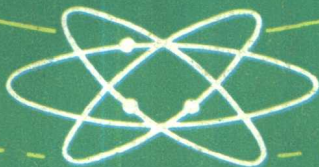


—高等学校教材—

电子仪器

成都电讯工程学院 陈杰美 古天祥 编



国防工业出版社

电 子 仪 器

成都电讯工程学院 陈杰美 古天祥 编

国防工业出版社

内 容 简 介

本书主要讲述通用电子测量仪器的基本原理,同时,结合电子测量仪器,较系统地阐述了锁相、频率合成、取样及模-数转换等方面的基本知识。对仪器中的重要电路部件有较详细的讨论,并介绍了设计方法。本书还介绍了电子仪器的新技术和新电路,如仪器的程控和智能化等。

全书分四章。第一章介绍信号发生器;第二章介绍电子示波器;第三章介绍频谱分析仪;第四章介绍数字仪器。

本书可作为高等学校工科电子类测量和仪器专业的试用教材,也可供从事电子测量仪器工作的工程技术人员参考。

电 子 仪 器

成都电讯工程学院 陈杰美 古天祥 编

*

国防工业出版社出版

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

国防工业出版社印刷厂印装

*

787×1092¹/₁₆ 印张 31 723千字

1986年12月第一版 1986年12月第一次印刷 印数: 0,001—4,700册

统一书号: 15034·3173 定价: 4.45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工科电子类专业课教材的编审、出版的组织工作。从一九七七年底到一九八二年初，由于各有关院校，特别是参与编审工作的广大教师的努力和有关出版社的紧密配合，共编审出版了教材 159 种。

为了使工科电子类专业教材能更好地适应社会主义现代化建设培养人才的需要，反映国内外电子科学技术水平，达到“打好基础，精选内容，逐步更新，利于教学”的要求，在总结第一轮教材编审出版工作经验的基础上，电子工业部于一九八二年先后成立了高等学校《无线电技术与信息系统》、《电磁场与微波技术》、《电子材料与固体器件》、《电子物理与器件》、《电子机械》、《计算机与自动控制》，中等专业学校《电子类专业》、《电子机械类专业》共八个教材编审委员会，作为教材工作方面的一个经常性的业务指导机构，并制定了一九八二～一九八五年教材编审出版规划，列入规划的教材、教学参考书、实验指导书等共 217 种选题。在努力提高教材质量，适当增加教材品种的思想指导下，这一批教材的编审工作由编审委员会直接组织进行。

这一批教材的书稿，主要是从通过教学实践、师生反映较好的讲义中评选择优和从第一轮较好的教材中修编产生出来的。广大编审者、各编审委员会和有关出版社都为保证和提高教材质量作出了努力。

这一批教材，分别由电子工业出版社、国防工业出版社、上海科学技术出版社、西北电讯工程学院出版社、湖南科学技术出版社、江苏科学技术出版社、黑龙江科学技术出版社和天津科学技术出版社承担出版工作。

限于水平和经验，这一批教材的编审出版工作肯定还会有许多缺点和不足之处，希望使用教材的单位、广大教师和同学积极提出批评建议，共同为提高工科电子类专业教材的质量而努力。

电子工业部教材办公室

前 言

本书系由高校工科电子类专业无线电技术与信息系统教材编委会仪表与测量编审小组评选审定,并推荐出版,作为高等学校工科电子类测量和仪器专业统编教材。

本书由成都电讯工程学院陈杰美同志担任主编,成都电讯工程学院张世箕教授担任主审,编审者均依据仪表与测量编审小组审定的编写大纲进行编写和审阅的。

本书是按讲授80学时编写的。实际授课学时可根据各校具体情况酌情增减。书中主要讲述通用电子测量仪器的基本原理。其目的是使读者掌握仪器整机和主要电路部件的电气设计方法,了解电子测量仪器的发展情况,巩固和加深基础课中所学的有关知识,并帮助读者用这些知识来解决电子测量仪器中的实际问题。书中内容是以仪器为线索来安排的,使读者建立起仪器的概念。同时,系统地阐述了锁相、频率合成、取样、同步、模-数转换等方面的基本知识。

