“十二五”职业教育国家规划教材
经全国职业教育教材审定委员会审定

公差配合与机械测量

（第二版）

主　编　万春芬　雷黎明　邹　桦

新形态教材

资源样例

高等教育出版社

“十二五”职业教育国家规划教材
经全国职业教育教材审定委员会审定

公差配合与机械测量

GONGCHA PEIHE YU JIXIE CELIANG

（第二版）

主　编　万春芬　雷黎明　邹　桦
副主编　吴致君　龚五堂　李有新

高等教育出版社·北京

内容提要

本书是在经全国职业教育教材审定委员会审定的“十二五”职业教育国家规划教材的基础上，根据教育部最新发布的《高等职业学校专业教学标准》中对本课程的要求，并参照最新颁发的相关国家标准和职业技能等级考核标准修订而成的。

本书采用任务驱动的编写模式，主要内容包括互换性、机械测量基础知识、尺寸公差、几何公差、表面粗糙度、典型零件的检测和尺寸链。

本书修订将传统单一纸质教材升级为新形态一体化教材，配套了丰富的助学助教多媒体资源，助力提高教学质量和教学效率。

本书适合作为高等职业院校装备制造大类专业的专业基础课程教材，也可作为从事机械设计与制造的专业工程技术人员的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

公差配合与机械测量/万春芬，雷黎明，邹桦主编
.—2 版.—北京：高等教育出版社，2019.11
ISBN 978-7-04-052904-3

Ⅰ.①公… Ⅱ.①万… ②雷… ③邹… Ⅲ.①公差-配合-高等职业教育-教材 ②机械元件-技术测量-高等职业教育-教材 Ⅳ.①TG801

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2019)第 235604 号

策划编辑 谢永铭 责任编辑 张尕琳 班天允 封面设计 张文豪 责任印制 高忠富

出版发行	高等教育出版社	网　　址	http://www.hep.edu.cn
社　　址	北京市西城区德外大街 4 号		http://www.hep.com.cn
邮政编码	100120		http://www.hep.com.cn/shanghai
印　　刷		网上订购	http://www.hepmall.com.cn
开　　本	787 mm×1092 mm　1/16		http://www.hepmall.com
印　　张	14.75		http://www.hepmall.cn
字　　数	325 千字	版　　次	2013 年 3 月第 1 版
			2019 年 11 月第 2 版
购书热线	010-58581118	印　　次	2019 年 11 月第 1 次印刷
咨询电话	400-810-0598	定　　价	34.00 元

本书如有缺页、倒页、脱页等质量问题，请到所购图书销售部门联系调换
版权所有　侵权必究
物 料 号　52904-00

网络增值服务使用说明

一、注册/登录

访问 http://abook.hep.com.cn，点击“注册”，在注册页面输入用户名、密码及常用的邮箱进行注册。已注册的用户直接输入用户名和密码登录即可进入“我的课程”页面。

二、课程绑定

点击“我的课程”页面右上方“绑定课程”，正确输入教材封底防伪标签上的 20 位密码，点击“确定”完成课程绑定。

三、访问课程

在“正在学习”列表中选择已绑定的课程，点击“进入课程”即可浏览或下载与本书配套的课程资源。刚绑定的课程请在“申请学习”列表中选择相应课程点击“进入课程”。

如有账号问题，请发邮件至：abook@hep.com.cn。

数字课程

Abook

本书二维码资源列表

页　码	类　型	说　　明	页　码	类　型	说　　明
2	微视频	互换性	100	微课	倾斜度公差
5	微课	加工误差	104	微课	位置度公差
8	微课	优先数系	104	微课	同轴度公差
12	微课	测量与检验	104	微课	对称度公差
12	微课	测量器具的分类	106	动画	圆跳动公差
13	微课	测量器具的基本技术指标	106	动画	全跳动公差
14	微课	测量方法	107	微视频	平行度误差的检测
15	微课	测量误差	108	微视频	垂直度误差的检测
20	微课	测量器具选用原则	108	微视频	同轴度误差的检测
23	微视频	量块	109	微视频	跳动误差的检测
28	微视频	光滑极限量规	126	微课	表面粗糙度概念
37	微视频	孔和轴的定义	129	微课	表面粗糙度评定参数
38	微课	有关尺寸的术语及定义	133	微课	表面粗糙度标注方法
39	微课	尺寸合格条件	137	微课	表面粗糙度的选用
40	微课	偏差与公差的术语及定义	140	微课	表面粗糙度检测方法
41	微课	配合	145	微课	普通螺纹几何参数
45	微课	标准公差	149	微课	作用中径
47	微课	基本偏差系列	149	微课	普通螺纹合格条件
49	微课	公差带代号、配合代号及其标注	150	微课	普通螺纹的公差等级
55	微课	基准制	150	微课	普通螺纹的公差带代号
57	微课	一般公差尺寸	155	微课	普通螺纹的标注
59	微课	基准制的选用	156	微视频	螺纹千分尺检测中径
60	微课	公差等级的选用	157	微视频	三针法测量螺纹中径
68	微课	用内径百分表检测孔径	186	微视频	齿距误差测量
71	微视频	用万能测长仪检测轴径	189	微视频	齿轮径向跳动误差检测
92	动画	线轮廓度公差与面轮廓度公差	189	微视频	齿轮的齿厚偏差测量
93	微视频	直线度误差的检测	196	微视频	公法线长度测量
93	微视频	平面度误差的检测	212	微课	尺寸链的概念
94	微视频	圆度误差的检测	212	微课	尺寸链分类
94	微视频	圆柱度误差的检测	214	微课	尺寸链的建立
100	微课	平行度公差	215	微课	尺寸链计算
100	微课	垂直度公差			

出版说明

2012年12月，教育部职业教育与成人教育司启动了“十二五”职业教育国家规划教材的选题立项工作。作为全国最大的职业教育教材出版基地，高等教育出版社认真贯彻执行《教育部关于“十二五”职业教育教材建设的若干意见》（教职成〔2012〕9号）文件精神，按照“统筹规划、优化结构、锤炼精品、鼓励创新”的原则，整合全国的优质出版资源，积极参与了该项工作。目前，已获立项的教材相继完成了编写工作，经教育部组织专家审定并公示后，陆续出版。

高等教育出版社国家规划教材的作者中有参与制定高等职业教育新专业教学标准的专家，有高等职业教育国家专业教学资源库建设项目的主持人，有学科领域的领军人物，有企业的技术人员，他们是保证教材编写质量的基础。

高等教育出版社国家规划教材主要突出以下五个特点：

1. 执行新标准

以《高等职业学校专业教学标准（试行）》为依据，服务经济社会发展和人的全面发展。教材内容与职业标准对接，突出就业能力培养。

2. 构建新体系

教材整体规划、统筹安排，注重系统培养，兼顾多样成才，突出学教融合。遵循技术技能人才培养规律，构建服务于中职高职衔接、职业教育与普通教育相互沟通的现代职业教育教材体系。

3. 找准新起点

教材编写遵循易用、易学、易教的原则，强调以学生为中心，符合职业教育的培养目标与学生认知规律。

4. 推进新模式

在高等职业教育工学结合、知行合一的人才培养模式下，改革教材编写体例，创新内容呈现形式，推进“任务驱动”“项目化”“工作过程导向”“理实一体化”“做中学、做中教”等教学模式的实施。

5. 配套新资源

秉承高等教育出版社打造数字化教学资源的传统与优势，教材内容与高等职业教育国家专业教学资源库紧密结合，同时配套建设课程教学资源，为教学提供全面支持和增值服务。

为了更好地为教学服务，高等教育出版社将以国家规划教材为基础，组织教师培训和教学研讨活动，通过与教师互动以及滚动建设立体化教学资源，把教材建设提高到一个新的水平。

高等教育出版社

HEP

前　言

本书是在经全国职业教育教材审定委员会审定的“十二五”职业教育国家规划教材的基础上，根据教育部最新发布的《高等职业学校专业教学标准》中对本课程的要求，并参照最新颁发的相关国家标准和职业技能等级考核标准修订而成的。

本书修订将传统单一纸质教材升级为新形态一体化教材，配套了丰富的助学助教多媒体资源，助力提高教学质量和教学效率。

本次修订的主要工作有：

1. 调整内容

本书在第一版的基础之上，根据高等职业院校教学需求，调整了部分项目和任务，使之更贴合当前教学实际情况。

2. 完善更新

本次修订更新了部分国家标准，并对全书的名词术语、插图作了检查和修正，力求准确、清晰。

3. 增补习题

增补了大量的习题，并丰富了习题的题型。使学生在有限的时间内，完成更多的练习，获得更多的信息量，更好地掌握本课程的重难点。

4. 丰富资源

在本次修订中，重点建设一批数字化教学资源，包括动画、微课、演示操作视频等。部分资源以二维码的形式在书中的知识点旁呈现，方便学生利用移动设备随扫随学，拓展学习时空。

5. 双色印刷

采用双色印刷后，不仅使本书更加美观，而且可以使学生更好地掌握书中知识点。

本书由万春芬、雷黎明、邹桦担任主编，吴致君、龚五堂、李有新担任副主编。其中，模块一、模块二、模块三由湖北工程职业学院万春芬、青海高等职业技术学院李有新修订；模块四、模块五由湖北工程职业学院邹桦修订；模块六、模块七由荆州职业技术学院雷黎明、龚五堂修订。数字化教学资源建设团队由湖北工程职业学院万春芬、邹桦、吴致君、杨贵新、周明召、於雷，荆州职业技术学院雷黎明、龚五堂、王文军、王欣等组成。此外，本次修订，参考了同行相关教材、动画等数字化资源，在此一并表示衷心感谢！

因编者水平有限，书中错漏在所难免，恳请读者批评指正，以便及时完善。

编　者

2019 年 9 月

HEP

Contents 目　录

模块一　互换性　/　1
任务 1　正确理解互换性　/　2
任务 2　掌握几何量精度设计基本内容、标准、优先数系　/　5
巩固训练　/　9
模块二　机械测量基础知识　/　11
任务 1　掌握机械测量基础知识　/　12
任务 2　正确选择测量器具　/　19
巩固训练　/　34
模块三　尺寸公差　/　36
任务 1　正确理解公差配合的基本术语及定义　/　37
任务 2　牢固掌握标准公差、基本偏差系列、公差带代号与配合代号　/　45
任务 3　掌握公差配合的选用　/　59
任务 4　熟练掌握尺寸的检测　/　68
巩固训练　/　74
模块四　几何公差　/　77
任务 1　掌握几何公差的正确标注　/　78
任务 2　掌握形状公差带及形状误差的评定　/　87
任务 3　掌握方向、位置、跳动公差带及它们误差的评定　/　95
任务 4　正确掌握几何公差的选用　/　109
巩固训练　/　121
模块五　表面粗糙度　/　125
任务 1　掌握表面粗糙度的正确标注　/　126

任务 2　掌握表面粗糙度的选用与检测　/　136
巩固训练　/　141
模块六　典型零件的检测　/　144
任务 1　普通螺纹连接的公差配合与检测　/　145
任务 2　键与花键、圆锥、滚动轴承的互换性与检测　/　161
任务 3　渐开线圆柱齿轮的精度与检测　/　184
任务 4　机床精度检测技术简介　/　205
巩固训练　/　208
模块七　尺寸链　/　211
任务 1　熟练掌握尺寸链的建立　/　212
任务 2　尺寸链的计算——正计算、反计算、中间计算　/　215
巩固训练　/　222
参考文献　/　224

Module 1 模 块 一　互　换　性

教学课件
互换性

装备制造大类专业的学生对减速器并不陌生。“机械制图”课程中零部件测绘的对象大多是减速器，后续课程“机械设计基础”的课程设计大多也是要求学生设计减速器。

减速器是一种传动装置，它主要由箱体、齿轮、轴、轴承、螺栓等组成，如图 1-1 所示。通过拆装减速器，认识到同一规格中的螺栓与螺母任意装配到减速器上即可起到连接、紧固等作用，同时认识到减速器的运行性能除与各个组成零件的加工质量有关外，还与零部件的装配精度有关，这就涉及互换性的有关知识。

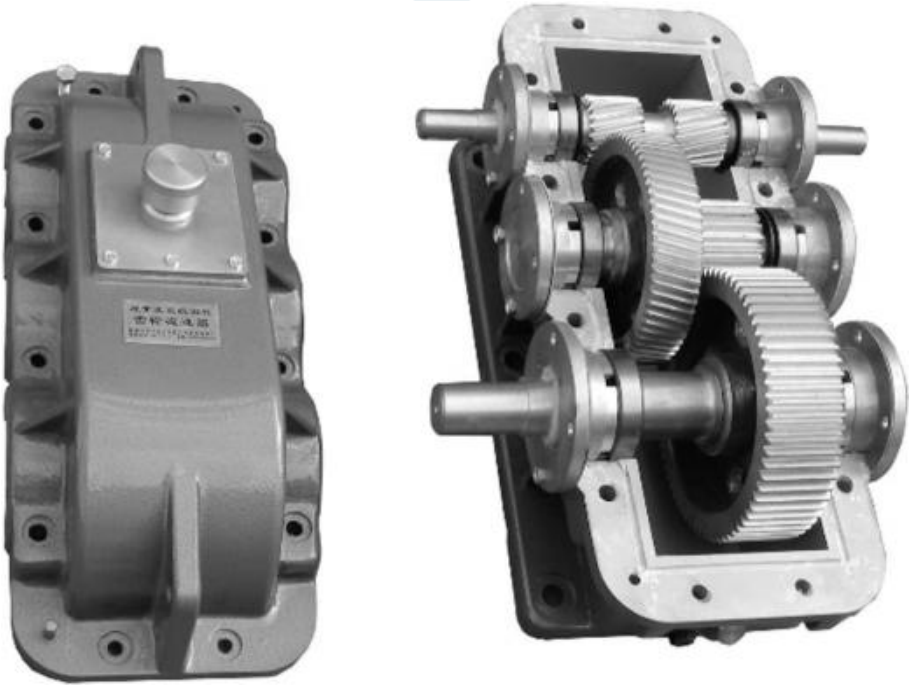


图 1-1　二级圆柱齿轮减速器结构

任务 1　正确理解互换性

理论知识要点

1.1　互换性的概念

广义而言，互换性是指事物之间可以相互替换而功能相同的性能。

狭义而言，互换性是指在装配时，同一规格的零部件能够彼此相互替换而功能相同的性能。如装配或修配减速器时，按相同规格装上一个螺栓或螺母就能满足机器性能要求，则此螺栓或螺母就具有互换性（见图 1-2）。

图 1-2　具有互换性的螺栓、螺母

互换性通常包括：几何参数互换性（如尺寸、形状、位置等），机械性能互换性（如强度、硬度等），以及理化性能互换性（如化学成分、导电性等）。本课程仅讨论几何参数互换性。

几何参数（也称几何量）主要指：尺寸（包括长度、直径、角度等）、几何误差（包括形状误差、位置误差）、表面粗糙度（主要指 Ra、Rz）、典型表面（如螺纹、齿轮、键、圆锥等）公差。

1.2　互换性的分类

1.2.1　按互换的程度分类

互换性按其互换的程度可分为完全互换和不完全互换。

（1）完全互换（也称绝对互换）

若一批零部件在装配前不做任何选择，装配时不需要调整和修配，装配后能满足使用要求，则这些零部件属于完全互换，或称这些零部件具有完全互换性。如减速器中同一规格的螺栓、螺母、滚动轴承等均应具有完全互换性。

微视频

互换性

（2）不完全互换（也称有限互换、部分互换）

若一批零部件在装配前允许有附加的选择，装配时允许有附加的调整和修配，装配后能满足使用要求，则这些零部件属于不完全互换，或称这些零部件具有不完全互换性。

可实现不完全互换的方法有：分组互换法、修配法、调整法和其他方法。当机器的装配精

度要求较高时，若采用完全互换，则要求零件的公差很小，加工困难，加工成本很高，甚至无法加工，为了克服这些缺点，可采用各种不同形式的不完全互换方法进行装配。

① 分组互换法。其主要优点是：既可保证装配精度和使用要求，又能减少加工难度，降低成本。具体做法是：将零件的加工公差适当放大，使之便于加工；加工完毕后，对零件逐个测量并分组，大孔对大轴、小孔对小轴分别进行装配，满足装配精度。此时，组内零件可以互换，但组与组之间的零件无法互换。如发动机气缸与活塞的装配可采用分组互换法。

② 修配法。具体做法是：装配时对某一特定的零件按所需要的尺寸进行修配，以满足装配要求和使用要求。如普通车床的尾座顶尖与主轴顶尖等高（即其连线应与机床导轨平行），装配时可修磨尾架部件中垫板的厚度，以满足等高要求。

③ 调整法。具体做法是：待零部件加工完以后，装配时，用调整的方法，改变某零件在机器中的尺寸和位置，以满足其功能要求。如机床导轨中的镶条，装配时可沿导轨移动方向调整其位置，以满足间隙要求。

1.2.2　按互换的部位分类

对标准部件，互换性可分为内互换和外互换。构成标准部件的零件之间的互换称为内互换，标准部件和其他部件之间的互换称为外互换。如滚动轴承的外圈内滚道、内圈外滚道与滚动体之间的互换即为内互换，滚动轴承外圈外径与机壳孔的互换为外互换，如图 1-3 所示。

图 1-3　滚动轴承零件之间内互换

1.3　互换性的应用范围

一般大量生产和成批生产（如汽车、拖拉机厂的生产）大都采用完全互换法生产。装配精度要求很高的场合（如轴承工业）常采用分组装配，即分组互换法生产；而小批和单件生产，如矿山、冶金等行业，则常采用修配互换法或调整互换法生产，它们均属于不完全互换法生产。

1.4　互换性的作用

互换性已成为现代化机械制造业中一个普遍遵守的原则。机械零件具有互换性，才有可能将数以万计的零部件进行高效率的、分散的、专业化的生产，然后集中起来进行装配，以获得最佳的经济效益和社会效益。因此，零部件的互换性的作用主要表现在以下几个方面：

1）设计方面：因零部件具有互换性，可最大限度地采用标准件、通用件，故可大大地简化计算和绘图等工作，使设计周期变短，凸显 CAD 辅助设计的优势，有利于新产品的研发。

2）制造方面：因零部件具有互换性，可广泛采用高效专用设备，组织专业化生产，提高产量和质量，降低生产成本。

3）使用和维修方面：因零部件具有互换性，可及时更换已失效的零部件，减少维修时间和费用，提高设备利用率。

能力训练指导

能力训练 1：互换性程度越高越好。这句话对吗？

分析指导：此说法不妥。互换性按其互换的程度可分为完全互换和不完全互换。当机器的装配精度要求较高时，若采用完全互换，则要求零件的公差很小，加工困难，加工成本很高，甚至无法加工，这时可采用不完全互换的方法进行装配。如一批单缸内燃机，要求其工作性能相差不大，装配时就要求活塞与气缸的装配间隙也相差不大，为此，对活塞、气缸采取大对大、小对小进行分组装配，才能满足生产要求（见图 1-4）。所以，不是互换性程度越高越好，而是适合就好。

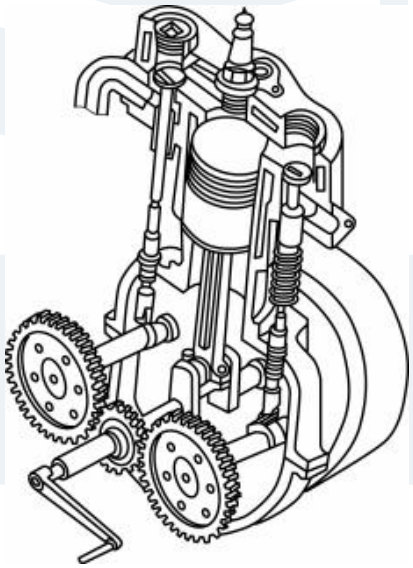


图 1-4　单缸内燃机

能力训练 2：具有互换性的零件是否一定是合格品？

分析指导：具有互换性的零件一定是合格品。产品合格至少从三个方面来考查：尺寸、形状和位置、表面粗糙度。只有掌握尺寸、形状和位置、表面粗糙度等方面的公差要求及其误差的检测方法，才能真正读懂机械图样的技术要求，加工出合格产品。

能力训练 3：减速器拆装训练有哪些注意事项。

分析指导：①安全提示；②准备好拆装工具；③拆卸时注意先后顺序，必要时作出标记；④交叉装配，体验零件互换性；⑤装配完毕后，清理现场。

能力训练任务

能力训练任务：拆装减速器（拆装时，学生操作，教师指导）

训练思考：

1）减速器是一台机器还是一种传动装置？为什么？

2）简述互换性分类及其应用场合。

3）减速器中的键、滚动轴承、普通螺纹等的公差配合代号，国家标准对其是否有特殊规定？

4）徒手画出减速器箱盖、底座或轴系部件示意图，如图 1-5 所示。

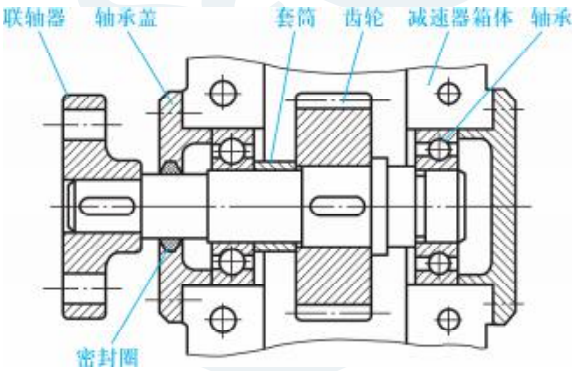


图 1-5　轴系部件组装图

任务 2　掌握几何量精度设计基本内容、标准、优先数系

理论知识要点

2.1　几何量精度设计

2.1.1　零件的加工误差、加工精度和公差

任何机械制造系统都存在制造误差。加工误差是指加工后的零件几何参数（也称几何量）的实际值与其设计理想值的偏离程度。加工误差主要包含尺寸误差、几何误差和表面微观形状误差等。加工误差的产生原因是在零件加工过程中机床、夹具、刀具及工件构成的工艺系统因受力、受热变形和摩擦振动、磨损和安装、调整等因素而产生的。

微课

加工误差

加工精度是指加工后的零件几何参数的实际值与设计理想值相符合的程度。加工误差越小，加工精度越高；反之，加工误差越大，加工精度越低。

公差是指允许零件几何参数的最大变动量（范围）。它包括尺寸公差、几何公差和表面粗糙度等。公差主要是针对加工难度、经济性而提出的，因为要保证零件具有互换性，在满足使用性能的前提下，只要使同一规格零件的几何参数在一定范围内变动即可，没有必要也不可能使同一规格零件的几何参数完全一致。对于同一零件，规定的公差值越大，零件越容易加工，生产成本越低；反之，加工越困难，生产成本越高。

公差是用来控制误差的。零件加工后的误差若在公差范围内，则为合格件；否则，为不合格件。所以，公差也是零件允许的最大误差。

2.1.2　几何量精度设计内容

机械产品的常规设计除进行总体方案设计、运动和动力设计、结构设计、强度和刚度设计外，还必须进行几何量精度设计。几何量精度设计是否正确、合理，对机械产品的使用性能和制造成本起决定性作用。

几何量精度设计就是确定零、部件几何要素的允许误差，即公差，其内容一般包括尺寸精度、形状和位置精度、表面粗糙度三个方面。

几何量精度设计的任务是：①在机械产品的总装配图和部件装配图上，确定、标注其各零件配合部位的配合代号和其他技术要求；②对组成机械产品的各零件，在零件图上确定、标注各处的尺寸公差、形状和位置公差、表面粗糙度要求以及典型表面（如螺纹、齿轮、键、圆锥等）公差要求。

几何量精度设计要解决以下三大矛盾：①零件精度与制造之间的矛盾（设计要求、制造成本）；②零件（部件）之间的矛盾（装配、配合）；③检测精度与检测方法之间的矛盾。

几何量精度设计有类比法、试验法、计算分析法三种方法。

几何量精度设计原则有以下几项。

1）互换性原则：是针对重复生产的零部件的，被广泛地采用，不仅能有效保证产品质量，而且能提高劳动生产率，降低制造成本。

2）标准化原则：大量采用标准化、通用化的零部件、元器件和构件，可提高产品互换性程度。

3）精度匹配原则：指相互配合的孔与轴精度方面的协调性和适应性。

4）优化原则：包括公差优化、优先选用、数值优化。

5）经济性原则：在满足功能要求的前提下，选用尽可能低的精度（较大的公差），从而提高产品的性能价格比。

综上所述，互换性原则体现几何量精度设计的目的，标准化原则是几何量精度设计的基础，精度匹配原则和优化原则是几何量精度设计的手段，经济性原则是几何量精度设计的目标。

2.2　标准与优先数系

2.2.1　标准

(1) 标准与标准化的含义

广义而言，标准是指对重复性事物和概念所作的统一规定。

狭义而言，在机械制造业中，标准是指公众使用的技术规范或技术文件。

标准化是指在经济、技术、科学及管理等社会实践中，对重复性事物和概念通过制定、发布和实施标准，达到统一，以获得最佳秩序和社会效益。换言之，标准化是指制定标准、贯彻标准和修改标准的全过程，是一个系统工程。在机械制造业中，要使任何零部件都具有互换性，就必须实现标准化，没有标准化就没有互换性。

(2) 标准的分类与级别

1) 在我国，标准按标准化对象可分为技术标准、管理标准和工作标准。技术标准是对标准化领域中需要协调统一的技术事项所制定的标准。它包括基础技术标准、产品标准、工艺标准、检测试验方式标准及安全、卫生、环保标准等，其中基础技术标准是指在一定范围内作为其他技术标准的基础并普遍使用、具有广泛指导意义的标准，如《极限与配合》、《形状与位置公差》等标准属于基础技术标准。

2) 在我国，标准分为 4 个级别：国家标准、行业标准(也称专业标准)、地方标准和企业标准。低一级标准不得与高一级标准相抵触。国家标准分为强制性国家标准(代号 GB)和推荐性国家标准(代号 GB/T)；专业标准也分为强制性专业标准(代号 ZB)和推荐性专业标准(ZB/T)；地方标准(代号 DB)；企业标准(代号 QB)。强制性标准必须执行，国家鼓励采用推荐性标准。

(3) 国际标准

国际标准是指由国际标准化机构通过的标准。三大权威的国际标准化机构为国际标准化组织 ISO(International Standardization Organization)、国际电工技术委员会 IEC(International Electro-technical Commission)、国际电信联盟 ITU(International Telecommunication Union)。采用国际标准制定本国标准一般有以下三种方式：

1) 等同采用。国家标准在采用国际标准时，在技术内容和编写方法上和国际标准完全相同，用 idt(identical)表示。

2) 等效采用。国家标准在采用国际标准时，在技术内容上完全相同，但在编写方法上和国际标准不完全相同，用 eqv(equivalent)表示。

3) 不等效采用。在技术内容上和国际标准不相同，用 neq(non-equivalent)表示。

ISO9000 及 ISO14000 是当前应用最广泛的国标标准。ISO9000 质量管理体系标准是 1987 年发布的，ISO14000 环境管理体系标准是 1996 年发布的。

(4) 产品几何技术规范

产品几何技术规范 GPS(Geometrical Product Specification)的作用对象是一切几何产品(即有尺寸大小和形状的所有产品)。它是一套关于产品几何参数的完整技术标准体系，包括

工件尺寸和几何公差、表面特征及其相关的检测原则、测量器具和校准要求，还包括尺寸和几何测量不确定度及其基本表达方法和图样标注（符号）的解释。

微课

优先数系

2.2.2　优先数系

（1）优先数系与优先数

优先数系是对各种技术参数进行协调、简化和统一的一种科学的数值取值制度。换言之，优先数系是一种十进制的公比特殊的（公比为$\sqrt[5]{10}$、$\sqrt[10]{10}$等）等比数列。优先数系中的每一个数称为优先数。如：表面粗糙度 Ra 的数值…、0.20、0.40、0.80、1.60、3.2、6.3、12.5、25、…为一个优先数系，其中的 0.20、0.40、0.80、1.60、3.2、6.3、12.5、25 均为优先数。

（2）优先数系的系列

国家标准 GB/T 321《优先数和优先数系》规定了五个系列：R5 系列、R10 系列、R20 系列、R40 系列、R80 系列，其中前四个为基本系列（见表 1-1），最后一个为补充系列，代号均可记为 Rr。在实际应用中，当这五个系列不能满足要求时，还可采用派生系列。派生系列是指从基本系列或补充系列中隔 p 项取值导出的系列，代号可记为 Rr/p。

表 1-1　优先数系的基本系列（摘自 GB/T 321）

R5	R10	R20	R40	R5	R10	R20	R40	R5	R10	R20	R40
1.00	1.00	1.00	1.00			2.24	2.24		5.00	5.00	5.00
			1.06				2.36				5.30
		1.12	1.12	2.50	2.50	2.50	2.50			5.60	5.60
			1.18				2.65				6.00
	1.25	1.25	1.25			2.80	2.80	6.30	6.30	6.30	6.30
			1.32				3.00				6.70
		1.40	1.40		3.15	3.15	3.15			7.10	7.10
			1.50				3.35				7.50
1.60	1.60	1.60	1.60			3.55	3.55		8.00	8.00	8.00
			1.70				3.75				8.50
		1.80	1.80	4.00	4.00	4.00	4.00			9.00	9.00
			1.90				4.25		10.00	10.00	10.00
	2.00	2.00	2.00			4.50	4.50				
			2.12				4.75				

1）基本系列　R5 系列：公比为 $\sqrt[5]{10}\approx1.6$；　R10 系列：公比为 $\sqrt[10]{10}\approx1.25$；

R20 系列：公比为 $\sqrt[20]{10}\approx1.12$；　R40 系列：公比为 $\sqrt[40]{10}\approx1.06$。

2）补充系列　R80 系列：公比为 $\sqrt[80]{10}\approx1.03$。

R80 系列分级很细，仅在基本系列不能满足实际需要时，才考虑使用。

3）派生系列　Rr/p 系列：公比为 $(\sqrt[r]{10})^p=10^{p/r}$。

在实际工作中，当基本系列不能满足分级要求时，可采用派生系列。派生系列是指从基本

系列或补充系列中每隔几项选出一个优先数，组成的新系列。

例如，在 R10 系列中，自 1 以后，每隔 3 项取一值得到一个派生系列，记为 R10/3 系列，即 1.00，2.00，4.00，8.00，…，此数列公比为 2，也可称为倍数系列。

(3) 优先数系的选用

产品(或零件)的主要参数(或主要尺寸)按优先数形成系列，可使产品(或零件)走上系列化，便于分析参数间的关系，可减轻设计计算的工作量。

优先数系是一项重要的基础标准，我国现行的优先数系与国际标准相同。本课程中涉及的尺寸分段、公差分级和表面粗糙度参数系列是按优先数系制定的。

选用基本系列时，应遵循先疏后密的原则，即按照 R5 系列、R10 系列、R20 系列和 R40 系列的顺序。目的是避免规格过多。

一般机械产品的主要参数通常遵循 R5 系列和 R10 系列；专用工具的主要尺寸遵循 R10 系列；通用型材、通用零件及工具的尺寸，铸件的壁厚等遵循 R20 系列。

能力训练指导

能力训练 1：试分析判断下列一组数据属于哪种系列。某电动机转速为 375，750，1 500，3 000，…，单位为 r/min。

分析指导：因为 750÷375＝2，1 500÷750＝2，…，此电动机转速公比为 2，它不符合优先数系基本系列、补充系列的公比，故此电动机转速属于派生系列，也可称为倍数系列。

能力训练 2：第一项为 10，按 R10 系列确定后五项优先数。

分析指导：因为 R10 系列的公比约为 1.25，且第一项为 10，所以此后五项优先数为 10×1.25、10×1.25^2、10×1.25^3、10×1.25^4、10×1.25^5。

能力训练任务

能力训练任务 1：某摇臂钻床的钻头的直径为 25，40，63，80，100，125，…，单位为 mm。试分析判断这数据属于哪几种系列。

能力训练任务 2：第一项为 10，按 R5 系列确定后五项优先数。

巩 固 训 练

1. 填空题

1) 按互换的程度，互换性可分为_____和_____；按互换的部位，互换性可分为_____和_____。

2) 不完全互换在生产实际中常采用的方法有_____、_____、_____和_____。

3）一般来说，在大批大量生产中，常采用_____；但在装配精度要求较高时，应采用_____。

4）公差是针对_____、_____而提出的。公差是用来限制_____的。零件加工后的误差若在公差范围内，则为_____件。

5）优先数系中，基本系列包括_____、_____、_____和_____。基本系列的选用，应遵循_____的原则。

2. 判断题

1）完全互换性适用于装配精度要求较低的场合，而不完全互换性适用于装配精度要求较高的场合。（　　）

2）具有互换性的零件，其几何参数必须制成绝对精确。（　　）

3）完全互换性用于厂际协作或配件的生产，不完全互换性仅限于部件或机构的制造厂内部的装配。（　　）

4）凡是具有互换性的零件必为合格品。（　　）

5）零件加工后的误差若在公差范围内则为合格件。（　　）

6）国家标准中，强制性标准是一定要执行的，而推荐性标准执行与否无所谓。（　　）

7）优先数系 R20 系列中的优先数，自 1 以后，每依次取得 20 个优先数，数值增至 10 倍。（　　）

8）R20/3 系列是从 R20 中，自 1 以后，每逢 3 项取 1 个优先数组成的派生系列。（　　）

9）优先数系包含基本系列和补充系列，而派生系列一定是倍数系列。（　　）

3. 选择题

1）影响零件互换性的几何参数有（　　）。（多选）

A. 表面粗糙度　　B. 形状　　C. 位置　　D. 尺寸

2）高精度滚动轴承内、外圈与滚体之间的装配常采用（　　）。

A. 修配互换法　　B. 完全互换法　　C. 分组互换法　　D. 调整互换法

3）代号为 ZB/T 的标准为（　　）。

A. 企业标准　　B. 地方标准　　C. 行业标准　　D. 国家标准

4）下列属于优先数系派生系列的是（　　）。

A. R10　　B. R20　　C. R20/3　　D. R80

4. 思考题

1）互换性在机械制造业中有什么作用？

2）第一项为 10，按 R20 系列确定后五项优先数。

3）某机床主轴转速为 50，63，80，100，125，…，单位为 r/min。试判断该数据属于哪种系列。

4）加工误差、公差、互换性三者的关系是什么？

Module 2 模 块 二　机械测量基础知识

教学课件

机械测量基础知识

机械零件的技术要求很多，包括尺寸公差、几何公差、表面粗糙度、材质的化学成分及力学性能要求等。测量是进行质量管理的手段，是贯彻质量标准的技术保证。零件几何量合格与否，需要通过测量或检验方能确定。图 2-1 所示的减速器输出轴，从毛坯到零件整个制造过程中，都需要用相关的量具进行质量检验和监控。

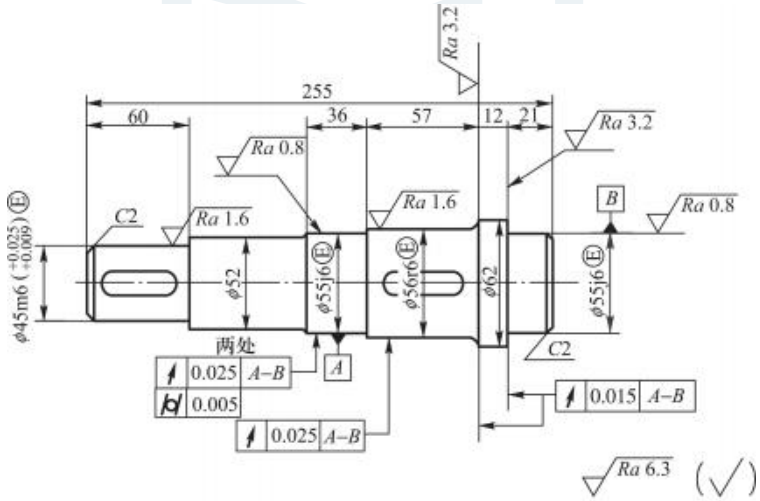


图 2-1　减速器输出轴

任务 1　掌握机械测量基础知识

理论知识要点

1.1　测量与检验

微课

测量与检验

测量是将被测的量与作为单位或标准的量，在量值上进行比较，从而确定二者比值的实验过程。几何量的测量是指测量结果为被测量的具体数值，如用千分尺测量轴的直径。

一个完整的测量过程应包含：

1）测量对象　本课程涉及的测量对象是几何量，包括长度、角度、表面粗糙度、形状和位置精度等。

2）计量单位　在机械制造中，常用的长度计量单位为 mm（毫米）和 μm（微米），角度计量单位为弧度和度、分、秒等。

3）测量方法　指测量时所采用的测量原理、计量器具以及测量条件的总和。

4）测量精确度　指测量结果与真值一致的程度。

几何量的检验是指确定零件的实际几何参数是否在规定的极限范围内，从而做出合格与否的判断。例如，用光滑极限量规检验零件。

测量必须获得一个数值，即测得值；检验不必获得被测对象的测得值，只给出其是否合格的判断即可。

1.2　测量器具的分类

微课

测量器具的分类

测量器具（也称计量器具）是指可单独或与其他装置一起，用来确定被测量的量值的器具。

（1）测量器具按结构特点分类

1）量具　是指以固定形式复现量值的测量器具，分为单值量具（如量块）和多值量具（如线纹尺）。其特点：一般没有放大装置。

2）量规　是指没有刻度的、专用于检验的测量器具，如光滑极限量规、螺纹量规等。

3）量仪　是指能将被测量转换成可直接观测的指示值或等效信息的测量器具。其特点：一般都有指示、放大系统。

4）测量装置　是指测量器具和辅助设备的总体。

（2）测量器具按用途分类

1）标准测量器具　是指测量时体现标准量的测量器具，如量块、多面棱体等。

2）通用测量器具　是指通用性大、可用来测量某一范围内各种尺寸（或其他几何量），并能获得具体读数值的测量器具，如千分尺、指示表、测长仪等。

3）专用测量器具　是指用于专门测量某种或某个特定几何量的测量器具，如量规、基节仪等。

1.3　测量器具的基本技术指标

微课

测量器具的基本技术指标

（1）标尺间距（也称刻度间距、分度间距）

标尺间距是指测量器具刻度标尺或度盘上两相邻刻线中心线间的距离，如图 2-2 所示。

（2）分度值（刻度值）

分度值是指测量器具刻度标尺或度盘上每刻线间距所代表的被测量的量值。一般长度测量器具的分度值有 0.1 mm、0.01 mm、0.001 mm、0.000 5 mm 等，如图 2-2 所示。

（3）测量范围

测量范围是指测量器具所能测量的最大值与最小值范围，如图 2-2 所示。

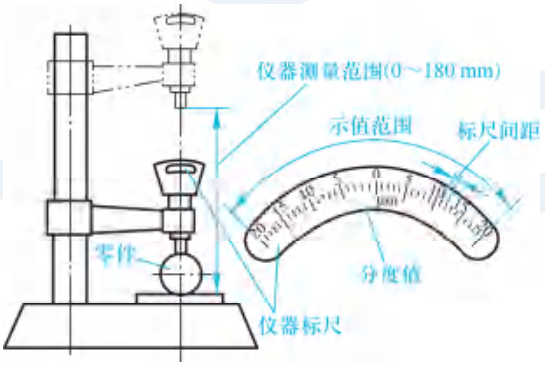


图 2-2　测量器具的基本参数示意图

（4）示值范围

示值范围是指测量器具标尺或度盘内全部刻度所代表的最大值与最小值范围，如图 2-2 所示。

有的测量器具，其测量范围与示值范围一致，例如游标卡尺。有的测量器具，其测量范围与示值范围不一致，例如钢直尺。

（5）灵敏度

灵敏度是指测量器具对被测量变化的反应能力。若被测量变化为 Δx，所引起的测量器

具的相应变化为 ΔL，则灵敏度 S 为：$S=\Delta L/\Delta x$。

（6）示值误差

示值误差是指测量器具示值减去被测量的真值所得的差值。

（7）示值变动性

示值变动性是指测量条件不变的情况下，对同一被测量进行多次测量，重复观察读数，其示值变化的最大差异。

（8）回程误差

回程误差是指在相同条件下，测量器具按正、反行程对同一被测量值进行测量时，测量器具示值之差的绝对值。

（9）修正值

修正值是指为消除系统误差，用代数法加到测量结果上的值，其大小与示值误差绝对值相等而符号相反。修正值一般通过检定来获得。

（10）不确定度

不确定度是指由于测量误差的存在而使被测几何量不能肯定的程度。

1.4　测量方法

测量方法是指测量时所采用的测量原理、测量器具和测量条件的总和。

微课

测量方法

（1）按实测量是否被测量分类

1）直接测量　是指被测量的量值或被测量相对于标准量的偏差值能从测量器具上直接获得的测量方法，如游标卡尺测量轴径、内径百分表测量孔径等。直接测量又可分为绝对测量和相对测量。

2）间接测量　是指先测量出与被测量有一定函数关系的量，然后通过函数关系计算出被测量的测量方法。简而言之：先测后算。

（2）按读数值（或示值）是否被测量的整个量值分类

1）绝对测量　是指被测量的整个量值从测量器具上能直接读出的测量方法，如游标卡尺、千分尺测量轴径等。绝对测量的特点有：可以直接读数，通用性好，一般使用通用测量器具。

2）相对测量（或称比较测量）是指读数值仅为被测量相对已知标准量的偏差值，被测量的整个量值为标准量与偏差值之和的测量方法。简而言之：量值＝标准量＋偏差值。相对测量的特点有：采用标准量具（如量块），一般来说，相对测量精度较绝对测量高。

（3）按测量器具测头是否与被测工件表面接触分类

1）接触测量　是指测量时测量器具的测头与工件被测表面直接接触，并存在一定机械作用的测量力的测量方法，如游标卡尺、千分尺测量工件。

2）非接触测量　是指测量时测量器具的测头不与被测工件表面接触的测量方法，如光切

显微镜测量表面粗糙度。

(4) 按同时测量被测量的多少分类

1) 单项测量　是指分别单独测量同一工件的单项参数的测量方法，如工具显微镜分别测量螺纹的螺距、牙侧角等。

2) 综合测量　是指同时测量工件上的几个相关参数，综合地判断工件是否合格的测量方法，如螺纹量规综合检验螺纹参数。

(5) 按技术测量是否在加工过程中操作分类

1) 在线测量(或称主动测量)　是指在加工过程中对工件进行测量并能及时防止废品产生的测量方法。

2) 离线测量(或称被动测量)　是指在加工完成后对工件进行测量并能发现、剔除废品的测量方法。

(6) 按技术测量所处的状态分类

1) 静态测量　是指测量时测量器具的测头与工件被测表面相对静止的测量方法，如千分尺测量轴径。

2) 动态测量　是指测量时测量器具的测头与工件被测表面处于相对运动状态的测量方法，如动态丝杠检查仪测量丝杠的参数、圆度仪测量圆度误差等。

(7) 按测量条件是否相同分类

1) 等精度测量　是指测量过程中决定测量结果的全部因素或条件不变的测量方法。

2) 不等精度测量　是指测量过程中测量结果的全部因素或条件可能完全改变或部分改变的测量方法。这种方法只用于重要的高精度测量。

1.5　测量误差

测量误差是指测得值与被测量的真值之间的差异。测量误差的大小反映了测量的精确程度。

微课

测量误差

在一定条件下，任何物理量的大小都是一个客观存在的、不以人的意志为转移的真实值，称为真值。被测量的真值只是一个理想概念，一般来说，其数值是不可知的，因而只能采取各种手段尽量使测量值接近真值。

1.5.1　测量误差表示法

1) 绝对误差 δ　绝对误差 δ 是指被测量的测得值(仪表的指示值) x 与其真值 x_0 之差，即

$$\delta = x - x_0 \tag{2-1}$$

绝对误差 δ 的绝对值越小，说明测得值越接近真值，因此测量精度就高。绝对误差 δ 只适用于同一被测量的多次测量，求哪次测量精度高的情况。绝对误差 δ 有单位，它的单位与被测量的单位相同。

2）相对误差 ε　相对误差 ε 是指绝对误差 δ 的绝对值 $|\delta|$ 与被测量真值 x_0 之比，即

$$\varepsilon=\frac{|x-x_0|}{x_0}\times 100\%=\frac{|\delta|}{x_0}\times 100\% \tag{2-2}$$

相对误差 ε 适用于不同被测量，求哪次测量精度高的情况。相对误差 ε 不带单位。相对误差 ε 比绝对误差 δ 能更好地说明测量的精确程度。

1.5.2　测量误差的产生原因

1）测量器具误差　是指测量器具内在因素（设计原理、制造、装配调整等因素）所引起的误差。

2）标准件误差　是指标准件本身的制造误差和检定误差。

3）测量方法误差　是指由于采用不完善的测量方法而引起的误差。

4）测量环境误差　是指测量时的环境条件（温度、湿度、气压、振动、灰尘等）不符合条件所引起的误差。

5）人员误差　是指由于人为的原因（测量技术训练程度、估读判断能力、分辨力、测量习惯等）所引起的测量误差。

1.5.3　测量误差的分类

根据测量误差的性质和特点，可分为：

1）系统误差　是指在同一条件下对同一被测量进行多次测量时，误差的大小和符号不变或按一定规律变化的误差。误差的大小和符号不变的称为定值系统误差（或称已定系统误差）；误差的大小和符号按一定规律变化的称为变值系统误差（或称未定系统误差）。

2）随机误差　是指在同一条件下对同一被测量进行多次测量时，误差的大小和符号以不可预定的方式变化着的误差。

3）粗大误差　是指由于测量不正确等原因引起的、明显超出规定条件预计差限的那种误差。

1.5.4　测量的数据处理

（1）测量数据处理原则

实际测量中，常针对各类测量误差对测量列中的数据进行处理：

1）系统误差　它对测量结果会产生较大的影响，因而要及时发现，并消除或减小它。定值系统误差因规律已知，采用修正值法在测量结果中设法消除。变值系统误差因规律未知，无法消除，常按随机误差处理。

2）随机误差　它的出现是不可避免和无法消除的，因而只能减小其对测量结果的影响。常用概率论和统计原理对它进行处理。

3）粗大误差　它使测量结果严重失真，因而必须将粗大误差对应的测量数据从测量列中剔除。

(2) 测量数据处理步骤(假定测量时数据中无系统误差)

1) 计算测量列的算术平均值 $\bar{x}$

$$\bar{x}=\frac{\sum_{i=1}^{n}x_i}{n} \tag{2-3}$$

2) 计算残差 ν_i

在实际应用中,通常以算术平均值 $\bar{x}$ 代替真值 x_0,以残差 ν_i 代替 δ_i。

残差 ν_i 是指各个测得值 x_i 与算术平均值 $\bar{x}$ 之差,即

$$\nu_i=x_i-\bar{x} \tag{2-4}$$

3) 计算测量列中单次测得值的标准偏差 σ

$$\sigma=\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}\nu_i^2}{n-1}} \tag{2-5}$$

4) 判断粗大误差

根据拉依达准则(3σ 准则)判断。方法是:测量列(n 个测得值)中若有一个测得值的残差的绝对值$|\nu_i|$大于 3σ,则该测得值含有粗大误差,应将其剔除。后对新的测量列($n-1$ 个测得值)重复上述四步骤计算,直至测量列中不再含有粗大误差为止。设最终测量列有 n'个测得值,其算术平均值为 $\bar{x}'$、标准偏差为 σ'。

5) 计算测量列算术平均值的标准偏差 $\sigma_{\bar{x}}$

$$\sigma_{\bar{x}}=\frac{\sigma'}{\sqrt{n'}} \tag{2-6}$$

6) 计算测量列单次测量的极限误差 $\delta_{\lim}$

$$\delta_{\lim}=\pm 3\sigma' \tag{2-7}$$

7) 计算测量列算术平均值的极限误差 $\delta_{\lim(\bar{x})}$

$$\delta_{\lim(\bar{x})}=\pm 3\sigma_{\bar{x}} \tag{2-8}$$

8) 测量结果为

$$x=\bar{x}'\pm\delta_{\lim(\bar{x})}=\bar{x}'\pm 3\sigma_{\bar{x}} \tag{2-9}$$

能力训练指导

能力训练 1:用常用测量器具进行间接测量。

分析指导:如图 2-3 所示,采用间接测量法测量两圆柱中心距 L。

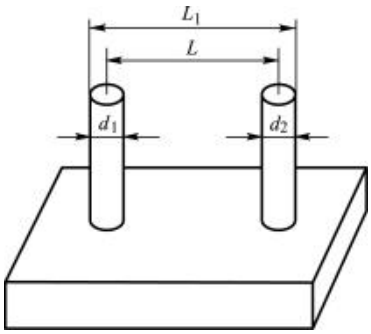


图 2-3　间接测量

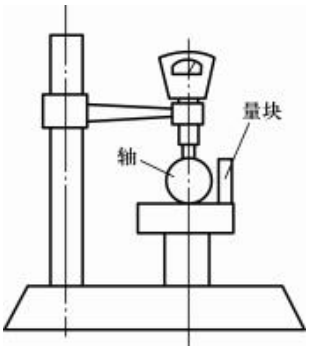


图 2-4　相对测量

步骤如下：①测出 d_1，测出 d_2，测出 L_1；②算出 $L=L_1-\frac{1}{2}(d_1+d_2)$。

能力训练 2：用机械式比较仪进行相对测量。

分析指导：图 2-4 所示为用机械式比较仪测量轴径（采用相对测量法）。

步骤如下：

1）根据轴的设计尺寸选用量块（已知标准量），放在指示表下方，调指示表（注：指示表触头应被压入一部分）。

2）移走量块，放入轴，指示针偏转示出偏差值，读出：量值＝标准量＋偏差值。

思考：上例测量方法是否为直接测量？

能力训练 3：已知某测量器具的标准偏差为 0.002 mm，零件单次测量值为 28.864 mm，四次平均测量值为 28.865 mm，则单次测量结果为_____，四次测量结果为_____。

分析指导：单次测量时，测量结果 $x_e=x_i\pm\delta_{\lim}=x_i\pm3\sigma$；

多次测量时，测量结果 $x_e=\bar{x}\pm\delta_{\lim(\bar{x})}=\bar{x}\pm3\sigma_{\bar{x}}$。

其中，x_e——真值；x_i——任一次的测得值；$\bar{x}$——平均值；σ——标准偏差；$\sigma_{\bar{x}}$——算术平均值的标准偏差。故单次测量结果为（28.864±0.006）mm，四次测量结果为（28.865±0.003）mm。

能力训练任务

能力训练任务 1：某仪器读数在 20 mm 处的示值误差为＋0.002 mm，当用它测量工件时，读数正好是 20 mm，问工件的实际尺寸是多少？

能力训练任务 2：用两种方法分别测量两个尺寸，它们的真值 $L_1=50$ mm，$L_2=80$ mm，若测得值分别为 50.004 mm 和 80.006 mm，哪一种方法测量精度高？

任务 2　正确选择测量器具

理论知识要点

2.1　验收原则

误收是指把废品作为合格品验收，它会影响产品质量和企业形象；误废是指把合格品作为废品验收，它会造成经济损失。

为了防止误收，确保产品质量，国家标准《产品几何技术规范(GPS)光滑工件尺寸的检验》(GB/T 3177)规定验收原则是允许有误废而不允许有误收。

2.2　验收极限

验收极限是判断所检验工件尺寸合格与否的尺寸界限。国家标准规定按验收极限验收工件。验收极限可以按照下列两种方式之一确定。

(1) 方式一：内缩式验收极限。其验收极限是从规定的最大实体尺寸(MMS)和最小实体尺寸(LMS)分别向工件公差带内移动一个安全裕度(A)来确定的，如图 2-5 所示。A 值按工件公差(T)的 1/10 确定。

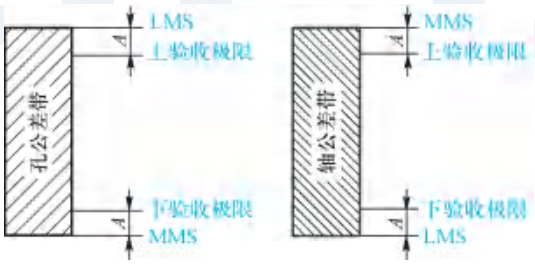


图 2-5　内缩式验收极限

最大实体尺寸(MMS)是指孔或轴具有允许材料量为最多时的状态(最大实体状态，简称 MMC)下的极限尺寸。孔：$D_{MMS}=D_{min}$；轴：$d_{MMS}=d_{max}$。

最小实体尺寸(LMS)是指孔或轴具有允许材料量为最少时的状态(最小实体状态，简称 LMC)下的极限尺寸。孔：$D_{LMS}=D_{max}$；轴：$d_{LMS}=d_{min}$。

孔尺寸的验收极限：

上验收极限＝最小实体尺寸(LMS)－安全裕度(A)

下验收极限＝最大实体尺寸(MMS)＋安全裕度(A)

轴尺寸的验收极限：

上验收极限＝最大实体尺寸(MMS)－安全裕度(A)

下验收极限＝最小实体尺寸(LMS)＋安全裕度(A)

(2) 方式二：不内缩式验收极限。其验收极限等于规定的最大实体尺寸(MMS)和最小实体尺寸(LMS)，限 A 值等于零。

验收极限方式的选择：验收极限方式的选择要结合尺寸功能要求及其重要程度、尺寸公差等级、测量不确定度和过程能力等因素综合考虑。

1) 对遵循包容要求的尺寸、高精度公差等级的尺寸，其验收极限按方式一确定。

2) 当过程能力指数 $C_p \geqslant 1$ 时，其验收极限可以按方式二确定；但对遵循包容要求的尺寸，其最大实体尺寸一边的验收极限仍应按方式一确定。

3) 对偏态分布的尺寸，其验收极限可以仅对尺寸偏向的一边按方式一确定。

4) 对非配合和一般公差的尺寸，其验收极限按方式二确定。

2.3　测量器具选用原则

微课

测量器具选用原则

按照测量器具的测量不确定度的允许值 u_1 选择测量器具。选择时，应使所选用的测量器具的测量不确定度数值 u 等于或小于标准规定的 u_1 值。

测量器具的测量不确定度允许值 u_1 与工件公差的比值分挡；对 IT6～IT11 的分为Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ三挡；对 IT12～IT18 的分为Ⅰ、Ⅱ两挡。测量不确定度允许值 u_1 的Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ三挡值分别约为工件公差的 1/10、1/6、1/4。其三挡数值列于表 2-1 中，选择时，优先选用Ⅰ挡千分尺和游标卡尺的测量不确定度见表 2-2，比较仪的测量不确定度见表 2-3，指示表的测量不确定度见表 2-4。

表 2-1　安全裕度 A 与测量器具的测量不确定度允许值 u_1　　μm

公差等级		IT6					IT7					IT8					IT9				
公称尺寸/mm		T	A	u_1			T	A	u_1			T	A	u_1			T	A	u_1		
大于	至			Ⅰ	Ⅱ	Ⅲ			Ⅰ	Ⅱ	Ⅲ			Ⅰ	Ⅱ	Ⅲ			Ⅰ	Ⅱ	Ⅲ
—	3	6	0.6	0.54	0.9	1.4	10	1.0	0.9	1.5	2.3	14	1.4	1.3	2.1	3.2	25	2.5	2.3	3.8	5.6
3	6	8	0.8	0.72	1.2	1.8	12	1.2	1.1	1.8	2.7	18	1.8	1.6	2.7	4.1	30	3.0	2.7	4.5	6.8
6	10	9	0.9	0.81	1.4	2.0	15	1.5	1.4	2.3	3.4	22	2.2	2.0	3.3	5.0	36	3.6	3.3	5.4	8.1
10	18	11	1.1	1.0	1.7	2.5	18	1.8	1.7	2.7	4.1	27	2.7	2.4	4.1	6.1	43	4.3	3.9	6.5	9.7
18	30	13	1.3	1.2	2.0	2.9	21	2.1	1.9	3.2	4.7	33	3.3	3.0	5.0	7.4	52	5.2	4.7	7.8	12

续　表

公差等级		IT6					IT7					IT8					IT9				
公称尺寸/mm		T	A	u_1			T	A	u_1			T	A	u_1			T	A	u_1		
大于	至			Ⅰ	Ⅱ	Ⅲ			Ⅰ	Ⅱ	Ⅲ			Ⅰ	Ⅱ	Ⅲ			Ⅰ	Ⅱ	Ⅲ
30	50	16	1.6	1.4	2.4	3.6	25	2.5	2.3	3.8	5.6	39	3.9	3.5	5.9	8.8	62	6.2	5.6	9.3	14
50	80	19	1.9	1.7	2.9	4.3	30	3.0	2.7	4.5	6.8	46	4.6	4.1	6.9	10	74	7.4	6.7	11	17
80	120	22	2.2	2.0	3.3	5.0	35	3.5	3.2	5.3	7.9	54	5.4	4.9	8.1	12	87	8.7	7.8	13	20
120	180	25	2.5	2.3	3.8	5.6	40	4.0	3.6	6.0	9.0	63	6.3	5.7	9.5	14	100	10	9.0	15	23
180	250	29	2.9	2.6	4.4	6.5	46	4.6	4.1	6.9	10	72	7.2	6.5	11	16	115	12	10	17	26
250	315	32	3.2	2.9	4.8	7.2	52	5.2	4.7	7.8	12	81	8.1	7.3	12	18	130	13	12	19	29
315	400	36	3.6	3.2	5.4	8.1	57	5.7	5.1	8.4	13	89	8.9	8.0	13	20	140	14	13	21	32
400	500	40	4.0	3.6	6.0	9.0	63	6.3	5.7	9.5	14	97	9.7	8.7	15	22	155	16	14	23	35

公差等级		IT10					IT11					IT12				IT13			
公称尺寸/mm		T	A	u_1			T	A	u_1			T	A	u_1		T	A	u_1	
大于	至			Ⅰ	Ⅱ	Ⅲ			Ⅰ	Ⅱ	Ⅲ			Ⅰ	Ⅱ			Ⅰ	Ⅱ
—	3	40	4.0	3.6	6.0	9.0	60	6.0	5.4	9.0	14	100	10	9.0	15	140	14	13	21
3	6	48	4.8	4.3	7.2	11	75	7.5	6.8	11	17	120	12	11	18	180	18	16	27
6	10	58	5.8	5.2	8.7	13	90	9.0	8.1	14	20	150	15	14	23	220	22	20	33
10	18	70	7.0	6.3	11	16	110	11	10	17	25	180	18	16	27	270	27	24	41
18	30	84	8.4	7.6	13	19	130	13	12	20	29	210	21	19	32	330	33	30	50
30	50	100	10	9.0	15	23	160	16	14	24	36	250	25	23	38	390	39	35	59
50	80	120	12	11	18	27	190	19	17	29	43	300	30	27	45	460	46	41	69
80	120	140	14	13	21	32	220	22	20	33	50	350	35	32	53	540	54	49	81
120	180	160	16	15	24	36	250	25	23	38	56	400	40	36	60	630	63	57	95
180	250	185	18	17	28	42	290	29	26	44	65	460	46	41	69	720	72	65	110
250	315	210	21	19	32	47	320	32	29	48	72	520	52	47	75	810	81	73	120
315	400	230	23	21	35	52	360	36	32	54	81	570	57	51	80	890	89	80	130
400	500	250	25	23	38	56	400	40	36	60	90	630	63	57	95	970	97	87	150

表 2-2　千分尺和游标卡尺的测量不确定度　　mm

<table>
<tr><th colspan="2" rowspan="2">尺寸范围</th><th colspan="4">计量器具类型</th></tr>
<tr><th>分度值为 0.01 mm 的外径千分尺</th><th>分度值为 0.01 mm 的内径千分尺</th><th>分度值为 0.02 mm 的游标卡尺</th><th>分度值为 0.05 mm 的游标卡尺</th></tr>
<tr><th>大于</th><th>至</th><th colspan="4">测量不确定度</th></tr>
<tr><td>0
50
100</td><td>50
100
150</td><td>0.004
0.005
0.006</td><td>0.008</td><td rowspan="3">0.020</td><td rowspan="2">0.05</td></tr>
<tr><td>150</td><td>200</td><td>0.007</td><td rowspan="2">0.013</td></tr>
<tr><td>200
250</td><td>250
300</td><td>0.008
0.009</td><td rowspan="4">0.100</td></tr>
<tr><td>300
350
400</td><td>350
400
450</td><td>0.010
0.011
0.012</td><td>0.020</td><td rowspan="3"></td></tr>
<tr><td>450</td><td>500</td><td>0.013</td><td>0.025</td></tr>
<tr><td>500
600
700</td><td>600
700
1 000</td><td></td><td>0.030</td><td>0.150</td></tr>
</table>

表 2-3　比较仪的测量不确定度　　mm

<table>
<tr><th colspan="2" rowspan="2">尺寸范围</th><th colspan="4">所使用的计量器具</th></tr>
<tr><th>分度值为 0.000 5 mm（相当于放大 2 000 倍）的比较仪</th><th>分度值为 0.001 mm（相当于放大 1 000 倍）的比较仪</th><th>分度值为 0.002 mm（相当于放大 400 倍）的比较仪</th><th>分度值为 0.005 mm（相当于放大 250 倍）的比较仪</th></tr>
<tr><th>大于</th><th>至</th><th colspan="4">测量不确定度</th></tr>
<tr><td>—</td><td>25</td><td>0.000 6</td><td rowspan="2">0.001 0</td><td>0.001 7</td><td rowspan="6">0.003 0</td></tr>
<tr><td>25</td><td>40</td><td>0.000 7</td><td rowspan="3">0.001 8</td></tr>
<tr><td>40</td><td>65</td><td rowspan="2">0.000 8</td><td rowspan="2">0.001 1</td></tr>
<tr><td>65</td><td>90</td></tr>
<tr><td>90</td><td>115</td><td>0.000 9</td><td>0.001 2</td><td rowspan="2">0.001 9</td></tr>
<tr><td>115</td><td>165</td><td>0.001 0</td><td>0.001 3</td></tr>
<tr><td>165</td><td>215</td><td>0.001 2</td><td>0.001 4</td><td>0.002 0</td><td rowspan="3">0.003 5</td></tr>
<tr><td>215</td><td>265</td><td>0.001 4</td><td>0.001 6</td><td>0.002 1</td></tr>
<tr><td>265</td><td>315</td><td>0.001 6</td><td>0.001 7</td><td>0.002 2</td></tr>
</table>

注：测量时，使用的标准器由 4 块 1 级（或 4 等）量块组成。

表 2-4　指示表的测量不确定度　　mm

尺寸范围		所使用的计量器具			
		分度值为 0.001 mm 的千分表(0 级在全程范围内，1 级在 0.2 mm 内)；分度值为 0.002 mm 的千分表(在 1 转范围内)	分度值为 0.001 mm，0.002 mm，0.005 mm 的千分表(1 级在全程范围内)；分度值为 0.01 mm 的百分表(0 级在任意 1 mm 内)	分度值为 0.01 mm 的百分表(0 级在全程范围内，1 级在任意 1 mm 内)	分度值为 0.01 mm 的百分表(1 级在全程范围内)
大于	至	测量不确定度			
—	25	0.005	0.010	0.018	0.030
25	40				
40	65				
65	90				
90	115				
115	165	0.006			
165	215				
215	265				
265	315				

能力训练指导

能力训练 1：轴类工件 $\phi 50f8\left(^{-0.025}_{-0.064}\right)$Ⓔ，试确定验收极限并选择适当的测量器具。

分析指导：

(1) 确定安全裕度

根据 $A=(1/10)T$，得：$A=\frac{1}{10}[|-0.025-(-0.064)|]\text{mm}=0.003\ 9\ \text{mm}$。

(2) 确定验收极限

因为此工件遵守包容要求，故其验收极限可按方式一来确定。

上验收极限＝最大实体尺寸－A＝(50－0.025－0.003 9)mm＝49.971 1 mm

下验收极限＝最小实体尺寸＋A＝(50－0.064＋0.003 9)mm＝49.939 9 mm

(3) 选择测量器具

据 $\phi 50f8$，查表 2-1 知：测量器具不确定度允许值 Ⅰ 挡 $u_1=0.003\ 5$ mm。

据 $u\leqslant u_1$，查表 2-3 知：分度值为 0.005 mm、测量不确定度 u 为 0.003 mm 的比较仪是合适的测量器具。

微视频

量块

能力训练 2：用量块检测工件尺寸。

分析指导：

(1) 实训目的

1) 熟知量块的结构和精度等级。

2) 了解量块的维护方法。

3) 会进行量块组合检测工件尺寸。

(2) 量块概述

量块是一种没有刻度的形状为长方体的量具，具有两个平行的测量面。每块量块上都标有公称尺寸。量块尺寸不小于 6 mm 时，尺寸标记在非工作面上；量块尺寸小于 6 mm 时，尺寸标记在测量面上，如图 2-6 所示。

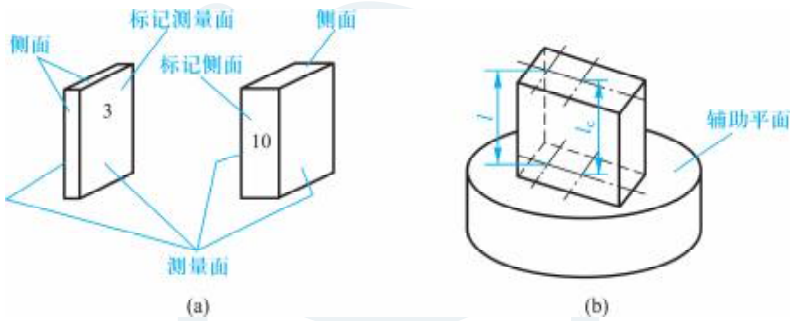


图 2-6　量块

量块可用来检定和调整各种计量器具、机床、工具和其他设备，也可直接用于测量工件，在相对测量中还可用作标准件等。

(3) 量块的正确使用

用量块检测工件尺寸时，先弄清量块的精度等级，即量块是按“级”使用，还是按“等”使用，再进行量块组合与检测。

1) 量块精度等级。

按 JJG 146《量块检定规程》的规定，量块的制造精度分为五级：K、0、1、2、3 级，其中 K 级精度最高，精度依次降低，3 级最低。

按 JJG 146《量块检定规程》的规定，量块的检定精度分为五等：1、2、3、4、5 等，其中 1 等精度最高，精度依次降低，5 等最低。

量块按“级”使用时，以量块的标称长度为工作尺寸，该尺寸包含了量块的制造误差。量块按“等”使用时，以经检定后所给出的量块中心长度的实际尺寸作为工作尺寸(注：每套量块都附有检定书，在检定书上查算出量块的实际尺寸)，该尺寸排除了量块的制造误差，仅包含检定时较小的测量误差。因此，量块按“等”使用时的测量精度比量块按“级”使用时高。

2) 量块的选用。

按所需尺寸从成套量块的尺寸系列中选取量块并进行组合。为减少量块组的长度(尺寸)

的累积误差，选取的量块数目应尽量少，通常以不超过四块为宜。

选取时，先按所需尺寸的末位数选，再依次前推，每选一块量块至少应减去所需尺寸的一位尾数。

例：从总块数为 83 的量块套别中，选取量块组合成 30.155 mm 的尺寸。

具体选法如下：

30.155	----------	所需尺寸
−1.005	----------	第一块量块的尺寸
29.15		
−1.15	----------	第二块量块的尺寸
28		
−8	----------	第三块量块的尺寸
20	----------	第四块量块的尺寸

成套量块的组合尺寸见表 2-5。

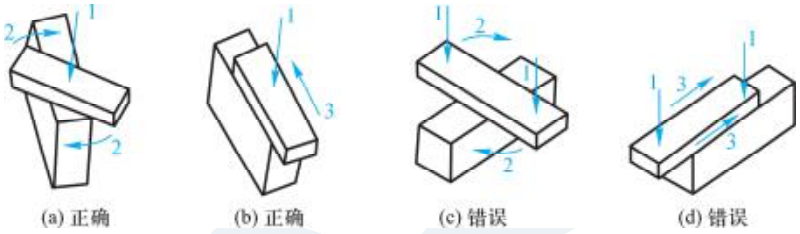
表 2-5　成套量块的组合尺寸(摘自 GB/T 6093)

套　别	总块数	级　别	尺寸系列/mm	间隔/mm	块　数
1	91	0，1	0.5	—	1
			1	—	1
			1.001，1.002，…，1.009	0.001	9
			1.01，1.02，…，1.49	0.01	49
			1.5，1.6，…，1.9	0.1	5
			2.0，2.5，…，9.5	0.5	16
			10，20，…，100	10	10
2	83	0，1，2	0.5	—	1
			1	—	1
			1.005	—	1
			1.01，1.02，…，1.49	0.01	49
			1.5，1.6，…，1.9	0.1	5
			2.0，2.5，…，9.5	0.5	16
			10，20，…，100	10	10
3	46	0，1，2	1	—	1
			1.001，1.002，…，1.009	0.001	9
			1.01，1.02，…，1.09	0.01	9
			1.1，1.2，…，1.9	0.1	9
			2，3，…，9	1	8
			10，20，…，100	10	10

3）量块的组合方法。

① 研合法。

量块在研合前需用优质汽油清洗并用鹿皮仔细擦干净，研合操作如图 2-7 所示。将两量块的测量面互相成 30°左右交叉接触，对小尺寸量块稍加压力（施力方向如图 2-7 所示）并缓缓转正，再沿工作面长边方向推进，直到两工作面全部贴合在一起。



1—加力方向；2—旋转方向；3—推合方向。

图 2-7　研合操作

量块经清洗擦干后，仍有极微薄的油膜留在工作面上，由于分子吸力作用，多块量块可牢靠地研合在一起，并组成尾数为 μm 的尺寸（如 30.155 mm 等）。

正常情况下，在研合过程中，手指能感到研合力。如研合力不大，可在旋转和推进小尺寸量块的过程中适当加一些压力，但压力不能过大，以免量块变形。

研合量块，应注意以下几点：

☆ 研合前，量块工作面要清洗干净，研合时如出现不易黏合或有打滑、阻滞和刮磨现象，应停止研合，检查工作面是否有微小毛刺或污物。

☆ 先研合小尺寸量块，再与中等尺寸的量块研合，最后与大尺寸量块研合。尺寸小于 5 mm 的量块直接与大尺寸量块研合时，宜将小量块放在下面，手握大尺寸量块往小尺寸量块上研合，以免小尺寸量块在旋转推合过程中变形。

☆ 量块组使用后，要及时拆开清洗，收放前要涂油，不要长期在研合状态下放置，以免锈蚀。

② 用量块附件夹持量块组。

量块附件如图 2-8 所示。使用时，将按所需尺寸组合好的量块组用图 2-8a 所示的夹持器夹持。当用作内尺寸或划线、定心时，则需在量块组两侧再加用专用量爪，如图 2-9 所示。

4）量块的维护。

量块在使用时，应对量块和被测工件进行外观检查，清除毛刺和灰尘。为了防止量块锈蚀，不允许用手直接拿取量块和对着量块吹气、讲话（防止唾沫溅到量块上），也不能把量块放在图纸上。

量块放到工作台上时，应尽量将非工作面放在下面，且在量块下面垫上软绸。拿取量块时，应拿非工作面。研合量块时，切忌非工作面与测量面互相研合。

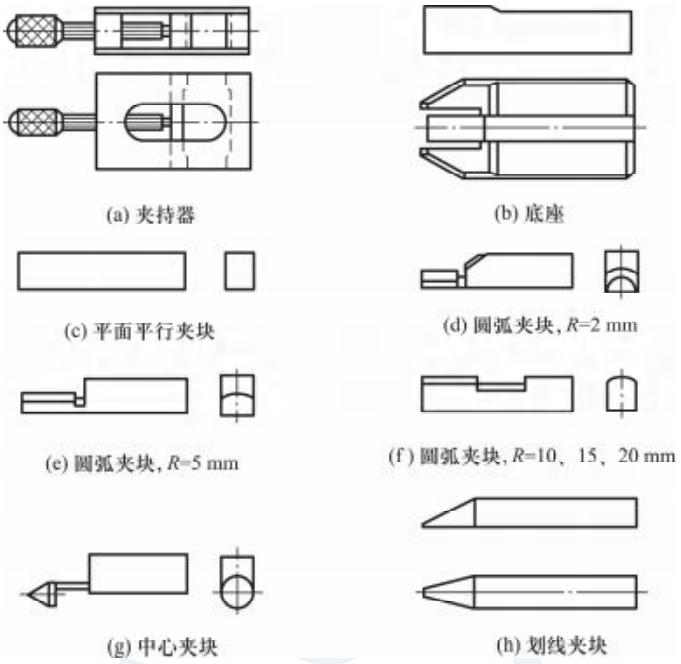


图 2-8　量块附件

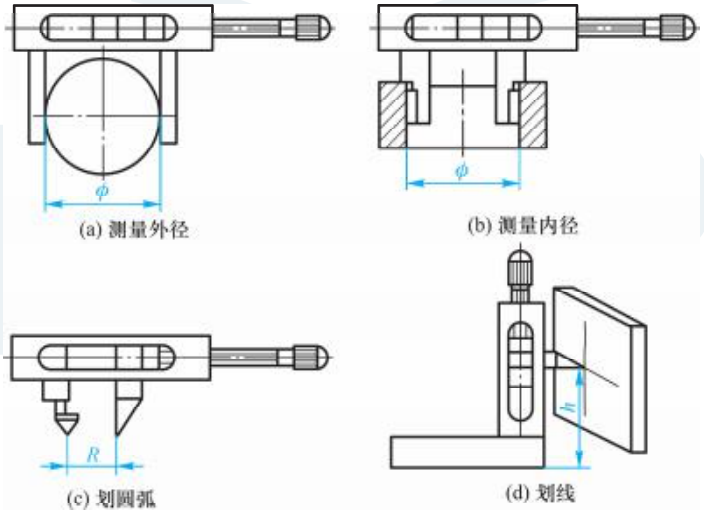


图 2-9　量块附件的应用

量块使用完毕后，要及时拆开量块组。拆开量块组时，应把量块逐块推下，不可强力拉开或掰开。然后把拆下的量块用汽油洗净，使用软绸擦干后，再放入专用盒内。如近期不再使用，还要涂上防锈油。

