

电子测量技术

电子技术教育丛书

江苏科学技术出版社

电子测量技术

韩志本 主编

江苏科学技术出版社

本书是根据电子工业部于1979年颁布的《电子工业工人技术等级标准》中有关具体规定和要求编写的。它是江苏省电子工业局主编的《电子技术教育丛书》中的一册，可作为电子类整机厂装配调试工、仪表工、计量工、检验工等工种工人技术培训教材，也可供电子类中专、技工学校师生以及有关技术人员参考。

全书包括电子测量概述，电流和电压的测量，功率的测量，电阻的测量，电容和电感的测量，半导体器件的测试，频率、时间和相位的测量，频谱分析和非线性失真的测量，调制系数的测量，频率特性的测量，非电量的电测法等十一章。学完本书之后，读者可在掌握基本原理与方法的基础上，学会选用合适的电子仪器，正确地进行测量，并取得可靠的数据。

本书由韩志本同志主编。其中，第一、三、四、九章由王谨之同志编写。侯世恩同志审阅了全稿。吴品祥、虞东威同志也给予了支持和帮助。

电 子 测 量 技 术

韩 志 本 主 编

出版：江苏科学技术出版社

发行：江苏省新华书店

印刷：常州人民印刷厂

开本 787×1092 毫米 1/32 印张 10.5 字数 230,000

1983年3月第1版 1983年3月第1次印刷

印数 1—22,500册

书号 15196·105 定价 0.95 元

责任编辑 许顺生

出 版 说 明

为了加速电子工业的发展和提高工人的技术水平，电子工业部于1979年9月颁发了《电子工业工人技术等级标准》，作为工人技术教育和等级考核的依据。此标准公布后，工厂企业普遍反映需要有一套同它相适应的、系统的技术教育书籍。为此，我们根据标准中规定的应知应会的具体要求，结合当前生产实际，组编了这套《电子技术教育丛书》。

丛书是在江苏省电子工业局主持下，由施福桐、赵所生、王谨之、许顺生、舒云台、吴山、张曙光和金仁和等同志组成编委会进行规划和组稿，分别邀请有关大专院校、科研单位、工厂的教授、讲师、工程师进行编写和审核的。

丛书包括《电工基础》、《电子线路》、《无线电技术原理》、《电子测量技术》、《电子计算机原理和应用》、《无线电元件和器件》、《无线电整机装配工艺》和《电子元、器件制造工艺》等册，将分别陆续出版。

由于电子工业的类别和工种繁多，等级要求也不一。所以，丛书安排内容的原则是以共同的技术基础为基石，适当照顾数量较多的专业工厂的需要。具体地说，是以工人技术等级标准为依据，将共同性基础理论为主体，兼顾整机厂和常用元器件厂的工艺知识，分别归纳成册。各工厂在组织培训时，可从中选配组合，满足各自的需要。

在《电子工业工人技术等级标准》中规定，对低等级工人的考核重点是产品的质量和数量，而高等级工人则侧重技术、熟练程度，和解决技术疑难问题的能力。我们考虑到本

丛书应着重帮助低等级工人奠定坚实的技术基础，又适当照顾高等级工人的进修需要，所以决定一般以五级工的相应标准为编写的上限。为使整机调试工、成品检验工等比较深入地掌握线路原理，故将《电子计算机原理和应用》和《无线电技术原理》等册的内容适当引深；另外，又专为整机和元器件厂编写了工艺书籍。因此，这套丛书也可供科技人员、中等专业学校和技工学校师生和业余爱好者参考。

