

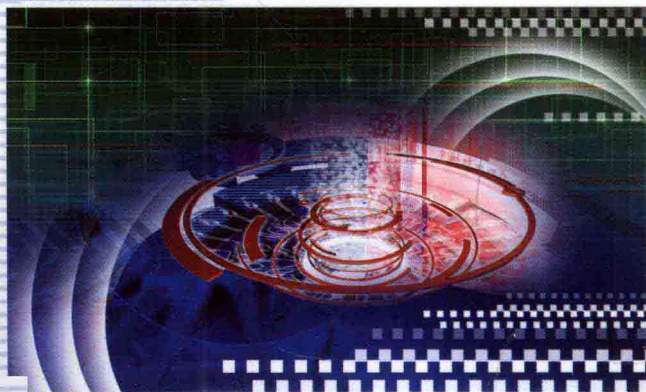


面向“十二五”高等教育课程改革项目研究成果

自动检测技术

ZIDONG JIANCE JISHU

◎ 主 编 王振成 刘爱荣



面向“十二五”高等教育课程改革项目研究成果

自动检测技术

主 编 王振成 刘爱荣

副主编 张文敏 雷立英 狄恩仓

郑 路 凡广生

 **北京理工大学出版社**
BEIJING INSTITUTE OF TECHNOLOGY PRESS

内 容 简 介

本书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。基础理论部分介绍了检测方法、检测误差、数据处理、常用传感器的分类等基础知识。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。每章有学习目的、小结和思考题与习题,全书最后的附录及实验指导,可供各专业根据各自的教学要求选择组织实训。

根据高等院校教育的特点,本书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。

本书适用于高等院校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。

版权专有 侵权必究

图书在版编目(CIP)数据

自动检测技术/王振成,刘爱荣主编. —北京:北京理工大学出版社,2010. 12
ISBN 978-7-5640-3867-0

I. ①自… II. ①王…②刘… III. ①自动检测-高等学校-教材 IV. ①TP274

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2010)第 190970 号

出版发行 / 北京理工大学出版社

社 址 / 北京市海淀区中关村南大街 5 号

邮 编 / 100081

电 话 / (010)68914775(总编室) 68944990(批销中心) 68911084(读者服务部)

网 址 / <http://www.bitpress.com.cn>

经 销 / 全国各地新华书店

印 刷 / 北京飞达印刷有限责任公司

开 本 / 710 毫米×1000 毫米 1/16

印 张 / 14.25

字 数 / 276 千字

版 次 / 2010 年 12 月第 1 版 2010 年 12 月第 1 次印刷 责任编辑 廖宏欢

印 数 / 1~1 500 册 责任校对 王 丹

定 价 / 32.00 元 责任印制 边心超

图书出现印装质量问题,本社负责调换

前 言

随着自动化技术和信息技术的发展,传感器技术在现代技术中占据越来越重要的位置,应用领域日趋扩大。自动检测技术课程系统、全面地讲述了各种传感器的原理和应用技术、非电量的检测与转换方法方面的知识。工科类专业学习和熟练掌握这些基本内容,将有助于学习后续专业课程。

本书从高等院校学生学习特点和岗位需要出发,教材内容的选择及体系和构造符合应用型教学的需要,力求简洁实用、图文并茂、通俗易懂,以达到举一反三、融会贯通的目的,体现教学特色。在编写安排上力争做到由浅入深、循序渐进,所编写内容注重实用性和可操作性,理论分析以适度、够用为限,突出重点,分散难点。

本书对传感器转换器件做了较详尽的叙述,内容包括检测技术基础知识、各非电量如温度的测量、压力与液位测量、流体的测量、位移的测量、转速的测量、湿度的测量、气体的测量、传感器系统综合应用等,共涉及十多种传感器。

