

● 新型电子电路应用指南

实用电子测量技术

张乃国 廉有林 编著



- ◆ 适用于电子技术、自动化、计算机等方面的技术人员
- ◆ 可供电子爱好者自学和参考
- ◆ 可作大、中专电子类学生教材



电子工业出版社
PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY

新型电子电路应用指南

实用电子测量技术

张乃国 廉有林 编著

电子工业出版社

内 容 提 要

本书在编写过程中力图体现先进性、实用性和资料性，并以实用性为主。从测量要求出发，引出测量方法、给出实用电路、元器件参数尽量齐全，以便于读者应用。

本书主要介绍以电子技术实现的各种测量方法。全书分四章：第一章为电子测量基础知识，第二章为模拟测量方法，第三章为数字测量方法，第四章介绍用屏幕显示方式实现的测量方法。内容丰富，深入浅出，便于读者阅读。

本书可供从事电子技术、自动化、计算机等方面的工程技术人员和电子爱好者自学和参考，也可作为大中专学校电子类学生的参考读物。

新型电子电路应用指南

实用电子测量技术

张乃国 廉有林 编著

责任编辑 魏永昌

*

电子工业出版社出版（北京市万寿路）

电子工业出版社发行 各地新华书店经销

北京市顺义县李史山胶印厂

*

开本：850×1168 毫米 1/32 印张：15.25 字数：385 千字

1996 年 3 月第 1 版 1996 年 3 月第 1 次印刷

印数：5000 册 定价：23.00 元

ISBN 7-5053-2532-9/TN·741

编 委 会

主 任 谢沅清

副主任 赵学泉

编 委 (按姓氏笔画排序)

华正权 杨世成 张乃国 张国华

郭 斌 解月珍

序 言

本丛书是为应用电子电路的工程技术人员提供一些必备的基础知识而编写的。

目前公开出版的电子电路书籍有两类，一类是教科书，一类是应用手册。教科书偏重于理论，而且由于受到学时和篇幅的限制，只能讲述一些主要的基本电路。众所周知，一个实用的电路，往往比原理性电路要复杂一些。初出校门的读者，阅读实际电路，或是自己设计一个实用电路，仅依靠教科书上介绍的电路知识，有一定的困难。而在许多电子电路手册或是电子电路集锦中，往往只给出电路及其所能实现的功能，原理阐述不够。不利于读者灵活变通应用。本丛书试图弥补上述不足，确定了如下的编写宗旨。

1. 考虑到本书的主要读者对象是中等以上水平的工程技术人员和电子爱好者。他们和教科书的读者——很少接触电子电路实际的青年学生不同。具体地说，这些读者或多或少有一些电子电路方面的基本知识。另一方面，相当多的一部分读者不一定具备高等数学基础。因此，本书讲述基础知识时，并不是所有基本理论都从头讲起，对有些问题的讲述，其起点比一般的教科书略高一些，编写时尽量避免应用较深的数学分析和推导，而是注重定性分析和工程估算。

2. 和教科书稍有不同的是，本丛书着重讲述和实际应用有关的理论，介绍一些经验公式和数据。书中还适当附上部分常用元器件和特性数据及选型原理。讲述设计时，不强调从头到尾的通盘设计和精确计算，偏重于利用参考电路作一些局部修改以适应实际需要的工程计算，还适当介绍某些调测电路的方法。

3. 本丛书的选材着眼于目前国内普遍应用的电路，对于一些

已经过时，虽然在部分陈旧设备中还有应用的电路，则不予选用。

本丛书第一批选题内容的安排以信号流程为主线，分为信号产生、信号放大、信号处理、信号变换、测量、电源及数字逻辑电路七个分册。每一分册相对独立，不存在某一分册为其它分册打基础的问题。

本丛书在动笔前，编委会曾多次集会研讨编写宗旨，内容深度、广度，制定出各分册的编写要求和大纲，并对若干分册的样章进行过讨论。各分册初稿完成后，由主编一一过目，各分册均确定了审稿人，提出修改意见，返回作者修改定稿。但由于各分册作者工作较忙，无法集中长时间进行写作，还由于水平有限，书成后未能全部达到预期目的。书中还难免出现这样或那样的缺点甚至错误，敬希广大读者批评指正。

