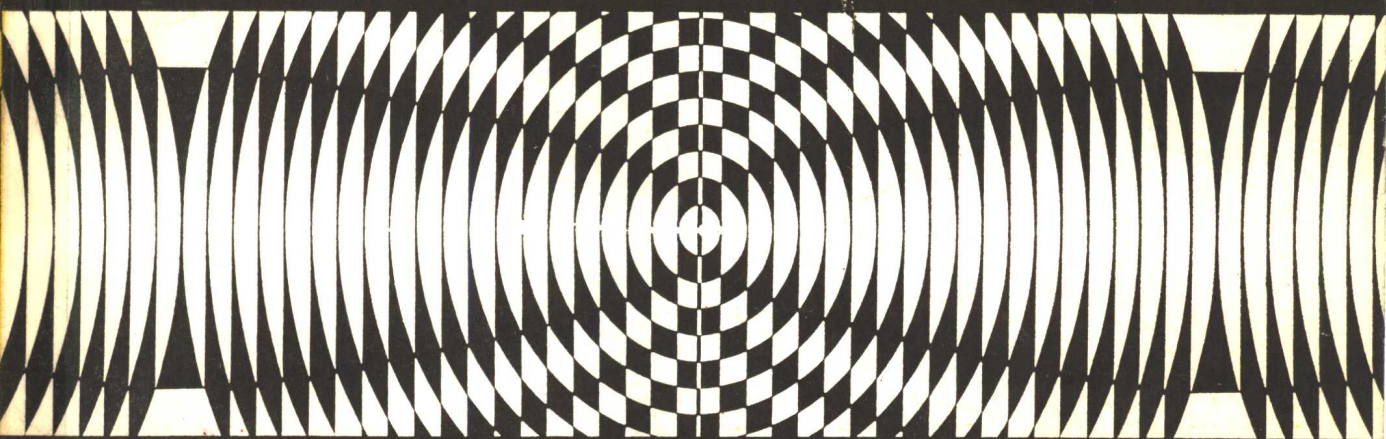


CHUANGANQIYUANLIYUYINGYONG

张正伟 主编



中央广播电视大学出版社

传感器原理与应用

传感器原理与应用

张正伟 主编

中央广播电视大学出版社

(京)新登字163号

传感器原理与应用

张正伟 主编

中央广播电视大学出版社出版

新华书店总店科技发行所发行

一二〇二工厂排版

开本787×1092 1/16 印张15.25 千字351

1991年10月第1版 1991年10月第1次印刷

印数 1—10000

定价: 5.85元

ISBN 7-304-00634-X/TN·12

前 言

本书是根据中央广播电视大学《传感器原理与应用》教学大纲编写的，授课36学时，其中电视授课27学时，面授9学时。

传感器的种类很多，关于它的原理、结构和使用等有关内容涉及的技术领域很广，渗透到各个学科。显然，短时间内系统而全面地介绍每种传感器是困难的。

本书的目的是使读者在传感技术方面具有较广的知识，了解工程检测中常用传感器的结构、原理、特性和应用；内容安排上着重物理概念的讲解，略去某些复杂公式的推导，力求做到重点突出、由浅入深，便于自学。

全书分八章共27节，每节的内容基本独立，各节附有小结、复习思考题和作业题。与本书配套的“《传感器原理与应用》学习指导和实验指导书”介绍了学习本课程的方法及每节的目的和要求。

