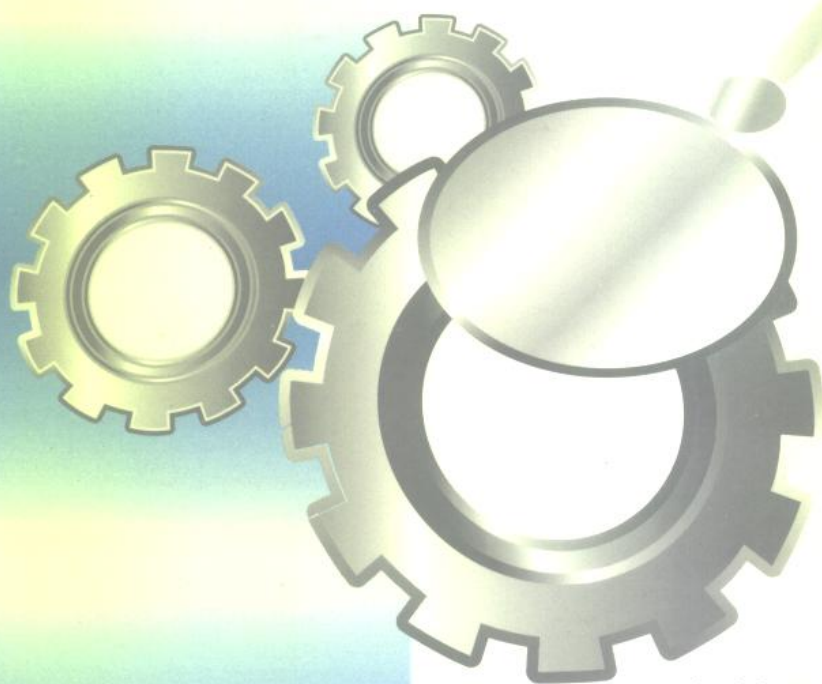


高等工科院校适用

机械工程检测技术

王恒杰 主编
刘自然

YUANXIAO SHIYONG



机械工业出版社

高等工科院校适用

机械工程检测技术

主编	王恒杰	刘自然
参编	彭 英	仲兴国
	蔡共宣	冯兰芳
主审	于永芳	



机械工业出版社

236-1-13

本书讲述了机械工程静态和动态检测技术的基础理论 and 应用。全书共分七章,前五章为基础理论,主要内容有:检测技术基础、常用传感器、中间转换器、信号的显示与记录、测试信号的分析处理。后二章为检测技术的应用,有几何量的检测和振动、位移、应变、力、噪声等典型物理量的测试等。

根据专科教学特点和教学改革的需要,本书在编写时,注意加强理论与实践的联系,贯彻少而精的原则,突出重点,利于自学。适用于高等专科学校机械类各专业,也可作为从事机械工程检测工作的技术人员自学用书。

图书在版编目 (CIP) 数据

机械工程检测技术/王恒杰,刘自然主编. —北京:机械工业出版社,1997. 8
ISBN 7-111-05571-3

I. 机… II. ①王… ②刘… III. 机械工程-检测-技术 IV. TH16

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (97) 第 02335 号

出版人:马九荣 (北京市百万庄南街1号 邮政编码 100037)
责任编辑:商红云 版式设计:霍永明 责任校对:袁凤霞
封面设计:姚毅 责任印制:王国光
煤炭工业出版社印刷厂印刷·新华书店北京发行所发行
1997年8月第1版·第1次印刷
787mm×1092mm¹/₁₆·16.5 印张·398 千字
0 001—5 000 册
定价:22.00 元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

前 言

本书是根据 1996 年国家教委审定的高等工程专科学校机械类专业课程的教学基本要求, 结合参编学校多年来教学改革的实践, 并吸取兄弟院校教学改革的成功经验, 在机械工业出版社教材编辑室的指导和支持下编写的, 是配合高等工程专科学校教学改革的系列教材之一。

本书在编写中全部采用国家最新标准和法定计量单位; 在内容上尽量突出工程专科教学的特点, 从适应教学改革的需要出发, 本着有利于培养学生的科学实践能力和创新精神, 重点阐述了检测技术的基础知识、基本理论和数据处理的基本方法以及所选用的仪器装置等。在论述上, 力求由浅入深, 理论联系实际, 明白易懂, 重点突出, 便于教学。

全书包括检测技术基础知识、常用传感器、信号的中间转换、显示与记录装置、检测信号的处理分析、典型几何量的检测以及振动、位移、应变、力、噪声等典型物理量的测试。

本书由王恒杰、刘自然主编。参加编写的有: 仲兴国 (第一章、第六章第二、五节), 彭英 (第二章、第三章), 蔡共宣 (第四章、第五章), 冯兰芳 (第六章第一、三、四节), 王恒杰 (绪论、第六章第六节), 刘自然 (第七章)。

本书由长春大学于永芳教授主审。

本书在编写过程中, 参考了一些兄弟院校编写的教材和有关资料, 并得到了有关领导的支持和帮助, 在此谨向关心、支持和帮助本教材编写工作的同志们表示谢意。

高等工程专科学校的教学改革是一项长期而又艰巨的工作, 目前仍处于探索阶段。如果本书的出版能对教学改革起一点作用, 将是我们最大的欣慰。但由于我们水平有限, 经验不足, 编写时间又较短促, 书中难免有不妥之处, 恳请各兄弟院校的师生和读者批评指正。

