



高等学校“十二五”重点规划教材
信息与自动化系列

检测与转换技术

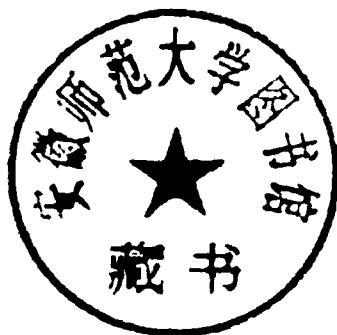
主 编 张佳薇

 哈尔滨工程大学出版社
Harbin Engineering University Press

检测与转换技术

主 编 张佳薇

副主编 王宇嘉 郑 纲 魏东辉



哈尔滨工程大学出版社

内 容 简 介

本书的主要内容包括检测技术的一般概念和测量方法、误差分析,传感器及其基本特性,电阻式、变磁阻式、电容式、电感式、压电式、霍尔式、热电式、光电式等常用传感器,新型传感器,测控系统实用抗干扰技术,微机测控系统的工作过程与应用,传感器在林业生产中的应用。本书的特点是在编写过程中力求内容丰富、全面、新颖,增强了教学的适用性和应用性,压缩了公式推导及繁琐的计算,对传感器原理部分力争讲清楚物理概念,传感器的应用部分则充分结合生产和工程实践,有助于读者对测控系统的建立及传感器知识的理解。

本书可以作为自动化、电气工程及其自动化、电子信息、通信工程、机械设计制造及其自动化、机电一体化、测控技术与仪器等相关专业的教材,也可作广大从事检测技术开发与应用的工程技术人员的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

检测与转换技术/张佳薇主编. —哈尔滨:哈尔滨
工程大学出版社,2011.8
ISBN 978-7-5661-0183-9

I. ①检… II. ①张… III. ①自动检测 ②传感器
IV. ①TP274 ②TP212

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2011)第 159357 号

出版发行 哈尔滨工程大学出版社
社 址 哈尔滨市南岗区东大直街 124 号
邮政编码 150001
发行电话 0451-82519328
传 真 0451-82519699
经 销 新华书店
印 刷 哈尔滨工业大学印刷厂
开 本 787mm×1092mm 1/16
印 张 15
字 数 363 千字
版 次 2011 年 8 月第 1 版
印 次 2011 年 8 月第 1 次印刷
定 价 30.00 元

<http://press.hrbeu.edu.cn>

E-mail: heupress@hrbeu.edu.cn

前 言

现代科学技术迅速发展,人们在研究自然现象和规律及生产活动中,必须从外界获得信息,要及时正确地获取这些信息,就必须合理地选择和应用各种检测技术和传感器。21世纪是信息化时代,其特征是人类社会活动和生产活动的信息化,传感器和检测技术的重要性更为突出。本教材是作者在多年来从事检测与转换技术的教学及科研的基础之上,根据高校自动化、电气工程及其自动化、机械设计制造及其自动化、机电一体化、电子信息、通信工程及测控技术与仪器等专业传感器与检测技术课程的基本要求,吸收近年来各高校的教学与科研最新成果,力求内容丰富、全面、新颖,叙述由浅入深,对传感器原理力争讲清物理概念,按照少而精和理论联系实际的原则编写而成的,教材具有一定的实用和参考价值。本教材突出应用性和针对性,强化实践能力的培养,将传感器和工程检测方面的知识有机地联系起来,使学生在掌握传感器原理的基础上,更进一步地应用这方面的知识以解决工程检测中的具体问题。同时在编写过程中,注意补充反映新器件、新技术的内容,力求使读者了解前沿学科动态。

本书由东北林业大学、上海工程技术大学、东北农业大学、上海第二工业大学的教师联合编写而成。全书由张佳薇任主编,王宇嘉、郑纲、魏东辉任副主编。其中绪论、第一章、第四章、第五章、第六章、第八章、第十章、第十二章、第十三章及附录 I, II 由张佳薇执笔,第三章、第十一章由王宇嘉执笔,附录 III 由薛云峰执笔,第七章、第九章由郑纲执笔,第二章由魏东辉执笔。

本书在编写过程中得到了众多高等学校、科研单位、厂矿企业等的大力支持和帮助,并获得了许多宝贵的意见,同时,还参考或引用了国内外一些专家学者的论著,在此一并表示衷心感谢。

本书内容全面而实用,适用面广,不仅可以作为自动化、电气工程及其自动化、电子信息、通信工程、机械设计制造及其自动化、机电一体化、自动化、测控技术与仪器等专业本科相关专业教材,也可作为广大从事检测技术开发与应用的工程技术人员的自学用书。

热忱地期望各位读者和同仁对本书的错误批评指正。

编 者

2011年7月

目 录

绪论	1
第一章 检测技术的基本概念	3
第一节 自动检测系统的组成	3
第二节 检测的基本方法	4
第三节 测量误差及其分类	7
第二章 传感器及其基本特性	14
第一节 传感器的定义、组成与分类	14
第二节 传感器的数学模型概述	16
第三节 传感器的基本特性	18
思考题与习题	26
第三章 电阻应变式传感器	27
第一节 弹性敏感元件	27
第二节 电阻应变片	32
第三节 电阻应变式传感器的测量电路	36
第四节 电阻应变式传感器的应用	41
思考题与习题	46
第四章 电容式传感器	48
第一节 电容式传感器的工作原理和结构	49
第二节 电容式传感器测量电路	52
第三节 电容式传感器的应用	57
思考题与习题	62
第五章 电感式传感器	63
第一节 自感传感器	63
第二节 互感式传感器	65
第三节 电涡流式传感器	71
思考题与习题	77
第六章 压电式传感器	79
第一节 压电效应和压电材料	79
第二节 压电式传感器等效电路和测量电路	84
第三节 压电式力传感器的合理使用	86
第四节 压电传感器的应用	88
思考题与习题	90