本书由河北广播电视大学张正伟同志主编。绪论及第一、五、六、七、八章由张正伟编写，第二、三、四章由许广合编写。初稿经齐薇同志审阅，提了许多宝贵意见，在此表示感谢。

本书由吉林工业大学戴逸松教授、高福华副教授和俞知恩副教授主审，参加审稿的有牛福河副教授、李桂成副教授、杨今才副教授、王树勋副教授、齐薇等。

由于教材涉及的知识面广，而篇幅有限，疵漏在所难免，恳请专家和读者批评指正。

编 者

1991.2

目 录

绪论	(1)
一、传感技术的应用	(1)
二、传感器的分类	(2)
三、传感器的发展	(3)
四、本课程的任务和教学要求	(5)
第一章 传感器和测量的基本知识	(6)
§ 1-1 测量的基本概念	(6)
一、测量	(6)
二、测量方法	(6)
三、测量仪表的精确度与分辨率	(8)
§ 1-2 传感器的一般特性	(11)
一、传感器的静态特性	(11)
二、传感器的动态特性	(12)
§ 1-3 传感器中的弹性敏感元件	(14)
一、弹性元件的基本特性	(14)
二、弹性元件的形式及应用范围	(15)
第二章 电阻式传感器及应用	(22)
§ 2-1 热电阻	(22)
一、工作原理	(22)
二、热电阻材料及常用热电阻	(22)
三、普通工业用热电阻式传感器的简单结构	(25)
四、热电阻应用	(25)
§ 2-2 电位器	(30)
一、概述	(30)
二、线性线绕电位器的空载特性	(31)
三、电位器的负载特性	(33)
四、非线性线绕电位器	(33)
§ 2-3 电阻应变片	(35)
一、电阻应变片的结构和材料	(35)
二、电阻应变片的工作原理	(37)

三、电阻应变片的工作特性及参数	(39)
四、应变片的温度误差及补偿方法	(43)
五、电阻应变片桥路	(46)
六、电阻应变仪	(50)
七、应变式传感器	(51)
第三章 电感式传感器及应用	(58)
§ 3-1 自感式	(58)
一、变隙式电感传感器	(58)
二、螺线管式电感传感器	(58)
三、电感式传感器的应用与配用电路	(64)
§ 3-2 差动变压器式	(72)
一、变隙式差动变压器	(72)
二、螺线管式差动变压器	(75)
三、差动变压器的应用与配用电路	(83)
§ 3-3 电涡流式	(90)
一、电涡流式传感器的基本结构	(90)
二、电涡流式传感器的工作原理	(91)
三、电涡流的形成范围	(94)
四、被测体材料、形状和大小对传感器灵敏度的影响	(95)
五、电涡流式传感器的应用与配用电路	(97)
第四章 电容式传感器及应用	(102)
§ 4-1 电容式传感器的工作原理及结构形式	(102)
一、电容式传感器的工作原理	(102)
二、电容式传感器的结构型式	(102)
三、电容式传感器的特性	(103)
§ 4-2 电容式传感器的测量电路及应用	(111)
一、电容式传感器的特点	(111)
二、电容式传感器配用的测量电路	(112)
三、电容式传感器的应用	(116)
第五章 谐振式传感器及应用	(123)
§ 5-1 振弦式	(123)
一、结构和工作原理	(123)
二、激励方式	(124)
三、应用	(127)
§ 5-2 振筒式	(130)

一、结构	(130)
二、工作原理	(130)
三、振筒固有频率与被测压力的关系	(131)
四、应用	(132)
§ 5-3 振膜式	(134)
第六章 光传感器及应用	(137)
§ 6-1 真空光电器件	(137)
一、外光电效应	(137)
二、真空光电管	(138)
三、光电倍增管	(142)
§ 6-2 光敏元件	(147)
一、内光电效应	(147)
二、光敏电阻 (光导管)	(148)
三、光敏二极管 (光电二极管)	(150)
四、光敏三极管	(152)
五、光敏晶体管二级管和三级管的基本特性	(153)
六、应用	(155)
§ 6-3 计量光栅	(158)
一、莫尔条纹原理	(159)
二、光栅传感器的工作原理	(160)
三、辨向原理和细分技术	(161)
第七章 电势型传感器	(165)
§ 7-1 热电偶	(165)
一、热电偶的工作原理	(165)
二、热电极的材料及常用热电偶	(169)
三、热电偶的结构及冷端处理	(170)
四、热电偶的其它主要误差	(175)
§ 7-2 光电池	(179)
一、硒光电池	(179)
二、硅光电池	(180)
§ 7-3 压电石英晶体和压电陶瓷	(183)
一、石英晶体的压电效应	(183)
二、压电陶瓷的压电效应	(186)
三、压电元件的等效电路和电荷放大器	(187)
四、应用	(188)

§ 7-4 霍尔元件	(193)
一、霍尔效应	(193)
二、霍尔元件的结构和基本电路	(195)
三、霍尔元件的主要特性参数	(196)
四、霍尔元件不等位电势的补偿和温度误差及补偿	(197)
五、应用	(199)
§ 7-5 磁电式	(203)
一、工作原理和结构	(203)
二、温度误差和非线性误差	(204)
三、应用	(205)
第八章 其它半导体传感器及应用	(209)
§ 8-1 热敏电阻	(209)
一、工作原理	(209)
二、基本类型	(210)
三、主要特性	(210)
四、主要参数	(212)
§ 8-2 固态压敏电阻	(214)
一、半导体压阻效应	(214)
二、晶面和晶向的表示方法	(215)
三、扩散硅压阻器件	(216)
四、应用	(218)
§ 8-3 湿敏电阻	(221)
一、湿敏电阻的结构和工作原理	(221)
二、几种湿敏电阻简介	(222)
三、多功能气体——湿度传感器	(223)
§ 8-4 磁敏元件	(224)
一、磁敏二极管的原理、特性及应用	(225)
二、磁敏三极管的原理、特性及应用	(227)
§ 8-5 气敏元件	(230)
一、气敏电阻的工作原理与特性	(230)
二、应用	(231)
附录：测量的基准和标准及单位制简介	(235)

