

高等学校教学用书

自动检测技术

GAODENG

XUEXIAO

JIAOXUE

YONGSHU

冶金工业出版社

高等学校教学用书

自动检测技术

(第二版)

北京科技大学 王绍纯 主编

冶金工业出版社

(京)新登字 036 号

图书在版编目(CIP)数据

自动检测技术/王绍纯主编. —北京:冶金工业出版社,
1995

高等学校教学用书

ISBN 7-5024-1613-7

I. 自… I. 王… II. 自动检测-高等学校-教学参考书
IV. TP274

中国版本图书馆CIP数据核字(94)第 13453 号

出版人 卿启云(北京沙滩嵩祝院北巷 39 号,邮编 100009)

怀柔县东茶坞印刷厂印刷;冶金工业出版社出版;各地新华书店发行

1995 年 5 月第 1 版,1995 年 5 月第 1 次印刷

787mm×1092mm 1/16; 18.25 印张; 427 千字; 279 页; 1-6000 册

10.70 元

第二版前言

本教材按照1991~1995年冶金高等院校教材编写、出版规划,对第一版进行了修订。本教材第一版自1985年出版以来,已经使用了八年,为了提高教材质量,适应教学改革的需要,在修订过程中,我们认真总结多年来讲授本教材的经验,广泛征求兄弟院校及使用单位的宝贵意见,对内容作了调整、精炼和提高,主要体现在如下几个方面:

1. 对全书总篇幅进行了调整。为了贯彻少而精的原则,按照教学大纲的要求,突出重点,尽量做到主次分明、详略恰当,对全书字数进行了较大幅度压缩。

2. 精选了内容。按照教学要求,对部分章节进行了较大修改或重新编写,例如测量误差理论与数据处理方法、应变式传感器、电涡流式传感器、电容式传感器等,在原有内容基础之上进行了充实提高。为了与后续课程配合和避免重复,对某些内容进行了删减,例如电位计式传感器、热电阻传感器、热电式传感器、霍尔式传感器等。

3. 增加了新内容。例如在第二章增加了光纤传感器、振动式传感器等内容,在各种传感器编写内容上均增写了传感器应用举例。

4. 增加了习题及思考题。为了培养学生运用基本理论分析与解决实际问题的能力,精选了一定数量的习题及思考题,置于各章之末。

参加本书第二版编写的有赵家贵(第一章、第二章的第五至第十二节)和王绍纯(第二章的第一节至第四节、第三、四、五章)二位同志。全书由王绍纯同志主编。曾参加本书第一版编写的刘国俊同志因身体原因未能参加本书第二版的编写工作。

在本书的编写和审稿过程中,兄弟院校的有关同志提供了不少宝贵意见和建议,在此表示衷心地感谢。由于我们水平所限,错误和不妥之处在所难免,敬希读者批评指正。

编者
一九九三年六月

前 言

本书是根据冶金部所属高等院校工业自动化仪表专业教学计划和自动检测技术课程教学大纲编写的。

本书原稿印刷后相继在重庆大学、北京工业大学、太原工学院、东北工学院、昆明工学院和北京钢铁学院等院校试用,并根据各院校试用提出的意见对原书进行了修改。

自动检测技术涉及面非常广泛。为了使读者能够获得比较系统和完整的概念,本书以信息的获取、转换与处理为线索,详细介绍了检测技术理论基础、各类传感器的工作原理与特性、电测技术中的抗干扰技术、仪表特性线性化技术和温度补偿技术以及特种测量技术。全书力求具有较好的系统性、完整性和一定的深度、广度。在内容组织上,注意了尽量反映检测技术领域中的新内容,如动态测试、数据采集、微弱信号检测、相关测量技术和反馈测量技术等,测量电路构成也注意到以集成电路为主。在内容叙述上,除理论分析外,还配有较完整的典型工程实例,以利于培养学生运用基本理论分析与解决实际问题的能力。

本书主要作为工业自动化仪表专业的教材,对从事检测技术的工程技术人员也具有参考价值。

参加本书编写的有赵家贵(第一章、第二章的第七至十二节)、刘国俊(第二章的第一至六节)和王绍纯(第三、四、五章)三位同志。全书由王绍纯同志主编。北京航空学院韩云台和何立民同志对本书进行了全面审阅。