编者

1994年1月

前 言

本书作为《新型电子电路应用指南》丛书的一个分册，介绍各种参量的电子测量方法。

电子测量技术主要研究利用电子技术实现各种物理量的测量原理、测量方法以及所采用的测量仪器。电子测量已成为一门发展迅速、应用广泛的学科，它对现代科学技术的发展起着巨大的推动作用。

全书分四章：第一章阐述电子测量的基础知识，叙及电子测量的特点、内容、方法、仪器、误差及抗干扰等内容；第二章介绍模拟测量技术，叙及直流电压、高低频电压、脉冲电压、噪声电压、失真度、功率、功率因数、 R 、 L 、 C 、 Q 、磁通及元器件参数等测量方法；第三章介绍数字测量技术，叙及电压、电流、频率、时间、相位、 R 、 L 、 C 、 Q 及逻辑量等测量方法；第四章介绍屏幕显示技术，叙及各种波形、时间、相位、调制度、元器件特性曲线及其参数、幅频特性、频谱特性、逻辑分析等测量方法。

鉴于阅读本书的对象是已经了解电子技术知识并想掌握更多电子测量方法的广大工程技术人员、大中专学生和电子爱好者，为此在编写本书时力图体现先进性、实用性和资料性，并以实用性为主。从测量要求出发，引出测量方法，给出实用电路，元器件参数尽量齐全，以便于读者应用。

本书由张乃国主编，以其编著的《电子测量技术》高校教材为基础确定全书的内容，并统编定稿。廉有林副教授编写了第二至第四章的初稿。北京邮电大学谢沅清教授对全书内容的安排提出了宝贵意见，并审阅了书稿。清华大学王宏宝副教授对本书的初稿曾提出修改意见。魏永昌副编审在全书编写过程中做了大量

工作。在此一并致谢。

本书参阅了许多有关电子测量方面的书籍及杂志，借本书出版之际谨向原作者表示感谢。

由于作者水平有限，对于书中的缺点和错误敬请读者批评指正。

编著者

1995年2月于清华大学

目 录

第一章 电子测量基础知识	(1)
1.1 电子测量的基本特点	(1)
1.2 电子测量的基本内容	(2)
1.3 电子测量的基本方法	(3)
1.4 电子测量仪器的分类	(5)
1.5 测量误差的基本知识	(7)
一、测量误差的表示方法	(7)
二、电子测量仪器误差的表示方法	(8)
三、误差的来源	(9)
四、误差的分类	(9)
1.6 提高测量准确度的基本方法	(10)
1.7 电子测量中的干扰及其预防	(13)
第二章 模拟测量方法	(15)
2.1 概述	(15)
一、对电压测量的基本要求	(16)
二、电压测量仪器的分类	(17)
三、测量中有关注意事项	(17)
2.2 高内阻回路直流电压的测量	(23)
一、直流电子式电压表的基本电路	(24)
二、带有斩波放大器的直流电压表	(30)
2.3 交流电压的表征与测量方法	(37)
一、交流电压的表征	(37)
二、交流电压的测量方法	(38)
2.4 低频电压的测量	(40)

一、平均值检波器的工作原理	(41)
二、波形换算方法	(42)
三、误差分析	(43)
四、利用运算放大器构成的精密检波器	(46)
五、均值检波式电压表实例	(52)
2.5 有效值电压的测量	(57)
一、有效值-直流变换器原理	(57)
二、有效值检波器实例	(63)
2.6 高频电压的测量	(72)
一、峰值检波式电压表原理	(72)
二、误差分析	(73)
三、波形换算方法	(74)
四、高频电压测量实例	(75)
五、高精度峰值检波器	(78)
2.7 脉冲电压的测量	(85)
一、脉冲电压表原理	(85)
二、脉冲电压测量实例	(87)
2.8 噪声电压的测量	(92)
一、噪声的基本特性	(92)
二、器件和放大器噪声的测量	(93)
2.9 失真度的测量	(107)
一、非线性失真定义	(107)
二、失真度测量仪原理	(108)
三、有源陷波电路	(110)
四、误差分析	(116)
2.10 功率的测量	(118)
一、音频与较高频率功率的测量	(118)
二、误差分析	(123)
三、功率表实例	(124)
2.11 功率因数的测量	(127)
一、用模拟电子技术方法测量功率因数	(128)

