



中国电子学会物联网专家委员会推荐

高职高专物联网应用技术专业“十二五”规划教材

传感器技术及应用

Sensors Technology and Applications

主 编 王来志 王万刚



西安电子科技大学出版社
<http://www.xduph.com>

中国电子学会物联网专家委员会推荐
高职高专物联网应用技术专业“十二五”规划教材

传感器技术及应用

主 编 王来志 王万刚
副主编 汤 平 刘显文
主 审 曹 毅 彭 勇

西安电子科技大学出版社

内 容 简 介

本书共 8 个项目, 包含 20 个学习任务, 其中 9 个任务为传感器基本知识学习, 11 个为完整制作任务, 各项目(除项目一外)又大体包括“项目学习引导”、“原理图分析”、“电路仿真”、“PCB 图绘制”、“电路制作”、“电路调试”等环节。除此之外, 书中还提供了元器件清单、元器件实物照片、电路制作技巧及制作注意事项等内容。

本书可作为高职院校相关专业的教材, 也可作为传感器技术制作爱好者的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

传感器技术及应用/王来志, 王万刚主编. —西安: 西安电子科技大学出版社, 2015. 2

高职高专物联网应用技术专业“十二五”规划教材

ISBN 978 - 7 - 5606 - 3533 - 0

I. ① 传… II. ① 王… ② 王… III. ① 传感器—高等教育—教材 IV. ① TP212

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 022255 号

策划编辑 王 飞

责任编辑 雷鸿俊

出版发行 西安电子科技大学出版社(西安市太白南路 2 号)

电 话 (029)88242885 88201467 邮 编 710071

网 址 www.xduph.com

电子邮箱 xdupfxb001@163.com

经 销 新华书店

印刷单位 陕西天意印务有限责任公司

版 次 2015 年 2 月第 1 版 2015 年 2 月第 1 次印刷

开 本 787 毫米×1092 毫米 1/16 印张 12.25

字 数 286 千字

印 数 1~3000 册

定 价 20.00 元

ISBN 978 - 7 - 5606 - 3533 - 0/

XDUP 3825001 - 1

*** 如有印装问题可调换 ***

高职高专物联网应用技术专业 “十二五”规划教材编委会

主 任 曹 毅
副 主 任 陈 良 乐明于
秘 书 长 彭 勇
副秘书长 王小平
编 委(按姓氏笔画排名):

王万刚	王田甜	王来志	王建勇
王辉春	王 黎	汤 平	向舜然
刘 勇	刘显文	杨 坝	杨 槐
杨 靖	张建碧	李继碧	李 静
罗 勇	郑俏娟	单光庆	易国键
姚 进	贺晓辉	唐中剑	唐德军
徐 欣	黄爱民	章 殷	曹 俊
董 灿	蔡 川	谭 锋	

前言

信息科学是众多领域中发展最快的一门科学，也是最具有发展活力的学科之一。信息科学四大环节(信息捕获、提取、传输、处理)的技术是人们最关心的，对社会发展和进步也有十分重要的作用。其最前端的“阵地”或手段是信息捕获，而捕获的主要工具就是传感器。传感器作为测控系统中对象信息的入口，在现代化工业生产中的重要性已被人们充分认识。

“传感器技术及应用”是理工科类高职高专院校物联网技术、电子技术、电子信息工程、计算机控制、机电一体化等专业的基础课程。本书是教育部人文社会科学研究项目(12YJA880005)的研究成果之一。在编写过程中，编者坚持“做中教、做中学”的原则，打破学科体系对知识内容的固化概念，以能力培养为主线，依据技术领域和企业岗位的需求，根据课程教学目标，将“传感器技术”、“自动控制技术”、“单片机技术”、“电子技能实训”综合起来，在多年教学讲义的基础上，对原来课程内容重新构思、优化，最终形成了本书。

本书共8个项目，包含20个学习任务，这些项目涵盖了各种常见传感器及其应用领域的相关知识，采用“项目引导学习—设计要求分析—制作(原理图、仿真图、PCB图)—安装调试”的工作流程，以此增强学生的动手能力，实现学校与企业的零对接，同时也凸显课程的职业特色。本书与国内现有教材相比具有以下特色：

