

“十三五”国家重点出版物出版规划项目
现代机械工程系列精品教材
普通高等教育 3D 版机械类规划教材

互换性与测量技术基础 (3D 版)

王长春 任秀华 李建春 杨宏伟 陈清奎 编著
张进生 主审



机械工业出版社

本书是由山东高校机械工程教学协作组组织编写的“普通高等教育3D版机械类规划教材”之一。本书共分为10章，主要内容包括：互换性、标准化与优先数系等基本知识，光滑圆柱体结合的极限与配合及其国家标准与选择，测量技术基础，几何公差及公差带特点、公差原则、几何公差选择与几何误差检测，表面粗糙度标准与表面粗糙度检测，光滑工件尺寸的检验、光滑极限量规设计，尺寸链基础，滚动轴承、键、螺纹以及齿轮的精度设计与应用示例，机械精度设计示例。

本书对各章的知识重点与难点均配置了基于虚拟现实（VR）技术与增强现实（AR）技术开发的3D虚拟仿真教学资源。

本书适用于普通工院校机械类各专业的本科生，也适用于各类成人教育、自学考试等机械类专业学生，还可供从事机械设计的工程技术人员参考。

图书在版编目（CIP）数据

互换性与测量技术基础：3D版/王长春等编著. —北京：机械工业出版社，2018.4

“十三五”国家重点出版物出版规划项目 现代机械工程系列精品教材
普通高等教育3D版机械类规划教材

ISBN 978-7-111-59457-4

I. ①互… II. ①王… III. ①零部件-互换性-高等学校-教材②零部件-测量技术-高等学校-教材 IV. ①TG801

中国版本图书馆CIP数据核字（2018）第054500号

机械工业出版社（北京市百万庄大街22号 邮政编码100037）

策划编辑：蔡开颖 责任编辑：蔡开颖 杨璇 王小东

责任校对：樊钟英 封面设计：张静

责任印制：

印刷厂印刷

2018年7月第1版第1次印刷

184mm×260mm·15.5印张·378千字

标准书号：ISBN 978-7-111-59457-4

定价： 元

凡购本书，如有缺页、倒页、脱页，由本社发行部调换

电话服务

服务咨询热线：010-88379833

读者购书热线：010-88379649

封面无防伪标均为盗版

网络服务

机工官网：www.cmpbook.com

机工官博：weibo.com/cmp1952

教育服务网：www.cmpedu.com

金书网：www.golden-book.com

普通高等教育 3D 版机械类规划教材 编审委员会

顾 问	艾 兴	中国工程院院士、山东大学教授
	林江海	山东省机械工程学会会长
主任委员	张进生	山东大学
	陈清奎	山东建筑大学
	冯春生	机械工业出版社
委 员	王 勇	山东大学
	张明勤	山东建筑大学
	赵玉刚	山东理工大学
	何 燕	青岛科技大学
	许崇海	齐鲁工业大学
	曹树坤	济南大学
	孙成通	临沂大学
	赵继俊	哈尔滨工业大学 (威海)
	孙如军	德州学院
	彭观明	泰山学院
	马国清	烟台大学
	徐 伟	枣庄学院
	李宏伟	滨州学院
	李振武	菏泽学院
	刘迎春	潍坊科技学院
	曹光明	潍坊学院
	刘延利	山东英才学院
秘 书	蔡开颖	机械工业出版社

序

虚拟现实（VR）技术是计算机图形学和人机交互技术的发展成果，具有沉浸感（Immersion）、交互性（Interaction）、构想性（Imagination）等特征，能够使用户在虚拟环境中感受并融入真实、人机和谐的场景，便捷地实现人机交互操作，并能从虚拟环境中得到丰富、自然的反馈信息。在特定应用领域中，VR 技术不仅可解决用户应用的需要，若赋予丰富的想象力，还能够使人们获取新的知识，促进感性和理性认识的升华，从而深化概念、萌发新的创意。

机械工程教育与 VR 技术的结合，为机械工程学科的教与学带来显著变革：通过虚拟仿真的知识传达方式实现更有效的知识认知与理解。基于 VR 的教学方法，以三维可视化的方式传达知识，表达方式更富有感染力和表现力。VR 技术使抽象、模糊成为具体、直观，将单调乏味变成丰富多变、极富趣味，令常规不可观察变为近在眼前、触手可及，通过虚拟仿真的实践方式实现知识的呈现与应用。虚拟实验与实践让学习者在创设的虚拟环境中，通过与虚拟对象的主动交互，亲身经历与感受机器拆解、装配、驱动与操控等，获得现实般的实践体验，增加学习者的直接经验，辅助将知识转化为能力。

教育部编制的《教育信息化十年发展规划（2011—2020 年）》（以下简称《规划》），提出了建设数字化技能教室、仿真实训室、虚拟仿真实训教学软件、数字教育教学资源库和 20000 门优质网络课程及其资源，遴选和开发 1500 套虚拟仿真实训实验系统，建立数字教育资源共建共享机制。按照《规划》的指导思想，教育部启动了包括国家级虚拟仿真实验教学中心在内的若干建设工程，力推虚拟仿真教学资源的规划、建设与应用。近年来，很多学校陆续采用虚拟现实技术建设了各种学科专业的数字化虚拟仿真教学资源，并投入应用，取得了很好的教学效果。

“普通高等教育 3D 版机械类规划教材”是由山东高校机械工程教学协作组组织驻鲁高等学校教师编写的，充分体现了“三维可视化及互动学习”的特点，将难于学习的知识点以 3D 教学资源的形式进行介绍，其配套的虚拟仿真教学资源由济南科明数码技术股份有限公司开发完成，并建设了“科明 365”在线教育云平台（www.keming365.com），提供了适合课堂教学的“单机版”、适合集中上机学习的“局域网络版”、适合学生自主学习的“手机版”，构建了“没有围墙的大学”“不限时间、不限地点、自主学习”的学习资源。

古人云，天下之事，闻者不如见者知之为详，见者不如居者知之为尽。

本系列教材的陆续出版，为机械工程教育创造了理论与实践有机结合的条件，很好地解决了普遍存在的实践教学条件难以满足卓越工程师教育需要的问题。这将有利于培养制造强国战略需要的卓越工程师，助推中国制造 2025 战略的实施。

张进生
于济南

前 言

本书是由山东高校机械工程教学协作组组织编写的“普通高等教育3D版机械类规划教材”之一。

本书分为概论、光滑圆柱体结合的极限与配合、测量技术基础、几何公差与检测、表面粗糙度与检测、光滑工件尺寸的检验与光滑极限量规设计、尺寸链、常用典型零件的精度设计、渐开线圆柱齿轮精度的评定与设计 and 机械精度设计示例10章。

在本书编写过程中，本着“老师易教、学生易学”的目的，一是各章设置了教学导读内容，同时在部分章节增加了知识拓展内容；二是对各章的知识重点与难点利用虚拟现实（VR）技术、增强现实（AR）技术以“3D”形式进行介绍，体现“三维可视化及互动学习”的特点。本书配有手机版的3D虚拟仿真教学资源，图中标有图标表示免费使用，标有图标表示收费使用。本书提供免费的教学课件，欢迎选用本书的教师登录机工教育服务网（www.cmpedu.com）下载。济南科明数码技术股份有限公司还提供有互联网版、局域网版、单机版的3D虚拟仿真教学资源，可供师生在线下载（www.keming365.com）使用。

本书适用于普通工科院校机械类各专业的本科生，也适用于各类成人教育、自学考试等机械类专业学生，还可供从事机械设计的工程技术人员参考。

本书由潍坊学院王长春、山东建筑大学任秀华、泰山学院李建春、滨州学院杨宏伟、山东建筑大学陈清奎编著；与本书配套的3D虚拟仿真教学资源由济南科明数码技术股份有限公司开发完成，并负责网上在线教学资源的维护、运营等工作，主要开发人员包括陈清奎、刘海、何强、栾飞、周鹏、李晓东、李洪营等。本书由山东大学机械工程学院张进生教授担任主审。

由于编者水平有限，书中难免存在错漏和不当之处，敬请广大读者批评指正。

编 者

目 录

序	
前言	
第 1 章 概论	1
1.1 互换性	1
1.2 标准化与标准	3
1.3 优先数和优先数系	6
1.4 零件的机械精度与加工误差	9
知识拓展：质量管理体系简介	10
习题一	10
第 2 章 光滑圆柱体结合的极限与配合	11
2.1 概述	11
2.2 极限与配合的基本术语及定义	12
2.3 极限与配合国家标准	22
2.4 极限与配合的选择	41
2.5 一般公差	54
知识拓展：大尺寸段与小尺寸段的极限与配合	56
习题二	59
第 3 章 测量技术基础	62
3.1 概述	62
3.2 测量方法与计量器具	67
3.3 测量误差	70
3.4 测量数据处理	75
知识拓展：三坐标测量机简介	83
习题三	83
第 4 章 几何公差与检测	84
4.1 概述	84
4.2 几何公差	91
4.3 公差原则	110
4.4 几何公差的选择	123
4.5 几何误差的评定与检测原则	133
习题四	137
第 5 章 表面粗糙度与检测	139
5.1 表面粗糙度的概念及其作用	139
5.2 表面粗糙度的评定	141
5.3 零件表面粗糙度的选择	145
5.4 表面粗糙度的标注	148
5.5 表面粗糙度的检测	152
知识拓展：表面粗糙度的演变与表面粗糙度测量仪	154
习题五	156
第 6 章 光滑工件尺寸的检验与光滑极限量规设计	157
6.1 光滑工件尺寸的检验	157
6.2 光滑极限量规设计	163
6.3 光滑极限量规的设计示例	168
知识拓展：螺紋量规简介	170
习题六	170
第 7 章 尺寸链	172
7.1 概述	172
7.2 尺寸链的计算	176
习题七	181
第 8 章 常用典型零件的精度设计	183
8.1 滚动轴承结合的精度设计	183
8.2 单键、花键结合的精度设计	193
8.3 螺紋结合的精度设计	199
知识拓展：国外螺紋标准简介	203
习题八	204
第 9 章 渐开线圆柱齿轮精度的评定与设计	205
9.1 渐开线圆柱齿轮精度的评定	205
9.2 渐开线圆柱齿轮精度标准	218
9.3 齿轮副的评定指标	222
9.4 齿轮类零件精度设计	224
知识拓展：汽车变速器简介	227



习题九	228	习题十	236
第 10 章 机械精度设计示例	229	附录 国家标准术语、标准号演化	
10.1 轴类零件的精度设计	229	一览表	237
10.2 箱体类零件的精度设计	233	参考文献	239

试读版本仅供防疫期间线上教学使用

第 1 章

概 论

教学导读

本章介绍互换性、标准化、加工误差等概念，介绍优先数系及其特点和计量技术的意义。要求学生掌握的知识点为：互换性、优先数系、加工误差、标准和标准化等概念，互换性的作用与种类，标准的组成与标准化历程。零部件的互换性与优先数系选用是本章的重点和难点。

1.1 互换性

1.1.1 互换性的概念

在工程或日常生活中随处可见互换现象，如图 1-1 和图 1-2 所示自行车零件（自行车轴组件和自行车链轮）坏了，维修人员可迅速换上同一规格的新零件；室内使用的荧光灯管坏了，可换装上相同规格新灯管。这些产品更换后能够很好地满足使用要求。这是因为合格的产品和制件具有在材料性能、几何尺寸、使用功能上彼此相互替换的性能。



图 1-1 自行车轴组件

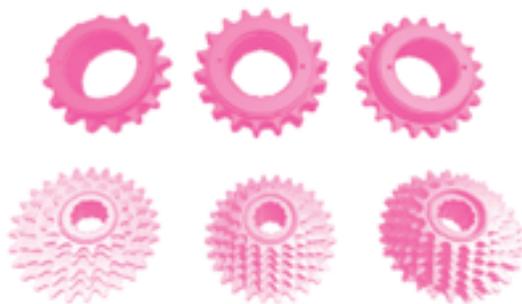


图 1-2 自行车链轮

互换性（interchangeability）是指一种事物能够代替另一事物，并且能满足同样要求的特性。

在机械制造工程领域中，任何机械产品都是由许多零部件组成，而这些零部件是在不同的工厂和车间制成的，这就经常要求产品的零部件具有互换性。那么，什么是机械零部件的



互换性呢？机械零部件的互换性是指同一规格零部件按规定的技术要求制造，能够彼此相互替换使用而效果相同的特性。

零部件互换性的含义在于在装配前从同一规格的零部件中任取其一，装配时不需挑选或修配，装配后就能达到预先规定的功能要求。

本书将主要论述机械制造工程领域里的产品或制件的几何参数互换性及其测量技术的基本理论和方法。

1.1.2 互换性的分类

广义上讲，零部件的互换性应包括几何参数、力学性能和理化性能等多方面的互换性。在本书中仅讨论零部件的几何参数互换性，即几何参数方面的公差和检测。

1. 按实现方法及互换程度分

按实现方法及互换程度的不同，互换性分为完全互换性和不完全互换性两类。

完全互换性（简称为互换性）是指零部件装配或更换时，不需要挑选或修配，就可完全满足使用要求。

不完全互换性（也称为有限互换性）是指零部件装配时，允许有附加条件的选择或调整。不完全互换性又包括概率互换性、分组互换性、调整互换性和修配互换性等。

2. 按应用部位或使用范围分

对标准部件或机构来讲，互换性分为内互换性和外互换性。

内互换性是指部件或机构内部组成零件间的互换性。

例如：滚动轴承内、外圈滚道直径与滚动体（滚珠或滚柱）直径间的配合为内互换性。

外互换性是指部件或机构与其相配合零件间的互换性。

例如：滚动轴承内圈内径与传动轴的配合、滚动轴承外圈外径与壳体孔的配合为外互换性。

实际生产组织中究竟采用何种形式的互换性，主要由产品的精度要求、复杂程度、生产规模、生产设备及技术水平等一系列因素来决定。

1.1.3 互换性的作用

互换性在提高产品质量和可靠性、提高经济效益等方面均具有重大意义。互换性原则已成为现代制造业中一个普遍遵守的原则。互换性生产对我国现代化生产具有十分重要的意义。

互换性必须遵守经济性原则，不是在任何情况下都适用的。有时零件只能采取单个配制才符合经济性原则，这时零件虽不能互换，但也有公差和检测的要求，如模具常用修配法制造。

机械工程中互换性主要体现在技术经济性上，其作用在产品或零部件的设计、制造、使用和维修等方面。

1. 设计方面

若零部件具有互换性，就能最大限度地使用标准件，减少产品中非标准零部件的使用量，便可以减少绘图和计算的工作量，缩短产品的设计周期，有利于产品更新换代，有助于产品的多样化与系列化，促进产品结构、性能的不断改进，全面提升产品附加值，提高产品



效益。

2. 制造方面

互换性有利于组织专业化生产，使用专用设备和 CAM 技术，产品的质量和数量必然会得到明显提高，生产成本随之也会显著降低。互换性是提高生产水平和进行文明生产的有力手段。

装配时，由于零部件具有互换性，不需要辅助加工和修配，所以可以大幅度的降低装配工作的劳动强度，缩短装配周期，还可采用流水线或自动装配，从而大幅度提高装配生产率。

3. 使用和维修方面

零部件具有互换性，对于某些易损件可以提前配置备用件。在更换那些已经磨损或损坏的零部件时，使用备用件或标准件，可大幅减少机器的维修时间和费用，保证机器能连续持久的运转，提高机器的使用价值。

1.2 标准化与标准

1.2.1 标准化与标准的含义

现代制造业生产的特点是规模大、社会生产分工细、协作单位多、互换性要求高。为了适应生产中各部门的协调和各生产环节的衔接，必须有一种手段，使分散的、局部的生产部门和生产环节保持必要的统一，成为一个有机的整体，以实现互换性生产。标准与标准化正是联系这种关系的主要途径和手段。

实行标准化是广泛实现互换性生产的前提与重要方法，如极限与配合等互换性标准都是重要的基础标准。

1. 标准

标准是对重复性事物和概念所做的统一规定。它以科学、技术和实践经验的综合成果为基础，经有关方面协商一致，由主管机构批准，以特定形式发布，作为共同遵守的准则和依据。标准对于改进产品质量，缩短产品周期，开发新产品和协作配套，提高社会效益，发展社会主义市场经济和对外贸易等有非常重要的意义。

标准必须对被规定的对象提出必须满足和应该达到的各方面的条件和要求，对于实物和制件对象提出相应的制作工艺过程和检验规范等规定。标准有如下内在的特性。

(1) 标准涉及对象的重复性 标准所涉及对象必须是具有重复性特征的事物和概念。若事物和概念没有重复性，就无须标准。

(2) 标准涉及对象的认知性 对标准涉及对象做统一规定，必须反映其内在本质并符合客观发展规律，这样才能最大限度地限制它们在重复出现中的杂乱和无序化，从而获得最佳的社会和经济效益。

(3) 制定标准的协商性 标准是一种统一规定。标准的推行将涉及社会、经济效益。因而，在制定标准过程中必须既考虑所涉及各个方面的利益，又考虑社会发展和国民经济的整体和全局的利益。这就要求标准的制定不但要有科学的基础，还要有广泛的调研和涉及利益多方的参与协商。



(4) 标准的法规性 标准的制定、批准、发布、实施、修订和废止等，具有一套严格的形式。标准制定后，有些是要强制执行的，如一些食品、环境、安全等标准；而本书涉及的主要是一些技术标准，都是各自涉及范围内大家共同遵守的统一的技术依据、技术规范或规定。

2. 标准化

标准化是指为了在一定的范围内获得最佳秩序，对实际的或潜在的问题制定共同的和重复使用的规则的活动。标准化是社会化的重要手段，是联系设计、生产和使用方面的纽带，是科学管理的重要组成部分，更是实现互换性的基础。

标准化工作包括制定标准、发布标准、组织实施标准、修改标准和对标准的实施进行监督的全部活动过程。这个过程是从探索标准化对象开始，经调查、试验和分析，进而起草、制定和贯彻标准，而后修订标准。因此，标准化是个不断循环而又不断提高其水平的过程。

标准化对于改进产品、过程和服务的适用性，防止贸易壁垒，促进技术合作方面具有特别重要的意义。例如：优先数系、几何公差及表面质量参数的标准化，计量单位及检测规定的标准化等。可见，在机械制造业中，任何零部件要使其具有互换性，都必须实现标准化，没有标准化，就没有互换性。

1.2.2 标准的分类

在技术经济领域内，标准可分为技术标准和管理标准两类不同性质的标准。标准分类关系图如图 1-3 所示。



图 1-3 标准分类关系图

1. 标准的种类

按标准的使用范围分，我国标准分为国家标准、行业标准、地方标准和企业标准共 4 级。

1) 国家标准。对需要在全国范围内统一的技术要求，应当制定国家标准。

2) 行业标准。对没有国家标准，而又需要在全国某行业范围内统一的技术要求，应当制定行业标准。但在有了国家标准后，该项行业标准就废止了。

3) 地方标准。对没有国家标准和行业标准,而又需要在省、自治区、直辖市范围内统一的工业产品的安全、卫生等要求,应当制定地方标准。但在公布相应的国家标准或行业标准后,该地方标准就废止了。

4) 企业标准。对企业生产的产品,在没有国家标准和行业标准的情况下,制定企业标准作为组织生产的依据。对于已有国家标准或行业标准的,企业也可以制定严于国家标准或行业标准的企业标准,在企业内部使用。

2. 标准的层次

按标准的作用范围分,标准分为国际标准、区域标准、国家标准、行业标准、地方标准和企业标准。

国际标准、区域标准、国家标准、地方标准分别是由国际标准化的标准组织、区域标准化的标准组织、国家标准机构、国家的某个区域一级所通过并发布的标准。对于已有国家标准或行业标准,企业也可制定产于国家标准或行业标准的企业标准,在企业内部使用。

3. 基础标准

按标准化对象的特征分,标准分为:基础标准,产品标准,方法标准和安全、卫生、环保标准等。

基础标准是指在一定范围内作为标准的基础并普遍使用,具有广泛指导意义的标准,如极限与配合标准、几何公差标准、渐开线圆柱齿轮精度标准等。

基础标准是以标准化共性要求和前提条件为对象的标准,是为了保证产品的结构功能和制造质量而制定的、一般工程技术人员必须采用的通用性标准,也是制定其他标准时可依据的标准。

本书所涉及的标准就是基础标准。

4. 标准的划分

标准按照其性质可分为技术标准和管理标准。

技术标准是指根据生产技术活动的经验和总结,作为技术上共同遵守的法规而制定的标准。技术标准包括基础标准、产品标准、方法标准、环保标准等。

管理标准是指对标准化领域中需要协调统一的管理事项所制定的标准。管理标准包括生产组织标准、经济管理标准、服务标准等。

1.2.3 标准化发展历程

1. 国际标准化的发展历程

标准化在人类开始创造工具时就已出现。标准化是社会生产劳动的产物。标准化在近代工业兴起和发展的过程中显得重要起来。早在19世纪,标准化在造船、铁路运输等行业中的应用十分突出,在机械行业中的应用也很广泛。到20世纪初,一些国家相继成立全国性的标准化组织机构,推进了各国的标准化事业发展。随着生产的发展,国际交流越来越频繁,因而出现了地区性和国际性的标准化组织。

1926年成立了国际标准化协会(简称为ISA),1947年重建国际标准化协会并改名为国际标准化组织(简称为ISO)。现在,这个世界上最大的标准化组织已成为联合国甲级咨询机构。ISO9000系列标准的颁发,使世界各国的质量管理及质量保证的原则、方法和程序,都统一在国际标准的基础之上。



2. 我国标准化的发展历程

我国标准化是在 1949 年新中国成立后得到重视并发展起来的, 1958 年发布第一批 120 项国家标准。从 1959 年开始, 陆续制定并发布了极限与配合、形状与位置公差、公差原则、表面粗糙度、光滑极限量规、渐开线圆柱齿轮精度等许多公差标准。我国在 1978 年恢复为 ISO 成员国, 承担 ISO 技术委员会秘书处工作和国际标准草案起草工作。

从 1979 年开始, 我国制定并发布了以国际标准为基础的新的公差标准。从 1992 年开始, 我国又发布了以国际标准为基础修订的 G/T 类新版标准。

1988 年全国人大常委会通过并由国家主席发布了《中华人民共和国标准化法》, 1993 年发布了《中华人民共和国产品质量法》。为了保障人体健康、人身与财产安全, 在 2001 年 12 月, 国家质量监督检验检疫总局颁布的《强制性产品认证管理规定》, 明确规定了凡列入强制性认证内容的产品, 必须经国家指定的认证机构认证合格, 取得指定认证机构颁发的认证证书, 取得认证标志后, 方可出厂销售、出口和使用。

2009 年《产品几何技术规范标准 (GPS)》的颁布与实行, 进一步推动了我国标准与国际标准的接轨, 我国标准化的水平在社会主义现代化建设过程中不断发展提高, 对我国经济的发展做出了很大的贡献。

我国作为制造业大国, 伴随着全球经济一体化, 陆续修订了相关国家标准, 修订的原则是立足我国实际的基础上向国际标准靠拢。

3. 我国计量技术的发展历程

在我国悠久的历史上, 很早就有关于几何量检测的记载。早在秦朝时期就统一了度量衡制度, 西汉已有了铜制卡尺。但长期的封建统治使得科学技术未能进一步发展, 计量技术一直处于落后的状态, 直到 1949 年新中国成立后才扭转了这种局面。

国务院 1959 年发布了《关于统一计量制度的命令》, 1977 年发布了《中华人民共和国计量管理条例》, 1984 年发布了《关于在我国统一实行法定计量单位的命令》。

1985 年全国人大常委会通过并由国家主席发布了《中华人民共和国计量法》。

我国健全各级计量机构和长度量值传递系统, 规定采用国际米制作为长度计量单位, 保证全国计量单位统一和量值准确可靠, 有力地促进我国科学技术的发展。

伴随我国计量制度建设与发展, 我国的计量器具业获得了较大的发展, 能够批量生产用于几何量检测的多品种计量仪器, 如万能测长仪、万能工具显微镜等。同时, 还设计制造出一些具有世界先进水平的计量仪器, 如激光光电光波比长仪、光栅式齿轮全误差测量仪、原子力显微镜等。

1.3 优先数和优先数系

制定标准以及设计零件的结构参数时, 都需要通过数值表示。任何产品的参数指标, 不仅与自身的技术特性有关, 还直接、间接地影响与其配套系列产品的参数值。例如: 螺母直径数值, 影响并决定螺栓直径数值以及丝锥、螺纹塞规、钻头等系列产品的直径数值。将由参数值间的关联产生的扩散称为数值扩散。

为满足不同的需求, 产品必然出现不同的规格, 形成系列产品。产品数值的杂乱无章会给组织生产、协作配套、使用维修带来困难, 故需对数值进行标准化。

1.3.1 优先数系及其公比

优先数系是工程设计和工业生产中常用的一种数值制度。优先数与优先数系是 19 世纪末 (1877 年) 由法国人查尔斯·雷诺 (Charles Renard) 首先提出的。当时载人升空的气球所使用的绳索尺寸由设计者随意规定, 多达 425 种。雷诺根据单位长度不同直径绳索的重量级数来确定绳索的尺寸, 按几何公比递增, 每进 5 项使项值增大 10 倍, 把绳索规格减少到 17 种, 并在此基础上产生了优先数系的系列, 后人为了纪念雷诺将优先数系称为 R_r 数系。

国家标准 GB/T 321—2005《优先数和优先数系》规定十进等比数列为优先数系, 并规定了五个系列, 分别用系列符号 R5、R10、R20、R40 和 R80 表示, 其中前四个系列是常用的基本系列, 而 R80 则作为补充系列, 仅用于分级很细的特殊场合。

优先数系基本系列的常用值见表 1-1。优先数系补充系列的常用值见表 1-2。

优先数系是十进等比数列, 其中包含 10 的所有整数幂 (0.01、0.1、1、10、100 等)。只要知道一个十进段内的优先数值, 其他十进段内的数值就可由小数点的前后移位得到。

优先数系中的数值可方便地向两端延伸, 由表 1-1 中的数值, 使小数点前后移位, 便可以得到所有小于 1 和大于 10 的任意优先数。

优先数系的公比为 $q_r = \sqrt[r]{10}$ 。

表 1-1 优先数系基本系列的常用值 (摘自 GB/T 321—2005)

基本系列	1~10 的常用值										
R5	1.00	1.60	2.50	4.00	6.30	10.00					
R10	1.00	1.25	1.60	2.00	2.50	3.15	4.00	5.00	6.30	8.00	10.00
R20	1.00	1.12	1.25	1.40	1.60	1.80	2.00	2.24	2.50	2.80	
	3.15	3.55	4.00	4.50	5.00	5.60	6.30	7.10	8.00	9.00	10.00
R40	1.00	1.06	1.12	1.18	1.25	1.32	1.40	1.50	1.60	1.70	
	1.80	1.90	2.00	2.12	2.24	2.36	2.50	2.65	2.80	3.00	
	3.15	3.35	3.55	3.75	4.00	4.25	4.50	4.75	5.00	5.30	
	5.60	6.00	6.30	6.70	7.10	7.50	8.00	8.50	9.00	9.50	10.00

表 1-2 优先数系补充系列的常用值 (摘自 GB/T 321—2005)

R80 的常用值 (1~10)										
1.00	1.03	1.06	1.09	1.12	1.15	1.18	1.22	1.25	1.28	
1.32	1.36	1.40	1.45	1.50	1.55	1.60	1.65	1.70	1.75	
1.80	1.85	1.90	1.95	2.00	2.06	2.12	2.18	2.24	2.30	
2.36	2.43	2.50	2.58	2.65	2.72	2.80	2.90	3.00	3.07	
3.15	3.25	3.35	3.45	3.55	3.65	3.75	3.85	4.00	4.12	
4.25	4.37	4.50	4.62	4.75	4.87	5.00	5.15	5.30	5.45	
5.60	5.80	6.00	6.15	6.30	6.50	6.70	6.90	7.10	7.30	
7.50	7.75	8.00	8.25	8.50	8.75	9.00	9.25	9.50	9.75	10.00

优先数在同一系列中, 每隔 r 个数, 其值增加 10 倍。

这五种优先数系的公比分别用代号 q_5 、 q_{10} 、 q_{20} 、 q_{40} 、 q_{80} 表示, 下标 5、10、20、40、80 分别表示各系列中每个“十进段”被细分的段数。



基本系列 R5、R10、R20、R40 的公比分别为

$$q_5 = \sqrt[5]{10} \approx 1.5849 \approx 1.60$$

$$q_{10} = \sqrt[10]{10} \approx 1.2589 \approx 1.25$$

$$q_{20} = \sqrt[20]{10} \approx 1.1220 \approx 1.12$$

$$q_{40} = \sqrt[40]{10} \approx 1.0593 \approx 1.06$$

补充系列 R80 的公比为

$$q_{80} = \sqrt[80]{10} \approx 1.0292 \approx 1.03$$

1.3.2 优先数与优先数系的构成规律

优先数系中的任何一个项值均称为优先数。

优先数的理论值为 $(\sqrt[10]{10})^N$ ，其中 N 是任意整数。按照此式计算得到优先数的理论值，除 10 的整数幂外，大多为无理数，工程技术中不宜直接使用。