绪 论

一、传感技术的应用

测量是人类认识事物本质不可缺少的活动。人类在科学试验和生产活动中离不开测量，通过测量能使人们对事物获得定量的概念以及发现事物的规律性，在近代自动化技术的应用中更需要测量。在自动化系统中，人们为了有目的地进行控制，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。所以，自动化就是用各种技术工具替代人们的检测、分析、判断和控制的工作，实现这些功能的技术工具称为自动化装置。在众多自动化装置构成的系统中，自动检测是必不可少的。在机械工业的自动检测中有机械加工过程中的自动检测和机械运行过程中的自动检测（监测）。自动检测装置中最初感受被测量并将它转换成可用信号输出的器件叫传感器，又叫探测器、换能器等。实质上它就是代替人们的五种感觉（视、听、嗅、味、触）器官的装置。

由于实际的被测量中多数是非电量，随着科学技术的发展，特别是自动化的发展，对测量的精度和速度，尤其对被测量动态变化过程的测量和远距离的测量提出了更高的要求，因而绝大多数是将非电量转移成电量再进行测量，所以，这里的传感器一词多指那些将非电量变成电量、输出电信号的传感器。

作为一个完整的非电量电测系统，它由传感器、测量电路、指示仪器或记录仪器，有时还有数据处理仪器组成，如图0-1所示。从图中看出传感器在非电量电测系统中占有重要位置，它获得的信息正确与否，关系到整个测量系统的精度。

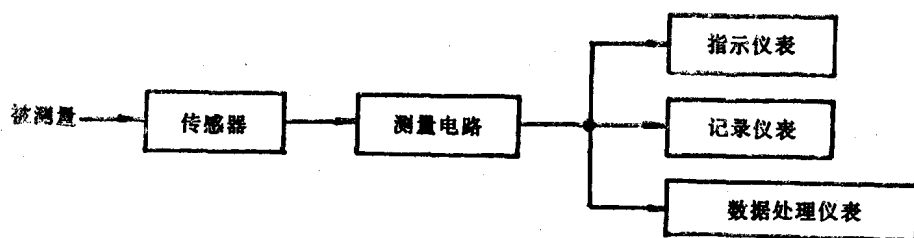


图0-1 非电量电测系统框图

把传感器和电子线路结合起来，就可以实现用机械方法不能实现的一些检测，例如高速检测、微小量的检测、不扰乱事物状态的检测、无损检测、遥测等等。此外，还能进行显示、记录、存储、运算等各种信息处理及准确地自动控制等等。

在机械制造过程中，需要检测的地方很多。加工以前，最好对坯件和所用的加工设备进行各种自动检查，以保证加工过程能够正常地开始，如自动判断和调整坯件的夹持方位，确

定上床后装夹的变形情况和夹紧力的大小，加工完毕后对工件进行测量，以便确定产品合格与否，如对工件的尺寸、粗糙度、形状和位置公差（圆度、锥度、平面度、同轴度等）的测量。对诸如齿轮和螺纹等工件，还要检测其齿距，螺距、节距半径、导程等。这些检测最好能自动地进行，并将检测结果输入下道工序，作为选用的条件，加工过程中为了保证精密产品的合格率，对加工条件也有严格的要求，因而加工过程中对诸如切削速度、切削力、切削扭矩、进给速度、温度、压力和振动等参数进行自动检测和自动调整，以期达到加工条件处于最佳状态。

大型、高速、大功率的旋转机械在化工、电力、机械等各部门的应用越来越广泛，为了保证这些设备的正常运行，提高设备运行的可靠性和安全率，在设备运行的过程中进行自动检测具有重要的意义，通常是安装故障监测系统，进行长期的状态监测，例如测量主轴的振动，以避免旋转部分与固定部分的碰撞，有时还测量固定部分的振动，防止因固定的松动产生事故，做到及时发现异常情况，对故障进行早期诊断。目前几乎所有的大中型旋转机械设备均配备监视的检测自动化系统。实际上这些设备在研制样机过程中就进行过主轴、转子和叶片的应变、振动形式及结构参数等非电量的测量，为设计中的强度提供实用数据。