《电子技术教育丛书》编委会

1981年5月

目 录

第一章 电子测量概述	1
第一节 迅速发展中的电子测量	1
第二节 电子测量的基本内容	2
第三节 电子测量的基本特点	3
第四节 计量的基本概念	5
第五节 常用电子仪器和测量方法的分类	7
第六节 测量误差的基本概念	11
第七节 测量误差的检查和改善方法	20
第八节 测量结果的处理	32
复习题一	45
第二章 电流和电压的测量	48
第一节 概述	48
第二节 测量电流和电压的基本知识	50
第三节 直流电流和电压的测量	73
第四节 交流电压的测量	76
第五节 脉冲电压的测量	88
第六节 示波器及其在电压测量中的应用	90
第七节 数字电压表简介	105
复习题二	113
第三章 功率的测量	115
第一节 概述	115
第二节 直接测量法	116
第三节 量热计测量法	117
第四节 光度计测量法	120
第五节 测热电阻法	121

第六节 分贝及其定度	126
复习题三	130
第四章 电阻的测量	132
第一节 概述	132
第二节 欧姆表法	132
第三节 直流电桥法	135
第四节 标准电阻简介	139
第五节 数字式欧姆表法	140
第六节 可变电阻的测量	142
第七节 电阻的交流特性	143
复习题四	145
第五章 电容和电感的测量	147
第一节 基本概念	147
第二节 电压-电流法	151
第三节 电桥法	155
第四节 谐振法	161
第五节 互感量的测量	167
第六节 Q 值的测量	170
第七节 标准电抗元件及其应用简介	173
复习题五	175
第六章 半导体器件的测试	177
第一节 概述	177
第二节 二极管的测试	178
第三节 稳压管的测试	184
第四节 三极管的测试	187
第五节 场效应管的测试	201
第六节 双基极二极管的测试	205
第七节 晶体管特性图示仪的原理和用法	209
复习题六	221

第七章 频率、时间和相位的测量	223
第一节 概述	223
第二节 频率的测量	227
第三节 时间的测量	241
第四节 相位的测量	251
复习题七	261
第八章 频谱分析和非线性失真的测量	263
第一节 概述	263
第二节 频谱分析法	265
第三节 非线性失真系数的测量	269
复习题八	276
第九章 调制系数的测量	278
第一节 概述	278
第二节 调制系数的测量	279
复习题九	284
第十章 频率特性的测量	286
第一节 概述	286
第二节 点频法测量幅频特性	288
第三节 扫频法测量幅频特性	290
第四节 脉冲法测量幅频特性	302
复习题十	304
第十一章 非电量的电测法	305
第一节 概述	305
第二节 常用传感器	307
复习题十一	321
附录 I 测量仪器误差的表示方法	322
附录 II 常用分贝表	325

第一章 电子测量概述

第一节 迅速发展中的电子测量

电子测量是指以电子技术的理论为依据、以电子测量仪器和设备为手段、待测量的电量和非电量为对象的测量过程。

随着无线电电子学不断发展，可以说，任何一项电子类的科研课题的解决、新产品的研制与定型、老产品的生产等，都需要进行大量的甚至非常复杂的测量、数据处理、分析和归纳工作。所以，电子测量在科研、生产和教学中的地位显得越来越重要。如今，这门电子测量科学已经成为一门发展十分迅速、使用非常广泛、精度越来越高、并对现代科技发展起着巨大推动作用的独立学科。它不仅应用于电子技术本身，还广泛地用于核子物理、材料科学、医学、化学等科学领域。

追溯无线电电子学的发展史可以知道，电子测量虽是无无线电电子学的一个分支，然而在发展过程中两者是相互促进的。例如，随着无线电技术的发展，在本世纪三十年代后期研制成功和使用示波器后，很快推动测量技术进入了一个新阶段。示波器不仅使人们对各种电现象得到直接观测而加深了理解，而且反过来又促进了无线电技术的发展，还奠定了雷达和电视的显示基础。近几十年来，随着无线电电子技术的迅速发展，许多新元件、新器件的涌现，各种电子测量仪器又得到了进一步发展并出现了各种数字式仪器。

