

350

TH16-43

C46

教育部高职高专规划教材

# 机械工程检测技术

陈瑞阳 毛智勇 主编  
刘晓彤 咎 华 郑业明 田宏宇 编

高等教育出版社

## 内 容 提 要

本书为教育部高职高专规划教材。主要介绍机械工程中常见机械参量的检测方法。全书共九章,分为基础理论和应用技术两部分。基础理论部分,讲述检测技术的基础知识、常用传感器的分类、测试信号的描述等。应用技术部分,分别介绍了几何量、应变、力、力矩、位移、振动、速度、转速、压力、流量、温度、噪声等机械参量的检测方法;相应传感器的原理及其测量电路;无损检测、计算机辅助测试等先进的检测技术。每章附有思考题与习题,全书最后的附录为实验指导,可供各专业根据各自的教学要求选择组织实训。

根据高职高专教育的特点,本书在编写时,以技术应用为出发点,做到理论少而精,重点突出应用能力的培养,实用性强;内容讲述通俗易懂,由浅入深,便于自学。本书适用于高职、高专及成人高校机械类和机电一体化类专业使用,也可供从事机械工程检测技术工作的工程技术人员参考。

## 图书在版编目(CIP)数据

机械工程检测技术/陈瑞阳,毛智勇主编. —北京:  
高等教育出版社,2000  
教育部高职高专规划教材  
ISBN 7-04-008728-6

I. 机... II. ①陈...②毛... III. 机械工程—检测—  
高等学校:技术学校—教材 IV. TH16

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2000)第 29009 号

机械工程检测技术

陈瑞阳 毛智勇 主编

---

出版发行 高等教育出版社

社 址 北京市东城区沙滩后街 55 号

邮政编码 100009

电 话 010-64054588

传 真 010-64014048

网 址 <http://www.hep.edu.cn>

经 销 新华书店北京发行所

排 版 高等教育出版社照排中心

印 刷 北京地质印刷厂

开 本 787×1092 1/16

版 次 2000 年 8 月第 1 版

印 张 14

印 次 2000 年 8 月第 1 次印刷

字 数 330 000

定 价 12.30 元

---

本书如有缺页、倒页、脱页等质量问题,请到所购图书销售部门联系调换。

版权所有 侵权必究

# 前言

本书是教育部高职高专规划教材,是根据教育部积极发展高等职业教育,大力推进高等专科教育人才培养模式的改革,促进高等职业教育、高等专科教育和成人高等教育“三教统筹”协调发展的方针,依据1999年6月在北京召开的“高职高专机械电子类专业基础课程教材研讨会”的精神,在高等教育出版社高职高专室的指导和支持下编写的。

本书以培养学生从事实际工作的基本能力和基本技能为目的,本着理论知识以必需、够用为度,少而精的原则,注意到理论知识的讲解与工程检测实践的有机结合。从实用性出发,本书以介绍典型机械量的检测方法为主线,将常用传感器、测量电路和数据分析处理技术等内容,有机地融会到检测方法中讲解,使学生对检测系统和方法有一个完整的认识,能够针对检测对象选用检测装置,实施检测过程,并给出测量结果。

本书在内容上力求概念清楚、通俗易懂、由浅入深,增强了实验、实训等实践环节,强调理论知识和实践训练的统—,着重培养学生的科学实践能力,分析问题、解决问题的能力 and 创新精神。

全书共九章,第一章为基础理论部分,讲述检测技术的基础知识、常用传感器、有关测试信号的描述等;第二章至第九章为应用部分,分别介绍了几何量、应变、力、力矩、位移、振动、速度、转速、压力、流量、温度、噪声等机械参量的检测原理和检测方法,相应传感器的原理及其测量电路,并介绍了无损检测、计算机辅助测试等先进检测技术;在本书的最后附有实验指导,可供各专业根据各自的教学要求选择组织实训。

本书由北京联合大学机械工程学院陈瑞阳、毛智勇主编,参加编写的有陈瑞阳(绪论、第四章、第六章、第八章第三节、第九章)、毛智勇(第三章、第七章)、刘晓彤(第一章)、咎华(第二章、第八章第二节)、郑业明(第八章第一节、附录)、田宏宇(第五章),由陈瑞阳负责统稿。本书由南京机械高等专科学校徐锦康教授主审。

本书在编写过程中得到高等教育出版社高职高专室的大力支持和帮助,且参考了兄弟院校的有关资料和反馈意见,在此一并表示衷心的感谢。

高职高专教育在新时期被赋予了新的教学模式和新的教学特色,它的完善需要长期和艰苦的工作,目前很多院校都在进行这方面探索,如果我们的努力能为这项教学改革尽到微薄之力,将是我们最大的心愿。由于我们水平有限,书中难免有不妥之处,恳请专家与读者批评指正。

编 者

2000年2月

# 绪 论

## 1. 检测技术在国民经济中的地位和作用

在人类的各项生产活动和科学实验中,为了了解和掌握整个过程的进展及其最后结果,经常需要对各种基本参数或物理量进行检查和测量,从而获得必要的信息,作为分析判断和决策的依据。检测技术就是利用各种物理效应,选择合适的方法与装置,将生产、科研、生活中的有关信息,通过检查与测量手段进行定性的了解和定量的掌握所采取的一系列技术措施。