为了保证测量精度，量块应严格定期检定，并将检定合格证附在盒内。超过规定期限未经检定合格的量块，不得继续使用。

能力训练 3：认识光滑圆柱极限量规。

分析指导：

（1）光滑极限量规的类型

量规是一种无刻度定值的专用量具。对机械零件检验，量规只能判断其是否合格，不能测出它的实际尺寸。量规在生产中得到了广泛的应用，特别适合大批量生产的场合。

微视频

光滑极限量规

量规按检测对象是否有螺纹分为光滑极限量规和螺纹量规，如图 2-10 所示。

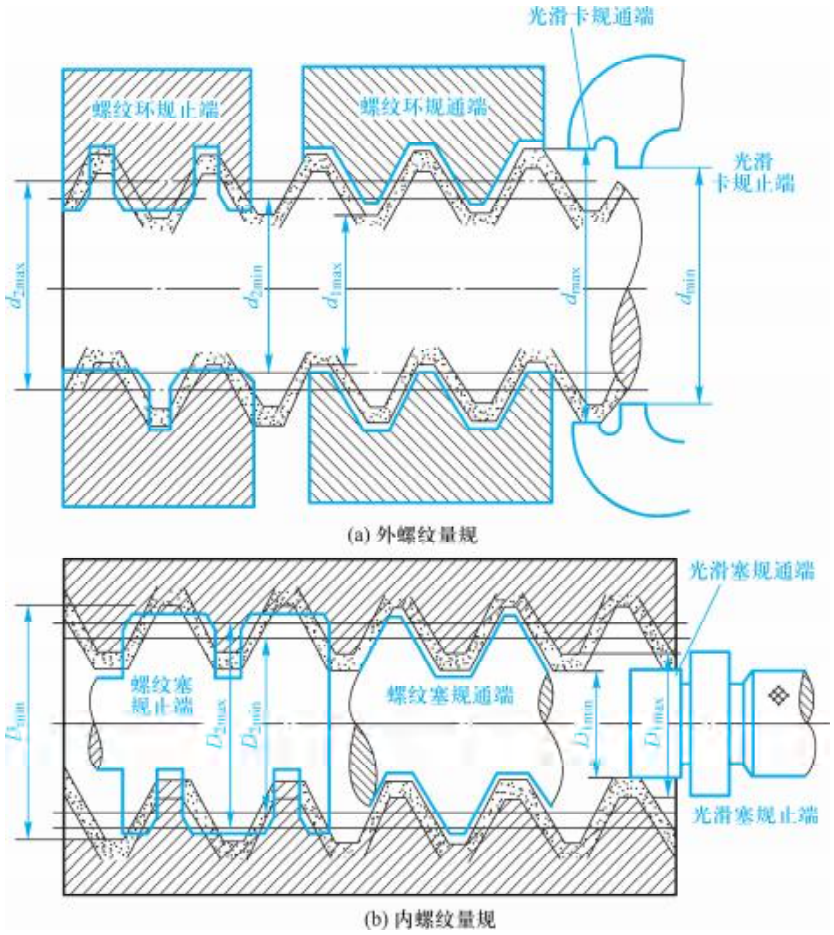


图 2-10　螺纹量规

光滑极限量规是指具有以孔或轴的最大实体尺寸和最小实体尺寸为公称尺寸的标准测量面，能反映控制被检测孔或轴边界条件的量规。

光滑极限量规可从以下几个角度进行分类：

1）按检测对象不同分为光滑圆柱极限量规、锥体量规、综合量规、键和花键量规等。

光滑圆柱极限量规——检测光滑的圆柱形孔和轴，如图 2-11 所示。

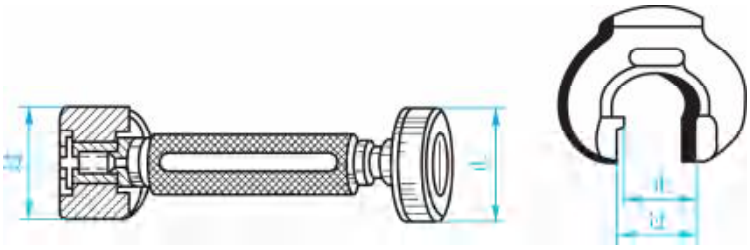


图 2-11　光滑圆柱极限量规

锥体量规——检测光滑的内锥孔、外锥面，如图 2-12 所示。

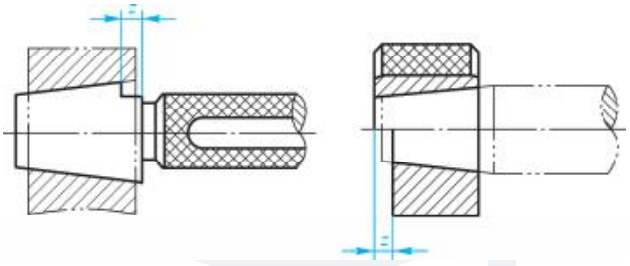


图 2-12　锥体量规

综合量规（或称功能量规、位置量规）——检测注有相关要求的机械零件，如图 2-13 所示。

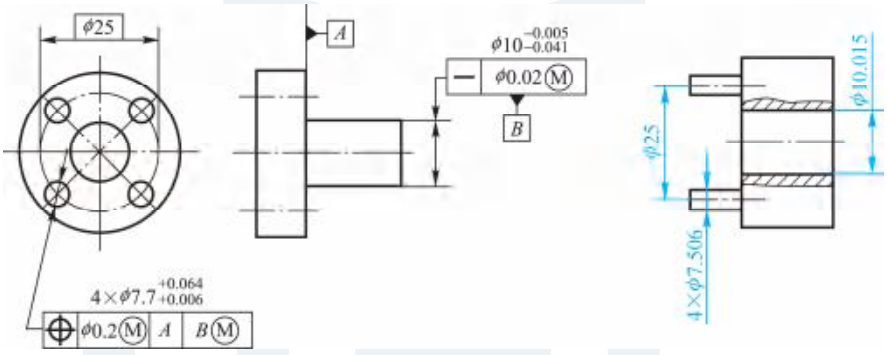


图 2-13　综合量规

键和花键量规——检测键和花键。

2）按结构形式分为不可调整式（固定式）和可调整式、单头和多头等。

3）按用途不同分为工作量规、验收量规和校对量规。其中每种量规都有通规和止规。

工作量规——操作者在生产过程中检验机械零件时所使用的量规。

验收量规——检验人员或用户代表在验收机械零件时所使用的量规。

注意：验收量规不需要另行制造。对机械零件进行检验时，操作者应该使用新的或磨损较少的通规，检验人员应该使用磨损较多且为同一规格的通规，用户代表应该使用磨损最多、接近机械零件最大实体尺寸且为同一规格的通规。

校对量规——检验工作量规的量规。

国家标准只对轴用工作量规（分为通规和止规）规定了三种校对量规，分别为“校通—通”

塞规、“校止—通”塞规和“校通—损”塞规。

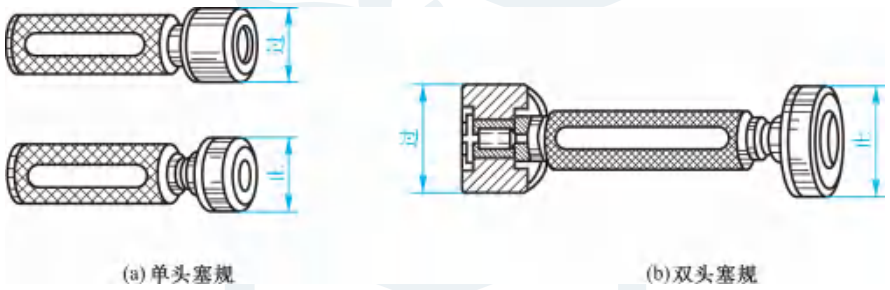
“校通—通”塞规(TT)　检验轴用工作量规通规的校对量规。校对时，应该通过，否则通规不合格。

“校止—通”塞规(ZT)　检验轴用工作量规止规的校对量规。校对时，应该通过，否则止规不合格。

“校通—损”塞规(TS)　检验工作量规通规是否达到磨损极限的校对量规。校对时，不应通过轴用工作量规通规，否则该通规已到或者超过磨损极限，不应继续使用。

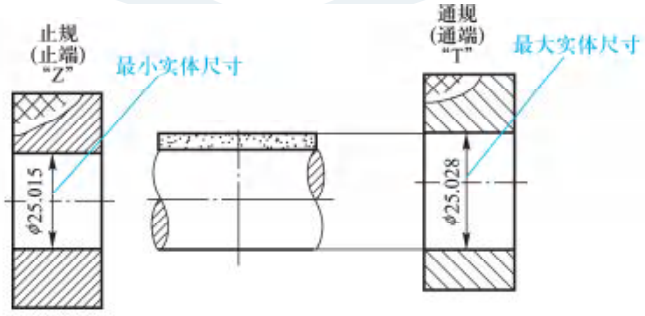
4）按使用方式不同分为塞规和环规。

塞规(也称孔用量规)是指用于检验孔径的光滑极限量规，其测量面为外圆柱面，如图 2-14a、图 2-14b 所示。



(a) 单头塞规　　(b) 双头塞规

图 2-14　塞规



(a) 环规

(b) 双头卡规　　(c) 单头极限卡规　　(d) 可调整卡规

图 2-15　环规、卡规

环规(也称轴用量规)是指用于检验轴径的光滑极限量规,其测量面为内圆柱面,如图 2-15a 所示。为不使量规过于笨重,方便检测大尺寸轴,此时,将测量面做成两个对称的平面,并用于检验轴径的光滑极限量规称为卡规(也称轴用量规)。卡规有固定式(如图 2-15b、图 2-15c)和调整式(如图 2-15d)。

无论塞规和环规(或卡规)都有通规和止规,且它们成对使用。通规用于控制机械零件的作用尺寸,止规用于控制机械零件的实际尺寸。

检验工件时,其合格标志是:通规能通过,止规不能通过。简而言之:通规通,止规止。由此通规也称为过规,止规也称为不过规。若把通规和止规做成一个整体,此时塞规或环规(卡规)的一端称为通端,另一端称为止端。通端和止端在外形上的区别是:通端较长,止端较短。

(2) 光滑圆柱极限量规的设计

光滑圆柱极限量规是专门用于检测光滑圆柱形孔和轴的一种光滑极限量规。它最具普遍性和代表性。本模块主要介绍它的有关知识和设计方法,为叙述方便起见,后面均将光滑圆柱极限量规简称为量规。

1) 量规的结构形式

量规的结构形式与被检验的机械零件的形状尺寸有关。

从结构的组成上看,量规有单头的、双头的("通""止"在一体,如图 2-16a、图 2-17a、图 2-17b 等所示),刚性的(不可调整的)、可调整的(测头部分可以调整,如图 2-17f 所示)。

从接触性质上看,有点接触式的(如测大孔的棒形塞规,如图 2-16d)、线接触式的(如卡规,如图 2-17 所示)和面接触式的(如圆柱套式塞规,如图 2-16a、图 2-16b 等所示)。

从量规的外形上看,有完全轮廓量规(即全形量规,如图 2-16a、图 2-16b 等所示)和不完全轮廓量规(即片形量规、不全形量规,如图 2-16c、图 2-16d 等所示)。

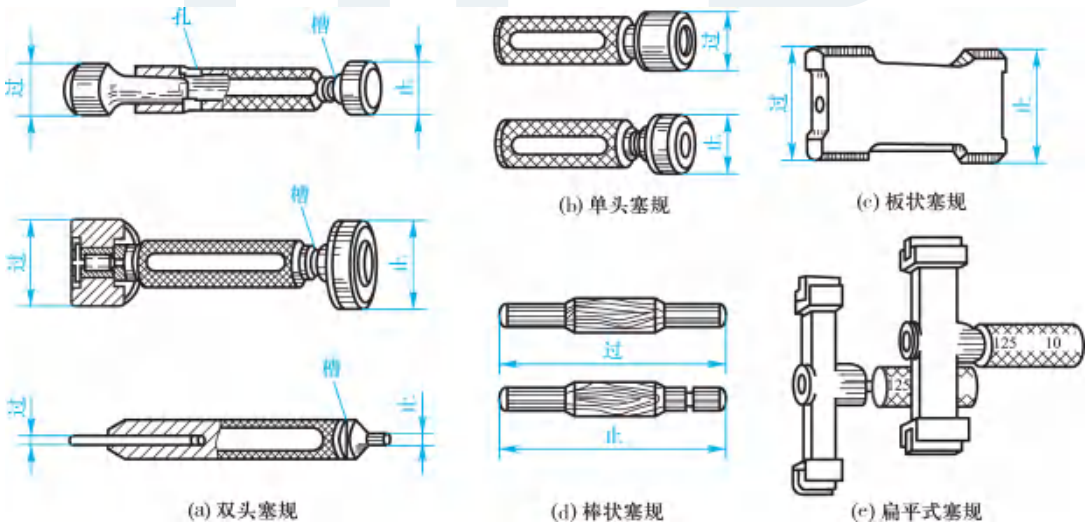


图 2-16　塞规结构

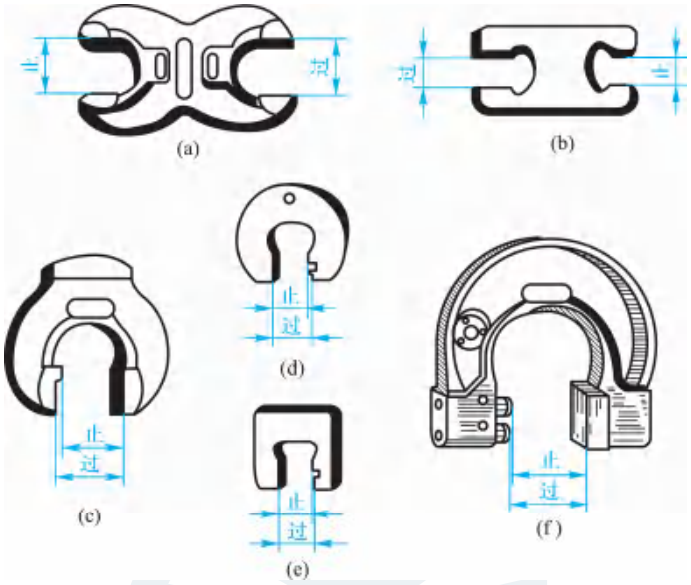


图 2-17　卡规结构

2）量规结构形式的设计选用

设计时合理选用量规的结构形式，对正确判断检验结果影响很大。图 2-18、图 2-19 列出

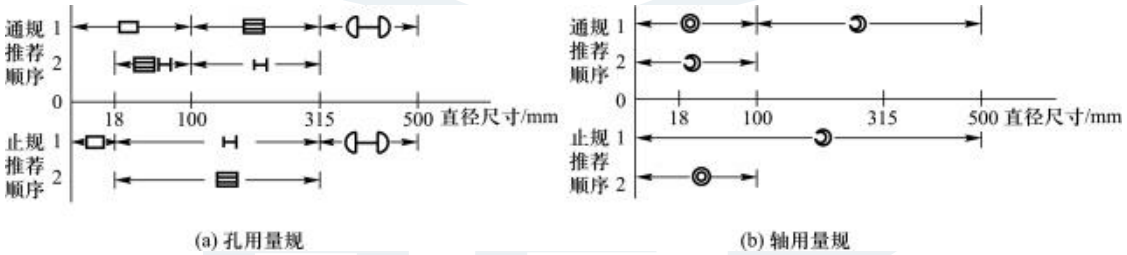


图 2-18　常用量规的结构形式及其应用的尺寸范围

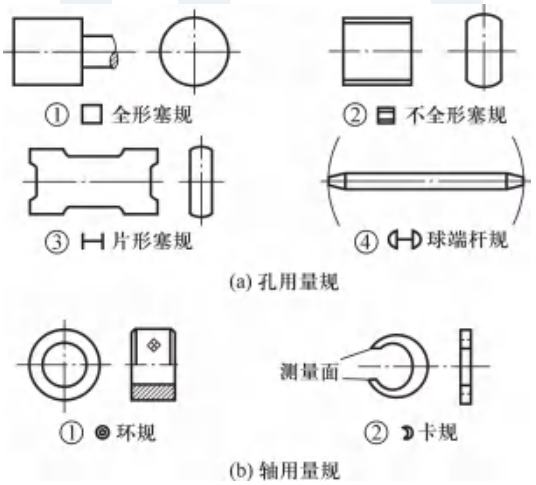


图 2-19　孔、轴用量规

了国家标准推荐的常用量规的结构形式及其应用的尺寸范围，供设计选型时参考。

全形塞规——具有外圆柱形的测量面。

不全形塞规——具有部分外圆柱形的测量面，主要是为了减轻重量。

片形塞规——具有较少部分外圆柱形的测量面。为避免使用变形，应具有一定厚度而做成板形。

球端杆规——具有球形的测量面。它有固定式和调整式两种。

3）量规公差

量规是一种精密检验工具，从制造角度来说，量规也是一种零件，无非是精度要求较高一些而已，制造量规就不可避免地产生误差，因此，对量规必须规定制造公差。制造公差的大小决定了量规制造的难易程度。

工作量规通规公差由制造公差 T 和磨损公差两部分组成。因工作量规通规在工作过程中经常通过被测零件，其工作表面不可避免地会产生磨损，为使工作量规通规具有一定的使用寿命，需要留出适当的磨损储量，故工作量规通规还需规定磨损公差。磨损公差的大小决定了通规的使用寿命。

工作量规止规公差仅由制造公差 T 组成。因工作量规止规在工作过程中不应通过被测零件，磨损很少，故不留磨损储量，即工作量规止规不规定磨损公差。

4）量规设计原则

由于机械零件存在形状误差，其实际尺寸虽然位于极限尺寸范围内，但装配时仍有可能发生困难或装配后达不到规定的配合要求。为了准确地评定遵守包容要求的孔和轴是否合格，设计量规时应遵守泰勒原则（极限尺寸判断原则）。

泰勒原则是指遵守包容要求的孔或轴的实际尺寸和形状误差综合形成的体外作用尺寸不允许超出最大实体尺寸，在孔或轴的任何位置上的实际尺寸不允许超出最小实体尺寸。

量规设计的两种情形：

① 符合泰勒原则的量规　为了避免误收零件，确保整台机器性能，常把量规设计成符合泰勒原则的量规，即通规做成全形量规，其尺寸等于零件的最大实体尺寸，长度等于配合长度；止规做成两点状止规，两测量面间的尺寸等于零件的最小实体尺寸。

② 偏离泰勒原则的量规　在实际应用中，制造和使用完全符合泰勒原则的量规有时比较困难，故国家标准规定，允许在被检验零件的形状误差不影响配合性质的条件下，可使用偏离泰勒原则的量规。如：对检验尺寸大于 100 mm 的孔，为不使量规过于笨重，通规通常做成不全形量规；对检验大尺寸的轴，通规通常做成不全形量规——卡规；对检验装夹在顶尖上加工的零件和曲轴零件等，通规也通常做成不全形量规。

能力训练任务

能力训练任务 1：被测工件为 ϕ25f8Ⓔ，试确定其验收极限并选择适当的测量器具。

能力训练任务 2：从总块数为 83 的量块套别中选取量块，组成 36.375 mm。

巩 固 训 练

1. 填空题

1）一个完整的测量过程包括_____、_____、_____、_____四要素。

2）测量器具按其结构特点可分为_____、_____、_____和_____。

3）国家标准规定，产品的验收原则是_____。

4）量块按“级”使用时，以量块的_____为工作尺寸；量块按“等”使用时，以经检定后所给出的量块_____为工作尺寸。

5）量规按检测对象是否有螺纹分为_____和_____。

6）通规用于控制机械零件的_____尺寸；止规用于控制机械零件的_____尺寸。

2. 判断题

1）量具和量仪在结构上最主要的区别是：量具一般具有传动放大系统，而量仪没有。（　　）

2）直接测量必为绝对测量。（　　）

3）为减少测量误差，一般不采用间接测量。（　　）

4）用机械式比较仪测量轴径尺寸，既属于相对测量法，又属于直接测量法。（　　）

5）规格为 150 mm 的游标卡尺的示值范围和测量范围均为 0～150 mm，因而可以说示值范围和测量范围属于同一概念。（　　）

6）使用的量块数越多，组合出的尺寸越准确。（　　）

7）光滑极限量规由于检验效率较高，因此适用于大批量生产的场合。（　　）

8）当通规和止规都能通过被测零件时，该零件即是合格品。（　　）

3. 选择题（单选）

1）下列测量器具中，不属于通用测量器具的是（　　）。

A. 钢直尺　　B. 千分尺　　C. 量块　　D. 游标卡尺

2）测量器具能准确读出的最小单位数值就是测量器具的（　　）。

A. 修正值　　B. 示值误差　　C. 分度值　　D. 刻度间距

3）用游标卡尺测量工件的轴径尺寸属于（　　）。

A. 直接测量和相对测量　　B. 直接测量和绝对测量

C. 间接测量和绝对测量　　D. 间接测量和相对测量

4）下列测量中，属于间接测量的是（　　）。

A. 用光学比较仪测外径　　B. 用千分尺测外径

C. 用游标卡尺测量两孔中心距　　D. 用内径百分表测量孔径

5）下列测量中，精度最高的是（　　）。

A. 真值为 40 mm，测得值为 40.05 mm

B. 真值为 40 mm，测得值为 40.02 mm

C. 真值为 100 mm，测得值为 99.5 mm

D. 真值为 100 mm，测得值为 100.03 mm

6）由于测量器具零位不准而出现的误差属于（　　）。

A. 随机误差　　B. 粗大误差　　C. 系统误差　　D. 测量器具误差

7）关于量块的特性，下列说法中正确的是（　　）。

A. 量块是没有刻度的平行端面量具，是专用于某一特定尺寸的，因此它属于量规

B. 利用量块的研合性，就可以用不同尺寸的量块组合成所需的各种尺寸

C. 在实际生产中，量块是单独使用的

D. 量块的制造精度分为五级，其中 0 级最高，3 级最低

8）测量孔用量规称作（　　）。

A. 卡规　　B. 塞规　　C. 通规　　D. 止规

4. 综合题

1）用普通测量器具测量下列孔和轴，试分别确定其验收极限，并选择适当的测量器具。

① $\phi 50e9\left(^{-0.050}_{-0.112}\right)$Ⓔ　　② $\phi 30H6\left(^{+0.013}_{0}\right)$

2）试从总块数为 83 的量块套别中组成下列尺寸：48.98 mm、40.79 mm。

3）量规的通规和止规按工件的哪个实体尺寸制造？各控制工件的什么尺寸？

Module 3 模 块 三　尺 寸 公 差

教学课件
尺寸公差

零、部件要具有互换性，首先必须是合格产品。判断零、部件是否是合格产品，主要从零件的尺寸精度、形状和位置的几何精度和表面粗糙度三个方面去考查。因此，加工后的零件尺寸符合机械图样的尺寸标注要求是产品合格的一个主要方面。本模块主要介绍尺寸公差。

图 3-1 所示为减速器输出轴，其上标注的尺寸有 ϕ45m6、ϕ55j6、ϕ56r6、255 mm 等。若要在读图时能正确理解、设计时能正确标注减速器输出轴上的这些尺寸，就要学习与掌握技术标准《极限与配合》。

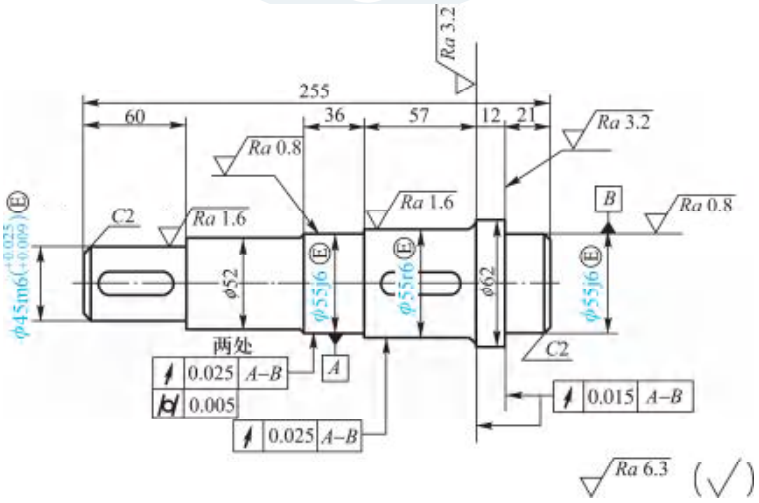


图 3-1　减速器输出轴

互换性要求中的零件尺寸一致性是指一批零件的尺寸须在某一合理的范围之内（并非尺寸完全相同），这个范围就是尺寸公差（允许零件尺寸的最大变动量），它既要满足零件的使用要求，又要满足零件制造的经济性，由此形成了“极限”与“配合”的概念。

“极限”主要用于协调零件使用要求与制造经济性之间的矛盾，“配合”主要反映零件组合时相互之间的关系。“极限”与“配合”的标准化有利于机器的设计、制造、使用和维修。技术标

准中的《极限与配合》除了主要适用于机械行业外，还几乎涉及国民经济的各个部门，是广泛组织协作和专业化生产的重要依据。

任务 1　正确理解公差配合的基本术语及定义

理论知识要点

1.1　有关孔和轴的定义

1）孔(hole)：通常指工件的圆柱形内表面，也包括由单一尺寸形成的非圆柱形内表面(即由两平行平面或切平面形成的包容面)。孔的直径用 D 表示。

2）轴(shaft)：通常指工件的圆柱形外表面，也包括由单一尺寸形成的非圆柱形外表面(即由两平行平面或切平面形成的被包容面)。轴的直径用 d 表示。

孔与轴的范围被扩大了，要注意正确理解。从装配关系讲，孔是包容面，轴是被包容面。从加工过程看，随着余量的切除，孔的尺寸由小变大，轴的尺寸由大变小。

如图 3-2 所示，由定义可知：d、d_1、d_2、d_3 可视为“轴”。D、D_1、D_2 可视为“孔”。L_1 可视为“非孔非轴”，因为从加工过程看，以 L_1 下端为基准加工上端，L_1 变小，可视为轴；以 L_1 上端为基准加工下端，L_1 变大，可视为孔。

微视频

孔和轴的定义

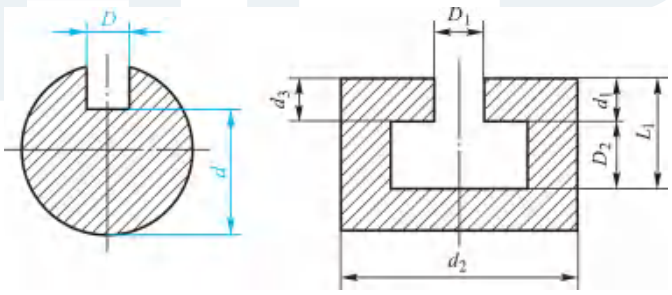


图 3-2　孔与轴

1.2　有关尺寸的术语及定义

(1) 尺寸

尺寸是指以特定单位表示线性尺寸值的数值。它由数字和长度(或角度)单位组成，如 255 mm、22°36′等。

长度包括直径、半径、宽度、高度、深度和中心距等。在机械制造业中，一般常用毫米(mm)作为特定单位，在图样上标注时，可省略单位，仅标数值，例如，图 3-1 所示的减速器输出轴上标注的 255、60、36、57 等。

微课

有关尺寸的术语及定义

(2) 公称尺寸(D，d)

公称尺寸是指设计时由设计者给定的尺寸。孔用 D 表示，轴用 d 表示。

公称尺寸的确定方法是设计者根据使用要求，通过强度、刚度计算及结构等方面的考虑，或根据实验和经验而确定的。公称尺寸一般按标准尺寸选取，目的是减少定值刀具、量具和夹具的规格数量。它可以是一个整数值或一个小数值。通过它并应用上、下极限偏差，可算出极限尺寸。

(3) 实际尺寸(也称实际要素、组成要素 D_a，d_a)

实际尺寸是指通过测量获得的某一孔、轴的尺寸。孔用 D_a 表示，轴用 d_a 表示。

存在测量误差，因此实际尺寸并非是被测尺寸的真值。又因为存在形状误差，同一表面不同部位的实际尺寸往往不相等，所以要用两点法进行测量，往往把实际尺寸称为局部实际尺寸。

实际尺寸是客观存在的，而测量获得的是一个随机尺寸，为了使其接近真值，对同一被测要素测量多次，求得平均值作为实际尺寸。

(4) 极限尺寸(D_{max}，d_{max}；D_{min}，d_{min})

极限尺寸是指一个孔或轴允许尺寸变化的两个界限值，如图 3-3 所示。

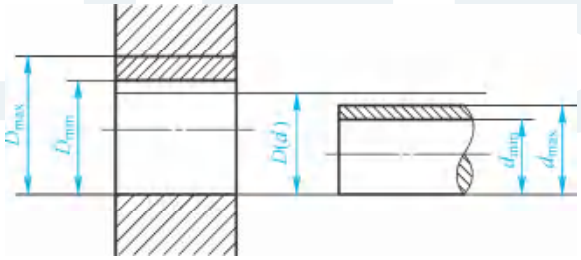


图 3-3　极限尺寸

上极限尺寸(也称最大极限尺寸)是指孔或轴允许的最大尺寸。孔用 D_{max} 表示，轴用 d_{max} 表示。下极限尺寸(也称最小极限尺寸)是指孔或轴允许的最小尺寸。孔用 D_{min} 表示，轴用 d_{min} 表示。

极限尺寸也是设计时由设计者给定的。通过公称尺寸和上、下极限偏差，可算出极限尺寸。极限尺寸用于控制实际尺寸，实际尺寸应位于其中，也可达到极限尺寸。

(5) 实体尺寸(MMS，LMS)

实体尺寸也是设计时由设计者给定的，它可分为最大实体尺寸(MMS)和最小实体尺寸(LMS)。

1）最大实体尺寸(MMS)是指孔或轴具有允许材料量为最多时状态(最大实体状态，简称MMC)下的极限尺寸。孔和轴的最大实体尺寸分别用 D_{MMS} 和 d_{MMS} 表示。

2）最小实体尺寸(LMS)是指孔或轴具有允许材料量为最少时状态(最小实体状态，简称LMC)下的极限尺寸。孔和轴的最小实体尺寸分别用 D_{LMS} 和 d_{LMS} 表示。

实体尺寸与极限尺寸有如下关系：(孔) $D_{MMS}=D_{min}$，$D_{LMS}=D_{max}$；(轴) $d_{MMS}=d_{max}$，$d_{LMS}=d_{min}$。

(6) 体外作用尺寸(D_{fe}，d_{fe})

作用尺寸可分为体外作用尺寸和体内作用尺寸。本书只介绍体外作用尺寸，轴和孔的体外作用尺寸如图 3-4 所示。

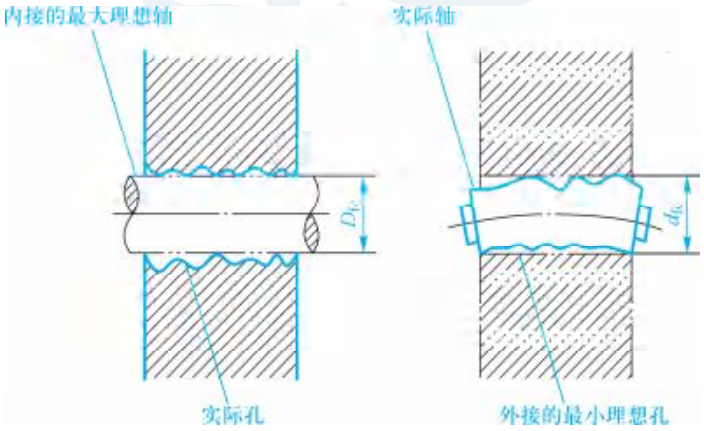


图 3-4　孔和轴的体外作用尺寸

孔的体外作用尺寸(D_{fe})是指在配合面的全长上与实际孔相内接的最大理想轴的尺寸。轴的体外作用尺寸(d_{fe})是指在配合面的全长上与实际轴相外接的最小理想孔的尺寸。

体外作用尺寸的特点：①实际存在的，对一批零件而言是一随机变量；②$D_{fe}\leqslant D_a$，$d_{fe}\geqslant d_a$；③只有 $D_{fe}\geqslant d_{fe}$，孔、轴才能自由装配(不是 $D_a\geqslant d_a$)。

(7) 尺寸合格条件

1）单个零件尺寸合格条件是：实际尺寸在极限尺寸范围内，即孔 $D_{min}\leqslant D_a\leqslant D_{max}$，轴 $d_{min}\leqslant d_a\leqslant d_{max}$。从这个角度看，极限尺寸是针对尺寸误差而提出的，测量获得的实际尺寸要求其检测精度较高，否则会产生误判现象。

微课

尺寸合格条件

2）有配合要求的零件尺寸合格条件是：必须遵循极限尺寸判断原则(即泰勒原则)，使实际尺寸和体外作用尺寸都被控制在极限尺寸内，即对孔：$D_{min}\leqslant D_{fe}\leqslant D_a\leqslant D_{max}$，对轴：$d_{min}\leqslant d_a\leqslant d_{fe}\leqslant d_{max}$。

1.3　有关偏差与公差的术语及定义

（1）尺寸偏差

尺寸偏差（简称偏差）是指某一尺寸减去其公称尺寸所得的代数差。此偏差可分为实际偏差和极限偏差。因为偏差是代数差，所以它可以为正、零或负值。

微课

偏差与公差的术语及定义

1）实际偏差

实际偏差是指实际尺寸减去其公称尺寸所得的代数差。它是零件加工完成后通过测量、计算而得到的。合格零件的实际偏差应位于极限偏差（孔用 Ea 表示、轴用 ea 表示）范围之内。

2）极限偏差

极限偏差是指极限尺寸减去其公称尺寸所得的代数差。它是设计时由设计者给定的。极限偏差用于控制实际偏差。

上极限偏差：上极限尺寸（最大极限尺寸）减去其公称尺寸所得的代数差。

下极限偏差：下极限尺寸（最小极限尺寸）减去其公称尺寸所得的代数差。计算公式为：

孔的上、下极限偏差　　$ES=D_{max}-D$　　$EI=D_{min}-D$

轴的上、下极限偏差　　$es=d_{max}-d$　　$ei=d_{min}-d$

上极限偏差总是大于下极限偏差。偏差值除零外，前面必须标注有正号或负号。标注示例：如图 3-1 所示的减速器输出轴上的 $\phi 45m6\left(^{+0.025}_{+0.009}\right)$Ⓔ。

（2）尺寸公差

尺寸公差（简称公差）是指允许尺寸的最大变动量。它是设计时由设计者给定的。公差是用以限制误差的，零件的误差在公差范围内即为合格；反之，则不合格。

尺寸公差的计算方法为：公差等于上极限尺寸减去下极限尺寸之差，或上极限偏差减去下极限偏差之差。

孔公差　　$T_h=|D_{max}-D_{min}|=|ES-EI|$

轴公差　　$T_s=|d_{max}-d_{min}|=|es-ei|$

（3）公差带与公差带图解

1）公差带是指在公差带图解中由两条平行直线所限定的一个区域，这两条平行直线分别代表上极限偏差和下极限偏差，或分别代表上极限尺寸和下极限尺寸。

公差带的两个要素 $\begin{cases} \text{大小} \xrightarrow{\text{标准化}} \text{标准公差等级} \\ \text{位置} \xrightarrow{\text{标准化}} \text{极限偏差} \longrightarrow \text{基本偏差} \end{cases}$

2）公差带图解（又称公差带图）是指采用几何作图方法画出的能代表公差带大小和位置的简图，如图 3-5 所示。

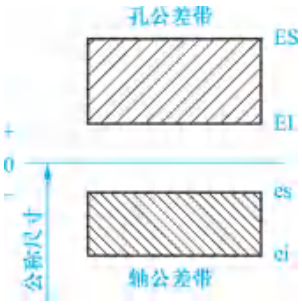


图 3-5　公差带图

零线：在公差带图解中，表示公称尺寸的一条水平直线即为零线。以它为基准确定偏差和公差，正偏差位于其上，负偏差位于其下。

3）公差带图的画法如下：

① 作零线；

② 确定作图比例，单位为 μm、mm 均可；

③ 根据孔或轴的极限偏差画出其公差带。

注意：公称尺寸相同的孔、轴公差带才能画在一张图纸上，作图比例应基本一致。

1.4　有关配合的术语及定义

（1）间隙与过盈

孔的尺寸－轴的尺寸 ＝ 代数差。差为正值时称为间隙 X，差为负值时称为过盈 Y。

（2）配合

微课

配合

配合是指公称尺寸相同的、相互结合的孔和轴公差带之间的关系。根据孔、轴公差带的不同位置关系，配合可分为间隙配合、过盈配合和过渡配合三大类。

1）间隙配合　是指孔公差带在轴公差带上方的配合，即具有间隙的配合（包括 $X_{min}=0$ 的配合）。对一批零件而言，所有孔的尺寸≥轴的尺寸，如图 3-6 所示。

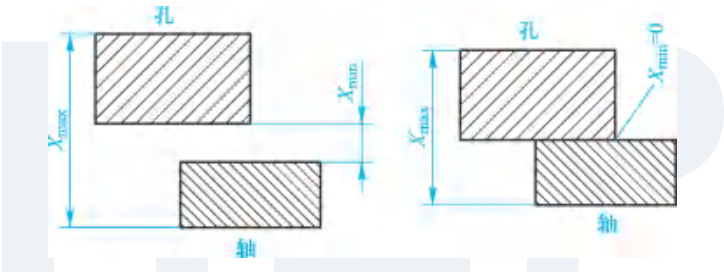


图 3-6　间隙配合

间隙配合的性质用其特征参数表示，其特征参数主要为：

最大间隙　$X_{max}=D_{max}-d_{min}=ES-ei$

最小间隙　$X_{min}=D_{min}-d_{max}=EI-es$

平均间隙　$X_{av}=\dfrac{X_{max}+X_{min}}{2}$

2）过盈配合　是指孔公差带在轴公差带下方的配合，即具有过盈的配合（包括 $Y_{min}=0$ 的配合）。对一批零件而言，所有孔的尺寸≤轴的尺寸，如图 3-7 所示。

过盈配合的性质用其特征参数表示，其特征参数主要为：

最小过盈　$Y_{min}=D_{max}-d_{min}=ES-ei$

最大过盈　$Y_{max}=D_{min}-d_{max}=EI-es$

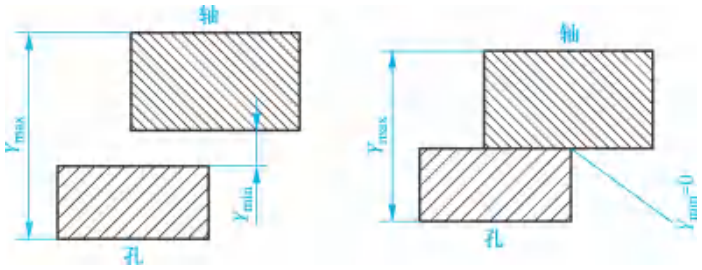


图 3-7　过盈配合

平均过盈　$Y_{av}=\dfrac{Y_{max}+Y_{min}}{2}$

3）过渡配合　是指孔、轴公差带具有相互重叠的配合，即可能具有 X 或 Y 的配合，如图 3-8 所示。

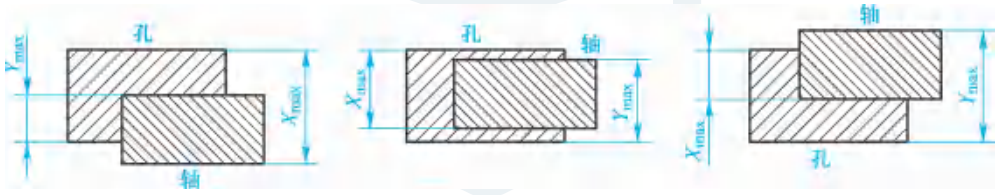


图 3-8　过渡配合

过渡配合的性质用其特征参数表示，其特征参数主要为：

最大间隙　$X_{max}=D_{max}-d_{min}=ES-ei$

最大过盈　$Y_{max}=D_{min}-d_{max}=EI-es$

平均间隙或平均过盈　X_{av}（或 Y_{av}）$=\dfrac{X_{max}+Y_{max}}{2}$

（3）配合公差

1）配合公差是允许间隙或过盈的变动量。其值为组成配合的孔、轴公差之和。

$$T_f=T_h+T_s=\begin{cases}|X_{max}-X_{min}| & \text{（间隙配合）}\\ |X_{max}-Y_{max}| & \text{（过渡配合）}\\ |Y_{min}-Y_{max}| & \text{（过盈配合）}\end{cases}$$

配合公差是设计人员根据相配件的使用要求确定的。配合公差越大，配合精度越低；配合公差越小，配合精度越高。

若要提高配合精度（即减小 T_f），可减小相配合的孔、轴尺寸公差（即提高相配合的孔、轴的加工精度）。设计时，应使 $T_f\leqslant T_h+T_s$。

2）配合公差带是指在公差带图解中由两条平行直线所限定的一个区域，这两条平行直线

分别代表极限间隙、极限过盈。

配合公差带大小取决于配合公差的大小，它表示配合精度；配合公差带相对于零线的位置取决于极限间隙或极限过盈的大小，它表示配合松紧。配合公差带图如图 3-9 所示。

配合公差完全在零线以上为间隙配合，完全在零线以下为过盈配合，跨在零线上、下两侧为过渡配合，如图 3-9 所示。

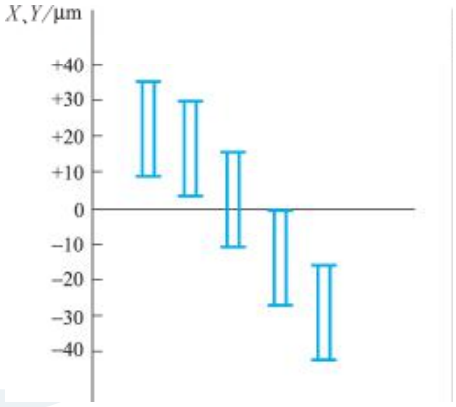


图 3-9　配合公差带图

能力训练指导

能力训练 1：分析图 3-10，哪些为“孔”？哪些为“轴”？

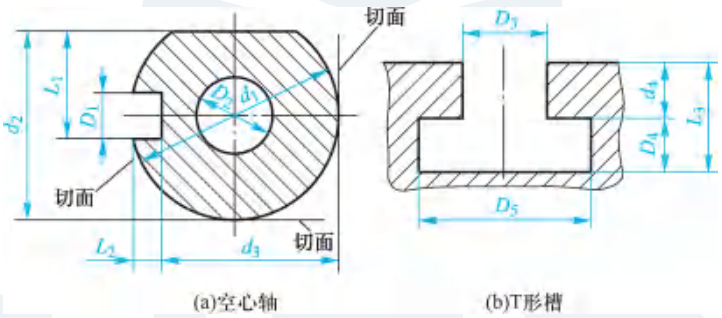


图 3-10　空心轴与 T 形槽

分析指导：从加工过程看，随着余量的切除，孔的尺寸由小变大，轴的尺寸由大变小。由此可知：d_1、d_2、d_3、d_4 可视为“轴”；D_1、D_2、D_3、D_4、D_5 可视为“孔”；L_1、L_2、L_3 可视为“非孔非轴”。

能力训练 2：零件的实际尺寸越接近公称尺寸，零件的精度越高。这句话对吗？

分析指导：此说法不正确。例如轴径 $\phi 80n7\left(^{+0.050}_{+0.020}\right)$，零件的实际尺寸越接近公称尺寸即约等于 80，它超出了下极限尺寸范围，此零件不合格，更谈不上精度高低了。因此，不是零件的实际尺寸越接近公称尺寸，零件的精度越高，而是零件的加工误差越小，零件的精度越高。

能力训练 3：计算并画出公差带图。

【例 3-1】　若某配合孔的尺寸为 $\phi 50^{+0.007}_{-0.018}$ mm，轴的尺寸为 $\phi 50^{0}_{-0.016}$ mm，试分别计算其极限间隙或极限过盈、配合公差，并画出其孔、轴公差带图，说明其配合性质。

解：1）画公差带图，如图 3-11 所示。

由图可知：此孔与轴的配合为过渡配合。

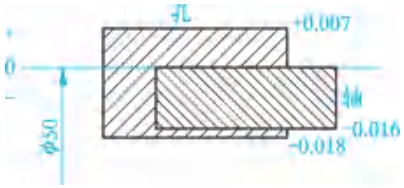


图 3-11　【例 3-1】公差带图

2）计算：配合公差 $T_f=T_h+T_s=|+0.007-(-0.018)|\text{mm}+|0-(-0.016)|\text{mm}=0.041\text{ mm}$

最大间隙 $X_{max}=ES-ei=+0.007\text{ mm}-(-0.016)\text{mm}=+0.023\text{ mm}$

最大过盈 $Y_{max}=EI-es=-0.018\text{ mm}-0\text{ mm}=-0.018\text{ mm}$

【例 3-2】　已知某配合的基本尺寸为 $\phi 80$ mm，配合公差 $T_f=49\ \mu m$，最大间隙 $X_{max}=19\ \mu m$。孔的公差带 $T_h=30\ \mu m$，轴的下偏差 $ei=+11\ \mu m$。试画出该配合的尺寸公差带图和配合公差带图，说明配合的类型。

解：1）计算极限偏差。

据 $T_f=T_h+T_s$ 得：$T_s=T_f-T_h=(49-30)\mu m=19\ \mu m$

又据 $X_{max}=ES-ei$ 得：$ES=X_{max}+ei=(19+11)\mu m=+30\ \mu m$

则：$EI=ES-T_h=(+30-30)\mu m=0\ \mu m$

$es=ei+T_s=(+11+19)\mu m=30\ \mu m$

2）画公差带图，如图 3-12 所示。

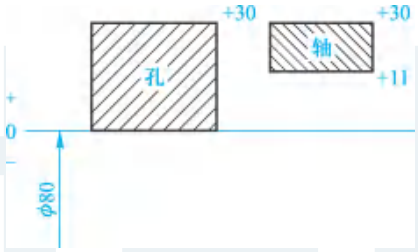


图 3-12　【例 3-2】公差带图

由图可知：此孔与轴配合为过渡配合。

3）画配合公差带图，如图 3-13 所示。

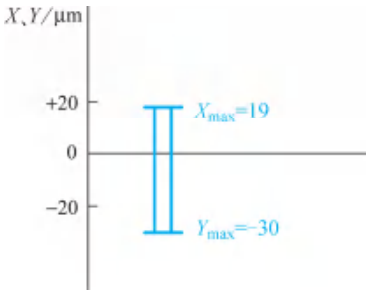


图 3-13　【例 3-2】配合公差带图

计算 $Y_{max}=EI-es=(0-30)\mu m=-30\ \mu m$

能力训练任务

能力训练任务 1：分析尺寸偏差与尺寸公差的不同。

能力训练任务 2：在某配合中，已知孔的尺寸标注为 $\phi 20^{+0.013}_{0}$ mm，$X_{max}=+0.011$ mm，$T_f=0.022$ mm，求出轴的上、下极限偏差。

任务 2　牢固掌握标准公差、基本偏差系列、公差带代号与配合代号

理论知识要点

2.1　标准公差

2.1.1　标准公差概念及等级

微课

标准公差

(1) 标准公差

标准公差指国家标准(GB/T 1800.1)极限与配合制中所规定的任一公差。其代号由 IT(国际公差，ISO Tolerancer 的缩写)和阿拉伯数字组成，如 IT8。标准公差确定了公差带的大小。

(2) 标准公差等级

标准公差等级是指确定尺寸精确程度的等级。国家标准(GB/T 1800.1)将标准公差等级规定为 20 个等级，依次为 IT01、IT0、IT1、IT2、…、IT18 等级 ，IT01 精度最高，IT18 精度最低。

一般来说，在机械制造中，IT8 为中等精度，常用的高精度有 IT7、IT6、IT5 等，常用的低精度有 IT9、IT10、IT11、IT12、IT13 等。

规定和划分标准公差等级的目的是使规定的等级既能满足不同的使用要求，又能大致代表各种加工方法的精度，从而既有利于设计，又有利于制造。

(3) 尺寸分段

实践证明，公差等级相同而基本尺寸相近的公差数值差别不大。因此，为简化公差数值表格，便于使用，国家标准(GB/T 1800.1)将不大于 500 mm 的公称尺寸分成 13 个尺寸段，这样的尺寸段称为主段落。但考虑到某些配合(如过盈配合)对尺寸变化很敏感，故有的主段落又分成 2～3 个中间段落，如表 3-1 所示。

表 3-1　尺寸≤500 mm 的尺寸分段　　mm

主段落		中间段落		主段落		中间段落		主段落		中间段落	
大于	至	大于	至	大于	至	大于	至	大于	至	大于	至
—	3			30	50	30 40	40 50	180	250	180 200 225	200 225 250
3	6										
6	10			50	80	50 65	65 80	250	315	250 280	280 315
10	18	10 14	14 18	80	120	80 100	100 120	315	400	315 355	355 400
18	30	18 24	24 30	120	180	120 140 160	140 160 180	400	500	400 450	450 500

2.1.2　标准公差数值

标准公差数值的大小与公差等级和基本尺寸有关。它是通过标准公差计算公式算出并经过圆整得到的，可分三类。

1）IT5～IT18 的公差值的计算。计算公式为

$$IT=aiI$$

式中：IT——标准公差；

a——公差等级系数（见表 3-2）；

i——公称尺寸不大于 500 mm 范围内的标准公差因子（见表 3-3）；

I——公称尺寸大于 500 mm 时的标准公差因子。

表 3-2　IT5～IT18 的公差等级系数 a

公差等级	IT5	IT6	IT7	IT8	IT9	IT10	IT11	IT12	IT13	IT14	IT15	IT16	IT17	IT18
a	7	10	16	25	40	64	100	160	250	400	640	1 000	1 600	2 500

表 3-3　尺寸≤500 mm 的公差因子 i 的值

尺寸段 D/mm	1～3	>3～6	>6～10	>10～18	>18～30	>30～50	>50～80	>80～120	>120～180	>180～250	>250～315	>315～400	>400～500
i/μm	0.54	0.73	0.90	1.08	1.31	1.56	1.86	2.17	2.52	2.90	3.23	3.54	3.89

2）高精度 IT01、IT0、IT1，公差值比较小，主要考虑测量误差的影响，其公差值的计算采用线性关系式：$IT=A+BD$，D 为公称尺寸，常数 A 和系数 B 均采用优先数系的派生系列 R10/2。

3）IT2～IT4，其公差值是在 IT1 与 IT5 之间按等比级数插入的，即 $IT2=IT1\times q$，IT3=

IT1×q^2，…，其公比 $q=\left[\frac{IT5}{IT1}\right]^{\frac{1}{4}}$。

分析表 3-4，可得出以下一些特点：

① 在 IT5～IT18 间，对于同一公差等级，属于同一尺寸段的公称尺寸，公差值相等；

② 属于不同尺寸段的公称尺寸，公差值不等，公称尺寸越大，公差值越大；

③ 对于同一公差等级，公称尺寸不同的零件均被认为具有同等的精确程度和加工难易程度。

表 3-4　标准公差数值表（摘自 GB/T 1800.1）

公称尺寸/mm		标准公差等级																	
		IT1	IT2	IT3	IT4	IT5	IT6	IT7	IT8	IT9	IT10	IT11	IT12	IT13	IT14	IT15	IT16	IT17	IT18
大于	至	μm											mm						
—	3	0.8	1.2	2	3	4	6	10	14	25	40	60	0.1	0.14	0.25	0.4	0.6	1	1.4
3	6	1	1.5	2.5	4	5	8	12	18	30	48	75	0.12	0.18	0.3	0.48	0.75	1.2	1.8
6	10	1	1.5	2.5	4	6	9	15	22	36	58	90	0.15	0.22	0.36	0.58	0.9	1.5	2.2
10	18	1.2	2	3	5	8	11	18	27	43	70	110	0.18	0.27	0.43	0.7	1.1	1.8	2.7
18	30	1.5	2.5	4	6	9	13	21	33	52	84	130	0.21	0.33	0.52	0.84	1.3	2.1	3.3
30	50	1.5	2.5	4	7	11	16	25	39	62	100	160	0.25	0.39	0.62	1	1.6	2.5	3.9
50	80	2	3	5	8	13	19	30	46	74	120	190	0.3	0.46	0.74	1.2	1.9	3	4.6
80	120	2.5	4	6	10	15	22	35	54	87	140	220	0.35	0.54	0.87	1.4	2.2	3.5	5.4
120	180	3.5	5	8	12	18	25	40	63	100	160	250	0.4	0.63	1	1.6	2.5	4	6.3
180	250	4.5	7	10	14	20	29	46	72	115	185	290	0.46	0.72	1.15	1.85	2.9	4.6	7.2
250	315	6	8	12	16	23	32	52	81	130	210	320	0.52	0.81	1.3	2.1	3.2	5.2	8.1
315	400	7	9	13	16	25	36	57	89	140	230	360	0.57	0.89	1.4	2.3	3.56	5.7	8.9
400	500	8	10	15	20	27	40	63	97	155	250	400	0.63	0.97	1.55	2.5	4	6.3	9.7

注：公称尺寸小于 1 mm 时，无 IT14 至 IT18。

2.2　基本偏差系列

2.2.1　基本偏差

基本偏差是用以确定公差带相对零线位置的那个极限偏差。它可以是上极限偏差或下极限偏差，一般为靠近零线的那个偏差，如图 3-14 所示。

微课

基本偏差系列

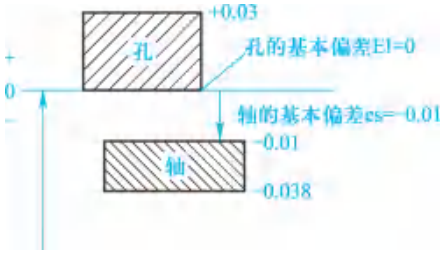


图 3-14　基本偏差

2.2.2　基本偏差的代号、特点

为了满足机器中各种不同性质和不同松紧程度的配合，国家标准对孔与轴分别规定了 28 个基本偏差。

(1) 代号

基本偏差的代号用拉丁字母(按英文读音)表示，孔大写、轴小写。在 26 个拉丁字母中去掉容易与其他含义混淆的 5 个字母：I、L、O、Q、W(i、l、o、q、w)，同时增加 7 个双字母：CD、EF、FG、JS、ZA、ZB、ZC(cd、ef、fg、js、za、zb、zc)，如图 3-15 所示。

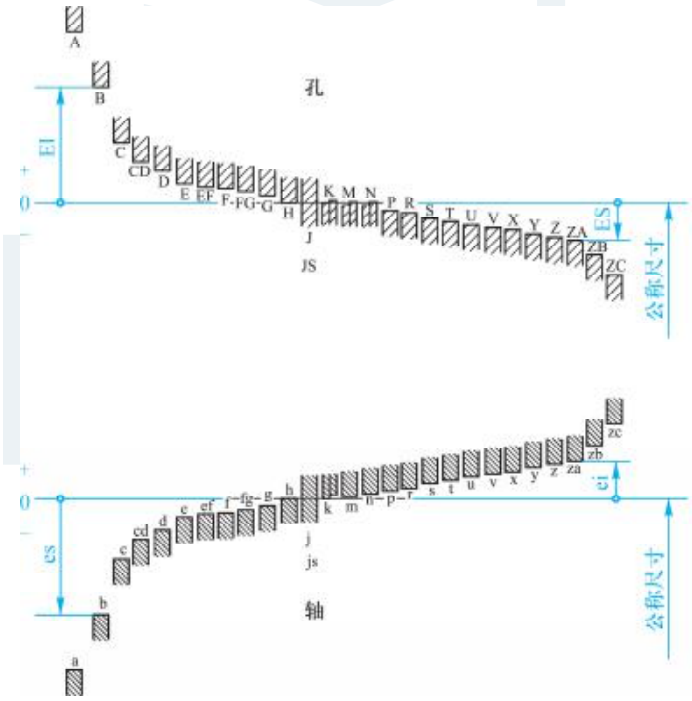


图 3-15　基本偏差系列图

(2) 特点

1) 对所有公差带，当位于零线上方时，基本偏差为下极限偏差；当位于零线下方时，基本偏差为上极限偏差。具体而言之，孔的基本偏差从 A 到 H 为下极限偏差 EI，且为正值(或零)；从 J 到 ZC 为上极限偏差，且为负值(除 J、K 外)。轴的基本偏差从 a 到 h 为上极限偏差

es，且为负值（或零）；从 j 到 zc 为下极限偏差 ei，且为正值（除 j 外）。

2）在各个公差等级中，JS 与 js 形成的公差带完全对称于零线，故上极限偏差为$+\frac{IT}{2}$或下极限偏差为$-\frac{IT}{2}$，均可为基本偏差。

3）孔的基本偏差的确定

① 通用规则　同一字母的孔和轴的基本偏差的符号相反，而绝对值相等，即 EI＝－es 或 ES＝－ei。

② 特殊规则　同一字母的孔和轴的基本偏差的符号相反，而绝对值相差一个 Δ 值，即 ES＝－ei＋Δ，$\Delta=T_h-T_s=IT n-IT(n-1)$，这是因为国家标准规定在较高公差等级中，按孔比轴低一级来考虑配合，且要求两种基准制中同名的配合其配合性质相同。此式适用于 3 mm＜公称尺寸≤500 mm，标准公差≤IT8 的 J～N 和标准公差≤IT7 的 P～ZC。

2.2.3　基本偏差数值表

表 3-5 为轴的基本偏差数值表（摘自 GB/T 1800.1）。

表 3-6 为孔的基本偏差数值表（摘自 GB/T 1800.1）。

2.3　公差带代号、配合代号及其标注

2.3.1　公差带代号

微课

公差带代号、配合代号及其标注

（1）公差带代号

公差带代号由基本偏差代号及公差等级数字组成。如图 3-1 所示的减速器输出轴上标注的 ϕ45m6、ϕ55j6、ϕ56r6 中的 m6、j6、r6 等。

公差带代号在零件图上的标注方法分别为：①代号标注，如图 3-16a 所示；②数值标注，如图 3-16b 所示；③混合标注，如图 3-16c 所示。另外，还有对称偏差标注，如 ϕ10js5（±0.003）。

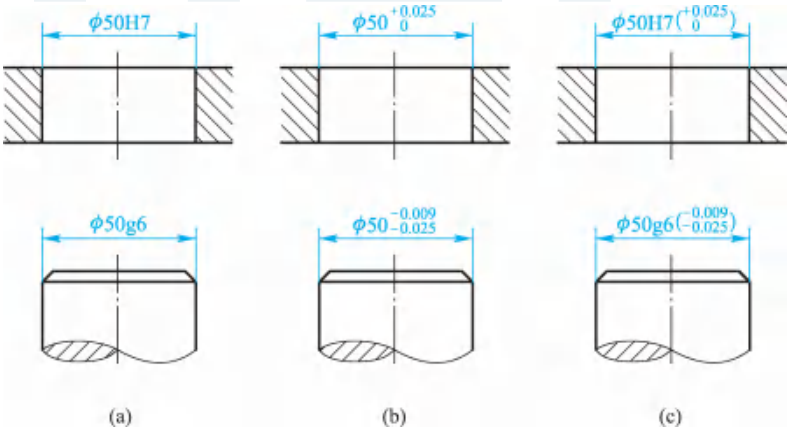


图 3-16　孔、轴公差带代号的标注方法

表 3-5　轴的基本偏差数值

公称尺寸/mm		上极限偏差 es												基本			
		所有标准公差等级												IT5 和 IT6	IT7	IT8	IT4 至 IT7
大于	至	a	b	c	cd	d	e	ef	f	fg	g	h	js	j			k
—	3	−270	−140	−60	−34	−20	−14	−10	−6	−4	−2	0	偏差=±ITn/2，式中ITn是IT数值	−2	−4	−6	0
3	6	−270	−140	−70	−46	−30	−20	−14	−10	−6	−4	0		−2	−4		+1
6	10	−280	−150	−80	−56	−40	−25	−18	−13	−8	−5	0		−2	−5		+1
10	14	−290	−150	−95		−50	−32		−16		−6	0		−3	−6		+1
14	18																
18	24	−300	−160	−110		−65	−40		−20		−7	0		−4	−8		+2
24	30																
30	40	−310	−170	−120		−80	−50		−25		−9	0		−5	−10		+2
40	50	−320	−180	−130													
50	65	−340	−190	−140		−100	−60		−30		−10	0		−7	−12		+2
65	80	−360	−200	−150													
80	100	−380	−220	−170		−120	−72		−36		−12	0		−9	−15		+3
100	120	−410	−240	−180													
120	140	−460	−260	−200		−145	−85		−43		−14	0		−11	−18		+3
140	160	−520	−280	−210													
160	180	−580	−310	−230								0					
180	200	−660	−340	−240		−170	−100		−50		−15			−13	−21		+4
200	225	−740	−380	−260								0					
225	250	−820	−420	−280													
250	280	−920	−480	−300		−190	−110		−56		−17	0		−16	−26		+4
280	315	−1050	−540	−330													
315	355	−1200	−600	−360		−210	−125		−62		−18	0		−18	−28		+4
355	400	−1350	−680	−400													
400	450	−1500	−760	−440		−230	−135		−68		−20	0		−20	−32		+5
450	500	−1650	−840	−480													
500	560					−260	−145		−76		−22	0					0
560	630																
630	710					−290	−160		−80		−24	0					0
710	800																
800	900					−320	−170		−86		−26	0					0
900	1000																
1000	1120					−350	−195		−98		−28	0					0
1120	1250																
1250	1400					−390	−220		−110		−30	0					0
1400	1600																
1600	1800					−430	−240		−120		−32	0					0
1800	2000																
2000	2240					−480	−260		−130		−34	0					0
2240	2500																
2500	2800					−520	−290		−145		−38	0					0
2800	3150																

注：1. 公称尺寸小于或等于 1 mm 时，基本偏差 a 和 b 均不采用。

2. 公差带 js7 至 js11，若 ITn 数值是奇数，则取偏差 $=\pm\frac{IT(n-1)}{2}$。

（摘自 GB/T 1800.1）

μm

偏差数值														
下极限偏差 ei														
≤IT3 >IT7	所有标准公差等级													
k	m	n	p	r	s	t	u	v	x	y	z	za	zb	zc
0	+2	+4	+6	+10	+14		+18		+20		+26	+32	+40	+60
0	+4	+8	+12	+15	+19		+23		+28		+35	+42	+50	+80
0	+6	+10	+15	+19	+23		+28		+34		+42	+52	+67	+97
0	+7	+12	+18	+23	+28		+33		+40		+50	+64	+90	+130
								+39	+45		+60	+77	+108	+150
0	+8	+15	+22	+28	+35		+41	+47	+54	+63	+73	+98	+136	+188
						+41	+48	+55	+64	+75	+88	+118	+160	+218
0	+9	+17	+26	+34	+43	+48	+60	+68	+80	+94	+112	+148	+200	+274
						+54	+70	+81	+97	+114	+136	+180	+242	+325
0	+11	+20	+32	+41	+53	+66	+87	+102	+122	+144	+172	+226	+300	+405
				+43	+59	+75	+102	+120	+146	+174	+210	+274	+360	+480
0	+13	+23	+37	+51	+71	+91	+124	+146	+178	+214	+258	+335	+445	+585
				+54	+79	+104	+144	+172	+210	+254	+310	+400	+525	+690
0	+15	+27	+43	+63	+92	+122	+170	+202	+248	+300	+365	+470	+620	+800
				+65	+100	+134	+190	+228	+280	+340	+415	+535	+700	+900
				+68	+108	+146	+210	+252	+310	+380	+465	+600	+780	+1000
0	+17	+31	+50	+77	+122	+166	+236	+284	+350	+425	+520	+670	+880	+1150
				+80	+130	+180	+258	+310	+385	+470	+575	+740	+960	+1250
				+84	+140	+196	+284	+340	+425	+520	+640	+820	+1050	+1350
0	+20	+34	+56	+94	+158	+218	+315	+385	+475	+580	+710	+920	+1200	+1550
				+98	+170	+240	+350	+425	+525	+650	+790	+1000	+1300	+1700
0	+21	+37	+62	+108	+190	+268	+390	+475	+590	+730	+900	+1150	+1500	+1900
				+114	+208	+294	+435	+530	+660	+820	+1000	+1300	+1650	+2100
0	+23	+40	+68	+126	+232	+330	+490	+595	+740	+920	+1100	+1450	+1850	+2400
				+132	+252	+360	+540	+660	+820	+1000	+1250	+1600	+2100	+2600
0	+26	+44	+78	+150	+280	+400	+600							
				+155	+310	+450	+660							
0	+30	+50	+88	+175	+340	+500	+740							
				+185	+380	+560	+840							
0	+34	+56	+100	+210	+430	+620	+940							
				+220	+470	+680	+1050							
0	+40	+66	+120	+250	+520	+780	+1150							
				+260	+580	+840	+1300							
0	+48	+78	+140	+300	+640	+960	+1450							
				+330	+720	+1050	+1600							
0	+58	+92	+170	+370	+820	+1200	+1850							
				+400	+920	+1350	+2000							
0	+68	+110	+195	+440	+1000	+1500	+2300							
				+460	+1100	+1650	+2500							
0	+76	+135	+240	+550	+1250	+1900	+2900							
				+580	+1400	+2100	+3200							

表 3-6　孔的基本偏差

公称尺寸/mm		下极限偏差 EI												基本偏差								
		所有标准公差等级												IT6	IT7	IT8	≤IT8	>IT8	≤IT8	>IT8	≤IT8	>IT8
大于	至	A	B	C	CD	D	E	EF	F	FG	G	H	JS	J			K		M		N	
—	3	+270	+140	+60	+34	+20	+14	+10	+6	+4	+2	0	偏差=±ITn/2，式中ITn是IT数值	+2	+4	+6	0	0	−2	−2	−4	−4
3	6	+270	+140	+70	+46	+30	+20	+14	+10	+6	+4	0		+5	+6	+10	−1+Δ		−4+Δ	−4	−8+Δ	0
6	10	+280	+150	+80	+56	+40	+25	+18	+13	+8	+5	0		+5	+8	+12	−1+Δ		−6+Δ	−6	−10+Δ	0
10	14	+290	+150	+95		+50	+32		+16		+6	0		+6	+10	+15	−1+Δ		−7+Δ	−7	−12+Δ	0
14	18											0										
18	24	+300	+160	+110		+65	+40		+20		+7	0		+8	+12	+20	−2+Δ		−8+Δ	−8	−15+Δ	0
24	30											0										
30	40	+310	+170	+120		+80	+50		+25		+9	0		+8	+14	+24	−2+Δ		−9+Δ	−9	−17+Δ	0
40	50	+320	+180	+130								0										
50	65	+340	+190	+140		+100	+60		+30		+10	0		+10	+18	+28	−2+Δ		−11+Δ	−11	−20+Δ	0
65	80	+360	+200	+150								0										
80	100	+380	+220	+170		+120	+72		+36		+12	0		+13	+22	+34	−3+Δ		−13+Δ	−13	−23+Δ	0
100	120	+410	+240	+180								0										
120	140	+460	+260	+200		+145	+85		+43		+14	0		+16	+26	+41	−3+Δ		−15+Δ	−15	−27+Δ	0
140	160	+520	+280	+210								0										
160	180	+580	+310	+230								0										
180	200	+660	+340	+240		+170	+100		+50		+15	0		+18	+30	+47	−4+Δ		−17+Δ	−17	−31+Δ	0
200	225	+740	+380	+260								0										
225	250	+820	+420	+280								0										
250	280	+920	+480	+300		+190	+110		+56		+17	0		+22	+36	+55	−4+Δ		−20+Δ	−20	−34+Δ	0
280	315	+1050	+540	+330								0										
315	355	+1200	+600	+360		+210	+125		+62		+18	0		+25	+39	+60	−4+Δ		−21+Δ	−21	−37+Δ	0
355	400	+1350	+680	+400								0										
400	450	+1500	+760	+440		+230	+135		+68		+20	0		+29	+43	+66	−5+Δ		−23+Δ	−23	−40+Δ	0
450	500	+1650	+840	+480								0										
500	560					+260	+145		+76		+22	0		+33			0		−26		−44	
560	630											0										
630	710					+290	+160		+80		+24	0					0		−30		−50	
710	800											0										
800	900					+320	+170		+86		+26	0					0		−34		−56	
900	1000											0										
1000	1120					+350	+195		+98		+28	0					0		−40		−66	
1120	1250											0										
1250	1400					+390	+220		+110		+30	0					0		−48		−78	
1400	1600											0										
1600	1800					+430	+240		+120		+32	0					0		−58		−92	
1800	2000											0										
2000	2240					+480	+260		+130		+34	0					0		−68		−110	
2240	2500											0										
2500	2800					+520	+290		+145		+38	0					0		−76		−135	
2800	3150											0										

注：1. 公称尺寸小于或等于 1 mm 时，基本偏差 A 和 B 及大于 IT8 的 N 均不采用。

2. 公差带 JS7 至 JS11，若 ITn 数值是奇数，则取偏差$=\pm\frac{IT(n-1)}{2}$。

3. 对小于或等于 IT8 的 K、M、N 和小于或等于 IT7 的 P 至 ZC，所需 Δ 值从表内右侧选取。例如 18～30 mm 段的 K7：Δ＝8 μm，所以 ES＝(−2＋8)μm＝＋6 μm；18～30 mm 段的 S6：Δ＝4 μm，所以 ES＝(−35＋4)μm＝−31 μm。

4. 特殊情况：250～315 mm 段的 M6，ES＝−9 μm(代替−11 μm)。

（摘自 GB/T 1800.1）

μm

数值													Δ 值					
上极限偏差 ES																		
≤IT7	标准公差等级大于 IT7												标准公差等级					
P 至 ZC	P	R	S	T	U	V	X	Y	Z	ZA	ZB	ZC	IT3	IT4	IT5	IT6	IT7	IT8
在大于 IT7 的相应数值上增加一个 Δ 值	−6	−10	−14		−18		−20		−26	−32	−40	−60	0	0	0	0	0	0
	−12	−15	−19		−23		−28		−35	−42	−50	−80	1	1.5	1	3	4	6
	−15	−19	−23		−28		−34		−42	−52	−67	−97	1	1.5	2	3	6	7
	−18	−23	−28		−33		−40		−50	−64	−90	−130	1	2	3	3	7	9
						−39	−45		−60	−77	−108	−150						
	−22	−28	−35		−41	−47	−54	−63	−73	−98	−136	−188	1.5	2	3	4	8	12
				−41	−48	−55	−64	−75	−88	−118	−160	−218						
	−26	−34	−43	−48	−60	−68	−80	−94	−112	−148	−200	−274	1.5	3	4	5	9	14
				−54	−70	−81	−97	−114	−136	−180	−242	−325						
	−32	−41	−53	−66	−87	−102	−122	−144	−172	−226	−300	−405	2	3	5	6	11	16
		−43	−59	−75	−102	−120	−146	−174	−210	−274	−360	−480						
	−37	−51	−71	−91	−124	−146	−178	−214	−258	−335	−445	−585	2	4	5	7	13	19
		−54	−79	−104	−144	−172	−210	−254	−310	−400	−525	−690						
	−43	−63	−92	−122	−170	−202	−248	−300	−365	−470	−620	−800	3	4	6	7	15	23
		−65	−100	−134	−190	−228	−280	−340	−415	−535	−700	−900						
		−68	−108	−146	−210	−252	−310	−380	−465	−600	−780	−1000						
	−50	−77	−122	−166	−236	−284	−350	−425	−520	−670	−880	−1150	3	4	6	9	17	26
		−80	−130	−180	−258	−310	−385	−470	−575	−740	−960	−1250						
		−84	−140	−196	−284	−340	−425	−520	−640	−820	−1050	−1350						
	−56	−94	−158	−218	−315	−385	−475	−580	−710	−920	−1200	−1550	4	4	7	9	20	29
		−98	−170	−240	−350	−425	−525	−650	−790	−1000	−1300	−1700						
	−62	−108	−190	−268	−390	−475	−590	−730	−900	−1150	−1500	−1900	4	5	7	11	21	32
		−114	−208	−294	−435	−530	−660	−820	−1000	−1300	−1650	−2100						
	−68	−126	−232	−330	−490	−595	−740	−920	−1100	−1450	−1850	−2400	5	5	7	13	23	34
		−132	−252	−360	−540	−660	−820	−1000	−1250	−1600	−2100	−2600						
	−78	−150	−280	−400	−600													
		−155	−310	−450	−660													
	−88	−175	−340	−500	−740													
		−185	−380	−560	−840													
	−100	−210	−430	−620	−940													
		−220	−470	−680	−1050													
	−120	−250	−520	−780	−1150													
		−260	−580	−840	−1300													
	−140	−300	−640	−960	−1450													
		−330	−720	−1050	−1600													
	−170	−370	−820	−1200	−1850													
		−400	−920	−1350	−2000													
	−195	−440	−1000	−1500	−2300													
		−460	−1100	−1650	−2500													
	−240	−550	−1250	−1900	−2900													
		−580	−1400	−2100	−3200													

（2）一般、常用和优先公差带代号

国家标准规定的标准公差有 20 个等级，而孔、轴基本偏差各有 28 个，可组合成 543 个孔公差带和 544 个轴公差带，由此又可组成近 30 万种配合。为了简化和统一，以利于互换，并尽可能减少刀具、量具的品种和规格，GB/T 1801 规定了公称尺寸≤500 mm 的轴：一般公差带 116 种、常用公差带 59 种（方框内）、优先公差带 13 种（彩色的），如图 3-17 所示。GB/T 1801 规定了公称尺寸≤500 mm 的孔：一般公差带 105 种、常用公差带 44 种（方框内）、优先公差带 13 种（彩色的），如图 3-18 所示。

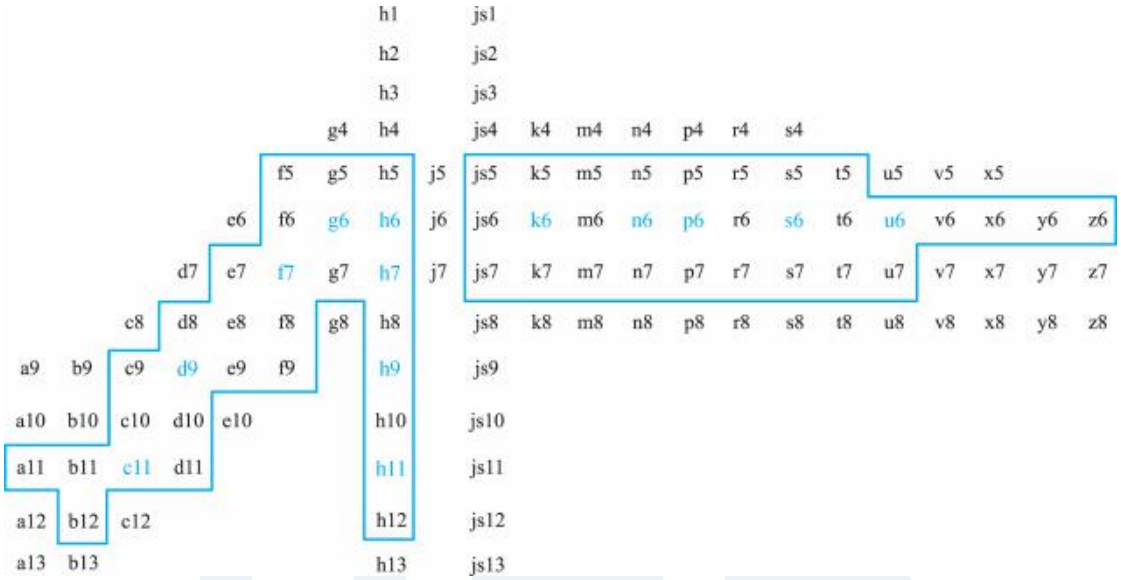


图 3-17　一般、常用和优先轴的公差带

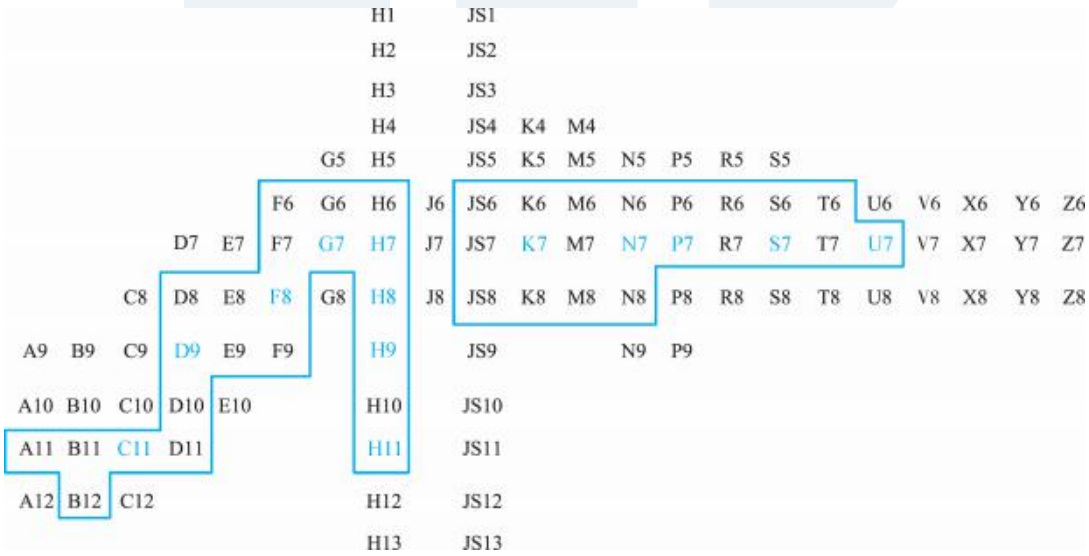


图 3-18　一般、常用和优先孔的公差带

2.3.2　配合代号

(1) 配合代号

配合代号用孔、轴公差带组合表示成分数，在装配图上标注，如图 3-19 所示。

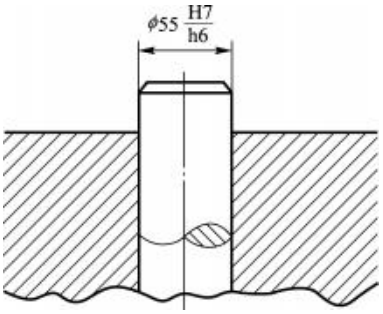


图 3-19　配合代号的表示方法

配合代号在装配图上的标注方法分别为：

① $\phi 55\ \frac{H7}{h6}$ 或 $\phi 55H7/h6$；

② $\phi 55\ \frac{H7\left(^{+0.030}_{0}\right)}{h6\left(^{0}_{-0.019}\right)}$ 或 $\phi 55H7\left(^{+0.030}_{0}\right)/h6\left(^{0}_{-0.019}\right)$；

