

無線電電子測量

甘良才 倪煥明 陳昌灝 編譯

WLP

武汉大学出版社

内 容 提 要

本书全面系统地论述了无线电电子测量的基本原理及方法,穿插讲述了数字化与自动化的测量系统与技术。全书共十五章,第一章无线电电子测量概论,第二章测试信号源,第三章信号波形的显示和观察,第四章至第八章介绍信号的有关基本参数的测量,第九章随机过程统计参数的测量,第十章至第十三章介绍电路及元器件参数的测量,第十四章非电量测量,最后以测量自动化一章结束全书。书末附有附录及大量的参考文献。本书内容新颖,重点突出,深入浅出。既适于作为高等院校电类各专业的必修课教材及非电专业的选修课教材,亦可供高校教师及有关专业的科技人员参考。

前 言

无论是在科学研究还是在生产实践中，测量都占有特殊重要的地位。因为在科学研究中，测量不仅是验证理论是否正确的客观标准，而且它常常给出发现新问题，提出新理论的线索。在生产实践中，测量更是检定和确保产品质量的重要手段。无线电电子测量将电子科学技术应用于测量中，具有量程范围宽广，测量精确度高、速度快，易于实现自动化与智能化等突出优点，广泛应用于自然科学与生产实践的各个领域，它的最新水平代表科学技术的新成就。因此，不仅从事电子科学技术领域的科技工作者，而且其它科技工作者，都迫切需要掌握无线电电子测量知识。本书就是适应上述需求而编译的。它既可作为有关专业的教科书与参考书，也适用于科技工作者参考。

本书编译者甘良才、倪焕明、陈昌灏三同志多年来从事电子测量的教学与科学研究工作，他们在原著（参见编译者序）的基础上，根据从事教学与科研工作的经验，又撰写了天线测量、半导体器件测量、非电量测量等三章。原著的内容新颖，系统性强，理论与实际紧密联系。再加上这几章新编的内容，使内容更为全面。译文亦忠实流畅，保持了原著的风格。可以预期本书将受到广大读者欢迎，为祖国的四化建设发挥应有的作用。

· 武汉大学无线信息工程系 张肃文
一九八四年十月于武汉大学

编译者序

无线电电子测量是电子工程类各专业的一门理论性和实践性都很强的技术基础课。在现代科学技术迅速发展的过程中，无线电电子测量的应用极为广泛，它为无线电电子学、无线电通信、自动过程控制、控制论、遥测技术、数据处理和计算机科学、工程等的研究、实践、测试、产品质量管理和校准提供依据。同时，无线电电子测量技术和设备，在其它许多新的领域得到了有效的应用，尤其是非电量和过程及其转换成电信号的有关测量。例如整体过程控制和管理系统就包括了这种技术。

基于上述事实，我们译出苏联学者Г·米尔斯基(Г·МИРСКИЙ)所著《РАДИОЭЛЕКТРОННЫЕ ИЗМЕРЕНИЯ》一书。同时为了更适应我国广大读者的实际需要，我们又参阅了国内外新近出版的有关教材及文献、资料，撰写了天线测量、半导体器件的测量、非电量测量等三章。既充实了本书的内容，又不失原著的风格。最后，在章节上作了适当的调整编译成本书。

此书适合作为电类各专业的必修课教材以及非电专业学生的选修课教材。亦可供高校有关专业教师及从事有关专业的广大科技人员参考。

本书由甘良才同志担任主译，翻译了第一、三、六、十章，撰写了第十二、十四两章；倪焕明同志翻译了第四、九、十五章，撰写了第十三章；陈昌灏同志翻译了第二、五、七、八、十一章。全书文字由甘良才同志统一润色。