由于我们水平有限,错误和不妥之处在所难免,恳切希望读者批评指正。

编者

一九八四年七月

3AD50103

I

目 录

绪论	(1)
第一章 检测技术理论基础	(2)
第一节 测量方法	(2)
一、概述	(2)
二、直接测量、间接测量与联立测量	(3)
三、偏差式测量、零位式测量和微差式测量	(3)
第二节 测量仪表及测量系统	(4)
一、测量仪表的功能	(5)
二、测量仪表的特性	(6)
三、测量仪表的组成环节	(11)
四、测量系统	(13)
第三节 测量数据处理方法	(15)
一、静态测量数据处理方法	(15)
二、测量误差的估计和处理	(19)
三、测量误差的合成与分配	(22)
四、测量数据处理	(24)
五、自动检测仪表的动态误差	(29)
习题及思考题	(33)
第二章 非电量电测法	(38)
第一节 概述	(38)
一、非电量电测技术及其优越性	(38)
二、非电量电测系统结构原理	(38)
第二节 应变式传感器	(39)
一、应变效应	(39)
二、电阻应变片、弹性体与应变胶	(41)
三、应变式传感器的参数调整与补偿	(51)
四、应变式传感器的应用	(53)
第三节 电感式传感器	(55)
一、可变磁阻式传感器	(56)
二、差动变压器式传感器	(65)
三、电涡流式传感器	(73)
第四节 电容式传感器	(81)
一、工作原理	(81)
二、结构和特点	(84)
三、测量电路	(88)
四、传感器的应用	(93)
第五节 压电式传感器	(94)

一、压电效应	(94)
二、压电材料	(96)
三、压电式传感器	(97)
四、压电式传感器的等效电路	(98)
五、压电式传感器测量电路	(99)
第六节 压磁式传感器	(102)
一、压磁式传感工作原理	(102)
二、压磁式传感器的基本特性	(103)
三、环境试验	(105)
四、测量电路	(106)
第七节 光式电传感器	(108)
一、外光电效应器件	(108)
二、内光电效应器件	(110)
三、阻挡层光电效应器件	(112)
四、光电式传感器的基本形式	(117)
第八节 核辐射传感器	(117)
一、放射源	(117)
二、探测器	(118)
三、核辐射传感器测量电路	(124)
四、核辐射传感器的应用	(126)
第九节 激光式传感器	(126)
一、激光的本质	(126)
二、激光的形成	(127)
三、激光的特点	(129)
四、激光器	(129)
五、激光的应用	(131)
第十节 光纤传感器	(133)
一、光纤及光纤传感器	(133)
二、传光型光纤传感器	(136)
三、传感型光纤传感器	(138)
第十一节 数字式传感器	(142)
一、转角—数字式传感器	(142)
二、光栅式传感器	(144)
三、磁栅式传感器	(149)
四、感应同步器	(149)
五、信号处理	(153)
第十二节 其他传感器	(158)
一、霍尔式传感器	(157)
二、超声式传感器	(163)
三、振动式传感器	(168)
四、智能式传感器	(171)
习题及思考题	(176)

第三章 电测技术中的抗干扰问题	(181)
第一节 干扰与防护	(181)
一、干扰与防护	(181)
二、干扰的类型及防护	(181)
第二节 噪声源与噪声耦合方式	(182)
一、噪声与信噪比	(182)
二、噪声源	(183)
三、噪声电压的迭加	(185)
四、噪声耦合方式	(185)
第三节 共模干扰与差模干扰	(190)
一、差模干扰	(190)
二、共模干扰	(191)
三、共模干扰抑制比	(192)
第四节 屏蔽、接地、浮置与其它噪声抑制技术	(193)
一、屏蔽技术	(193)
二、接地	(197)
三、浮置	(200)
四、平衡电路	(201)
五、滤波器	(202)
六、光耦合器	(203)
七、脉冲电路的噪声抑制技术	(204)
第五节 电源变压器与工频干扰	(204)
一、电源变压器原、副边绕组之间加入单层静电屏蔽后的泄漏电流分析	(204)
二、电源变压器原、副边绕组间加入双层屏蔽的接法及漏电分析	(205)
三、电源变压器原、副边之间采用三层屏蔽的接法及干扰分析	(206)
第六节 电子测量仪表的屏蔽与防护	(207)
一、测量仪表中实用屏蔽规则	(207)
二、数字电压表的屏蔽与防护分析	(209)
三、电子测量仪表的屏蔽与防护小结	(212)
习题及思考题	(214)
第四章 线性化及温度补偿	(218)
第一节 非线性特性的线性化	(218)
一、仪表组成环节的非线性特性	(218)
二、非线性特性的补偿方法	(218)
三、实用线性化器举例	(223)
第二节 自动检测技术中的温度补偿技术	(233)
一、概述	(233)
二、温度补偿原理	(233)
习题及思考题	(238)
第五章 特种测量技术	(241)
第一节 数据的采样与保持	(241)

