

现代机电技术系列教材

XIANDAI JIDIANJISHU XILIE JIAOCAI

传感器与检测技术

● 主编 芮延年

机电

◆ 苏州大学出版社

《现代机电技术系列教材》

传感器与检测技术

主编 芮延年

编著 宋天麟 任 晓 刘和剑
曹丰文 高育芳

主审 顾 豫

苏州大学出版社

图书在版编目(CIP)数据

传感器与检测技术/芮延年主编. —苏州:苏州大学出版社,2005.3

(现代机电技术系列教材)

ISBN 7-81090-454-X

I. 传… II. 芮… III. 传感器-高等学校-教材
IV. TP212

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2005)第 015586 号

内容提要

本书由浅入深地介绍了传感器与检测技术的基本原理及应用,按照顺序先后介绍了温度检测、压力检测、流量检测、机械位移检测、速度、加速度、振动检测、物位及厚度检测、视觉与图像检测、信号与工程测试理论基础以及传感器与检测技术的典型应用。

本书适合作高等学校机械工程及自动化、电气工程与自动化、电子与信息工程、计算机工程等工科专业的教材,也可供科研、设计单位及企业等有关工程技术人员参考。

传感器与检测技术

芮延年 主编

责任编辑 薛华强

苏州大学出版社出版发行

(地址:苏州市干将东路200号 邮编:215021)

常熟高专印刷有限公司印装

(地址:常熟市元和路98号 邮编:215500)

开本 787mm×1092mm 1/16 印张 14.25 字数 346 千

2005 年 3 月第 1 版 2005 年 3 月第 1 次印刷

ISBN 7-81090-454-X/TP·33(课) 定价:28.00 元

苏州大学版图书若有印装错误,本社负责调换

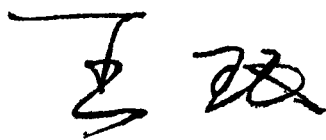
苏州大学出版社营销部 电话:0512-67258835

总 序

本世纪头 20 年,对我国来说,是一个必须紧紧抓住并且可以大有作为的重要战略机遇期。在世界科技进步日新月异、经济全球化深入发展、国际间生产要素重组和产业转移加快的新形势下,苏州作为全国经济发达地区之一,应利用有利的时机和条件加快发展。要实现更快更好的发展,就必须抓住新科技革命带来的又一次历史机遇,正确驾驭其发展趋势,全面实施科教兴市战略,大力推动科技进步,加强科技创新,加速科技成果向生产力的转化。尤为重要的是,要大力培养一支高素质的人才队伍,在更高的平台上实现科技和经济发展的新跨越。

部分相关高校从 21 世纪对科技创新和人才培养的新要求出发,认真贯彻落实教育部关于面向 21 世纪教学内容和课程体系改革的指示精神,组织有关专家、学者、教授编写了《现代机电技术系列教材》,包括《机电一体化原理及应用》、《现代设计方法及其应用》、《产品创新设计》、《工程制图》、《工程力学》、《现代工程材料基础》、《计算机集成制造》、《现代制造技术》、《先进电子制造技术》、《模具设计》、《模具制造》、《液压与气压传动》、《传感器与检测技术》、《机电专业毕业设计指导》等,很有必要,颇有价值。我们相信,《现代机电技术系列教材》的出版,必将对苏州地区乃至全国机电人才的培养以及机电工业的发展产生积极的促进作用。

南京航空航天大学博士生导师



2004 年 7 月

前 言

人们通常把电子计算机称作电脑,把传感器称作“电五官”,把执行器称作“电手足”,只有具备信息采集的传感器、信息处理的电脑、信息执行的执行器,才能构成完整的机电一体化系统。传感器是将位移、速度、加速度、力、角度、角速度、角加速度、距离等机械运动量转换成电信号,即引起电阻、电流、电压、电场及频率的变化,通过相应的信号检测装置将其反馈给控制与信息处理装置,因此,传感与检测是实现机电一体化的关键技术。