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。经过五十多年的努力和发展,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。

在机械制造行业中,通过对机床的许多静态、动态参数如工件的加工精度、切削速度、床身振动等进行在线检测,从而控制加工质量。在化工、电力等行业中,如果不随时对生产工艺过程中的温度、压力、流量等参数进行自动检测,生产过程就无法控制甚至发生危险。在交通领域,一辆现代化汽车装备的传感器就有十几种,分别用于检测车速、方位、转矩、振动、油压、油量、温度等。在国防科研中,检测技术用得更多,许多尖端的检测技术都是因国防工业需要而发展起来的。例如,研究飞机的强度,就要在机身、机翼上贴上几百片应变片并进行动态测量。在导弹、卫星、飞船的研制中,检测技术就更为重要。例如阿波罗宇宙飞船用了 1218 个传感器,运载火箭部分用了 2077 个传感器,对加速度、温度、压力、应变、振动、流量、位置、声学等进行监测。近年来,随着家电工业的兴起,检测技术也进入了人们的日常生活中。例如,自动检测并调节房间的温度、湿度等。

总之,检测技术已广泛地应用于工农业生产、科学研究、国内外贸易、国防建设、交通运输、医疗卫生、环境保护和人民生活的各个方面,起着越来越重要的作用,成为国民经济发展和科技进步的一项必不可少的重要基础技术。因而,使用先进的检测技术也就成为经济高度发展和科技现代化的重要标志之一。

从另一方面看,现代化生产和科学技术的发展也不断地对检测技术提出新的要求和课题,成为促进检测技术向前发展的动力。科学技术的新发现和新成果不断应用于检测技术中,有力地

促进了检测技术自身的现代化。

检测技术与现代化生产和科学技术的密切关系,使它成为一门十分活跃的技术学科,几乎渗透到人类的一切活动领域,发挥着愈来愈大的作用。

## 2. 检测系统的组成

一个完整的检测系统或检测装置通常是由传感器、信号处理电路和显示记录装置等部分组成,分别完成信息获取、转换、显示和处理等功能。图 0.1 给出了检测系统的组成框图。

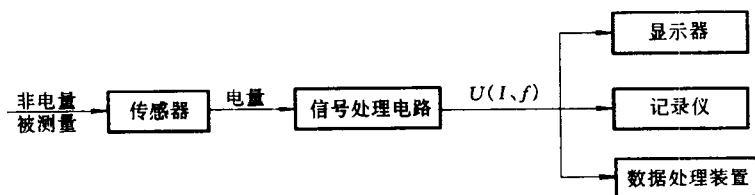


图 0.1 检测系统的组成框图

(1) 传感器 又称变换器或转换器、变送器,是检测系统的信号拾取部分,作用是感受被测量并将其转换成可用信号输出,通常这种输出是电信号。如将机械位移量转换成电阻、电容或电感等参数的变化;又如将振动或声音信号转换成电压或电荷的变化。

(2) 信号处理电路 又称测量电路或中间变换电路。用于对传感器输出的信号进行加工,作用是把传感器输出的微弱信号变成具有一定功率的电压、电流或频率信号,以满足显示记录装置的要求。如将阻抗的变化转换成电压或电流的变化;又如将信号进行放大、调制与解调、线性化以及转换成数字信号等。经过这样的加工使之变成一些合乎需要、便于传送、显示或记录以及可作进一步处理的信号。电阻应变式传感器,被测量引起传感器直接变化的是粘贴在传感器弹性元件上的应变片的电阻变化。信号处理电路通过测量电桥电路及放大电路等,把该电阻量变化转换成电压量输出。电感、电容、压电传感器,被测量引起传感器直接变化的是电感量、电容量和电荷量,然后经过信号处理电路,可获得足够量值的电压或电流输出。信号处理电路还能起阻抗变换的作用,如压电传感器是高输出阻抗,经过信号处理电路后,成为低阻抗输出,这样才能与某些记录仪相匹配。

应当指出测量电路的种类和构成是由传感器的类型决定的,不同的传感器所要求配用的测量电路经常具有自己的特色。在以后各章节中,我们将针对不同的传感器作详细介绍。

(3) 显示、记录部分 它的作用是将信号处理电路输出的被测信号转换成人们可以感知的形式,如指针的偏转、数码管的显示、荧光屏上的图像等。还可将此电信号记录在适当的介质上,如磁带、记录纸等,以提供人们观测和分析。目前常用的显示器有四类:模拟显示、数字显示、图像显示及记录仪等。

模拟显示是利用指针对标尺的相对位置表示被测量数值的大小。如各种指针式电气测量仪表,常见的有毫伏表、微安表、模拟光柱等。其特点是读数方便、直观,结构简单、价格低廉,在检测系统中一直被大量应用。但这种显示方式的精度受标尺最小分度限制,而且读数时易引入主观误差。

