

互换性与 测量技术基础

鄂峻峤 主编

河北科学技术出版社

互换性与测量技术基础

鄂峻峤 主编

河北科学技术出版社

内 容 提 要

本书根据近期全国教材编审委员会公差组拟订的《互换性与测量技术基础》教学大纲编写，主要内容包括：互换性与标准化的基本概念；测量技术的基本知识；尺寸公差和圆柱结合的互换性；形状和位置公差；表面粗糙度；滚动轴承与孔轴结合的互换性；平键及花键结合的互换性；螺纹结合的互换性；圆柱齿轮传动的互换性以及尺寸链等。

书中以互换原理为主线，力图系统而简要地阐述本学科的基本知识。全书都采用新标准，各章并附有摘录的表格数据和精选的习题。

本书可作为高等院校除机械制造专业外的各机械类和非机械类专业教学之用，也适用于电大、函大、业大和专科学校有关专业及本课程时数为40左右的机制专业使用，亦可供有关工程技术人员参考。

互换性与测量技术基础

鄂峻峤 主编

河北科学技术出版社出版（石家庄市北马路45号）
石家庄市太行印刷厂印刷 河北省新华书店发行

787×1092毫米 1/16 19印张 213,400字 印数：1,970 1985年12月第1版
1985年12月第1次印刷 统一书号：15365·18 定价：2.00元

本书编者 (以校名字数及笔划为序)

天津大学	谭国源	周慧珠	北京工业学院	刘巽尔	
华侨大学	杨介民		四川工业学院	傅筱英	
浙江大学	吴昭同	蒋承蔚	西安矿业学院	生成德	
福州大学	李竞白		沈阳机电学院	陈鸿儒	于秋恩
广东工学院	朱杭发	曾焕浪	河北机电学院	李润普	王瑞峰
云南工学院	艾佳		佳木斯工学院	姜乃厚	田宝林
东北工学院	李纯甫		山东纺织工学院	王一涵	
东北林学院	黄玉峰	尚其纯	天津轻工业学院	孔德音	孙莫君
江西工学院	张英云		华东纺织工学院	李虹	
武汉工学院	余培元	潘世荣	西北纺织工学院	张长歧	
	苏明秋		中国科学技术大学	高积庆	
昆明工学院	谢文藻	陈建村	东北重型机械学院	郭峻峤	邵晓荣
南京林学院	章玉林		齐齐哈尔轻工学院	郭泰	
上海工业大学	陈宝山		西安冶金建筑学院	段福来	
甘肃工业大学	严忠锦		武汉水运工程学院	罗镜冰	
合肥工业大学	刘正国	许有芳	石家庄机械技术学院	张智涵	
大庆石油学院	曹树文	李凤芹	哈尔滨船舶工程学院	田敏茹	钟赛云
大连铁道学院	邢纪英	王芸篇	长春光学精密机械学院	冯景武	
内蒙古工学院	刘奕德	庞雨珍	齐齐哈尔市标准计量局	金天玉	刘胜芬
内蒙古林学院	苏和		第一汽车制造厂职工大学	杜野	
长沙铁道学院	林少伟	张传厚			
	刘奇旭				

前 言

《互换性与测量技术基础》不仅是高等工科院校的一门重要的技术基础课,而且是农业、林业、水产以及经济管理等高校有关专业的必修课程。

三十多年来,随着生产和科学技术的迅速发展,本学科的基本理论日臻完善,且更为广泛地应用于生产实际。精选其中最基本的、具有指导意义的内容,编出符合教学需要的教材,是我们许多院校的共同愿望。因此,本书根据近期全国教材编审委员会公差组拟定的《互换性与测量技术基础》教学大纲(讨论稿),由39所高等院校及齐齐哈尔市标准计量局通力合编而成。

本书有四个主要特点:第一,根据最近的教学大纲,采用最新的标准;第二,综合各学校教材之精粹,发挥编者之所长,并力求全书在结构和笔调上一致;第三,以互换性原理为主线,内容少而精;第四,以教学实用为准绳,按教学大纲40学时规格,适当删节可在实验中学学习的部分,并略增可加深基本概念的内容。