- (1) 本书将传感器与检测技术有机地结合起来，使学生能够更全面地学习和掌握信号传感、信号采集、信号转换、信号处理及信号传输的整个过程。
- (2) 符合高职教育的特点。以实际应用为目的，以必须、够用为度，以强化应用为教学重点，强调专业技术应用能力的训练，增加了实训操作环节。
- (3) 坚持“做中教、做中学”的原则，实现学校与企业的零对接。其中11个制作任务每个都可制作一个完整的产品，实用性强。
- (4) 书中选用的制作任务具有很强的拓展性，在原有电路上只要稍加扩展就能实现其他应用。

此外，本书还配备了电子教案、习题答案、PCB文件以及部分项目的演示视频等资源，需要的读者可登录西安电子科技大学出版社网站(<http://www.xduph.com>)进行下载。

本书由重庆城市管理职业学院王来志、王万刚教授担任主编，由重庆航天航空职业技术学院汤平、重庆艾申特电子科技有限公司刘显文高级工程师担任副主编。其中项目二的任务二、项目四和项目八的任务二由王万刚编写，其余部分由王来志编写，全书由重庆城市管理职业学院曹毅、彭勇完成统稿并担任主审。王小平、王建勇、杨坝、姚进、蔡川、张

目 录

项目一 检测技术及传感器的基本概念	1	内容五 半导体热敏电阻	82
任务一 检测及误差的基本概念	1	内容六 负温度系数热敏电阻	83
内容一 测量方法及检测系统的基本概念	2	任务二 温度报警器	85
内容二 误差的基本概念	5	内容一 测温电路	85
任务二 传感器的基本概念	13	内容二 温度报警器的制作与调试	85
内容一 传感器的定义与组成	13	任务三 恒温控制器	86
内容二 传感器的分类	14	内容一 工作原理	86
内容三 传感器的基本特性	14	内容二 恒温控制器的制作与调试	89
内容四 传感器的应用领域及其发展	18	思考与练习	91
内容五 传感器的正确选用	21	项目四 温度传感器	92
内容六 传感器接口电路	22	任务一 项目学习引导	92
思考与练习	24	内容一 基本概念	92
项目二 力传感器	26	内容二 温度传感器的分类及选用	94
任务一 项目学习引导	26	内容三 含水量的检测方法	96
内容一 应变式传感器	27	任务二 婴儿尿湿报警器	97
内容二 电感式传感器	36	内容一 工作原理	97
内容三 电容式传感器	46	内容二 尿湿报警器的制作与调试	98
内容四 压电式传感器	58	任务三 湿度测试仪	100
任务二 电子称重装置	67	思考与练习	102
内容一 工作原理	67	项目五 光电传感器	103
内容二 电子称重装置的制作与调试	70	任务一 项目学习引导	103
思考与练习	71	内容一 基本概念	103
项目三 温度传感器	73	内容二 光纤传感器	111
任务一 项目学习引导	73	任务二 自动照明装置	114
内容一 温度测量的概念	73	内容一 工作原理	114
内容二 热电偶传感器	74	内容二 自动照明装置的制作与调试	115
内容三 金属热电阻传感器	79	任务三 防盗报警器	116
内容四 集成温度传感器	80	内容一 工作原理	116
		内容二 防盗报警器的制作与调试	125

思考与练习	127	内容一 工作原理	157
项目六 气体传感器	128	内容二 遥控门铃的制作与调试	163
任务一 项目学习引导	128	思考与练习	165
内容一 基本概念	128	项目八 无线传感器	166
内容二 气体传感器的分类	129	任务一 项目学习引导	167
任务二 酒精检测器	132	内容一 基本概念	167
内容一 工作原理	132	内容二 无线传感器网络的关键技术	169
内容二 酒精检测仪的制作与调试	143	内容三 无线传感器网络的应用	174
任务三 煤气报警器	145	任务二 无线传感器节点制作	176
内容一 工作原理	145	内容一 基于 ZigBee 的无线传感器节点	176
内容二 煤气报警器的制作与调试	148	工作原理	176
思考与练习	148	内容二 无线传感器节点硬件电路设计	184
项目七 传感器与遥控装置	149	内容三 无线传感器节点软件系统设计	185
任务一 项目学习引导	149	思考与练习	187
内容一 红外探测的基本概念	149	参考文献	188
内容二 微波传感器的工作原理	152		
内容三 超声波传感器的工作原理	154		
任务二 声控遥控装置	157		

