



国家骨干高职院校工学结合创新成果系列教材

传感器与测控技术

主 编 宁爱民 张存吉
副主编 廖 威 钟景洲



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn



国家骨干高职院校工学结合创新成果系列教材

传感器与测控技术

主 编 宁爱民 张存吉

副主编 廖 威 钟景洲



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

内 容 提 要

本教材以“项目引导、做学教一体化”为编著原则,涵盖传感器、测量与控制的内容,共分7个项目。内容包括:认识传感器与测控系统,热工量传感器及应用,机械量传感器及应用,光学量传感器及应用,环境量传感器及应用,无线传感器网络,测控系统设计的几个关键技术与综合实训。项目中的任务来自于实际工程项目,实用性极强。

本书可作为高职高专电子、电气、自动化、机电一体化等专业的教材,也可作为大学生电子设计竞赛的训练教材,以及从事传感器设计和应用工程技术人员的参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

传感器与测控技术 / 宁爱民, 张存吉主编. -- 北京:
中国水利水电出版社, 2014. 8
国家骨干高职院校工学结合创新成果系列教材
ISBN 978-7-5170-2424-8

I. ①传… II. ①宁… ②张… III. ①传感器—高等
职业教育—教材②自动检测系统—高等职业教育—教材
IV. ①TP212②TP274

中国版本图书馆CIP数据核字(2014)第202132号

书 名	国家骨干高职院校工学结合创新成果系列教材 传感器与测控技术
作 者	主编 宁爱民 张存吉 副主编 廖威 钟景洲
出版发行	中国水利水电出版社 (北京市海淀区玉渊潭南路1号D座 100038) 网址: www.waterpub.com.cn E-mail: sales@waterpub.com.cn 电话: (010) 68367658 (发行部)
经 售	北京科水图书销售中心(零售) 电话: (010) 88383994、63202643、68545874 全国各地新华书店和相关出版物销售网点
排 版	中国水利水电出版社微机排版中心
印 刷	北京嘉恒彩色印刷有限责任公司
规 格	184mm×260mm 16开本 16.75印张 397千字
版 次	2014年8月第1版 2014年8月第1次印刷
印 数	0001—2000册
定 价	38.00元

凡购买我社图书,如有缺页、倒页、脱页的,本社发行部负责调换

版权所有·侵权必究

国家骨干高职院校工学结合创新成果系列教材

编 委 会

主 任：刘延明

副主任：黄伟军 黄 波 皮至明 汪卫星

委 员：张忠海 吴汉生 凌卫宁 陆克芬

邓海鹰 梁建和 宁爱民 黄晓东

陈炳森 方 崇 陈光会 方渝黔

况照祥 叶继新 许 昕 欧少冠

梁喜红 刘振权 陈治坤 包才华

秘 书：饶亚娟

前言

随着信息化技术的迅猛发展,传感器与测控技术得到了越来越广泛的应用,各高职院校开设的电子信息类、自动化类、机电类专业都有传感器的专业课程。传感器与测控技术是一门多学科融合的技术,编者根据教育部最新的教学改革要求,结合多年的专业建设和课程改革实践与成果,以培养技能应用型人才为目标,采用项目引导,“教、学、做”一体化的形式编写了本书。

本书采取“项目载体、过程导向、任务驱动”的教学模式,培养学生的职业能力和职业素质。课程建设以测控系统以及传感器模块的设计为主线,贯穿整个课程教学的各个环节。以智能家居或智能小车为项目载体,按照测控系统设计的工作过程,安排认识传感器与测控系统、热工量传感器及应用、机械量传感器及应用、光学量传感器及应用、环境量传感器及应用、无线传感器网络、测控系统设计的几个关键技术与综合实训7个项目。