二、非正弦电流情况下功率因数的测量	(130)
2.12 电阻的测量	(133)
一、采用欧姆表测电阻	(133)
二、采用电桥测电阻	(141)
三、采用有源电桥测电阻	(142)
2.13 电容、电感的测量	(145)
一、直接测量法	(145)
二、用交流电桥测电感、电容	(155)
三、一种测量电容的新方法	(160)
2.14 Q 值及元件参数的测量	(161)
一、 Q 表	(161)
二、用虚、实部分分离法测量阻抗	(165)
2.15 分立半导体器件参数的测量	(169)
一、晶体管基本参数的测量	(169)
二、多用测试仪电路	(179)
2.16 集成运放参数的测量	(182)
一、逐项测试法	(183)
二、带辅助放大器的测试方法	(190)
三、运算放大器测试电路实例	(195)
2.17 磁场测量	(200)
第三章 数字测量方法	(213)
3.1 电压测量的数字化方法	(213)
一、数字式电压表 (DVM) 的特点	(214)
二、DVM 的主要类型	(215)
三、数字电压表的工作特性与测量误差	(224)
3.2 电压-频率转换器的实用电路	(230)
一、恢复型电压-频率转换器	(230)
二、由单片集成电路构成的 100kHz U-F 转换器	(233)
三、精度为 0.2% 的压控振荡器	(234)
3.3 直流数字电压表	(236)
一、单片 CMOS 双积分式 A/D 转换器	(236)

二、由 A/D 转换器为主体构成的 DVM 实例	(237)
三、一种微机化的 $6\frac{1}{2}$ 位数字电压表	(241)
3.4 直流电流的测量	(244)
一、直流电流-直流电压转换器	(244)
二、电流-频率转换器	(248)
三、用数字面板表测直流电流	(250)
3.5 多用型数字电压表	(251)
一、多用型 DVM 工作原理	(251)
二、多用型 DVM 实例	(251)
3.6 频率的测量	(259)
一、电子计数器测频	(259)
二、频率计数器的组成	(261)
三、误差分析	(262)
四、频率计电路实例	(264)
3.7 时间的测量	(270)
一、周期测量	(271)
二、用脉冲计数法测量脉冲上升时间 t_r 及脉冲宽度 t_w	(272)
三、脉冲时间间隔的测量	(274)
四、长时间的测量 (外控时间间隔测量)	(275)
五、时间测量电路实例	(275)
3.8 相位的测量	(280)
一、用脉冲计数法测相位	(280)
二、测量实例	(281)
3.9 电阻的测量	(287)
一、利用电阻-电压转换器测电阻	(287)
二、测量实例	(289)
3.10 电容的测量	(296)
一、电容数字测量的一般方法	(296)
二、测量实例	(297)
3.11 电感及品质因数的测量	(306)
一、电感数字测量的一般方法	(306)

二、测量实例	(307)
3.12 数字系统中逻辑量的测试	(313)
一、逻辑电平测试设备	(314)
二、简易逻辑电平测试实例	(315)
三、三态逻辑电平测试笔电路实例	(317)
四、多点逻辑状态测试电路	(319)
五、数显逻辑电平探测器	(322)
第四章 屏幕显示技术	(325)
4.1 概述	(325)
一、示波器的基本工作原理	(325)
二、电子示波器的组成与种类	(327)
三、示波器的检验	(331)
四、示波器的选择与使用	(334)
4.2 通用示波器	(339)
一、Y 信道部分	(339)
二、X 信道部分	(345)
4.3 多波形显示	(346)
一、多波形显示	(346)
二、双扫描显示	(349)
4.4 取样示波器	(352)
一、取样示波器的组成	(352)
二、取样示波器的应用	(354)
4.5 用微处理机构成的数字存储示波器	(355)
一、数字存储示波器的特点	(355)
二、数字存储示波器的工作原理及应用	(355)
三、数字存储示波器应用举例	(359)
4.6 用示波器测量电压	(365)
一、基本测量方法及原理	(365)
二、直流电压或含直流成分交流电压的测量	(370)
三、高频电压的测量	(371)
四、脉冲电压的测量	(371)

