



国防科工委“十五”规划教材·电气工程

电气测试原理与方法

主 编 张晓斌

副主编 吴小华 郑先成 高朝晖

董延军 雷 涛

西北工业大学出版社

北京理工大学出版社 西北工业大学出版社

哈尔滨工业大学出版社 哈尔滨工程大学出版社

内容简介

本书全面、系统地论述了电气测量技术的基本理论,测量原理、方法及其在测试系统中的应用,力求反映近年来在该领域中的新器件、新技术和发展趋势。全书主要内容包括:测量误差和数据处理的基础知识;测试方法与测试系统,包括电磁参数的测试方法,常用传感器与主要非电参数的测试原理,并简要介绍了测试系统的组成;自动测试系统,包括测试系统总线技术与测试软件技术,并对自动测试系统设计基本原则作了简要分析。

本书的内容系统全面,主要侧重于原理和应用,可作为高等院校电类、非电类专业测试技术课程的教材,也可供从事测试技术和自动化工作的工程技术人员学习和参考。

图书在版编目(CIP)数据

电气测试原理与方法/张晓斌主编. —西安:西北工业大学出版社,2007.4
国防科工委“十五”规划教材. 电气工程
ISBN 978-7-5612-2197-6

I. 电… II. 张… III. 电气测量—高等学校—教材 IV. TM93

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2007)第 036836 号

电气测试原理与方法

张晓斌 主编

责任编辑 王莉莎

责任校对 曹锦

西北工业大学出版社出版发行

西安市友谊西路 127 号(710072)

市场部电话:029-88493844 88491757

<http://www.nwpup.com>

陕西向阳印务有限公司印制 各地书店经销

开本:787×960 1/16

印张:25.625 字数:554千字

2007年4月第1版 2007年4月第1次印刷

印数:3000册

ISBN 978-7-5612-2197-6 定价:35.00元

国防科工委“十五”规划教材编委会

(按姓氏笔画排序)

主任：张华祝

副主任：王泽山 陈懋章 屠森林

编委：王 祁 王文生 王泽山 田 蔚 史仪凯

乔少杰 仲顺安 张华祝 张近乐 张耀春

杨志宏 肖锦清 苏秀华 辛玖林 陈光禡

陈国平 陈懋章 庞思勤 武博祎 金鸿章

贺安之 夏人伟 徐德民 聂 宏 贾宝山

郭黎利 屠森林 崔锐捷 黄文良 葛小春



前 言

本书是国防科工委“十五”重点建设教材,根据 1991 年版(西北工业大学出版社)《电气测试技术》在实际教学中的使用情况和经验积累,由西北工业大学组织修订编写。

1991 年由西北工业大学出版社出版的教材《电气测试技术》已在国内使用了 10 多年,得到了广大教师、学生和工程技术人员的充分肯定,也对原版教材提出了不少宝贵意见。与此同时,随着计算机技术的发展,近年来,测试技术也有了长足的发展,无论是测试仪器还是测试方法都有了很大的进步。因此重新编写教材是十分必要的。

本教材仍然保持第一版覆盖面较广,内容较为系统全面,主要侧重于原理和应用,尽量避免一些对介绍原理无关的数学推导等特点,保持了内容的科学性、严密性与完整性。增加了测量系统和计算机的接口、虚拟仪器、动态信号的分析 and 处理等内容,并在不削弱传统传感器基本内容的前提下,增加了目前在工程实际中常用的霍尔电压、电流传感器,以及智能传感器和机器人传感器等反映近代传感技术的新内容,介绍了自动测试系统与虚拟仪器技术的发展、系统组成与基本设计原则,并根据 10 多年来的教学使用情况,对原教材内容作了不少修改和增删。

全书分为三篇共九章:第一篇(第一~三章)为测量误差与数据处理。系统地介绍测量误差和数据处理的基础知识,着重于常用公式的物理意义和具体应用,保持了内容的科学性、严密性与完整性。第二篇(第四~八章)为测试方法与测试系统。因涉及面很宽,所以精选内容并将重点放在测试的基础原理与方法上,归纳为电磁参数的测试方法并介绍常用传感器与主要非电参数的测试原理,简要介绍了测试系统的组成。第三篇(第九章)为自动测试系统。阐述了自动测试系统技术的发展,介绍了测试系统总线技术与测试软件技术,并对自动测试系统设计基本原则作了简要分析。