每个项目都以先做后学的方式来安排,做中学、学中做,在每个任务中都以学生作为主体,教师指导任务的设计和实施,主要从传感器选型、模块设计和调试三个环节完成。

本书由孙凯教授主审,广西水利电力职业技术学院宁爱民和张存吉主编,深圳市亿道电子科技有限公司工程师钟景洲、广西水利电力职业技术学院廖威担任副主编,具体编写分工为:宁爱民编写项目1、3、5;张存吉编写项目2、4、6;廖威编写项目7;龙祖连、梧州职业技术学院陈锦义参与了部分章节的编写,深圳亿道电子科技有限公司的钟景洲工程师制定项目实施规范并提供设备、技术支持,同时还参阅了同行专家们的著作及文献和相关网络资源,在此一并真诚致谢。

限于编者的学识水平和实践经验,书中不妥之处在所难免,敬请专家和读者批评指正。

编者

2014年5月

目 录

前言

项目 1 认识传感器与测控系统	1
任务 1.1 认识传感器	1
任务 1.2 测控系统认识	14
小结	17
习题 1	17
项目 2 热工量传感器及应用	18
任务 2.1 温度传感器应用	18
任务 2.2 流量传感器应用	20
任务 2.3 热工量传感器知识学习	22
小结	47
习题 2	47
项目 3 机械量传感器及应用	48
任务 3.1 霍尔传感器应用	48
任务 3.2 超声波传感器应用	50
任务 3.3 振动传感器应用	52
任务 3.4 气压传感器应用	54
任务 3.5 接近开关应用	56
任务 3.6 机械量传感器知识学习	57
小结	159
习题 3	160
项目 4 光学量传感器及应用	161
任务 4.1 红外传感器应用	161
任务 4.2 紫外线传感器应用	164
任务 4.3 光照传感器应用	166
任务 4.4 光电池应用	168
任务 4.5 光学量传感器知识学习	170
小结	193
习题 4	193

项目 5 环境量传感器及应用	194
任务 5.1 温湿度传感器应用	194
任务 5.2 烟雾传感器应用	196
任务 5.3 分贝传感器应用	199
任务 5.4 火焰传感器应用	201
任务 5.5 环境量传感器知识学习	203
小结	218
习题 5	218
项目 6 无线传感器网络	219
任务 6.1 无线网络组成	219
任务 6.2 无线网络通信协议	222
任务 6.3 无线网络硬件平台	231
任务 6.4 无线传感器网络应用实例	239
小结	241
习题 6	241
项目 7 测控系统设计的几个关键技术与综合实训	242
任务 7.1 测控系统设计的 5 个关键技术	242
任务 7.2 智能家居系统	252
任务 7.3 智能小车系统	254
小结	255
习题 7	255
附录《传感器与测控技术》课程标准	256
参考文献	259

项目 1 认识传感器与测控系统

学习目标

- 1. 专业能力目标：能根据应用要求正确设计测控系统框图。
- 2. 方法能力目标：掌握绘制测控系统框图的要点。
- 3. 社会能力目标：具备良好的职业道德修养和良好的心理素质，能遵守职业道德规范；具有分析问题、解决问题的能力，善于创新和总结经验。

项目导航

本项目主要讲解传感器基本知识、误差处理，阐述测控系统的概念与组成。

任务 1.1 认识传感器

任务目标：

- (1) 掌握传感器的概念及分类。
- (2) 掌握传感器校准与误差处理方法。

任务导航：

以智能家居为载体，介绍传感器的基础知识。

1.1.1 传感器基本知识

1. 什么是传感器

当今的社会是信息化的社会，若将信息化社会与人体相比拟就可以看出传感器在信息化社会中的作用，在图 1.1 中，电子计算机便相当于人的大脑。大脑是通过人的五种感觉器官（视觉、听觉、嗅觉、味觉和触觉）感受外界刺激并作出反响的，与“感官”这种受刺激的元件相对应的就是传感器，故传感器又称为“电五官”。

所以传感器是人机接口（外部真实世界与计算机的接口，另一接口是执行器），它能感受或响应规定的被测量，如各种物理量、化学量、生物量或状态量，并按照一定规律转换成有用信号，便于远距离传输、处理、存储和控制。