一、概述	(241)
二、采样过程与采样原理	(241)
三、采样—保持器的工作原理	(243)
四、实际采样—保持器的工作过程分析	(244)
五、采样—保持器的构成原理	(246)
第二节 峰值测量	(248)
一、概述	(248)
二、峰值保持器的工作原理	(248)
三、工程实用峰值保持器	(249)
第三节 有效值测量	(250)
一、有效值检测的意义	(250)
二、有效值检测电路的工作原理	(251)
第四节 微弱信号检测	(253)
一、微弱信号检测的意义	(253)
二、锁定放大器	(253)
三、取样积分器	(259)
第五节 利用噪声进行信号检测	(261)
一、概述	(261)
二、相关测速	(262)
三、噪声温度计	(266)
第六节 反馈测量技术	(268)
一、反馈测量系统	(268)
二、逆传感器	(268)
三、力平衡式测量系统	(270)
四、温度平衡式测量系统	(272)
五、热流量平衡式测量系统	(273)
习题及思考题	(275)
参考文献	(278)

绪 论

在科学实验和工业生产中,为了即时了解实验进展情况、生产过程的情况及它们的结果,人们要经常对某些物理量,如电流、电压、温度、压力、流量、物位、位移、尺寸等参数进行检测。这时人们就要选择合适的测量仪表,采用一定的检测方法去实施有效地检测。检测的目的是实现对物理现象的定性了解或定量掌握。检测技术就是人们为了对自然现象或生产过程参数能够进行定性了解和定量掌握所采取的一系列技术措施的总称。

检测技术已经发展成为一门较完整的技术学科。检测技术这门技术学科所涉及的内容是比较广泛的。它从被检测物理量的实际情况出发,首先要探讨能够应用什么物理原理将被测物理量转换成便于传输和处理的物理量(如电信号或光信号);进而研究信号的放大和加工变换方法,以便于信号的远距离传输,再下一步就是研究信号的接收和显示方法;最后还要研究数据的处理方法以及相应的技术措施。

检测技术在人类认识世界和现代化生产中起着重要作用。

人类对客观世界的认识,是通过观察、实验与测量,由浅入深地不断认识的。通过检测手段去确定物质运动在量方面的规律性,掌握了量的规律性就能更好地认识物质运动的本质。许多物理定律的发现都是建立在实验与测量这一基础之上的,许多自然科学的建立与发展都是与检测技术密切相关的。

生产过程自动化是现代化生产的重要特征。为了高效率地进行生产操作,为了提高产品产量和质量,必须对生产过程进行自动控制。为了实现对生产过程的自动控制,首先必须实现对生产过程参数进行实时、可靠地检测。生产过程参数的自动检测是实现自动控制的前提条件。没有参数的检测,就使自动控制失去了前提和依据。检测技术发展了,控制水平就能提高。

检测技术的发展是以生产发展为基础的,随着生产的发展而迅速发展。特别是半导体技术、微电子技术的发展,为检测技术的发展提供了物质手段,使检测仪表、传感器有可能实现小型化、多功能和智能化、高可靠性,使原先不能实现的测量方法,得以实现。同时,生产的发展又不断地提出新的检测任务,促使人们去研究和解决这些新课题,从而推动了检测技术的发展。

学习和掌握了检测技术,就能够在科学研究和生产中所面临的检测任务面前,正确地选择测量原理和方法,正确地选择所需要的技术工具(如敏感元件、传感器、变换器、传输电缆、显示装置及数据处理装置等),组成恰当的检测系统,完成所提出的检测任务。

第一章 检测技术理论基础

为了完成科学实验和工业生产中提出的检测任务,并且尽可能地获取到被测量真实值,需要对测量方法、检测系统的特性、测量误差及测量数据处理等方面的理论及工程方法进行学习和研究。只有了解和掌握了这些基本技术理论,才能实施有效地测量。