实际应用的数值都是经过化整处理后的近似值，根据取值的有效数字位数，优先数的近似值可以分为：计算值（取 5 位有效数字，供精确计算用）；常用值（即优先值，取 3 位有效数字，是经常使用的）；化整值（是将常用值化整处理后所得的数值，一般取 2 位有效数字）。

优先数系主要有以下规律。

(1) 任意相邻两项间的相对差近似不变（按理论值则相对差为恒定值）如 R5 系列约 60%，R10 系列约为 25%，R20 系列约为 12%，R40 系列约为 6%，R80 系列约为 3%，由表 1-1 和表 1-2 可以明显地看出这一点。

(2) 任意两项优先数计算后仍为优先数 任意两项的理论值经计算后仍为一个优先数的理论值。计算包括任意两项理论值的积或商，任意一项理论值的正、负整数乘方等。

(3) 优先数系具有相关性 优先数系的相关性表现为：在上一级优先数系中隔项取值，就得到下一系列的优先数系；反之，在下一系列中插入比例中项，就得到上一系列。

例如：在 R40 系列中隔项取值，就可得到 R20 系列；在 R10 系列中隔项取值，就能得到 R5 系列；又如，在 R5 系列中插入比例中项，就得 R10 系列；在 R20 系列中插入比例中项，就得 R40 系列。

这种相关性也表现在：R5 系列中的项值包含在 R10 系列中，R10 系列中的项值包含在 R20 系列中，R20 系列中的项值包含在 R40 系列中，R40 系列中的项值包含在 R80 系列中。

(4) 优先数系的派生系列 为了使优先数系具有更宽广的适应性，可以从基本系列中，每逢 p 项留取一个优先数，生成新的派生系列，以符号 Rr/p 表示。

例如：派生系列 R10/3，就是从基本系列 R10 中，自 1 以后每逢 3 项留取一个优先数而组成的，即 1.00，2.00，4.00，8.00，16.0，32.0，64.0 等。

1.3.3 优先数系的特点

优先数系作为数值标准化的重要内容，广泛应用于产品的各种技术参数，主要优点如下。

1. 国际统一的数值分级制，共同的技术基础

优先数系是国际统一的数值分级制，是各国共同采用的基础标准。它适用于不同领域各种技术参数的分级，为技术经济工作上的统一、简化以及产品参数的协调提供了共同的基础。

2. 数值分级合理

数系中各相邻项的相对差相等，即数系中数值间隔相对均匀。因而选用优先数系，技术参数的分布经济合理，能在产品品种规格数量与用户实际需求间达到理想的平衡。

3. 规律明确，利于数值的扩散

优先数系是等比数列，其各项的对数又构成等差数列；同时，任意两优先数理论值的积、商和任一项的整次幂仍为同系列的优先数。这些特点能方便设计计算，也有利于数值的计算。

4. 具有广泛的适应性

优先数系的项值可向两端无限延伸，所以优先数的范围是不受限制的。此外，还可采取派生系列的方法，给优先数系数值及数值间隔的选取带来更多的灵活性，也给不同的应用带来更多的适应性。

1.3.4 优先数系的选用规则

优先数系的应用很广泛，适用于各种尺寸、参数的系列化和质量指标的分级，对保证各种工业产品的品种、规格、系列的合理化分档和协调配套具有十分重要的意义。

选用基本系列时，应遵守先疏后密的规则，即按 R5、R10、R20、R40 的顺序依次选用；当基本系列不能满足要求时，可选用派生系列，注意应优先采用公比较大和延伸项含有项值 1 的派生系列；根据经济性和需要量等不同条件，还可分段选用最合适的系列，以复合系列的形式来组成最佳系列。

由于优先数系中包含有各种不同公比的系列，因而可以满足各种较密和较疏的分级要求。优先数系以其广泛的适用性，成为国际上通用的标准化数系。工程技术人员应在一切标准化领域中尽可能地采用优先数系，以达到对各种技术参数协调、简化和统一的目的，促进国民经济更快、更稳地发展。

1.4 零件的机械精度与加工误差

机器精度是由整机精度和各个组成零件的精度构成，零件的精度是整机精度的基础。影响零件精度的最基本因素是零件的尺寸、形状和位置以及表面粗糙度，因而，机械精度设计的主要内容包括尺寸公差、几何公差、表面质量等几个方面的选择与设计。机械精度控制是保证零件质量和整机精度的重要方式与手段。

零件加工时，任何一种加工方法都不可能把零件做得绝对准确，一批零件加工完成后的尺寸之间存在着不同程度的差异，同时，还存在着形状、位置以及表面粗糙度等多方面的差异。

由于加工工艺系统的误差和制造企业的不同，造成一批完工零件的尺寸各不相同，即使在完全相同的工艺条件下，也同样存在着尺寸的差异。所以说，加工误差是永远不能消除



的, 只能通过提高技术水平减少加工误差。从满足产品使用性能要求来看, 也不要求一批相同规格的零件尺寸完全相同, 而是根据使用要求的高低, 允许存在一定的误差。

加工误差包括以下几种:

1. 尺寸误差

尺寸误差是指一批零件的尺寸变动, 加工后零件的提取尺寸与理想尺寸之差, 如直径误差、孔间距误差等。

2. 形状误差

形状误差是指加工后零件的实际表面形状相对于其理想表面形状的差异, 如圆度误差、直线度误差等。

3. 位置误差

位置误差是指加工后零件的表面、轴线或对称平面之间的相互位置相对于其理想位置的差异, 如平行度误差、位置度误差、圆跳动误差等。

4. 表面粗糙度误差

表面粗糙度误差是指加工后零件表面上形成的较小间距和峰谷组成的微观几何形状误差。

知识拓展：质量管理体系简介

质量工程是以控制、保证、改进产品质量为目标, 把质量检测技术、质量管理理论及其实践与现代工程技术成果有机结合而开发、应用的综合工程技术。质量工程涉及质量设计、质量检验、质量控制和质量管理等众多内容。保证产品质量是要求零部件具有互换性的基本目的, 因此, 零部件的互换性与质量工程的联系紧密。从互换性生产的角度看, 质量工程中的全面质量管理、质量特性等特别值得关注。

ISO9000 质量管理体系是由国际标准化组织 (ISO) 制定, 是国际上通用的质量管理体系, 通常包括质量方针、目标以及质量策划、质量控制、质量保证和质量改进等内容, 现在执行的是 GB/T 19001—2008 《质量管理体系 要求》。

习题一

1-1 互换性的含义表现在哪些方面? 互换性有何作用?

1-2 互换性分为哪几类?

1-3 为何采用优先数系? 优先数系的基本系列有几种?

1-4 试写出下列基本系列和派生系列中自 10 开始的 5 个优先数的常用值: R5, R10/3, R20/3。

1-5 在尺寸公差表格中, 自 IT6 级开始各等级尺寸公差值的计算式分别为 $10i$ 、 $16i$ 、 $25i$ 、 $40i$ 、 $64i$ 、 $100i$ 、 $160i$ 等; 在螺纹公差表中, 自 3 级开始的等级系数为 0.50、0.63、0.80、1.00、1.25、1.60、2.00, 试判断它们各属于何种优先数的系列?

第2章

光滑圆柱体结合的极限与配合

教学导读

本章首先介绍了标准公差、基本偏差等基本术语，以此为基础介绍标准公差与基本偏差的标准规定及其计算方法、国家标准推荐的常用公差带与配合等，最后讲述了极限与配合的选择方法，此外还简要介绍了一般公差。知识拓展部分对大尺寸段与小尺寸段的极限与配合进行了简介。要求学生掌握的知识点为：标准公差等级划分、标准公差数值计算、公称尺寸段分段，基本偏差的划分与代号、孔与轴基本偏差的计算与换算、公差带和配合的表达、极限与配合的选择步骤与计算方法、未注尺寸的公差。其中孔与轴基本偏差的计算与换算、极限与配合的选择是本章的重点和难点。

2.1 概述

圆柱体结合是由孔与轴构成的、在机械制造中应用最广泛的一种结合。它对机械产品的使用性能和寿命有很大影响。光滑圆柱体结合的极限与配合是机械工业中重要的基础标准。它不仅适用于圆柱体内、外表面的结合，也适用于其他结合中由单一尺寸确定的部分，如键结合中键与键槽、花键结合中内花键与花键轴等。

“极限”主要反映机器零件使用要求与制造要求之间的矛盾；而“配合”则反映组成机器的零件之间的装配关系。极限与配合的标准化有利于机器的设计、制造、检测、使用和维修，有利于保证产品的精度、使用性能和寿命，也有利于刀具、量具、夹具和机床等工艺装备的标准化。极限与配合国家标准不仅是机械工业各部门进行产品设计、工艺设计和制定其他标准的基础，也是广泛组织协作和专业化生产的重要依据。该标准几乎涉及国民经济的各个部门，是特别重要的基础标准之一。

随着现代科学技术的飞速发展，产品加工精度和质量要求越来越高，为便于国际交流和采用国家标准的需要，我国参照国际标准（ISO）并结合实际生产状况颁布了一系列的国家标准，并对旧标准不断修订。新修订的孔、轴极限与配合国家标准主要由以下几部分组成：

GB/T 1800.1—2009《产品几何技术规范（GPS） 极限与配合 第1部分：公差、偏差和配合的基础》。

GB/T 1800.2—2009《产品几何技术规范（GPS） 极限与配合 第2部分：标准公差等级和孔、轴极限偏差表》。



GB/T 1801—2009《产品几何技术规范(GPS) 极限与配合 公差带和配合的选择》。

GB/T 1803—2003《极限与配合 尺寸至18mm 孔、轴公差带》。

GB/T 1804—2000《一般公差 未注公差的线性尺寸和角度尺寸的公差》。

2.2 极限与配合的基本术语及定义

2.2.1 孔、轴的定义

1. 孔

孔通常是指工件的圆柱形内表面,如图2-1所示齿轮、套筒、轴承等零件的圆孔;也包括由两平行平面或平行切面形成的非圆柱形内表面,如图2-1所示齿轮及轴上键槽的宽度表面。从装配关系上看,孔是包容面,孔的内部没有材料。随着工件表面余量的切除,孔的尺寸逐渐由小变大。

孔的公称尺寸用 D 表示,图2-2中标注的尺寸 D_1 、 D_2 、 \dots 、 D_6 所确定的表面都称为孔。

2. 轴

轴通常是指工件的圆柱形外表面,如图2-1所示轴、齿轮、套筒、轴承等零件的圆轴;也包括由两平行平面或平行切面形成的非圆柱形外表面,如图2-1所示平键的宽度表面。从装配关系上看,轴是被包容面,轴的内部有材料。随着工件表面余量的切除,轴的尺寸逐渐由大变小。

轴的公称尺寸用 d 表示,图2-2中标注的尺寸 d_1 、 d_2 、 \dots 、 d_4 所确定的表面都称为轴。



图2-1 轴及轴上零件

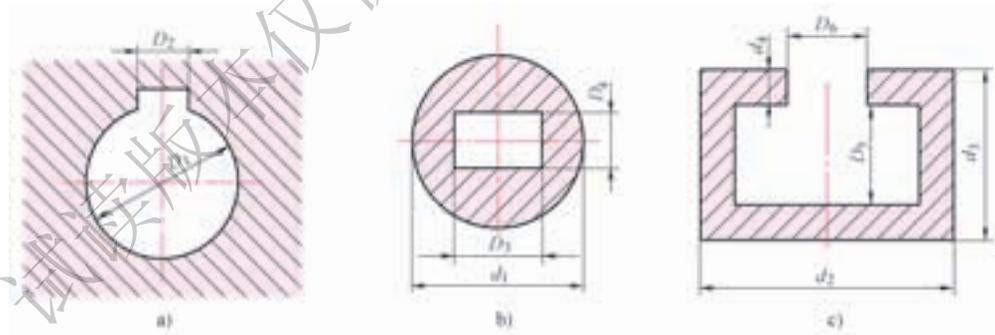


图2-2 孔和轴的示意图

2.2.2 有关尺寸的术语与定义

1. 尺寸

尺寸是指以特定单位表示线性值的数值,如长度、宽度、高度、半径、直径及中心距等。尺寸由数字和单位组成。机械制图中图样上的尺寸若以毫米(mm)为单位时,无须标注计量单位的符号或名称,若采用其他单位时必须注明相应的单位符号。

2. 公称尺寸

公称尺寸是由图样规范确定的理想形状要素的尺寸。

公称尺寸是设计者根据使用要求, 考虑零件的强度、刚度、结构和工艺等多种因素, 经过计算、设计给定的尺寸。

孔的公称尺寸用 D 表示, 轴的公称尺寸用 d 表示, 相配合的孔与轴的公称尺寸相同。

图 2-3 中的直径 $\phi 40\text{mm}$ 、 $\phi 20\text{mm}$ 及长度 60mm 都是公称尺寸。

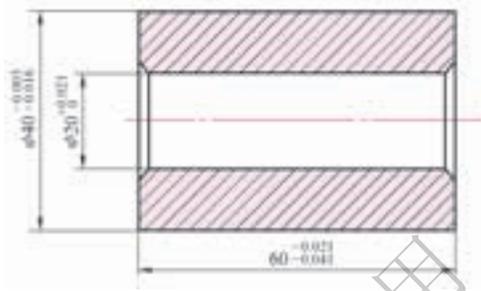


图 2-3 套筒图

公称尺寸应尽量采用 GB/T 2822—2005 中的标准尺寸, 10~100mm 尺寸范围的标准尺寸见表 2-1。选取标准尺寸可减少定值刀具、量具和夹具的规格和数量。公称尺寸是计算极限偏差、极限尺寸的起始尺寸。它只表示尺寸的基本大小, 并不是在实际加工中要求得到的尺寸。

表 2-1 10~100mm 尺寸范围的标准尺寸 (摘自 GB/T 2822—2005) (单位: mm)

R 常用值			R 化整值			R 常用值			R 化整值		
R10	R20	R40	R10	R20	R40	R10	R20	R40	R10	R20	R40
10.0	10.0 11.2		10	10 11		35.5	35.5 37.5			36	38
12.5	12.5 14.0	12.5 13.2 14.0 15.0	12	12 14 15	12 13 14 15	40.0	40.0 42.5 45.0 47.5	40	40	40 42 45 48	
16.0	16.0 18.0	16.0 17.0 18.0 19.0	16	16 18	16 17 18 19	50.0	50.0 53.0 56.0 60.0	50	50	50 53 56 60	
20.0	20.0 22.4	20.0 20.2 22.4 23.6	20	20 22	20 21 22 24	63.0	63.0 67.0 71.0 75.0	63	63	63 67 71 75	
25.0	25.0 28.0	25.0 26.5 28.0 30.0	25	25 28	25 26 28 30	80.0	80.0 85.0 90.0 95.0	80	80	80 85 90 95	
31.5	31.5	31.5 33.5	32	32	32 34	100.0	100.0 100.0	100	100	100	100

3. 局部尺寸

(1) 实际 (组成) 要素 实际 (组成) 要素是指由接近实际 (组成) 要素所限定的工件实际表面的组成要素部分。由于存在测量误差, 即使同一零件的相同部位用同一量具重复测量多次, 测量得到的实际 (组成) 要素的尺寸也不完全相同, 因此实际 (组成) 要素的尺寸并非尺寸的真值。

此外, 由于形状误差等因素影响, 零件同一表面不同部位的实际 (组成) 要素的尺寸



通常不相等, 在同一截面不同方向上的实际 (组成) 要素的尺寸也可能不相同, 如图 2-4 所示。

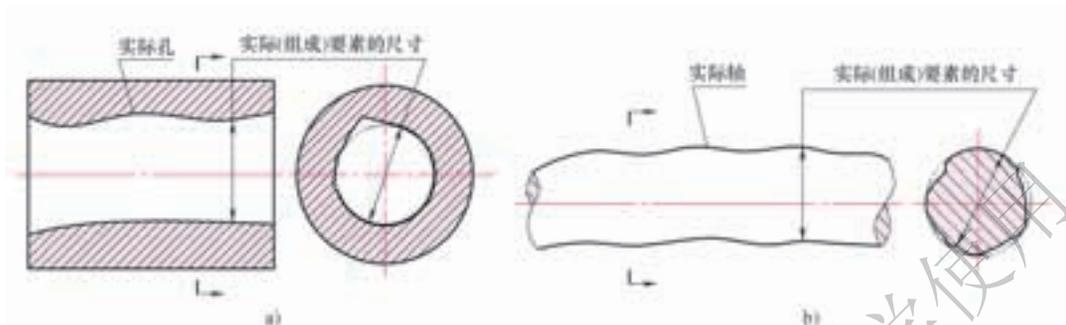


图 2-4 实际 (组成) 要素

a) 孔 b) 轴

(2) 提取 (组成) 要素的局部尺寸 提取 (组成) 要素是指按规定方法, 由实际 (组成) 要素提取有限数目的点形成实际 (组成) 要素的近似替代。一切提取 (组成) 要素上两对应点之间距离称为提取 (组成) 要素的局部尺寸。孔和轴提取 (组成) 要素的局部尺寸分别用 D_a 、 d_a 表示, 如图 2-5 所示。

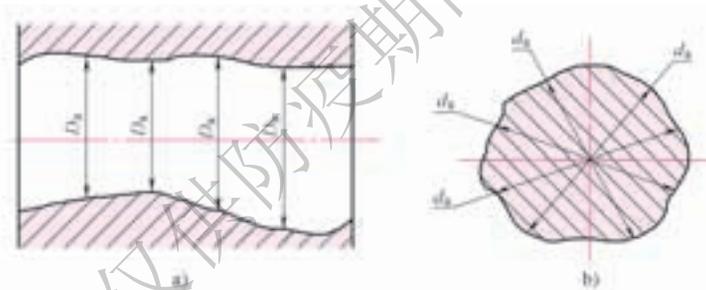


图 2-5 提取 (组成) 要素的局部尺寸

a) 孔 b) 轴

4. 极限尺寸

(1) 尺寸要素 尺寸要素是指由一定大小的线性尺寸或角度尺寸确定的几何形状。尺寸要素可以是圆柱形、球形、两平行对应面、圆锥形或楔形等。

(2) 极限尺寸 极限尺寸是指尺寸要素允许的尺寸的两个极值。极限尺寸是在设计确定公称尺寸的同时, 考虑加工的经济性并满足零件的使用要求确定的。它可能大于、等于或小于公称尺寸。

1) 上极限尺寸。上极限尺寸是指尺寸要素允许的最大尺寸。孔和轴的上极限尺寸分别用 D_{\max} 和 d_{\max} 表示。图 2-3 中孔、轴的上极限尺寸分别为 $\phi 20.021\text{mm}$ 、 $\phi 39.997\text{mm}$ 。

2) 下极限尺寸。下极限尺寸是指尺寸要素允许的最小尺寸。孔和轴的下极限尺寸分别用 D_{\min} 和 d_{\min} 表示。图 2-3 中孔、轴的下极限尺寸分别为 $\phi 20\text{mm}$ 、 $\phi 39.984\text{mm}$ 。

极限尺寸可限制提取 (组成) 要素的局部尺寸。若零件提取 (组成) 要素的局部尺寸小于或等于上极限尺寸, 大于或等于下极限尺寸, 表明零件合格, 即



孔	$D_{\min} \leq D_a \leq D_{\max}$
轴	$d_{\min} \leq d_a \leq d_{\max}$

2.2.3 有关偏差与公差术语与定义

1. 尺寸偏差

尺寸偏差简称为偏差，是指某一尺寸减去公称尺寸所得的代数差，因此偏差可以是正值、负值或零，在进行计算时，除零外必须带有正号或负号。

1) 上极限偏差。上极限偏差是指上极限尺寸减去公称尺寸所得的代数差。

孔和轴的上极限偏差分别用 ES 、 es 表示，其计算公式为

$$ES = D_{\max} - D \quad (2-1)$$

$$es = d_{\max} - d \quad (2-2)$$

2) 下极限偏差。下极限偏差是指下极限尺寸减去公称尺寸所得的代数差。

孔和轴的下极限偏差分别用 EI 、 ei 表示，其计算公式为

$$EI = D_{\min} - D \quad (2-3)$$

$$ei = d_{\min} - d \quad (2-4)$$

如图 2-3 所示，上、下极限偏差均标注在公称尺寸的右侧。

图 2-3 中孔的上、下极限偏差分别为 $+21\mu\text{m}$ 、 $0\mu\text{m}$ ；轴的上、下极限偏差分别为 $-3\mu\text{m}$ 、 $-16\mu\text{m}$ 。

3) 实际偏差。实际偏差是指提取（组成）要素的局部尺寸减去公称尺寸所得的代数差。

孔和轴的实际偏差分别用 E_a 、 e_a 表示，其计算公式为

$$E_a = D_a - D \quad (2-5)$$

$$e_a = d_a - d \quad (2-6)$$

实际偏差应限制在极限偏差范围内，也可达到极限偏差。孔或轴实际偏差的合格条件为

$$\text{孔} \quad EI \leq E_a \leq ES$$

$$\text{轴} \quad ei \leq e_a \leq es$$

2. 尺寸公差

尺寸公差是尺寸允许的变动量，简称为公差。

尺寸公差等于上极限尺寸减下极限尺寸之差，也等于上极限偏差减下极限偏差之差。

公差是一个没有符号的绝对值，没有正、负值之分，也不可能为零（公差为零，零件无法加工）。

孔、轴的尺寸公差分别用 T_D 、 T_d 表示。

尺寸公差、极限尺寸和极限偏差的关系为

$$T_D = D_{\max} - D_{\min} = ES - EI \quad (2-7)$$

$$T_d = d_{\max} - d_{\min} = es - ei \quad (2-8)$$

图 2-6 中表示出孔、轴的公称尺寸、极限尺寸和极限偏差、公差的关系。

3. 极限偏差与公差的区别

1) 从数值上看，极限偏差是代数值，可以为正值、负值或零；公差一定为正值。

2) 从工艺上看，极限偏差限制实际偏差，其大小表示零件实际偏差允许变动的极端



值，是判断零件尺寸是否合格的依据；公差表示零件尺寸允许的变动范围，影响制造精度，反映零件的加工难易程度。

3) 从作用上看，极限偏差反映公差带位置，影响配合的松紧程度；公差等级代表公差带大小，影响零件的配合精度。

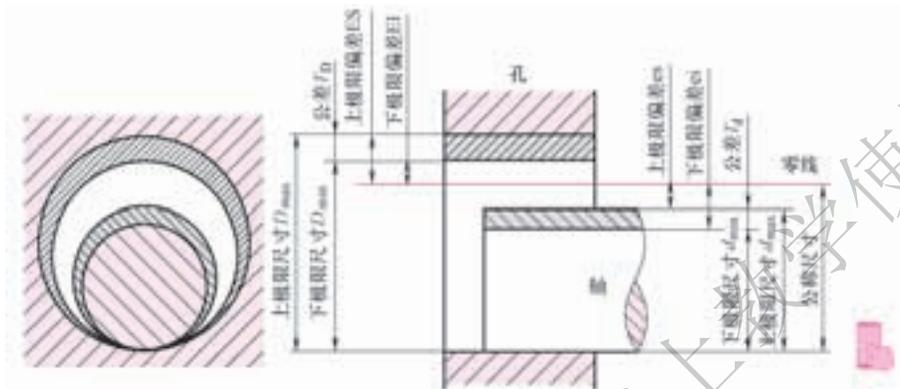


图 2-6 极限与配合示意图

4. 公差带与公差带图

1) 公差带图。由于公差或偏差的数值比公称尺寸的数值小得多，在图中不使用同一比例表示，同时为了简化，只画出放大的孔、轴公差区域和位置，采用这种表达方法的图形称为公差带图，如图 2-7 所示。公差带图中尺寸以 mm 为单位，偏差和公差习惯上以 μm 为单位（只标注数值，不标注单位），也可以用 mm 为单位。公差带图由零线、公称尺寸和公差带组成。

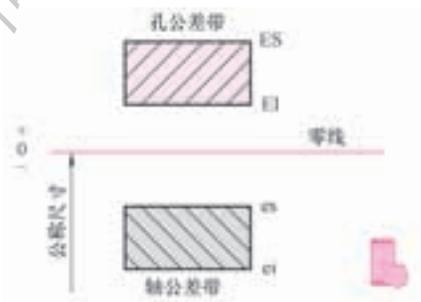


图 2-7 公差带图

2) 零线。在公差带图中，零线是表示公称尺寸的一条直线，以其为基准确定偏差和公差。通常，零线沿水平方向绘制，偏差位于零线上方为正，位于零线下方为负，位于零线上的偏差为零。

3) 公差带。在公差带图中，代表上、下极限偏差或上、下极限尺寸的两条直线所限定的区域称为公差带。公差带由公差带大小和公差带位置两个要素组成，公差带大小由标准公差确定，公差带位置由基本偏差确定。

公差带在零线垂直方向上的宽度代表公差值，沿零线方向的长度可适当选取。为清晰醒目，将公差带画成封闭线框。在绘制公差带图时，应以不同的方式来区分孔、轴公差带，如图 2-7 所示。

4) 基本偏差。基本偏差是指国家标准规定的，用来确定公差带相对零线位置的那个极限偏差，可以是上极限偏差或下极限偏差，一般为靠近零线或位于零线的那个极限偏差。如图 2-7 所示，孔的基本偏差为下极限偏差，轴的基本偏差为上极限偏差。

5) 标准公差。标准公差是指国家标准中规定的，用以确定公差带大小的任一公差。

2.2.4 有关配合的术语与定义

1. 配合

配合是指公称尺寸相同、相互结合的孔和轴公差带之间的相互位置关系。

2. 间隙或过盈

孔的尺寸减去相配合的轴的尺寸所得的代数差，差值为正时，称为间隙，用 X 表示；差值为负时，称为过盈，用 Y 表示。

3. 配合种类

根据零件配合松紧度的不同，即组成配合的孔与轴的公差带位置不同，将配合分为间隙配合、过盈配合和过渡配合三种。

1) 间隙配合。间隙配合是指具有最小间隙且大于或等于零的配合。

此时，孔的公差带全在轴公差带之上，如图 2-8 所示。

孔、轴极限尺寸或极限偏差的关系为 $D_{\min} \geq d_{\max}$ 或 $EI \geq es$ 。

由于孔和轴有各自的尺寸公差带，因此装配后孔、轴的间隙随孔、轴尺寸的变化而变化。

孔的上极限尺寸（或孔的上极限偏差）减去轴的下极限尺寸（或轴的下极限偏差）所得的代数差为最大间隙，用 X_{\max} 表示。

孔的下极限尺寸（或孔的下极限偏差）减去轴的上极限尺寸（或轴的上极限偏差）所得的代数差为最小间隙，用 X_{\min} 表示。

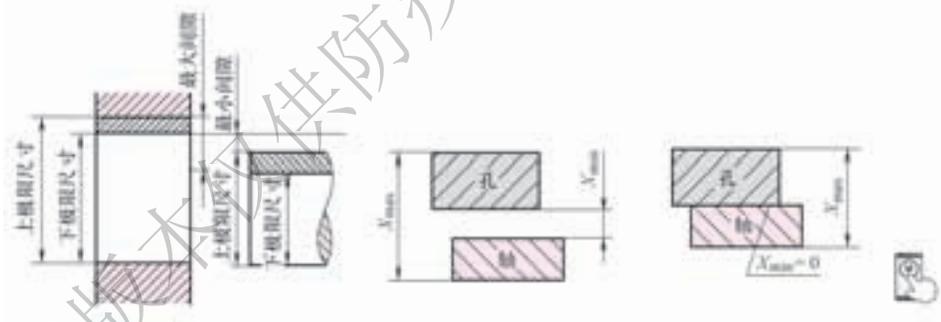


图 2-8 间隙配合

$$X_{\max} = D_{\max} - d_{\min} = ES - ei \quad (2-9)$$

$$X_{\min} = D_{\min} - d_{\max} = EI - es \quad (2-10)$$

间隙配合的平均松紧程度有时也用平均间隙来衡量，最大和最小间隙的平均值称为平均间隙，用 X_{av} 表示。

$$X_{\text{av}} = \frac{X_{\max} + X_{\min}}{2} \quad (2-11)$$

间隙数值的前面必须带有正号（除零外）。

2) 过盈配合。过盈配合是指具有最小过盈且等于或小于零的配合。

此时，孔的公差带全在轴的公差带之下，如图 2-9 所示。



孔、轴极限尺寸或极限偏差的关系为 $D_{\max} \leq d_{\min}$ 或 $ES \leq ei$ 。

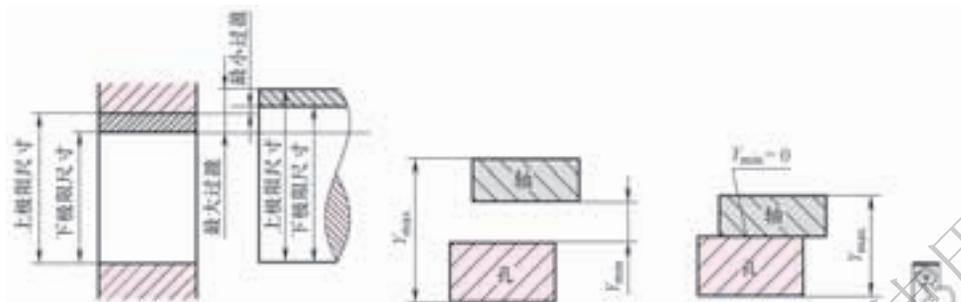


图 2-9 过盈配合

同理，装配后孔、轴的过盈也随孔、轴尺寸的变化而变化。孔的下极限尺寸（或孔的下极限偏差）减去轴的上极限尺寸（或轴的上极限偏差）所得的代数差为最大过盈，用 Y_{\max} 表示；孔的上极限尺寸（或孔的上极限偏差）减去轴的下极限尺寸（或轴的下极限偏差）所得的代数差为最小过盈，用 Y_{\min} 表示。

$$Y_{\max} = D_{\min} - d_{\max} = EI - es \quad (2-12)$$

$$Y_{\min} = D_{\max} - d_{\min} = ES - ei \quad (2-13)$$

过盈配合的平均松紧程度有时也用平均过盈来衡量，最大过盈和最小过盈的平均值称为平均过盈，用 Y_{av} 表示。

$$Y_{\text{av}} = \frac{Y_{\max} + Y_{\min}}{2} \quad (2-14)$$

过盈数值的前面必须带有负号（除零外）。

3) 过渡配合。过渡配合是指可能具有间隙或过盈的配合。

此时，孔的公差带与轴的公差带相互交叠，如图 2-10 所示。

孔、轴极限尺寸或极限偏差的关系为 $D_{\max} > d_{\min}$ 且 $D_{\min} < d_{\max}$ 或 $ES > ei$ 且 $EI < es$ 。