国家标准《传感器通用术语》（7665—2005）中，对于传感器的定义作了如下规定：

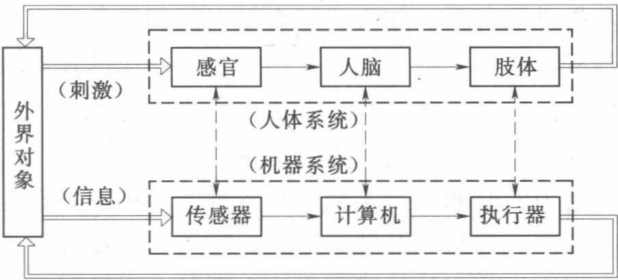


图 1.1 传感器的作用



“能感受（或响应）规定的被测量并按照一定规律转换成可用信号输出的器件或装置。传感器通常由直接响应于被测量的敏感元件和产生可用信号输出的转换元件以及相应的电子线路所组成。”

2. 传感器的作用

近来传感器引起人们极大的关注。现代信息技术的三大基础是信息的获取、传输和处理，即传感器技术、通信技术和计算机技术，它们分别构成了信息技术系统的“感官”、“神经”和“大脑”。现代计算机技术和通信技术由于超大规模集成电路的飞速发展取得了极大进展，以微处理器为中心的信息处理能力及通信能力已大大提高，成本显著下降，而作为信息获取源头的信息获取装置——传感器的发展相对落后，没有跟上信息技术的发展，成为影响产业发展的瓶颈。

传感器面临着迫切改变信息获取能力落后现状的挑战，同时技术进步又为传感器技术加速发展提供了保证和机遇，从20世纪80年代起，在世界范围内逐步掀起了一股“传感器热”。在过去的15年中传感器技术及其应用取得了巨大的进步，新的技术不断出现，传感器技术成为新技术革命的关键因素。人们不仅对传感器的精度、可靠性、响应速度、获取的信息量要求越来越高，还要求其成本低廉且使用方便。

传感器是实现自动检测和自动控制的首要环节，如果没有传感器对原始参数进行精确可靠的测量，那么无论是信号转换、信息处理或者数据的显示与控制，都将成为一句空话。可以说，没有精确可靠的传感器，就没有精确可靠的自动检测和控制系统。现代微电子技术和计算机为信息的转换与处理提供了极其完善的手段，近代检测与控制系统正经历着重大的变革，但是，如果没有各种传感器去检测大量原始数据并提供信息，电子计算机也无法发挥其应有的作用。

传感器已经广泛应用于生产、生活和科学研究的各个领域，在航空、航天技术领域，传感器应用得最早也应用得最多。在现代飞机上，装备着繁多的显示与控制系统，以保证各种飞行任务的完成。在这些系统中，传感器首先对反映飞行器飞行参数和姿态、发动机工作状态的各个物理参数加以检测，并显示在各类显示器上，提供给驾驶员和领航员去控制和操纵飞行器。如飞机三个轴向的偏转角度有角度传感器和方向传感器敏感，速度有速度传感器敏感，高度或高度偏差也有相应的传感器敏感，以获得飞行器的速度、位置、姿态、航向、航程等参数，并由飞行控制系统以此自动引导飞行器按规定的航向和航线飞行。另外，在新型飞行器的研制过程中，必须进行风洞实验、发动机实验，以及样机的静、动力实验和飞行实验。在各种实验中，自动巡回检测系统通过传感器敏感各种力、压力、应变、位移、温度、流量、转速、速度等物理量，经过计算机处理得到检测结果。现在大型飞机使用的传感器多达上百种，而洲际导弹、宇宙飞船和航天飞机等复杂飞行器需要敏感的飞行参数更多。在美国航天飞机上就安装有超过2000个各种各样的传感器，时刻监测航天飞机的工作状态。

在化工、炼油、钢铁冶炼、电力、煤气等现代化工业生产过程中，传感器的应用就更多了。现代化的工业生产自动化程度很高，通常不能直接观察装置中的生产过程，只能通过传感器检测物理、化学和机械参数，从而了解和控制装置的运转状态。因此，传感器在工业控制中极为重要。自动化工业生产工艺复杂、装置庞大，传感器分布在装置内的各个



