

普通高等教育“十一五”规划教材
PUTONG GAODENG JIAOYU SHIYIWU GUIHUA JIAOCAI



CHUANGANQI YU JIANCE JISHU
YUANLI JI SHIJIAN

传感器与检测技术 原理及实践

付家才 主 编
沈显庆 孙毅男 副主编



中国电力出版社

<http://jc.cepp.com.cn>

普通高等教育“十一五”规划教材
PUTONG GAODENG JIAOYU SHIYIWU GUIHUA JIAOCAI



TP212/182

2008

CHUANGANQI YU JIANCE JISHU
YUANLI JI SHIJIAN

传感器与检测技术 原理及实践

主 编 付家才
副主编 沈显庆 孙毅男
编 写 韩 龙 曹小燕 周 杰
孙 鹏 潘洪亮 孙桂芝
主 审 常太华 苏 杰 赵 建



中国电力出版社

<http://jc.cepp.com.cn>

内 容 提 要

本书为普通高等教育“十一五”规划教材。

本书从系统工程的角度,以被控参量的类型为模块,以误差理论为依据,重点介绍传感器的测量电路及测试方法,并对温度、转速、压力、流量等非电量参数进行了电路设计,具有取材新颖、内容丰富、适用面广等特点。全书共八章,主要内容包括绪论、测量误差理论、检测信号处理、常用传感器、电参数测量、非电量测量、检测综合设计、工程实践方法等。

本书可作为高等院校自动化、电气工程及其自动化、机电一体化等相关专业的本科教材,也可作为高职高专及函授教材,还可作为工业控制及相关领域工作人员的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

传感器与检测技术原理及实践/付家才主编. —北京:中国电力出版社, 2008

普通高等教育“十一五”规划教材

ISBN 978-7-5083-7386-7

I. 传… II. 付… III. 传感器—高等学校—教材
IV. TP212

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2008)第 086901 号

中国电力出版社出版、发行

(北京三里河路6号 100044 <http://jc.cepp.com.cn>)

北京市同江印刷厂印刷

各地新华书店经售

*

2008年7月第一版 2008年7月北京第一次印刷

787毫米×1092毫米 16开本 21.25印张 517千字

定价 33.80元

敬告读者

本书封面贴有防伪标签,加热后中心图案消失
本书如有印装质量问题,我社发行部负责退换

版权专有 翻印必究

前 言

为贯彻落实教育部《关于进一步加强高等学校本科教学工作的若干意见》和《教育部关于以就业为导向深化高等职业教育改革的若干意见》的精神,加强教材建设,确保教材质量,中国电力教育协会组织制订了普通高等教育“十一五”教材规划。该规划强调适应不同层次、不同类型院校,满足学科发展和人才培养的需求,坚持专业基础课教材与教学急需的专业教材并重、新编与修订相结合。本书为新编教材。

随着微型计算机及微电子技术在检测领域的广泛应用,传感器及检测技术在测量原理、准确度、灵敏度、可靠性、功能及自动化水平等方面都发生了巨大的变化。因此,学习传感器及检测技术的工作原理,掌握相关的新技术和设计方法是十分重要的。

本书是为高等学校电类相关专业编写的省部级“十一五”规划教材,内容上以本科应用型人才的培养为目标,注重培养学生的实践能力。本书主要特点为:

- (1) 在取材和教材体系编排上注重原理与应用技术相结合,突出应用性和针对性,把误差理论、传感器原理、检测方法及工程实践的具体事例联系在一起,突出实践能力的培养;
- (2) 力求将最新的传感技术、检测技术等及时反映在教材中,同时还增加了检测综合设计、工程实践方法等内容;
- (3) 测量电路实用性强,所有测量电路均通过实践验证,部分电路可直接应用到生产实际中。

本书内容包括测量误差理论、检测信号处理、常用传感器、电参数测量、非电量测量等内容,重点讲述了监测系统综合设计和工程实践方法。

本书由付家才教授任主编,沈显庆、孟毅男任副主编。编写分工为:第一章由付家才编写,第二章由孟毅男编写,第三章由韩龙编写,第四章由曹小燕编写,第五章第一节、第二节、第四节由周杰编写,第五章第三节、第五节以及第六章第一节、第二节、第三节、第四节由沈显庆编写,第六章第五节、第六节、第七节、第八节、第九节由孙桂芝编写,第七章由孙鹏编写,第八章由潘洪亮编写。全书由付家才策划与统稿。华北电力大学常太华、苏杰老师,西安电子科技大学赵建老师审阅了本书。