在编译过程中，始终得到了张肃文教授的耐心指导和热情支持，陆兆熊副教授校阅全部译文，张肃文教授审校了全书最后定

稿。在此一并表示衷心感谢。

在编译本书时，尽管我们力图以简洁的语言、深入浅出的方式来阐明基本理论和原理，并订正了原书中的一些错误，但限于编译者的水平，难免有不妥之处，敬请读者不吝赐教。

编 译 者

一九八四年十月

于武汉大学

目 录

前言	(I)
编译者序	(Ⅱ)
第一章 无线电电子测量概论	(1)
§ 1-1 现代无线电电子测量的重要性及任务	(1)
§ 1-2 无线电电子测量中的被测物理量	(4)
§ 1-3 基本定义和术语	(8)
§ 1-4 测量误差和测量仪器误差	(11)
§ 1-5 仪器的分类和命名	(33)
§ 1-6 测量仪器的基本特性	(34)
§ 1-7 仪器的选择	(36)
第二章 测试信号源	(39)
§ 2-1 概述	(39)
§ 2-2 音频(低频)模拟信号源	(42)
§ 2-3 超低频模拟测试信号源	(48)
§ 2-4 低频和超低频数字信号源	(52)
§ 2-5 高频和微波测试信号源	(59)
§ 2-6 脉冲和方波发生器	(65)
§ 2-7 噪声发生器	(74)
第三章 信号波形的显示和观察	(85)
§ 3-1 概述	(85)
§ 3-2 阴极射线示波器的一般方框图及工作原理	(85)
§ 3-3 时间基准的形式	(88)
§ 3-4 阴极射线示波器的基本单元	(95)
§ 3-5 时基的触发和同步	(112)
§ 3-6 双踪和双束示波器	(115)
§ 3-7 高速和取样示波器	(117)
§ 3-8 贮存示波器	(125)
§ 3-9 示波器的使用	(126)

第四章 时间间隔和相位移的测量	(137)
§ 4-1 时间间隔测量概述	(137)
§ 4-2 时基法	(138)
§ 4-3 时间间隔到数字的变换	(140)
§ 4-4 电子脉冲计数器	(148)
§ 4-5 相位移测量概述	(159)
§ 4-6 相位移到时间间隔的变换	(159)
§ 4-7 零点法	(169)
§ 4-8 频率范围的扩展	(171)
第五章 频率测量	(173)
§ 5-1 概述	(173)
§ 5-2 脉冲计数法测量频率	(174)
§ 5-3 频率比较(外差)法	(186)
§ 5-4 变换振荡器法	(188)
§ 5-5 谐振法	(192)
§ 5-6 电容充放电法	(201)
§ 5-7 用示波器进行频率比较	(202)
§ 5-8 频率标准	(206)
第六章 电压测量	(209)
§ 6-1 概述	(209)
§ 6-2 模拟(电表)指示式电子伏特计的框图和工作原理	(213)
§ 6-3 模拟(电表)指示式电子伏特计的基本单元	(215)
§ 6-4 脉冲伏特计的特性	(226)
§ 6-5 模拟(电表)指示式电子伏特计的误差源	(228)
§ 6-6 电压波形对伏特计指示的影响	(231)
§ 6-7 数字伏特计	(234)
§ 6-8 电压测量方法	(259)
第七章 功率测量	(267)
§ 7-1 概述	(267)
§ 7-2 音频和射频功率的测量方法	(268)
§ 7-3 测辐射热法	(270)