检测点。检测数据由传感器所在地点传送到控制室，自动控制系统发出的控制信号和指令信号又传送到现场，从而实现远距离控制。温度、压力、流量和液面是经常需要检测的参数，被称为生产过程的“四大参数”。影响产品性能的参数还有许多，如表征产品物理性质的密度、黏度等参数，这些参数的检测和控制更困难。

仪器仪表是科学研究和工业技术的“耳目”，在基础科学和尖端技术的研究中，大到上千光年的茫茫宇宙，小到 10^{-13} cm 的粒子世界；长到数十亿年的天体演变，短到 10^{-24} s 的瞬间反应；高达 5×10^8 °C 的超高温，低到 0.01K 的超低温，这些极端量的检测是人的感官或一般检测设备无能为力的，必须有相应的高精度传感器以及大型检测系统才能奏效。因此，传感器的发展，越来越成为一些边缘科学研究和高新技术开发的推动力量。

传感器在生物医学和医疗器械工程方面也显露出广阔的前景，它将人体内各种生理信息转换成工程上容易测定的量（一般是电量），从而正确地显示出人体生理状态。传感器还渗透到人们的日常生活中，如用于家用电器中温度和湿度的测控、煤气泄漏报警等。一辆现代化小轿车上安装的传感器也多达几十个甚至上百个。

可见，传感器在科学研究、工业自动化、非电量电测仪表、医用仪器、家用电器、航空航天、军事技术等方面起着极为重要的作用。

3. 传感器的组成

传感器通常由直接响应被测量的敏感元件和产生可用信号输出的转换元件以及相应的电子线路所组成，如图 1.2 所示。

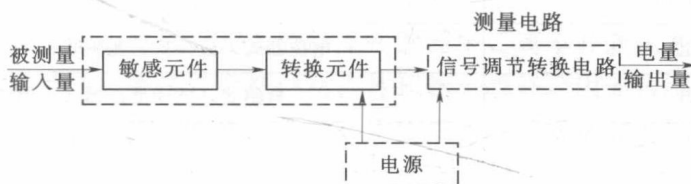


图 1.2 传感器的组成

例如，如图 1.3 所示膜盒气体压力传感器，敏感元件是膜盒，被测压力 P 的变化引起膜盒上半部分移动，带动磁心移动；转换元件是磁心与电感线圈，磁心的位移引起线圈电感量的变化；然后由转换电路将线圈电感的变化转换为变化的电压或电流信号输出，转换元件是传感器的核心。实际上很多传感器并不全包含上述三部分。转换元件也可以直接感受被测量，而输出与被测量成确定关系的电量，这时转换元件本身就可作为一个独立的传感器使用，例如，图 1.4 所示的热电偶是由两种不同导体组合而成，将温度差直接转换输出热电势，完成温度测量。

当传感器输出为规定的标准信号时，则称为变送器。传感器与变送器是两种不同功能的模块，变送器为输出标准信号的传感器。标准信号是物理量的形式和数值范围都符合国际标准的信号，如电流标准 4~20mA (DC)，电压标准 1~5V (DC)。输出的标准化是技术发展的必然趋势，如目前国际上已出现了多种现场总线的变送器。

4. 传感器的分类

传感器的分类方法很多，国内外尚无统一的方法。最常用的分类方法是下面两种：第



一种是按工作原理分类，如应变式、压阻式、压电式、光电式等传感器；第二种是按被测量分类，如力、位移、速度、加速度等传感器。这两种分类方法有共同的缺点，都只强调了传感器的一个方面，所以在许多情况下往往将上述两种分类方法综合使用，如应变式压力传感器、压电式加速度传感器等。

