

常用电子测量技术手册

CHANG YONG

DIAN ZI CE LIANG

JI SHU SHOU CE

CHANG YONG

DIAN ZI CE LIANG

JI SHU SHOU CE

责任编辑：王定一

常用电子测量技术手册

王谨之 许顺生 编

*

天津科学技术出版社出版

天津市赤峰道130号

天津新华印刷一厂印刷

新华书店天津发行所发行

*

开本787×1092毫米 1/16 印张23.5 字数567 000

1989年8月第1版

1989年8月第1次印刷

印数：1—5 000

ISBN 7-5308-0325-5/TP·12 定价：9.35元

内 容 简 介

本手册是一本既有系统理论，又有实践知识的电子测量技术工具书。

全书分三篇，共19章。第一篇为理论基础和专业基础标准，分五章，分别介绍了电子测量的基本概念、测量误差和测量结果处理方法。第二篇为常用电子测量仪器，分九章，提供了188种型号的常用仪器及其主要性能指标，并对其中44种典型仪器作了详细剖析，篇末介绍了仪器检修的一般方法。第三篇为基本测量方法，分五章，针对常用的基本测量原理和方法进行了详细分析，概念系统清晰，内容简明实用。书末，附有三个索引，可使读者迅速方便地查到所需的仪器、测量方法和专业标准。

为适应电子测量技术的新发展，选择本书内容时纳入了许多新理论、新技术、新仪器，并扼要地给出了计算机技术和微机的应用与示例，同时考虑到目前院校、企业所用测量技术和仪器的现状，保留了仍被沿用的测量技术和仪器设备。所以，这是一本很有实用价值的手册。

本手册主要供高校、中专校电子类专业师生、实验人员和有关工程技术人员在实际测量工作中作工具书使用，也可供有关科技人员进修电子测量技术时自学之用，对于新建职业技术学校等单位筹建实验室等工作，十分有益。

前 言

电子测量，既是电子科学技术的一个重要分支，又是一门内容繁多、应用广泛的实验科学。如欲良好地完成任何一项测量任务时，都必须充分掌握与项目有关的测量原理，合理选用必不可少的测量仪器，正确操作，取得数据，分析处理测量结果。所以，一般测量书籍常包括上述内容。

目前，已出版的电子测量书籍和教材的内容基本类同，但有两种不同的安排方法：一种以阐述测量原理为线索，插讲几种主要仪器的工作原理；另一种以剖析各类主要电子仪器为线索，同时讲述有关测量原理。两种编写方法各有侧重和特点。前者，适用面较广；后者，更适用于仪器制造专业。普遍认为，上述两类书籍均无法取代测量实践所需的工具书。正因为电子测量是一门实验科学，教学、科研或生产都必须进行测量；在测量现场为选择测量方案，保证测量顺利进行和提高测量精确度，常需迅速查阅常用电子仪器的构成原理、性能指标和基本测量方法，以及测量结果的处理方法。所以，提供一本既有基础理论、又有实践知识的电子测量技术手册所起的作用是不言而喻的。目前，这类手册极少。有鉴于此，我们将收集积累的资料编写成本书的初稿。

目前，电子测量技术和仪器正处于一个大变革时期。这一变革的重要标志，突出地表现在两个方面：（1）四化建设的发展，对外开放、新技术、新仪器的引进，打破了国内仪器界的长期封闭状态，使电子仪器产品迅速更新换代，性能指标时有刷新；为适应新形势，进而开拓国内外新市场，电子测量仪器的专业标准必须向国际标准靠拢，从而又带来了新的发展。（2）近年来，许多新理论、新技术涌现，并已引入到测量方法中，尤其是计算技术和微机的引入，出现了新的误差处理分析方法、智能仪器和自动测试系统。为适应这一变革，同时兼顾到各单位设备更新的实际情况，我们将初稿作了多次增删修改，然后才定稿。另外，值得一提的是：书中宣传和贯彻了国家新颁布的电子测量仪器专业基础标准。

全书分三篇，共十九章。

第一篇为理论基础和专业基础标准，分五章，有系统地介绍电子测量的基本概念、新的专业基础标准、误差分析和测量结果处理方法。第二篇为常用电子测量仪器，分九章，专门叙述各类常用仪器，共提供188种不同型号仪器的主要性能指标，并将其中44种典型仪器作了详细剖析。编写时从使用的角度出发，避免

了对电路的繁琐讨论,重点放在仪器组成原理,以便于建立完整概念。篇末介绍了仪器检修的一般方法。第三篇为基本测量方法,分五章,详细分析了各种常用的基本测量原理和方法,通过误差来源的讨论阐明各种方法的特点及其所能达到的精确度。本篇以基本方法为重点,力求讲清概念,内容简明实用。书末,附有索引,便于读者迅速查到所需的仪器、使用方法和专业基础标准。