本书中各种插图另配有单式和复合式全套投影幻灯教学片,以使讲授更为生动形象;另外,还编有学习指导书,以帮助读者自学与复习。因此,本书既可作为高等工科院校(包括一些学时数较少的机制专业)的教材,也适用于非工科院校、电大、函大、业大和专科学校有关专业。

本书统稿人(按姓氏笔划)有:朱杭发、刘正国、刘奕德、李纯甫、严忠锦、吴昭同、陈鸿儒、周慧珠、段福来、张英云、张智涵、黄玉峰、谢文藻、鄂峻峤和谭国源。鄂峻峤担任主编。审稿人(按姓氏笔划)有:成熙治、过馨葆、何贡和陈泽民。成熙治担任主审。

在统稿、审稿和出版过程中,承蒙福州大学、大连铁道学院、齐齐哈尔市标准计量局和河北机电学院给予大力支持和赞助,特此表示衷心感谢。

由于编写时间仓促,且更限于水平,书中难免出现不当或错漏之处,敬希有关专家和读者多加指正。

编 者

1985年6月

目 录

第一章 互换性与标准化的基本概念	(1)
§ 1-1 互换性的基本概念	(1)
§ 1-2 标准与标准化	(3)
§ 1-3 优先数系及优先数标准	(4)
第二章 测量技术的基本知识	(7)
§ 2-1 计量器具和测量方法的分类	(7)
§ 2-2 测量误差和测量结果的表达	(8)
第三章 尺寸公差与圆柱结合的互换性	(12)
§ 3-1 尺寸公差与配合的基本术语	(12)
§ 3-2 标准公差系列	(19)
§ 3-3 基本偏差系列	(22)
§ 3-4 公差与配合的选用	(31)
§ 3-5 光滑工件尺寸的检测	(42)
第四章 形状和位置公差	(53)
§ 4-1 形位误差的影响和评定准则	(53)
§ 4-2 形位公差和公差带	(56)
§ 4-3 基准和三基面体系	(68)
§ 4-4 形位公差与尺寸公差的关系	(69)
§ 4-5 形位公差的选用	(74)
第五章 表面粗糙度	(82)
§ 5-1 表面粗糙度对零件使用性能的影响	(82)
§ 5-2 评定基准和评定参数	(83)
§ 5-3 表面粗糙度的选择及图样标注	(87)
第六章 滚动轴承与孔、轴结合的互换性	(93)
§ 6-1 滚动轴承的使用要求和精度等级	(93)
§ 6-2 滚动轴承内、外径公差带配置的特点	(94)
§ 6-3 滚动轴承与轴和外壳孔的配合	(95)

第七章 平键、花键结合的互换性	(102)
§ 7-1 平键结合的互换性.....	(102)
§ 7-2 花键结合的互换性.....	(104)
第八章 螺纹结合的互换性	(107)
§ 8-1 普通螺纹结合的使用要求和基本牙型.....	(107)
§ 8-2 影响螺纹结合互换性的主要几何参数误差.....	(109)
§ 8-3 普通螺纹的公差与配合.....	(113)
第九章 圆柱齿轮传动的互换性	(119)
§ 9-1 齿轮传动的使用要求.....	(119)
§ 9-2 齿轮的误差及其评定指标.....	(119)
§ 9-3 齿轮副的误差及其评定指标.....	(126)
§ 9-4 渐开线圆柱齿轮精度标准及其应用.....	(130)
第十章 尺寸链	(143)
§ 10-1 尺寸链的基本概念.....	(143)
§ 10-2 尺寸链的分析与计算.....	(145)
§ 10-3 保证装配精度的其他方法.....	(152)

第一章 互换性与标准化的基本概念

现代化生产是建立在先进技术、严密分工和广泛协作基础上的社会化生产，它要求各个部门及许多生产环节之间密切配合、协调一致。要实现这种专业化协作生产，就必须采用互换性原则；而保证互换性生产的基础则是标准化。

本章简述互换性与标准化的基本概念；并通过对优先数系标准的介绍，进一步说明标准化的重要意义。

§ 1-1 互换性的基本概念

一、互换性的含义

在机械工业中，互换性是指同一规格的零、部件可以相互替换的性能。零、部件在制造时，按同一规格要求；在安装时，无需挑选或附加修配；在安装后，能保证预定的使用性能。这样的零、部件称做具有互换性（Interchangeability）的零、部件。