编者

1996. 10

目 录

前言	
绪论	1
一、检测技术在机械工程中的作用	1
二、机械工程检测工作的任务	1
三、机械工程检测工作的含义和范围	2
四、本课程的性质与学习要求	3
第一章 检测技术基础	4
第一节 几何量测量基础	4
一、测量的基本概念与尺寸传递	4
二、计量器具和测量方法	5
三、计量器具的参数和特性	7
第二节 测量误差与数据处理	7
一、测量误差的基本概念	7
二、随机误差	9
三、系统误差	12
四、粗大误差	13
五、测量数据的处理	14
六、动态测量误差及数据处理概述	18
第三节 检测系统的基本特性	18
一、检测系统的组成	18
二、线性系统及其主要性质	19
三、检测系统的静态特性	20
四、检测系统的动态特性	22
五、不失真测试的条件	28
第二章 常用传感器	31
第一节 传感器的构成与分类	31
一、传感器的构成	31
二、传感器的分类	31
第二节 电阻式传感器	32
一、工作原理	33
二、应变式传感器的用途	35
第三节 电感式传感器	35
一、工作原理	35
二、电感式传感器的特点与用途	38
第四节 电容式传感器	39
一、工作原理	39
二、电容式传感器的用途	41
第五节 压电式传感器	41
一、工作原理	41
二、压电式传感器的用途	43
第六节 磁电式传感器	45
一、工作原理	45
二、磁电式传感器的用途	47
第七节 数字式传感器	47
一、感应同步器	48
二、光栅	50
三、磁栅	54
四、角数字编码器	56
第八节 半导体敏感元件	59
一、半导体彩色传感器	59
二、霍尔效应型传感器	59
第三章 信号的中间转换	61
第一节 电桥	61
一、直流电桥	61
二、交流电桥	65
三、带感应耦合臂的电桥	66
第二节 调制与解调	67
一、调幅及其解调	67
二、调频及其解调	70
第三节 滤波电路	73
一、滤波电路分类	74
二、RC 滤波电路原理及特性	75
第四节 电荷放大器	78
一、电荷放大级	78
二、归一化电压放大级	79
三、低、高通滤波器	80
四、输出放大级	80
第四章 显示与记录装置	82
第一节 光线示波器	82
一、结构与工作原理	82
二、振子特性	84
三、振子的选择和使用	90
第二节 X-Y 函数记录仪	91
一、工作原理	91

二、频率响应特性	93	七、对称度误差的检测	167
第三节 磁带记录仪	94	八、跳动误差的检测	168
一、基本组成及功用	94	第四节 表面粗糙度检测	169
二、工作原理	95	一、比较法	169
三、记录方式	97	二、光切法	170
四、技术性能参数	99	三、干涉法	172
第四节 显示与记录装置的选择	101	四、针描法	175
第五章 检测信号的处理分析	103	第五节 螺纹精度检测	178
第一节 信号的分类与特征	103	一、概述	178
第二节 检测信号的时间域分析	104	二、螺纹公差	178
一、均值、方差、均方值	104	三、螺纹的检测	179
二、相关分析	106	第六节 圆柱齿轮精度检测	184
三、相关分析应用	112	一、概述	184
第三节 检测信号的幅值域分析	116	二、影响齿轮传动精度的误差及其 检测	189
一、概率密度函数 $p(x)$	116	三、影响齿轮传动平稳性的误差及其 检测	199
二、概率分布函数 $P(x)$	118	四、影响载荷分布均匀性的误差及其 检测	203
第四节 检测信号的频率域分析	119	五、影响齿轮传动侧隙的误差及其 检测	206
一、信号的频率结构——频谱	119	第七章 典型物理量的检测	210
二、随机信号的功率谱密度函数	126	第一节 振动测试	210
第五节 倒频谱分析	131	一、振动测试仪器的选用	211
一、倒频谱定义	131	二、振动状态测试	211
二、倒频谱分析应用	132	三、机械动态特性测试	215
第六节 数字信号处理分析简介	133	四、测试系统的定度	221
一、采样、混叠与采样定理	133	第二节 位移测试	224
二、截断、泄漏与窗函数	134	一、位移传感器的选用	224
第六章 几何量的检测	138	二、部件移动距离的测试	227
第一节 尺寸检测	138	三、回转轴误差运动的测试	231
一、轴径的检测	138	第三节 应变和力的测试	235
二、孔径的检测	140	一、应变的测试	235
三、计量器具的选择	141	二、力的测试	239
第二节 角度及锥度的检测	143	第四节 噪声测试	243
一、概述	143	一、噪声的度量	243
二、检测方法	144	二、噪声测试仪器——声级计	247
第三节 形状和位置误差检测	147	三、噪声测试方法	249
一、直线度误差的检测	147	四、噪声测试中的几个问题	250
二、平面度误差的检测	152	参考文献	255
三、圆度误差的检测	156		
四、平行度误差的检测	159		
五、垂直度误差的检测	162		
六、同轴度误差的检测	164		