本书承国营前锋无线电仪器厂王关锦高级工程师审阅,并提供了许多资料,提出了宝贵的改进意见。在编写过程中,我们得到了中国电子测量与仪器学会黄存礼高级工程师的勉励,并推荐出版;又得到国营南京无线电厂吴兆元工程师的热忱帮助。在此,谨表谢意。

由于本手册的内容涉及面很广,且受作者水平所限,书中一定会有错误或不足之处,恳请读者批评指正。

作 者

1986年于南京

目 录

第一篇 理论基础和专业基础标准

第一章 电子测量的基本概念	(1)	第二章 电子测量仪器的基本概念和专业基础标准	(13)
第一节 测量学的基本知识	(1)	第一节 电子测量仪器的分类	(13)
一、测量和电子测量	(1)	第二节 电子测量仪器的型号命名方法	(14)
二、电子测量的内容和特点	(1)	一、有关名词术语	(15)
三、量具和仪器	(3)	二、有关整件、附件、备件和软件的适用范围	(15)
四、测量装置和测量系统	(3)	三、型号组成和命名体系	(15)
五、变换过程	(3)	四、主机的型号命名方法	(16)
第二节 计量学的基本知识	(3)	五、组合单元的型号命名方法	(17)
一、计量的意义	(3)	六、整件、附件、备件和软件的型号命名方法	(17)
二、单位和单位制	(4)	七、成套仪器的型号命名方法	(19)
三、基准和标准	(4)	八、测试系统的型号命名方法	(19)
四、传递和检定	(5)	九、应用举例	(35)
五、对比	(5)	第三节 电子测量仪器的技术条件	(38)
第三节 电子测量的基本方法	(5)	一、误差	(39)
一、直接测量法	(5)	二、稳定性	(39)
二、间接测量法	(6)	三、分辨力	(39)
三、组合测量法	(6)	四、有效范围和动态范围	(39)
第四节 基本测量技术	(6)	五、测试速率	(39)
一、频域测量技术	(7)	六、可靠性	(39)
二、时域测量技术	(7)	第四节 电子测量仪器的可靠性	(40)
三、随机测量技术	(8)	一、可靠性的基本概念	(40)
第五节 电子测量的变换技术	(9)	二、可靠性的术语和定义	(41)
一、频率变换技术	(9)	三、失效规律	(42)
二、参量变换技术	(10)		
三、模/数和数/模变换技术	(12)		
四、能量变换技术	(12)		

四、提高仪器可靠性的途径	(43)
第五节 电子测量仪器的环境试验	(44)
一、环境试验总纲	(44)
二、温度试验	(45)
三、湿度试验	(48)
四、振动试验	(50)
五、冲击试验	(52)
六、运输试验	(54)
第六节 电子测量仪器的质量检验	(54)
规则	(54)
一、范围和目的	(55)
二、试验分类	(55)
三、定型试验	(55)
四、交收试验	(55)
五、例行试验	(55)
六、成品出厂	(56)
七、例行试验样机的处理	(56)
八、保修期限	(56)
第七节 电子测量仪器基本安全	(56)
要求	(56)
一、术语及定义	(57)
二、基本安全标志	(57)
三、基本安全试验	(57)
四、基本电气防护	(60)
五、对元件的基本要求	(60)
六、端子和电源线的基本要求	(60)
第八节 电子测量仪器的电源电压	(61)
与频率试验	(61)
一、规范	(61)
二、试验方法	(61)
第九节 电磁兼容与电磁干扰	(61)
一、电磁兼容和电磁干扰的一般概念	(61)
二、电磁干扰的测量	(62)
第三章 测量误差的基本概念	(64)
第一节 测量误差的主要来源	(64)
一、仪器误差	(64)
二、使用误差	(65)
三、人身误差	(65)
四、影响误差	(66)
五、方法误差	(66)

第二节 电子测量仪器误差的一般规定	(66)
一、误差规定的变革	(66)
二、电子测量仪器误差的一般规定	(66)
第三节 误差的性质与分类	(69)
一、系统误差	(69)
二、随机误差	(70)
三、粗大误差	(71)
第四节 精度的基本概念	(71)
第五节 随机误差与系统误差的处理关系	(71)
第六节 不确定度、置信限和置信概率	(72)
一、不确定度	(72)
二、置信限和置信概率	(72)

第四章 随机误差、系统误差和误差的传播 (73)

