



“十三五”普通高等教育本科规划教材

CHUANGANQI YU JIANCEJISHU YUANLI JI SHIJIAN

传感器与检测技术 原理及实践

沈显庆 主 编

孟毅男 王蕴恒 寇晓静 副主编



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS



“十三五”普通高等教育本科规划教材

传感器与检测技术 原理及实践

主 编 沈显庆
副主编 孟毅男 王蕴恒 寇晓静
编 写 潘洪亮 曹小燕 周 杰 孙 鹏
主 审 樊尚香



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

内 容 提 要

本书为“十三五”普通高等教育本科规划教材。

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,主要内容包括传感器及检测技术概述、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、检测系统的综合设计、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/沈显庆主编. —北京:中国电力出版社,2018.10

“十三五”普通高等教育本科规划教材

ISBN 978-7-5198-2049-7

I. ①传… II. ①沈… III. ①传感器—检测—高等学校—教材 IV. ①TP212

中国版本图书馆CIP数据核字(2018)第172180号

出版发行:中国电力出版社

地 址:北京市东城区北京站西街19号(邮政编码100005)

网 址: <http://www.cepp.sgcc.com.cn>

责任编辑:陈硕(010—63412532) 贾丹丹

责任校对:黄 蓓 太兴华

装帧设计:郝晓燕

责任印制:钱兴根

印 刷:北京天宇星印刷厂

版 次:2018年10月第一版

印 次:2018年10月北京第一次印刷

开 本:787毫米×1092毫米 16开本

印 张:22.25

字 数:548千字

定 价:53.00元

版 权 专 有 侵 权 必 究

本书如有印装质量问题,我社发行部负责退换

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定了“十三五”普通高等教育本科规划教材。该教材强调适应不同层次、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亟需的专业教材并重、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，传感器与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。

本书在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，重点讲述了检测系统综合设计和工程实践方法。

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

2018年1月

目 录

前言

第一章 传感器及检测技术概述	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	4
本章小结	5
习题与思考题	6
第二章 测量误差理论	7
第一节 测量与测量误差的基本概念	7
第二节 测量误差的性质与基本规律	13
第三节 最佳估计值及其误差分析	33
第四节 测量不确定度及其评定	47
第五节 最小二乘法	52
本章小结	54
习题与思考题	54
第三章 检测信号处理	56
第一节 测量电桥	56
第二节 测量放大器	62
第三节 噪声信号处理	73
本章小结	84
习题与思考题	84
第四章 常用传感器	85
第一节 传感器的特性	85
第二节 电阻应变式传感器	91
第三节 电容式传感器	100
第四节 电感式传感器	109
第五节 电涡流式传感器	117
第六节 压电式传感器	121
第七节 磁电式传感器	131
第八节 光电式传感器	135
第九节 霍尔式传感器	145
第十节 光纤传感器	153

第十一节 超声波传感器·····	159
第十二节 气敏与湿敏传感器·····	162
第十三节 生物传感器·····	169
第十四节 传感器的标定·····	171
本章小结·····	174
习题与思考题·····	174
第五章 电参数测量 ·····	176
第一节 电压测量·····	176
第二节 电流测量·····	198
第三节 电抗测量·····	202
第四节 频率时间测量·····	217
第五节 相位差测量·····	226
本章小结·····	231
习题与思考题·····	231
第六章 非电量测量 ·····	234
第一节 长度及线位移测量·····	234
第二节 角度及角位移测量·····	242
第三节 速度、转速及加速度测量·····	245
第四节 力、力矩及应力测量·····	248
第五节 温度测量·····	252
第六节 流量测量·····	261
第七节 压力测量·····	267
第八节 振动测量·····	270
第九节 成分与物性测量·····	274
本章小结·····	278
习题与思考题·····	280
第七章 检测系统的综合设计 ·····	281
第一节 综合设计基础·····	281
第二节 温度检测系统设计·····	289
第三节 位移检测系统设计·····	294
第四节 压力检测系统设计·····	303
本章小结·····	311
习题与思考题·····	311
第八章 工程实践方法 ·····	312
第一节 工程实践内容·····	312
第二节 设计实践·····	312
本章小结·····	344
习题与思考题·····	344
参考文献 ·····	346