绪 论

一、检测技术在机械工程中的作用

自然界里有着各种各样的物体，它们都具有不同的形状、大小、状态和运动等特性。人们在生活和生产实践中，要想了解自然界中存在的各种物体的特性，就必须对它进行检测。

自然科学的产生与发展离不开检测。科学技术的进步是与检测方法、检测技术的不断完善分不开的。著名科学家门捷列夫说过：“科学，只有当人类懂得测量时才开始。”这说明，测量是人类认识自然的主要武器。只有借助于检测技术，人们才有可能发现、掌握自然界中的规律，并利用这些规律为人类服务。

现代科学技术的发展就更离不开检测技术，特别是科学技术迅速发展的今天，在机械工程、电子通讯、交通运输、军事技术、空间技术等许多领域都离不开检测技术。

机械工业在我国社会主义经济建设中占有相当重要的地位，它既要以各种技术装备国民经济各部门，同时又要提供大量的日用机电产品来满足人们日益增长的物质需求。经过四十多年的努力和发展，现在我国不但可以生产具有尖端技术的航天、航空和航海设备，而且还可以生产大型、重载的冶金、矿山设备以及高精度的仪器、仪表和机床等。但是，从另一方面，我国机械工业与世界工业发达国家相比，还存在着品种不够齐全、产品质量和技术水平不够高等问题。为此，我国的机械工业要跨入世界先进行列，就必须在吸收国外先进技术的同时，结合我国实际，加强研究，采用新技术、新材料、新工艺，不断更新产品，以适应当今世界科学技术发展的新形势。

面对上述形势和任务，机械工程检测技术就愈显得重要。例如，由于机械加工精度和生产过程的自动化水平不断提高，机械产品的加工已从单机自动化和生产自动线发展到柔性制造系统，并向最终实现无人化车间和自动化工厂过渡。因此，除了应对加工完成之后的工件进行检测之外，还必须进一步对生产的全过程进行检测。

随着生产和科学技术的发展，对检测技术也提出了更高的要求。产品质量的提高，在一定程度上有赖于检测准确度和检测效率的提高。因此，先进的检测技术已成为现代化生产中必不可少的重要组成部分。

当前，空间技术、高能物理、大规模集成电路等高新技术的迅速发展，给机械工业提出了许多新的课题。即要求检测技术不仅能为产品的质量和性能提供准确而客观的评价，为生产技术的合理改进提供基础数据以指导设计和制造，而且还可以作为进行一切探索性、开发性和创造性的科学发现或技术发明的手段。所以检测技术是机械工业发展的一项重要基础技术，对于从事机械工程的技术人员来说，必须掌握这门学科。

二、机械工程检测工作的任务

检测工作的基本任务是通过检测手段，获取有关研究对象的大小、形位、状态、运动和特征等方面的信息，并作出比较客观、准确的判断和描述，使我们对其有一个恰当的、全面的认识，并达到进一步改造和控制研究对象的目的。

在检测过程中，有些信息可以直接检测，而另外一些信息却不容易直接检测。例如弹簧

在外力作用下产生变形,其变形量可以直接检测。而对于一个回转圆盘的不平衡量的大小却不容易直接检测。然而,这种不平衡状态可以用传感器检测其支承的动载荷或振动信号,然后经过加工、处理就可获得圆盘不平衡量大小的信息。

被研究对象所包含的信息是十分丰富的,在生产实践中,人们总是根据需要测出所感兴趣的有限的信息,而不是全部信息。例如,单自由度的质量—弹簧系统的动态特性可以通过质量块的位移—时间关系来描述,质量块位移的时间历程(信号)就包含了该系统的固有频率和阻尼比等特征参数,即人们所需要的信息。经过分析、处理所获得的信息,就可以掌握这一系统的动态特性。

对机械这一类物理系统,信息是其客观存在或运动状态的特征。信息的载体称为信号,而信息则蕴涵于信号之中。信息总是通过某些物理量的形式表现出来,这些物理量就是信号。但是在信号中,既含有我们所需要的信息,也含有大量的不感兴趣的其他信息——干扰。干扰的存在给检测工作带来许多麻烦,检测工作中的一项任务就是要从复杂的信号(含有干扰的信号)中提取有用的信息。应该指出的是,干扰并不都是有害的。例如,齿轮传动的噪声对工作环境是一种“污染”,但它却是齿轮副传动缺陷的一种表现形式。因此可以用来评价齿轮副的传动质量,在某些场合,亦可用作故障诊断等。

根据信号的物理性质,可分为非电信号和电信号。如随时间而变化的力、位移、速度等属于非电信号;而随时间变化的电流、电压和磁通量等属于电信号。这两者可以借助于一定的装置相互变换。在检测过程中,常常将被测的非电信号通过传感器变换成电信号,以便于传输、放大、分析处理和显示记录等。

综上所述,检测技术的主要任务是:

(1) 对产品的质量进行检测,以判断是否达到设计要求。其中包括对原材料的物理性能、力学性能的检测,以及对零、部件和各类机械产品性能的检测等。

(2) 对生产过程进行监控,以保证生产的正常运行。例如,自动加工中,刀具磨损及断裂的监视以及零件尺寸的监视等。

(3) 可为生产、科研提供可靠数据和反馈信息,促使科学技术的发展和生产水平的不断提高。

三、机械工程检测工作的含义和范围

检测是人们认识客观事物,和从客观事物中获取所需信息,并掌握其客观规律的一种科学方法。在检测过程中,需要选用专门的仪器设备,设计合理的试验方法和进行必要的数据处理,从而取得被测对象的有关信息。例如,上述单自由度的质量—弹簧系统的检测,首先选择激振方案,然后根据信息量的性质(即质量块的机械运动)选择相应的传感器,并通过传感器以电信号的形式进行检测,所得的电信号还要进行再次变换、传输、加工和处理,才能最终获得研究对象中所需的信息量值。