本书主要讨论信号发生器、信号波形与频谱分析仪器、数字式测量仪器等三类仪器。在信号发生器中,着重分析合成信号发生器。在信号分析仪器中,着重分析电子示波器。在数字式测量仪器中,主要分析电子计数器和数字电压表。这几类仪器是最通用的基本测试仪器,其他仪器大都可以由它们变换或组合而成。此外,这几种仪器在电路上各具有代表性,便于读者了解各种电路在仪器中的应用情况。

本书每章皆附有思考题、习题和主要参考资料,以便复习和查阅。

本课程应在全部基础课程及《电子测量》课完成后进行。为使理论联系实际,使用本书时,应配合一定数量的示教和实验。实验内容建议包括:取样式锁相环、示波器时基和数字面板表等。在教学过程中,如能结合一些典型仪器实例分析或做课程作业,可更好地帮助读者建立整机概念。考虑到电子仪器日新月异的发展及本书的篇幅,书末附有这方面的资料。

本书的第一、二章由陈杰美同志编写,第三、四章由古天祥同志编写。在编写过程中,成都电讯工程学院103教研室的同志提供了许多宝贵资料和意见,并在抄稿、绘图工作中给予大力帮助,在此一并表示衷心感谢。由于编者水平有限,书中难免还存在一些缺点和错误,殷切希望广大读者批评指正。

编 者

目 录

绪论	1
一、电子测量仪器的功用和特点	1
二、电子测量仪器的分类	3
三、电子测量仪器的技术条件	5
四、电子测量仪器中的测量过程及基本组成原理	7
五、电子测量仪器的数字化、自动化和智能化	8
第一章 信号发生器	14
§1-1 信号发生器引论	14
一、信号发生器的功用和分类	14
二、正弦信号发生器的工作特性	16
三、低频信号发生器	18
四、高频信号发生器	20
五、函数发生器	37
六、脉冲信号发生器	39
§1-2 合成信号发生器的基本原理	40
一、概述	40
二、直接合成法	42
三、间接合成法	50
四、数字合成法	58
§1-3 合成信号发生器中的寄生信号和噪声	61
一、寄生信号对正弦信号稳定性的影响	61
二、噪声对正弦信号稳定性的影响	65
三、放大器的相位杂散和相位噪声	69
四、振荡器的相位杂散和相位噪声	80
五、倍频器的相位杂散和相位噪声	83
六、分频器的相位杂散和相位噪声	84
七、混频器的杂散和噪声	89
八、鉴相器的杂散和噪声	92
九、锁相环的杂散和噪声	93
§1-4 合成信号发生器的设计	101
一、各类频率合成法的比较	101
二、原理方框图的确定	104
§1-5 合成信号发生器中的频率控制	113
一、频率的手动控制	113
二、频率的程序控制	117
三、信号发生器中的扫频	122
§1-6 合成信号发生器的电平控制	128
一、信号发生器电平的连续控制	128
二、信号发生器电平的步进控制	129
三、信号发生器电平的扫描	130
本章思考题和习题	130
第二章 电子示波器	133
§2-1 通用示波器的概述	133

一、示波器的分类	133
二、示波器的基本工作原理	134
三、示波器的主要工作特性	136
四、示波管电路	141
§2-2 示波器的Y信道	144
一、Y信道的方框图	144
二、Y信道的输入电路	147
三、Y信道的前置放大器	155
四、Y信道的延迟级	161
五、Y信道的输出放大器	169
六、示波器的多踪显示	174
* 七、通用示波器Y信道的设计	181
§2-3 示波器的X信道	189
一、X信道的方框图	189
二、扫描发生器环	191
三、触发脉冲发生器	207
四、双扫描系统的功用与原理	215
* 五、通用示波器X信道的设计	217
§2-4 存储示波器	224
一、存储示波器的工作原理	224
二、存储示波器的工作特点	226
§2-5 取样示波器	228
一、取样示波器的原理	228
二、取样定理及其应用	230
三、取样门的频率特性和过渡特性	235
四、取样示波器的取样电路	241
五、取样示波器的X信道	256
六、随机取样示波器的原理	265
本章思考题和习题	266
第三章 频谱分析仪	271
§3-1 频谱分析仪的工作原理	271
一、模拟式频谱分析仪	271
二、数字式频谱分析仪	275
§3-2 外差式频谱分析仪	275
一、外差式频谱分析仪的主要工作特性	275
二、外差式频谱分析仪的方框图	279
三、外差式频谱仪的主要电路部件	285
§3-3 自动频谱分析仪	291
本章思考题和习题	295
第四章 数字式仪器	297
§4-1 概述	297
一、数字式测量仪器的基本概念	297
二、A-D转换器的误差	300
三、数字式测量仪器的特点	304
§4-2 电子计数器	305
一、电子计数器的原理及组成	305
二、通用计数器的几种基本测试功能	312
三、通用计数器的主要技术指标	317