第一章 传感器及检测技术概述

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的自动检测,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及自身状态的各种物理量(如力、位移、速度、位置等)及其变化,并将这些信号转换成电信号,然后再通过相应的变换、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。其中,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,它们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。其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变换为容易传输、处理、记录和显示的形式。其组成框图如图 1-1 所示。

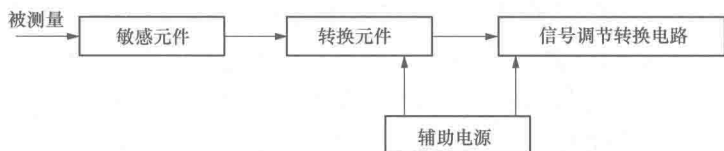


图 1-1 传感器组成框图

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、振动国、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、比重等。

(5) 光学量：光强、光通量、光照度、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方法分类

(1) 电磁转换：电阻式、应变式、压阻式、热阻式、电感式、互感式（差动变压器）、电容式、阻抗式（电涡流式）、磁电式、热电式、压电式、霍尔式、振频式、感应同步器、磁栅等。

(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。

3. 按使用性质分类

按使用性质检测仪表通常可分为标准表、实验室表和工业用表等三种。

“标准表”是各级计量部门专门用于精确计量、校准送检样品和样机的标准仪表。标准表的精度等级必须高于被测样品、样机所标称的精度等级；而其本身又根据量值传递的规定，必须经过更高一级法定计量部门的定期检定、校准。

“实验室表”多用于各类实验室中，它的使用环境条件较好，往往无特殊的防水、防尘措施。对于温度、相对湿度、机械振动等的允许范围也较小。这类检测仪表的精度等级虽较工业用表为高，但使用条件要求较严，只适于实验室条件下的测量与读数，不适于远距离观察及传送信号等。

“工业用表”是长期使用于实际工业生产现场的检测仪表与检测系统。这类仪表为数最多，根据安装地点的不同，又有现场安装及控制室安装之分。前者应有可靠的防护，能抵御恶劣的环境条件，其显示也应醒目。工业用表的精度一般不很高，但要求能长期连续工作，并具有足够的可靠性。

第二节 传感器技术的发展动向

传感器位于检测系统的入口是获取信息的第一个环节，因此它的精度、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，传感器的性能不断提高，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

传感器集成化包括两种定义，一是同一功能的多元件并列化，即将同一类型的单个传感元件用集成工艺在同一平面上排列起来，排成 1 维的为线性传感器，CCD 图像传感器就属于这种情况。集成化的另一个定义是多功能一体化，即将传感器与放大、运算以及温度补偿等环节一体化，组装成一个器件。

多功能体现在传感器能测量不同性质的参数，实现综合检测。例如：集成有压力、温度、湿度、流量、加速度、化学等不同功能敏感元件的传感器，能同时检测外界环境的物理特性或化学特性，进而实现对环境的多参数综合监测。

三、传感器的智能化

传感器与微处理机相结合，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”等人工智能，就称之为传感器的智能化。借助于半导体集成化技术把传感器部分与信号预处理电路、输入输出接口、微处理器等制作在同一块芯片上，即成为大规模集成智能传感器。可以说智能传感器是传感器技术与大规模集成电路技术相结合的产物，它的实现将取决于传感技术与半导体集成化工艺水平的提高与发展。这类传感器具有多能、高性能、体积小、适宜大批量生产和使用方便等优点，可以肯定地说，是传感器重要的方向之一。

四、传感器的微型化

微电子工艺、微机械加工和超精密加工等先进制造技术在各类传感器的开发和生产中的不断普及，使传感器向以微机械加工技术为基础、仿真程序为工具的微结构技术方向发展。如采用微机械加工技术制作的 MEMS 产品（微传感器和微系统），具有划时代的微小体积、低成本、高可靠性等独特的优点。