第一节 随机误差	(73)
一、一般概念	(73)
二、直方图和误差方程	(73)
三、标准偏差的计算	(78)
四、算术平均值的计算	(79)
五、精密度的其他表示法	(81)
六、粗大误差的剔除	(82)
第二节 系统误差	(84)
一、一般概念	(84)
二、恒定系差的检查和修正	(84)
三、变值系差的判断和修正	(85)
四、系统误差的改善	(89)
五、允许残留的系统误差	(91)
第三节 误差的传播	(92)
一、一般概念	(92)
二、测量误差的合成	(92)
三、测量误差的分配	(100)
四、最佳测量方案的选择	(102)

第五章 测量结果的处理 (104)

第一节 有效数字的处理	(104)
一、有效数字与欠准数字	(104)
二、欠准数字的含义	(104)

三、多余有效数字的删略原则	(104)	一、最大似然估计	(111)
四、有效数字位数的保留	(105)	二、最小二乘法原理	(111)
五、有效数字的运算原则	(105)	三、回归分析和经验公式的确定	(113)
第二节 等精度测量结果的数据处理		第五节 测量结果的图解处理	(116)
.....	(105)	一、作图的基本知识	(116)
一、步骤	(105)	二、曲线的拟合	(118)
二、实例	(107)	三、直线的修匀	(119)
第三节 非等精度测量和加权平均		第六节 插入法的应用	(122)
.....	(108)	一、比例法	(122)
一、测量结果的加权	(109)	二、图解法	(123)
二、加权平均	(109)	第七节 测量数据的微型计算机处理	
三、加权平均值的方差	(110)	(123)
第四节 最小二乘法和回归分析		一、一般步骤和程序流程图	(123)
.....	(111)	二、实例	(125)

第二篇 常用电子测量仪器

第六章 频率、时间和相位测量仪器		一、模拟式电压表的组成原理	(143)
.....	(127)	二、DA22型超高频毫伏表	(148)
第一节 概述	(127)	三、S401型视频毫伏表	(149)
第二节 常用仪器及其主要性能指标		第四节 数字式电压测量仪器	(150)
一览	(127)	一、数字式电压表的组成原理	(150)
第三节 频率和时间测量仪器	(127)	二、PZ8型直流数字电压表	(153)
一、计数式测频测时仪器的基本原理		三、DS26A型直流数字电压表	(155)
.....	(127)	第八章 示波器和逻辑分析仪	(158)
二、E312型电子计数式频率计	(132)	第一节 概述	(158)
第四节 变频器	(134)	第二节 常用仪器及其主要性能指标	
一、概述	(134)	一览	(159)
二、E3121型变频器	(134)	第三节 示波器的组成部分和工作	
第五节 相位测量仪器	(135)	特性	(159)
一、概述	(135)	一、基本组成部分	(159)
二、数字相位计的组成原理	(136)	二、工作特性	(160)
三、BX21A型低频数字相位计	(138)	第四节 通用示波器	(162)
四、BX23A型高频数字相位计	(139)	一、SBT-5型同步示波器	(162)
五、BX27型高频数字相位计	(139)	二、SR8型二踪单时基示波器	(164)
第七章 电压测量仪器	(141)	三、SR37型二踪双时基示波器	(166)
第一节 概述	(141)	第五节 取样示波器	(169)
第二节 常用仪器及其主要性能指标		一、基本概念	(169)
一览	(141)	二、SQ12A型取样示波器	(170)
第三节 模拟式电压测量仪器	(143)	第六节 记忆、存贮示波器	(173)
		一、基本概念	(173)

二、ST7型记忆示波器	(174)
三、SS1型数字存储示波器	(175)
第七节 逻辑分析仪	(176)
一、数字系统的信号特征及其对检测的要求	(176)
二、逻辑分析仪的组成原理	(177)
三、逻辑分析仪的特点	(177)
四、逻辑分析仪的分类	(178)
五、SL2型逻辑示波器	(178)
六、SL3型逻辑示波器	(180)

第九章 信号发生器

第一节 概述	(181)
第二节 常用信号发生器及其主要性能指标一览	(182)
第三节 低频信号发生器和函数发生器	(182)
一、低频信号发生器的组成原理	(182)
二、XD22型低频信号发生器	(186)
三、函数(波形)发生器的组成原理	(187)
四、S101型函数(波形)发生器	(188)
第四节 脉冲信号发生器	(189)
一、XC15型和XC20型脉冲信号发生器	(189)
二、XC13A型、XC14A型和XC19A型脉冲信号发生器	(190)
三、XD11型多用信号发生器	(191)
第五节 高频和超高频信号发生器	(192)
一、高频和超高频信号发生器的组成原理	(192)
二、XFG-7型高频信号发生器	(193)
三、XFC-6A型标准信号发生器	(194)
四、QF1050型标准信号发生器	(195)
五、XB28A型标准信号发生器	(199)
第六节 频率合成式信号发生器	(200)
一、概述	(200)
二、频率合成方法	(200)
三、几种常用的锁相环	(202)
四、频率合成器基本原理	(203)
五、PO12型频率合成器	(206)