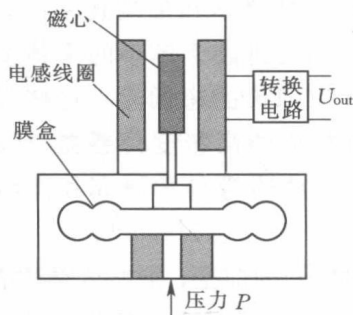


图 1.3 气压传感器示意图

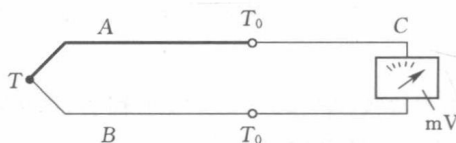


图 1.4 热电偶示意图

(1) 按工作原理分类。往往同一机理的传感器可以测量多种物理量，如电阻型传感器可以用来测温度、位移、压力、加速度等物理量。而同一被测物理量又可采用多种不同类型的传感器来测。如位移量，可用电容式、电感式、电涡流式等传感器来测。本书按测量原理来分，这种分类方法列于表 1.1。

表 1.1 传感器变换原理一览表

变换原理	传感器举例
变电阻	电位器式，应变式，压阻式，光敏，热敏
变磁阻	电感式，差动变压器式，涡流式
变电容	电容式，湿敏
变谐振频率	振动膜（筒、弦、梁）式
变电荷	压电式
变电势	霍尔式，感应式，热电偶

(2) 按被测量分类。这种分类方法列于表 1.2，包括了输入的基本被测量和由此派生的其他量。

表 1.2 传感器输入被测量一览表

基本被测量	派生的被测量	基本被测量	派生的被测量
热工量	温度，热量，比热，压力，压差，真空度，流量，流速，风速	物理量	黏度，温度，密度
		化学量	气体（液体）化学成分，浓度，盐度
机械量	位移，尺寸，形状，力，应力，力矩，振动，加速度，噪声，角度，表面粗糙度	生物量	心音，血压，体温，气流量，心电流，眼压，脑电波
		光学量	光强，光通量

其他分类方法还有：按工作效应分有物理传感器、化学传感器、生物传感器；按输出



量分有模拟式（输出量为电压、电流等模拟信号）、数字式（输出量为脉冲、编码等数字信号）传感器；按能量关系分有：能量转换型（传感器输出量直接由被测量能量转换而来）、能量控制型（传感器输出的能量由外部能源提供，但受输入量控制）传感器等。

5. 传感器的发展

传感器的使用已有相当长的历史，过去人们把它叫做变换器或换能器，它既是技术产品中的老成员，又是科技发展中的新秀，其发展方兴未艾，前途无量。

早期以测量物理量为主的传感器，如电位器、应变式和电感式传感器等都是利用机械结构的位移或变形来完成非电量到电量的变换。由于新材料、新工艺、新原理的出现，机械结构型传感器在精度、稳定性方面有了很大提高，出现了谐振式、石英电容式这样一些稳定可靠的高精度结构型传感器。迄今为止，结构型传感器在国防、工业自动化、自动检测等许多领域中仍占有相当大的比例。

（1）新材料、新功能的开发与应用。传感器材料是传感器技术的重要基础，随着各种半导体材料、有机高分子功能材料等新材料的发展，人们可制造出各种新型传感器。利用材料的压阻、湿敏、热敏、光敏、磁敏及气敏等效应，可把温度、湿度、光量、气体成分等物理量变换成电量，由此研制出的传感器称为物性传感器。这种传感器具有结构简单、体积小、重量轻、反应灵敏、易于集成化、微型化等优点，引起传感器学术界的重视。而大量的半导体材料、功能陶瓷和有机聚合物的新发展，则为物性传感器的发展提供了坚实的基础。更由于宽广的市场需求，刺激了各类廉价物性传感器的发展，促进了传感器的小型化。但是，在要求高可靠性高稳定性的使用场合以及恶劣环境条件下，物性传感器还有不少问题有待解决，但是这类传感器的发展前途很好。

（2）微机械加工工艺的发展。在发展新型传感器中，离不开新工艺的采用。各种控制仪器设备的功能越来越强，要求各个部件所占体积越小越好，因而传感器本身体积也是越小越好。这就要求发展新的材料及加工技术，主要是指各种微细加工技术，又称微机械加工技术。微机械加工技术是随着集成电路工艺发展起来的。半导体技术中的氧化、光刻、扩散、沉积、平面电子工艺、各向异性腐蚀及蒸镀、溅射薄膜等加工方法，都已引进到传感器制造过程中，如利用半导体技术制造出硅微型传感器，利用薄膜工艺制造出快速响应的气敏、湿敏传感器，利用溅射薄膜工艺制造的压力传感器等。微型传感器是目前最为成功最具有实用性的微机电装置。