项目一 检测技术及传感器的基本概念

知识学习目标

- ▶ 掌握传感器的概念、组成及特点;
- ▶ 了解传感器的地位与作用;
- ▶ 掌握测量及误差的基本知识;
- ▶ 掌握传感器接口电路及其原理、调试方法。

实践训练目标

- ▶ 能根据误差选择合适(精度)的测量仪表;
- ▶ 会制作与调试基本的接口电路。

本项目主要学习传感器的概念、测量、误差及传感器接口电路等知识。通过本项目的学习,应明白传感器在现代测控系统中的地位、作用,知道传感器的定义,了解其发展趋势;掌握与测量有关的名词、测量的分类、误差的表示形式及能根据测量精度要求选择仪表;由于传感器是现代测控系统的感知元件,一般情况下,要通过接口电路实现传感器与控制电路的连接,所以接口电路也非常重要,尤其作为专科毕业生,应理解并熟练掌握接口电路的形式、原理及作用,在工作中,应能根据现象判断故障的位置。

在学习本项目之前,应复习一下电路基本理论、电子技术相关的知识,通过学习能制作一些简单的接口电路,以锻炼自己的动手能力和解决问题的能力。

任务一 检测及误差的基本概念

测量和检测问题广泛存在于各行各业,存在于生产、生活等领域,而且随着生产力水平与人类生活水平的不断提高,对测量和检测问题提出了越来越高的要求。一方面要求检测系统具有更高的速度、精度、可靠性和自动化水平,以便尽量减少人力,提高工作效率;另一方面要求检测系统具有更大的灵活性和适应性,并向多功能化、智能化方向发展。传感器的广泛使用使这些要求成为可能。传感器处于研究对象与测控系统的接口位置,是感知、获取检测信息的窗口,一切科学实验和生产过程,特别是自动检测和自动控制系统要获取的信息,都要通过传感器将其转换成容易传输与处理的电信号。

在工程实践和科学实验中提出的检测任务是指正确及时地掌握各种信息,大多数情况下是要获取被检测对象信息的大小,即被测量的大小,所以信息采集的主要含义就是测量和取得测量数据。为了有效地完成检测任务,必须掌握测量的基本概念、测量误差和数据处理等方面的理论及工程方法。

内容一 测量方法及检测系统的基本概念

一、测量的基本概念

在科学实验和工业生产中,为了及时了解实验进展情况、生产过程情况以及它们的结果,人们需要经常对一些物理量,如电流、电压、温度、压力、流量、液位等参数进行测量,这时人们就要选择合适的测量装置,采用一定的检测方法进行测量。

测量是人们借助于专门的设备,通过一定的方法,对被测对象收集信息、取得数据的过程。为了确定某一物理量的大小,就要进行比较,因此有时也把测量定义为“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倍数的过程”。如用 X 表示被测量, $\{X\}$ 表示被测量的数值即比值(含测量误差), $[X]$ 表示标准量,即测量单位,则上述定义用数学公式表示为

$$X = \{X\}[X] \quad (1-1)$$

测量的结果可以表现为数值,也可以表现为一条曲线或某种图形等。但不管以什么形式表现,测量结果总包含为数值(大小和符号)和单位两部分。例如,测得某一电流为 20 A,表明该被测量的数值为 20,单位为 A(安培)。

随着科学技术和生产力的发展,测量过程除了传统的比较过程外,还必须进行变换,把不容易直接测量的量变换为容易测量的量,把静态测量变为动态测量,因此,人们常把前面提到的简单的比较过程称为狭义的测量,而把能完成对被测量进行检出、变换、分析、处理、存储、控制和显示等功能的综合过程称为广义测量。

二、测量方法

测量方法是指实现测量过程所采用的具体方法。在测量过程中,由于测量对象、测量环境、测量参数的不同,因而会采用各种各样的测量仪表和测量方法。针对不同的测量任务进行具体分析,以找出切实可行的测量方法,这对测量工作是十分重要的。

对于测量方法,从不同的角度有不同的分类方法。根据获得测量值的方法可分为直接测量、间接测量和组合测量;根据测量的精度情况可分为等精度测量和非等精度测量;根据测量方式可分为偏差式测量、零位式测量和微差式测量;根据被测量变化快慢可分为静态测量和动态测量;根据测量敏感元件是否与被测介质接触可分为接触测量和非接触测量;根据测量系统是否向被测对象施加能量可分为主动式测量和被动式测量;等等。

1. 直接测量、间接测量和组合测量

(1) 直接测量。用事先分度或标定好的测量仪表,直接读取被测量值的方法称为直接测量。例如,用磁电式电流表测量电路的某一支路电流、用电压表测量电压、用温度计测量温度等,都属于直接测量。直接测量是工程技术中大量采用的方法,其优点是测量过程简单而又迅速,但不易达到很高的测量精度。