检测工作是一项非常复杂的工作,需要多种学科知识的综合运用。在现代检测技术中几乎利用了所有的近代新技术和新理论,例如,半导体技术、激光技术、光纤技术、声控技术、遥感技术、自动化技术、计算机技术及数理统计、控制论、信息论等。

从广义的角度来讲,检测工作涉及试验设计、模型理论、传感器、信号加工与处理、误差理论、控制工程和参数估计等内容。从狭义角度来讲,检测工作则是指在选定激励方式下,信号的检测、变换、处理乃至显示、记录或直接以电量输出数据等内容。与之相对应的各个

环节构成检测系统。本教材仅从狭义的范围来论述检测技术中的一些基础知识,包括基本理论和常见几何量参数及机械参量的检测方法和具体应用。

机械工程检测的几何量和物理量多为各种形位、力、位移、速度、温度、流量、噪声等等。如果所检测的信号不随时间变化,或随时间变化非常缓慢而可以忽略其变化者,则称静态检测。如果所检测的信号变化较快,则属于动态检测。对于从事机械工程的技术人员来说,不仅需要掌握宏观上不随时间而变化的静态几何量的检测,而且还要掌握日益增多的动态机械参量的检测。在动态检测中,由于检测器具(传感器、放大器、中间转换器等)本身也具有特定的动态特性,所以我们所研究的信号总是检测器具的动态特性和研究对象动态特性的综合反映。本课程主要研究静态和动态检测方面的有关内容。

四、本课程的性质与学习要求

本课程是机械类各专业的一门技术基础课,是从基础课学习过渡到专业课学习的桥梁。本课程包括几何量静态检测和机械参量动态检测两部分内容,前一部分内容主要通过实验课来完成,后一部分内容主要通过课堂教学和一定学时的实验课来完成。

本课程是高等数学、物理学、力学、电子学、自动控制等技术的综合运用,又是实践性很强的一门课程。因此,学生在学习本课程时,除应具备上述学科的基础知识外,还应具有一定的生产实践知识,参加必要的实验,以得到检测能力的训练。

学生在学完本课程后应达到下列要求:

- (1) 掌握各种典型几何量的检测方法和初步学会使用常用的计量器具。
- (2) 基本掌握检测系统静态、动态特性的评价方法和不失真检测条件,并能正确选用检测系统进行检测工作。
- (3) 了解常用传感器、中间转换电路和显示记录仪器的工作原理和性能。
- (4) 掌握信号的时域和频域的描述方法,建立明确的信号的频谱概念。

总之,只有在学习过程中密切联系实际,加强实验,注意基本概念,才能初步具有处理实际检测工作的能力。

第一章 检测技术基础

第一节 几何量测量基础

一、测量的基本概念与尺寸传递

将被测物理量与标准量进行比较的过程称为计量。计量又常分为长度、温度、力学、电学、无线电、时间频率、放射性、光学、声学、化学等十大类。

在机械制造业中，长度计量又称为几何量测量，包括长度、角度、几何形状和相互位置及表面粗糙度等测量。几何量测量是保证机械产品质量和实现互换性生产的重要措施。

测量就是为确定被测几何量的量值而进行的实验过程，其实质是将被测几何量 L 与作为计量单位的标准量 E 进行比较，从而确定两者比值 q 的过程，即 $L/E=q$ ，或 $L=qE$ 。测量过程包括测量对象、计量单位、测量方法及测量精度等四个要素。

几何量测量对象是多种多样的，不同的测量对象有不同的被测量。如孔、轴的被测量主要是直径；箱体零件的被测量有长、宽、高以及孔间距等；螺纹零件的被测量有螺距、中径、牙型半角等；复杂的零件还有复合的被测量，如丝杠和滚刀的螺旋线误差等。但不管形体如何不同，被测量的参数如何复杂，从几何量计量的本质来说都可归结为长度量和角度量两种，复杂量无非是长度和角度的组合而已。

测量方法是指完成测量任务所用的方法、计量器具以及测量条件的总和。当没有现成的计量器具时，需要自行设计测量方法，这就需要根据被测对象和被测量的特点（形体大小、形状和精度要求等）确定标准量，拟定测量原理，工件的定位，读数和瞄准方式，以及测量的环境条件。

测量精度是指测量结果的可靠程度。由于在测量过程中不可避免地存在着测量误差，因此不知道测量结果的可靠程度的测量是没有意义的。

我国规定的法定计量单位中常用的长度单位有米 (m)、毫米 (mm)、微米 (μm)，角度单位为度 ($^\circ$)、分 ($'$)、秒 ($''$)。

在测量过程中，计量单位应以物质形式来体现。在计量部门，用多面棱体作为角度量的基准。机械制造中的一般角度标准是角度量块、测角仪或分度头等。

1983年10月第十七届国际计量大会通过了以光速来定义米，即一米是光在真空中于 $(1/299792458)$ s 的时间间隔内的行程长度。可用激光辐射精确地复现。为了把长度基准的量值准确地传递到生产中所应用的计量器具和工件上去，必须建立长度量值的传递系统。我国从国家波长标准开始，长度量值分两个平行的系统向下传递，一个是刻线量具（线纹尺）系统，另一个是端面量具（量块）系统，其中后者的应用更广。