随着社会的发展和科学技术的进步,人们对传感器的需求越来越多,要求也越来越高,传感器发挥的作用也越来越大。目前,虽然相继有一些传感器方面的书籍以及手册等出版,但仍然不能满足社会的需求。为此,编者根据多年来在教学、科研、应用中掌握的丰富的理论知识与实践经验,在学习、借鉴与总结国内外研制、使用传感器文献资料的基础上编写了《传感器与检测技术》一书。

本书在充分介绍一些传统传感器内容的同时,也融合了当今新型传感器领域中的最新成果。全书共分十章。

第1章“概论” 主要介绍传感器与检测技术基本概念。

第2章“温度检测” 主要介绍温度传感器与检测原理及方法。

第3章“压力检测” 主要介绍应变、薄膜、压电、电容等传感器与检测原理及方法。

第4章“流量检测” 主要介绍流量的检测仪表与方法。

第5章“机械位移检测” 主要介绍电容、电感、差动和光栅等传感器与检测方法。

第6章“速度、加速度、振动检测” 主要介绍速度、加速度、振动等传感器与检测方法。

第7章“物位及厚度检测” 主要介绍浮力、静压、电容、超声波等传感器与检测方法。

第8章“视觉与图像检测” 主要介绍固态图像传感器、红外成像传感器与无损检测等视觉与图像检测技术。

第9章“信号与工程测试理论基础” 主要介绍信号的分类与描述、实验数据的表述方法、线性回归和相关分析原理及其应用。

第10章“传感器与检测技术典型应用” 通过数码照相机、机器人传感器、汽车传感器的介绍,使读者对传感器与检测技术有一个综合的了解。最后对传感与检测技术的发展进行了展望。

本书的第1章、第9章、第10章由苏州大学芮延年教授编写;第2章、第3章由苏州大学应用技术学院宋天麟副教授编写;第4章、第5章、第6章由苏州大学应用技术学院任晓

副教授、刘和剑讲师编写;第7章、第8章由苏州职业大学曹丰文副教授和苏州大学高育芳讲师编写。全书由苏州广播电视大学顾豫先生主审。

本书在编写过程中参阅了国内外同行的教材、参考书、手册和期刊文献,在此谨致谢意。夏威、吴冬敏、马艳平、朱如春、张志伟、任芸丹等研究生为本书的插图、整理做了大量工作,在此表示衷心的感谢!

由于时间仓促,加上作者水平有限,错漏及不足之处在所难免,敬请读者批评指正。

编 者

2005年1月

目 录

第 1 章 概 论	(1)
1.1 测试技术概述	(1)
1.2 常用检测方法	(4)
1.3 传感器的定义、组成及分类	(10)
1.4 传感器的基本特性	(13)
习题一	(16)
第 2 章 温度检测	(17)
2.1 温标及测温方法	(17)
2.2 膨胀式温度计	(19)
2.3 电阻式温度传感器	(21)
2.4 光纤温度传感器	(26)
2.5 红外温度传感器	(31)
2.6 温度传感器的应用实例	(33)
习题二	(35)
第 3 章 压力检测	(36)
3.1 压力的概念及单位	(36)
3.2 应变式压力计	(38)
3.3 薄膜应变片	(46)
3.4 压电式压力传感器	(49)
3.5 电容式传感器	(56)
3.6 霍尔式压力计	(63)
3.7 电子秤	(66)
3.8 压力传感器的应用实例	(68)
习题三	(69)
第 4 章 流量检测	(71)
4.1 流量的检测方法	(72)
4.2 流量计测量仪表	(77)
4.3 流量传感器的应用实例	(86)
习题四	(87)