数字显示则直接以十进制数字形式来显示读数,实际上是专用的数字电压表,它可以附加打

印机,打印记录测量数值,并且易于和计算机联机,使数据处理更加方便。这种方式有利于消除读数的主观误差。目前多采用发光二极管(LED)和液晶(LCD)等以数字的形式来显示读数。前者亮度高,后者耗电省。

图像显示,如果被测量处于动态变化之中,用一般的显示仪表读数就十分困难,这时可以将输出信号送至显示装置,用示波管(CRT)或 LCD 屏幕来显示被测参数的变化曲线或读数,有时还可用图表、彩色图等形式来反映整个生产线上的多组数据。

记录仪主要用来记录被测量随时间变化的曲线,作为检测结果,供分析使用。常用的记录仪有笔式记录仪、光线示波器、磁带记录仪、快速打印机等。

显示、记录部分通常都是选用市场上现售的标准设备。

### 3. 检测技术发展概况

检测技术是随着现代科学技术的发展而迅速发展起来的一门新兴学科。20 世纪 20 年代,检测技术已经应用在机械工程试验和生产过程的自动控制中。1946 年电子计算机诞生,并很快地渗透到机械行业。50 年代初期出现了第一批机电一体化产品——数控机床。它将机械加工、检测技术和计算机技术结合在一起,大大提高了加工精度和生产效率。目前,在现代机械制造最具代表性的产品中,如数控机床、机器人、柔性制造系统(FMS)、计算机集成制造系统(CIMS)等,检测技术都已成为不可缺少的重要组成部分。

近年来,由于物理学、化学、材料学,特别是半导体材料学、微电子学等方面的新成就,使新型的检测系统正在向器件集成化、信息数字化和控制智能化方向发展,新型或具有特殊功能的传感器不断涌现出来。检测技术的新进展主要表现在以下几个方面:

#### (1) 不断提高检测系统的测量精度、量程范围,延长使用寿命、提高可靠性

随着科学技术的不断发展,对检测系统测量精度的要求也相应地在提高。近年来,人们研制出许多高精度的检测仪器以满足各种需要。例如,用直线光栅测量直线位移时,测量范围可达二三十米,而分辨率可达微米级。人们已研制出能测量小至几十个帕的微压力和大到几千兆帕高压的压力传感器,开发了能够测出极微弱磁场的磁敏传感器。从 60 年代开始,人们对传感器的可靠性和故障率的数学模型进行了大量的研究,使得检测系统的可靠性及寿命大幅度的提高,现在许多检测系统可以在极其恶劣的环境下连续工作数万小时。目前人们正在不断努力进一步提高检测系统的各项性能指标。

#### (2) 应用新技术和新的物理效应,扩大检测领域

检测原理大多以各种物理效应为基础,人们根据新原理、新材料和新工艺研究所取得的成果,将研制出更多品质优良的新型传感器。例如光纤传感器、液晶传感器、以高分子有机材料为敏感元件的压敏传感器、微生物传感器等。近代物理学的成果如激光、红外、超声、微波、光纤、放射性同位素等的应用,都为检测技术的发展提供了更多的途径。如激光测距、红外测温、超声波无损探伤、放射性测厚等非接触测量的迅速发展。另外,代替视觉、嗅觉、味觉和听觉的各种仿生传感器和检测超高温、超高压、超低温和超高真空等极端参数的新型传感器,将是今后传感器技术研究和发展的方向。

#### (3) 发展集成化、功能化的传感器

随着超大规模集成电路技术的发展,硅电子元件的集成化有可能大量地向传感器领域渗透。人们将传感器与信号处理电路制作在同一块硅片上,得到体积小、性能好、功能强的集成传感器,

使传感器本身具有检测、放大、判断和一定的信号处理功能。例如,已研制出高精度的 PN 结测温集成电路。又如,人们已能将排成阵列的成千上万个光敏元件及扫描放大电路制作在一块芯片上,制成 CCD 摄像机。今后,还将在光、磁、温度、压力等领域开发新型的集成化、功能化的传感器。

#### (4) 采用微机技术,使检测技术智能化

从 20 世纪 60 年代微处理器问世后,人们已逐渐将计算机技术应用到检测系统中,使检测仪器智能化,从而扩展了功能,提高了精度和可靠性。计算机技术在检测技术中的应用,还突出地表现在整个检测工作可在计算机控制下,自动按照给定的检测实验程序进行,并直接给出检测结果,构成自动检测系统。其它诸如波形存储、数据采集、非线性校正和系统误差的消除、数字滤波、参数估计等方面,也都是计算机技术在检测领域中应用的重要成果。目前新研制的检测系统大都带有微处理器。

#### 4. 本课程的任务和学习要求

对于机械及机电一体化专业来说,本课程是一门技术基础课。通过本课程的学习,使学生能较正确地选用检测装置和初步掌握静、动态测试所需要的基本理论、基本知识和基本技能。

学生在学完本课程后应具有以下几方面的知识:

- (1) 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的条件。
- (2) 掌握各种典型几何量的检测方法和初步学会使用常用的检测仪器。
- (3) 基本掌握常用传感器及其测量电路的工作原理和性能。
- (4) 针对常见的机械量能够正确地选用检测装置完成检测任务。