量块是一种以两个互相平行的测量面之间的距离作为长度量值的长方体状的高精度量具，见图 1-1a。它具有形状简单、量值稳定、精度高、耐磨性好及使用方便的特点。主要用于：校准和检定计量器具；作为标准件用比较法测量工件尺寸；用于精密机械加工中的划线

或调整机床。

为满足不同的使用要求,根据量块长度的极限偏差以及长度变动量等制造精度指标,国家标准将量块分为00、0、1、2、3五级,精度依次降低,3级最低。按级使用时,应以量块的标称长度作为工作尺寸。

量块经长期使用其中心长度就会超出原定级别的允许偏差,就要降级使用,即降低了量块的使用价值。利用量块的测量精度比量块的制造精度高的特点,将量块按等使用就能克服上述缺点。因此国家计量局标准规定,根据量块在检定时中心长度的测量极限误差大小分为6等:即1,2,3,4,5,6等,其中1等的检定精度最高,6等最低。按等使用时,应以检定后的实测中心长度作为工作尺寸。量块按等使用比按级使用更准确。

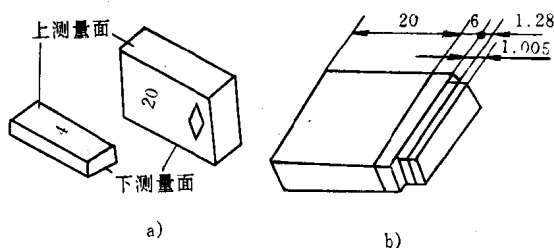


图 1-1 量块外形及组合

量块是由制造厂按级成套供应的,每套的总块数从4块到91块不等,它们有不同的名义尺寸系列。使用时,可以用不同尺寸的量块组合成所需要的各种尺寸。组合量块有两种方法:

(1) 研合法 将量块清洗擦干后沿测量面长边方向,先将端缘部分测量面接触,然后将一块量块沿着另一块的测量面平行方向滑进,最后使两测量面全部粘合在一起。

(2) 量块附件组合法 将量块清洗擦干后用量块附件将量块组夹紧。

为减少组合误差,应尽量使用最少的块数,一般不应超过4块。组合时,从消除需要数字的最末位数开始逐一选取。例如,用83块一套的量块组成28.285mm的尺寸,可分别选用:1.005, 1.28, 6.00和20.00mm这4个量块。量块组的组合,见图1-1b。

二、计量器具和测量方法

(一) 计量器具的分类

1. 按用途分类

(1) 标准计量器具 在测量中用来体现标准量,常用它校对和调整其它计量器具。还可分为定值和变值两种,前者只能体现某一固定量值,如量块和直角尺等;后者可以体现某一范围内的多种量值,如线纹尺和多面棱体等。

(2) 通用计量器具 它是机器制造中通常使用的,可以测量某一范围内的各种尺寸,将被测的量值转换成可以直接观察的示值的计量器具。如游标卡尺、千分尺、指示表、测长仪、三坐标测量机等。

(3) 专用计量器具 用于专门测量某种或某个特定几何量的计量器具。如量规、圆度仪、齿轮渐开线检查仪等。

2. 按结构和工作原理分类

(1) 机械式计量器具 用机械方法实现对被测量的感受、传递和放大的计量器具。如游标卡尺、千分尺、百分表、各类机械式测微仪等。其结构简单,性能稳定,使用维护方便,但精度不高。

(2) 光学式计量器具 用光学方法实现对被测量的转换和放大的计量器具。如光学比较仪、自准直仪、工具显微镜等。其精度高,性能稳定,测量对象广泛。

(3) 气动式计量器具 靠压缩空气通过气动系统时的状态(流量或压力)变化来实现对被测量的转换的计量器具。如水柱式和浮标式气动量仪等。它可实现非接触测量和远距离测量。

(4) 电子式计量器具 将被测量通过传感器转变为电量(电流、电压、电感、电容)等,再经变换而获得读数的计量器具。如电感比较仪、电动轮廓仪等。其精度高,易于实现自动测量、数字显示和对被测量进行各种数学运算。

(二) 测量方法的分类

1. 直接测量和间接测量

测量结果直接从计量器具的读数装置上获得的测量称为直接测量。如用千分尺或比较仪测量轴径。

直接地测量与被测的量有已知函数关系,并通过函数式计算求得测量结果的一类测量称为间接测量。它通常用于直接测量不易测准或由于被测件结构限制而无法进行直接测量的场合。如测量大圆柱直径时,可通过测量周长 L ,按公式 $D=L/\pi$ 计算直径。

2. 绝对测量和相对测量

绝对测量是指能直接从计量器具的读数装置读出被测量整个数值的测量。如用千分尺测量直径。

相对测量又称比较测量。先用标准器调整计量器具的零位,测量时由仪器的读数装置读出被测量相对于标准器的偏差,被测量的整个量值等于所示的偏差与标准量的代数和。例如用量块调整比较仪进行相对测量。