第 5 章 机械位移检测	(88)
5.1 电容式位移传感器.....	(88)
5.2 电感式位移传感器.....	(91)
5.3 差动变压器式位移传感器.....	(94)
5.4 光栅位移传感器.....	(95)
5.5 位移传感器在检测中的应用	(100)
习题五.....	(103)
第 6 章 速度、加速度、振动检测	(104)
6.1 速度传感器	(104)
6.2 加速度传感器	(110)
6.3 振动检测	(113)
6.4 速度、加速度、振动传感器在检测中的应用	(120)
习题六.....	(122)
第 7 章 物位及厚度检测	(123)
7.1 浮力式物位检测	(123)
7.2 静压式物位检测	(125)
7.3 电容式物位检测	(127)
7.4 超声波物位传感器	(129)
7.5 光纤液位传感器	(130)
7.6 物位传感器应用实例	(132)
习题七.....	(135)
第 8 章 视觉与图像检测	(136)
8.1 视觉检测技术概述	(136)
8.2 固态图像传感器	(140)
8.3 图像传感器的应用	(147)
8.4 红外成像与无损检测	(152)
习题八.....	(155)
第 9 章 信号与工程测试理论基础	(156)
9.1 信号的分类与描述	(156)
9.2 周期信号与离散频谱	(157)
9.3 非周期信号与连续频谱	(163)
9.4 实验数据的表述方法	(171)
9.5 线性回归及其应用	(173)
9.6 相关分析及其应用	(178)

习题九.....	(182)
第 10 章 传感器与检测技术典型应用.....	(183)
10.1 数码照相机.....	(183)
10.2 机器人传感器.....	(186)
10.3 汽车传感器.....	(201)
10.4 传感与检测技术发展及展望.....	(210)
习题十.....	(211)
参考文献	(213)

第1章 概 论

1.1 测试技术概述

1.1.1 测试技术在工程中的作用

测试(measurement and test)是具有实验性质的测量。测量是为确定被测对象的量值而进行的实验过程。实验是对迄今未知事物的探索性认识过程。因此,测试技术包含测量和实验两个方面。凡需要考察事物的状态、变化和特征等,并要对其进行定量描述时,都离不开测试工作。

人类对客观世界的认识和改造活动总是以测试工作为基础的。测试是人类认识自然、掌握自然规律的实践途径之一,是科学研究中获得感性材料、接受自然信息的途径,是形成、发展和检验自然科学理论的实践基础。人类早期在从事生产活动时,就已经对长度(距离)、面积、时间和质量进行了测量,其最初的计量单位或是和自身生理特点相联系(如长度),或是和自然环境相联系(如时间)。秦始皇在建立统一的中央政权以后,立即建立统一的度量衡制度,说明恰当的测试工作对生产发展和社会交往的重要性。在测试技术发展史中,应该着重提一下伽利略的功绩。伽利略不满意古代思想家对宇宙进行哲理性的定性描述,他主张观测和实验,对自然界的现象和运动规律进行定量的描述。他开创了实验科学,从而开创了近代意义上的自然科学。

工程技术中的研究对象往往十分复杂,有些问题至今还难以进行完善的理论分析和计算,必须依靠实验研究来解决实际问题。通过测试工作积累原始数据,是工程设计和研究中很艰巨、很重要的一项工作。

机械工业担负着装备国民经济各部门的任务。现代机械工业的发展,面临着新兴科学技术发展的挑战,宇宙、高能物理、红外、激光以及智能机器的发展,对机械工业部门提出了一系列新的课题。例如,一些特殊的机械装置(如宇航飞行器、激光器、核电站设备等)要求在给定的时间域内工作绝对可靠,元件具有高精度、高性能,这就要求生产厂商必须提供优良的设备。

另一方面,随着加工精度的提高和生产过程自动化的发展,现代机械加工过程已从单机自动化和自动生产线发展到柔性制造系统(FMS),并朝着无人化工厂方向发展。而且生产中除了加工后的自动测量外,还应包括在线测量,从备料到产品入库、包装等流程的全过程,以及设备管理、故障诊断和安全监控等。因此,先进的测试技术已成为生产系统中不可缺少的一个组成部分。

随着集成电路与计算机技术的发展,机械与电子相结合,形成所谓机电一体化系统。机电一体化(mechatronics)系统是在机械结构的主功能、动力功能、信息处理功能和控制功能的基础上引进了电子技术,是将机械装置和电子部件以及软件等有机地结合起来构成的系