§ 7-4	量热法	(281)
§ 7-5	热电动势法	(286)
§ 7-6	机械式功率计	(289)
§ 7-7	可调阻抗功率计和霍尔效应功率计	(290)
§ 7-8	射频峰值脉冲功率的测量	(292)
§ 7-9	激光能量和功率的测量	(294)
第八章	信号频谱分析	(299)
§ 8-1	概述	(299)
§ 8-2	用滤波法进行频谱分析	(300)
§ 8-3	滤波器型频谱分析仪	(301)
§ 8-4	滤波器型频谱分析仪的基本特性	(312)
§ 8-5	色散线频谱分析仪	(316)
§ 8-6	谐波失真的测量	(319)
§ 8-7	振幅调制系数的测量	(322)
§ 8-8	频偏的测量	(323)
第九章	随机过程统计参数的测量	(327)
§ 9-1	概述	(327)
§ 9-2	统计参数的测量	(331)
§ 9-3	概率参数的估计	(333)
§ 9-4	关于测量统计误差的说明	(336)
§ 9-5	统计信号分析仪设计的一般原则	(337)
§ 9-6	平均值(均值)的测量	(341)
§ 9-7	平均功率和方差的测量	(348)
§ 9-8	自相关和互相关函数的测量	(351)
§ 9-9	频谱分析	(376)
§ 9-10	概率分布分析	(383)
第十章	集总参数电路的电路参数测量	(394)
§ 10-1	概述	(394)
§ 10-2	测量线性电路元件参数的谐振法	(394)
§ 10-3	用脉冲计数法测量线性电路的元件参数	(400)
§ 10-4	晶体管参数的测量	(405)

第十一章 微波线性电路和线参数的测量	(409)
§ 11-1 微波测试装置的部件.....	(409)
§ 11-2 用开槽测试线测量阻抗.....	(421)
§ 11-3 用反射计测量阻抗.....	(429)
第十二章 天线测量	(433)
§ 12-1 概述.....	(433)
§ 12-2 天线长度及谐振频率的测量.....	(434)
§ 12-3 天线阻抗和辐射功率的测量.....	(438)
§ 12-4 天线增益的测量.....	(441)
§ 12-5 天线驻波比 S (或天线输入阻抗 Z_a) 的测量.....	(447)
§ 12-6 方向图的测量.....	(457)
§ 12-7 天线场强的测量.....	(459)
第十三章 半导体器件的测量	(464)
§ 13-1 概述.....	(464)
§ 13-2 半导体二极管的测量.....	(465)
§ 13-3 半导体三极管的测量.....	(474)
§ 13-4 场效应管的测量.....	(484)
§ 13-5 双基极二极管的测量.....	(487)
§ 13-6 晶体管特性图示仪.....	(490)
§ 13-7 集成电路的测量.....	(493)
第十四章 非电量测量	(498)
§ 14-1 概述.....	(498)
§ 14-2 非电量测量系统的组成.....	(499)
§ 14-3 传感器的分类及其特性、参数.....	(500)
§ 14-4 常用传感器.....	(504)
§ 14-5 线性化的基本概念.....	(521)
§ 14-6 反馈测量系统.....	(523)
第十五章 测量自动化	(526)
§ 15-1 测量自动化的基本趋势.....	(526)
§ 15-2 由间接测量给出直接指示的计算自动化.....	(527)
§ 15-3 多功能仪表.....	(530)

§ 15-4 扫频技术和系统·····	(534)
§ 15-5 全自动测量的基本特点·····	(545)
附录 测量仪器误差的表示法·····	(560)
参考文献·····	(563)

第一章 无线电电子测量概论

§ 1-1 现代无线电电子测量的重要性及任务

纵观历史，科学技术的进步与测量能力的提高是紧密相关的。一种新仪器的出现可以使一门科学的现状，甚至使一门科学所涉及的领域发生巨大的变化，其实例是很多的。另一方面，一门新的科学和技术的出现，必然会促使人们去寻求一种新的测量方法和测量设备。因此，科学和测量之间的相互作用是很明显的。

近年来，用于科学规划和管理仪器生产的测试设备，以及用于自动化的测试设备等，已日益显示出其重要性。这是因为在很多情况下研究是基础性的，要完成大量的科学和工程实验，且产品复杂性日益增加。因此，科学技术各领域里所完成的测量次数正急剧增加。例如，在美国每天完成的测量总数竟达数十亿次之多。

研究和工业部门进行测量花费的资金占总资金支出的十分之一。在很多情况下，例如在无线电电子设备或空间装置的制造和运行中，费用超过总数的一半以上。这就是为什么测试设备方面所达到的先进程度已成为衡量一个国家科学技术能力的一个重要标志。