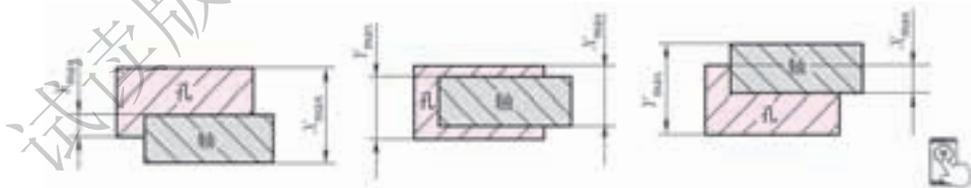


图 2-10 过渡配合

在过渡配合中，装配后孔、轴的间隙或过盈也是变化的。最大间隙 X_{\max} 和最大过盈 Y_{\max} 分别按式 (2-9) 和式 (2-12) 计算。

最大间隙和最大过盈的平均值称为平均间隙（或平均过盈），用 X_{av} （或 Y_{av} ）表示。

$$X_{\text{av}} (\text{或 } Y_{\text{av}}) = \frac{X_{\max} + Y_{\max}}{2} \quad (2-15)$$

按式(2-15)计算所得的数值为正值时是平均间隙,为负值时是平均过盈。

由于机器中零件的工作情况、结构设计和使用要求不同,因此相结合零件的配合性质也不一样。装配时要得到合适的松紧程度,就需要由各种不同的孔、轴公差带来实现。图2-11、图2-12所示为二级圆柱齿轮减速器三维结构图及其低速级齿轮轴系结构图,其中起轴向定位作用的轴套孔与轴颈的配合、轴承端盖定位圆柱面与壳体孔的配合较松,装拆方便,允许的配合间隙较大,应采用间隙配合;轴与齿轮孔处的配合要紧固,两者之间无相对运动,能传递载荷和转矩,而且不经常拆卸,应采用过盈配合;轴与滚动轴承内圈处的配合定心精度要求较高,配合虽然紧固,但装拆较易,此处的配合比轴与齿轮孔处的配合要松一些。



图 2-11 二级圆柱齿轮减速器三维结构图



图 2-12 低速级齿轮轴系结构图

4. 配合公差及配合公差带图

1) 配合公差。配合公差是指组成配合的孔与轴的公差之和,用 T_f 表示。

它是允许间隙或过盈的变动量,是一个没有符号的绝对值。

在间隙配合中,配合公差等于最大间隙与最小间隙之差的绝对值,表示间隙的允许变动量,即

$$T_f = |X_{\max} - X_{\min}| = T_D + T_d \quad (2-16)$$

在过盈配合中,配合公差等于最大过盈与最小过盈之差的绝对值,表示过盈的允许变动量,即

$$T_f = |Y_{\min} - Y_{\max}| = T_D + T_d \quad (2-17)$$

在过渡配合中,配合公差等于最大间隙与最大过盈之差的绝对值,即

$$T_f = |X_{\max} - Y_{\max}| = T_D + T_d \quad (2-18)$$

式(2-16)~式(2-18)表明,配合公差越小,则满足此要求的孔、轴公差就应越小,孔、轴的尺寸精度要求就越高,这将导致制造难度增加、成本提高。因此设计时应综合考虑使用要求和加工精度两个因素,进行合理选取,从而提高综合技术经济效益。

2) 配合公差带图。配合公差带图是用来直观地表达孔、轴配合的松紧程度及其变动情



况的图形。

在配合公差带图中，横坐标为零线，表示零间隙或零过盈。

零线上方的纵坐标为正值，代表间隙。

零线下方的纵坐标为负值，代表过盈。

配合公差带两条横线上的坐标值代表极限间隙或极限过盈，它反映配合的松紧程度；两条横线之间的距离为配合公差，它反映配合的松紧变化程度，如图 2-13 所示。



图 2-13 配合公差带图

例 2-1 求下列三组配合中孔、轴的公称尺寸、极限尺寸、公差、极限间隙或极限过盈、平均间隙或平均过盈及配合公差，指出其配合种类，并画出孔、轴的公差带图和配合公差带图。

① 孔 $\phi 30^{+0.021}_0$ mm 与轴 $\phi 30^{-0.020}_{-0.033}$ mm 相配合。

② 孔 $\phi 30^{+0.021}_0$ mm 与轴 $\phi 30^{+0.021}_{+0.008}$ mm 相配合。

③ 孔 $\phi 30^{+0.021}_0$ mm 与轴 $\phi 30^{+0.048}_{+0.035}$ mm 相配合。

解 根据题目要求，计算得到的各项参数见表 2-2，

图 2-14 和图 2-15 所示为三组配合孔、轴的公差带图和配合公差带图。



图 2-14 三组配合孔、轴的公差带图

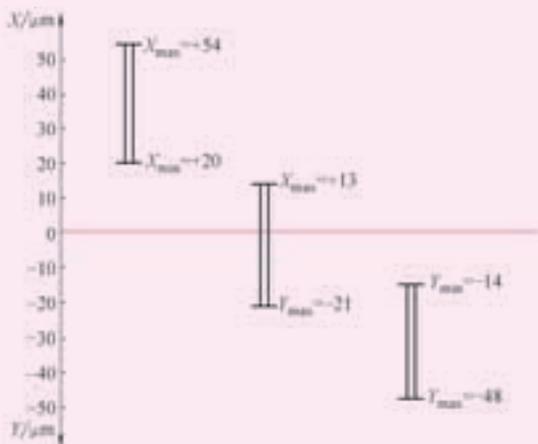


图 2-15 三组配合孔、轴的配合公差带图

表 2-2 例 2-1 计算结果表

(单位: mm)

所求参数	相配合的孔、轴	①		②		③	
		孔	轴	孔	轴	孔	轴
公称尺寸		30	30	30	30	30	30
极限尺寸	$D_{\max}(d_{\max})$	30.021	29.980	30.021	30.021	30.021	30.048
	$D_{\min}(d_{\min})$	30.000	29.967	30.000	30.008	30.000	30.035
极限偏差	ES(es)	+0.021	-0.020	+0.021	+0.021	+0.021	+0.048
	EI(ei)	0	-0.033	0	+0.008	0	+0.035
公差 $T_D(T_d)$		0.021	0.013	0.021	0.013	0.021	0.013
极限间隙	X_{\max}	+0.054		+0.013			
	X_{\min}	+0.020					
极限过盈	Y_{\max}			-0.021		-0.048	
	Y_{\min}					-0.014	
平均间隙或 平均过盈	X_{av}	+0.037					
	Y_{av}			-0.004		-0.031	
配合公差 T_f		0.034		0.034		0.034	
配合种类		间隙配合		过渡配合		过盈配合	

5. 配合制

配合制是指用标准化的孔、轴公差带（即同一极限制的孔和轴）组成各种配合要求的一种配合制度。

为了设计、制造方便及获得最佳的技术经济效益，无需将孔、轴公差带同时变动，只要固定一个公差带位置，变更另一个公差带位置即可满足各种配合要求。

GB/T 1800.1—2009 规定了两种配合制，即基孔制配合和基轴制配合。

1) 基孔制配合。基孔制配合是指基本偏差为一定的孔的公差带，与不同基本偏差的轴的公差带形成各种配合的一种制度，如图 2-16a 所示。

在基孔制配合中，孔为基准孔，其下极限尺寸与公称尺寸相等，下极限偏差（基本偏差）为零；上极限偏差为正值，其公差带偏置在零线上方。

2) 基轴制配合。基轴制配合是指基本偏差为一定的轴的公差带，与不同基本偏差的孔的公差带形成各种配合的一种制度，如图 2-16b 所示。

在基轴制配合中，轴为基准轴，其上极限尺寸与公称尺寸相等，上极限偏差（基本偏差）为零；下极限偏差为负值，其公差带偏置在零线下方。

基准孔或基准轴的另一极限偏差值随其公差带的大小而变化。根据孔、轴公差带相对位置的不同，两种配合制都可形成不同松紧程度的间隙配合、过渡配合和过盈配合。

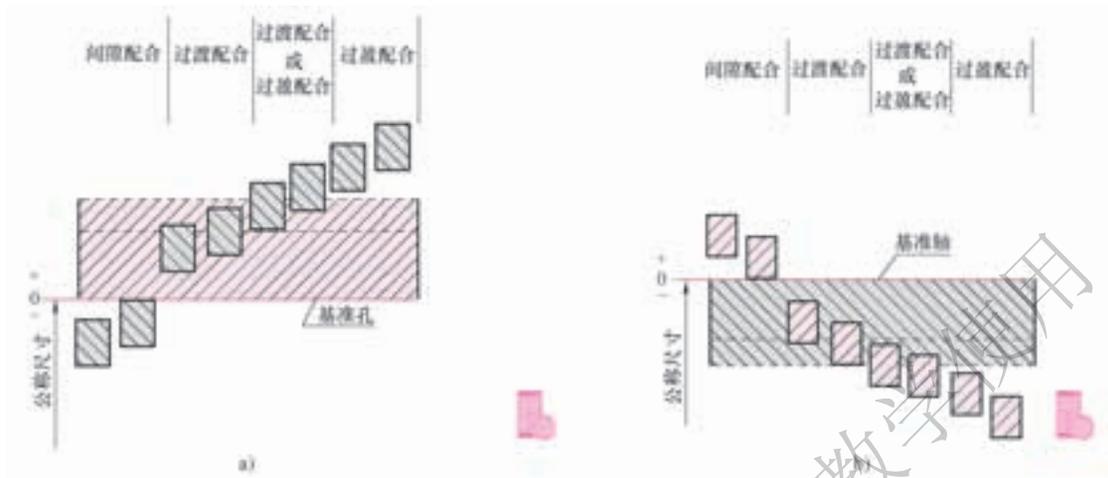


图 2-16 基孔制配合与基轴制配合

a) 基孔制配合 b) 基轴制配合

2.3 极限与配合国家标准

各种配合是由孔与轴公差带之间的位置关系决定的，而孔、轴公差带是由其大小和位置决定的，公差带的大小由公差确定，公差带的位置由基本偏差确定。为了使公差带的大小和位置标准化，实现互换性并满足各种使用要求，极限与配合国家标准规定了孔和轴的标准公差系列与基本偏差系列。

2.3.1 标准公差

标准公差是极限与配合国家标准规定的、用以确定公差带大小的任一公差，其符号为“IT”。它的数值取决于孔或轴的公称尺寸和标准公差等级。

1. 标准公差因子

标准公差因子是确定标准公差值的基本单位，是制定标准公差数值系列的基础。

利用统计法在生产实践中可发现：在相同的加工条件下，公称尺寸不同的孔或轴加工后产生的加工误差不相同，而且误差的大小无法比较。在尺寸较小时加工误差与公称尺寸呈立方抛物线关系，在尺寸较大时接近线性关系。

由于误差是由公差来控制，因此标准公差的数值不仅与标准公差等级的高低有关，而且与公称尺寸的大小有关，这种关系可以用标准公差因子的形式来表示。标准公差因子是公称尺寸的函数。

1) 当公称尺寸 $\leq 500\text{mm}$ 时，标准公差因子 i (单位为 μm) 的计算公式为

$$i = 0.45 \sqrt[3]{D} + 0.001D \quad (2-19)$$

式中， D 是公称尺寸分段的几何平均值 (mm)。

式(2-19)等号右边的第一项主要反映加工误差与公称尺寸呈立方抛物线关系,第二项反映了由温度变化引起的测量误差,该测量误差与公称尺寸呈线性关系。随着公称尺寸的增大,第二项的影响效果越来越显著。

2) 当公称尺寸 $>500\sim 3150\text{mm}$ 时,标准公差因子 I (单位为 μm)的计算公式为

$$I = 0.004D + 2.1 \quad (2-20)$$

当公称尺寸 $>3150\text{mm}$ 时,按式(2-20)来计算标准公差,也不能完全反映实际误差的分布规律。但目前尚未确定出更合理的计算公式,只能暂时按直线关系式计算。

2. 标准公差等级

公差等级是指确定尺寸精确程度的等级,其代号用IT(ISO Tolerance)和阿拉伯数字表示。在极限与配合制中,同一公差等级对所有公称尺寸的一组公差被认为具有同等精确程度。

为满足生产使用要求,国家标准对公称尺寸 $\leq 500\text{mm}$ 的孔、轴规定了20个标准公差等级,其代号分别为IT01、IT0、IT1、IT2、…、IT18,从IT01到IT18等级依次降低,而相应的标准公差数值依次增大。

3. 标准公差数值的计算

在公称尺寸 $\leq 500\text{mm}$ 的常用尺寸范围内,标准公差数值计算公式见表2-3;公称尺寸 $> 500\sim 3150\text{mm}$ 的标准公差数值计算公式见表2-4。

表 2-3 公称尺寸 $\leq 500\text{mm}$ 的标准公差数值计算公式

标准公差等级	计算公式	标准公差等级	计算公式	标准公差等级	计算公式
IT01	$0.3 + 0.008D$	IT5	$7i$	IT12	$160i$
IT0	$0.5 + 0.012D$	IT6	$10i$	IT13	$250i$
IT1	$0.8 + 0.020D$	IT7	$16i$	IT14	$400i$
IT2	$(IT1) \times (IT5/IT1)^{1/4}$	IT8	$25i$	IT15	$640i$
IT3	$(IT1) \times (IT5/IT1)^{1/2}$	IT9	$40i$	IT16	$1000i$
IT4	$(IT1) \times (IT5/IT1)^{3/4}$	IT10	$64i$	IT17	$1600i$
		IT11	$100i$	IT18	$2500i$

表 2-4 公称尺寸 $500\sim 3150\text{mm}$ 的标准公差数值计算公式

标准公差等级	计算公式	标准公差等级	计算公式	标准公差等级	计算公式
IT1	$2I$	IT7	$16I$	IT13	$250I$
IT2	$2.7I$	IT8	$25I$	IT14	$400I$
IT3	$3.7I$	IT9	$40I$	IT15	$640I$
IT4	$5I$	IT10	$64I$	IT16	$1000I$
IT5	$7I$	IT11	$100I$	IT17	$1600I$
IT6	$10I$	IT12	$160I$	IT18	$2500I$



由表 2-3 和表 2-4 可知,公差等级 IT5~IT18 的标准公差数值是由公差等级系数和标准公差因子的乘积决定的,其数值 IT 可表示为

$$IT = ai \text{ 或 } IT = aI \quad (2-21)$$

式中, a 是标准公差等级系数。

a 采用 R5 系列中的优先数,公比 $q = \sqrt[5]{10} \approx 1.6$ 。从 IT6 级开始,每增加 5 个等级, a 值增大到 10 倍。

在常用尺寸段范围内, IT01、IT0、IT1 三个高公差等级的标准公差数值主要考虑测量误差的影响,因此其标准公差数值与公称尺寸呈线性关系,且三个标准公差等级之间的常数和系数均采用优先数系的派生系列 R10/2 中的优先数。IT2~IT4 的标准公差数值大致按公比 $q = (IT5/IT1)^{1/4}$ 的等比数列递增。

4. 公称尺寸分段

根据标准公差数值计算公式,每一个公称尺寸都对应一个标准公差数值,这将导致公称尺寸数目众多、标准公差数值表庞大复杂,在生产实际中使用起来很不方便,同时不利于公差数值的标准化和系列化。而且当公称尺寸相近时,同一公差等级的公差数值相差很小。因此,为了简化标准公差数值表、统一公差数值,国家标准将公称尺寸分成若干段,具体情况见表 2-5。

公称尺寸分为主段落和中间段落。在标准公差表格中,一般使用主段落,对过盈或间隙比较敏感的一些配合,使用分段比较密的中间段落。

标准公差数值计算公式中的公称尺寸 D 应按所属尺寸分段 ($>D_1 \sim D_2$) 内首、尾两尺寸的几何平均值 $D = \sqrt{D_1 D_2}$ 代入计算。

但对于 $\leq 3\text{mm}$ 的公称尺寸段,其几何平均值为 $D = \sqrt{1 \times 3} \text{mm} = 1.732\text{mm}$ 。

按几何平均值计算出公差数值,再把尾数化整,即得出标准公差数值,见表 2-6。实际使用时一般用查表法确定标准公差数值。由表 2-6 可知,在同一个尺寸段中,标准公差等级越低,标准公差数值就越大,则尺寸精度越低。

例 2-2 求公称尺寸为 20mm,公差等级为 IT6、IT7 的标准公差数值。

解 公称尺寸为 20mm,属于 18~30mm 的尺寸段。这一尺寸段的几何平均值 D 和标准公差因子 i 分别由下式计算得到。

$$D = \sqrt{18 \times 30} \text{mm} \approx 23.24\text{mm}$$

$$i = 0.45 \sqrt[3]{D} + 0.001D = (0.45 \sqrt[3]{23.24} + 0.001 \times 23.24) \mu\text{m} = 1.31 \mu\text{m}$$

查表 2-3 可得

$$IT6 = 10i = 10 \times 1.31 \mu\text{m} \approx 13 \mu\text{m}$$

$$IT7 = 16i = 16 \times 1.31 \mu\text{m} \approx 21 \mu\text{m}$$



表 2-5 公称尺寸分段

(单位: mm)

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
—	3	无细分段		250	315	250	280
3	6			280	315		
6	10			315	355		
10	18	10	14	400	500	355	400
		14	18			400	450
18	30	18	24	500	630	450	500
		24	30			500	560
30	50	30	40	630	800	560	630
		40	50			630	710
50	80	50	65	800	1000	710	800
		65	80			800	900
80	120	80	100	1000	1250	900	1000
		100	120			1000	1120
120	180	120	140	1250	1600	1120	1250
		140	160			1250	1400
		160	180			1400	1600
180	250			1600	2000	1600	1800
						1800	2000
						2000	2240
						2240	2500
						2500	2800
				2000	2500	2500	2800
				2500	3150	2800	3150

2.3.2 基本偏差

基本偏差是用来确定公差带相对零线位置的上极限偏差或下极限偏差。它是公差带位置标准化的唯一指标。

1. 基本偏差代号

为满足各种不同配合的需要,国家标准对孔、轴各规定了 28 个公差带位置,分别由 28 个基本偏差代号来确定。图 2-17 所示为基本偏差系列。

基本偏差代号用拉丁字母表示,大写字母代表孔,小写字母代表轴。在 26 个字母中,除去易与其他符号混淆的 5 个字母 I(i)、L(l)、O(o)、Q(q)、W(w),再加上 7 个双字母 CD(cd)、EF(ef)、FG(fg)、JS(js)、ZA(za)、ZB(zb)、ZC(zc),共 28 个字母作为孔和轴的基本偏差代号。其中,JS、js 将逐渐代替近似对称的基本偏差 J 和 j。因此,在国家标准中,孔仅保留 J6、J7 和 J8,轴仅保留 j5、j6、j7 和 j8。除 JS 和 js 外,其余基本偏差均与公差等级无关。



表 2-6 标准公差数值 (摘自 GB/T 1800.1—2009)

公称尺寸/mm		标准公差等级																			
		IT01	IT0	IT1	IT2	IT3	IT4	IT5	IT6	IT7	IT8	IT9	IT10	IT11	IT12	IT13	IT14	IT15	IT16	IT17	IT18
大于		μm																			
至		mm																			
—	3	0.3	0.5	0.8	1.2	2	3	4	6	10	14	25	40	60	0.1	0.14	0.25	0.40	0.60	1.0	1.4
3	6	0.4	0.6	1	1.5	2.5	4	5	8	12	18	30	48	75	0.12	0.18	0.30	0.48	0.75	1.2	1.8
6	10	0.4	0.6	1	1.5	2.5	4	6	9	15	22	36	58	90	0.15	0.22	0.36	0.58	0.90	1.5	2.2
10	18	0.5	0.8	1.2	2	3	5	8	11	18	27	43	70	110	0.18	0.27	0.43	0.70	1.10	1.8	2.7
18	30	0.6	1	1.5	2.5	4	6	9	13	21	33	52	84	130	0.21	0.33	0.52	0.84	1.30	2.1	3.3
30	50	0.6	1	1.5	2.5	4	7	11	16	25	39	62	100	160	0.25	0.39	0.62	1.00	1.60	2.5	3.9
50	80	0.8	1.2	2	3	5	8	13	19	30	46	74	120	190	0.3	0.46	0.74	1.20	1.90	3.0	4.6
80	120	1	1.5	2.5	4	6	10	15	22	35	54	87	140	220	0.35	0.54	0.87	1.40	2.20	3.5	5.4
120	180	1.2	2	3.5	5	8	12	18	25	40	63	100	160	250	0.4	0.63	1.00	1.60	2.50	4.0	6.3
180	250	2	3	4.5	7	10	14	20	29	46	72	115	185	290	0.46	0.72	1.15	1.85	2.90	4.6	7.2
250	315	2.5	4	6	8	12	16	23	32	52	81	130	210	320	0.52	0.81	1.30	2.10	3.20	5.2	8.1
315	400	3	5	7	9	13	18	25	36	57	89	140	230	360	0.57	0.89	1.40	2.30	3.60	5.7	8.9
400	500	4	6	8	10	15	20	27	40	63	97	155	250	400	0.63	0.97	1.55	2.50	4.00	6.3	9.7
500	630	—	—	9	11	16	22	32	44	70	110	175	280	440	0.7	1.10	1.75	2.8	4.4	7.0	11.0
630	800	—	—	10	13	18	25	36	50	80	125	200	320	500	0.8	1.25	2.0	3.2	5.0	8.0	12.5
800	1000	—	—	11	15	21	28	40	56	90	140	230	360	560	0.9	1.40	2.3	3.6	5.6	9.0	14.0
1000	1250	—	—	13	18	24	33	47	66	105	165	260	420	660	1.05	1.65	2.6	4.2	6.6	10.5	16.5
1250	1600	—	—	15	21	29	39	55	78	125	195	310	500	780	1.25	1.95	3.1	5.0	7.8	12.5	19.5
1600	2000	—	—	18	25	35	46	65	92	150	230	370	600	920	1.5	2.30	3.7	6.0	9.2	15.0	23.0
2000	2500	—	—	22	30	41	55	78	110	175	280	440	700	1100	1.75	2.80	4.4	7.0	11.0	17.5	28.0
2500	3150	—	—	26	36	50	68	96	135	210	330	540	860	1350	2.1	3.30	5.4	8.6	13.5	21.0	33.0

注: 1. 公称尺寸大于 500mm 的 IT1~IT5 的标准公差数值为试行的。

2. 公称尺寸小于或等于 1mm, 无 IT14~IT18。

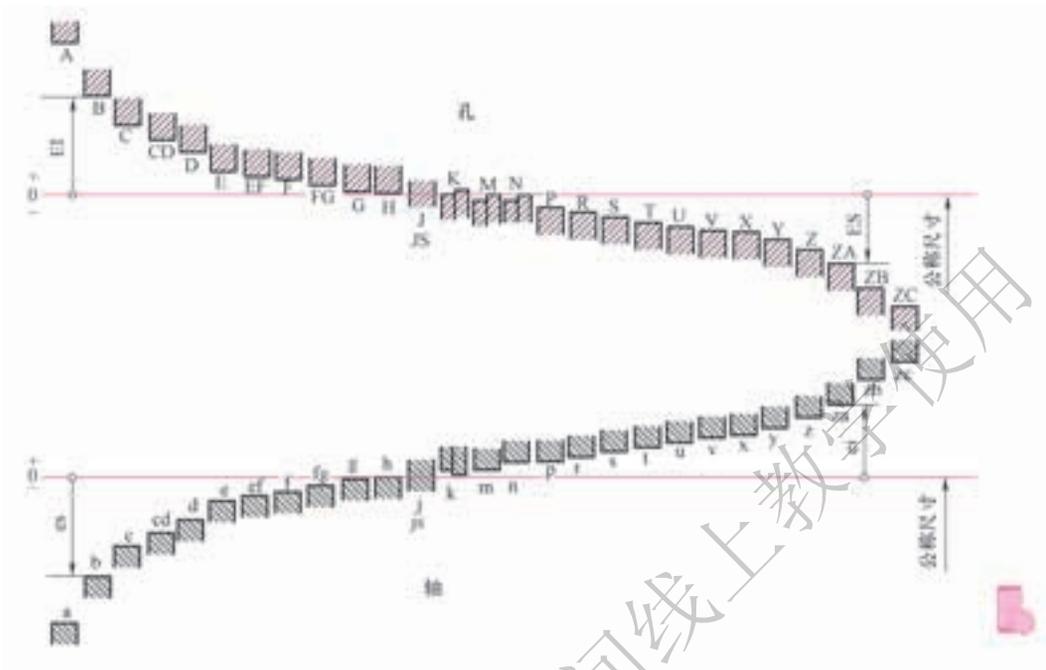


图 2-17 基本偏差系列

2. 基本偏差系列

图 2-17 所示为公称尺寸相同的 28 种孔和轴基本偏差相对零线的位置，其在图中具有倒影关系。基本偏差系列各公差带只画出一端，“开口”的另一端未画出，因为它由公差等级来确定，即由公差等级确定公差带的大小。

(1) 轴的基本偏差系列 由图 2-17 可以看出轴的基本偏差具有以下特点。

1) 代号为 a~g 的基本偏差为上极限偏差 es ，其值为负，绝对值逐渐减小。

2) 代号为 h 的基本偏差为上极限偏差 es ，并且 $es=0$ 。它是基轴制配合中基准轴的基本偏差代号。

3) 基本偏差代号为 js 的公差带相对于零线对称分布，基本偏差可取上极限偏差 $es=+IT/2$ ，也可取下极限偏差 $ei=-IT/2$ 。

4) 代号为 j~zc 的基本偏差为下极限偏差 ei ，除 j 外其余皆为正值，并且基本偏差数值逐渐增大。

(2) 孔的基本偏差系列 由图 2-17 可以看出孔的基本偏差具有以下特点。

1) 代号为 A~G 的基本偏差为下极限偏差 EI ，其值为正，基本偏差数值逐渐减小。

2) 代号为 H 的基本偏差为下极限偏差 EI ，并且 $EI=0$ 。它是基孔制配合中基准孔的基本偏差代号。

3) 基本偏差代号为 JS 的公差带相对于零线对称分布，基本偏差可取上极限偏差 $ES=+IT/2$ ，也可取下极限偏差 $EI=-IT/2$ 。

4) 代号为 J~ZC 的基本偏差为上极限偏差 ES ，除 J、K 外其余皆为负值，且绝对值逐渐增大。



3. 轴的基本偏差数值的确定

轴的基本偏差数值是以基孔制为基础, 根据各种配合要求, 在生产实践和大量试验的基础上, 依据统计分析结果整理出一系列公式而计算出来的。

轴的基本偏差数值计算公式见表 2-7。

表 2-7 轴的基本偏差数值计算公式

公称尺寸/mm		基本偏差代号	符号	极限偏差	计算公式
大于	至				
1	120	a	-	es	$265+1.3D$
120	500				$3.5D$
1	160	b	-	es	$\approx 140+0.85D$
160	500				$\approx 1.8D$
0	40	c	-	es	$-52D^{0.2}$
40	500				$95+0.8D$
0	10	cd	-	es	c 和 d 值的几何平均值
0	3150	d	-	es	$16D^{0.44}$
0	3150	e	-	es	$11D^{0.41}$
0	10	ef	-	es	e 和 f 值的几何平均值
0	3150	f	-	es	$5.5D^{0.41}$
0	10	fg	-	es	f 和 g 值的几何平均值
0	3150	g	-	es	$2.5D^{0.34}$
0	3150	h	无符号	es	0
0	500	j			无公式
0	3150	js	+	es	$0.5IT_n$
			-	ei	
0	500	k	+	ei	$0.6\sqrt[3]{D}$
500	3150		无符号		0
0	500	m	+	ei	$IT7-IT6$
500	3150				$0.024D+12.6$
0	500	n	+	ei	$5D^{0.34}$
500	3150				$0.04D+21$
0	500	p	+	ei	$IT7+(0\sim 5)$
500	3150				$0.072D+37.8$
0	3150	r	+	ei	p 和 s 值的几何平均值
0	50	s	+	ei	$IT8+(1\sim 4)$
50	3150				$IT7+0.4D$
24	3150	t	+	ei	$IT7+0.63D$
0	3150	u	+	ei	$IT7+D$
14	500	v	+	ei	$IT7+1.25D$