全书共分九章,第一章为基础理论部分,讲述检测技术基本知识、传感器特性、有关测试信号的描述等。第二章和第九章为应用部分,分别介绍了应变、力、力矩、位移、振动、速度、转速、流量、温度、湿度、噪声等参量的检测原理和检测方法,相应的传感器的原理及测量电路,并介绍了无损探伤技术、计算机辅助测试等先进检测技术,本书的最后附有热电偶计算所用数据表及附录(关于单位制的知识)。

本书由中州大学王振成、刘爱荣担任主编。参加编写的有王振成(绪论、第一章、附表);刘爱荣(第七章、附录1);雷立英(第五章第五节、附录2);张文敏(第二章、第三章);狄恩仓(第六章、第九章);郑路(第五章的前四节);凡广生(第四章、第八章)。由王振成和刘爱荣共同负责统稿。

高等教育在新时期具有新的教学模式和特色,其完善是一个长期和艰苦的过程,目前,许多院校都在进行这方面的探索。如果我们的努力能为这项教学改革尽到微薄之力,这将是我们的最大心愿。由于水平有限,书中难免有不妥之处,恳请专家和读者提出批评指正。

编 者

目 录

绪论	1
第一章 自动检测技术的基本知识	5
1.1 测量的基本概念及方法	5
1.1.1 测量的基本概念	5
1.1.2 测量方法	6
1.2 测量误差及其分类	7
1.2.1 误差的表达方式	7
1.2.2 测量误差的分类	8
1.2.3 测记仪表的精确度与分辨率	9
1.3 测量结果的数据分析及其处理	11
1.3.1 测量结果的数据分析	11
1.3.2 测量结果的数据处理	13
1.3.3 测量系统静态误差的合成	15
1.4 传感器及其基本特性	16
1.4.1 传感器的定义及组成	16
1.4.2 传感器的分类	17
1.4.3 传感器的基本特性	18
1.5 传感器中的弹性敏感元件	22
1.5.1 弹性敏感元件的基本特性	22
1.5.2 弹性敏感元件的形式及应用范围	24
思考题与习题	27
第二章 应变和力的测试	28
2.1 应变的测试	28
2.1.1 应变片的工作原理	28
2.1.2 应变片的类型	29
2.2 测量电路——电桥	30
2.2.1 直流电桥	30
2.2.2 交流电桥	32

2.3 应变片的选择与粘贴	32
2.3.1 应变片的选择	32
2.3.2 应变片的粘贴	33
2.3.3 试件上的布片与接桥	34
2.3.4 提高应变测试精度的措施	35
思考题与习题	37
第三章 位移的测量	38
3.1 概述	38
3.2 位移—数字式传感器	39
3.2.1 光栅式位移传感器工作原理	39
3.2.2 光栅式位移传感器计算公式	39
3.3 常用位移传感器测量电路	40
3.3.1 电感式传感器	40
3.3.2 涡流式传感器	48
3.3.3 电容式传感器	51
3.4 数字式位移传感器	58
3.4.1 直接测量和间接测量	59
3.4.2 增量式和绝对式测量	60
3.5 物位的检测	60
3.5.1 物位的检测方法	61
3.5.2 利用液体的浮力检测	61
3.5.3 利用液位引起的压力(压差)检测	62
3.5.4 利用超声波反射检测	63
3.5.5 利用射线被物体的吸收检测	64
3.5.6 利用振动频率变化检测	65
3.5.7 利用重力平衡检测料位	65
3.5.8 物位测量仪表的选用	66
思考题与习题	67
第四章 速度的检测	69
4.1 运动速度的测量	69
4.1.1 激光多普勒测速	69
4.1.2 相关法测速	70
4.2 转速的测量	71
4.2.1 机械式转速计	71
4.2.2 闪光测转速法	72
4.2.3 数字式转速测量系统	73