传统的加速度传感器是由重力块和弹簧等制成的，体积大、稳定性差、寿命短，而利用激光等各种微细加工技术制成的硅加速度传感器体积非常小，互换性和可靠性都较好。另外还有微型的温度、磁场传感器等，这种微型传感器面积大小都在 1mm^2 以下。目前在 1cm^2 大小的硅芯片上可以制作上千个压力传感器的阵列。

（3）传感器的集成化、多功能化发展。各种微机械加工工艺及新材料的发展为传感器集成提供了可能，使传感器从原来的单一元件、单一功能向集成化多功能化方向发展。传感器的集成化一般包含三方面含义：①将传感器与其后级的放大电路、运算电路、温度补偿电路等集成在一起，实现一体化；②将同一类的传感器集成于同一芯片上，构成二维阵列式传感器；③将几个传感器集成在一起，构成一种新的传感器。传感器的“多功能化”是与“集成化”相对应的一个概念，是指传感器能感知与转换两种以上的不同的物理量或



化学量。例如，在同一硅片上制作应变计和温度敏感元件，制成能同时测量压力和温度的多功能传感器，将处理电路也制作在同一硅片上，还可实现温度补偿；将检测几种不同气体的敏感元件用厚膜制造工艺制作在同一基片上，制成可监测氧气、氨气、乙醇、乙烯四种气体的多功能传感器；一种温、气、湿三功能陶瓷传感器也已经研制成功。

(4) 传感器的智能化发展。传感器与微电子技术和微处理器技术相结合，使之不仅具有检测功能，还具有信息处理、逻辑判断、自诊断以及“思维”等功能，称之为传感器的智能化。传感器与微电脑的“硬件”和“软件”集合于一体，特别是与“软件”的有机结合，可以对获得的信息进行存储、数据处理和控制，从而扩展了功能，提高了精度，而且在对环境条件的适应性，对信息的识别等方面大大优于传统的单功能传感器，此类传感器称为智能传感器。

综上所述，随着自动化生产程度的不断提高，对传感器的要求也在不断提高，人们正竞相发展小型化、集成化、智能化的传感器，并且为不断满足测试技术的各种需要而努力开发新型传感器。同时必须指出，高灵敏度、高精确度、高稳定性、响应速度快、互换性好始终是传感器发展所追求的目标，也是传感器发展的永久方向。

1.1.2 传感器校准与误差处理

1. 传感器标定与校准

新研制或生产的传感器需要对其性能进行全面的检定，经过一段时间储存或使用的传感器也需要对其性能进行复测。

所谓传感器的标定，是指在明确输入和输出的变换对应关系的前提下，利用某种标准或标准器具对传感器的静态特性指标或动态特性指标等进行标度。而将传感器在使用中或储存后进行的性能复测称为校准。校准的方法与标定方法本质相同。

标定的基本方法是，利用标准设备产生已知的非电量（如标准力、压力、位移等）作为输入量，输入待标定的传感器，然后将传感器的输出量与输入的标准量做比较，获得一系列标准数据或曲线。有时输入的标准量是利用一标准传感器检测而得到的，这时的标定实质是待标定传感器与标准传感器之间的比较。

传感器的标定系统一般由以下几个部分组成：

- (1) 被测非电量的标准发生器。如活塞式压力计、测力机、恒温源等。
- (2) 被测非电量的标准测试系统。如标准压力传感器、标准力传感器、标准温度计等。
- (3) 待标定传感器所配接的信号调节器和显示、记录器等。所配接的仪器亦作为标准测试设备使用，其精度是已知的。

为了保证各种量值的准确一致，标定应按计量部门规定的测试规程和管理办法进行。图1.5所示为标准装置部门规定的力值传递系统示意图。按此系统，只能用上一级标准装置检定下一级传感器及配套仪表。如果待标定传感器精度较高，可以跨级使用更高级的标准装置。