零、部件的互换性通常包括几何参数（如尺寸、形状、相互位置及表面粗糙度等）和机械物理性能（如强度、硬度、磁性等）的互换性。本书仅讨论几何参数的互换性。

使相同规格的零、部件的几何参数达到完全一致，是不可能的。实际上，合理地控制零件的误差不超出一定的范围，不仅能够满足装配后的使用要求，也可以使零件在制造时经济合理。这个允许零件几何参数的变动量称为公差（Tolerance）。零件在加工后是否符合公差规定，则需通过检测来判断。显然，公差与检测是互换性的保证。

应该指出，互换性不仅对零、部件而言；从广义来看，它做为现代化生产的生产原则，不但是成批、大量生产的基础，而且是单件、小批生产必须遵循的基本原则。

二、互换性的种类

根据零、部件互换性程度的不同，可以分为完全互换和不完全互换。

（一）完全互换

当零件或部件在装配或更换时，事前不必经过挑选，装配时也无需进行附加修配就能装配在机器上，并能满足预定的使用性能要求，这样的零、部件属于完全互换。如常用的螺钉、螺帽，普通机床中的齿轮、轴，以及滚动轴承部件的内孔和外径等，都具有完全互换性。

（二）不完全互换

当对零、部件的精度要求很高时，为了便于制造，常把零件的公差适当放大，而在装配前根据实际尺寸进行分组，或者在装配时根据实际情况对调整用的零件进行选择，以保证预定的使用性能要求，这样的零件属于不完全互换。

所谓分组装配，是指在装配前通过测量，对零件进行分组，装配时按相应组进行，使大

孔与大轴相配，小孔与小轴相配，以满足使用要求。这样，零件就只限于在本组范围内可互换，故称有限互换，这是一种不完全互换。

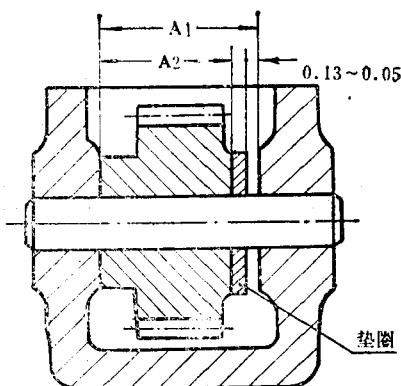


图 1—1 不完全互换示例

例如，在图 1—1 所示齿轮箱中，设计要求齿轮一个端面与箱壁之间保持 $0.13\sim 0.05\text{mm}$ 的间隙。为了便于制造，可以适当扩大 A_1 与 A_2 的尺寸公差，而另外在齿轮端面增加一个补偿垫圈（调整用的零件）。在装配前，制造出不同厚度的垫圈，分组存放，根据 A_1 和 A_2 的实际尺寸选取适当厚度的垫圈，以保证得到符合要求的间隙。此时，箱体、齿轮仍为具有完全互换性的零件，而垫圈仅能在本组内互换，就是一种不完全互换。

一般来说，在装配时，需要进行选择或调整的，多属不完全互换；需要附加修配的，则该零件不具有互换性。不完全互换往往只限于厂内的零、部件的装配；对于厂外协作，则应采用完全互换。

无论采用完全互换或不完全互换，都是根据具体情况，事先在设计时确定的。

三、互换性的作用

在现代化机械制造业中，应用互换性原则已成为提高生产水平和促进技术进步的强有力的手段之一，其作用主要表现在下述几个方面：

1. 在设计过程中，采用具有互换性的标准零件和标准部件，将简化设计工作量，缩短设计周期。
2. 在加工过程中，按互换性生产原则进行生产时，各个零件可以同时分别加工，以利于实现专业化协作生产。由于工件单一，加工质量和生产效率都易于提高。如工件批量大，还可以采用高效率的专用设备，进而实现生产过程自动化，建立自动化流水线、自动化车间和工厂。
3. 在装配过程中，由于零、部件具有互换性，使装配过程能够连续而顺利地进行，从而缩短装配周期；并进而可采用流水作业方式，使装配生产率大幅度提高。
4. 在使用过程中，用具有互换性的备用零件和部件可以简单而迅速地替换磨损的或损坏的零、部件，这将缩短修理时间，节约修理费用，保证机器工作的连续性和持久性，提高机器的使用率。尤其对影响范围大的重要设备和军用品的修复，可互换的备件更具有重大意义。

