



普通高等教育“十一五”国家级规划教材

国家精品课程教材



普通高等教育“十二五”电子信息类规划教材

电子测量原理

Principles of Electronic Measurement

詹惠琴
古天祥
刁友宝
古军
何羚
编著

第2版



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

普通高等教育“十一五”国家级规划教材
国家精品课程教材
普通高等教育“十二五”电子信息类规划教材

电子测量原理

第 2 版

詹惠琴 古天祥 习友宝 古 军 何 羚 编著



机械工业出版社

本书采用了全新的体系结构,根据电子信息科学技术研究的基本对象——信号和系统,把电子测量的基本内容划分为“信号的测量”和“系统的测量”两大部分。全书共3篇,第1篇为“电子测量总论及测量误差理论”,讲述电子测量的基本原理和测量误差理论;第2篇为“信号的测量”,讨论了信号的时间与频率、信号的幅度(电压)、信号的波形(时域特性)、信号的频谱(频域特性)和数字信号等的测量;第3篇为“系统的测量”,主要讨论了测量系统的基本特性、系统测量用的信号源、元器件的特性参数、集成电路、线性系统特性及网络分析等的测量。

本书编写根据科学性、先进性和实用性的原则精选内容,全面阐述了电子测量的基本原理,阐述中力求思路清晰、概念准确、文句流畅、可读性好,以便于教学和自学。

电子测量技术是广泛用于各学科专业的一门通用技术。本书适用面广,可作为理工科院校的电子类专业本科、专科的电子测量课程教材,也可作为广大科研和工程技术人员的参考书。

本书配有电子课件,欢迎选用本书作教材的老师发邮件至 jinacmp@163.com 索取。

图书在版编目(CIP)数据

电子测量原理/詹惠琴等编著. —2版. —北京:
机械工业出版社, 2014. 12
普通高等教育“十二五”电子信息类规划教材
ISBN 978-7-111-48364-9

I. ①电… II. ①詹… III. ①电子测量技术—高等学校—教材 IV. ①TM93

中国版本图书馆CIP数据核字(2014)第246672号

机械工业出版社(北京市百万庄大街22号 邮政编码100037)

策划编辑:吉玲 责任编辑:吉玲 卢若薇

版式设计:霍永明 责任校对:胡艳萍 陈秀丽

封面设计:张静 责任印制:刘岚

北京京丰印刷厂印刷

2015年3月第2版·第1次印刷

184mm×260mm·30印张·722千字

标准书号:ISBN 978-7-111-48364-9

定价:55.00元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

电话服务

网络服务

服务咨询热线:010-88379833

机工官网:www.cmpbook.com

读者购书热线:010-88379469

机工官博:weibo.com/cmp1952

教育服务网:www.cmpedu.com

封面无防伪标均为盗版

金书网:www.golden-book.com

第2版前言

本书于2004年出版以来,经历了16次重印,已有70多所兄弟院校使用,得到广大读者的关心。这些年来,随着电子信息科学技术的发展,作者对电子测量的课程体系和教学内容有一些新的认识,深感本书有改写的必要。本书第2版做了两个较大的调整:一是全书的体系结构的调整,即根据电子信息科学技术研究的基本对象——信号和系统,把电子测量的基本内容划分为“信号的测量”和“系统的测量”两大部分;二是各章内容的调整,即根据被测信号的属性和系统所处的状态,阐述信号的基本参量和系统的基本部件的测量技术及仪器原理。

人类赖以生存和发展的三种基本资源是物质、能量和信息。物质是基础,信息来源于物质运动,但不等同于物质,也不具备能量,是一种比较抽象的东西。信息进行传输、存储和处理必须有载体,信息可用物质来载负,也可用能量来载负。以前,人们利用信息基本上是基于物质资源,信息的载体是物质(竹简、纸质的书信),信息的传输靠人力(信使、邮政、投递),信息的处理用质料工具(算盘、计算尺)并由人工操作,手段落后,速度慢,效率低。