第十章 信号分析测量仪器

第一节 概述	(208)
第二节 常用信号分析测量仪器及其主要性能指标一览	(208)
第三节 调制度分析仪	(209)
一、调制度分析仪的组成原理	(209)
二、BE1型调制度测量仪	(211)
三、BD5型调制度测量仪	(213)
第四节 失真度测量仪	(214)
一、失真度测量仪的组成原理	(214)
二、BS1型失真度测量仪	(215)
第五节 频谱分析仪	(216)
一、频谱分析仪的组成原理	(216)
二、BP1型频谱分析仪	(218)
三、BP29型频谱分析/跟踪扫频仪	(220)

第十一章 频率特性测试仪器

第一节 概述	(224)
第二节 常用仪器及其主要性能一览	(224)
第三节 频率特性测试仪器	(225)
一、光点扫描式频率特性测试仪的组成原理	(225)
二、光栅增辉式频率特性测试仪的组成原理	(231)
三、BT3型频率特性测试仪	(234)
四、BT14型低频频率特性图示仪	(235)
五、BT15型扫频图示仪	(239)
第四节 矢量电压表	(237)
一、概述	(237)
二、DT1型矢量电压表	(238)
第五节 微波网络分析仪	(240)
一、概述	(240)
二、BF101型频响测试仪	(240)
三、HW1型微波网络分析仪	(241)

第十二章 元件参数测量仪器

第一节 概述	(246)
第二节 常用仪器及其主要性能指标一览	(246)

第三节 品质因数测量仪	(247)
一、组成原理	(247)
二、LJ2861型Q值测量仪	(250)
第四节 电桥	(251)
一、交流电桥概述	(251)
二、低频电桥的组成原理	(251)
三、CD5型高频阻抗电桥	(252)
四、高频电桥的组成原理	(254)
五、CD4型超高频导纳电桥	(257)
第五节 数字式元件参数测量仪的 组成原理	(258)
一、数字式欧姆计和交流电阻测量仪	(258)
二、数字式电感测量仪	(260)
三、数字式电容测量仪	(262)
四、数字式Q表	(263)
第十三章 半导体器件参数测试仪器	(265)
第一节 概述	(265)

第二节 常用仪器及其主要性能一览	(265)
第三节 半导体器件特性的图示原理	(266)
一、输出特性的图示原理	(266)
二、输入特性的图示原理	(267)
三、脉冲法图示原理	(268)
第四节 半导体器件特性图示仪	(269)
一、JT-1型晶体管特性图示仪	(269)
二、QT-2型晶体管特性图示仪	(271)
第十四章 电子测量仪器检修的一般 方法	(275)
一、入检	(275)
二、查找故障	(275)
三、故障处理	(279)
四、校验	(280)
五、出检	(280)
六、总结	(280)

第三篇 基本测量方法

第十五章 频率和时间测量方法	(281)
第一节 概述	(281)
第二节 无源测频法	(282)
一、谐振法	(282)
二、电桥法	(283)
第三节 有源比较测频法	(284)
一、拍频法	(284)
二、差频法	(285)
第四节 计数法测频和测时	(288)
一、直读式频率计的测频原理	(288)
二、通用计数器的测频、测时原理	(289)
第十六章 电压测量方法	(292)
第一节 概述	(292)
一、基本要求和特点	(292)
二、测量方法	(293)
第二节 检波法	(294)
一、常用检波法概述	(294)

二、同步检波法和锁相同步检波法	(296)
第三节 外差-检波法	(297)
第四节 热偶法和测热电阻法	(298)
一、热偶法电压测量原理	(298)
二、测热电阻法电压测量原理	(300)
第五节 取样法	(302)
一、差频锁相式取样法	(302)
二、随机取样法	(303)
第六节 数字化测量方法	(304)
一、概述	(304)
二、A/D转换的基本原理和直流电压的 测量	(305)
三、AC/DO变换的基本原理和交流电 压的测量	(309)
四、I/V变换的基本原理和直流电流的 测量	(311)
五、 Ω/V 变换的基本原理和直流电 阻的测量	(312)