③ $\phi 55\ \frac{\left(^{+0.030}_{0}\right)}{\left(^{0}_{-0.019}\right)}$ 或 $\phi 55\left(^{+0.030}_{0}\right)/\left(^{0}_{-0.19}\right)$。

前一种应用最广，后两种一般分别用于批量生产和单件小批生产。

微课

基准制

(2) 基准制

一种零件的基本偏差(公差带位置)不变，而只改变另一种零件的基本偏差(公差带位置)，以获得不同的配合性质称为“基准制”，又称“配合制”。它分为基孔制和基轴制，如图 3-20 所示。

基孔制：基本偏差固定不变的孔的公差带与不同基本偏差轴的公差带形成的各种配合。其基本偏差为 H。

$$\text{基孔制}\begin{cases}\text{孔——基准件(上极限偏差}+\text{IT，下极限偏差 0)}\\ \text{轴——非基准件}\end{cases}$$

基轴制：基本偏差固定不变的轴的公差带与不同基本偏差孔的公差带形成的各种配合。其基本偏差为 h。

$$\text{基轴制}\begin{cases}\text{孔——非基准件}\\ \text{轴——基准件(上极限偏差 0，下极限偏差}-\text{IT)}\end{cases}$$

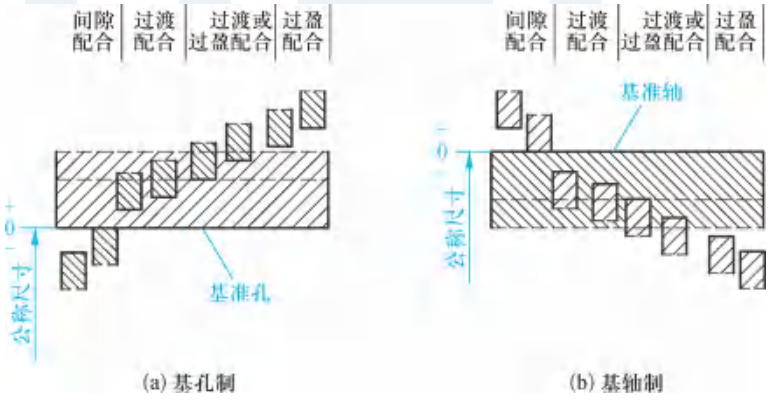


图 3-20　基准制

（3）常用和优先配合代号

GB/T 1801 规定了基孔制常用配合 59 种，优先配合 13 种，见表 3-7；基轴制常用配合 47 种，优先配合 13 种，见表 3-8。

表 3-7　基孔制常用和优先配合（摘自 GB/T 1801）

基准孔	轴																				
	a	b	c	d	e	f	g	h	js	k	m	n	p	r	s	t	u	v	x	y	z
	间隙配合								过渡配合			过盈配合									
H6						H6/f5	H6/g5	H6/h5	H6/js5	H6/k5	H6/m5	H6/n5	H6/p5	H6/r5	H6/s5	H6/t5					
H7						H7/f6	H7/g6	H7/h6	H7/js6	H7/k6	H7/m6	H7/n6	H7/p6	H7/r6	H7/s6	H7/t6	H7/u6	H7/v6	H7/x6	H7/y6	H7/z6
H8					H8/e7	H8/f7	H8/g7	H8/h7	H8/js7	H8/k7	H8/m7	H8/n7	H8/p7	H8/r7	H8/s7	H8/t7	H8/u7				
H8				H8/d8	H8/e8	H8/f8		H8/h8													
H9			H9/c9	H9/d9	H9/e9	H9/f9		H9/h9													
H10			H10/c10	H10/d10				H10/h10													
H11	H11/a11	H11/b11	H11/c11	H11/d11				H11/h11													
H12		H12/b12						H12/h12													

注：用彩色表示的配合为优先配合。

表 3-8　基轴制常用和优先配合（摘自 GB/T 1801）

基准轴	孔																				
	A	B	C	D	E	F	G	H	JS	K	M	N	P	R	S	T	U	V	X	Y	Z
	间隙配合								过渡配合			过盈配合									
h5						F6/h5	G6/h5	H6/h5	JS6/h5	K6/h5	M6/h5	N6/h5	P6/h5	R6/h5	S6/h5	T6/h5					
h6						F7/h6	G7/h6	H7/h6	JS7/h6	K7/h6	M7/h6	N7/h6	P7/h6	R7/h6	S7/h6	T7/h6	U7/h6				
h7					E8/h7	F8/h7		H8/h7	JS8/h7	K8/h7	M8/h7	N8/h7									
h8				D8/h8	E8/h8	F8/h8		H8/h8													
h9				D9/h9	E9/h9	F9/h9		H9/h9													
h10				D10/h10				H10/h10													
h11	A11/h11	B11/h11	C11/h11	D11/h11				H11/h11													
h12		B12/h12						H12/h12													

注：用彩色表示的配合为优先配合。

(4) 同名配合

对于两个配合，一个为基孔制(或基轴制)，另一个必为基轴制(或基孔制)，它们的基本偏差代号相对应，孔、轴公差等级同级或孔比轴低一级，这样的配合称为同名配合。如 $\phi 40\,\dfrac{\mathrm{H7}}{\mathrm{m6}}$ 与 $\phi 40\,\dfrac{\mathrm{M7}}{\mathrm{h6}}$ 为同名配合。

同名配合的配合性质是否相同，主要分为以下两种情形：

① 所有基孔制或基轴制的同名的间隙配合，其配合性质相同。

② 基孔制或基轴制的同名的过渡配合和过盈配合，只有公差等级组合符合国家标准在换算孔的基本偏差时的规定，配合性质才能相同。即

$D\leqslant 500$ mm 的>IT8 的 K、M、N 以及>IT7 的 P～ZC，还有 $D>500$ mm、$D<3$ mm 的所有 J～ZC 形成配合时，必须采用孔、轴同级。

$D\leqslant 500$ mm 的≤IT8 的 J、K、M、N 以及≤IT7 的 P～ZC 形成配合时，必须采用孔比轴低一级。

2.4　一般公差尺寸

微课

一般公差尺寸

一般公差是指在车间一般加工条件下可以保证的公差。它是机床在正常维护和操作下，可达到的经济加工精度。

一般公差规定了四个等级：f(精密级)、m(中等级)、c(粗糙级)、v(最粗级)。这 4 个公差等级相当于 IT12、IT14、IT16 和 IT17。凡未注公差的线性尺寸(包含倒圆半径与倒角高度)均按 m(中等级)加工和检验，在图样上或技术文件中可表示为 GB/T 1804—m，见表 3-9。

表 3-9　线性尺寸的未注极限偏差数值(摘自 GB/T 1804)　　mm

公差等级	尺寸分段							
	0.5～3	>3～6	>6～30	>30～120	>120～400	>400～1000	>1000～2000	>2000～4000
f(精密级)	±0.05	±0.05	±0.1	±0.15	±0.2	±0.3	±0.5	—
m(中等级)	±0.1	±0.1	±0.2	±0.3	±0.5	±0.8	±1.2	±2
c(粗糙级)	±0.2	±0.3	±0.5	±0.8	±1.2	±2	±3	±4
v(最粗级)	—	±0.5	±1	±1.5	±2.5	±4	±6	±8

一般公差尺寸就是只标注公称尺寸、不标注公差的尺寸(如 $\phi 55$ mm、255 mm)，又称为“自由尺寸”或“未注公差尺寸”。

一般公差的线性尺寸主要用于不重要的、较低精度的非配合尺寸及以工艺方法可保证的尺寸，它可以简化制图，节约设计与检验时间，突出重要尺寸。

能力训练指导

能力训练 1：通过两查一算（即查标准公差数值表、基本偏差数值表，计算另一极限偏差），查算出减速器输出轴上的 $\phi45m6$ 的极限偏差。

分析指导：

（1）查表 3-4 确定轴径 $\phi45m6$ 的标准公差：IT6＝16 μm。

（2）查表 3-5 确定轴径 $\phi45m6$ 的基本偏差：其基本偏差为下极限偏差 ei＝＋9 μm。

（3）计算轴径 $\phi45m6$ 的上极限偏差：依据公式 $T_s=|d_{max}-d_{min}|=|es-ei|$，得

$$es=T_s+ei=IT+ei=16\ \mu m+9\ \mu m=25\ \mu m$$

故 $\phi45m6$ 的极限偏差为 $\phi45^{+0.025}_{+0.009}$ mm。

能力训练 2：已知 $\phi60H7(^{+0.030}_{0})/p6(^{+0.051}_{+0.032})$，求 $\phi60P7/h6$ 的孔与轴的上、下极限偏差，查表验证。

分析指导：

因 IT7＝|＋0.030－0|mm＝0.030 mm，IT6＝|＋0.051－(＋0.032)|mm＝0.019 mm

$\phi60P7$ 满足特殊规则，则 Δ＝IT7－IT6＝(0.030－0.019)mm＝0.011 mm

故 ES＝－ei＋Δ＝(－0.032＋0.011)mm＝－0.021 mm＝－21 μm

EI＝ES－IT7＝(－0.021－0.030)mm＝－0.051 mm＝－51 μm

$\phi60h6$：es＝0 μm，ei＝es－IT6＝(0－0.019)mm＝－0.019 mm＝－19 μm

查表验证：两查一算。

① 查标准公差数值表 3-4 知：IT7＝30 μm，IT6＝19 μm

② 查孔 P7 基本偏差数值表 3-6 知：ES＝－32 μm＋Δ＝－32 μm＋11 μm＝－21 μm

查轴 h6 基本偏差数值表 3-5 知：es＝0 μm

③ 计算：IT＝|ES－EI|＝|es－ei|

孔 P7：EI＝ES－IT7＝－21 μm－30 μm＝－51 μm

轴 h6：ei＝es－IT6＝0 μm－19 μm＝－19 μm，查表与计算结果一致。

能力训练 3：下面三根轴哪根精度最高？哪根精度最低？

（1）$\phi70^{+0.105}_{+0.075}$；（2）$\phi250^{-0.015}_{-0.044}$；（3）$\phi10^{0}_{-0.022}$

分析指导：要判断三根轴的精度，可分为两种情形：①公称尺寸属于同一尺寸段内的轴、公称尺寸相同的轴，公差值小的，精度就高；②公称尺寸不同的轴，以公差等级作为精度高低的判断依据。

本题三根轴的公称尺寸不同，先要根据公称尺寸和公差值查出各轴的公差等级，再作判断。查表 3-4 知：$\phi70^{+0.105}_{+0.075}$ 为 IT7，$\phi250^{-0.015}_{-0.044}$ 为 IT6，$\phi10^{0}_{-0.022}$ 为 IT8，故 $\phi250^{-0.015}_{-0.044}$ 精度最高。

能力训练 4：判断下列各对同名配合的配合性质是否相同。

（1）$\phi40\dfrac{H9}{f8}$ 与 $\phi40\dfrac{F9}{h8}$；（2）$\phi40\dfrac{H7}{m7}$ 与 $\phi40\dfrac{M7}{h7}$

分析指导：对于两个间隙配合，同名配合的配合性质一定相同。对于两个过渡配合或过盈配合：高精度时，孔的基本偏差用特殊规则换算，孔比轴低一级，同名配合的配合性质才相同；低精度时，孔的基本偏差用通用规则换算，孔、轴必须同级，同名配合的配合性质才相同。所以，①$\phi 40\frac{H9}{f8}$与$\phi 40\frac{F9}{h8}$配合性质相同；②$\phi 40\frac{H7}{m7}$与$\phi 40\frac{M7}{h7}$配合性质不相同。

能力训练任务

能力训练任务 1：已知公差带 $\phi 20H7(^{+0.021}_{0})$，$\phi 20s6(^{+0.048}_{+0.035})$，求 $\phi 20S7$ 的极限偏差（不查表）。

能力训练任务 2：查表确定下列各尺寸的公差带代号：

（1）$\phi 50^{-0.050}_{-0.075}$（轴）；（2）$\phi 65^{+0.005}_{-0.041}$（孔）。

任务 3　掌握公差配合的选用

理论知识要点

正确、合理地选择公差与配合，对产品的使用性能、互换性和经济性有着重要的影响。

公差与配合的选择原则是在满足使用要求的前提下能获得最佳的经济效益。公差与配合的选择方法主要有类比法、计算法和试验法。公差与配合的选择内容主要有基准制的选用、公差等级的选用和配合种类的选用。

3.1　基准制的选用

微课

基准制的选用

基准制的选用要从零件的加工工艺、装配工艺和经济性等方面考虑。

（1）优先选用基孔制

从工艺上看，加工中等尺寸、精度较高的孔通常要用价格较贵的定值刀具（如铰刀），而加工中等尺寸、精度较高的不同轴，可用同一把车刀或同一个砂轮，因此，采用基孔制可减少定值刀具和量具的规格、数量，降低加工成本，提高经济性。

（2）下列情况下应选用基轴制

① 采用具有一定公差等级（IT8～IT11）的冷拉棒材制作轴时，选用基轴制。因其不需再加工，可获较明显的经济效益。这种情况常见于农业机械等行业中。

② 与标准件相配合的孔和轴，应以标准件为基准件来选用基准制。如平键、半圆键等键连接，由于键是标准件，键与键槽的配合应采用基轴制；滚动轴承外圈与箱体孔的配合应采用

基轴制。

③ 根据结构上的需要，同一公称尺寸的轴上装配有不同配合要求的几个孔件时应采用基轴制。如图 3-21 所示，销轴两端与活塞孔的配合为 M6/h5，销轴与轴套孔的配合为 H6/h5，显然它们的配合松紧是不同的，此时应当采用基轴制。

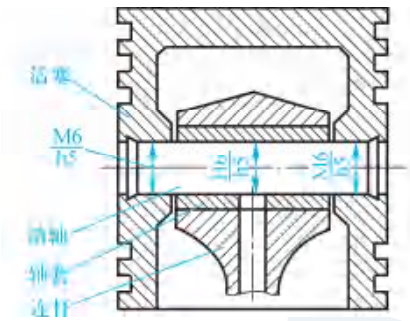


图 3-21　活塞连杆机构中的孔轴配合

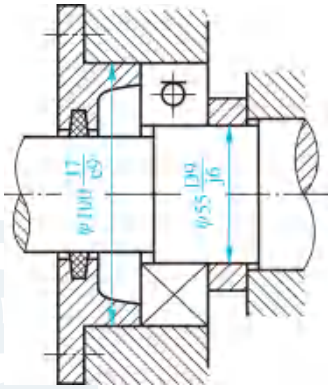


图 3-22　轴承端盖与壳孔、轴套与轴径的配合

(3) 特殊情况下选用非基准制

为了满足配合的特殊需要，允许采用任一孔、轴公差带组成的非基准制配合。

如图 3-22 所示，轴承端盖与壳孔的配合和轴套与轴径的配合分别为 $\phi 100\ \frac{J7}{e9}$ 和 $\phi 55\ \frac{D9}{j6}$，它们既不是基孔制也不是基轴制。壳孔公差带 J7 是它与轴承外圈配合决定的，轴径公差带 j6 是它与轴承内圈配合决定的。为了使轴承端盖与壳孔和轴套与轴径获得更松的配合，前者不能采用基轴制，后者不能采用基孔制，从而决定采用非基准制。

3.2　公差等级的选用

公差等级的选用原则是在满足使用要求的前提下，尽量选取较低的公差等级或较大的公差值。公差等级的选用依据是 $T_h + T_s \leqslant T_f$。公差等级选用的常用方法是类比法。

微课

公差等级的选用

类比法是指参照类似的机构、工作条件和使用要求的经验资料，进行比照，得出一种解决问题方案的方法。采用类比法应考虑以下几点：

① 工艺等价性。孔比同级轴加工困难，成本更高，工艺是不等价的。为了工艺等价，对于公称尺寸≤500 mm、标准公差≤IT8 时，国家标准推荐孔比轴低一级相配合，如 H7/n6；对于公称尺寸>500 mm 或公称尺寸<3 mm 的配合或标准公差>IT8 级时，国家标准推荐孔、轴同级配合，如 H9/e9。

② 相配零件、部件的精度匹配性。例如，与滚动轴承相配合的轴和孔的公差等级与轴承的精度有关。

③ 配合性质。过盈配合、过渡配合的公差等级不能太低，一般孔的标准公差≤IT8，轴的标准公差≤IT7。间隙配合则不受此限制。但间隙小的配合，公差等级应较高。

④ 在非基准制配合中，有的零件精度要求不高，可与相配合零件的公差等级差 2～3 级，如图 3-22 所示的轴承端盖与壳的配合为 $\phi 100\,\dfrac{\mathrm{J7}}{\mathrm{e9}}$。

公差等级的应用见表 3-10。各种加工方法能达到的公差等级见表 3-11。

表 3-10　公差等级的应用

应用场合			公差等级(IT)																			
			01	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
量块				——																		
量规	高精度量规					——	——															
量规	低精度量规									——	——											
配合尺寸	个别特别重要的精密配合				——																	
配合尺寸	特别重要的精密配合	孔						——														
配合尺寸	特别重要的精密配合	轴				——	——															
配合尺寸	精密配合	孔								——	——											
配合尺寸	精密配合	轴							——	——												
配合尺寸	中等精度配合	孔											——									
配合尺寸	中等精度配合	轴										——	——									
配合尺寸	低精度配合														——	——						
非配合尺寸，一般公差尺寸																——	——	——	——	——	——	——
原材料公差												——	——	——	——	——	——	——				

注："——"表示应用的公差等级。

表 3-11　各种加工方法能达到的公差等级

加工方法	公差等级(IT)																			
	01	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
研磨		—	—	—	—	—	—													
珩磨						—	—	—	—											
圆磨							—	—	—	—										
平磨							—	—	—	—										
金刚石车							—	—	—											
金刚石镗							—	—	—											
拉削							—	—	—	—										
铰孔								—	—	—	—	—								
车									—	—	—	—	—							
镗									—	—	—	—	—							
铣										—	—	—	—							
刨、插												—	—							
钻												—	—	—	—					

续　表

加工方法	公差等级(IT)																			
	01	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
滚压、挤压												—	—							
冲压												—	—	—	—	—				
压铸													—	—	—	—				
粉末冶金成形								—	—	—										
粉末冶金烧结									—	—	—	—								
砂型铸造、气割																		—	—	—
锻造																	—	—		

3.3　配合的选用

最常用的配合的选用方法为类比法。

(1) 配合类别的选择

选择时，应根据具体的使用要求和工作条件，确定是间隙配合、过渡配合或过盈配合。确定配合类别后，尽可能先选用优先配合，后常用配合，再一般配合(由国家标准推荐的一般用途的孔、轴公差带按需要组成的配合)。

例如，孔、轴有相对运动(转动或移动)要求，必须选择间隙配合；若孔、轴间无相对运动，应根据具体工作条件的不同确定过盈、过渡甚至间隙配合。表 3-12、表 3-13 给出了配合类别选择的大体方向。

表 3-12　配合类别的选择

无相对运动	需要传递转矩	永久结合		较大过盈的过盈配合
		可拆结合	要精确同轴	轻型过盈配合、过渡配合或基本偏差为 H(h)的间隙配合加紧固件
			不要精确同轴	间隙配合加紧固件
	不需要传递转矩，要精确同轴			过渡配合或轻的过盈配合
有相对运动	只有移动			基本偏差为 H(h)、G(g)等间隙配合
	转动或转动和移动的复合运动			基本偏差 A～F(a～f)等间隙配合

表 3-13　尺寸至 500 mm 基孔制常用和优先配合的特征及其应用

配合类别	配合特征	配合代号	应　　用
间隙配合	特大间隙	$\frac{H11}{a11}\frac{H11}{b11}\frac{H12}{b12}$	用于高温或工作时要求大间隙的配合
	很大间隙	$\frac{H11}{c11}\frac{H11}{d11}$	用于工作条件较差、受力变形或为了便于装配而需要大间隙的配合和高温工作的配合

续　表

配合类别	配合特征	配合代号	应　　用
间隙配合	较大间隙	$\frac{H6}{e5}\left(\frac{H7}{e6}\right)\left(\frac{H8}{e7}\right)\frac{H8}{e8}\left(\frac{H9}{e9}\right)$ $\frac{H10}{e10}\left(\frac{H11}{e11}\right)\frac{H12}{e12}$	用于高速重型的滑动轴承或大直径的滑动轴承，也可以用于大跨距或多支点支承的配合
	一般间隙	$\frac{H6}{f5}\frac{H7}{f6}\left(\frac{H8}{f7}\right)\frac{H8}{f8}\frac{H9}{f9}$	用于一般转速的动配合。当温度影响不大时，广泛应用于普通润滑油润滑的支承处
	较小间隙	$\frac{H7}{g6}\frac{H8}{g7}$	用于精密滑动零件或缓慢间隙回转的零件的配合部位
	很小间隙与零间隙	$\frac{H6}{g5}\frac{H6}{h5}\left(\frac{H7}{h6}\right)\left(\frac{H8}{h7}\right)\frac{H8}{h8}$ $\left(\frac{H9}{h9}\right)\frac{H10}{h10}\left(\frac{H11}{h11}\right)\frac{H12}{h12}$	用于不同精度要求的一般定位件的配合，以及缓慢移动和摆动零件的配合
过渡配合	绝大部分有微小间隙	$\frac{H6}{js5}\frac{H7}{js6}\frac{H8}{js7}$	用于易于装拆的定位配合或加紧固件后可传递一定静载荷的配合
	大部分有微小间隙	$\frac{H6}{k5}\frac{H7}{k6}\frac{H8}{k7}$	用于稍有振动的定位配合，加紧固件可传递一定荷载，装拆方便，可用木槌敲入
	绝大部分有较小过盈	$\frac{H6}{m5}\frac{H7}{m6}\frac{H8}{m7}$	用于定位精度较高而且能够抗震的定位配合，加键可传递较大荷载，可用铜锤敲入或小压力压入
	大部分有微小过盈	$\left(\frac{H7}{n6}\right)\frac{H8}{n7}$	用于精确定位或紧密组合件的配合，加键能传递大力矩或冲击性荷载，只在大修时拆卸
过盈配合	绝大部分有较小过盈	$\frac{H8}{p7}$	加键后能传递很大力矩，且能承受振动或冲击的配合，装配后不再拆卸
	轻型	$\frac{H6}{n5}\frac{H6}{p5}\left(\frac{H7}{p6}\right)\frac{H6}{r5}\frac{H7}{r6}\frac{H8}{r7}$	用于精确的定位配合，一般不能靠过盈传递力矩，要传递力矩尚需要加紧固件
	中型	$\frac{H6}{s5}\left(\frac{H7}{s6}\right)\frac{H8}{s7}\frac{H6}{t5}\frac{H7}{t6}\frac{H8}{t7}$	不需要加紧固件就能传递较小力矩和轴向力，加紧固件后能承受较大荷载和动荷载
	重型	$\left(\frac{H7}{u6}\right)\frac{H8}{u7}\frac{H7}{v6}$	不需要加紧固件就可传递和承受大的力矩和动荷载的配合，要求零件材料具有高温性能
	特重型	$\left(\frac{H7}{x6}\right)\frac{H7}{y6}\frac{H7}{z6}$	能传递和承受很大力矩和动荷载的配合，需要经过试验后方可应用

注：1. 括号内的配合为优先配合。
2. 国家标准规定的 44 种基轴制配合的应用与本表中的同名配合相同。

（2）非基准件基本偏差代号的选择

基准制、公差等级和配合类别确定后，则配合选择的关键是确定非基准件基本偏差代号。若采用基孔制，就要确定轴的基本偏差代号；若采用基轴制，就要确定孔的基本偏差代号。

选择方法：最常用的是类比法，即参照同类型机器或机构中，经过实践验证的配合的实际情况，通过分析对比来确定配合的方法。用类比法选择配合时，不应简单地搬用，首先要掌握各种配合的特征和应用场合，应尽量采用国家标准规定的优先和常用配合，此外，还要考虑一些实际因素。

各类基本偏差在形成基孔制（或基轴制）配合时的应用场合经过大致总结，见表 3-14、表 3-15 和表 3-16。

表 3-14　各种间隙配合基本偏差的比较与选择

相对运动情况	无定心要求的慢速转动	高速转动	中速转动	精密低速转动或移动或手动移动
选择基本偏差	c(C)	d(D)或 e(E)	f(F)	g(G)或 h(H)

表 3-15　各种过盈配合基本偏差的比较与选择

过盈程度选择根据	传递扭矩的大小	装卸情况	应选择的基本偏差
较小或小的过盈	加紧固件传递一定的扭矩与轴向力，属轻型过盈配合。不加紧固件可用于准确定心仅传递小扭矩，需轴向定位（过盈配合时）	用于需要拆卸时，装入时使用压力机	p(P)、r(R)
中等与大的过盈	不加紧固件可传递较小的扭矩与轴向力，属中型过盈配合	用于很少拆卸时	s(S)、t(T)
很大的过盈	不加紧固件可传递大的扭矩与轴向力、特大扭矩和动载荷，属重型、特重型过盈配合	用于不拆卸时，一般不推荐使用。对于特重型过盈配合（后三种）需经试验才能应用	u(U)、v(V)、x(X)、y(Y)、z(Z)

表 3-16　各种过渡配合基本偏差的比较与选择

盈、隙情况	定心要求	装配与拆卸情况	应选择的基本偏差
过盈率很小，稍有平均间隙	要求较好定心时	木槌装配，拆卸方便	js(JS)
过盈率中等，平均过盈接近为零	要求定心精度较高时	木槌装配，拆卸比较方便	k(K)
过盈率较大，平均过盈较小	要求精密定心时	最大过盈时需相当的压入力，可以拆卸	m(M)
过盈率大，平均过盈稍大	要求更精密定心时	用锤或压力机装配，拆卸较困难	n(N)

(3) 基本偏差的确定方法

已知配合的极限过盈、间隙时，基本偏差的确定方法，见表 3-17。

表 3-17　计算—查表法确定基本偏差代号的计算公式

间隙配合	可按 X_{min} 来选择基本偏差代号	对基孔制间隙配合，有 $es \leqslant -X_{min}$ 对基轴制间隙配合，有 $EI \geqslant +X_{min}$
过渡配合	可按 X_{max} 来选择基本偏差代号	对基孔制过渡配合，有 $T_D - ei \leqslant X_{max}$ 对基轴制过渡配合，有 $ES-(-T_d) \leqslant X_{max}$
过盈配合	可按 Y_{min} 来选择基本偏差代号	对基孔制过盈配合，有 $T_D - ei \leqslant Y_{min}$ 对基轴制过盈配合，有 $ES-(-T_d) \leqslant Y_{min}$

能力训练指导

能力训练 1：减速器输出轴(见图 3-1)的尺寸分析。

分析指导：识读零件图时，从尺寸公差角度分析，初学者至少应获得以下两个方面的信息：①哪些是已注公差尺寸？哪些是一般公差尺寸？②从已注公差尺寸中，结合几何公差、表面粗糙度，可判断出零件上哪处是重要部位？从而在加工时注意。

本输出轴长度方向的尺寸均为一般公差尺寸(也称自由尺寸)；本输出轴为阶梯轴，其直径 ϕ52 mm、ϕ62 mm 为一般公差尺寸，其直径 ϕ45m6、ϕ55j6(两处)、ϕ56r6 为已注公差尺寸，结合几何公差、表面粗糙度，可知此四处均为输出轴的重要部位，ϕ45m6 为与带轮相配合的轴径，ϕ55j6(两处)为与轴承相配合的轴径，ϕ56r6 为与齿轮相配合的轴径，机加工时应特别注意。

能力训练 2：铝制活塞和钢制缸体的配合，公称尺寸为 ϕ150 mm，要求工作间隙为 0.1～0.3 mm；缸体工作温度 $t_D=110$ ℃，线膨胀系数 $\alpha_D=12\times10^{-6}$/℃；活塞工作温度 $t_d=180$ ℃，线膨胀系数 $\alpha_d=24\times10^{-6}$/℃。试确定常温(20 ℃)下装配时的间隙变动范围，并选择适当的配合。

分析指导：

(1) 由热变形而引起的间隙变动量 ΔX

$$\Delta X = X_{工作} - X_{装配} = D(\alpha_D \Delta t_D - \alpha_d \Delta t_d)$$

式中：$\Delta t_D = t_D - 20\ ℃ = 110\ ℃ - 20\ ℃ = 90\ ℃$

$\Delta t_d = t_d - 20\ ℃ = 180\ ℃ - 20\ ℃ = 160\ ℃$

则：$\Delta X = 150\times(12\times10^{-6}\times90 - 24\times10^{-6}\times160)\text{mm} = -0.414\ \text{mm}$。

负号说明工作时间隙减小，则有：

$$X_{装配} = X_{工作} + 0.414\ \text{mm} = (0.1\sim0.3)\text{mm} + 0.414\ \text{mm}$$

即：$X_{装配max}=0.714$ mm，$X_{装配min}=0.514$ mm。由此可知，装配间隙应增大，并以此确定配合。

（2）确定基准制

因为缸体与活塞配合无特殊要求，所以选用基孔制配合，基孔制配合 EI=0。

（3）确定孔、轴公差等级

由 $T_f=T_D+T_d=|X_{装配max}-X_{装配min}|=|0.714-0.514|$ mm=0.2 mm=200 μm，又据工艺等价性，查表 2-2 得：ϕ150 mm 的 IT9=100 μm，故取孔、轴的公差等级均为 IT9。

（4）确定孔、轴基本偏差代号及公差带

因为是基孔制配合，所以孔的基本偏差代号为 H，公差带代号为 $\phi150H9(^{+0.100}_{0})$。且有 $X_{装配min}=EI-es=+514$ μm。

查表 3-5 得：轴的基本偏差为 a，其上极限偏差 es=−520 μm，最接近题意，所以轴径为 $\phi150a9(^{-0.520}_{-0.620})$。

（5）缸体与活塞的配合代号为 ϕ150H9/a9。

（6）验算

$X'_{装配max}=ES-ei=+100\ \mu m-(-620)\mu m=+720\ \mu m>X_{装配max}$，不满足原设计要求；

$X'_{装配min}=EI-es=+520\ \mu m>X_{装配min}=+514\ \mu m$，满足原设计要求，但将影响经济性。

（7）结果分析

$X'_{装配min}>X_{装配min}$ 满足使用要求，但将影响经济性；$X'_{装配max}>X_{装配max}$，无“磨损储备”，不满足原设计要求。

但在大批生产条件下，一般规定 $|\Delta|/T_f<10\%$ 时仍可满足使用要求（Δ 为实际极限盈隙与给定极限盈隙的差值），则

$|\Delta_1|/T_f=(520-514)/200=3\%<10\%$

$|\Delta_2|/T_f=(720-714)/200=3\%<10\%$

所以，缸体与活塞配合 ϕ150H9/a9 是合适的，能满足使用要求。

能力训练 3：图 3-23 所示为钻模的一部分。钻模板上装有固定衬套，快换钻套与固定衬套配合，在工作时要求快换钻套能迅速更换。在压紧螺钉松开（不必取下）的情况下，当快换钻套以其铣成的缺边 A 对正压紧螺钉时，可以直接进行装卸；当快换钻套的台阶面 B 旋至压紧螺钉的下端面时，拧紧螺钉，快换钻套就被固定，防止了它的轴向窜动和周向转动。若用如图 3-23 所示钻模来加工工件上的 ϕ12 mm 孔，试选择固定衬套与钻模板、快换钻套与固定衬套以及快换钻套的内孔

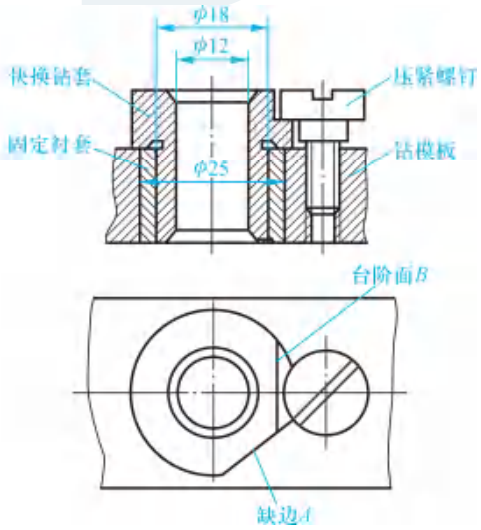


图 3-23　钻模

与钻头之间的配合(公称尺寸如图 3-23 所示)。

分析指导：

1) 基准制的选择　对固定衬套与钻模板的配合以及快换钻套与固定衬套的配合，因结构无特殊要求，应优先选用基孔制配合。对钻头与快换钻套内孔的配合，因钻头属标准刀具，应采用基轴制配合。

2) 公差等级的选择　参看表 3-10，钻模夹具各零件的连接，可按用于配合尺寸的 IT5～IT12 级选用。重要的配合尺寸，对轴可选 IT6，对孔可选 IT7。本例中钻模板的孔、固定衬套的孔、钻套的孔统一按 IT7 选用。而固定衬套的外圆、快换钻套的外圆则按 IT6 选用。

3) 配合种类的选择　固定衬套与钻模板的配合，要求连接牢靠，在轻微冲击和负荷下不能发生松动，即使固定衬套内孔磨损了，需更换拆卸的次数也不多。因此参看表 3-16 可选平均过盈率大的过渡配合 n，本例配合选 H7/n6。

快换钻套与固定衬套的配合，要求经常用手更换，故需一定间隙保证更换迅速。但因又要求有准确的定心，间隙不能过大，为此参看表 3-14 可选精密滑动的配合 g。本例选 H7/g6。

至于快换钻套内孔，因要引导旋转着的刀具进给，既要保证一定的导向精度，又要防止间隙过小而被卡住。根据钻孔切削速度多为中速，参看表 3-14 应选中等转速的基本偏差 F，本例选 F7。

必须指出：快换钻套与固定衬套内孔的配合，根据上面分析本应选 H7/g6，考虑到为了统一钻套内孔与衬套内孔的公差带，规定了统一的公差带 F7，因此钻套 1 与固定衬套 2 内孔的配合，应选相当于 H7/g6 的配合 F7/k6。因此，本例中钻套 1 与固定衬套 2 内孔的配合应为 F7/k6(非基准制配合)。图 3-24 为 H7/g6 与 F7/k6 这两种配合的公差带图解。

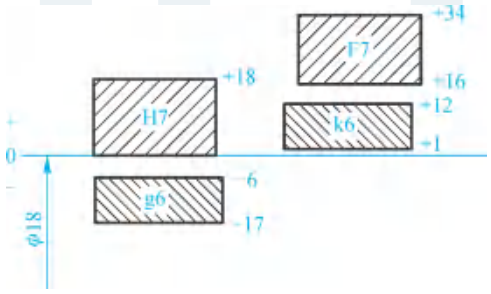


图 3-24　H7/g6 与 F7/k6 两种配合的公差带图解

能力训练任务

能力训练任务：分析图 3-25 所示的配合，说明配合的基准制和种类。

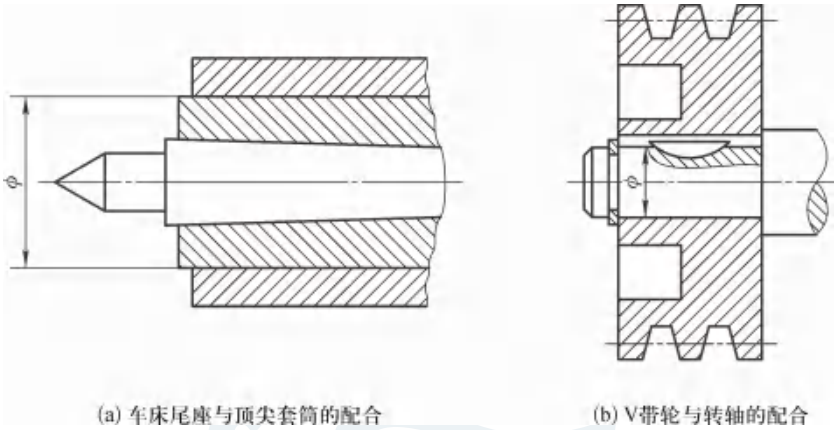


图 3-25　说明配合的基准制和种类

任务 4　熟练掌握尺寸的检测

理论知识要点

4.1　尺寸检测

尺寸检测是兼有测量、检验两种特性的一个综合鉴别过程，即使用普通测量器具测量工件尺寸，并按验收极限判断工件尺寸是否合格。企业车间经常使用的普通测量器具有游标卡尺、千分尺、指示表、比较仪等。

4.2　测量类型

在机械制造中，尺寸测量可分为一般测量（单位：mm）、精密测量（单位：μm）、超精密测量（单位：nm）三种。因此，选择、采用恰当的测量方法和测量器具是至关重要的，同时尺寸检测必须遵循其验收原则：允许误废而不允许误收。

能力训练指导

微课

用内径百分表检测孔径

能力训练 1：用内径百分表检测孔径。

分析指导：

（1）实训目的

1）了解内径百分表的结构。

2）掌握用内径百分表进行比较测量的原理。

3）掌握用内径百分表进行比较测量的步骤。

（2）内径百分表概述

1）内径百分表的用途

内径百分表简称内径量表，主要以相对测量法测量内孔尺寸及其几何形状误差。因为量具结构简单和测量方法简便，所以生产中被广泛用于测量孔径，特别是在大批量生产中测量更为方便。

2）内径百分表的结构形式

内径百分表按其测头形式可分为：带定位护桥的内径百分表和不带定位护桥的内径百分表。不带定位护桥的内径百分表有胀簧式和钢球式。内径百分表由百分表和表架组成，如图 3-26 所示。百分表作读数装置。表架是一个管状结构，内部装有杠杆或楔形传动机构。

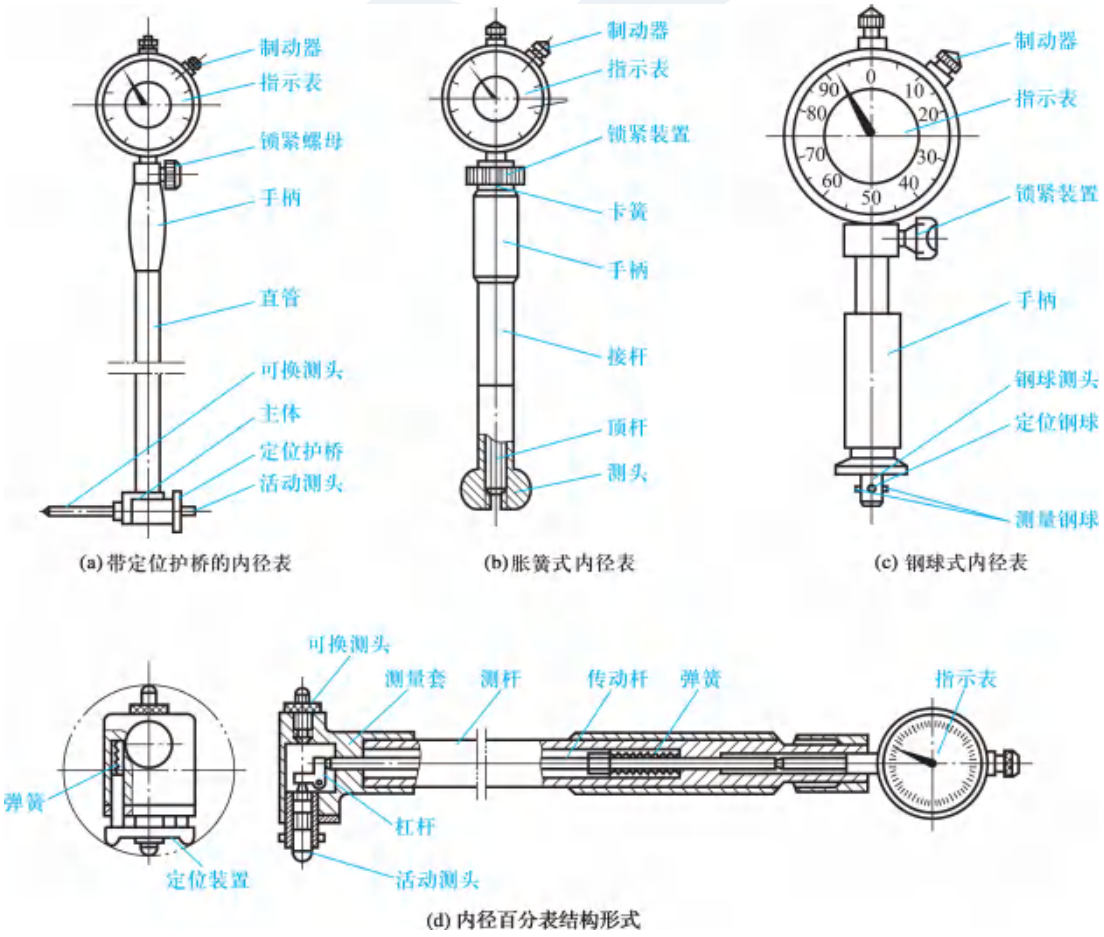


图 3-26　内径百分表结构形式

图 3-26d 所示的内径百分表的主体是三通管，在一端安装活动测头，另一端安装可换测头，垂直管口的一端通过直管安装百分表。为了提高测量精度，在内径百分表上还安装一个定

位护桥，其作用是帮助找正孔的直径位置。

3）内径百分表的测量范围

内径百分表的分度值为 0.01 mm。其测量范围有 10～18 mm、18～35 mm、35～50 mm、50～100 mm、100～160 mm、160～250 mm、250～450 mm 共七种。各种规格的内径百分表均备有整套可换测头。测头上标有测量范围，可按所测尺寸的大小自行选换。

（3）测量步骤

1）预调整。根据被测孔径的公称尺寸选择可换测头，旋入内径百分表的测量套中；再将百分表安装到表架上，使其有约 1 mm 的预压缩量。

2）校对零位。校对零位常用的有三种方法：①用量块和量块附件校对零位；②用标准环规校对零位；③用外径千分尺校对零位。

用量块和量块附件校对零位，先按被测孔径的公称尺寸组合量块，放入量块夹中夹紧；再将百分表的两测量头放在量块夹两量脚之间，摆动传动杆，反复几次，当百分表指针在最小值处时，旋转百分表盘，使零刻线与指针对齐；最后锁紧可换测头的锁紧螺母，如图 3-27a、图 3-27b 所示。

3）测量孔径。手握绝缘套，倾斜一定角度将测量头放入被测孔中，摆动量表观察指针转折点的位置，如图 3-27b 所示，记录相对零点的差值；在孔的轴线方向取 3 个截面，共测 6 个点并记录，如图 3-28 所示。

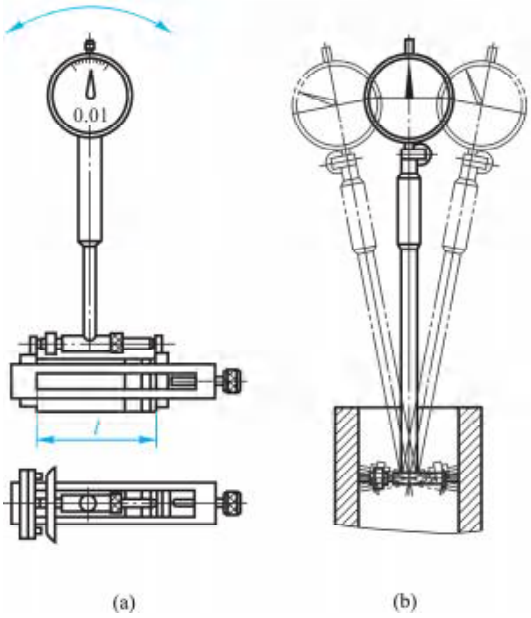


图 3-27　校对零位

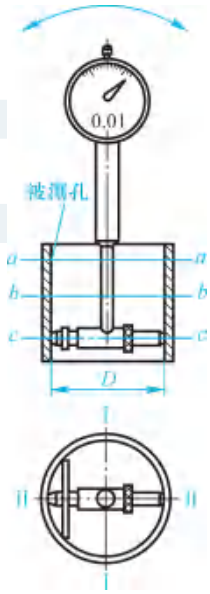


图 3-28　测量孔径

4）判断孔径的是否合格。根据零件图上标注的被测孔极限尺寸或极限偏差，判断其是否合格。

能力训练 2：用万能测长仪检测轴径（精密测量）。

微视频

用万能测长仪检测轴径

分析指导：测长仪是根据阿贝原理制造的，是一种集精密机械、光学系统和电气部分于一体的长度测量仪器。依据测量主轴的位置不同可分为立式测长仪（测量主轴铅直放置）和卧式测长仪（测量主轴水平放置）。因其测量范围较广，故又称万能测长仪。

（1）结构简介

万能测长仪主要由底座、工作台、测座及各种测量附件组成，如图 3-29 所示。

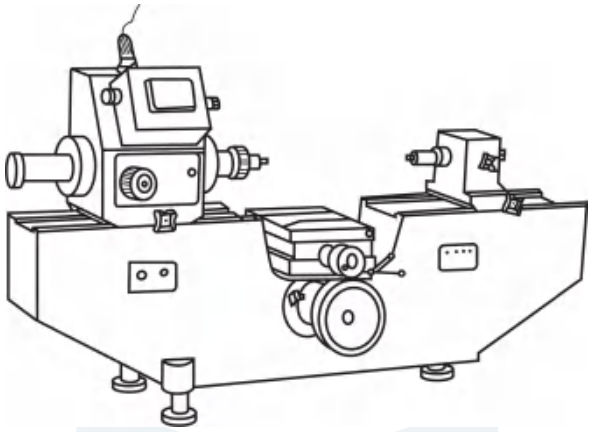


图 3-29　万能测长仪

为使放在工作台上的工件获得正确的测量位置，工作台可做以下五种运动：升降，横向移动，纵向自由运动，绕垂直轴和水平轴转动。

（2）测长仪的用途

1）可进行直接测量和间接测量。

2）可进行外尺寸、内尺寸、内外螺纹中径的测量。

（3）实训目的

1）了解万能测长仪的结构、用途。

2）掌握万能测长仪检测轴径、孔径的方法。

（4）万能测长仪检测轴径的实训步骤

1）测帽的选择。检测圆柱形物体，可选刃形测帽或平面测帽。

JD18 投影万能测长仪是用接触法测量的，因此正确地选择和调整测帽可以避免较大的测量误差。一对测帽分别装在尾管和测头上。测帽选择的原则是：被测件与测帽的接触面积为最小，接近点或线。测量平面物体时，使用 $R20$ 的球形测帽；测量圆柱形物体时，使用 1.5×8 的刃形测帽；测量球形物体时，使用 $\phi2$、$\phi8$ 的平面测帽；三针法测量螺纹中径时，使用 $\phi14$ 的平面测帽。

2）安装被测轴。将被测轴放置在工作台上，并用压板固定。

3）影屏刻线调整、记录初始数据。眼观影屏，先转动测微旋钮，使影屏上半部的整数刻线

对齐三角尖端(最好为零刻线对齐三角尖端);后使测量主轴与尾管接触,一起移动它们,使影屏下半部的毫米刻线处在某一双纹刻线中间(最好使毫米刻线处在 0 双纹刻线中间),记录初始数据,数据Ⅰ=5.010 mm,如图 3-30 所示。

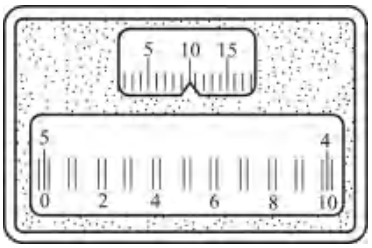


图 3-30　数据Ⅰ

4) 使被测轴在工作台中处于正确位置。升起被测轴,使它处在测量主轴与尾管之间。上下微动工作台,眼观影屏,直至找到"最大值";将工作台绕垂直轴微微转动,眼观影屏,直至找到"最小值"。此时被测轴才处于正确的位置。

5) 正确读数,记录数据。被测轴处于正确的位置后,转动测微旋钮,使影屏下半部显示出的某一条毫米刻线的影像处在某一双纹刻线中间,然后进行读数,记录数据。图 3-31b 所示影屏视场读数为(75+0.3+0.021)mm=75.321 mm。

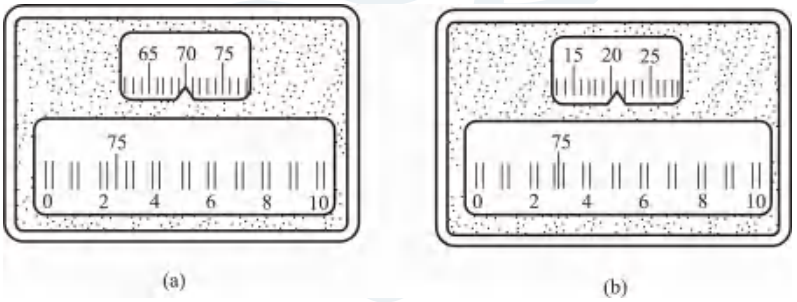


图 3-31　数据Ⅱ

6) 计算。轴径的测得值=数据Ⅱ−数据Ⅰ。

(5) 万能测长仪检测孔径的实训步骤

万能测长仪测量大于 ϕ10 mm 的内尺寸时,只能采用相对(比较)测量法。测量原理如图 3-32 所示。

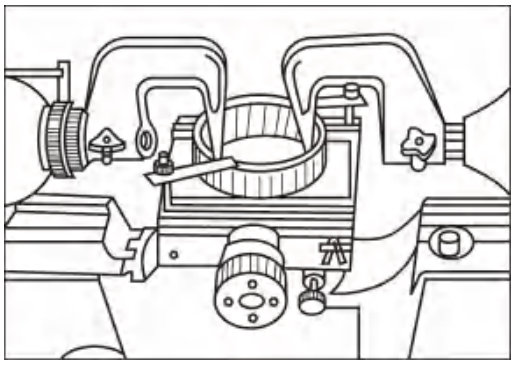


图 3-32　相对(比较)测量法原理

先测量并读取标准环规孔径实际尺寸的示值 a_1，后换上工件，测量并读取被测孔实际尺寸的示值 a_2，最后根据已知的标准环规孔径的实际尺寸 D，即可计算出被测孔的实际尺寸 D_a。

当被测孔径大于标准环规内孔直径 D 时（见图 3-33a），$D_a=D+(a_2-a_1)$。

当被测孔径小于标准环规内孔直径 D 时（见图 3-33b），$D_a=D+(a_1-a_2)$。

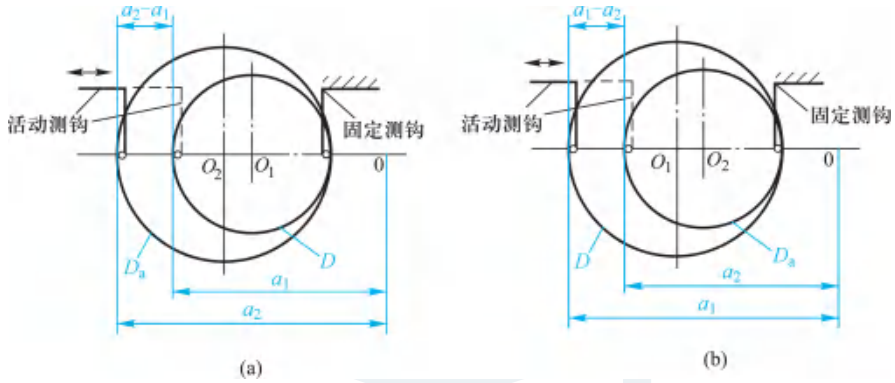


图 3-33　相对（比较）测量法的计算

实训步骤：

1）选择一对合适的内测钩，分别装在测量主轴和尾管上，使两测钩的楔、槽对齐后，锁紧固定螺钉。

2）将标准环规放在工作台上，用压板压紧（注意：应使标准环规上的刻线与测量轴线一致）。

3）根据标准环规孔径的大小，调整测座与尾座的相对位置，使工作台上升，直至两测钩进入到标准环规的孔中并与孔壁轻轻接触。

4）转动测微手轮，使工作台做横向运动，眼观影屏，直至找到“最大值”；松开固定手柄，使工作台绕水平轴转动，直至找到“最小值”，如图 3-34 所示。

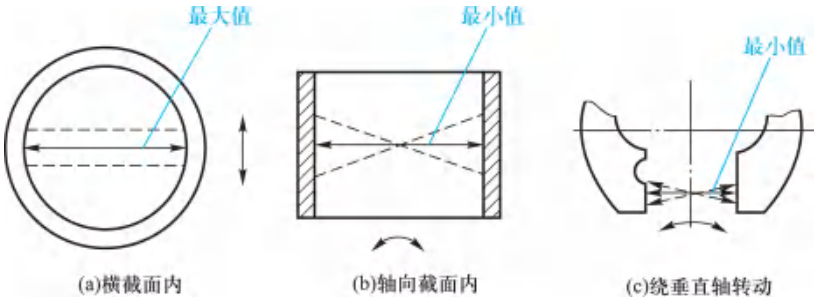


图 3-34　找转折点

5）转动测微旋钮，眼观影屏，读取标准环规孔径实际尺寸的示值 a_1。

6）推动测量主轴向右运动，取下标准环规，装上被测工件。

7）按步骤 3、4 使被测工件处于正确位置，读取被测孔实际尺寸的示值 a_2。

8）计算被测孔的实际尺寸 D_a。

9）可在被测孔的两个不同截面和互成 90°的两个方位上测量四次，求出其平均值。

能力训练任务

能力训练任务：减速器输出轴（见图 3-1）的尺寸检测分析：从生产类型角度考虑，单件、小批生产，常用什么样的测量器具检测？大批、大量生产，又常用什么样的测量器具检测？怎样检测？

巩 固 训 练

1. 填空题

1）某一尺寸减去其_____所得的代数差称为尺寸偏差，简称_____。

2）确定公差带大小和位置的两个要素分别是_____和_____。

3）按孔公差带和轴公差带相对位置不同，配合分为三种：孔公差带在轴公差带之上时为_____配合；孔公差带在轴公差带之下时为_____配合；孔、轴公差带相互重叠时为_____配合。

4）当 EI-es≥0 时，此配合必为_____配合；当 ES-ei≤0 时，此配合必为_____配合。

5）基孔制的最小极限尺寸等于其_____尺寸，而基轴制的_____尺寸等于其公称尺寸。

6）国家标准设置了_____个标准公差等级。一般来说，在机械制造中，_____为中等精度，常用的高精度有_____等，常用的低精度有_____等。

7）零件的某个尺寸为 $\phi 90j7\left(^{+0.020}_{-0.015}\right)$，其基本偏差为_____μm，尺寸公差为_____mm，标准公差 IT7 等于_____μm。

8）线性尺寸的一般公差规定了 4 个等级，即_____、_____、_____和_____。

9）滚动轴承内圈与轴的配合要采用基_____制，而外圈与壳体孔的配合要采用基_____制。

10）选择高精度等级（≤IT7）时，轴的精度要比孔_____级。

2. 判断题

1）为了实现互换性，零件的公差应规定得越小越好。（　　）

2）公差通常为正，在个别情况下也可以为负或零。（　　）

3）孔和轴的加工精度越高，则其配合精度也越高。（　　）

4）公称尺寸相同，公差等级一样的孔和轴的标准公差数值相等。（　　）

5）图样上未注公差的尺寸为自由尺寸，其公差不作任何要求。（　　）

6）一光滑轴与多孔配合，其配合性质不同时，应当选用基孔制配合。（　　）

7）若已知 ϕ30f7 的基本偏差为－0.02 mm，则 ϕ30F8 的基本偏差一定是＋0.02 mm。（　　）

8）ϕ10f6、ϕ10f7 和 ϕ10f8 的上偏差是相等的，只是它们的下偏差各不相同。（　　）

9）只要孔和轴装配在一起，就必然形成配合。（　　）

10）选用公差带时，应按常用、优先和一般公差带的顺序选取。（　　）

3. 选择题

1）某尺寸的实际偏差为零，则其实际尺寸（　　）。

A. 必定合格　　B. 为零件的真实尺寸

C. 等于公称尺寸　　D. 等于最小极限尺寸

2）基本偏差确定公差带的位置，一般情况下，基本偏差是（　　）。

A. 上偏差　　B. 下偏差

C. 实际偏差　　D. 靠近零线的偏差

3）下列各关系式中，表达正确的是（　　）。

A. $T_f=+0.025$ mm　　B. $X_{max}=0.048$ mm

C. ES=0.026 mm　　D. es=－0.021 mm

4）下列各关系式中，能确定孔与轴的配合为过渡配合的是（　　）。

A. EI＞es　　B. ES≤ei　　C. EI＞ei　　D. EI＜ei＜ES

5）下列尺寸标注中，正确的是（　　）。

A. $\phi 80^{-0.021}_{-0.009}$　　B. $\phi 30^{0.033}_{0}$　　C. $\phi 50^{+0.039}_{0}$　　D. $\phi 120^{+0.020}_{-0.020}$

6）与 ϕ80k6 组成工艺等价原则的基孔制过渡配合是（　　）。

A. ϕ80H6　　B. ϕ80H7　　C. ϕ80H5　　D. ϕ80h7

7）下列配合代号标注不正确的是（　　）。

A. ϕ30H6/R5　　B. ϕ30H7/p6　　C. ϕ30h7/D8　　D. ϕ30H9/h7

8）$\phi 200H6\left(^{+0.029}_{0}\right)$比 $\phi 18H8\left(^{+0.027}_{0}\right)$的尺寸精确程度（　　）。

A. 高　　B. 低　　C. 无法比较

4. 查表、画图题

已知下列三对孔、轴相结合，分别查表、计算三对配合的极限间隙或过盈量及配合公差，绘出公差带图，并说明它们的配合类别。

1）孔 $\phi 20^{+0.033}_{0}$，轴 $\phi 20^{-0.065}_{-0.086}$；　2）$\phi 20\dfrac{K7}{h6}$；　3）$\phi 25\dfrac{H8}{f7}$

5. 简答题

孔、轴配合中，为什么要规定基准制？广泛采用基孔制配合的原因何在？在什么情况下采用基轴制配合？

6. 计算题

(1) 在某配合中，已知孔的尺寸标注为 $\phi 20^{+0.013}_{0}$，$X_{max}=+0.011$，$T_f=0.022$，求出轴的上、下极限偏差及其公差带代号。

(2) 某钻模如图 3-35 所示。已知：1)配合面①和②都有定心要求，需用过盈量不大的固定连接；2)配合面③有定心要求，在安装和取出定位套时需要轴向移动；3)配合面④有导向要求，且钻头能在转动状态下进入钻套。试着选择上述配合面的配合种类，并简述其理由。

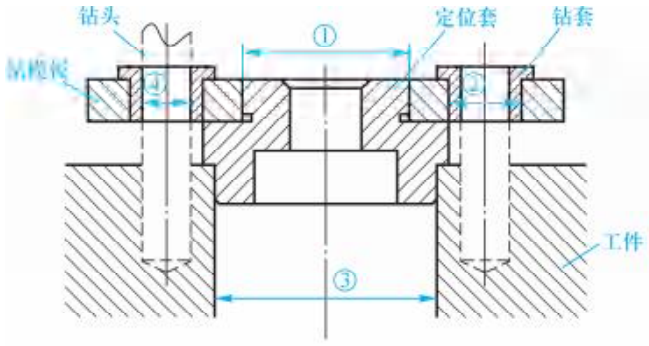


图 3-35　钻模

Module 4 模 块 四　几 何 公 差

教学课件

几何公差

机械零件几何要素的形状和位置精度在很大程度上影响着该零件的质量和互换性，从而影响整个机械产品的质量。为了保证机械产品的质量，就应该正确选择几何公差，在零件图上正确标注，并按零件图上给出的几何公差来评定和检测几何误差。

如图 4-1 所示，减速器输出轴上与轴承、齿轮配合的轴径本身形状有何要求？不同轴段间相互位置有何要求？为什么与轴承配合处的轴径上标注 0.025 A–B / 0.005、与齿轮配合处的轴径上标注 0.025 A–B？它们的含义是什么？本模块将重点解决这些问题。

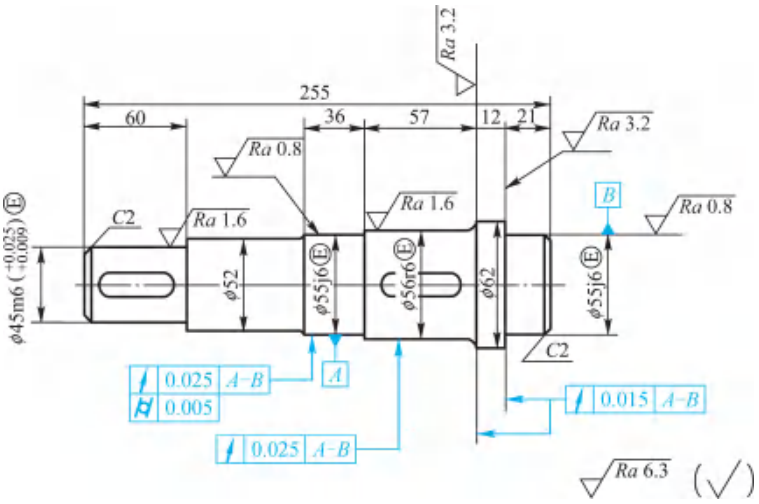


图 4-1　减速器输出轴

任务 1　掌握几何公差的正确标注

理论知识要点

1.1　几何公差有关概念

1.1.1　几何公差的概念

在机械加工过程中，加工误差是不可避免的。加工所得到的构成零件几何特征的点、线、面的实际形状和相互位置与理想几何体规定的形状和相互位置存在差异，其中形状的差异就叫形状误差，相互位置的差异就叫位置误差，两者统称为几何误差，又称为形位误差。

为了保证产品质量，同时考虑到经济性，实现产品的互换性，必须把形位误差控制在一定的范围内。这个允许形状、位置误差的最大变动范围就叫几何公差，又称形位公差。

1.1.2　几何公差的研究对象

几何公差的研究对象是几何要素。几何要素（简称要素）是指构成零件几何特征的点、线、面。零件上的面，面上的线或线上的点称为组成要素；由一个或几个组成要素得到的中心点、中心线或中心面称为导出要素，例如，球心是由球面得到的导出要素。

几何要素可从不同角度分类：

（1）按几何特征分类

1）组成要素　构成零件外形的能被人们直接感觉到的点、线、面称为组成要素，也称轮廓要素。

2）导出要素　组成要素的对称中心点、线、面称为导出要素，也称中心要素。它不能被人们直接感觉到，而是要通过相应的组成要素才能模拟体现出来，如零件上的中心面、中心线、中心点等。

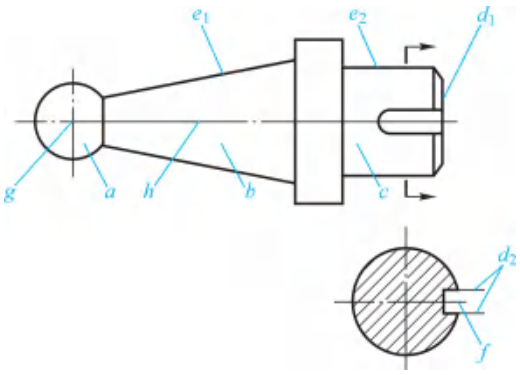


图 4-2　几何要素

如图 4-2 所示，a——球面，b——锥面，c——柱面，d_1——端面，d_2——键槽侧面，均为轮廓要素；e_1、e_2——素线，为轮廓要素；g——球心，h——中心线，f——中心平面，均

为中心要素。

（2）按存在状态分类

1）实际要素　零件上实际存在的要素称为实际要素，如图 4-3 所示。测量时可由测得要素代替。

2）理想要素　具有几何意义的要素称为理想要素，又称为公称要素。设计图样所表示的要素（如轮廓要素或中心要素）均为理想要素，如图 4-3 所示。

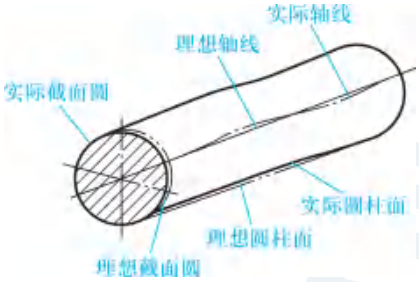


图 4-3　实际要素和理想要素

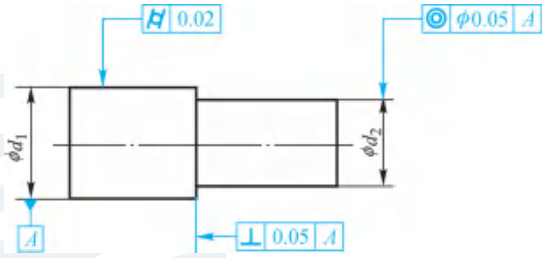


图 4-4　被测要素和基准要素

（3）按所处地位分类

1）被测要素　被测要素是指图样上给出形状或（和）位置公差要求后即形成了检测对象的要素。被测要素按功能要求又可分为两种：

① 单一要素　单一要素是指仅对其本身给出形状公差要求的要素，如直线度、平面度、圆度、圆柱度等。

② 关联要素　关联要素是指对其他要素有功能要求且给出了位置公差要求的要素。功能要求是指要素间某种确定的方向和位置关系，如平行度、垂直度、同轴度、对称度等。

2）基准要素　基准要素是指用来确定被测要素方向或（和）位置的要素。理想基准要素简称基准，如图 4-4 所示。

1.2　几何公差的类型、特征项目及其符号

几何公差可分为形状公差、方向公差、位置公差和跳动公差。国家标准将几何公差共分为 14 个项目。每一项目都规定了专门的符号，见表 4-1。

表 4-1　几何公差特征项目及其符号

公差类型	几何特征	符号	有无基准
形状公差	直线度	—	无
	平面度	▱	
	圆度	○	
	圆柱度	⌭	

续　表

公差类型	几何特征	符号	有无基准
形状公差	线轮廓度	⌒	无
	面轮廓度	⌓	
方向公差	平行度	//	有
	垂直度	⊥	
	倾斜度	∠	
	线轮廓度	⌒	
	面轮廓度	⌓	
位置公差	位置度	⌖	有或无
	同心度(用于中心点)	◎	有
	同轴度(用于轴线)	◎	
	对称度	⌯	
	线轮廓度	⌒	
	面轮廓度	⌓	
跳动公差	圆跳动	↗	有
	全跳动	⌰	

1.3　几何公差所用基准

1.3.1　基准

几何公差所使用的基准是确定被测要素方向和位置的依据。

1.3.2　基准的类型

基准按几何特征可分为基准点、基准直线和基准平面三种。

基准按构成情况可分为以下几种类型：

1）单一基准：由单个要素（如一个平面、一条轴线）构成，单独作为某被测要素的基准称为单一基准。

2）组合基准（也称公共基准）：由两个或两个以上的要素共同建立而作为单一基准使用的基准称为组合基准或公共基准，如图 4-5 所示。标注倾斜度、同轴度、径向跳动等几何公差时，常用组合基准。

3）基准体系：若某被测要素需由两个或三个相互间具有确定关系的基准共同确定，这种基准称为基准体系。常见形式有：相互垂直的两平面基准或三平面基准，相互垂直的一直线基准和一平面基准，如图 4-6 所示。标注垂直度、位置度等几何公差时，常用基准体系。

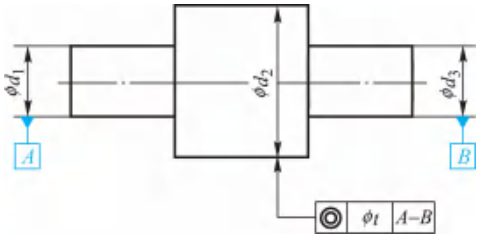


图 4-5　组合基准

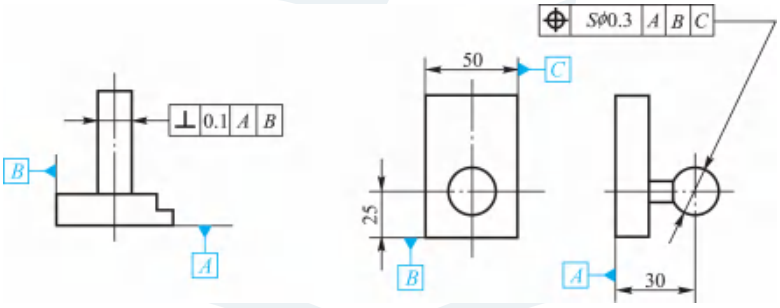


图 4-6　基准体系

1.4　几何公差的标注方法

几何公差标注是图样中对几何要素的形状、位置提出精度要求时作出的表示。一旦有了这一标注，也就明确了被控制的对象（要素）是谁，允许它有何种误差，允许的变动量（即公差值）多大，范围在哪里，实际要素只要做到在这个范围之内就为合格。

几何公差的标注要素包括：框格和指引线、特征项目符号、公差数值和有关符号、基准符号和有关符号。

1.4.1　几何公差框格和指引线的标注

几何公差框格用细实线绘出，有两格或多格，在图样上可水平放置，也可垂直放置。用指引线连接公差框格和被测要素。

指引线由细实线和箭头构成，可从公差框格的任一端引出，终端带一箭头。引出段必须垂直于公差框格。引向被测要素时允许弯折，但不得多于两次。指引线的箭头应指向公差带的宽度方向或直径方向。

对于水平放置的公差框格，指引线可以从框格的左端或右端引出；对于垂直放置的公差框格，指引线可以从框格的上端或下端引出；为方便起见，指引线也可从框格的侧边引出。注意不能在两端同时引出指引线，如图 4-7 所示。

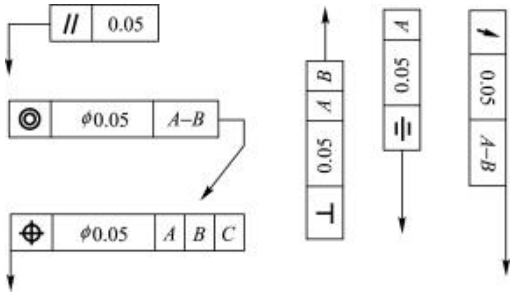


图 4-7　几何公差框格和指引线的标注

1.4.2　被测要素和基准要素的标注

1）当被测要素为组成要素（轮廓要素）时，指引线箭头应标注在该要素的可见轮廓线或其延长线上，并应明显地与尺寸线错开。简言之：错开标注，被测要素为组成要素。如图 4-8 所示，圆跳动公差标注的被测要素是 ϕd_2 的外圆柱面，指引线箭头应与 ϕd_2 尺寸线明显错开。

2）当被测要素为导出要素（中心要素）时，指引线箭头应与该要素的尺寸线对齐。简言之：对齐标注，被测要素为导出要素。如图 4-8 所示，同轴度公差标注的被测要素是 ϕd_2 的轴线，指引线箭头应与 ϕd_2 尺寸线对齐。

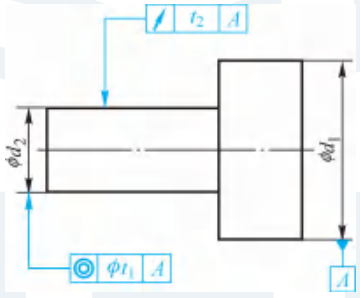


图 4-8　组成要素和导出要素的标注

3）对于有方向或位置要求的关联被测要素，在图样上必须用基准符号和注在公差框格内的基准字母表示被测要素与基准要素之间的关系。基准符号如图 4-9 所示。基准字母都应水平书写，用拉丁字母表示，为避免引起误解，不采用 E、I、J、M、O、P、L、R、F。

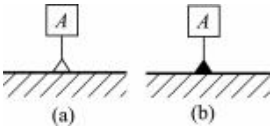


图 4-9　基准符号

4）当基准要素为组成要素（轮廓要素）时，将基准三角形置于该要素的可见轮廓线或其延长线上，并应明显地与尺寸线错开，简言之：错开标注，基准要素为组成要素，如图 4-10a 所示；若基准要素为有积聚性投影的表面时，基准符号可置于用圆点指向实际表面的投影的引出线上，如图 4-10b 所示。

5）当基准要素为导出要素（中心要素）时，基准三角形应放置在该尺寸线的延长线上，并应明显地与尺寸线对齐，简言之：对齐标注，基准要素为导出要素，如图 4-11a 所示。如果没有足够的位置标注基准要素尺寸的两个尺寸箭头，则其中一个箭头可用基准三角形代替，如图 4-11b 所示。

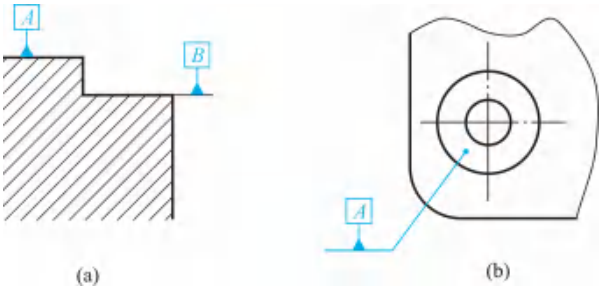


图 4-10　基准要素的标注

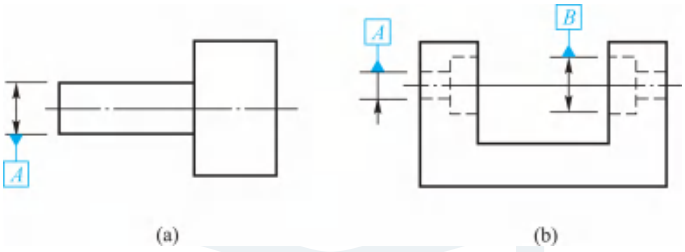


图 4-11　导出要素的标注

1.4.3　几何公差的特殊标注

1）当被测要素（或基准要素）为圆锥体的轴线时，指引线的箭头（或基准符号）应与圆锥的直径尺寸线（大端或小端）对齐，如图 4-12 所示。若直径尺寸不能明显地区分圆锥体和圆柱体，则应在圆锥体内画出空白尺寸线，并将指引线箭头（或基准符号）与该空白尺寸线对齐，如图 4-13 所示。