由于编者水平有限,书中不足之处在所难免,敬请广大读者批评指正。

编 者

2008年1月

目 录

前言

第一章 绪论	1
第一节 传感器的组成与分类	1
第二节 传感器技术的发展动向	2
第三节 检测技术的地位与作用	3
第四节 检测技术的发展趋势	6
本章小结	8
习题与思考题	8
第二章 测量误差理论	9
第一节 测量与测量误差的基本概念	9
第二节 测量误差的性质与基本规律	17
第三节 最佳估计值及其误差分析	41
第四节 测量不确定度及其评定	57
本章小结	63
习题与思考题	63
第三章 检测信号处理	65
第一节 测量电桥	65
第二节 测量放大器	72
第三节 噪声信号处理	81
第四节 微弱信号的处理	91
本章小结	99
习题与思考题	100
第四章 常用传感器	101
第一节 传感器的特性	101
第二节 电阻应变式传感器	107
第三节 电容式传感器	112
第四节 电感式传感器	116
第五节 电涡流式传感器	120
第六节 压电式传感器	124
第七节 磁电式传感器	128
第八节 光电式传感器	132
第九节 霍尔式传感器	138
第十节 光纤传感器	142
第十一节 超声波传感器	146
第十二节 微波传感器	149
第十三节 智能传感器	152

第十四节 其他传感器	154
第十五节 传感器的标定	157
本章小结	159
习题与思考题	160
第五章 电参数测量	161
第一节 电压测量	161
第二节 电流测量	181
第三节 电抗测量	185
第四节 频率时间测量	200
第五节 相位差测量	208
本章小结	212
习题与思考题	212
第六章 非电量测量	215
第一节 长度及线位移测量	215
第二节 角度及角位移测量	221
第三节 速度、转速及加速度测量	224
第四节 力、力矩及应力测量	226
第五节 温度测量	229
第六节 流量测量	238
第七节 压力测量	244
第八节 振动测量	247
第九节 成分与物性测量	251
本章小结	255
习题与思考题	256
第七章 检测综合设计	258
第一节 综合设计基础	258
第二节 温度系统设计	273
第三节 转速系统设计	277
第四节 位移系统设计	282
第五节 压力系统设计	290
本章小结	297
习题与思考题	297
第八章 工程实践方法	298
第一节 工程实践内容	298
第二节 设计实践	298
本章小结	330
习题与思考题	330
参考文献	331

第一章 绪 论

在机电一体化产品中,无论是机械电子化产品(如数控机床),还是机电相互融合的高级产品(如机器人),都离不开检测与传感器这个重要环节。若没有传感器对原始的各种参数进行精确而可靠地自动检测,那么信号转换、信息处理、正确显示、控制器的最佳控制等都是无法进行和实现的。

检测系统是机电一体化产品中的一个重要组成部分,用于实现计测功能。在机电一体化产品中,传感器的作用就相当于人的感官,用于检测有关外界环境、自身状态及其变化的各种物理量(如力、位移、速度、位置等),并将这些信号转换成电信号,然后再通过相应的转换、放大、调制与解调、滤波、运算等电路将有用的信号检测出来,反馈给控制装置或送去显示。实现上述功能的传感器及相应的信号检测与处理电路,就构成了机电一体化产品中的检测系统。

随着现代测量、控制及自动化技术的发展,传感器技术越来越受到人们的重视,应用越来越普遍。凡是应用到传感器的地方,必然伴随着相应的检测系统。传感器与检测系统可对各种材料、机件、现场等进行无损探伤、测量和计量;对自动化系统中各种参数进行自动检测和控制。尤其是在机电一体化产品中,传感器及其检测系统不仅是一个必不可少的组成部分,而且已成为机与电有机结合的一个重要纽带。

第一节 传感器的组成与分类

一、传感器的定义

传感器是能感受规定的被测量并将其按照一定规律转换成可用输出信号的器件或装置,通常由敏感元件和转换元件组成。敏感元件是指传感器中直接感受被测量的部分,转换元件是指传感器能将敏感元件的输出转换为适于传输和测量的电信号部分。

应该说明,并不是所有的传感器都能明显区分敏感元件与转换元件两个部分,而是二者合为一体。例如,半导体气体、湿度传感器等一般都是将感受的被测量直接转换为电信号,没有中间转换环节。传感器的输出信号形式有很多种,如电压、电流、频率、脉冲等。输出信号的形式由传感器的原理确定。