第七章 磁电式传感器	91
第一节 霍尔元件	91
第二节 霍尔集成传感器	99
第三节 霍尔传感器的应用	101
思考题与习题	105
第八章 热电式传感器	106
第一节 热电偶传感器	106
第二节 热电阻传感器	118
第三节 集成温度传感器	124
思考题与习题	128
第九章 光电式传感器	129
第一节 光电转换元件	129
第二节 光电传感器的应用	141
思考题与习题	145
第十章 新型传感器	147
第一节 机器人传感器	147
第二节 智能控制与 Smart 传感器	158
思考题与习题	166
第十一章 测控系统实用抗干扰技术	167
第一节 消除或抑制干扰源	167
第二节 破坏干扰途径	169
第三节 接地技术	172
第四节 滤波技术	175
第五节 光电耦合技术	176
第十二章 微机测控系统的工作过程与应用	178
第一节 带微机的测控系统原理	178
第二节 系统中的几种重要部件	179
第三节 检测技术与可编程序控制器间的关系	182
第四节 微机在测控系统中的主要应用	183
第五节 应用实例——汽轮机叶根槽数控铣床	184
第十三章 传感器在林业生产中的应用	288
第一节 传感器在原木检测中的应用	288
第二节 传感器在制材生产中的应用	300
第三节 苗木生长状态的测试	308
第四节 传感器在其他方面的应用	310
附录 I 传感器的命名方法及代号	317
附录 II 传感器材料	323
附录 III 实践指导	329
参考文献	332

绪 论

1. 检测与转换技术的基本概念

检测与测量含义基本相同,国家标准中对测量一词的定义为:测量是指以确定被测对象属性和量值为目的的全部操作。以电子技术、计算机技术为基础对各种电量和非电量的检测,是人们从事工农业生产、科学实验和科学研究的重要手段。

转换是利用敏感器件或电路将被测参数由一种量变换为另一种量的过程。它可以将被测参数的非电量变换为电量,以便于测量;也可以将被测量的大小进行变换,以提高测量精度;也可以将一种物理量变换为另一种物理量,以满足测量或控制的要求。

检测与转换技术包括自动检测技术和自动转换技术,它是科学地认知客观事物的手段,也是信息技术的重要组成部分。只有通过检测人们才能够定量地表述某个生产过程或运动对象,才能进行比较和判断,进而对生产过程或运动对象进行有效地管理和控制。检测与转换技术是以研究自动检测系统中的信息提取、信息转换以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。信息提取是检测与转换的基础,是指从自然界、社会生产过程中或科学实验中获取人们需要的信息的过程。信息处理是检测与转换中的重要环节,它借助专门的设备、仪器和系统,将获得的物理量进行显示、输出,或者将得到的信息进行加工、运算、分析或综合,以便进行故障诊断、报警、检测、计量、保护、控制、调度和管理等,以达到预防自然灾害、防止事故发生、改善产品质量、提高生产的自动化水平、降低劳动强度、顺利完成科学实验、进行文明生产和科学管理等目的。

2. 检测与转换技术的应用

检测与转换技术已成为一些发达国家最重要的热门技术之一,其主要原因是它可以给人们带来巨大的经济效益和社会效益。可以说,一个国家的现代化水平是用自动化水平来衡量的,而自动化水平是用检测与转换仪表以及传感器的种类和数量多少来衡量的。一个完整的检测与转换过程一般包括信息的提取、信号的分析与转换、数据的存储与传输、显示或打印等。

检测与转换技术应用领域十分广泛,在工农业生产、科学研究、医疗卫生、交通运输和经济贸易等方面起着重要作用。即使在日常生活中,检测与转换技术也在不知不觉中发挥着重要作用。例如,电冰箱的温度调节离不开对温度的检测;家庭用电、用水和用气的多少,则要通过电表、水表和煤气表对电量、水流量和气流量进行检测;医生对病人进行诊断时,常常要测量病人的体温和血压等。这些简单实例中都渗透着检测与转换技术。

在科学技术与社会生产高度发达的今天,要求与之适应的检测与转换仪器或系统虽然错综复杂,被测对象的跨度既广泛又具多样性,但是归纳起来主要是以下几方面:

- (1)能够测量多种参量,既有电量,又有非电量;
- (2)具有多个输入通道,既可进行定点测量,又可进行多点测量;
- (3)能够进行快速动态在线实时测量,因为绝大多数的被测信号是随时间变化的动态信号;
- (4)能够实时快速进行信号分析处理,排除噪声干扰、消除偶然误差、修正系统误差,从