第一节 测量方法

测量方法是实现参数检测的基本问题之一。测量方法的选择关系到能否实现有效地测量。

一、概述

1. 测量过程

测量是将被测量与同种性质的标准量进行比较,确定被测量对标准量的倍数,并用数字表示这个倍数。例如,用米尺测量金属棒料的长度,就是将被测棒料的长度与标准长度——米尺进行比较,最后得出棒料是几米几厘米长。

通过分析,可将测量过程概括为四步:“并列”、“示差”、“平衡”、“读数”四步过程。

在工程实践和科学实验所经常遇到的测量过程中,上述四步过程中的某几步,有时不是直接的或不是在同一时间内进行的,即不象用米尺测量棒料长度时,四步过程那样直接、那样直观,这就要求对具体的测量过程应该进行具体深入地分析,找出四步过程,并抓住每一步的特点。

2. 测量方法的本质

测量方法就是针对不同的测量任务,去正确实现“并列”、“示差”、“平衡”和“读数”四步测量过程所采取的具体措施。简而言之,就是进行测量所采用的具体方法。

具体的测量方法是多种多样的。从形式上看之所以互不相同,这是因为不同的检测量,要求用不同的具体措施来实现这四步测量过程。在许多情况下,要实现这四步测量过程,并不是很容易的,有时是很困难的。

测量方法对测量工作是十分重要的,它关系到测量任务是否能完成。因此,要针对不同测量任务的具体情况,待进行分析后,找出切实可行的测量方法,然后,根据测量方法选择合适的检测技术工具,组成测量系统,进行实际测量。反之,如果测量方法不对头,即使选择的技术工具(有关仪器、仪表、设备等)再高级,也不会有好的测量结果。

3. 测量方法分类

对于测量方法,从不同的角度出发,有不同的分类方法。按测量手续分类有:直接测量、间接测量和联立测量。按测量方式分类有:偏差式测量、零位式测量和微差式测量。除此之外,还有许多其它分类方法。例如,按测量敏感元件是否与被测介质接触,可分为接触式测量与非接触式测量;按被测量变化快慢,可分为静态测量与动态测量;按测量系统是否向被测对象施加能量,可分为主动式测量与被动式测量等。

二、直接测量、间接测量与联立测量

1. 直接测量

在使用仪表进行测量时,对仪表读数不需要经过任何运算,就能直接表示测量所需要的结果,称为直接测量。例如,用磁电式电流表测量电路的支路电流,用弹簧管式压力表测量流体压力等就为直接测量。直接测量的优点是测量过程简单而迅速,缺点是测量精度不容易达到很高。这种测量方法是工程上广泛采用的方法。

2. 间接测量

在使用仪表进行测量时,首先对与被测物理量有确定函数关系的几个量进行测量,将测量值代入函数关系式,经过计算得到所需要的结果,这种测量称为间接测量。在这种测量过程中,手续较多,花费时间较长,但是有时可以得到较高的测量精度。间接测量多用于科学实验中的实验室测量,工程测量中亦有应用。

3. 联立测量(也称组合测量)

在应用仪表进行测量时,若被测物理量必须经过求解联立方程组,才能得到最后结果,则称这样的测量为联立测量。在进行联立测量时,一般需要改变测试条件,才能获得一组联立方程所需要的数据。

对联立测量,在测量过程中,操作手续很复杂,花费时间很长,是一种特殊的精密测量方法。它多适用于科学实验或特殊场合。

在实际测量工作中,一定要从测量任务的具体情况出发,经过具体分析后,再决定选用哪种测量方法。

三、偏差式测量、零位式测量和微差式测量

1. 偏差式测量

在测量过程中,用仪表指针的位移(即偏差)决定被测量的测量方法,称为偏差式测量法。应用这种方法进行测量时,标准量具不装在仪表内,而是事先用标准量具对仪表刻度进行校准。在测量时,输入被测量,按照仪表指针在标尺上的示值,决定被测量的数值。它是以直接方式实现被测量与标准量的比较,测量过程比较简单、迅速,但是,测量结果的精度较低。这种测量方法广泛用于工程测量中。

在偏差式测量仪表中,一般要利用被测物理量产生某种物理作用(通常是力或力矩),使仪表的某个元件(通常是弹性元件)产生相似,但是方向相反的作用,此相反作用又与仪表指针的线位移或角位移(即指针偏差)相关,它便于人们用感官直接观测。在测量过程中,此相反作用一直要增加到与被测物理量的某物理作用相平衡,这时指针的位移在标尺上对应的刻度值,就表示了被测量的测量值。图 1-1 所示的压力表就是这类仪表的一个示例。