四、实现互换性的先决条件

从互换性的含义可以看出，具有互换性的零、部件必须按一定规格和公差要求来制造，且要满足预定的使用性能要求。这样，就必然要求对数值系列、公差等规定统一的标准。当产品制造以后，是否符合要求，还需要按一定的标准进行检验。用标准把技术统一起来，才可能协调一致、相互协作，有节奏地组织互换性生产。所以制订标准和贯彻标准是实现互换性生产的先决条件。

§ 1-2 标准与标准化

一、标准及其分类、分级

技术标准简称标准 (Standard)，是从事生产建设、经营管理和商品流通的一种共同的技术依据。它是在总结生产活动中，对具有多样性、重复性的事物，在一定范围内做出的统一规定。

所谓事物的多样性，是指同类事物具有多种表现形式。例如，同一种用途的产品具有不同的结构形式、不同的尺寸规格和不同的质量水平；同一精度要求的零件可以有不同的加工方法；测试同一技术特性，可以有不同的试验手段；完成同一项工作，可以有不同的程序等等。所谓事物的重复性，是指人类在实践过程中重复发生的事件。例如，某零件或部件在不同产品中的应用；同种规格零件的批量生产；在生产和科学实验过程中反复使用的图形、符号、概念、计算公式和计算方法等等。

标准可分为基础标准，产品标准，原料、材料、毛坯及零、部件标准，工艺及工艺装备标准等等。

基础标准是生产技术活动中对各专业具有广泛指导意义的或作为统一依据的那些最基本的标准。如在本书中所介绍的优先数系、公差与配合、形位公差、表面粗糙度等标准都属于基础标准。

目前我国的标准分为三级：即国家标准，部标准和企业标准。

国家标准是指对全国经济、技术发展有重大意义，而必须在全国范围内统一的标准。如基本的原材料标准、重要的工农业产品标准、基础标准、通用标准就属于这一级。我国国家标准的代号为GB。

部标准（部颁标准）主要是指全国性的各专业范围内统一的标准。如机械工业部标准，其代号为JB。

企业标准包括工厂标准、行业标准、地方标准等。凡没有制订国家标准、部标准的产品都要制订企业标准。

为了使世界各国在技术上统一，在国际上成立了国际标准化组织（简称ISO），它负责制订国际标准。由于国际标准集中反映了许多国家的现代科学技术水平，并考虑国际技术交流和贸易往来的需要，因而，尽可能参照国际标准来制订或修订国家标准，已成为我国重要的技术政策。

二、标准化及其意义

标准化 (Standardization) 是指制订标准、贯彻标准和修订标准的全部活动过程。

标准化的目的是把事物的多样性限制在合理的范围之内，把重复性实践的经验集中及加以系统化和简化，并用文件的形式固定下来，形成标准。以此作为手段来协调和指导分散的社会活动，并使其达到最佳的效果。

标准化的意义在于积极地推动人类的进步和科学技术的发展。

我国是世界上最先运用标准化并获得成果的国家。早在公元前200年（秦代），我国对度量衡、货币、文字、兵器规格、驰道和车轨宽度等进行了人类历史上规模较大、范围较广的标准化工作。这对古代中国的科技、文化、贸易、交通、经济、军事和政治等均起到了巨大的推动作用。在本世纪七十年代出土的临潼兵马俑和秦陵铜车马中，发现射箭用的弩机上的销轴，铜车马上大量的子母扣、链、销、转轴、合页等的联结均有互换性。这充分说明，两千多年以前我国的机械设计和制造方面的标准化已达到了较高的水平。