思考题与习题	81
第五章 机械振动的检测	82
5.1 概述	82
5.2 机械振动的类型	83
5.2.1 振动的类型及其表征参数	83
5.2.2 单自由度系统的受迫振动	87
5.2.3 由基础运动所引起的受迫振动	89
5.2.4 多自由度系统的振动	91
5.2.5 振动计量器具检定系统	92
5.2.6 振动测量仪器的检定	95
5.3 振动的激励和激振器	97
5.3.1 振动的激励	97
5.3.2 激振器	101
5.4 测振传感器	104
5.4.1 惯性式测振传感器的力学模型与特性分析	105
5.4.2 压电式加速度传感器及阻抗头	108
5.4.3 磁电式速度传感器	118
5.4.4 电涡流测振传感器	120
5.4.5 光导纤维测振传感器	122
5.5 振动的测量	123
5.5.1 振动量的测量	123
5.5.2 固有频率和阻尼的测量	125
5.5.3 机械阻抗的测量	129
思考题与习题	134
第六章 流量的测量	136
6.1 概述	136
6.1.1 流量的概念	136
6.1.2 流量计的分类	137
6.1.3 流量计的类型	137
6.2 总量测量仪表	138
6.2.1 椭圆齿轮流量计	138
6.2.2 容积式流量计的误差	139
6.3 流体阻力式流量计	141
6.3.1 转子流量计的测量原理	141
6.3.2 转子流量计的特性	143
6.4 测速式流量计	144

6.4.1 涡轮流量计	144
6.4.2 超声波流量计	145
思考题与习题	147
第七章 温度的检测	148
7.1 温度测量的基本概念	148
7.1.1 温度的基本概念	149
7.1.2 温标	149
7.1.3 温度测量及传感器分类	150
7.2 热电偶传感器的工作原理	151
7.2.1 热电效应	151
7.2.2 中间导体定律	153
7.3 热电偶的种类及结构	153
7.3.1 热电极材料和通用热电偶	153
7.3.2 热电偶的结构形式	155
7.4 热电偶冷端的延长	157
7.5 热电偶的冷端温度补偿	159
7.5.1 冷端恒温法	159
7.5.2 计算修正法	160
7.5.3 仪表机械零点调整法	160
7.5.4 电桥补偿法	160
7.6 热电偶的应用及配套仪表	161
7.6.1 与热电偶配套的仪表	161
7.6.2 热电偶的应用	163
思考题与习题	165
第八章 湿度与噪声的检测及无损探伤技术	168
8.1 湿敏电阻传感器	168
8.1.1 大气湿度与露点	168
8.1.2 测量湿度的传感器	169
8.2 噪声的测量	171
8.2.1 噪声的物理度量	172
8.2.2 噪声的主观评价	173
8.2.3 噪声测试仪器——声级计	176
8.2.4 噪声测试方法	177
8.3 无损检测技术	181
8.3.1 无损检测方法	181
8.3.2 无损检测的应用实例	184

思考题与习题	185
第九章 计算机辅助检测系统	186
9.1 带计算机的检测系统简介	186
9.1.1 带计算机的检测系统的特点及功能	186
9.1.2 带计算机的检测系统的工作流程	187
9.1.3 系统中的几种重要部件	188
9.1.4 可编程序控制器中的传感器接口板	192
9.2 带计算机的检测技术应用实例	193
9.2.1 陶瓷隧道窑温度、压力监测控制系统	193
9.2.2 智能化流量积算仪	195
9.2.3 传感器在模糊控制洗衣机中的应用	196
思考题与习题	198
附表 1	201
附表 2	202
附表 3	203
附表 4	204
附录 1	205
附录 2	207
参考文献	217

绪 论

检测包含检查和测量两方面,是将生产、科研、生活等方面的相关信息通过选择合适的检测方法与装置进行分析或定量计算,以发现事物的规律性。在自动化系统中,首先需要通过检测获取生产流程中的各种有关信息,然后对它们进行分析、判断,以便进行自动控制。