本课程涉及的学科面广,需要有较广泛的基础和专业知识,学好这门课的关键在于理论联系实际。要富于设想,善于借鉴,重视实验环节,参加必要的实验,这样才能得到检测能力的训练。

本教材的各章末均附有数量较多的应用实例及思考题与习题,引导学生循序渐进地掌握检测技术的基本原理和实际应用技能及方法。

# 第1章 检测技术基础

## 1.1 检测方法和检测误差概述

为了实现对一种特定物理量的检测,需要涉及检测原理、检测方法和检测系统三个要素。所谓检测原理是指实现测量所依据的物理现象和物理定律的总体。例如热电偶测温依据热电效应,压电晶体测力依据压电效应,激光测距依据多普勒效应等等。检测方法是指实现测量所使用的原理和设备。检测系统是指具有一定特性并用于测量的装置。

### 1.1.1 检测方法

根据检测时被测量具有的不同特征,检测方法有许多种分类:

#### 1. 电测法和非电测法

两者的差别在于检测回路中是否有检测信息的电信号转换。在现代检测技术中都是采用电测方法来检测非电量。广泛采用非电量电测法的原因是电测法可以获得很高的灵敏度和精度,可以实现远距离传输,便于实现测量过程的自动化,便于实现测量与控制的联动。

#### 2. 静态测量和动态测量

这两种测量方法是根据被测物理量的性质来划分的。静态测量即测量那些不随时间变化或变化很缓慢的物理量;动态测量即测量那些随时间快速变化的物理量。

静态与动态是相对的,可以把静态测量看作是动态测量的一种特殊形式。动态测量的误差分析比静态测量要复杂。

#### 3. 直接测量和间接测量

直接测量是用预先标定好的测量仪表,对某一未知量直接进行测量,得到测量结果。例如用压力表测量压力;用万用表测量电压、电流、电阻等。直接测量的优点是简单而迅速,所以工程上广泛应用。

间接测量是对几个与被测物理量有确切函数关系的物理量进行直接测量,然后把所得的数据代入关系式中进行计算,从而求出被测物理量。间接测量方法比较复杂,一般在直接测量很不方便或无法进行时,才采用间接测量。

#### 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。由于有接触变形的影响,将给测量带来误差。

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,因而没有接触变形的影

响。一般利用光、气、磁等物理量关系使敏感元件与工件产生联系。

#### 5. 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。如用千分尺测量轴的直径。

相对测量又称比较测量。先用标准器具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具的偏差,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。

#### 6. 离线测量和在线测量

离线测量又称被动测量,是在零件加工完成后进行的测量,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。

### 1.1.2 检测误差基本概念

#### 1. 误差的定义

被测量物理量所具有的客观存在的量值,称为真值,记为  $x_0$ 。由检测装置测得的结果称为测量值,记为  $x$ 。测量值与真值之差称为误差。误差一般有两种表达形式:

1) 绝对误差  $\Delta$ ——测量值与真值之差称为绝对误差,它表示误差的大小。

$$\Delta = x - x_0$$

真值是一个理想概念,一般无法得到。实际测量中常用高精度的测量值或平均值代表真值,称为“约定真值”。

2) 相对误差  $\epsilon$ ——绝对误差与被测量的真值之比称为相对误差,一般用百分比(%)表示。因测量值与真值接近,所以也可近似用绝对误差与测量值之比作为相对误差。

$$\epsilon = \frac{\Delta}{x_0} \approx \frac{\Delta}{x}$$

绝对误差只能表示出误差量值的大小,不便于比较测量结果的精度。例如,有两个温度测量结果  $15 \pm 1^\circ\text{C}$  和  $50 \pm 1^\circ\text{C}$ ,尽管它们的绝对误差都是  $\pm 1^\circ\text{C}$ ,但后者的精度显然高于前者。

为了方便,对计量器具还常常使用“引用误差”的概念。引用误差是一种简化和方便实用的相对误差。它是以测量仪表某一刻度点的误差为分子,满刻度值为分母所得的比值,即

$$\text{引用误差} = \frac{\text{某一刻度值的误差}}{\text{满刻度值}}$$

我国常用的电工、热工仪表就是按引用误差之值进行精度分级的。在选择仪表时,要兼顾仪表的精度等级和测量上限两个方面。

#### 2. 误差的来源

测量误差产生的原因可以归纳为五个方面:

##### 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测量误差的  $1/5 \sim 1/3$ 。

## 2) 测量装置误差

测量装置的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℃,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原因,并采取相应的措施,以保证测量精度。

## 3. 误差按特征的分类

根据测量误差的特征,可将误差分为三类:系统误差、随机误差和粗大误差。

1) 系统误差——在同一条件下,多次测量同一量值时,绝对值和符号保持不变或在条件改变时按一定规律变化的误差称为系统误差。例如,由于标准量的不准确、仪器刻度的不准确而引起的误差。

因为系统误差有规律性,所以应尽可能通过分析和试验的方法加以消除,或通过引入修正值的方法加以修正。

2) 随机误差——在相同条件下,多次测量同一量值时,绝对值和符号以不可预定的方式变化的误差称为随机误差。例如,仪表中传动件的间隙和摩擦、连接件的变形等因素引起的误差。