二、传感器的组成

由于传感器输出的信号一般都很微弱,需要有信号调节与转换电路将其放大或转换为容易传输、处理、记录和显示的形式。传感器组成框图如图 1-1 所示。

三、传感器的分类

1. 按被测参量分类

- (1) 电工量:电压、电流、电功率、电阻、电容、频率、磁场强度、磁通密度等。
- (2) 热工量:温度、热量、比热容、热

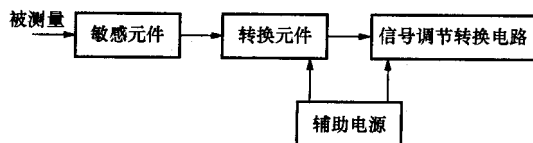


图 1-1 传感器组成框图

流、热分布、压力、压差、真空度、流量、流速、物位、液位、界面等。

(3) 机械量：位移、形状、力、应力、力矩、重量、质量、转速、线速度、振动、加速度、噪声等。

(4) 物性和成分量：气体成分、液体成分、固体成分、酸碱度、盐度、浓度、黏度、粒度、密度、相对密度等。

(5) 光学量：发光强度、光通量、照度、辐射能量等。

(6) 状态量：颜色、透明度、磨损量、裂纹、缺陷、泄漏、表面质量等。

2. 按被测参量的检测转换原理分类

(1) 电磁转换：电阻式、电感式、电容式、磁电式、热电式、压电式等。

(2) 光电转换：光电式、激光式、红外式、光栅、光导纤维式等。

(3) 其他能/电转换：声/电转换（超声波式）、辐射能/电转换（X射线式、 β 射线式、 γ 射线式）、化学能/电转换（各种电化学转换）等。

第二节 传感器技术的发展动向

由于传感器位于检测系统的入口，是获取信息的第一个环节，因此其精度、可靠性、稳定性、抗干扰性等直接关系到机电一体化产品的整机性能指标。因此，传感器的研究与开发一直受到人们的重视，其性能也在不断提高，主要表现在以下几个方面。

一、新型传感器的开发

鉴于传感器的工作机理是基于各种效应和定律，由此启发人们进一步发现新现象、采用新原理、开发新材料、采用新工艺，并以此研制出具有新原理的新型物性型传感器，这是发展高性能、多功能、低成本和小型化传感器的重要途径。总之，传感器正经历着从以结构型为主转向以物性型为主的过程。

二、传感器的集成化和多功能化

随着微电子学、微细加工技术和集成化工艺等方面的发展，出现了多种集成化传感器。这类传感器包括同一功能的多个敏感元件排列成线性、面型的阵列型传感器；多种不同功能的敏感元件集成一体，成为可同时进行多种参数测量的传感器；传感器与放大、运算、温度补偿等电路集成一体具有多种功能——实现了横向和纵向的多功能。

三、传感器的智能化

传感器又被形象地称为“电五官”，它与“电脑”的结合，就是传感器的智能化。智能传感器不仅具有信号检测、转换功能，同时还具有记忆、存储、解析、统计处理及自诊断、自校准、自适应等功能。如进一步将传感器与计算机的这些功能集成于同一芯片上，就成为智能传感器。

四、无线传感器网络

(一) 发展历程

早在 20 世纪 70 年代，就出现了将传统传感器采用点对点传输、连接传感控制器而构成传感器网络雏形，人们把它归之为第一代传感器网络。随着相关学科的不断发展和进步，传感器网络同时还具有了获取多种信息信号的综合处理能力，并通过与传感控制器的相连，组成了有信息综合和处理能力的传感器网络，这是第二代传感器网络。而从 20 世纪末开始，

现场总线技术开始应用于传感器网络，人们用其组建智能化传感器网络，大量多功能传感器被运用，并使用无线技术连接，无线传感器网络逐渐形成。

无线传感器网络 (Self Organizing Wireless Sensor Network) 作为新兴技术，是目前国外研究的热点，其在军事、环境、健康、家庭、商业、空间探索和灾难拯救等领域展现出广阔的应用前景。早在 2003 年美国自然科学基金委员会已经斥巨资来支持这方面的研究，并且出现了一些致力于无线传感器网络的公司，其中，Crossbow 公司已推出了 Mica 系列传感器网络产品。国内很多大学现已经开展相关领域的研究，但大部分工作仍处在自组织无线网络协议性能仿真和硬件节点小规模实验设计阶段。

(二) 应用现状

虽然由于技术等方面的制约，无线传感器网络的大规模商业应用还有待时日，但是，最近几年，随着计算成本的下降及微处理器体积越来越小，已经为数不少的无线传感器网络开始投入使用。目前无线传感器网络的应用主要集中在以下领域。

1. 环境的监测和保护

随着人们对于环境问题的关注程度越来越高，需要采集的环境数据也越来越多，无线传感器网络的出现为随机性的研究数据获取提供了便利，并且还可以避免传统数据收集方式给环境带来的侵入式破坏。

2. 医疗护理

无线传感器网络在医疗研究、护理领域也可以大展身手。罗彻斯特大学的科学家使用无线传感器创建了一个智能医疗房间，使用微尘来测量居住者的重要征兆（血压、脉搏和呼吸）、睡觉姿势及每天 24h 的活动状况。