1. 检测技术

检测技术是以研究自动检测系统中的信息提取、信息转换及信息处理的理论和技术为主要内容的一门应用技术学科。广义上说,检测技术是自动化技术的四个支柱之一,检测技术的任务是寻找与自然信息具有对应关系的各种表现形式的信号,以及确定的定性、定量关系;从反映某一信息的多种信号中挑选出在所处条件下最为合适的表现形式,及寻求最佳的采集、变换、处理、传输、存储、显示的方法和相应的设备。

信息采集是指从自然界诸多被检查与测量量(物理量、化学量、生物量与社会量等)中提取所需要的信息。

信息变换是将所提取出的有用信息向电量、幅值、功率等形式转换。

信息处理的任务是根据输出环节的需要,将变换后的电信号进行数字运算(求均值、极值和误差范围等)以及模拟量、数字量变换等处理。

信息传输的任务是在排除干扰的情况下经济地、准确无误地把信息进行远、近距离的传递。

虽然检测技术服务的领域非常广泛,但是从这门课程的研究内容来看,涵盖有传感器技术、误差理论、测试计量技术、抗干扰技术以及电量间互相转换的技术等。提高自动检测系统的检测分辨率、精度、稳定性和可靠性是本门学科的主要研究方向。

2. 自动检测系统的组成

自动检测系统是自动测量、自动计量、自动保护、自动诊断、信号自动输出与反馈等诸系统的总称,其原理框图如图 0-1 所示。对具体检测系统或传感器而言,必须将框图中的各项内容赋予具体的内容。

传感器是指一个能将被测的非电量转换成电量的敏感器件,是连接被测对象和检测系统的接口。它提供给系统赖以进行处理和决策所必需的原始信息,是现代自动控制技术的起点,在很大程度上决定了系统的功能,属于关键性器件。

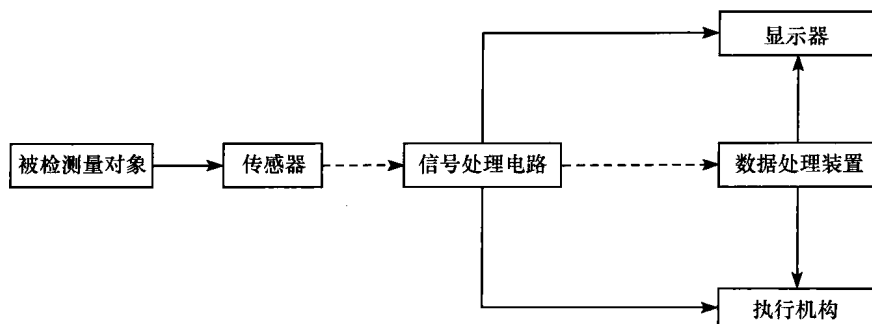


图 0-1 自动检测系统框图

信息处理电路的作用是把传感器输出的电量变成具有一定驱动和传输能力的信号(如电压、电流、频率等),以推动后级的数据处理装置、显示器及执行机构。

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来表示读数的,常见的有毫伏表、微安表、模拟光柱等。

数字显示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、耐振动、可适应较宽的温度范围;后者耗电低、集成度高。目前还研制出了带背光板的 LCD,便于在夜间观看 LCD 显示的内容。

图像显示是用 CRT 或点阵式的 LCD 来显示读数或被测参数的变化曲线,有时还可以用图表或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检测对象的动态变化过程,常用的记录有笔式记录仪、高速打印机、绘图仪、数字存储示波器、磁带记录仪等。

数据处理装置是用来对测试所得的实验数据进行处理、运算、分析,对动态测试结果做频谱分析(幅值谱分析、功率谱分析)、相关分析等,完成这些任务必须采用计算机技术。

数据处理的结果通常送到显示器和执行机构中去,以显示运算处理的各种数据或控制各种被控对象。在不带数据处理装置的自动检测系统中,显示器和执行机构由信号处理电路直接驱动,如图 0-1 中的虚线所示。