统的总称。

机电一体化技术的兴起与发展,使机械产品的结构与功能产生了质的飞跃。机械产品由以往取代、延伸与放大人体力的作用,跃变到取代、延伸与加强人部分脑力的作用。与此同时,机械产品的制造过程也发生了飞跃。制造过程不仅包含物质流与能量流,而且包含了信息流。制造过程正在走向柔性化、集成化、智能化。柔性制造系统与计算机集成制造系统(CIMS)的出现与发展正是这一趋势的体现,而这一切的关键,就在于信息的获取、传输、存储、分析、处理和利用。

1.1.2 测试工作的任务

进行测试工作是为了获取有关研究对象的状态、运动和特征等方面的信息。信息(information)一般理解为消息、情报或知识。例如,语言文字是社会信息,商品情报是经济信息,遗传密码是生物信息等。然而,从物理学观点来看,信息是物质所固有的,是其客观存在或运动状态的特征。传输信息的载体称为信号(signal),信息蕴含于信号之中。例如古代的烽火,人们观察到的是光信号,它蕴涵的信息是“敌人来进攻了”。有些信息是可以直接检测的,而另外一些信息却不容易直接检测。例如,弹簧在外力作用下产生变形,其变形量是可以直接检测的;根据外力和变形,弹簧刚度也是容易计算的。但是对于一个回转圆盘的不平衡量的大小及其分布的信息却不易直接检测。然而,这种不平衡状态在回转时将使支承受受到附加动态力,用传感器检测支承的动载荷或振动信号,对它们进行加工、处理就可以获得圆盘不平衡量的大小和角度位置的信息。又例如,机械系统的动态特性(如机床动态特性)只有通过对外界激励和系统响应的测试才能求得。

被研究对象的信息量总是非常丰富的,测试工作又总是根据一定的目的和要求,获取有限的、观察者感兴趣的某些特定信息。例如,研究一个简单的单自由度质量-弹簧系统的微小自由振动,我们感兴趣的是该系统的固有频率和阻尼比。我们可以通过施加一定的激励而观察质量块的运动,这时并不去研究弹簧的微观表现。而当我们研究弹簧的疲劳问题时,有关材料的性质和缺陷(如微裂纹)的信息就是非常重要的了。测试工作总是要用最简便的方法获得和研究任务相联系的、最有用的、表征特性的有关信息,而不是企图获得该事物的全部信息。

信号是信息的载体。信息总是通过某些物理量的形式表现出来,这些物理量就是信号。例如,上述振动系统可以通过质量块的位移-时间关系来描述,质量块位移的时间历程(信号)就包含了该系统固有频率和阻尼比的信息。从信息的获取、变换、加工、传输、显示和记录等方面来看,以电量形式表示的电信号最为方便。所以本书中所指的信号,一般是指随时间变化的电信号。

信号中虽然携带着信息,但是信号中既含有我们所需的信息,也常常含有大量我们不感兴趣的其他信息,后者统称为干扰。相应地,对信号也有“有用”信号和“干扰”信号的提法,但这是相对的。在一种场合中我们认为是干扰的信号,在另一种场合中却可能是有用的信号。例如,齿轮噪声对工作环境是一种“污染”,但是齿轮噪声是齿轮副传动缺陷的一种表现,因此可以用来评价齿轮副的运行状态并用作故障诊断的依据。测试工作者的一个任务就是要从复杂的信号中提取有用的信息。

为了保存、传输、读取或反馈有用信息,我们常常把信号作必要的变换。以语言为例,语

言本身是人们表达思想的一种载体,用声波形式和约定的方式(词汇、语法等)来表达。为了便于保存和传输,人们把声波信号转换成电信号。为了传输和抗干扰,还将电信号变换为高频电磁波。在接收时,先要恢复原来的电信号,然后再用此电信号激励一个发声系统,才能获得相应的声波。这类复杂的变换无非是要达到一个目的,即把信息从信源点尽可能真实地传输到接收点。整个过程要求既不失真,也不受干扰。严格地说,是要在外界严重干扰的情况下,能够提取和辨识出信号中所包含的有用信息。