(2) 间接测量。首先对与被测量有确定函数关系的几个量进行测量,然后再将测量值代入函数关系式,经过计算得到所需结果,这种测量方法称为间接测量。例如,在测量直流功率时,根据 $P=UI$,先对 U 和 I 进行直接测量,再计算出功率 P 。间接测量测量手续

多,花费时间较长,一般用在直接测量不方便或没有相应直接测量仪表的场合。
(3) 组合测量。若被测量必须经过求解联立方程组才能得到最后结果,则这种测量方法称为组合测量。组合测量是一种特殊的精密测量方法,操作手续复杂,花费时间长,多用于科学实验等特殊场合。

2. 等精度测量和非等精度测量

用相同仪表与测量方法对同一被测量进行多次重复测量,称为等精度测量。用不同精度的仪表或不同的测量方法,或在环境条件相差很大时对同一被测量进行多次重复测量称为非等精度测量。

3. 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)决定被测量值,这种测量方法称为偏差式测量。仪表上有经过标准量具校准过的标尺或刻度盘。在测量时,利用仪表指针在标尺上的示值,读取被测量的数值。偏差式测量简单、迅速,但精度不高,这种测量方法广泛应用于工程测量中。

(2) 零位式测量。用已知的标准量去平衡或抵消被测量的作用,并用指零式仪表来检测测量系统的平衡状态,从而判定被测量值等于已知标准量的方法称为零位式测量。用天平测量物体的质量、用电位差计测量未知电压都属于零位式测量。在零位式测量中,标准量是一个可连续调节的量,被测量能够直接与标准量相比较,测量误差主要取决于标准量具的误差,因此可获得较高的测量精度。另外,指零机构愈灵敏,平衡的判断愈准确,愈有利于提高测量精度。但这种方法需要平衡操作,测量过程复杂,花费时间长,因此不适用于测量迅速变化的信号。

(3) 微差式测量。微差式测量综合了偏差式测量和零位式测量的优点。它将被测量 X 大部分作用先与已知的标准量 N 相比较,取得差值 Δ 后,再用偏差法测得此差值,则 $X = N + \Delta$ 。由于 $\Delta \ll N$,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。例如,测量稳压电源输出电压随负载电阻变化的情况时,可采用如图 1-1 所示的微差式测量方法。

图 1-1 中, R_r 和 E 分别表示稳压电源的内阻和电动势, R_L 为稳压电源的负载, E_1 、 R_1 和 R_w 表示电位差计的参数。在测量前先调整 R_1 ,使电位差计工作电流 I_1 为标准值,然后使稳压电源负载电阻 R_L 为额定值。调整 R_p 的活动触点,使毫伏表指示为零,这相当于事先用零位式测量出额定输出电压 U_0 。然后,增加或减少负载电阻 R_L 的值,负载变化所引起的稳压电源输出电压的微小波动值 ΔU 即可由毫伏表指示出来。根据稳压电源的输出电压 $U = U_0 + \Delta U$,稳压电源在各种负载下的输出值都可准确地测量出来。微差式测量的反应速度快,测量精度高,特别适合于在线控制参数的测量。

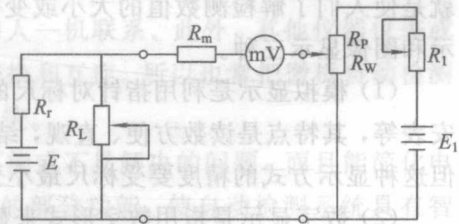


图 1-1 微差式测量原理图

三、检测系统的组成

在自动检测系统中,各个组成部分是以信息流的过程来划分的。检测时,首先获取被

测量的信息,并通过信息的转换把获得的信息变换为电量,然后进行一系列的处理,再用指示仪或显示仪将信息输出,或由计算机对数据进行处理,最后把信息输送给执行机构。所以一个检测系统主要分为信息的获得、信息的转换、信息的处理和信息的输出等几个部分。要完成这些功能主要依靠传感器、信号处理电路、显示装置、数据处理装置和执行机构等。其具体组成框图如图 1-2 所示。



图 1-2 自动检测系统的组成

1. 传感器

传感器是把被测量的非电量(如物理量、化学量、生物量等)变换为另一种与之有确定对应关系并且容易测量的量(通常为电学量)的装置。它是一种获得信息的重要手段,它所获得信息的正确与否,关系到整个检测系统的精度,因而在非电量检测系统中占有重要的地位。