应当指出,在任何一次测量中,系统误差和随机误差一般都是同时存在的,而且它们之间并不存在严格界限,在一定的条件下还可以互相转化。例如,仪表的分度误差,对制造者来说具有随机的性质,为随机误差;而对检测部门来说就转化为系统误差了。随着人们对误差来源及其变化规律认识的深入和检测技术的发展,对系统误差与随机误差的区分会越来越明确。

3) 粗大误差——这种误差主要是由于测量人员的粗心大意、操作错误、记录和运算错误或外界条件的突然变化等原因产生的。粗大误差的产生使测量结果有明显的歪曲,凡经证实含有粗大误差的数据应从实验数据中剔除。

## 4. 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。

如图 1.1 所示的三种打靶结果,图 1.1a 表示系统误差小而随机误差大,即准确度高而精密度低;图 1.1b 表示系统误差大而随机误差小,即准确度低而精密度高;图 1.1c 表示两种误差都小,即精确度高。

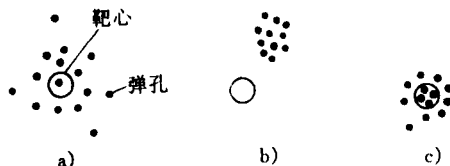


图 1.1 精度

### 1.1.3 随机误差的估算

虽然一次测量的随机误差的产生没有规律,但是通过大量的测量发现,在多次重复测量的总体上,随机误差却服从一定的统计规律,最常见的就是正态分布规律。

#### 1. 随机误差的分布及其特征

现进行如下实验,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。将测得的尺寸进行分组,从 7.131 mm 到 7.141 mm 每隔 0.001 mm 为一组,共分 11 组,其每一组的尺寸范围如表 1.1 中第 1 列所示,每组中工件尺寸的次数为  $n_i$ ,列于表中第 3 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 4 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 1.2a 所示的图形,称为频率直方图。连接每个小方框上部的中点,得一折线,称为实际分布曲线。若将上述测量次数  $N$  无限增大,而分组间隔取值很小,  $\Delta x$  就趋近于零,且用测量的绝对误差  $\delta$  代替测得尺寸  $x_i$ ,则得图 1.2b 所示的光滑曲线,即随机误差的正态分布曲线。

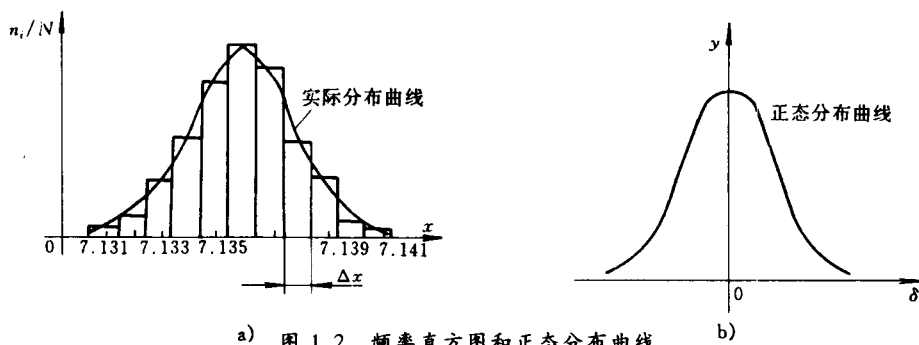
表 1.1 频率计算示例

| 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           |

根据概率论,正态分布密度曲线可用下式表示

$$y = \frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{\delta^2}{2\sigma^2}} \quad (1.1)$$

式中,  $y$  为概率密度;  $\sigma$  为标准偏差;  $e$  为常数 2.71828;  $\delta$  为随机误差(绝对误差)。



a) 图 1.2 频率直方图和正态分布曲线

b)

随机误差的正态分布有以下基本性质：

- 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) 测量次数很多时,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。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)。

## 2. 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  $x_1, x_2, \dots, x_n$ , 则算术平均值为

$$\bar{X} = \frac{1}{n} (x_1 + x_2 + \dots + x_n) = \frac{\sum x_i}{n} \quad (1.2)$$

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。

## 3. 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  $\sigma$  越小,  $y_{\max}$  越大,正态分布曲线越陡,随机误差的分布越集中,测量的精密度越高。图 1.3 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  $\sigma$  来表示。

单次测量的标准偏差可表示为

$$\sigma = \sqrt{\frac{\delta_1^2 + \delta_2^2 + \dots + \delta_n^2}{n}} = \sqrt{\frac{\sum \delta_i^2}{n}} \quad (1.3)$$

由于  $\delta = x - x_0$ , 而  $x_0$  为真值,不易得到。实际上常采用残余误差  $\nu_i$  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