2. 零位式测量(又称补偿式或平衡式测量)

在测量过程中,用指零仪表的零位指示,检测测量系统的平衡状态;在测量系统达到平衡时,用已知的基准量决定被测未知量的测量方法,称为零位式测量法。应用这种方法进行测量时,标准量具装在仪表内,在测量过程中,标准量直接与被测量相比较;调整标准量,一直到被测量与标准量相等,即使指零仪表回零。例如,用电位差计测量电势。图 1-2 所示电路是电位差计的简化等效电路。在进行测量之前,应先调 R_1 ,将回路工作电流 I 校准;在测量

时,要调整 R 的活动触点,使检流计 G 回零,这时 I_g 为零,即是 $U_k = U_x$,这样,标准电压 U_k 的值就表示被测未知电压值 U_x 。

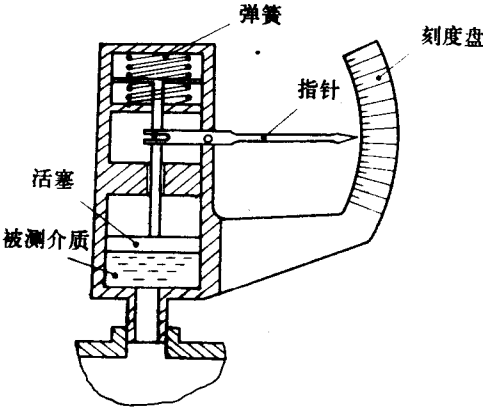


图 1-1 压力表

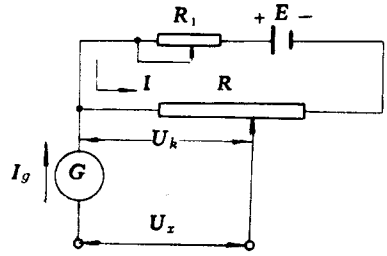


图 1-2 电位差计简化等效电路

零位式测量法的优点是可以获得比较高的测量精度。但是,测量过程比较复杂,要进行平衡操作,花费时间长。采用自动平衡操作以后,可以加快测量过程,但它的反应速度由于受工作原理所限,也不会很高。因此,这种测量方法不适用测量变化迅速的信号,只适用于测量变化较缓慢的信号。这种测量方法在工程实践和实验室中应用很普遍。

3. 微差式测量

微差式测量法是综合了偏差式测量法与零位式测量法的优点而提出的测量方法。这种方法是将被测的未知量与已知的标准量进行比较,并取得差值后,用偏差法测得此差值。应用这种方法进行测量时,标准量具装在仪表内,并且在测量过程中,标准量直接与被测量进行比较。由于二者的值很接近,因此,测量过程中不需要调整标准量,而只需要测量二者的差值。

设: N 为标准量, x 为被测量, Δ 为二者之差,则 $x = N + \Delta$,即被测量是标准量与偏差值之和。

由于 N 是标准量,其误差很小并且 $\Delta \ll N$,因此,可选用高灵敏度的偏差式仪表测量 Δ 。即使测量 Δ 的精度较低,但因 $\Delta \ll X$,故总的测量精度仍很高。

微差式测量法的优点是反应快,而且测量精度高,它特别适用于在线控制参数的检测。

第二节 测量仪表及测量系统

在生产或科学实验中,经常会遇到检测任务。在检测任务面前,首先要考虑的是应用什么样的测量原理,采用什么样的测量方法;还要考虑使用什么技术工具去进行测量。测量仪表就是进行测量所需要的技术工具的总称。也就是说,测量仪表是实现测量的物质手段。很显然,这里所说的测量仪表这一概念是广义的。广义概念下的测量仪表包括敏感元件、传感器、变换器、运算器、显示器、数据处理装置等。测量仪表性能好坏直接影响测量结果的可信度。全面掌握测量仪表的功能和构成原理,有助于正确选用仪表。