18世纪中,人类开始了利用能量资源来驱动动力工具的研究,大大扩展了人的体力。19世纪末和20世纪初,人类又开始了利用能量资源来传输信息的研究。一切电磁波(包括激光、X射线等)都具有能量,在空间传播不需要介质;信息以具有能量的电磁波信号为载体,可实现远距离快速传输。近半世纪以来,计算机技术的迅速发展,利用能量进行信息处理的技术得到了蓬勃发展,大大扩展了人的智力。

20世纪中以来,无线通信、广播、电视、雷达、计算机等广泛应用,大量的、各种各样的无线电技术参数需要测量,促进了电子测量技术的发展。1959年,成都电讯工程学院在我国首次开出了“无线电测量”课程(“电子测量”课程的前身)。课程内容按无线电参量测量的门类划分章节,并以此构成全书的主线,之后国内出版的“电子测量”教材大多沿用了这样的体系结构。

在电子信息科学技术的发展过程中,人们对信息的获取、传输、处理和显示等各个技术环节进行了大量深入的研究,形成了测量、通信、控制、计算机、信号处理、信息显示、电子元器件及微电子技术等专业学科。虽然电子信息科学技术的各专业学科的研究方向各不相同,但就其基本研究对象而言,都可归结为对信号和系统的研究,作为电子信息科学技术的一个分支,电子测量技术及仪器学科也不例外。



本书把各个门类的被测量按信号和系统分类，事实也是按被测对象的属性划分的，即信号的特性参量为带有能量的有源量，而系统的特性参量本身为无源量。被测对象的有源与无源特性，决定了测量系统的组成原理和功能结构的不同；测量信号（有源量）的测量系统，不需要主动向被测对象提供激励，是接受被测对象激励（能量）的被动式测量系统，而对系统参数（无源量）的测量，测量系统则必须主动向被测对象提供激励（能量）才能进行测量，是主动式测量系统。

本书讨论“信号的测量”，是以最常见的最广泛应用的电信号为重点，讲述信号的频率、幅度、波形、频谱等基本参数的测量，并在讨论每种信号参数测量的同时，根据被测信号的属性和特点（如静态、稳态与动态，周期性与非周期性等），讲述测量原理（如直接比较与间接比较）、观测方法（如时域与频域）和测量技术（模拟式和数字式）。

本书讨论“系统的测量”，不是以某专业领域的专门系统为基本对象，而是以构造这些系统所需的最通用、最基本的元件、器件、电路和网络等部件的测量为基本对象。此外，也讨论测量系统基本特性的测量。在研究系统测量时，根据系统所处的状态，讲述系统在静态、稳态和动态下的性能及所采用的时域测量和频域测量方法。

笔者认为，本书对体系结构和各章内容做这样的调整，有利于读者对电子测量的对象有一个更深刻的认识，对电子测量基本内容的学习有一条更清晰的主线，对电子测量原理和方法有一个更完整的概念，对电子测量与电子信息科学技术之间的关系有一个更全面的了解。

本书第2版内容分为3篇12章。第1篇“电子测量总论及测量误差理论”（共2章），其中，电子测量总论在介绍电子测量基本概念的基础上，讲述电子测量的原理和分类，并介绍本书的体系结构；本篇的另一个重要内容是讨论测量误差、测量数据处理等。第2篇“信号的测量”（共5章），讲述信号的时间与频率、信号的幅度、信号的波形（时域特性）、信号的频谱（频域特性）和数字信号的测量等内容。第3篇“系统的测量”（共5章），讨论测量系统基本特性，讲述系统测量用的信号源、元器件特性参数、集成电路、线性系统特性及网络分析等测量的内容。此外，本书加强了思考与练习的内容。考虑到不少学校和专业设置有“智能仪器”“虚拟仪器”和“自动测试系统”等课程，以及本书的篇幅所限，这部分的内容未列入本书编写范围。

本书第2版的编写仍较全面地、系统地包含了电子测量课程的基本内容，同时对第1版各章内容，做了较大的修改或重新编写，力求根据先进性和适用性的原则精选内容，在讲述中注重交待整体思路和基本概念，在行文中做到逻辑性强和可读性好。



本书建议的教学学时数为48~64学时,各校可根据具体的情况增减。在教学内容处理上,第1、2篇属于电子测量最基本的内容,可重点讲述;学时较少时,第3篇可选讲第8章和第9章。