七十年代初出现了把电子计算技术与电子测量仪器结合在一起的**新型数字化自动测量系统**。它可以自动地按照预先指定的程序进行量程选择、测量数据、记录数据、计算结果、修正误差甚至检查故障。为了区别起见，人们把传统的仪器与测量技术称为**经典仪器和经典测量技术**，而把这种高速自动化仪器与测量技术称为**“智能仪器与智能测量技术”**。智能仪器与智能测量技术的问世，不但打破了人们长期以来的传统观念，还对整个电子技术和许多近代科学技术产生了十分深远的影响。特别是在中、大规模集成电路和大型高速电子计算机的生产与使用中，它的作用尤为重要。这种智能化自动测试仪器与系统，已经成为八十年代电子技术和电子仪器发展的重要方向。

尽管如此，可以肯定：在今后一个相当长的时期内，传统的经典仪器和测量技术还不可能完全被这崭新的智能自动化仪器与系统所替代。其原因有：（1）经典仪器与测量技术是电子测量的基础；（2）并非在所有测量场合都需要或能适用自动化，只有在需要大量重复和快速测出某些指定项目的前提下，使用昂贵而复杂的自动化系统才有价值（随着集成电路制造技术的提高和降价，智能仪器和系统的价格也有相应下降，但仍感价格高昂）。在绝大多数的测量场合中，还是需要使用传统的仪器和测量方法的。为此，本书仍以传统的电子测量技术来编写，这样既符合当前的实际需要，又可奠定坚实的理论基础，掌握常用的测量技术。

第二节 电子测量的基本内容

随着电子技术的不断发展，测量的内容与项目愈来愈多。

这里，仅就集中参数电路进行测量的主要内容加以分类简介，以便读者在学习测量技术之前，了解一些概貌。

(1) 电能方面的测量，内容有电压、电流和功率等。

(2) 电路参数方面的测量，内容有电阻、电感、电容、阻抗、品质因数和损耗等。

(3) 电信号波形参数方面的测量，内容有频率、时间(包括周期)、相位、失真度、调幅系数、调频频偏等。

(4) 电路性能方面的测量内容有放大量(增益)、衰减量、灵敏度、频率特性等。

(5) 半导体器件方面的测量，内容有二极管、稳压管、三极管、场效应管、单结管等。

以上五个方面是属于电路的电量测量。除此之外，还有非电量的电子测量法，简称电测法。在使用电子测量方法之前，必须把待测的非电量，如温度、位移、角度、速度、压力、流量等等，转换成相应的电参数(如电压、电流、频率等)才能够用电子测量的方法测出，最后换算成所需的结果。

第三节 电子测量的基本特点

电子测量的特点很多，这里简述其主要特点。

1. 频率范围宽

当测量电流、电压和功率等项目时，都必须考虑其频率的高低和范围；当测量电子设备的增益、衰减、灵敏度、通频带等项目时，也必须考虑其频率的高低和范围。在电子测量中，应该充分地注意频率的特点。从电子测量所可能接触到的总的频率范围来看，是很宽的。低端进入 10^{-4} 赫量级，高端已达到几百千兆赫。

通常，应该根据被测对象的频率高低与范围，来选定相应频率范围的仪器和测试方法。这是因为在不同频段时的测量方法并不一样。当遇到工作对象的频率范围很宽时，就只可用几个不同频段的仪器分段衔接的测法来解决。显然，在衔接中会带来一些问题，而且常常感到麻烦。近十年来，由于各种新技术、新工艺和新器件的不断出现，已提供了许多种类的新的宽频段仪器。电子测量技术也正向着宽频段（甚至全频段）的方向迈进。

2. 量程广

量程是指被测量的量值范围。电子测量的总的量值范围很宽。例如，一只很普通的 MF30 型万用表，其欧姆档可从几欧姆测到几十兆欧姆，达七个数量级；电流档可从几微安测到 500 毫安，达五个数量级。数字式频率计的量程范围更大，可达十七个数量级以上。

3. 精确度高

测量的精确程度，除了与测量方法的正确与否和测量技术的高低有关外，还同所选用仪器的精确度有关。单就电子仪器的精确度而言，当前已达到相当高的水平。以时间和频率的测量为例，由于 1967 年国际计量大会以后采用了铯原子频标来定义时间频率的原始基准，使得频率测量的精确度可优于 10^{-13} 量级。它的精确度同其他所有物理量的精确度相比，已遥遥领先。电子测量中的其他参数的测量精确度（虽不如时间频率的精度）一般都比较高。

