

高等学校教材

电子测量

(第二版)

蒋焕文 孙 续



中国计量出版社

新登(京)字 024 号

本书第一版获 1987 年全国高等学校优秀教材奖

本书第二版获铁道部第二届优秀教材一等奖

内 容 提 要

本书包括三大部分内容：第一部分用较短的篇幅系统地介绍了测量误差的基本理论和测量数据处理；第二部分阐述了电子测量的基本原理和方法，包括示波测试和测量、频率测量、电压测量、频域测量和信号源；第三部分为现代电子测量，扼要介绍微计算机化仪器和自动测试系统，以及数据域测试仪器与技术。

本书保留了第一版的体系与特色，并对传统和陈旧的内容作了删减，各个章节的内容都有所更新。尤其是本书第三部分，对智能仪器、个人仪器、自动测试系统和数据域测试都进行了扼要介绍，以便读者对电子测量的新领域获得基本概念和实用知识。

本书可作为高等学校通信和电子类各专业的电子测量教材，也可作为电子测量专业的基础教程。对从事电子技术和计量测试人员，也可从本书得到有益的知识。对本书内容适当删选，也可作为各类业余大学有关专业的教材。

电 子 测 量

(第二版)

蒋焱文 孙 续

责任编辑 倪伟清

++

中国计量出版社出版

北京和平里西街甲 2 号

河北省永清县第一胶印厂印刷

新华书店北京发行所发行

++

开本 850×1168/32 印张 18 字数 469 千字

1988 年 5 月第 2 版 1994 年 8 月第 17 次印刷

印数 172801—182800

ISBN 7-5026-0080-9/TB·65

定价 12.60 元

出版说明

根据国务院关于高等学校教材工作分工的规定，我部承担了全国高等学校、中等专业学校工科电子类专业教材的编审、出版的组织工作。由于各有关院校及参与编审工作的广大教师共同努力，有关出版社的紧密配合，从1978年至1985年，已编审、出版了两轮教材，正在陆续供给高等学校和中等专业学校教学使用。

为了使工科电子类专业教材能更好地适应“三个面向”的需要，贯彻“努力提高教材质量，逐步实现教材多样化，增加不同品种、不同层次、不同学术观点、不同风格、不同改革试验的教材”的精神，我部所属的七个高等学校教材编审委员会和两个中等专业学校教材编审委员会，在总结前两轮教材工作的基础上，结合教育形势的发展和教学改革的需要，制订了1986—1990年的“七五”（第三轮）教材编审出版规划。列入规划的教材、实验教材、教学参考书等近400种选题。这批教材的评选推荐和编写工作由各编委会直接组织进行。

这批教材的书稿，是从通过教学实践、师生反映较好的讲义中经院校推荐，由编审委员会（小组）评选择优产生出来的。广大编审者、各编审委员会和有关出版社为保证教材的出版和提高教材的质量，作出了不懈的努力。

限于水平和经验，这批教材的编审、出版工作还会有缺点和不足之处，希望使用教材的单位，广大教师和同学积极提出批评建议，共同为不断提高工科电子类专业教材的质量而努力。

第二版前言

本教材按电子工业部制定的工科电子类专业教材1986—1990年编审出版规划，由无线电技术与信息系统教材编审委员会仪表与测量编审小组征稿、评选、推荐出版，责任编委于英民副教授。

本教材由北方交通大学蒋焕文、孙续编著，上海铁道学院王本初教授担任主审。

本书第一版曾获1987年全国高等学校优秀教材奖。但是，由于电子测量技术和仪器的发展十分迅速，第一版已不能适应实际需要。为此，我们对《电子测量》第一版作了较大的修订。修订后的第二版保留了第一版的体系和特色，充实了近代电子测量的新内容，删去了部分传统和陈旧的内容，教材内容有了较大的更新。