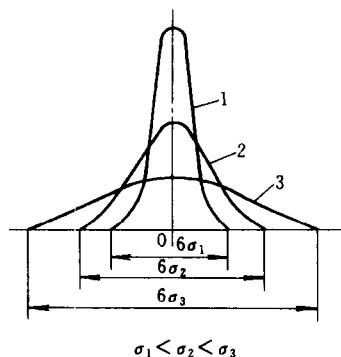


图 1.3 标准偏差对随机误差分布性质的影响

$$\nu_i = x_i - \bar{X} \quad (1.4)$$

通过数学推导,测量列的标准偏差可用下式表示

$$\sigma_s = \sqrt{\frac{\sum \nu_i^2}{n-1}} \quad (1.5)$$

增加测量次数可以提高测量精度。但当  $\sigma$  一定时,在  $n > 10$  以后,测量次数的增加对提高精度的影响已很小。因此一般情况下,取  $n \leq 10$ 。若要进一步提高测量精度,则需采取其它措施来解决。

#### 4. 极限误差

设测量结果(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  $P$ ,若差值  $(1-P)$  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

$$P = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-t}^{+t} e^{-\frac{t^2}{2}} dt \quad (1.6)$$

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。

表 1.2 四个特殊  $t$  值对应的概率

| $t$ | $\delta$  | $\phi(t)$ | 不超出 $\delta$ 的概率 $P$ | 超出 $\delta$ 的概率 $P' = 1 - P$ |
|-----|-----------|-----------|----------------------|------------------------------|
| 1   | $\sigma$  | 0.341 3   | 0.682 6              | 0.317 4                      |
| 2   | $2\sigma$ | 0.477 2   | 0.954 4              | 0.045 6                      |
| 3   | $3\sigma$ | 0.498 65  | 0.997 3              | 0.002 7                      |
| 4   | $4\sigma$ | 0.499 968 | 0.999 36             | 0.000 64                     |

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  $P$  和超出相应区间的概率  $P'$ ,如表 1.2 所示。从表中可以得到下列结果:若我们进行  $n$  次等精度测量,当  $t = 1$ ,即  $\delta = \sigma$  时,有 68.26% 的测量误差在  $\pm \delta$  的范围内;当  $t = 2$ ,即  $\delta = 2\sigma$  时,有 95.44% 的测量误差在  $\pm \delta$  的范围内;当  $t = 3$ ,即  $\delta = 3\sigma$  时,有 99.73% 的测量误差在  $\pm \delta$  的范围内。由此可知  $t$  和误差出现的概率有关,常称为置信系数或置信度。当  $t = 3$  时,概率  $P \approx 1$ ,因此常取  $\delta = \pm 3\sigma$  为随机误差的极限误差,如图 1.4 所示。即

$$\delta_{\lim} = \pm 3\sigma \quad (1.7)$$

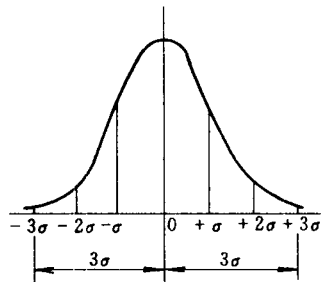


图 1.4 随机误差的极限误差

#### 1.1.4 系统误差

##### 1. 系统误差的分类

###### 1) 定值系统误差

指大小和符号均固定不变的系统误差。如刻度尺不准确、千分尺未校准零位等都将对测量结果引入定值系统误差。

###### 2) 变值系统误差

指大小和符号按一定规律变化的误差,它又可分为

(1) 累积性(线性)系统误差——这种误差随时间或测量值的变化呈线性递增或递减。如千分尺测微螺杆螺距的累积误差,使测量误差随被测尺寸增大而增大。

(2) 周期性系统误差——误差的大小和符号呈周期性变化。如指示式仪表的指针回转中心与刻度盘中心有偏心,测量机构中有齿轮传动,引起的误差都是正弦周期误差。

(3) 复杂系统误差——误差的变化规律比较复杂。如刻度分划不规则引起的示值误差。

##### 2. 系统误差对测量结果的影响及消除

定值系统误差只影响一系列重复测得值的算术平均值,对残余误差和标准偏差没有影响。而变值系统误差对它们都有影响,如果不将其从整个的误差数据中分离出去,仍按随机误差处理就会失去意义。由于系统误差往往大于随机误差,又不能用取平均值的方法减小系统误差,因而减小或消除系统误差很重要。系统误差的发现及消除的方法很多,这里不详细叙述,仅对消除系统误差的三条主要途径概括如下:

1) 消除产生系统误差的根源。如防止零位变动、对计量器具按时进行检测和修理等。

2) 在测量过程中消除系统误差。如用工具显微镜测螺距时,由于安装后螺纹的轴线与滑台纵向移动方向不平行,所测的螺距不等于沿螺纹轴线的实际螺距。为消除安装误差的影响,可分别测牙型左右两侧的螺距,取其平均值作为螺距的实际尺寸。

3) 在测量结果中引入修正值,得到不包含该系统误差的测量结果。

#### 1.1.5 粗大误差

粗大误差会对测量结果产生明显的歪曲,因而必须从测量数据中加以消除。粗大误差的剔除应根据判断粗大误差的原则进行,凡超出随机误差分布范围的误差,就可视为粗大误差。判断粗大误差的准则有:拉依达准则、肖维勒准则、格拉布斯准则以及狄克逊准则等。