执行机构通常是指各种接触器、电磁铁、电磁阀门、电磁调节阀、伺服电动机等,它们在电路中是起通断、控制、调节、保护等作用的电器设备。许多检测系统能输出与被测量有关的电流或电压信号,作为自动控制系统的控制信号,去驱动这些执行机构。

3. 检测技术的作用

人类对客观世界的认识和改造总是以检测工作作为基础的。人类早期在从事生产活动时,就已经对长度(距离)、面积、时间和质量进行测量,其最初的计量单位或是与自身生理特点相联系(如长度)、或是与自然环境(如时间)相联系。

工程技术中的研究对象往往十分复杂,有些实际问题必须依靠实验研究来解

决,而通过检测工作积累原始数据是工程设计和研究中的一项十分艰巨、也是十分重要的工作。

随着社会的进步和发展,自动检测技术已成为一些发达国家的最重要的热门技术之一,它可以给人们带来巨大的经济效益,并促进科学技术飞跃发展,因此在国民经济中占有极其重要的地位和作用。

在实际工业生产中,检测技术的内容涉及极为广泛,如表 0-1 所示。

表 0-1 工业检测技术的内容

被测量类型	被测量量	被测量类型	被测量量
热工量	温度、热量、比热容、热流、热分布、压力(压强)、压差、真空度、流量、流速、物位、液位、界面	物体的性质和成分量	气体、液体、固体的化学成分、浓度、黏度、湿度、密度、酸碱度、浊度、透明度、颜色
机械量	直线位移、角位移、速度、加速度、转速、应力、应变、力矩、振动、噪声、质量(重量)	状态量	机械的运动状态(启停等)、设备的异常状态(超温、过载、泄漏、变形、磨损、堵塞、断裂等)
几何量	长度、厚度、角度、直径、间距、形状、平行度、同轴度、粗糙度、硬度、材料缺陷	电工量	电压、电流、功率、电阻、阻抗、频率、脉宽、相位、波形、频谱、磁场强度、电场强度、材料的磁性能

在国防科研中,检测技术更为重要,用得更多,而且许多检测技术都是因国防科研需要而发展起来的。甚至在日常生活中,也离不开检测技术。如家庭煤气泄漏自动报警装置、空气温度的检测装置等。自动检测技术渗透各行各业,方方面面,也可以说检测技术直接影响着人类文明发展和进步。

4. 检测技术的发展趋势

检测技术所涉及的知识非常广泛,渗透各个学科领域。由于科学和技术的发展,自动化程度越来越高,因而对自动检测系统的要求越来越高,促使自动检测系统的研究向着研制“在线”检测和控制,检测系统小型化、一体化及智能化,以及研究故障检测系统的方向发展。当前,检测技术的发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、可靠性、稳定性、抗干扰性及使用寿命。近年来,随着科学技术的不断发展,要求测量精度、可靠性和稳定性等尽可能的高。例如超精度的“在线”检测精度要求小于 $0.1\ \mu\text{m}$ 。对传感器可靠性、故障率的数学模型和计算方法的研究,大大提高检测系统的可靠性。

为了使自动检测装置适应在各种复杂条件下可靠工作,要求研制的检测系统具有较高的抗干扰能力和适应生产要求的较长的使用寿命。

2) 发展小型化、集成化、多功能化、多维化、智能化和高性能、扩大量程范围的检测装置。随着半导体材料的研究和新工艺的进展,已研制出了一批新型半导体传感器;光刻、扩散及各向异性腐蚀等集成电路新工艺也已渗透至传感器的制造过程中,从而使检测系统更趋于小型化、集成化、多维化、多功能化及性能更强。同时若将传感器、放大器、温度补偿电路等集成于同一芯片上,构成“材料—器件—电

路—系统”一体化,将进一步增加检测系统的抗干扰能力。

自微处理器问世及迅速应用以来,测量系统、控制技术、显示和记录装置也在向数字化、智能化方向发展,使得自动检测技术须具有精确检测及数据处理等功能,以提高测量精度和可靠性,从而扩展检测功能。