而实现测量结果的精度以及具有对被测信号的高分辨能力。

据有关资料统计,在现代工程装备中,检测环节的投入已达到装备系统总成本的60%左右。检测技术已成为保证装备实际性能指标和正常工作的重要手段,科学上的重大发现,往往是通过新的检测手段来完成的。在科学技术迅速发展的今天,对检测与转换仪器或系统有着更高层次的要求。可以说,大到天体观测、遥感遥测、气象预报、地质探测、找矿,小到物质成分分析、晶体结构测定、原子核结构研究等都离不开检测技术。从军事用途的电子侦查、雷达等到民用的工业过程参数测控和医用断层扫描(CT),无一不是现代检测与转换技术手段的体现。随着微电子技术和计算机技术的不断发展,检测与转换技术将在各个领域发挥越来越重要的作用。

3. 检测与转换技术的发展

检测与转换技术的发展伴随着仪器仪表(或系统)的发展,而仪器仪表(或系统)的发展可归纳为以下五个阶段。

第一代检测与转换测试仪器:它是以电磁感应基本定律为基础的模拟指针式仪表。其主要特点是结构简单,功能单一,检测精度低,读数不方便。

第二代检测与转换测试仪器:它是以电子管或晶体管为基础的分立元件式仪表或系统。当20世纪50年代出现电子管,60年代出现晶体管时,检测与转换仪器也进入了电子时代。其主要特点是功能较完善,但精度低,响应速度慢。

第三代检测与转换仪器:它是以集成电路芯片为基础的数字式仪表或系统。20世纪70年代集成电路的出现,推动了检测与转换技术的前进与发展,使检测与转换仪表具有A/D转换电路,能将被测的模拟信号转换成数字信号,检测结果以数字形式输出显示。其主要特点是检测精度高,速度快,读数与显示清晰、直观,同时数字信号便于远距离传输。

第四代检测与转换仪器:它是智能式仪表或系统。20世纪80年代,微电子技术的发展、微处理器的普及和智能控制理论的出现,使检测与转换技术又向前迈进了一大步。其主要特点是具有数据存储、运算、逻辑判断、自选量程、自动校正、自动补偿、自寻故障等功能,以及检测精度高、操作使用方便等优点。

第五代检测与转换测试仪器:它是现代检测与转换系统或装置。现代检测与转换系统或装置的标志是自动化和智能化。微电子技术与计算机技术的飞速发展,测试技术与计算机深层次的结合引发了测试仪器领域的一场新的革命。一种全新的仪器结构概念促使新一代仪器或系统——虚拟仪器出现,进而产生集成仪器和系统,由单台仪器子系统向多台仪器组成的大的测试系统方向发展。近几十年以来,现代空间技术、导航、卫星通信、计算机技术、集成电路等科学技术的新领域和新发展对电子测量技术提出了很多新要求:精度高、速度快;能自动进行数据处理、显示、存储、传输;能多点综合测量;能自动控制测量过程等。信息论、控制论、误差理论、电子技术、计算机技术、传感器技术、信号处理技术和集成电路技术的普及、应用和各学科相互渗透也为现代检测技术奠定了基础。计算机技术的发展和广泛应用,适合测量技术的语言 and 标准接口与通信技术的进步,特别是大规模集成电路,尤其是微机的出现,大大促进了现代检测技术的发展。

目前,现代检测技术正朝着集成仪器、测试系统的体系结构、测试软件、人工智能测试技术方向发展。

第一章 检测技术的基本概念

检测技术是以研究检测与控制系统中信息的提取、转换及处理的理论和技术为主要内容的一门应用技术学科。在工程实践和科学实验中提出的检测任务是正确及时地掌握各种信息,大多数情况下是要获取被测对象信息的大小,即被测量的大小。这样,信息采集的主要含义就是测量、取得测量数据。

“测量系统”是传感器技术发展到现在一定阶段的产物。在工程中需要传感器与多台仪表组合在一起,才能完成信号的检测,这样便形成了测量系统。尤其是随着计算机技术及信息处理技术的发展,测量系统所涉及的内容也不断得以充实。

为了更好地掌握检测技术的应用,需要掌握自动检测系统的组成、测量的基本概念、测量系统的特性、测量误差以及数据处理等方面的检测技术基本知识。

第一节 自动检测系统的组成

非电量的检测多采用电测法,即首先将各种非电量转变为电量,然后经过一系列的处理,将非电量参数显示出来。自动检测系统原理框图如图 1-1 所示。

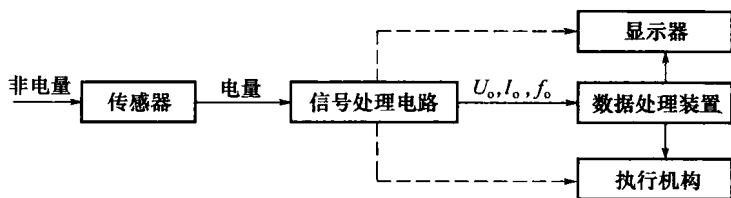


图 1-1 自动检测系统原理框图

(1) 传感器(Transducer)。传感器是指一个能将被测的非电量转换成与之有确定对应关系的电量输出的器件或装置。

(2) 信号处理电路。信号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电压、电流或频率信号等,以推动后级的显示器、数据处理装置及执行机构。

(3) 显示器。目前常用的显示器有四类,包括模拟显示、数字显示、图像显示及记录仪等。

①模拟量是指连续变化量。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。

②数字显示目前多采用发光二极管(LED)和液晶(LCD)等,并以数字的形式来显示读数。前者亮度高、耐震动、可适应较宽的温度范围;后者耗电省、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 的显示内容。