3. 军事领域

由于无线传感器网络具有密集型、随机分布的特点，使其非常适合应用于恶劣的战场环境中，包括侦察敌情、监控兵力、装备和物资，判断生物化学攻击等多方面用途。

第三节 检测技术的地位与作用

一、检测的定义

检测是指在各类生产、科研、试验及服务等各个领域，为及时获得被测、被控对象的有关信息而实时或非实时地对一些参量进行定性检查和定量测量。

二、检测技术的地位与作用

对工业生产而言，采用各种先进的检测技术对生产全过程进行检查、监测，对确保安全生产，保证产品质量，提高产品合格率，降低能源和原材料消耗，提高企业的劳动生产率和经济效益是必不可少的。

“检测”是测量，“计量”也是测量，但两者还是有区别的。一般说来，“计量”是指用精度等级更高的标准量具、器具或标准仪器，对送检量具、仪器或被测样品、样机进行考核性质的测量。这种测量通常具有非实时及离线和标定的性质，一般在规定的具有良好环境条件的计量室、实验室，采用比被测样品、样机更高精度的并按有关计量法规定期校准的标准量具、器具或标准仪器进行测量。而“检测”通常是指在生产、实验等现场，利用某种合适的检测仪器或综合测试系统对被对象进行在线、连续的测量。

据了解,目前国内外一些城市污水处理厂由于在污水的收集、提升、处理及排放等环节均实现自动检测与优化控制,因而大大降低了污水处理的运营成本,其污水处理的平均运行费用约为 0.4 元/ m^3 。而我国许多基本上靠人工操作的城镇污水处理厂的污水处理平均运行费用为 $1.0\sim 1.6$ 元/ m^3 ,与前者相比差距十分明显。

在军工生产和新型武器、装备研制过程中更离不开现代检测技术,对检测的需求更多、要求更高。研制任何一种新武器,从设计到零部件制造、装配到样机试验,都要经过成百上千次严格的试验,每次试验需要同时高速、高精度地检测多种物理参量,测量点经常多达上千个。飞机、潜艇等在正常使用时都装备了上百个不同的检测传感器,组成十几至几十种检测仪表,实时监测和指示各部位的工作状况。在新机型设计、试验过程中需要检测的物理量更多,而检测点通常在 5000 个以上。在火箭、导弹和卫星的研制过程中,需动态高速检测的参量也很多,要求也更高。没有精确、可靠的检测手段,要使导弹准确命中目标和卫星准确入轨是根本不可能的。

各种先进的医疗检测仪器可大大提高疾病的检查、诊断速度和准确性,有利于争取时间,对症治疗,增加患者战胜疾病的机会。

随着生活水平的提高,检测技术与人们日常生活也越来越密切。例如,新型建筑材料的物理、化学性能检测,装饰材料有害成分是否超标检测,城镇居民家庭室内的温度、湿度、防火、防盗及家用电器的安全监测等,不难看出检测技术在现代社会中的重要地位与作用。

三、检测系统的组成

尽管现代检测仪器和检测系统的种类、型号繁多,用途、性能千差万别,但它们的作用都是用于各种物理或化学成分等参量的检测。它们的组成单元按信号传递的流程来描述:通常由各种传感器(转换器)将非电被测物理或化学成分参量转换成电信号,然后经信号调理(信号转换、信号检波、信号滤波、信号放大等)、数据采集、信号处理后显示并输出[通常有 $4\sim 20$ mA的电流信号、经D/A转换和放大后的模拟电压、开关量、脉宽调制(PWM)、串行数字通信和并行数字输出等],由以上设备以及系统所需的交、直流稳压电源和必要的输入设备(如拨动开关、按钮、数字拨码盘、数字键盘等)便组成了一个完整的检测(仪器)系统。现代检测系统组成框图如图1-2所示。

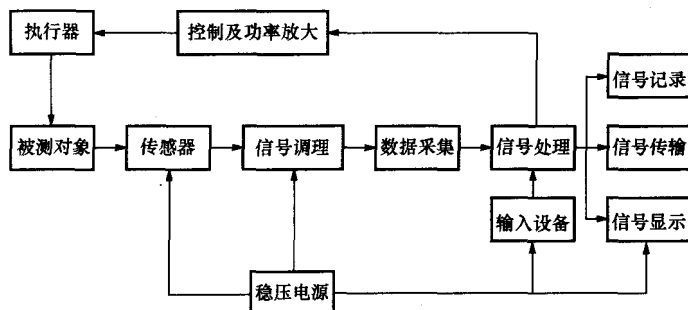


图 1-2 现代检测系统组成框图

1. 传感器

传感器作为检测系统的信号源,其性能的好坏将直接影响检测系统的精度和其他指标,是检测系统中十分重要的环节。本书主要介绍工程上涉及面较广、应用较多、需求量大的各

种物理量、化学成分量常用的先进的检测技术与实现方法，以及如何选用合适的传感器；对传感器要求了解其工作原理、应用特点，而对如何提高现有传感器本身的技术性能，以及设计开发新的传感器则不作深入研究。