本书由詹惠琴编写第2、8、10、11章,古天祥编写第1章,习友宝编写第4、5章,古军编写第3、7、9章,何羚编写第6、12章。全书由詹惠琴、古天祥统稿。

本书编写中认真学习和参考了国内外同行专家学者的有关教材、专著和论文,并有所引用。此外,本书第2版编写过程中,得到机械工业出版社的支持。在此,谨一并致以诚挚的感谢!尽管编者对本书内容和文字做了仔细的推敲和校订,但在编写过程中,由于水平有限,仍难免存在一些疏漏之处,殷切期望读者批评指正。

编 者

2015年1月

第1版前言

本书系由全国高等学校“测控技术与仪器”专业教材研讨会规划的测控信息技术规划教材，由教材编审委员会审定，并推荐出版，作为高等学校工科测控技术与仪器专业的教材。

本书是按参考学时为60~80学时编写的，由电子科技大学古天祥教授担任主编，南京邮电学院梅杓春教授和电子科技大学陈杰美教授主审。

本书阐述了电子测量的基本原理、测量误差和实际应用。全书由6篇组成：第1篇测量总论和误差理论，以崭新的角度阐述了测量学科的丰富内涵，重点讨论测量原理、测量方法和测量系统中的共性问题，并系统地讨论了测量误差及数据处理，测量不确定度概念及评定方法。第2篇基本电参量测量，讨论在静态和稳态下，时间(频率)、电压、阻抗等三类基本电参量的测量原理、方法和误差分析，着重讨论数字化测量技术。第3篇至第5篇分别讨论了三大测量领域，即时域测量、频域测量和数据域测量。第3篇在信号的时间波形测量中，介绍信号波形的采集、显示及应用技术，分别讨论了模拟示波器和数字存储示波器的组成、基本原理、工作方式和性能指标，以及信号和系统的时域测量技术等。第4篇频域测量，讨论了频域中的信号频谱和网络性能的测量，介绍了测量激励信号源的基本工作原理。第5篇数据域测量，介绍数字系统的基本测量原理和方法，包括数字信号的产生、逻辑分析、可测性设计及数字系统测试的典型实例。第6篇测量系统集成，概括介绍了组建测量系统的硬件平台、软件平台、总线标准、通信技术等。

电子测量与各个学科、各个行业的关系十分密切。电子测量是获取信息的重要手段，在工农业生产、科学技术研究、国防现代化建设等各个领域有极为广泛的应用。电子测量技术和电子仪器早已成为一种各行各业所需的通用技术和通用设备，例如，在电子类专业的技术基础课的课程实验及综合实践中，就要用到各种电参量测量技术及各类电子仪器，因此国内高校的许多理工科专业，尤其是电子信息类专业，都把“电子测量”列为一门十分重要的技术基础课程。同时，“电子测量”是建立在“电路分析基础”、“模拟与数字电路”、“信号与系统”、“微机及接口”等技术基础课程内容之上的，它是把电子、计算机、通信与控制等电子信息专业知识综合应用在测量科学技术中，而形成的一个独具特色的学科。其特点是综合性强、实践性突出、应用面广泛。通过本课程的学习，学生不仅能获得电子测量技术和仪器方面的基础知识和掌握一门通用技术，而且可以培养综合应用能力与实践能力。



在测控技术与仪器专业中，分别开出了“电子测量原理”与“电子测量仪器”课程。两门课程的关系是，前者在学习了测量原理的基础上，着重讨论测量技术与方法，误差分析和实际应用；后者在掌握了仪器原理的基础上，着重研究电子仪器及系统的设计与制造等工程实现技术。前者在讨论测量原理和方法时，主要基于系统方框级；后者在讨论仪器设计和开发时，则主要基于电路结构级。“电子测量原理”是“电子测量仪器”的基础，两门课程有着密切的联系。一个好的测量原理、方法和技术，往往又被测量仪器所采用，集成在仪器中，成为仪器的一种原理方案，所以讨论测量原理和考虑测量方法时，都不能脱离具体的测量仪器。尽管如此，本课程涉及到具体电子仪器时是基于仪器的基本原理及应用，而不是基于仪器的设计与制造。这样的处理原则使本书不仅适合测控专业学生，作为一门入门的专业基础课的教材，而且也适用于广大非测控专业的学生，把本书作为了解测量仪器的原理，增强测试能力的应用技术基础课程的教材。