本教材第一、二章由董延军、张晓斌编写,第三、六、八、九章由郑先成、雷涛编写,第四章由高朝晖编写,第五、七章由吴小华编写。全书由西北工业大学张晓斌教授任主编。

本教材可作为高等学校电气工程专业本科生及相关的电类专业本科生或研究生的教材和参考书,可供从事检测技术和自动化工作的工程技术人员自学与参考;适当删选内容,也可作为大专及各类成人高等教育的教材或者教学参考书。

在本教材的编写过程中,参阅了许多教材,得到了有关院校、研究单位的支持和帮助,还得到原版主编西北工业大学李颂伦教授的大力支持,中国航空综合技术研究所王守芳研究员、空军工程大学严东超教授和西北工业大学郭玉琦教授对全书作了仔细的审阅,提出了极为宝贵的意见,西北工业大学出版社雷军助理和教务处教材科郭金香老师也付出了很多心血,在此一并表示衷心的感谢。

本教材作者虽长期从事电气测试技术的教学和科研工作,但全书涉及学科众多,由于作者知识、经验和水平所限,书中一定存在疏漏和不足之处,希望广大读者批评指正。

编者

2006年11月



总 序

国防科技工业是国家战略性产业,是国防现代化的重要工业和技术基础,也是国民经济发展和科学技术现代化的重要推动力量。半个多世纪以来,在党中央、国务院的正确领导和亲切关怀下,国防科技工业广大干部职工在知识的传承、科技的攀登与时代的洗礼中,取得了举世瞩目的辉煌成就;研制、生产了大量武器装备,满足了我军由单一陆军,发展成为包括空军、海军、第二炮兵和其他技术兵种在内的合成军队的需要,特别是在尖端技术方面,成功地掌握了原子弹、氢弹、洲际导弹、人造卫星和核潜艇技术,使我军拥有了一批克敌制胜的高技术武器装备,使我国成为世界上少数几个独立掌握核技术和外层空间技术的国家之一。国防科技工业沿着独立自主、自力更生的发展道路,建立了专业门类基本齐全,科研、试验、生产手段基本配套的国防科技工业体系,奠定了进行国防现代化建设最重要的物质基础;掌握了大量新技术、新工艺,研制了许多新设备、新材料,以“两弹一星”、“神舟”号载人航天为代表的国防尖端技术,大大提高了国家的科技水平和竞争力,使中国在世界高科技领域占有了一席之地。党的十一届三中全会以来,伴随着改革开放的伟大实践,国防科技工业适时地实行战略转移,大量军工技术转向民用,为发展国民经济做出了重要贡献。

国防科技工业是知识密集型产业,国防科技工业发展中的一切问题归根到底都是人才问题。50多年来,国防科技工业培养和造就了一支以“两弹一星”元勋为代表的优秀的科技人才队伍,他们具有强烈的爱国主义思想和艰苦奋斗、无私奉献的精神,勇挑重担,敢于攻关,为攀登国防科技高峰进行了创造性劳动,成为推动我国科技进步的重要力量。面向新



世纪的机遇与挑战,高等院校在培养国防科技人才,产生和传播国防科技新知识、新思想,攻克国防基础科研和高技术研究难题当中,具有不可替代的作用。国防科工委高度重视,积极探索,锐意改革,大力推进国防科技教育特别是高等教育事业的发展。