通常检测仪器、检测系统对传感器有如下要求：

(1) 精确性。传感器的输出信号必须准确地反应其输入量，即被测量的变化。因此，传感器的输出与输入关系必须是严格的单值函数关系，最好是线性关系。

(2) 稳定性。传感器的输入与输出的单值函数关系最好不随时间和温度而变化，受外界其他因素的干扰影响亦应很小，重复性要好。

(3) 灵敏度。要求被测参量较小的变化就可使传感器获得较大的输出信号。

(4) 其他。耐腐蚀性好、低能耗、输出阻抗小和售价相对较低等。

2. 信号调理

信号调理在检测系统中的作用是对传感器输出的微弱信号进行检波、转换、滤波、放大等，以方便检测系统后续环节处理或显示。例如，工程上常见的热电阻型数字温度检测（控制）仪表，其传感器 Pt100 的输出信号为热电阻值的变化。为便于处理，通常需设计一个四臂电桥，把随被测温度变化的热电阻阻值转换成电压信号。由于信号中往往夹杂着 50Hz 工频等噪声电压，故其信号调理电路通常包括滤波、放大、线性化等环节。需要远传的话，通常采取 D/A 或 V/I 电路将获得的电压信号转换成标准的 4~20mA 电流信号后再进行远距离传送。检测系统种类繁多，复杂程度差异很大，信号的形式也多种多样，各系统的精度、性能指标要求各不相同，它们所配置的信号调理电路的多少也不尽一致。

对信号调理电路的一般要求是：

(1) 能准确转换、稳定放大、可靠地传输信号；

(2) 信噪比高，抗干扰性能要好。

3. 数据采集

数据采集（系统）在检测系统中的作用是对信号调理后的连续模拟信号进行离散化，并转换成与模拟信号电压幅度相对应的一系列数值信息，同时以一定的方式把这些转换数据及时传递给微处理器或依次自动存储。数据采集系统通常以各类 A/D 转换器为核心，辅以模拟多路开关、采样/保持器、输入缓冲器、输出锁存器等。

数据采集系统的主要性能指标有：

(1) 输入模拟电压信号范围，单位为 V；

(2) 转换速度（率），单位为次/s；

(3) 分辨率，通常以模拟信号输入为满度时的转换值的倒数来表征；

(4) 转换误差，通常指实际转换数值与理想 A/D 转换器理论转换值之差。

4. 信号处理

信号处理模块是现代检测仪表、检测系统进行数据处理和各种控制的中枢环节，其作用和人的大脑相类似。现代检测仪表、检测系统中的信号处理模块通常以各种型号的单片机、微处理器为核心来构建，对高频信号和复杂信号的处理有时需增加数据传输和运算速度快、处理精度高的专用高速数据处理器（DSP），或直接采用工业控制计算机。

5. 信号显示

通常人们都希望及时知道被测参量的瞬时值、累积值或其随时间的变化情况，因此，各

类检测仪表和检测系统在信号处理器计算出被测参量的当前值后,通常均需送至各自的显示器作实时显示。显示器是检测系统与人联系的主要环节之一,一般可分为指示式显示、数字式显示和屏幕式显示三种。

(1) 指示式显示又称模拟式显示。被测参量数值大小由光指示器或指针在标尺上的相对位置来表示。用有形的指针位移模拟无形的被测量是较方便、直观的。

(2) 数字式显示以数字形式直接显示出被测参量数值的大小。在正常情况下,数字式显示彻底消除了显示驱动误差,能有效地克服读数的主观误差,(相对指示式仪表)可提高显示和读数的精度,还能方便地与计算机连接并进行数据传输。因此,各类检测仪表和检测系统正越来越多地采用数字式显示方式。

(3) 屏幕式显示实际上是一种类似电视显示方法,具有形象性和易于读数的优点,又能同时同一屏幕上显示一个被测量或多个被测量的(大量数据式)变化曲线,有利于对它们进行比较、分析。屏幕显示器一般体积较大,价格与变通指示式显示、数字式显示相比要高得多,其显示通常需由计算机控制,对环境温度、湿度等指标要求较高,在仪表控制室、监控中心等环境条件较好的场合使用较多。

6. 信号输出

在许多情况下,检测仪表和检测系统在信号处理器计算出被测参量的瞬时值后,除送显示器进行实时显示外,通常还需把测量值及时传送给控制计算机、可编程控制器(PLC)或其他执行器、打印机、记录仪等,从而构成闭环控制系统或实现打印(记录)输出。检测仪表和检测系统的信号输出通常有4~20mA的电流信号,经D/A转换和放大后的模拟电压、开关量、脉宽调制(PWM)、串行数字通信和并行数字输出等多种形式,需根据测控系统的具体要求确定。