(续)

公称尺寸/mm		基本偏差代号	符号	极限偏差	计算公式
大于	至				
0	500	x	+	ei	IT7+1.6D
18	500	y	+	ei	IT7+2D
0	500	z	+	ei	IT7+2.5D
0	500	za	+	ei	IT8+3.5D
0	500	zb	+	ei	IT9+4D
0	500	zc	+	ei	IT10+5D

注：1. 公式中 D 是公称尺寸的几何平均值，单位为 mm。

2. 公称尺寸至 500mm 轴的基本偏差 k 的计算公式仅适用于标准公差等级 IT4~IT7，所有其他公称尺寸和所有其他 IT 等级的基本偏差 $k=0$ 。

轴的另一个极限偏差是根据基本偏差和标准公差的关系，分别按式 (2-22) 或式 (2-23) 计算得出。

$$es = ei + IT \quad (2-22)$$

$$ei = es - IT \quad (2-23)$$

利用轴的基本偏差计算公式，圆整尾数得到轴的基本偏差数值，见表 2-8。

4. 孔的基本偏差数值的确定

孔和轴的基本偏差呈倒影关系，孔的基本偏差是根据轴的基本偏差换算得到的。

换算原则是：在孔、轴同级配合或孔比轴低一级的配合中，基轴制配合中孔的基本偏差代号与基孔制配合中轴的基本偏差代号相当时，应该保证基轴制和基孔制的配合性质相同，且极限间隙或极限过盈相同。例如：G7/h6 与 H7/g6、M8/h7 与 H8/m7 的配合性质均相同。

根据上述原则，孔的基本偏差可以按下面两种规则计算。

(1) 通用规则 通用规则是指同一个字母表示的孔、轴的基本偏差绝对值相等，符号相反。孔的基本偏差与轴的基本偏差关于零线对称，相当于轴基本偏差关于零线的倒影，所以又称为倒影规则。

通用规则适用于以下情况。

1) 对于孔的基本偏差 A~H，不论孔、轴是否采用同级配合，都有 $EI = -es$ 。

2) 对于孔的基本偏差 K~ZC，标准公差 $>IT8$ 的 K、M、N 以及 $>IT7$ 的 P~ZC，孔、轴一般都采用同级配合，故按通用规则确定，则有 $ES = -ei$ 。

特例：公称尺寸大于 3mm，标准公差大于 IT8 的 N，其基本偏差 $ES=0$ 。

(2) 特殊规则 特殊规则是指同一字母表示孔、轴基本偏差时，孔的基本偏差和轴的基本偏差符号相反，而绝对值相差一个 Δ 值， Δ 值可在表 2-9 中“ Δ ”栏处查得。

在较高的公差等级中，因相同公差等级的孔比轴难加工，因而常采用异级配合，即配合中孔的公差等级通常比轴低一级，并要求两种配合制所形成的配合性质相同。

基孔制配合时 $Y_{\min} = ES - ei = +ITn - ei$

基轴制配合时 $Y_{\min} = ES - ei = ES - (-IT(n-1))$

当配合性质相同时，有

$$ITn - ei = ES + IT(n-1)$$



(单位: μm)

表 2-8 公称尺寸 $\leq 500\text{mm}$ 轴的基本偏差数值 (摘自 GB/T 1800.1—2009)

公称尺寸/mm		基本偏差数值																
		上极限偏差 es										js			下极限偏差 ei			
		a	b	c	cd	d	e	ef	f	fg	g	h	js	IT5、IT6	IT7	IT8	IT4~IT7	k
大于	至	所有标准公差等级																
—	3	-270	-140	-60	-34	-20	-14	-10	-6	-4	-2	0		-2	-4	-6	0	0
3	6	-270	-140	-70	-46	-30	-20	-14	-10	-6	-4	0		-2	-4		+1	0
6	10	-280	-150	-80	-56	-40	-25	-18	-13	-8	-5	0		-2	-5		+1	0
10	14	-290	-150	-95		-50	-32	-16			-6	0		-3	-6		+1	0
14	18																	
18	24	-300	-160	-110		-65	-40	-20			-7	0		-4	-8		+2	0
24	30																	
30	40	-310	-170	-120		-80	-50	-25			-9	0		-5	-10		+2	0
40	50	-320	-180	-130		-100	-60	-30			-10	0		-7	-12		+2	0
50	65	-340	-190	-140		-120	-72	-36			-12	0		-9	-15		+3	0
65	80	-360	-200	-150		-145	-85	-43			-14	0		-11	-18		+3	0
80	100	-380	-220	-170		-170	-100	-50			-15	0		-13	-21		+4	0
100	120	-410	-240	-180		-190	-110	-56			-17	0		-16	-26		+4	0
120	140	-460	-260	-200		-210	-125	-62			-18	0		-18	-32		+5	0
140	160	-520	-280	-210		-230	-135	-68			-20	0		-20				
160	180	-580	-310	-230														
180	200	-660	-340	-240														
200	225	-740	-380	-260														
225	250	-820	-420	-280														
250	280	-920	-480	-300														
280	315	-1050	-540	-330														
315	355	-1200	-600	-360														
355	400	-1350	-680	-400														
400	450	-1500	-760	-440														
450	500	-1650	-840	-480														

偏差等于
 $\pm \frac{IT_n}{2}$, 式中
 IT_n 是
IT 数值

(续)

公称尺寸/mm		基本偏差数值																
		下极限偏差 ei																
		所有标准公差等级																
大于	至	m	n	p	r	s	t	u	v	x	y	z	za	zb	zc			
—	3	+2	+4	+6	+10	+14		+18		+20		+26	+32	+40	+60			
3	6	+4	+8	+12	+15	+19		+23		+28		+35	+42	+50	+80			
6	10	+6	+10	+15	+19	+23		+28		+34		+42	+52	+67	+97			
10	14	+7	+12	+18	+23	+28		+33		+40		+50	+64	+90	+130			
14	18								+39	+45		+60	+77	+108	+150			
18	24	+8	+15	+22	+28	+35	+41	+47	+54	+63	+73	+88	+118	+160	+218			
24	30						+41	+48	+55	+64	+75	+88	+118	+160	+218			
30	40	+9	+17	+26	+34	+43	+48	+60	+68	+80	+94	+112	+148	+200	+274			
40	50						+54	+70	+81	+97	+114	+136	+180	+242	+325			
50	65	+11	+20	+32	+41	+53	+66	+87	+102	+122	+144	+172	+226	+300	+405			
65	80						+75	+102	+120	+146	+174	+210	+274	+360	+480			
80	100	+13	+23	+37	+51	+71	+91	+124	+146	+178	+214	+258	+335	+445	+585			
100	120						+104	+144	+172	+210	+254	+310	+400	+525	+690			
120	140				+63	+92	+122	+170	+202	+248	+300	+365	+470	+620	+800			
140	160	+15	+27	+43	+65	+100	+134	+190	+228	+280	+340	+415	+535	+700	+900			
160	180				+68	+108	+146	+210	+252	+310	+380	+465	+600	+780	+1000			
180	200				+77	+122	+166	+236	+284	+350	+425	+520	+670	+880	+1150			
200	225	+17	+31	+50	+80	+130	+180	+258	+310	+385	+470	+575	+740	+960	+1250			
225	250				+84	+140	+196	+284	+340	+425	+520	+640	+820	+1050	+1350			
250	280	+20	+34	+56	+94	+158	+218	+315	+385	+475	+580	+710	+920	+1200	+1550			
280	315				+98	+170	+240	+350	+425	+525	+650	+790	+1000	+1300	+1700			
315	355	+21	+37	+62	+108	+190	+268	+390	+475	+590	+730	+900	+1150	+1500	+1900			
355	400				+114	+208	+294	+435	+530	+660	+820	+1000	+1300	+1650	+2100			
400	450	+23	+40	+68	+126	+232	+330	+490	+595	+740	+920	+1100	+1450	+1850	+2400			
450	500				+132	+252	+360	+540	+660	+820	+1000	+1250	+1600	+2100	+2600			

注：1. 公称尺寸小于或等于 1mm 时，基本偏差 a 和 b 不采用。
 2. 公差带 js7~js11，若 IT_n 数值为奇数，则偏差 = ±(IT_n-1)/2。



因此孔的基本偏差为

$$ES = -ei + \Delta \quad (2-24)$$

$$\Delta = IT_n - IT_{(n-1)} \quad (2-25)$$

式中, IT_n 是某一级孔的标准公差数值; $IT_{(n-1)}$ 是高一级轴的标准公差数值。

特殊规则适用于以下情况:

公称尺寸 $\leq 500\text{mm}$, 标准公差 $\leq IT8$ 的 K、M、N 和标准公差 $\leq IT7$ 的 P~ZC。

孔的另一个极限偏差是根据基本偏差和标准公差的关系, 按式 (2-26) 或式 (2-27) 计算得出。

$$ES = EI + IT \quad (2-26)$$

$$EI = ES - IT \quad (2-27)$$

按照孔的基本偏差换算原则, 得到孔的基本偏差数值, 见表 2-9。

5. 公称尺寸 > 500~3150mm 的孔、轴的基本偏差数值

公称尺寸大于 500mm 时, 孔与轴一般都采用同级配合。因此只要孔、轴的基本偏差代号相对应, 它们的基本偏差数值相等、符号相反。

公称尺寸 > 500~3150mm 孔、轴的基本偏差计算公式见表 2-10, 孔、轴的基本偏差数值见表 2-11。

由表 2-11 可知, 大尺寸段孔、轴的公差等级范围为 IT6~IT18, 基本偏差代号范围为 d(D)~u(U), 此范围内不包括 ef(EF)、fg(FG) 和 j(J) 基本偏差代号。

表 2-10 公称尺寸 > 500~3150mm 孔、轴的基本偏差数值计算公式

轴				孔		
基本偏差代号	极限偏差	符号	计算公式	符号	极限偏差	基本偏差代号
d	es	-	$16D^{0.44}$	+	EI	D
e	es	-	$11D^{0.41}$	+	EI	E
f	es	-	$5.5D^{0.41}$	+	EI	F
g	es	-	$2.5D^{0.34}$	+	EI	G
h	es	无符号	0	无符号	EI	H
js	es 或 ei	+或-	$0.5IT_n$	+或-	EI 或 ES	JS
k	ei	无符号	0	无符号	ES	K
m	ei	+	$0.024D+12.6$	-	ES	M
n	ei	+	$0.04D+21$	-	ES	N
p	ei	+	$0.072D+37.8$	-	ES	P
r	ei	+	P、p 和 S、s 值的几何平均值	-	ES	R
s	ei	+	$IT7+0.4D$	-	ES	S
t	ei	+	$IT7+0.63D$	-	ES	T
u	ei	+	$IT7+D$	-	ES	U

注: 1. D 为公称尺寸段的几何平均值, 单位为 mm。

2. 除 js、JS 外, 表中所列公式与标准公差等级无关。

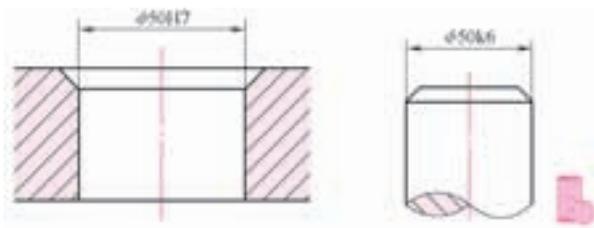


图 2-18 标注示例一

上、下极限偏差数字的字号应比公称尺寸数字的字号小一号。

当上极限偏差或下极限偏差为零时,要标出极限偏差数值“0”,不可省略,如图 2-19a 所示。若上、下极限偏差值相等而符号相反时,则在极限偏差数值与公称尺寸之间标注符号“±”,且两者数字高度相同,如图 2-19c 所示。

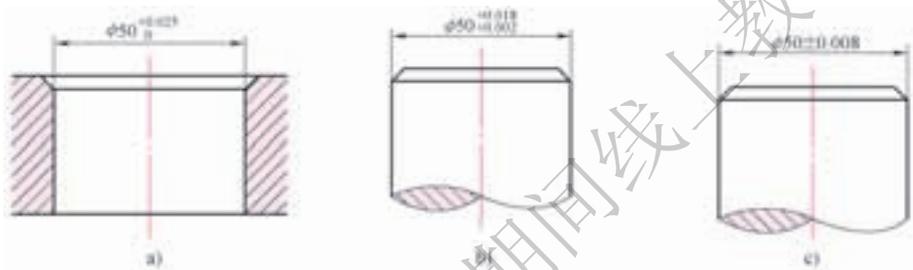


图 2-19 标注示例二

3) 在孔或轴的公称尺寸后面同时标注公差带代号及上、下极限偏差数值,此时后者应加上圆括号,如图 2-20 所示的 $\phi 50H7(+0.025)$ 、 $\phi 50k6(+0.018)$ 。

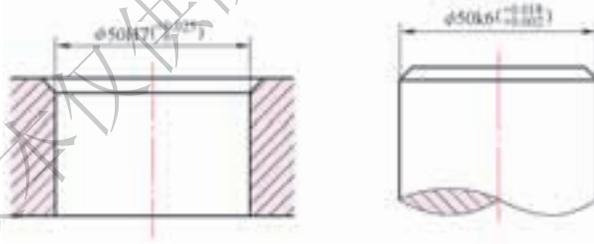


图 2-20 标注示例三

2. 配合及其标注

(1) 配合代号 配合代号由相互结合的孔、轴的公差带代号组成。配合代号用分数形式表示,分子为孔的公差带代号,分母为轴的公差带代号。例如:基孔制配合代号 $\phi 50 \frac{H7}{k6}$ 或 $\phi 50H7/k6$,基轴制配合代号 $\phi 50 \frac{F8}{h7}$ 或 $\phi 50F8/h7$ 。

(2) 配合的标注 配合代号一般标注在装配图中,如图 2-21 所示。

图 2-21b 所示的配合代号 $\phi 50 \frac{H7}{k6}$ 的含义为:相配合的孔、轴公称尺寸为 $\phi 50\text{mm}$,基孔制配合,孔的基本偏差代号为 H,公差等级为 7 级;轴的基本偏差代号为 k,公差等级为 6 级。



在装配图中, 当一非标准件与标准件配合时, 可以仅标注非标准件的公差带代号, 如图 2-22 所示。

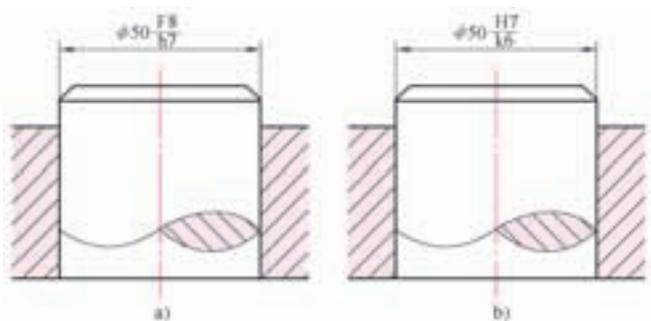


图 2-21 配合标注示例一

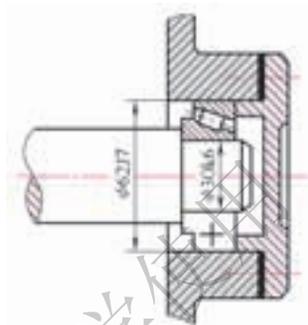


图 2-22 配合标注示例二

例 2-3 用查表法确定 $\phi 25H8/p8$ 、 $\phi 25P8/h8$ 和 $\phi 25P7/h6$ 的极限偏差数值。

解 查表 2-6 得: $IT8 = 33\mu\text{m}$, $IT7 = 21\mu\text{m}$, $IT6 = 13\mu\text{m}$ 。

1) 基孔制配合 $\phi 25H8/p8$ 。

轴 $p8$ 的基本偏差为下极限偏差 e_i , 查表 2-8 得

$$e_i = +22\mu\text{m}$$

轴 $p8$ 的上极限偏差 e_s 为

$$e_s = e_i + IT8 = (+22 + 33)\mu\text{m} = +55\mu\text{m}$$

孔 $H8$ 的基本偏差为下极限偏差 E_I , $E_I = 0$, 上极限偏差 E_S 为

$$E_S = E_I + IT8 = (0 + 33)\mu\text{m} = +33\mu\text{m}$$

由此可得

$$\phi 25H8 \left(\begin{smallmatrix} +0.033 \\ 0 \end{smallmatrix} \right) / p8 \left(\begin{smallmatrix} +0.055 \\ +0.022 \end{smallmatrix} \right)$$

2) 基轴制配合 $\phi 25P8/h8$ 。

孔 $P8$ 的基本偏差为上极限偏差 E_S , 查表 2-9 得

$$E_S = -22\mu\text{m}$$

孔 $P8$ 的下极限偏差 E_I 为

$$E_I = E_S - IT8 = (-22 - 33)\mu\text{m} = -55\mu\text{m}$$

轴 $h8$ 的基本偏差为上极限偏差 e_s , $e_s = 0$, 下极限偏差 e_i 为

$$e_i = e_s - IT8 = (0 - 33)\mu\text{m} = -33\mu\text{m}$$

由此可得

$$\phi 25P8 \left(\begin{smallmatrix} -0.022 \\ -0.055 \end{smallmatrix} \right) / h8 \left(\begin{smallmatrix} 0 \\ -0.033 \end{smallmatrix} \right)$$

3) 基轴制配合 $\phi 25P7/h6$ 。

孔 $P7$ 的基本偏差为上极限偏差 E_S , 查表 2-9 得

$$E_S = [(-22) + \Delta] = (-22 + 8)\mu\text{m} = -14\mu\text{m}$$

孔 $P7$ 的下极限偏差 E_I 为

$$E_I = E_S - IT7 = (-14 - 21)\mu\text{m} = -35\mu\text{m}$$

轴 $h6$ 的基本偏差为上极限偏差 e_s , $e_s = 0$, 下极限偏差 e_i 为



$$e_i = e_s - IT_6 = (0 - 13) \mu\text{m} = -13 \mu\text{m}$$

由此可得

$$\phi 25P7 \left(\begin{smallmatrix} -0.014 \\ -0.035 \end{smallmatrix} \right) / h6 \left(\begin{smallmatrix} 0 \\ -0.013 \end{smallmatrix} \right)$$

三对配合的孔、轴公差带图如图 2-23 所示。

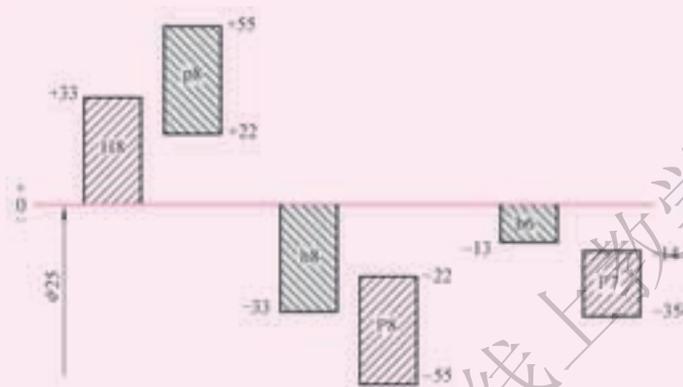


图 2-23 三对配合的孔、轴公差带图

2.3.4 常用尺寸段公差带与配合

GB/T 1800.1—2009 规定了 20 个标准公差等级和 28 种基本偏差代号，由此可组成 543 种孔的公差带（基本偏差 J 只有 J6、J7、J8）、544 种轴的公差带（基本偏差 j 只有 j5、j6、j7、j8）。由孔和轴的公差带可组成大量的配合，如此多的公差带与配合全部使用显然是不经济的。为了获得最佳的技术经济效益，减少定值刀具、量具及工艺装备的品种和规格，有必要对公差带和配合加以限制，并选用适当的孔与轴公差带以组成配合。

1. 孔的公差带

在公称尺寸 $\leq 500\text{mm}$ 的常用尺寸段范围内，国家标准推荐了 105 种孔的一般、常用和优先公差带，如图 2-24 所示。其中方框内的 43 种为常用公差带，圆圈内的 13 种为优先公差带。

2. 轴的公差带

在公称尺寸 $\leq 500\text{mm}$ 的常用尺寸段范围内，国家标准推荐了 116 种轴的一般、常用和优先公差带，如图 2-25 所示。其中方框内的 59 种为常用公差带，圆圈内的 13 种为优先公差带。

在选用公差带时，应按优先、常用、一般公差带的顺序选取。仅在特殊情况下，当一般公差带也不能满足使用要求时，允许按国家标准规定的基本偏差和标准公差等级组成所需的公差带。

3. 孔、轴的配合

GB/T 1801—2009 规定了基孔制常用配合 59 种，其中注有 \blacktriangleright 符号的 13 种为优先配



表 2-12 基孔制优先、常用配合

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						$\frac{H6}{f5}$	$\frac{H6}{g5}$	$\frac{H6}{h5}$	$\frac{H6}{js5}$	$\frac{H6}{k5}$	$\frac{H6}{m5}$	$\frac{H6}{n5}$	$\frac{H6}{p5}$	$\frac{H6}{r5}$	$\frac{H6}{s5}$	$\frac{H6}{t5}$					
H7						$\frac{H7}{f6}$	$\frac{H7}{g6}$	$\frac{H7}{h6}$	$\frac{H7}{js6}$	$\frac{H7}{k6}$	$\frac{H7}{m6}$	$\frac{H7}{n6}$	$\frac{H7}{p6}$	$\frac{H7}{r6}$	$\frac{H7}{s6}$	$\frac{H7}{t6}$	$\frac{H7}{u6}$	$\frac{H7}{v6}$	$\frac{H7}{x6}$	$\frac{H7}{y6}$	$\frac{H7}{z6}$
H8					$\frac{H8}{e7}$	$\frac{H8}{f7}$	$\frac{H8}{g7}$	$\frac{H8}{h7}$	$\frac{H8}{js7}$	$\frac{H8}{k7}$	$\frac{H8}{m7}$	$\frac{H8}{n7}$	$\frac{H8}{p7}$	$\frac{H8}{r7}$	$\frac{H8}{s7}$	$\frac{H8}{t7}$	$\frac{H8}{u7}$				
				$\frac{H8}{d8}$	$\frac{H8}{e8}$	$\frac{H8}{f8}$		$\frac{H8}{h8}$													
H9			$\frac{H9}{c9}$	$\frac{H9}{d9}$	$\frac{H9}{e9}$	$\frac{H9}{f9}$		$\frac{H9}{h9}$													
H10			$\frac{H10}{c10}$	$\frac{H10}{d10}$				$\frac{H10}{h10}$													
H11	$\frac{H11}{a11}$	$\frac{H11}{b11}$	$\frac{H11}{c11}$	$\frac{H11}{d11}$				$\frac{H11}{h11}$													
H12		$\frac{H12}{b12}$						$\frac{H12}{h12}$													

注：1. $\frac{H6}{n5}$ 、 $\frac{H7}{p6}$ 在公称尺寸小于或等于 3mm 和 $\frac{H8}{r7}$ 在公称尺寸小于或等于 100mm 时，为过渡配合。

2. 带▴的配合为优先配合。

表 2-13 基轴制优先、常用配合

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						$\frac{F6}{h5}$	$\frac{G6}{h5}$	$\frac{H6}{h5}$	$\frac{JS6}{h5}$	$\frac{K6}{h5}$	$\frac{M6}{h5}$	$\frac{N6}{h5}$	$\frac{P6}{h5}$	$\frac{R6}{h5}$	$\frac{S6}{h5}$	$\frac{T6}{h5}$					
h6						$\frac{F7}{h6}$	$\frac{G7}{h6}$	$\frac{H7}{h6}$	$\frac{JS7}{h6}$	$\frac{K7}{h6}$	$\frac{M7}{h6}$	$\frac{N7}{h6}$	$\frac{P7}{h6}$	$\frac{R7}{h6}$	$\frac{S7}{h6}$	$\frac{T7}{h6}$	$\frac{U7}{h6}$				
h7					$\frac{E8}{h7}$	$\frac{F8}{h7}$		$\frac{H8}{h7}$	$\frac{JS8}{h7}$	$\frac{K8}{h7}$	$\frac{M8}{h7}$	$\frac{N8}{h7}$									
h8				$\frac{D8}{h8}$	$\frac{E8}{h8}$	$\frac{F8}{h8}$		$\frac{H8}{h8}$													
h9				$\frac{D9}{h9}$	$\frac{E9}{h9}$	$\frac{F9}{h9}$		$\frac{H9}{h9}$													
h10				$\frac{D10}{h10}$				$\frac{H10}{h10}$													
h11	$\frac{A11}{h11}$	$\frac{B11}{h11}$	$\frac{C11}{h11}$	$\frac{D11}{h11}$				$\frac{H11}{h11}$													
h12		$\frac{B12}{h12}$						$\frac{H12}{h12}$													

注：带▴的配合为优先配合。

2.4 极限与配合的选择

孔、轴极限与配合的选择是机械设计与制造中的一个重要环节。极限与配合的选择是否恰当,对机械产品的精度、性能、互换性和成本都有很大影响,有时甚至起决定性作用。因此,极限与配合的选择实质上是尺寸的精度设计。

极限与配合的应用就是如何经济地满足使用要求,确定相配合孔、轴极限带的大小和位置。极限与配合的选择主要包括配合制、公差等级及配合的选择。

2.4.1 配合制的选择

配合制包括基孔制配合和基轴制配合两种。选用配合制时,应综合考虑零件的结构特点、加工工艺、经济效益等因素,遵循以下原则来确定。

1. 优先选用基孔制配合

一般情况下应优先选用基孔制配合。因为对于中、小尺寸的孔多采用定值刀具(如钻头、铰刀、拉刀等)加工,定值量具(如光滑极限量规等)检验。而每一种规格的定值刀具、量具只能加工和检验一种特定尺寸和公差带的孔。例如: $\phi 25\text{H}8/\text{p}8$ 、 $\phi 25\text{H}8/\text{f}7$ 、 $\phi 25\text{H}8/\text{k}7$ 是公称尺寸相同的基孔制配合,虽然它们的配合性质各不相同,但孔的公差带是相同的,所以只需用同一规格的定值刀具、量具来加工和检验即可。这三对配合中轴的公差带虽然各不相同,但加工轴时使用车刀、砂轮等通用刀具即可满足要求,检验轴时也是使用普通计量器具完成检验。因此,采用基孔制配合不但可以减少孔的公差带数量,而且还可大大减少定值刀具、量具的数量和规格,因而经济合理、使用方便。

2. 特殊情况下采用基轴制配合

在下列特殊情况下采用基轴制比较经济合理。

(1) 使用冷拉钢材直接制作轴 在农业机械、纺织机械和建筑机械中,常使用具有一定精度(IT9~IT11)的冷拉钢材直接制作轴,轴的外表面不需再进行切削加工即可满足使用要求,此时应选用基轴制配合。

(2) 结构上的需要 同一公称尺寸的轴上需要装配几个具有不同配合性质的零件时,应选用基轴制配合,否则轴加工困难或无法加工。

如图2-26a所示,在内燃机活塞连杆机构中,活塞销2与活塞1上两个销孔的配合要求紧一些,应为过渡配合;而活塞销与连杆3之间有相对运动,配合要求松一些,应为间隙配合。若三处配合均选用基孔制配合,则配合分别为H6/m5、H6/h5和H6/m5,公差带如图2-26b所示。此时必须把活塞销制成两头粗、中间细的阶梯轴才能满足各部分的配合要求,这样既不利于加工,又不利于装配(活塞销在装配过程中会刮伤连杆小头孔内表面)。