除以上三个特点外，对于近代自动化智能仪器与测试系统来说，还有高速度、自动测试、自动记录、自动处理数据和分析归纳测量结果的特点。

第四节 计量的基本概念

电子测量也与其他测量一样，是一个比较的过程。通过比较来获得被测量对象的某些需要掌握的数值，从而加以认识或加深认识。要进行比较，就必须先具备能体现该物理量的单位已知量，以作为衡量依据；然后用已知量来同该被测量对象的物理量进行比较。例如，买布要量长度，用尺来量，则尺就是该物理量单位的已知量，而布的长度就是被研究对象的物理量。测量的准确度同已知量有密切关系，所以对于测量中的所有的已知量，都必须以严格的科学理论为依据来定义。同一已知量的千千万万只量具或测量仪器所表示的测量单位，必须以此为依据，互相统一。由此就发展成为一门计量学。

现在，可以给计量学下一个定义：计量学是一门专门研究如何保证量值的统一和准确所必须的方法、技术、专用设备和实施政策的科学。

计量学研究的内容有：

- (1) 研究测量和计量的一般理论；
- (2) 研究测量和计量的方法、技术和计量用的专用量具和仪器设备；
- (3) 研究各种量值单位的定义和相互转换关系；
- (4) 研究各种量值的复制转移和检定，以及研究保证量值统一所必须采取的措施、规程和法制。

为了量值的准确和统一，必须把有关的定义、标准、措施和规程树立其权威性，并用法律形式加以固定和推行。

在科研、生产、教学的各种测量工作中，无不使用着大

量的不同精确度、不同类型的量具和电子仪器设备，因此保证各类量具、仪器和设备的量值统一是十分重要的。为达到量值的统一，必须通过各级标准、基准和相应的辅助设备把统一的物理量的量值（国家基准量值）转移（即传递）到使用的量具和仪器设备上去。国家计量部门以法定的形式制订出一整套检定规程，其中包括检定方法、使用设备、对标准（或基准）与受检量具（或仪器）的精度要求、操作步骤、误差表示方式等，在全国范围内严格执行。

各类量具和仪器，特别是电子仪器，由于所用元器件性能不可能保持长期稳定并且会逐渐老化，使用一段时间后其精确度会下降，因此必须进行定期检定。两次检定之间的时间间隔（称为检定周期）随仪器种类、性质和等级而有不同的规定。

习惯上，对于复制基本单位的基准器称为基准（如长度基准）；而对导出单位的基准器常称为标准（如频率标准、标准电池、标准电阻）。根据性质和用途不同，基准可分为以下几类：

（1）主基准。又称为原始基准（或原器）。它是一个国家直接按物理量单位定义复制的具有高水平的基准，可以作为国家基准。

（2）副基准。即次级基准。它的量值是根据主基准来确定的，平时用来代替主基准向下传递量值，使主基准不致因常用而降低精度。

（3）参考基准。这是进行量值传递的一种副基准。为了使用方便并对组成基准的不同方案进行比较，其原理、结构、外形常与国家基准不同。

（4）中介基准。由于某些基准互相难以进行直接对比，

故需要专门的基准作为中介。例如，标准电池可作为国家伏特基准与国际伏特基准进行对比，故标准电池就是伏特基准的中介基准。

(5) 工作基准。这种基准是用作直接向下属标准量具或仪器传递量值的基准。

有了基准和标准，就可以进行量值的复制、传递、检定、对比。

对比是指相同或相近精度的基准、标准或仪器，为了比较相互间量值的一致性而进行的核对工作。这项工作计量部门经常开展的一项重要业务活动。

第五节 常用电子仪器和测量方法的分类

一、常用电子仪器的分类

电子测量所用的仪器，品种繁多，为便于学习、管理、研制，常把它们进行分类。分类的方法和原则不同，仪器的组合也不同。常用的分类方法有：(1) 按功能分类；(2) 按频段分类；(3) 按精度和使用环境分类；(4) 按工作原理分类；(5) 按使用场合分类；(6) 其他分类。