本教材可分为三大部分：

第一部分（第二章）为测量误差和数据处理。几年来的教学实践表明，第一版的这部分内容物理概念比较突出、分量恰到好处，因此变动不大；

第二部（第三至七章）为基本电子测量原理和方法，删去了第一版中以传统方法为基础的“电路参数的测量”一章，把有关元件参数（阻抗）测量的内容放到第五章中，着重介绍虚、实部分离的现代阻抗测量方法，因为实质上是电压测量在阻抗测量中的应用，故阻抗测量放在电压测量一章中讨论不损其系统性。此外，还增加了“频域测量”一章，其主要内容除保留了第一版中扫频测量技术的基本内容外，加强了线性系统频率特性的测量和频谱分析，对现代网络分析仪也作了扼要介绍。示波器已成为用途最广的电子仪器之一，从正确使用的要求来看，历来是学生掌

握上的难点，第二版加强了示波器显示稳定波形的基本原理——触发与扫描；

第三部分（第八至九章）扼要介绍了现代电子测量的几个新领域。测量仪器微机化和测试系统自动化，是现代电子测量的重要标志，第二版大幅度充实了这方面的内容。第八章介绍了智能仪器、个人仪器和自动测试系统的基本概念、原理和实用知识。最后一章“数据域测试技术”是第二版中新加入的，旨在适应计算机工业和微计算机化设备迅速发展的需要，对数字系统的研制、使用和维修中遇到的大量测试问题，提供入门知识。

本课程的参考学时数为 60 学时，前两部分大致占 12 和 32 学时；第三部分内容可以选授，可用 14 学时或稍多一些。

本教材适用于通信和电子类各专业的电子测量教材；也可作为电子测量专业的基础教程，以作为《现代电子测量》课程的先修课程。采用本教材，适当精选第一部分内容，保证第二部分的基本内容，可组成一个 40 学时左右的少学时电子测量课程；在讲授时适当充实第三部分内容，也可单独作为一个 20 学时的现代电子测量选修课教材。

《电子测量》第一版自 1983 年出版以来，经过五次重印，得到了广大师生和读者的关心和支持，并通过兄弟院校的教学实践，对教材提出了许多宝贵意见和建议；北京工业学院汤世贤教授、清华大学童诗白教授和成都电讯工程学院张世箴教授，热情为第一版作了评介，并始终关心和支持第二版的写作；主审王本初教授认真审阅了全稿，提出了指导性意见，为提高书稿质量付出了辛勤的劳动；本教材的责任编委于英民副教授为本书顺利出版付出了心血；我们还得到本校通信与控制工程系有关老师和同志们的指导与帮助，在这里对他们表示诚挚的感谢。

作者水平有限，书中难免存在错误和不足之处，殷切希望广大读者批评指正。

作者

1988 年 4 月于北方交通大学

第一版前言

本书是电子测量的基本教程和入门书。旨在阐明近代电子测量实践中所遇到的主要物理量的基本测量原理和方法，以及测量误差的基本理论和数据处理知识。尽管本书是为大学三年级电信、电子类专业学生编写的《电子测量》课程教材，但对从事这一领域实际工作的工程技术人员也有参考价值。如果适当删选内容，也可作为各类业余大学的教材。

本书的教学时数为 60—70 学时（其中实验 10—15 学时），讲授内容各校可根据实际情况加以取舍。

本书的内容分两大部分。第一部分（第二章）以较短的篇幅系统地介绍了测量误差和数据处理的基础知识。在保证内容科学性和严密性的前提下，避免繁琐的数学推导，而把重点放在对常用公式的物理解释和具体应用上。内容介绍力求线条清楚，能在十几学时内讲清主要问题。第二部分（第三至第九章）涉及的面很宽，内容要精选。我们在选取这部分内容时把重点放在基本测量原理和方法上，并着重介绍了取样技术、扫频技术、频率合成技术以及电子计算技术在测量中的应用。编写时抓住带有共性的基本测量原理和方法，并通过对误差来源的分析，讨论各种测量的特点及其所能达到的测量精确度。书中对测量原理的介绍力求深入浅出、讲清概念；对测量方法的讨论则侧重于归纳、总结，力求简明实用。至于对测量仪器的讨论，我们把重点放在各类仪器的工作原理、组成框图、工作特性及其涵义上，对仪器电路则在概括和综合的基础上重点介绍那些与测量原理和正确使用密切相关的部分，而不沉于对仪器完整电路的一般讨论。