若选用基轴制配合,则三处配合分别为M6/h5、H6/h5和M6/h5,公差带如图2-26c所示。此时活塞销可按一种公差带加工,制成光轴,这样既满足使用要求,又有利于加工和装配。而不同基本偏差的孔分别位于连杆和活塞两个零件上,加工并不困难,所以应采用基轴制配合。

3. 与标准零部件结合的配合制选择

对于与标准零部件相配合的孔或轴,基准制的选择应以标准件而定。例如:与滚动轴承

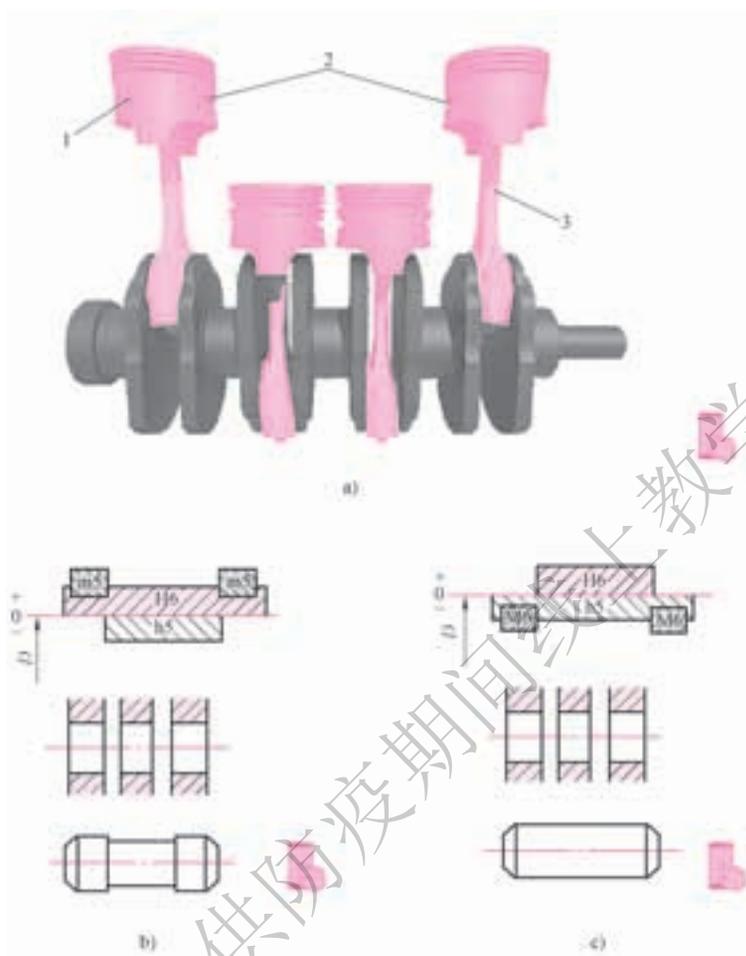


图 2-26 基轴制配合示例

a) 活塞连杆机构 b) 基孔制配合 c) 基轴制配合

1—活塞 2—活塞销 3—连杆

(标准件) 内圈相配合的轴应选用基孔制配合, 与滚动轴承外圈相配合的壳体孔应选用基轴制配合。

4. 采用非配合制配合

必要时采用不包含基本偏差为 H 或 h 的任何适当的孔、轴公差带组成配合, 在满足使用要求的同时, 又可获得最佳的经济效益。

如图 2-12 所示的圆柱齿轮减速器轴系结构图中, 根据轴颈与滚动轴承内圈的配合要求, 轴颈公差带代号已确定为 $\phi 55k6$; 而起轴向定位作用的轴套孔与该轴颈的配合要求有间隙, 拆装方便, 轴套孔的公差带可取 $\phi 55D9$, 因此该轴颈与轴套孔可组成配合代号为 $\phi 55D9/k6$ 的间隙配合。根据箱体上壳体孔与滚动轴承外圈的配合要求, 壳体孔的公差带代号已确定为 $\phi 110J7$; 而轴承端盖定位圆柱面与该孔的配合间隙较大, 轴承端盖要求拆装方便, 且尺寸精度要求不高, 轴承端盖定位圆柱面的公差带可取 $\phi 110e9$, 因此轴承端盖定位圆柱面与壳体孔可组成配合代号为 $\phi 110J7/e9$ 的间隙配合。

2.4.2 公差等级的选择

选择公差等级时要正确处理好使用要求与制造工艺、加工成本之间的关系。公差等级选择过高,虽然可以满足使用要求,但零部件加工难度大、成本高;公差等级选择过低,虽然零部件加工工艺简单、成本低,但未必能保证产品的精度和质量。公差等级选择过高或过低都不利于综合经济效益的提高。因此,选择公差等级的基本原则是:在满足使用要求的前提下,尽量选用较低的公差等级。

选用公差等级时,除遵循基本原则外,还应考虑以下问题。

(1) 孔与轴的工艺等价性 工艺等价性是指同一配合中的孔和轴的加工难易程度大致相同。

公称尺寸 $\leq 500\text{mm}$ 且公差等级 $<IT8$ 的孔比同级的轴加工困难,孔比轴低一级配合,如 $\phi 50H7/u6$ 、 $\phi 30K7/h6$;公差等级 $=IT8$ 的孔比轴低一级或同级配合,如 $\phi 40H8/i8$ 、 $\phi 60H8/p7$;公差等级 $>IT8$ 或公称尺寸 $> 500\text{mm}$ 的孔应与轴采用同级配合,如 $\phi 100H9/d9$ 、 $\phi 70D10/h10$ 。

(2) 各公差等级的应用范围 一般情况下采用类比法选择公差等级。各公差等级的应用范围见表 2-14,可供选择时参考。

表 2-14 各公差等级的应用范围

公差等级	应用范围
IT01~IT1	一般用于高精度量块和其他精密尺寸标准块的公差
IT2~IT5	用于特别精密零件的配合
IT5(孔 IT6)	用于高精度和重要的配合。例如:精密机床主轴的轴颈、主轴箱体孔与精密滚动轴承的配合;车床尾座孔与顶尖套筒的配合;内燃机中活塞销与活塞销孔、连杆小头孔的配合等
IT6(孔 IT7)	用于精密配合要求的场合。例如:机床中一般传动轴和轴承的配合;齿轮、带轮和轴的配合;内燃机中曲轴与轴套、活塞与气缸的配合等
IT7~IT8	用于一般精度要求的配合。例如:一般机械中速度不高的轴与轴承的配合;在重型机械中用于精度要求稍高的配合;在农业机械、纺织机械中则用于较重要的配合
IT9~IT10	用于一般要求的配合或精度要求较高的槽宽的配合
IT11~IT12	用于不重要的配合。例如:机床上法兰盘与止口的配合;滑块与滑移齿轮的配合;螺栓与螺孔的配合等
IT12~IT18	用于未注尺寸公差的尺寸精度或粗加工的工序尺寸精度,包括冲压件、铸锻件及其他非配合尺寸的公差等,如壳体的外形、壁厚、端面之间的距离等

(3) 相关件或相配件的结构或精度 某些孔、轴的公差等级取决于相关件或相配件的结构或精度。

例如:与滚动轴承相配合的外壳孔和轴颈的公差等级取决于相配件滚动轴承的类型、精度等级及配合尺寸;齿轮孔与轴的配合,它们的公差等级取决于相关件齿轮的精度等级。

(4) 各种加工方法的加工精度 各种加工方法可能达到的公差等级见表 2-15,可供选择时参考。

(5) 配合性质及加工成本 为达到使用要求、降低加工成本,对于一些精度要求不高



的配合,孔、轴的公差等级可以相差2~3级。

轴承端盖定位圆柱面与壳体孔的配合、轴颈与轴套孔的配合都要求大间隙配合,而壳体孔和轴颈的公差等级已由轴承的精度等级决定,因此,轴承端盖定位圆柱面与壳体孔的配合为 $\phi 110J7/e9$,轴颈与轴套孔的配合为 $\phi 55D9/k6$,它们的公差等级相差分别为2级和3级,以降低加工成本。

表 2-15 各种加工方法可能达到的公差等级

加工方法	公差等级	加工方法	公差等级
研磨	IT01~IT5	铣	IT8~IT11
珩磨	IT4~IT7	刨、插	IT10~IT11
圆磨	IT5~IT8	钻	IT10~IT13
平磨	IT5~IT8	滚压、挤压	IT10~IT11
金刚石车	IT5~IT7	冲压	IT10~IT14
金刚石镗	IT5~IT7	压铸	IT11~IT14
拉削	IT5~IT8	粉末冶金成形	IT6~IT8
铰孔	IT6~IT10	粉末冶金烧结	IT7~IT10
车	IT7~IT11	砂型铸造、气割	IT16~IT18
镗	IT7~IT11	锻造	IT15~IT16

例 2-4 已知孔、轴配合的公称尺寸为 $\phi 30\text{mm}$, $X_{\min} = +21\mu\text{m}$, $X_{\max} = +56\mu\text{m}$, 试确定孔、轴的公差等级。

解 (1) 配合公差 T_f 的确定 由式 (2-16) 可得

$$T_f = |X_{\max} - X_{\min}| = |(+56) - (+21)| \mu\text{m} = 35\mu\text{m}$$

(2) 孔、轴公差等级的确定 为满足使用要求,所选的孔、轴的公差 T_D 、 T_d 应满足

$$T_f = T_D + T_d \leq 35\mu\text{m}$$

根据公差等级的选用原则,应尽量选择较低公差等级的孔、轴配合。

查表 2-6 可得

$$IT6 = 13\mu\text{m}, \quad IT7 = 21\mu\text{m}$$

根据工艺等价性,孔的公差等级应比轴低一级配合,因此孔的公差等级为 IT7,轴的公差等级为 IT6。

孔、轴的实际配合公差 T_f 为

$$T_f = T_D + T_d = IT7 + IT6 = (21 + 13)\mu\text{m} = 34\mu\text{m} \leq 35\mu\text{m}$$

因此,公差等级为 IT7 的孔和公差等级为 IT6 的轴相配合可满足使用要求。

2.4.3 配合的选择

确定了配合制和孔、轴的公差等级之后,就需要选择配合性质,即确定基孔制配合中的非基准轴或基轴制配合中的非基准孔的基本偏差代号。

选择配合的方法有计算法、试验法和类比法。

计算法是根据一定的理论和公式，经过计算得出所需的间隙或过盈，由于影响配合间隙量和过盈量的因素很多，计算结果也只是一个近似值，实际应用中还需经过试验来确定。

对产品性能影响很大的一些配合，通常采用试验法来确定最佳的间隙量或过盈量，但此方法必须进行大量试验，成本较高。

类比法是参照类似的经过生产实践验证的机器或机构，分析零件的工作条件及使用要求，以它们为样本选择所需的配合，类比法是机械设计中最常用的方法。

1. 配合种类的选择

配合种类的选择主要是根据零部件的工作条件和使用要求选择间隙配合、过渡配合和过盈配合三种配合类型之一。当相配合的孔、轴间有相对运动时，应选择间隙配合；当相配合的孔、轴间无相对运动，对中性要求较高而又需要经常拆卸时，选择过渡配合；当相配合的孔、轴间无相对运动且不经常拆卸而又需要传递一定的载荷和转矩时，应选择过盈配合。

2. 配合代号的选择

(1) 间隙配合代号的选择 在基孔制中，属于间隙配合的轴的基本偏差代号有 $a \sim h$ ；在基轴制中，属于间隙配合的孔的基本偏差代号有 $A \sim H$ 。其中基准孔与基本偏差代号为 a 的轴所组成的配合间隙最大。

1) H/a 、 H/b 、 H/c 配合。配合的间隙很大，可用于工作条件较差、要求动作灵活的机械上，如图 2-27 所示的起重机吊钩的配合；为便于装配，保证有较大间隙的配合，如图 2-28 所示的管道法兰的配合；轴在高温下工作时的间隙配合，如图 2-29 所示的内燃机气阀导杆与衬套的配合。

2) H/d 、 H/e 配合。配合的间隙较大，用于要求不高、易于转动的支承。图 2-30 和图 2-31 所示为内燃机曲轴与连杆衬套的配合、张紧链轮与轴的配合。



图 2-27 起重机吊钩的配合



图 2-28 管道法兰的配合



图 2-29 内燃机气阀

1—导杆 2—衬套 3—缸盖 4—座圈



3) H/f 配合。配合的间隙适中，多用于 IT6~IT8 的一般转动配合，如齿轮箱、小电动机、泵等的转轴及滑动支承的配合。图 2-32 所示为齿轮轴套与轴的配合。



图 2-30 内燃机曲轴与连杆衬套的配合



图 2-31 张紧链轮与轴的配合



图 2-32 齿轮轴套与轴的配合

4) H/g 配合。配合的间隙很小，多用于 IT5~IT7 级，除了很小负荷的精密机构外，一般不用作转动配合。它适合于不回转的精密滑动配合，也用于插销等定位配合。图 2-33 所示为拖拉机曲轴与连杆大头孔的配合。

5) H/h 配合。配合最小间隙为零，适用于无相对转动而有定心和导向要求的定位配合。图 2-34 所示为起重机吊车的链轮与轴的配合。

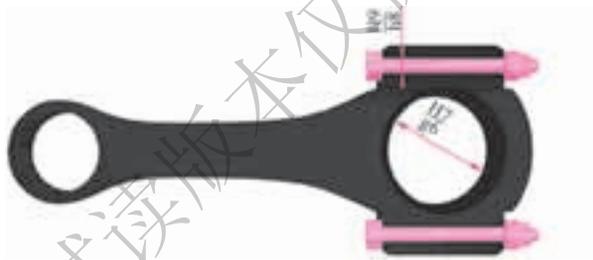


图 2-33 拖拉机曲轴与连杆大头孔的配合



图 2-34 起重机吊车的链轮与轴的配合

(2) 过渡配合代号的选择 在基孔制中，属于过渡配合的轴的基本偏差代号有 js、j、k、m、n；在基轴制中，属于过渡配合的孔的基本偏差代号有 JS、J、K、M、N。过渡配合最大间隙应小，以保证对中性；最大过盈也应小，以保证拆装方便，因此，过渡配合的孔、轴的公差等级一般为 IT4~IT7。

定心要求较高、不经常拆卸时，选用较紧的配合；定心要求不高、经常拆卸时，选用较松的配合；承受大载荷、大转矩或动载荷的结合部位，选用较紧的配合。传递载荷或转矩时必须加键或销等联接件。

1) H/j、H/js 配合。配合具有平均间隙，适用于要求间隙比 h 小并略有过盈的定位配

合, 加联接件可传递一定的静载荷。图 2-35 所示为带轮与轴的配合。

2) H/k 配合。配合的平均间隙接近于零, 定心较好, 装配后零件受到的接触应力较小, 能够拆卸, 如图 2-22 所示的滚动轴承内圈与轴颈的配合。

3) H/m、H/n 配合。配合具有平均过盈, 定心性好, 用于精确定位, 装配较紧, 加键能传递大的载荷和转矩, 如图 2-29 所示的内燃机气阀衬套与气缸盖的配合。图 2-36 所示为蜗轮青铜轮缘与轮辐的配合。

(3) 过盈配合代号的选择 在基孔制中, 属于过盈配合的轴的基本偏差代号有 p~zc; 在基轴制中, 属于过盈配合的孔的基本偏差代号为 P~ZC。

1) H/p、H/r 配合。在高公差等级时为过盈配合, 只宜在大修时拆卸, 主要用于定心精度很高、零件有足够的刚性、受冲击载荷的定位配合; 采用锤打或压力机装配。图 2-37 所示为蜗轮青铜轮缘与轮芯的配合。

2) H/s、H/t 配合。配合属于中等过盈配合, 多采用 IT6~IT7 级, 主要用于钢铁件的永久或半永久性结合, 依靠过盈产生的结合力可以直接传递中等载荷; 一般用压力法装配, 也有用冷轴或热套法装配的, 如图 2-29 所示的内燃机气阀座圈与气缸盖的配合。图 2-38 所示为联轴器与轴的配合。

3) H/u、H/v、H/x、H/y、H/z 配合。配合属于大过盈配合, 过盈量依次增大, 选用时要慎重, 一般要经过试验才能应用; 适用于传递大的转矩或承受大的冲击载荷, 完全依靠过盈产生的结合力保证牢固连接, 通常采用冷轴或热套法装配以保证过盈量均匀。由于过盈量大, 因此要求零件许用应力大, 否则零件容易被挤裂。图 2-39 所示为车轮轮箍与轮芯、轮芯与车轴的配合。

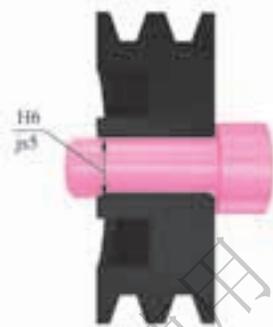


图 2-35 带轮与轴的配合



图 2-36 蜗轮青铜轮缘与轮辐的配合

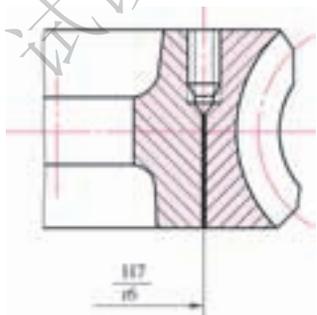


图 2-37 蜗轮青铜轮缘与轮芯的配合



图 2-38 联轴器与轴的配合



图 2-39 车轮轮箍与轮芯、轮芯与车轴的配合



为便于在工程设计中使用类比法选择配合,将上述各种基本偏差的特性及应用列于表 2-16 中,将优先配合的特征及应用列于表 2-17 中,供选择参考。

表 2-16 各种基本偏差的特性及应用

配合	基本偏差	特性及应用
间隙配合	a(A) b(B)	可得到特别大的间隙,应用很少。主要应用于工作温度高、热变形大的零件的配合,如发动机中活塞与气缸套的配合为 H9/a9
	c(C)	可得到很大的间隙,适用于缓慢、松弛的间隙配合。一般用于工作条件差(如农用机械、矿山机械)、工作时受力变形大及装配工艺性不好的零件的配合,推荐配合 H11/c11;也适用于高温工作的间隙配合,如内燃机气阀杆与衬套的配合为 H8/c7
	d(D)	与 IT7~IT11 级对应,适用于较松的间隙配合,如密封盖、滑轮、空转带轮轴孔等与轴的配合;以及大尺寸的滑动轴承孔与轴颈的配合,如涡轮机、球磨机、轧滚成形和重型弯曲机等的滑动轴承;活塞环与活塞环槽的配合可选用 H9/d9
	e(E)	与 IT6~IT9 级对应,适用于具有明显的间隙、易于转动的轴与轴承配合,以及高速、重载支承的大尺寸轴与轴承的配合,如大型电动机、涡轮发动机、内燃机主要轴承处的配合为 H8/e7
	f(F)	多与 IT6~IT8 级对应,用于一般转动的配合。当受温度影响不大时,被广泛应用于普通润滑油润滑的轴和轴承的配合,如齿轮箱、小电动机、泵等的转轴与滑动轴承孔的配合为 H7/f6
	g(G)	多与 IT5~IT7 级对应,形成配合的间隙较小,制造成本高,仅用于轻载精密装置中的转动配合。最适合不回转的精密滑动配合,也用于插销的定位配合,滑阀、连杆销等处的配合
	h(H)	多与 IT4~IT11 级对应,广泛应用于无相对转动零件的配合和一般的定位配合。若没有温度、变形的影响,也用于精密滑动轴承的配合。例如:车床尾座孔与滑动套筒的配合为 H6/h5
过渡配合	js(JS)	多用于 IT4~IT7 级具有平均间隙的过渡配合,用于略有过盈的定位配合,如联轴器、齿圈与钢制轮毂的配合,滚动轴承外圈与外壳孔的配合多采用 JS7。一般用手或木锤装配
	k(K)	多用于 IT4~IT7 级平均间隙略接近零的配合,用于稍有过盈的定位配合,如滚动轴承内、外圈分别与轴颈、外壳孔的配合。一般用木锤装配
	m(M)	多用于 IT4~IT7 级平均过盈较小的配合,用于精密定位的配合,如蜗轮的青铜轮缘与轮毂的配合为 H7/m6。一般用木锤装配,但在最大过盈时,需要相当的压入力
	n(N)	多用于 IT4~IT7 级平均过盈较大的配合,很少形成间隙。用于加键传递较大转矩的配合,如压力机上齿轮与轴的配合;键与键槽的配合采用 N9/h9。一般用木锤或压力机装配。而 n5 与 H6、N6 与 h5 均形成过盈配合
过盈配合	p(P)	用于小过盈的配合,与 H6 或 H7 的孔形成过盈配合,而与 H8 的孔形成过渡配合。对于合金钢制件的配合,为易于拆卸需要较轻的压入配合;而对于碳钢和铸铁制件形成的配合则为标准压入配合
	r(R)	用于传递大转矩或受冲击载荷而需要加键的配合,如蜗轮与轴的配合为 H7/r6。与 H8 孔的配合,公称尺寸在 100mm 以上时为过盈配合,公称尺寸小于 100mm 时,为过渡配合
	s(S)	用于钢和铸铁制件的永久性和半永久性装配,可产生相当大的结合力。例如:套环压在轴、阀座上用 H7/s6 的配合。当尺寸较大时,为了避免损伤配合的表面,需用热胀或冷缩法装配
	t(T)	用于钢和铸铁制件的永久性结合,不用键可传递转矩。例如:联轴器与轴的配合用 H7/t6。需用热套法或冷轴法装配
	u(U)	用于大过盈配合,一般应验算在最大过盈量时,零件材料是否损坏。例如:火车轮毂轴孔与轴的配合为 H6/u5。需用热胀或冷缩法装配
	v(V),x(X) y(Y),z(Z)	用于特大的过盈配合,目前使用的经验和资料很少,须经试验后才能应用,一般不推荐

表 2-17 优先配合的特性及应用

优先配合		特性及应用
基孔制	基轴制	
H11/c11	C11/h11	间隙非常大,摩擦情况差,用于要求大公差和大间隙的外露组件,装配方便、很松的配合,高温工作和松的转动配合
H9/d9	D9/h9	间隙比较大,摩擦情况较好,用于精度要求低、温度变化大、高转速或径向压力较大的自由转动的配合
H8/f7	F8/h7	摩擦情况良好,用于配合间隙适中的转动配合,中等转速和中等轴颈压力的一般精确的传动,也可用于长轴或多支承的中等精度的定位配合
H7/g6	G7/h6	间隙很小,用于不回转的精密滑动配合;或用于不希望自由转动,但可自由移动和滑动,并精密定位的配合;也可用于要求明确的定位配合
H7/h6 H8/h7 H9/h9 H11/h11	H7/h6 H8/h7 H9/h9 H11/h11	均为间隙配合,其最小间隙为零,最大间隙为孔与轴的公差之和,用于具有缓慢的轴向移动或摆动的配合
H7/k6	K7/h6	过渡配合,装卸方便,用木锤打入或取出,用于要求稍有过盈、精密定位的配合
H7/n6	N7/h6	过渡配合,装拆困难,需要用木锤费力打入,用于允许有较大过盈的更精密定位的配合,也用于装配后不需要拆卸或大修时才拆卸的配合
H7/p6	P7/h6	小过盈的配合,用于定位精度特别高时,能以最好的定位精度达到部件的刚性及对中性要求,而对内孔承受压力无特殊要求,用于不依靠配合的紧固性传递摩擦载荷的配合
H7/s6	S7/h6	过盈量属于中等的压入配合,用于一般钢和铸铁件或薄壁件的冷缩配合,铸铁件可得到最紧的配合
H7/u6	U7/h6	过盈量较大的压入配合,用于传递大的转矩或承受大的冲击载荷,或不适宜承受大压力冷缩配合,或不加紧固件就能得到牢固结合的场所

3. 计算法选择配合

当已知极限间隙(过盈)时,首先根据要求选取配合制;再计算配合公差确定孔、轴的公差等级;然后按相应公式及已知条件计算基本偏差数值,查表确定孔、轴的基本偏差代号;最后验算所选取配合的极限间隙(过盈)是否在允许的范围内。

采用计算法确定极限与配合主要包括以下 5 个步骤。

(1) 确定配合制

(2) 求配合公差 T_f

$$T_f = |X_{\max} - X_{\min}| = |Y_{\min} - Y_{\max}| = |X_{\max} - Y_{\max}|$$

(3) 确定孔、轴的公差等级 根据

$$T_f = T_D + T_d$$

查表 2-6 得到孔、轴的公差等级。若在表中找不到任何两个相邻或相同等级的公差之和恰巧等于配合公差,则按式(2-28)确定孔、轴的公差等级。

$$T_D + T_d \leq T_f \quad (2-28)$$

考虑到孔、轴的精度匹配和工艺等价原则,孔和轴的公差等级应相同或孔比轴低一级进行公差等级组合。

(4) 根据允许的极限间隙(极限过盈)确定非基准件的基本偏差代号 以基孔制配合为例说明计算过程。



1) 间隙配合。若为间隙配合,则轴的基本偏差为上极限偏差 es ,且 $es < 0$,其公差带在零线以下。因此轴的基本偏差 es 满足

$$|es| = X_{\min} \quad (2-29)$$

根据 X_{\min} 查表 2-8,即可得到轴的基本偏差代号。

2) 过盈配合。若为过盈配合,则轴的基本偏差为下极限偏差 ei ,且 $ei > 0$,其公差带在零线以上。因此轴的基本偏差 ei 满足

$$ei = ES + |Y_{\min}| \quad (2-30)$$

根据 ei 的计算结果查表 2-8,即可得到轴的基本偏差代号。

3) 过渡配合。若为过渡配合,则轴的基本偏差为下极限偏差 ei ,由式(2-9)可得轴的基本偏差 ei 为

$$ei = ES - X_{\max}$$

根据 ei 的计算结果查表 2-8,即可得到轴的基本偏差代号。

查取轴的基本偏差代号时,若表 2-8 中不存在与计算出的基本偏差数值相等的代号,则应按以下原则近似地选取某一代号。

对于间隙配合或过盈配合

$$X'_{\min} \geq X_{\min} \text{ 或 } |Y'_{\min}| \geq |Y_{\min}|$$

对于过渡配合

$$X'_{\max} \leq X_{\max}$$

式中, X'_{\min} 、 Y'_{\min} 和 X'_{\max} 分别是查取的基本偏差代号形成的最小间隙、最小过盈和最大间隙; X_{\min} 、 Y_{\min} 和 X_{\max} 分别是由已知条件给定的最小间隙、最小过盈和最大间隙。

基轴制配合的计算过程与基孔制类似,可参照推算。

(5) 验算极限间隙(极限过盈) 首先按孔、轴的标准公差计算出另一极限偏差,然后按所取的配合代号计算极限间隙(极限过盈)并判断其值是否在允许的极限间隙(极限过盈)范围内。若验算结果不符合设计要求,可更换孔、轴的基本偏差代号或变动孔、轴的公差等级,直至所选用的配合完全符合设计要求。

2.4.4 极限与配合选择示例

例 2-5 已知孔、轴配合的公称尺寸为 $\phi 40\text{mm}$, $X_{\min} = +22\mu\text{m}$, $X_{\max} = +66\mu\text{m}$, 试确定配合代号。

解 1) 无特殊规定,采用基孔制配合。

2) 配合公差 T_f 的确定。由式(2-16)可得允许的配合公差 T_f 为

$$T_f = |X_{\max} - X_{\min}| = |(+66) - (+22)| \mu\text{m} = 44\mu\text{m}$$

3) 孔、轴公差等级的确定。为满足使用要求,所选的孔、轴的公差 T_D 、 T_d 应满足

$$T_f = T_D + T_d \leq 44\mu\text{m}$$

根据公差等级的选用原则,应尽量选择较低公差等级的孔、轴配合。

查表 2-6 可得

$$IT6 = 16\mu\text{m} \quad IT7 = 25\mu\text{m}$$

根据工艺等价原则，孔的公差等级应比轴低一级配合，因此孔的公差等级为 IT7，轴的公差等级为 IT6。

孔、轴的实际配合公差 T_f 为

$$T_f = T_D + T_d = IT7 + IT6 = (25 + 16) \mu\text{m} = 41 \mu\text{m} \leq 44 \mu\text{m}$$

因此，孔的公差带代号为 $\phi 40H7 (+0.025)_0$ 。

4) 轴的基本偏差代号的确定。在基孔制间隙配合中，轴的基本偏差为上极限偏差 es ，由式 (2-29) 可得

$$es = -X_{\min} = -22 \mu\text{m}$$

查表 2-8 可知，基本偏差数值接近 $-22 \mu\text{m}$ 的基本偏差代号为 f ，其基本偏差数值 $es = -25 \mu\text{m}$ ，确定轴的公差带代号为 $\phi 40f6 (-0.041)_{-0.041}$ 。