测量系统是测量仪表的有机组合,对于比较简单的测量工作只需要一台仪表就可以解决问题。但是,对于比较复杂、要求高的测量工作,往往需要使用多台测量仪表,并且按照一

定规则将它们组合起来,构成一个有机整体——测量系统。

在现代化的生产过程和实验中,过程参数的检测都是自动进行的,即检测任务是由测量系统自动完成的。因此,研究和掌握测量系统的功能和构成原理十分必要。

一、测量仪表的功能

在测量过程中测量仪表要完成的主要功能有:物理量的变换、信号的传输和处理、测量结果的显示。

1. 变换功能

在生产和科学实验中,经常会碰到各种各样的物理量,其中大多数是非电量,例如,热工参数中的温度、压力、流量;机械量参数中的转速、力、位移;物性参数中的酸碱度、比重、成分含量等。对于这些物理量想通过与其对应的标准量直接比较,一步得到测量结果,往往非常困难,有时甚至是不可能实现的。为了解决实际测量中的这种困难,在工程上解决的办法是依据一定的物理定律,将难于直接同标准量“并列”比较的被测物理量经过一次或多次的信号能量形式的转换,变换成便于处理、传输和测量的信号能量形式。在工程上,电信号(电压或电流)是最容易处理、传输和测量的物理量。因此,往往将非电量的被测量依据一定的物理定律,严格地转换成电量(电压或电流),然后再对变换得到的电量进行测量和处理。

在仪表中进行物理量的变换,同时伴随着能量形式的变换。从能量形式的变换方式角度分析,可将变换功能分为两类:

(1)单形态能量变换 这种变换形式是将 A 形态能量(反映被测量)作用于物体,遵照一定物理定律转换成 B 形态能量(反映变换后的物理量),其框图示于图 1-3。这种变换的特点是变换时所需要的能量,取自于被测介质,不需要从外界补充能量。因此,这种变换的前提条件是从被测介质取走变换所需要的能量后,不应影响被测介质的物理状态。这种变换的结构与形式都比较简单,但要求变换器中消耗的能量应尽量少。

(2)双形态能量变换 这种变换形式是将 A 形态能量(反映被测量)和 B 形态能量(参比量)同时作用于物体,按照一定的物理定律变换成 B 形态或 C 形态能量(反映变换后的物理量),其框图示于图 1-4。例如,利用霍尔效应进行磁场测量。将霍尔元件



图 1-3 单形态能量变换

置于被测磁场 B 中,在霍尔元件上通以电流 I ,这时霍尔效应元件有霍尔电热 E_H 产生,也就是说将磁场能量和电能同时作用于霍尔元件,通过霍尔效应转换成电能输出,如图 1-5 所示。

这种变换形式的特点是变换过程所需要的能量,不是从被测对象(磁场)取得,而是从附加的能源(参比电流源)取得。其优点是附加能源的电平高,从而使变换后所得信号较强。由于不从被测介质取出能量,这种变换不破坏被测介质的物理状态。这种变换器的结构形式一般较复杂。

研究仪表变换功能机理是很重要的课题。设法将新发现的物理定律引入传感器中,作为物理量变换的依据,往往会产生崭新的传感器和测量方法。

2. 传输功能

被测量经变换后的信号,要经过一定距离的传输后,才能进行测量,显示出最后结果。即

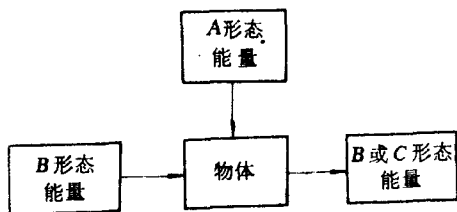


图 1-4 双形态能量变换

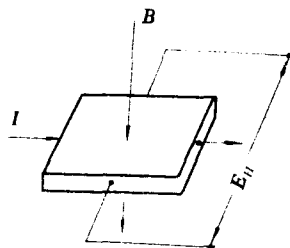


图 1-5 霍尔元件

仪表在测量过程中完成的第二个功能就是将信号进行一定距离的不失真地传输。

在比较简单的测量过程中，信号的传输距离很近，仪表的信号传输作用还不十分明显。随着生产的发展，自动化水平的不断提高，计算机控制和现场检测越来越普遍。这时，生产现场与中央控制室的距离都很远，位于现场的传感器及变送器将被测参数变换与放大后，要经过较长距离的传输才能将信号送入控制室。工业生产中应用比较多的是有线传输和无线传输。有线传输，即用电缆或导线传输电压、电流信号或数字信号。无线传输，即用无线发射，在远距离由接收机接收，进行信号传输。

3. 显示功能

测量的最终目的之一是将测量结果用便于人眼观察的形式表示出来。这就要求测量仪表能完成第三个功能即显示功能。仪表的显示方式可以分为模拟和数字式两类。模拟式显示有：指针指示和记录曲线；数字式显示有：数码显示和数字式打印记录等。