2. 信号处理电路

通常传感器输出信号是微弱的,需要由信号处理电路加以放大、调制、解调、滤波、运算以及进行数字化处理等。信号处理电路的主要作用就是把传感器输出的电学量变成具有一定功率的模拟电压(或电流)信号或数字信号,以推动后级的输出显示或记录设备、数据处理装置及执行机构。

根据测量对象和显示方法的不同,信号处理电路可以是简单的传输电缆,也可以是由许多电子元件组成的数据采集卡,甚至是包括计算机在内的装置。

3. 显示装置

测量的目的是使人们了解被测量的数值,所以必须有显示装置。显示装置的主要作用就是使人们了解检测数值的大小或变化的过程。目前常用的显示方式有模拟显示、数字显示和图像显示三种。

(1) 模拟显示是利用指针对标尺的相对位置来表示被测量数值的大小,如毫伏表、毫安表等,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使用。但这种显示方式的精度要受标尺最小分度的限制,而且读数时易引入主观误差。

(2) 数字显示是指用数字形式来显示测量值,目前大多采用 LED 发光数码管或液晶显示屏等,如数字电压表。这类检测仪器还可附加打印机,打印记录测量数值,并易于计算机联机,使数据处理更加方便。

(3) 图像显示是指用屏幕显示(CRT)读数或被测参数变化的曲线,主要用于计算机自动检测系统中。如果被测量处于动态变化中,用一般的显示仪表读数就十分困难,这时可将输出信号送给计算机进行图像显示或送至记录仪,从而描绘出被测量随时间变化的曲线,并以之作为检测结果,供分析使用。常用的自动记录仪器有笔式记录仪、光线示波器、磁带记录仪和计算机等。

4. 数据处理装置和执行机构

数据处理装置就是利用微机技术，对被测结果进行处理、运算、分析，对动态测试结果进行频谱、幅值和能量谱分析等。

在自动测控系统中，经信号处理电路输出的与被测量对应的电压或电流信号还可以驱动某些执行机构动作，为自动控制系统提供控制信号。

随着计算机技术的飞跃发展，微机在自动检测系统中已得到了非常广泛的应用。微机在检测技术分支领域中的应用主要有自动测试仪器及系统、智能仪器仪表和虚拟仪器等。微机自动测控系统的典型结构如图 1-3 所示，它主要由微机基本子系统(包括 CPU、RAM、ROM、EPROM 等)、数据采集子系统及其接口、数据通信子系统及其接口、数据分配子系统及其接口和基本 I/O 子系统及其接口组成。

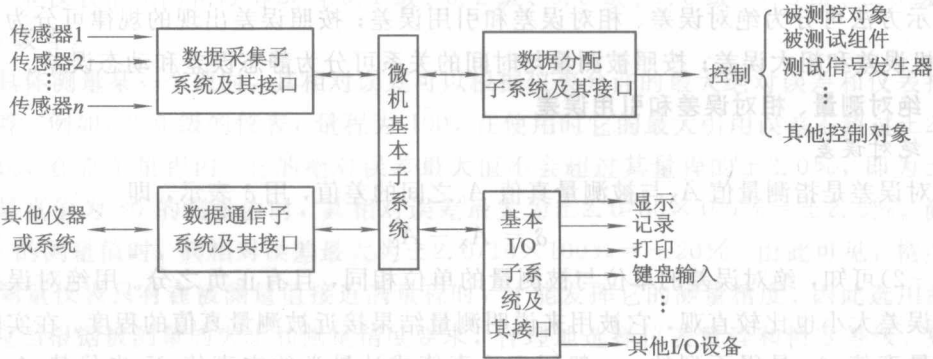


图 1-3 微机自动检测系统的典型结构

被检测的各种参数(例如温度、流量、压力、位移、速度等)由传感器变换成易于后续处理的电信号。如果传感器输出信号太弱或信号质量不高，则应经过前端预处理电路进行放大、滤波等，然后经过数据采集子系统转换成数字量，并通过接口送入微机子系统，经过微机运算、变换处理后，由数据分配子系统和接口输出到执行机构，以实现要求的自动控制；或由基本 I/O 子系统及其接口输出(显示、记录、打印或绘制成各种图表、曲线等)。另外，基本 I/O 子系统还可完成状态、参数的设置和人—机联系。此外，其他仪器仪表或系统通过通信子系统及其接口完成相互之间的信息交换和互连。所以也常把微机自动检测系统称为计算机数据采集系统，或简称为数据采集系统。