高等院校国防特色专业教材及专著是国防科技人才培养当中重要的知识载体和教学工具,但受种种客观因素的影响,现有的教材与专著整体上已落后于当今国防科技的发展水平,不适应国防现代化的形势要求,对国防科技高层次人才的培养造成了相当不利的影响。为尽快改变这种状况,建立起质量上乘、品种齐全、特点突出、适应当代国防科技发展的国防特色专业教材体系,国防科工委全额资助编写、出版 200 种国防特色专业重点教材和专著。为保证教材及专著的质量,在广泛动员全国相关专业领域的专家学者竞投编著工作的基础上,以陈懋章、王泽山、陈一坚院士为代表的 100 多位专家、学者,对经各单位精选的近 550 种教材和专著进行了严格的评审,评选出近 200 种教材和学术专著,覆盖航空宇航科学与技术、控制科学与工程、仪器科学与工程、信息与通信技术、电子科学与技术、力学、材料科学与工程、机械工程、电气工程、兵器科学与技术、船舶与海洋工程、动力机械及工程热物理、光学工程、化学工程与技术、核科学与技术等学科领域。一批长期从事国防特色学科教学和科研工作的两院院士、资深专家和一线教师成为编著者,他们分别来自清华大学、北京航空航天大学、北京理工大学、华北工学院、沈阳航空工业学院、哈尔滨工业大学、哈尔滨工程大学、上海交通大学、南京航空航天大学、南京理工大学、苏州大学、华东船舶工业学院、东华理工学院、电子科技大学、西南交通大学、西北工业大学、西安交通大学等,具有较为广泛的代表性。在全面振兴国防科技工业的伟大事业中,国防特色专业重点教材和专著的出版,将为国防科技创新人才的培养起到积极的促进作用。

党的十六大提出,进入 21 世纪,我国进入了全面建设小康社会、加快推进社会主义现代化的新的发展阶段。全面建设小康社会的宏伟目标,对国防科技工业发展提出了新的更高的要求。推动经济与社会发展,提



升国防实力,需要造就宏大的人才队伍,而教育是奠基的柱石。全面振兴国防科技工业必须始终把发展作为第一要务,落实科教兴国和人才强国战略,推动国防科技工业走新型工业化道路,加快国防科技工业科技创新步伐。国防科技工业为有志青年展示才华,实现志向,提供了缤纷的舞台,希望广大青年学子刻苦学习科学文化知识,树立正确的世界观、人生观、价值观,努力担当起振兴国防科技工业、振兴中华的历史重任,创造出无愧于祖国和人民的业绩。祖国的未来无限美好,国防科技工业的明天将再创辉煌。

张华祝

目 录

绪 论	1
-----------	---

第一篇 测量误差与数据处理

第一章 测量的一般知识

1.1 有关测量的一些基本概念	4
1.2 测量方法及其分类	5
1.3 单位与单位制	7
1.4 电气测量的单位制	11
1.5 计量基准、计量标准及量值的传递	14

思考题与习题	15
--------------	----

参考文献	15
------------	----

第二章 测量误差的基本概念

2.1 测量误差及其来源	17
2.2 测量误差的表示方法	19
2.3 测量误差的性质和分类	24
2.4 有效数字及运算规则	26
2.5 随机误差的处理	31
2.6 粗大误差的处理	51
2.7 系统误差的处理	57
2.8 测量误差的合成与分配	63
2.9 测量数据的图形处理	77

思考题与习题	82
--------------	----

参考文献	85
------------	----

第三章 测试信号的分析

3.1 信号的分类与定义	86
3.2 信号的幅值域分析	91
3.3 信号的时域分析与频域分析	92



3.4 滤波器	116
3.5 随机信号分析	135
思考题与习题	143
参考文献	143

第二篇 测试方法与测试系统

第四章 常用传感器基本原理与参数测试

4.1 概述	144
4.2 电阻式传感器	147
4.3 电容式传感器	151
4.4 变磁阻式传感器	154
4.5 磁电式传感器	157
4.6 压电式传感器	159
4.7 热电式传感器	162
4.8 光电式传感器	168
4.9 半导体磁效应传感器	180
4.10 新型传感器简介	190
思考题与习题	193
参考文献	193

第五章 测试系统基本原理

5.1 计算机测试系统的结构与原理	194
5.2 基本信号调理电路	199
5.3 信号的转换	214
5.4 测试系统智能化设计	235
思考题与习题	238
参考文献	238

第六章 电磁参数的测量

6.1 电压、电流和功率的测量	239
6.2 频率的测量	246
6.3 波形的测量	249
6.4 阻抗的测量	253
6.5 磁参数的测试	255



思考题与习题	270
参考文献	270
第七章 主要非电参数的测量	
7.1 概述	271
7.2 转速的测量	272
7.3 转矩的测试	282
7.4 温度的测试	297
7.5 压力的测量	307
7.6 振动的测量	313
7.7 噪声的测试	324
思考题与习题	334
参考文献	335
第八章 测量系统的特性分析	
8.1 概述	336
8.2 测量系统的静态特性分析	337
8.3 测量系统的动态特性分析	342
8.4 数字化测量系统的主要技术特性	344
思考题与习题	344
参考文献	345