第十七章 相位差测量方法	(314)	二、频谱分析测量方法	(332)
第一节 概述	(314)	第十九章 自动测试技术	(338)
第二节 直接比较法	(315)	第一节 概述	(338)
第三节 检相法	(316)	第二节 IEEE-488 标准接口、母线系统	(340)
一、检相法	(316)	一、接口系统概述	(340)
二、环形调制器法	(317)	二、母线系统	(342)
三、脉冲变换法	(317)	三、消息和编码	(343)
四、时间间隔法	(319)	四、三线挂钩过程	(343)
五、差分鉴相法	(320)	五、接口功能	(344)
第四节 频率变换法	(320)	六、器件内部接口功能的配置	(345)
第五节 数字化测量方法	(321)	第三节 测量仪器的程控	(346)
第十八章 图示测量方法	(322)	第四节 智能仪器简介	(348)
第一节 概述	(322)	一、基本概念和特点	(348)
第二节 时域响应的图示测量原理	(322)	二、组成原理	(349)
一、电压的测量方法	(322)	三、设计简介	(349)
二、时间的测量方法	(323)	第五节 自动测试系统的组建	(350)
三、频率的测量方法	(324)	一、方案论证	(350)
四、相位差的测量方法	(327)	二、选用仪器	(350)
五、调幅系数的测量方法	(328)	三、计算机的选择	(350)
六、调频指数和最大频偏的测量方法	(329)	四、系统硬设备的装联	(350)
第三节 扫频图示法测量原理	(331)	五、编制测试软件	(350)
一、系统幅一频特性的图示测量方法	(331)	六、编制文件	(351)
附录 I 常用电子测量仪器索引	(354)	第六节 自动测试系统示例	(351)
附录 II 测量原理和方法索引	(359)		
附录 III 电子测量仪器专业基础标准索引	(362)		
主要参考资料	(363)		

第一篇 理论基础和专业基础标准

实践证明，如要良好地完成预定的测量任务，就必须充分掌握电子测量的基本理论、常用测量仪器的工作原理和基本的测量方法三个重要环节。所以，本手册将有关内容归纳成三篇，分十九章逐次有系统地加以叙述。

本篇共分五章。除叙述电子测量的各种基本概念和电子测量仪器概貌外，还讲述了现行专业基础标准、测量误差理论基础和测量结果的处理方法。

第一章 电子测量的基本概念

第一节 测量学的基本知识

一、测量和电子测量

测量，是指人们借助于一定的工具和设备，利用实验方法对客观事物进行测定，并取得数据，通过数据对被测事物得到定量的认识或加深理解的过程。

从广义说，凡是利用电子学方法和电子技术所进行的测量都是电子测量。

二、电子测量的内容和特点

1. 电子测量的内容

电子测量的内容范围很广，可分为两大类：第一类是属于电子学本身的电参量测量；第二类是运用电子手段来测量其他非电参量。本书只叙述第一类测量。电子测量涉及到在极宽的电磁频谱上对电量和磁量的测量。但就集中参数电路而言，常需测量的电参量可分为四大类型：

- (1) 电能；
- (2) 电路参数；
- (3) 电信号波形特征；
- (4) 电子设备性能，如表1-1所列。

随着科学技术的发展，特别是应用电子技术的广泛采用，使非电量的电子测量技术得到迅速发展。在这些测量过程中，先将各种非电的物理、化学、机械等信息量通过电子敏感元件（传感器）转换成电信号量，然后使用电子测量技术测出相应的电参量，最后再将电参量折合成非电量数据。显然，电子敏感元件的选用和非电量与电量之间的互换关系是测量的关键。按照信息量转换方式可测量的非电量如表1-2所列。用电子测量仪器来测量非电量的优

表1-1 集中参数电路常测的参数

序号	类型	常测参数
1	电能的量	电流、电压、功率、电场强度
2	电路参数的量	电阻、电感、电容、阻抗、品质因数、损耗角正切
3	电信号波形特征的量	频率、周期、相位、失真度、调幅度、频偏
4	电子设备性能的量	增益、衰减、灵敏度、通频带宽度、信噪比

点是：高精度，高灵敏度，极快的响应速度，使用方便，以及易于实现自动化测量。这就使得电子测量仪器的使用范围大大扩展，几乎渗透到各个领域，而且品种繁多，不胜枚举。然而，不论在电量或非电量的测量中，具有重要意义的是频率、电压、阻抗、相位等基本参量。它们往往是其他电参量测量的基础。