3. 单项测量和综合测量

单项测量是指单个地彼此没有联系地测量工件的单项参数。如分别测量螺纹中径、螺距和牙型半角。这种测量除终检工件外,还用于工序间的测量,以及工艺分析、调整机床等。

综合测量的特点是将被测件各相关的参数折合为一主参数或综合各参数进行测量。例如螺纹的中径、螺距和牙型半角的误差都要影响螺纹的旋入性,因此可用螺纹量规进行综合检验,如通端能旋入而止端不能旋入,则认为是合格的。又如用检验圆柱体的圆柱度来控制其纵、横截面的形状误差等。综合测量与被测件在工作中的实际情况相符,并且检验效率高,适用于成批和大量生产的终结检验。

4. 接触测量和非接触测量

接触测量是指测量时仪器的测头与工件表面直接接触,并有机械作用的测量力。测量力的存在将引入接触变形误差。

非接触测量是指测量时仪器的敏感元件与工件表面不直接接触,因而没有机械作用的测量力。此时,可利用光、气、磁等物理量关系使敏感元件与工件表面联系。

5. 离线测量和在线测量

离线测量又称被动测量,是在零件完工后进行的测量,其作用仅限于发现并剔除废品。

在线测量又称主动测量,是在工件加工过程中进行的测量。它可直接用来控制零件的加工过程,决定是否需要继续加工或调整机床,能及时防止废品的产生。

6. 静态测量与动态测量

静态测量是指测量时被测表面与测量头间保持相对静止。如用千分尺测零件直径。

动态测量是指测量时被测表面与测量头之间有相对运动。它能反映被测参数的变化过程。

如用齿轮单面啮合仪检测齿轮综合误差。

三、计量器具的参数和特性

计量器具的各项参数和特性从不同角度反映了计量器具的功用和性能，也是我们选用计量器具的依据。

(1) 刻度间距 刻度尺或刻度盘上两相邻刻线中心的距离。为保证估读精度，刻度间距一般在 $1 \sim 2.5\text{mm}$ 之间。

(2) 分度值 相邻两刻线间的距离所代表的量值。它是计量器具所能读出的最小读数。对于数字式仪器则称为分辨率，是指仪器显示的最末一位数字间隔所代表的量值。

(3) 示值范围 计量器具所显示或指示的起始值到终止值的范围。如外径千分尺的示值范围为 25mm 。

(4) 测量范围 在允许的误差限内计量器具所能测量的被测量值的范围。如千分尺的测量范围有 $0 \sim 25\text{mm}$ 、 $25 \sim 50\text{mm}$ 、 $50 \sim 75\text{mm}$ 等多种。

(5) 示值误差 计量器具的示值与被测量的真值之差。它可以通过将计量器具与高一等级的计量标准相比较，即检定来得到。

(6) 修正值 为消除系统误差而用代数法加到测量结果上的值，它与示值误差大小相等而符号相反。

(7) 测量力 测量过程中仪器测头和被测工件之间的接触力。

(8) 稳定度 在规定工作条件内，计量器具某些性能随时间保持不变的能力。

(9) 灵敏度 计量器具对被测量变化的反映能力。若用 ΔL 表示被观测变量的增量， ΔX 表示被测量的增量，则灵敏度 S 为： $S = \Delta L / \Delta X$ 。当分子分母是同一类量时，灵敏度又称放大倍数。

(10) 不确定度 由于测量误差的存在而对被测量值不能肯定的程度。这是建立在误差理论基础上的一个概念。

第二节 测量误差与数据处理

一、测量误差的基本概念

(一) 概述

各种物理量都需经过测试和计量（测量）才能得出结果。测量误差是不可避免的，因此必须研究、估计和判断测量结果是否可靠。研究误差理论的意义在于：

(1) 正确处理测量数据，合理计算所得结果，得到更接近真值的最佳结果。

(2) 正确认识误差性质，分析误差产生的原因，以消除和减小误差。

(3) 合理设计或合理选用计量器具、测量方法和环境条件。

测量误差 δ 是指测量结果 l 与被测量的真值 L 之差，即

$$\delta = l - L$$

真值是指一个量在被观测瞬间的条件下，被测的量本身所具有的真实大小。真值是客观存在的，但在一般情况下又是未知的。

上述测量误差 δ 又称绝对误差，可能是正值或负值，其绝对值的大小决定了测量的精度。绝对误差只能判断相同被测量值的精度，对大小不同量值的同类量进行测量，要比较其精度，

就需采用测量误差的另一种表示方法,即相对误差 f ,它等于测量的绝对误差与被测量的真值之比,即

$$f = \frac{\delta}{L} \approx \frac{\delta}{l}$$

相对误差没有单位,通常用百分数表示。

(二) 测量误差的来源

任何测量都是被测量和单位量之间的比较,这种比较需要采用某种测量基准和测量工具,在一定的测量条件下,通过一定的测量方法才能进行。如果这些测量因素发生变化,与理想的情况不一致,就会使测得值与真实值不一致,产生测量误差。在几何量测量中,测量误差的来源如下所述。

1. 基准件误差

如量块和标准线纹尺等长度基准的制造或检定误差,会带入测量值中。一般取基准件误差占总测量误差的 $1/5 \sim 1/3$ 。

2. 测量装置误差

测量装置是在测量过程中,实现被测的未知量与已知的单位量进行比较的组成部分。其误差包括仪器的原理误差和制造、调整误差,仪器附件及附属工具的误差,被测件与仪器的相互位置的安置误差,接触测量中测力及测力变化引起的误差等。