§ 1-3 优先数系及优先数标准

在产品的设计、制造和使用中，各种产品的性能参数和规格尺寸参数都需要通过数值来表明。例如，产品的承载能力大小、产品规格大小、零件尺寸大小、原材料的直径大小、公差值的大小以及所用设备、刀具、检具的尺寸大小等等都要用数值来表达。另外，产品参数的数值具有扩播性。例如，造纸机的尺寸决定纸张的尺寸，纸张的尺寸又决定了书刊、纸品的尺寸，纸品的尺寸又影响到印刷机、打字机、书架等的尺寸。又如，螺栓的尺寸一旦确定，会传播扩散出螺母的尺寸、丝锥和板牙的尺寸、螺栓孔的尺寸，以及加工螺栓孔用的钻头和紧固螺母用的扳手的尺寸等。

为了满足不同的需要，产品必然出现不同的规格，因而，产品参数的数值即使有微小的差别，经过反复扩散传播后，也会造成相应产品的尺寸规格繁多杂乱，以致给组织生产、协作配套及维修使用等带来许多困难。优先数系和优先数正是对各种技术参数的数值进行简化、协调和统一的一种合乎科学的数值标准，是标准化的重要内容。

优先数系 (Series of Preferred Numbers) 规定十进几何数列为它的标准数列。各产品参数按此数列分级（大小分档）以满足不同需要。

在十进几何数列中，每后一项的数值相对于前一项数值的增长率（后项减前项再与前项之比的百分数）是相等的，它符合均匀分级的需要。

所谓十进，就是在几何级数的各项数值中包括 $1, 10, 100, \dots, 10^n$ 和 $1, 0.1, 0.01, \dots, \frac{1}{10^n}$ 等数。其中 n 为整数。

如公比 q 为 1.6 的十进几何数列为： $1, 1.6, 2.5, 4, 6.3, 10, 16, 25, 40, 63, 100, 160, \dots, 1000, \dots$

数列中 $1 \sim 10, 10 \sim 100, 100 \sim 1000$ ，等称为十进段。每个十进段的项数都是相等的。相邻段对应项值只是扩大或缩小十倍。此性质有利于简化工程计算。

设首项为 a ，公比为 q ，十进段内的项数为 m ，则十进几何数列的形式为：

$$a, aq, aq^2, \dots, aq^{m-1}, aq^m。且$$

$$aq^m = 10a$$

$$(1-1)$$

$$公比 q = \sqrt[m]{10}$$

$$(1-2)$$

另外，考虑到某些产品参数的数值有倍增的要求，因此又规定十进几何数列中相隔 X 项可构成倍数系列。即：

$$aq^x = 2a \quad (1-3)$$

联立(1-1)、(1-3)两式,取对数,得:

$$\frac{x}{m} = \lg 2 \approx 0.301 \approx \frac{3}{10}$$

由此可得包括倍数系列在内的十进几何数列。按比例 $\frac{x}{m}$ 的组合如下:

$$\frac{x}{m} = \frac{3}{10}, \frac{6}{20}, \frac{9}{30}, \frac{12}{40}, \frac{15}{50}, \frac{24}{80} \dots\dots$$

如取组合 $\frac{3}{10}$,则 $m=10$,即以首项为1,公比为 $q_{10} = \sqrt[10]{10} \approx 1.25$ 构成数列:1.00,

1.25, 1.60, 2.00, 2.50, 3.15, 4.00, 5.00, 6.30, 8.00, 10.00;而 $x=3$,即其中每隔三项构成倍数系列:1, 2, 4, 8.....。

我国优先数系标准规定 m 值为5, 10, 20, 40和80五种,分别用 $R_5, R_{10}, R_{20}, R_{40}, R_{80}$ 表示。其中 R_5 为不包含倍数系列的数列。

五种优先数系的公比如下:

$$R_5 \text{ 数系 } q_5 = \sqrt[5]{10} \approx 1.5849 \approx 1.6$$

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

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

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

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

R_5, R_{10}, R_{20} 和 R_{40} 是通常采用的系列,称为基本系列(见表1-1)。 R_{80} 系列作为补充系列,是标准中最密的数系,除特殊情况外,一般不使用。

优先数系中的每一个数,即为优先数(Preferred Numbers)。

优先数的理论值是无理数,实际工作中不能应用。表1-1中以所列计算值的五位有效数作为工程上精确计算之用。对计算值再作圆整,保留三位有效数的称常用值,它就是通常所说的优先数。优先数的化整值对计算值的相对误差较大,故一般不宜采用。