本书是根据作者多年来从事电子测量教学工作的体会，历年来讲述有关电子测量课的讲稿和讲义，并参考近年来国内、外有

关资料和教材编写而成的。作者深感在电子技术飞跃发展的今天,电子测量作为培养工程师的一门技术基础课已不可缺少。学生系统掌握这方面的理论基础和实际知识,对于提高实践技能,培养严格的科学态度和科学的工作方法,以及为适应今后在生产 and 科研中将会遇到的大量现代测量任务进行必要的准备,都是十分重要的。作者热诚期望本书作为引玉之砖,能对电子测量的教学及学科的普及和提高作出菲薄的贡献。

本书承上海铁道学院王本初副教授(主审)、华中工学院张肃文教授、上海铁道学院陈惠康、兰州铁道学院李坤秀、清华大学张乃国、北京师范大学郭汾、罗琪、南京邮电学院常松奎、刘友霖、北京工业学院苏舫、铁道科学研究院顾理敏等同志认真审阅,提出了宝贵的改进意见。在编写过程中清华大学童诗白教授、中国计量科学院肖明耀同志、南京邮电学院范懋本副教授曾给予指导和帮助。我校杜锡钰教授、张树京、张林昌副教授始终关心和支持本书的写作,我们还得到本校电信系有关教研室的同志和数学教研室邹沛同志的指导和帮助。作者谨向他们表示衷心感谢!

我校电信系电子测量教研室徐一飞和张英飞同志也参加了本书的编写工作。

由于作者水平有限,书中一定会有许多错误或不足之处,欢迎读者批评指教。

作 者

1982年7月于北方交通大学

目 录

第一章 绪论	(1)
第一节 测量和计量	(1)
一、测量及其重要意义	(1)
二、计量的基本概念	(2)
第二节 电子测量的特点和应用	(3)
第三节 本课程的任务	(8)
第二章 测量误差理论与数据处理	(10)
第一节 测量误差的基本概念	(10)
一、测量误差的定义	(11)
二、测量误差的分类	(17)
第二节 测量误差的估计和处理	(29)
一、随机误差的影响及统计处理	(29)
二、用统计学方法剔除异常数据	(51)
三、处理系统误差的一般方法	(58)
第三节 测量误差的合成与分配	(67)
一、测量误差的合成	(68)
二、测量误差的分配	(86)
三、最佳测量方案的选择	(90)
第四节 测量数据处理	(91)
一、有效数字及数字的舍入规则	(91)
二、非等精度测量与加权平均	(96)
三、最小二乘法与回归分析	(101)
附录 I 正态分布在对称区间的积分表	(118)
附录 II t 分布在对称区间的积分表	(119)
附录 III 判别异常数据的肖维纳及格拉布斯准则	(122)
第三章 示波测试和测量技术	(123)
第一节 示波测试的基本原理	(124)

一、阴极射线示波管	(124)
二、图像显示的基本原理	(131)
第二节 通用示波器	(139)
一、示波器的分类和通用示波器的组成	(139)
二、示波器的垂直通道	(140)
三、示波器的水平通道	(143)
第三节 取样技术在示波测量中的应用	(154)
一、取样示波器的基本原理	(154)
二、取样示波器的基本组成	(158)
三、取样示波器的几个主要参数	(163)
第四节 示波器的多波形显示	(165)
一、多线显示和多踪显示	(165)
二、双扫描示波显示	(168)
第五节 波形的存贮和记忆	(170)
一、记忆示波器	(170)
二、数字存贮示波器	(171)
第六节 示波器的使用	(171)
一、示波器的基本测量方法	(171)
二、示波器功能扩展实例	(179)
三、示波器的正确使用	(181)
第四章 频率与时间的测量	(187)
第一节 频率或时间的原始基准	(187)
第二节 电子计数器测频方法	(188)
一、电子计数器的测频原理	(188)
二、频率计数器的组成	(190)
三、误差分析	(192)
第三节 电子计数器测周方法	(195)
一、测周的必要性与基本原理	(195)
二、误差分析	(196)
三、倒数计数器	(197)
第四节 时间间隔的测量	(199)
一、基本模式	(199)