本书讲述各部分的内容时，注重从原理、误差及应用三个方面来阐述，三者之间的关系是，以测量原理为基础，通过测量误差的分析来提升，以其实际应用为归宿。作为一个测量人员来说，测量能力不仅体现在会使用操作仪器，而且要能进行基本的误差分析。因为，只有在懂得测量原理、方法的基础上，才能更合理操作使用仪器，更好地完成测量任务；而且也只有通过测量误差的分析，才能更深刻地理解测量原理，更有效地提高测量的质量，了解测量结果的有效性和实用价值。在学习本课程的过程中应重应用，即应用所学的基本原理和方法，去解决实际中的问题。本课程具有很强的实践性，教学过程中应开设相应的实验课程，以达到理论联系实际，提高综合应用能力的目的。此外，学习过程中，还应完成相当数量的习题，训练运用所学的知识来解题的能力。本书每章后面皆附有思考题和习题，以便进行练习。此外，我们将编写与本书配套使用的“电子测量原理习题和解答”。

本书由电子科技大学自动化工程学院的部分教师编写。古天祥编写第1~2章，詹惠琴编写第3章，杨红宇编写第4章，习友宝编写第5章，徐建南编写第6章，金卫、习友宝、詹惠琴共同编写第7章，戴志坚编写第8章和11.2节，何羚编写第9~10章，谢永乐编写第11章，王厚军、谢永乐共同编写第12章，还有袁渊、罗翠华、古军、李云霞、钱瑛、杨皓等承担了本书部分章节和习题的编写及图文整理工作，全书由古天祥统稿。

笔者从教的电子科技大学于1959年开始为电子类专业本科生开出了“电子测量原理”课程，此外还为测量专业本科生开设了“电子测量仪器”、“微波测量仪器”、“自动测试系统”等课程，并且承担了大量的电子测量技术及仪器领域的科研工作，在电子测量领域内有良好的教学、科研环境，为本书的编写提



供了一个很好的背景。本书是笔者长期为本科生讲授“电子测量”、“电子仪器”课程及承担科研工作的经验总结。同时，笔者在撰写本书的过程中，也认真学习和参考了国内外同行专家学者的有关教材、专著和论文，充分吸取了他们的学术观点和成功经验，引用并充实在本书之中。本书的编写过程中，得到了电子科技大学各级领导的关心支持及许多专家的帮助指正。电子科技大学把本书作为精品课程的教材进行建设并给予重点支持，电子科大自动化工程学院的领导提供了大量帮助，童玲教授、陈光禧教授、陈长龄教授、钱光弟教授、师奕兵教授、黄建国教授、田书林教授、周群副教授、雷霆副教授在本书大纲审定、具体编写上提出了许多宝贵意见。此外，全国测控技术与仪器专业教学指导委员会的专家们提出了许多指导性意见，在此一并表示衷心的感谢！

本书为国家精品课程“电子测量原理”的配套教材，课程网站为：<http://125.71.228.229/wlxt/ncourse/dzcl/web/dzcljpkc/>