3. 方法误差

由于测量方法不完善而引起的误差,如经验公式、函数类型选择的近似性引入的误差,尺寸对准方式引起的对准误差,在拟定测量方法时由于知识的不足或研究不充分而引起的误差等。

4. 环境误差

环境条件不符合标准而引起的误差,如温度、湿度、气压、振动等。在几何量测量中,温度是主要因素。测量时的标准温度定为 20°C ,精密工件、刀具和量具的测量需要在计量室中进行。一般车间没有控制温度的条件,应使量仪与工件等温后测量。

5. 人员误差

由于测量者受分辨能力的限制、固有习惯引起的读数误差以及精神因素产生的一时疏忽等引起的误差。

总之,产生测量误差的因素是多种多样的,在分析误差时,应找出产生误差的主要因素,并采取相应的措施,以保证测量精度。

(三) 测量误差的分类

测量误差根据其特征和出现的规律,可分为下列三种。

1. 随机误差

随机误差的大小及符号均事先不能知道,但随着观测次数的增多,即测得值增多时,则将遵循一定的统计规律。随机误差是由测量过程中未加控制的多种随机因素造成的,而且这些因素一般又都不起显著作用。

2. 系统误差

在同一条件下,多次测量同一量值时,大小和符号保持不变或按某一确定规律变化的误差。系统误差由固定不变或按确定规律变化的因素所造成,通常可以预先设法知道。

3. 粗大误差

由于主观疏忽或外界条件的突然变化而产生的明显歪曲测量结果的误差。在测量中应及时发现并剔除此类误差。

(四) 精度

测量结果与真值接近的程度称为精度。它可分为：

1. 精密度

表示测量结果中随机误差的大小程度，即在一定条件下进行多次重复测量时，所得结果彼此之间的符合程度。

2. 准确度

反映测量结果中系统误差的大小程度。

3. 精确度

反映系统误差与随机误差的综合，即测量结果与真值的一致程度。

以图 1-2 所示的打靶结果说明。图 a 为系统误差小而随机误差大，即准确度高而精密度低。图 b 表示系统误差大而随机误差小，即准确度低而精密度高。图 c 表示两种误差都小，即精确度高。

二、随机误差

(一) 随机误差的分布及其特征

如进行以下实验，即对一个工件的某一部位用同一方法进行 150 次重复测量，所得的一系列测得值常称为测量列。然后将测得的尺寸进行分组，从 7.131mm 到 7.141mm 每隔 0.001mm 为一组，共分

11 组，其每一组的尺寸范围如表 1-1 中第一列所示，每组中工件尺寸出现的次数为 n_i ，列于表中第三列。若总的测量次数用 N 表示，则可算出各组的相对出现次数 n_i/N ，列于表中第四列。用横坐标表示测得值 x ，纵坐标表示相对出现次数 n_i/N ，则得图 1-3a 所示的图形，称频率直方图。连接每个小方图上部中点，得一折线，称实际分布曲线。若将上述测量次数 N 无限增大，而分组间隔取值很小， Δx 就趋近于零，且用测量的绝对误差 δ 代替测得尺寸 x_i ，则得图 1-3b 所示的光滑曲线，即随机误差的正态分布密度曲线。

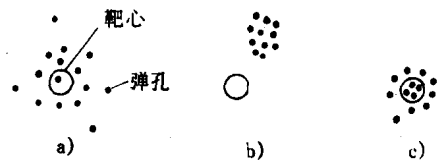


图 1-2 精度

表 1-1 频率计算示例

测量值范围	测量中值	出现次数 n_i	相对出现次数率 n_i/N
7.1305~7.1315	$x_1=7.131$	$n_1=1$	0.007
7.1315~7.1325	$x_2=7.132$	$n_2=3$	0.020
7.1325~7.1335	$x_3=7.133$	$n_3=8$	0.054
7.1335~7.1345	$x_4=7.134$	$n_4=18$	0.120
7.1345~7.1355	$x_5=7.135$	$n_5=28$	0.187
7.1355~7.1365	$x_6=7.136$	$n_6=34$	0.227
7.1365~7.1375	$x_7=7.137$	$n_7=29$	0.193
7.1375~7.1385	$x_8=7.138$	$n_8=17$	0.113
7.1385~7.1395	$x_9=7.139$	$n_9=9$	0.060
7.1395~7.1405	$x_{10}=7.140$	$n_{10}=2$	0.013
7.1405~7.1415	$x_{11}=7.141$	$n_{11}=1$	0.007