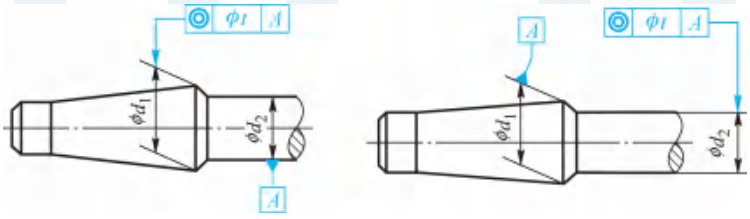


图 4-12　圆锥轴线要素的标注（一）

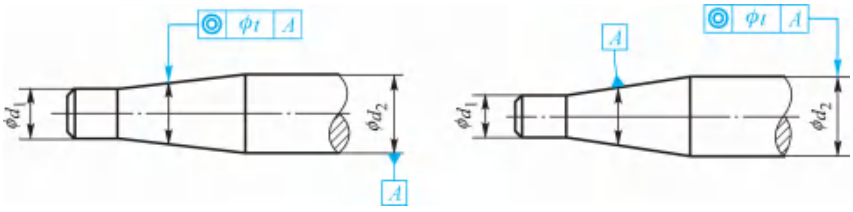


图 4-13　圆锥轴线要素的标注（二）

2）当指引线的箭头（或基准符号）与尺寸线的箭头重叠时，尺寸线的箭头可以省略，如

图 4-14 所示。

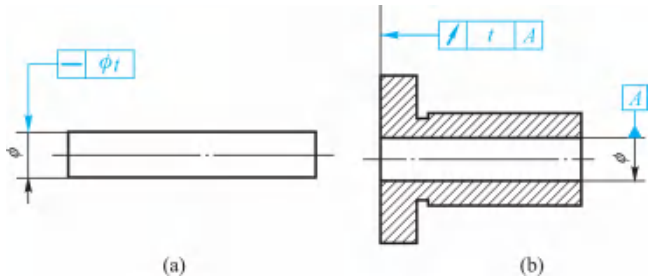


图 4-14　省略尺寸箭头的用法

3）以螺纹轴线为被测要素或基准要素时，默认要素为螺纹中径圆柱的轴线，否则应另有说明，例如用“MD”表示大径，用“LD”表示小径，如图 4-15 所示。

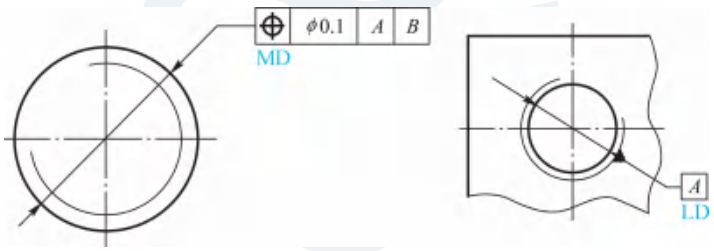


图 4-15　螺纹要素的标注

以齿轮、花键轴线为被测要素或基准要素时，需要说明所指的要素，如用“PD”表示节径，用“MD”表示大径，用“LD”表示小径。

4）当基准要素为成组要素（多个成一组的相同要素）时，基准符号标注在成组要素的尺寸引出线的下方，或标注在该组要素的公差框格的下方。当基准要素为单一要素，但标注基准符号的地方不够时，也可将基准符号标注在该要素的尺寸引出线或其公差框格的下方，如图 4-16 所示。

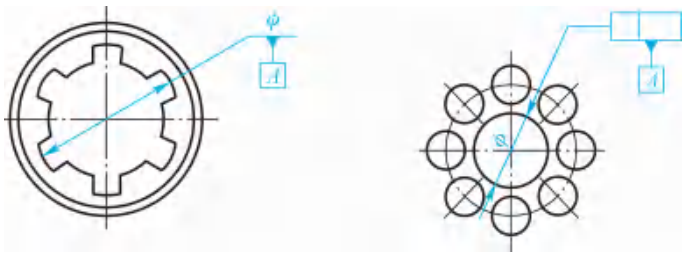


图 4-16　引出基准的标注

1.4.4　几何公差的简化标注

1）当同一被测要素有多项几何公差要求，其标注方法又一致时，可将多个公差框格绘制

在一起，用一条指引线指向被测要素，如图 4-17 所示。

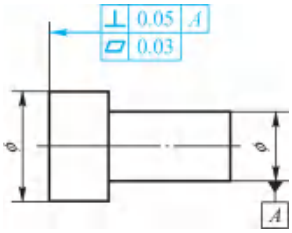


图 4-17　简化标注(一)

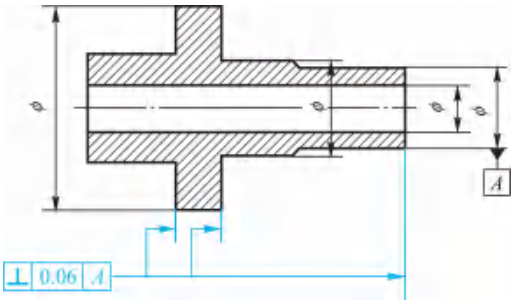


图 4-18　简化标注(二)

2）不同被测要素有同一公差要求时，可以在同一指引线上绘制多个指示箭头，分别指向各被测要素，如图 4-18 所示。

3）结构和尺寸相同的几个被测要素(即成组要素)，有相同的几何公差要求时，可只对其中的一个要素进行标注，但应在该框格的上方说明被测要素的数量，如图 4-19 所示。

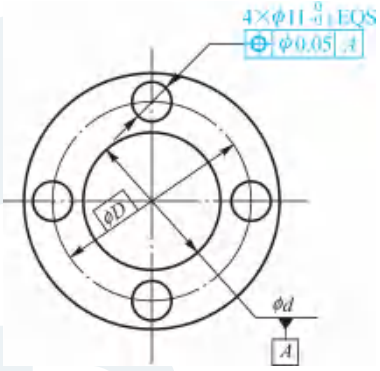


图 4-19　简化标注(三)

1.4.5　公差值的标注

公差值是以毫米为单位写在公差框格中的，标注时应注意以下三方面的内容：

1）标注公差数值时，要特别注意公差带的形状。对于圆形、圆柱形公差带，公差数值前要加注“ϕ”，对于球形公差带，公差数值前要加注“$S\phi$”。对于以宽度数值表示的公差带，只标注公差值数字，如圆度、素线直线度、平面度等。

2）同一被测要素有多项形位公差要求时，各项公差值应协调，即：$t_{形状}<t_{方向}<t_{位置}$，$t_{平行}<t_{尺寸}$。

3）如果所标注的公差有附加说明时，则被测范围为箭头所指的整个被测要素。如果对被测范围有要求，则在公差数值一格中作相应的说明，如图 4-20 所示。

图 4-20a 表示被测要素在任意 100 mm 长的范围内，直线度公差为 0.02 mm。图 4-20b 表示被测平面在任意一个边长为 500 mm 的正方形区域内，其平面度公差为 0.04 mm。图 4-20c 和图 4-20d 中，分子表示整个被测要素的公差数值，分母表示给定范围的公差数值。

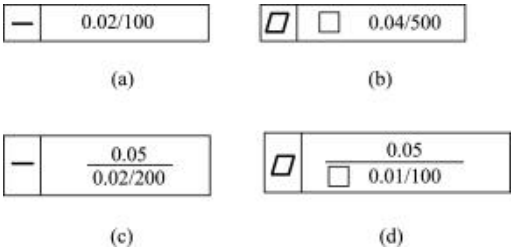


图 4-20　被测范围有要求时的说明

4）对公差值的要求，除数值外，若还有进

一步要求，如：误差值只允许中间凸起不许凹下，或只许从某一端向另一端减少或增加等，此时，应采用限制符号，见表 4-2，标注在公差值的后面。

表 4-2　限制符号表

含　　义	符　　号	举　　例
只许中间向材料内凹下	(−)	— t(−)
只许中间向材料外凸起	(+)	▱ t(+)
只许从左至右减小	(▷)	⌯ t(▷)
只许从右至左减小	(◁)	⌯ t(◁)

能力训练指导

能力训练：改正图 4-21 所示中几何公差标注上的错误（不得改变几何公差项目）。

分析指导：

至少可从以下三个方面来分析：

1）基准问题：①有无基准；②采用何种基准。

2）公差值问题：①公差值有无 ϕ；②公差值大小：$t_{形状}<t_{方向}<t_{位置}$。

3）对齐与错开问题：①被测要素或基准要素为组成（轮廓）要素，须错开；②被测要素或基准要素为导出（中心）要素，须对齐。

由此，本题作为同轴度的基准 A 应与 ϕd_1 对齐。直线度的被测要素为组成要素，其指引线应与 ϕd_2 错开；直线度公差值应无 ϕ。公差值大小应为 $t_{形状}<t_{方向}<t_{位置}$。故改正后的几何公差标注如图 4-22 所示。

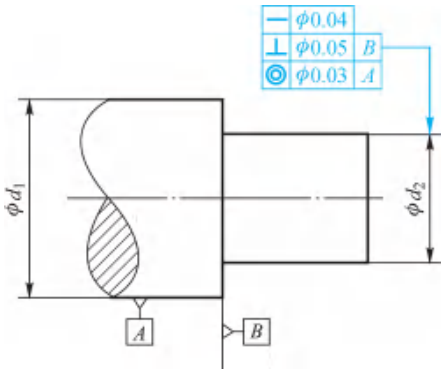


图 4-21　几何公差标注示例（错误）

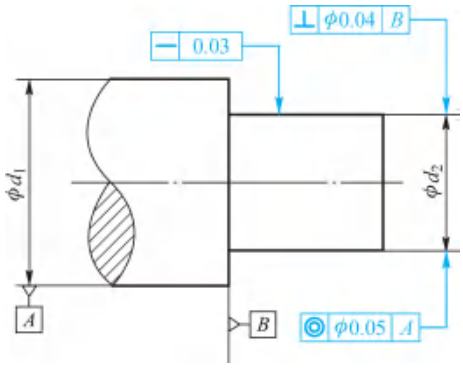


图 4-22　几何公差标注示例（改正后）

能力训练任务

能力训练任务：改正图 4-23 中几何公差标注上的错误（不得改变几何公差项目）。

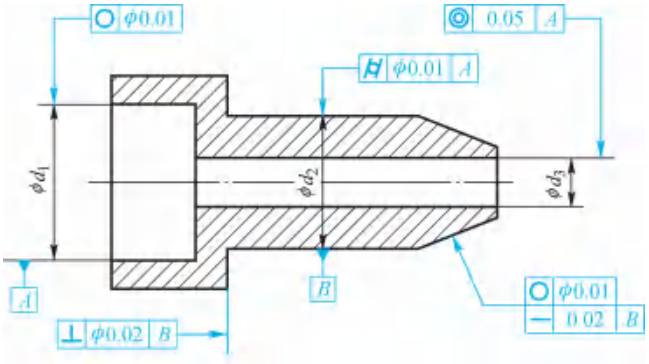


图 4-23　几何公差标注示例

任务 2　掌握形状公差带及形状误差的评定

理论知识要点

2.1　几何公差带的概念

用来限制几何误差最大变动的区域叫作几何公差带。具体而言，几何公差带是指由一个或几个理想的几何线或面所限定的、由线性公差值表示其大小的区域。由此可知，几何公差带通常具有两个含义：区域性和长度值。只要零件实际几何要素完全落在给定的几何公差带内，就表示该零件在形状或位置方面合格。

既然几何公差带是一个区域，那么它一定具有形状、大小、方向和位置四个特征要素。为讨论方便，可以用图形来描绘允许实际几何要素变动的区域，即几何公差带图，用它来表明形状、大小、方向和位置关系。

2.1.1　几何公差带的形状

公差带的形状是由公差项目及被测要素与基准要素的几何特征来确定的。如图 4-24a 所示，圆度公差带形状是两同心圆之间的区域；如图 4-24b 所示，当直线度被测要素为给定平面内的直线时，公差带形状是两平行直线间的区域；如图 4-24c 所示，当直线度被测要素为轴线

时，公差带形状是一个圆柱内的区域。

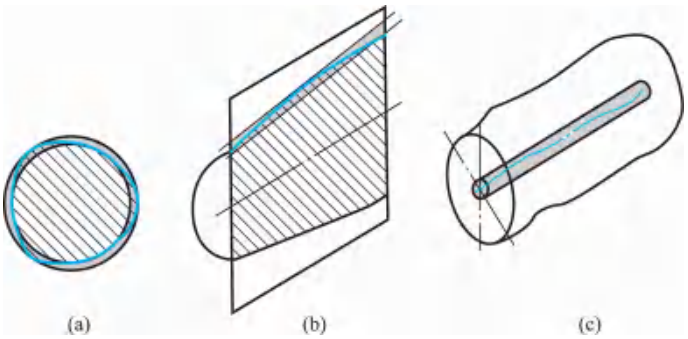


图 4-24　几何公差带示例

几何公差带的形状较多，但常用的公差带有以下 11 种形状：两平行直线间的区域、两等距曲线间的区域、两平行平面间的区域、两等距曲面间的区域、圆柱面内的区域、两同心圆间的区域、圆内区域、球内区域、两同轴圆柱面间的区域、一段圆柱面、一段圆锥面，如图 4-25 所示。

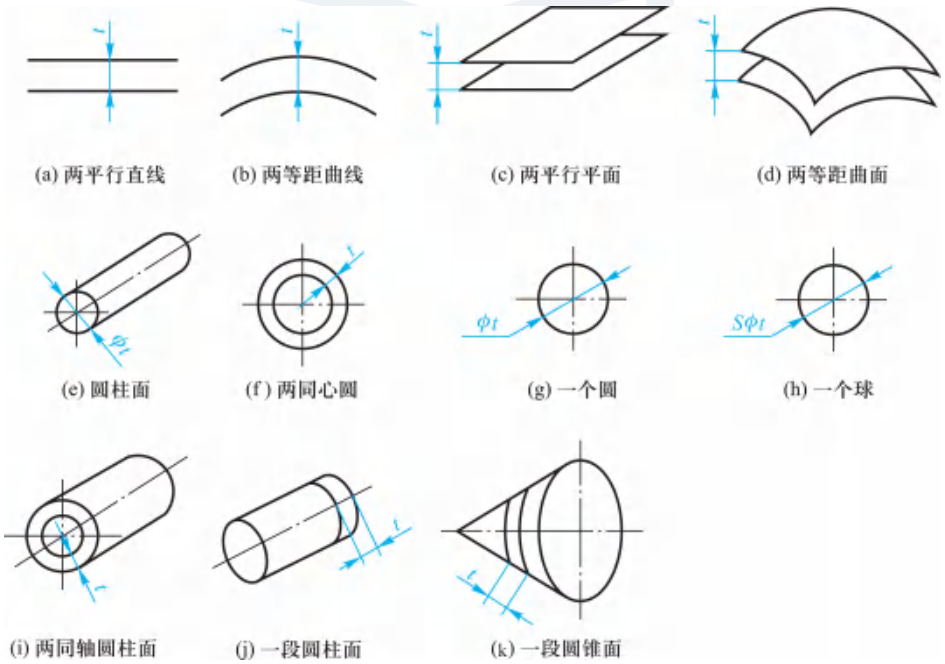


图 4-25　几何公差带的形状

2.1.2　几何公差带的大小

几何公差带的大小是由公差值确定的，它指的是公差带的宽度 t 或直径 ϕt。

2.1.3　几何公差带的方向

几何公差带的方向即评定被测要素误差的方向。对于形状公差，设计不作出规定，其方向应遵守评定形状误差的最小条件原则；对于位置公差，其方向由设计给出，被测要素应与基准

保持设计给定的关系。

2.1.4　几何公差带的位置

形状公差的几何公差带没有位置要求。对于位置公差的几何公差带，其位置是由相对基准的尺寸公差或理论正确尺寸确定的。

几何公差带的方向、位置各存在两种情况：浮动和固定。浮动是指公差带的方向或位置可以随实际被测要素的变动而变动，没有对其他要素保持一定几何关系的要求；固定是指公差带的方向或位置必须和基准要素保持一定的几何关系。所以，形状公差（未标基准）的公差带的方向和位置一般是浮动的，位置公差（标有基准）的公差带的方向和位置一般是固定的。

2.2　形状公差带及其特点

形状误差是单一被测实际要素对其理想要素的变动量。形状公差是为了限制形状误差而设置的，国家标准规定了六个形状误差项目：直线度、平面度、圆度、圆柱度、线轮廓度和面轮廓度。

直线度是表示零件上的直线要素保持理想直线的状况，即研讨直线本身“直不直”的程度问题。

平面度是表示零件上的平面要素保持理想平面的状况，即研讨平面本身“平不平”的程度问题。

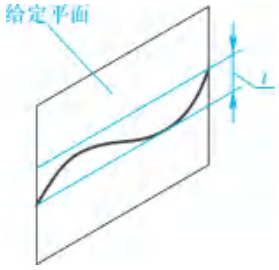
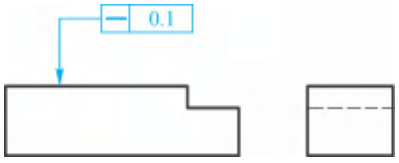
圆度是表示零件上的圆要素的实际形状与中心保持等距的状况，即研讨圆本身“圆不圆”的程度问题。

圆柱度是表示零件上圆柱面要素外形轮廓各点对其轴线保持等距的状况，即研讨圆柱面本身“不仅要圆，而且要直”的程度问题。它比圆度要求更严格。

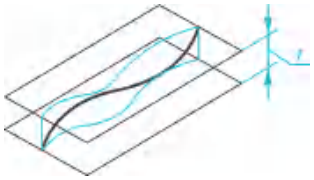
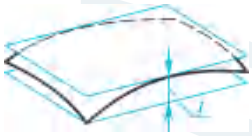
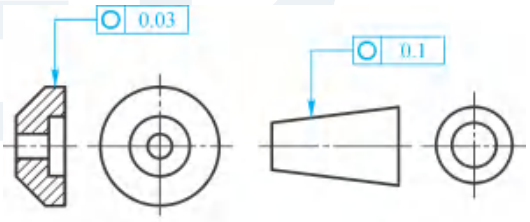
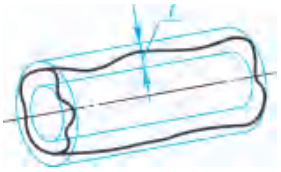
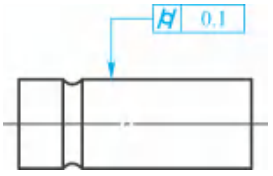
形状公差用形状公差的几何公差带（简称形状公差带）来表达。形状公差带是用以限制单一被测实际要素的形状允许最大变动的区域。形状公差带的特点是：①没有基准要求，公差带是浮动的。②被测要素除直线度有一种情形（轴线直线度）为导出要素外，其他的均为组成要素。

形状公差带的定义、标注示例和解释见表 4-3。

表 4-3　形状公差带的定义、标注示例和解释（摘自 GB/T 1182）　mm

项目	符号	公差带定义	标注示例和解释
直线度	—	在给定平面内，公差带是距离为公差值 t 的两平行直线之间的区域  	被测表面的素线，必须位于平行于图样所示投影面，且距离为公差值 0.1 的两平行直线内 

续　表

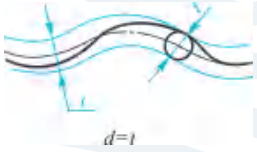
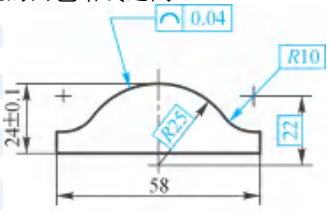
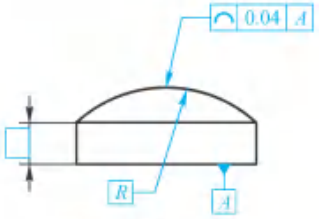
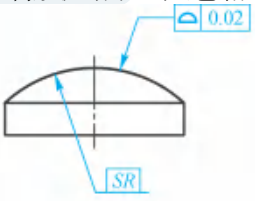
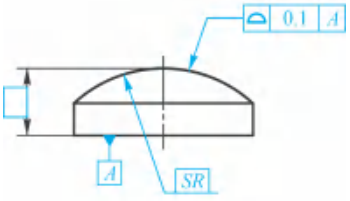
项目	符号	公差带定义	标注示例和解释
直线度	—	在给定方向上公差带是距离为公差值 t 的两平行平面之间的区域 	被测圆柱面的任意素线必须位于距离为公差值 0.1 的两平行平面内
		如在公差值前加注 ϕ，则公差带是直径为 t 的圆柱面内的区域	被测圆柱体的轴线必须位于直径为 ϕt 的圆柱面内
平面度	▱	公差带是距离为公差值 t 的两平行平面之间的区域 	被测表面必须位于距离为公差值 0.08 的两平行平面内
圆度	○	公差带是在同一正截面上，半径差为公差值 t 的两同心圆之间的区域	(a) 被测圆柱面任一正截面的圆周必须位于半径差为公差 0.03 的两同心圆之间； (b) 被测圆锥面任一正截面上的圆周必须位于半径差为公差值 0.1 的两同心圆之间  (a) (b)
圆柱度	⌭	公差带是半径差为公差值 t 的两同轴圆柱面之间的区域 	被测圆柱面必须位于半径差为 0.1 的两同轴圆柱面之间 

2.3　线轮廓度公差与面轮廓度公差

无基准要求时，线轮廓度、面轮廓度均为单一要素，其轮廓度公差为形状公差；有基准要求时，线轮廓度、面轮廓度均为关联要素，其轮廓度公差为位置公差。

线轮廓度、面轮廓度公差带的定义、标注示例和解释见表 4-4。

表 4-4　线轮廓度、面轮廓度公差带的定义、标注示例和解释

项目	符号	公差带定义	标注示例和解释
线轮廓度	⌒	其公差带是包络一系列直径为公差值 t 的圆的两包络线之间的区域，诸圆的圆心位于具有理论正确几何形状的线（理论轮廓线）上： （a）无基准要求； （b）有基准要求  d=t	在平行于图样所示投影面的任一截面上，被测轮廓线必须位于包络一系列直径为公差值 0.04，且圆心位于具有理论正确几何形状的线上的两包络线之间  (a)  (b)
面轮廓度	⌓	公差带是包络一系列直径为公差值 t 的球的两包络面之间的区域，诸球的球心应位于具有理论正确几何形状的面（理论轮廓面）上： （a）无基准要求； （b）有基准要求 d=t	被测轮廓面必须位于包络一系列球的两包络面之间，诸球的直径为公差值 0.02，且球心为具有理论正确几何形状的面上的两包络面之间  (a)  (b)

线轮廓度是表示在零件的给定平面上，任意形状的曲线保持理想形状的状况，即研讨某曲线轮廓“曲不曲”的程度问题。

面轮廓度是表示非圆曲面保持其理想形状的状况，即研讨曲面本身“曲不曲”的程度问题，它比线轮廓度要求严格，是一项综合公差。

非圆曲线、非圆曲面形状大都比较复杂，图样上通常采用理论正确尺寸来确定其理想形状。理论正确尺寸是指用来确定被测要素的理想形状、理想方向和理想位置的尺寸，该尺寸不带公差，标注在方框中。

动画

线轮廓度公差与面轮廓度公差

2.4　形状误差的评定

2.4.1　几何误差的检测原则

几何误差的检测方法很多，可归纳为五大原则：

1）与拟合要素（理想要素）比较原则。用某一实物模拟拟合要素（理想要素），再将被测要素与相应的拟合要素作比较，来评定几何误差。如用刀口尺模拟理想直线；用平板面模拟基准；用心轴模拟被测孔轴线等。

2）测量坐标值原则。广泛应用于对轮廓度、位置度的测量。

3）测量特征参数原则。如以平面上任意方向的最大直线度误差来近似表示该平面的平面度误差。

4）测量跳动原则。主要用于圆跳动、全跳动误差的测量。

5）控制实效边界原则。主要用于按最大实体要求给出几何公差时的零件检测。

2.4.2　形状误差的评定

形状公差是用来限定形状误差的。形状公差用形状公差带来表达。形状公差带是用以限制单一实际要素的形状允许最大变动的区域。因此，实际要素在此区域内为合格，反之则为不合格。

国家标准规定：最小条件是评定形状误差的基本准则。最小条件是指被测实际要素对其理想要素的最大变动量为最小。

形状误差的评定采用最小包容区域法。最小包容区域是指包容被测实际要素，且具有最小宽度 f 或直径 ϕf 的区域。形状误差值可用最小包容区域的宽度或直径表示。

如图 4-26 所示，最小包容区域是根据被测实际要素与包容区域的接触状态来判断的。直线度误差的最小包容区域的判断准则是相间准则，即（高、低、高或低、高、低）。

各种形状、方向、位置误差值都需要建立相应的最小包容区域，它们都具有“最小”“包容”的性质。对于同一被测要素，有 $f_{形状} \leqslant f_{方向} \leqslant f_{位置}$。

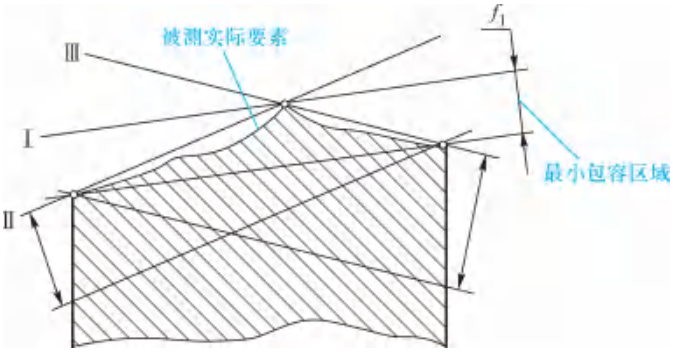


图 4-26　直线度误差的最小包容区域

能力训练指导

能力训练 1：直线度误差的检测，如图 4-27 所示。

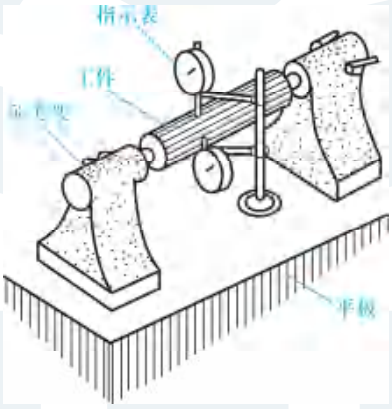


图 4-27　直线度误差的检测

分析指导：

图 4-27 所示为用指示表测量外圆轴线的直线度误差，其测量步骤如下：

1）将工件安装在平行于平板的两顶尖之间。

2）沿铅垂轴截面的两条素线测量，同时记录两指示表在各测点的读数差（绝对值），取各测点读数差的一半的最大值为该轴截面轴线的直线度误差。

3）用同样方法测量若干个截面，取其中最大的误差值作为该外圆轴线的直线度误差。

能力训练 2：平面度误差的检测，如图 4-28 所示。

图 4-28 所示为用指示表测量平面度误差，其测量步骤为：

1）调平。将工件支承在平板上，借助指示表调整被测平面对角线上 a 与 b 两点，使之等高；再调整另一对角线上的 c 与 d，使之等高。

2）测量。移动指示表测量平面上各点，指示表的最大与最小读数之差

微视频

直线度误差的检测

微视频

平面度误差的检测

即为该平面的平面度误差。

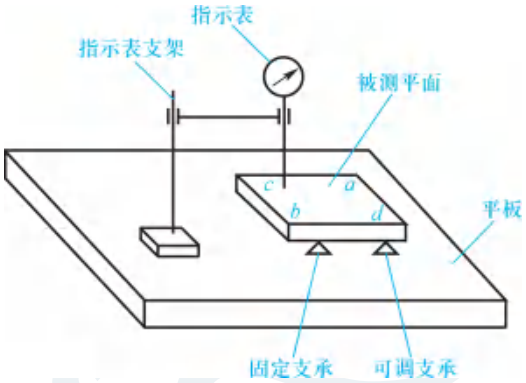


图 4-28　平面度误差的检测

能力训练任务

能力训练任务 1：写出图 4-29 所示用指示表测量圆锥面的圆度误差的测量步骤。

微视频

圆度误差的检测

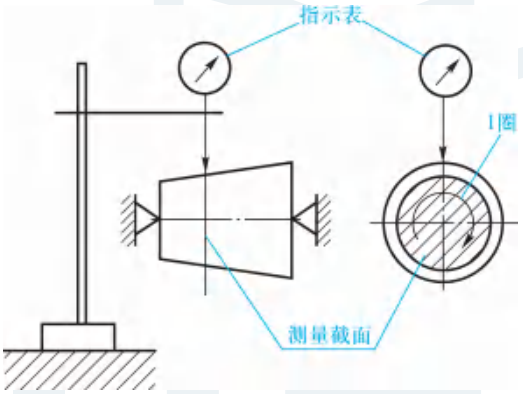


图 4-29　用指示表测量圆锥面的圆度误差

能力训练任务 2：解释图 4-30 所示用指示表测量圆柱度误差的测量方法。

微视频

圆柱度误差的检测

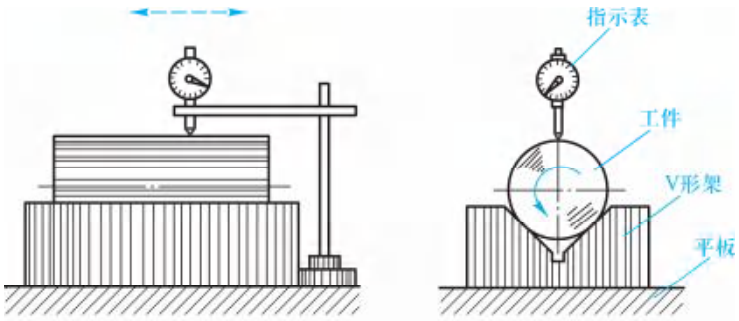


图 4-30　用指示表测量圆柱度误差

任务 3　掌握方向、位置、跳动公差带及它们误差的评定

理论知识要点

3.1　方向公差带及其特点

方向公差限制实际被测要素相对于基准要素在方向上的变动，它包括平行度、垂直度和倾斜度等项目。方向公差带是用以限制关联实际要素对具有确定方向的理想要素允许最大变动的区域。

平行度公差是限制被测实际要素对基准在平行方向上变动量的一项指标。即用来控制零件上被测要素（平面或直线）相对于基准要素（平面或直线）的方向偏离 0°的程度。

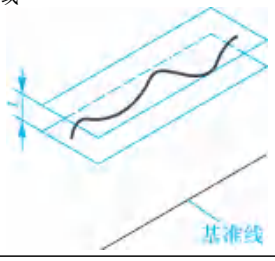
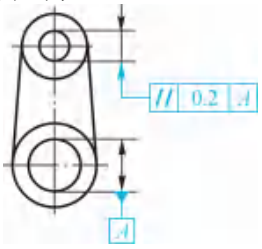
垂直度公差是限制被测实际要素对基准在垂直方向上变动量的一项指标。即用来控制零件上被测要素（平面或直线）相对于基准要素（平面或直线）的方向偏离 90°的程度。

倾斜度公差是限制被测实际要素对基准在倾斜方向上变动量的一项指标。即用来控制零件上被测要素（平面或直线）相对于基准要素（平面或直线）的方向某一角度（0°～90°）的程度。

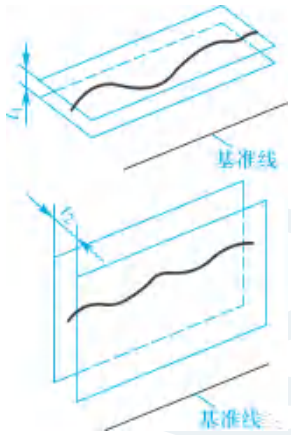
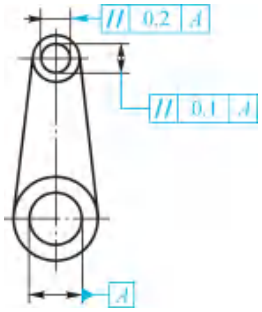
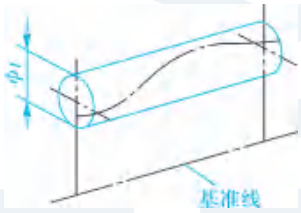
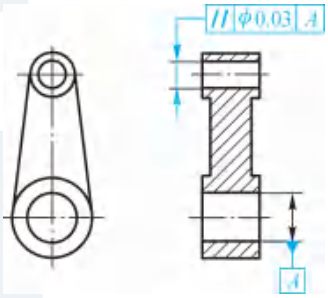
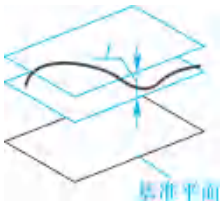
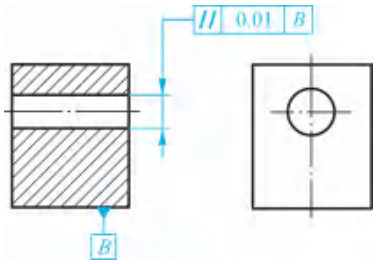
方向公差带的特点：①方向公差带具有确定的方向，而位置可以浮动；②方向公差带可以同时限制被测要素的形状和方向，因此，当同一被测要素有方向公差要求时，一般不再给出形状公差。如果需要对它的形状精度提出进一步要求，可以在给出方向公差的同时再给出形状公差，但形状公差的公差值必须小于方向公差的公差值。

方向公差带的定义、标注示例和解释见表 4-5。

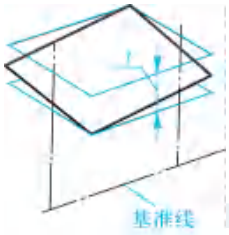
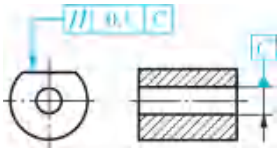
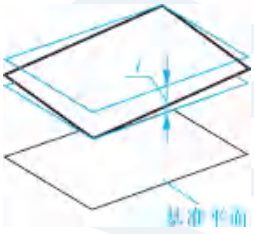
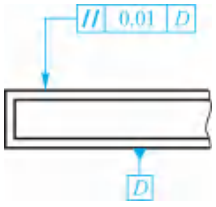
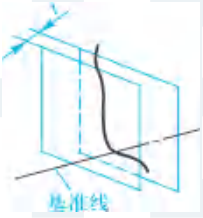
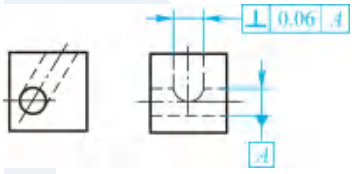
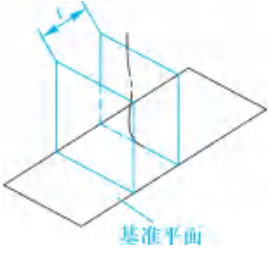
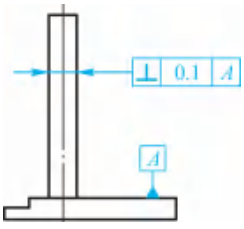
表 4-5　方向公差带的定义、标注示例和解释（摘自 GB/T 1182）　mm

项目	符号	公差带定义	标注示例和解释
平行度	//	（1）线对线： （a）给定一个方向。公差带是距离为公差值 t，且平行于基准线位于给定方向上的两平行平面的区域 	被测轴线必须位于距离为公差值 0.2，且在给定的方向上平行于基准线 A 的两平行平面之间 

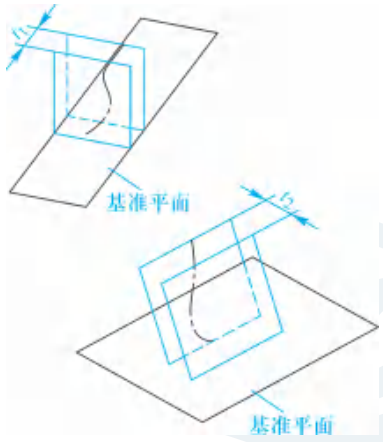
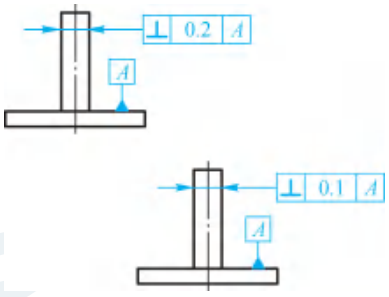
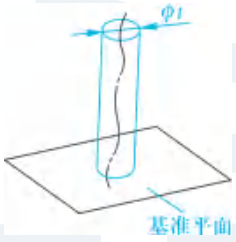
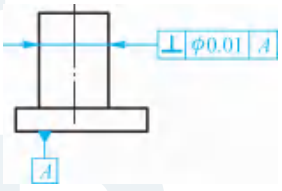
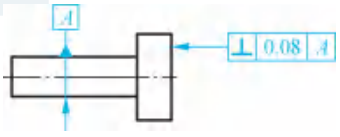
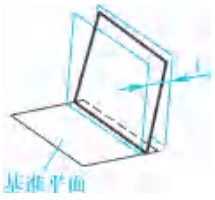
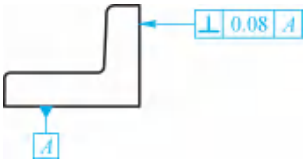
续　表

项目	符号	公差带定义	标注示例和解释
平行度	//	(b) 给定相互垂直的两个方向。公差带是两对相互垂直的距离为 t_1 和 t_2，且平行于基准线的两平行平面之间的区域  	被测轴线必须位于距离分别为公差值 0.2 和 0.1，在给定的互相垂直方向上，且平行于基准线 A 的两组平行平面之间 
		(c) 任意方向。如在公差值前加注 ϕ，公差带是直径为公差值 t，且平行于基准线的圆柱面的区域  	被测轴线必须位于直径为公差值 ϕ0.03，且平行于基准轴线 A 的圆柱面内 
		(2) 线对面： 公差带是距离为公差值 t，且平行于基准平面的两平行平面之间的区域  	被测轴线必须位于距离为公差值 0.01，且平行于基准表面 B(基准平面)的两平行平面之间 

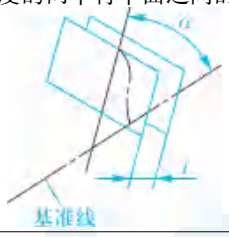
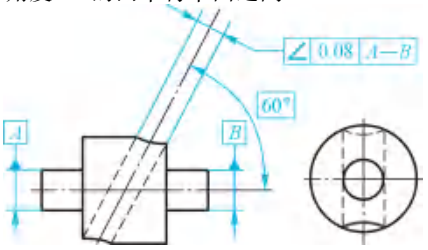
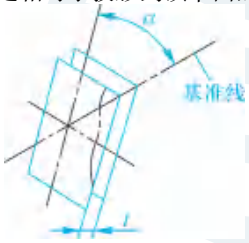
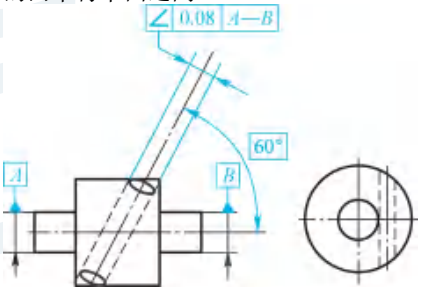
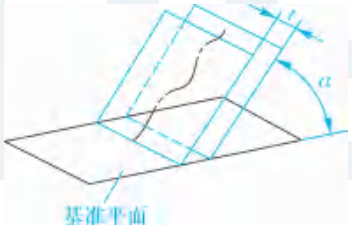
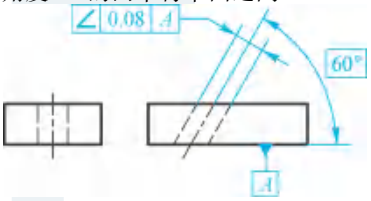
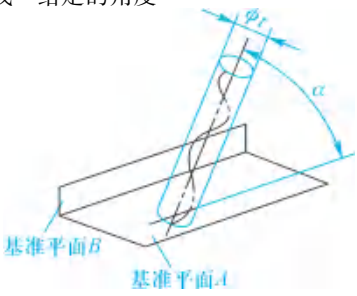
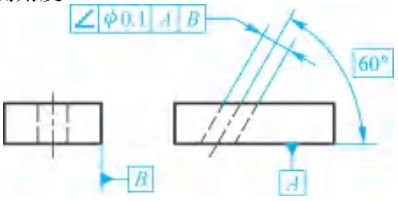
续　表

项目	符号	公差带定义	标注示例和解释
平行度	//	(3) 面对线： 公差带是距离为公差值 t，且平行于基准线的两平行平面之间的区域  	被测表面必须位于距离为公差值 0.1，且平行于基准线 C（基准轴线）的两平行平面之间 
		(4) 面对面： 公差带是距离为公差值 t，且平行于基准面的两平行平面之间的区域  	被测表面必须位于距离为公差值 0.01，且平行于基准表面 D（基准平面）的两平行平面之间 
垂直度	⊥	(1) 线对线： 公差带是距离为公差值 t，且垂直于基准线的两平行平面之间的区域  	被测轴线必须位于距离为公差值 0.06，且垂直于基准线 A（基准轴线）的两平行平面之间 
		(2) 线对面： (a) 给定一个方向。在给定方向上，公差带是距离为公差值 t，且垂直于基准面的两平行平面之间的区域  	在给定方向上被测轴线必须位于距离为公差值 0.1，且垂直于基准表面 A 的两平行平面之间 

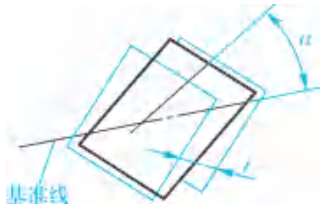
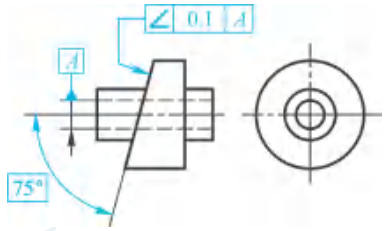
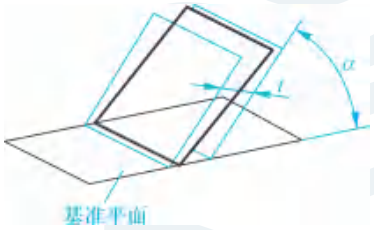
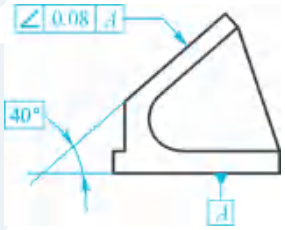
续　表

项目	符号	公差带定义	标注示例和解释
垂直度	⊥	(b) 给定相互垂直的两个方向。公差带分别是相互垂直的距离为 t_1 和 t_2 且垂直于基准面的两平行平面之间的区域  	被测轴线必须位于距离分别为公差值 0.2 和 0.1 的互相垂直且各自垂直于基准平面 A 的两平行平面之间 
		(c) 任意方向。如公差值前加注 ϕ，则公差带是直径为公差值 t，且垂直于基准面的圆柱面内的区域  	被测轴线必须位于直径为公差值 0.01，且垂直于基准平面 A（基准线）的圆柱面内 
		(3) 面对线： 公差带是距离为公差值 t，且垂直于基准线的两平行平面之间的区域 	被测表面必须位于距离为公差值 0.08，且垂直于基准线 A（基准轴线）的两平行平面之间 
		(4) 面对面： 公差带是距离为公差值 t，且垂直于基准面的两平行平面之间的区域  	被测表面必须位于距离为公差值 0.08，且垂直于基准平面 A 的两平行平面之间 

续　表

项目	符号	公差带定义	标注示例和解释
倾斜度	∠	(1) 线对线： (a) 在同一平面内。被测线和基准线在同一平面内：公差带是距离为公差值 t，且与基准线成一给定角度的两平行平面之间的区域  	被测轴线必须位于距离为公差值 0.08，且与 A—B 公共基准线成理论正确角度 60°的两平行平面之间 
		(b) 在不同平面内。被测线与基准线不在同一平面内：公差带是距离为公差 t 且与基准线成一给定角的两平行平面之间的区域。如被测线与基准线不在同一平面内，则被测线应投影到包含基准轴线并平行于被测轴线的平面上，公差带是相对于投影到该平面的线而言的  	被测轴线投影到包含基准轴线的平面上，它必须位于距离为公差值 0.08，并与 A—B 公共基准线成理论正确角度 60°的两平行平面之间 
		(2) 线对面： (a) 给定方向。公差带是距离为公差值 t，且与基准成一给定角度的两平行平面之间的区域  	被测轴线必须位于距离为公差值 0.08，且与基准面 A（基准平面）成理论正确角度 60°的两平行平面之间 
		(b) 任意方向。如果公差值前加注 ϕ，则公差带是直径为公差值 t 的圆柱面内的区域，该圆柱面的轴线应平行于 B 基准平面，并与基准体系成一给定的角度  	被测轴线必须位于直径为 0.1 的圆柱公差带内，该公差带应平行于基准平面 B 并与基准表面 A（基准平面）成理论正确角度 60° 

续　表

项目	符号	公差带定义	标注示例和解释
倾斜度	∠	(3) 面对线： 公差带是距离为公差值 t，且与基准线成一给定角度的两平行平面之间的区域 	被测表面必须位于距离为公差值 0.1，且与基准线(基准轴线)成理论正确角度 75°的两平行平面之间 
		(4) 面对面： 公差带是距离为公差值 t，且与基准面成一给定角度的两平行平面之间的区域 	被测表面必须位于距离为公差值 0.08，且与基准面 A(基准平面)成理论正确角度 40°的两平行平面之间 

微课　平行度公差

微课　垂直度公差

微课　倾斜度公差

3.2　位置公差带及其特点

位置公差限制实际被测要素相对于基准要素在位置上的变动，它包括位置度、同轴(同心)度和对称度等项目。位置公差带是关联被测要素允许变动的区域。

位置度公差要求被测要素对一基准体系保持一定的位置关系，被测要素的理想位置是由基准和理论正确尺寸确定的。

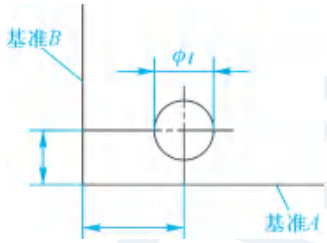
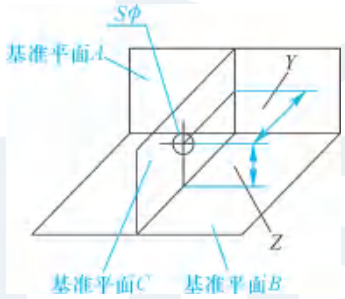
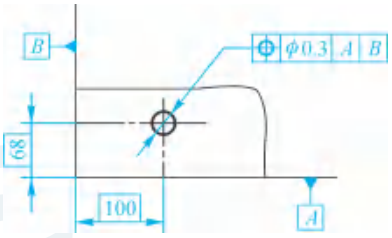
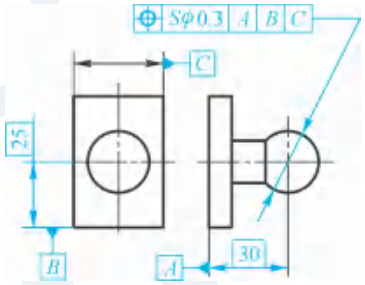
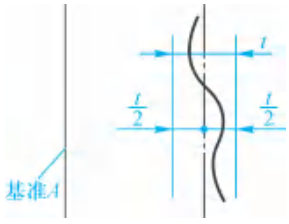
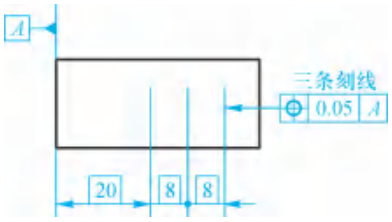
同轴(心)度公差的被测要素和基准要素均为轴线，要求被测要素的理想位置与基准同心或同轴。

对称度公差的被测要素和基准要素为中心平面或轴线，要求被测要素理想位置与基准一致。

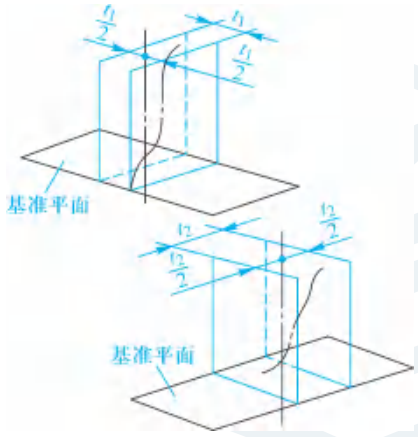
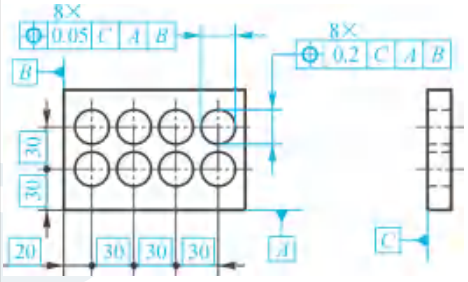
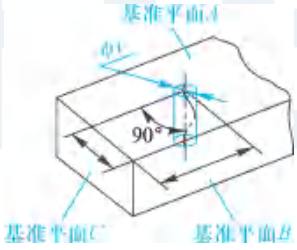
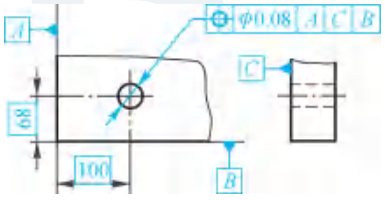
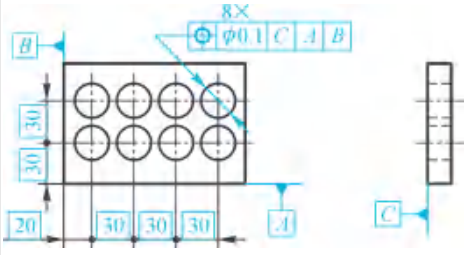
位置公差带的特点：①位置公差带相对于基准具有确定的位置；②位置公差带可以同时限制被测要素的形状、方向和位置，因此，当同一被测要素有位置公差要求时，一般不再给出方向和形状公差；若给出，应使形状公差＜方向公差＜位置公差。

位置公差带的定义、标注示例和解释见表 4-6。

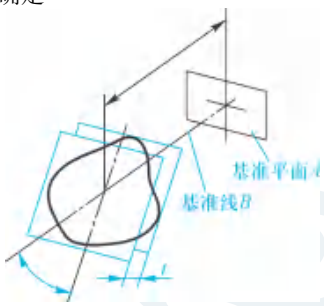
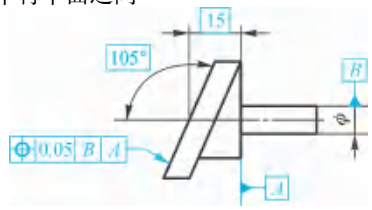
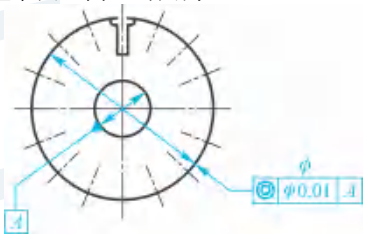
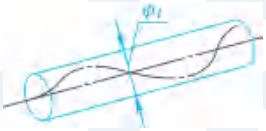
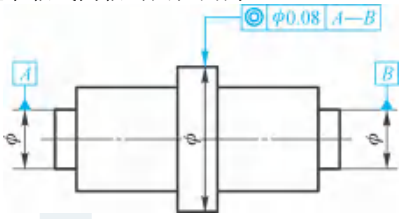
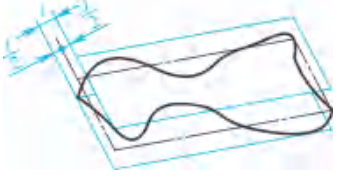
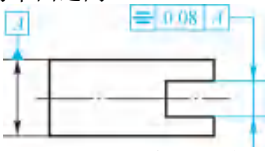
表 4-6　位置公差带的定义、标注示例和解释(摘自 GB/T 1182)　　mm

项目	符号	公差带定义	标注示例和解释
位置度	⌖	(1) 点的位置度： 如在公差值前加注 ϕ，公差带是直径为公差值 t 的圆内的区域。圆公差带的中心点的位置由相对于基准 A 和 B 的理论正确尺寸确定  如在公差值前加注 $S\phi$，公差带是直径为公差值 t 的球内的区域，求公差带的中心点的位置由相对于基准 A、B 和 C 的理论正确尺寸确定  	两个中心线的交点必须位于直径为公差值 0.3 的圆内，该圆的圆心位于相对基准 A 和 B 所确定的点的理想位置上  被测球的球心必须位于直径为公差值 0.3 的球内。该球的球心位于相对基准 A、B、C 所确定的理想位置上 
		(2) 线的位置度： (a) 给定一个方向。公差带是距离为公差值 t，且以线的理想位置为中心线对称配置的两平行线之间的区域。中心线的位置由相对于基准 A 的理论正确尺寸确定，此位置度公差仅给定一个方向  	每根刻线的中心线必须位于距离为公差值 0.05，且相对于基准 A 所确定的理想位置对称的两平行线之间 

续　表

项目	符号	公差带定义	标注示例和解释
位置度	⌖	(b) 给定相互垂直的两个方向。公差带是两对互相垂直的距离为 t_1 和 t_2，且以轴线的理想位置为中心对称配置的两平行平面之间的区域。轴线的理想位置是由相对于三基面体系的理论正确尺寸确定的，此位置度公差相对于基准给定互相垂直的两个方向  	各个被测孔的轴线分别位于两对互相垂直的距离为 0.05 和 0.2，且相对于 C、A、B 基准表面(基准平面)所确定的理想位置对称配置的两平行平面之间 
		(c) 任意方向。如在公差值前加注 ϕ，则公差带是直径为 t 的圆柱面内的区域，公差带的轴线的位置由相对于三基面体系的理论正确尺寸确定  	被测轴线必须位于直径为公差值 0.08，且以相对于 A、B、C 基准表面(基准平面)所确定的理想位置为轴线的圆柱面内  每个被测轴线必须位于直线为公差值 $\phi0.1$，且以相对于 C、A、B 的基准表面(基准平面)所确定的理想位置为轴线的圆柱面内 

续　表

项目	符号	公差带定义	标注示例和解释
位置度	⌖	（3）面的位置度： 公差带距离为公差值 t，且以面的理想位置为中心对称配置的两平行平面之间的区域，面的理想位置是由相对于三基面体系的理论正确尺寸确定  	被测表面必须位于距离为公差值 0.05，且以基准线 B（基准轴线）和基准表面 A（基准平面）所确定的理想位置对称配置的两平行平面之间 
同心度（同轴度）	◎	（1）点的同心度： 公差带是公差值为 ϕt，且与基准圆心同心的圆内的区域 	外圆的圆心必须位于公差值为 $\phi 0.01$，且与基准圆心同心的圆内 
		（2）轴线的同轴度： 公差带是公差值为 ϕt 的圆柱面的区域，该圆柱面的轴线与基准轴线同轴  	圆的轴线必须位于公差值为 $\phi 0.08$，且与基准轴线同轴的圆柱面内 
对称度	⌯	公差带是距离为公差值 t，且相对基准的中心平面对称配置的两平行平面之间的区域  	被测中心平面必须位于距离为公差值 0.08，且相对于基准中心平面 A 对称配置的两平行平面之间  被测中心平面必须位于距离为公差值 0.08，且相对于公共基准中心平面 $A—B$ 对称配置的两平行平面之间

微课　位置度公差

微课　同轴度公差

微课　对称度公差

3.3　跳动公差带及其特点

跳动公差限制被测表面相对基准轴线的变动，分为圆跳动公差和全跳动公差。

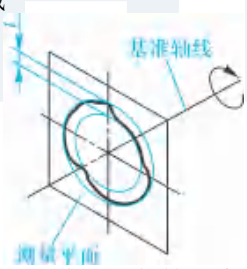
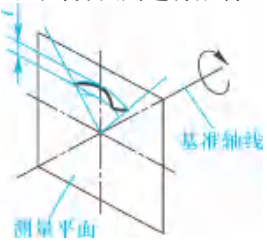
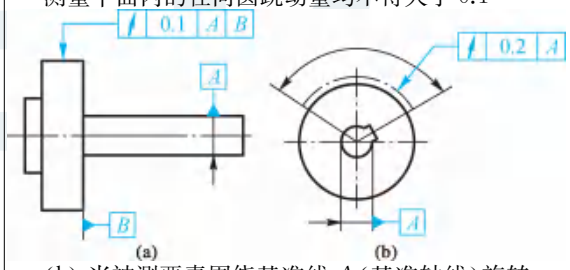
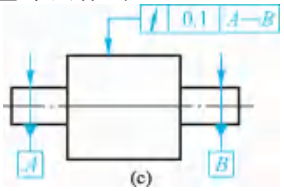
圆跳动公差是被测表面绕基准轴线回转一周时，在给定方向上的任一测量面上所允许的跳动量。圆跳动公差按测量方向的不同分为径向圆跳动公差、斜向圆跳动公差和端面（轴向）圆跳动公差。

全跳动公差是被测表面绕基准轴线连续回转时，在给定方向上所允许的最大跳动量。全跳动公差按测量方向的不同分为径向全跳动公差和端面全跳动公差。

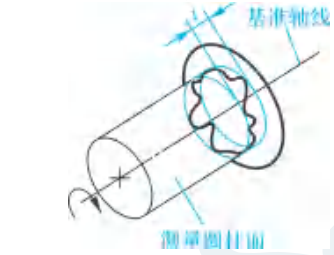
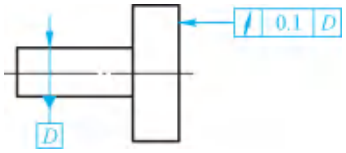
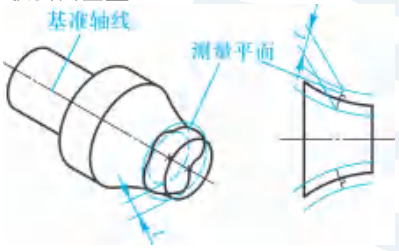
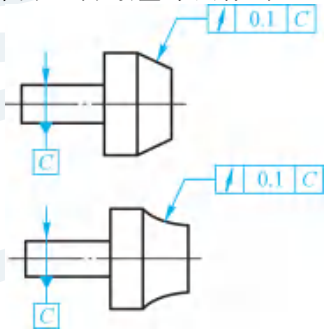
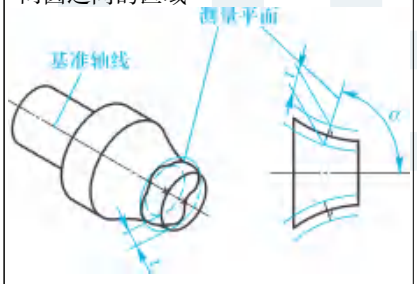
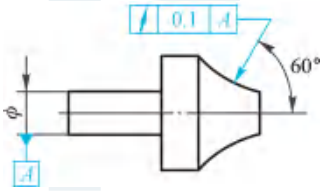
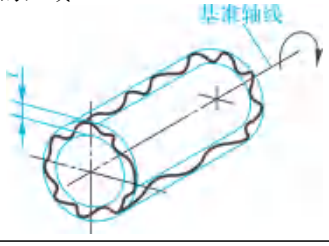
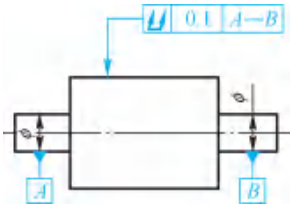
跳动公差带的特点：①跳动公差带的位置具有固定和浮动的双重特点；②跳动公差带可以综合控制被测要素的位置、方向和形状。如端面全跳动公差可同时控制端面对基准轴线的垂直度和它的平面度误差；径向全跳动公差可控制同轴度、圆柱度误差。

跳动公差带的定义、标注示例和解释见表 4-7。

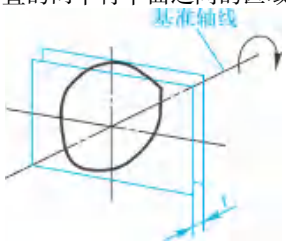
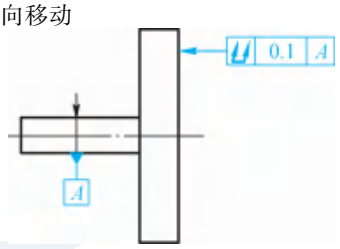
表 4-7　跳动公差带的定义、标注示例和解释（摘自 GB/T 1182）　mm

项目	符号	公差带定义	标注示例和解释
圆跳动	↗	（1）径向圆跳动： 公差带是在垂直于基准轴线的任一测量平面内半径差为公差值 t，且圆心在基准轴线上的两同心圆之间的区域  圆跳动通常是围绕轴线旋转一整周，也可对部分圆周进行限制  	（a）当被测要素围绕基准线 A（基准轴线）并同时受基准表面 B（基准平面）的约束旋转一周时，在任一测量平面内的径向圆跳动量均不得大于 0.1  （b）当被测要素围绕基准线 A（基准轴线）旋转一给定部分圆周时，在任一测量平面内的径向圆跳动量均不得大于 0.2 （c）当被测要素围绕公共基准线 $A—B$（公共基准轴线）旋转一给定部分圆周时，在任一测量平面内的径向圆跳动量均不得大于 0.1 

续　表

项目	符号	公差带定义	标注示例和解释
圆跳动	↗	(2) 轴向圆跳动： 公差带是在与基准同轴的任一半径位置的测量圆柱面上的距离为 t 的两圆之间的区域  	被测面围绕基准线 D(基准轴线)旋转一周时，在任一测量平面内的轴向跳动均不得大于 0.1 
		(3) 斜向圆跳动： 公差带是在与基准同轴的任一测量圆锥面上，距离为 t 的两圆之间的区域；除另有规定，其测量方向应与被测面垂直  	被测面绕基准线 C(基准轴线)旋转一周时，在任一测量圆锥面上的跳动量均不得大于 0.1 
		(4) 给定方向的斜向圆跳动： 公差带是在与基准同轴的任一给定角度的测量圆锥面上，距离为 t 的两圆之间的区域  	被测面绕基准线 A(基准轴线)旋转一周时，在给定角度为 60°的任一测量圆锥面上的跳动量均不得大于 0.1 
全跳动	↗↗	(1) 径向全跳动： 公差带是半径差为公差值 t，且与基准或公共基准同轴的两圆柱面之间的区域  	被测要素围绕公共基准线 A—B 作若干次旋转，并在测量仪器与工件间同时作轴向移动时，被测要素上各点间的示值差均不得大于 0.1，测量仪器或工件必须沿着基准轴线方向并相对于公共基准轴线 A—B 移动 

续　表

项目	符号	公差带定义	标注示例和解释
全跳动	⌰	（2）端面全跳动： 公差带是距离为公差值 t，且与基准垂直的两平行平面之间的区域 	被测要素围绕基准轴线 A 作若干次旋转，并在测量仪器与工件间作径向移动时，在被测要素上各点间的示值差均不得大于 0.1，测量仪器或工件必须沿着轮廓具有理想正确形状的线和相对于基准轴线 A 的正确方向移动 

动画　圆跳动公差

动画　全跳动公差

3.4　方向、位置、跳动误差的评定

3.4.1　方向、位置误差的评定

方向、位置误差的评定采用最小包容区域法。利用最小包容区域去包容被测实际要素，当最小包容区域的宽度或直径小于公差值时，被测要素是合格的。

方向、位置最小包容区域示例如图 4-31 所示。

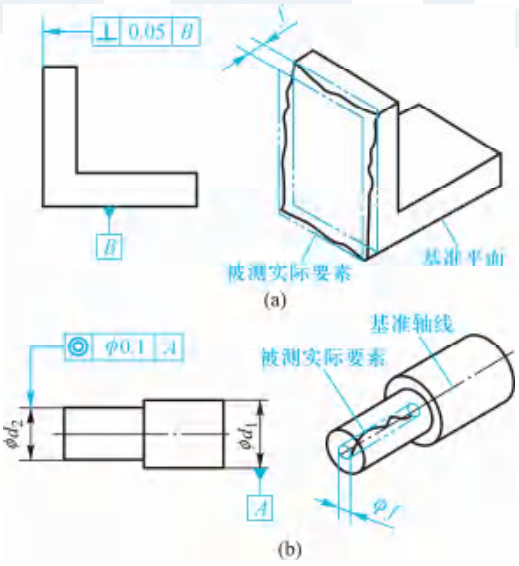


图 4-31　方向、位置最小包容区域示例

3.4.2　跳动误差的评定

圆跳动误差是被测要素无轴向移动绕基准轴线回转一周时，由位置固定的指示表在给定方向上所测得的最大与最小示值之差。

全跳动误差是被测要素绕基准轴线连续回转的同时沿轴向（或径向）移动指示表在给定方向上所测得的最大与最小示值之差。

3.4.3　方向、位置、跳动误差的检测

在方向、位置、跳动误差的检测中，被测实际要素的方向或（和）位置是根据基准来确定的，而理想基准要素是不存在的，在实际测量中，通常用模拟法来体现基准，即用形状足够精确的表面来体现基准平面、基准轴线、基准中心平面等，如图 4-32 所示。

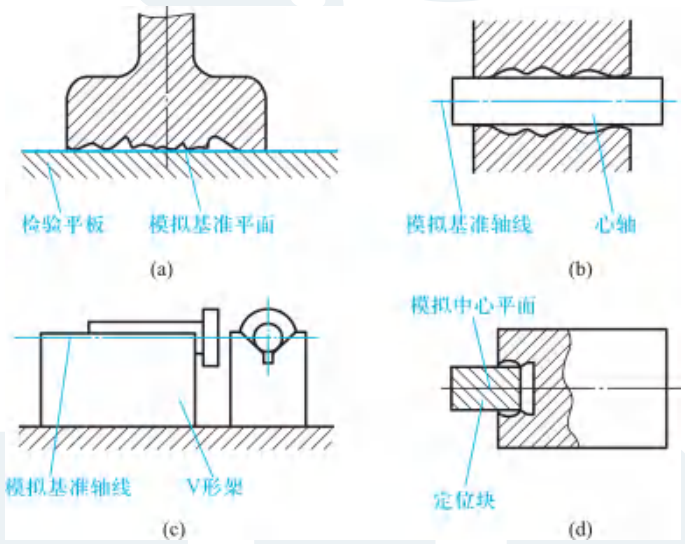


图 4-32　用模拟法体现基准

能力训练指导

能力训练 1：平行度误差的检测。

分析指导：

图 4-33 所示为用指示表测量面对面平行度误差。其步骤是：①安放工件。将工件放置在平板上；②测量。用指示表测量被测平面上各点，指示表的最大与最小读数之差即为该工件的平行度误差。

微视频

平行度误差的检测

图 4-34 所示为测量某工件孔轴线对底平面的平行度误差。其测量步骤是：①安放工件。将工件放在平板上，被测孔轴线用心轴模拟。②测量。在测量距离为 L_2 的两个位置上测得的读数分别为 M_1 和 M_2，则平行度误差为 $\frac{L_1}{L_2}|M_1-M_2|$，其中 L_1 为被测孔轴线的长度。

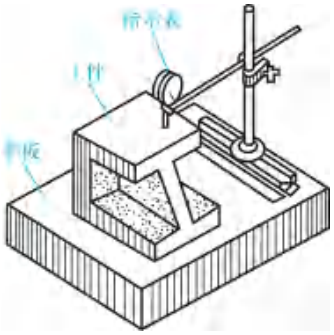


图 4-33　面对面平行度误差的检测

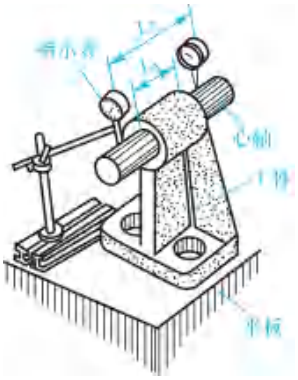


图 4-34　线对面平行度误差的检测

能力训练 2：垂直度误差的检测。

分析指导：

图 4-35 所示为测量某工件端面对孔轴线的垂直度误差，其步骤是：①安放工件。将工件套在心轴上，心轴固定在 V 形架内，基准孔轴线通过心轴由 V 形架模拟。②测量。用指示表在被测端面的各点上测量，指示表的最大与最小读数之差即为该端面的垂直度误差。

微视频

垂直度误差的检测

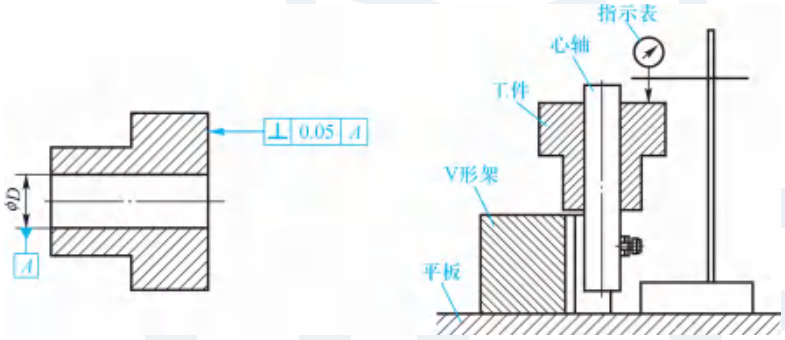


图 4-35　垂直度误差的检测

能力训练任务

能力训练任务 1：如图 4-36 所示，分析如何利用指示表对阶梯轴进行同轴度误差的检测。

微视频

同轴度误差的检测

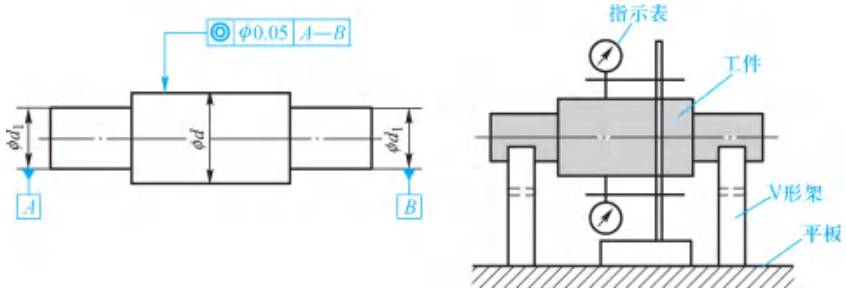


图 4-36　同轴度误差的检测

能力训练任务 2：如图 4-37 所示，分析如何利用指示表对工件进行圆跳动误差的检测。

微视频

跳动误差的检测

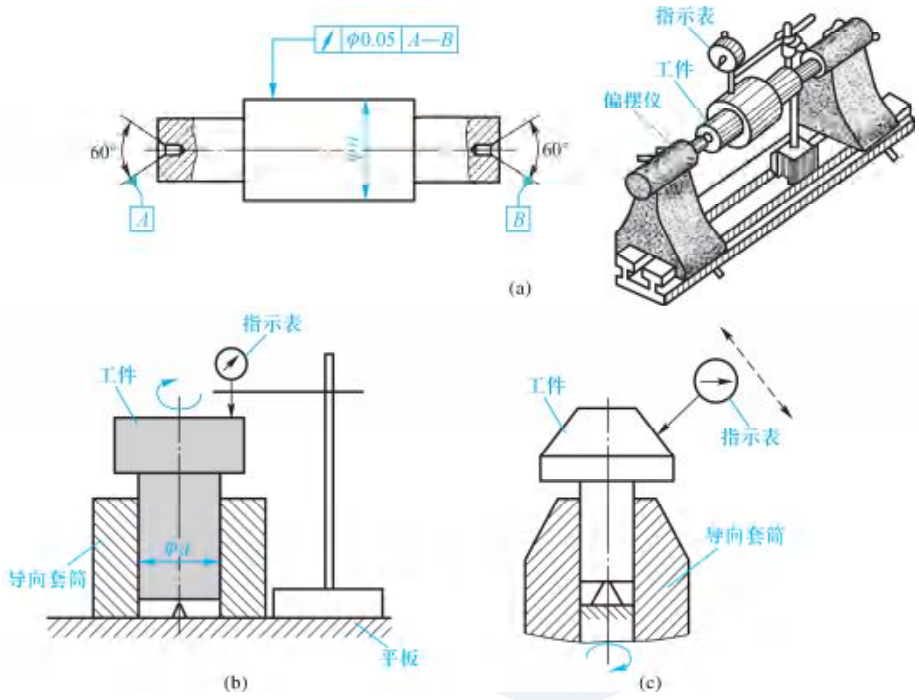


图 4-37　圆跳动误差的检测

任务 4　正确掌握几何公差的选用

理论知识要点

4.1　熟知公差原则的有关术语及定义

(1) 实体尺寸(MMS，LMS)

实体尺寸是设计时由设计者给定的，它可分为最大实体尺寸(MMS)和最小实体尺寸(LMS)。

最大实体状态(MMC)是指实际要素在给定长度上处处位于尺寸极限之内并具有实体最大时的状态，或者是指孔或轴具有材料量为最多时的状态。

最大实体尺寸(MMS)是指处于最大实体状态下的极限尺寸。孔和轴的最大实体尺寸分

别用 D_M 和 d_M 表示。

最小实体状态(LMC)是指实际要素在给定长度上处处位于尺寸极限之内并具有实体最小时的状态,或者是指孔或轴具有材料量为最少时的状态。

最小实体尺寸(LMS)是指处于最小实体状态下的极限尺寸。孔和轴的最小实体尺寸分别用 D_L 和 d_L 表示。

实体尺寸与极限尺寸有如下关系:(孔)$D_M=D_{min}$, $D_L=D_{max}$;(轴)$d_M=d_{max}$, $d_L=d_{min}$。

(2) 作用尺寸

作用尺寸是零件的实际尺寸和几何误差综合作用的尺寸。它可分为体外作用尺寸和体内作用尺寸。对一批零件而言,作用尺寸是一个变值。

1) 体外作用尺寸(D_{fe}, d_{fe})

孔的体外作用尺寸(D_{fe})是指在配合面的全长上与实际孔相内接的最大理想轴的尺寸。

轴的体外作用尺寸(d_{fe})是指在配合面的全长上与实际轴相外接的最小理想孔的尺寸。

2) 体内作用尺寸(D_{fi}, d_{fi})

在被测要素的给定长度上,与实际轴体内相接的最大理想孔的直径称为轴的体内作用尺寸 d_{fi};与实际孔体内相接的最小理想轴的直径称为孔的体内作用尺寸 D_{fi},如图 4-38 所示。

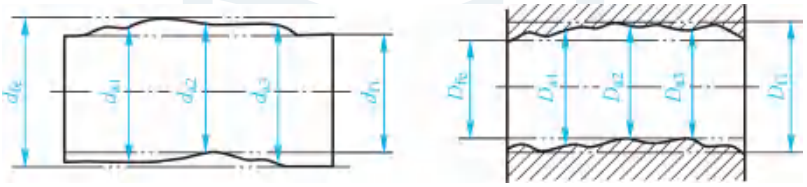


图 4-38　孔与轴的体外、体内作用尺寸

对于孔 $D_{fe}=D_a-F_t$, $D_{fi}=D_a+F_t$。

对于轴 $d_{fe}=d_a+F_t$, $d_{fi}=d_a-F_t$(F_t 为几何误差)。

(3) 边界

边界是指由设计者给定的具有理想形状的极限包容面。

边界的尺寸为极限包容面的直径或距离。其中,尺寸为最大实体尺寸的边界称最大实体边界(MMB),如图 4-39 所示,尺寸为最小实体尺寸的边界称最小实体边界(LMB)。

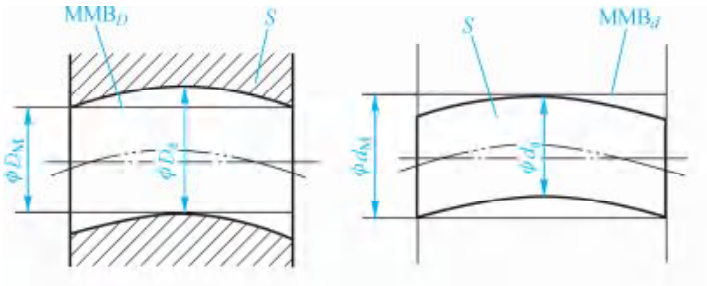


图 4-39　孔、轴的最大实体边界(MMB)