7. 输入设备

输入设备是操作人员和检测仪表(或检测系统)联系的另一主要环节,用于输入设置参数、下达有关命令等。最常用的输入设备是各种键盘、拨码盘、条码阅读器等。近年来,随着工业自动化、办公自动化和信息化程度的不断提高,通过网络或各种通信总线利用其他计算机或数字化智能终端,实现远程信息和数据输入的方式越来越普遍。最简单的输入设备是各种开关、按钮。模拟量的输入、设置往往借助电位器进行。

8. 稳压电源

一个检测仪表或检测系统往往既有模拟电路部分,又有数字电路部分,通常需要多组幅值大小要求各异但稳定的电源。这类电源在检测系统使用现场一般无法直接提供,通常只能提供交流220V工频电源或+24V直流电源。检测系统的设计者需要根据使用现场的供电电源情况及检测系统内部电路的实际需要,统一设计各组稳压电源,给系统各部分电路和器件分别提供所需的稳定电源。

第四节 检测技术的发展趋势

随着世界各国现代化步伐的加快,对检测技术的要求越来越高。而科学技术的不断进步,尤其是大规模集成电路技术、微型计算机技术、机电一体化技术、微机械和新材料技术方面,大大促进了现代检测技术的发展。目前,现代检测技术发展的总趋势大体有以下几个

方面。

一、不断拓展测量范围，努力提高检测精度和可靠性

随着科学技术的发展，对检测仪器和检测系统的性能要求，尤其是精度、测量范围、可靠性指标的要求越来越高。以温度为例，为满足某些科研实验的需求，不仅要求研制测温下限接近 0K (-273.15°C)，且测温量程尽可能达到 15K (约 -258°C) 的高精度超低温检测仪表。同时，某些场合需连续测量液态金属的温度或长时间连续测量 $2500\sim 3000^{\circ}\text{C}$ 的高温介质温度，目前虽然已能研制和生产最高上限超过 2800°C 的热电偶，但测温范围一旦超过 2500°C ，其准确度将下降，而且极易氧化，从而严重影响其使用寿命与可靠性。因此，寻找能长时间连续准确检测上限超过 2000°C 被测介质温度的新方法、新材料和研制出相应的测温传感器（尤其是适合低成本大批量生产）是各国科技工作者多年来一直努力要解决的课题。目前，非接触式辐射型温度检测仪表的测温上限，理论上最高可达 10^5°C 以上，但与聚核反应优化控制理想温度（约 10^8°C ）相比还相差 3 个数量级，这就说明超高温检测的需求远远高于当前温度检测所能达到的技术水平。

二、传感器逐渐向集成化、组合式、数字化方向发展

传感器与信号调理电路分开，使微弱的传感器信号在通过电缆传输的过程中容易受到各种电磁干扰信号的影响，再加上各种传感器输出信号形式众多，而使检测仪器与传感器的接口电路无法统一和标准化，实施起来颇为不便。

随着大规模集成电路技术的迅猛发展，采用贴片封装方式、体积大大缩小的通用和专用集成电路越来越普遍，因此，目前已有不少传感器实现了敏感元件与信号调理电路的集成和一体化，对外可直接输出标准的 $4\sim 20\text{mA}$ 电流信号，成为名副其实的转换器。这对检测仪器整机研发与系统集成提供了很大的方便，从而使得这类传感器身价倍增。

其次，一些厂商把两种或两种以上的敏感元件集成于一体，成为可实现多种功能的新型组合式传感器。例如，将热敏元件和湿敏元件及信号调理电路集成在一起，一个传感器可同时完成温度和湿度的测量。

三、重视非接触式检测技术研究

在检测过程中，把传感器置于被测对象上，可灵敏地感知被测参量的变化，这种接触式检测方法通常比较直接、可靠，测量精度较高，但在某些情况下，因传感器的加入会对被测对象的工作状态产生干扰，影响测量的精度。而在有些被测对象上，根本不允许或不可能安装传感器，如测量高速旋转的振动、转矩等。因此，各种可行的非接触式检测技术的研究越来越受到重视。目前已商品化的光电式传感器、电涡流式传感器、超声波检测仪表、核辐射检测仪表等正是在这些背景下不断发展起来的。今后不仅需要继续改进和克服非接触式检测仪器（传感器）易受外界干扰及绝对精度较低等问题，而且相信对一些难以采用接触式检测或无法采用接触方式进行检测的，尤其是那些具有重大军事、经济或其他应用价值的非接触检测技术课题的研究投入会不断增加，非接触检测技术的研究、发展和应用步伐将会明显加快。

四、检测系统智能化

近十年来，由于包括微处理器、单片机在内的大规模集成电路的成本和价格不断降低，功能和集成度不断提高，使得许许多多单片机、微处理器或微型计算机为核心的现代检测仪器（系统）实现了智能化，这些现代检测仪器通常具有系统故障自测、自诊断、自调零、