工程测试所用传感器的标定应在与其使用条件相似的环境下进行。有时为了获得较高的标定精度，可将传感器与配用的电缆、滤波器、放大器等测试系统一起标定。有些传感



器在标定时还应十分注意规定的安装技术条件。

2. 测量误差与误差类型

在实际测量中,由于测量设备不准确、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。下面介绍一些测量误差的基本术语。

(1) 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,通常很难知道。

(2) 指定真值。由于真值是一个理想值,通常很难知道,所以一般用指定真值来代替真值。指定真值指由国家设立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,指定真值也叫约定真值。

(3) 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,把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,也叫相对真值。

(4) 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 1kg,标准电阻上标出的 1Ω ,标准信号发生器度盘上标出的输出正弦波的频率 100kHz 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 XD7 型低频信号发生器频率刻度的工作误差不大于 $\pm 3\% \pm 1\text{Hz}$ 。如果在额定工作条件下该仪器频率刻度是 100Hz,这就是它的标称值,而实际值是 $(100 \pm 100 \times 3\% \pm 1)\text{Hz}$,即实际值在 96Hz 到 104Hz 之间。

(5) 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 50mA 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 25mA。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。

测量误差的分类有多种方法,以下是几种常用的分类方法。

测量误差按其性质可分为系统误差、随机误差和粗大误差。

(1) 系统误差。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

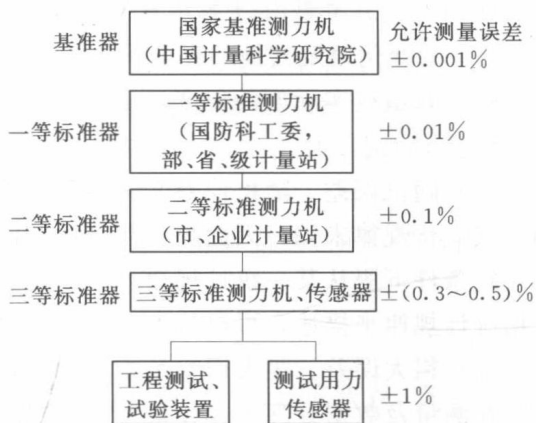


图 1.5 力值传递系统示意图



律变化的误差。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，测量就越正确，所以经常用正确度来表征系统误差的大小。

(2) 随机误差。随机误差又称偶然误差，是由很多复杂因素的微小变化的总和所引起的，其变化规律未知，因此分析起来比较困难。但是随机误差具有随机变量的一切特点，在一定条件下服从某一统计规律，一般为正态分布。因此，经过多次测量后，对其总和可以用统计规律来描述，可以从理论上估计对测量结果的影响。

(3) 粗大误差。粗大误差是指在一定条件下测量结果显著地偏离其实际值所对应的误差。在测量及数据处理中，如果发现某次测量结果所对应的误差特别大或特别小时，应认真判断误差是否属于粗大误差，如果属于粗大误差，该值应舍去不用。

测量误差被测量随时间变化的速度可分为静态误差、动态误差。

(1) 静态误差。静态误差是指在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。

测量误差按使用条件要分为基本误差、附加误差。

(1) 基本误差。基本误差是指测试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 ）℃，湿度小于80%，电源频率50Hz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。

3. 误差表示方法与测量数据处理

测量误差可采用绝对误差、相对误差和容许误差来表示。

(1) 绝对误差。绝对误差表示为示值与被测量真值之差，设某一被测量的测量值为 x ，真值为 x_0 ，绝对误差则为 Δx ：

$$\Delta x = x - x_0 \quad (1.1)$$

测量值 x ，具体应用中可以用测量仪表的示值；真值 x_0 ，在实际测量中，常用某一被测量多次测量的平均值或上一级标准仪表测得的示值作为约定真值，代替真值 x_0 。

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，其符号表示出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°C 左右,若测量绝对误差为 $\pm 1^{\circ}\text{C}$,这样的测量质量不能被常人接受;如果测量 1400°C 左右的炉温,绝对误差能保持 $\pm 1^{\circ}\text{C}$,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 $37 \pm 1^{\circ}\text{C}$ 和 $1400 \pm 1^{\circ}\text{C}$;另一种方法就是用后面介绍的相对误差来表示。