五、网络化

网络传感器的开发，使测控系统主动进行信息处理以及远距离实时在线测量成为可能。

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、被控对象的相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，两者有什么区别？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经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、处理及排放和各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 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其污水处理的平均运行费用为 $1.0 \sim 1.6 \text{ 元/m}^3$, 两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理,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。

用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。

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,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的不断进步,则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。

(1) 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绝对零度 (-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(尤其是适合低成本大批量生产) 出相应的测温传感器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。

(2) 传感器逐渐向集成化、组合式、数字化方向发展。

鉴于传感器与信号调理电路分开, 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, 由于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, 成为名副其实的变送器。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。

(3) 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, 而影响测量的精度。而在有些被测对象上, 根本不允许或不可能安装传感器, 例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(传感器)检测仪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。

(4) 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, 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、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能/价格比。



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、检测技术的发展趋势, 并在环境监护、医疗和军事领域的应用进行了阐述。



习题与思考题

- 1-1 传感器的组成与分类是什么?
- 1-2 举例说明检测技术在现代化建设中的作用。
- 1-3 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?
- 1-4 检测技术的发展趋势是什么?

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、周围环境以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、不确定度评定、数据处理方法等三大部分内容。

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。测量有时也称为计量。

按获取被测量测量结果的方法不同,测量一般可分为直接测量法和间接测量法。

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。直接测量法则是直接获取被测量量值的测量方法。例如:用尺子测量长度、用玻璃温度计测量温度、用量筒测量液体容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、零位测量法以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。计量学曾经称作“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，如科学技术数据委员会 (CODATA) 2012 年推荐的“阿伏伽德罗常数”为 $6.022\ 141\ 79(30) \times 10^{23} \text{ mol}^{-1}$ ，测量该值的相对标准不确定度为 5.0×10^{-8} ；

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：

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

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 $e = x - x_{\text{con} \cdot \text{true}}$ 为误差的测量值或估计值，通常所说的误差均是测量误差的测量值或估计值。误差的测量值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：

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

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

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

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

(3) 说明：

1) 相对误差以百分数表示， r_e 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，要避免 $x=0$ 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 $e = r_x \cdot x$ ，这时当 $x=0$ 时可能导出 $e=0$ ，但要注意：误差的测量值为 0，并不意味着测量误差为 0，因为被测量的真值不可知。

3) 在式 (2-1) 中所表达的误差通常称作绝对误差，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。

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

(一) 引用误差

(1) 定义: 测量器具的绝对误差与其引用值的比值。

(2) 定义式:
$$r_f = \frac{e}{x_f} \times 100\% \quad (2-5)$$

(3) 说明:

1) 如果不做特殊说明, 引用值 x_f 通常是该仪器的量程, 即 $x_f = x_{\max} - x_{\min}$; 当 $x_{\min} = 0$ 时 $x_f = x_{\max}$, 此时引用值 x_f 为标称范围的上限。

2) 引用误差虽然是相对值, 但由于引用值是确定的, 故引用误差是以相对误差的形式表示测量器具的绝对误差, 当仪表的准确度等级以引用误差表达时, 则给出了仪表的最大绝对误差 $e_{\max} = C\% \cdot (x_{\max} - x_{\min})$, C 为仪表等级、 $r_f = C\%$ 。

3) 模拟指针仪表、工业仪表的等级常用引用误差表达。

4) 某些模拟指针仪表用相对误差表达等级, 但必须给出合适的测量范围。

5) 数字仪表通常用 2 项合成的表达式表达其误差极限值:

a) $e_{\max} = \pm(a\% \cdot x + b\% \cdot FR)$, x 为示值、 FR (Full Range) 通常是 $x_{\max}$;

b) $e_{\max} = \pm(a\% \cdot x + n \cdot digit)$, $n = 1 \sim 4$ 、 $digit$ 是与量程对应的末位数字所代表的值。

【例 2-1】 求以引用误差定等的 1.0 级、测量范围为 0~100V 电压表的最大绝对误差。当用该电压表测量 50V 的电压时, 测量结果的相对误差不超过多少?