表1-2 可用电子测量技术测定的非电量及其对照关系

用敏感元件直接变换后可测的非电量	用敏感元件间接变换（二次敏感）后可测的非电量
热（热量、温度、比热）	位置、温度、浓度、损伤、真空度、风速、流速、流量、振动
光（光通、照度、紫外线、红外线、光色）	变位、旋转角、位置、尺寸、转矩、速度、风向、成分、水分、粘度、混浊度、声压、损伤、缺陷、温度、流量
磁（磁通、磁场）	变位、旋转角、位置、尺寸、转矩、速度、加速度、振动、流量、压力、重量、温度、成分、声压、损伤、缺陷
电（电容、电流、电场）	变位、旋转角、转矩、速度、加速度、振动、流量、压力、重量、温度、声压、色调
应变（形变、位移）	应力、转矩、速度、加速度、振动、流量、液面、真空度、表面光洁度、声压、
超声（声压、噪声）	变位、尺寸、流量、流速、粘度、温度、损伤、缺陷、应力、液面、料位、振动、加速度、角速度
气氛（种类、压力）	防爆、防水、检漏、成分、比重、纯度、浓度、湿度、pH值
放射线（射线或辐照剂量）	变位、位置、尺寸、成分、水分、浓度、纯度、密度、粘度、缺陷、检漏、真空度、时间

2. 电子测量的特点

电子测量的主要特点有：

（1）频率范围很宽 频率范围可从直流到110GHz，甚至进入可见光范围（约 88×10^{12} Hz）。

（2）量程很广 电子测量仪器的量程很广。以功率为例，可从 10^{-11} 瓦到250千瓦；又如，数字频率计的测量范围可从0.00001Hz到60GHz。

（3）精确度很高 电子测量仪器的精确度通常都很高。以时间频率测量为例，测量精确度可优于 10^{-13} 量级。

（4）可进行遥测和数据处理 电子测量可通过各种传感器实现遥控、遥测，并与数据处理系统相结合，取得可靠的结果。

(5) 易于实现测量自动化 本世纪70年代开始出现了电子计算机与电子测量仪器相结合的自动测试系统。不久,由于微型计算机、微处理器、IEEE-488标准接口的出现,使电子测量技术自动化、智能化发展到了一个全新的水平。有了它们,绝大部分调整与测量工作无需人工干预,测试结果的误差修正、数据处理和输出全由计算机来完成。这些功能在任何电子学方法所不能比拟的。

三、量具和仪器

测量是一个比较过程。在各种比较过程中,必须有一个体现测量单位的已知量,人们将体现测量单位的器具称为量具。

大多数量具在参与比较(测量)时,都需要借助于比较设备才能完成这一过程。例如,标准电阻就是一种量具,用它来测量一个未知电阻,需要借助于电桥;又如,用标准电池(量具)来测量某一直流电压时,就要使用电位差计。

直接用量具往往比较麻烦。有的测量无法作成实物量具,例如频率、非线性失真等。所以,工程上很少直接用量具,而是将量具的量值转移到仪器上,用仪器来代替量具。测量仪器是泛指一切参与比较的设备。

四、测量装置和测量系统

在测量实践中,为完成某项测量任务往往需要多台测量仪器,并与其他辅助设备组成一个整体,这个整体叫做测量装置。例如,测试收音机的测量装置就包括信号发生器、天线、电平表、示波器、稳压电源等。

为实现对多种参量的综合测量,还可以把若干个不同种类、用途的测量仪器及有关辅助设备组成一个完整的测量系统。例如,微波测量系统、网络测量系统,以及包括微型计算机在内的自动测试系统。

五、变换过程

现代电子测量技术中,变换技术使用愈来愈多。在模拟式仪器中,将电压、电流变换成指针式电表指针的旋转角或位移距离,就是常见的变换技术。将电压、电容、电感、相位等参量变换成频率参量来进行测量,也是变换测量的常见形式。又如,在频率很高时采用取样技术,使其以低频方式将高频信号复现出来,可以巧妙地解决某些高频测量仪器在技术和工艺上的困难。变换技术将在本章第五节中介绍。

第二节 计量学的基本知识

一、计量的意义

在测量过程中所用的单位已知量必须有严格的科学理论为依据,并加以定义,否则就无法将同一物理量的千千万万只量具和仪器所表示的测量单位加以统一。

广义地说,计量学是一门关于测量的基础科学。它是专门研究如何保证量值统一和准确所必须的方法、技术、专门设备和政策的科学。

计量学研究的内容有:

- (1) 关于测量与计量的理论;
- (2) 关于测量与计量的方法、技术和计量用的专门量具和仪器;
- (3) 关于各种量值单位的定义,以及各单位之间的关系;