无线电电子学的分支——雷达、电视、无线电控制、无线电导航、无线电遥测、射电天文学等的进步都伴随着精密、可靠的测量方法和仪器设计的发展。现代的仪器通过人造地球卫星、月球和行星探测器、宇宙飞船和载有大量电子实验装置的太空实验站，对空间探测所取得的成就作出很大的贡献。宇宙飞船的设

计工作以及将其发射入轨道，飞行和轨道中对接的控制，涉及各种不同的测量，包括极高精密度的测量，这些仅能由无线电电子测试设备来完成。

无线电电子测量首先产生于无线电出现的早期。自那以后，测量的进步总是与电子学和无线电工程并驾齐驱的。随着新的频带、新的传输和接收技术以及新型无线电设备的付诸实用，必然需要寻求无线电测量的新方法和新仪器。目前，几乎没有一种工业不使用电气或无线电电子测量。

对于尖端科学和生产的各个领域的发展来说，测试设备和仪器制造保持高的发展速度及先进水平，并引导其它各个领域是很重要的。这就是为什么今天的无线电电子仪器研制已成为拥有很多工厂、设计室和研究机构的工业分支。

在无线电电子系统的各种设备的分析、生产、校准和使用中，测量的意义和作用显得尤为重要。除非使用适当的仪器，否则，复杂的无线电电子设备就不能校准。无线电电子设备的校准，主要归结为各种独立的组件以及作为一个整体的仪器的工作电压、电流和各种响应的测量，以保证它们满足各自的技术要求。只有充分大量地提供精密的测试设备，才能做到这一点。

在无线电电子设备的分析和综合中，测量占据相当部分的时间和精力。在很多情况下，设计公式导出近似的结果，而保证最佳性能所必需的工作条件只有靠试凑法才能确定。如果没有仪器测量，分析通常是不可相信的，因为无法对我们所注意的过程进行定量或定性的计算。

由于无线电和电子学涉及的物理量很多，而且数值的可能范围很宽（频率从几分之一赫到数百吉赫，功率从几分之一微瓦到数十兆瓦，电阻从几微欧姆到数吉欧姆等等）。因此，现代无线电电子仪器的类型和设计是极其复杂的。

在无线电电子系统的使用和维修中，测试仪器也是极其重要的。如果没有仪器，谁也不能监视系统的工作状态，并使其性能保

持在所要求的范围内，无法适当地进行故障检测或从事任何其它方面的维修工作。

无线电电子测量工作可分为如下几个方面：

(1) 实验室方法的开发。其目的是提高测量精度、扩大测量范围、扩展仪器能工作的频率范围以及在向科学技术新领域进军时，研究工作者感兴趣的那些量的测量所采用的技术和测试设备（随机过程的统计分析就是一个典型的例子）。

(2) 仪器和测试设备的开发。这些仪器和测试设备能以足够高的速度、精度和可靠性对有关无线电设备的生产、校准和运行进行测量和测试。在这方面有两种发展趋向，即

(a) 向直测、直读的仪表方向发展（通常具有自动复零特性），特别着重于数字仪器。

(b) 向数据记录仪器方向发展。

(3) 检测待测电路若干参数的自动化仪表及装置的开发。当电路的某一参数与规定的值相等时，仪表或装置就自动地转向下一个参数的检测。已制成的自动检测器，它除了能识别有故障的元器件或部件外，还能提出矫正的方法、步骤、使用的工具和修理所需要的时间。

(4) 设计的改进、仪表的体积和重量的减小及微电路的应用。

一个工程师或研究人员的工作包括大量的测量，这种测量能用各种不同的无线电电子仪表来完成。因此，为了使测量、测试或实验正确以及使用最适合于目前的对象、被测电路或器件的测试技术，他们必须具备各种测量方法和仪表的操作知识，注意影响测量精度的因素，正确选择现有工作的仪器以及适当地考虑到可能存在的误差来源。

实验者如果不深思熟虑地处理测量，清楚地知道被测的是什么电路，可以预期得到怎样的信号以及现有的测试设备所能完成的工作，就不可能得到一个正确的结果。为了充分地利用说明书对