③图像显示是用 CRT 或点阵 LCD 来显示读数或被测参数的变化曲线,有时还可用图

表或彩色图等形式来反映整个生产线上的多组数据。

④记录仪主要用来记录被检测对象的动态变化过程,常用的记录仪有笔式记录仪、高速打印机、绘图仪、数字存储示波器、磁带记录仪、无纸记录仪等。

(4)数据处理装置。数据处理装置用来对测试所得的实验数据进行处理、运算、逻辑判断、线性变换,对动态测试结果作频谱分析(幅值谱分析、功率谱分析)、相关分析等,完成这些工作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 1-1 中的虚线部分。

(5)执行机构。所谓执行机构通常是指各种继电器、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、保护等作用的电气设备。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,去驱动执行机构。

第二节 检测的基本方法

一个物理量的检测可以通过不同的方法实现。检测方法选择的正确与否,直接关系到检测结果的可靠程度,也关系到检测与控制系统的经济性和可行性。检测方法的分类形式有多种,从不同的角度出发有不同的分类方法,下面介绍几种常见的分类方法。

1. 按测量手续分类

按测量手续分类有直接测量、间接测量和组合测量。

(1)直接测量。将被测量与标准量直接比较,或用预先经标准量标定好的测量仪器或仪表进行测量,从而直接测得被测量的数值。例如,用弹簧管式压力表测量流体压力就是直接测量。直接测量的优点是测量过程简单、迅速,缺点是测量精度不高。该方法是工程上广泛采用的方法。

(2)间接测量。被测量本身不易直接测量,但可以通过与被测量有一定函数关系的其他量(一个或几个)的测量结果(如用函数解析式计算、查函数曲线或表格)求出被测量数值,这种测量方式称为间接测量。例如,导线的电阻率 ρ 的测量,根据电阻 $R = \rho \frac{4l}{\pi d^2}$ 得出

$$\rho = \frac{\pi d^2 R}{4l} \quad (1-1)$$

式中, l, d 分别表示导线的有效长度和直径。测量时,只要先经过直接测量得到导线的 R, l, d 的数值,再代入 ρ 的表达式,最后经过计算得到需要的结果 ρ 值。在这种测量过程中,手续较多,花费时间较长,但与直接测量被测量相比,可以得到较高的精度。该方法多用于科学实验中实验室的测量,工程中也有应用。

(3)组合测量。如果被测量有多个,而且被测量又与某些可以通过直接或间接测量得到结果的其他量存在着一定的函数关系,则可先测量这几个量,再求解函数关系组成的联立方程组,从而得到多个被测量的数值。显然,它是一种兼用直接测量和间接测量的方式。例如,在研究导体的电阻 R_t 随温度 t 变化的规律时,在一定的温度范围内有下列关系式:

$$R_t = R_{20} + \alpha(t - 20) + \beta(t - 20)^2 \quad (1-2)$$

式中, R_{20}, α, β 为三个待定的量, R_{20} 为电阻在 20°C 时的数值, α, β 为电阻的温度系数。依据此关系式, 测量出在 t_1, t_2, t_3 三个不同的测试温度时导体的电阻 R_{11}, R_{12}, R_{13} , 得联立方程组

$$\begin{cases} R_{11} = R_{20} + \alpha(t_1 - 20) + \beta(t_1 - 20)^2 \\ R_{12} = R_{20} + \alpha(t_2 - 20) + \beta(t_2 - 20)^2 \\ R_{13} = R_{20} + \alpha(t_3 - 20) + \beta(t_3 - 20)^2 \end{cases} \quad (1-3)$$

求解此方程组即可得 R_{20}, α, β 。

上述三种测量方法中, 直接测量快捷简便, 间接测量和组合测量相对复杂、费时。间接测量和组合测量仅在缺乏直接测量仪器、不便于直接测量或直接测量时涉及到的其他因素较多等情况下才予以采用, 故多用于科学实验和一些特殊的场合。

2. 按测量方式分类

按测量方式分类有偏差式测量、零位式测量和微差式测量。

(1) 偏差式测量。能够直接在仪器、仪表上读取读数的测量方法称为直接测量法。应用这种方法进行测量时, 标准量具没有装在仪表内, 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, 按照仪表指针在标度尺上的示值决定被测量的数值。它是以间接方式实现被测量与标准量的比较。例如, 用磁电式仪表测量电路中某电气元件通过的电流及其两端的电压就属于偏差式测量。该测量方法过程比较简单、迅速, 但测量结果的精度低, 因此广泛用于工程测量。

(2) 零位式测量。在测量过程中, 用指零仪表的零位指示测量系统的平衡状态, 在测量系统达到平衡状态时, 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具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, 惠斯登电桥测量电阻 (或电感、电容) 就是这种方法的一个典型例子, 如图 1-2 所示。当电桥平衡时有

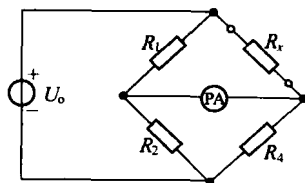


图 1-2 惠斯登电桥测量电阻

$$R_x = \frac{R_1}{R_2} R_4 \quad (1-4)$$

通常是先大致调整比率 $\frac{R_1}{R_2}$, 再调整标准电阻 R_4 , 直至电桥平衡。充当零指示器的检流计 PA 指示为零, 此时即可根据式 (1-4) 由比率 R_1/R_2 和 R_4 值得到被测电阻 R_x 的值。