(4) 关于量值的传递和保证量值统一而必须采取的措施、规程和法制等。

计量学具有一定的法律性和权威性。

二、单位和单位制

根据定义而令系数为1的量称为单位。例如，安培是电流的单位。单位是表征测量结果的重要组成部分，又是对两个同类量值进行比较的基础。

基本单位是指彼此无关和分别加以确定的物理量单位。

导出单位是指由基本单位通过定义、定律或其它函数关系推导、派生出来的各种导出量值。

由各基本单位和导出单位便可组成各种不同的单位制。例如，静电单位（CGSM制）、实用单位制（MKSA制）等。因单位制类型很多，给科学技术的应用带来许多麻烦和混乱。于是，在1948年第九届国际计量大会上通过一项决议，建议国际上采用一种实用单位为基础而规定的统一单位制。1960年第十一届国际计量大会上正式通过了这种单位制，命名为国际单位制，代号为SI。从1971年第十四届国际计量大会后，国际单位制的基本单位共有七个：

(1) 长度单位为米。1米等于光在真空中，在 $1/299\,792\,458$ 秒的时间间隔内运行距离的长度。

(2) 质量单位为千克（公斤）。1千克等于国际千克原器的质量。

(3) 时间单位为秒。1秒等于 Cs^{133} 原子基态的两个超精细能级之间跃迁所对应的辐射的 $919\,263\,177\,0$ 个周期的持续时间。

(4) 电流单位为安培。若在真空中两条相距1米的两无限长而其圆截面小得可忽略的平行直导线内维持1安培的恒定电流，则此两导线之间产生的作用力在每米长度上等于 2×10^{-7} 牛顿。

(5) 热力学温度单位为开尔文。1开尔文等于水三相点热力学温度的 $1/273.16$ 。

(6) 物质的量的单位为摩尔。其定义是：1摩尔的任务物质所包括的结构粒子数与 0.012 千克 C^{12} 的原子数相等。在使用摩尔时，结构粒子应予指明，它可以是原子、分子、离子、电子及其他粒子，或者是这些粒子的特定组合。

(7) 光强度单位为坎德拉。1坎德拉表示一光源在给定方向上的发光强度。该光源发出频率为 540×10^{12} Hz的单色辐射，且在此方向上的辐射强度为 $1/683$ W/sr（瓦特每球面度）。

国际单位制吸取了其他单位制的优点，包括力学、电磁学、热力学、光学等各种物理量，它是目前最完善的单位制。它已被国际上几十个国家所采用。我国于1977年初参加国际计量委员会，其常设机构为国际计量局（BIPM），同年五月作出了“逐步采用国际单位制”的正式决定。1984年2月我国正式颁布了以国际单位为基础构成的法定计量单位。

国际单位制中，常用的力学和电学量的单位列于表1-3。

三、基准和标准

基准是专门用以规定、保持和复现某种物理量计量单位的特殊量具或仪器。它的精确度和稳定性最高。根据其性质和用途不同又分为：

(1) 主基准 主基准又称原始基准或原器。它是指一个国家直接按物理量单位的定义复现的、具有最高水平的基准。主基准可作为国家基准。

(2) 副基准 副基准又称为次级基准，它的量值根据主基准来确定。用以代替主基准

表1-3 国际单位制中常用的力学和电学量

量	名称	代号	
		中文	国际
长度	米	米	m
质量	千克(公斤)	千克(公斤)	kg
时间	秒	秒	s
力	牛[顿]	牛	N
能、功、热量	焦[耳]	焦	J
功率、辐射通量	瓦[特]	瓦	W
电流	安[培]	安	A
电流密度	安培每平方米	安/米 ²	A/m ²
电量、电荷	库[仑]	库	C
电位、电压、电动势	伏[特]	伏	V
电场强度	伏特每米	伏/米	V/m
磁通(量)	韦[伯]	韦	Wb
磁感应(强度)	特[斯拉]	特	T
磁场强度	安培每米	安/米	A/m
频率	赫[兹]	赫	Hz
电阻	欧[姆]	欧	Ω
电导	西[门子]	西	S
电容	法[拉]	法	F
电感	亨[利]	亨	H

向下传递量值。

(3) 作证基准 作证基准是用以检验国家基准的完善性,并在国家基准一旦损坏或失效时代替国家基准的一种副基准。通过定期的国际对比,可判明国家基准与作证基准之间的量值变化情况,并能对其系统误差进行修正,以便恢复其原有值。

(4) 参考基准 参考基准是进行量值传递的一种副基准。为了使用方便及对组成基准的不同方案进行比较,其原理、结构、外形往往与国家基准不同。

(5) 中介基准 中介基准是一种为解决某些基准互相间难以直接对比而建立的中介。例如,通过标准电池来实现国家伏特基准与国际伏特基准之间的对比,这时标准电池就是中介基准。