另外,检测系统趋于多维化,对于测量信息的采集不是局限于某一点,而是能在较宽范围内立体获得信息且具有较高的空间分辨率,即从“计量”向状态识别靠近。

3) 应用新技术和新的物理效应,扩大检测领域的应用。检测原理大多以各种物理效应为基础。近代物理学的进展,对仿生学的研究,仿造生物的感觉功能的新型传感器的开发应用,使得检测技术的应用领域更广阔。如今的检测领域正向着整个社会需要各方面的扩展,不仅用于工业部门,而且涉及工程、海洋开发、宇宙航行等尖端科学技术和新兴工业领域,如生物、医疗、环境污染监测、危险品和毒品的侦察、安全监测等方面,同时也已渗入人类的日常生活之中等。

4) 网络化传感器及检测系统逐步发展。在“信息时代”社会里,本着资源共享的原则,信息网络化蓬勃发展。为了能随时随地浏览和控制现场工况,要求传感器及检测系统具有能符合某种协议格式的信息采集及传输的功能。即通过局域网、互联网等实现异地的数据交换和共享,从而实现远程调试、远程故障诊断、远程数据采集和实时操作,构成网络化的检测系统。

总之,检测技术的不断发展是为了适应国民经济发展的需求,取得的进展十分引人瞩目,今后将有更辉煌的飞跃。

5. 本课程的任务和学习要求

本课程的任务是:在阐述测量基本原理的基础上,分析各种传感器如何将非电量转换为电量,并对相应的测量转换电路、信号处理电路及在各领域中的应用作一介绍,同时也适当的介绍误差处理、弹性元件、抗干扰技术、信号的处理与变换及自动检测技术的综合应用等知识。目的是使学生掌握各类传感器的基本理论、工作原理、转换电路、主要性能和特点以及自动检测技术的相关知识,从而使学生能合理地选择、使用传感器,了解传感器的发展动向和运用检测技术的相关知识解决各领域中的实际问题等。

由于涉及机、电、光、热等多方面知识,学科面广,需要有较广泛的基础和专业知识,学习本课程之前应有所准备。学习中要把握全书中重点和各章重点,弄懂基本概念,做到理论联系实际,富于联想、善于借鉴,重视实验和实训,这样才能学得活、学得好,才有利于提高今后解决实际问题的能力。

第一章

自动检测技术的基本知识

通过本章的学习,你将能够:

1. 了解测量的基本概念与方法;
2. 掌握测量误差的分类及测量结果的处理方法;
3. 了解传感器的基本特性;
4. 了解传感器常用的弹性元件的形式与应用范围。

检测技术的主要组成部分之一是测量,人们采用测量手段来获取所研究对象在数量上的信息,从而通过测量所得到的是定量的结果。现代社会要求测量必须达到高准确度、误差极小、速度更快、可靠性强等。为此要求测量的方法精益求精。本章主要介绍测量的基本概念,测量方法,误差定义及表示方法,误差分类及处理,测量仪表精确度与分辨率,测量结果的数据统计与处理,传感器的定义、分类、静特性及技术指标和传感器中的弹性敏感元件等内容。这些内容是学习后面章节的基本知识。

1.1 测量的基本概念及方法

1.1.1 测量的基本概念

测量是借助专用的技术和设备,通过实验和计算等方法取得被测对象的某个量的大小和符号;或者取得一个变量与另一个变量之间的关系,如变化曲线等,从而掌握被测对象的特性、规律或控制某一过程等。

测量是获取被测对象量值的唯一手段。它是将被测量与同性质的标准量通过专用的技术和设备进行比较,获得被测量对比标准量的倍数。“标准量”是由国际上或国家计量部门所指定的,其特性是足够稳定的。

测量结果一般表示为:

$$X = AX_0 \quad (1-1)$$

式中, X ——被测量;