二、脉冲宽度的测量	(201)
第五节 不同测量模式的测量误差	(202)
一、测频模式时的误差	(202)
二、测周模式时的误差	(205)
三、测时间间隔模式时的误差	(209)
第六节 标准频率源的测量	(210)
一、引言	(210)
二、频率准确度	(211)
三、频率稳定度	(211)
四、频率稳定度的时域测量	(222)
五、SSB 相位噪声的测量	(228)
第五章 电压测量技术	(236)
第一节 对电压测量的基本要求及电压测量	
仪器的分类	(236)
一、对电压测量的基本要求	(236)
二、电压测量仪器的分类	(237)
第二节 交流电压的测量	(238)
一、峰值电压表	(238)
二、均值电压表	(241)
三、有效值电压表	(246)
第三节 分贝的测量	(250)
一、数学定义	(250)
二、分贝的测量方法	(252)
三、选频测量	(256)
第四节 噪声测量	(258)
一、平均值电压表测噪声时读数的修正	(258)
二、带宽准则	(259)
三、满度波峰因数对测量时间的影响	(260)
第五节 电压测量的数字化方法	(264)
一、概述	(264)
二、非积分式 DVM	(265)
三、积分式 DVM 的特点	(271)

四、双斜式积分 DVM	(275)
五、DVM 的主要工作特性	(283)
六、在 DVM 中的自动功能	(287)
第六节 以电压测量为基础的数字仪表	(291)
一、数字多用表	(291)
二、阻抗的数字化测量方法	(295)
第七节 高频电压标准	(298)
一、引言	(298)
二、用测热电阻测量高频电压的原理	(298)
第六章 测量用信号源	(304)
第一节 引 言	(304)
第二节 正弦信号发生器的分类、组成和工作特性	(305)
一、分类与组成	(305)
二、工作特性	(307)
第三节 频率合成式信号发生器	(313)
一、概 述	(313)
二、有关锁相环的基本概念	(317)
三、锁相环的几种基本形式	(320)
四、应用举例	(325)
第四节 频率合成器	(327)
一、十进频率合成器总体组成	(327)
二、十进锁相合成单元	(329)
三、输出频率的连续调节	(332)
第七章 频域测量	(334)
第一节 引 言	(334)
第二节 线性系统频率特性的测量	(335)
一、正弦测量技术	(335)
二、扫频测量技术	(344)
三、多频测量	(359)
第三节 网络分析仪	(361)
一、双口网络 S 参量理论	(362)

二、 S 参数的测量	(365)
第四节 白噪声在线性系统测试中的应用	(367)
一、多路通信中的白噪声测试	(368)
二、非线性失真的动态测量	(368)
三、用白噪声作测试信号估测系统工作性能	(369)
第五节 信号的频谱分析	(371)
一、引 言	(371)
二、频谱仪的工作原理	(373)
三、扫频外差式频谱仪	(374)
四、频谱仪的工作特性	(377)
五、频谱仪的正确使用	(381)
第八章 微计算机化仪器与自动测试系统	(383)
第一节 概述	(383)
第二节 智能仪器	(385)
一、智能仪器的组成	(385)
二、微机化数字存储示波器	(391)
三、微计算机在计数器中的应用	(401)
四、微计算机在电压测量中的应用	(407)
五、微计算机在信号源中的应用	(422)
第三节 个人仪器	(429)
一、个人仪器的组成结构	(431)
二、个人仪器的特点	(433)
三、个人仪器系统实例	(435)
第四节 自动测试系统	(445)
一、自动测试系统的发展概况	(446)
二、GPIB 系统概述	(449)
三、GPIB 系统中消息的传递	(453)
四、GPIB 系统的接口功能	(464)
五、自动测试系统的组建	(472)
六、第三代自动测试系统(设备)	(478)
第九章 数据域测试	(490)
第一节 数据域分析和数据域测试仪器	(490)