在研究机床加工（切削）情况下的动态稳定性、自激现象和加工精度等问题时，就需要用压电式加速度计、力传感器等仪器测量刀架、床身等有关部位的振动、机械阻抗等参数，检验机床的动态特性，找出提高精度的薄弱环节。通过对切削力的测量，可以研究金属的切削原理，为机床和夹具的设计和制定切削用量提供必要的切削力数据，也是评价刀架结构和材料的重要依据。目前我国多采用应变式和压电式三向切削力传感器进行测量。

在研制装载机、挖掘机等工程机械中，需要进行大量的试验工作，如测量装载机摇臂工作时的应力分布和最大主应力的位置、大小和方向等。测量挖掘机油缸、回转台或整机的位移、速度、转速、加速度、起动和制动时间等参数，为设计提供实用数据。

在电力、化工工业生产中、为了保证生产过程的正常进行，对工艺参数（如温度、压力、流量等）要进行监测和控制，例如化工厂合成塔中的压力和温度是化学反应的主要因素，它们将影响化学反应速度，必须对它们加以控制，这就要不断地检测出它们的数值。

以上涉及的非电量电测技术中的关键器件是传感器，它是现代测控系统中不可缺少的器件，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须的原始信息，是一些现代技术的起点，在很大程度上决定了系统的功能。

随着电子计算机、生产过程自动化、生物医学、环保、能源、海洋开发、遥感、遥测、宇航等科学技术的发展、传感器的品种和数量与日俱增，从太空到海洋，从各种复杂的工程系统到日常生活的衣食住行，都离不开各种传感器，传感技术对国民经济的发展日益起着巨大的作用。

二、传感器的分类

传感器的分类方法很多，按被测物理量划分有：位移传感器，又分为直线位移传感器和角位移传感器，用于长度、厚度、应变、振动、偏转角等参数的测量；速度传感器，又分为

线速度传感器和角速度传感器，用于线速度、振动、流量、动量、转速、角速度、角动量等参数的测量；加速度传感器，又分线加速度传感器和角加速度传感器，用于线加速度、振动、冲击、质量、应力、角加速度、角振动、角冲击、力矩等参数的测量；力、压力传感器，用于力、压力、重量、力矩、应力等参数的测量。这种分类方法只表明了传感器的用途，会把不同工作原理的传感器归并为一类，不利于从工作原理的物理基础上认识传感器的内在规律，从学习的角度看不宜如此分类。

按工作原理划分有：电阻式传感器，利用移动电位器触点改变电阻值或改变电阻丝或片的几何尺寸的原理制成，主要用于位移、力、压力、应变、力矩、气流流速和液体流量等参数的测量，电感式传感器，利用改变磁路几何尺寸、磁体位置来改变电感和互感的电感量或压磁效应原理制成，主要用于位移、压力、力、振动、加速度等参数的测量；电容式传感器，利用改变电容的几何尺寸或改变电容介质的性质和含量，从而改变电容量的原理制成，用于位移、压力、液位、厚度、含水量等参数的测量；谐振式传感器，利用改变机械的或电的固有参数来改变谐振频率的原理制成，主要用于测量压力。

以上四种属于电参数式传感器，还有电量传感器，包括：电势型传感器，利用热电效应、光电效应、霍尔效应、电磁感应等原理制成，主要用于温度、磁通、电流、速度、光强、热辐射等参数的测量；电荷传感器，利用压电效应原理制成，主要用于力、加速度的测量。

此外，也有将光电传感器、半导体传感器分出来另列一类的。光电传感器利用光电效应和几何光学原理制成，主要用于光强、光通量、位移等参数的测量；半导体传感器，利用半导体的压阻效应、内光电效应、磁电效应，与气体接触产生性质变化等原理制成，多用于温度、压力、加速度、磁场、有害气体和气体泄漏的测量。

本教材按传感器的工作原理进行分类，先介绍电阻式、电感式、电容式、谐振式四种典型参数式传感器，再介绍光传感器和电势型传感器，最后介绍其它半导体传感器。

三、传感器的发展

传感技术所涉及的知识非常广泛，渗透到各个学科领域，但它们的共性是利用物理定律和物质的物理特性，将非电量转换成电量。所以探索新理论，采用新技术和新工艺及新材料，以期达到高质量的转换功能是传感器总的发展方向。