注意，孔(内表面)的边界是一个理想轴(外表面)，轴(外表面)的边界是一个理想孔(内表面)。

(4) 实效尺寸

实效尺寸是零件的实体尺寸和几何公差综合作用的尺寸。它分为最大实体实效尺寸(MMVS)和最小实体实效尺寸(LMVS)。实效尺寸对一批零件而言是一个定值。

1) 最大实体实效状态、尺寸、边界

最大实体实效状态(MMVC)是指在给定长度上，实际要素处于最大实体状态，且其中心要素的形状或位置误差等于给出公差值时的综合极限状态。

最大实体实效尺寸(MMVS)是指在最大实体实效状态下的体外作用尺寸。MMVS 计算式为(t 为中心要素的几何公差，加注符号Ⓜ)：

轴的最大实体实效尺寸为 $d_{MV}=d_M+t=d_{max}+t$。

孔的最大实体实效尺寸为 $D_{MV}=D_M-t=D_{min}-t$。

最大实体实效边界(MMVB)是指尺寸为最大实体实效尺寸的边界，如图 4-40 所示。

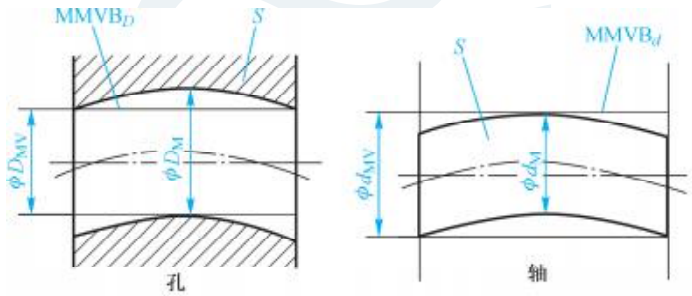


图 4-40　孔、轴的最大实体实效边界

2) 最小实体实效状态、尺寸、边界

最小实体实效状态(LMVC)是指在给定长度上，实际要素处于最小实体状态，且其中心要素的形状或位置误差等于给出公差值时的综合极限状态。

最小实体实效尺寸(LMVS)是指在最小实体实效状态下的体内作用尺寸。LMVS 计算式为：对轴 $d_{LV}=d_L-t=d_{min}-t$。

对孔 $D_{LV}=D_L+t=D_{max}+t$(t 为几何公差)。

最小实体实效边界(LMVB)是指尺寸为最小实体实效尺寸的边界。

4.2　公差原则

公差原则是指用以确定同一被测要素上的几何公差与尺寸公差之间的相互关系的原则。它分为独立原则和相关要求两大类。

4.2.1　独立原则

(1) 独立原则的标识

图样上给出的尺寸公差和几何公差未用特定符号或说明文字来示意它们有联系，就表示

它们遵守独立原则。

（2）独立原则的含义

独立原则是几何公差和尺寸公差不相干的公差原则，或者说几何公差和尺寸公差要求是各自独立的。大多数机械零件的几何精度都是遵循独立原则的，尺寸公差控制尺寸误差，几何公差控制几何误差，图样上不需任何附加标注。

独立原则是尺寸公差和几何公差相互关系遵守的基本原则。独立原则没有控制边界，只有各自的控制极限。

（3）独立原则的标注示例分析

如图 4-41 所示，该标注表示：①轴的局部实际尺寸应在 $\phi19.97\sim\phi20$ mm 之间；②不管实际尺寸为何值，轴线的直线度误差$\leqslant\phi0.05$ mm。该轴分别满足此二项，加工合格；若有一项未满足，则加工不合格。

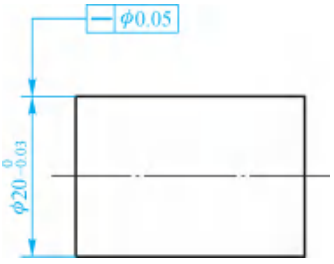


图 4-41　独立原则标注示例

（4）独立原则的检测

对遵守独立原则的被测要素，用通用计量器具分别对尺寸误差、几何误差进行检测。

4.2.2　相关要求

相关要求是指图样上给出的尺寸公差和几何公差相互关联的设计要求。它分为包容要求Ⓔ、最大实体要求Ⓜ、最小实体要求Ⓛ和可逆要求Ⓡ。

（1）包容要求Ⓔ

1）包容要求的标识

包容要求在零件图样上的标识是在尺寸公差带代号后面加写Ⓔ。

2）包容要求的含义

采用包容要求时，含义有三层：①当被测实际要素为最大实体状态时，形状公差为零；②当被测实际要素偏离最大实体状态时，形状公差获得补偿，补偿量来自尺寸公差，并等于尺寸公差减小量；③当被测实际要素为最小实体状态时，形状公差获得补偿量最多，最大补偿量等于尺寸公差。

3）包容要求遵守的边界及合格条件

遵守包容要求时，被测实际要素应遵守最大实体边界。边界尺寸为最大实体尺寸。

被测实际要素的合格条件遵守泰勒原则（也称极限尺寸判断原则），具体内容为：体外作用尺寸不得超过其最大实体尺寸，且局部实际尺寸不得超过其最小实体尺寸，即

对于外表面　$d_{fe}\leqslant d_M(d_{max})$；$d_a\geqslant d_L(d_{min})$。

对于内表面　$D_{fe}\geqslant D_M(D_{min})$；$D_a\leqslant D_L(D_{max})$。

图 4-42　包容要求标注示例

4）包容要求的标注示例分析

如图 4-42 所示，该轴遵守包容要求，遵守边界为 $\phi30$ mm

的理想圆柱面，边界尺寸为 $\phi30$ mm。该轴最大实体尺寸为 $\phi30$ mm，最小实体尺寸为 $\phi29.987$ mm。该轴处于最大实体状态时，其形状误差为 0 mm，该轴处于最小实体状态时，其形状误差为 0.013 mm。该轴的合格条件为：$d_{fe}\leqslant\phi30$ mm，$d_a\geqslant\phi29.987$ mm。

综上所述，在使用包容要求的情况下，图样上所标注的尺寸公差具有双重职能：①控制尺寸误差；②控制形状误差。

5）包容要求的动态公差图

动态公差图是用来表示零件尺寸公差与形位公差变化关系的图形。其画法：以零件实际尺寸 d_a 为横坐标，以零件形状误差为纵坐标，画出一条与横坐标成 45°角的粗直线，这条粗直线上各点纵、横坐标值之和等于该零件的边界。

图 4-43 为图 4-42 所示包容要求的动态公差图。

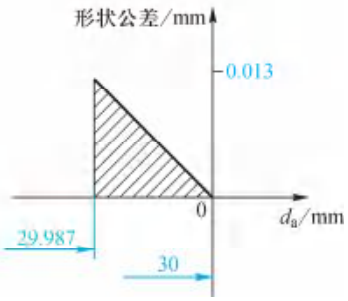


图 4-43　动态公差图

6）包容要求的检测

常用光滑极限量规来检测遵守包容要求的被测要素。

（2）最大实体要求Ⓜ

最大实体要求必须用于导出（中心）要素有几何公差要求的情况。它既可用于被测要素也可用于基准要素，并可同时采用，主要用来保证零件装配的互换性。

这里仅介绍最大实体要求用于被测要素时的情况：

1）最大实体要求用于被测要素的标识

图样上几何公差框格内公差值后加注Ⓜ。

2）最大实体要求用于被测要素的含义

最大实体要求用于被测要素时，含义有三层：①被测要素的几何公差值是在该要素处于最大实体状态时给定的；②当被测要素的实际轮廓偏离最大实体状态时，几何公差获得补偿，补偿量来自尺寸公差，并等于尺寸公差减小量；③当被测实际要素为最小实体状态时，几何公差获得补偿量最多，最大补偿量等于尺寸公差。

3）最大实体要求用于被测要素应遵守的边界及合格条件

最大实体要求用于被测要素时，被测要素应遵守最大实体实效边界。边界尺寸为最大实体实效尺寸。

被测实际要素的合格条件遵守泰勒原则，具体内容为：体外作用尺寸不得超过其最大实体实效尺寸，且局部实际尺寸在最大与最小极限尺寸之间。即

对于外表面　$d_{fe}\leqslant d_{MV}=d_{max}+t$　$d_{max}\geqslant d_a\geqslant d_{min}$

对于内表面　$D_{fe}\geqslant D_{MV}=D_{min}-t$　$D_{max}\geqslant D_a\geqslant D_{min}$　（t 为几何公差）

4）最大实体要求用于被测要素的标注示例分析

如图 4-44 所示，最大实体要求用于 $\phi50^{+0.13}_{0}$ 孔轴线，该孔轴线应遵守最大实体实效边界，边界尺寸为 $\phi49.92$ mm。该孔最大实体尺寸为 $\phi50$ mm，最小实体尺寸为 $\phi50.13$ mm。该孔处于最大实体状态时，其垂直度公差为 $\phi0.08$ mm，该孔处于最小实体状态时，其垂直度公差

为 ϕ0.21 mm。该孔的合格条件为：$D_{fe}\geqslant\phi$49.92 mm，ϕ50.13 mm$\geqslant D_a\geqslant\phi$50 mm。

5）最大实体要求用于被测要素的动态公差图

由图 4-45 可知：该孔处于最大实体状态时，其垂直度公差为 ϕ0.08 mm，该孔处于最小实体状态时，其垂直度公差为 ϕ0.21 mm。

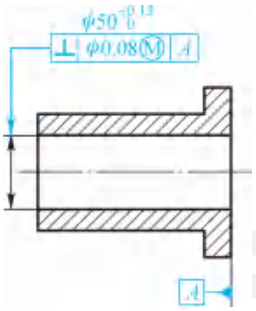


图 4-44　最大实体要求用于被测要素的标注示例

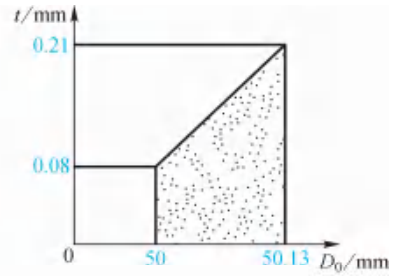
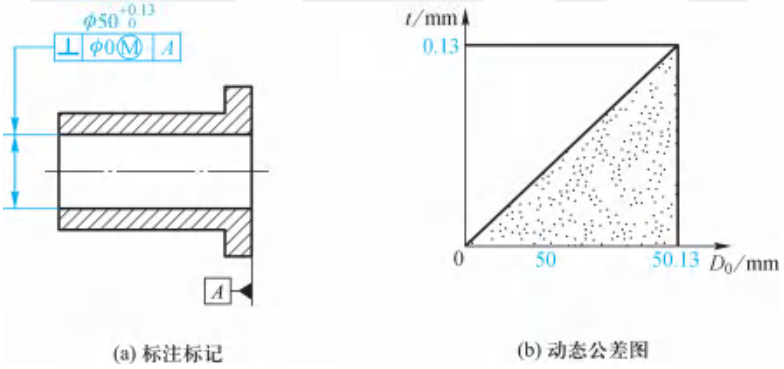


图 4-45　动态公差图

6）最大实体要求的特殊情况——零几何公差

零几何公差是指在零件图样上标记几何公差值的框格内标注标记为 0(ϕ0)Ⓜ，如图 4-46a 所示。此种情况下，被测实际要素的最大实体实效边界就变成了最大实体边界，最大实体实效尺寸等于最大实体尺寸。

对于位置公差而言，最大实体要求的零几何公差比起最大实体要求来，显然更严格。由于零几何公差的缘故，动态公差图的形状由直角梯形（最大实体要求）转为直角三角形（相当于裁掉直角梯形中的矩形），如图 4-46b 所示。



(a) 标注标记　　(b) 动态公差图

图 4-46　最大实体要求的特殊情况——零几何公差

4.3　正确掌握几何公差的标准与选用

4.3.1　几何公差值的标准

国家标准对 11 项几何公差（除线、面轮廓度及位置度未规定公差等级外）作了规定。其

中，直线度、平面度、平行度、垂直度、倾斜度、同轴度、对称度、圆跳动、全跳动划分为 12 级，即 1～12 级，1 级精度最高，12 级精度最低；圆度、圆柱度划分为 13 级，最高等级为 0 级。一般来说，机械制造中，常采用 6、7、8、9 等四级各项目的各级公差值见表 4-8～表 4-11。

表 4-8　直线度和平面度公差值

主参数 L/mm	公差等级											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
	公差值/μm											
≤10	0.2	0.4	0.8	1.2	2	3	5	8	12	20	30	60
>10～16	0.25	0.5	1	1.5	2.5	4	6	10	15	25	40	80
>16～25	0.3	0.6	1.2	2	3	5	8	12	20	30	50	100
>25～40	0.4	0.8	1.5	2.5	4	6	10	15	25	40	60	120
>40～63	0.5	1	2	3	5	8	12	20	30	50	80	150
>63～100	0.6	1.2	2.5	4	6	10	15	25	40	60	100	200
>100～160	0.8	1.5	3	5	8	12	20	30	50	80	120	250
>160～250	1	2	4	6	10	15	25	40	60	100	150	300
>250～400	1.2	2.5	5	8	12	20	30	50	80	120	200	400
>400～630	1.5	3	6	10	15	25	40	60	100	150	250	500
>630～1 000	2	4	8	12	20	30	50	80	120	200	300	600
>1 000～1 600	2.5	5	10	15	25	40	60	100	150	250	400	800
>1 600～2 500	3	6	12	20	30	50	80	120	200	300	500	1 000
>2 500～4 000	4	8	15	25	40	60	100	150	250	400	600	1 200
>4 000～6 300	5	10	20	30	50	80	120	200	300	500	800	1 500
>6 300～10 000	6	12	25	40	60	100	150	250	400	600	1 000	2 000

表 4-9　圆度和圆柱度公差值

主参数 $d(D)$/mm	公差等级												
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
	公差值/μm												
≤3	0.1	0.2	0.3	0.5	0.8	1.2	2	3	4	6	10	14	25
>3～6	0.1	0.2	0.4	0.6	1	1.5	2.5	4	5	8	12	18	30
>6～10	0.12	0.25	0.4	0.6	1	1.5	2.5	4	6	9	15	22	36
>10～18	0.15	0.25	0.5	0.8	1.2	2	3	5	8	11	18	27	43
>18～30	0.2	0.3	0.6	1	1.5	2.5	4	6	9	13	21	33	52
>30～50	0.25	0.4	0.6	1	1.5	2.5	4	7	11	16	25	39	62
>50～80	0.3	0.5	0.8	1.2	2	3	5	8	13	19	30	46	74
>80～120	0.4	0.6	1	1.5	2.5	4	6	10	15	22	35	54	87
>120～180	0.6	1	1.2	2	3.5	5	8	12	18	25	40	63	100
>180～250	0.8	1.2	2	3	4.5	7	10	14	20	29	46	72	115
>250～315	1.0	1.6	2.5	4	6	8	12	16	23	32	52	81	130
>315～400	1.2	2	3	5	7	9	13	18	25	36	57	89	140
>400～500	1.5	2.5	4	6	8	10	15	20	27	40	63	97	155

表 4-10　平行度、垂直度和倾斜度公差值

主参数 L、$d(D)$/mm	公差等级											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
	公差值/μm											
≤10	0.4	0.8	1.5	3	5	8	12	20	30	50	80	120
>10～16	0.5	1	2	4	6	10	15	25	40	60	100	150
>16～25	0.6	1.2	2.5	5	8	12	20	30	50	80	120	200
>25～40	0.8	1.5	3	6	10	15	25	40	60	100	150	250
>40～63	1	2	4	8	12	20	30	50	80	120	200	300
>63～100	1.2	2.5	5	10	15	25	40	60	100	150	250	400
>100～160	1.5	3	6	12	20	30	50	80	120	200	300	500
>160～250	2	4	8	15	25	40	60	100	150	250	400	600
>250～400	2.5	5	10	20	30	50	80	120	200	300	500	800
>400～630	3	6	12	25	40	60	100	150	250	400	600	1 000
>630～1 000	4	8	15	30	50	80	120	200	300	500	800	1 200
>1 000～1 600	5	10	20	40	60	100	150	250	400	600	1 000	1 500
>1 600～2 500	6	12	25	50	80	120	200	300	500	800	1 200	2 000
>2 500～4 000	8	15	30	60	100	150	250	400	600	1 000	1 500	2 500
>4 000～6 300	10	20	40	80	120	200	300	500	800	1 200	2 000	3 000
>6 300～10 000	12	25	50	100	150	250	400	600	1 000	1 500	2 500	4 000

表 4-11　同轴度、对称度、圆跳动和全跳动公差值

主参数 $d(D)$，B，L/mm	公差等级											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
	公差值/μm											
≤1	0.4	0.6	1.0	1.5	2.5	4	6	10	15	25	40	60
>1～3	0.4	0.6	1.0	1.5	2.5	4	6	10	20	40	60	120
>3～6	0.5	0.8	1.2	2	3	5	8	13	25	50	80	150
>6～10	0.6	1	1.5	2.5	4	6	10	15	30	60	100	200
>10～18	0.8	1.2	2	3	5	8	12	20	40	80	120	250
>18～30	1	1.5	2.5	4	6	10	15	25	50	100	150	300
>30～50	1.2	2	3	5	8	12	20	30	60	120	200	400
>50～120	1.5	2.5	4	6	10	15	25	40	80	150	250	500
>120～250	2	3	5	8	12	20	30	50	100	200	300	600
>250～500	2.5	4	6	10	15	25	40	60	120	250	400	800
>500～800	3	5	8	12	20	30	50	80	150	300	500	1 000
>800～1 250	4	6	10	15	25	40	60	100	200	400	600	1 200
>1 250～2 000	5	8	12	20	30	50	80	120	250	500	800	1 500
>2 000～3 150	6	10	15	25	40	60	100	150	300	600	1 000	2 000
>3 150～5 000	8	12	20	30	50	80	120	200	400	800	1 200	2 500
>5 000～8 000	10	15	25	40	60	100	150	250	500	1 000	1 500	3 000
>8 000～10 000	12	20	30	50	80	120	200	300	600	1 200	2 000	4 000

4.3.2　未注几何公差的规定

图样上没有具体注明几何公差值的要素时，根据国家标准规定，其几何精度由未注几何公差来控制，按以下规定执行：

① GB/T 1182 对未注直线度、平面度、垂直度、对称度和圆跳动各规定了 H、K、L 三个公差等级，见表 4-12～表 4-15。

表 4-12　直线度和平面度未注公差值　mm

公差等级	基本长度范围					
	≤10	>10～30	>30～100	>100～300	>300～1 000	>1 000～3 000
H	0.02	0.05	0.1	0.2	0.3	0.4
K	0.05	0.1	0.2	0.4	0.6	0.8
L	0.1	0.2	0.4	0.8	1.2	1.6

表 4-13　垂直度未注公差值　mm

公差等级	基本长度范围			
	≤100	>100～300	>300～1 000	>1 000～3 000
H	0.2	0.3	0.4	0.5
K	0.4	0.6	0.8	1
L	0.6	1	1.5	2

表 4-14　对称度未注公差值　mm

公差等级	基本长度范围			
	≤100	>100～300	>300～1 000	>1 000～3 000
H	0.5			
K	0.6		0.8	1
L	0.6	1	1.5	2

表 4-15　圆跳动未注公差值　mm

公差等级	圆跳动公差值
H	0.1
K	0.2
L	0.5

② 圆度的未注公差值等于直径公差值，但不能大于表 4-15 中的径向圆跳动值。

③ 圆柱度的未注公差值不作规定，但圆柱度误差由圆度、直线度和素线平行度误差三部分组成，而其中每一项误差均由它们的注出公差或未注公差控制。

④ 平行度的未注公差值等于尺寸公差值或直线度和平面度未注公差值中的较大者。

⑤ 同轴度的未注公差值可以和表 4-15 中的圆跳动的未注公差值相等。

⑥ 线轮廓度、面轮廓度、倾斜度、位置度和全跳动的未注公差值均由各要素的注出或未注线性尺寸公差或角度公差控制。

4.3.3　几何公差的选用

几何误差直接影响着零部件的旋转精度、连接强度、密封性以及载荷均匀性等，因此，正确、合理地选用几何公差，对保证机器或仪器的功能要求和提高经济效益具有十分重要的意义。

几何公差的选用主要包括几何公差项目的选择、公差值的选择、公差原则的选择和基准要素的选择。

(1) 几何公差项目的选择

几何公差项目的选择原则是：根据被测要素的几何特征、结构特点及零件的使用要求，并考虑检测的方便和经济效益。

1) 形状公差项目主要是按被测要素的几何形状特征确定的。如控制平面的形状误差选择平面度；控制圆柱面的形状误差应选择圆度或圆柱度。

2) 方向、位置公差项目是按要素间几何方位关系确定的。如对轴线、平面可规定方向和位置公差；对点只能规定位置度公差；回转类零件才可以规定同轴度公差和跳动公差。

3) 零件的功能要求不同，对几何公差应提出不同的要求。如减速器转轴的两个轴颈的几何精度，在功能上，因其是安装基准，所以要求两轴颈同轴，可以规定同轴度公差或径向圆跳动公差。

4) 考虑检测的方便性，有时可将所需的公差项目用控制效果相同或相近的公差项目来代替。例如，要素为一圆柱面时，圆柱度是理想的项目，但是由于圆柱度检测不方便，故可选用圆度、直线度和素线平行度等几个分项进行控制。又如径向圆跳动可综合控制圆度和同轴度误差，而径向圆跳动检测简单易行，所以在不影响设计要求的前提下，可尽量选用径向圆跳动公差项目。

(2) 公差值的选择

公差值的选择原则是：在满足零件功能要求的前提下，考虑工艺经济性和检测条件，选择最经济的公差值。

根据零件功能要求、结构、刚性和加工经济性等条件，公差值的选择应采用类比法。具体选择时，还应考虑以下几点：

1) 在同一要素上给出的形状公差值应小于位置公差值，即 $t_{形状} < t_{方向} < t_{位置}$。如同一平面上，平面度公差值应小于该平面对基准平面的平行度公差值。

2) 圆柱形零件的形状公差，除轴线的直线度公差以外，一般情况下应小于其尺寸公差。如最大实体状态下，形状公差在尺寸公差之内，形状公差包含在位置公差带内。

3) 选用形状公差等级时，应考虑结构特点和加工的难易程度，在满足零件功能要求的前

提下，对于下列情况应适当降低 1～2 级公差等级：①细长的轴或孔；②距离较大的轴或孔；③宽度大于二分之一长度的零件表面；④线对线和线对面相对于面对面的平行度；⑤线对线和线对面相对于面对面的垂直度。

4）选用形状公差等级时，还应注意协调形状公差与表面粗糙度之间的关系。通常情况下，表面粗糙度的数值占形状误差值的 20%～25%。

5）在通常情况下，零件被测要素的形状误差比位置误差小得多，因此给定平行度或垂直度公差的两个平面，其平面度的公差等级，应不低于平行度或垂直度的公差等级；同一圆柱面的圆度公差等级应不低于其径向圆跳动公差等级。

（3）公差原则的选择

公差原则的选择原则是：根据被测要素的功能要求，综合考虑各种公差原则的应用场合和采用该种公差原则的可行性和经济性。

1）独立原则的适用范围较广，尺寸公差、几何公差两者要求都严、一严一松、两者要求都松的情况下，使用独立原则都能满足要求。如印刷机滚筒几何公差要求严、尺寸公差要求松；通油孔几何公差要求松、尺寸公差要求严；连杆的小头孔尺寸公差、几何公差两者要求都严，如图 4-47 所示。

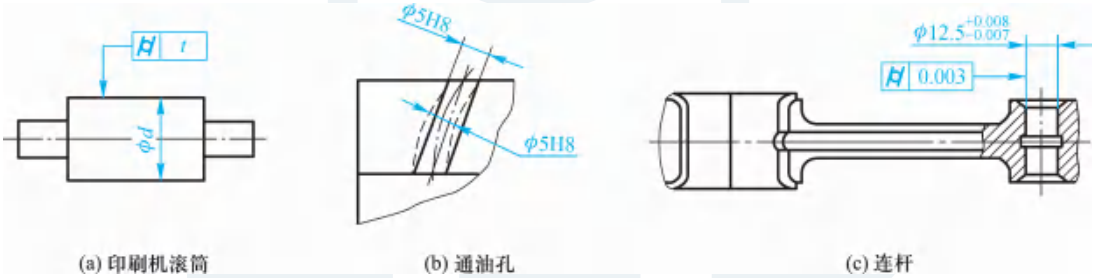


图 4-47　独立原则的适用实例

2）包容要求主要用于需保证配合性质，特别是要求精密配合的场合。选用包容要求时，可用光滑极限量规来检测。

3）最大实体要求主要用于保证可装配性的场合。选用最大实体要求时，可采用功能量规（即位置量规）检测。

4）最小实体要求主要用于需要保证零件的强度和最小壁厚的场合，目前应用较少。

最大、最小实体要求适用于中心要素。

（4）基准要素的选择

基准是确定关联要素间方向和位置的依据。在选择位置公差项目时，需要正确选用基准。选择基准时，一般应从以下几方面考虑：

1）根据零件各要素的功能要求，一般以主要配合表面，如轴颈、轴承孔、安装定位面，重要的支承面等作为基准，如轴类零件，常以两个轴承为支承运转，其运动轴线是安装轴

承的两轴颈共有轴线，因此，从功能要求来看，应选这两处轴颈的公共轴线（组合基准）为基准。

2）根据装配关系应选零件上相互配合、相互接触的定位要素作为各自的基准。如盘、套类零件，一般是以其内孔轴线径向定位装配或以其端面轴向定位，因此根据需要可选其轴线或端面作为基准。

3）根据加工定位的需要和零件结构，应选择较宽大的平面、较长的轴线作为基准，以使定位稳定。对结构复杂的零件，一般应选三个基准面，根据对零件使用要求的影响程度，确定基准的顺序。

4）根据检测的方便程度，应选择在检测中装夹定位的要素为基准，并尽可能将装配基准、工艺基准与检测基准统一起来。

能力训练指导

能力训练：几何公差选用标注，如图 4-1 所示为减速器输出轴。

分析指导：

找出该输出轴上的重要部位，一般而言，与轴承内圈、齿轮、带轮等配合部位，以及定位基准部位都是重点部位。由此：

1）两个轴颈 ϕ55j6 与普通级滚动轴承内圈配合，为保证配合性质，故采用包容要求，同时提出圆柱度公差为 ϕ0.005 mm 的要求；该两轴颈安装滚动轴承后，与减速器箱体上的两孔配合，需限制两轴颈的同轴度误差，为检测方便，提出了径向圆跳动公差 0.025 mm。

2）ϕ56r6 和 ϕ45m6 分别与齿轮、带轮配合，为保证配合性质，也采用包容要求；为保证齿轮的正确啮合，对 ϕ56r6 提出了径向圆跳动公差 0.025 mm。

3）ϕ62 处左、右两轴肩为齿轮、轴承的定位面，应与轴线垂直，为此提出了端面圆跳动公差 0.015 mm。

4）对键槽提出对称度要求，此处选用 8 级。

能力训练任务

能力训练任务：按以下要求标注，需标注的阶梯轴如图 4-48 所示。

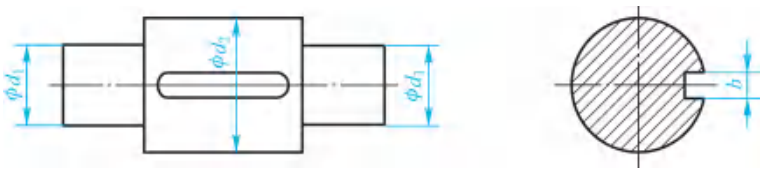


图 4-48　阶梯轴标注

1）轴颈 2×ϕd_1 采用包容要求。

2）ϕd_2 轴线对 $2\times\phi d_1$ 轴颈公共基准轴线的同轴度公差为 0.015 mm。

3）b 键槽的中心平面对 ϕd_2 圆柱面轴线的对称度为 0.025 mm。

巩 固 训 练

1. 填空题

1）按所处地位不同，几何要素可分为_____和_____。被测要素按功能要求又可分为_____和_____。

2）几何公差可分为_____、_____、_____和_____。国标规定有_____个特征项目。

3）轴线直线度的公差带形状是_____，同轴度的公差带形状是_____。

4）圆跳动公差可以分为_____圆跳动公差、_____圆跳动公差和_____圆跳动公差三种。

5）孔的最大实体实效尺寸 D_{MV} 等于_____尺寸与其中心要素的_____之差。

6）轮廓要素的尺寸公差与其导出要素的几何公差的相关要求可以分为_____要求、_____要求和_____要求三种。

7）公差原则中的包容要求适用于单一要素。包容要求表示实际要素要遵守_____，其局部实际尺寸不得超出最小实体尺寸。

8）标准中规定公称尺寸为 30～50 mm 时，IT8＝39 μm，则对于图样标注为 ϕ36h8 时，其最大实体尺寸为_____mm，最小实体尺寸为_____mm，对于图样标注为 ϕ36H8 时，其最大实体尺寸为_____mm，最小实体尺寸为_____mm。

2. 判断题

1）导出要素不能被人们直接感觉到，因此导出要素只能作为基准要素，不能作为被测要素。（　　）

2）在图样上给出形状公差要求的要素均为单一要素。（　　）

3）平面度公差带与端面全跳动公差带的形状是相同的。（　　）

4）直线度公差带一定是距离为公差值 t 的两平行平面之间的区域。（　　）

5）若某平面的平面度误差值为 0.06 mm，则该平面对基准的平行度一定小于 0.06 mm。（　　）

6）轴上有一键槽，其对称度公差为 0.03 mm，该键槽实际中心平面对基准轴线的最大偏离量为 0.02 mm，因此它是符合要求的。（　　）

7）几何公差按最大实体原则与尺寸公差相关时，则要求实际被测要素遵守最大实体边界。（　　）

8）公差等级的选用应在保证使用要求的条件下，尽量选取较低的公差等级。（　　）

3. 选择题

1）几何公差的基准代号中，字母(　　)。

A. 按垂直方向书写　　B. 按水平方向书写

C. 书写方向应与基准符号的方向一致　　D. 按任意方向书写均可

2）直线度误差属于(　　)。

A. 轮廓误差　　B. 方向误差　　C. 形状误差　　D. 跳动误差

3）某实际被测轴线相对于基准轴线的最近点距离为 0.04 mm，最远点距离为 0.08 mm，则该实际被测轴线对基准轴线的同轴度误差为(　　)。

A. 0.04 mm　　B. 0.08 mm　　C. 0.12 mm　　D. 0.16 mm

4）径向全跳动公差带的形状与(　　)的公差带形状相同。

A. 同轴度　　B. 圆度　　C. 圆柱度　　D. 轴线的位置度

5）(　　)是给定平面内直线度最小包容区域的判别准则。

A. 三角形准则　　B. 相间准则　　C. 交叉准则　　D. 直线准则

6）最大实体尺寸是指(　　)。

A. 孔和轴的上极限尺寸　　B. 孔和轴的下极限尺寸

C. 孔的下极限尺寸和轴的上极限尺寸　　D. 孔的上极限尺寸和轴的下极限尺寸

7）设某轴的尺寸为 $\phi 25_{-0.05}^{0}$，其轴线直线度公差为 $\phi 0.05$，则其最小实体实效尺寸为(　　)。

A. 25.05 mm　　B. 24.95 mm　　C. 24.90 mm　　D. 24.80 mm

8）公差原则是(　　)。

A. 确定公差值大小的原则　　B. 制定公差与配合标准的原则

C. 处理误差和公差关系的原则　　D. 处理尺寸公差和几何公差关系的原则

4. 标注题

将下列各项几何公差要求标注在零件图上，零件图如图 4-49 所示。

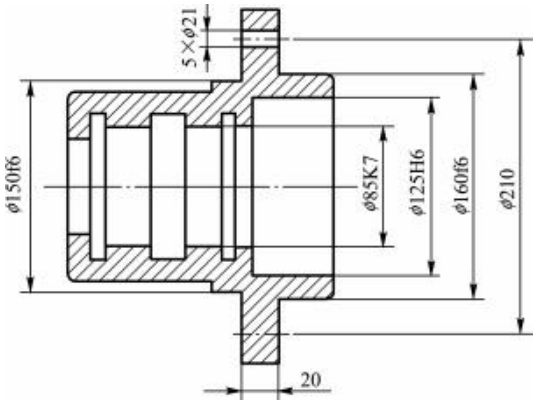


图 4-49　零件图

1）ϕ160f6 圆柱表面对 ϕ85K7 圆孔轴线的圆跳动公差为 0.03 mm。

2）ϕ150f6 圆柱表面对 ϕ85K7 圆孔轴线的圆跳动公差为 0.02 mm。

3）厚度为 20 的安装板左端面对 ϕ150f6 圆柱面轴线的垂直度公差为 0.03 mm。

4）安装板右端面对 ϕ160f6 圆柱面轴线的垂直度公差为 0.03 mm。

5）ϕ125H6 圆孔的轴线对 ϕ85K7 圆孔轴线的同轴度公差为 ϕ0.05 mm。

6）5×ϕ21 孔对由与 ϕ160f6 圆柱面轴线同轴，直径尺寸 ϕ210 确定并均匀分布的理想位置的位置度公差为 ϕ0.125 mm。

5. 标注改错题

改正图 4-50a、b、c、d 所示的几何公差标注上的错误(不改变几何公差项目)。

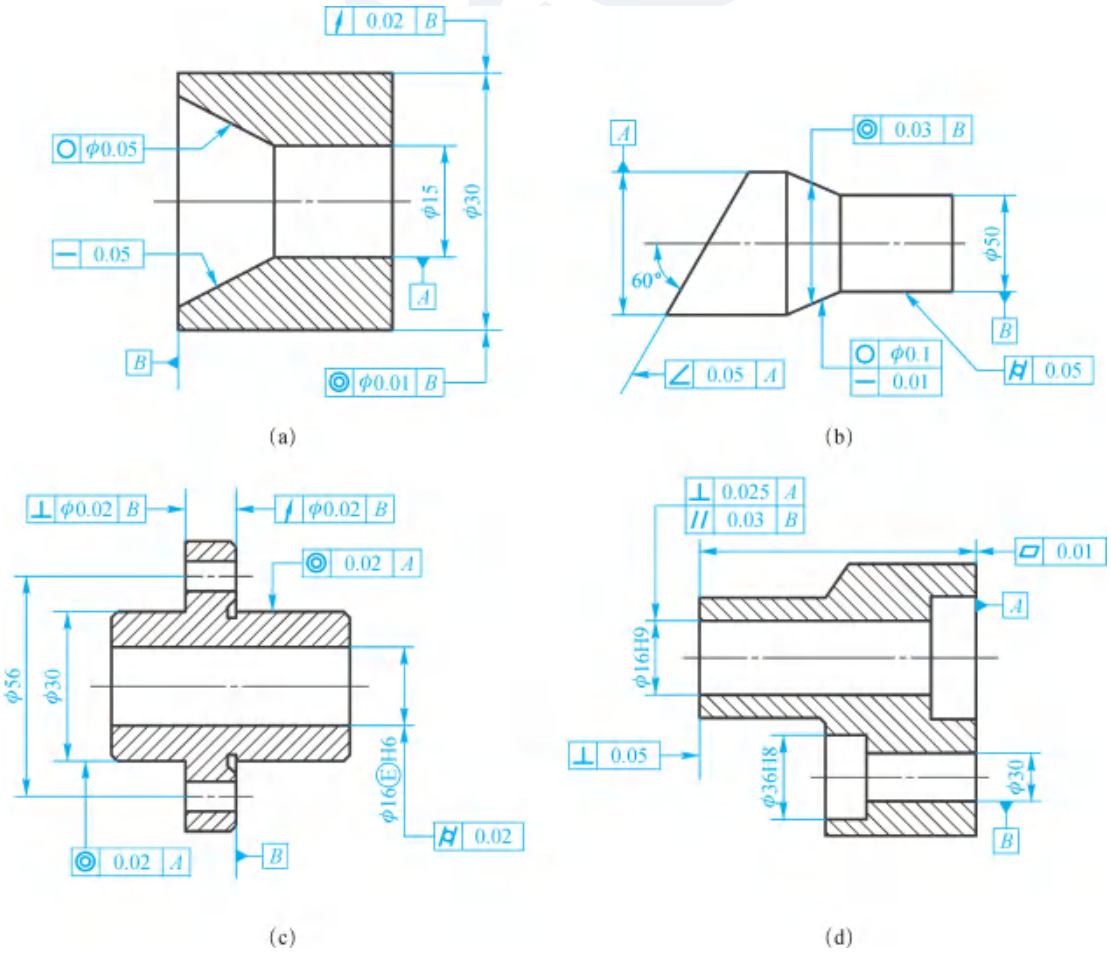


图 4-50　标注改错

6. 公差原则分析

试对图 4-51 所示的标注内容进行分析，按要求将相关信息填入表 4-16 中。

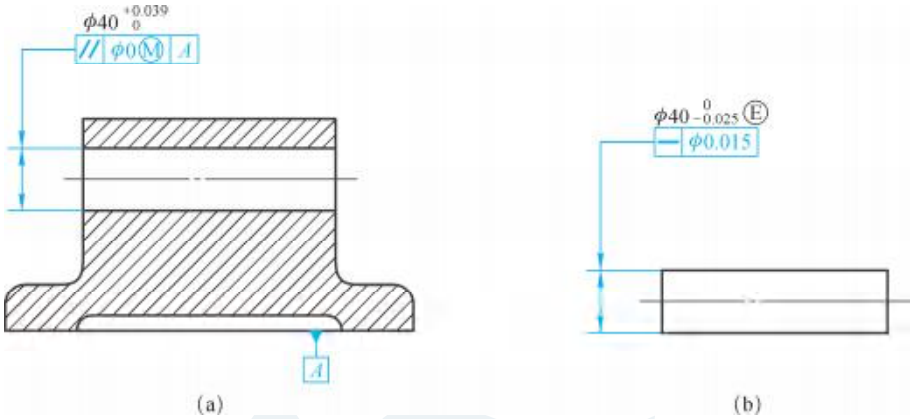


图 4-51　公差原则分析

表 4-16　公差原则分析表

相关信息	图 4-51a	图 4-51b
最大实体尺寸		
最小实体尺寸		
几何公差的给定值		
几何公差的最大允许值		
遵守的边界名称		
边界的尺度		
合格条件		

Module 5 模块五　表面粗糙度

表面粗糙度是零件加工质量的重要技术要求之一。正确识读零件图上的表面粗糙度，设计时能正确选用和标出表面粗糙度，是机械工程技术人员必须掌握的能力。

教学课件
表面粗糙度

如图 5-1 所示为减速器输出轴，轴颈 ϕ55j6（两处）与滚动轴承配合，ϕ56r6 和 ϕ45m6 与齿轮和带轮配合，这些配合表面的表面粗糙度要求较高，其余表面的表面粗糙度要求较低，那么，表面粗糙度的数值大小如何确定、在图样上如何进行标注，这是本模块的学习重点。

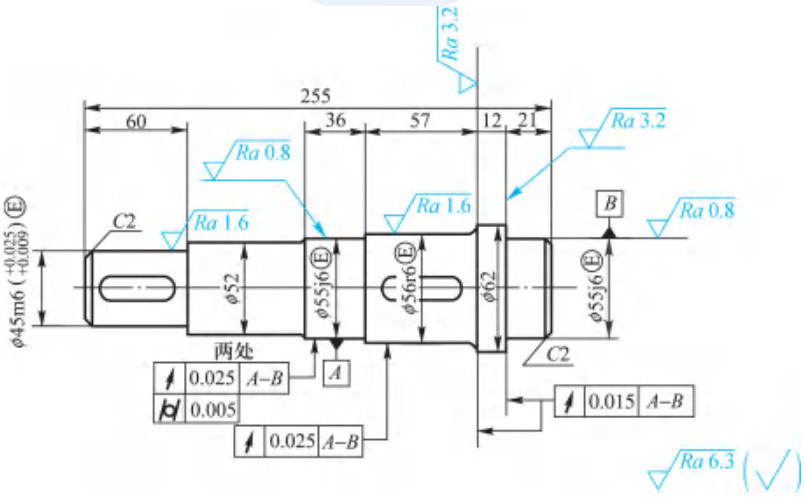


图 5-1　减速器输出轴

任务 1　掌握表面粗糙度的正确标注

理论知识要点

1.1　表面粗糙度概述

1.1.1　表面粗糙度概念

无论是机械加工后的零件表面，还是用其他方法获得的零件表面，总会存在几何形状误差。几何形状误差分为表面形状误差（宏观几何形状误差）、表面波纹度（波度）和表面粗糙度（微观几何形状误差）三类，它们是按波距来划分的。波距 λ 是指相邻两波峰或两波谷之间的距离，当波距 λ 小于 1 mm 时，属于表面粗糙度；波距 λ 范围为 1～10 mm 时，属于表面波纹度；波距 λ 大于 10 mm 时，属于表面形状误差。表面微观几何形状误差与表面缺陷（如沟槽、气孔、划痕等）都属于表面结构。

微课

表面粗糙度概念

表面粗糙度（也称表面不平度）是指由零件表面的较小间距和微小峰谷组成的微观几何形状误差，如图 5-2 所示。表面粗糙度数值越小，表示表面越光滑。

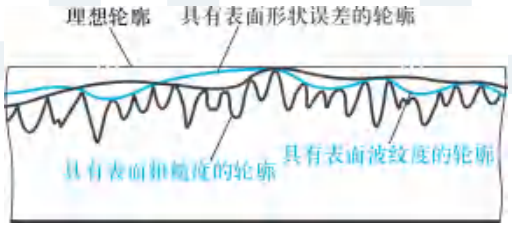


图 5-2　零件表面的几何形状误差

1.1.2　表面粗糙度对机械零件使用性能的影响

表面粗糙度是评定产品质量的重要指标，其数值大小对零件的使用性能和寿命有直接影响，主要表现如下：

1）影响配合性质的稳定性。对间隙配合，作相对运动的两个表面粗糙的零件磨合后，间隙增大，可能会改变配合性质；对过盈配合，压入装配时会挤平凸峰，减小实际有效过盈，降低连接强度；对过渡配合，表面粗糙度会使配合变松，降低定位和导向精度。

2）影响零件的耐磨性。表面越粗糙，摩擦系数越大，两相对表面运动时，磨损越快；表面过于光滑，由于润滑油被挤出或吸附作用减弱等原因，也会使摩擦阻力增大从而加快磨损。

3）影响抗疲劳强度。疲劳裂纹主要是由于表面微观峰谷的波谷所造成的应力集中引起的。表面越粗糙，凹谷越深，应力集中越严重，容易产生疲劳破坏。

4）影响耐腐蚀性。对于在有腐蚀性气体或液体条件下工作的工件，表面越粗糙越容易将腐蚀物存于凹谷中，造成工件表面的腐蚀。

此外，表面粗糙度对密封性、产品外观及表面反射能力等都有明显的影响，因此，在保证零件尺寸、形状和位置精度的同时，也要对表面粗糙度提出相应的要求。

1.2　表面粗糙度的评定参数

1.2.1　表面粗糙度评定的相关术语

（1）实际表面（Real Surface）

物体与周围介质分离的表面称为实际表面，如图 5-3 所示。

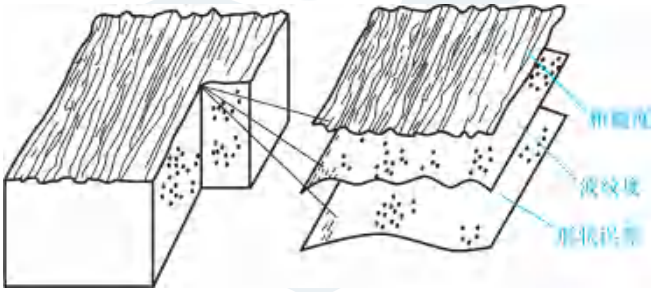


图 5-3　实际表面

（2）表面轮廓

平面与实际表面相交所得的轮廓线称为表面轮廓。在评定表面粗糙度时，除非特别说明，表面轮廓指垂直于表面加工纹理方向的轮廓线，如图 5-4 所示。

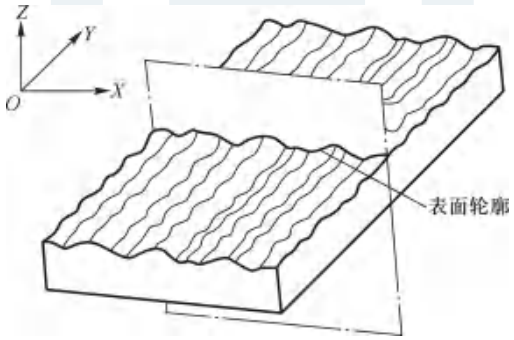


图 5-4　表面轮廓

（3）取样长度（lr）

取样长度是指用于判别具有表面粗糙度特征的一段基准线长度。标准规定取样长度按表

面粗糙程度选取相应的数值，一般表面越粗糙，取样长度应越长。在取样长度范围内，轮廓线走向基本一致，一般不少于 5 个的轮廓峰和轮廓谷，目的是为了限制和减弱表面波纹度对表面粗糙度测量结果的影响。

(4) 评定长度(ln)

由于零件表面粗糙度不均匀，为了全面、合理地反映被测表面的特性，在评定或测量表面轮廓时所必需的一段长度移为评定长度。评定长度可包括一个或多个取样长度。国家标准推荐：$ln=5lr$；对均匀性好的表面，宜选 $ln\leqslant 5lr$；对均匀性较差的表面，宜选 $ln\geqslant 5lr$。lr 和 ln 的数值见表 5-1。

表 5-1　lr 和 ln 的数值(摘自 GB/T 1031)

Ra/μm	Rz/μm	lr/mm	ln/mm($ln=5lr$)
≥0.008～0.02	≥0.025～0.10	0.08	0.4
>0.02～0.10	>0.10～0.50	0.25	1.25
>0.10～2.0	>0.50～10.0	0.8	4.0
>2.0～10.0	>10.0～50.0	2.5	12.5
>10.0～80.0	>50.0～320	8.0	40.0

(5) 轮廓滤波器与传输带

轮廓滤波器是指能将表面轮廓分离成长波成分和短波成分的滤波器，它们对应抑制的波长称为截止波长。长波滤波器(其截止波长为 λ_C)能将大于其设定截止波长的部分滤掉；短波滤波器(其截止波长为 λ_S)能将小于其设定截止波长的部分滤掉。

表面轮廓经过滤波，去掉了表面形状误差、表面波纹度等因素的影响，结果只呈现表面粗糙度结构，方便测量和评定。

从短波滤波器的截止波长 λ_S 到长波滤波器的截止波长 λ_C 之间的波长范围称为评定表面粗糙度的传输带。

采用触针式量仪测量时，长波滤波器的截止波长 λ_C 等于取样长度 lr，即 $\lambda_C=lr$ 。

(6) 基准线(轮廓中线)

基准线是评定表面粗糙度参数值大小的一条参考线，有以下两种：

① 轮廓的最小二乘中线　它是一条假定的直线，要求轮廓上的点到此直线的距离的平方和为最小。

② 轮廓的算术平均中线　它也是一条假定的直线，要求该直线划分轮廓的上、下两部分的面积相等。算术平均中线常用目测确定，是一种近似的图解，在生产中常用它替代轮廓的最小二乘中线。

1.2.2　表面粗糙度评定参数

表面结构要求的评定参数有 R 轮廓(表面粗糙度参数)、W 轮廓(波纹度参数)、P 轮廓(原始轮廓参数)。工程上一般采用 R 轮廓。

为了满足对零件表面不同的功能要求，从不同角度反映表面粗糙度的状态特征，国家标准

从实际轮廓的幅度、横向间距和形状三个方面规定了相应的参数。

微课

表面粗糙度评定参数

（1）幅度参数（高度参数）

1）轮廓的算术平均偏差 Ra　在一个取样长度内，各点纵坐标值 $y(x)$ 绝对值的算术平均值称为轮廓的算术平均偏差，如图 5-5 所示。其数学表达式为

$$Ra=\frac{1}{lr}\int_0^{lr}|y(x)|\mathrm{d}x;\ Ra\approx\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}|y_i|$$

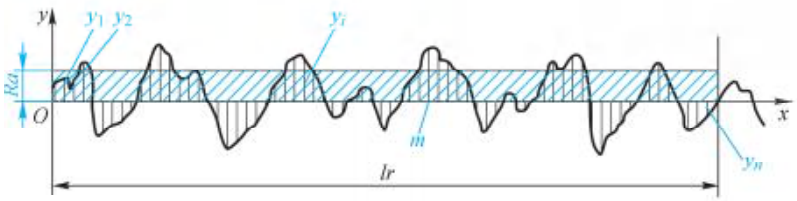


图 5-5　轮廓的算术平均偏差 Ra

测得的 Ra 值越大，则表面越粗糙。在幅度参数中，因取点较多，故 Ra 能较完整、全面地表达零件表面的微观几何特征。Ra 一般用电动轮廓仪进行测量，是普遍采用的评定参数。

2）轮廓的最大高度 Rz　在一个取样长度内，最大轮廓峰高 Rp 与最大轮廓谷深 Rv 之和称为轮廓的最大高度，如图 5-6 所示。其数学表达式为

$$Rz=Rp+Rv$$

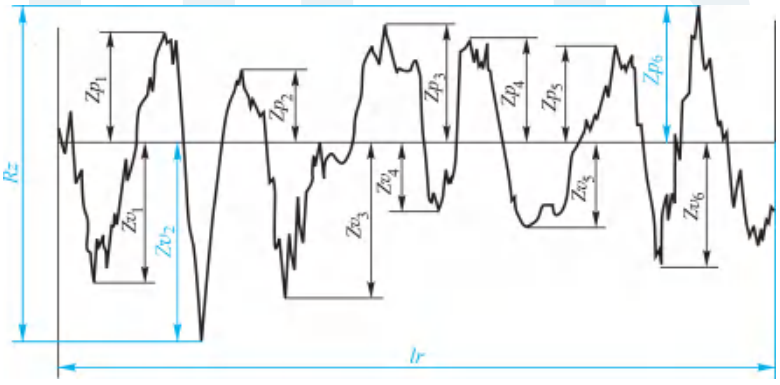


图 5-6　轮廓的最大高度

（2）横向间距参数

轮廓单元的平均宽度 Rsm　在一个取样长度内，轮廓单元宽度的平均值称为轮廓单元的平均宽度，如图 5-7 所示。其表达式为

$$Rsm=\frac{1}{m}\sum_{i=1}^{m}Xs_i$$

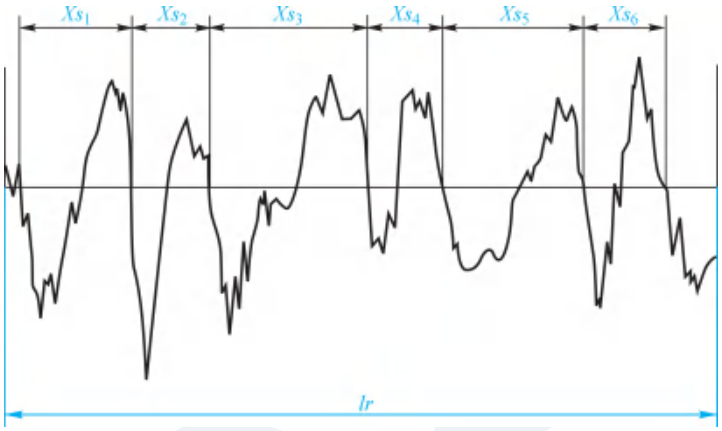


图 5-7　轮廓单元的平均宽度

Rsm 的值越小，表示轮廓表面越细密，密封性越好。

(3) 形状参数(混合参数)

轮廓的支承长度率 $Rmr(c)$　在给定水平位置 C 上轮廓的实体材料长度 $Ml(c)$ 与评定长度 ln 的比率称为轮廓的支承长度率，如图 5-8 所示。其表达式为

$$Rmr(c)=\frac{Ml(c)}{ln}$$

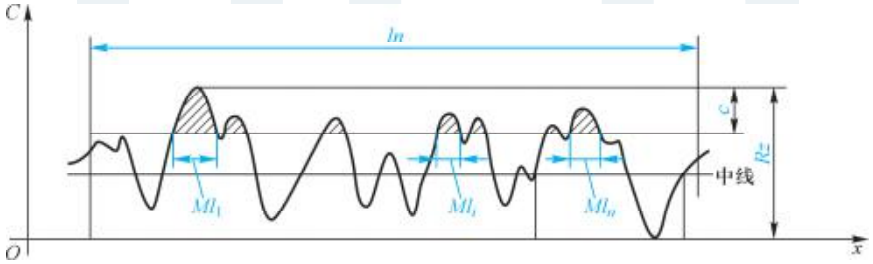


图 5-8　轮廓的支承长度率

轮廓的支承长度率 $Rmr(c)$ 是依据评定长度而不是从取样长度上来定义的，因为这样可以提供更稳定的参数。横向间距参数 Rsm 和形状参数 $Rmr(c)$ 为附加参数，不能单独在图样上注出，只能作为幅度参数的辅助参数，用于有特殊使用要求的表面。

1.2.3　表面粗糙度评定参数数值

国家标准《表面粗糙度　参数及其数值》(GB/T 1031)中，除轮廓的支承长度率 $Rmr(c)$ 外，表面粗糙度评定参数数值均由优先数系中的派生系列 R10/3 确定。而取样长度和评定长

度则由 R10/5 系列得到。

（1）轮廓的算术平均偏差 Ra 的数值

轮廓的算术平均偏差 Ra 的数值见表 5-2。

表 5-2　轮廓的算术平均偏差 Ra 的数值　μm

规定系列	补充系列	规定系列	补充系列	规定系列	补充系列	规定系列	补充系列
	0.008						
	0.010						
0.012			0.125		1.25	12.5	
	0.016		0.160	1.60			
	0.020	0.20			2.0		16.0
0.025			0.25		2.5	25	20
	0.032		0.32	3.2			
	0.040	0.40			4.0		32
0.050			0.50		5.0	50	40
	0.063		0.63	6.3			
	0.080	0.80			8.0		63
0.100			1.00		10.0	100	80

注：按表面功能和生产经济合理性，优先选用规定系列数值，当不能满足要求时，方可选用补充系列数值。

（2）轮廓的最大高度 Rz 的数值

轮廓的最大高度 Rz 的数值见表 5-3。

表 5-3　轮廓的最大高度 Rz 的数值　μm

规定系列	补充系列	规定系列	补充系列	规定系列	补充系列	规定系列	补充系列	规定系列	补充系列	规定系列	补充系列
			0.125		1.25	12.5			125		1250
			0.160	1.60			16.0		160	1600	
		0.20			2.0		20	200			
0.025			0.25		2.5	25			250		
	0.032		0.32	3.2			32		320		
	0.040	0.40			4.0		40	400			
0.050			0.50		5.0	50			500		
	0.063		0.63	6.3			63		630		
	0.080	0.80			8.0		80	800			
0.100			1.00		10.0	100			1000		

1.3　表面粗糙度的标注

零件表面完工后的表面精度要求，由图样上所标注的表面结构图形符号表示。GB/T 131《产品几何技术规范(GPS)技术产品文件中表面结构的表示法》规定了表面粗糙度的符号、代号及其在图样上的标注方法。

1.3.1　表面结构的图形符号

国家标准规定表面结构的图形符号分为基本图形符号、扩展图形符号、完整图形符号、工件轮廓各表面的图形符号，见表 5-4。

表 5-4　表面结构的图形符号及含义说明

符　　号	含义说明
	基本圆形符号，表示表面可用任何方法获得。当不加注粗糙度参数值或有关说明（例如：表面处理、局部热处理状况等）时，仅适用于简化代号标注
	扩展的基本符号，表示表面是用去除材料的方法获得，例如车、铣、钻、磨、剪切、抛光、腐蚀、电火花加工、气割等
	扩展的基本符号，表示表面是用不去除材料的方法获得，例如铸、锻、冲压变形、热轧、冷轧、粉末冶金等；或者是用于保持原供应状况的表面（包括保持上道工序的状况）
	完整图形符号，用于标注有关参数和说明，在文本中这三个符号分别用 APA、MRR、NMR 表示
	工件轮廓各表面的图形符号，指对图形中封闭轮廓表示的所有表面具有相同的表面粗糙度要求

1.3.2　表面结构完整图形符号的组成及其标注含义

（1）表面结构完整图形符号的组成

表面结构完整图形符号是在表面结构基本符号的周围，注上表面结构的单一要求和补充要求。注写的位置如图 5-9 所示。

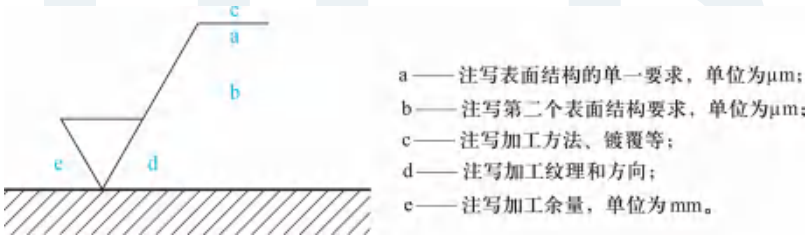


图 5-9　表面结构完整图形符号的组成

（2）表面结构代号的标注含义

在图样上注出的表面结构代号含义的解释次序为：是否去除材料、（单、双向）极限值、传输带、评定参数及数值、评定长度、评定规则等六步，见表 5-5。

若为双向极限值，必须同时注出 U、L；若为单向上限值，可不注出 U，称省略标注；若为下限值，注出 L，不可省略。未注出传输带具体数值，则为默认传输带。若指定传输带，则短波 λ_S 在前，长波 λ_C 在后，中间用“—”隔开；只标注一个滤波器时，应保留“—”来表明该滤波器是短波滤波器或长波滤波器；指定传输带标注在幅度参数符号前面，并用“/”隔开。未注出评定长度具体数值，则为默认评定长度，即评定长度包含 5 个取样长度。图样上标注表面粗糙度参数

的上限值或下限值时，表示在表面粗糙参数的所有实测值中，允许超过规定值的个数少于总数的 16%（称为 16%规则，省略标注）；图样上标注表面粗糙度参数的最大值时，表示表面粗糙度参数的所有实测值均不得超过该规定值（称为最大规则，在上、下限值前加注 max）。

表 5-5　表面结构代号的注法及含义

代　　号	含义/解释
Rz 0.4	表示不允许去除材料，单向上限值，默认传输带，粗糙度的最大高度为 0.4 μm，评定长度为 5 个取样长度（默认），采用“16%规则”（默认）
Rz max0.2	表示去除材料，单向上限值，默认传输带，粗糙度的最大高度为 0.2 μm，评定长度为 5 个取样长度（默认），采用“最大规则”
0.008-0.8/Ra3.2	表示去除材料，单向上限值，传输带 0.008～0.8 mm，算术平均偏差为 3.2 μm，评定长度为 5 个取样长度（默认），采用“16%规则”（默认）
-0.8/Ra 3 3.2	表示去除材料，单向上限值，传输带：λ_S 默认为标准值，$\lambda_C = lr = 0.8$ mm 算术平均偏差为 3.2 μm，评定长度包含 3 个取样长度，“16%规则”（默认）
U Ra max 3.2 L Ra 0.8	表示不允许去除材料，双向极限值，两极限值均使用默认传输带，上限值：算术平均偏差为 3.2 μm，评定长度为 5 个取样长度（默认），采用“最大规则”；下限值：算术平均偏差为 0.8 μm，评定长度为 5 个取样长度（默认），采用“16%规则”（默认）

1.3.3　表面粗糙度在图样上的标注方法

表面结构要求对每一表面一般只标注一次，并尽可能注在相应的尺寸及公差的同一视图上，除非另有说明，所标注的是对完工零件表面结构的精度要求。

微课

表面粗糙度标注方法

（1）表面结构代号标注方向的总原则

按照国家标准的规定，表面结构代号的注写和读取方向与尺寸的注写和读取方向一致，如图 5-10 所示。

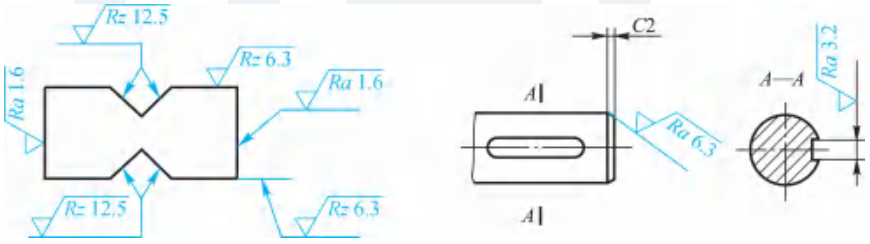


图 5-10　表面结构代号的注写和读取方向

（2）标注在轮廓线和指引线上

表面结构代号可标注在可见轮廓线、尺寸界线、引出线或它们的延长线上，符号的尖端必须从材料外指向并接触被测表面。必要时，表面结构代号也可用带箭头或黑点的指引线引出标注，如图 5-11 所示。

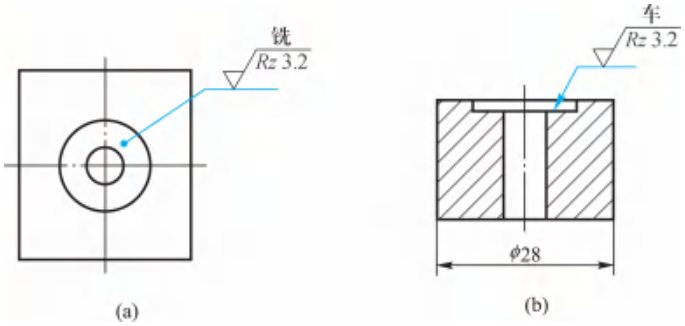


图 5-11　用指引线注出表面结构的要求

(3) 标注在特征尺寸的尺寸线上

在不致引起误解时，表面结构要求可以标注在给定的尺寸线上，如图 5-12 所示。

(4) 标注在几何公差框格的上方

表面结构要求可标注在几何公差框格的上方，如图 5-13 所示。

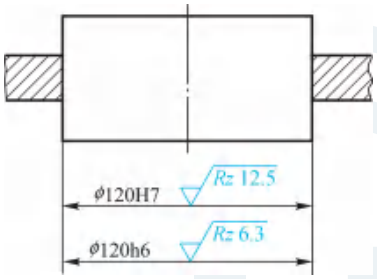


图 5-12　标注在特征尺寸线上

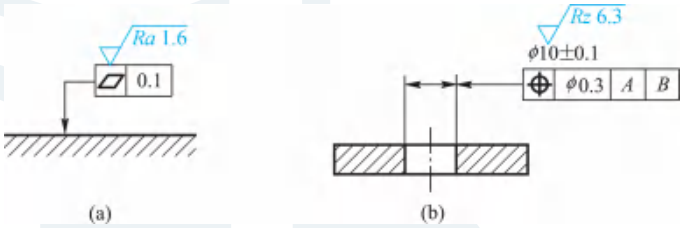


图 5-13　标注在几何公差框格的上方

(5) 表面结构要求的简化标注

若工件的多数(包括全部)表面有相同的表面粗糙度要求，则其表面粗糙度要求可统一标注在图样的标题栏附近。此时(除全部表面有相同要求的情况外)，表面粗糙度要求的符号后面应有：在圆括号内给出无任何其他标注的基本符号，或在圆括号内给出不同的表面结构要求，如图 5-14 所示。

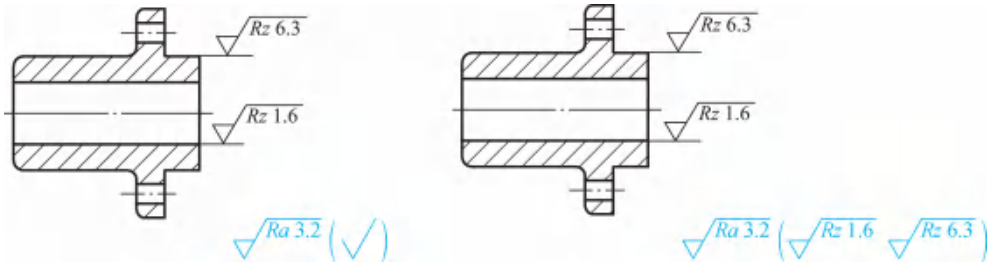


图 5-14　简化标注示例

(6) 多种工艺的表面结构要求

由几种不同的工艺方法获得的同一表面，当需要明确每种工艺方法的表面结构要求时，可按图 5-15 所示进行标注。

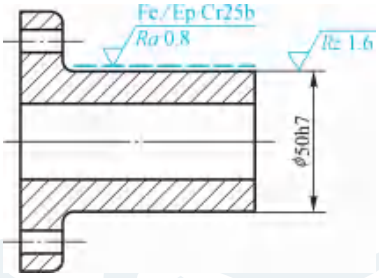


图 5-15　多种工艺的表面结构代号注法

能力训练指导

能力训练：降低表面粗糙度的措施有哪些？

分析指导：

第一，可从切削用量进行分析：

1) 切削速度 v_c　切削速度对表面粗糙度的影响较复杂，一般在低速度或在高速度切削时，不会产生积屑瘤，因此加工后表面粗糙度值小。用较高的切削速度，还可大大提高生产率。比如，用 YT15 切削 35 钢，临界切削速度为 100 m/min。

2) 进给量 f　适当减少进给量 f 将使表面粗糙度值减小。

3) 切削深度 a_p　一般来说，切削深度 a_p 对加工表面粗糙度影响不明显。但当 $a_p<0.02$ mm 时，由于加工半径的影响，常出现挤压、打滑和周期性切入加工表面的现象，从而使表面粗糙度值增大。为降低加工表面粗糙度值，应根据刀具刃口刃磨的锋利程度选择相应的切削深度。

第二，从刀具参数进行分析：

1) 刃倾角 λ_s　增大刃倾角对降低表面粗糙度有利。因为 λ_s 增大，实际工作前角随之增大，切削力 F 明显下降，从而可减轻工艺系统的振动，减小加工表面的粗糙度数值。

2) 主偏角 κ_r、副主偏角 κ_r'、刀尖圆弧半径 r_ε　减小刀具的主偏角 κ_r 和副主偏角 κ_r' 以及增大刀尖圆弧半径 r_ε，可减小切削残留面积，使工件的表面粗糙度值降低。

3) 前角 γ_o　增大前角 γ_o，有利于减小表面粗糙度值。前角大刃口锋利，切削层的塑性变形和摩擦阻力小，切削力和切削热降低。但 γ_o 不能太大，否则会嵌入工件或崩刀，反而增大表面粗糙度值。

4) 提高刀具刃磨质量，减小刀具前、后面的粗糙度数值，使其不大于 Ra1.25 μm。

5) 选用与工件亲和力小的刀具材料，如用陶瓷或碳化钛基硬质合金切削碳素工具钢，用金刚石或矿物陶瓷刀加工有色金属等。

第三，从工件材料进行分析：

采用热处理工艺以改善工件性能是减小其表面粗糙度值的有效措施。如对工件进行正火或回火后再加工，可使表面粗糙度值明显减小。

第四，从切削液角度进行分析：

切削液的冷却，特别是润滑作用能有效地减小表面粗糙度值。因此，可从使用极压切削液（10%～12%）、极压乳化液和离子型切削液。

第五，从机床的精度方面来看：

机床的运动精度及工艺系统的振动也将影响加工表面的粗糙度。为降低工艺系统的振动，可以采用超声振动切削加工。

能力训练任务

能力训练任务 1：测量表面粗糙度轮廓和评定表面粗糙度轮廓参数时，为什么要规定取样长度？标准评定长度等于连续的几个标准取样长度？

能力训练任务 2：指出图 5-16 中的错误，并改正。

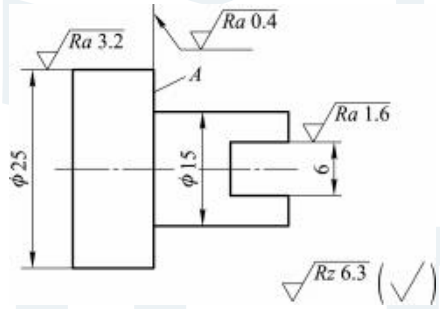


图 5-16　表面粗糙度标注示例

任务 2　掌握表面粗糙度的选用与检测

理论知识要点

2.1　表面粗糙度的选用

2.1.1　表面粗糙度评定参数的选用

目前，用常规工艺加工大多数零件表面时，通常只给出主要参数幅度参数即可。因 Ra 和 Rz 相比较，测点较多，更能客观地反映工件的表面实际情况，用电动轮廓仪能方便地测出 Ra

实际值。因此国家标准规定，在常用数值范围（Ra 为 0.025～6.3 μm）内，应优先选用 Ra 参数。Rz 直观易测，用双管显微镜、干涉显微镜等可测得，但 Rz 反映轮廓情况不如 Ra 全面，往往用在小零件（测量长度很小）或表面不允许有较深的加工痕迹（防止应力过于集中）的零件。对于光滑和半光滑表面，普遍选用 R_a 作为评定参数；对于极光滑和极粗糙表面，多选用 R_z 作为评定参数。

微课

表面粗糙度的选用

但当仅用幅度特性参数已不能对零件表面功能给予足够的控制时，就应加选附加参数。附加参数一般包括轮廓单元的平均宽度（Rsm）、轮廓支承长度率（Rmr）。

2.1.2　主参数值的选用原则

表面粗糙度主参数值的选用应遵循在满足表面功能要求的前提下，尽量选用较大的表面粗糙度数值的基本原则，以便简化加工工艺，降低加工成本。

表面粗糙度主参数值的选用一般采用类比法，参见表 5-1，具体选择时应考虑下列因素：

1）在同一零件上，工作表面一般比非工作表面的表面粗糙度数值要小。

2）摩擦表面比非摩擦表面的表面粗糙度数值要小；滚动摩擦表面比滑动摩擦表面的表面粗糙度数值要小；运动速度高、压力大的摩擦表面比运动速度低、压力小的摩擦表面的表面粗糙度数值要小。

3）承受循环载荷的表面及容易引起应力集中的结构（圆角、沟槽等），其表面粗糙度数值要小。

4）配合精度要求高的结合表面、配合间隙小的配合表面及要求连接可靠且承受重载的过盈配合表面，均应取较小的表面粗糙度数值。

5）配合性质相同时，一般情况下，零件尺寸越小，则表面粗糙度数值应越小；在同一精度等级时，小尺寸比大尺寸、轴比孔的表面粗糙度数值要小；通常在尺寸公差、表面形状公差小时，表面粗糙度数值要小。

6）防腐性、密封性要求越高，表面粗糙度数值应越小。

7）一般情况下，形状公差、尺寸公差和表面粗糙度值之间有一定的对应关系，设形状公差为 T，尺寸公差为 IT，它们之间的关系可参照以下对应关系：

若　T≈0.6 IT，则 $Ra \leqslant 0.05$ IT；$Rz \leqslant 0.2$ IT。

T≈0.4 IT，则 $Ra \leqslant 0.025$ IT；$Rz \leqslant 0.1$ IT。

T≈0.25 IT，则 $Ra \leqslant 0.012$ IT；$Rz \leqslant 0.05$ IT。

T<0.25 IT，则 $Ra \leqslant 0.15$ T；$Rz \leqslant 0.6$ T。

表 5-6 给出了轴和孔的表面粗糙度参数推荐值；表 5-7 给出了表面粗糙度参数值在某一范围内的表面微观特征、对应的加工方法及应用举例。供选用时参考。

表 5-6　轴和孔的表面粗糙度参数推荐值表

<table>
<tr><th colspan="3">应用场合</th><th colspan="6">Ra/μm</th></tr>
<tr><th rowspan="2">示例</th><th rowspan="2">公差等级</th><th rowspan="2">表面</th><th colspan="6">公称尺寸/mm</th></tr>
<tr><th colspan="3">≤50</th><th colspan="3">>50～500</th></tr>
<tr><td rowspan="8">经常装拆零件的配合表面(如挂轮、滚刀等)</td><td rowspan="2">IT5</td><td>轴</td><td colspan="3">≤0.2</td><td colspan="3">≤0.4</td></tr>
<tr><td>孔</td><td colspan="3">≤0.4</td><td colspan="3">≤0.8</td></tr>
<tr><td rowspan="2">IT6</td><td>轴</td><td colspan="3">≤0.4</td><td colspan="3">≤0.8</td></tr>
<tr><td>孔</td><td colspan="3">≤0.8</td><td colspan="3">≤1.6</td></tr>
<tr><td rowspan="2">IT7</td><td>轴</td><td colspan="3" rowspan="2">≤0.8</td><td colspan="3" rowspan="2">≤1.6</td></tr>
<tr><td>孔</td></tr>
<tr><td rowspan="2">IT8</td><td>轴</td><td colspan="3">≤0.8</td><td colspan="3">≤1.6</td></tr>
<tr><td>孔</td><td colspan="3">≤1.6</td><td colspan="3">≤3.2</td></tr>
<tr><td rowspan="12">过盈配合的配合表面
(1) 用压力机装配
(2) 用热孔法装配</td><td rowspan="2">公差等级</td><td rowspan="2">表面</td><td colspan="6">公称尺寸/mm</td></tr>
<tr><td colspan="2">≤50</td><td colspan="2">>50～120</td><td colspan="2">>120～500</td></tr>
<tr><td rowspan="2">IT5</td><td>轴</td><td colspan="2">≤0.2</td><td colspan="2">≤0.4</td><td colspan="2">≤0.4</td></tr>
<tr><td>孔</td><td colspan="2">≤0.4</td><td colspan="2">≤0.8</td><td colspan="2">≤0.8</td></tr>
<tr><td rowspan="2">IT6～IT7</td><td>轴</td><td colspan="2">≤0.4</td><td colspan="2">≤0.8</td><td colspan="2">≤1.6</td></tr>
<tr><td>孔</td><td colspan="2">≤0.8</td><td colspan="2">≤1.6</td><td colspan="2">≤1.6</td></tr>
<tr><td rowspan="2">IT8</td><td>轴</td><td colspan="2">≤0.8</td><td colspan="2">≤1.6</td><td colspan="2">≤3.2</td></tr>
<tr><td>孔</td><td colspan="2">≤1.6</td><td colspan="2">≤3.2</td><td colspan="2">≤3.2</td></tr>
<tr><td rowspan="2">IT9</td><td>轴</td><td colspan="2">≤1.6</td><td colspan="2">≤3.2</td><td colspan="2">≤3.2</td></tr>
<tr><td>孔</td><td colspan="2">≤3.2</td><td colspan="2">≤3.2</td><td colspan="2">≤3.2</td></tr>
<tr><td rowspan="6">滑动轴承的配合表面</td><td rowspan="2">公差等级</td><td rowspan="2">表面</td><td colspan="6">公称尺寸/mm</td></tr>
<tr><td colspan="2">≤50</td><td colspan="2">>50～120</td><td colspan="2">>120～500</td></tr>
<tr><td rowspan="2">IT6～IT9</td><td>轴</td><td colspan="6">≤0.8</td></tr>
<tr><td>孔</td><td colspan="6">≤1.6</td></tr>
<tr><td rowspan="2">IT10～IT12</td><td>轴</td><td colspan="6">≤3.2</td></tr>
<tr><td>孔</td><td colspan="6">≤3.2</td></tr>
<tr><td rowspan="3">精密定心零件的配合表面</td><td rowspan="2">公差等级</td><td rowspan="2">表面</td><td colspan="6">径向跳动/μm</td></tr>
<tr><td>2.5</td><td>4</td><td>6</td><td>10</td><td>16</td><td>25</td></tr>
<tr><td rowspan="2">IT5～IT8</td><td>轴</td><td>≤0.05</td><td>≤0.1</td><td>≤0.1</td><td>≤0.2</td><td>≤0.4</td><td>≤0.8</td></tr>
<tr><td>孔</td><td>≤0.1</td><td>≤0.2</td><td>≤0.2</td><td>≤0.4</td><td>≤0.8</td><td>≤1.6</td></tr>
</table>