1.1.3 测试系统构成

测试系统由一些不同功能的环节组成,这些环节保证了由获取信号到提供观测的最必要的信号流程功能。图 1-1 是一测试系统最基本的组成原理方框图。

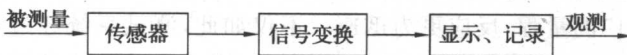


图 1-1 测试系统组成原理方框图

传感器作为测试系统的第一环节,将被测系统或过程中需要观测的信息转化为人们所熟悉的各种信号,这是测试过程必须实现的第一步任务。通常,传感器将被测物理量转换成以电量为主要形式的电信号。例如,将机械位移转换为电阻、电容或电感等电参数的变化;将振动或声音转换成电压或电荷的变化;等等。

信号变换部分是对传感器所送出的信号进行加工,如将电阻抗变为电压或电流、信号放大等。为了用传感器输出的信号进一步推动显示、记录仪器和控制器,或将此信号输入计算机作信号的分析 and 处理,需对传感器输出的信号作进一步变换。信号变换的具体内容很多,如用电桥将电路参量(如电阻、电容、电感)转换为可供传输、处理、显示和记录的电压或电流信号;利用滤波电路抑制噪声,选出有用信号;对在传感器及后续各环节中出现的一些误差作必要的补偿和校正;信号送入计算机以前需经模/数转换及在计算机处理后送出时需经数/模转换;等等。经过这样的加工使传感器输出的信号变为合乎需要,便于传输、显示或记录以及可作进一步后续处理的信号。

显示与记录部分将所测信号变为一种能为人们所理解的形式,以供人们观测和分析。

上述测试系统各组成部分都是“功能块”的含义,在实际工作中,这些功能块所表达的具体装置或仪器的伸缩性是很大的。例如,信号变换部分有时可以是由很多仪器组合成的一个完成特定功能的复杂群体;有时却可能简单到仅有一个变换电路,甚至可能仅是一根导线。由于信号分析和处理理论以及信息处理技术的迅速发展,特别是计算机技术在信号处理中的广泛应用,近年来已将信号的后续处理部分引入到测试系统,成为测试系统的有机组成部分,形成如图 1-2 所示的较为复杂的测试系统。这些信号处理部分无论是运用模拟信号处理还是数字信号处理技术,都是将所测信号进一步变换、运算,从原始的测试信号中提取表征被测对象某一方面信息的特征量,以利于人们对客观事物动态过程的更深入认识。

测试系统是要测出被测对象中人们所需要的某些特征性参量信号,不管中间经过多少环节的变换,在这些过程中必须忠实地把所需信息通过其载体信号传输到输出端。整个过程要求既不失真,也不受干扰。这就要求系统本身既具有不失真传输信号的能力,还需具有在外界各种干扰情况下能提取和辨识信号中所包含的有用信息的能力。

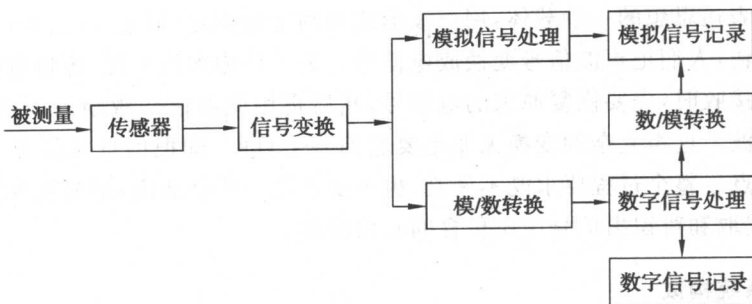


图 1-2 包括信号处理功能的测试系统

测试系统在一定程度上是人类感官的某种延伸,但它能获得比人的感官更客观、更准确的量值,具有更为宽广的量程,反应更为迅速。不仅如此,测试系统经过对所测结果的处理和分析把最能反映研究对象本质的特征量提取出来并加以处理,这就不仅是单纯的感官的延伸了,而是具有了选择、加工、处理以及判断的能力,也可以认为是一种智能的复制和延长。

1.2 常用检测方法

对于测量方法,从不同的角度出发,有不同的分类方法。本节重点阐述按测量手段分类的直接测量、间接测量和联立测量,以及按测量方式分类的偏差式测量、零位式测量和微差式测量。