X_0 ——标准量;

A ——比值。

可见,比值 A 的大小取决于标准量 X_0 的单位大小。因此在表示测量结果时,

必须包含两个要素：一个是比值大小及符号(正或负)；另一个是说明比值 A 所采用的单位，不注明单位，测量结果失去实际意义。

1.1.2 测量方法

测量的方法多种多样，就测量方法而言，测量分为直接测量和间接测量。如用电压表、电流表等测量属于直接测量。它们的共同点是用一块分度(标定)好的仪表盘对被测量进行直接测量，从表盘上直接读出被测数值；若直接测量不方便，或直接测量的仪表不够精确，就利用被测量与某中间量间的函数关系，先测出中间量，然后通过相应的函数关系计算出被测量的数值，此法称之为间接测量。如伏安法测量电阻的阻值。

根据测量结果的显示方式，测量分为模拟量测量和数字量测量。如用示波器测量交流电压属模拟量测量。

按被测量是否随时间变化，测量分为静态测量和动态测量。如在磨削加工中使用无杠杆传动的电触式传感器进行圆工件检测就是动态测量。

根据测量时是否与被测量对象接触，测量分为接触式测量和非接触式测量。

从不同角度考察，测量方法有不同的分类，但常用的具体测量方法有零位法、偏差法和微差法等。

零位法是指被测量与已知标准量进行比较，使这两种量对仪器的作用抵消为零(指机构达到平衡)，从而可以肯定被测量就等于已知标准量。如天平测量质量就是零位法的典型例子。天平的砝码就是已知标准量。零位法的测量误差显然主要来自标准量的误差和比较仪器的误差。此法的误差很小，因此零位法的测量精度较高，但平衡复杂。多用于静态信号或缓慢信号的测量。

偏差法是指测量仪表用指针相对于表盘上分度线的位移来直接表示被测量大小。如用弹簧秤测物体的质量是直接从指针偏移的大小来表示被测量。在这种测量方法中，必须事先用标准量具对仪表分度进行校正。该方法由于表盘上分度的精确度不易做的很高，测量精度一般不高。但测量过程简单、迅速、比较通用。

微差法是零位法和偏差法的组合。先将被测量与一个已知标准量进行比较，

使该标准量尽量接近被测量，这相当于不彻底的零位法。而不足部分即被测量与该标准量之差，再用偏差法测量。例如图 1-1 的长度测量中标准长度 L_B 与被测量 L_x 进行比较后的差值 ΔL 用偏差法测出，则所得被测物体长度 $L_x = L_B + \Delta L$ 。

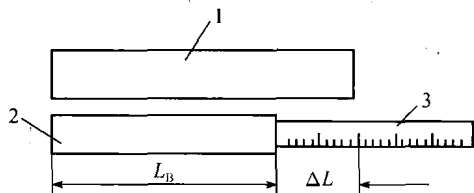


图 1-1 微差法测量示意图

1—被测量物体；2—标准长度；3—测量尺

在测量中，即使测得的差值 ΔL 精度不高，但因其值较小，其误差对总的误差

影响较小。另外微差法不必进行反复的平衡操作。因而微差法是综合了偏差法速度快和零位法测量精度高的优点而提出的测量方法,在工程测量中广泛使用。

1.2 测量误差及其分类

测量的目的是对被测量求取真值。所谓真值是指某被测量在一定条件下其本身客观存在的真实的实际值。但由于实验方法和实验设备的不完善、周围环境的影响及人们认识能力所限等,测量和实验所得的数据和被测量的真值间不可避免地存在着差异,在数值上即表现为误差。这种测量值与真值之间的差值称为测量误差。