表 5-7　表面粗糙度参数值在某一范围内的表面微观特征、对应的加工方法及应用举例

表面微观特征		$Ra/\mu m$	加工方法	应用举例
粗糙表面	可见刀痕	>20～40	粗车、粗刨、粗铣、钻、荒锉、锯割	半成品粗加工后的表面，非配合的加工表面，如轴端面、倒角、钻孔、齿轮及带轮的侧面、键槽地面、垫圈接触面等
	微见刀痕	>10～20		
半光表面	微见加工痕迹	>5～10	车、铣、镗、刨、钻、锉、荒磨、粗铰	轴上不安装轴承、齿轮处的非配合表面、紧固件的自由装配表面等
		>2.5～5	车、铣、镗、刨、磨、锉、滚压、电火花加工、粗刮	半精加工表面，箱体、支架、端盖、套筒等与其他零件结合而无配合要求的表面，需要发蓝的表面等
	看不清加工痕迹	>1.25～2.5	车、铣、镗、刨、磨、拉、刮、滚压、铣齿	接近于精加工表面，齿轮的齿面、定位销孔、箱体上安装轴承的镗孔表面
光表面	可辨加工痕迹的方向	>0.63～1.25	车、铣、镗、磨、拉、刮、精铰、粗研、磨齿	要求保证定心及配合特性的表面，如圆锥销、圆柱销，与滚动轴承相配合的轴颈，磨削的齿轮表面，普通车床的导轨面，内、外花键定心表面等
	微辨加工痕迹的方向	>0.32～0.63	精铰、精镗、磨、刮、滚压、研磨	要求配合性质稳定的配合表面，受交变应力作用的重要零件，较高精度车床的导轨面
	不可辨加工痕迹的方向	>0.16～0.32	布轮磨、精磨、研磨、超精加工、抛光	精密机床主轴圆锥孔，顶尖圆锥面，发动机曲轴、凸轮轴的工作表面，高精度齿轮齿面
极光表面	暗光泽面	>0.08～0.16	精磨、研磨、抛光、超精车	精密机床主轴的轴颈表面，汽缸内表面，活塞销表面，仪器导轨面，阀的工作表面，一般量规测量面等
	亮光泽面	>0.04～0.08	超精磨、镜面磨削、精抛光	精密机床主轴的轴颈表面，滚动导轨中的钢球、滚子和高速摩擦的工作表面
	镜状光泽面	>0.01～0.04		高压柱塞泵中柱塞和柱塞套的配合表面，中等精度仪器零件配合表面
	镜面	≤0.01	镜面磨削、超精研磨	高精度量仪、量块的工作表面，高精度仪器摩擦机构的支承表面，光学仪器中的金属镜面

2.2　表面粗糙度的检测

常用的表面粗糙度的检测方法有比较法、光切法、针描法、干涉法。

（1）比较法

比较法就是将被测零件表面与粗糙度样板用肉眼或借助放大镜和手摸感触进行比较，从而估计出表面粗糙度。比较法使用简便，适用于车间检验；缺点是精度较差，只能作定性分析

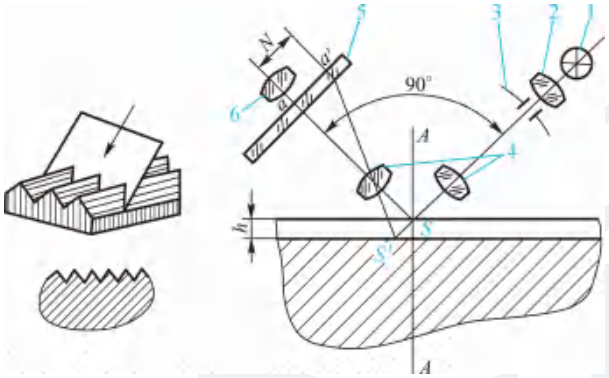
比较。

（2）光切法

光切法是利用光切原理测量表面粗糙度的方法。光切法测量常采用的仪器是光切显微镜（双管显微镜）。该仪器适宜测量车、铣或其他类似方法加工的金属零件的平面或外圆表面，其工作原理如图 5-17 所示。该法宜用 Rz 作为评定参数。

微课

表面粗糙度检测方法

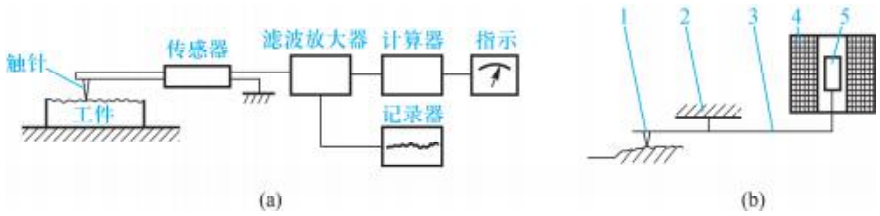


1—光源；2—聚光镜；3—狭缝；4—物镜；5—分划板；6—目镜。

图 5-17　光切显微镜工作原理图

（3）针描法

针描法是通过针尖感触被测表面微观不平度的截面轮廓的方法，实际上是一种接触式测量方法。所用测量仪器为电动轮廓仪，测定范围为 0.025～5 μm。该方法测量范围广、快速可靠，操作简便并易于实现自动测量和微机数据处理，但被测表面易被触针划伤，其原理框图如图 5-18 所示。



1—触针；2—支点；3—传感器杠杆；4—电感线圈；5—电磁铁心。

图 5-18　针描法测量原理框图

（4）干涉法

干涉法是利用光波干涉原理来测量表面粗糙度的方法。常用的仪器是干涉显微镜，适宜于用 Rz 值来评定表面粗糙度，Rz 测量范围为 0.05～0.8 μm。

能力训练指导

能力训练 1：在国家标准里，轮廓的幅度参数为什么是必须标注的参数？而且以 Ra 最常用，Rz 不常用。

分析指导：

1）因为表面粗糙度（也称表面不平度）是指由零件表面的较小间距的峰和谷组成的微观几何形状误差，表面不平主要是由峰、谷造成的，所以轮廓的幅度参数是必须标注的参数。

2）在幅度参数中，Ra 与 Rz 相比较，检测点较多，能较完整、全面地表达零件表面的微观几何特征，且用电动轮廓仪能方便地测出 Ra 的实际值。因此国家标准推荐，在常用数值范围（Ra 为 0.025～6.3 μm）内，应优先选用 Ra 参数。

能力训练 2：当下列每对配合（或工件）使用性能相同时，哪一个表面粗糙度要求高，为什么？

（1）ϕ40G7 和 ϕ40g7；

（2）$\phi 55\dfrac{\mathrm{H7}}{\mathrm{f6}}$ 和 $\phi 55\dfrac{\mathrm{H7}}{\mathrm{h6}}$。

分析指导：

1）ϕ40G7 和 ϕ40g7：因为同一尺寸公差的轴比孔的粗糙度参数值要小，而此孔和轴为同一尺寸，公差等级均为 7 级，尺寸公差值均相同，所以 ϕ40g7 的表面粗糙度要求高。

2）$\phi 55\dfrac{\mathrm{H7}}{\mathrm{f6}}$ 和 $\phi 55\dfrac{\mathrm{H7}}{\mathrm{h6}}$：因为这两对配合均为间隙配合，前者间隙比后者大，而小间隙配合表面，其表面粗糙度参数值比大间隙配合表面的要小，所以后对配合的工件表面比前对配合的对应表面的粗糙度要求高。

能力训练任务

能力训练任务：用 TR200 手持式表面粗糙度仪检测标准样板的表面粗糙度。

巩 固 训 练

1. 填空题

1）表面粗糙度是指由零件表面的较小_____和_____组成的微观几何形状误差，也称_____。

2）评定长度可包括_____个或_____个取样长度，国家标准推荐 ln＝_____lr。

3）表面粗糙度的幅度参数有_____和_____。

4）表面结构代号（表面粗糙度代号）可标注在_____、_____、_____或它们的延

长线上，符号的尖端必须从材料_____指向并接触被测表面。

5）同一零件工作表面的粗糙度参数值_____非工作表面的粗糙度参数值。

2. 判断题

1）取样长度 lr 过短将不能反映表面粗糙度的真实情况，因此取样长度 lr 越长越好。（　　）

2）测量和评定表面粗糙度时，若零件表面的微观几何形状很均匀，则可选取一个取样长度作为评定长度。（　　）

3）同一表面 Ra 值一定小于 Rz 值。（　　）

4）零件的尺寸精度越高，通常其表面粗糙度值相应取得越小。（　　）

5）Ra 能充分反映表面微观几何形状的高度特征，是普遍采用的粗糙度评定参数。（　　）

3. 选择题

1）通常情况下，表面粗糙度的波距 λ（　　）。

A. 大于 1 mm　　B. 小于 1 mm　　C. 为 1～10 mm　　D. 为 5～10 mm

2）表面粗糙度反映的是零件被加工表面的（　　）。

A. 尺寸误差　　B. 宏观几何形状误差

C. 微观几何形状误差　　D. 形状误差

3）下列描述中，（　　）不属于表面粗糙度对零件性能的影响。

A. 配合性　　B. 韧性　　C. 耐腐蚀性　　D. 耐磨性

4）用光切显微镜测量表面粗糙度 Rz 值的方法属于（　　）。

A. 直接测量法　　B. 综合测量法　　C. 接触测量法　　D. 非接触测量法

5）使用简单，适用于在车间检测表面粗糙度的检测方法是（　　）。

A. 光切法　　B. 干涉法　　C. 比较法　　D. 针描法

4. 简答题

1）表面粗糙度的含义是什么？对零件的使用性能有哪些影响？

2）表面粗糙度与尺寸及形状公差之间有何关系？

3）当下列每对配合（或工件）使用性能相同时，哪一个表面粗糙度要求高，为什么？

① $\phi 20\mathrm{H7}$ 和 $\phi 65\mathrm{H7}$；　　② $\phi 35\dfrac{\mathrm{H6}}{\mathrm{f5}}$ 和 $\phi 35\dfrac{\mathrm{H6}}{\mathrm{s5}}$。

4）解释下面表面结构代号的含义

① $\sqrt{\begin{matrix}\mathrm{U}\ Ra\ 3.2\\ \mathrm{L}\ Ra\ 1.6\end{matrix}}$；　　② $\sqrt{\mathrm{L}\ Ra\ \max\ 0.8}$。

5. 标注题

根据技术要求，在图 5-19 所示的轴承套图中的规定位置处标注表面粗糙度要求。

位置 1：去除材料，轮廓的算术平均偏差 Ra 为 0.8 μm；

位置 2：去除材料，轮廓的算术平均偏差 Ra 为 6.3 μm；

位置 3：去除材料，轮廓的算术平均偏差 Ra 为 3.2 μm；
位置 4：去除材料，轮廓的算术平均偏差 Ra 为 1.6 μm；
位置 5：去除材料，轮廓的算术平均偏差 Ra 为 3.2 μm；
其余表面的表面粗糙度要求为：去除材料，轮廓的算术平均偏差 Ra 为 12.5 μm。

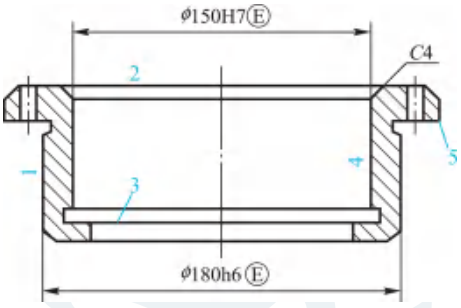


图 5-19　轴承套

Module 6 模 块 六　典型零件的检测

教学课件

典型零件的检测

机器或机构均是由零件组成的。就连接而言，螺纹连接、键连接在机器或机构中应用较多；就传动而言，齿轮传动、链传动、带传动在机器或机构中应用较多。因此，机器或机构中最具代表性的典型零件无外乎是常用结合件（螺栓与螺母的结合——螺纹连接、键与轴槽轮毂槽的结合——键连接、圆锥结合）、滚动轴承、齿轮等，如图 6-1 所示。

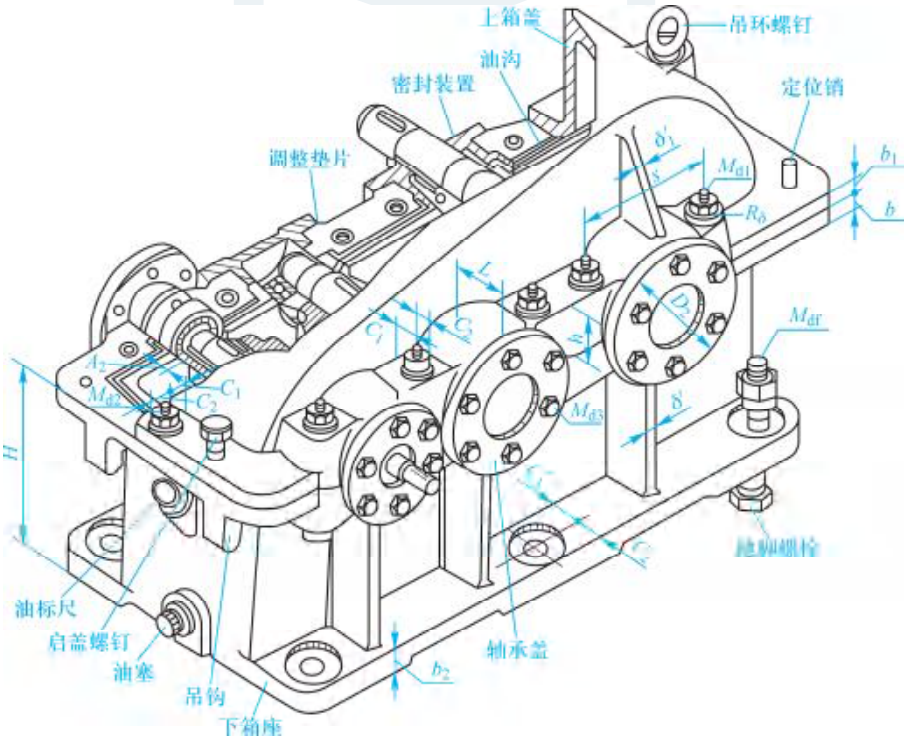


图 6-1　二级圆柱齿轮减速器

任务 1　普通螺纹连接的公差配合与检测

理论知识要点

1.1　普通螺纹几何参数

1.1.1　螺纹的种类和使用要求

根据结合性质和使用要求不同，螺纹可分为以下三类：

1）普通螺纹　普通螺纹又称紧固螺纹，其牙型为三角形，主要用于紧固和连接零件。对普通螺纹连接的主要使用要求是可旋合性和连接的可靠性。

2）传动螺纹　主要传递动力和位移，如机床中的丝杠和螺母、千分尺中的测微螺杆和螺母、千斤顶中的起重螺杆和螺母等。其牙型为梯形、矩形和锯齿形等。对传动螺纹的使用要求是传递动力要可靠，传动比要稳定。

3）密封螺纹　主要用于密封，如各种机械设备的液压、气动、润滑和冷却等管路系统。对密封螺纹的使用要求是密封性和连接的可靠性。

1.1.2　普通螺纹的几何参数

要对普通螺纹进行检测，首先要弄清楚的是检测要素——螺纹的几何参数。

普通螺纹的几何参数有十个：大径（D、d）、小径（D_1、d_1）、中径（D_2、d_2）、单一中径（D_{2s}、d_{2s}）、螺距（P）和导程（P_h）、牙型角（α）和牙侧角（α_1、α_2）、螺纹旋合长度、螺纹升角（φ）、最大实体牙型、最小实体牙型。

微课

普通螺纹几何参数

（1）大径（D、d）、小径（D_1、d_1）（见图 6-2）

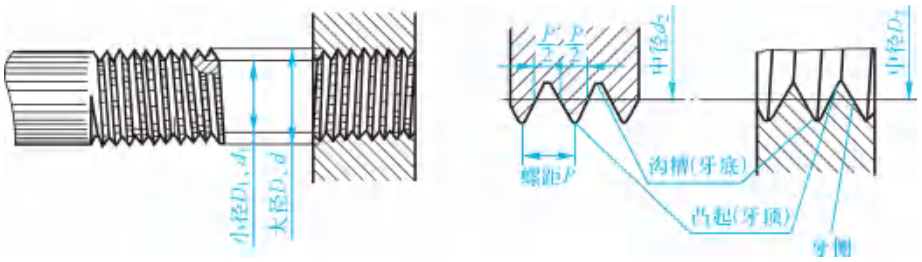


图 6-2　普通螺纹的大径、小径

大径：一个与外螺纹牙顶或内螺纹牙底相切的假想圆柱的直径。大径又称公称直径，主要

用于螺纹图样标注和螺纹称呼。

小径：一个与外螺纹牙底或内螺纹牙顶相切的假想圆柱的直径。小径主要用于螺纹强度校核。

（2）中径（D_2、d_2）、单一中径（D_{2s}、d_{2s}）（见图 6-3）

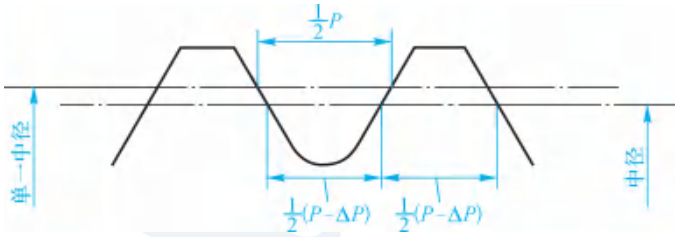


图 6-3　普通螺纹的中径、单一中径

中径（D_2、d_2）：一个假想的要求牙型上沟槽宽度等于凸起宽度的圆柱直径。

注意：中径不是大径和小径的平均值。中径主要用于考查内、外螺纹装配旋合性。

单一中径（D_{2s}、d_{2s}）：一个假想的要求牙型上沟槽宽度$=\frac{1}{2}P$ 的圆柱直径。注意：螺距无误差，中径就是单一中径；螺距有误差，中径和单一中径不相等。单一中径测量简便，可用三针法测得，通常把单一中径近似看作实际中径。

（3）螺距（P）和导程（P_h）（见图 6-4）

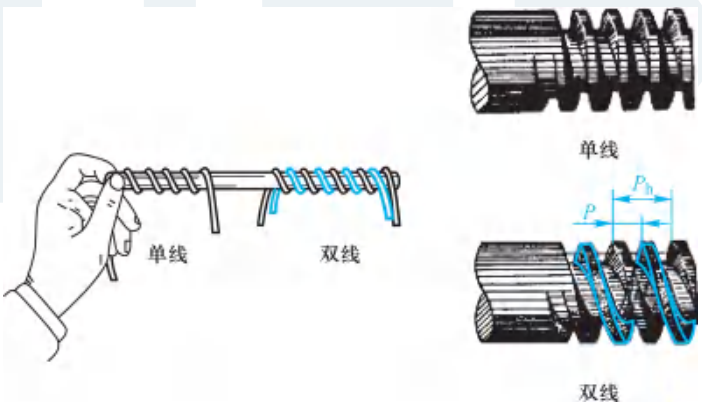


图 6-4　普通螺纹的线数、螺距和导程

螺距 P：螺纹相邻两牙在中径上对应两点间的轴向距离。普通螺纹的螺距分为粗牙和细牙两种。

导程 P_h：螺纹同一条螺旋线上的相邻两牙在中径线上对应两点间的轴向距离。对单线螺纹：$P_h=P$；对多线螺纹：$P_h=nP$（n 为螺纹的线数）。

（4）牙型角（α）和牙侧角（α_1、α_2）（见图 6-5）

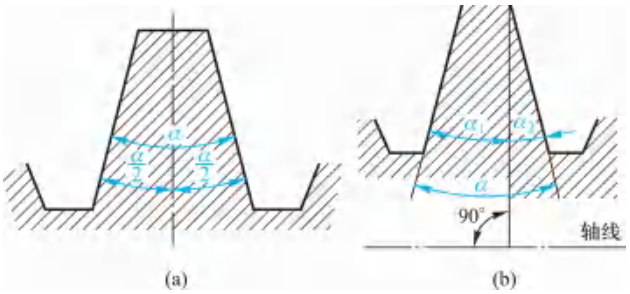


图 6-5　普通螺纹的牙型角、牙侧角

牙型角 α：通过螺纹轴线的剖面，螺纹牙型上相邻两牙侧间的夹角。普通螺纹的牙型角 $\alpha=60°$。

牙侧角：通过螺纹轴线的剖面，螺纹牙型上牙侧与螺纹轴线间的夹角。α_1 表示左牙侧角，α_2 表示右牙侧角。

（5）螺纹旋合长度（见图 6-6）

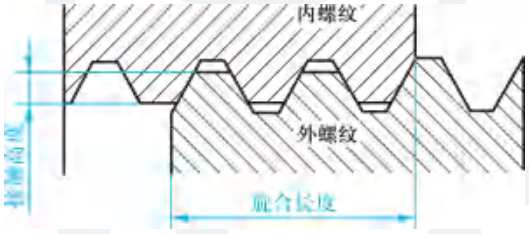


图 6-6　普通螺纹的旋合长度

螺纹旋合长度是指两个相互配合的螺纹沿螺纹轴线方向相互旋合部分的长度。

1.2　普通螺纹主要几何参数对互换性的影响

普通螺纹连接的互换性要求在装配过程中具有可旋合性，在使用过程中具有连接可靠性。影响普通螺纹互换性的几何参数有五个：大径、中径、小径、螺距和牙侧角。因大径和小径处均留有间隙，一般不会影响其配合性质，故影响普通螺纹互换性的主要几何参数有三个：螺距、牙侧角和中径。

1.2.1　螺距误差对互换性的影响

螺距误差包括螺距偏差（ΔP）和螺距累积误差（ΔP_Σ）。螺距偏差（ΔP）是指单个螺距的实际尺寸与其公称尺寸之差。螺距累积误差（ΔP_Σ）是指在规定的旋合长度内螺距偏差的累积值。螺距累积误差（ΔP_Σ）为影响螺纹互换性的主要因素。

影响：螺距累积误差（ΔP_Σ）使内、外螺纹牙侧产生干涉，影响装配的旋合性，从而影响使用

的连接可靠性，如图 6-7 所示。

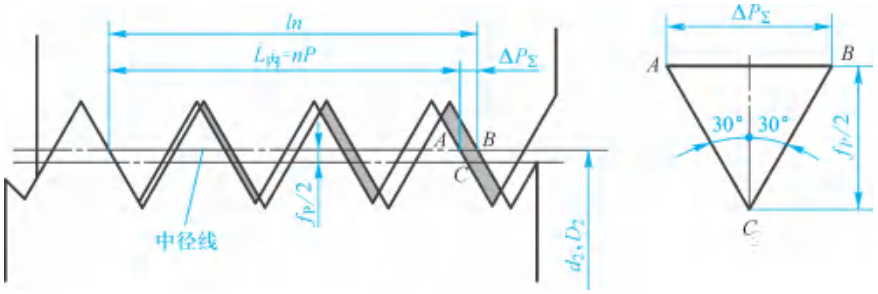


图 6-7　螺距误差对互换性的影响

解决措施：

对于外螺纹：把外螺纹的中径 d_2 减少一个数值 f_p 至 d_2'。

对于内螺纹：把内螺纹的中径 d_2 加大一个数值 f_p 至 d_2'。

f_p 被称为螺距误差中径当量，

$$f_p=\Delta P_\Sigma \cot\frac{\alpha}{2} \tag{6-1}$$

对于牙型角 $\alpha=60°$的普通螺纹，

$$f_p=1.732|\Delta P_\Sigma| \tag{6-2}$$

1.2.2　牙侧角偏差对互换性的影响

牙侧角偏差是指牙侧角的实际值与其基本值之差。它包括螺纹牙侧的形状误差和牙侧相对于螺纹轴线的垂直方向的位置误差。

影响：牙侧角偏差会使内、外螺纹接合时发生干涉，接触面积减少，从而影响装配的旋合性和连接可靠性，如图 6-8 所示。

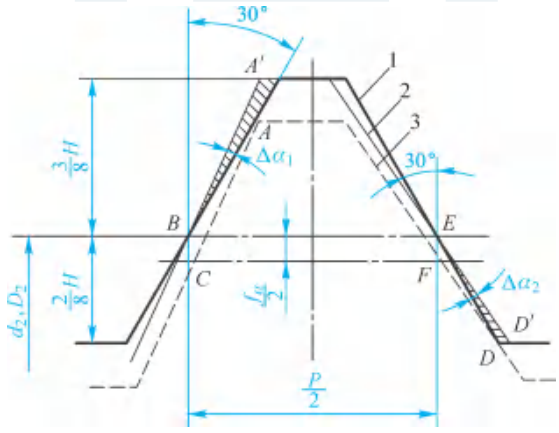


图 6-8　牙侧角偏差对互换性的影响

解决措施：

对于外螺纹，把外螺纹的中径 d_2 减少一个数值 f_α 至 d'_2。

对于内螺纹，把外螺纹的中径 d_2 增大一个数值 f_α 至 d'_2。

f_α 被称为牙侧角偏差中径当量，

$$f_\alpha = 0.073P(K_1|\Delta\alpha_1| + K_2|\Delta\alpha_2|) \tag{6-3}$$

式中，K_1、K_2 为左、右牙侧角偏差补偿系数。

对于外螺纹，当 $\Delta\alpha_1$（或 $\Delta\alpha_2$）为正值时，K_1（或 K_2）取 2；当 $\Delta\alpha_1$（或 $\Delta\alpha_2$）为负值时，K_1（或 K_2）取 3。

对于内螺纹，当 $\Delta\alpha_1$（或 $\Delta\alpha_2$）为正值时，K_1（或 K_2）取 3；当 $\Delta\alpha_1$（或 $\Delta\alpha_2$）为负值时，K_1（或 K_2）取 2。

1.2.3　中径误差对互换性的影响

中径误差是指中径实际尺寸与中径公称尺寸的代数差。

影响：当外螺纹中径大于内螺纹中径时，影响螺纹装配的旋合性；当外螺纹中径过小，内螺纹中径过大时，则配合太松，会降低连接的可靠性。

1.3　普通螺纹合格性的判断

1.3.1　作用中径

微课

作用中径

作用中径是一个假想的，但在螺纹配合中实际起作用的中径。注意：对于单个螺纹，只有中径和单一中径，没有作用中径；对于配合螺纹，才有作用中径。

1.3.2　外螺纹的作用中径 d_{2m} 和内螺纹的作用中径 D_{2m}

当外螺纹有螺距累积误差、牙侧角偏差，与具有理想牙型的内螺纹旋合时，旋合变紧，其效果好像外螺纹的中径增大了，这个增大了的假想中径是与内螺纹旋合时起作用的中径，称为外螺纹的作用中径，以 d_{2m} 表示。

$$d_{2m} = d_{2s} + (f_p + f_\alpha) \tag{6-4}$$

当内螺纹有螺距累积误差、牙侧角偏差，与具有理想牙型的外螺纹旋合时，旋合也变紧了，其效果好像内螺纹的中径减小了，这个减小了的假想中径是与外螺纹旋合时起作用的中径，称为内螺纹的作用中径，以 D_{2m} 表示。

$$D_{2m} = D_{2s} - (f_p + f_\alpha) \tag{6-5}$$

微课

普通螺纹合格条件

1.3.3　普通螺纹合格的条件

要实现螺纹结合的互换性，螺纹中径必须合格。判断螺纹中径合格应遵循泰勒原则，即实际螺纹作用中径不能超出最大实体牙型的中径（保证螺纹的旋合性），而实际螺纹上任一部位

的单一中径不能超出最小实体牙型的中径(保证螺纹的连接强度),如图 6-9 所示。

对外螺纹　　$d_{2m} \leqslant d_{2\max}$，$d_{2s} \geqslant d_{2\min}$　　(6-6)

对内螺纹　　$D_{2m} \geqslant D_{2\min}$，$D_{2s} \leqslant D_{2\max}$　　(6-7)

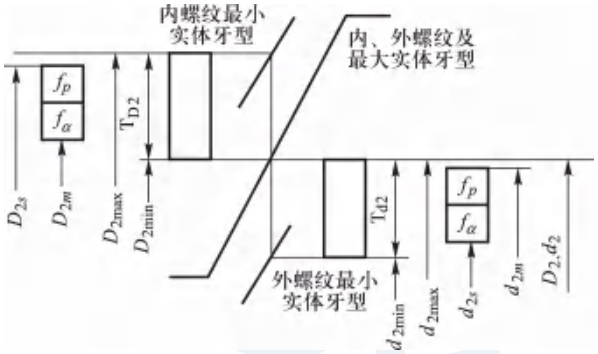


图 6-9　普通螺纹合格的判断

1.4　普通螺纹的公差配合

1.4.1　普通螺纹的公差等级

微课

普通螺纹的
公差等级

微课

普通螺纹的
公差带代号

GB/T 197 中列出了普通螺纹的公差等级,见表 6-1。其中 6 级是基本级,3 级精度最高,9 级精度最低。

国家标准只规定了螺纹的中径、顶径公差。其误差由中径综合公差控制,底径误差由刀具控制。普通螺纹公称尺寸(小径、中径、螺距)见表 6-2,普通螺纹的中径公差见表 6-3。

一般来说,为保证螺纹的旋合性,中径公差不大于同级的顶径公差;为达到工艺等价性,内螺纹中径公差是同一公差等级外螺纹中径公差的 1.32 倍。

表 6-1　普通螺纹公差等级(GB/T 197)

螺纹直径		公差等级	螺纹直径		公差等级
外螺纹	中径 d_2	3、4、5、6、7、8、9	内螺纹	中径 D_2	4、5、6、7、8
	大径(顶径)d	4、6、8		小径(顶径)D_1	4、5、6、7、8

表 6-2　普通螺纹公称尺寸(中径、小径、螺距)(GB/T 193)　　mm

D，d	P	D_2，d_2	D_1，d_1	D，d	P	D_2，d_2	D_1，d_1
2.5	0.45	2.208	2.013	16	2	14.701	13.835
	0.35	2.273	2.121		1.5	15.026	14.376
3	0.5	2.675	2.459		1	15.350	14.917
	0.35	2.773	2.621	18	2.5	16.376	15.294
3.5	0.6	3.110	2.850	20	2.5	18.376	17.294
4	0.7	3.545	3.242		2	18.701	17.835
	0.5	3.675	3.459		1.5	19.026	18.376
4.5	0.75	4.013	3.688	22	2.5	20.376	19.294
5	0.8	4.480	4.134	24	3	22.051	20.752
	0.5	4.675	4.459		2	22.701	21.835
6	1	5.350	4.917		1.5	23.026	23.376
	0.75	5.513	5.188		1	23.350	22.917
8	1.25	7.188	6.647	27	3	25.051	23.752
	1	7.350	6.917	30	3.5	27.727	26.211
10	1.5	9.026	8.376		2	28.701	27.835
	1.25	9.188	8.647		1.5	29.026	28.376
12	1.75	10.863	10.106	33	3.5	30.727	29.211
	1.5	11.026	10.376	36	4	33.402	31.670
	1.25	11.188	10.674		3	34.051	32.752
14	2	12.701	11.835		2	34.701	33.835

表 6-3　普通螺纹中径公差(摘自 GB/T 197)　　μm

公称直径 D/mm		螺距	内螺纹中径公差 T_{D2}					外螺纹中径公差 T_{d2}						
>	≤	P/mm	公差等级					公差等级						
			4	5	6	7	8	3	4	5	6	7	8	9
5.6	11.2	0.75	85	106	132	170	—	50	63	80	100	125	—	—
		1	95	118	150	190	236	56	71	90	112	140	180	224
		1.25	100	125	160	200	250	60	75	95	118	150	190	236
		1.5	112	140	180	224	280	67	85	106	132	170	212	295

续　表

公称直径 D/mm		螺距	内螺纹中径公差 T_{D2}					外螺纹中径公差 T_{d2}						
>	≤	P/mm	公差等级					公差等级						
			4	5	6	7	8	3	4	5	6	7	8	9
11.2	22.4	1	100	125	160	200	250	60	75	95	118	150	190	236
		1.25	112	140	180	224	280	67	85	106	132	170	212	265
		1.5	118	150	190	236	300	71	90	112	140	180	224	280
		1.75	125	160	200	250	315	75	95	118	150	190	236	300
		2	132	170	212	265	335	80	100	125	160	200	250	315
		2.5	140	180	224	280	355	85	106	132	170	212	265	335
22.4	45	1	106	132	170	212	—	63	80	100	125	160	200	250
		1.5	125	160	200	250	315	75	95	118	150	190	236	300
		2	140	180	224	280	355	85	106	132	170	212	265	335
		3	170	212	265	335	425	100	125	160	200	250	315	400
		3.5	180	224	280	355	450	106	132	170	212	265	335	425
		4	190	236	300	375	475	112	140	180	224	280	355	450
		4.5	200	250	315	400	500	118	150	190	236	300	375	475

1.4.2　普通螺纹的基本偏差

螺纹公差带是以基本牙型为零线布置的，如图 6-10 所示。

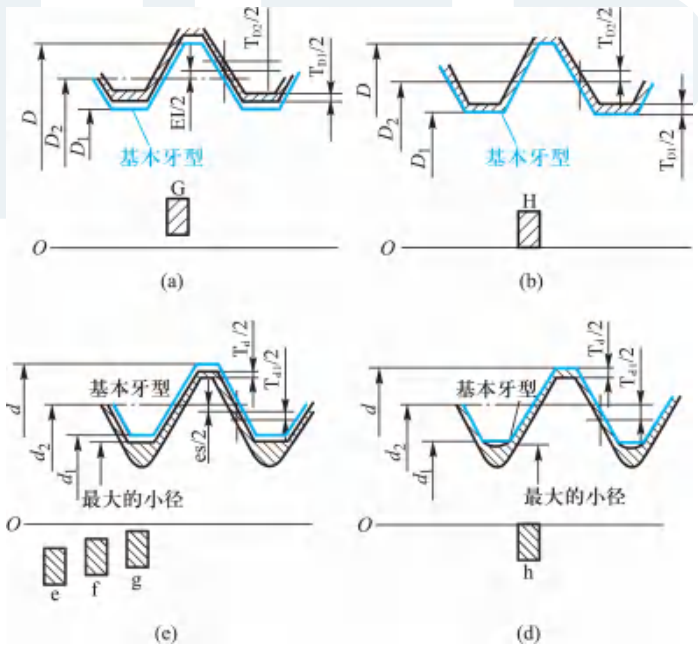


图 6-10　普通螺纹的基本偏差

国家标准对内螺纹规定了两种基本偏差 G、H，其基本偏差 EI≥0；对外螺纹规定了四种基本偏差 e、f、g、h，其基本偏差 es≤0，如图 6-10 所示。

普通螺纹基本偏差数值见表 6-4。

表 6-4　普通螺纹基本偏差数值表（摘自 GB/T 197）　μm

螺距 P/mm	内螺纹		外螺纹			
	G	H	e	f	g	h
	EI		es			
0.75	+22	0	−56	−38	−22	0
0.8	+24	0	−60	−38	−24	0
1	+26	0	−60	−40	−26	0
1.25	+28	0	−63	−42	−28	0
1.5	+32	0	−67	−45	−32	0
1.75	+34	0	−71	−48	−34	0
2	+38	0	−71	−52	−38	0
2.5	+42	0	−80	−58	−42	0
3	+48	0	−85	−63	−48	0

1.4.3　普通螺纹的配合

（1）旋合长度的选用

普通螺纹连接即为内、外螺纹的配合，其旋合长度将会影响螺纹配合件的配合精度和互换性，因此必须选择合理的旋合长度。国家标准规定了三组旋合长度：短旋合长度组（S）、中等旋合长度组（N）、长旋合长度组（L）。若未明确螺纹旋合长度的，一般按中等旋合长度（N）选取，见表 6-5。

表 6-5　螺纹的旋合长度（摘自 GB/T 197）　mm

基本大径 D、d		螺距 P	旋合长度			
			S	N		L
>	≤		≤	>	≤	>
2.8	5.6	0.5	1.5	1.5	4.5	4.5
		0.6	1.7	1.7	5	5
		0.7	2	2	6	6
		0.75	2.2	2.2	6.7	6.7
		0.8	2.5	2.5	7.5	7.5
5.6	11.2	0.75	2.4	2.4	7.1	7.1
		1	3	3	9	9
		1.25	4	4	12	12
		1.5	5	5	15	15

续　表

基本大径 D、d		螺距 P	旋合长度			
			S	N		L
>	≤		≤	>	≤	>
11.2	22.4	1	3.8	3.8	11	11
		1.25	4.5	4.5	13	13
		1.5	5.6	5.6	16	16
		1.75	6	6	18	18
		2	8	8	24	24
		2.5	10	10	30	30
22.4	45	1	4	4	12	12
		1.5	6.3	6.3	19	19
		2	8.5	8.5	25	25
		3	12	12	36	36
		3.5	15	15	45	45
		4	18	18	53	53

(2) 螺纹配合精度的选用

GB/T 197 规定螺纹的配合精度等级分为精密、中等和粗糙三个等级：

精密级——用于精密螺纹，以保证内、外螺纹具有稳定的配合性质。

中等级——用于一般用途的螺纹。

粗糙级——用于不重要或制造困难的螺纹，如在热轧棒料上或深不通孔内加工的螺纹。

(3) 螺纹配合公差带的选用

普通螺纹公差带代号由公差等级数字和基本偏差字母组成，如 6 H、5 G、6 g 等。

为了减少螺纹加工刀具和检测量具的规格和种类，GB/T 197 规定了普通螺纹的推荐公差带，见表 6-6。

表 6-6　普通螺纹的推荐公差带(摘自 GB/T 197)

旋合长度		内螺纹推荐公差带			外螺纹推荐公差带		
		S	N	L	S	N	L
公差精度	精密	4H	5H	6H	(3h4h)	4h (4g)	(5h4h) (5g4g)
	中等	5H (5G)	$\boxed{6H}$ 6G	7H (7G)	(5h6h) (5g6g)	6h、$\boxed{6g}$ 6f、6e	(7h6h) (7g6g)(7e6e)
	粗糙	—	7H (7G)	8H (8G)	—	8g (8e)	(9g8g) (9e8e)

注：1. 优先选用红色的公差带，其次选用不带括号的公差带，加括号的公差带尽可能不用。
2. 带方框的公差带用于大批量生产的紧固件。

为了保证足够的接触高度，内、外螺纹最好组成 H/g、H/h 或 G/h 的配合，选用时主要考虑以下几种情况：

1）要求旋合后具有较高的同轴度和连接强度，可选用 H/h 配合；

2）需经常拆卸的螺纹，可选用 H/g、G/h 的配合；

3）需镀层的螺纹，根据镀层的厚度不同选用 6H/6e 或 6G/6e 的配合。

（4）普通螺纹的标注

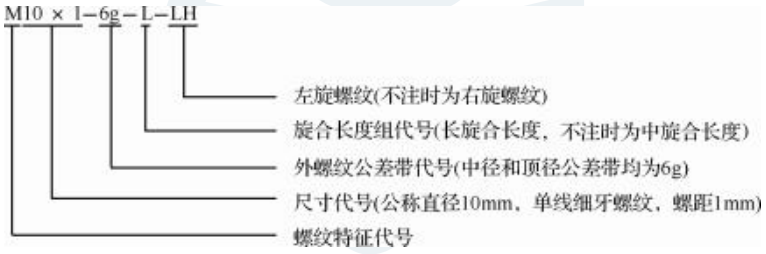
微课

普通螺纹的标注

完整的普通螺纹标记依次由螺纹特征代号（M）、尺寸代号（单线螺纹：公称直径×螺距，粗牙螺距不标；多线螺纹：公称直径×导程）、公差带代号（中径顶径公差带，相同只标注一个）、旋合长度代号（S、N、L）和旋向代号（右旋不标，左旋标注“LH”）组成。

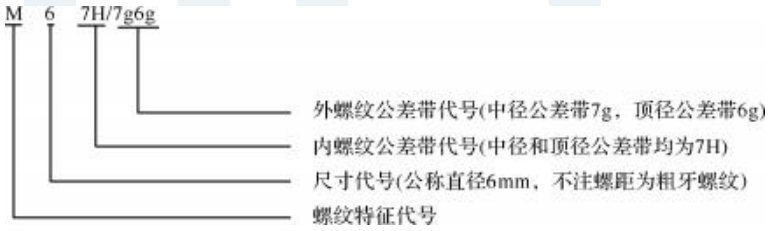
标注实例：

1）在零件图上的标注



2）在装配图上的标注

表示内、外螺纹配合时，内螺纹公差带代号在前、外螺纹公差带代号在后，中间用斜线分开。



螺纹标记在图样上标注时，应标注在螺纹的公称直径（大径）的尺寸线上。

能力训练指导

能力训练 1：普通螺纹检测方法的选用。

分析指导：普通螺纹检测主要检测项目是螺纹的螺距、牙型角和中径，此外，还有螺纹表面粗糙度等。

对于普通螺纹(三角螺纹),一般采用综合测量法。而对于传动螺纹(梯形螺纹、矩形螺纹、蜗杆螺纹等),则采用分项测量法,即分别测量螺纹的螺距、牙型角和中径。

检测螺纹的常用仪器:

1) 螺距的测量。常用钢直尺和螺距规进行测量。

2) 螺纹大、小径的测量。一般用游标卡尺或千分尺进行测量。

3) 螺纹中径的测量。①螺纹千分尺测量;②三针测量法测量;③万能工具显微镜测量(影像法)。

(1) 综合测量法

用标准螺纹量规进行测量。通规(通端)通,止规(止端)止,则合格,否则不合格,如图 6-11 所示。

(2) 单项测量法

1) 螺距测量　用螺距规和样板测量,如图 6-12 所示。用专用装置测量,如图 6-13 所示。

2) 牙型角测量　用样板检测;用万能角度尺测量,如图 6-14 所示。

3) 中径测量　用螺纹千分尺测量,如图 6-15 所示;用三针测量法测量,如图 6-16 所示。

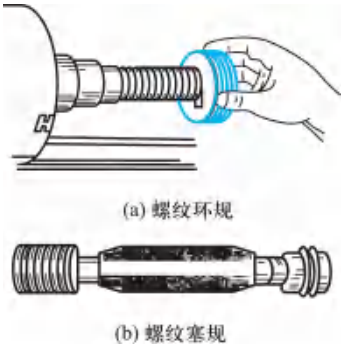


图 6-11　综合测量法

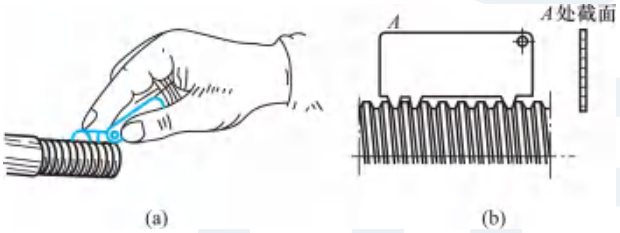


图 6-12　用螺距规和样板测量螺距

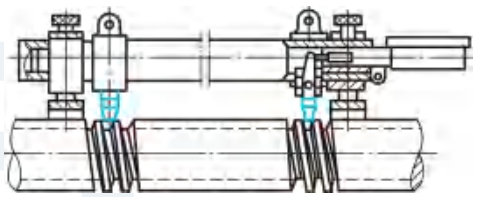


图 6-13　用专用装置测量螺距

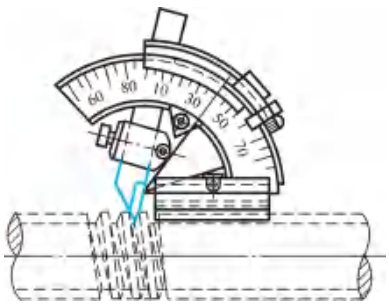


图 6-14　用万能角度尺测量牙型角

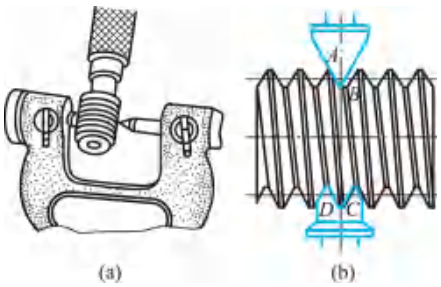


图 6-15　螺纹千分尺

微视频

螺纹千分尺检测中径

微视频

三针法测量螺纹中径

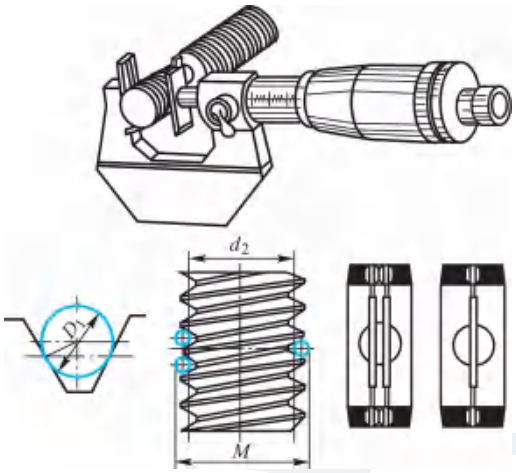


图 6-16　用三针测量法测量中径

能力训练 2:影像法测量螺纹的主要参数。

分析指导:

(1) 实训目的

1) 了解工具显微镜的结构和工作原理。

2) 掌握用万能工具显微镜测量外螺纹主要几何参数的方法。

3) 掌握螺纹测量数据的处理方法。

(2) 实训任务

1) 用万能工具显微镜测量外螺纹中径。

2) 用万能工具显微镜测量外螺纹螺距。

3) 用万能工具显微镜测量外螺纹牙侧角。

(3) 量仪简介

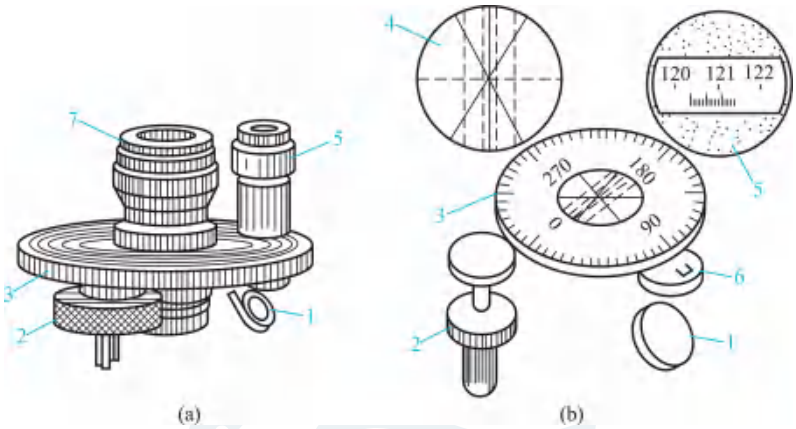
工具显微镜是一种精密的光学测量仪器,适用于线性尺寸和角度的测量,尤其适用于螺纹、样板等复杂工件的测量。它具有直角坐标测量系统、光学系统和瞄准装置、角度测量装置,其主要组成部分为:底座,立柱,工作台,纵向、横向千分尺,光学投影系统和显微镜系统。

图 6-17　万能工具显微镜的外形

根据测量精度和测量范围,工具显微镜可分为小型、大型和万能工具显微镜。

在万能工具显微镜上使用的测量方法有影像法、轴切法、干涉法等。采用影像法可测量外螺纹参数(中径、螺距、牙侧角)。万能工具显微镜的外形如图 6-17 所示。

根据不同的用途,目镜有测角目镜、双像目镜、轮廓目镜等。一般测量长度或角度都采用测角目镜(又称细线网目镜)。测角目镜如图 6-18 所示。



1—反光镜；2—目镜分划板手轮；3—目镜分划板；4—米字线；
5—角度计数读数目镜；6—角度固定游标分划板；7—中央目镜。

图 6-18　测角目镜

（4）实训过程

1）查出螺纹中径 d_2。根据螺纹标记，查表 6-2、表 6-3、表 6-4 可得螺纹中径、中径公差、基本偏差，画出螺纹公差带图。

2）调整目镜视场。

① 转动目镜上的视场调节环，使视场中的米字线清晰；

② 把调焦棒安装在工作台上的两顶尖之间，移动工作台，并旋转升手轮，直至调焦棒内的刀刃清晰地成像在目镜视场中，如图 6-19 所示。

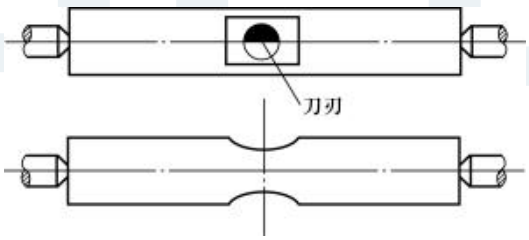


图 6-19　用调焦棒对焦示意图

3）选取适当的光阑孔径。取下调焦棒，将被测螺纹安装在两顶尖之间；根据被测螺纹的中径，选取适当的光阑孔径，见表 6-7。

表 6-7　光阑孔径（牙型角 $\alpha=60°$）

螺纹中径 d_2/mm	10	12	14	16	18	20	25	30	40
光阑孔径/mm	11.9	11	10.4	10	9.5	9.3	8.6	8.1	7.4

4）倾斜立柱。转动立柱倾斜手轮，根据螺纹大径把立柱倾斜成螺纹升角，使牙廓两侧的

影像清晰，见表 6-8。

表 6-8　立柱倾斜角（牙型角 $\alpha=60^\circ$，单线）

螺纹大径 d/mm	10	12	14	16	18	20	22	24	27	30	36	42
螺距基本值 P/mm	1.5	1.75	2	2	2.5	2.5	2.5	3	3	3.5	4	4.5
立柱倾斜角 φ	3°01′	2°56′	2°52′	2°29′	2°47′	2°27′	2°13′	2°27′	2°10′	2°17′	2°10′	2°07′

5）测量螺纹中径

① 采用压线法。压线法是把目镜分划板上米字线的中虚线转到与牙廓影像的牙侧方向一致，并使中虚线的一半压在牙廓影像之内，另一半位于牙廓影像之外，如图 6-20 所示。

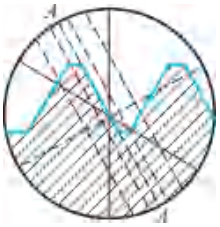


图 6-20　压线法测量螺纹中径

② 测量、记录。测量中径是沿螺纹轴线的垂直方向测量螺纹两个相对牙廓侧面间的距离。测量时应使米字线交叉点大致落在侧边中点上，如图 6-21 所示的Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ、Ⅳ，测Ⅰ$_{横}$、Ⅱ$_{横}$，两次读数之差即为 $d_{2右}$；把立柱反转一个螺纹升角 φ，测Ⅲ$_{横}$、Ⅳ$_{横}$，两次读数之差即为 $d_{2左}$。取两者的平均值作为中径的实际尺寸 $d_{2实际}$，即 $d_{2实际}=\dfrac{d_{2左}+d_{2右}}{2}$。

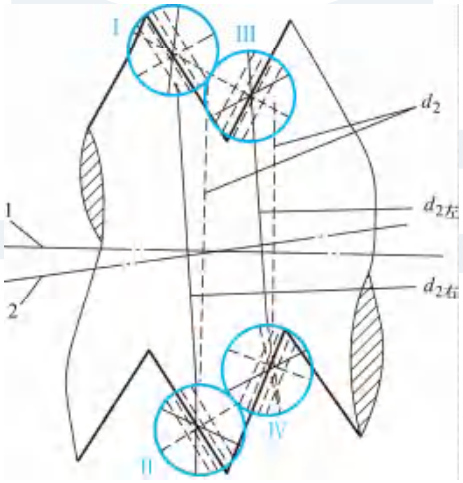


图 6-21　螺纹单一中径的测量

6）测量螺纹螺距

① 采用压线法，如图 6-22 所示。

② 测量、记录。螺距是指相邻两同侧牙廓侧面在中径线上的轴向距离。

7）测量螺纹牙侧角

① 采用对线法。对线法是使米字线的中虚线与牙廓影像的牙侧间有一条宽度相同的细缝，如图 6-23 所示。

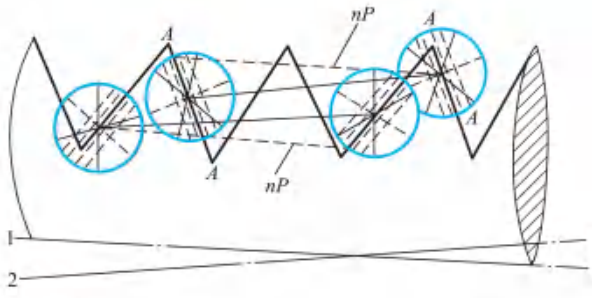


图 6-22　压线法测量螺距

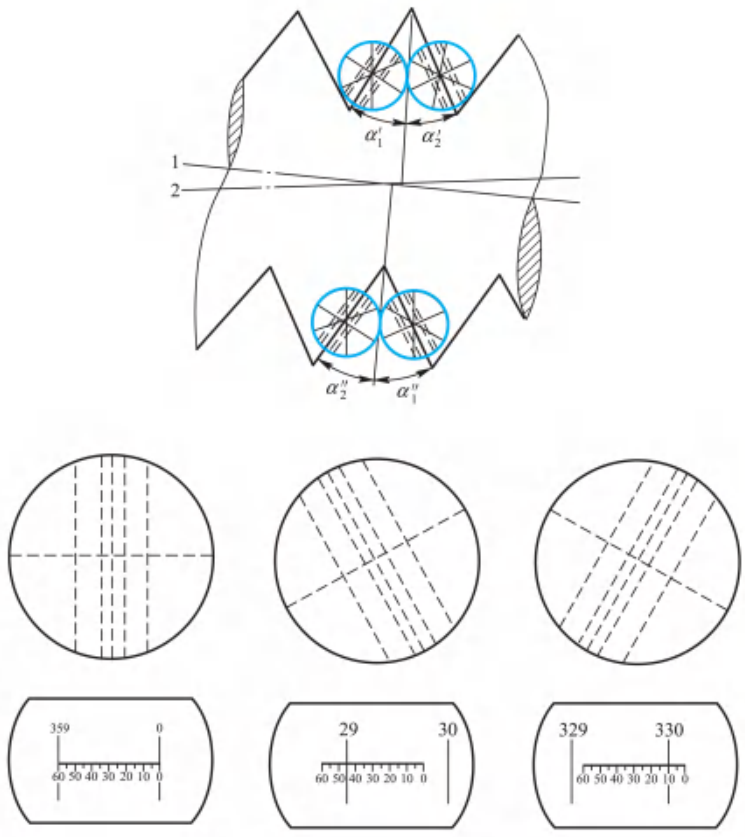


图 6-23　对线法测量牙侧角

② 测量、记录。

能力训练 3：判断中径的合格性。

有一外螺纹在图样上标记为 M24×3—4h，今测得单一中径 $d_{2s}=21.950$ mm，螺距累积误差 $\Delta P_{\Sigma}=+0.04$ mm，牙侧角误差分别为 $\Delta\alpha_1=-35'$，$\Delta\alpha_2=+20'$。试计算该螺纹的作用中径 d_{2m}，并判断中径是否合格。

分析指导：

(1) 确定中径的极限尺寸

分别查取表 6-2、表 6-3、表 6-4 知：M24×3—4h 的中径公称尺寸 $d_2=22.051$ mm，基本偏差 es=0，公差 $T_{d2}=125\ \mu m$。

由此可得中径的极限尺寸为：$d_{2max}=d_2+es=22.051$ mm

$$d_{2min}=d_{2max}-T_{d2}=(22.051-0.125)mm=21.926\ mm$$

(2) 计算作用中径

由螺距误差中径当量计算公式(6-2)得：

$$f_p=1.732|\Delta P_\Sigma|=1.732\times0.04\ mm=0.069\ mm$$

由牙侧角偏差中径当量计算公式(6-3)得：

$$\begin{aligned}f_\alpha&=0.073P(K_1|\Delta\alpha_1|+K_2|\Delta\alpha_2|)\\&=0.073\times3(3\times|-35'|+2|+20'|)mm=0.032\ mm\end{aligned}$$

由作用中径计算公式(6-4)得：

$$d_{2m}=d_{2s}+(f_p+f_\alpha)=[21.950+(0.069+0.032)]mm=22.051\ mm$$

(3) 判断中径是否合格

由式(6-6)得：

$$d_{2s}=21.950\ mm>d_{2min}(=21.926\ mm)$$

且 $d_{2m}=22.051\ mm\leqslant d_{2max}(=22.051\ mm)$，所以该螺纹中径合格。

能力训练任务

能力训练任务 1：某螺纹副设计为 M16—6H/6g，加工完后实测为：内、外螺纹的单一中径 $d_{2s}=14.592$ mm；内螺纹的螺距累积误差 $\Delta P_\Sigma=+50\ \mu m$，牙侧角误差 $\Delta\alpha_1=+50'$，$\Delta\alpha_2=-1°$；外螺纹的螺距累积误差 $\Delta P_\Sigma=-20\ \mu m$，牙侧角误差 $\Delta\alpha_1=+30'$，$\Delta\alpha_2=+40'$。问此螺纹副是否合格，能否旋合？

能力训练任务 2：测得某螺栓 M16—6g 的单一中径为 14.6 mm，$\Delta P_\Sigma=35\ \mu m$，$\Delta\alpha_1=-50'$，$\Delta\alpha_2=40'$，试问此螺栓是否合格？若不合格，能否修复，怎样修复？

任务 2　键与花键、圆锥、滚动轴承的互换性与检测

2.1　键的互换性与检测

理论知识要点

键连接广泛用于轴与轴上传动件(如齿轮、链轮、带轮、联轴器等)之间的连接，主要用以传

递扭矩，有时用作轴上传动件的导向。键连接是一种可拆连接。

2.1.1　平键的尺寸

键又称单键，可分为平键（包括普通平键、导向平键、薄形平键）、半圆键、楔形键（包括普通楔键、钩头楔键）和切向键等几种，其中平键应用最广泛。

平键连接靠键的侧面分别与轴槽和轮毂槽的侧面相互接触来传递运动和扭矩，因此键宽和键槽宽 b 是决定配合性质的主要参数，GB/T 1095 将键（槽）宽 b 作为配合尺寸，规定较小的公差；而键高 h、键长 L、轴槽深 t_1 和轮毂槽深 t_2 均为非配合尺寸，规定较大的公差。平键断面尺寸如图 6-24 所示。平键、键槽断面尺寸及键槽公差见表 6-9。普通平键尺寸及公差见表 6-10。

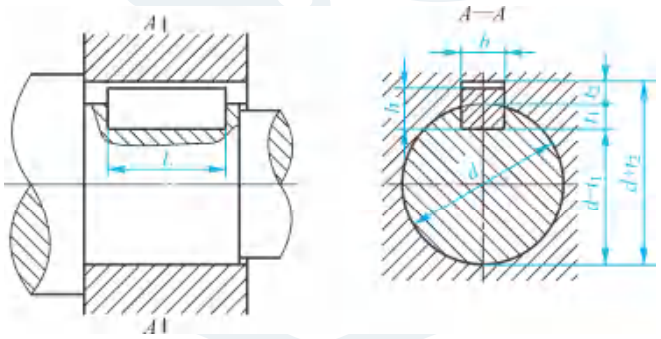


图 6-24　平键断面尺寸

表 6-9　平键、键槽断面尺寸及键槽公差（摘自 GB/T 1095）　　mm

轴	键	键槽										
公称直径 d	公称尺寸 $b\times h$	宽度 b						深度				
		公称尺寸	极限偏差					轴槽 t_1		轮毂槽 t_2		
			松连接		正常连接		紧密连接					
			轴 H9	毂 D10	轴 N9	毂 JS9	轴和毂 P9	公称尺寸	极限偏差	公称尺寸	极限偏差	
>22～30	8×7	8	+0.036 0	+0.098 +0.040	0 −0.036	±0.018	−0.015 −0.051	4.0	+0.2 0	3.3	+0.2 0	
>30～38	10×8	10						5.0		3.3		
>38～44	12×8	12	+0.043 0	+0.120 +0.050	0 −0.043	±0.0215	−0.018 −0.061	5.0		3.3		
>44～50	14×9	14						5.5		3.8		
>50～58	16×10	16						6.0		4.3		
>58～65	18×11	18						7.0		4.4		
>65～75	20×12	20	+0.052 0	+0.149 +0.065	0 −0.052	±0.026	−0.022 −0.074	7.5		4.9		
>75～85	22×14	22						9.0		5.4		
>85～95	25×14	25						9.0		5.4		
>95～100	28×16	28						10.0		6.4		

注：1. $(d-t_1)$ 和 $(d+t_2)$ 两个组合尺寸的偏差按相应的 t_1 和 t_2 的偏差选取，但 $(d-t_1)$ 偏差值应取负号（−）。
2. 导向平键的轴槽与轮毂槽用较松键连接的公差。尺寸应符合 GB/T 1097 的规定。

表 6-10　普通平键尺寸及公差　　mm

宽度 b	公称尺寸		2	3	4	5	6	8	10	12	14	16	18	20	22	25	28
	极限偏差（h8）		0 −0.014		0 −0.018			0 −0.022		0 −0.027				0 −0.033			
高度 h	公称尺寸		2	3	4	5	6	7	8	8	9	10	11	12	14		16
	极限偏差	矩形（h11）	—		—			0 −0.090					0 −0.110				
		方形（h8）	0 −0.014		0 −0.018			—					—				

2.1.2　平键连接的尺寸公差带与配合

因键由型钢制成，是标准件，故键连接采用基轴制配合。国家标准对键宽规定了一种公差带 h8，对轴槽宽和轮毂槽宽各规定了三种公差带。为满足不同用途的需要，平键连接可采用松连接、正常连接和紧密连接等三种配合，见表 6-11，其公差带图如图 6-25 所示。

表 6-11　平键连接的三类配合及其应用

配合种类	尺寸 b 的公差带			配合性质及应用
	键	轴槽	轮毂槽	
松连接	h8	H9	D10	键在轴上及轮毂中均能滑动。松连接主要用于导向平键，轮毂可在轴上作轴向移动
正常连接		N9	JS9	键在轴上及轮毂中均固定，用于载荷不大的场合
紧密连接		P9	P9	键在轴上及轮毂中均牢固地固定，比上一种配合更紧。这种配合主要用于载荷较大、载荷有冲击性和双向传递扭矩的场合

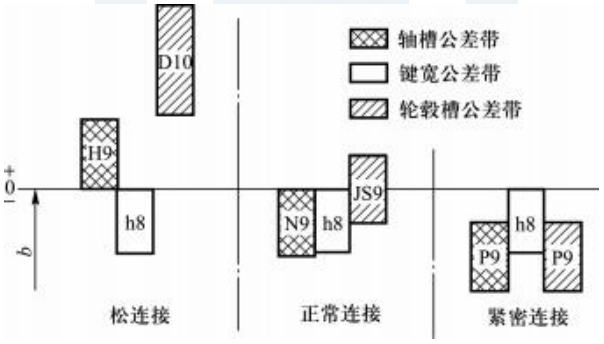


图 6-25　键宽与键槽宽 b 的公差带图

2.1.3　平键连接的几何公差与表面粗糙度

为保证平键连接的强度（即具有足够的接触面积）和避免装拆困难，国家标准对键和键槽

的几何公差作了如下规定：

1）键槽（轴槽、轮毂槽）对轴线有对称度公差要求，按 GB/T 1095 选取，一般取 7～9 级。

2）当键的长宽比大于等于 8 时，键的两工作侧面有平行度公差要求。当 $b \leqslant 6$ mm 时，公差等级取 7 级；当 8 mm$\leqslant b<$36 mm 时，公差等级取 6 级；当 $b \geqslant 40$ mm 时，公差等级取 5 级。

键和键槽配合面的表面粗糙度：Ra 一般取 1.6～3.2 μm；非配合面的表面粗糙度：Ra 取 6.3 μm，如图 6-26 所示。

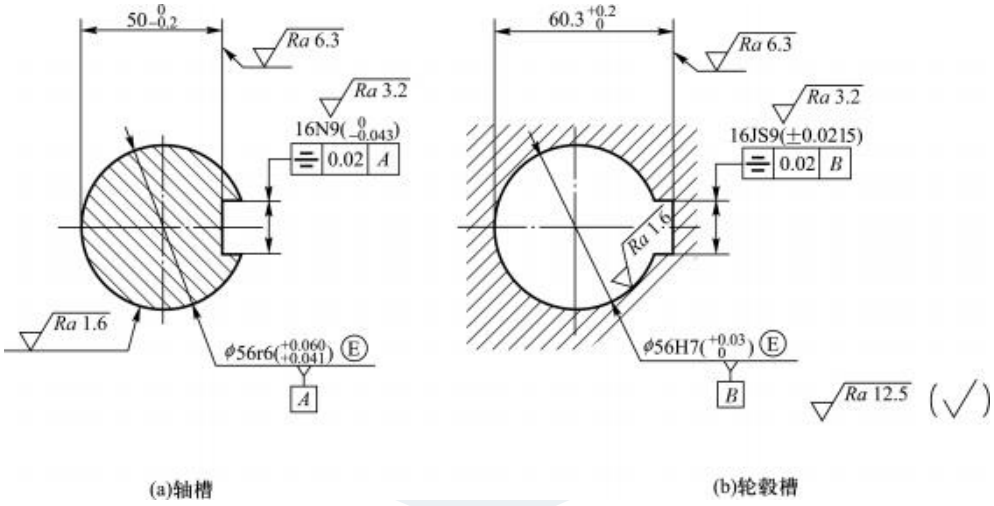


图 6-26　键槽（轴槽、轮毂槽）标注示例

能力训练指导

能力训练 1：平键的检测

分析指导：

平键连接的检测对象是键宽、槽宽、槽深和对称度。

1）通用计量器具测量法。当单件小批量生产时，对键宽槽宽、轴槽深和轮毂槽深，一般采用通用计量器具（游标卡尺、千分尺等）测量；键槽（轴槽、轮毂槽）对称度采用分度头、V 形块和百分表测量。

2）量规测量法。当大批量生产时，键宽、槽宽采用极限量规检测；轴槽深和轮毂槽深采用专用量规（深度量规）检测；键槽（轴槽、轮毂槽）对称度采用对称度极限量规检测，如图 6-27 所示。

能力训练 2：有一减速器中的轴和齿轮间采用普通平键连接，已知轴和齿轮孔的配合是 ϕ56H7/r6，试确定轴槽和轮毂槽的剖面尺寸及其公差带、相应的几何公差、各个表面的粗糙度参考值，并把它们标注在断面图中。

分析指导：

1）查表 6-9 得：ϕ56 轴与齿轮孔用平键的尺寸为 $b \times h=16$ mm$\times$10 mm。

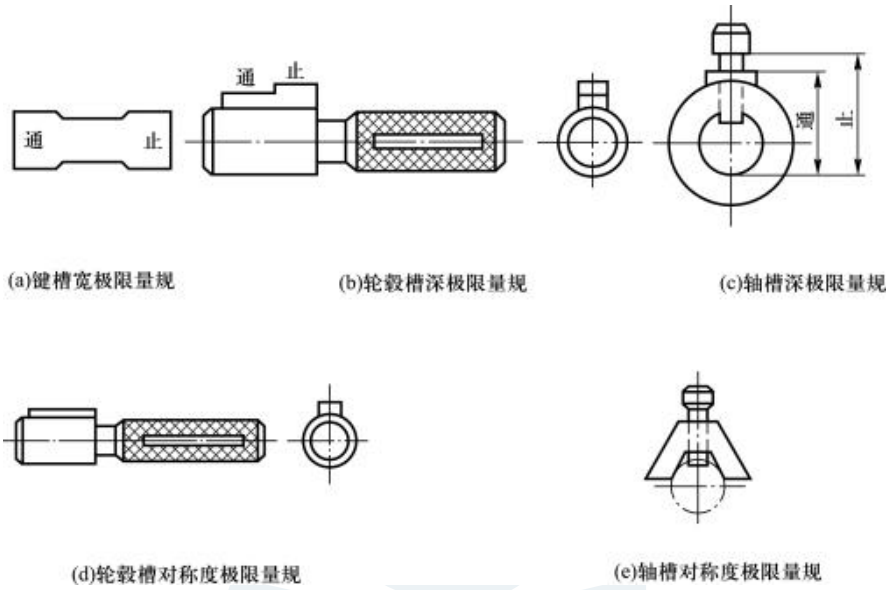


图 6-27　检测平键的量规

2）确定键连接。减速器中轴与齿轮承受一般载荷，故采用正常连接。查表 6-9 得轴槽公差带为 16N9($^{0}_{-0.043}$)mm；轮毂槽公差带为 16JS9(±0.021)mm；轴槽深 $t_1=6.0^{+0.2}_{0}$ mm，$d-t_1=50^{0}_{-0.2}$ mm；轮毂槽深 $t_2=4.3^{+0.2}_{0}$ mm，$d+t_2=60.3^{+0.2}_{0}$ mm。

3）确定键连接几何公差和表面粗糙度。轴槽对轴线、轮毂槽对孔轴线的对称度公差按 GB/T 1095 中的 8 级选取，公差值为 0.02 mm。轴槽、轮毂槽侧面表面粗糙度 Ra 值为 3.2 μm，底面的 Ra 值为 6.3 μm。

图样标注如图 6-26 所示。

能力训练任务

能力训练任务：某直径为 50 mm 的传动轴与齿轮采用普通平键连接，配合类别选为正常连接，试确定键的尺寸，并按照 GB/T 1095 确定键、轴槽及轮毂槽宽和高的公差值，并画出尺寸公差带图。

2.2　花键的互换性与检测

理论知识要点

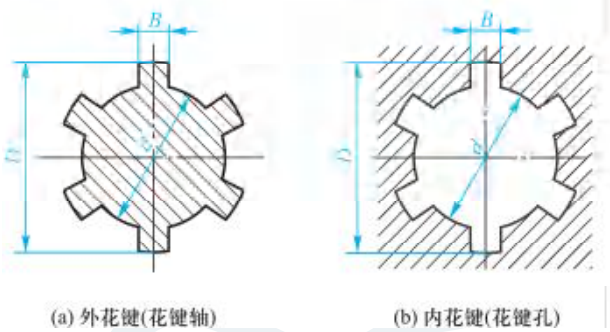
2.2.1　花键连接的优点

当需要传递较大的扭矩，且定心精度要求较高时，可采用花键连接。花键连接可以是固定连接，也可以是滑动连接。与单键相比，花键连接的优点是：定心精度高、导向性好、承载能力强。

花键分为矩形花键、渐开线花键和三角花键三种。生产中应用最多的是矩形花键。

2.2.2　矩形花键的几何参数和定心方式

GB/T 1144《矩形花键尺寸、公差和检验》规定矩形花键的主要参数为大径 D、小径 d、键宽和键槽宽 B，如图 6-28 所示，其尺寸系列见表 6-12。



(a) 外花键(花键轴)　　(b) 内花键(花键孔)

图 6-28　矩形花键

表 6-12　矩形花键尺寸系列(摘自 GB/T 1144)　　mm

小径 d	轻系列				中系列			
	规格 $N\times d\times D\times B$	键数 N	大径 D	键宽 B	规格 $N\times d\times D\times B$	键数 N	大径 D	键宽 B
11					6×11×14×3	6	14	3
13					6×13×16×3.5	6	16	3.5
16					6×16×20×4	6	20	4
18					6×18×22×5	6	22	5
21					6×21×25×5	6	25	5
23	6×23×26×6	6	26	6	6×23×28×6	6	28	6
26	6×26×30×6	6	30	6	6×26×32×6	6	32	6
28	6×28×32×7	6	32	7	6×28×34×7	6	34	7
32	6×32×36×6	6	36	6	8×32×38×6	8	38	6
36	8×36×40×7	8	40	7	8×36×42×7	8	42	7
42	8×42×46×8	8	46	8	8×42×48×8	8	48	8
46	8×46×50×9	8	50	9	8×46×54×9	8	54	9
52	8×52×58×10	8	58	10	8×52×60×10	8	60	10
56	8×56×62×10	8	62	10	8×56×65×10	8	65	10
62	8×62×68×12	8	68	12	8×62×72×12	8	72	12
72	10×72×78×12	10	78	12	10×72×82×12	10	82	12
82	10×82×88×12	10	88	12	10×82×92×12	10	92	12
92	10×92×98×14	10	98	14	10×92×102×14	10	102	14
102	10×102×108×16	10	108	16	10×102×112×16	10	112	16
112	10×112×120×18	10	120	18	10×112×125×18	10	125	18

矩形花键的定心方式有三种：按大径 D 定心、按小径 d 定心和按键宽 B 定心。国家标准规定采用小径 d 定心，如图 6-29 所示。因花键结合面的硬度要求较高，通过拉削、插削等方式加工出来的花键需淬火处理，若采用大径定心，变形后的花键孔很难用拉削、磨削等方式进行修正，而采用小径定心，花键孔小径可通过内圆磨削进行修复，花键轴小径可通过成形磨削进行修复，达到所要求的精度。

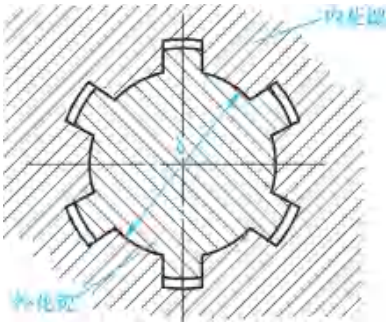


图 6-29　花键小径定心方式

实际生产中，大批量生产的花键孔主要采用拉削加工。为了便于加工和检测，国家标准规定矩形花键的键数 N 为偶数，分别为 6、8、10 三种。根据工作载荷的不同，矩形花键又分为轻、中两个系列，轻系列键高尺寸较小，承载能力较低；中系列键高尺寸较大，承载能力较强。

2.2.3　矩形花键连接的公差带与配合

国家标准规定采用小径 d 定心，故定心小径 d 采用较小的公差等级，非定心大径 D 采用较大的公差等级。GB/T 1144 规定矩形花键连接采用基孔制，主要目的是为了减少花键拉刀和花键量规的规格和数量。

通过改变外花键的小径和外花键宽的尺寸公差带可形成不同的配合性质。按装配形式不同，矩形花键配合可分为滑动、紧滑动和固定三种配合。按使用要求不同，矩形花键的配合精度可分为一般和精密两级，精密级用于机床变速箱中，其定心精度要求高或传递扭矩较大；一般级适用于汽车、拖拉机的变速箱中。矩形内、外花键的尺寸公差见表 6-13。

表 6-13　矩形内、外花键的尺寸公差（摘自 GB/T 1144）

内花键				外花键			装配形式
d	D	B		d	D	B	
		拉削后不热处理	拉削后热处理				
一般用							
H7	H10	H9	H11	f7	a11	d10	滑动
				g7		f9	紧滑动
				h7		h10	固定
精密传动用							
H5	H10	H7，H9		f5	a11	d8	滑动
				g5		f7	紧滑动
				h5		h8	固定
H6				f6		d8	滑动
				g6		f7	紧滑动
				h6		h8	固定

注：1. 精密滑动用的内花键，当需要控制键槽配合间隙时，槽宽可选 H7，一般情况下可选 H9；
2. d 为 H6 和 H7 的内花键，允许与高一级的外花键配合。