由于编者水平有限，书中难免还存在一些缺点和错误，殷切希望广大读者批评指正。

编者

2004年1月

目 录

第2版前言	
第1版前言	
第1篇 电子测量总论及测量误差	
理论	1
引言	1
第1章 电子测量总论	3
1.1 概述	3
1.1.1 测量的基本概念	3
1.1.2 电子测量的意义	7
1.1.3 电子测量的特点	8
1.1.4 电子测量的定义	9
1.2 电子测量的原理及基本技术	10
1.2.1 测量的量值比较原理	10
1.2.2 测量的信息获取原理	17
1.3 电子测量的分类	23
1.3.1 概述	23
1.3.2 有源量(信号)测量和无源量(系统)测量	23
1.3.3 静态、稳态和动态测量	25
1.3.4 时域、频域和时频域测量	27
1.3.5 直接测量、间接测量和组合测量	29
1.3.6 模拟量测量和数字量测量	30
1.3.7 随机测量技术	32
1.4 本书的体系结构及学习要点	33
1.4.1 本书的体系结构	33
1.4.2 本书的学习要点	34
本章小结	34
思考与练习	35
第2章 测量误差和测量数据处理	37
第一部分 测量误差	37
2.1 测量误差概述	38
2.1.1 测量误差的基本概念	38
2.1.2 测量误差的表示方法	38
2.1.3 测量误差的分类及影响	43
2.2 系统误差的分析和处理	46
2.2.1 系统误差的特征	46
2.2.2 系统误差的发现方法	46
2.2.3 系统误差的削弱或消除方法	47
2.3 随机误差的分析和处理	50
2.3.1 随机误差的统计特性	50
2.3.2 有限次测量的数学期望和标准偏差的估计值	56
2.3.3 测量结果的置信度	59
2.4 粗大误差的判断与处理	63
2.4.1 粗大误差的特性	63
2.4.2 粗大误差的判断	64
2.4.3 粗大误差的防止和剔除	64
第二部分 测量数据处理	66
2.5 直接测量的误差及数据处理——等精度测量与不等精度测量的数据处理	66
2.5.1 等精度直接测量	67
2.5.2 不等精度直接测量	68
2.6 间接测量的误差及数据处理——测量误差的合成与分配	70
2.6.1 测量误差的合成	70
2.6.2 测量误差的分配	72
2.6.3 最佳测量方案的选择	73
2.7 组合测量的误差及数据处理——曲线拟合与回归分析	73
2.7.1 问题的提出	73
2.7.2 图解法	74
2.7.3 经验公式法	75
2.7.4 一元线性回归	76
2.7.5 非线性回归	80
2.8 测量结果的处理与表达——有效数字	81
2.8.1 有效数字的概念	82
2.8.2 数值修约	83
2.8.3 近似运算	84
本章小结	84
思考与练习	86



第2篇 信号的测量	89	器的原理	139
引言	89	4.2.3 模拟式交流电压表	142
第3章 信号的时间与频率的测量	94	4.2.4 交流电压表的响应特性及误差分析	145
3.1 概述	94	4.2.5 交流电压的模拟式测量小结	148
3.1.1 时间和频率的基本概念	94	4.3 直流电压的数字化测量	148
3.1.2 时间和频率测量的特点	96	4.3.1 电压-数字转换的原理和分类	148
3.2 频率测量的原理与方法综述	97	4.3.2 A-D 转换原理	150
3.2.1 频率测量的原理与方法分类	97	4.4 数字电压表 (DVM) 和数字多用表 (DMM)	156
3.2.2 间接比较法	98	4.4.1 数字电压表的组成及结构	156
3.2.3 直接比较法	99	4.4.2 数字多用表的组成及结构	158
3.3 时间 (频率) 的数字化测量及电子计数器原理	100	4.4.3 数字电压表和数字多用表的主要性能指标	161
3.3.1 时间和频率的数字化测量原理	100	4.5 数字电压表的误差分析及自动校准技术	163
3.3.2 电子计数器的组成原理	102	4.5.1 数字电压表的误差分析	163
3.3.3 电子计数器的分类及主要技术指标	105	4.5.2 数字电压表中的自动校准技术	166
3.4 通用计数器的组成及测试功能	106	4.5.3 数字电压表中的自动量程技术	168
3.4.1 通用计数器的整机组成框图	106	本章小结	169
3.4.2 通用计数器的测试功能	107	思考与练习	170
3.5 时间和频率的测量误差	112	第5章 信号波形的测量	173
3.5.1 测量误差的来源	112	5.1 概述	173
3.5.2 测量误差的分析	118	5.1.1 波形测量	173
3.6 高分辨力的时间和频率测量技术	121	5.1.2 示波器的基本组成	174
3.6.1 多周期同步法	121	5.1.3 示波器的分类	174
3.6.2 模拟内插法	122	5.1.4 示波器的发展	175
3.6.3 时间-电压变换法	124	5.2 信号波形的模拟测量原理	175
3.6.4 游标法	125	5.2.1 阴极射线管	175
3.6.5 时延法	127	5.2.2 CRT 波形显示的基本原理	177
3.7 调制域测试技术	128	5.3 模拟示波器	182
3.7.1 调制域分析的特点	128	5.3.1 通用示波器的基本构成	182
3.7.2 调制域测量的基本原理	128	5.3.2 示波器的主要技术指标	183
本章小结	129	5.3.3 通用示波器的 Y 通道 (垂直系统)	184
思考与练习	130	5.3.4 通用示波器的 X 通道 (水平系统)	187
第4章 信号幅度的测量	133	5.4 波形的数字化测量及数字存储示波器的原理	194
4.1 概述	133	5.4.1 概述	194
4.1.1 信号幅度测量的意义和特点	133		
4.1.2 电压测量的方法和分类	134		
4.2 电压的模拟式测量	137		
4.2.1 交流电压的特征参量	137		
4.2.2 交流-直流 (AC-DC) 转换			