因此，孔、轴的配合代号为 $\phi 40 \frac{H7 (+0.025)_0}{f6 (-0.041)_{-0.041}}$ 。

5) 极限间隙的验算所选配合的极限间隙为

$$X'_{\max} = ES - ei = [(+25) - (-41)] \mu\text{m} = +66 \mu\text{m}$$

$$X'_{\min} = EI - es = [0 - (-25)] \mu\text{m} = +25 \mu\text{m}$$

均在 $+22 \sim +66 \mu\text{m}$ 之间，故所选配合符合设计要求。

例 2-6 已知孔、轴配合的公称尺寸为 $\phi 16\text{mm}$ ， $X_{\max} = +12 \mu\text{m}$ ， $Y_{\max} = -20 \mu\text{m}$ ，试确定配合代号。

解 1) 无特殊规定，采用基孔制配合。

2) 配合公差 T_f 的确定。由式 (2-18) 可得允许的配合公差 T_f 为

$$T_f = |X_{\max} - Y_{\max}| = |(+12) - (-20)| \mu\text{m} = 32 \mu\text{m}$$

3) 孔、轴公差等级的确定。为满足使用要求，所选的孔、轴的公差 T_D 、 T_d 应满足

$$T_f = T_D + T_d \leq 32 \mu\text{m}$$

根据公差等级的选用原则，应尽量选择较低公差等级的孔、轴配合。

查表 2-6 可得

$$IT6 = 11 \mu\text{m}, \quad IT7 = 18 \mu\text{m}$$

根据工艺等价原则，孔的公差等级应比轴低一级配合，因此孔的公差等级为 IT7，轴的公差等级为 IT6。

孔、轴的实际配合公差 T_f 为

$$T_f = T_D + T_d = IT7 + IT6 = (11 + 18) \mu\text{m} = 29 \mu\text{m} \leq 32 \mu\text{m}$$

因此，孔的公差带代号为 $\phi 16H7 (+0.018)_0$ 。

4) 轴的基本偏差代号的确定。在基孔制过渡配合中，轴的基本偏差为下极限偏差 ei ，由式 (2-9) 可得

$$ei = ES - X_{\max} = [(+18) - (+12)] \mu\text{m} = +6 \mu\text{m}$$



查表 2-8 可知,基本偏差数值接近 $+6\mu\text{m}$ 的基本偏差代号为 m,其基本偏差数值 $ei = +7\mu\text{m}$ 确定轴的公差带代号为 $\phi 16\text{m}6\left(\begin{smallmatrix} +0.018 \\ +0.007 \end{smallmatrix}\right)$ 。

因此,孔、轴的配合代号为 $\phi 16 \frac{\text{H}7\left(\begin{smallmatrix} +0.018 \\ 0 \end{smallmatrix}\right)}{\text{m}6\left(\begin{smallmatrix} +0.018 \\ +0.007 \end{smallmatrix}\right)}$ 。

5) 最大间隙和最大过盈的验算。所选配合的最大间隙和最大过盈为

$$X'_{\max} = ES - ei = [(+18) - (+7)] \mu\text{m} = +11 \mu\text{m}$$

$$Y'_{\max} = EI - es = [0 - (+18)] \mu\text{m} = -18 \mu\text{m}$$

因此

$$X'_{\max} < X'_{\max} | Y'_{\max} | < | Y_{\max} |$$

故所选配合符合设计要求。

例 2-7 试分析确定图 2-40 所示的 C6140 型车床尾座有关部位的配合。

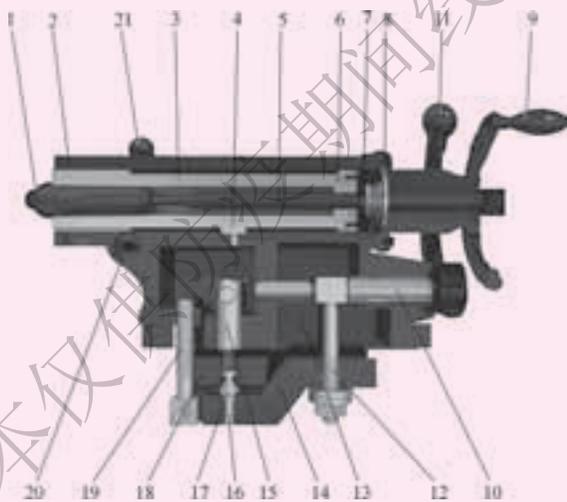


图 2-40 C6140 型车床尾座装配图

- 1—顶尖 2—尾座体 3—套筒 4—定位块 5—丝杠 6—螺母 7—挡油圈
8—后盖 9—手轮 10—偏心轴 11、21—手柄 12—拉紧螺钉 13—滑座
14—杠杆 15—圆柱 16、17—圆销 18—压块 19—螺钉 20—夹紧套

解 尾座在车床上的作用是与主轴顶尖共同支承工件,承受切削力。

尾座工作时,扳动手柄 11,通过偏心机构将尾座夹紧在床身上,再转动手轮 9,通过丝杠 5、螺母 6,使套筒 3 带动顶尖 1 向前移动,顶住工件,最后转动手柄 21,使夹紧套 20 靠摩擦夹住套筒,从而固定顶尖位置。

尾座有关部位的配合选择说明见表 2-18。

表 2-18 尾座有关部位的配合选择说明

序号	配合件	配合代号	配合选择说明
1	套筒 3 的外圆与尾座体 2 的孔	$\phi 60 \frac{H6}{h5}$	套筒调整时要在尾座体孔中滑动,需有间隙,而顶尖工作时需较高的定位精度,故选择精度高的小间隙配合
2	套筒 3 的内孔与螺母 6 的外圆	$\phi 30 \frac{H7}{h6}$	为避免螺母在套筒中偏心,需一定的定位精度;为了方便装配,需有间隙,故选小间隙配合
3	套筒 3 上的槽宽与定位块 4 侧面	$12 \frac{D10}{h9}$	定位块宽度按键宽标准取 $12h9$,因长槽与套筒轴线有歪斜,所以取较松配合
4	定位块 4 的圆柱面与尾座体 2 的孔	$\phi 10 \frac{H9}{h8}$	为容易装配和通过定位块自身转动修正它在安装时的位置误差,选用间隙配合
5	丝杠 5 的轴颈与后盖 8 的内孔	$\phi 20 \frac{H7}{g6}$	因有定心精度要求,且轴孔有相对低速转动,故选用较小间隙配合
6	挡油圈 7 的孔与丝杠 5 的轴颈	$\phi 20 \frac{H11}{g6}$	由于丝杠轴颈较长,为便于装配选间隙配合,因无定心精度要求,故选内孔精度较低
7	后盖 8 的凸肩与尾座体 2 的孔	$\phi 60 \frac{H6}{js6}$	配合面较短,主要起定心作用,配合后用螺钉紧固,没有相对运动,故选过渡配合
8	手轮 9 的孔与丝杠 5 的轴端	$\phi 18 \frac{H7}{js6}$	手轮通过半圆键带动丝杠一起转动,为便于装拆和避免手轮轴上晃动,选过渡配合
9	手柄轴与手轮 9 的小孔	$\phi 10 \frac{H7}{k6}$	为永久性连接,可选过盈配合,但考虑到手轮是铸件(脆性材料)不能取大的过盈,故选为过渡配合
10	手柄 11 的孔与偏心轴 10	$\phi 19 \frac{H7}{h6}$	手柄通过销转动偏心轴。装配时销与偏心轴配作,配作前要调整手柄处于紧固位置,偏心轴也处于偏心向上位置,因此配合不能有过盈
11	偏心轴 10 的右轴颈与尾座体 2 的孔	$\phi 35 \frac{H8}{d7}$	有相对转动,又考虑到偏心轴两轴颈和尾座体两支承孔都会产生同轴度误差,故选用间隙较大的配合
12	偏心轴 10 的左轴颈与尾座体 2 的孔	$\phi 18 \frac{H8}{d7}$	
13	偏心轴 10 与拉紧螺钉 12 的孔	$\phi 26 \frac{H8}{d7}$	没有特殊要求,考虑装拆方便,采用大间隙配合
14	压块 18 的圆销 16 与杠杆 14 的孔	$\phi 10 \frac{H7}{js7}$	无特殊要求,只要便于装配且压块装上后不易掉出即可,故选较松的过渡配合
15	压块的圆销 17 与压块 18 的孔	$\phi 18 \frac{H7}{js6}$	
16	杠杆 14 的孔与标准圆柱销	$\phi 16 \frac{H7}{n6}$	圆柱销按标准制成 $\phi 16n6$,结构要求销与杠杆配合要紧,销与螺钉孔配合要松,故取杠杆孔为 H7,螺钉孔为 D8
17	螺钉 19 的孔与标准圆柱销	$\phi 16 \frac{D8}{n6}$	
18	圆柱 15 与滑座 13 的孔	$\phi 32 \frac{H7}{n6}$	要求圆柱在承受径向力时不松动,但必要时能在孔中转位,故选用较紧的过渡配合
19	夹紧套 20 的外圆与尾座体 2 横孔	$\phi 32 \frac{H8}{e7}$	手柄 21 放松后,夹紧套要易于退出,便于套筒 3 移出,故选间隙较大的配合
20	手柄 21 的孔与螺钉轴	$\phi 16 \frac{H7}{n6}$	由半圆键带动螺钉轴转动,为便于装拆,选用小间隙配合



2.5 一般公差

国家标准 GB/T 1804—2000《一般公差 未注公差的线性尺寸和角度尺寸的公差》是等效采用国际标准 ISO 2768—1:1989《一般公差 第1部分:未单独注出公差的线性尺寸和角度尺寸的公差》,对 GB/T 1804—1992《一般公差 线性尺寸的未注公差》和 GB/T 11335—1989《未注公差 角度的极限偏差》进行修订的一项新标准。

2.5.1 尺寸的一般公差

1. 尺寸的一般公差定义

为保证零件的使用功能,必须对构成零件的所有要素提出一定的公差要求。但对某些在功能上无特殊要求的不重要尺寸或较低精度的非配合尺寸,通常不标注它们的公差,即未注公差尺寸。

对未注公差尺寸通常采用一般公差进行控制。一般公差是指在车间普通工艺条件下,机床设备一般加工能力可保证的公差。在正常维护和操作情况下,它代表经济加工精度。

GB/T 1804—2000对未注公差尺寸规定了一般公差。采用一般公差的尺寸,在该尺寸后不需注出其极限偏差数值。

采用一般公差的尺寸在正常车间精度保证的条件下,一般可不检验。

2. 一般公差的作用

- 1) 简化图样,使图样清晰易读。
- 2) 节省图样设计时间,设计人员只需熟悉和应用一般公差的规定,不必逐一考虑或计算其公差数值。
- 3) 图样上明确了哪些要素可由一般工艺水平保证,可简化检验要求,有利于质量管理。
- 4) 由于一般公差无需在图样上进行标注,因此突出了图样上注出公差的尺寸,以便在加工和检验时引起重视。
- 5) 明确了图样上要素的一般公差要求,对供需双方在加工、销售、交货等各个环节都是非常有利的。

2.5.2 一般公差标准

GB/T 1804—2000对线性尺寸的一般公差规定了4个公差等级,公差等级从高到低依次为精密级(f)、中等级(m)、粗糙级(c)和最粗级(v),并制定了相应的极限偏差数值。

线性尺寸的极限偏差数值见表2-19;倒圆半径和倒角高度尺寸的极限偏差数值见表2-20;角度尺寸的极限偏差数值见表2-21。

选取图样上未注公差尺寸的公差等级时,应考虑车间精度并由相应的技术文件或标准做出具体规定。

通过不同工艺(如切削和铸造)加工形成的两表面之间的未注公差尺寸应按规定的两个一般公差数值中的较大值控制。以角度单位规定的一般公差仅控制表面的线或素线的总方向,不控制它们的形状误差,从实际表面得到的线的总方向是理想几何形状的接触线方向。

表 2-19 线性尺寸的极限偏差数值 (摘自 GB/T 1804—2000) (单位: mm)

公差等级	公称尺寸分段							
	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

表 2-20 倒圆半径和倒角高度尺寸的极限偏差数值 (摘自 GB/T 1804—2000) (单位: mm)

公差等级	公称尺寸分段			
	0.5~3	>3~6	>6~30	>30
f(精密级)	±0.2	±0.5	±1	±2
m(中等级)				
c(粗糙级)	±0.4	±1	±2	±4
v(最粗级)				

注: 倒圆半径与倒角高度的含义参见 GB/T 6403.4—2008《零件倒圆与倒角》。

表 2-21 角度尺寸的极限偏差数值 (摘自 GB/T 1804—2000)

公差等级	公称长度分段/mm				
	~10	>10~50	>50~120	>120~400	>400
f(精密级)	±1°	±30′	±20′	±10′	±5′
m(中等级)					
c(粗糙级)	±1°30′	±1°	±30′	±15′	±10′
v(最粗级)	±3°	±2°	±1°	±30′	±20′

2.5.3 一般公差的表示方法

当零件功能上允许的公差等于或大于一般公差时, 均应采用一般公差。

采用国家标准规定的一般公差, 在图样上只标注公称尺寸, 不标注极限偏差或公差带代号, 而是在图样标题栏附近或技术要求、技术文件(如企业标准)中注出标准号和公差等级代号。

如图 2-41 所示 GB/T 1804-f, 表示图中未注尺寸的一般公差均选用精密级, 按国家标准 GB/T 1804—2000 的规定执行。例如: 查表 2-19 可知尺寸 $\phi 200\text{mm}$ 的极限偏差数值为 $\pm 0.2\text{mm}$, 尺寸 C5 的极限偏差数值为 $\pm 0.5\text{mm}$ 。

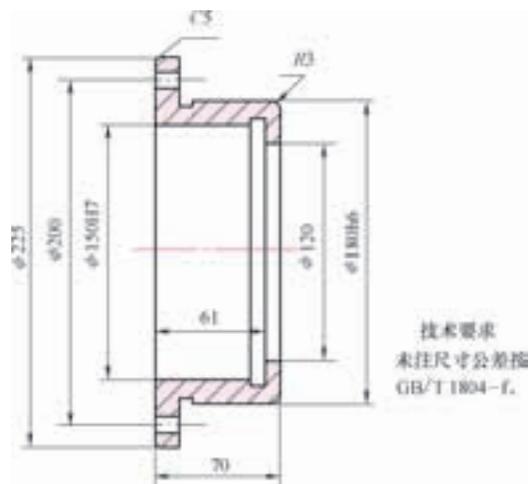


图 2-41 未注公差尺寸图样



知识拓展：大尺寸段与小尺寸段的极限与配合

1. 大尺寸段的极限与配合

大尺寸是指公称尺寸大于 500mm，甚至超过 10000mm 的零件尺寸。重型机械制造中经常会遇到大尺寸极限与配合的问题，如矿山机械制造、飞机制造和船舶制造等。

(1) 特点

1) 影响大尺寸加工误差的主要因素是测量误差。

① 大尺寸的孔、轴测量比较困难，测量时很难找到直径的真正位置，因此测量值通常小于真实值。

② 受测量方法和测量器具的限制，大尺寸外径的测量比内径的测量更困难、更难掌握，测量误差也更大。

③ 大尺寸测量时，测量基准的准确性以及被测工件与量具中心轴线的同轴误差均对测量精度影响较大。

④ 大尺寸测量时的温度变化对测量误差也有很大影响。

2) 大尺寸段公差特点。大尺寸零件多为单件、小批量生产，其加工和检测一般采用通用的机床、刀具和量具，而不用定尺寸的刀具和量具。大尺寸段公差特点如下。

① 大尺寸孔、轴的加工难易程度相当，由于刀具、量具及测量误差等原因，大尺寸段的轴比孔更难加工和测量，因此国家标准推荐孔、轴一般采用同级配合。

② 大尺寸孔、轴配合时，应注意测量误差对配合性质的影响。

③ 由于大尺寸零件制造和检测困难，因此大尺寸范围的公差等级一般选用 IT6~IT12。

(2) 大尺寸段常用孔、轴公差带 根据国家标准规定，公称尺寸>500~3150mm 大尺寸段常用孔、轴的公差带分别见表 2-22、表 2-23。其中孔的常用公差带有 31 种，轴的常用公差带有 41 种。

表 2-22 公称尺寸>500~3150mm 大尺寸段常用孔的公差带

			G6	H6	JS6	K6	M6	N6
		F7	G7	H7	JS7	K7	M7	N7
D8	E8	F8		H8	JS8			
D9	E9	F9		H9	JS9			
D10				H10	JS10			
D11				H11	JS11			
				H12	JS12			

表 2-23 公称尺寸>500~3150mm 大尺寸段常用轴的公差带

			g6	h6	js6	k6	m6	n6	p6	r6	s6	t6	u6
		f7	g7	h7	js7	k7	m7	m7	p7	r7	s7	t7	u7
d8	e8	f8		h8	js8								
d9	e9	f9		h9	js9								
d10				h10	js10								
d11				h11	js11								
				h12	js12								

(3) 配制配合 国家标准对大尺寸段没有推荐配合,但在实际应用中常用“配制配合”来处理问题。配制配合是以一个零件的实际(组成)要素尺寸为基数,来配制另一个零件的一种工艺措施,一般适用于尺寸较大、公差等级较高、单件小批生产的配合零件。

1) 对配制配合零件的一般要求。

① 先按功能要求选取标准配合。先按互换性生产选取配合,配制的结果(实际间隙或过盈)应满足所选标准配合的极限间隙或极限过盈的要求。

② 确定基准件。一般选择难加工、但能得到较高测量精度的那个零件作为基准件(先加工件,一般是孔),并给它一个比较容易达到的公差等级或按“线性尺寸的未注公差”加工。

③ 配制件的极限偏差与公差的确定。配制件(一般是轴)的公差可按规定的配合公差来选取,其极限偏差和极限尺寸以基准件的实际(组成)要素尺寸为基数来确定,以满足配合要求的极限间隙或极限过盈值。

由于以满足配合要求的极限间隙或极限过盈为目的,所以配制件的公差比采用互换性生产时单个零件的公差要大得多,其公差值接近于间隙配合公差或过盈配合公差。

2) 使用配制配合的注意事项。

① 配制配合。是仅限于关于尺寸极限方面的技术规定,不涉及其他技术要求,因此,其他几何公差和表面粗糙度方面的技术要求,不能因采用配制配合而降低。

② 测量的准确度。是对保证配合性质影响很大,测量时要注意温度、几何误差对测量结果的影响。配制配合应采用尺寸相互比较的测量方法,并且在同样条件下测量,使用同一基准装置或校对量具,由同一组计量人员进行测量以提高测量精度。

3) 配制配合在图样上的标注。在设计图样上,用代号 MF 表示配制配合,并借用基准孔的代号 H 或基准轴的代号 h 分别表示先加工件为孔或轴。在装配图和零件图的相应部位均应标注,此外在装配图上还要标明按功能要求选定的标准配合的代号。

(4) 公称尺寸 $> 3150 \sim 10000\text{mm}$ 的标准公差与基本偏差。国家标准对 $> 3150 \sim 10000\text{mm}$ 的公称尺寸规定了 5 个主段落(各分别包含 2 个中间段落)同时规定了其公差等级为 IT6~IT18,见表 2-24。该公称尺寸范围的孔、轴的基本偏差代号共 14 种,并且所有孔、轴的基本偏差数值大小相等、符号相反,符合通用规则,见表 2-24。

2. 小尺寸段的极限与配合

小尺寸是指公称尺寸至 18mm,尤其是小于 3mm 的零件尺寸。

(1) 特点 小尺寸零件在加工、检测、装配和使用等方面与常用尺寸和大尺寸零件有所不同,主要体现在加工误差和测量误差上。

1) 加工误差。由于小尺寸零件刚性差,受切削力影响变形很大,同时小尺寸零件加工时定位、装夹都比较困难,因而零件尺寸越小加工误差反而越大,而且小尺寸轴比孔更难加工。

2) 测量误差。在测量过程中,由于量具误差、温度变化和测量力等因素的影响,至少公称尺寸在 10mm 范围内的零件,测量误差与其公称尺寸不成正比。

(2) 小尺寸段孔、轴公差带与配合 GB/T 1803—2003 规定了公称尺寸至 18mm 的孔、轴公差带,主要适用于仪器仪表和钟表工业。国家标准规定了 154 种孔的公差带,见表 2-25; 169 种轴的公差带,见表 2-26。由于国家标准没有推荐优先、常用和一般公差带的选用次序,也没有推荐配合,因此各行业、工厂可根据实际情况自行选用公差带并组成配合。



- 2) 公差是零件尺寸允许的最大偏差。
- 3) 公差可以为正值、负值或零。
- 4) 孔的基本偏差为下极限偏差，而轴的基本偏差为上极限偏差。
- 5) 过渡配合可能具有间隙或过盈，因此过渡配合可能是间隙配合，也可能是过盈配合。
- 6) 若孔的实际（组成）要素的尺寸小于其配合的轴的实际（组成）要素的尺寸，则形成的配合为过盈配合。
- 7) 孔与轴的加工精度越高，则其配合精度也越高。
- 8) 某配合的最大间隙 $X_{\max} = +20\mu\text{m}$ ，配合公差 $T_f = 30\mu\text{m}$ ，则该配合一定是过渡配合。
- 9) 配合的松紧程度取决于标准公差的大小。

2-3 根据表 2-27 中的已知数据，计算并填写表中各空格的数值，并按适当比例绘制出各孔、轴的公差带图。

表 2-27 习题 2-3 表 (单位: mm)

公称尺寸	极限尺寸		极限偏差		公差	尺寸标注
	上极限尺寸	下极限尺寸	上极限偏差	下极限偏差		
孔: $\phi 10$	9.985	9.970				
孔: $\phi 18$						$\phi 18^{+0.017}_0$
孔: $\phi 30$		30.320			0.100	
轴: $\phi 40$			-0.050	-0.112		
轴: $\phi 60$	60.041			+0.011		
轴: $\phi 90$		89.978			0.022	

2-4 按 $\phi 30k6$ 加工一批轴，完工后测得每根轴的实际（组成）要素尺寸，其中最大尺寸为 $\phi 30.015\text{mm}$ ，最小尺寸为 $\phi 30\text{mm}$ 。试确定这批轴规定的公差值，并判断这批轴是否全部合格？说明原因。

2-5 根据表 2-28 中的已知数据，计算并填写表中各空格的数值，并按适当比例绘制出各对孔、轴配合的尺寸公差带图和配合公差带图。

表 2-28 习题 2-5 表 (单位: mm)

公称尺寸	孔			轴			最大间隙 X_{\max} 或 最小过盈 Y_{\min}	最小间隙 X_{\min} 或 最大过盈 Y_{\max}	平均间隙 X_{av} 或 平均过盈 Y_{av}	配合公差 T_f	配合种类
	上极限偏差 ES	下极限偏差 EI	公差 T_D	上极限偏差 es	下极限偏差 ei	公差 T_d					
$\phi 25$		0				0.013	+0.074		+0.057		
$\phi 14$		0				0.011		-0.012	+0.0025		
$\phi 45$			0.025					-0.050	-0.0295		

2-6 查表确定下列配合中孔、轴的极限偏差，说明各配合所采用的配合制和配合种类，并计算其极限间隙或极限过盈，画出配合公差带图。

- 1) $\phi 25H7/g6$ 2) $\phi 40K7/h6$ 3) $140H8/r8$ 4) $50S8/h8$ 5) $15JS8/g7$

2-7 已知下列两组孔、轴配合，具体使用要求如下：

- 1) 公称尺寸为 $\phi 40\text{mm}$ ， $X_{\max} = +0.068\text{mm}$ ， $X_{\min} = +0.025\text{mm}$ 。
- 2) 公称尺寸为 $\phi 35\text{mm}$ ， $Y_{\max} = -0.062\text{mm}$ ， $Y_{\min} = -0.013\text{mm}$ 。



试确定其配合制，孔、轴的公差等级和基本偏差代号，并计算它们的极限偏差。

2-8 某配合的公称尺寸为 $\phi 60\text{mm}$ ，要求装配后的间隙为 $+0.025 \sim +0.110\text{mm}$ ，若采用基孔制配合，试确定此配合中孔、轴的公差带代号，并画出其尺寸公差带图。

2-9 某基孔制配合孔、轴的公称尺寸为 $\phi 50\text{mm}$ ，要求配合的最大间隙 $X_{\max} = +0.066\text{mm}$ ，最小间隙 $X_{\min} = +0.025\text{mm}$ ，若轴的公差 $T_d = 0.016\text{mm}$ ，试确定孔、轴的极限偏差，并画出尺寸公差带图。

2-10 某基轴制配合孔、轴的公称尺寸为 $\phi 30\text{mm}$ ，要求配合的最大过盈 $Y_{\max} = -0.035\text{mm}$ ，最小过盈 $Y_{\min} = -0.001\text{mm}$ ，若孔的公差 $T_D = 0.021\text{mm}$ ，试确定孔、轴的极限偏差，并画出尺寸公差带图。

2-11 已知下列三组孔、轴配合，其极限间隙或极限过盈分别满足下列条件：

- 1) 配合的公称尺寸为 $\phi 25\text{mm}$ ， $X_{\max} = +0.086\text{mm}$ ， $X_{\min} = +0.020\text{mm}$ 。
- 2) 配合的公称尺寸为 $\phi 40\text{mm}$ ， $Y_{\max} = -0.076\text{mm}$ ， $Y_{\min} = -0.035\text{mm}$ 。
- 3) 配合的公称尺寸为 $\phi 60\text{mm}$ ， $Y_{\max} = -0.032\text{mm}$ ， $X_{\max} = +0.046\text{mm}$ 。

试分别确定各配合中孔、轴的公差等级，并按基孔制确定其配合代号。

第 3 章

测量技术基础

教学导读

本章首先介绍几何量测量的定义及测量过程四要素与量值传递系统、量块基本知识、计量器具的基本技术性能指标、测量方法以及各类测量误差及其特点，以此为基础针对不同测量误差详述其处理方法，给出了测量的数据处理步骤与测量结果的表达形式等。要求学生掌握的知识点为：测量、量块、测量误差和分度值等概念，量值传递系统的组成、测量方法、测量误差和测量结果的表达，其他计算器具的工作原理，各类测量误差的数据处理方法。测量过程四要素、量块等级划分、测量误差处理与数据处理方法是本章的重点和难点。

3.1 概述

零部件品质要求不同、形状各异，如图 3-1 所示。零部件要满足互换性要求，在制造完成后确保产品符合公差的要求，因此需要根据零部件测量精度要求、测量系统所需要使用的环境、测量效率等方面进行考虑选择测量系统，以保证几何量测量与品质控制要求。常用的



图 3-1 变速箱零件



计量器具（螺旋千分尺）如图 3-2 所示。



图 3-2 常用的计量器具（螺旋千分尺）

3.1.1 测量与测量技术

检测是测量与检验的总称。测量是指将被测量与用计量单位表示的标准量进行比较，从而确定被测量的试验过程，而检验则是判断零件是否合格而不需要测出具体数值。

1. 测量

测量是将被测量与用计量单位表示的标准量进行比较，从而确定被测量的过程。

若被测量为 Q ，计量单位为 u ，确定的比值为 x ，则被测量可表示为

$$Q = xu \quad (3-1)$$

该公式的物理意义：在被测量 Q 一定的情况下，比值 x 完全决定于所采用的计量单位 u ，而且呈反比关系，同时说明计量单位 u 的选择决定于被测量所要求的精确程度。

如某一被测长度 Q ，与毫米（mm）作为单位 u 进行比较，得到的比值 x 为 10.5，则被测长度 $Q = 10.5\text{mm}$ 。

2. 检验

检验是确定被测的几何量是否在规定的验收极限范围内从而判断其是否合格，而不要求其准确的量值。

3. 测量过程四要素

由测量的定义可知，任何一个测量过程不仅必须有明确的被测对象、确定的计量单位、与被测对象相适应的测量方法，而且测量结果还要达到所要求的测量精度。因此，一个完整的测量过程应包括如下四个要素。

(1) 被测对象 被测对象是几何量，即长度、角度、形状、位置、表面粗糙度以及螺纹、齿轮等零件的几何参数。

(2) 计量单位 我国采用的法定计量单位：长度的计量单位为米（m），角度的计量单位为弧度（rad）和度（°）、分（′）、秒（″）。

在机械零件制造中，常用的长度计量单位是毫米（mm）；在几何量精密测量中，常用的长度计量单位是微米（ μm ）；在超精密测量中，常用的长度计量单位是纳米（nm）。

常用的角度计量单位是弧度、微弧度（ μrad ）和度、分、秒。

$$1\mu\text{rad} = 10^{-6}\text{rad}$$

$$1^\circ = 0.0174533\text{rad}$$

(3) 测量方法 测量时所采用的测量原理、计量器具和测量条件的总和。

(4) 测量精度 测量结果与被测量真值的一致程度。精密测量要将误差控制在允许的



范围内,以保证测量精度。为此,除了合理地选择测量方法外,还应正确估计测量误差的性质和大小,以便保证测量结果具有较高的置信度。

3.1.2 计量单位与量值传递系统

1. 计量单位与长度基准的量值传递系统

国际上统一使用的公制长度基准是在1983年第17届国际计量大会上通过的,以米作为长度基准。米的新定义为:米是光在真空中(1/299792458)s的时间间隔内所行进的距离。