在设计任何产品时,对主要尺寸及参数应有意识地采用优先数,使其在刚开始时就纳入标准化轨道。

通常,一般机械的主要参数按 R_5 或 R_{10} 系列;专用工具的主要尺寸按 R_{10} 系列;通用型材、零件及工具的尺寸和铸件的壁厚等按 R_{20} 系列。

优先数系标准是一项重要的基础标准。我国的优先数系标准与国际标准相同。

习 题 一

1. 选答

(1) 保证互换性生产的基础是:

①现代化; ②标准化; ③大量生产。

(2) 根据同一图纸要求,加工出一批零件。其中个别零件不合格,后经附加修配,达

到技术要求。问这属于按哪一类互换性进行生产？

①完全互换；②不完全互换；③不互换。

2. 根据表1—1写出10~100段R10系列的各项化整值。

3. 写出家用灯泡10W~100W系列。

表1—1

优先数基本系列

基本系列(常用值)				计 算 值
R5	R10	R20	R40	
1.00	1.00	1.00	1.00	1.0000
		1.06	1.06	1.0593
		1.12	1.12	1.1220
	1.25	1.18	1.18	1.1885
		1.25	1.25	1.2589
		1.32	1.32	1.3335
		1.40	1.40	1.4125
1.60	1.60	1.50	1.50	1.4962
		1.60	1.60	1.5849
		1.70	1.70	1.6788
	2.00	1.80	1.80	1.7783
		1.90	1.90	1.8836
		2.00	2.00	1.9953
2.50	2.50	2.12	2.12	2.1135
		2.24	2.24	2.2387
		2.36	2.36	2.3714
	3.15	2.50	2.50	2.5119
		2.65	2.65	2.6607
		2.80	2.80	2.8184
3.00		3.00	2.9854	
4.00	4.00	3.15	3.15	3.1623
		3.35	3.35	3.3497
		3.55	3.55	3.5481
	5.00	3.75	3.75	3.7584
		4.00	4.00	3.9811
6.30	6.30	4.25	4.25	4.2170
		4.50	4.50	4.4668
		4.75	4.75	4.7315
	8.00	5.00	5.00	5.0119
		5.30	5.30	5.3088
		5.60	5.60	5.6234
		6.00	6.00	5.9566
10.00	6.30	6.30	6.30	6.3096
		6.70	6.70	6.6834
		7.10	7.10	7.0795
	8.00	7.50	7.50	7.4989
		8.00	8.00	7.9433
		8.50	8.50	8.4140
10.00	10.00	9.00	9.00	8.9125
		9.50	9.50	9.4405
		10.00	10.00	10.0000

第二章 测量技术的基本知识

测量 (Measurement) 是把被测量的量与体现计量单位的标准量进行比较, 从而确定被测量相当于计量单位的倍数或分数。

检验 (Inspection) 只确定零件的实际几何参数是否在规定的极限范围内, 从而作出合格与否的判断。检验不能测得被测量的实际数值。

测量或检验是互换性生产过程中的重要组成部分, 是保证各种公差与配合标准贯彻实施的重要手段, 也是实现互换性生产的重要前提之一。

为了实现测量和检验的目的, 必须使用统一的标准量、采用一定的测量方法和运用适当的测量工具, 而且要达到必要的测量精度。

本章内容主要通过实验环节掌握, 这里仅简要介绍计量器具和测量方法的分类、测量误差及其结果的表达。

§ 2-1 计量器具和测量方法的分类

一、计量器具分类

计量器具是测量仪器和测量工具的统称。测量几何量的计量器具可分为以下三类:

1. 标准计量器具: 它是测量时用以体现标准量值的器具。如基准米尺、量块等。
2. 量规: 它是没有刻度的、用以检验零件尺寸或形状和相互位置的检验工具。它不能量出被测量的具体数值, 只能判断零件是否合格。
3. 通用量具和量仪: 它包括刻线尺、各种游标尺和游标量角器以及各种机械的、气动的、光学的、电的和机、电、光综合的量仪。