第三篇 自动测试系统

第九章 自动测试系统	
9.1 概述	346
9.2 测试系统总线技术	349
9.3 测试软件技术	371
9.4 自动测试系统设计	382
9.5 航空电气参数测试系统设计举例	386
思考题与习题	390
参考文献	390
附表	391

绪 论

一、测量的意义

测量是人类认识和改造客观世界必不可少的重要手段之一。发明元素周期表的科学家门捷列夫曾说过：“有测量才有科学。”

人们借助专门的设备，通过实验方法对客观事物取得数量信息的过程称为测量。

在科学技术的发展过程中，人们根据对客观事物所做的大量观察和测量，形成定性和定量的认识，总结出客观世界的规律；通过观察和测量进一步检验这些规律是否符合客观实际；在利用这些客观规律改造客观世界的过程中，又通过观察和测量来检验实际效果。例如，英国物理学家瑞利(Rayleigh)在测定氮的密度时，发现用从大气中分离的氮与用化学方法制取的氮所得的结果不同，经过进一步的实验和测量，证实是由于从大气中分离的氮还含有惰性气体的缘故，这导致后来发现了惰性气体。

在现代化建设中，测量是监督保证工作质量，决定工程成败的主要手段；测量是产品制造过程中对产品质量进行检测及在产品运行过程中进行在线检测的主要手段。在我国实现社会主义四个现代化的伟大事业中，科学技术的现代化是关键，在其中测量技术的发展具有十分重要的地位。今天，测量技术的水平，已被公认为是一个国家科学和现代化水平的重要标志之一。

二、测量、计量与测试

计量是以确定量值为目的的一组操作。一般认为，以国家法定计量单位为计量单位进行的测量属于计量的范畴。但计量工作有更广范的内容，它包括：计量单位的确定及其基准、标准的建立、复制、保存和量值传递；研究测量方法及测量不确定度的估算；研究测量器具的特性和观测者进行测量的能力。计量工作的任务是保证量值的一致、准确和测量器具的正确使用。

对于测试，虽有不同的理解，但一般认为测试所包括的范围要宽一些，含有以下一些与测量稍有区别的含义：

(1) 测试是指某些尚未建立起正式计量标准而具有试验研究性质的测量。

(2) 测试是指定性的测量。例如，判断电路中的某一晶闸管的导通或截止，判断数字电路中某一节点处于高电平还是低电平状态，都可以用电压测量来判断，但这种测量和一般的电压测量有区别，故称为测试，以表示这种区别。

(3) 测试包括测量和试验。可以说，测试是试验和测量的全过程，既包括定量的也包括定性的测量和试验。



三、电气测试的内容和特点

电气测试泛指一切利用电气技术进行的测试及对电气系统与设备(电机、电器等)所进行的测试。电气测试通常包括以下几个方面:

- (1) 电参数的测量。如测量电压、电流、电量和电功率等。
- (2) 磁参数的测量。如测量磁感应强度、磁场强度、磁通、磁矩、磁导率、磁滞和涡流损耗等。
- (3) 电路元件参数的测量。如电阻、电感、电容、功率电子器件与介质损耗角等。
- (4) 信号与电源质量测试。如波形、频率、相位、噪声干扰等。
- (5) 有关电气系统与设备常用非电参数的测试。如转速、转矩、压力、温度、噪声、振动等。

通常电气测试以低频、直流、大功率电磁量的测试为主而与电子测试相区别,但其区分并不严格,而且有时也互有交叉与重叠。

电气测试有以下几个特点:

(1) 电气测试所包括的范围很广,因而电气测试所采取的测试方法与手段是各式各样的,涉及的学科门类较多,需要综合运用各有关学科知识。随着科学技术向纵深发展,各学科之间的渗透性越来越强。