仪表技术指标的详细说明，就需要技巧和知识。事实上，对仪器能很好使用的科技工作者可以获得比规定值高的精度，甚至能够使用不同用途的仪器进行测量（假如不能得到合适的仪器的话）。

测量常包括大量仪表组合的应用，这时，成功与否取决于这些组合与测量技术的正确选择以及直接与间接测量的适当结合。

原理性的预备知识很重要，不仅因为它们是作为测量的理论指导和正确应用仪表的前提，而且在许多现代无线电电子系统中也包括这些原理。例如，一些自动控制系统运用相位移测量，雷达和无线电遥测系统依靠时间间隔的测量，许多设备采用数字的方法来测量感兴趣的参数等等。

§ 1-2 无线电电子测量中的被测物理量

无线电电子测量是测量科学——计量学和仪器制造学的一部分。术语“无线电电子测量”有两个含义：

（1）对象：包括各种物理量、信号特性、电路参数、元件值以及及各种无线电电子设备的系统或特性*有关的工作状态的测量。

（2）方法：包括使用无线电电子测量技术和电子仪表。

因此，在无线电电子测量中的被测量是各种物理量、信号特性、电路参数、元件值和无线电或电子电路的工作状态。此处术语“电路”是广义的，意即用于对信号进行传输、接收以及其它处理的任何器件。

在信号测量之前，应把它分为特定的类别，通常有以下几种方法：第一，信号可按照变化方式分为确知信号与随机信号（用统计术语描述）；第二，可分为直流、交流（谐波看作特殊情况）和脉冲；第三，按照它们在信道中的作用分为载波、原（调

* 应该注意，由于无线电电子测量的方法和设备行之有效，故它们已应用于其它科学技术领域。在非电量测量时，必须将其转换成电量。

制)信号、已调制信号(含有原信号和载波),也可以是噪声(对已调制信号产生干扰)或信号和噪声的混合物。

必须清楚地了解信号本身是不能测量的。所能测量的是信号的特性。例如,要想确知电路的输出电压时,实际上是测量电压具体的值,如平均值、均方根值等。同样,测量脉冲也是如此,人们只能确定与此脉冲(或脉冲序列)有关的某些特定参数,如它的峰值、持续时间、相对于参考点或基准脉冲的时间位置等。

由此可见,在测量信号参数时,应以某些先验的知识为基础。举例说明如下:假设一个实验者有一个双输出端的盒子,要测量两个端子之间的电压。显然,除非实验者已具备有关他将要测量的信号的预备知识,否则,将不能着手工作。假设已知信号是确定的,那么实验者要知道该信号是直流、交流还是脉冲,因为这对选择伏特计来说是最基本的。他们必知须知道预期的数量级,以便挑选一个具有正确量程的伏特计。至于脉冲电压,他将希望知道是处理单一脉冲呢,还是周期性脉冲、脉冲的持续时间、占空因数等等。假如实验者缺乏这方面的信息,他将不得不进行一系列试探性测量以得到起码的近似数据。这也许包括使用示波器获得有关被测电压波形的概念,或者使用一个量程比“盒子”输出电压大的伏特计,以便量程能逐步缩小到正确值。当然,这种情况是不多见的。在大多数情况下,实验者具有丰富的先验知识,这种知识来源于所研究的信号源的一般特性和指定用途,或者来源于设计资料以及与相似的信号源的比较。

换句话说,通过先验知识(由正确的假设得到),实验者可以建立一个被测信号的模型,它可能是数学模型——严密的(形式的)、分析的、理想化的定义,或是简化了的物理模型。实际信号和用来模拟它的模型之间的差异,产生所谓的信号分类误差。