自校准、自选量程、自动测试和自动分选功能,强大数据处理和统计功能,远距离数据通信和输入与输出功能,可配置各种数字通信接口,传递检测数据和各种操作命令等,还可方便地接入不同规模的自动检测、控制与管理信息网络系统。与传统检测系统相比,智能化的现代检测系统具有更高的精度和性价比。

本章小结

本章在论述传感器及检测技术基本概念的基础上,较为详细地介绍了传感器的分类和发展方向以及检测系统的组成,特别是对近几年发展起来的无线传感器网络及在环境监护、医疗和军事领域的应用进行了阐述。

习题与思考题

- 1-1 举例说明检测技术在现代化建设中的应用。
- 1-2 检测系统通常由哪几部分组成?各类检测系统对传感器的一般要求是什么?
- 1-3 检测技术的发展趋势是什么?
- 1-4 检测系统的组成及各部分的作用?
- 1-5 简述无线传感器网络的应用?

第二章 测量误差理论

人类为了认识自然与改造自然,需要不断地对自然界的各种现象进行测量和研究,但由于受人们的认识能力、测量仪器的性能、实验方法的不完善、周围环境及被测对象的变化等因素的影响,测量和实验所得数据与被测量的真值之间不可避免地存在着差异,这些差异在数值上即表现为误差。随着科学技术的日益发展和人们认识水平的不断提高,虽然可将误差控制得越来越小,但终究不能完全消除。误差存在的必然性和普遍性已为大量实践所证明:任何测量均有误差,误差存在于一切测量过程中,这就是所谓的误差公理。为了充分认识并减小误差,必须对测量过程和科学实验中的误差进行研究。

测量误差理论包括基本误差理论、数据处理方法、不确定度评定规范三大部分内容。

目前,误差理论与数据处理已经发展成为一门独立的学科,属于理论计量学范畴。本章的有关内容均符合最新的相关国家计量技术规范。

第一节 测量与测量误差的基本概念

一、测量的定义和分类

测量是以确定量值为目的的一组操作,有时也称为计量。

按获取被测量结果的方法不同,测量方法一般可分为直接测量法和间接测量法。所谓间接测量法是指,通过直接测量的量值与被测量量值之间的已知函数关系,确定被测量量值的测量方法。所谓直接测量法是指直接获取被测量量值的测量方法。不难理解,直接测量法是间接测量法的一种特例,而间接测量法更具有一般性。

例如,用尺子测量长度、用玻璃温度计测量温度、用量筒测量液体体积等测量均属于直接测量;根据测量电阻、导线长度和截面积的方法确定金属电阻率的方法则属于间接测量。

在计量学领域,为了获得更好的测量结果,还经常采用诸如定义测量法、直接比较法、闭环组合测量法、替代测量法、交换(对置)测量法、微差测量法、零位测量法及最常见的偏移测量法等。这些方法均属于上述两种方法的范畴,只是具体实施方法略有不同,因此对于不同的测量任务,应选择合适的测量方法。

测量与计量既有联系,又有区别。计量是实现单位统一、量值准确可靠的活动,这个活动通常伴随测量。计量学是关于测量的科学,是保证单位统一和量值准确可靠的科学。计量学覆盖测量的理论与实践的各个方面。计量学曾经称为度量衡学、权度学。计量学研究的主要内容包括:可测量的量、计量单位、计量基准和计量标准的建立与复现、量值保存及传递、测量原理、测量方法、测量不确定度、观测者进行测量的能力、计量的法制和管理、物理常量与物理常数、标准(参考)物质、材料特性的准确确定等。

二、量与测量误差的基本概念

(一) 被测量

被测量是指测量对象的特定量。

(二) 量的真值

(1) 定义：与给定的特定量定义一致的值。

(2) 说明：通过测量得到的值只能逼近真值。

(三) 量的约定真值

(1) 定义：对于给定的目的、被赋予适当不确定度的特定量的值，该值常通常是约定采用的。

(2) 说明：

1) 约定真值有时称为最佳估计值、指定值、约定值、参考值；

2) 在实际测量中约定真值通常是被测量的实际值、已修正过的算术平均值、计量标准的值等相对准确的值；

3) 约定真值可以是权威推荐值，如国际科学技术数据委员会 (CODATA) 1986 年推荐的阿伏伽德罗常数为 $6.0221367 \times 10^{23} \text{ mol}^{-1}$ ；

4) 约定真值可以是理论值，如：三角形内角和为 180° 。

(四) 测量误差

(1) 定义：测量结果与被测量真值的差。

(2) 定义式为

$$e = x - x_{\text{true}} \quad (2-1)$$

由于真值 x_{true} 不能确定，则误差不能确定，故常用约定真值 $x_{\text{con}\cdot\text{true}}$ 代替真值 x_{true} ，此时得到的误差值 $e = x - x_{\text{con}\cdot\text{true}}$ 为误差估计值。通常所说的误差均是测量误差的估计值，其是一个大小和符号确定的值。