拉依达准则又称 $3\sigma$ 准则,主要适用于服从正态分布的误差和重复测量次数比较多的情况。其具体作法是:用测量列的数据,按式(1.5)算出标准偏差,然后用 $3\sigma$ 准则来检测所有的残余误差 $\nu_i$ 。若某一个 $|\nu_i| > 3\sigma$ ,则该残差判为粗大误差,其相应的测量值应从测量列中剔除。然后重新计算标准偏差,再将新算出的残差进行判断,直到剔除完所有粗大误差为止。

产生粗大误差的原因主要在于测量人员的主观方面,其次在于外界条件。在测量过程中,对于误读、误记或运算错误,应随时发现,随时剔除(或加以纠正)。如果外界条件突然变化,如产生冲击、振动,仪器示值突然变化,应当立即停止测量,并将有关测量结果剔除,直到外界条件恢复

正常或重新调整仪器以后,再进行测量。如果直到测量结束也没有充分理由确定哪一个测得值含有粗大误差,这时可用上述  $3\sigma$  准则来判别。

## 1.2 检测装置的基本特性

对于某一物体的特性,比如运动物体的速度,若知道了它的检测原理和检测方法,就可以选用检测装置对它进行检测。但这一检测装置得到的检测结果是否满足我们的要求呢?要想满意地回答这个问题,就要对检测装置的特性有一个了解。

检测装置的基本特性包括静态特性和动态特性。当被测量为恒定值或为缓变信号时,我们通常只考虑检测装置的静态性能。而当对快速变化的量进行测量时,就必须全面考虑检测装置的动态特性和静态特性。只有当其满足一定要求时,我们才能从检测装置的输出中正确分析、判断其输入的变化,从而实现不失真测试。

### 1.2.1 线性系统及其主要性质

检测装置的特性是指检测装置对其输入量的影响。数学模型就是系统的输出与输入关系的数学描述。在动态条件下得到的数学模型是微分方程,它可以通过理论分析与试验方法相结合而得到。

理想的检测系统应当是线性系统,因为在动态测试中作非线性校正相当困难,而且只有对线性系统才能作比较完善的数学处理和分析。严格地说,一切物理系统都是非线性系统,但为了研究方便起见,常常在一定的工作范围内,略去那些影响较小的非线性因素所引起的误差,在工程上允许时,这一系统就可以作为线性系统来处理。

线性系统的输入  $x(t)$  和输出  $y(t)$  之间的关系可用下列微分方程来描述

$$\begin{aligned} a_n \frac{d^n y(t)}{dt^n} + a_{n-1} \frac{d^{n-1} y(t)}{dt^{n-1}} + \cdots + a_1 \frac{dy(t)}{dt} + a_0 y(t) \\ = b_m \frac{d^m x(t)}{dt^m} + b_{m-1} \frac{d^{m-1} x(t)}{dt^{m-1}} + \cdots + b_1 \frac{dx(t)}{dt} + b_0 x(t) \end{aligned} \quad (1.8)$$

式中,若  $a_n, a_{n-1}, \cdots, a_1, a_0$  和  $b_m, b_{m-1}, \cdots, b_1, b_0$  均由系统物理参数所决定而与时间无关,则该方程所描述的系统称作常系数线性系统,也称为时不变线性系统。这种系统具有下面两个重要性质。

#### 1. 叠加性

指同时作用在系统上的几个输入所引起的输出,等于各个输入单独作用于系统上所引起的各个输出之和,即

$$\begin{aligned} \text{若} \quad & x_1(t) \rightarrow y_1(t), \quad x_2(t) \rightarrow y_2(t) \\ \text{则} \quad & [x_1(t) + x_2(t)] \rightarrow [y_1(t) + y_2(t)] \end{aligned}$$

#### 2. 频率保持性

若对常系数线性系统输入某一频率的信号  $x(t)$ , 则其稳态输出  $y(t)$  的幅值和相位与输入可能不同,但其频率将与输入信号的频率完全相同。如输入  $x(t) = \sin \omega t$ , 则输出

$$y(t) = A \sin(\omega t + \varphi)。$$

这就是频率保持性。频率保持性是线性系统的一个很重要的特性,用实验的方法研究系统的响应特性就是基于这个性质。根据线性时不变系统的频率保持性,如果系统的输入为一个已知频率的正弦信号,其输出却包含有其它频率成分,那么可以断定,这些其它频率成分决不是输入引起的。它们或是由外界干扰引起的,或是由系统内部噪声引起的,或是输入太大使系统进入非线性区,或是系统中有明显的非线性环节。