为了保证长度测量的精度,还需要建立准确的量值传递系统。鉴于激光稳频技术的发展,用激光波长作为长度基准具有很好的稳定性和复现性。我国采用碘吸收稳定的0.633 μm 氦氖激光辐射作为波长标准来复现“米”。

在实际应用中,不能直接使用光波作为长度基准进行测量,而是采用各种计量器具进行测量。为了保证量值统一,必须把长度基准的量值准确地传递到生产中应用的计量器具和被测工件上。长度基准的量值传递系统如图3-3所示。

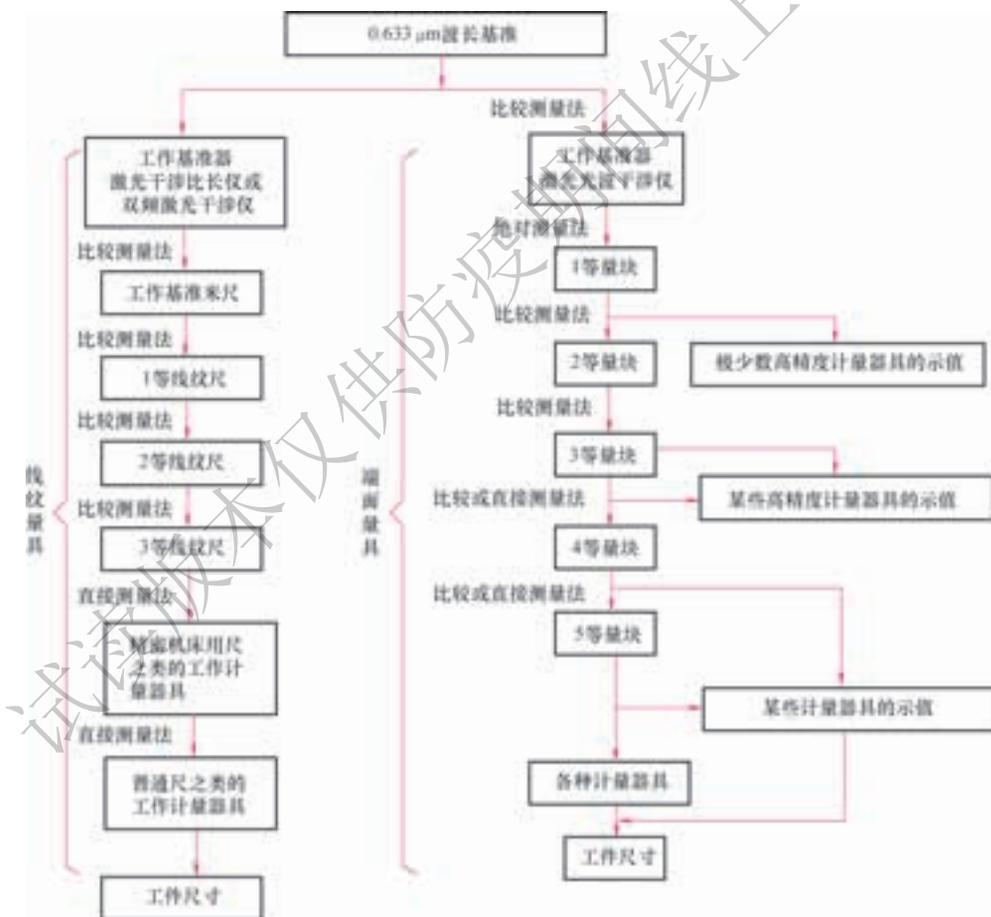


图 3-3 长度基准的量值传递系统

2. 角度基准与量值传递系统

角度是重要的几何量之一。角度不需要像长度一样建立自然基准。但在计量部门,为了



方便,仍采用多面棱体(棱形块)作为角度量值的基准。机械制造中的角度基准一般是角度量块、测角仪或分度头等。

多面棱体有4面、6面、8面、12面、24面、36面及72面等,以多面棱体作为角度基准的量值传递系统,如图3-4所示。



图 3-4 角度基准的量值传递系统

3.1.3 量块

1. 量块及其术语

量块是精密测量中经常使用的标准器,分为长度量块、角度量块两类。

长度量块是单值端面量具,其形状大多为长方六面体,其中一对平行平面为量块的工作表面,两工作表面的间距即长度量块的工作尺寸。

量块由特殊合金钢制成,耐磨且不易变形,工作表面之间或与平晶(图3-5)表面间具有可研合性,以便组成所需尺寸的量块组。

(1) 标称长度 L_n 量块上标出的尺寸。

(2) 中心长度 L_c 对应于量块未研合测量面中心点的量块长度。量块长度是指量块一个测量面上的任意点到与其相对的另一测量面相研合的辅助体表面之间的垂直距离。

(3) 量块长度变动量 V 指量块任意点长度 L_i 的最大差值,即 $V=L_{imax}-L_{imin}$ 。量块长度变动量最大允许值 t_v 列在表3-1和表3-2中。

(4) 量块长度偏差 量块的长度实测值与标称长度之差。量块长度偏差的允许值(极限偏差 t_e)列在表3-1中。

角度量块有三角形(一个工作角)和四边形(四个工作角)两种。三角形角度量块只有一个工作角($10^\circ\sim 79^\circ$)可以用作角度测量的标准量,而四边形角度量块则有四个工作角($80^\circ\sim 100^\circ$)可以用作角度测量的标准量。

2. 长度量块的等级划分与选用

(1) 长度量块的分级 量块按制造精度分为五级,即0、1、2、3、K级,其中0级精度最高,3级精度最低。K级为校准级,用来校准0、1、2级量块。

量块的“级”主要是根据量块长度极限偏差和量块长度变动量最大允许值来划分的。量块按“级”使用时,以量块的标称长度作为工作尺寸。该尺寸包含了量块的制造误差,不需要加修正值,使用较方便,但不如按“等”使用的测量精度高。量块分级的精度指标见表3-1。

(2) 长度量块的分等 量块按检定精度分为1~5等,其中1等精度最高,5等精度最低。

量块按等使用时,是以量块检定书列出的实测中心长度作为工作尺寸,该尺寸排除了量块的制造误差,只包含检定时较小的测量误差。因此,量块按“等”使用比按“级”使用的测量精度高。量块分等的精度指标见表3-2。

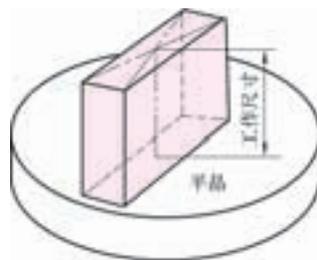


图 3-5 量块工作表面与平晶研合



表 3-1 量块分级的精度指标 (摘自 JJG 146—2011)

标称长度 l_n /mm	K 级		0 级		1 级		2 级		3 级	
	t_e	t_v	t_e	t_v	t_e	t_v	t_e	t_v	t_e	t_v
	最大允许值/ μm									
$l_n \leq 10$	± 0.20	0.05	± 0.12	0.10	± 0.20	0.16	± 0.45	0.30	± 1.0	0.50
$10 < l_n \leq 25$	± 0.30	0.05	± 0.14	0.10	± 0.30	0.16	± 0.60	0.30	± 1.2	0.50
$25 < l_n \leq 50$	± 0.40	0.06	± 0.20	0.10	± 0.40	0.18	± 0.80	0.30	± 1.6	0.55
$50 < l_n \leq 75$	± 0.50	0.06	± 0.25	0.12	± 0.50	0.18	± 1.00	0.35	± 2.0	0.55
$75 < l_n \leq 100$	± 0.60	0.07	± 0.30	0.12	± 0.60	0.20	± 1.20	0.35	± 2.5	0.60
$100 < l_n \leq 150$	± 0.80	0.08	± 0.40	0.14	± 0.80	0.20	± 1.60	0.40	± 3.0	0.65
$150 < l_n \leq 200$	± 1.00	0.09	± 0.50	0.16	± 1.00	0.25	± 2.00	0.40	± 4.0	0.70
$200 < l_n \leq 250$	± 1.20	0.10	± 0.60	0.16	± 1.20	0.25	± 2.40	0.45	± 5.0	0.75
$250 < l_n \leq 300$	± 1.40	0.10	± 0.70	0.18	± 1.40	0.25	± 2.80	0.50	± 6.0	0.80
$300 < l_n \leq 400$	± 1.80	0.12	± 0.90	0.20	± 1.80	0.30	± 3.60	0.50	± 7.0	0.90
$400 < l_n \leq 500$	± 2.20	0.14	± 1.10	0.25	± 2.20	0.35	± 4.40	0.60	± 9.0	1.00
$500 < l_n \leq 600$	± 2.60	0.16	± 1.30	0.25	± 2.60	0.40	± 5.00	0.70	± 11.0	1.10
$600 < l_n \leq 700$	± 3.00	0.18	± 1.50	0.30	± 3.00	0.45	± 6.00	0.70	± 12.0	1.00
$700 < l_n \leq 800$	± 3.40	0.20	± 1.70	0.30	± 3.40	0.50	± 6.50	0.80	± 14.0	1.30
$800 < l_n \leq 900$	± 3.80	0.20	± 1.90	0.35	± 3.80	0.50	± 7.50	0.90	± 15.0	1.40
$900 < l_n \leq 1000$	± 4.20	0.25	± 2.00	0.40	± 4.20	0.60	± 8.00	1.00	± 17.0	1.50

表 3-2 量块分等的精度指标 (摘自 JJG 146—2011)

(单位: μm)

标称长度 l_n /mm	1 等		2 等		3 等		4 等		5 等	
	测量 不确定度	长度变 动量								
$l_n \leq 10$	0.022	0.05	0.06	0.10	0.11	0.16	0.22	0.30	0.6	0.50
$10 < l_n \leq 25$	0.025	0.05	0.07	0.10	0.12	0.16	0.25	0.30	0.6	0.50
$25 < l_n \leq 50$	0.030	0.06	0.08	0.10	0.15	0.18	0.30	0.30	0.8	0.55
$50 < l_n \leq 75$	0.035	0.06	0.09	0.12	0.18	0.18	0.35	0.35	0.9	0.55
$75 < l_n \leq 100$	0.040	0.07	0.10	0.12	0.20	0.20	0.40	0.35	1.0	0.60
$100 < l_n \leq 150$	0.05	0.08	0.12	0.14	0.25	0.20	0.50	0.40	1.2	0.65
$150 < l_n \leq 200$	0.06	0.09	0.15	0.16	0.30	0.25	0.6	0.40	1.5	0.70
$200 < l_n \leq 250$	0.07	0.10	0.18	0.16	0.35	0.25	0.7	0.45	1.8	0.75
$250 < l_n \leq 300$	0.08	0.10	0.20	0.18	0.40	0.25	0.8	0.50	2.0	0.80
$300 < l_n \leq 400$	0.10	0.12	0.25	0.20	0.50	0.30	1.0	0.50	2.5	0.90
$400 < l_n \leq 500$	0.12	0.14	0.30	0.25	0.60	0.35	1.2	0.60	3.0	1.00
$500 < l_n \leq 600$	0.14	0.16	0.35	0.25	0.7	0.40	1.4	0.70	3.5	1.10
$600 < l_n \leq 700$	0.16	0.18	0.40	0.30	0.8	0.45	1.6	0.70	4.0	1.20
$700 < l_n \leq 800$	0.18	0.20	0.45	0.30	0.9	0.50	1.8	0.80	4.5	1.30
$800 < l_n \leq 900$	0.20	0.20	0.50	0.35	1.0	0.50	2.0	0.90	5.0	1.40
$900 < l_n \leq 1000$	0.22	0.25	0.55	0.40	1.1	0.60	2.2	1.00	5.5	1.50



长度量块的分等，其量值按长度量值传递系统进行，即低一等的量块检定必须用高一等的量块作为基准进行测量。

按“等”使用量块，在测量上需要加入修正值，虽麻烦一些，但消除了量块制造误差的影响，可用制造精度较低的量块进行较精密的测量。

(3) 长度量块的尺寸组合 利用量块的研合性，可根据实际需要，用多个尺寸不同的量块研合组成所需要的长度标准量，为保证测量精度一般不超过四块。

量块是成套制成的，每套包括一定数量不同尺寸的量块。83 块和 46 块成套量块尺寸组成见表 3-3。

表 3-3 83 块和 46 块成套量块尺寸组成 (摘自 GB/T 6093—2001)

总块数	尺寸系列/mm	间隔/mm	块数	总块数	尺寸系列/mm	间隔/mm	块数
83	0.5	—	1	46	1	—	1
	1	—	1		1.001~1.009	0.001	9
	1.005	—	1		1.01~1.09	0.01	9
	1.01~1.49	0.01	49		1.1~1.9	0.1	9
	1.5~1.9	0.1	5		2~9	1	8
	2.0~9.5	0.5	16		10~100	10	10
	10~100	10	10				

长度量块的尺寸组合一般采用消尾法，即选一块量块应消去一位尾数。

例如：尺寸 46.725mm 使用 83 块成套量块组合为

$$46.725\text{mm} = 1.005\text{mm} + 1.22\text{mm} + 4.5\text{mm} + 40\text{mm}。$$

选用的第 1 个量块：1.005mm。

第 2 个量块：1.22mm。

第 3 个量块：4.5mm。

第 4 个量块：40mm。

量块常作为尺寸传递的长度标准和计量器具示值误差的检定标准，也可作为精密机械零件测量、精密机床和夹具调整时的尺寸基准。

3.2 测量方法与计量器具

3.2.1 测量方法及其分类

在实际工作中，测量方法通常是指获得测量结果的具体方式。它可以按下面几种情况进行分类。

1. 按实测几何量是否就是被测几何量分

(1) 直接测量 直接测量是指被测几何量的量值直接由计量器具读出，如用游标卡尺、千分尺测量轴径。

(2) 间接测量 间接测量是指欲测量的几何量的量值由实测几何量的量值按一定的函数关系式运算后获得。例如：采用“弓高弦长法”间接测量圆弧样板的半径 R ，只要测得弓高 h 和弦长 b 的量值，然后按公式进行计算即可得到 R 的量值。

直接测量过程简单，其测量精度只与这一测量过程有关，而间接测量的精度不仅取决于



实测几何量的测量精度，还与所依据的计算公式和计算的精度有关。一般来说，直接测量的精度比间接测量的精度高。因此，应尽量采用直接测量。对于受条件所限无法进行直接测量的场合采用间接测量。

2. 按示值是否就是被测几何量的量值分

(1) 绝对测量 绝对测量是计量器具的示值就是被测几何量的量值，如用游标卡尺、千分尺测量轴径。

(2) 相对测量（也称为比较测量） 计量器具的示值只是被测几何量相对于标准量（已知）的偏差，被测几何量的量值等于已知标准量与该偏差值（示值）的代数和。例如：用立式光学比较仪测量轴径，测量时先用量块调整示值零位，该比较仪指示出的示值为被测轴径相对于量块尺寸的偏差。一般来说，相对测量的精度比绝对测量的精度高。

3. 按测量时被测表面与计量器具的测头是否接触分

(1) 接触测量 接触测量是在测量过程中，计量器具的测头与被测表面接触，即有测量力存在，如用立式光学比较仪测量轴径。

(2) 非接触测量 非接触测量是在测量过程中，计量器具的测头不与被测表面接触，即无测量力存在，如用光切显微镜测量表面粗糙度，用气动量仪测量孔径。

对于接触测量，测头和被测表面的接触会引起弹性变形，即产生测量误差，而非接触测量则无此影响，故易变形的软质表面或薄壁工件多用非接触测量。

4. 按工件上被测几何量是否同时测量分

(1) 单项测量 单项测量是对工件上的各个被测几何量分别进行测量。例如：用公法线千分尺测量齿轮的公法线长度变动，用跳动检查仪测量齿轮的齿圈径向圆跳动等。

(2) 综合测量 综合测量是对工件上几个相关几何量的综合效应同时测量得到综合指标，以判断综合结果是否合格。例如：用齿距仪测量齿轮的齿距累积误差，实际上反映的是齿轮的公法线长度变动和齿圈径向圆跳动两种误差的综合结果。

综合测量的效率比单项测量的效率高，一般来说单项测量便于分析工艺指标，综合测量便于只要求判断合格与否，而不需要得到具体的测得值的场合。

依据测头和被测表面之间是否处于相对运动状态，测量还可以分为动态测量和静态测量。动态测量是在测量过程中，测头与被测表面处于相对运动状态。动态测量效率高，并能测出工件上几何参数连续变化时的情况。例如：用电动轮廓仪测量表面粗糙度是动态测量。此外，还有主动测量（也称为在线测量），是在加工工件的同时对被测对象进行测量，其测量结果可直接用于控制加工过程，及时防止废品的产生。

3.2.2 计量器具

1. 量具类

量具类是通用的有刻线的或无刻线的一系列单值和多值的量块和量具等，如长度量块、90°角尺、角度量块、线纹尺、游标卡尺、螺旋千分尺等。

2. 量规类

量规是没有刻线且专用的计量器具，可用于检验工件要素提取尺寸和几何误差的综合结果。使用量规检验不能得到工件的具体提取尺寸和几何误差值，而只能确定被检验工件是否合格。例如：使用光滑极限量规检验孔、轴，只能判定孔、轴的合格与否，不能得到孔、轴



的实际尺寸。

3. 计量仪器

计量仪器（简称为量仪）是能将被测几何量的量值转换成可直接观测的示值或等效信息的一类计量器具。计量仪器按原始信号转换的原理可分为以下几种。

(1) 机械量仪 机械量仪是指用机械方法实现原始信号转换的量仪，一般都具有机械测微机构。这种量仪结构简单、性能稳定、使用方便，如指示表、杠杆比较仪等。

(2) 光学量仪 光学量仪是指用光学方法实现原始信号转换的量仪，一般都具有光学放大（测微）机构。这种量仪精度高、性能稳定，光学比较仪（图 3-6）、工具显微镜、干涉仪等。

(3) 电动量仪 电动量仪是指能将原始信号转换为电量信号的量仪，一般都具有放大、滤波等电路。这种量仪精度高、测量信号经 A/D 转换后，易于与计算机接口，实现测量和数据处理的自动化，如电感比较仪、电动轮廓仪、圆度仪等。

(4) 气动量仪 气动量仪是以压缩空气为介质，通过气动系统流量或压力的变化来实现原始信号转换的量仪。这种量仪结构简单、测量精度和效率都高、操作方便，但示值范围小，如水柱式气动量仪、浮标式气动量仪等。



图 3-6 光学比较仪

4. 计量装置

计量装置是指为确定被测几何量的量值所必需的计量器具和辅助设备的总体。它能够测量同一工件上较多的几何量和形状比较复杂的工件，有助于实现检测自动化或半自动化，如齿轮综合精度检查仪、发动机缸体孔的几何精度综合测量仪等。

3.2.3 计量器具的基本技术性能指标

计量器具的基本技术性能指标是合理选择和使用计量器具的重要依据。下面介绍一些常用的基本技术性能指标。

1. 标尺间距

标尺间距是指计量器具的标尺或分度盘上相邻两刻线中心之间的距离或圆弧长度。考虑人眼观察的方便，一般应取标尺间距为 1~2.5mm。

2. 分度值

分度值是指计量器具的标尺或分度盘上每一标尺间距所代表的量值。一般长度计量器具的分度值有 0.1mm、0.05mm、0.02mm、0.01mm、0.005mm、0.002mm、0.001mm 等。一般来说，分度值越小，则计量器具的精度就越高。

3. 分辨力

分辨力是指计量器具所能显示的最末一位数所代表的量值。由于在一些量仪（如数字式量仪）中，其读数采用非标尺或非分度盘显示，因此就不能使用分度值这一概念，而将其称为分辨力。例如：国产 JC19 型数显式万能工具显微镜的分辨力为 0.5 μ m。



4. 示值范围

示值范围是计量器具所能显示或指示的被测几何量起始值到终止值的范围。例如：数显式光学比较仪的示值范围为 $\pm 100\mu\text{m}$ 。

5. 测量范围

测量范围是计量器具在允许的误差限度内所能测出的被测几何量量值的下限值到上限值的范围。一般测量范围上限值与下限值之差称为量程。例如：立式光学比较仪的测量范围为 $0\sim 180\text{mm}$ ，也可表述为立式光学比较仪的量程为 180mm 。

6. 灵敏度

灵敏度是计量器具对被测几何量微小变化的响应变化能力。若被测几何量的变化为 Δx ，该几何量引起计量器具的响应变化能力为 ΔL ，则灵敏度为

$$S = \Delta L / \Delta x \quad (3-2)$$

当上式中分子和分母为同种量时，灵敏度也称为放大比或放大倍数。对于具有等分刻线的标尺或分度盘的量仪，放大倍数 K 等于标尺间距 a 与分度值 i 之比

$$K = a / i \quad (3-3)$$

一般来说，分度值越小，则计量器具的灵敏度就越高。

7. 示值误差

示值误差是指计量器具上的示值与被测几何量的真值的代数差。一般来说，示值误差越小，则计量器具的精度就越高。

8. 修正值

修正值是指为了消除或减少系统误差，用代数法加到测量结果上的数值，其大小与示值误差的绝对值相等，而符号相反。例如：示值误差为 -0.004mm ，则修正值为 $+0.004\text{mm}$ 。

9. 测量重复性

测量重复性是指在相同的测量条件下，对同一被测几何量进行多次测量时，各测量结果之间的一致性。通常以测量重复性误差的极限值（正、负偏差）来表示。

10. 不确定度

不确定度是指由于测量误差的存在而对被测几何量量值不能肯定的程度，直接反映测量结果的置信度。

3.3 测量误差

3.3.1 测量误差的概念

对于任何测量过程，由于计量器具和测量条件方面的限制，不可避免地会出现或大或小的测量误差。因此，每一个实际测得值，往往只是在一定程度上接近被测几何量的真值，这种实际测得值与被测几何量真值的差值称为测量误差。测量误差可以用绝对误差或相对误差来表示。

1. 绝对误差

绝对误差是指被测几何量的测得值与其真值之差，即



$$\delta = x - x_0 \quad (3-4)$$

式中, δ 是绝对误差; x 是被测几何量的测得值; x_0 是被测几何量的真值。

绝对误差可能是正值, 也可能是负值。这样, 被测几何量的真值可表示为

$$x_0 = x \pm |\delta| \quad (3-5)$$

按照此式, 可以由测得值和测量误差来估计真值存在的范围。测量误差的绝对值越小, 则被测几何量的测得值就越接近真值, 就表明测量精度越高, 反之, 则表明测量精度越低。对于大小不相同的被测几何量, 用绝对误差表示测量精度不方便, 所以需要相对误差来表示或比较它们的测量精度。

2. 相对误差

相对误差是指绝对误差 (取绝对值) 与真值之比, 即

$$f = \frac{|\delta|}{x_0} \times 100\%$$

由于 x_0 无法得到, 因此在实际应用中常以被测几何量的测得值代替真值进行估算, 即

$$f = \frac{|\delta|}{x} \times 100\% \quad (3-6)$$

式中, f 是相对误差。

相对误差是一个量纲一的数值, 通常用百分比来表示。

例如: 测得两个孔的直径大小分别为 25.43mm 和 41.94mm, 其绝对误差分别为 +0.02mm 和 +0.01mm, 则由式 (3-6) 计算得到其相对误差分别为

$$f = \frac{|\delta|}{x} \times 100\% = \frac{0.02}{25.43} \times 100\% = 0.0786\%$$

$$f = \frac{|\delta|}{x} \times 100\% = \frac{0.01}{41.94} \times 100\% = 0.0238\%$$

显然, 后者的测量精度比前者高。

3.3.2 测量误差分类

按测量误差特点和性质, 测量误差可分为系统误差、随机误差和粗大误差三类。

1. 系统误差

系统误差是指在一定测量条件下, 多次测取同一量值时, 绝对值和符号均保持不变的测量误差, 或者绝对值和符号按某一规律变化的测量误差。前者称为定值系统误差, 后者称为变值系统误差。

例如: 在比较仪上用相对法测量工件尺寸时, 调整量仪所用量块的误差就会引起定值系统误差; 量仪的分度盘与指针回转轴偏心所产生的示值误差会引起变值系统误差。

根据系统误差的性质和变化规律, 系统误差可以用计算或试验对比的方法确定, 用修正值 (校正值) 从测量结果中予以消除。但在某些情况下, 变值系统误差由于变化规律比较复杂, 不易确定, 因而难以消除。在实际测量中, 系统误差对测量结果的影响是不能忽视的, 揭示系统误差出现的规律性, 消除系统误差对测量结果的影响, 是提高测量精度的有效措施。



(1) 发现系统误差的方法 在测量过程中产生系统误差的因素是复杂多样的, 查明所有的系统误差是很困难的事情, 同时也不可能完全消除系统误差的影响。

发现系统误差必须根据具体测量过程和计量器具进行全面而仔细的分析, 但目前还没有能够找到可以发现各种系统误差的方法。下面只介绍适用于发现某些系统误差常用的两种方法。

1) 试验对比法。试验对比法是通过改变产生系统误差的测量条件, 进行不同测量条件下的测量, 来发现系统误差。这种方法适用于发现定值系统误差。

例如: 量块按标称尺寸使用时, 在测量结果中, 就存在着由于量块尺寸偏差而产生的大小和符号均不变的定值系统误差, 重复测量也不能发现这一误差, 只有用另一块更高等级的量块进行对比测量, 才能发现它。

2) 残差观察法。残差观察法是指根据测量列的各个残差大小和符号的变化规律, 直接由残差数据或残差曲线图形来判断有无系统误差, 这种方法主要适用于发现大小和符号按一定规律变化的变值系统误差。根据测量先后顺序, 将测量列的残差作图(图 3-7), 观察残差的规律。若残差大体上正、负相间, 又没有显著变化, 就认为不存在变值系统误差(图 3-7a)。若残差按近似的线性规律递增或递减, 就可判断存在线性系统误差(图 3-7b)。若残差的大小和符号有规律地周期变化, 就可判断存在周期性系统误差(图 3-7c)。但是残差观察法对于测量次数不是足够多时, 也有一定的难度。



图 3-7 变值系统误差的发现

a) 不存在变值系统误差 b) 存在线性系统误差 c) 存在周期性系统误差

(2) 消除系统误差的方法

1) 从产生误差根源上消除系统误差。要求测量人员分析测量过程中可能产生系统误差的各个环节, 并在测量前就将系统误差从产生根源上加以消除。例如: 为了防止测量过程中仪器示值零位的变动, 测量开始和结束时都需检查示值零位; 若示值不为零, 须调整仪器并进行置零处理。

2) 用修正法消除系统误差。这种方法是预先将计量器具的系统误差检定或计算出来, 做出误差表或误差曲线, 然后取与误差数值相同而符号相反的值作为修正值, 将测得值加上相应的修正值, 即可使测量结果不包含系统误差。

3) 用抵消法消除定值系统误差。这种方法要求在对称位置上分别测量一次, 以使这两次测量中测得的数据出现的系统误差大小相等, 符号相反, 取这两次测量中数据的平均值作为测得值, 即可消除定值系统误差。例如: 在工具显微镜上测量螺纹螺距时, 为了消除螺纹轴线与量仪工作台移动方向倾斜而引起的系统误差, 可分别测取螺纹左、右牙面的螺距, 然后取它们的平均值作为螺距测得值。



4) 用半周期法消除周期性系统误差。对周期性系统误差, 可以每相隔半个周期进行一次测量, 以相邻两次测量数据的平均值作为一个测得值, 即可有效消除周期性系统误差。

消除和减小系统误差的关键是找出误差产生的根源和规律。实际上, 系统误差不可能完全消除。一般来说, 系统误差若能减小到使其影响相当于随机误差的程度, 则可认为已被消除。

2. 随机误差

随机误差是指在一定测量条件下, 多次测取同一量值时, 绝对值和符号以不可预定的方式变化的测量误差。

就某一次具体测量而言, 随机误差的绝对值和符号无法预先知道。但对于连续多次重复测量来说, 随机误差符合一定的概率统计规律, 因此, 可以应用概率论和数理统计的方法对它进行处理。系统误差和随机误差的划分并不是绝对的, 它们在一定的条件下是可以相互转化的。