四、输入通道及其抗干扰电路	321
五、计数与显示电路	328
六、微波计数器	350
七、时间计数器	353
§4-3 直流电压A-D转换器的主要部件	362
一、积分器	362
二、模拟电压比较器	365
三、模拟开关	373
四、基准电压源	381
§4-4 电压-数字转换技术	387
一、电压-数字转换的原理及分类	387
二、斜坡式电压-数字转换器	389
三、双斜式电压-数字转换器	392
四、双斜式电压-数字转换器的自动校零技术	398
五、三斜式电压-数字转换器	405
六、脉冲宽度调制式电压-数字转换器	407
七、电荷平衡式 V - F 转换器	409
八、电荷平衡·斜坡式电压-数字转换器	412
九、数字-模拟(D-A)转换器	413
十、反馈比较式电压-数字转换器	421
十一、余数循环比较式电压-数字转换器	427
十二、无反馈比较式电压-数字转换器	428
十三、复合式电压-数字转换器	431
§4-5 双斜式数字电压表的误差分析	433
一、积分器的误差	433
二、双斜式DVM整机误差的基本表达式	441
三、非线性误差及校准	445
四、积分器引起的动态误差	451
§4-6 数字电压表的干扰及其抑制	454
一、串模干扰	454
二、共模干扰	461
§4-7 数字多用表	467
一、数字多用表的组成	467
二、DVM和DMM的主要工作特性	475
三、智能多用表	477
本章思考题和习题	483
参考资料	488

绪 论

一、电子测量仪器的功用和特点^{〔1〕〔2〕}

测量是探求、收集和整理表征事物性质及其相互关系的各种资料与数据的过程。只有大量地积累这些资料与数据,并进行实事求是的分析,才可能发现事物发展的规律,因此,测量是人类认识世界的重要手段。

电子测量,就是用电子学的手段来进行测量。在电子测量过程中使用的设备,就是电子仪器。随着电子学的发展,几乎任何一种物理量都可以用电子仪器进行测量。电子测量仪器,主要是指在电子科学技术中测量电磁参量的那些电子仪器。

电子测量仪器是电子科学技术中的一个重要分支,它为整个电子科学技术提供实验手段,同时又受到电子科学技术中其它学科的促进。

在电子科学技术领域中,很多物理量和物理现象是人体感官所无法直接感觉到的,只有通过电子测量仪器这个媒介,人们才能感觉到它们。因此,没有电子测量仪器,人们就不能获得电子科学技术的知识。例如,在电子科学技术中广泛应用的电信号振荡器,它的频率高低、幅度大小、振荡波形等,都是人们无法感觉到的,只有通过频率计才能知道其频率,通过电压表或功率计才能知道其幅度,通过示波器才能知道其波形。