一、数据域分析的基本概念.....	(490)
二、数字系统的特点和对数据域测试的要求.....	(492)
三、数据域测试仪器.....	(494)
第二节 逻辑分析仪的组成和工作原理.....	(501)
一、逻辑分析仪的基本组成.....	(501)
二、逻辑分析仪的触发.....	(503)
三、逻辑分析仪的数据获取.....	(505)
四、逻辑分析仪的数据存贮.....	(509)
五、逻辑分析仪的显示.....	(511)
第三节 逻辑分析仪的应用.....	(514)
一、逻辑状态分析仪的基本应用.....	(514)
二、逻辑定时分析仪的基本应用.....	(530)
习题	(539)
第二章习题.....	(539)
第三章习题.....	(542)
第四章习题.....	(549)
第五章习题.....	(551)
第六章习题.....	(552)
第七章习题.....	(553)
参考资料	(555)

第一章 绪 论

第一节 测量和计量

一、测量及其重要意义

测量是为确定被测对象的量值而进行的实验过程。在这个过程中常借助专门的设备，把被测对象直接或间接地与同类已知单位进行比较，取得用数值和单位共同表示的测量结果。

测量是揭示客观世界规律，用数字语言描述周围世界，进而改造世界的重要手段。广义地说，任何实验科学的结论，都是对实验数据统计推断的结果。而数据的取得，就要靠测量。近代自然科学是从有了实验科学之后才真正形成的。许多重大科学成果的获得，首先因为有了新的实验手段。在科学发展史上，重要的实验数据可以把假说上升为理论，成为验证理论的客观标准。同时，很多实验数据还成为发现新问题、提出新理论的线索和依据。著名科学家门捷列夫用一句话概括了测量对科学的作用，这句话就是“没有测量，就没有科学”。

现代科学技术、生产和国防的重要特点之一，就是要进行大量的观测和统计。现代工业大生产，用到测量上的工时和费用约占整个生产所用的20%~30%。提高测量水平，降低测量成本，减少测量误差，提高测量效率，对国民经济各个领域都是至关重要的。因此，测量手段的现代化，已被公认为是科学技术和生产现代化的重要条件和明显标志。

二、计量的基本概念

随着生产的发展、商品的交换和国际、国内的交往，客观上要求对同一量在不同的地方、用不同的测量手段测量时，所得的结果应该一致。因而出现了大家公认的统一单位，体现这些单位的基准、标准和用这些基准和标准来校准的测量器具，还用法律形式将上述内容固定下来，从而形成了与测量有联系而又有别于测量的新概念，这就是计量的概念。也可以说计量是为了保证量值的统一和准确一致的一种测量，它的三个主要的特征是统一性、准确性和法制性。计量工作主要是把未知量与经过准确确定、并经国家计量部门认可的基准或标准相比较来加以测定，也就是通过建立基准、标准，进行量值传递。但是它也包含了为达到统一和准确一致所进行的全部活动，如单位的统一、基准和标准的建立、计量监督管理、测量方法及其手段的研究等等。

凡能用以直接或间接测出被测对象量值的量具、计量仪器和计量装置都统称为计量器具。计量器具按用途可分为计量基准、计量标准和工作用计量器具三类。

计量基准一般又分为国家基准、副基准和工作基准。国家基准又叫主基准，它是用来复现和保存计量单位，具有现代科学技术所能达到的最高准确度，经国家鉴定并批准，作为统一全国计量单位量值的最高依据的计量器具。通过直接或间接与国家基准比对来确定其量值，并经国家鉴定批准的计量器具称为副基准。建立副基准的目的主要是代替国家基准的日常使用，也可以用于验证国家基准的变化。经与国家基准或副基准校准或比对，并经国家鉴定，实际用以检定计量标准的计量器具称为工作基准。工作基准主要用于一般量值传递，以防止国家基准或副基准由于使用频繁而丧失其应有的准确度或遭到损坏。