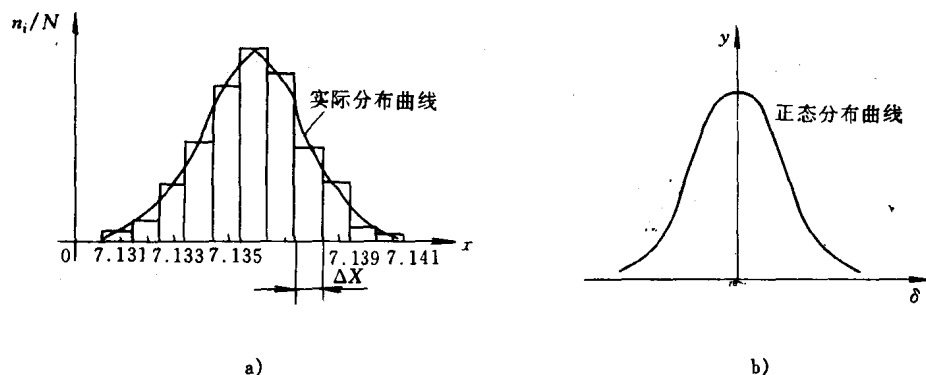


图 1-3 频率直方图和正态分布曲线

根据概率论，正态分布密度曲线可用下列数学公式表示

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

式中 y ——概率密度；
 σ ——标准偏差；
 e ——常数 2.71828；
 δ ——随机误差。

随机误差的正态分布有如下基本性质：

- (1) 绝对值小的误差比绝对值大的误差出现的机会要多，即单峰性。
- (2) 测量次数很大时，绝对值相等的正负误差出现的机会相等，即对称性。由此推理，随着测量次数趋于无穷大，随机误差的算术平均值将趋于零，即抵偿性。
- (3) 在一定条件下，误差的绝对值不会超过一定的限度，即有界性。

随机误差的分布多数属于正态分布。在有些情况下，还有其它形式的分布律，如均匀分布、三角形分布等，可参阅有关资料。

正态分布随机误差的评定指标有两类：一类表示分布中心的位置，其数字特征为算术平均值；另一类表示分散的程度，其数字特征为标准偏差（均方根偏差）。

(二) 算术平均值

对某量进行 n 次等精度的、无系统误差的测量，测得值为 $l_1, l_2, \dots, l_n$ ，则算术平均值为

$$\bar{L} = \frac{1}{n} (l_1 + l_2 + \dots + l_n) = \frac{\sum l_i}{n} \quad (1-2)$$

当测量次数无限大时，被测量的算术平均值即为真值，但实际上进行无限多次测量是不可能的，真值也就难以得到。而作为有限次测量，算术平均值则最接近真值，因此以算术平均值作为测量结果是可靠而合理的。

(三) 标准偏差

由式 (1-1) 可知，当 $\delta=0$ 时，概率密度最大，即 $y_{\max} = 1/(\sigma \sqrt{2\pi})$ 。若 $\sigma_1 < \sigma_2 < \sigma_3$ ，则 $y_{1\max} > y_{2\max} > y_{3\max}$ 。即 σ 愈小， $y_{\max}$ 愈大，正态分布曲线愈陡，随机误差的分布愈集中，测量方法的精密程度愈高。图 1-4 中，表示了三种不同标准偏差的正态分布曲线。

由上述可知,测量的精密度可用标准偏差 σ 来表示。

单次测量的标准偏差可表示为

$$\sigma = \sqrt{\frac{\delta_1^2 + \delta_2^2 + \cdots + \delta_n^2}{n}} = \sqrt{\frac{\sum \delta_i^2}{n}} \quad (1-3)$$

由于 $\delta = l - L$, 而 L 为真值, 不易得到。实际上常采用残余误差(残差) ν_i 计算标准偏差的估计值。残余误差为某测量值与算术平均值之差, 即

$$\nu_i = l - \bar{L} \quad (1-4)$$

通过数学推导, 测量列的标准偏差可用下式表示

$$\sigma_s = \sqrt{\frac{\sum \nu_i^2}{n-1}} \quad (1-5)$$

在有限次测量中, 作为最接近真值的算术平均值, 也存在可靠程度的评定问题, 其精度用算术平均值的标准偏差表示, 即

$$\sigma_L = \frac{\sigma}{\sqrt{n}} = \frac{\sigma_s}{\sqrt{n}} \quad (1-6)$$

此式说明, 增加测量次数可以提高测量精度。但当 σ 一定时, 在 $n > 10$ 以后, σ_L 已减少得非常缓慢。因此一般情况下, 取 $n = 10$ 以内。若要进一步提高测量精度, 则需采取其它措施来解决。

(四) 极限误差

测量结果(单次测量值或测量列的算术平均值)的误差不超过某极端误差的概率为 P , 并使差值 $(1-P)$ 可忽略, 该极端误差称为极限误差。

正态分布曲线下的全部面积相当于全部误差出现的概率, 即

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

随机误差落在区间 $(-\delta, +\delta)$ 上的概率为

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

将上式进行变量置换, 设 $t = \delta/\sigma$, $dt = d\delta/\sigma$, 则

$$P = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-t}^{+t} e^{-\frac{t^2}{2}} dt \quad (1-7)$$

这样就可以求出积分值 P 。为了应用方便, 其积分值一般列成表格形式, 称为概率函数积分值表。由于函数是对称的, 因此表中列出的值是由 $0 \sim t$ 的积分值 $\phi(t)$, 而 $-t$ 到 $+t$ 的积分值 $P = 2\phi(t)$ 。当 t 给定时, $\phi(t)$ 值可由表中查出。

现已查出 $t = 1, 2, 3, 4$ 等几个特殊值的积分值, 并求出随机误差不超出相应区间的概率

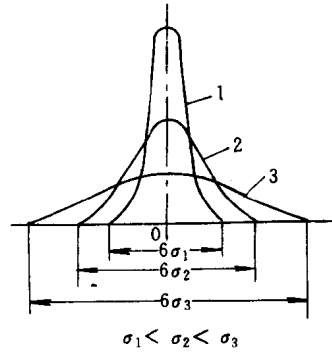


图 1-4 标准偏差对随机误差分布性质的影响