(6) 工作基准 工作基准专门用于向下属标准量具或仪器进行量值传递。

通常,将主基准划为一级基准,各种用途的副基准划为二级基准,各种工作基准划分三级基准。习惯上,将复现基本单位的基准器都称为基准,例如长度基准质量、基准等;而将若干导出单位的基准器叫做标准,例如原子频率标准、标准线圈等。

四、传递和检定

对同一量值来说,保证各类量具或仪器的量值的互相统一是十分重要的,这就需要通过各级基准、标准以及相应的辅助设备把一个量值单位从国家基准传递给日常使用的千万只量具和仪器。为此,国家计量部门从法定形式制订出一套检定规程。其中包括检定方法、所用设备,对标准(或基准)及受检量具或仪器精度比的要求、操作步骤以及对受检量具或仪器给出误差的方式等。

上述检定规程的执行称为检定。各类量具和仪器,特别是电子测量仪器,由于使用的元器件老化或不稳定,常在一段时间后精度下降,故应定期进行检定。定期检定又称为周期检定。周期长短随具体仪器种类而定。

五、对比

对比是指相同(或相近)精度的基准、标准或测量仪器为比较互相之间量值的一致性而进行的比较工作。这是计量部门经常开展的重要业务活动。

第三节 电子测量的基本方法

电子测量的基本方法有:直接测量法、间接测量法和组合测量法等三类。

一、直接测量法

用电子测量仪器对待测的未知量进行直接获取量值的测量称为直接测量。有的电子测量仪器是直读式的，测量结果可直接读出；有的电子测量仪器是比较式的，例如Q表、电位差计，虽不能直接从仪器上读到结果，但因比较式测量仪器直接参与了测量，也属于直接测量。

二、间接测量法

先对与待测未知量有确切函数关系的量值进行直接测量，再通过函数关系换算出未知量，这种方法称为间接测量法。例如，根据直接测量电流 I 和电阻 R ，再用间接方法($P=I^2R$)来测量电阻器的耗散功率。

三、组合测量法

如果测量过程中，既使用直接测量法，又使用间接测量法，两种方法所得数据经综合后才获得待测的未知量，这种方法称为组合测量法。根据不同温度下直接测量电阻的数据来确定电阻器的温度系数就是一例。

第四节 基本测量技术

电子测量技术中，尽管待测的参量种类很多，但各种待测参量必定要在一定的电路或网络中将其特征表现出来。有的表现成时间的函数，有的表现成频率的函数。所以，可将参量的测量技术划分为时域测量技术和频域测量技术两大类。另外，还有一类参量是服从统计规律的随机信号，如各类噪声。随着科学技术的迅速发展，对噪声的研究受到极大重视，已发展出另一大类的测量方法。这就是随机测量技术。

不论采用哪种基本测量技术，测量过程都必须在一定的信号作用下才能进行。这个信号称为测试信号。有时测试信号是为了测量而从被测电路外面输入的；有时它就是要被测对象（如测量电压、电流、频率）。在频域测量中最典型的测试信号是正弦波信号，故常把频域测量技术称为正弦波测试技术；在时域测量中，因常常研究瞬态现象，经常用脉冲波（或方波）作为测试信号，故常把时域测量技术称为脉冲波测试技术；在随机测量技术中，常用噪声作为随机信号源进行测量，故常把随机测量技术称为噪声测试技术。

在研究或进行具体测量的过程中，都必须联系到各种形式的电路（或网络），即被测电路或测量电路。被测电路可分为线性和非线性电路两大类。习惯上，电路被称为系统，所以也可称为线性系统和非线性系统两大类。

过去线性系统用得比较多。近年来，由于数字电路、数字仪器和电子计算机技术的发展，非线性系统也应用得很广泛。但在很大程度上，电子测量仪器仍然依靠线性电路来完成测量。很多非线性系统可在一定条件下作为线性系统来处理。

线性系统在正弦波的作用下，其输出也是正弦波。如果输入信号 $f(t)$ 为任意的周期性波形，则可按傅氏级数将它展成一系列不同频率及相位关系的正弦波的线性组合，其中包括一个基波和不同幅度与相位的各次谐波。对其中每一个正弦分量，系统都有其自己的传递函数 $K(\omega)$ 倍表征正弦响应，而总的输出则是各输出正弦分量的线性组合。分析和比较系统在正弦信号激励下的响应，便可对系统的各种电气特性作出评价。这是正弦波测试技术应用十分广泛的重要原因。

然而，正弦波测试所得结果有时不能直接反映系统的某些特征。例如，用测量幅频特性