随机误差主要由测量过程中一些偶然性因素或不确定因素引起的。例如: 量仪传动机构的间隙、摩擦、测量力的不稳定以及温度波动等引起的测量误差, 都属于随机误差。按一定公称尺寸制造的量块总是存在着制造误差, 对某一具体量块来讲, 可认为该制造误差是系统误差, 但对一批量块而言, 制造误差是变化的, 可以认为它是随机误差。在使用某一量块时, 若没有检定该量块的尺寸偏差, 而按量块标称尺寸使用, 则制造误差属于随机误差; 若检定出该量块的尺寸偏差, 按量块提取尺寸使用, 则制造误差属于系统误差。

利用误差转化的特点, 可根据需要将系统误差转化为随机误差, 用概率论和数理统计的方法来减小该误差的影响; 或将随机误差转化为系统误差, 用修正的方法减小该误差的影响。

3. 粗大误差

粗大误差是指超出在一定测量条件下预计的测量误差, 就是对测量结果产生明显歪曲的测量误差。含有粗大误差的测得值称为异常值, 它的数值比较大。

1) 粗大误差的产生。粗大误差的产生有主观和客观两方面的原因, 主观原因如测量人员疏忽造成的读数误差, 客观原因如外界突然振动引起的测量误差。由于粗大误差明显歪曲测量结果, 因此在处理测量数据时, 应根据判断粗大误差的准则设法将其剔除。

2) 粗大误差的处理方法。粗大误差的数值相当大, 在测量中应尽可能避免。如果粗大误差已经产生, 则应根据判断粗大误差的准则予以剔除, 通常用拉依达准则 (又称为 3σ 准则) 来判断。

当测量列服从正态分布时, 残差落在 $\pm 3\sigma$ 外的概率很小, 仅有 0.27%, 即在连续 370 次测量中只有一次测量的残差会超出 $\pm 3\sigma$, 而实际上连续测量的次数绝不会超过 370 次, 测量列中就不应该有超出 $\pm 3\sigma$ 的残差。因此, 当出现绝对值大于 3σ 的残差时, 即 $|v_i| > 3\sigma$, 则认为该残差对应的测得值含有粗大误差, 应予以剔除。

注意拉依达准则不适用于测量次数小于或等于 10 的情况。

3.3.3 测量误差的来源

由于测量误差的存在, 测得值只能近似地反映被测几何量的真值。为减小测量误差, 就



须分析产生测量误差的原因,以便提高测量精度。在实际测量中,产生测量误差的因素很多,归纳起来主要有以下几方面。

1. 计量器具误差

计量器具误差是计量器具本身的误差,包括计量器具的设计、制造和使用过程中的误差,这些误差的总和反映在示值误差和测量的重复性上。

设计计量器具时,为了简化结构而采用近似设计的方法会产生测量误差。例如:当设计的计量器具不符合阿贝原则时,也会产生测量误差。

阿贝原则是指测量长度时,应使被测工件的尺寸线(简称为被测线)和计量器具中作为标准的刻度尺(简称为标准线)重合或顺次排成一条直线。例如:千分尺的标准线(测微螺杆轴线)与工件被测线(被测直径)在同一条直线上,而游标卡尺作为标准的刻度尺与被测直径不在同一条直线上。一般符合阿贝原则的测量引起的测量误差很小,可以略去不计;不符合阿贝原则的测量引起的测量误差较大。所以用千分尺测量轴径要比用游标卡尺测量轴径的测量误差更小,即测量精度更高。

有关阿贝原则的详细内容可以参考计量器具方面的书籍。

计量器具零件的制造和装配误差也会产生测量误差。例如:标尺的标尺间距不准确、指示表的分度盘与指针回转轴的安装有偏心等都会产生测量误差。计量器具在使用过程中零件的变形等也会产生测量误差。此外,相对测量时使用的标准量(如长度量块)的制造误差也会产生测量误差。

2. 方法误差

方法误差是指测量方法的不完善(包括计算公式不准确,测量方法选择不当,工件安装、定位不准确等)引起的误差。

例如:在接触测量中,由于测头测量力的影响,使被测工件和测量装置产生变形而产生测量误差。

3. 环境误差

环境误差是指测量时环境条件(温度、湿度、气压、照明、振动、电磁场等)不符合标准所导致的误差。

在测量长度时,规定的环境条件标准温度为 20°C ,但是在实际测量时被测工件和计量器具的温度对标准温度均会产生或大或小的偏差,而被测工件和计量器具的材料不同时它们的线膨胀系数是不同的,这将产生一定的测量误差 δ ,其大小为

$$\delta = x[\alpha_1(t_1 - 20) - \alpha_2(t_2 - 20)] \quad (3-7)$$

式中, x 是被测长度; α_1 、 α_2 分别是被测工件、计量器具的线膨胀系数; t_1 是测量时被测工件的温度($^{\circ}\text{C}$); t_2 是测量时计量器具的温度($^{\circ}\text{C}$)。

4. 人员误差

人员误差是测量人员人为的差错,如测量瞄准不准确、读数或估读错误等,都会产生人员方面的测量误差。

3.3.4 测量精度

测量精度是指被测几何量的测得值与其真值的接近程度。它和测量误差是从两个不同角度说明同一概念的术语。测量误差越大,则测量精度就越低;测量误差越小,则测量精度就



越高。为了反映系统误差和随机误差对测量结果的不同影响，测量精度示意图如图 3-8 所示。

1. 正确度

正确度反映测量结果受系统误差的影响程度。系统误差小，则正确度高。

2. 精密度

精密度反映测量结果受随机误差的影响程度。它是指在一定测量条件下连续多次测量所得的测得值之间相互接近的程度。随机误差小，则精密度高。

3. 准确度

准确度反映测量结果同时受系统误差和随机误差的综合影响程度。若系统误差和随机误差都小，则准确度高。若系统误差和随机误差都大，则准确度低。

对于一次具体测量，其精密度高，正确度却不一定高；正确度高，精密度也不一定高；精密度和正确度都高的测量，准确度就高；精密度和正确度当中有一个不高，准确度就不高。

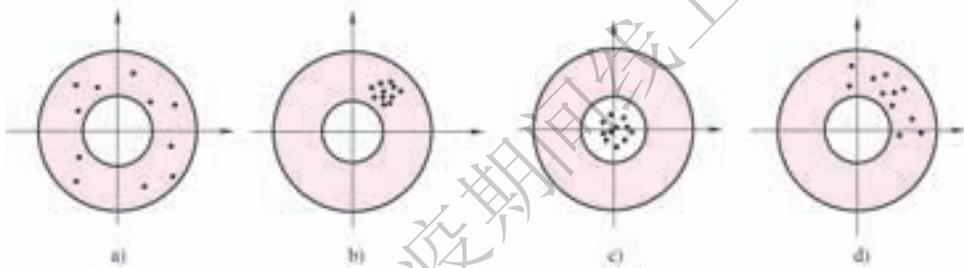


图 3-8 测量精度示意图

a) 正确度高，精密度低 b) 精密度高，正确度低 c) 准确度高 d) 准确度低

3.4 测量数据处理

通过对某一被测几何量进行连续多次的重复测量，得到一系列的测量数据（测得值）即测量列，可以对该测量列进行数据处理，以消除或减小测量误差的影响，提高测量精度。

3.4.1 测量结果的表达

测量工作完成后需要报告测量结果。在日常生产中，为了检验产品质量而进行的测量，测量结果一般“实测实报”即可。

例如：磨削加工一根 $\phi 40_{-0.03}^{+0.02}$ mm 的轴，用测量范围为 25~50mm 的杠杆千分尺测量得 $\phi 40.01$ mm，报出数据为 $\phi 40.01$ mm 即可。

如果是为了新产品开发、对切削加工的工艺进行分析、验收新购进的高精度的加工设备、制订新的工艺与标准等目的而进行的测量，必须对测量结果所获得的数据的不确定度进行分析，提出详细说明一并报出，使用户拿到这个数据后非常明确它的可靠程度。由于测量方法、测量误差处理等因素的影响，测量结果表达形式也有多种，具体分为不存在系统误差的单次测量结果、不存在系统误差的多次测量结果以及间接测量的测量结果等形式。



等精度测量是指在测量条件（包括计量器具、测量人员、测量方法及环境条件等）不变的情况下，对某一被测几何量进行的连续多次测量。虽然在此条件下得到的各个测得值不同，但影响各个测得值精度的因素和条件相同，故测量精度视为相等。相反，在测量过程中全部或部分因素和条件发生改变，则称为不等精度测量。在一般情况下，为了简化对测量数据的处理，大多采用等精度测量。

1. 不存在系统误差的单次测量结果表达式

测量列中单次测量是指测量过程中任意一次的测量，通常用单次测量的测得值表示。单次测量结果为

$$x_0 = x_i \pm 3\sigma \quad (3-8)$$

式中， x_i 是单次测量的测得值； σ 是随机误差的标准偏差； x_0 是单次测量的结果。

2. 不存在系统误差的多次测量结果表达式

若在一定测量条件下，对同一被测几何量进行多组测量（每组皆测量 n 次），则对应每组 n 次测量都有一个算术平均值，各组的算术平均值不相同。不过，它们的分散程度要比单次测量值的分散程度小得多。多次测量所得结果 x_0 为

$$x_0 = \bar{x} \pm 3\sigma_{\bar{x}} \quad (3-9)$$

式中， \bar{x} 是多次测量的测得值平均值； $\sigma_{\bar{x}}$ 是测量列的算术平均值的标准偏差。

3. 间接测量的测量结果表达式

在有些情况下，由于某些被测对象的特点，不能进行直接测量，这时需要采用间接测量。间接测量是指通过测量与被测几何量有一定关系的几何量，按照已知的函数关系式计算出被测几何量的量值。因此间接测量的被测几何量是测量所得到的各个实测几何量的函数，而间接测量的误差则是各个实测几何量误差的函数，故称这种误差为函数误差。

间接测量的结果 y_0 为

$$y_0 = (y - \Delta y) \pm \delta_{\text{lim}(y)} \quad (3-10)$$

式中， y 是欲测几何量（函数）值； Δy 是函数的系统误差值； $\delta_{\text{lim}(y)}$ 是函数的测量极限误差值。

3.4.2 测量列中随机误差的处理

随机误差不可能被修正或消除，但可应用概率论与数理统计的方法，估计出随机误差的大小和规律，并设法减小其影响。

1. 随机误差的特性及分布规律

通过对大量的试验数据进行统计后发现，随机误差通常服从正态分布规律（随机误差还存在其他规律的分布，如等概率分布、三角分布、反正弦分布等），其正态分布曲线如图 3-9 所示（横坐标 δ 表示随机误差，纵坐标 y 表示随机误差的概率密度）。

正态分布的随机误差具有下面四个基本特性。

(1) 单峰性 绝对值越小的随机误差出现的概率

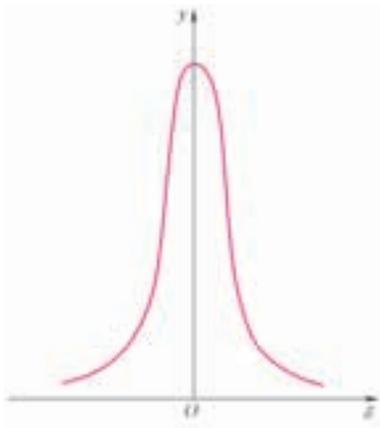


图 3-9 正态分布曲线



越大，反之则越小。

(2) 对称性 绝对值相等的正、负随机误差出现的概率相等。

(3) 有界性 在一定测量条件下，随机误差的绝对值不超过一定界限。

(4) 抵偿性 随着测量次数的增加，随机误差的算术平均值趋于零，即各次随机误差的代数和趋于零。这一特性是对称性的必然反映。

正态分布曲线的数学表达式为

$$y = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{\delta^2}{2\sigma^2}} \quad (3-11)$$

式中， y 是概率密度； σ 是标准偏差； δ 是随机误差； e 是自然对数的底。

2. 随机误差的标准偏差 σ

从式 (3-11) 可以看出，概率密度 y 的大小与随机误差 δ 、标准偏差 σ 有关。

当 $\delta=0$ 时，概率密度 y 最大，即 $y_{\max} = 1/\sigma\sqrt{2\pi}$ 。

显然，概率密度最大值 y_{\max} 是随标准偏差 σ 变化的。标准偏差 σ 越小，分布曲线就越陡，随机误差的分布就越集中，表示测量精度就越高。反之，标准偏差 σ 越大，分布曲线就越平坦，随机误差的分布就越分散，表示测量精度就越低。

随机误差的标准偏差 σ 可按下式计算，即

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum \delta^2}{n}} \quad (3-12)$$

式中， n 是测量次数。

标准偏差 σ 是反映测量列中测得值分散程度的一项指标，其表示的是测量列中单次测量值（任一测得值）的标准偏差。

3. 随机误差的极限值 δ_{\lim}

由于随机误差的有界性，因此随机误差的大小不会超过一定的范围。随机误差的极限值就是测量极限误差。

由概率论的知识可知，正态分布曲线和横坐标轴间所包含的面积等于所有随机误差出现的概率总和。若随机误差落在 $(-\infty \sim +\infty)$ 之间，则其概率为 1，即

$$P = \int_{-\infty}^{+\infty} y d\delta = \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{\delta^2}{2\sigma^2}} d\delta = 1$$

实际上随机误差落在 $(-\delta \sim +\delta)$ 之间，其概率为 < 1 ，即

$$P = \int_{-\delta}^{+\delta} y d\delta < 1$$

为化成标准正态分布，便于求出 $P = \int_{-\delta}^{+\delta} y d\delta$ 的积分值（概率值），其概率积分计算过程如下：

引入 $t = \frac{\delta}{\sigma}$ ， $dt = \frac{d\delta}{\sigma}$ ($\delta = \sigma t, d\delta = \sigma dt$)

则

$$P = \int_{-\delta}^{+\delta} y d\delta$$



$$\begin{aligned}
 &= \int_{-\sigma t}^{+\sigma t} \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{t^2}{2}} \sigma dt \\
 &= \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\sigma t}^{+\sigma t} e^{-\frac{t^2}{2}} dt \\
 &= \frac{2}{\sqrt{2\pi}} \int_0^{+\sigma t} e^{-\frac{t^2}{2}} dt \quad (\text{对称性})
 \end{aligned}$$

再令

$$P = 2\phi(t)$$

则有

$$\phi(t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_0^{+\sigma t} e^{-\frac{t^2}{2}} dt$$

这就是拉普拉斯函数(概率积分)。选择不同的 t 值,就对应有不同的概率,测量结果的可信度也就不一样,见表3-4。随机误差在 $\pm\sigma t$ 范围内出现的概率称为置信概率, t 称为置信因子或置信系数。在几何量测量中,通常取置信因子 $t=3$,则置信概率为 $P=2\phi(t)=99.73\%$ 。即 δ 超出 $\pm 3\sigma$ 的概率为 $1-99.73\%=0.27\%\approx 1/370$ 。

在实际测量中,测量次数一般不会多于几十次,随机误差超出 $\pm 3\sigma$ 的情况实际上很少出现,所以取测量极限误差为 $\delta_{\text{lim}}=\pm 3\sigma$ 。

δ_{lim} 也表示测量列中单次测量值的测量极限误差。

表 3-4 四个特殊 t 值对应的概率

t	$\delta=\pm\sigma t$	不超出 $ \delta $ 的概率 $P=2\phi(t)$	超出 $ \delta $ 的概率 $\alpha=1-2\phi(t)$
1	$\pm 1\sigma$	0.6826	0.3174
2	$\pm 2\sigma$	0.9544	0.0456
3	$\pm 3\sigma$	0.9973	0.0027
4	$\pm 4\sigma$	0.99936	0.00064

例如:某次测量的测得值为 30.002mm ,若已知标准偏差 $\sigma=0.0002\text{mm}$,置信概率取 99.73% ,则测量结果应为 $30.002\text{mm}\pm 0.0006\text{mm}$ 。

4. 随机误差的处理步骤

由于被测几何量的真值未知,所以不能直接计算求得标准偏差 σ 的数值。在实际测量时,当测量次数 n 充分大时,随机误差的算术平均值趋于零,便可以用测量列中各个测得值的算术平均值代替真值,并估算出标准偏差,进而确定测量结果。

在假定测量列中不存在系统误差和粗大误差的前提下,可按下列步骤对随机误差进行处理。

(1) 计算测量列中各个测得值的算术平均值 设测量列的测得值为 $x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$,则算术平均值为

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n}$$

(2) 计算残余误差 残余误差(简称为残差) v_i 即测得值与算术平均值之差,一个测



量列就对应着一个残余误差列 $v_i = x_i - \bar{x}$ 。

残余误差具有两个基本特性。

- 1) 残余误差的代数和等于零，即 $\sum v_i = 0$ 。
- 2) 残余误差的平方和为最小，即 $\sum v_i^2 = \min$ 。

由此可见，用算术平均值作为测量结果是合理可靠的。

(3) 计算标准偏差（即单次测量精度 σ ）。在实际中常用贝塞尔（Bessel）公式计算标准偏差，即

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n v_i^2}{n-1}}$$

若需要，可以写出单次测量结果表达式。

(4) 计算测量列的算术平均值的标准偏差 $\sigma_{\bar{x}}$ 描述它们的分散程度同样可以用标准偏差作为评定指标。根据误差理论，测量列的算术平均值的标准偏差 $\sigma_{\bar{x}}$ 与测量列单次测量值的标准偏差 σ 存在如下关系，即

$$\sigma_{\bar{x}} = \frac{\sigma}{\sqrt{n}}$$

σ 与 $\sigma_{\bar{x}}$ 的关系如图 3-10 所示。

显然，多次测量结果的精度比单次测量的精度高，即测量次数越多，测量精密度就越高。但图 3-10 中曲线也表明测量次数不是越多越好，一般取 $n > 10$ （15 次左右为宜）。

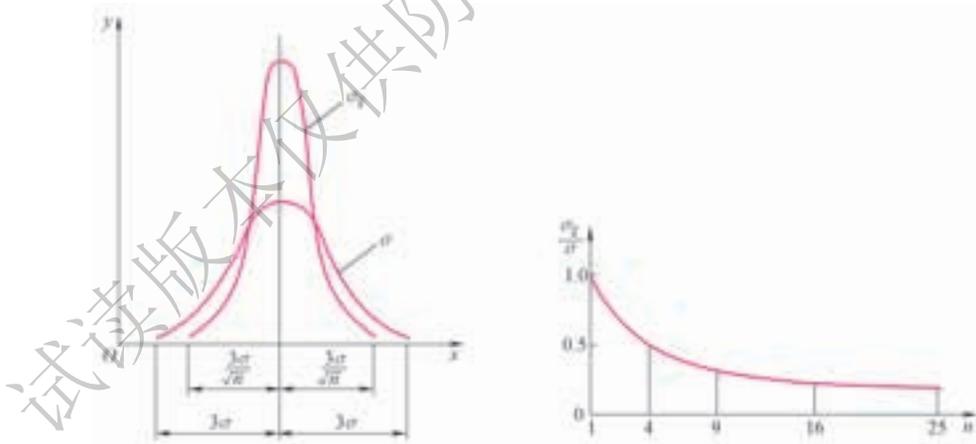


图 3-10 σ 与 $\sigma_{\bar{x}}$ 的关系

(5) 计算测量列的算术平均值的测量极限误差 $\delta_{\lim(\bar{x})}$

$$\delta_{\lim(\bar{x})} = \pm 3\sigma_{\bar{x}}$$

(6) 写出多次测量所得结果的表达式

$$x_0 = \bar{x} \pm \delta_{\lim(\bar{x})}$$



3.4.3 直接测量与间接测量的数据处理

1. 直接测量列的数据处理

为了从直接测量列中得到正确的测量结果, 应按以下步骤进行数据处理。

(1) 计算测量列的算术平均值和残余误差 判断测量列中是否存在系统误差。如果存在系统误差, 则应采取措施加以消除。

(2) 计算测量列单次测量值的标准偏差 σ 判断是否存在粗大误差。若有粗大误差, 则应剔除含粗大误差的测得值, 并重新组成测量列, 再重复上述计算, 直到将所有含粗大误差的测得值都剔除干净为止。

(3) 计算测量列的算术平均值的标准偏差 $\sigma_{\bar{x}}$

(4) 计算测量列的算术平均值的测量极限误差 $\delta_{\lim(\bar{x})}$

(5) 给出测量结果表达式 $x_0 = \bar{x} \pm \delta_{\lim(\bar{x})}$, 并说明置信概率

2. 间接测量列的数据处理

(1) 函数及其微分表达式 在间接测量中, 被测几何量通常是实测几何量的多元函数, 表示为

$$y = F(x_1, x_2, \dots, x_m)$$

式中, y 是被测几何量 (函数); x_i 是实测几何量。

函数的全微分表达式为

$$dy = \frac{\partial F}{\partial x_1} dx_1 + \frac{\partial F}{\partial x_2} dx_2 + \dots + \frac{\partial F}{\partial x_m} dx_m \quad (3-13)$$

式中, dy 是被测几何量 (函数) 的测量误差; dx_i 是实测几何量的测量误差, $\frac{\partial F}{\partial x_i}$ 是实测几何量的测量误差传递系数。

(2) 函数的系统误差计算 由各实测几何量测得值的系统误差, 可近似得到被测几何量 (函数) 的系统误差

$$\Delta y = \frac{\partial F}{\partial x_1} \Delta x_1 + \frac{\partial F}{\partial x_2} \Delta x_2 + \dots + \frac{\partial F}{\partial x_m} \Delta x_m \quad (3-14)$$

式中, Δy 是被测几何量 (函数) 的系统误差; Δx_i 是实测几何量的系统误差。

(3) 函数的随机误差计算 由于各实测几何量的测得值中存在着随机误差, 因此被测几何量 (函数) 也存在着随机误差。根据误差理论, 函数的标准偏差 σ_y 与各个实测几何量的标准偏差 σ 的关系为

$$\sigma_y = \sqrt{\left(\frac{\partial F}{\partial x_1}\right)^2 \sigma_{x_1}^2 + \left(\frac{\partial F}{\partial x_2}\right)^2 \sigma_{x_2}^2 + \dots + \left(\frac{\partial F}{\partial x_m}\right)^2 \sigma_{x_m}^2} \quad (3-15)$$

式中, σ_y 是被测几何量 (函数) 的标准偏差; σ_{x_i} 是实测几何量的标准偏差。

同理函数的测量极限误差为

$$\delta_{\lim(y)} = \pm \sqrt{\left(\frac{\partial F}{\partial x_1}\right)^2 \delta_{\lim(x_1)}^2 + \left(\frac{\partial F}{\partial x_2}\right)^2 \delta_{\lim(x_2)}^2 + \dots + \left(\frac{\partial F}{\partial x_m}\right)^2 \delta_{\lim(x_m)}^2} \quad (3-16)$$

式中, $\delta_{\lim(y)}$ 是被测几何量 (函数) 的测量极限误差; $\delta_{\lim(x_i)}$ 是实测几何量的测量极限



误差。

(4) 间接测量列数据处理步骤

- 1) 找出函数表达式 $y = F(x_1, x_2, \dots, x_m)$ 。
- 2) 求出被测几何量 (函数) 值 y 。
- 3) 计算函数的系统误差值 Δy 。
- 4) 计算函数的标准偏差 σ_y 和函数的测量极限误差值 $\delta_{\lim(y)}$ 。
- 5) 写出被测几何量 (函数) 的结果表达式。

例 3-1 对某一轴直径等精度测量 16 次, 按测量顺序将各测得值依次列于表 3-5 中, 试求测量结果。

解 1) 判断定值系统误差。假设计量器具已经检定、测量环境得到有效控制, 可认为测量列中不存在定值系统误差。

2) 求测量列算术平均值。

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n} = 14.955 \text{ mm}$$

3) 计算残余误差。各残余误差的数值经计算后列于表 3-5 中。按残差观察法, 这些残差没有周期性变化, 因此可以认为测量列中不存在变值系统误差。

4) 计算测量列单次测量值的标准偏差。

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n v_i^2}{n-1}} \approx 8.1 \mu\text{m}$$

表 3-5 数据处理计算表

测量序号	测得值 x_i/mm	残余误差 $v_i/\mu\text{m} = x_i - \bar{x}$	残余误差的平方 $v_i^2/\mu\text{m}^2$
1	14.959	+4	16
2	14.955	0	0
3	14.958	+3	9
4	14.957	+2	4
5	14.958	+3	9
6	14.956	+1	1
7	14.957	+2	4
8	14.958	+3	9
9	14.955	0	0
10	14.957	+2	4
11	14.959	+4	16
12	14.955	0	0
13	14.956	+1	1
14	14.925	-30	900
15	14.958	+3	9
16	14.957	+2	4
算术平均值	14.955 mm	$\sum v_i = 0$	$\sum v_i^2 = 986 \mu\text{m}^2$



5) 判断粗大误差。第 14 个测得值的残余误差值为 $-30\mu\text{m}$, 按照拉依达准则测量列中出现绝对值大于 3σ ($3 \times 8.1\mu\text{m} = 24.3\mu\text{m}$) 的残余误差, 即测量列中存在粗大误差; 按照粗大误差处理原则, 须剔除粗大误差后, 重新计算。

6) 重新计算平均值、残余误差, 具体数值见表 3-6。

7) 再次计算测量列单次测量值的标准偏差。

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n v_i^2}{n-1}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n v_i^2}{15-1}} \approx 1.36\mu\text{m}$$

8) 判断粗大误差。按拉依达准则, 测量列中没有出现绝对值大于 3σ ($3 \times 1.36\mu\text{m} = 4.08\mu\text{m}$) 的残余误差, 即测量列中不存在粗大误差。

9) 计算测量列的算术平均值的标准偏差。

$$\sigma_{\bar{x}} = \frac{\sigma}{\sqrt{n}} = \frac{1.36\mu\text{m}}{\sqrt{15}} \approx 0.35\mu\text{m}$$

注意: 此公式里的 n 值按 15 计算, 是剔除粗大误差后的测量次数。

10) 计算测量列的算术平均值的测量极限误差。

$$\delta_{\text{lim}}(\bar{x}) = \pm 3\sigma_{\bar{x}} = \pm 3 \times 0.35\mu\text{m} = \pm 1.05\mu\text{m}$$

11) 确定测量结果。 $x_0 = \bar{x} \pm 3\sigma_{\bar{x}} = 14.957\text{mm} \pm 0.0011\text{mm}$, 这时的置信概率为 99.73%。

表 3-6 剔除粗大误差后数据处理计算表

测量序号	测得值 x_i/mm	残余误差 $v_i/\mu\text{m} = x_i - \bar{x}$	残余误差的平方 $v_i^2/\mu\text{m}^2$
1	14.959	+2	4
2	14.955	-2	4
3	14.958	+1	1
4	14.957	0	0
5	14.958	+1	1
6	14.956	-1	1
7	14.957	0	0
8	14.958	+1	1
9	14.955	-2	4
10	14.957	0	0
11	14.959	+2	4
12	14.955	-2	4
13	14.956	-1	1
14	14.958	+1	1
15	14.957	0	0
算术平均值	14.957mm	$\sum v_i = 0$	$\sum v_i^2 = 26\mu\text{m}^2$



知识拓展：三坐标测量机简介

三坐标测量机简称为 CMM，随着计算机技术的进步以及电子控制系统、检测技术的发展，其具备高精度、高效率和万能性的特点，可实现对工件的尺寸、形状和几何公差的精密检测，是测量和获得尺寸数据的最有效的方法之一。它可以代替多种表面测量工具及昂贵的组合量规，在机械、电子、仪表、塑胶等行业中广泛使用。

三坐标测量机如图 3-11 所示，主要由主机机械系统（X、Y、Z 三轴或其他）、测头系统、电气控制硬件系统和数据处理软件系统组成。三坐标测量机可将实物转变为 CAD 模型以及几何模型等，在逆向工程领域具有优势。



图 3-11 三坐标测量机



习题三

- 3-1 测量过程包括哪四大要素？测量与检验有何异同？
- 3-2 量块的“等”和“级”如何划分的？按“等”和“级”使用时，如何区别？
- 3-3 计量器具有哪些基本技术性能指标？
- 3-4 试举例说明测量范围与示值范围的区别。
- 3-5 测量误差分哪几类？正态分布随机误差有哪些基本特性？
- 3-6 在立式光学比较仪上对一轴类工件进行比较测量，共重复测量 15 次，测得值如下（单位为 mm）：9.015、9.013、9.016、9.012、9.015、9.014、9.017、9.018、9.014、9.016、9.014、9.015、9.014、9.017、9.018。试求出该工件的算术平均值、单次测量的标准偏差、算术平均值的标准偏差、测量结果。
- 3-7 若用一块 4 等量块在立式光学比较仪上对一轴类工件进行比较测量，共重复测量 15 次，测得值见题 3-6。在已知量块的中心长度实际偏差为 $+0.2\mu\text{m}$ ，其长度的测量不确定度的允许值为 $\pm 0.25\mu\text{m}$ 的情况下，不考虑温度的影响，试确定该工件的测量结果。