### 1.2.2 检测系统的静态特性

如果系统的输入和输出都是不随时间变化的常量或变化十分缓慢,在所观察的时间间隔内可忽略其变化而视作常量的量,则式(1.8)中微分项均为零,从而得

$$y = \frac{b_0}{a_0} x = Kx \quad (1.9)$$

理想的静态量测试系统其输出应单调、线性比例于输入,即上式中斜率  $K$  是常数。

描述测试系统静态特性的主要参数有灵敏度、线性度、回程误差等。

#### 1. 灵敏度

灵敏度为检测装置的输出量与输入量的变化之比,即

$$S = \frac{\Delta y}{\Delta x} \quad (1.10)$$

对特性成线性关系的系统,如图 1.5a 所示,其灵敏度为常量,即

$$S = \frac{\Delta y}{\Delta x} = \frac{y}{x} = \frac{b_0}{a_0} = \text{常量}$$

对于特性成非线性关系的系统,如图 1.5b 所示,其灵敏度为系统特性曲线的斜率,即

$$S = \frac{dy}{dx}$$

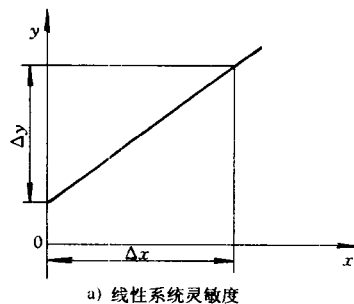
若检测装置的输出与输入为同量纲量,其灵敏度就是无量纲量,常称为“放大倍数”。

在选择检测装置的灵敏度时,应当注意合理性。一般来讲,灵敏度以高为好。但是当灵敏度增大时,测试量程就变小,稳定性变差。

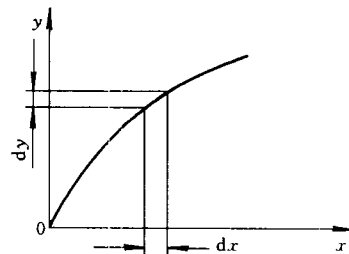
#### 2. 线性度

在静态测量中,检测装置的输出与输入之间的关系曲线称为定标曲线(亦称输入输出特性曲线),通常用实验的方法求取。理想的测试系统(线性系统)的定标曲线是直线,实际测试系统是很难做到的。一般测试系统的定标曲线是一条具有特定形状的曲线。

定标曲线与理想直线的偏离程度称为线性度。作为技术指标,如图 1.6 所示,采用定标曲线 2 和它的拟合直线 1 间的最大偏差  $B$  与测试系统标称全量程输出范围  $A$  之比的百分数来表示,即



a) 线性系统灵敏度



b) 非线性系统灵敏度

图 1.5 灵敏度的定义

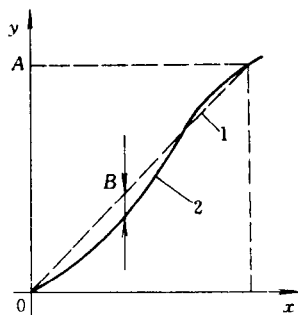


图 1.6 定标曲线与线性度

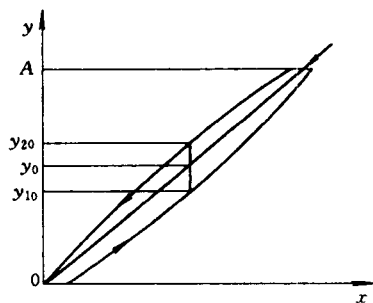


图 1.7 回程误差

$$\text{线性度} = \frac{B}{A} \times 100\% \quad (1.11)$$

由于线性度是以所参考的拟合直线为基准得到的,因此,拟合直线不同时,线性度的数值也不同。常用的确定拟合直线的方法有以下两种。

1) 最小二乘法 拟合直线通过坐标原点,使它与定标曲线输出量偏差的平方和为最小。这一方法比较精确,但计算复杂。

2) 两点连线法 在测得的定标曲线上,把通过零点和全量程输出点的连线作为拟合直线,如图 1.6 所示。此方法简单但不精确。

### 3. 回程误差

回程误差也称滞后误差。理想测试系统的输出、输入有完全单调的一一对应关系。而实际测试系统有时会出现同一个输入量却对应有几个不同的输出量的情况。在同样的测量条件下,在全量程范围内,当输入量由小增大再由大减小时,对于同一个输入量所得到的两个数值不同的输出量的最大差值与全量程输出量的比值的百分数为回程误差,如图 1.7 所示,即

$$\text{回程误差} = \frac{\Delta y_{\max}}{A} \times 100\% = \frac{y_{20} - y_{10}}{A} \times 100\% \quad (1.12)$$

产生回程误差的原因可归纳为系统内部各种类型的摩擦、间隙以及某些机械材料和电气材料的滞后特性。

## 1.2.3 检测系统的动态特性

动态测量中当输入量变化时,人们观察到的输出量的变化,不仅受研究对象动态特性的影响,同时也受到测试系统动态特性的影响。即当一个输入量经过测试系统的“传递”后,由于受测试系统本身特性的影响,使通过它的输入量在输出时原状态产生了变化。测试系统对输入量的影响不是一个定值,而是一个自变量为输入频率的函数。

动态测试时,输入和输出都随时间变化,式(1.8)中各阶微分就不都等于零。因此要了解系统对输入的动态响应,就要对系统的微分方程求解,这显然是比较困难的。利用数学中的拉普拉斯变换(关于拉普拉斯变换可参阅有关文献)可把实数域中复杂的微分方程变换为复数域中简单的代数方程而求解。因此,为了工程上的需要,常用通过拉氏变换建立的传递函数来表示线性系