各种显示方式都有自己的特点和用途。因此，要具体情况具体分析，选择合适的显示方式。

二、测量仪表的特性

仪表的特性，一般分为静特性和动特性两种。当用测量仪表进行测量的参数不随时间而变或随时间变化很缓慢，不必考虑仪表输入量与输出量之间的动态关系而只需要考虑静态关系时，联系输入量与输出量之间的关系式是代数方程，不含有时间变量，这就是所谓的静特性。当被测量随时间变化很快，必须考虑测量仪表输入量与输出量之间的动态关系时，联系输入量与输出量之间的关系是微分方程，含有时间变量，这就是所谓的动特性。

静特性与动特性彼此不是孤立的。当静特性显示出非线性和随机性质时，静特性会影响动态条件下的测量结果。这时描写动特性的微分方程变得十分复杂，甚至在工程上无法解出。引起静特性出现非线性和带有随机性的物理原因比较常见。例如，干摩擦、间隙、迟滞回线等都能使静特性出现非线性和带有随机性。遇到这种情况只能作工程上的近似处理。

1. 测量仪表的静特性

(1) 刻度特性 一般测量仪表都是用数字表示的刻度。所谓刻度特性是表示测量仪表的输入量与输出量之间的数量关系，即被测量与测量仪表指示值之间的函数关系。这种函数关系可以用数据表格形式给出，也可用坐标曲线形式给出，还可以用数学方程式 $y=f(x)$ 给出。式中 x 表示被测量， y 表示指示值。这种数学方程式给出的刻度特性被称为刻度方程。

刻度特性可分为线性特性和非线性特性。线性刻度特性可用一次代数方程表示，它的几何表示是直线；非线性刻度特性可用高次代数方程或超越方程表示，它的几何表示是曲线。

从测量效果看，希望测量仪表具有线性刻度特性。但是，由测量原理所决定，也会经常遇

到非线性特性。这时,在传感器测量电路中,需要引入一个“线性化器”,用以补偿静特性的非线性,最终取得整台仪表的线性刻度特性。

(2)灵敏度 灵敏度表示测量仪表的输入量增量 Δx 与由它引起的输出量增量 Δy 之间的函数关系。更确切的说,灵敏度 S 等于测量仪表的指示值增量与被测量增量之比。可用下式表示:

$$S = \frac{df(x)}{dx} = \frac{dy}{dx} = f'(x) \quad (1-1)$$

它表示单位被测量的变化所引起仪表输出指示值的变化量。很显然,灵敏度 S 值越高表示仪表越灵敏。

测量仪表的灵敏度可分为三种情况,如图 1-6 所示:

- (a)在整个测量范围,灵敏度 S 保持为常数,即灵敏度 S 不随被测量变而变;
- (b)灵敏度 S 随被测量(输入值)增加而增加;
- (c)灵敏度 S 随被测量输入量增加而减小。

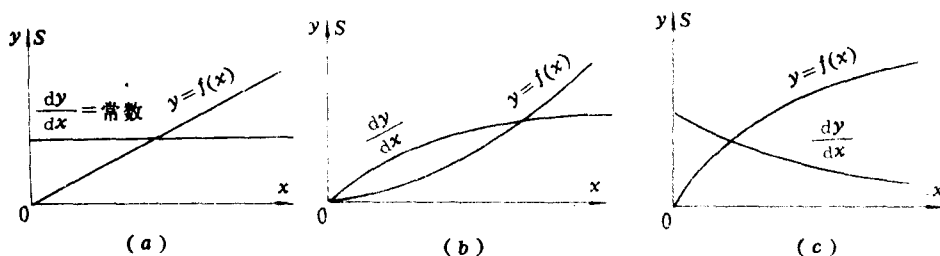


图 1-6 测量仪表的灵敏度

一般希望测量仪表的灵敏度 S 在整个测量范围内保持为常数。这样要求,一方面有利于读数,另一方面便于分析和处理测量结果。

从灵敏度的定义可以知道,灵敏度是刻度特性的导数。因为它是一个有因次的量,因此当讨论任一测量仪表的灵敏度时,必须确切地说明它的因次。

(3)相对灵敏度及其百分表示 相对灵敏度 S_s 用下式定义

$$S_s = \frac{\Delta y}{\Delta x/x} \quad (1-2)$$

它表示仪表指示值的增量对被测量的相对变化率而言的灵敏度。在实际测量中经常用百分数表示,即

$$S_s = \frac{\Delta y}{\frac{\Delta x}{x} 100\%} \quad (1-3)$$

相对灵敏度是最实用的灵敏度表示法。在实际测量中,被测量有大有小。在要求相同的测量精度条件下,被测量越小,所要求的绝对灵敏度越高。但是为了保证同一测量精度,不管被测量大小如何,只要相对灵敏度相同就可以了。