测量误差可用绝对误差表示,也可用相对和引用误差表示。

1.2.1 误差的表达方式

(1) 绝对误差 某量值的测量值 A_x 与真值 A_0 之间的差为绝对误差 Δ ,即

$$\Delta = A_x - A_0 \quad (1-2)$$

由式(1-2)可知,绝对误差可能为正值或负值。

(2) 相对误差 绝对误差 Δ 与被测量的真值 A_0 之比称为相对误差 γ ,用百分比形式表示。即

$$\gamma = \frac{\Delta}{A_0} \times 100\% \quad (1-3)$$

对于相同的被测量,绝对误差可以评定其测量精度的高低,但对于不同的被测量及不同的物理量,绝对误差就难以评定其测量精度的高低,而采用相对误差来评定较为确切。

例如,对 $L_1 = 100 \text{ mm}$ 的尺寸两次测量,其测量误差分别为 $\Delta_1 = 10 \text{ mm}$, $\Delta_2 = 8 \text{ mm}$,显然后者测量精度高,但若对 $L_2 = 80 \text{ mm}$ 的尺寸测量,测量误差为 $\Delta_3 = 7 \text{ mm}$,此时用绝对误差就难以评定与前两次精度的高低,必须用相对误差来评定。

因测量值与真值相近,故也可近似用绝对误差与测量值之比作为相对误差,此误差也称示值相对误差。即

$$\gamma_x = \frac{\Delta}{A_x} = 100\% \quad (1-4)$$

由于绝对误差可能为正值或负值,因此相对误差也可能为正值或负值。

(3) 引用误差 相对误差可用来比较两种测量结果的准确程度,但不能用来衡量不同测量仪器或仪表的质量。因为同一测量设备在整个测量范围内的相对测量误差不是定值,随着被测量的减小,相对误差也增大。当被测量接近于量程的起

始零点时,相对误差趋于无限大。为了合理地评价仪表的测量质量引入了引用误差。所谓引用误差 γ_m 是指被测量的绝对误差 Δ 与测量仪表的上限(满度或称量程)值 A_m 的百分比之值,即

$$\gamma_m = \frac{\Delta}{A_m} \times 100\% \quad (1-5)$$

1.2.2 测量误差的分类

误差产生的原因和类型很多,其表现形式也多种多样,根据造成误差的不同原因,有不同的分类方法。

1. 按误差的特点与性质划分

误差可分为系统误差、随机误差(也称偶然误差)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,标准量值的不准确、仪器仪表盘分度的不准确而引起的误差。系统误差按其表现规律分为:不变系统误差和变化系统误差。不变系统误差是指误差绝对值和符号为固定的系统误差。如由于分度盘分度差错或分度盘移动而使仪表分度产生误差。变化系统误差是指误差绝对值和符号为变化的系统误差。如电子元器件老化、机械零件变形移位、电源电压波动等产生的误差。

系统误差是有规律可循的,因此可通过实验的方法或引入修正值的方法予以修正,也可通过对测量设备的重新调整来消除。

(2) 随机误差 在同一条件下,多次测量同一量值时,绝对值和符号以不可预定方式变化着的误差称为随机误差。例如,仪器仪表中传动部件的间隙和摩擦、连接件的弹性变形等引起的示值不稳定。随机误差的出现,就每次测量误差的个体而言是没有规律的,不可预计它的大小和符号,但在多次重复测量时,测量结果的总体是遵从于统计规律,因而可从理论上计算出它对测量结果的影响,即随着测量次数 n 的增加,随机误差 δ_i 的算术平均值 $\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \delta_i$ 将逐渐变小,测量精度将提高。随机误差不能用实验的办法消除。

(3) 粗大误差 超出在规定条件下预期的误差称为粗大误差,也称过失误差。此误差值较大,明显歪曲测量结果,如测量时标错了标志、读错或记错了数、使用有缺陷的仪器及在测量时因操作不细心而引起的过失性误差等。当发现粗大误差时,应予以剔除。

2. 按测量变化速度划分

误差可分为静态误差和动态误差。

(1) 静态误差 被测量稳定不变时所产生的误差称为静态误差。前面讨论的误差多属于静态误差。