只要零指示器的灵敏度足够高, 零位式测量法的测量准确度几乎等同于标准量的准确度, 因而测量准确度很高, 所以常用在实验室作为精密测量的一种方法。但测量过程中为了获得平衡状态, 需要进行反复调节, 即使采用一些自动平衡技术, 检测速度仍然较慢, 这是该方法的不足之处。

(3) 微差式测量法。偏差式测量法和零位式测量法相结合构成微差式测量法。它通过测量待测量与标准量之差 (通常该差值很小) 来得到待测量量值, 如图 1-3 所示。

图 1-3 中, P 为量程不大但灵敏度很高的偏差式仪表, 它指示的是待测量 x 与标准量 s

之间的差值 $\delta = x - s$, 即 $x = s + \delta$ 。只要 δ 足够小, 这种方法测量的准确度基本上取决于标准量的准确度, 同时它又省去了零位式测量中反复调节标准量大小以求平衡的步骤。因此, 它兼有偏差式测量法的测量速度快和零位式测量法准确度高的优点。微差式测量法除在实验室中用作精密测量外, 还广泛应用于生产线控制参数的测量上。例如, 直流稳压电源输出电压稳定度的测量原理如图1-4所示。直流稳压电源的输出电压 U_0 会随着市电的波动和负载的变化而有微小起伏(常用波纹系数表示起伏大小)。 V_2 为量程不大但灵敏度很高的电压表, U_B 表示由标准电源 U_S 获得的标准电压, U_0 为直流稳压电源的实际输出电压, U_S 是由电压表 V_2 测得的 U_0 与 U_B 的差值, 即输出电压随市电波动和负载变化而产生的微小起伏。

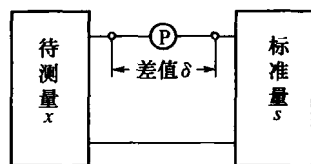


图 1-3 微差式测量法

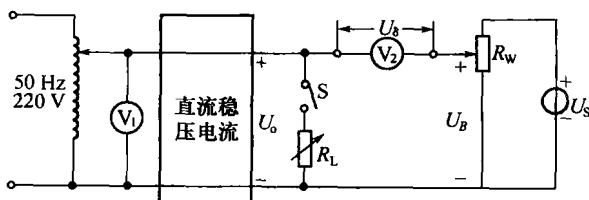


图 1-4 直流稳压电源输出电压稳定度的测量原理

3. 按被测量的性质分类

按被测量的性质分类有时域测量、频域测量、数据域测量和随机测量。

(1) 时域测量也叫做瞬态测量, 主要测量被测量随时间的变化规律。典型的例子是用示波器观察脉冲信号的上升沿、下降沿以及动态电路的暂态过程等。

(2) 频域测量也称为稳态测量, 主要目的是获取待测量与频率之间的关系。如用频谱分析仪分析信号的频谱, 测量放大器的幅频特性、相频特性等。

(3) 数据域测量也称为逻辑量测量, 主要是用逻辑分析仪等设备对数字量或电路的逻辑状态进行测量。数据域测量可以同时观察多条通道上的逻辑状态, 或者显示某条数据线上的时序波形, 还可以借助计算机分析大规模集成电路芯片的逻辑功能等。随着微电子技术发展的需要, 数据域测量及其测量智能化、自动化显得越来越重要。

(4) 随机测量也叫做统计测量, 主要是对各类噪声信号进行动态测量和统计分析。

除了上述几种常见的分类方法外, 还有其他一些分类方法, 如按照对测量精度的要求可以分为精密测量和工程测量; 按照测量时测量者对测量过程的干预程度分为自动测量和非自动测量; 按照被测量与测量结果获取地点的关系分为本地(原位)测量和远地测量(遥测); 按照被测量的属性分为电量测量和非电量测量等。

4. 检测方法的选择原则

在选择测量方法时, 要综合考虑下列主要因素:

(1) 从被测量本身的特点来考虑。例如, 按照被测量的性质可以分为时域测量、频域测量、数据域测量和随机测量四种。被测量的性质不同, 采用的测量仪器和测量方法当然不同。又如, 对被测对象的情况要了解清楚, 被测参数是否线性、数量级如何、对波形和频率有何要求、对测量过程的稳定性有无要求、有无抗干扰要求, 以及其他要求等。

(2)从测量所得的精确度和灵敏度来考虑。工程测量和精密测量对这两者的要求有所不同,要注意选择仪器、仪表的准确度等级,还要选择测量误差满足要求的测量技术。如果属于精密测量,还要按照误差理论的要求进行比较严格的数据处理。

(3)考虑测量环境是否符合测量设备和测量技术状况要求,尽量减少仪器、仪表对被测电路状态的影响。

(4)测量方法简单可靠,测量原理科学,尽量减少原理性误差。

在测量之前,必须先综合考虑以上诸方面的情况,恰当选择测量仪器、仪表及设备,采用合适的测量方法和测量技术,才能较好地完成测量任务。

第三节 测量误差及其分类

一、测量误差的基本概念

1. 误差公理

在实际测量中,测量设备不准确、测量方法(手段)不完善、测量程序不规范及测量环境因素的影响,都会导致测量结果或多或少地偏离被测量的真值。测量结果与被测量真值之差就是测量误差。测量误差的存在是不可避免的,也就是说,“一切测量都具有误差,误差自始至终存在于所有科学实验之中”,这就是误差公理。人们研究测量误差的目的就是寻找产生误差的原因,认识误差的规律、性质,进而找出减小误差的途径与方法,以求获得尽可能接近真值的测量结果。