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:

$$C = -\Delta x = x_0 - x \quad (1.2)$$

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:

$$x_0 = x + C \quad (1.3)$$

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 (1.3) 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,相对误差有:

1) 实际相对误差。实际相对误差是用绝对误差 Δx 与被测量约定真值 x_0 的百分比来表示的相对误差:

$$\gamma_{x_0} = \frac{\Delta x}{x_0} \times 100\% \quad (1.4)$$

2) 示值相对误差。示值相对误差定义为绝对误差 Δx 与仪器示值 x 的百分比值:

$$\gamma_x = \frac{\Delta x}{x} \times 100\% \quad (1.5)$$

在误差相对较小时, γ_{x_0} 与 γ_x 相差不大,无须区分,但在误差较大时,两者不能混淆。

3) 引用相对误差(或满度相对误差)。满度相对误差是用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:

$$\gamma_m = \frac{\Delta x_m}{x_m} \times 100\% \quad (1.6)$$

满度相对误差也称为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:

$$\Delta x_m = \gamma_m x_m \quad (1.7)$$

引用误差可以评价测量仪表精确读等级,它客观正确地反映了测量的精确度高低。国际规定,电测仪表的准确度等级 S 就是按满度相对误差分级的,按 γ_m 大小依次划分成 0.1、0.2、0.5、1.0、1.5、2.5 及 5.0 七级。因此,准确度等级 S 与满度相对误差 γ_m 有以下关系:

$$|\gamma_m| \leq S\% \quad (1.8)$$

【例 1-1】 某电压表 $S=1.5$, 试标出它在 $0 \sim 100\text{V}$ 量程中的最大绝对误差。

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



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

一般而言,测量仪表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,只能按最坏情况处理,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。但这一结论只适合于正向刻度的一般电压表、电流表等类型的仪表,而不适合于测量电阻的普通型欧姆表,因为这类欧姆表是反向刻度,且刻度是非线性的。可以证明,此种情况下示值与欧姆表的中值接近时,测量结果的准确度最高。

【例 1-2】 某 1.0 级电流表,满度值 $x_m = 100\text{V}$, 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:

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

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:

$$\gamma_{x1} = \frac{\Delta x}{x_1} \times 100\% = \frac{\Delta x_m}{x_1} \times 100\% = \frac{\pm 1}{100} \times 100\% = \pm 1\%$$

$$\gamma_{x2} = \frac{\Delta x}{x_2} \times 100\% = \frac{\Delta x_m}{x_2} \times 100\% = \frac{\pm 1}{80} \times 100\% = \pm 1.25\%$$

$$\gamma_{x3} = \frac{\Delta x}{x_3} \times 100\% = \frac{\Delta x_m}{x_3} \times 100\% = \frac{\pm 1}{20} \times 100\% = \pm 5\%$$

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,否则测得值的准确数值将低于仪表的准确度等级。

测量结果的数据处理可以按照下列步骤进行:

(1) 将一系列等精度测量数据 $x_i (i=1, 2, \dots, n)$ 按先后顺序列成表格(在测量时应尽可能消除系统误差,其消除方法可参考相关书籍)。

(2) 按以下方法求出测量数据 x_i 的算术平均值 $\bar{x}$ 。

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i = \frac{x_1 + x_1 + \dots + x_n}{n} \quad (1.9)$$

(3) 计算出各测量值的残余误差 $v_i (v_i = x_i - \bar{x})$, 并列入表中的每个测量数值旁。

(4) 检查 $\sum_{i=1}^n v_i^2 = 0$ 的条件是否满足。若不满足,说明计算有错误,需再计算。

(5) 在每个残余误差旁列出 v_i^2 , 然后按以下方法求出均方根误差 σ 。

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n v_i^2}{n-1}} \quad (1.10)$$

(6) 判别是否存在粗大误差(即是否有 $|v_i| > 3\sigma$ 的数),若有,应舍去此读数 x_i ,