在机械工业中，为了实现检测自动化，就要研究能用于连续和瞬时检测工件的传感器，再将它与微处理机联接，实现质量控制的全盘自动化。

由于科学和技术的发展，工业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生产线上加工过程中的“在线”检测和控制，研究自动检测系统智能化，研究故障检测系统的方向发展。

传感器位于检测系统的入口，是获得信息的第一个环节，因而它的精度、可靠性、稳定性、抗干扰性等直接关系着整个系统的性能和稳定、可靠程度。因此，希望不断地开发新型传感器应用于检测系统。无接触式传感器的研制已得到普遍重视，因为无论机械加工过程中，还是监视旋转机械运行的过程中，都希望能用无接触式传感器进行自动检测。

生产过程用多个传感器同时对一个产品进行检测或按照一定程序进行检测,将获得的几个数据输给微处理机,以便进行即时分析,进而对产品的加工进行控制。这样的自动检测系统,不仅包括检测数据、处理数据,而且参与加工过程的控制,称主动检测,从而提高产品精度和效益,这也是自动检测系统的智能化。

对于电力、化工等工业中用的汽轮机、空气压缩机等中大型旋转机器的故障诊断系统已开始有成套产品,在机械加工过程中也正在研制故障诊断系统。加工过程中的故障可能来自工件的加工状态,也可能来自加工设备的运行状态。故障诊断系统的使命就是发现、判断和预防故障的产生。目前国外有部分机床已开始采用故障诊断系统,可以检查换刀机构各步骤之间的时间间隔、溜板的磨损情况,溜板运动的平滑度和定位精度等。

近些年来,由于电子计算机技术的发展,使“电脑”成为可能,进而作为“电脑”的计算机开始要求具有类似人的视觉、触觉、听觉、嗅觉、味觉功能的电五官。配有电五官的电脑才能组成智能机器人及其它人工智能仪器设备。所以传感技术正向着模拟人的五官的另一个方向发展。如何提高感觉信息传感器的功能,将成为今后技术研究的重点。例如,就人造触觉来说,通过对特定地点的位置进行接触,能够进行高精度的测量,但象人一样用手指接触后,能够感知物体表面状态和形状乃至材料就有困难,有待于触觉传感器的进一步发展。

无论从工业生产的自动检测和监测,还是智能机器人,都不断地向传感技术提出新的要求,除了要求不断地开发新型传感器外,还要求已经使用的传感器向提高性能和扩大使用范围、小型化和集成化、多功能化、多维化、智能化、无接触化方向发展。

目前国际上,每发现新材料、新元件和新工艺都会很快地应用于研制新型传感器。例如,半导体材料的研究和新工艺的进展,促进了半导体传感器的迅速发展,研制出来一批新型半导体传感器;压电半导体材料为压电传感器的集成化提供了方便;高分子压电薄膜的出现,将使机器人的触觉系统更接近人的触觉器官——皮肤。不久的将来,非晶半导体,粗细陶瓷、形状记忆合金等新的敏感材料,将导致新型传感器的出现。

为了提高测控精度,必须使传感器的精度尽可能地提高。例如,对超精的“在线”检测精度要求小于0.1微米,因此要研制高精度的传感器。目前对传感器、仪表的可靠性正进行着多方面的研究,例如对传感器可靠性故障率数学模型和计算方法的研究。对生产工艺过程中测量极端参数的传感器也正在研究,如连续测量液态金属的温度,长时间连续测量高温介质的温度(2500~3000℃),测量固体表面的温度,测量极低的温度,测量脉动流量等等。

采用光刻、扩散及各向异性腐蚀等集成电路新工艺,可以大批生产微型传感器,这就是传感器的小型化,目前已经制成装在注射针头上的压力传感器、成分传感器。

若将传感器、放大器、温度补偿电路等集成在同一芯片上,这样既减小了体积又增加了抗干扰能力,这叫“材料、器件、电路、系统一体化”。它是利用某些固体材料的物性变化,如机械特性、电特性、磁特性、热特性、光特性、化学特性等,来实现信息的直接变换,也就是利用不同材料的物理、化学、生物效应做成器件,直接测量被测量,而且将电