2. 真值

被测量本身所具有的真正值称之为真值。真值是一个理想的概念,一般是很难求取的。

3. 指定真值

由于真值是一个理想值,一般很难知道,所以一般用指定真值来代替真值。指定真值是指由国家设立的各种尽可能维持不变的实物标准(或基准),以法令的形式指定其所体现的量值作为计量单位的指定值,指定真值也叫做约定真值。

4. 实际值

实际测量中,不可能都直接与国家基准相比对,所以国家通过一系列的各级实物计量标准构成量值传递网,将国家基准所体现的计量单位逐级比较传递到日常工作仪器或量具上去。在每一级的比较中,都以上一级标准所体现的值作为准确无误的值,通常称为实际值,也叫做相对真值。

5. 标称值

测量器具上标定的数值称为标称值,如标准砝码上标出的 1 kg,标准电阻上标出的 1 Ω ,标准信号发生器刻度盘上标出的输出正弦波的频率 100 kHz 等。由于制造和测量精度不够以及环境等因素的影响,标称值并不一定等于它的真值或实际值。为此,在标出测量器具的标称值时,通常还要标出它的误差范围或准确度等级。如 XD-7 型低频信号发生器频率刻度的工作误差 $\leq \pm 3\% \pm 1$ Hz,如果在额定工作条件下该仪器频率刻度是 100 Hz,这就是它的标称值,而实际值是 $100 \times (1 \pm 3\%) \pm 1$ Hz,即实际值在 96 Hz 到 104 Hz 之间。

6. 示值

由测量器具指示的被测量值称为测量器具的示值,也称为测量值,它包括数值和单位。一般地说,示值与测量仪表的读数有区别,读数是仪器刻度盘上直接读到的数据。例如,以100分度表示50 mA的电流表,当指针指在刻度盘上的50处时,读数是50,而电流值是25 mA。为便于核查测量结果,在记录测量数据时,一般应记录仪表量程、读数和示值,对于数字显示仪表,通常示值和读数是统一的。

二、测量误差的分析

测量误差是不可避免的,下面分别从误差的表示方法、误差出现的规律、误差的来源、被测量随时间变化的速度、使用条件及误差与被测量的关系等方面来分析测量误差。

1. 按表示方法分析

按表示方法分析有绝对误差、相对误差和容许误差之分。

(1)绝对误差。绝对误差定义为示值与被测量真值之差,即

$$\Delta A = A_x - A_0 \quad (1-5)$$

式中, ΔA 为绝对误差; A_x 为示值,具体应用中可以用测量结果的测量值、标准量具的标称值代替; A_0 为被测量的真值,真值 A_0 一般很难得到,所以用实际值 A 代替被测量的真值 A_0 ,因而绝对误差更有实际意义的定义是

$$\Delta A = A_x - A \quad (1-6)$$

对于绝对误差,应注意下面几个特点:

①绝对误差是有单位的量,其单位与测量值和实际值相同。

②绝对误差是有符号的量,其符号表示测量值与实际值的大小关系,若测量值较实际值大,则绝对误差为正值;反之为负值。

③测量值与实际值之间的偏离程度和方向通过绝对误差来体现,但仅用绝对误差通常不能说明测量质量的好坏。例如,人体体温在37℃左右,若测量绝对误差为 $\Delta x = \pm 1$ ℃,这样的测量质量不能被接受,而如果测量1400℃左右的炉温,绝对误差能保持 ± 1 ℃,这样的测量质量就令人满意了。因此,为了表明测量结果的准确程度,一种方法是将测得值与绝对误差一起列出,如上面的例子可以写成37℃ ± 1 ℃和1400℃ ± 1 ℃;另一种方法就是用相对误差来表示。

在实际测量中,还经常用到修正值这个概念,其绝对值与绝对误差 Δx 相等,但符号相反,通常用符号 C 表示,为

$$C = -\Delta x = A - A_x \quad (1-7)$$

修正值给出的方式不一定是具体的数值,也可以是一条曲线、公式或数表,利用修正值和仪表示值,可得到被测量实际值

$$A = A_x + C \quad (1-8)$$

智能化仪器的优点之一就是可利用内部的微处理器存储修正值,并利用式(1-8)自动对被测量实际值进行修正。

(2)相对误差。相对误差用来说明测量精度的高低,可分为如下几种:

①实际相对误差。实际相对误差定义为绝对误差 Δx 与实际值 A 的百分比值,即

$$\gamma_A = \frac{\Delta x}{A} \times 100\% \quad (1-9)$$

②示值相对误差。示值相对误差定义为绝对误差 Δx 与示值 x 的百分比值,即

$$\gamma_x = \frac{\Delta x}{x} \times 100\% \quad (1-10)$$

③满度相对误差。满度相对误差定义为仪器量程内最大绝对误差 Δx_m 与测量仪器满度值 x_m 的百分比值,即

$$\gamma_m = \frac{\Delta x_m}{x_m} \times 100\% \quad (1-11)$$

满度相对误差也叫做满度误差或引用误差,通过满度误差实际上给出了仪表各量程内绝对误差的最大值,即

$$\Delta x_m = \gamma_m \times x_m \quad (1-12)$$

我国电工仪表的准确度等级 S 就是按满度相对误差 γ_m 分级的。按 γ_m 大小依次划分为 0.1, 0.2, 0.5, 1.0, 1.5, 2.5 及 5.0 七级,它们分别表示对应仪表的引用误差所不应超过的百分比。从仪表面板上的标志可以判断出仪表的等级,仪表的准确度等级和基本误差如表 1-1 所示。准确度等级的数值越小,仪表就越昂贵。