微机自动检测技术不仅能解决传统的检测技术不能或不易解决的问题，而且能简化电路、增加功能、提高精度和可靠性等，还能实现人脑的部分功能，使自动检测系统具有智能化，实现代替人工的自动检测目的。随着微机自动检测技术的不断发展，自动检测系统会变得更加智能化和多功能化。

内容二 误差的基本概念

一、测量误差

在检测过程中，不论采用什么样的测量方式和方法，也不论采用什么样的测量仪表，

由于测量仪表本身不够准确,测量方法不够完善,以及测量者本人经验不足,人的感觉器官受到局限等原因,都会使测量结果与被测量的真值之间存在着差异,这个差值就称为测量误差。测量误差的主要来源可以概括为工具误差(又称仪器误差)、环境误差、方法误差和人员误差等。

测量的目的就是求得与被测量真值最接近的测量值,在合理的前提下,这个值越逼近真值越好。但不管怎么样,测量误差不可能为零。在实际测量中,只需达到相应的精确度就可以了,并不是精确度越高越好。必须清楚地知道,提高测量精确度要付出人力、物力,是以牺牲测量可靠性为代价的。那种不计工本,不顾场合,一味追求越准越好的做法是不可取的,要有技术与经济兼顾的意识,应追求最高的性价比。

为了便于对误差进行分析和处理,人们通常把测量误差从不同角度进行分类。按照误差的表示方法可分为绝对误差、相对误差和引用误差;按照误差出现的规律可分为系统误差、随机误差和粗大误差;按照被测量与时间的关系可分为静态误差和动态误差。

1. 绝对测量、相对误差和引用误差

1) 绝对误差

绝对误差是指测量值 A_x 与被测量真值 A_0 之间的差值,用 δ 表示,即

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

由式(1-2)可知,绝对误差的单位与被测量的单位相同,且有正负之分。用绝对误差表示仪表的误差大小也比较直观,它被用来说明测量结果接近被测量真值的程度。在实际使用中,被测量真值 A_0 是得不到的,一般用理论真值或计量学约定真值 X_0 来代替 A_0 ,则式(1-2)可写成

$$\delta = A_x - X_0 \quad (1-3)$$

绝对误差不能作为衡量测量精确度的标准,例如用一个电压表测量 200 V 电压,绝对误差为 +1 V,而用另一个电压表测量 10 V 电压,绝对误差为 +0.5 V,前者的绝对误差虽然大于后者,但误差值相对于被测量值却是后者大于前者,即两者的测量精确度相差较大,为此人们引入了相对误差。

2) 相对误差

所谓相对误差(用 γ 表示),是指绝对误差 δ 与被测量真值 X_0 的百分比,即

$$\gamma = \frac{\delta}{X_0} \times 100\% \quad (1-4)$$

在上面的例子中,

$$\gamma_1 = \frac{1}{200} \times 100\% = 0.5\% \quad \gamma_2 = \frac{0.5}{10} \times 100\% = 5\%$$

$\gamma_1 < \gamma_2$, 所以相对误差比绝对误差能更好地说明测量的精确程度。

在实际测量中,由于被测量真值是未知的,而指示值又很接近真值,因此也可以用指示值 A_x 代替真值 X_0 来计算相对误差。

一般情况下,使用相对误差来说明不同测量结果的准确程度,即用来评定某一测量值的精确度,但不适用于衡量测量仪表本身的质量。因为同一台仪表可以用来测量许多不同真值的被测量,在整个测量范围内的相对误差不是一个定值。随着被测量的减小,相对误差变大。为了更合理地评价仪表质量,采用了引用误差的概念。

3) 引用误差

引用误差是绝对误差 δ 与仪表量程 L 的比值, 通常以百分数表示, 即

$$\gamma_0 = \frac{\delta}{L} \times 100\% \quad (1-5)$$

如果以测量仪表整个量程中可能出现的绝对误差最大值 δ_m 代替 δ , 则可得到最大引用误差 γ_{0m} , 即

$$\gamma_{0m} = \frac{\delta_m}{L} \times 100\% \quad (1-6)$$

对一台确定的仪表或检测系统, 出现的绝对误差最大值是一个定值, 所以其最大引用误差就是一个定值, 由仪表本身性能所决定。一般用最大引用误差来确定测量仪表的精度等级。工业仪表常见的精度等级有 0.1 级、0.2 级、0.5 级、1.0 级、1.5 级、2.0 级、2.5 级、5.0 级等。