(2) 电气测试具有较高的准确度、灵敏度和连续性,便于记录和进行数据处理。

(3) 电气测试便于实现离开被测对象一定距离之外的远距离测试。电气测试便于将非电量经过相应的变换器变换为电量进行测试。现在,长度、热学、力学、光学、电离辐射等各类机械环境和大气环境测量领域已越来越多地依靠电气测量手段。

(4) 电气测试便于实现测试过程的自动化与测试设备的“智能化”。电气测试设备便于组成遥控遥测设备,能在恶劣环境条件下工作;电气测试设备便于与计算机接口,组成计算机测试系统。这种电气测试系统在测试中可以实现程控、遥控、自动调准、自动校准、自动诊断,对测试结果可以自动记录,自动完成测试数据的运算、分析和处理,适合用于国民经济的各个领域。

20世纪90年代以来,随着计算机技术与仪器仪表技术深层次结合的发展,从最初的将通用仪器与微处理器相结合产生了智能仪器,到继而出现了虚拟仪器技术。在虚拟仪器系统中,软件是核心,所有仪器的功能都能通过软件根据系统的需要来定义;硬件是虚拟仪器工作的基础,主要功能是完成对被测信号的采集、传输和结果的显示、输出等。虚拟仪器还具有计算机系统的所有优点,如强大的数据处理能力,友好的用户界面以及与其他设备多种形式的互连功能等。

通常把以计算机为核心,在程控指令或程序的指挥下,能自动完成测试任务而组合起来的测量仪器和其他设备的有机整体称为自动测试系统,简称ATS(Automatic Test System)。自动测试系统是现代检测技术、传感技术、计算机技术、控制技术、数字信号处理技术等多学科融合发展的成果。



四、课程学习要求

电气测试技术的范围很宽,而且其内容随着科学技术的发展在不断地更新与发展。所以本课程不对电气测试方法一一加以讨论,而着重使读者掌握电气测试中最基本的理论、知识与方法,为设计、组织和进行电气系统与元件实验、误差分析、数据处理、解决工程实际问题打下必要的基础。

课程重点是基本测量原理、基本测量方法、误差分析和数据处理、传感器基本原理、虚拟仪器及自动测试系统的构成与应用。

本课程是一门理论性和实践性都很强的课程,因此,在理论上和实践上都应充分重视。

第一篇

测量误差与数据处理

第一章 测量的一般知识

1.1 有关测量的一些基本概念

一、量和量值

量是现象,物体和物质的可以定性区别和定量确定的一种属性。

由一个数和合适的计量单位表示的量称为量值。例如,电线长 5.3 m,电动机质量 20 kg 等都是由数值(如 5.3,20)和计量单位(如 m,kg)两部分组成的量值。

二、测量过程

测量过程一般包括三个阶段:

(1) 准备阶段。明确被测量的性质及测量所要达到的目的,然后选定适当的测量方法及选择相应的测量仪器。

(2) 测量阶段。建立测量仪器所必需的测量条件,谨慎进行操作,认真记录测量数据。

(3) 数据处理阶段。根据记录的数据,考虑测量条件的实际情况,进行数据处理,以求得测量结果和测量误差。

三、测量手段

(1) 量具:体现计量单位的器具。量具中的一小部分可直接参与比较,如尺子、量杯等。多数量具要用专门设备才能发挥比较的功能,如利用标准电阻测量电阻时,需要借助于电桥。

(2) 仪器:泛指一切参与测量工作的设备。包括各种直读仪器、非直读仪器、量具、测试信



号源、电源设备以及各种辅助设备,如电压表、频率表、示波器等。

(3) 测量装置:由几台测量仪器及有关设备所组成的整体,用以完成某种测量任务。

(4) 测量系统:由若干不同用途的测量仪器及有关辅助设备所组成,用以多种参量的综合测试。

四、测量结果的表示

测量结果可以表示为数字、曲线或图形,但不论其表现形式如何,均应包含数值、单位及误差,即应在表示出量值的同时注明测量误差数值或范围。

1.2 测量方法及其分类

测量的具体方法是由被测量的参数类别、量值的大小,所要求的测量准确度、测量速度的快慢,进行测量所需的条件以及其他一系列因素决定的。每个物理量都可以用技术特性和操作方法特性具有不同特点的多种方法进行测量。随着科学技术的发展,新的测量方法还会不断出现。