表 1-1 仪表的准确度等级和基本误差

准确度等级	0.1	0.2	0.5	1.0	1.5	2.5	5.0
基本误差	$\pm 0.1\%$	$\pm 0.2\%$	$\pm 0.5\%$	$\pm 1.0\%$	$\pm 1.5\%$	$\pm 2.5\%$	$\pm 5.0\%$

仪表的准确度在工程中也称为“精度”,准确度等级习惯上称为精度等级。根据仪表的等级可以确定测量的最大引用误差和最大绝对误差。例如,在正常情况下,用 0.5 级、量程为 100 °C 温度表来测量温度时,可能产生的最大绝对误差为

$$\Delta x_m = (\pm 0.5\%) \times x_m = \pm (0.5\% \times 100) \text{ °C} = \pm 0.5 \text{ °C}$$

在正常工作条件下,仪表的最大绝对误差多数是不变的,而示值相对误差 γ_x 随示值的减小而增大。例如用上述温度表来测量 80 °C 温度时,相对误差 $\gamma_x = (\pm 0.5/80) \times 100\% = \pm 0.525\%$,而用它来测量 10 °C 温度时,相对误差 $\gamma_x = (\pm 0.5/10) \times 100\% = \pm 5\%$ 。

例 1-1 某压力表准确度为 2.5 级,量程为 0~1.5 MPa,求:

- (1) 可能出现的最大满度相对误差 γ_m 。
- (2) 可能出现的最大绝对误差 Δx_m 为多少 kPa?
- (3) 测量结果显示为 0.70 MPa 时,可能出现的最大示值相对误差 γ_x 。

解 (1) 可能出现的最大满度相对误差可以从准确度等级直接得到,即 $\gamma_m = \pm 2.5\%$ 。

(2) $\Delta x_m = \gamma_m \times x_m = \pm 2.5\% \times 1.5 \text{ MPa} = \pm 0.0375 \text{ MPa} = \pm 37.5 \text{ kPa}$ 。

(3) $\gamma_x = \frac{\Delta x_m}{x} \times 100\% = \frac{\pm 0.0375}{0.70} \times 100\% = \pm 5.36\%$

由上例可知, γ_x 的绝对值总是大于(在满度时等于) γ_m 。

例 1-2 某电压表 $S = 1.5$, 试标出它在 0 V~100 V 量程中的最大绝对误差。

解 在 0 V~100 V 量程内上限值 $x_m = 100 \text{ V}$, 而 $S = 1.5$, 所以

$$\Delta x_m = \gamma_m \times x_m = \pm \frac{1.5}{100} \times 100 = \pm 1.5 \text{ V}$$

一般而言,测量仪器在同一量程不同示值处的绝对误差实际上未必处处相等,但对使用

者来讲,在没有修正值可利用的情况下,只能按最坏的情况处理,即认为仪器在同一量程各处的绝对误差是个常数且等于 Δx_m ,人们把这种处理叫做误差的整量化。由示值相对误差和满度相对误差表达式可以看出,为了减小测量中的示值误差,在进行量程选择时应尽可能使示值接近满度值,一般以示值不小于满度值的 $2/3$ 为宜。

例 1-3 某 1.0 级电流表,满度值 $x_m = 100 \mu\text{A}$,求测量值分别为 $x_1 = 100 \mu\text{A}$, $x_2 = 80 \mu\text{A}$, $x_3 = 20 \mu\text{A}$ 时的绝对误差和示值相对误差。

解 由满度相对误差表达式可得绝对误差为

$$\Delta x_m = \gamma_m \cdot x_m = \pm \frac{1}{100} \times 100 = \pm 1 \mu\text{A}$$

绝对误差是不随测量值改变的,而测量值分别为 $100 \mu\text{A}$ 、 $80 \mu\text{A}$ 、 $20 \mu\text{A}$ 时的示值相对误差各不相同,分别为

$$\gamma_{x_1} = \frac{\Delta x}{x_1} \times 100\% = \frac{\Delta x_m}{x_1} \times 100\% = \frac{\pm 1}{100} \times 100\% = \pm 1\%$$

$$\gamma_{x_2} = \frac{\Delta x}{x_2} \times 100\% = \frac{\Delta x_m}{x_2} \times 100\% = \frac{\pm 1}{80} \times 100\% = \pm 1.25\%$$

$$\gamma_{x_3} = \frac{\Delta x}{x_3} \times 100\% = \frac{\Delta x_m}{x_3} \times 100\% = \frac{\pm 1}{20} \times 100\% = \pm 5\%$$

由此可见,在同一量程内,测得值越小,示值相对误差越大。由此应当注意到,测量中所用仪表的准确度并不是测量结果的准确度,只有在示值与满度值相同时二者才相等,否则测得值的准确度数值将低于仪表的准确度等级。