路也做在一起,或将同一类传感器集成在同一芯片上构成二维阵列式传感器,或称面型固态图象传感器,它可以测量物体的表面情况,这称传感器的集成化。

由于目前数字计算机、数字测量系统、数字控制、数字显示和数字记录装置的发展和应用,要求传感器输出数字量越来越普遍,其主要原因是传感器输出的模拟量用A/D转换后的精度不高。要求开发直接输出数字信号的传感器势在必行,此即传感器的数字化。

用一个敏感器件只能获得一个点的信息,在空间分辨率方面缺少宽范围以及立体的信息。如果能在宽范围内扫描,对获取的信息进行处理后,就能够掌握广阔空间及复杂物体的状态,此即所谓检测的多维化。这是从“计量”向状态的识别靠近一步。

把不具有智能的敏感元件用计算机的智能加强,使传感器的系统高性能化,能进行更精确的检测,它兼有检测和数据处理的功能,这就是传感器的智能化。

在测量过程中,把传感器置于被测对象上,相当于有一个负载加在上面,这样多少会引起测量误差。有的被测物体上根本不能安装传感器,例如高速旋转轴的振动、转矩等。因此需要采用研制无接触式传感器,这称传感器的无接触化。目前已采用的有光电式传感器、电涡流式传感器、超声波、同位素等。其中光电式传感器具有更多的优越性。作为新型传感器的光导纤维已经应用于位移、压力、温度等参数的测量。光导纤维传感器在很短距离内(0.12~2.5mm)具有很高的灵敏度和分辨率,用它测量2.5米长导轨的平直度可测到 $\pm 5\mu\text{m}$ 。应用激光也是光电式传感器发展的一个方向,国外已有用激光检测工件尺寸、粗糙度和表面缺陷等。

传感技术是由多方面知识综合构成的,是边缘领域的技术。所以传感技术的发展必须在更广阔的技术领域内进行。现在不断地研究仿生学,仿造生物的感觉功能来开发未来的新型传感器。

四、本课程的任务和教学要求

本课程是机电工程类专业的技术基础课。

本课程主要是讲授工程检测中常用的传感器,以及用这些传感器测量诸如力、压力、温度、位移、物位、转速和振动等参数的方法。

本课程的任务是使机电工程类专业的学生在传感技术方面具有较广的知识,了解工程检测中常用传感器的结构、原理、特性、应用及发展方向,使该专业毕业生在工作中具有初步选用传感器的能力。

要求学生掌握常用的各种传感器的简单结构、工作原理、特性、应用及使用中的主要问题,了解有关测量的一些基本知识,初步了解工程检测中的基本电路。

第一章 传感器和测量的基本知识

本章将介绍有关测量的基本知识、传感器的一般特性、传感器中的弹性敏感元件等内容。它们是学习后面有关章节内容的初步基础。

§ 1-1 测量的基本概念

一、测量

人们在认识自然界的过程中，从各个不同方面采用各种不同的方法进行观察和研究自然界的规律。其中常用的方法是收集研究对象在数量上的信息，即对研究对象进行测量。测量是借助专用的技术和设备通过实验和计算，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、图表等。从而掌握被测对象的特性、规律或控制某个过程等等。

测量是获得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，才能在量值上给出被测量的大小和符号的描述。标准量应该是国际上或国家特定机构所指定的，其特性应该是足够稳定的。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。无量纲数值

由上式看出，比值 A 的大小取决于标准量 X_0 单位的大小。所采用的标准量的单位越小，比值 A 的数值越大，测量精度也就越高。因此，表示测量结果时，必须注明标准量 X_0 的单位。不注明单位的测量结果将失去实用意义。

二、测量方法

就测量方法而论，测量又分直接测量和间接测量。通常用的电压表、电流表、温度计、压力表都属于直接测量仪表。它们共同的特点是用一块事先分度（标定）好的表盘，对被测量进行直接测量，从表盘上读出该量的数值；如果直接测量不方便，或直接测量的仪表不够准确，或没有相应的仪表时，就利用被测量与某种中间量之间的函数关系，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，这种方法称为间接测量。例如用伏安法测量某电阻的电阻值，就是先测出电阻上电压和电流值，再用欧姆定律间接计算出该电阻的数值。

直接测量方法中，又分零位法、偏差法和微差法等。

零位法是指被测量与已知标准量（度量器）在比较仪器中进行比较，使这两种量对仪器的作用抵消为零（指零机构达到平衡），从而可以肯定被测量就等于已知标准量。如天平测量重量就是零位法的典型例子。其中的砝码就是已知标准量。零位法的测量装置中都有可以变化的标准量。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。实际上这些误差是很小的，因此零位法的测量精度较高。测量装置的指零机构越灵敏，测量的分辨率越高。