解: 最大绝对误差 $e_{\max} = 1.0\% \times (100 - 0) = 1 \text{ (V)}$ 。

用该电压表测量 50V 时的相对误差不超过 $r_{\max} = \frac{1V}{50V} = 2\%$ 。

【例 2-2】 标称范围为 0~150V 的电压表, 当其示值为 100.0V 时, 测得其输入电压实际值为 99.4V。则求该电压表在 100.0V 处的引用误差和相对误差。

解: 该电压表在 100.0V 处的引用误差 $r_f = \frac{e}{x_f} = \frac{100 - 99.4}{150 - 0} = 0.4\%$

该电压表在 100.0V 处的相对误差 $r = \frac{e}{x} = \frac{100 - 99.4}{100} = 0.6\%$

【例 2-3】 用 4 $\frac{1}{2}$ 位数字电压表 2V 挡和 200V 挡测量 1V 电压, 该电压表各挡允许误差限均为 $\pm(0.02\% \cdot x + 1digit)$, 试分析用上述两挡分别测量时的相对误差。

解: 用 2V 挡测量, 绝对误差为 $e_{2V} = \pm(0.02\% \cdot 1V + 0.0001V) = \pm 0.0003V$,

相对误差 $r_{2V} = \frac{0.0003V}{1V} = 0.03\%$

用 200V 挡测量, 绝对误差为 $e_{200V} = \pm (0.02\% \cdot 1V + 0.01V) = \pm 0.010 \text{ V}$,

$$\text{相对误差} \quad r_{200V} = \frac{0.010 \text{ V}}{1V} = 1.02\%$$

这个例子说明了用同一数字仪表的不同量程测量同一个被测量, 测量误差是不同的; 使用同一量程测量两个差距较大的被测量时, 误差表达式中的两个部分误差的贡献是不同的。

【例 2-4】 某待测的电压约为 100V, 现有 0.5 级 0~300V 和 1.0 级 0~100V 两个以引用误差定等的电压表, 问用哪一个电压表测量比较好?

解: 用 0.5 级 0~300V 测量 100V 时

$$\text{最大绝对误差为} \quad e_{\max} = 0.5\% \times (300 - 0) = 1.5V$$

$$\text{最大相对误差为} \quad r_{\max} = \frac{1.5V}{100V} = 1.5\%$$

用 1.0 级 0~100V 测量 100V 时

$$\text{最大绝对误差为} \quad e_{\max} = 1.0\% \times (100 - 0) = 1.0V$$

$$\text{最大相对误差为} \quad r_{\max} = \frac{1.0V}{100V} = 1.0\%$$

上面这个例子同样说明了如果量程选择恰当, 用 1.0 级仪表进行测量比用 0.5 级仪表更准确。

(二) 分贝误差

在电子测量领域, 分贝误差广泛用于增益(衰减)量的测量中, 经常使用分贝误差来表达增益(衰减)测量的相对误差。

1. 对于电压、电流量

设双口网络(如放大器或衰减器)输入、输出电压的测量值分别为 U_i 和 U_o , 电压增益的测量值为 A_u

$$A_u = \frac{U_o}{U_i} \quad (2-6)$$

用对数表示为

$$G_u = 20 \lg A_u \text{ (dB)} \quad (2-7)$$

G_u 为增益测量值的分贝值 (dB)。

设 A 为电压增益实际值, 其分贝值 $G = 20 \lg A$, 根据误差定义及式 (2-7) 有

$$\Delta A = A_u - A$$

$$\text{从而} \quad G_u = 20 \lg(A + \Delta A) = 20 \lg \left[A \left(1 + \frac{\Delta A}{A} \right) \right] = 20 \lg A + 20 \lg \left(1 + \frac{\Delta A}{A} \right)$$

$$\text{定义分贝误差为} \quad \gamma_{dB} = G + 20 \lg \left(1 + \gamma_{dB} \frac{\Delta A}{A} \right) = G_x - G = 20 \lg \left(1 + \frac{\Delta A}{A} \right) \quad (\text{dB})$$