1. 按功能分类

电子仪器在原则上分成专用仪器和通用仪器两大类。专用仪器是为特定目的专门设计制造的，它只适用于特定的测量对象和测试条件。例如，收音机生产中的专用集中信号发生器，它只输出几个特定的频率和预定的电平，用电缆分别送到几个测试点，满足生产线的需要。这就不需要用多个通用信号发生器。这种专用仪器投资少，使用也方便。但是，它不适用于一般实验室。通用仪器的通用性较强、灵活性也

好,故有较宽的使用范围。例如,电压表、示波器、信号源、频率计等。专用仪器的特点是结构简单、使用方便和投资少;通用仪器的特点是适用面广和灵活。

专用仪器可按特定的功能进行再分类,这里不作介绍。

通用电子测量仪器也可按功能来再分类,如表1-1所示。

表1-1 常用的通用电子仪器分类

序	类 别	常 用 品 种
1	电平测量仪器	电流表、电压表、毫伏表、微伏表、数字式电压表、矢量电压表、功率计、电压标准、标准电压表等等
2	电路参数测量仪器	RLC 量具、电桥、电容测试仪、电感测试仪、Q表、欧姆表、绝缘电阻测量仪、阻抗图示仪等等 电子管参数测试仪、晶体管参数测试仪、集成电路测试仪、测量线、驻波计等等
3	频率时间相位测量仪	谐振式波长计、外差式波长计、校准测试接收机、电子计数器、石英钟等等
4	相位测量仪	矢量表、相敏电压表、数字式相位计、移相器、延时器、群延迟测试仪等等
5	波形测量仪器	通用示波器、多踪示波器、取样示波器、超低频示波器、记忆示波器、调制度测试仪、频偏仪等等
6	频谱分析仪	谐波分析仪、失真仪、频谱分析仪等等
7	场强测量仪	测量用天线、测量接收机、场强测量仪等等
8	模拟电路特性测试仪	频率特性测试仪、相位特性测试仪、噪声系数测试仪等等
9	数字电路特性测试仪	逻辑状态分析仪、逻辑时间分析仪等等
10	信号发生器	低频信号发生器、高频信号发生器、超高频信号发生器、脉冲信号发生器、扫频信号发生器等等
11	电信测试仪	电平振荡器、电平表等等

通用电子仪器的研制趋势是向功能多、应用面广、灵活性好、体积小和高可靠性等方面发展。例如,属于网络分析

仪的矢量电压表，它是一种频带很宽（从1~1000兆赫），既可测定两路射频信号基波分量的幅度，又可测量相位差，而且灵敏度很高（最小满刻度为100微伏），因此使用面很广。

2. 按频段分类

频段不同，使用场合也不同。通常可分成：超低频类、低频类、高频类和超高频类仪器。每类中还可按功能再加以区分。

3. 按精度和使用环境分类

精度等级常与使用环境有关。按电子工业部部颁标准规定，电子测量仪器的使用环境分Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ组。

Ⅰ组：应在良好环境中使用，操作要细心，只允许受到轻微的振动。

Ⅱ组：可在一般环境中使用，允许受到一般的振动和冲击。

Ⅲ组：可在恶劣环境中使用，允许在频繁的搬动和运输中经受较大的振动和冲击。

各组的环境条件，如表1-2所示。

4. 按工作原理分类

按工作原理来分类，可分成模拟式电子仪器和数字式电子仪器两大类。

模拟式电子仪器，是指具有连续特性的模拟量与同类模拟量相比较的仪器。例如，电压表、电流表、信号发生器等。早期的电子仪器和现用的大部分仪器都属这一类。

数字式电子仪器，是指通过模/数转换器把具有连续性的被测量，变换成数字量，再显示其结果的仪器。例如，数字式电压表、数字式频率计等。

其他分类方法，就不再赘述。