在具体测量某一个值时, 其相对误差可以根据仪表允许的最大绝对误差和仪表指示值进行计算。例如, 2.0 级的仪表, 量程为 100, 在使用时它的最大引用误差不超过 $\pm 2.0\%$, 也就是说, 在整个量程内, 它的绝对误差最大值不会超过其量程的 $\pm 2.0\%$, 即为 ± 2.0 。用它测量真值为 80 的测量值时, 其相对误差最大为 $\pm 2.0/80 \times 100\% = \pm 2.5\%$ 。测量真值为 10 的测量值时, 其相对误差最大为 $\pm 2.0/10 \times 100\% = \pm 20\%$ 。由此可见, 精度等级已知的测量仪表只有在被测量值接近满量程时, 才能发挥它的测量精度。因此选用测量仪表时, 应当根据被测量的大小和测量精度要求, 合理地选择仪表量程和精度等级, 只有这样才能提高测量精度, 达到最好的性价比。

2. 系统误差、随机误差和粗大误差

1) 系统误差

在相同条件下, 多次重复测量同一量时, 保持恒定或遵循某种规律变化的误差称为系统误差。其误差的数值和符号不变的称为恒值系统误差, 按照一定规律变化的称为变值系统误差。变值系统误差又可分为累进性的、周期性的和按复杂规律变化的等多种类型。

检测装置本身性能不完善、测量方法不当、对仪器的使用不当、环境条件的变化等原因都可能产生系统误差。如果能设法消除这些原因, 则系统误差也就被消除了。例如, 由于仪表刻度起始位不对产生的误差, 只要在测量前校正指针零位即可消除。

系统误差的大小表明测量结果的准确度。系统误差越小, 则测量结果越准确。系统误差的大小说明了测量结果偏离被测量真值的程度。系统误差是有规律的, 因此可通过实验或分析的方法, 查明其变化规律和产生原因, 通过对测量值的修正, 或者采用一定的预防措施, 就能够消除或减小它对测量结果的影响。

2) 随机误差

在相同条件下, 多次测量同一量时, 其误差的大小和符号以不可预见的方式变化, 这种误差称为随机误差。

随机误差是由很多复杂因素的微小变化的总和所引起的, 其分析起来比较困难。但是, 随机误差具有随机变量的一切特点, 在一定条件下服从统计规律, 因此通过多次测量后, 对其总和可以用统计规律来描述, 从而在理论上估计出其对测量结果的影响。随机误差的大小表明测量结果重复一致的程度, 即测量结果的分散性。通常, 用精密度表示随机

误差的大小。随机误差大,测量结果分散,精密度低;反之,测量结果的重复性好,精密度高。

3) 粗大误差

明显歪曲测量结果的误差称为粗大误差,又称过失误差。含有粗大误差的测量值称为坏值或异常值。在实际测量中,由于粗大误差的误差数值特别大,容易从测量结果中发现,一经发现粗大误差,可以认为该次测量无效,坏值应从测量结果中剔除,从而消除它对测量结果的影响。

粗大误差主要是人为因素造成的。例如,测量人员工作时的疏忽大意,出现了读数错误、记录错误、计算错误或操作不当等。另外,测量方法不恰当,测量条件意外地突然变化,也可能造成粗大误差。在分析测量结果时,就应先分析有没有粗大误差,先把坏值从测量值中剔除,然后再进行系统误差和随机误差的分析。

3. 静态误差和动态误差

静态误差是指在测量过程中,被测量随时间变化很缓慢或基本上不变化的测量误差。以上所介绍的测量误差均属于静态误差。

在被测量随时间变化时进行测量所产生的附加误差称为动态误差。由于检测系统(或仪表)对动态信号的响应需要一定时间,输出信号来不及立即反映输入信号的量值,加上传感器对不同频率的输入信号的增益和时间延迟不同,因此输出信号与输入信号的波形将不完全一致而造成动态误差。在实际应用中,应尽量选用动态特性好的仪表,以减小动态误差。