(五) 相对误差

(1) 定义：测量误差与被测量真值的比值。

(2) 定义式为

$$r_{\text{tr}} = \frac{x - x_{\text{true}}}{x_{\text{true}}} \times 100\% \quad (2-2)$$

由于被测量真值不可知，因此工程上常用以下表达式计算相对误差的估计值

$$r_c \approx \frac{x - x_{\text{con}\cdot\text{true}}}{x_{\text{con}\cdot\text{true}}} \times 100\% \quad (2-3)$$

$$r_x \approx \frac{x - x_{\text{con}\cdot\text{true}}}{x} \times 100\% \quad (2-4)$$

(3) 说明：

1) 相对误差以百分数表示， r_c 通常称实际相对误差、 r_x 通常称示值相对误差。

2) 给出相对误差时，必须说明 x 的取值范围，避免 $x=0$ 的情况用相对误差表达。如果出现这种情况，则用相对误差表达绝对误差，即 $e = r_x x$ 。这时 $x=0$ 可能导出 $e=0$ ，但要注意测量误差的估计值为 0，并不意味着测量结果的不确定度为 0，即并不意味着被测量的测量值就是真值。

3) 式 (2-1) 中所表达的误差通常称为绝对误差，它是与相对误差对应的专有名词，不要与误差绝对值混淆。

4) 相对误差由绝对误差和测量值大小决定，因此不能简单地根据相对误差值的大小来判断测量结果的好坏和测量仪器及系统的优劣，只能判断误差相对测量值的大小。某些小信

号测量的相对误差较大,测量结果和仪器却体现了相当高的技术水平。另外,由于测量目的不同,具体的测量任务对绝对误差和相对误差的要求也不同。

【例 2-1】 用一个 4 位多量程数字频率计测量标准频率信号源输出 100kHz 时的频率,量程选择为 0~10MHz,频率计测量值为 101kHz,求频率计在该点的绝对误差和相对误差。

解 绝对误差

$$e = x - x_{\text{con}\cdot\text{true}} = 101 - 100 = 1(\text{kHz})$$

相对误差

$$r_c \approx \frac{x - x_{\text{con}\cdot\text{true}}}{x_{\text{con}\cdot\text{true}}} = \frac{1}{100} = 1\%$$

【例 2-2】 用 [例 2-1] 中频率计测量标准频率信号源输出 1000kHz 时的频率,量程仍选择为 0~10MHz,频率计测量值为 1001kHz,求频率计在该点的绝对误差和相对误差。

解 绝对误差

$$e = x - x_{\text{con}\cdot\text{true}} = 1001 - 1000 = 1(\text{kHz})$$

相对误差

$$r_c \approx \frac{x - x_{\text{con}\cdot\text{true}}}{x_{\text{con}\cdot\text{true}}} = \frac{1}{1000} \times 100\% = 0.1\%$$

【例 2-3】 用 [例 2-1] 中频率计测量标准频率信号源输出 100kHz 时的频率,量程选择为 0~1MHz,频率计测量值为 100.1kHz,求频率计在该点的绝对误差和相对误差。

解 绝对误差

$$e = x - x_{\text{con}\cdot\text{true}} = 100.1 - 100 = 0.1(\text{kHz})$$

相对误差

$$r_c \approx \frac{x - x_{\text{con}\cdot\text{true}}}{x_{\text{con}\cdot\text{true}}} = \frac{0.1}{100} \times 100\% = 0.1\%$$

【例 2-4】 用 [例 2-1] 中频率计测量标准频率信号源输出 990kHz 时的频率,量程选择为 0~1MHz,精密频率计测量值为 990.1kHz,求频率计在该点的绝对误差和相对误差。

解 绝对误差

$$e = x - x_{\text{con}\cdot\text{true}} = 990.1 - 990 = 0.1(\text{kHz})$$

相对误差

$$r_c \approx \frac{x - x_{\text{con}\cdot\text{true}}}{x_{\text{con}\cdot\text{true}}} = \frac{0.1}{990} \times 100\% \approx 0.01\%$$

从上面四个例子可以得到如下结论:

- (1) 使用同一量程测量不同大小的被测量时,绝对误差相同,其相对误差不同;
- (2) 使用不同量程测量大小相同的被测量时,绝对误差不同,其相对误差不同;
- (3) 使用不同量程测量大小不同的被测量时,绝对误差不同,其相对误差可能相同。

在测量工作中,要获得相对准确的测量结果,选择合适性能的仪表和量程非常重要,否则导致测量成本的提高或测量结果的不满意。

三、仪器误差的有关概念

绝对误差与相对误差是误差的基本概念,适用于所有的测量工作。但是还有一些针对仪