计量标准是按国家规定的准确度等级，作为检定依据用的计量器具或物质，它的量值是由工作基准传递来的，并将基准所复现的单位量值通过检定逐级传递到工作用计量器具，以保证后者

量值的准确和一致。计量标准有两类：一类是标准器具，一类是标准物质。标准物质是指在规定条件下，具有高稳定的物理、化学或计量学特性，并经正式批准作为标准使用的物质或材料。在鉴定、评价和考核仪器、测量方法和测量结果方面，标准物质的使用都是一种重要手段。

不用于检定工作而只用于日常测量的计量器具称为工作用计量器具。但是工作用计量器具要定期用计量标准来检定，即由计量标准来评定它的计量性能（准确度、稳定度、灵敏度等）是否合格。

计量工作保证了全国量值的统一，是生产、科研和人民生活的正常秩序和各项活动安全可靠的重要保证。计量工作是国民经济的一项带基础性的重要工作，需要一定的法制管理。第六届全国人民代表大会常务委员会第十二次会议通过了中华人民共和国计量法，并于一九八六年七月一日起施行。这对加强计量监督管理，保障国家计量单位制的统一和量值的准确可靠，有利于生产、贸易和科学技术的发展，适应社会主义现代化建设的需要，维护国家、人民的利益都是十分重要的。

从上面的讨论可以看出，计量的出现是测量发展的客观需要，测量还是计量联系生产实际的重要途径，可以说没有测量就谈不上计量。但是测量数据的准确可靠，要求计量予以保证，没有计量，测量也将失去价值。测量和计量相互配合，在国民经济各个领域都发挥着重要作用。

第二节 电子测量的特点和应用

从广义来说，凡是利用电子技术来进行的测量都可以说是电子测量。随着电子科学技术的发展，由于电子测量的一系列优点，许多物理量都设法通过一定的传感器变换成电信号，然后利用一整套比较成熟的电子学方法来进行测量。在科学技术高度发展的今天，尖端技术和现代化的工农业生产都离不开精密和准确

的测量。一个射程为八千公里的洲际导弹，如果航向误差有0.03度，也会造成导弹偏离目标5—8公里。制造炸药的甲苯，在生产中测量温度如有一度的误差，也可能造成严重的事故。现代化科学技术和现代化大生产中那些要求精密和准确测量的内容通常都是运用了电子测量的方法来实现的。

从狭义来说，电子测量是在电子学中测量有关电的量值。即使在这个范围内，内容也是相当广泛的，通常包括下面几个方面：

- (1) 电能量的测量，即测量电流、电压、电功率等；
- (2) 信号的特性及所受干扰的测量，例如信号的波形和失真度、频率、相位、脉冲参数、调制度、信号频谱、信/噪比等；
- (3) 元件和电路参数的测量，例如电阻、电感、电容、电子器件（电子管、晶体管、场效应管等）、集成电路的测量。电路频率响应、通带宽度、品质因数、相位移、延时、衰减和增益的测量等等。

与其它一些测量相比，电子测量具有以下几个明显的特点：

(1) 测量频率范围极宽，低端除测直流外可测低至 10^{-4} — 10^{-5} Hz，高端可至100 GHz左右（在有些测量方面甚至更高）。电子测量能工作在这样宽的频率范围，这就使它的应用范围很广。但是即使测量同一电量，在不同的频段中所依据的原理、采用的方法、使用的元器件等都可能相差很远。所以有时把测量或供给同一电量的仪器分成几种，分别侧重于不同的频段，例如超低频信号发生器、音频信号发生器、高频信号发生器等等。当然这给使用带来很多不便。近年来研制了很多宽频设备，使一台仪器能在很宽的频率范围内工作。

(2) 量程很广。由于所测电量的大小相差极大，要求测量仪器的量程也极宽。同一台电子仪器，经常能做到量程宽达很多数量级。例如一台普通的欧姆表，可以测出几欧姆至几十兆欧姆的电阻，量程宽达六、七个数量级。一台高灵敏度的新型数字电