为了探讨测量方法的特征,正确地选择测量方法,需要对测量方法分类。测量方法的分类形式很多,例如,根据被测量的特点(在测量期间其值可以认为是恒定的量还是随时间变化的量)而分为静态测量和动态测量;根据测量条件分为等精度测量和非等精度测量;按测量器具的敏感元件是否与被测物体接触而分为接触测量和非接触测量等。但对于研究测试技术来说,更有意义的是按被测量值的获得方法所做的分类,即直接测量法、间接测量法及在此两类方法的基础上形成的组合测量法。

一、直接测量法

直接测量法是不对与被测量有函数关系的其他量进行测量而能直接获得被测量值的一种测量方法。可以用预先按已知标准量定度好的直读式测量仪器或比较式仪器对被测量进行测量,从而得到被测量值。例如,用电压表测电压,用电桥测电阻等。有时,为了进行相应的修正,需要作补充测量来确定影响量的值,这仍然是直接测量。

直接测量法又可分为直接比较测量法、替代测量法、微差测量法、零位测量法和符合测量法等。

(1) 直接比较测量法:将被测量直接与已知其值的同类量相比较的测量方法。例如,用一刻度尺测量长度等。

(2) 替代测量法:将选定的且已知其值的量替代被测的量,使得在指示装置上有相同的效应,从而确定被测量值。

(3) 微差测量法:将被测量与同它的量值只有微小差别的同类已知量相比较并测出这两



个量值间的差值的测量方法。

由于这种方法的特征是测量被测量与已知量之间的差值,因此采用准确度比较低的仪器来测差值时,也能得到高准确度的结果。但是只有在已知量准确度高,且其值接近被测量值的条件下,才可能实现这种方法。

(4) 零位测量法:通过调整一个或几个与被测量有已知平衡关系的量,用平衡的方法确定出被测量的值。

零位测量法的一般形式是将被测量与其值为已知的量相比较,而使所选择的已知量和被测量之间的差值为零。差值的指示用零位指示器(指零表)指示。

零位测量法的最大优点是可以用一个固定已知量,通过调整另一个已知可调量而确定不同大小的被测量,零位测量法的典型例子是用电桥测电阻。

(5) 符合测量法:是由对某些标记或信号的观察来测定被测量值与作比较用的同类已知量值间微小差值的一种微差测量法。例如,用游标卡尺测量物体的尺寸等。

实现符合测量法的原理有游标原理、拍频原理、干涉原理和闪频原理等。

二、间接测量法

间接测量法是通过与对被测量有函数关系的其他量的测量而得到被测量值的测量方法。例如,已知电阻阻值测出其两端的电压来确定流过该电阻的电流值。

一般地说,间接测量需要测量的量较多,测量和计算工作量较大,引起的误差因素也较多,但如果对测量误差进行分析,并选择和确定具体的优化测量方法以及在比较理想的条件下进行测量,测量结果的准确度不一定低,有的甚至有较高的准确度。

三、组合测量法

组合测量法是当各未知量能以某些可测量的组合形式表示(或改变测量条件来获得这种不同的组合)时,根据直接测量和间接测量所得的数据,通过解一组联立方程而求出各未知量的数值。例如,当测量标准电阻的温度系数 α 和 β 以及 $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的电阻值 R_{20} 时,可先测出不同温度下该标准电阻的阻值 $R_{t_1}, R_{t_2}, R_{t_3}$,再通过求解下述联立方程组来求 α, β, R_{20} 。

$$R_{t_1} = R_{20} + \alpha(t_1 - 20) + \beta(t_1 - 20)^2$$

$$R_{t_2} = R_{20} + \alpha(t_2 - 20) + \beta(t_2 - 20)^2$$

$$R_{t_3} = R_{20} + \alpha(t_3 - 20) + \beta(t_3 - 20)^2$$

组合测量法实质上仍然是一种间接测量法。组合测量法有两个明显的优点:在准确度要求相同的情况下,组合测量需要进行的测量次数较少;系统误差出现的规律变为随机性质,因而可使测量结果的准确度有所提高。