二、误差的处理及消除方法

从工程实践可知,测量数据中含有系统误差和随机误差,有时还含有粗大误差。它们的性质不同,对测量结果的影响及处理方法也不同。在测量中,对测量数据进行处理时,首先判断测量数据中是否含有粗大误差,如有,则必须加以剔除。再看数据中是否存在系统误差,对系统误差可设法消除或加以修正。对排除了系统误差和粗大误差的测量数据,则利用随机误差性质进行处理。总之,对于不同情况的测量数据,首先要加以分析研究,判断情况,再经综合整理,得出合乎科学的结果。

1. 随机误差的处理

在相同条件下,对某个量重复进行多次测量,排除系统误差和粗大误差后,如果测量数据仍出现不稳定现象,则存在随机误差。

在等精度测量情况下,得到 n 个测量值 $x_1, x_2, \dots, x_n$,设只含有随机误差 $\delta_1, \delta_2, \dots, \delta_n$,这组测量值或随机误差都是随机事件,可以用概率数理统计的方法来处理。随机误差的处理目的就是这些随机数据中求出最接近真值的值,对数据精密度(或可信度)的高低进行评定并给出测量结果。

测量实践表明,多数测量的随机误差具有以下特征:

- (1) 绝对值小的随机误差出现的概率大于绝对值大的随机误差出现的概率。
- (2) 随机误差的绝对值不会超出一定界限。
- (3) 测量次数 n 很大时,绝对值相等、符号相反的随机误差出现的概率相等,当 $n \rightarrow \infty$ 时,随机误差的代数和趋近于零。

随机误差的上述特征,说明其分布是单一峰值的和有界的,且当测量次数无穷大时,这类误差还具有对称性(即抵偿性),所以测量过程中产生的随机误差服从正态分布规律。其分布密度函数为

$$f(\delta) = \frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{\delta^2}{2\sigma^2}} \quad (1-7)$$

式中: δ 是随机误差, $\delta = x - x_0$ (x 为测量值, x_0 为测量值的真值); σ 是方均根误差,或称标准误差。式(1-7)称为高斯误差方程。标准误差 σ 可由下式求得:

$$\sigma = \lim_{n \rightarrow \infty} \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - x_0)^2} = \lim_{n \rightarrow \infty} \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \delta_i^2} \quad (1-8)$$

计算 σ 时,必须已知真值 x_0 ,并且需要进行无限多次等精度重复测量。这显然是很难做到的。

根据长期的实践经验,人们公认,一组等精度的重复测量值的算术平均值最接近被测量的真值,而算术平均值很容易根据测量结果求得,即

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i = \frac{x_1 + x_2 + \dots + x_n}{n} \quad (1-9)$$

因此,可以利用算术平均值 $\bar{x}$ 代替真值 x_0 来计算式(1-8)中的 δ_i 。此时,式(1-8)中的 $\delta_i = x_i - x_0$ 就可改换成 $v_i = x_i - \bar{x}$, v_i 称为剩余误差。不论 n 为何值,总有:

$$\sum_{i=1}^n v_i = \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x}) = \sum_{i=1}^n x_i - \sum_{i=1}^n \bar{x} = n\bar{x} - n\bar{x} = 0 \quad (1-10)$$

由此可以看出,虽然可求得 n 个剩余误差,但实际上它们之中只有 $n-1$ 个是独立的。考虑到这一点,测量次数 n 为有限值时,标准误差的估计值 σ_s 可由下式计算:

$$\sigma_s = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n v_i^2} \quad (1-11)$$

式(1-11)为贝塞尔公式。在一般情况下,我们对 σ 和 σ_s 并不加以严格区分,统称为标准误差。

标准误差 σ 的大小可以表示测量结果的分散程度。图1-4为不同 σ 下的正态分布曲线。由图可见: σ 愈小,分布曲线愈陡峭,说明随机变量的分散性小,测量精度高;反之, σ 愈大,分布曲线愈平坦,随机变量的分散性也大,则精度也低。

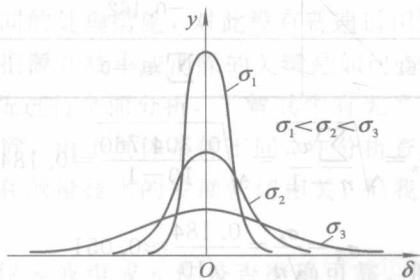


图1-4 不同 σ 下的正态分布曲线

对被测量进行 m 组的“多次测量”后(每组测量 n 次),各组所得的算术平均值 $\bar{x}_1, \bar{x}_2, \dots, \bar{x}_m$ 围绕真值 L 有一定的分散性,也是随机变量。算术平均值的精度可由算术平均值的