2.2.4　矩形花键的几何公差和表面粗糙度

矩形花键连接表面复杂，键长与键宽比值较大，故几何公差对矩形花键连接的装配性能、传递扭矩、运动性能等影响很大。国家标准对矩形花键的几何公差作了以下规定：

1）内、外花键小径 d 的尺寸公差与几何公差的关系遵守包容要求，目的是保证定心表面的配合性质，如图 6-30 所示。

2）大批量生产时，对键和键槽规定了位置度公差，键宽需要遵守最大实体要求，如图 6-30 所示。矩形花键位置度公差值见表 6-14。

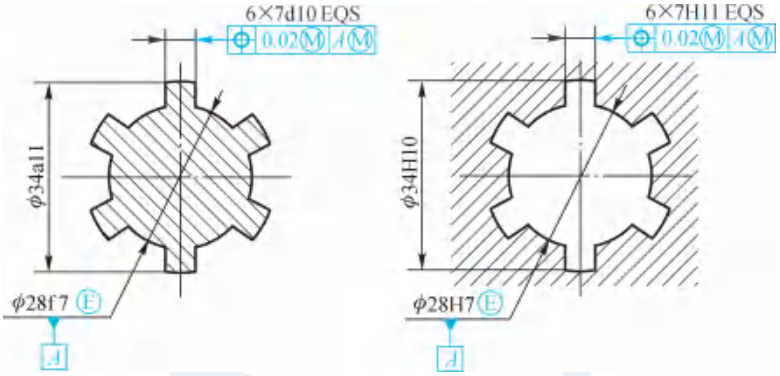


图 6-30　矩形花键位置公差标注实例

表 6-14　矩形花键位置度公差值(摘自 GB/T 1144)　　mm

键槽宽或键宽 B	位置度公差 t_1		
	键槽宽	键宽	
		滑动、固定	紧滑动
3	0.010	0.010	0.006
3.5～6	0.015	0.015	0.010
7～10	0.020	0.020	0.013
12～18	0.025	0.025	0.016

3）单件小批量生产时，对键(键槽)宽规定了对称度公差和等分度公差，并遵守独立原则，如图 6-31 所示，公差值见表 6-15。

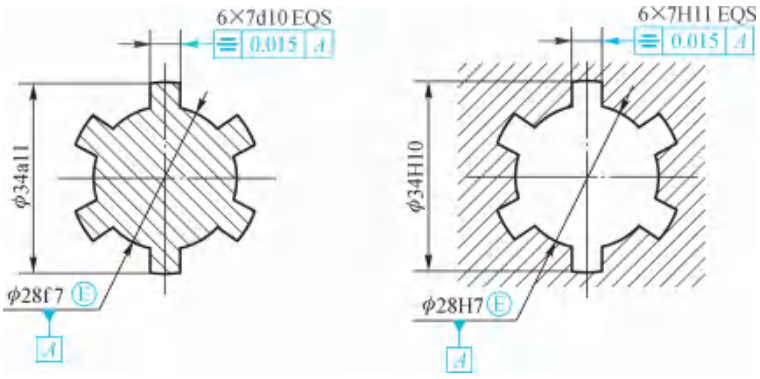


图 6-31　矩形花键对称度公差标注实例

表 6-15　矩形花键对称度公差值(摘自 GB/T 1144)　　mm

键槽宽或键宽 B	t_1	
	一般用	精密传动用
3	0.010	0.010
3.5～6	0.015	0.015
7～10	0.020	0.020
12～18	0.025	0.025

4）若花键长度较长，可单独规定键侧对小径轴线的平行度公差。

矩形花键连接的各接合面的表面粗糙度，见表 6-16。

表 6-16　矩形花键表面粗糙度推荐值

加工表面	Ra 不大于/μm	
	内花键	外花键
小径	1.6	0.8
大径	6.3	3.2
键侧	3.2	0.8

能力训练指导

能力训练 1：矩形花键的标注。

分析指导：

矩形花键的标注应按次序包含以下项目：键数 N，小径 d，大径 D，键(槽)宽 B，花键的公差带代号及标准代号。

例：某矩形花键连接，键数 $N=6$，定心小径 $d=23H7/f7$，大径 $D=26H10/a11$，键宽 $B=6H11/d10$，试进行标记。

标记如下：

花键规格：$N\times d\times D\times B$ 为 6×23×26×6。

花键副：6×23H7/f7×26H10/a11×6H11/d10，GB/T 1144。

内花键：6×23H7×26H10×6H11，GB/T 1144。

外花键：6×23f7×26a11×6d10，GB/T 1144。

能力训练 2：矩形花键的检测。

分析指导：

矩形花键的检测有综合测量和单项测量。主要对定心小径、大径和键宽三个参数检验，而每一个参数都有尺寸、位置、表面粗糙度的检验。

1）综合检验　在大批量生产中，一般都采用专用量规进行检验。花键综合量规、单项止规（花键单项检测极限量规），如图 6-32 所示。

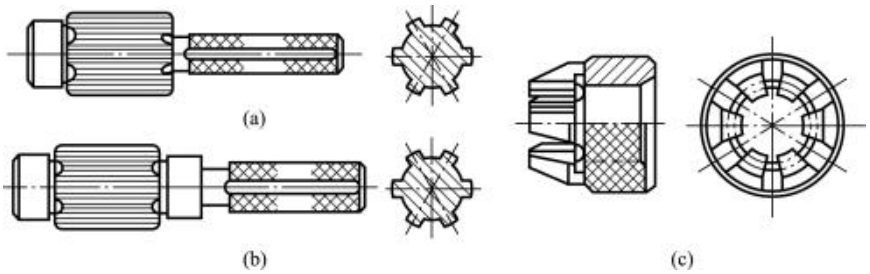


图 6-32　花键综合量规、单项止规

检验时，当综合通规通过，单项止规不能通过，则花键合格，否则不合格。

2）单项检测　在单件小批量生产中，采用通用计量器具（千分尺、游标卡尺、指示表等）分别测量花键的尺寸误差（d、D、B）、小径对大径的同轴度误差和键齿（槽）的位置度误差。

能力训练任务

能力训练任务：某矩形花键的标注代号为：$6\times28\frac{H7}{g7}\times32\frac{H11}{a11}\times7\frac{H11}{f9}$，试查表确定内、外花键主要尺寸的极限偏差和极限尺寸。

2.3　圆锥配合的互换性与检测

理论知识要点

2.3.1　圆锥配合的特点、分类和形成方式

（1）与圆柱配合相比，圆锥配合具有以下特点（见图 6-33）。

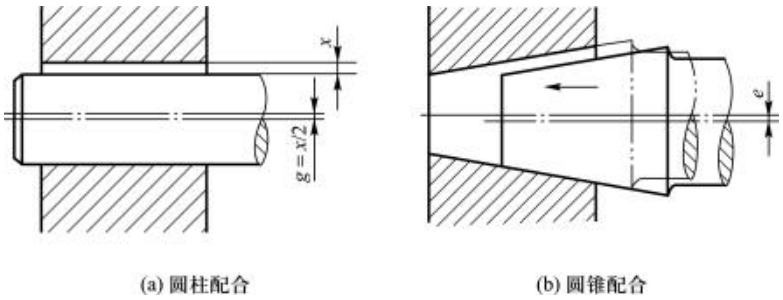


图 6-33　圆柱配合和圆锥配合

1）圆锥配合具有较高的同轴度，对中性好，且装拆方便。

2）圆锥配合的配合性质可以调整。因为在圆锥配合中，间隙大小或过盈大小可通过轴向

相对位置的移动来改变。

3）圆锥配合具有较好的密封性。圆锥经配对研磨后结合起来常被用在防止漏气、漏水等场所。

影响圆锥结合互换性的参数比较多，加工和检测比较困难，故圆锥配合应用不如圆柱配合广泛。

（2）圆锥配合的分类

1）间隙配合　特点是具有间隙，能作相对运动，间隙大小可调整，零件易拆开。常用在有相对运动的机构中，如机床顶尖、车床主轴的圆锥轴颈与滑动轴承配合等。

2）过盈配合　特点是具有过盈，可利用配合圆锥面间的自锁产生的摩擦力来传递转矩，如机床主轴锥孔与刀具锥柄的配合。

3）紧密配合　特点是配合很紧密，通常要将内、外圆锥成对研磨。这类圆锥不具有互换性，如发动机中的气阀与阀座的配合。

（3）圆锥配合的形成方式

1）结构型圆锥配合　这是由内、外圆锥的结构或基准平面之间的尺寸确定最终位置而获得的圆锥配合。结构型圆锥配合优先选用基孔制，其松紧程度由内、外圆锥直径公差带的相对位置决定，如图 6-34 所示。

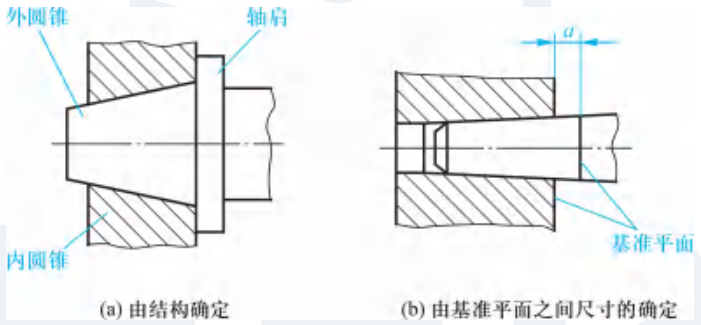


图 6-34　结构型圆锥配合

2）位移型圆锥配合　相互结合的内、外圆锥由实际初始位置(P_a)开始，作一定的相对轴向位移(E_a)而获得要求的间隙或过盈的圆锥配合。位移型圆锥配合的内、外圆锥直径公差带的基本偏差采用 H/h 或 JS/js，其轴向位移的极限值需按极限间隙或极限过盈计算确定，如图 6-35 所示。

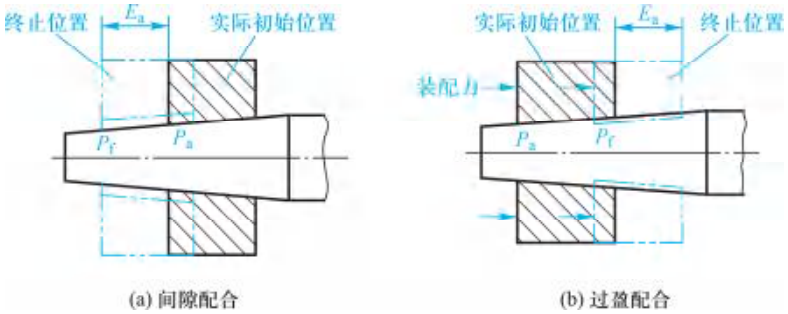


图 6-35　位移型圆锥配合

2.3.2　圆锥配合的基本参数

参考图 6-36 可知：

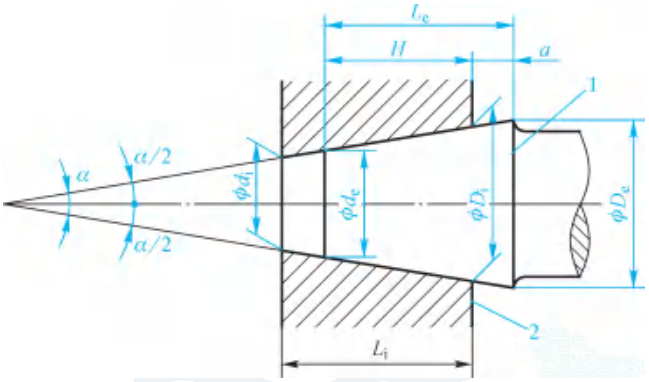


图 6-36　圆锥配合的基本参数

1）圆锥角是指在通过圆锥轴线的截面内，两条素线之间的夹角，用 α 表示。

2）圆锥素线角是指圆锥素线与其轴线的夹角，它等于圆锥角之半，用 $\alpha/2$ 表示。

3）圆锥直径是指与圆锥轴线垂直的截面内的直径。有三个直径：内、外圆锥的最大直径 D_i、D_e，内、外圆锥的最小直径 d_i、d_e，给定截面 X 处圆锥直径 d_x。

4）圆锥长度是指圆锥最大直径截面和最小直径截面之间的轴向距离，用 L 表示。内圆锥长度用 L_i 表示，外圆锥长度用 L_e 表示。

5）圆锥配合长度是指内、外圆锥配合面的轴向距离，用 H 表示。

6）锥度是指圆锥的最大直径与最小直径之差和圆锥长度之比，用 C 表示，即 $C=\dfrac{D-d}{L}=2\tan\dfrac{\alpha}{2}$，锥度常用比例或分式形式表示，例如 $C=1:20$ 或 $C=1/20$ 等。

7）基面距是指相互结合的内、外圆锥基准面间的距离，用 a 表示。

8）轴向位移是指相互结合的内、外圆锥，从实际初始位置到终止位置所移动的距离，用 E_a 表示，如图 6-37 所示。

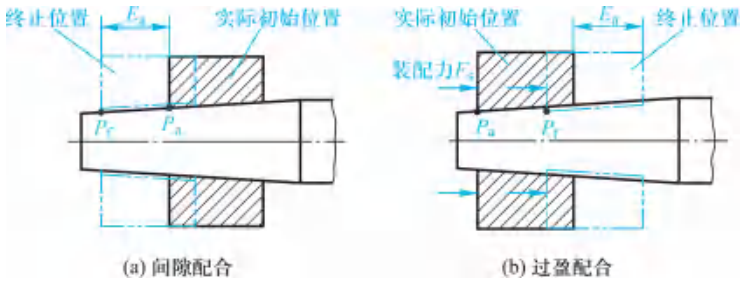


图 6-37　圆锥配合的轴向位移

2.3.3　圆锥主要几何参数误差对互换性的影响

（1）圆锥配合的基本要求

1）圆锥配合应根据使用要求有适当的间隙或过盈，且间隙或过盈应均匀，即接触均匀性。

2）有些圆锥配合的实际基面距要求控制在一定范围内。若基面距太大，则配合长度减小，影响配合的稳定性和传递转矩；若基面距太小，则因磨损的补偿调节范围将减小。

（2）圆锥主要几何参数误差对互换性的影响

1）圆锥直径误差对配合的影响

结构型圆锥的基面距是一定的，圆锥直径误差影响圆锥配合的实际间隙或过盈的大小。

位移型圆锥的直径误差影响圆锥配合的实际初始位置，故影响装配后的基面距。

2）圆锥角误差对配合的影响

对结构型圆锥，圆锥角误差影响接触的均匀性。

对位移型圆锥，圆锥角误差除影响接触均匀性外，还会影响基面距，如图 6-38 所示。

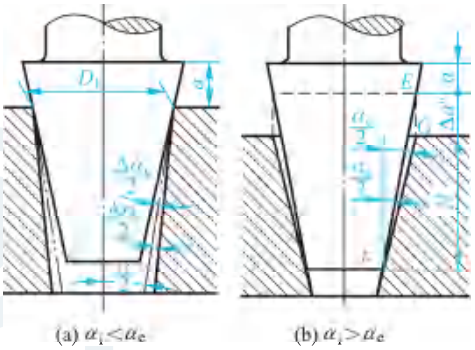


图 6-38　圆锥角误差对配合的影响

3）圆锥形状误差对配合的影响

圆锥形状误差是指圆锥素线直线度误差和横截面的圆度误差。它主要影响配合表面的接触精度。

2.3.4　圆锥公差

（1）圆锥公差的基本术语

1）公称圆锥　由设计给定的理想形状的圆锥。其确定形式有两种：一种是用一个公称圆锥直径（D 或 d 或 d_x）、公称长度 L、公称圆锥角 α 或公称锥度 C 确定；另一种是用两个公称圆锥直径和公称圆锥长度确定。

2）实际圆锥　实际存在并与周围介质分隔的圆锥。实际圆锥直径 d_a 是指实际圆锥上的任一直径。实际圆锥角是指在实际圆锥的任一轴向截面内，包容其素线且距离为最小的两对平行直线之间的夹角，如图 6-39 所示。

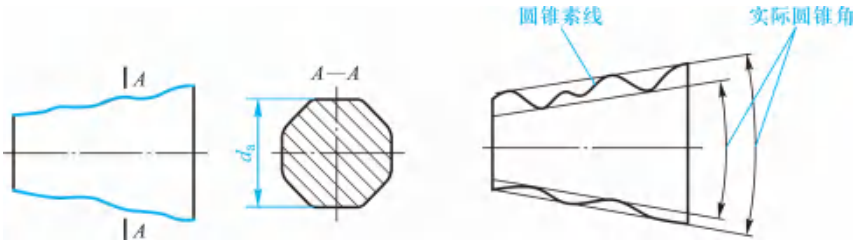


图 6-39　实际圆锥

3）极限圆锥　与公称圆锥共轴且圆锥角相等，直径分别为上极限直径和下极限直径的两个圆锥，如图 6-40 所示。垂直于圆锥轴线的截面上的直径称为极限圆锥直径，即如图 6-40 所示的 D_{max}、D_{min}、d_{max}、d_{min}。

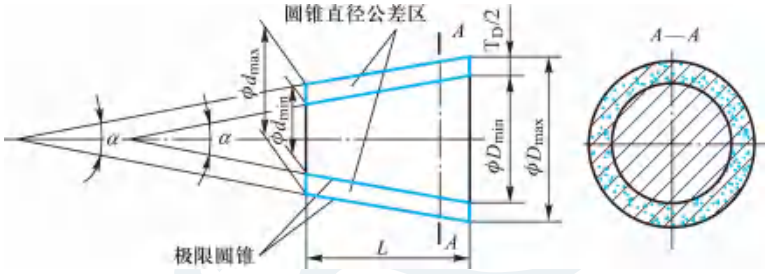


图 6-40　极限圆锥

（2）圆锥公差

1）圆锥直径公差 T_D　圆锥直径公差 T_D 是指圆锥直径的允许变动量。其公差带是指两个极限圆锥所限定的区域，此区域称为圆锥直径公差区，如图 6-41 所示。

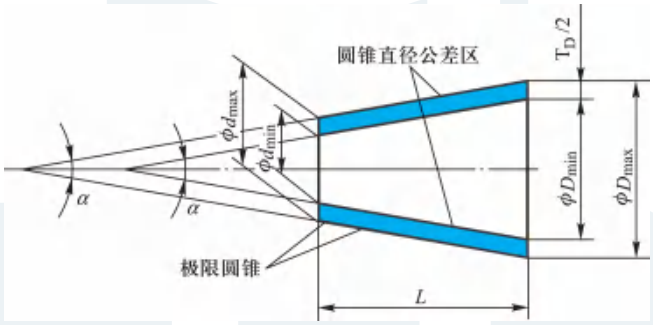


图 6-41　圆锥直径公差 T_D

2）给定截面圆锥直径公差 T_{DS}　给定截面圆锥直径公差 T_{DS}是指在垂直于圆锥轴线的给定截面内，圆锥直径的允许变动量。其公差带是在给定截面内，由两个同心圆所限定的区域，此区域称为给定截面圆锥直径公差区，如图 6-42 所示。

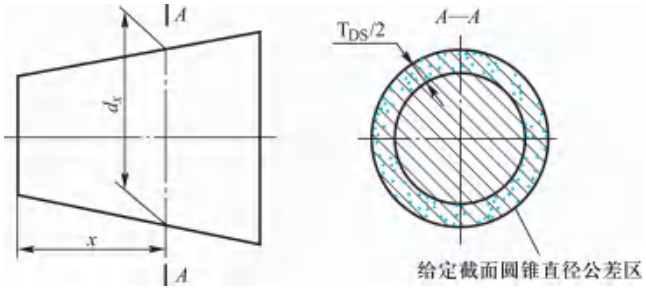


图 6-42　给定截面圆锥直径公差 T_{DS}

3）圆锥角公差 AT　圆锥角公差 AT 是指圆锥角的允许变动量，AT 共分 12 个公差等级。其公差带是由两个极限圆锥角所限定的区域。圆锥角公差 AT 有两种表示方法：AT_D（单位为 μm）和 AT_α（单位为 μrad），二者关系为：$AT_D = AT_\alpha \cdot L \times 10^{-3}$，如图 6-43 所示。

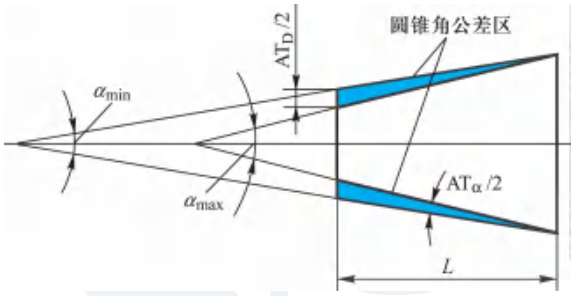


图 6-43　圆锥角公差 AT

4）圆锥形状公差 T_F　圆锥形状公差 T_F 包括圆锥素线直线度公差和截面圆度公差。对要求不高的圆锥工件，其形状公差可用圆锥直径公差 T_D 控制；对要求较高的圆锥工件，应单独按要求给定形状公差 T_F。

（3）圆锥公差的给定方法

对于一个具体的圆锥，应根据其功能要求规定所需的公差项目，不必全部给出上述四项公差。GB/T 11334 中规定了以下两种圆锥公差的给定方法：

1）基本锥度法：适用于有配合要求的结构型内、外圆锥。标注时，给出圆锥的公称圆锥角 α（或锥度 C）和圆锥直径公差 T_D。由 T_D 确定两个极限圆锥，如图 6-44 所示。

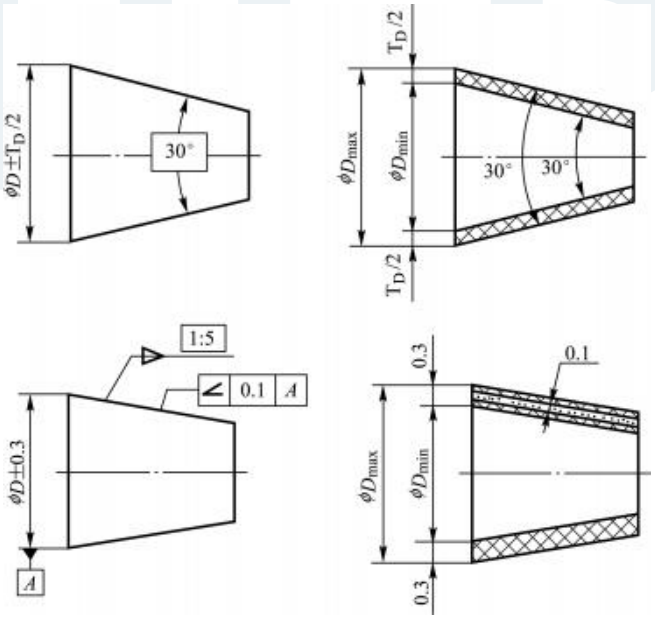


图 6-44　基本锥度法标注

2）公差锥度法：仅适用于对某些给定截面圆锥直径有较高要求的圆锥、密封和非配合圆锥。标注时，给出给定截面圆锥直径公差 T_{DS} 和圆锥角公差 AT。当对形状公差有更高要求时，可再给出圆锥的形状公差。例如某些阀类零件，为使圆锥配合在给定截面上有良好的接触，以保证有良好的密封性时，常采用这种公差，如图 6-45 所示。

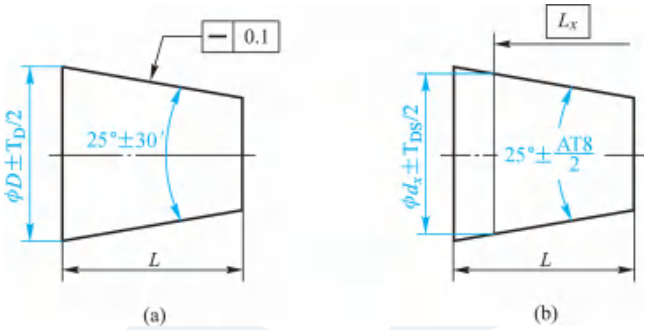


图 6-45　公差锥度法标注

能力训练指导

能力训练 1：圆锥尺寸在图样上的标注。

分析指导：

常用下列四种标注方法，供选择：

1）标注圆锥公称直径（只注一端，一般选择大端）、公称圆锥角、公称圆锥长度，如图 6-46 所示。

2）标注圆锥公称直径（只注一端，一般选择大端）、公称圆锥度、公称圆锥长度，如图 6-47 所示。

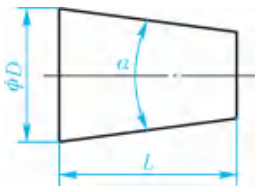


图 6-46　圆锥尺寸标注方法 1

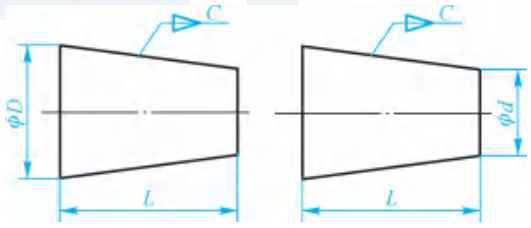


图 6-47　圆锥尺寸标注方法 2

3）标注给定截面公称圆锥直径、公称圆锥度、轴向位置给定截面公称圆锥长度，如图 6-48 所示。

4）对生产中常用的特殊用途的锥度（如工具与机床常用的莫氏锥度），可以不按上述形式标注，特殊对待，如图 6-49 所示。

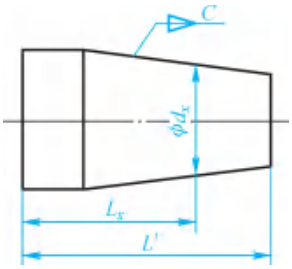


图 6-48　圆锥尺寸标注方法 3

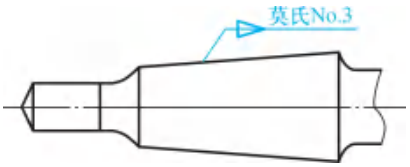


图 6-49　圆锥尺寸标注方法 4

能力训练 2：圆锥公差的检测方法。

分析指导：

1）量规检验法　大批量生产的圆锥，多用圆锥量规作为检验工具，如图 6-50 所示。检验内圆锥时用锥度塞规，检验外圆锥时用锥度环规，主要检验内、外圆锥工件锥度和基面距偏差。对锥度要求较严的圆锥，采用涂色法。

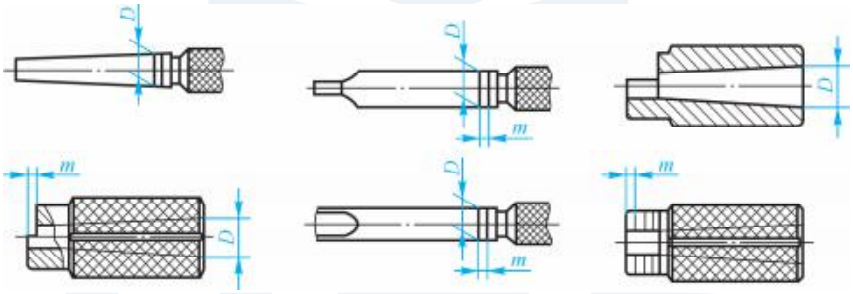


图 6-50　圆锥量规

2）间接测量法　用正弦规、指示表测量锥度（或锥角），如图 6-51 所示。

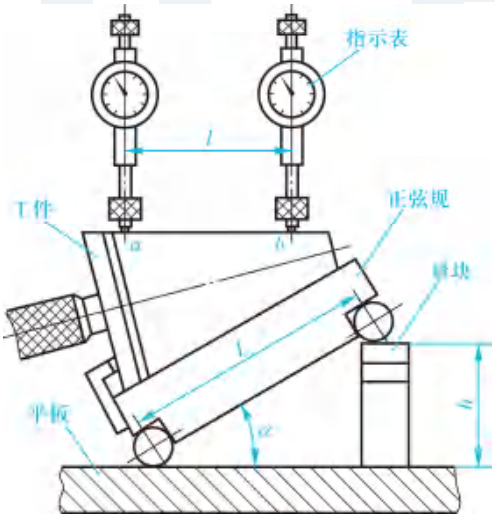


图 6-51　圆锥间接测量法

步骤如下：

① 按所测锥角理论值算出所需的量块尺寸 h（$h=L\sin\alpha$）。

② 将被测圆锥放在正弦规上。

③ 用指示表在被测圆锥素线上 a、b 两点处测量（按指示表最大示值读数），a、b 两点读数差 Δh 与 a、b 两点间距离 l 之比为锥度误差 ΔC，即 $\Delta C=\Delta h/l$。则锥角误差为 $\Delta\alpha\approx2\times10^5\times\Delta C(")$。

④ 将工件转过 90°，重复上述测量，以两次测得锥角误差绝对值最大者作为工件锥角误差。

能力训练任务

能力训练：某位移型圆锥配合的锥度 $C=1:20$，要求得到间隙配合，极限间隙 $X_{max}=60\ \mu m$，$X_{min}=30\ \mu m$，试计算其轴向位移的极限值和轴向位移公差。

2.4　滚动轴承的互换性与检测

理论知识要点

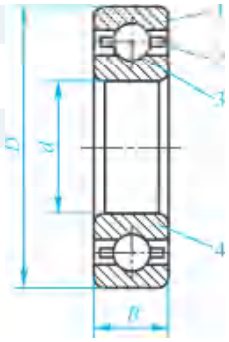
2.4.1　滚动轴承的组成与精度等级

（1）滚动轴承的组成

滚动轴承是机械中广泛使用的一种标准化部件，用以支承轴类零件转动。它由外圈、内圈、滚动体和保持架组成，如图 6-52 所示。轴承的外径 D 和内径 d 是配合的公称尺寸。

（2）滚动轴承的公差等级

滚动轴承是按其外形尺寸公差和旋转精度划分公差等级的。外形尺寸公差是指轴承的内径 d、外径 D 和宽度 B 等的尺寸公差；旋转精度是指轴承内外圈的径向跳动、端面对滚道的跳动和端面对内孔的跳动。



1—外圈；2—保持架；3—滚动体；4—内圈。
图 6-52　滚动轴承的结构

GB/T 307.3 规定：向心轴承公差等级分为普通级、6、5、4、2 五级；圆锥滚子轴承公差等级分为普通级、6X、5、4、2 五级；推力轴承公差等级分为普通级、6、5、4 四级。其中 2 级精度最高，普通级精度最低。

普通级——旧称 0 级，用于低、中速及旋转精度要求不高的一般旋转机构，在机械中应用最广。例如普通机床变速箱、进给箱的轴承，汽车、拖拉机变速箱的轴承，普通电机、水泵、压缩机等旋转机构中的轴承等。

6 级、5 级、4 级——用于转速较高、旋转精度要求较高的旋转机构。例如普通机床的主轴后轴承、精密机床的主轴轴承等。

2 级——用于转速很高、旋转精度要求也很高的机构。例如精密坐标镗床的主轴轴承、高精度仪器仪表的主要轴承等。

2.4.2　滚动轴承内外径公差带及其特点

（1）滚动轴承内外径公差带

滚动轴承是标准部件，为了便于组织专业化生产和便于互换，国家标准规定：轴承外圈外径与壳体配合采用基轴制，外径公差带位于以公称外径 D 为零线的下方，与一般基轴制相同；轴承内圈内径与轴配合采用基孔制，内径公差带位于以公称内径 d 为零线的下方，这与一般基孔制规定不同，如图 6-53 所示。

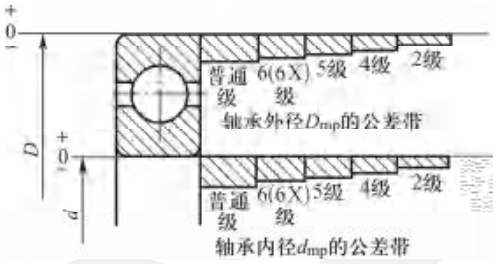


图 6-53　滚动轴承内外径公差带

（2）滚动轴承内外径公差带的特点

各级轴承的内、外径公差带的上偏差均为零，下偏差均为负值，呈现单向分布的特点。这主要是考虑到轴承与轴颈配合的特殊需要，当它与一般过渡配合的轴相配时，可以获得一定的过盈量，从而满足轴承内径与轴配合的需要，同时又可按标准偏差来加工轴。

2.4.3　滚动轴承与轴、壳体的配合及选用

（1）轴、壳体的尺寸公差带

GB/T 275 对与普通级轴承配合的轴颈规定了 17 种公差带，对外壳孔规定了 16 种公差带，如图 6-54 所示。

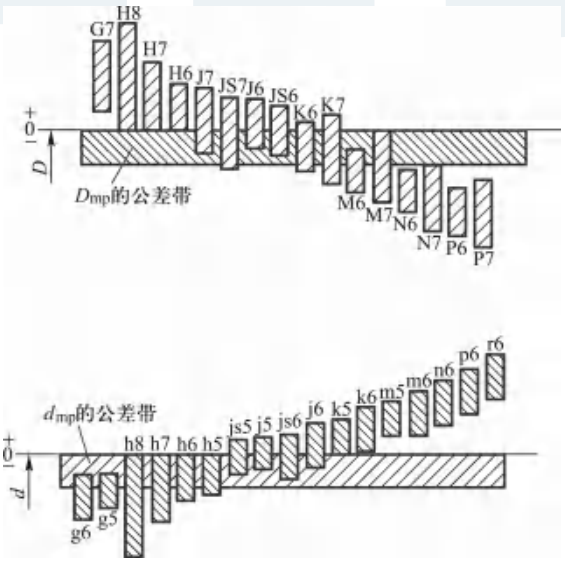


图 6-54　轴、壳体的尺寸公差带

(2) 轴承配合的选用

正确选择轴承的配合，对保证机器正常运转、提高轴承使用寿命、充分发挥其承载能力关系很大，选择时主要考虑下列因素：

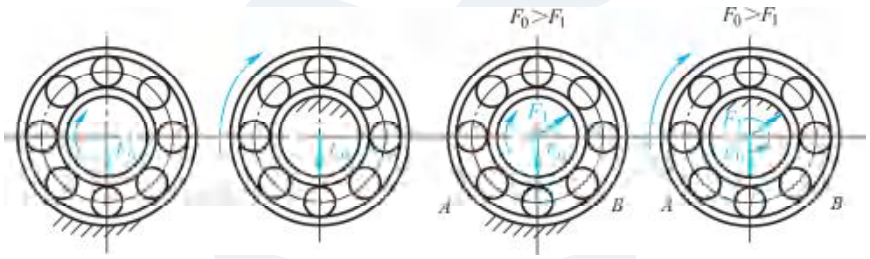
1) 轴承的工作条件

当轴承的内圈或外圈工作为旋转套圈时，应选用稍紧的配合，其过盈量大小应使配合面在工作载荷下不发生“爬行”现象。

当轴承的内圈或外圈工作为不旋转套圈时，为拆卸和调整方便，宜选用较松的配合。

2) 负荷类型

轴承转动时，根据作用于轴承上合成径向载荷相对套圈的旋转情况，可将所受载荷分为局部载荷、循环载荷和摆动载荷三类，如图 6-55 所示。



(a) 内圈：旋转载荷　外圈：定向载荷　(b) 内圈：定向载荷　外圈：旋转载荷　(c) 内圈：旋转载荷　外圈：摆动载荷　(d) 内圈：摆动载荷　外圈：旋转载荷

图 6-55　轴承套圈承受载荷的类型

局部载荷　也称定向载荷，作用于轴承上的载荷方向始终不变地作用在套圈滚道的局部区域上，如图 6-56a、图 6-56b 所示。承受局部载荷的套圈与壳体孔、轴的配合，一般选较松的过渡配合或较小的间隙配合，目的是套圈在振动或冲击下产生缓慢转位，使磨损均匀以延长轴承使用寿命。

循环载荷　也称旋转载荷，作用于轴承上的合成径向载荷顺次地作用在套圈滚道的整个圆周上，如图 6-56a、图 6-56b、图 6-56c 所示。承受循环负荷的套圈与壳体孔、轴的配合，选用过盈配合或较紧的过渡配合，目的是防止打滑即产生“爬行”现象。

摆动载荷　作用于轴承上的合成径向载荷与所承受的套圈在一定区域内相对摆动，如图 6-56c、图 6-56d 所示。承受摆动负荷的套圈与壳体孔、轴的配合，选用过盈配合或较紧的过渡配合，也可稍松些。

3) 负荷大小

一般把径向载荷 $P_r \leqslant 0.06C_r$ 的载荷称为轻载荷；$0.06C_r < P_r \leqslant 0.12C_r$ 的载荷称为正常载荷；$P_r > 0.15C_r$ 的载荷称为重载荷。其中 C_r 为轴承的径向额定动负荷——轴承能够旋转 10^6 次而不发生点蚀破坏的概率为 90%时的载荷值。

4) 其他因素

选用轴承配合时，其他因素有工作温度、旋转精度和速度、重型机械用的大型或特大型轴

承等，其配合类型的选择可用类比法酌情处理。

轴承配合的选用，参照表 6-17、表 6-18、表 6-19、表 6-20。

表 6-17　向心轴承和轴的配合　轴公差带代号(摘自 GB/T 275)

圆柱孔轴承						
运转状态		负荷状态	深沟球轴承、调心轴承和角接触球轴承	圆柱滚子轴承和圆锥滚子轴承	调心滚子轴承	公差带
说明	举例		轴承公称内径/mm			
旋转的内圈负荷及摆动载荷	一般通用机械、电机、机床主轴、泵、内燃机、直齿轮传动装置、铁路机车车辆轴箱、破碎机等	轻载荷	≤18 >18～100 >100～200	≤40 >40～140 >140～200	≤40 >40～100 >100～200	h5、j6① k6② m6②
		正常载荷	≤18 >18～100 >100～140 >140～200 >200～280 — —	— ≤40 >40～100 >100～140 >140～200 >200～400 —	— ≤40 >40～65 >65～100 >100～140 >140～280 >280～500	j5、js5 k5② m5② m6 n6 p6 r6
		重载荷		>50～140 >140～200 >200	>50～100 >100～140 >140～200 >200	n6 p6④ r6 r7
固定的内圈载荷	静止轴上的各种轮子，张紧轮绳、轮、振动箱、惯性振动器	所有载荷	所有尺寸			f6 g6④ h6 j6
仅有轴向载荷			所有尺寸			j6、js6
圆锥孔轴承						
所有负荷	铁路机车车辆轴箱		装在退卸套上的所有尺寸			h8(IT6)③⑤
	一般机械传动		装在紧定套上的所有尺寸			h9(IT7)⑤

注：① 凡对精度有较高要求的场合，应用 j5、k5、……代替 j6、k6、……

② 圆锥滚子轴承、角接触球轴承配合对游隙影响不大。可用 k6、m6 代替 k5、m5。

③ 凡有较高精度或转速要求的场合，应选用 h7(IT5)代替 h8(IT6)等。

④ 重载荷下轴承游隙应选大于 0 组。

⑤ IT6、IT7 表示圆柱度公差数值。

表 6-18　向心轴承和外壳的配合　孔公差带代号(摘自 GB/T 275)

运转状态		载荷状态	其他状况	公差带①	
说　明	举　例			球轴承	滚子轴承
固定的外圈载荷	一般机械、铁路机车车辆轴箱、电机、泵、曲轴主轴承	轻、正常、重	轴向易移动，可采用剖分式外壳	H7、G7②	
摆动载荷		冲击	轴向能移动，可采用整体或剖分式外壳	J7、JS7	
		轻、正常			
		正常、重	轴向不移动，采用整体式外壳	K7	
		冲击		M7	
旋转的外圈载荷	张紧滑轮、轮载轴承	轻		J7	K7
		正常		K7、M7	M7、N7
		重		—	N7、P7

注：① 并列公差带随尺寸的增大从左至右选择，对旋转精度有较高要求时，可相应提高一个公差等级。
② 不适用于剖分式外壳。

表 6-19　推力轴承和轴的配合　轴公差带代号

运载状态	载荷状态	推力球轴承和推力滚子轴承	推力调心滚子轴承①	公差带
		轴承公称内径/mm		
仅有轴向负荷		所有尺寸		j6、js6
固定的轴圈载荷	径向和轴向联合载荷	—	≤250 >250	j6 js6
旋转的轴圈载荷或摆动载荷		— —	≤200 >200～400 >400	k6② m6 n6

注：① 也包括推力圆锥滚子轴承、推力角接触球轴承。
② 要求较小过盈时，可用 j6、k6、m6 分别代替 k6、m6、n6。

表 6-20　推力轴承和外壳的配合　孔公差带代号

运载状态	负荷状态	轴承类型	公差带	备注
仅有轴向载荷		推力球轴承	H8	
		推力圆柱、圆锥滚子轴承	H7	
		推力调心滚子轴承	—	外壳孔与座圈间间隙为 0.001D(D 为轴承公称外径)
固定的轴圈载荷	径向和轴向联合载荷	推力角接触球轴承 推力调心滚子轴承 推力圆锥滚子轴承	H7	
旋转的轴圈载荷或摆动载荷			K7	普通使用条件
			M7	有较大径向载荷时

（3）配合表面的几何公差和表面粗糙度

为了保证轴承正常工作，除了正确选择配合之外，还应对与轴承配合的轴和轴承座孔的几何公差和表面粗糙度提出要求，见表 6-21、表 6-22。

表 6-21　轴和外壳孔的几何公差值（摘自 GB/T 275）

公称尺寸/mm	圆柱度 t/μm								端面圆跳动 t_1/μm							
	轴颈				外壳孔				轴肩				外壳孔肩			
	轴承公差等级															
	0	6(6X)	5	4	0	6(6X)	5	4	0	6(6X)	5	4	0	6(6X)	5	4
≤6	2.5	1.5	1.0	0.6	4	2.5	1.5	1.0	5	3	2.0	1.2	8	5	3	2.0
>6～10	2.5	1.5	1.0	0.6	4	2.5	1.5	1.0	6	4	2.5	1.5	10	6	4	2.5
>10～18	3.0	2.0	1.2	0.8	5	3.0	2.0	1.2	8	5	3.0	2.0	12	8	5	3.0
>18～30	4.0	2.5	1.5	1.0	6	4.0	2.5	1.5	10	6	4.0	2.5	15	10	6	4.0
>30～50	4.0	2.5	1.5	1.0	7	4.0	2.5	1.5	12	8	5.0	3.0	20	12	8	5.0
>50～80	5.0	3.0	2.0	1.2	8	5.0	3.0	2.0	15	10	6.0	4.0	25	15	10	6.0
>80～120	6.0	4.0	2.5	1.5	10	6.0	4.0	2.5	15	10	6.0	4.0	25	15	10	6.0
>120～180	8.0	5.0	3.5	2.0	12	8.0	5.0	3.5	20	12	8.0	5.0	30	20	12	8.0
>180～250	10.0	7.0	4.5	3.0	14	10.0	7.0	4.5	20	12	8.0	5.0	30	20	12	8.0
>250～315	12.0	8.0	6.0	4.0	16	12.0	8.0	6.0	25	15	10.0	6.0	40	25	15	10.0
>315～400	13.0	9.0	7.0	5.0	18	13.0	9.0	7.0	25	15	10.0	6.0	40	25	15	10.0
>400～500	15.0	10.0	8.0	6.0	20	15.0	10.0	8.0	25	15	10.0	6.0	40	25	15	10.0

表 6-22　轴颈与外壳孔的表面粗糙度（摘自 GB/T 275）　μm

公称尺寸/mm	轴或外壳配合表面直径公差等级								
	IT5			IT6			IT7		
	表面粗糙度								
	Rz	Ra		Rz	Ra		Rz	Ra	
		磨	车		磨	车		磨	车
≤80	4	0.4	0.8	6.3	0.8	0.8	10	1.6	3.2
>80～500	6.3	0.8	1.6	10	1.6	1.6	16	1.6	3.2
端面	10	1.6	3.2	25	3.2	6.3	25	3.2	6.3

能力训练指导

能力训练：滚动轴承配合的标注。

训练指导：

1）装配图的标注　在装配图上，轴承座孔与滚动轴承外圈外径的配合，只标注轴承座孔

的公差带代号；轴颈与滚动轴承内圈内径的配合，只标注轴颈的公差带代号，如图 6-56 所示。

2）零件图的标注　标注时注意与装配图的对应关系，如图 6-57 所示。

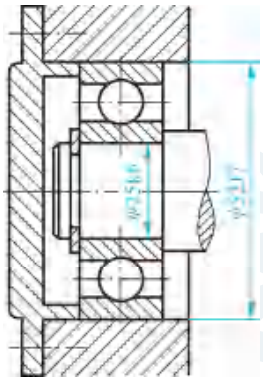


图 6-56　轴颈和轴承座孔公差带在装配图上的标注

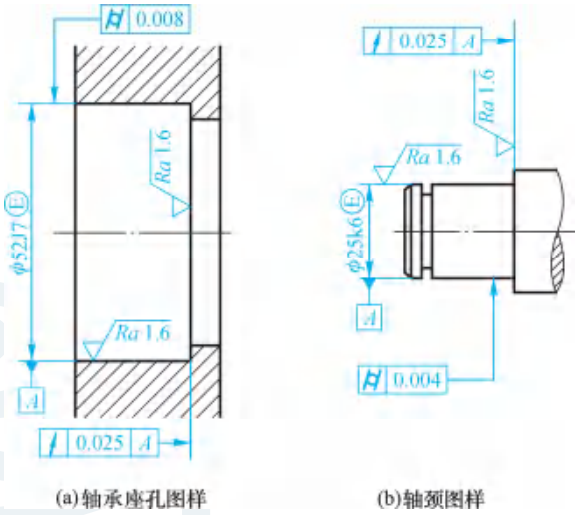


图 6-57　滚动轴承配合要求在零件图上的标注

能力训练任务

能力训练任务：图 6-58 为直齿圆柱齿轮减速器输出轴轴颈部分的装配图，已知该减速器的功率为 5 kW，从动轴转速为 83 r/min，两端的轴承为代号 6211 的深沟球轴承，内径 $d=55$ mm，外径 $D=100$ mm。试确定轴颈和轴承座孔的公差代号、几何公差、采用的公差原则及表面粗糙度轮廓参数值，并将其标注在装配图和零件图上。

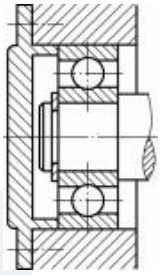


图 6-58　轴颈部分的装配图

任务 3　渐开线圆柱齿轮的精度与检测

理论知识要点

3.1　齿轮传动的使用要求及齿轮的基本参数

3.1.1　齿轮传动的使用要求

齿轮传动是应用最广泛的传动机构之一，其主要功能是传递运动、动力和精密分度等。在

不同的机械中，齿轮传动的使用要求主要包括以下几个方面：

① 传递运动的准确性。要求齿轮在一转范围内传动比的变化尽量小，以保证从动轮与主动轮的运动协调，即主动轮转过角度 φ_1 时，从动轮转过相应角度 $\varphi_2=i\varphi_1$。但由于齿轮的制造和安装存在误差，导致传动比 i 变化，引起转角误差和传递运动不准确。

② 传递运动的平稳性。要求齿轮在转过一个齿的范围内，瞬时传动比的变化尽量小，以保证传动平稳，降低冲击，减小振动和噪声。

③ 载荷分布的均匀性。要求啮合时齿轮工作齿面接触良好，载荷分布均匀，避免造成局部齿面的过度磨损和折齿，提高齿轮的使用寿命。

④ 齿侧间隙的合理性。要求啮合时齿轮非工作齿面应留有一定的侧隙，用以储存润滑油和补偿齿轮的制造误差、安装误差和热变形，防止齿轮工作过程中卡死或齿面烧伤。间隙过大会在启动和反转时引起冲击，造成回程误差，所以侧隙的选择应在一个合理的范围内。

不同工作条件下、不同用途的齿轮，对其使用要求的侧重点是不同的：

① 对控制系统、读数装置和分度机构的齿轮，主要要求其传递运动的准确性，同时对需要正反转的齿轮，要求有较小的间隙。

② 对低速重载齿轮（如起重机械、重型机械），主要要求其载荷分布的均匀性。

③ 对高速重载齿轮（如汽轮机减速器齿轮），主要对其传递运动的准确性、平稳性和载荷分布的均匀性都有较高要求，同时还要求有较大的间隙，以满足润滑的需要。

④ 对一般汽车、拖拉机和机床的变速齿轮，主要要求其传递运动的平稳性。

3.1.2　齿轮的基本参数

渐开线齿轮的基本参数为齿数 z、模数 $m(d=mz)$、压力角 α、齿顶高系数 h_a^*、顶隙系数 c^*。正常齿制：$h_a^*=1$，$c^*=0.25$；短齿制：$h_a^*=0.8$，$c^*=0.3$。

3.2　单个齿轮的精度指标

国家标准 GB/T 10095 中将齿轮的误差和偏差统称为齿轮偏差，将偏差和偏差的公差（或极限偏差）共用一个符号表示，单项要素偏差符号用小写字母，多项要素偏差组成的“总”偏差或“累积”用大写字母。

3.2.1　轮齿同侧齿面偏差

轮齿同侧齿面偏差共有 11 个检测项目，即齿距偏差（f_{pt}、F_{pk}、F_p）、齿廓偏差（F_α、$f_{f\alpha}$、$f_{H\alpha}$）、切向综合偏差（F_i'、f_i'）、螺旋线偏差（F_β、$f_{f\beta}$、$f_{H\beta}$），其中 F_{pk}、$f_{f\alpha}$、$f_{H\alpha}$、F_i'、f_i'、$f_{f\beta}$、$f_{H\beta}$等 7 个不是必检项目。

1）齿距偏差　分为单个齿距偏差 f_{pt}、齿距累积偏差 F_{pk}和齿距累积总偏差 F_p。

① 单个齿距偏差 f_{pt}　是指在端平面内接近齿高中部的一个与齿轮轴线同心的圆上，实际齿距与理论齿距的代数差，分为 $\pm f_{pt}$，如图 6-59 所示。f_{pt}可造成主动齿与被动齿发生冲

撞，从而影响齿轮传动的平稳性，GB/T 10095.1 给出了单个齿距偏差的允许值$\pm f_{pt}$。

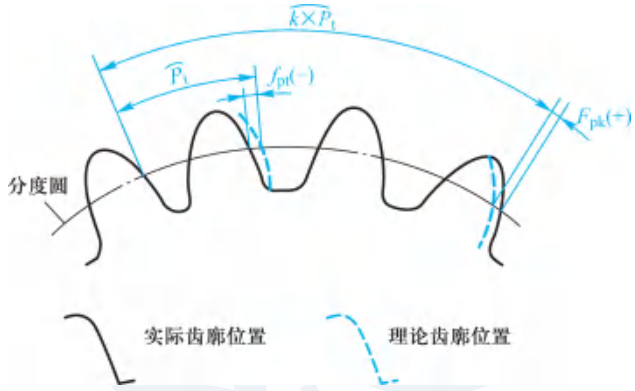


图 6-59　单个齿距偏差 f_{pt} 和 k 个齿距累积偏差 F_{pk}

② 齿距累积偏差 F_{pk}　是指任意 k 个齿距的实际弧长与理论弧长的代数差，如图 6-59 所示。F_{pk}的允许值适用于齿距 k 为 2～$z/8$ 的弧段内。F_{pk}过大，将产生振动和噪声，从而影响齿轮传动的平稳性。

③ 齿距累积总偏差 F_p　是指齿轮同侧齿面任意弧段内的最大齿距累积偏差，如图 6-60 所示。F_p 主要影响运动准确性，即运动精度。GB/T 10095.1 给出了齿距累积总偏差 F_p 允许值。

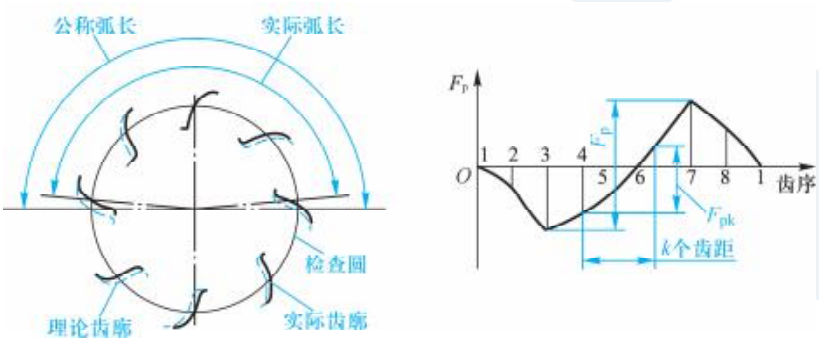


图 6-60　齿距累积总偏差 F_p

微视频

齿距误差测量

2）齿廓偏差　是指实际齿廓与设计齿廓的偏离量，该偏离量在端平面内且垂直于渐开线齿廓的方向计值。

① 齿廓总偏差 F_α　是指在计值范围(L_α)内，包容实际齿廓迹线的两条设计齿廓迹线间的距离，如图 6-61 所示 。L_α 约占齿廓有效长度的 92%，即从齿顶倒棱或倒圆的起始点 A 延伸到与之配对齿轮或基本齿条相啮合的有效齿廓的起始点 B 之间的长度。F_α 存在，则齿轮的齿廓不是标准的渐开线，不能保证瞬时传动比为常

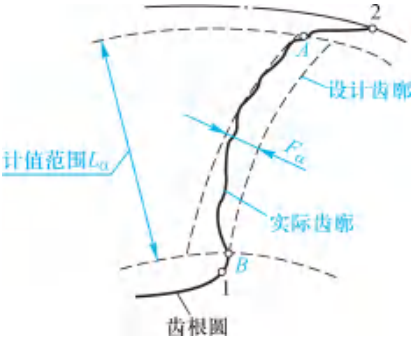


图 6-61　齿廓及齿廓总偏差 F_α

数，容易产生振动与噪声，影响齿轮传动平稳性。

国家标准把齿廓总偏差 F_α 细分为齿廓形状偏差 $f_{f\alpha}$ 和齿廓倾斜偏差 $f_{H\alpha}$。标准规定 $f_{f\alpha}$ 和 $f_{H\alpha}$ 不是必检项目。

② 齿廓形状偏差 $f_{f\alpha}$　是指在计值范围(L_α)内，包容实际齿廓迹线的两条与平均齿廓迹线完全相同的曲线间的距离，且两条曲线与平均齿廓迹线的距离为常数，如图 6-62a 所示。

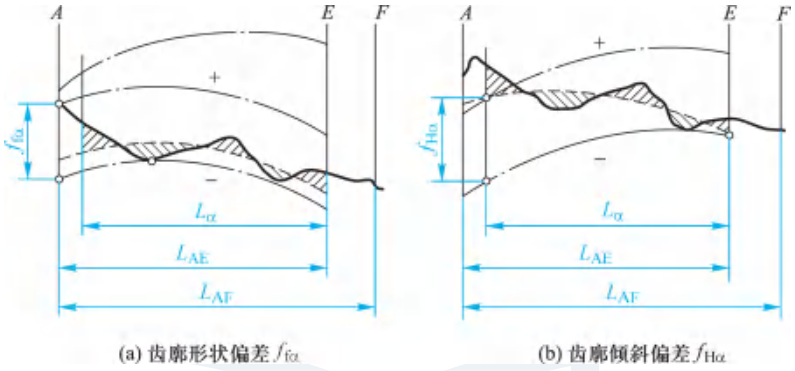


图 6-62　齿廓形状偏差及倾斜偏差

③ 齿廓倾斜偏差 $f_{H\alpha}$　是指在计值范围(L_α)内，两端与平均齿廓迹线相交的两条设计齿廓迹线间的距离，如图 6-63b 所示。

3）切向综合偏差(F_i'、f_i')

① 切向综合总偏差 F_i'　是指被测齿轮与测量齿轮单面啮合检验时，在被测齿轮一转内，齿轮分度圆上实际圆周位移与理论圆周位移的最大差值，以分度圆弧长计，如图 6-63 所示。

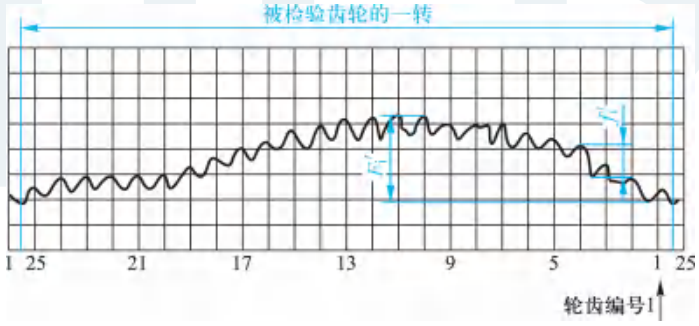


图 6-63　切向综合总偏差 F_i' 与一齿切向综合偏差 f_i'

② 一齿切向综合偏差 f_i'　是指被测齿轮与测量齿轮单面啮合检验时，在被测齿轮一个齿距角内，齿轮分度圆上实际圆周位移与理论圆周位移的最大差值，以分度圆弧长计，如图 6-63 所示。

F_i' 和 f_i' 分别影响运动的准确性和平稳性，是齿距、齿廓等偏差的综合反映，可以用它们来代替齿距、齿廓偏差。标准规定 F_i'、f_i' 不是必检项目。

4）螺旋线偏差　是指在端面基圆切线方向测得的实际螺旋线偏离设计螺旋线的量。它主要影响齿轮传动的承载能力。

螺旋线偏差包括螺旋线总偏差 F_β、螺旋线形状偏差 $f_{f\beta}$ 和螺旋线倾斜偏差 $f_{H\beta}$。标准规定 $f_{f\beta}$ 和 $f_{H\beta}$ 不是必检项目，如图 6-64 所示。

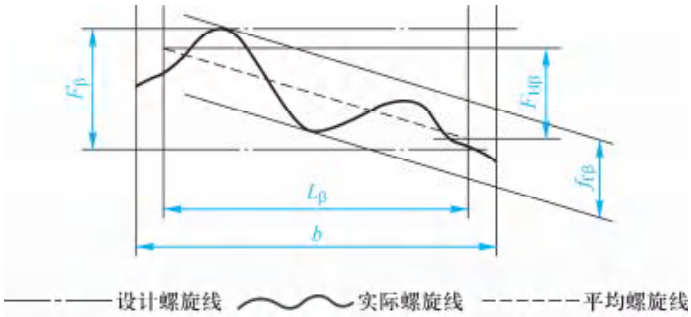


图 6-64　螺旋线总偏差、螺旋线形状偏差和螺旋线倾斜偏差

① 螺旋线总偏差 F_β　是指在计值范围(L_β)内，包容实际螺旋线迹线的两条设计螺旋线间的距离。L_β 等于齿宽 b 的两端各减去齿宽的 5%或一个模数的长度。

② 螺旋线形状偏差 $f_{f\beta}$　是指在计值范围内，包容实际螺旋线迹线的两条与平均螺旋线迹线完全相同的曲线间的距离，且两条曲线与平均螺旋线迹线的距离为常数。

③ 螺旋线倾斜偏差 $f_{H\beta}$　是指在计值范围内，两端与平均螺旋线迹线相交的设计螺旋线迹线间距离。

3.2.2　径向综合偏差和径向跳动

在大批量生产中，F_i''、f_i''、F_r 常作为辅助检测项目。

1）径向综合偏差　分为径向综合总偏差 F_i''、一齿径向综合偏差 f_i''，如图 6-65 所示。

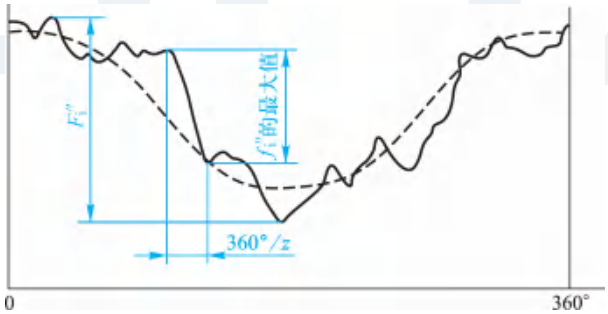


图 6-65　径向综合偏差

① 径向综合总偏差 F_i''　是指在齿轮径向(双面)综合检验时，被测齿轮的左右齿面同时与测量齿轮接触，并转过一整圈时(即转过 360°)出现的中心距最大值与最小值之差，如图 6-65 所示。它主要影响运动的准确性。

② 一齿径向综合偏差 f_i''　是指被测齿轮与测量齿轮啮合一整圈时，对应一个齿距(360°/z)的径向综合偏差值。它主要影响运动平稳性。

2）齿轮径向跳动 F_r　是指测头(球形、圆柱形或砧形)相继置于齿槽内时，从它到齿轮轴

线的最大和最小径向距离之差，如图 6-66 所示。

微视频

齿轮径向跳动误差检测

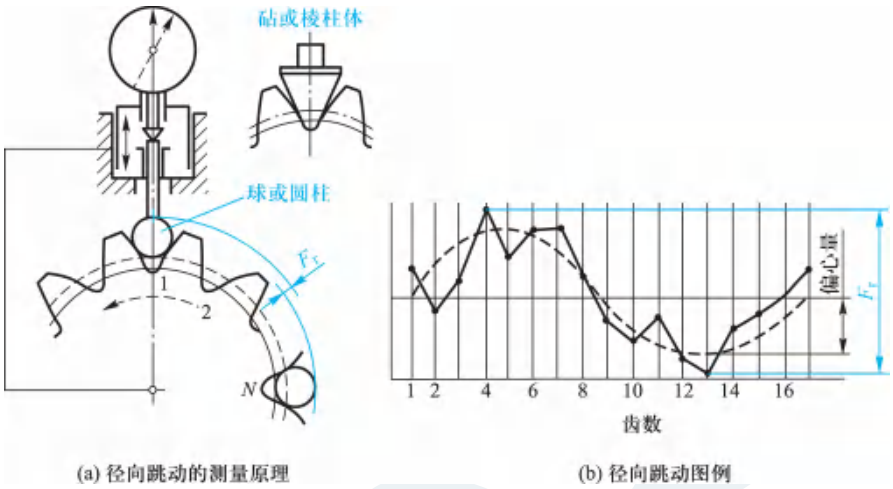


图 6-66　齿轮径向跳动

F_r 与径向综合总偏差 F_i'' 的性质相似，若检测了 F_i''，就不用再检测 F_r。

3.2.3　齿厚偏差

齿厚偏差是指分度圆柱面上实际齿厚与设计齿厚之差。齿厚偏差是评价齿侧间隙的一项指标，如图 6-67 所示。

微视频

齿轮的齿厚偏差测量

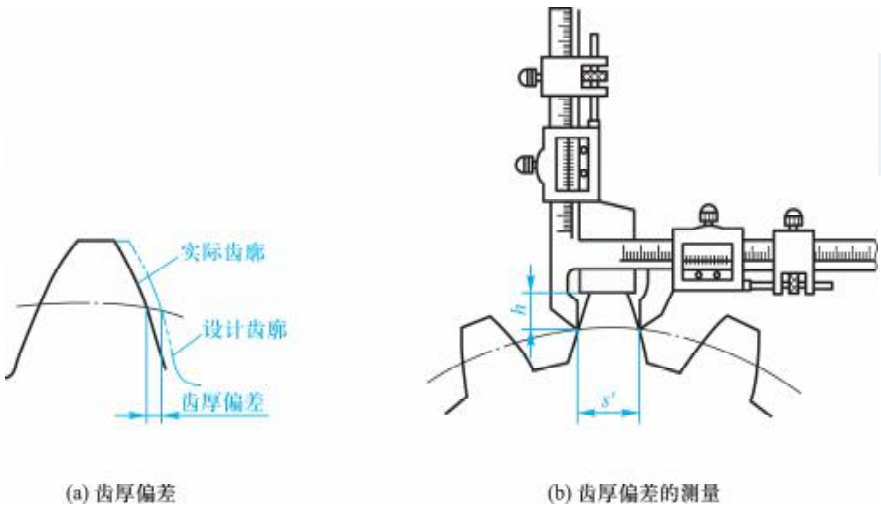


图 6-67　齿厚偏差及其测量

综上所述，对于单个齿轮，其必检项目为 5 个：单个齿距偏差 f_{pt}、齿距累积总偏差 F_p、齿廓总偏差 F_α、螺旋线总偏差 F_β、齿厚偏差。这些必检项目以及径向综合总公差 F_i''、一齿径向综合公差 f_i'' 和径向跳动公差 F_r 的偏差允许值，见表 6-23—表 6-29。

表 6-23　渐开线圆柱齿轮单个齿距偏差的允许值±f_{pt}　μm

分度圆直径 d/mm	模数 m/mm	精度等级				
		5	6	7	8	9
5～20	0.5～2	4.7	6.5	9.5	13.0	19.0
	>2～3.5	5.0	7.5	10.0	15.0	21.0
>20～50	0.5～2	5.0	7.0	10.0	14.0	20.0
	>2～3.5	5.5	7.5	11.0	15.0	22.0
	>3.5～6	6.0	8.5	12.0	17.0	24.0
	>6～10	7.0	10.0	14.0	20.0	28.0
>50～125	0.5～2	5.5	7.5	11.0	15.0	21.0
	>2～3.5	6.0	8.5	12.0	17.0	23.0
	>3.5～6	6.5	9.0	13.0	18.0	26.0
	>6～10	7.5	10.0	15.0	21.0	30.0
>125～280	0.5～2	6.0	8.5	12.0	17.0	24.0
	>2～3.5	6.5	9.0	13.0	18.0	26.0
	>3.5～6	7.0	10.0	14.0	20.0	28.0
	>6～10	8.0	11.0	16.0	23.0	32.0
>280～560	0.5～2	6.5	9.5	13.0	19.0	27.0
	>2～3.5	7.0	10.0	14.0	20.0	29.0
	>3.5～6	8.0	11.0	16.0	22.0	31.0
	>6～10	8.5	12.0	17.0	25.0	35.0

表 6-24　渐开线圆柱齿轮齿距累积总偏差的允许值 F_p　μm

分度圆直径 d/mm	模数 m/mm	精度等级				
		5	6	7	8	9
5～20	0.5～2	11.0	16.0	23.0	32.0	45.0
	>2～3.5	12.0	17.0	23.0	33.0	47.0
>20～50	0.5～2	14.0	20.0	29.0	41.0	57.0
	>2～3.5	15.0	21.0	30.0	42.0	59.0
	>3.5～6	15.0	22.0	31.0	44.0	62.0
	>6～10	16.0	23.0	33.0	46.0	65.0
>50～125	0.5～2	18.0	26.0	37.0	52.0	74.0
	>2～3.5	19.0	27.0	38.0	53.0	76.0
	>3.5～6	19.0	28.0	39.0	55.0	78.0
	>6～10	20.0	29.0	41.0	58.0	82.0
>125～280	0.5～2	24.0	35.0	49.0	69.0	98.0
	>2～3.5	25.0	35.0	50.0	70.0	100.0
	>3.5～6	25.0	36.0	51.0	72.0	102.0
	>6～10	26.0	37.0	53.0	75.0	106.0
>280～560	0.5～2	32.0	46.0	64.0	91.0	129.0
	>2～3.5	33.0	46.0	65.0	92.0	131.0
	>3.5～6	33.0	47.0	66.0	94.0	133.0
	>6～10	34.0	48.0	68.0	97.0	137.0

表 6-25　渐开线圆柱齿轮的齿廓总偏差 F_α 的允许值　　μm

分度圆直径 d/mm	模数 m/mm	精度等级				
		5	6	7	8	9
5～20	0.5～2	4.6	6.5	9.0	13.0	18.0
	>2～3.5	6.5	9.5	13.0	19.0	26.0
>20～50	0.5～2	5.0	7.5	10.0	15.0	21.0
	>2～3.5	7.0	10.0	14.0	20.0	29.0
	>3.5～6	9.0	12.0	18.0	25.0	35.0
	>6～10	11.0	15.0	22.0	31.0	43.0
>50～125	0.5～2	6.0	8.5	12.0	17.0	23.0
	>2～3.5	8.0	11.0	16.0	22.0	31.0
	>3.5～6	9.5	13.0	19.0	27.0	38.0
	>6～10	12.0	16.0	23.0	33.0	46.0
>125～280	0.5～2	7.0	10.0	14.0	20.0	28.0
	>2～3.5	9.0	13.0	18.0	25.0	36.0
	>3.5～6	11.0	15.0	21.0	30.0	42.0
	>6～10	13.0	18.0	25.0	36.0	50.0
>280～560	0.5～2	8.5	12.0	17.0	23.0	33.0
	>2～3.5	10.0	15.0	21.0	29.0	41.0
	>3.5～6	12.0	17.0	24.0	34.0	48.0
	>6～10	14.0	20.0	28.0	40.0	56.0

表 6-26　螺旋线总公差 F_β

分度圆直径 d/mm	齿宽 b/mm	精度等级				
		5	6	7	8	9
		F_β/μm				
>20～50	>10～20	7.0	10.0	14.0	20.0	29.0
	>20～40	8.0	11.0	16.0	23.0	32.0
>50～125	>10～20	7.5	11.0	15.0	21.0	30.0
	>20～40	8.5	12.0	17.0	24.0	34.0
	>40～80	10.0	14.0	20.0	28.0	39.0
>125～280	>10～20	8.0	11.0	16.0	22.0	32.0
	>20～40	9.0	13.0	18.0	25.0	36.0
	>40～80	10.0	15.0	21.0	29.0	41.0
>280～560	>20～40	9.5	13.0	19.0	27.0	38.0
	>40～80	11.0	15.0	22.0	31.0	44.0
	>80～160	13.0	18.0	26.0	36.0	52.0

表 6-27　径向综合总公差 F_i''

分度圆直径 d/mm	法向模数 m_n/mm	精度等级				
		5	6	7	8	9
		F_i''/μm				
>20～50	>1.0～1.5	16	23	32	45	64
	>1.5～2.5	18	26	37	52	73
>50～125	>1.0～1.5	19	27	39	55	77
	>1.5～2.5	22	31	43	61	86
	>2.5～4.0	25	36	51	72	102
>125～280	>1.0～1.5	24	34	48	68	97
	>1.5～2.5	26	37	53	75	106
	>2.5～4.0	30	43	61	86	121
	>4.0～6.0	36	51	72	102	144
>280～560	>1.0～1.5	30	43	61	86	122
	>1.5～2.5	33	46	65	92	131
	>2.5～4.0	37	52	73	104	146
	>4.0～6.0	42	60	84	119	169

表 6-28　一齿径向综合公差 f_i''

分度圆直径 d/mm	法向模数 m_n/mm	精度等级				
		5	6	7	8	9
		f_i''/μm				
>20～50	>1.0～1.5	4.5	6.5	9.0	13	18
	>1.5～2.5	6.5	9.5	13	19	26
>50～125	>1.0～1.5	4.5	6.5	9.0	13	18
	>1.5～2.5	6.5	9.5	13	19	26
	>2.5～4.0	10	14	20	29	41
>125～280	>1.0～1.5	4.5	6.5	9.0	13	18
	>1.5～2.5	6.5	9.5	13	19	27
	>2.5～4.0	10	15	21	29	41
	>4.0～6.0	15	22	31	44	62
>280～560	>1.0～1.5	4.5	6.5	9.0	13	18
	>1.5～2.5	6.5	9.5	13	19	27
	>2.5～4.0	10	15	21	29	41
	>4.0～6.0	15	22	31	44	62

表 6-29　径向跳动公差 F_r

分度圆直径 d/mm	法向模数 m_n/mm	精度等级				
		5	6	7	8	9
		F_r/μm				
>20～50	>2.0～3.5	12	17	24	34	47
	>3.5～6.0	12	17	25	35	49
>50～125	>2.0～3.5	15	21	30	43	61
	>3.5～6.0	16	22	31	44	62
	>6.0～10	16	23	33	46	65
>125～280	>2.0～3.5	20	28	40	56	80
	>3.5～6.0	20	29	41	58	82
	>6.0～10	21	30	42	60	85
>280～560	>2.0～3.5	26	37	52	74	105
	>3.5～6.0	27	38	53	75	106
	>6.0～10	27	39	55	77	109

3.3　齿轮副的安装精度与侧隙

为了满足两个齿轮啮合传动的性能要求，除控制单个齿轮的精度外，还须控制齿轮副的安装精度及齿轮配合的侧隙大小。

3.3.1　齿轮副的安装精度

（1）中心距极限偏差±f_a

±f_a 是指在齿轮副的齿宽中间平面内，实际中心距与公称中心距之差。它主要影响齿轮副侧隙。中心距极限偏差±f_a 见表 6-30。

表 6-30　中心距极限偏差±f_a　　μm

中心距 a/mm	齿轮精度等级	
	5、6	7、8
⩾6～10	7.5	11
>10～18	9	13.5
>18～30	10.5	16.5
>30～50	12.5	19.5
>50～80	15	23
>80～120	17.5	27
>120～180	20	31.5
>180～250	23	36
>250～315	26	40.5
>315～400	28.5	44.5
>400～500	31.5	48.5

（2）轴线平行度偏差 $f_{\Sigma\delta}$、$f_{\Sigma\beta}$

“轴线平面内的偏差”$f_{\Sigma\delta}$是指一对齿轮的轴线在轴线平面内的平行度偏差，如图 6-68 所示。

“垂直平面上的偏差”$f_{\Sigma\beta}$是指一对齿轮的轴线在垂直平面内的平行度偏差，如图 6-68 所示。

$f_{\Sigma\delta}$和 $f_{\Sigma\beta}$主要影响齿轮副的侧隙和载荷分布均匀性，且 $f_{\Sigma\beta}$的影响更为敏感。其计算式为

$$f_{\Sigma\beta}=0.5\left(\frac{L}{b}\right)F_{\beta} \tag{6-8}$$

$$f_{\Sigma\delta}=2f_{\Sigma\beta} \tag{6-9}$$

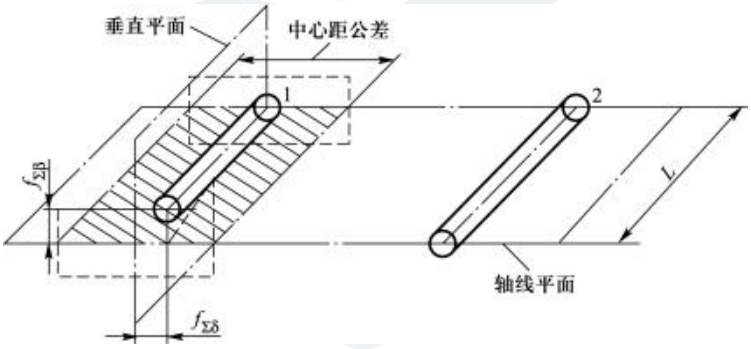


图 6-68　轴线的平行度偏差

（3）中心距偏差 f_a

中心距偏差 f_a 是指在齿轮副的齿宽中间平面内，实际中心距与公称中心距之差。它主要影响齿轮副的齿侧间隙，如图 6-69 所示。

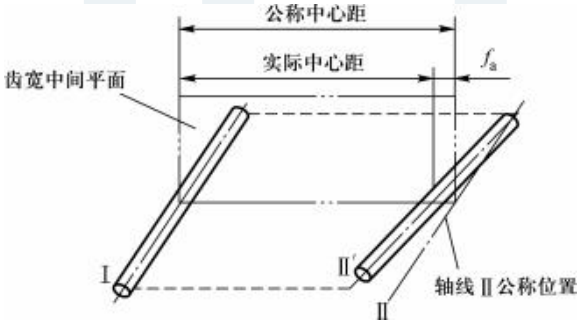


图 6-69　中心距偏差

3.3.2　齿轮副的配合

（1）侧隙

侧隙是指在节圆上齿槽宽度超过相啮齿轮齿厚的量。它可分为圆周侧隙 j_{wt}、法向侧隙

j_{bn}和径向侧隙 j_r。侧隙的大小主要取决于齿厚和中心距，与齿轮的精度等级无关。

确保齿轮副具有最小法向侧隙 j_{bnmin}的目的是能用 j_{bnmin}来补偿齿轮传动时温升所引起的变形并保证正常润滑。

最小法向侧隙 j_{bnmin}采用计算法，其计算式为

$$j_{bnmin}=\frac{2}{3}(0.06+0.0005a_i+0.03m_n) \tag{6-10}$$

中、大模数齿轮最小法向侧隙 j_{bnmin}的推荐数据见表 6-31。

表 6-31　中、大模数齿轮最小法向侧隙 j_{bnmin}的推荐数据　　mm

法向模数 m_n	最小中心距 a_i					
	50	100	200	400	800	1600
1.5	0.09	0.11	—	—	—	—
2	0.10	0.12	0.15	—	—	—
3	0.12	0.14	0.17	0.24	—	—
5	—	0.18	0.21	0.28	—	—
8	—	0.24	0.27	0.34	0.47	—
12	—	—	0.35	0.42	0.55	—
18	—	—	—	0.54	0.61	0.94