5.4.2	波形的采集与存储	196	6.5.1	脉冲信号的测量	269
5.4.3	波形采集与存储的控制—— 触发与时基	201	6.5.2	相位噪声的测量	270
5.4.4	波形的显示与处理	208	6.5.3	非线性测量	271
5.4.5	波形数字化测量的特点	213	6.5.4	信道功率的测量	274
5.5	数字存储示波器的实现技术	215	6.5.5	调制度的测量	275
5.5.1	现代数字示波器的一般 组成	215	本章小结		277
5.5.2	高速 A-D 转换器	216	思考与练习		277
5.5.3	波形存储器的降速处理 技术	219	第 7 章 数字信号的测量		280
5.5.4	触发与时基系统的实现 技术	220	7.1 概述		280
5.5.5	数字示波器 (DSO) 的主要 技术指标	226	7.1.1 数字信号的基本概念		280
5.6	示波器的基本测量技术	230	7.1.2 数字信号的特点		281
5.6.1	示波器的选用	230	7.2 数字信号测量的基本原理		282
5.6.2	信号电压的测量	231	7.2.1 信号采集		282
5.6.3	信号时间和频率的测量	232	7.2.2 触发识别		284
5.6.4	信号相位的测量	233	7.2.3 数据存储		286
本章小结		235	7.2.4 数据显示		287
思考与练习		236	7.3 逻辑分析仪		289
第 6 章 信号频谱的测量		239	7.3.1 逻辑分析仪的组成结构		289
6.1 概述		239	7.3.2 逻辑分析仪的特点及性能		290
6.1.1 信号频谱分析的意义		239	7.3.3 逻辑分析仪的分类及典型 仪器简介		291
6.1.2 信号的频谱		240	7.4 逻辑分析仪的应用		293
6.1.3 常见信号的频谱		241	7.4.1 逻辑分析仪的选用		293
6.1.4 频谱仪的分类		244	7.4.2 逻辑分析仪的应用实例		294
6.2 稳态 (周期) 信号的频谱测量		245	本章小结		298
6.2.1 扫频式频谱分析原理		245	思考与练习		298
6.2.2 外差式频谱仪		246	第 3 篇 系统的测量		300
6.3 动态 (瞬变) 信号的频谱测量		254	引言		300
6.3.1 FFT 分析仪的原理		254	第 8 章 测量系统的基本特性		304
6.3.2 全数字中频的实时频谱 分析		258	8.1 概述		304
6.4 频谱仪的技术指标		264	8.1.1 测量系统的定义		304
6.4.1 外差式频谱仪的主要指标		264	8.1.2 测量系统的响应特性		304
6.4.2 FFT 分析仪的主要技术 指标		266	8.2 测量系统的静态特性		305
6.4.3 外差式频谱仪和 FFT 分 析仪的比较		267	8.2.1 静态特性的表征和获取		305
6.4.4 频谱仪各参数间的联动关系		267	8.2.2 静态特性的基本参数		307
6.5 频谱仪的应用		269	8.2.3 静态特性的质量指标		308
			8.3 测量系统的动态特性		312
			8.3.1 动态特性概述		312
			8.3.2 测量系统动态特性的数学 模型		313
			8.3.3 常见的一阶和二阶测量系统 的动态特性		316