偏差法是指测量仪表用指针相对于表盘上刻度线的位移（相对初始点的偏差）来直接表示被测量的大小。用偏差法进行测量的指针式仪表，其表盘上的刻度是用标准量具标定过的。图1-1的弹簧秤就是用偏差法进行测量的，它的标尺用砝码标定过。该方法由于表盘上刻度的精确度不易做得很高，测量精度一般不高。采用偏差法的测量仪器中，被测量对仪表的作用被仪表中的平衡元件所平衡。当被测量增大时，所需平衡的反作用也要相应地增大，指针的偏转也就按比例地增大。图1-1弹簧秤中的弹簧就是提供反作用的元件，弹簧的伸长提供的反作用力与重物的重量相平衡，指针随弹簧的伸长而偏移一定距离。偏差法测量仪表比较通用，但其精度较低。

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，当然让该标准量尽量接近被测量，这相当于不彻底的零位法。不足部分，也就是被测量与该标准量之差，再用偏差法测出。例如图1-2的长度测量中， L_B 是标准长度，它与被测量 L_X 进行比较后的差值 ΔL 用偏差法测出（例如用尺），则所得被测物体长度 $L_X = L_B + \Delta L$ 。该测量方法中，即使测得的差值 ΔL 精确度不高，也因 ΔL 较小，其误差对总的误差影响较小。这是微差法的一个优点。另一个优点是不必象零位法那样进行反复地平衡操作，也不需要可调节的标准量具，因而标准量具的精度可以做得较高。

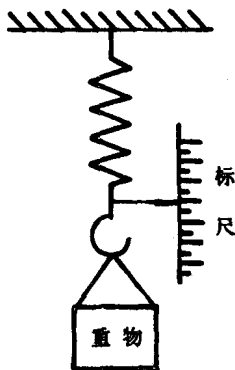


图1-1 弹簧秤

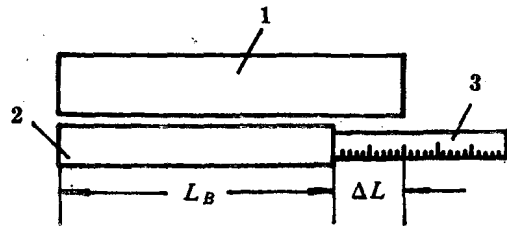


图1-2 微差法测量示意图

1. 被测物体 2. 标准长度 3. 尺

用零位法进行测量时，需要用可变化的标准量具反复地相对被测量进行平衡操作，这需要时间。而微差法中不需要进行平衡操作这一点，显得该方法简便、迅速，在工程检测中得到大量应用。

三、测量仪表的精确度与分辨率

衡量仪表测量能力的指标中,通常遇到较多的是精确度(简称精度)的概念。与精度有关的指标有三个:精密度、准确度和精确度等级。

描述测量仪表指示值不一致程度的量叫精密度,即对某一个稳定的被测量,在相同的工作条件下,由同一个测量者使用同一个仪表,在相当短的时间内按同一方向连续重复测量,获得测量结果(仪表指示值)不一致的程度。例如某温度计的精密度为 $0.5k$,表明该温度计测量温度时,不一致程度不会大于 $0.5k$ 。不一致程度越小,说明仪表越精密。有时表面上看,不一致程度为零,但并不能说明该仪表精密度好。例如某距离的真值是 1.426 米,经某仪表多次测量的结果均为 1.4 米,这只能说明该仪表显示的有效位数太少。显然能读出的有效位数越多,仪表的精密度才有可能越高。

描述仪表指示值有规律地偏离真值的程度叫准确度。例如某电压的真值是 10.000 毫伏。经某电压表多次测量结果是 10.03 毫伏、 10.04 毫伏、 10.06 毫伏、 10.04 毫伏,则该电压表指示值偏离真值的数值为 0.06 毫伏。所以该电压表的准确度为 0.06 毫伏。

精确度是精密度和准确度两者的总和,即仪表在测量性能上的综合优良程度。仪表的精密度和准确度都高,其精度才能高。精确度最终是以测量误差的相对值来表示的。

准确度是由系统误差产生的,它是指服从某一特定规律(如定值、线性、多项式、周期性等函数规律)的误差。产生系统误差的原因有:仪表工作原理所利用的物理规律不完善;仪表本身材质、零部件、制造工艺有缺陷;测量环境有变化;测量中使用仪表的方法不正确;测量工作人员不良的读数习惯等。总之,这些误差的出现是有规律的,产生的原因是可知的。所以应尽可能了解各种误差的成因,并设法消除其影响,或者,在不能消除时,确定或估计出其误差值。