1.2.1 按测量手段分类

1. 直接测量

直接测量法是工程上广泛采用的方法。这种在使用测量仪表进行测量时,对仪表读数不需要经过任何运算就能直接得到测量结果的方法,称为直接测量法。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而迅速,缺点是测量精度不易达到很高。

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,经过计算得到测量所需的结果,这种测量称为间接测量。例如,导线电阻率 ρ 的测量就是间接测量。由于 $\rho = \frac{r\pi d^2}{4l}$,其中 r 、 l 、 d 分别表示导线的电阻值、长度和直径,这时,只有先经过直接测量得到导线的 r 、 l 、 d 以后,再代入 ρ 的表达式,经计算得到最后所需要的结果 ρ 值。

这种测量过程手续较多,花费时间较长,但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

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。

联立测量操作手续复杂,花费时间长,是一种特殊的测量方法,只适用于科学实验或特殊场合。

1.2.2 按测量方式分类

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。它是间接方式实现被测量与标准量的比较。例如,用磁电式电流表测量电路中某支路的电流,用磁电式电压表测量某电气元件两端的电压等,就属于偏差式测量法。采用这种方法进行测量,测量过程比较简单、迅速,但是测量结果的精度低。这种测量方法广泛应用于工程测量中。

2. 零位式测量

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。如图 1-3 所示电路是电位差计的简化等效电路。在进行测量之前,应先调整 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 $I_g = 0$,即 $U_h = U_x$,这样,标准电压 U_h 的值就表示被测未知电压值 U_x 。

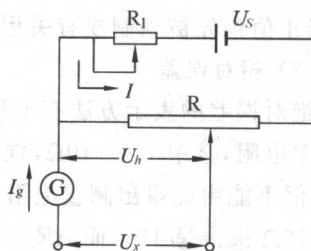


图 1-3 电位差计简化等效电路

采用零位式测量法进行测量,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。采用自动平衡操作以后,虽然可以加快测量过程,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于测量变化迅速的信号,只适用于测量变化较缓慢的信号。

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,用偏差法测得比较值。应用这种方法测量时,标准量具装在仪表内,并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,因此在测量过程中不需要调整标准量,而只需要测量二者的差值。

微差式测量法的优点是反应快,而且测量精度高,特别适用于在线控制参数的检测。

1.2.3 测量误差

人们对客观世界的认识总是带有一定的局限性,与客观事物的本来面貌存在差异。测量是在一定的物质基础上进行的。因此,人们在进行各种实际测量时,尽管被测量在理论上存在真值,但由于客观实验条件的限制,被测量的真值实际上是测不到的,因而测量结果只

能是真值的近似值,这样就不可避免地存在着测量误差。

1. 误差的基本概念及表达方式

(1) 绝对误差

绝对误差是示值与被测量真值之间的差值。设被测量的真值为 L_0 , 测量值或示值为 x , 则绝对误差 Δx 为

$$\Delta x = x - L_0 \quad (1-1)$$

由于真值 L_0 一般来说是未知的,所以在实际应用时,常用实际真值 L 来代表真值 L_0 , 并采用高一标准仪器的示值作为实际真值。故通常用

$$\Delta x = x - L \quad (1-2)$$

来代表绝对误差。

在实际测量中,还经常用到修正值这个名称,它的绝对值与 Δx 相等但符号相反,用符号 c 表示,即

$$c = -\Delta x = L - x$$

修正值给出的不一定是具体的数值,也可以是一条曲线、公式或数表。某些智能化仪表中,修正值预先被编制成有关程序,储存于仪表中,所得测量结果已自动对误差进行了修正。

(2) 相对误差

绝对误差的表示方法有不足之处,因为它不能确切地反映出测量的准确程度。例如,测量两个电阻,其中 $R_1 = 10\Omega$, 误差 $\Delta R_1 = 0.1\Omega$, $R_2 = 1000\Omega$, 误差 $\Delta R_2 = 1\Omega$, 尽管 $\Delta R_1 < \Delta R_2$, 但不能由此得出测量电阻 R_1 比测量电阻 R_2 准确程度高的结论,因为 $\Delta R_1 = 0.1\Omega$, 相对于 10Ω 来讲是 1% , 而 $\Delta R_2 = 1\Omega$, 相对于 1000Ω 来讲是 0.1% , 所得结论应是 R_2 的测量比 R_1 的测量更准。因此,为反映测量质量的高低,需引出相对误差的概念,由绝对误差与真值或实际值之比表示相对误差 δ , 即

$$\delta = \frac{\Delta x}{L_0} \times 100\% \approx \frac{\Delta x}{x} \times 100\% \quad (1-3)$$