8.3.4 测量系统的动态误差及性能评价指标	318
本章小结	321
思考与练习	321
第9章 信号源	323
9.1 概述	323
9.1.1 信号源在系统测量中的作用	323
9.1.2 信号源的分类	324
9.1.3 信号源的主要技术指标	326
9.2 传统的信号源	327
9.2.1 高频信号源	327
9.2.2 脉冲信号源	330
9.2.3 函数信号源	331
9.3 锁相频率合成信号源	334
9.3.1 合成信号源概述及直接合成原理	334
9.3.2 锁相环的基本形式及锁相频率合成的原理	336
9.3.3 提高频率分辨力的锁相合成技术	340
9.3.4 扩展输出频率上限的锁相技术	343
9.3.5 锁相合成信号源的实例分析	346
9.4 直接数字合成信号源	347
9.4.1 DDS 信号源的基本组成原理	347
9.4.2 DDS 的单片集成电路	350
9.4.3 DDS 的技术指标及特点	352
9.4.4 DDS + PLL 频率合成信号源	353
9.4.5 任意波形信号源	354
9.4.6 合成扫频信号源	356
本章小结	357
思考与练习	358
第10章 电子元器件的测量	361
10.1 概述	361
10.1.1 电子元器件的分类	361
10.1.2 电子元器件测量的特点	362
10.2 无源元件的阻抗测量	362
10.2.1 无源元件 R 、 L 、 C 的阻抗概述	362
10.2.2 电桥法	367
10.2.3 谐振法	370
10.2.4 电压电流法	373
10.2.5 自动平衡桥路法	375
10.3 分立器件参数测量概述	376
10.4 分立器件测量仪器	377
10.4.1 晶体管特性图示仪	377
10.4.2 分立器件综合测量仪	381
本章小结	383
思考与练习	384
第11章 集成电路测试	385
11.1 概述	385
11.1.1 集成电路测试的意义	385
11.1.2 集成电路测试的基本原理	386
11.1.3 集成电路测试的分类	386
11.1.4 集成电路测试系统	387
11.2 数字集成电路测试技术	388
11.2.1 概述	388
11.2.2 数字集成电路的参数测试	390
11.2.3 数字集成电路的功能测试	394
11.3 模拟集成电路测试技术	403
11.3.1 概述	403
11.3.2 模拟集成电路测试系统	404
11.3.3 线性集成运算放大器的测试	406
11.4 混合集成电路的测试	412
11.4.1 混合集成电路的测试要求	412
11.4.2 混合集成电路测试系统的组成	413
本章小结	414
思考与练习	415
第12章 线性系统特性测量和网络分析	416
12.1 概述	416
12.1.1 线性系统特性测量的基本原理	416
12.1.2 频率特性测量的基本方法	417
12.1.3 频率特性测量仪器	418
12.2 扫频信号源	419
12.2.1 概述	419
12.2.2 扫频信号源的原理	420
12.2.3 宽频段扫频方法	422
12.3 射频信号的幅相测量(幅相接收机)	423
12.3.1 概述	423
12.3.2 射频信号频率下变换	426



12.3.3 中频信号的相位测量	429	12.6.1 网络参数的基本测量原理	442
12.4 扫频仪	432	12.6.2 网络分析仪	444
12.4.1 扫频仪的组成	433	12.7 网络分析仪的误差分析及校准	
12.4.2 扫频仪的主要性能指标	433	技术	449
12.4.3 频标	434	12.7.1 网络分析仪的误差分析	449
12.5 网络特性及其 S 参数	435	12.7.2 网络分析仪的误差校准和	
12.5.1 网络分析的基本概念	435	修正	453
12.5.2 微波网络的 S 参数	436	本章小结	455
12.5.3 网络特性参数的定义	439	思考与练习	455
12.6 网络参数的测量原理及网络分		部分习题参考答案	457
析仪	442	参考文献	462

第1篇 电子测量总论及测量误差理论

引言

本篇包含电子测量总论和测量误差理论两章。

“电子测量总论”一章在介绍测量基本概念的基础上，阐述电子测量的意义、内容、特点及应用，并重点讨论电子测量原理及基本技术。这部分内容将分别在信息获取的广义概念和量值比较的狭义概念的基础上，阐述电子测量的基本原理，并在实现电子测量原理的变换、比较、处理和显示等环节中，阐述电子测量的基本技术。电子测量总论一章将分别从不同角度讨论电子测量的分类。从被测对象(信号与系统)的属性，讲述有源量与无源量测量的特点；从电子测量方法，概述直接测量、间接测量与组合测量；从被测对象所处的状态，讨论静态、稳态和动态测量；从被测对象分析的角度，介绍时域、频域、随机域和数域测量；从采用的技术，分别讲述模拟测量和数字测量等。最后，介绍本书的体系结构和内容安排。