定义增益相对误差 $\gamma_A = \frac{\Delta A}{A}$ 则有

$$\gamma_{dB} = 20 \lg(1 + \gamma_A) \quad (\text{dB}) \quad (2-8)$$

式 (2-8) 表达了电压(电流)增益相对误差与分贝误差的关系。

2. 对于功率类参量

同理, 当 $A_P = \frac{P_o}{P_i}$ 时可得

$$\gamma_{dB} = 10 \lg(1 + \gamma_P) \quad (\text{dB}) \quad (2-9)$$

式 (2-9) 表达了功率增益相对误差与分贝误差的关系。

当 γ_A 与 γ_P 较小时, 将式 (2-8)、式 (2-9) 分别按级数展开后, 得到两个近似公式

$$\gamma_{dB} \approx 8.69 \gamma_A \quad (\text{dB}) \quad (2-10)$$

$$\gamma_{dB} \approx 4.34 \gamma_P \quad (\text{dB}) \quad (2-11)$$

3. 说明

在实际工作中, 常用 dB 来表示信号电平, 用 dBm 来表示功率信号电平。

为统一测量方法, 确定了一个规约的输入信号大小, 也就是所谓的零电平。

在电子学领域中, 零电平一般定义为: 在 600Ω 的纯电阻上耗散 1mW 的功率。按此定义电阻上的电压和流过的电流分别为

$$U_i = \sqrt{PR} = \sqrt{0.001 \times 600} = 0.7746 (\text{V})$$

$$I_i = \sqrt{\frac{P}{R}} = \sqrt{\frac{0.001}{600}} = 1.291 (\text{mA})$$

作为输入基准值的 1mW 、 0.7746V 和 1.291mA 分别称为零电平功率、零电平电压和零电平电流 (我国不采用电流电平测量基准), 在微波和通信领域中广泛应用。

电压和电流信号引入零电平后的对数增益公式为

$$G_u = 20 \lg \frac{U_o}{0.7746} \quad (\text{dB}) \quad (2-12)$$

功率信号引入零电平后的对数增益公式为

$$G_P = 10 \lg \frac{P_o}{0.001} \quad (\text{dBm}) \quad (2-13)$$

我国现在使用的测量仪器也有取 $1\mu\text{W}$ 为零电平的 (例如测量接收机), 在这种情况下要注意。

【例 2-5】 测量某电压放大器的电压增益。当输入端电压 $U_i = 1.2\text{mV}$ 时, 测得输出电压 $U_o = 6\text{V}$, 若 U_i 的测量误差可忽略, U_o 的测量误差为 $\gamma_u = +3\%$, 求: 放大器电压增益的绝对误差 ΔA , 相对误差 γ_A 及分贝误差 γ_{dB} 。

解:

$$\text{电压增益的测量值} \quad A_u = \frac{\hat{U}_o(\text{测量值})}{U_i} = \frac{6\text{V}}{1.2\text{mV}} = 5000$$

$$\text{电压增益的实际值} \quad A = \frac{U_o(\text{实际值})}{U_i} = \frac{\hat{U}_o - \gamma_u \hat{U}_o}{U_i} = \frac{\hat{U}_o(1 - 3\%)}{U_i} = A_u \cdot (1 - 3\%) = 4850$$

$$\text{电压增益的绝对误差} \quad \Delta A = A_u - A = 5000 - 4850 = +150$$

$$\text{电压增益的相对误差} \quad \gamma_A = \frac{\Delta A}{A} = \frac{+150}{4850} \approx +3.1\%$$

$$\text{电压增益的分贝误差} \quad \gamma_{dB} = 20 \lg(1 + 0.031) = 20 \lg 1.031 = +0.27 (\text{dB})$$

(三) 准确度

1. 测量准确度

测量结果与被测量真值之间的一致程度。