相对误差通常用于衡量测量的准确程度,相对误差越小,准确程度越高。

(3) 引用误差

引用误差是一种实用方便的相对误差,常在多挡和连续刻度的仪器仪表中应用。这类仪器仪表测量范围不是一个点,而是一个量程,这时按式(1-3)计算,由于分母是变量,随被测量的变化而变化,所以计算很麻烦。为了计算和划分仪表的精度等级的方便,通常采用引用误差,它是从相对误差演变过来的,其分母为常数,取仪器仪表中的量程值,因而引用误差 γ_m 为

$$\gamma_m = \frac{\Delta x}{A} \times 100\% \quad (1-4)$$

式中 A 为仪表的量程。

我国电工仪表共分七级: $0.1, 0.2, 0.5, 1.0, 1.5, 2.5$ 及 5.0 。例如, 0.1 级表的引用误差的最大值不超过 $\pm 0.1\%$; 0.5 级表的引用误差最大值不超过 $\pm 0.5\%$; 等等。工业自动化仪表的精度等级一般在 $0.2 \sim 5.0$ 。

引用误差从形式上看似相对误差,但是对某一具体仪表来说,由于其分母 A 是一个常数,与被测量大小无关,因此它实质上是一个绝对误差的最大值。例如,量限为 $1V$ 的毫伏

表,精度等级为 5.0,即 $\gamma_m = (\Delta x/A) \times 100\% = 5.0\%$ 。从这个式子可以求出 $\Delta x = 1V \times 5.0\% = 50mV$,这说明无论指示在刻度的哪一点,其最大绝对误差不超过 50mV。但各点的相对误差是不同的。在选用仪表时,一般使其最好能工作在不小于满刻度值 2/3 的区域。

2. 误差的分类与来源

根据误差出现的规律可分为系统误差、随机误差和粗大误差三种。

(1) 系统误差

在相同的条件下多次测量同一量时,误差的绝对值和符号保持恒定,或在条件改变时,与某一个或几个因素成函数关系有规律的误差,称为系统误差,简称系差。例如,仪表的刻度误差和零位误差,应变片电阻值随温度的变化等都属于系统误差。它产生的主要原因是仪表制造、安装或使用方法不正确,也可能由测量人员的一些不良的读数习惯等产生。

系统误差是一种有规律的误差,故可以采用修正值或补偿校正的方法来减小或消除。

(2) 随机误差

服从统计规律的误差称随机误差,简称随差,又称偶然误差。只要测试系统的灵敏度足够高,在相同条件下,重复测量某一量时,每次测量的数据或大或小,或正或负,不能预知。虽然单次测量的随机误差没有规律,但多次测量的总体却服从统计规律,通过对测量数据的统计处理,能在理论上估计其对测量结果的影响。

随机误差是由很多复杂因素对测量值的综合影响所造成的,如电磁场的微变,零件的摩擦、间隙,热起伏,空气扰动,气压及湿度的变化,测量人员感觉器官的生理变化等,它不能用修正或采取某种技术措施的办法来消除。

应该指出,在任何一次测量中,系统误差与随机误差一般都是同时存在的,而且两者之间并不存在绝对的界限。

(3) 粗大误差

粗大误差是一种显然与实际值不符的误差。如测错、读错、记错以及实验条件未达到预定的要求而匆忙实验,都会引起粗大误差。含有粗大误差的测量值称为坏值或异常值,在处理数据时应剔除掉。这样,测量中要估计的误差就具有系统误差和随机误差两类。