（2）公称齿厚、齿厚偏差和齿厚公差

计算时，齿厚是指公称齿厚 S_n。两个具有公称齿厚 S_n 的齿轮在公称中心距下啮合是无侧隙的。对于斜齿轮，是指法向齿厚 S_n；对于标准齿轮，是指公称齿厚 $S_n=\frac{\pi}{2}m$；对于变位齿轮，则有：对于外齿轮 $S_n=m_n\left(\frac{\pi}{2}+2x\tan\alpha_n\right)$，内齿轮 $S_n=m_n\left(\frac{\pi}{2}-2x\tan\alpha_n\right)$，$x$ 是齿轮变位系数。

在中心距不变的条件下，通过改变齿厚偏差可获得大小不同的齿侧间隙。为了获得最小侧隙 j_{bnmin}，齿厚应保证有最小的减薄量，标准规定齿厚的上极限偏差 E_{sns}；为了保证齿侧间隙不至过大，标准又规定齿厚公差 T_{sn}（及齿厚下极限偏差 E_{sni}）。

齿厚上极限偏差 E_{sns}主要取决于侧隙，其选择大体上与齿轮精度无关。齿厚上极限偏差 E_{sns}的确定方法有经验类比法、简易计算法和计算法。

由于实际齿轮的齿厚都是在公称齿厚的基础上，减薄一定的数值来获得齿侧间隙，故齿厚的上、下极限偏差都应取负值。

若大、小齿轮齿数相差不大，可取 E_{sns1}和 E_{sns2}相等，即

$$E_{sns1}=E_{sns2}=E_{sns}=-\frac{j_{bnmin}}{2\cos\alpha_n} \tag{6-11}$$

若大、小齿轮齿数相差较大，从强度匹配角度来讲，一般应使大齿轮的齿厚减薄量大一些，小齿轮的齿厚减薄量小一些。

齿厚公差 T_{sn} 由径向跳动公差 F_r 和切齿径向进刀公差 b_r 组成，与齿轮的精度等级无关，主要由制造设备来控制。其计算式为

$$T_{sn}=2\tan\alpha_n\cdot\sqrt{F_r^2+b_r^2} \tag{6-12}$$

切齿径向进刀公差见表 6-32。

表 6-32　切齿径向进刀公差

齿轮精度等级	3	4	5	6	7	8	9	10
b_r	IT7	1.26IT7	IT8	1.26IT8	IT9	1.26IT9	IT10	1.26IT10

注：IT 值按齿轮分度圆直径为主参数查表确定。

微视频

公法线长度测量

（3）公法线平均长度极限偏差 E_{bn}

公法线平均长度极限偏差是指齿轮一转内，公法线平均长度与公称长度之差。即

$$E_{bn}=\overline{W}_k-W_k$$

$\overline{W}_k$ 是在齿轮圆周上均匀地测出 k 个公法线长度值，求其平均值即得。W_k 通过计算可得。对标准直齿圆柱齿轮，公法线长度的公称值为

$$W_k=m\cos\alpha\left[\frac{(2k-1)\pi}{2}+z\,\mathrm{inv}\alpha\right] \tag{6-13}$$

其中，$k=\frac{\alpha}{180^\circ}+\frac{1}{2}$。

当 $\alpha=20^\circ$ 时，$W_k=m[1.476(2k-1)+0.014z]$　　(6-14)

其中，跨齿数 $k=\frac{z}{9}+0.5$。

公法线平均长度极限偏差分为上极限偏差 E_{bns} 和下极限偏差 E_{bni}。其计算式为

上极限偏差

$$E_{bns}=-E_{sns}\cos\alpha_n \tag{6-15}$$

下极限偏差

$$E_{bni}=-E_{sni}\cos\alpha_n \tag{6-16}$$

E_{bn} 的合格条件为：$E_{bns}\leqslant E_{bn}\leqslant E_{bni}$。

注：公法线平均长度极限偏差一般是负值，以便得到齿厚的减薄量，通常用检查公法线长度极限偏差来代替齿厚极限偏差。

3.4　齿坯精度、齿轮精度等级、齿轮精度的选择

3.4.1　齿坯精度

齿坯的尺寸偏差和几何误差直接影响齿轮的加工和检验。

内孔圆柱度公差取 $0.04(L/b)F_\beta$ 和 $0.1F_p$ 两者中的较小值(L 为轴承跨度)。

齿顶圆直径偏差对齿轮重合度及齿轮顶隙都有影响,其公差一般按 $\pm0.05m_n$ 给出。

齿坯尺寸公差见表 6-33,齿坯径向和端面圆跳动公差见表 6-34,齿面表面粗糙度推荐极限值见表 6-35,齿轮各基面的表面粗糙度(Ra)推荐值见表 6-36。

表 6-33　齿坯尺寸公差(供参考)　μm

分度圆直径 d/mm	齿轮精度等级			
	3～4	5～6	7～8	9～10
≤125	7	11	18	28
>125～400	9	14	22	36
>400～800	12	20	32	50
>800～1 600	18	28	45	71

表 6-34　齿坯径向和端面圆跳动公差　μm

分度圆直径 d/mm	齿轮精度等级			
	3～4	5～6	7～8	9～10
到 125	7	11	18	28
>125～400	9	14	22	36
>400～800	12	20	32	50
>800～1 600	18	28	45	71

表 6-35　齿面表面粗糙度推荐极限值(摘自 GB/Z 18620.4)　μm

齿轮精度等级	Ra		Rz	
	$m_n<6$	$6\leqslant m_n\leqslant25$	$m_n<6$	$6\leqslant m_n\leqslant25$
3	—	0.16	—	1.0
4	—	0.32	—	2.0
5	0.5	0.63	3.2	4.0
6	0.8	1.00	5.0	6.3
7	1.25	1.60	8.0	10
8	2.0	2.5	12.5	16
9	3.2	4.0	20	25
10	5.0	6.3	32	40

表 6-36　齿轮各基面的表面粗糙度(*Ra*)推荐值　　μm

项　　目	齿轮精度等级						
	5	6	7		8	9	
齿面加工方法	磨齿	磨或珩齿	剃或珩齿	精滚精插	插齿或滚齿	滚齿	铣齿
齿轮基准孔	0.32～0.63	1.25	1.25～2.5			5	
齿轮轴基准轴颈	0.32	0.63	1.25		2.5		
齿轮基准端面	1.25～2.5	2.5～5				3.2～5	
齿轮顶圆	1.25～2.5	3.2～5					

3.4.2　齿轮精度等级

目前，渐开线圆柱齿轮的精度标准主要由三项国家标准和四项国家标准化指导性文件组成。

1）轮齿同侧齿面的精度等级　GB/T 10095.1 对轮齿同侧齿面的 11 个项目规定了 13 个精度等级，即 0，1，2，…，12 级，其中 0 级最高，12 级最低。

2）径向综合偏差、径向跳动的精度等级　GB/T 10095.2 对径向综合偏差规定了 4，5，…，12 共 9 个精度等级，其中 4 级最高、12 级最低。GB/T 10095.2 对径向跳动规定了 13 个精度等级，即 0，1，2，…，12 级，其中 0 级最高，12 级最低。

确定齿轮精度等级时，主要依据齿轮的用途、使用要求和工作条件，工程中多采用类比法选择。

3.4.3　齿轮精度的选择

（1）公差组的选择

国家标准对 3 个公差组分别规定了一些检验组，见表 6-37 和表 6-38。实际工程中，应根据齿轮副的工作要求、检测条件和生产规模等，在各公差组中选定适当的检验组来评定和验收齿轮的精度。

表 6-37　各种用途齿轮的精度等级和检验指标

齿轮要求	测量分度齿轮	涡轮机用齿轮	航空、汽车、机床、牵引齿轮、拖拉机、起重机和一般机器等场合使用的齿轮			
精度等级	3～5	3～6	4～6	6～8	7～9	9～11
公差组Ⅰ	$F_i'(F_p)$	$F_i'(F_p)$	$F_p(F_i'')$	F_r 和 F_w (F_i'' 和 F_w)	F_r 和 F_w (F_i'' 和 F_w)	F_r
公差组Ⅱ	$f_i'(f_f$ 和 $f_{pb})$	$f_{p\beta}(f_i\Delta E_{sn})$	f_f 和 f_{pb} (f_f 和 f_{pt})	f_r 和 f_{pb} (f_i')	f_{pb} 和 f_{pt}	f_{pt}
公差组Ⅲ	F_p	F_{px} 和 f_r	接触斑点 (F_β)	接触斑点 (F_β)	接触斑点 (F_β)	接触斑点 (F_β)
齿轮副侧隙	E_{sns} 和 E_{sni} (E_{bns} 和 E_{bni})					

表 6-38　齿轮检验组适用的精度等级和测量器具

检验组	公差组			适用等级	计量器具
	Ⅰ	Ⅱ	Ⅲ		
1	F_i'	f_i'	F_β	3～8	单啮仪、齿轮万能测量机、齿轮仪
2	F_p	$f_{p\beta}$	F_{px}	3～6	齿距仪、波度仪、轴向齿轮仪
3	F_p	f_f、f_{pb}	F_β	3～7	齿距仪、齿形仪、齿向仪
4	F_p	f_{pt}、f_{pb}	F_β	3～7	齿距仪、基节仪、齿向仪
5	F_i'、F_w	f_i''	F_β	6～9	双啮仪、公法线卡尺、齿向仪
6	F_r、F_w	f_f、f_{pb}	F_β	6～8	跳动仪、公法线卡尺、齿形仪、基节仪、齿向仪
7	F_r、F_w	f_{pt}、f_{pb}	F_β	6～8	跳动仪、公法线卡尺、齿距仪、基节仪、齿向仪
8	F_r	f_{pt}	F_β	9～12	跳动仪、齿距仪、齿向仪

（2）精度项目的选择

主要考虑精度级别、项目间的协调、生产批量和检测费用等因素。

精度等级较高的齿轮，应选用同侧齿面的精度项目，如齿距偏差、齿廓偏差等；精度等级较低的齿轮，可选用径向综合偏差或径向跳动偏差等，见表 6-39 和表 6-40。

表 6-39　各类齿轮推荐选用的精度项目组合

用　　途		分度、读数	航空、汽车、机床		拖拉机、减速机、农用机械	涡轮机、轧钢机	
精度等级		3～5	4～6	6～8	7～12	3～6	6～8
功能要求	运动精度	F_i' 或 F_p	F_i' 或 F_p	F_i 或 F_i''	F_i 或 F_i''	F_p	
	传动平稳	f_i' 或 F_α 与 f_{pt}	f_i' 或 F_α 与 f_{pt}	f_i''	f_{pt}	F_α 与 f_{pt}	f_{pt}
	承载能力	F_β					

表 6-40　各精度项目组合的测量器具

精度项目			精度等级	测量仪器	应用说明
运动精度	传动平稳	承载能力			
F_i'	f_i'	F_β	3～6	万能齿轮测量机、齿向仪	属高、精仪器，反映误差真实、准确，并能分析单项误差，适用于精密、分度、读数、高速、测量等齿轮和齿轮刀具
			5～8	整体误差测量仪	能反映转角误差和轴向误差，也能分析单项误差，适用于机床、汽车等齿轮
			6～8	单面啮合仪、齿向仪	用测量齿轮作基准件，接近齿轮工作状态，反映转角真实误差，适用于大批量齿轮的测量，易于实现自动化

续　表

精度项目			精度等级	测量仪器	应用说明
运动精度	传动平稳	承载能力			
F_p	F_α 或 f_{pt}	F_β	3～7	半自动齿距仪、渐开线检查仪、齿向仪	精准度高，有助于齿轮机床调整，作工艺分析，适用于中高精度、磨削后的齿轮，宽斜、人字齿轮，还适用于剃、插齿刀的检测
F''_i	f''_i		6～9	双面啮合仪、齿向仪	接近加工状态，经济性好，适用于大量或成批生产的汽车、拖拉机齿轮
F_β	f_{pt}		7～9	万能测齿仪、齿向仪	适用于大尺寸齿轮或多齿数的滚切齿轮
F_α	F_α		5～7	跳动仪、齿形仪、齿向仪	精准度高，有助于齿轮机床调整，便于作工艺分析，适用于中高精度、磨削后的齿轮，宽斜、人字齿轮，还适用于剃、插齿刀的检测，以及滚齿、剃齿、插齿等加工出的齿轮
F_r	f_{pt}		8～12	跳动仪、齿距仪、齿向仪	适用于中、低精度齿轮，多齿数滚切齿轮，便于工艺分析

（3）精度等级的选择

精度等级选择的主要依据是齿轮的用途、使用要求和工作条件等。选择的方法主要有计算法和经验法（类比法），通常采用类比法。齿轮各项目参数的精度等级一般取成相同等级，特殊情况也可取成不同等级，见表 6-41。

表 6-41　一些机械采用的齿轮精度等级范围

应用范围	精度等级	应用范围	精度等级
单啮仪、双啮仪	2～5	载重汽车	6～9
汽轮机减速器	3～5	通用减速器	6～8
金属切削机床	3～8	轧钢机	5～10
航空发动机	4～7	矿用绞车	6～10
内燃机车、电气机车	5～8	起重机	6～9
轻型汽车	5～8	拖拉机	6～10

在机械传动中应用最多的是既传递运动又传递动力的齿轮，其精度等级与圆周速度密切相关。渐开线圆柱齿轮精度等级的适用范围与圆周速度见表 6-42。

表 6-42　渐开线圆柱齿轮精度等级的适用范围与圆周速度

精度等级	工作条件与应用范围	圆周速度/(m·s^{-1})	
		直齿	斜齿
4	用于特殊精密分度机构的齿轮；在速度极高、要求最平稳及无噪声情况下工作的齿轮；高速汽轮机的齿轮；检验 6～7 级精度齿轮的测量齿轮	<35	<70
5	用于精密分度机构的齿轮；在高速、要求高平稳性及无噪声情况下工作的齿轮；高速汽轮机的齿轮；检验 8～9 级精度齿轮的测量齿轮	<20	<40
6	用于高速情况下平稳工作，要求最高效率及无噪声的齿轮；航空制造业中有特殊要求的小齿轮，读数设备中特殊精密传动的齿轮	<15	<30
7	在增高了速度与适度功率或相反的情况下工作的齿轮；金属切削机床中的进给齿轮(要求运动协调)；具有一定速度的减速器中的齿轮，读数设备中的传动及具有一定速度的非直齿齿轮传动，航空制造业中的齿轮	<10	<15
8	一般机器制造业中，不要求特殊精度的齿轮，分度链以外的机床用齿轮；航空与汽车拖拉机制造业中不重要的小齿轮；起重机构的齿轮；农业机械中的小齿轮，普通减速器的齿轮	<6	<10
9	用于不提出精度要求的粗糙工作的齿轮，按照大载荷设计，且用于轻载的齿轮	<2	<4

能力训练指导

能力训练 1：齿轮在图样上的标注。

分析指导：

对于单个齿轮，其必检项目为 5 个：单个齿距偏差 f_{pt}、齿距累积总偏差 F_p、齿廓总偏差 F_α、螺旋线总偏差 F_β、齿厚偏差。在大批量生产中，F_i''、f_i''、F_r 常作为辅助检测项目。

(1) 齿轮精度等级的标注

1) 当齿轮的检验项目具有相同的精度等级时，图样上只标注该精度等级和标准号。

如 7GB/T 10095.1，表示检验项目精度(如单个齿距偏差 f_{pt}、齿距累积总偏差 F_p、齿廓总偏差 F_α、螺旋线总偏差 F_β)同为 7 级的齿轮。

2) 当齿轮各检验项目具有不同的精度等级时，图样上标注精度等级和标准号，但须在精度等级后用括弧加注检验项目。

如 8(F_p、f_{pt}、F_α)、7(F_β)GB/T 10095.1，表示齿距累积总偏差 F_p、单个齿距偏差 f_{pt}、齿廓总偏差 F_α 皆为 8 级，而螺旋线总偏差 F_β 为 7 级。

3) 齿轮的径向综合偏差要求为 5 级精度，可标注为 5(F_i'' 和 f_i'')GB/T 10095.2。

(2) 齿厚偏差常用标注方法

1) $S_{nE_{sni}}^{E_{sns}}$　其中 S_n 为法向公称齿厚，E_{sns} 为齿厚上极限偏差，E_{sni} 为齿厚下极限偏差。

2) $W_{kE_{bni}}^{E_{bns}}$　其中 W_k 为跨 k 个齿的公法线公称长度，E_{bns} 为公法线长度上极限偏差，E_{bni} 为公法线长度下极限偏差。

能力训练 2：圆柱齿轮精度设计。

分析指导：

(1) 圆柱齿轮精度设计步骤

1) 确定齿轮精度等级；

2) 选择最小侧隙和计算齿厚偏差；

3) 确定检验项目及其公差；

4) 确定齿轮副精度；

5) 确定齿坯公差和表面粗糙度；

6) 绘制齿轮零件图。

(2) 实例

某机床主轴箱传动轴上的一对直齿圆柱齿轮，$z_1=26$，$z_2=56$，$m=2.75$ mm，$b_1=28$ mm，$b_2=24$ mm，两轴承间距离 L 为 90 mm，$n_1=1\ 650$ r/min，齿轮材料为钢，箱体材料为铸铁，单件小批生产，试设计小齿轮的精度，并画出齿轮零件图。

1) 确定齿轮精度等级

因该齿轮为机床主轴箱传动齿轮，查表 6-41 可知齿轮精度为 3～8 级；再因该齿轮既传递运动又传递动力，可根据线速度确定其精度等级：

$$v=\frac{\pi d n_1}{1\ 000\times 60}=\frac{3.14\times 2.75\times 26\times 1\ 650}{1\ 000\times 60}\text{m/s}\approx 6.2\ \text{m/s}$$

查表 6-42 可确定该齿轮为 7 级精度，则齿轮精度表示为 7 GB/T 10095.1。

2) 选择最小侧隙和计算齿厚偏差

中心距　$a_i=\dfrac{m(z_1+z_2)}{2}=\dfrac{2.75\times(26+56)}{2}\text{mm}=112.75\ \text{mm}$，

由式(6-10)：$j_{bnmin}=\dfrac{2}{3}(0.06+0.0005a_i+0.03m_n)$，可得：

$$j_{bnmin}=\frac{2}{3}(0.06+0.000\ 5\times 112.75+0.03\times 2.75)\text{mm}\approx 0.133\ \text{mm}$$

由式(6-11)：$E_{sns}=\dfrac{j_{bnmin}}{2\cos\alpha_n}$，可得 $E_{sns}=-\dfrac{j_{bnmin}}{2\cos\alpha_n}=-\dfrac{0.13}{2\cos 20^\circ}\text{mm}\approx -0.071\ \text{mm}$。

分度圆直径 $d=mz=2.75\times 26\ \text{mm}=71.5\ \text{mm}$，查表 6-29 得 $F_r=0.03$ mm，查表 6-32 和表 3-4 得 $b_r=\text{IT9}=0.074$ mm。

由式(6-12)：$T_{sn}=\sqrt{F_r^2+b_r^2}\cdot 2\tan\alpha_n$ 得：

$T_{sn}=\sqrt{0.03^2+0.074^2}\times 2\tan 20^\circ \text{mm}\approx 0.058\ \text{mm}$

由 $E_{sni}=E_{sns}-T_{sn}$ 得：$E_{sni}=(-0.071-0.058)\text{mm}=-0.129\ \text{mm}$

通常用检查公法线长度极限偏差来代替齿厚偏差。

由式(6-15)得：$E_{bns}=-E_{sns}\cos\alpha_n=-0.071\times\cos 20^\circ\text{mm}\approx-0.067\ \text{mm}$

由式(6-16)得：$E_{bni}=-E_{sni}\cos\alpha_n=-0.129\times\cos 20^\circ\text{mm}\approx-0.121\ \text{mm}$

由跨齿数 $k=\frac{z}{9}+0.5$ 得：$k=\frac{26}{9}+0.5=3.4$，取 $k=3$，则由式(6-14)得：

$$W_k=m[1.476(2k-1)+0.014z]$$
$$=2.75\times[1.476\times(2\times3-1)+0.014\times26]\text{mm}=21.296\ \text{mm}$$

则公法线长度及偏差为　$W_k=21.296^{-0.067}_{-0.121}\text{mm}$。

3）确定检验项目及其公差

该齿轮属于小批量生产，中等精度，没有对局部范围提出更严格的噪声、振动要求，参考表 6-37～表 6-40，确定检验 F_p、F_α、F_β、F_r。查表 6-24 得 $F_p=0.038$ mm、查表 6-25 得 $F_\alpha=0.016$ mm、查表 6-26 得 $F_\beta=0.017$ mm、查表 6-29 得 $F_r=0.030$ mm。

4）确定齿轮副精度

① 中心距极限偏差 $\pm f_a$

查表 6-30 得 $\pm f_a=\pm0.027$ mm，则 $a=112.75\ \text{mm}\pm0.027\ \text{mm}$。

② 轴线平行度偏差 $f_{\Sigma\delta}$ 和 $f_{\Sigma\beta}$

由式(6-8)：$f_{\Sigma\beta}=0.5(L/b)F_\beta$，得 $f_{\Sigma\beta}=0.5\times(90/28)\times0.017\ \text{mm}=0.027\ \text{mm}$。

由式(6-9)：$f_{\Sigma\delta}=2f_{\Sigma\beta}$，得 $f_{\Sigma\delta}=2\times0.027\ \text{mm}=0.054\ \text{mm}$。

5）确定齿坯公差和表面粗糙度

① 内孔尺寸偏差

查表 6-33 得精度等级为 IT7，即 $\phi30\text{H7}Ⓔ=\phi30^{+0.021}_{0}Ⓔ$。

② 齿顶圆直径偏差 $\pm T_{da}/2$

齿顶圆直径为：$d_a=m_n(z+2)=2.75\times(26+2)\text{mm}=77\ \text{mm}$。

其偏差为：$\pm T_{da}/2=\pm0.05m_n=\pm0.05\times2.75\ \text{mm}\approx\pm0.14\ \text{mm}$，则 $d_a=77\ \text{mm}\pm0.14\ \text{mm}$。

③ 基准面的几何公差

内孔圆柱度公差：

$0.04(L/b)F_\beta=0.04\times(90/28)\times0.017\ \text{mm}\approx0.002\ \text{mm}$，$0.1F_p=0.1\times0.038\ \text{mm}\approx0.004\ \text{mm}$，取以上两值中的较小值，即 $t_1=0.002$ mm。

端面圆跳动公差：查表 6-34 得 $t_2=0.018$ mm。

顶圆径向圆跳动公差：查表 6-34 得 $t_3=0.018$ mm。

④ 齿坯表面粗糙度

齿面 Ra 上限值：查表 6-35 得 $Ra=1.25\ \mu\text{m}$。

其余表面粗糙度：查表 6-36 得齿坯内孔 Ra 上限值为 1.25 μm，端面 Ra 上限值为 2.5 μm，顶

圆 Ra 上限值为 3.2 μm，其余表面 Ra 上限值为 12.5 μm。

6）绘制齿轮零件图

齿轮零件图如图 6-70 所示。

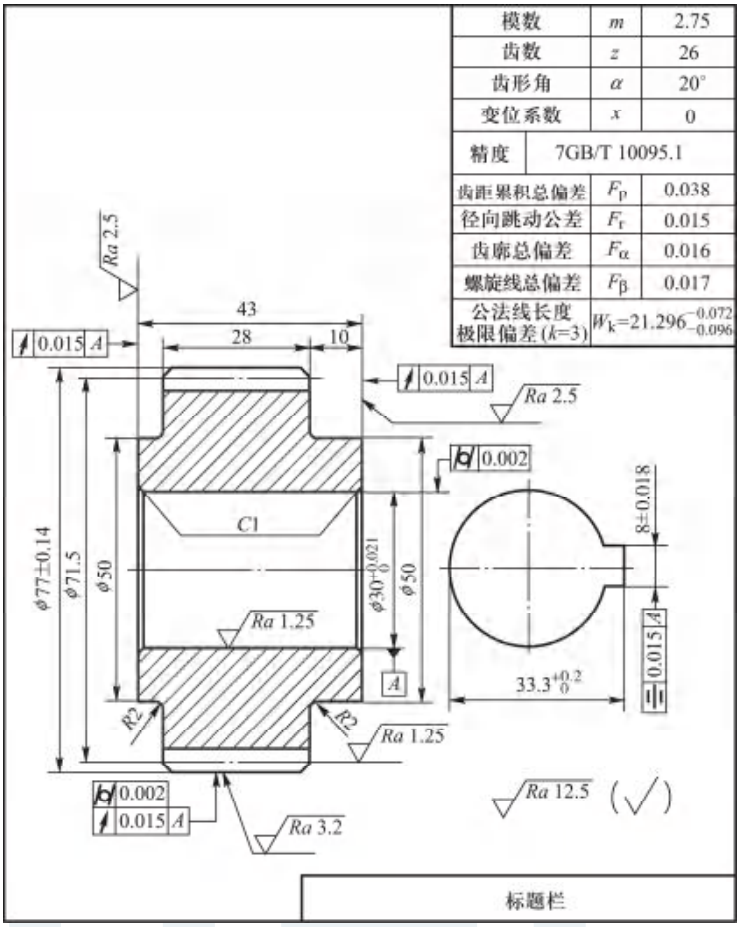


图 6-70　齿轮零件图

能力训练任务

能力训练任务：已知圆柱齿轮副的模数 $m=5$ mm，压力角 $\alpha=20°$，齿宽 $b=50$ mm，齿数 $z_1=20$，齿数 $z_2=100$，孔径 $d_1=25$ mm，$d_2=80$ mm，精度等级为 7 级，试查表确定单个齿距偏差的允许值和螺旋线总偏差的允许值。

任务 4　机床精度检测技术简介

理论知识要点

4.1　机床精度有关概念

4.1.1　机床精度

机床精度分为机床加工精度和机床静态精度：机床加工精度是指被加工零件达到的尺寸精度、形状精度和位置精度；机床静态精度是指机床的几何精度、运动精度、传动精度、定位精度等在空载条件下检测的精度。

机械加工精度和误差是对机械加工质量程度的不同描述。机械加工精度是指加工后的机械零件的实际几何参数与理想几何参数相符合的程度；机械加工误差是指加工后的机械零件的实际几何参数与理想几何参数的差异。加工误差小，表明零件的加工精度高；反之，则为加工精度低。

进行机械加工，保证加工质量的同时不可忽视加工的经济性，即机械加工的经济精度。机加工的经济精度是指在正常加工条件下，使用符合质量标准的设备、工艺装备和标准技术等级的工人，不延长加工时间所能保证的加工精度。

4.1.2　机床几何误差对机床加工精度的影响

机床几何误差主要指主轴回转误差、导轨误差和传动链误差。

（1）主轴回转误差

主轴回转误差是指主轴实际回转轴线与其理想位置的偏离差异。它主要由主轴的制造误差、轴承误差、轴承间隙、与配合零件的误差、主轴挠度及热变形等引起。

主轴回转误差可分解为径向圆跳动、轴向窜动和角度摆动三种基本形式，可使加工后的工件在轴向产生圆柱度误差，在径向产生圆度误差，在端面产生垂直度误差，加工螺纹时产生周期性的螺距误差等。

适当提高主轴及箱体的制造精度、选用高精度的轴承、提高主轴部件的装配精度、对高速主轴部件进行平衡、对滚动轴承进行预紧等，均可提高机床主轴的回转精度。

（2）导轨误差

导轨是机床上确定各部件相对位置关系的基准，也是主要部件的运动基准。导轨误差主要表现如下：①导轨在水平面内的直线度误差，当加工的零件较长时，在工件直径上形成锥形、鼓形或鞍形；②导轨在垂直面内的直线度误差，对零件的精度影响小，可以忽略不计；③导轨面

间的平行度误差，在工件回转类机床（车床或磨床）上加工圆柱面时，在外圆柱面上产生锥度、单叶回转曲面等。

（3）传动链误差

传动链误差是指传动链始末两端传动元件间相对运动的误差，主要表现为转角误差。一般加工中，传动链误差对工件质量影响不大；在加工螺纹或用范成法加工齿轮等工件时，传动链误差影响其加工精度。

为了减少传动链误差，可采取减少传动环节缩短传动链，提高传动副（特别是末端元件）的制造和装配精度以减少传动间隙等措施。

4.1.3　机床刚度对机床加工精度的影响

工艺系统是指在切削加工中由机床、刀具、夹具和工件组成的封闭系统。在切削力、夹紧力、传动力及重力等作用下，工艺系统的各组成元件将产生相应的变形，这种变形破坏了刀具与工件的相对正确位置及切削成形运动所需的正确几何关系，造成加工误差。

工艺系统受力变形是指它抵抗弹性变形的能力，用刚度 k 来描述。工艺系统刚度包含机床刚度。机床刚度主要指机床部件刚度。机床刚度不足，将会影响机床加工精度。

影响机床部件刚度的因素有：①连接表面间的接触变形；②零件间摩擦力和接合面间隙；③部件中薄弱零件的变形。

提高连接表面间接触刚度的常用方法是改善接触表面的配合质量和配合面的间隙，如机床导轨副采用刮研；给机床部件以预加载荷，如对各类轴承、滚动丝杆螺母的调整等。

4.2　机床精度的检测

机床由许多零、部件组成，其主要零、部件有主轴、导轨、传动链、工作台等。机床精度的检测，实质是对主要零、部件进行检测。

能力训练指导

能力训练 1：主轴锥孔斜向圆跳动误差应如何检测？

分析指导：将杠杆千分表固定在机床上，使千分表测头顶在主轴锥孔的内表面上，千分表测头垂直于圆锥孔的内表面，旋转主轴检测，千分表的读数最大差值就是斜向圆跳动误差的数值。这种检测方法在检测内圆磨头主轴锥孔时经常采用。

能力训练 2：主轴定心轴颈径向圆跳动误差和斜向圆跳动误差应如何检测？

分析指导：根据使用和设计的要求，机床的主轴有各种不同的定心方式，以保证工件或刀具在回转时处于平稳状态，因此要求定心轴颈的表面与主轴回转轴线同轴。检测同轴度误差的方法就是测量其径向和斜向圆跳动误差。将千分表（测量精度要求高时采用测微仪）固定在机床上，使千分表测头顶在主轴定心轴颈表面上（若为锥面，则测头垂直于锥面），旋转主轴检测。千分表读数的最大差值，就是定心轴颈径向和斜向圆跳动误差的数值。其测量方向是被

测面的方向。

能力训练 3：对不同形状的导轨，各表面应分别控制哪些平面的直线度误差？导轨直线度误差常用检测方法有哪些？

分析指导：常见的机床导轨有矩形导轨和 V 形导轨。矩形导轨的水平表面控制导轨在垂直平面内的直线度误差。矩形导轨的两侧面控制导轨在水平面内的直线度误差。对 V 形导轨，因为组成导轨的是两个斜表面，所以两个斜表面既控制垂直平面内的直线度误差，同时也控制水平面内的直线度误差。

导轨直线度误差常用检测方法有：研点法、平尺拉表比较法、垫塞法、拉钢丝检测法和水平仪检测法、光学平直仪（自准直仪）检测法等。

能力训练 4：哪些机床必须进行传动链传动误差检测？其检测方法有哪几种？

分析指导：凡是由传动链的合成运动加工齿轮和螺纹的机床，为了能获得正确的牙型、螺距和分齿精度，必须保证其传动链有一定的精度。

机床传动链传动误差的检测方法有间接法和直接法两种：

1）间接法　间接法是按机床说明书规定，加工一个产品，如齿轮或丝杠，对工件进行测量，用检验工件质量的方法，以确定机床传动链的传动误差是否能加工出所要求精度等级的工件。这种方法是反映施工工艺的综合误差，既包含有机床传动链的传动误差，同时也包含其他因素的误差。

2）直接法　有静态测量法和动态测量法两种。

能力训练 5：如何对卧式车床和精密丝杠车床传动误差实现动态测量？

分析指导：卧式车床和精密丝杠车床传动误差动态测量，根据机床专业精度标准规定可采用精密螺母、千分表、标准丝杆检测。

在前后顶尖间，顶紧一根带有精密螺母的标准丝杆，螺母应当与标准丝杠精确地配合（或有调整间隙的装置），并使标准丝杠在转动，螺母只能作轴向移动而不能转动。

将千分表固定在溜板上，使千分表测头顶在螺母端面上。以标准丝杠螺距和机床丝杠螺距之比作为主轴至传动丝杠的传动比。

将机床的开合螺母合上，慢速开动机床，在 25 mm、100 mm 和 300 mm 长度上分别检测一次。千分表读数的最大差值就是传动误差。

能力训练 6：对机床工作台平面度误差测量有什么要求？

分析指导：机床工作台平面度误差的检测方法，以往沿用“两点法”，即利用平行平尺、千分表、等高垫块、框式水平仪等，将沿工作台面某些直线部位进行的测量，理解为任一截面上的最大直线度误差。而它与几何公差国家标准中平面度定义规定不符，目前，GB/T 17421.1《机床检验通则　第 1 部分：在无负荷或精加工条件下机床的几何精度》中指出，对平面度误差的检查测量均为按包容实际表面且距离为最小的两平行平面间的距离，由此定义可以看出，作为评定基准的包容平面，其位置也需要根据最小条件原则来确定。所以必须首先全面掌握被测表面的误差情况，然后才能按一定准则确定评定基准。这样就决定了测量必须要分两个步骤，即

先测出实际表面上若干点相对于任意一个理想平面(测量基准)的高度,然后通过基准转换等方法,才能求出符合定义的误差值。

能力训练 7:工作台移动时倾斜度误差应如何检测?

分析指导:外圆磨床、螺纹磨床、拉刀磨床、龙门刨床和龙门铣床等工作台移动时倾斜度误差的检测,首先应在工作台中央,垂直于工作台移动方向放置一个水平仪(如果磨床是斜台面,水平仪应放在专用垫板上);移动工作台,每隔 250 mm(或 500 mm、或小于此值)记录一次读数,短床身在工作台全部行程上至少记录三个读数;水平仪在 1000 mm 行程上和全部行程上读数的最大代数差,就是工作台移动时的倾斜度误差。

能力训练 8:横梁移动时倾斜度误差应如何检测?

分析指导:横梁移动时倾斜度误差的检测方法,首先是在横梁导轨的中央位置,平行于横梁放置一个水平仪;移动横梁,每隔 500 mm(或小于 500 mm)记录一次读数,在横梁全部行程上至少记录 3 个读数;在横梁全部行程上检测时,两垂直刀架(或铣头)应移到横梁上相对称的位置。而横梁的移动方向,只能由下往上,不能往返。

这种方法多用于龙门刨床、龙门铣床、立式车床等机床横梁移动时的倾斜度误差的检测。

能力训练任务

能力训练任务:分析加工圆柱时,产生如图 6-71 所示各种误差的原因。

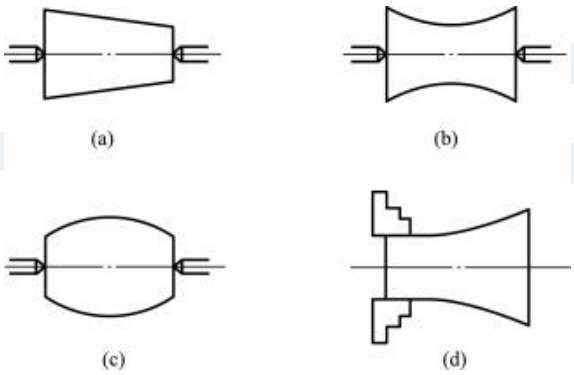


图 6-71　分析误差产生的原因

巩 固 训 练

1. 填空题

1) 根据结合性质和使用要求,螺纹可分为_____、_____和_____三类。

2) 国标规定,普通螺纹的公称直径是指螺纹的_____径。

3）螺纹大径用代号_____表示，主要用于_____和_____；螺纹小径用代号_____表示，主要用于_____；螺纹中径用代号_____表示。其中大写代号表示_____，小写代号表示_____。

4）普通螺纹连接的互换性要求：在装配过程中具有_____，在使用过程中具有_____。影响其互换性的主要几何参数有_____、_____和_____。

5）普通螺纹的配合精度分为_____、_____和_____三级。普通螺纹标记 M10—5g6g—L 中，L 表示_____，5g 表示_____。

6）为了满足不同用途的需要，平键连接可采用_____、_____和_____三种配合。对于_____，键、轴槽、轮毂槽的宽度公差分别是 h8、N9、JS9.

7）矩形花键的标注次序为：_____、_____、_____、_____、_____及_____。

8）_____级轴承在机械中应用最广。

9）齿轮传动的使用要求主要包括：_____、_____、_____、_____和_____。

10）齿轮轮齿同侧齿面偏差共有_____个检测项目，即齿距偏差_____个、齿廓偏差_____个、切向综合偏差_____个、螺旋线偏差_____个。

2. 选择题

1）普通外螺纹的中径公差等级分为（　　）。

A. 4、5、6、7、8 五级　　B. 4、5、6、7、8、9 六级

C. 3、4、5、6、7、8、9 七级　　D. 4、6、8 三级

2）国标规定，普通外螺纹中径的基本偏差代号有（　　）。

A. f、g、h 三种　　B. e、f、g、h 四种

C. d、e、f、g、h 五种　　D. G、H 两种

3）普通螺纹标记 M20×2—5g6g—S 中的 5g6g 表示（　　）。

A. 中径和底径公差带　　B. 顶径和底径公差带

C. 中径和顶径公差带　　D. 大径和小径公差带

4）平键的（　　）是配合尺寸。

A. 键宽和槽宽　　B. 键高和槽深　　C. 键长和槽长

5）花键连接一般选择的基准制为（　　）。

A. 基孔制　　B. 基轴制　　C. 混合制

6）国家标准规定，矩形花键连接的定心方式采用（　　）。

A. 大径定心　　B. 小径定心

C. 键（键槽）宽定心　　D. 小径和键（键槽）宽定心

7）内、外矩形花键的大径配合选用（　　）。

A. 间隙配合　　B. 过渡配合　　C. 过盈配合　　D. 过渡或过盈配合

8）滚动轴承的精度等级是按（　　）分级的。

A. 外形尺寸精度　　B. 旋转精度　　C. 外形尺寸精度和旋转精度

9）GB/T 307.3 规定，向心轴承公差等级分为（　　）。

A. 普通级、2、3、4、5 五级　　B. 普通级、6、5、4、2 五级

C. 普通级、6X、5、4、2 五级　　D. 普通级、6、5、4 四级

10）6208 向心轴承内圈与 ϕ40m6 轴颈配合，形成（　　）。

A. 过渡配合　　B. 过盈配合

C. 间隙配合　　D. 过盈配合或过渡配合

11）齿轮副的侧隙用于（　　）。

A. 补偿热变形　　B. 补偿制造误差和装配误差

C. 尺寸润滑油　　D. 补偿热变形和储存润滑油

12）齿轮齿距累积总偏差用来评定（　　）。

A. 齿侧间隙　　B. 轮齿载荷分布均匀性

C. 齿轮传动准确性　　D. 齿轮传动平稳性

3. 简答题

1）普通螺纹的几何参数有哪些？其中影响螺纹互换性的主要参数有哪些？

2）普通螺纹中径、单一中径、作用中径三者有何区别和联系？并写出普通螺纹合格的条件。

3）滚动轴承承受载荷类型不同与选择配合有何关系？

4）如何选择齿轮的检验项目？

4. 综合题

1）解释下列螺纹标记中各代号的含义：

① M10×1—5g6g—s；　　② M36—6H/6g。

2）一螺纹配合的标记为 M20×2—6H/5g6g，试查表确定内螺纹中径、小径和外螺纹中径、大径的极限偏差、极限尺寸。

3）某减速器中的一齿轮与轴之间通过平键来传递转矩，已知轴径为 25 mm，键宽为 8 mm，试确定键槽的尺寸和配合，画出轴键槽的断面图和轮毂键槽的局部视图，并按规定进行标注。

4）某减速器中的一对直齿圆柱齿轮，$m=5$ mm，$z_1=60$，$\alpha=20°$，$x=0$，$n_1=960$ r/min，两轴承间距离 $L=100$ mm，齿轮为钢制，箱体为铸铁制造，单件小批量生产，试确定：

① 齿轮精度等级；

② 检验项目及其允许值；

③ 齿厚上、下极限偏差或公法线长度极限偏差值；

④ 齿轮箱体精度要求及其允许值；

⑤ 齿坯精度要求及其允许值；

⑥ 画出齿轮零件图。

Module 7 模 块 七　尺　寸　链

教学课件

尺寸链

机器由零部件组成，各零部件间只有保持正确的尺寸关系，才能实现正确的运动关系及其他功能要求。在结构设计上或在装配工艺上，适当限定各有关零、部件尺寸和位置的适宜公差，保证机器达到设计精度要求，这是尺寸链可以解决的问题。

如图 7-1 所示，装配间隙 A_0 与零件尺寸 A_1、A_2、A_3 有关联，其中某个零件尺寸发生变化，装配间隙 A_0 随之变化。装配间隙 A_0 影响装配精度，装配精度影响机床加工精度。装配精度高即要求装配间隙 A_0 小，也就要求各组成零件尺寸精度高，即加工难度大，合理分配各零件的尺寸公差，既是设计问题又是工艺问题，所以尺寸链知识是机械大类专业学生必须掌握的知识。

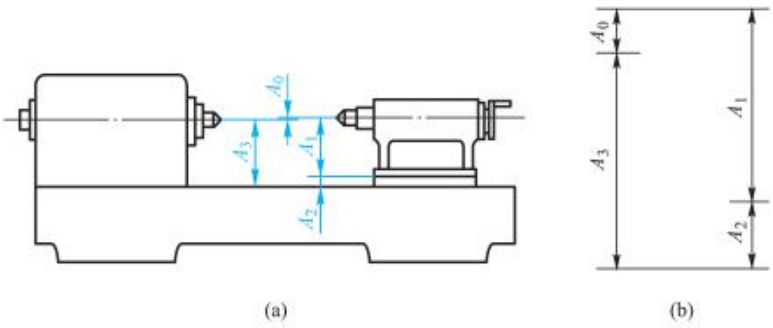


图 7-1　机床尾座顶尖轴线高度尺寸链

任务 1　熟练掌握尺寸链的建立

理论知识要点

1.1　尺寸链的概念

微课

尺寸链的概念

尺寸链是指在一个零件或一台机器的结构中，某些相互联系的尺寸按一定顺序连接成一个封闭的尺寸组。其中“尺寸”是指包括长度、角度和几何误差等的广义尺寸。

尺寸链由环组成。环又分为封闭环和组成环。如图 7-1 所示，A_0、A_1、A_2、A_3 均为环。

封闭环是指加工或装配过程中最后自然形成的那个尺寸。封闭环常用下标为“0”的字母表示，如图 7-1 所示，A_0 为封闭环。

组成环是指尺寸链中除封闭环以外的其他环。组成环通常用下标为“1，2，3，…”的字母表示，如图 7-1 所示，A_1、A_2、A_3 均为组成环。根据它们对封闭环影响的不同，又分为增环和减环。

1）增环　与封闭环同向变动的组成环称为增环，即当其他组成环尺寸不变时，该组成环尺寸增大（或减小）而封闭环尺寸也随之增大（或减小），如图 7-1 所示，A_1、A_2 均为增环。

2）减环　与封闭环反向变动的组成环称为减环，即当其他组成环尺寸不变时，该组成环尺寸增大（或减小）而封闭环的尺寸却随之减小（或增大），如图 7-1 所示，A_3 为减环。

1.2　尺寸链的分类

微课

尺寸链分类

尺寸链通常从以下三个角度进行分类：

（1）按应用场合分

尺寸链分为设计尺寸链和工艺尺寸链。设计尺寸链又分为装配尺寸链和零件尺寸链。

1）装配尺寸链是指由不同零件设计尺寸组成的尺寸链，如图 7-2a 所示。

2）零件尺寸链是指由同一零件的设计尺寸组成的尺寸链，如图 7-2b 所示。

3）工艺尺寸链是指由同一零件的工艺尺寸组成的尺寸链，如图 7-2c 所示。

（2）按各环所在空间位置分

1）直线尺寸链是指各组成环都平行于封闭环的尺寸链，如图 7-2 所示。

2）平面尺寸链是指各组成环位于一个或几个平行平面内，但有些组成环不平行于封闭环

的尺寸链，见图 7-3a。计算时，将平面尺寸链转化为直线尺寸链，再进行计算，见图 7-3b。

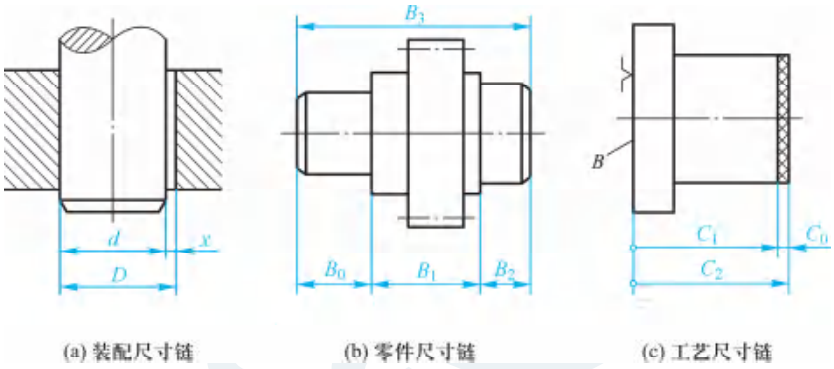


图 7-2　尺寸链分类之一

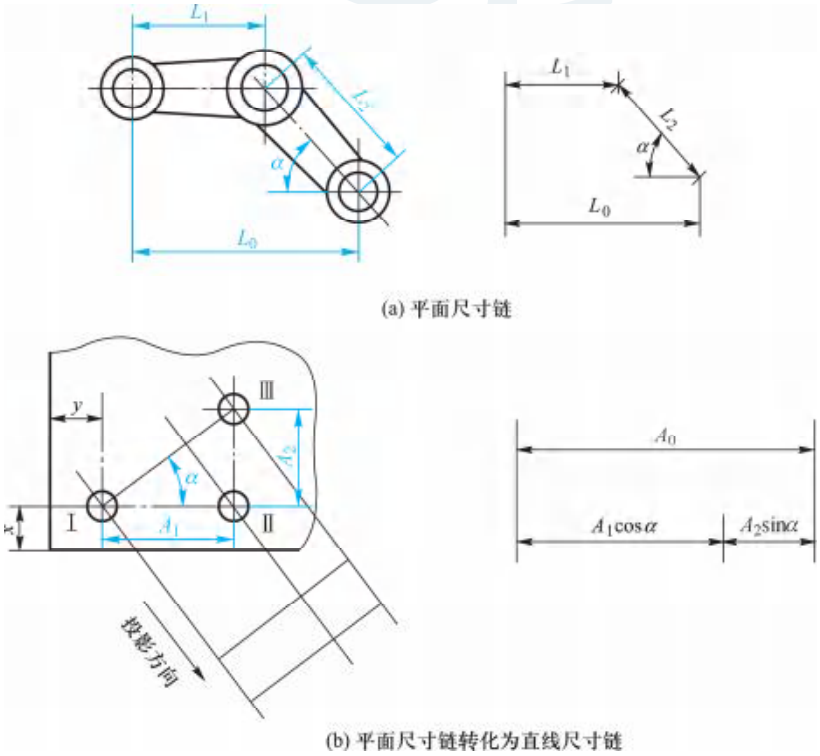


图 7-3　尺寸链分类之二

3）空间尺寸链是指组成环可位于几个不平行的平面内的尺寸链。

（3）按各环尺寸的几何特性分

1）长度尺寸链是指各环均为长度尺寸的尺寸链，如图 7-2 所示。

2）角度尺寸链是指各环均为角度尺寸的尺寸链，如图 7-4 所示。

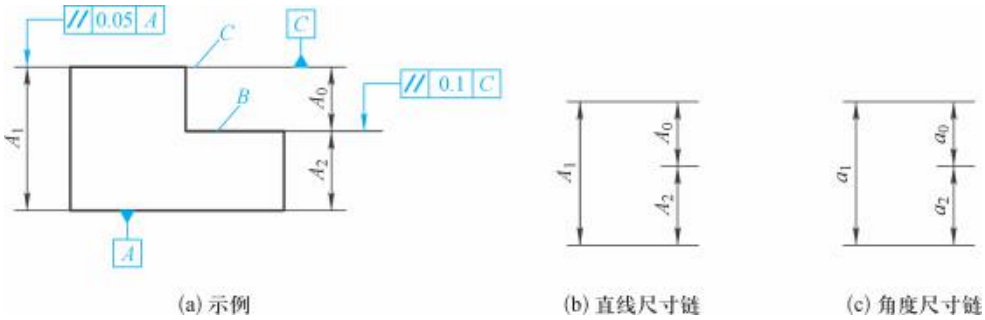


图 7-4　角度尺寸链

本模块重点讨论长度尺寸链中的直线尺寸链。

1.3　尺寸链的特点

1）封闭性　组成尺寸链的各个尺寸应按一定顺序构成一个封闭系统。

2）相关性（制约性）　尺寸链的其中一个尺寸变动将影响其他尺寸变动。

1.4　尺寸链的建立

建立尺寸链时应遵循“最短尺寸链原则”，即使组成环数目为最少。

微课

尺寸链的建立

1.4.1　确定封闭环

一个尺寸链中规定有且只有一个封闭环。在尺寸链中封闭环的公差值最大，精度最低。

封闭环的确定方法：装配尺寸链的封闭环是在装配之后形成的，此封闭环通常是机器上有装配精度要求的尺寸；零件尺寸链的封闭环应为公差等级要求最低的环，在零件图上一般不标注；工艺尺寸链的封闭环是在加工中自然形成的，一般为工艺过程中需要的尺寸，加工顺序不同，封闭环也不同。

1.4.2　查找组成环

组成环的构成约定：一个尺寸链至少要有两个组成环，但组成环数应尽量少。组成环中，可以只有增环没有减环，但不能只有减环没有增环。

查找组成环的顺序：先从封闭环的任意一端开始，找出相邻的尺寸作为第一尺寸，然后再找出与第一尺寸相邻的作为第二尺寸，这样一环接一环，直到封闭环的另一端为止，从而形成封闭的尺寸组。

1.4.3　画尺寸链图、判断增减环

1）画尺寸链图　只需将链中各尺寸依次画出，形成封闭的图形即可。

2）判断增环、减环　采用回路法，即画尺寸链图时，从封闭环开始用带单箭头的线段表示各环，箭头仅表示查找组成环的方向，其中，箭头方向与封闭环上箭头方向一致的环为减环，箭头方向与封闭环上箭头方向相反的环为增环。

能力训练指导

能力训练：零件的尺寸标注与尺寸链有什么不同？工序图与零件图有什么不同？

分析指导：

对零件进行尺寸标注时，要求同一方向的尺寸至少留出一个开口，不允许标注尺寸是封闭的；而研究尺寸链时，必须将开口闭合，形成一个封闭的尺寸组。

工序图与零件图外貌相似，主要区别在于：工序图只画出和标出与本工序有关的尺寸，而零件图应全部画出和标出。

能力训练任务

能力训练任务：图 7-5 所示的尺寸链中，A_0 为封闭环。试分析各组成环中，哪些是增环，哪些是减环。

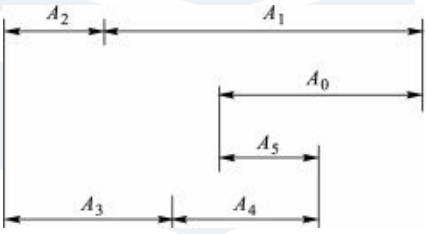


图 7-5　尺寸链示例

任务 2　尺寸链的计算——正计算、反计算、中间计算

理论知识要点

2.1　尺寸链的计算类型——“三算”

尺寸链计算的主要目的是进行公差校核计算和公差设计计算。

1）正计算（又称校核计算）　已知各组成环的极限尺寸，求封闭环的极限尺寸。正计算主要用于验算正确性。

2）反计算　已知封闭环的极限尺寸和各组成环的公称尺寸，求各组成环的极限偏差。反计算主要用于设计，根据封闭环分配各组成环尺寸的公差。

微课

尺寸链计算

3）中间计算　已知封闭环和部分组成环的极限尺寸，求某一组成环的极限尺寸，常用在工艺上。中间计算和反计算通常称为设计计算。

2.2　尺寸链计算的常用方法

尺寸链计算方法有完全互换法（极值法）、不完全互换法（大数互换法或概率法）、分组互换法、调整法和修配法等，常用方法主要有完全互换法和不完全互换法。

2.2.1　完全互换法（极值法）

（1）含义

完全互换法是指不考虑各环实际尺寸的分布情况，仅按各环的最大与最小极限尺寸进行计算。按此法计算出来的尺寸加工各组成环，进行装配时各组成环不需要挑选或辅助加工，装配后即能满足封闭环的公差要求，即可实现完全互换。

（2）应用场合

完全互换法主要用于高精度、尺寸环数少的尺寸链或低精度、尺寸环数多的尺寸链的大批量生产的装配场合。

（3）计算公式

设尺寸链的总环数为 m，增环环数为 n，A_0 为封闭环的公称尺寸，A_z 为增环的公称尺寸，A_j 为减环的公称尺寸。

封闭环的公称尺寸：

$$A_0=\sum_{z=1}^{n}A_z-\sum_{j=n+1}^{m}A_j \tag{7-1}$$

封闭环的极限尺寸：

$$A_{0\max}=\sum_{z=1}^{n}A_{z\max}-\sum_{j=n+1}^{m}A_{j\min} \tag{7-2}$$

$$A_{0\min}=\sum_{z=1}^{n}A_{z\min}-\sum_{j=n+1}^{m}A_{j\max} \tag{7-3}$$

封闭环的极限偏差：

$$\mathrm{ES}_0=\sum_{z=1}^{n}\mathrm{ES}_z-\sum_{j=n+1}^{m}\mathrm{EI}_j \tag{7-4}$$

$$\mathrm{EI}_0=\sum_{z=1}^{n}\mathrm{EI}_z-\sum_{j=n+1}^{m}\mathrm{ES}_j \tag{7-5}$$

封闭环的公差：

$$\mathrm{T}_0=\sum_{i=1}^{m}\mathrm{T}_i \tag{7-6}$$

2.2.2　不完全互换法(大数互换法或概率法)

(1) 含义

不完全互换法是指在大量生产且工艺过程稳定的情况下,各组成环的实际尺寸趋近公差带中间的概率大,利用概率的方法来计算封闭环公差和极限偏差。按此法计算出来的尺寸加工各组成环,进行装配时,不是在全部产品中,而是在绝大多数产品中保证互换。此法可使组成环的公差扩大,从而获得良好的技术经济效益。

(2) 应用场合

不完全互换法主要用于组成环数较多、装配精度要求较高的大批量生产的装配场合。

(3) 计算公式

封闭环的公称尺寸:与完全互换法相同。

封闭环的公差:

若组成环的实际尺寸按正态分布,且分布范围与公差带宽度一致,分布中心与公差带中心重合,则有:

$$T_0=\sqrt{\sum_{i}^{m}T_i} \tag{7-7}$$

若各组成环公差相等,则有:$T_{av}=\dfrac{T_0}{\sqrt{m}}$

封闭环的中间偏差:

[各环的中间偏差:$\Delta_i=\dfrac{1}{2}(ES_i+EI_i)$]

$$\Delta_0=\frac{1}{2}(ES_0+EI_0) \tag{7-8}$$

$$\Delta_0=\sum_{z=1}^{n}\Delta_z-\sum_{j=n+1}^{m}\Delta_j \tag{7-9}$$

封闭环的极限偏差:

(各环的极限偏差:$ES_i=\Delta_i+\dfrac{T_i}{2}$;　$EI_i=\Delta_i-\dfrac{T_i}{2}$)

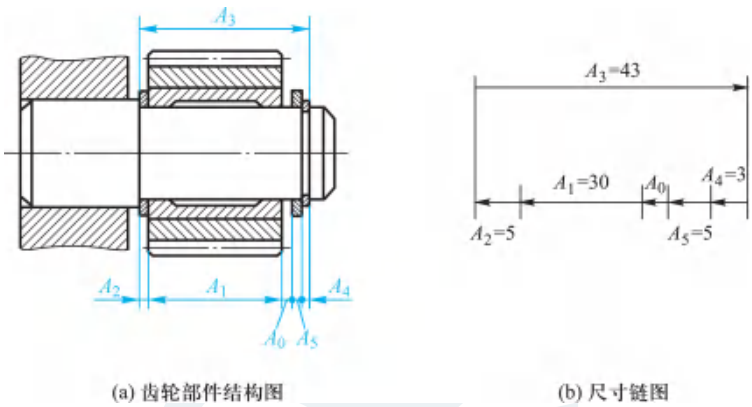
$$ES_0=\Delta_0+\frac{T_0}{2} \tag{7-10}$$

$$EI_0=\Delta_0-\frac{T_0}{2} \tag{7-11}$$

能力训练指导

能力训练 1:正计算(校核计算)。

如图 7-6 所示齿轮部件结构，轴固定不动，齿轮在轴上回转。已知各零件的尺寸：$A_1=30_{-0.13}^{0}$ mm，$A_2=A_5=5_{-0.075}^{0}$ mm，$A_3=43_{+0.02}^{+0.18}$ mm，$A_4=3_{-0.04}^{0}$ mm，设计要求间隙 A_0 为 0.1～0.45 mm，试做校核计算。



(a) 齿轮部件结构图　　(b) 尺寸链图

图 7-6　尺寸链的计算

分析指导：

（1）确定封闭环及其技术要求

由于间隙 A_0 是装配后自然形成的，因此 A_0 为封闭环。此间隙 A_0 在 0.1～0.45 mm，即 $A_0=0_{+0.1}^{+0.45}$ mm。

（2）寻找全部组成环，画尺寸链图，并判断增、减环

依据查找组成环的方法，找出全部组成环为 A_1、A_2、A_3、A_4 和 A_5，尺寸链图如图 7-6b 所示。依据“回路法”判断出：A_3 为增环，A_1、A_2、A_4 和 A_5 皆为减环。

（3）校核计算

根据极值法的计算公式(7-1)、(7-2)、(7-3)、(7-4)、(7-5)、(7-6)知：

封闭环的公称尺寸：

$A_0=A_3-(A_1+A_2+A_4+A_5)=43\ \text{mm}-(30+5+3+5)\ \text{mm}=0$，封闭环的公称尺寸为 0，说明各组成环的公称尺寸满足封闭环的设计要求。

封闭环的极限偏差

$ES_0=ES_3-(EI_1+EI_2+EI_4+EI_5)=+0.18\ \text{mm}-(-0.13-0.075+-0.04-0.075)\ \text{mm}=+0.50\ \text{mm}$

$EI_0=EI_3-(ES_1+ES_2+ES_4+ES_5)=+0.02\ \text{mm}-(0+0+0+0)=+0.02\ \text{mm}$

封闭环的公差

$T_0=T_1+T_2+T_3+T_4+T_5=0.13\ \text{mm}+0.075\ \text{mm}+0.16\ \text{mm}+0.075\ \text{mm}+0.04\ \text{mm}=0.48\ \text{mm}$

校核结果表明，封闭环的上、下偏差及公差均已超过规定范围，必须调整组成环的极限

偏差。

剖析：本题是装配尺寸链的正计算，属于公差控制问题。通过计算 A_0 为 $0^{+0.50}_{+0.02}$ mm，与题目要求 $A_0=0^{+0.45}_{+0.1}$ mm 不符。根据封闭环的公差等于各组成环的公差之和，本题需缩减各组成环的公差范围，亦即增大了加工难度，所以调整时要具体分析各组成环的精度等级和工艺能否实现，同时要符合国家标准对公差的要求。

能力训练 2：反计算（设计计算）。

反计算的任务：将封闭环的公差分配给各组成环。分配方法有：等公差法和等精度法。

当各组成环的公称尺寸相差不大时，采用“等公差法”。具体操作是：将封闭环的公差平均分配给各组成环；如果需要，可在此基础上进行必要的调整，即组成环的平均公差为

$$T_i=\frac{T_0}{m}\quad（m——组成环数）$$

当各组成环的公称尺寸相差较大，按等公差法分配公差不太合理时，采用“等精度法”。具体操作是：使各组成环公差等级相同，即各组成环公差等级系数相等，设其值均为 a，然后按 $T=ai$（国标规定：在 IT5～IT18 公差等级内，$T=ai$）计算各组成环公差，最后采用“调整环”和按“入体原则”确定各组成环的极限偏差。

公差因子 i 可按公称尺寸查表得出，见表 7-1。公差等级系数 a 可查表 7-2，也可通过计算求得：

$$a=\frac{T_0}{\sum_{j=1}^{m} i_j} \tag{7-12}$$

表 7-1　公差因子 i 数值表

公称尺寸段 D/mm	1～3	>3～6	>6～10	>10～18	>18～30	>30～50	>50～80	>80～120	>120～180	>180～250	>250～315	>315～400	>400～500
公差因子 i/μm	0.54	0.73	0.90	1.08	1.31	1.56	1.86	2.17	2.52	2.90	3.23	3.54	3.59

表 7-2　公差等级系数 a 数值表

公差等级	IT8	IT9	IT10	IT11	IT12	IT13	IT14	IT15	IT16	IT17	IT18
系数 a	25	40	64	100	160	250	400	640	1 000	1 600	2 500

“入体原则”规定：包容尺寸的基本偏差为 H，被包容尺寸的基本偏差为 h，一般长度尺寸用 js。即按“入体原则”确定各组成环极限偏差应向材料内分布，故称为“入体”。

如图 7-6a 所示齿轮结构，轴固定不动，齿轮在轴上回转。已知各零件的公称尺寸为：$A_1=30$ mm，$A_2=A_5=5$ mm，$A_3=43$ mm，弹簧卡环 $A_4=3^{0}_{-0.05}$ mm（标准件），设计要求间隙 A_0 为 0.1～0.35 mm，试用“等精度法”确定各组成环的公差和极限偏差。

分析指导：

(1) 确定封闭环及其技术要求

因为间隙 A_0 是装配后自然形成的，所以确定封闭环为要求的间隙 A_0。此间隙为 0.1～0.35 mm，即 $A_0=0^{+0.35}_{+0.1}$ mm。封闭环的公差为 $T_0=ES_0-EI_0=+0.35\ mm-(+0.10\ mm)=0.25\ mm$。

(2) 寻找全部组成环，画尺寸链图，并判断增、减环

依据查找组成环的方法，找出全部组成环为 A_1、A_2、A_3、A_4 和 A_5，画尺寸链图，如图 7-6b 所示。依据"回路法"判断出 A_3 为增环，A_1、A_2、A_4 和 A_5 皆为减环。

(3) 校核封闭环的公称尺寸

$$A_0=A_3-(A_1+A_2+A_4+A_5)=43\ mm-(30+5+3+5)mm=0\ mm$$

封闭环的公称尺寸为 0，说明各组成环的公称尺寸满足封闭环的设计要求。

(4) 计算各组成环的公差

由表 7-1 可查出各组成环的公差因子：$i_1=1.31\ \mu m$，$i_2=i_5=0.73\ \mu m$，$i_3=1.56\ \mu m$，$i_4=0.54\ \mu m$。

按式(7-12)得各组成环相同的公差等级系数 $a(a=a_{av})$：

$$a_{av}=\frac{T_0-T_4}{i_1+i_2+i_3+i_5}=\frac{250-50}{1.31+0.73+1.56+0.73}=\frac{200}{4.33}=46$$

由表 7-2 知，$a=a_{av}=46$，在 TI9～IT10 之间，因要保证误差不超出要求范围，故选取公差等级为 IT9。

查标准公差表得各组成环的公差为：

$T_1=0.052\ mm$，$T_2=T_5=0.030\ mm$，$T_3=0.062\ mm$，$T_4=0.050\ mm$（已知）

(5) 校核封闭环公差

$T_0'=\sum_{i=1}^{m}T_i=T_1+T_2+T_3+T_4+T_5=(0.052+0.030+0.062+0.050+0.030)\ mm=0.224\ mm<T_0=0.25\ mm$。符合要求，还有富余。因此，可考虑放大较难加工的 A_3 的公差，放大后的 A_3 公差：$T_3=(0.25-0.224+0.062)mm=0.088\ mm$。

(6) 确定各组成环的极限偏差

选 A_3 作为调整环，其余根据"入体原则"，由于除 A_3 外，其余均相为被包容尺寸，故取其上极限偏差为零，即 $A_1=30^{0}_{-0.05}$ mm，$A_2=A_5=5^{0}_{-0.030}$ mm，$A_4=3^{0}_{-0.05}$ mm(已知)。

根据式(7-4)、式(7-5)可得调整环 A_3 的极限偏差：

$$ES_0=ES_3-(EI_1+EI_2+EI_4+EI_5)$$

$$ES_3=ES_0+(EI_1+EI_2+EI_4+EI_5)=0.35+(-0.052-0.030-0.050-0.030)mm$$
$$=+0.188\ mm$$

$$EI_0=EI_3-(ES_1+ES_2+ES_4+ES_5)$$

$$EI_3=EI_0+(ES_1+ES_2+ES_4+ES_5)=0.10+(0+0+0+0)\text{mm}=+0.10\ \text{mm}$$

因此 $A_3=43^{+0.188}_{+0.100}$ mm 。

能力训练 3：中间计算（设计计算）。

在轴上铣削如图 7-7a 所示的键槽，加工顺序为：车外圆 A_1 为 $\phi70.5^{0}_{-0.1}$ mm，铣键槽深 A_2，磨外圆 $A_3=\phi70^{0}_{-0.06}$ mm。要求磨完外圆后，保证键槽深 $A_0=62^{0}_{-0.3}$ mm，求铣键槽的深度 A_2。

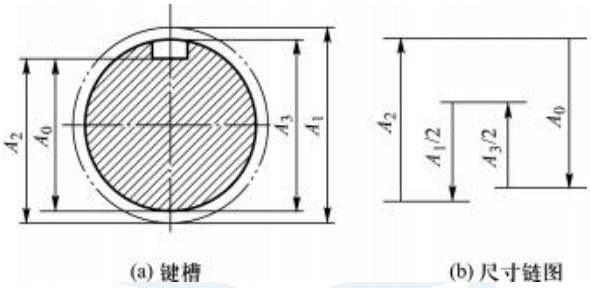


图 7-7　轴的工艺尺寸链

分析指导：

（1）确定封闭环

A_0 是加工最后自然形成的，所以是封闭环。

（2）寻找全部组成环，画尺寸链图，并判断增、减环

以外圆圆心为基准，取半径组成尺寸链，如图 7-7b 所示。A_2、$\frac{A_3}{2}$ 为增环，$\frac{A_1}{2}$ 为减环。

（3）计算 A_2 的公称尺寸和上、下极限偏差

$$A_2=A_0-\frac{A_3}{2}+\frac{A_1}{2}=\left(62-\frac{70}{2}+\frac{70.5}{2}\right)\text{mm}=62.25\ \text{mm}$$

$$ES_2=ES_0-\frac{ES_3}{2}+\frac{EI_1}{2}=0\ \text{mm}-0\ \text{mm}+(-0.05)\text{mm}=-0.05\ \text{mm}$$

$$EI_2=EI_0-\frac{EI_3}{2}+\frac{ES_1}{2}=-0.3\ \text{mm}-(-0.03)\text{mm}+0\ \text{mm}=-0.27\ \text{mm}$$

（4）校核计算结果

$$T_0=T_2+\frac{T_3}{2}+\frac{T_1}{2}=[-0.05-(-0.27)]\text{mm}+0.03\ \text{mm}+0.05\ \text{mm}=0.3\ \text{mm}$$

满足题目要求，计算正确。

能力训练任务

能力训练任务：如图 7-8 所示的圆筒，已知外圆 $A_1=\phi70^{-0.04}_{-0.12}$ mm，内孔尺寸 $A_2=\phi60^{+0.06}_{0}$ mm，

内外圆轴线的同轴度公差为 $\phi 0.02$ mm，求壁厚 A_0。

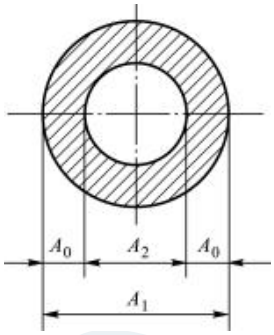


图 7-8　圆筒

巩 固 训 练

1. 填空题

1）尺寸链由环组成。环又分为_____环和_____环。

2）根据应用场合不同，尺寸链可分为_____尺寸链和_____尺寸链。

3）尺寸链计算的主要目的是进行_____计算和_____计算。

4）封闭环的公称尺寸等于所有_____的公称尺寸之和减去所有_____的公称尺寸之和。

2. 判断题

1）在零件尺寸链中，应选择最重要的尺寸作为封闭环。（　　）

2）一个尺寸链的环数最少为三环。（　　）

3）在一个尺寸链中必须同时具备封闭环、增环和减环。（　　）

4）要提高封闭环的尺寸精度，在满足结构功能的前提下，应尽量简化结构，即遵循“最短尺寸链”原则。（　　）

3. 选择题

1）对封闭环有直接影响的为（　　）。

A. 所有增环　　B. 所有减环　　C. 全部组成环

2）中间计算主要用于（　　）。

A. 工艺设计　　B. 产品设计

C. 求工序间的加工余量　　D. 验证设计的正确性

3）零件在加工过程中间接获得的尺寸称为（　　）。

A. 增环　　B. 减环

C. 封闭环　　D. 组成环

4）按“入体原则”确定各组成环极限偏差应（　　）。

A. 向材料外分部　　B. 向材料内分部　　C. 对称分部　　D. 随机分布

4. 简答题

1）如何确定尺寸链的封闭环？能不能说尺寸链中未知的环就是封闭环？

2）尺寸链的计算主要解决哪几类问题？

5. 计算题

1）有一孔、轴配合，装配前孔和轴均需镀铬，镀层厚度均为（10±2）μm，镀后应满足 ϕ30H8/f7 的配合，试确定孔和轴在镀前的尺寸（用完全互换法）。

2）某厂加工一批曲轴部件，如图 7-9 所示。经试运转，发现有的曲轴肩与轴承衬套端面有划伤现象。按设计要求 $A_0=0.1\sim0.2$ mm，而 $A_1=150^{+0.018}_{0}$ mm，$A_2=A_3=75^{+0.02}_{-0.08}$ mm，试验算给定尺寸的极限偏差是否合理。

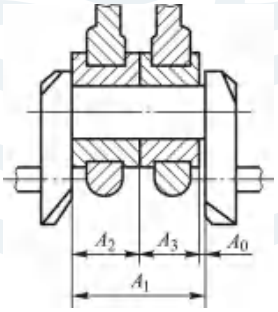


图 7-9　曲轴部件

参考文献

[1] 高晓康,陈于萍.互换性与测量技术[M].3 版.北京:高等教育出版社,2009.
[2] 王玉.机械精度设计与检测技术[M].北京:国防工业出版社,2005.
[3] 孙全颖,唐文明.机械精度设计与质量保证[M].哈尔滨:哈尔滨工业大学出版社,2010.
[4] 赵美卿,王凤娟.公差配合与技术测量[M].北京:冶金工业出版社,2008.
[5] 徐茂功.公差配合与技术测量[M].3 版.北京:机械工业出版社,2009.
[6] 吕天玉.公差配合与测量技术[M].3 版.大连:大连理工大学出版社,2009.
[7] 范真.几何量公差与测量学习指导[M].北京:化学工业出版社,2007.
[8] 甘永立.几何量公差与检测实验指导书[M].6 版.上海:上海科学技术出版社,2010.
[9] 郭连湘.公差配合与技术测量实验指导书[M].北京:化学工业出版社,2006.
[10] 邓方贞,杨淑珍.机械测量技术[M].北京:人民邮电出版社,2017.
[11] 甘永立.几何量公差与检测习题试题集[M].5 版.上海:上海科学技术出版社,2007.

郑重声明

高等教育出版社依法对本书享有专有出版权。任何未经许可的复制、销售行为均违反《中华人民共和国著作权法》，其行为人将承担相应的民事责任和行政责任；构成犯罪的，将被依法追究刑事责任。为了维护市场秩序，保护读者的合法权益，避免读者误用盗版书造成不良后果，我社将配合行政执法部门和司法机关对违法犯罪的单位和个人进行严厉打击。社会各界人士如发现上述侵权行为，希望及时举报，本社将奖励举报有功人员。

反盗版举报电话 (010)58581999 58582371 58582488

反盗版举报传真 (010)82086060

反盗版举报邮箱 dd@hep.com.cn

通信地址 北京市西城区德外大街4号 高等教育出版社法律事务与版权管理部

邮政编码 100120

购书请拨打电话 (021)56717287

防伪查询说明

用户购书后刮开封底防伪涂层，利用手机微信等软件扫描二维码，会跳转至防伪查询网页，获得所购图书详细信息。也可将防伪二维码下的20位密码按从左到右、从上到下的顺序发送短信至106695881280，免费查询所购图书真伪。

反盗版短信举报

编辑短信“JB，图书名称，出版社，购买地点”发送至10669588128

防伪客服电话

(010)58582300

网络增值服务使用说明

一、注册/登录

访问http://abook.hep.com.cn/，点击“注册”，在注册页面输入用户名、密码及常用的邮箱进行注册。已注册的用户直接输入用户名和密码登录即可进入“我的课程”页面。

二、课程绑定

点击“我的课程”页面右上方“绑定课程”，正确输入教材封底防伪标签上的20位密码，点击“确定”完成课程绑定。

三、访问课程

在“正在学习”列表中选择已绑定的课程，点击“进入课程”即可浏览或下载与本书配套的课程资源。刚绑定的课程请在“申请学习”列表中选择相应课程并点击“进入课程”。

如有账号问题，请发邮件至：abook@hep.com.cn。

HEP

公差配合与机械测量（第二版）	万春芬	十二五/新形态
工程力学（第四版）	杜建根	十二五/新形态
机械工程材料及成形工艺（第四版）	姜敏凤	十二五/新形态
机械设计基础（第四版）	栾学钢	十二五/新形态
机械设计基础课程设计（第二版）	栾学钢	十二五
机械设计与应用案例化教程	蒋新萍	项目化
机械基础（第二版）	郁志纯	十二五/新形态
机械零件与典型机构（第二版）	赵玉奇	十二五
液压与气动技术（第二版）	朱立达	十二五/新形态
机械制造基础（第四版）	黎　震	十二五
机械制造技术	刘晓红	国家级教学资源库配套
金属切削与加工（第四版）	王靖东	十二五
金工实习（第四版）	王　骏	十二五/新形态
数控加工工艺与编程（第二版）	张兆隆	十二五
模具制造工艺（第二版）	刘华刚	十二五
模具制造工艺实训（第二版）	秦　涵	十二五

本/书/另/配
PPT等教学资源

服务QQ：800078148
工科类教学研究中心QQ群：243777153

学习卡
网址：http://abook.hep.com.cn
网上学习/资源下载
防伪短信查询：10669588128
免费查询/甄别盗版
使用说明详见书内"防盗声明"页

ISBN 978-7-04-052904-3

定价：34.00元