“测量误差理论”一章包括测量误差和测量数据处理两部分内容。其中，“测量误差”部分阐述测量误差的基本概念、来源、表示及分类，并分别阐述系统误差、随机误差、粗大误差的性质、特点及识别方法，以使读者能正确分析误差产生原因及其发生规律，认识测量结果中存在的各种误差的性质，找到减少或消除测量误差的方法，并使测量结果更接近于真值。对于“测量数据处理”部分，本书力求以一条清晰的思路来阐述，并根据采用的测量方法，按直接测量、间接测量和组合测量三种情况分类讲述测量数据的处理。其中，直接测量讨论等精度和不等精度的重复测量下的数据处理，间接测量讨论误差的合成与分配，组合测量讨论曲线拟合和回归分析。

本篇欲达以下目的：

1) 从电子测量的基本对象——信号和系统出发，用一条清晰的主线把测量学科所涉及的广泛、丰富的内容串连起来，构造一个较完整的体系，将本书的基本内容按照被测对象有源量和无源量的基本属性，划分为信号(有源量)的测量和系统(无源量)的测量两大部分。这些内容应使读者在深刻认识被测对象的基础上，对电子测量原理、方法、技术及仪器有一个较系统的、完整的了解，从而深刻地领会测量学科的丰富内涵，清晰地建立起关于电子测量的总体概念。

2) 说明电子测量学科与其他学科之间互相依存、相辅相成的关系。电子测量技术是测量学和电子学相结合的产物，“电子测量原理”课程与电子技术基础课程的密切关系。“电子测量原理”课程是建立在模拟与数字电路、信号与系统、微机及接口等先修技术基础课程之上的，它综合应用了电子、计算机、通信与控制等学科专业知识，综合性强、应用面广、实践性突出，通过学习，读者不仅能够掌握一门通用技术，而且还可以开拓思路，培养综合应用与实践的能力。



3) 强调在学习本书后续各章的各种参量测量技术时, 读者应当从测量原理、误差分析和实际应用三个方面深入理解和掌握其内容, 对于电子测量原理方法、仪器系统及其基本技术等内容, 应根据被测对象的特点, 在电子测量的整体上从共性的角度进行讨论, 并对测量误差及数据处理的基本理论及实际应用进行系统分析。

本篇的内容对读者学习后面的两篇内容, 即信号与系统的各种参量的测量技术会有较大的帮助。

第 1 章

电子测量总论

1.1 概述

1.1.1 测量的基本概念

1. 测量的意义

什么是测量？虽然并非每一个人都能给出一个明确的科学定义，但是每一个人都能深深感受到它的存在，并或多或少对它有一定的了解。在日常生活中，买东西要称重量，做衣服要量尺寸，安排工作要计时间，生病了要测体温……，以及在家庭中常用的水表、电表、气表、空调机、洗衣机、电冰箱、电饭锅等，都需要测量电压、电流、电能、温度、湿度、流量、水位等物理量。可见，人们随时随地都离不开测量。

日常生活中处处离不开测量，那么，建立在严格数量观念之上的自然科学，如物理学、化学、生物学、医学等，就更加离不开测量了。为了揭示科学的奥秘，人们用实验的方法去认识客观世界，用测量的手段获取实验数据，再对测量数据进行归纳和演绎就可得到科学的理论，使感性认识上升到理论阶段。近代自然科学就是从有了实验与测量之后才真正形成的，正如俄国著名科学家门捷列夫所说：“没有测量，就没有科学”。

现代信息科学技术的三大支柱是信息获取技术（测量技术）、信息的传输技术（通信技术）、信息的处理技术（计算机技术）。在这三大技术中，信息获取（测量）是首要的，是信息的源头。没有获取到信息，其传输和处理就是无源之水、无米之炊。