例 1-4 要测量 $100 \text{ }^\circ\text{C}$ 的温度,现有 0.5 级、测量范围为 $0 \sim 300 \text{ }^\circ\text{C}$ 和 1.0 级、测量范围为 $0 \sim 100 \text{ }^\circ\text{C}$ 的两种温度计,试分析各自产生的示值误差。

解 0.5 级温度计,可能产生的最大绝对误差为

$$\Delta x_{m1} = \gamma_{m1} \cdot x_{m1} = \pm \frac{S_1}{100} \cdot x_{m1} = \pm \frac{0.5}{100} \times 300 = \pm 1.5 \text{ }^\circ\text{C}$$

按照误差整量化原则,认为该量程内绝对误差为

$$\Delta x_1 = \Delta x_{m1} = \pm 1.5 \text{ }^\circ\text{C}$$

因此示值相对误差

$$\gamma_{x_1} = \frac{\Delta x_1}{x_1} \times 100\% = \frac{\pm 1.5}{100} \times 100\% = \pm 1.5\%$$

同样可以算出用 1.0 级温度计可能产生的绝对误差和示值相对误差为

$$\Delta x_2 = \Delta x_{m2} = \gamma_{m2} \cdot x_{m2} = \pm \frac{1.0}{100} \times 100 = \pm 1.0 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$\gamma_{x_2} = \frac{\Delta x_2}{x_2} \times 100\% = \frac{\pm 1.0}{100} \times 100\% = \pm 1.0\%$$

由此可见,用 1.0 级低量程温度计测量所产生的示值相对误差反而小一些,因此选用 1.0 级温度计较为合适。

在实际测量操作时,一般应先在大量程下测得被测量的大致数值,而后选择合适的量程再进行测量,以尽可能减小相对误差。

(3) 容许误差。容许误差是指根据技术条件的要求,规定测量仪器误差不应超过的最大范围,有时也称为仪器误差。

2. 按照被测量随时间变化的速度分析

(1) 静态误差。静态误差是指在被测量随时间变化很慢的过程中,被测量随时间变化很缓慢或基本不变时的测量误差。

(2) 动态误差。动态误差是指在被测量随时间变化很快的过程中,测量所产生的附加误差。动态误差是由于有惯性、有纯滞后,因而不能让输入信号的所有成分全部通过,或者输入信号中不同频率成分通过时受到不同程度衰减时引起的。

3. 按使用条件分析

(1) 基本误差。基本误差是指测量系统在规定的标准条件下使用时所产生的误差。所谓标准条件,一般是测试系统在实验室标定刻度时所保持的工作条件,如电源电压($220 \pm 5\%$) V,温度(20 ± 5) $^{\circ}\text{C}$,湿度小于80%,电源频率50 Hz等。

基本误差是指测试系统在额定条件下工作时所具有的误差,测试系统的精确度是由基本误差决定的。

(2) 附加误差。当使用条件偏离规定的标准条件时,除基本误差外还会产生附加误差。例如,由于温度超过标准引起的温度附加误差以及使用电压不标准而引起的电源附加误差等,这些附加误差使用时叠加到基本误差上去。

三、误差的分类与处理

误差是不可避免的,但要想办法尽量消除或减小测量误差。下面将分别从系统误差、随机误差及粗大误差三方面来考虑如何消除或减小误差。

1. 系统误差及其消除或减小

系统误差是在一定的测量条件下,测量值中含有固定不变或按一定规律变化的误差。系统误差主要由以下几方面因素引起:材料、零部件及工艺缺陷;环境温度、湿度、压力的变化以及其他外界干扰等。其变化规律服从某种已知函数,它表明了一个测量结果偏离真值或实际值的程度,系统误差越小,测量就越准确,所以经常用正确度来表征系统误差的大小。

产生系统误差的来源多种多样,因此要减小系统误差只能根据不同的目的,对测量仪器仪表、测量条件、测量方法及步骤进行全面分析,以发现系统误差,进而分析系统误差,然后采用相应的措施将系统误差消除或减弱到与测量要求相适应的程度。

(1) 从产生系统误差的来源上考虑。从产生系统误差的来源上考虑是减小系统误差的最基本的方法。该方法要求实验者对整个测量过程要有一个全面仔细的分析,弄清楚可能产生系统误差的各种因素,然后在测量过程中予以消除。产生系统误差的来源多种多样,因此要消除系统误差只能根据不同的测量目的,对测量仪器误差加以消除。具体地说,选择准确度等级高的仪器设备以消除仪器的基本误差;使仪器设备工作在规定条件下;使用正确调零、预热以消除仪器设备的附加误差;选择合理的测量方法,设计正确的测量步骤以消除方法误差和理论误差;提高测量人员的测量素质,改善测量条件(选用智能化、数字化仪器仪表等)以消除人员误差。

(2) 利用修正的方法消除。利用修正的方法是消除或减弱系统误差的常用方法,该方法在智能化仪表中得到了广泛应用。所谓修正的方法就是在测量前或测量过程中,求取某类误差的修正值,而在测量的数据处理过程中手动或自动地将测量读数或结果与修正值相加,从测量读数或结果中消除或减弱该类系统误差。

(3) 利用特殊的测量方法消除。系统误差的特点是大小、方向恒定不变,具有预见性,