误差的来源是多方面的,例如测量用的工具不完善(称工具误差);测试设备和电路的安装、布置、调整不完善(称装置误差);测量方法本身的理论根据不完善(称方法误差);测量环境如温度、湿度、气压、电磁场的变化(称环境误差);甚至测量人员生理上的原因,如反应速度、分辨能力(称人员误差)等。

3. 系统误差和随机误差的表达式

设对某被测量进行了等精度独立的几次测量,得值 $x_1, x_2, \dots, x_n$,则测定值的算术平均值 $\bar{x}$ 为

$$\bar{x} = \frac{x_1 + x_2 + \dots + x_n}{n} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (1-5)$$

式中 $\bar{x}$ 又可称为取样平均值。

当测量次数 n 趋于无穷大($n \rightarrow \infty$)时,取样平均值的极限称为测定值的总体平均值,用符号 A 表示,即

$$A = \lim_{n \rightarrow \infty} \bar{x} = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (1-6)$$

测定值的总体平均值 A 与测定值真值 L_0 之差被定义为系统误差,用符号 ϵ 表示:

$$\epsilon = A - L_0 \quad (1-7)$$

n 次测量中,各次测定值 $x_i (i=1 \sim n)$ 与其总体平均值 A 之差被定义为随机误差,用符号 δ_i 表示:

$$\delta_i = x_i - A \quad (i=1 \sim n) \quad (1-8)$$

将式(1-7)和式(1-8)等号两边分别相加,得

$$\epsilon + \delta_i = (A - L_0) + (x_i - A) = x_i - L_0 = \Delta x_i \quad (1-9)$$

式中 Δx_i 为各次测定的绝对误差。

式(1-9)表明,各次测量值的绝对误差等于系统误差 ϵ 和随机误差 δ_i 的代数和。

4. 基本误差和附加误差

按使用条件划分可将误差分为基本误差和附加误差。

(1) 基本误差

任何测量仪器和传感器都是在一定的环境条件下使用的,测量误差也因环境条件(如温度、气压、湿度、电源电压和频率、振动等)的变化而变化。这样在对传感器和仪器进行检定和刻度时,应把所有起影响作用的外界因素控制在变化较窄的条件内。此条件由国家标准或企业标准文件明确规定,称为标准条件。仪器在标准条件下使用所具有的误差称为基本误差,它属于系统误差。

例如,仪表是在电源电压 $220\text{V} \pm 5\text{V}$ 、电网频率 $50\text{Hz} \pm 2\text{Hz}$ 、环境温度 $20^\circ\text{C} \pm 5^\circ\text{C}$ 、大气压力 $1.013 \times 10^5 \text{Pa} \pm 1000 \text{Pa}$ 、湿度 $65\% \pm 5\%$ 的条件下标定的。如果这台仪表在这个条件下工作,则仪表所具有的误差就是基本误差。换句话说,基本误差是测量仪表在额定条件下工作所具有的误差。

测量仪表的精度等级就是由其基本误差决定的。不同等级的传感器和仪表的基本误差在国家和企业标准中都有明确规定。

(2) 附加误差

当使用条件偏离标准条件时,传感器和仪表必然在基本误差的基础上增加了新的系统误差,它称为附加误差。例如,温度附加误差、频率附加误差、电源电压波动附加误差等。

在使用传感器和仪表进行测量时,应根据使用条件在基本误差上再分别加上各项附加误差。例如,在电源电压 $220\text{V} (\pm 10\%)$ 、温度范围 $0^\circ\text{C} \sim 50^\circ\text{C}$ 、仪表可过载运行等条件下工作,可以知道测量仪表总误差不超过多少。

5. 测量误差的估计和校正

测量误差中包括系统误差和随机误差。它们的性质不同,对测量结果的影响及处理方法也不同。

(1) 随机误差的影响及统计处理

在测量中,当系统误差被尽力消除或减小到可以忽略的程度之后,仍会出现对同一被测量重复进行多次测量时有读数不稳定的现象,这说明有随机误差存在。由随机误差性质可知,它服从统计规律,它对测量结果的影响可用均方根误差来表示。

均方根误差(又称标准误差) σ 为

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \Delta x_i^2}{n}} \quad (1-10)$$