下例将较深入地研究这个问题。假设我们想测一个放大器输出电压的

均方根值，因为输入信号是正弦电压，所以事先假定输出信号为谐波电压。因此，我们使用一个能测量谐波电压的伏特计，它具有一个峰值检波器，且按照读出正弦电压的均方根值来校正刻度。事实上，这样的伏特计是测量正弦电压的峰值，但显示的是均方根值，因为在刻度上的所有数值代表峰值除以1.41。通过放大器后，信号的上部和下部被削平，也就是说，失真如此严重，以致它不再是正弦波信号（称为非线性失真）。此时，伏特计所读出的是非正弦电压的最大值除以1.41而不是正弦电压的均方根值。由于选择了一个错误的模型，结果与真值显著不同。

关于无线电电子电路，在测量电路参数或响应之前，首先也必须确定一个适当的模型。

最普通的电路是用作信号转换的电路，有放大器、变压器、滤波器、分压器、倍频器和分频器、微分和积分网络、接收机、测量仪器等。就它们的设计和完成的功能的多样性而言，它们在数学描述和分类上有许多共同之处。

把一个待研究的电路看成一个双口网络，其策动函数（或称激励）为 $X(t)$ ，响应为 $Y(t)$ ，它就能由联系电路激励和响应的运算算子来完全表征。

把算子记为 B ，那么算子方程为

$$Y(t) = B\{X(t)\} \quad (1-1)$$

它说明算子 B 对输入信号 $X(t)$ 的作用是产生输出信号 $Y(t)$ 。

算子是个广泛的概念，它包括已知的全部数学运算：与一个常数因子或函数相乘或相除、微分、积分、指数运算、解微分方程等等。例如，一个输出电压为输入电压 K 倍的放大器，可用一个常数因子 K 的算子来描述。在一定频率范围内，同一放大器的性能可借助于复数增益因数来表达。

通常，由算子描述的电路的分类与数学中对应的算子的分类极为相似。算子基本上分为线性算子和非线性算子。

线性齐次类算子包括具有如下特性的算子：

(1) 可加性：算子能够加于总和中的每一项，即

$$B_0\{X_1(t) + X_2(t)\} = B_0\{X_1(t)\} + B_0\{X_2(t)\} \quad (1-2)$$

(2) 齐次性: 常数因子 a 可提取出来, 即

$$B_0\{aX(t)\} = aB_0\{X(t)\} \quad (1-3)$$

把一个意义明确的函数 $\varphi(t)$ 加于一个线性齐次算子, 使它变为线性非齐次算子:

$$B\{X(t)\} = B_0\{X(t)\} + \varphi(t)$$

不具有可加性和齐次性的算子叫非线性算子。

相应地, 有线性和非线性两种电路(或系统)。在电路中, 基本数学运算由简单的单元, 如加、减、放大、微分、积分、非线性等来完成。一个复杂的电路通常是由这些单元的某种组合而成。

一个线性电路, 其组成元件的参数与流过它们的电流的大小无关。例如一个普通(线性)电阻器的电阻值、电容器的电容值、电感器的电感值, 不管流过包含这些元件的电路中的电流如何, 其值保持不变。线性电路还遵从迭加原理。非线性电路没有这些性质。非线性电路的电阻值随流过它的电流而变, 它的伏安特性是非线性的。非线性器件的例子有限幅器、检波器、乘法器、平方器和外差变频器等。

在建立电路模型时, 人们通常从描述元件特性的数学关系着手。然而, 这样的数学关系式只给出理想化的描述, 得到的模型仅与实际电路近似相符。除了过分理想化或不准确的描述外, 模型与原型电路(或系统)之间的差异, 可能是由于忽略了某些(通常是寄生的)关系以及噪声和干扰的影响等。

模型和电路之间如果不能准确地相符合, 将产生上述的分类误差。

当测量随机过程的统计特性时, 分类误差可能特别大。例如, 如果实验者参与一个实质上非平稳的随机过程, 并选择一种平稳和各态历经的(对于感兴趣的参数)模型, 以致能从足够长(与相关时间比较)的单一实现中形成一种探寻统计参量的估值, 这样的估值可能与真值差别很大。另一种典型的分类误差服从一种