二、测量方法分类

测量方法可按不同特征进行分类。

(一) 直接测量和间接测量

直接测量是用计量器具直接测量被测量。例如用游标卡尺和千分尺直接测量工件的直径和长度。

间接测量是测量与被测量有一定数学关系的其他量, 经过计算才能得到被测量。例如, 为了测得样板的圆弧直径 D , 可以先测量弦长 S 和弓形高度 H , 然后按公式 $D = \frac{S^2}{4H} + H$ 算出直径 D 。

(二) 绝对测量和相对测量

绝对测量是指可以直接从计量器具上读出被测量的数值的测量。例如用游标卡尺测量工

件时，可以从卡尺的读数中读出工件直径或长度的数值。

相对测量是用标准量具调整仪器的零点，然后测量出被测量相对于标准量的偏差的测量。

一般说来，相对测量具有较高的精度。

(三) 综合测量和单项测量

综合测量是指同时测量零件上的几个有关的参数，从而综合地判断工件是否合格的测量。例如用螺纹量规检验螺纹等。

单项测量是指分别测量零件的各个参数的测量。例如分别测量螺纹的中径、螺距和牙型半角；分别测量齿轮的齿距、齿形和齿厚等。

§ 2-2 测量误差和测量结果的表达

一、测量误差 (Error of Measurement)

测量误差是指测量结果与被测量的真值之差。

测量误差按其性质可分成三类：

1. 系统误差 (Systematic Error)：在多次测量中，大小和符号都保持恒定，或按一定的规律变化的误差称为系统误差。前者为定值系统误差，后者为变值系统误差。

测量时，定值系统误差对每次测得值的影响都是相同的。例如，仪器零位的一次调整误差对多次测量的测得值的影响是一样的。变值系统误差对每次测得值的影响是按一定规律变化的。例如指示表指针的回转中心与分度盘中心存在偏心时，指针的示值将沿分度盘圆周按正弦规律变化。

2. 随机误差 (Random Error)：在多次测量中，大小和符号都不可预定的误差称为随机误差。它是由于测量过程中的不稳定因素综合形成的（如量仪示值的变化、读数不一致、温度波动、测量力不恒定等）。

同一误差来源，有时可表现为系统误差，有时则表现为随机误差。如斜视标尺而引起的误差，当多次测量中总是偏向一方时，它表现为系统误差；当多次测量中有时偏向左、有时偏向右时，它表现为随机误差。

3. 粗大误差 (Parasitic Error)：在系列测得值中有个别数值明显过大，超出在正常条件下随机误差应有的范围，这种误差称为粗大误差。这是由于计量器具有缺陷、使用不正确、读错示值、记错数字或者外界条件剧变（如突然振动）等因素造成的。在正常情况下，不应出现粗大误差。对于这种有显著差异的测量值，应剔除不用。

二、测量结果的表达

在测量误差中，系统误差，特别是定值系统误差，通常是可以消除的。用计算或试验的方法找出系统误差，在测得值中加入与误差值大小相等而符号相反的数值（即校正值），就可以将系统误差从测量结果中除去。随机误差的出现是不规则的，不能用加校正值的方法消除，但可用数理统计方法对一系列测得值作统计处理，以便能较好地估计和评定测量结果。

为此，应计算下述各项参数。

1. 算术平均值 \bar{x} (Arithmetic Mean): 在同一条件下，对同一个量进行多次 (n) 重复测量，由于测量误差的影响，将得到一系列不同的测得值 x_1, x_2, \dots, x_n ，这些量的算术平均值为：

$$\bar{x} = \frac{x_1 + x_2 + \dots + x_n}{n} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n} \quad (2-1)$$

设 x_0 为真值， δ 为随机误差，可得：

$$\delta_1 = x_1 - x_0, \delta_2 = x_2 - x_0, \dots, \delta_n = x_n - x_0.$$

$$\therefore \sum \delta_i = \sum x_i - nx_0.$$

由随机误差的特性可知：当 $n \rightarrow \infty$ 时， $\sum \delta_i \rightarrow 0$ ， $\sum x_i = nx_0$ 。

$$\text{即 } x_0 = \frac{\sum x_i}{n} = \bar{x}$$

由此可见，对某一量进行无数次测量时，所有测得值的算术平均值就等于真值。事实上，作无限次测量是不可能的。但是，如果进行有限次测量，可以证明，各次测得值的算术平均值是最接近真值的最佳值。因此，把测得值的算术平均值作为测量的最后结果是可靠的，而且也是合理的。