精密度是两个因素确定的,一个是重复性,它是由随机误差决定的;另一个是仪表能显示的有效位数,能读出的有效位数越多,仪表的精密度越高。随机误差是指相同条件下多次测量同一物理量时,在已经消除系统误差的因素之后,测量结果仍有误差。它是由许多影响量细小变化的总和造成的,而其中的每个影响量的变化规律以及它们之间的关系难以认识,因而表现出随机性。但是,总的看这种随机变化服从统计规律(如正态分布、均匀分布等)。测量中,它表现了测量结果的分散性,该误差不能用校正方法消除,只能利用概率论和统计学的一些方法,评估随机误差对测量结果的影响,通过适当的数据处理,有可能大大地减少它对测量结果的影响。

精确度是反映测量仪表优良程度的综合指标。实际测量中,精密度高,准确度不一定高,因仪表本身可以存在较大的系统误差。反之,如果准确度高,精密度也不一定高。精密度和准确度的区别,可以用图1-3射击的例子来说明。图1-3(a)表示弹着点很分散,相当于精密度差;图1-3(b)表示精密度虽好,但准确度差;图1-3(c)才表示精密度和准确度都很好。

在工程检测中,为了简单地表示仪表测量结果的可靠程度,引入一个仪表精度等级的概念,用 A 表示。 A 的定义是,仪表在规定工作条件下,其最大绝对允许误差值相对仪表测量

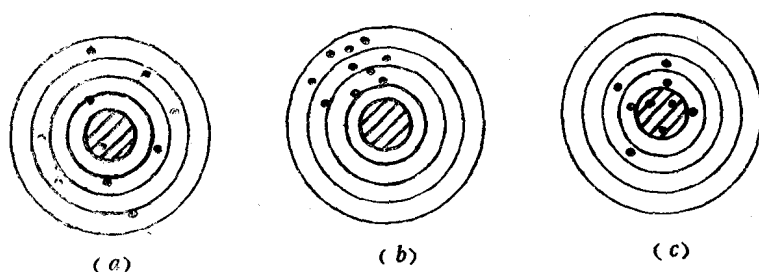


图1-3 射击举例

范围的百分数。即

$$A\% = \frac{\Delta g_{\max}}{x_{\max} - x_{\min}} \times 100\% \quad (1-2)$$

式中

$\Delta g_{\max}$ ——最大绝对允许误差值

$x_{\max}$ 、 $x_{\min}$ ——测量范围的上、下限值

A ——精度等级

为了方便，对 A 的数值以一系列标准百分数值进行分档，如0.001、0.005、0.02、0.05…1.5、2.5、4.0、6.0等。例如某仪表的精度为1.5级，表明该仪表指示值相对误差不大于1.5%。

如果某仪表的输入量从某个任意非零值缓慢地变化（增大或减少），在输入变化值 Δ 没有超过某一数值以前，该仪表指示值不会变化，但当输入变化值 Δ 超过某一数值后，该仪表指示值发生变化。这个使指示值发生变化的最小输入变化值称为仪表的分辨率。分辨率显示仪表能够检测到被测量最小变化量的本领。一般模拟式仪表的分辨率规定为最小刻度分格数值的一半。数字式仪表的分辨率规定为最后一位的数字。

关于测量的基准和标准及单位制见附录。

本节小结

测量是将被测量与同性质的标准量用专门的技术和设备进行比较，获得被测量对比该标准量的倍数，从而在量值上给出被测量的大小和符号。

标准量的单位越小，测量精度也越高。表示测量结果时，必须注明标准量的单位。

测量分直接测量和间接测量。前者是对被测量进行直接测量，从事先分度（标定）好的表盘上读出被测量的大小。后者是利用被测量与某种中间量之间的函数关系，先测出中间量，再通过相应的函数关系，计算出被测量的数值。

直接测量方法中，又分零位法、偏差法和微差法。

零位法是指被测量与已知标准量在比较仪器中进行比较，让仪器指零机构指零，从而肯定被测量等于已知标准量。该法测量精度较高。

偏差法是指测量仪表用指针相对于表盘上刻度线的位移来直接指出被测量的大小。该法