(4)局部灵敏度 一个测量仪表往往由若干个环节组成。为了设计和标定方便,需要研究每个组成环节的灵敏度。对整台测量仪表而言,每个环节的灵敏度叫做局部灵敏度。

局部灵敏度 S_i 就是表示仪表组成环节的输出量增量与引起这个增量的输入量增量的比,即

$$S_i = \frac{\Delta x_i}{\Delta x_{i-1}} \quad (1-4)$$

式中 Δ_i ——第 i 个环节的输量增量;

Δx_i ——第 i 个环节的输入量增量。

从局部灵敏度和仪表灵敏度的定义可以得出测量仪表的总灵敏度 S 等于各组成环节局部灵敏度之积,即

$$S = \prod_{i=1}^N S_i \quad (1-5)$$

(5)有害灵敏度 测量仪表除了相对被测量的灵敏度之外,还可能对各种干扰作用有反应。例如,电源电压波动,环境温度的变化等都会使仪表的输出指示值发生变化。

所谓有害灵敏度就是指测量仪表的输出指示值的变化对引起该变化的干扰物理量的变化量之比。在设计测量仪表时,总是力求使有害灵敏度降到最低。

(6)灵敏度阈与分辨力 当用人眼观测仪表输出的读数时,人眼的分辨能力是有限的。例如,用平衡电桥测量电阻时,当检流计指针的偏转小于 0.3mm 时,人眼就很难观测出来。又如,用示波器进行测量时,由于干扰影响和聚焦线条较粗,当二波形曲线的峰值之差小于 0.5mm 时,人眼就很难区别。

下面举个具体例子,说明由于人眼的分辨能力有限,对测量结果的影响。

例 1-1 在用直流电桥测量电阻时,若被测电阻值 R_x 的数值是 $R_x = 10.0004\Omega$ 并且电桥已经平衡,标准电阻 $R_N = 10.0004\Omega$ 。但由于检流计指针偏转在 $\pm 0.3\text{mm}$ 以内时,人眼区别不了,因此 R_N 的值也可能不是 10.0004Ω ,而是其它值。

若已知电桥的相对灵敏度 $S_s = \frac{1}{0.01\%} [\text{mm}]$,当检流计指针偏转不超过 $\pm 0.3\text{mm}$ 时,所对应的标准电阻 R_N 的相对变化为

$$\frac{\Delta R_N}{R_N} = \frac{\Delta X}{S_s} = \frac{\pm 0.3}{1/0.01\%} = \pm 0.003\%$$

所以有 $\Delta R_N = R_N \times (\pm 0.003\%) = \pm 0.0003\Omega$

即 R_N 有 $\pm 0.0003\Omega$ 变化时,对应检流计指针偏转 $\pm 0.3\text{mm}$,刚好为人眼所能分辨。因此,测量结果的可能取值范围是

$$R_N = 10.0004 \pm 0.0003\Omega = 10.0001\Omega \sim 10.0007\Omega$$

若要求测量结果的相对误差小于 0.01%,上述情况勉强可以,因为人眼分辨力有限所引起的相对误差为 $\pm 0.003\%$ 以内,占总误差的 1/3 弱。但是,若要求测量误差更小,例如是 0.001%,则上述情况就达不到要求了。

所谓灵敏度阈就是指测量仪表最小所能够区别的读数变化量,所对应的引起读数变化的输入变化量。例如,上例中的 $\pm 0.0003\Omega$ 。灵敏度阈也称死区或不灵敏区。

为了保证足够的测量准确度,在测量技术标准上规定:灵敏度阈应小于允许的绝对误差的 1/3(也有人认为应小于 1/5 或 1/10)。

对于数字式仪表,灵敏度阈转变成分辨力。所谓分辨力就是指数字式仪表指示数字值的最后一位数字所代表的值。

(7)测量仪表的标定与测量仪表常数 对于直读式仪表在使用前应予以标定。所谓标定就是指对测量仪表输入标准量,测得相应的指示值,然后求得该测量仪表的“常数”。