2. 残差 (Residual Error)：每次测量所得的量值与所有量值的算术平均值之代数差，称为残余误差，简称残差，用 v_i 表示：

$$v_i = x_i - \bar{x} \quad (2-2)$$

当测量次数足够多时，残差的代数和趋近于零，即

$$\sum_{i=1}^n v_i = 0$$

残差的这种特性称为可相消性。

残差用以代替随机误差计算标准偏差。

3. 标准偏差 σ (Standard Deviation)：测得值的算术平均值虽能表示测量结果，但不能表示各测得值的精密度。为此，需要引进标准偏差的概念。

根据误差理论，随机误差的标准偏差 σ 是各随机误差平方和的平均值的平方根，即

$$\sigma = \sqrt{\frac{\delta_1^2 + \delta_2^2 + \dots + \delta_n^2}{n}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \delta_i^2}{n}}$$

式中 n —测量次数；

δ —测得值与真值之差。

用残差 v_i 代替 δ_i 时，标准偏差 σ 的估算值 S 如下 (证略)：

$$S = \sqrt{\frac{\sum v_i^2}{n-1}} \quad (2-3)$$

4. 算术平均值的标准偏差 σ_x ：标准偏差 σ 代表一组测得值的精密度，但是在系列测量中是以算术平均值作为被测量的测量结果，因此，更重要的是要知道算术平均值的精密度。

设在相同的条件下，对某值重复地进行 k 组的“ n 次测量”，则每组的“ n 次测量”所得

的算术平均值 \bar{x} ，并不完全相同，但都围绕着真值 x 波动，波动范围比单次测量的范围要小。因此，以多次测量的算术平均值作为测量结果，其精度参数用标准偏差 $\sigma_{\bar{x}}$ 表示。根据误差理论，算术平均值的标准偏差 $\sigma_{\bar{x}}$ 与单次系列测得值的标准偏差 σ 的关系为：

$$\sigma_{\bar{x}} = \frac{\sigma}{\sqrt{n}} \quad (2-4)$$

若用残差表示， $\sigma_{\bar{x}}$ 的估算值 $S_{\bar{x}}$ 为：

$$S_{\bar{x}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n v_i^2}{n(n-1)}} \quad (2-5)$$

若按正态分布考虑，可取算术平均值的极限误差 $\lambda_{lim} = \pm 3\sigma_{\bar{x}}$ (2-6)

综上所述，在精密测量中，宜用多次重复测量的测得值的算术平均值 \bar{x} 作为最终测量结果，用标准偏差 σ 或极限误差 Δ_{lim} 评定这些测得值的精密度；而用算术平均值的标准偏差 $\sigma_{\bar{x}}$ 或算术平均值的极限偏差 λ_{lim} 评定算术平均值的精密度。

例 2-1 对一小轴进行一系列等精度测量（在相同条件下测量），所得数据列于表 2-1（设系统误差已消除），求测量结果。

(1) 求算术平均值 \bar{x} ；

由 (2-1) 式可得：

$$\bar{x} = \frac{\sum x_i}{n} = 30.457 \text{ mm}$$

表 2-1

测得值的残差和残差的平方

测 得 值 x_i (mm)	残差 v_i (μm)	残差的平方 v_i^2 (μm) ²
30.454	-3	9
30.459	+2	4
30.459	+2	4
30.454	-3	9
30.458	+1	1
30.459	+2	4
30.456	-1	1
30.458	+1	1
30.458	+1	1
30.455	-2	4
$\bar{x} = 30.457$	$\sum v_i = 0$	

(2) 求残差 v_i 和 $\sum v_i^2$ ；

由 (2-2) 式可得：

v_i 及 $\sum v_i^2$ (见表 2-1)

(3) 求标准偏差的估算值 $S_{\bar{x}}$ ；

由 (2-3) 式可得：