五、噪声电压的测量	(375)
4.7 周期、时间、相位的测量	(376)
一、周期、时间的测量	(376)
二、相位的测量	(380)
4.8 调制度的测量	(383)
一、调幅系数的测量	(384)
二、调频指数与频偏的测量	(387)
4.9 晶体管特性曲线的显示	(390)
一、观察晶体管特性曲线	(391)
二、晶体管开关特性的测试	(395)
4.10 集成电路参数的测试	(401)
一、数字集成电路参数的测试	(401)
二、运算放大器电参数的测试	(405)
4.11 用电子示波器检测电子电路	(413)
一、检测放大电路	(413)
二、稳压电源瞬态响应测试电路	(422)
4.12 磁性元件特性曲线的显示	(423)
一、磁心 $B-H$ 曲线的描绘	(423)
二、交流磁化曲线和磁滞回线的自动测量	(427)
三、用振动线圈法测量磁场强度	(432)
4.13 电子示波器功能扩展电路	(432)
一、示波器带宽扩展电路	(432)
二、用示波器显示多路波形的附加电路	(434)
三、用示波器观察抽样信号的附加电路	(435)
四、使示波器具有逻辑分析功能	(437)
4.14 扫频技术	(439)
一、扫频法的原理	(440)
二、扫频仪的应用举例	(441)
4.15 信号的频谱分析方法	(448)
一、时域和频域的关系	(448)
二、频谱分析仪的原理与应用	(448)

4.16 数字系统的逻辑分析	(454)
一、逻辑分析仪的组成	(455)
二、逻辑分析仪的功能、特点、分类及主要产品	(456)
三、简易逻辑分析仪	(459)
四、逻辑分析仪用于数字系统故障诊断的实例	(463)
主要参考文献	(470)

第一章 电子测量基础知识

1.1 电子测量的基本特点

测量是人类认识和改造自然的重要手段，是人们为确定被测对象的量值而进行的实验过程。随着科学技术的发展，需要进行大量的测量工作。测量学逐步发展成为一门完整的、理论与实践相结合的学科。随着测量学的发展，诞生了以电子技术为手段的测量方法，称为电子测量。

电子测量涉及到宽广频率范围内的所有电量、磁量以及各种非电量的测量。当前，电子测量已广泛应用于科学研究、实验测试、工业生产、通讯、医疗及军事等领域，已成为现代科学技术不可缺少的手段。

电子测量与其它测量方法相比，具有以下特点：

(1) 测量频率范围宽

电子测量除测量直流电量外，还可以测量交流电量，其频率范围低至 10^{-4}Hz ，高至 10^{12}Hz 。在不同的频率范围内，采用的测量方法和使用的测量仪器也不同。例如提供测量用的信号源就有低频信号发生器、音频信号发生器、高频信号发生器等种类。

(2) 仪器量程范围广

量程是仪器所能测试各种参数的范围。由于被测量的大小相差较大，因而要求测量仪器的量程要很宽广。例如一台数字电压表，可以测量从纳伏 (nV) 级至千伏 (kV) 级的电压，其量程达 11 个数量级，一台数字频率计，其量程可达 17 个数量级。

(3) 测量准确度高

电子测量的准确度比其它测量方法高得多,尤其是对频率、时间、电压的测量。由于采用原子频标,可以使测量误差减小到 10^{-13} 数量级,如果是做成专用钟表,几千万年仅差1秒。这是目前人类在测量准确度方面达到的最高指标。用标准电池做基准可使测量误差减小到 10^{-6} 数量级,以此做成的直流数字电压表可以作为高级标准仪表使用。由于用电子测量方法能够准确地测量频率和电压,所以人们往往尽可能地把其它参数变换成频率或电压信号后再进行测量。

(4) 测量速度快

电子测量具有其它测量方法无法类比的高速度。例如对航天飞机、导弹或工业生产中的“在线测量”和数据处理等,都要求高速度,这样才能及时发出控制信号。由于电子测量中主要利用电子运动(例如示波器中的电子束偏转)来实现,因而可以达到比指针等方式高得多的测量速度。

电子测量的准确度高、速度快是它在现代科学技术领域得到广泛应用的重要原因。

(5) 易于实现测量自动化

通过各种类型的传感器实现遥测,解决了人体不便于接触或无法到达的区域(例如深海或地下)。由于应用微型计算机可以实现自动记录、数据运算、分析处理,做成各种自动化仪器或自动测试系统等。

电子测量的许多特点,使它广泛应用于各个部门,大到宇宙航天,小到物质结构,几乎找不到没有应用电子测量技术的领域。

1.2 电子测量的基本内容

随着科学技术的不断发展,测量的内容愈来愈多。电参数的测量分为电磁测量和电子测量两类,前者着重研究交直流电量的指示测量法与比较测量法以及磁量的测量方法;后者是以电子技