电子测量仪器对电子科学技术理论和应用的发展有着重大的意义。例如,现已广泛应用的傅立叶级数,虽然早在十九世纪初就已提出,但却长期得不到实际应用。直到二十世纪二十年代以后,人们用电子测量仪器观测到了电信号的频谱,才使得傅立叶级数所表述的频谱概念得到公认。从此以后,傅立叶级数不但在电子科学技术中,而且在机械振动和其他科学技术领域中,得到了广泛的应用。也正是由于对电信号的频谱测量,推翻了人们起初认为调频与调幅相比,有可能缩窄频带宽度的错误设想,从而大大促进了电信理论的发展。电子射线示波器的出现,为人们长期无法准确认识的脉冲信号,提供了一种有效的测试手段,从而使脉冲技术迅速发展成为电子科学技术中一门独立的学科。逻辑分析仪是人们探索大规模集成电路的神秘的钥匙,从而促进了电子计算技术的迅猛发展。

电子设备在使用过程中,也须经常用电子测量仪器监测它的工作质量,进行定期的校验。另外,电子设备的维修工作量是很大的,为了迅速准确地搜寻电子设备中出现故障的部位,分析和判断故障的性质,从而找到有效的解决办法,必须借助于电子测量仪器才能完成。

总之,电子测量是把电子科学技术的理论与实践相联系的桥梁,而电子测量仪器则是它的物质基础。

电子测量仪器具有精度高、量程广、频带宽、速度快、多功能、可进行远距测量、易于实现自动化,以及使用灵活方便等特点。

电子科学技术是一门新的科学,发展很快,这就要求电子测量仪器必须相应地有很快的发展速度。加之仪器的服务对象繁多,使用条件不同,使得电子测量仪器的新旧产

品更换十分迅速。例如,建立在模拟技术基础上的程控示波器,刚出现一、二年就相继废型,而被电子计算机或微处理器控制的自动示波器所代替。由于更新速度快,就要求电子测量仪器的研制人员应熟悉电子科学技术的发展情况,在选定仪器方案时,就要预见到将来定型生产时的前景,而且应尽可能选用便于更换的方案。

由于电子测量仪器是近代科学技术必不可少的工具,因而每当一种新理论、新技术或新产品出现时,必然有一些新仪器伴随出现。例如,随着电子计算机的发展,出现了逻辑分析仪、字符发生器等数据域测试仪器。大规模集成电路和微处理器的发展,又促使大规模集成电路测试仪和微处理器开发系统的出现。电子测量仪器对新技术十分敏感,常常是在出现一种新技术后,很快就加以应用。电子测量仪器是最先利用频率合成技术、电子计算技术、超导技术和微处理器的技术领域之一。

表0-1^①列出了各类电子测量仪器的一些主要技术指标和目前所能达到的水平。由此可以窥见上述电子测量仪器的若干特点。

表0-1 各类电子测量仪器的目前水平

仪器类别或 测试项目	主 要 技 术 指 标 ①
电压标准	输出电压:最高1199.9999V,输出电流:最高100mA,精度:0.1nV
频率标准	稳定性:氢原子钟 $10^{-14}/s$, 铯原子钟 $10^{-13}/s$, 超导谐振腔 $10^{-16}/s$ 激光法:最高频率148THz, 精确度 1×10^{-10}
电容基准	精确度: 5×10^{-6}
电压测试	直流:最高灵敏度0.1nV, 精确度0.0001% 交流:最高灵敏度10 μ V, 精确度0.03%, 最高频率18GHz
功率测试	测量范围10pW~250kW, 最高频率330GHz, 精确度0.05%
电阻测试	测量范围1 μ Ω ~ $10^{18}\Omega$, 精确度 $\pm 0.009\%$ 读数+0.002%满度
电导测试	测量范围 $10^{-10}\mu$ S~1000s, 精确度0.01%
电容测试	测量范围 10^{-19} ~20F, 精确度 10×10^{-6}
频率测试	测量范围0.000001Hz~150GHz, 频率稳定度 $5 \times 10^{-12}/d$
相位测试	最高频率40GHz, 精确度 $\pm 0.02^\circ$
频谱分析	频率范围0.5Hz~90GHz, 动态范围150dB, 分辨力0.5Hz, 灵敏度-142dBm
网络分析	频率范围50Hz~40GHz, 分辨力0.001dB, 动态范围115dB, 精确度0.025dB 电压驻波比1.02~ ∞
时域反射计	上升时间35ps, 反射系数:最低0.001/div, 时间0.01ns/div, 距离0.01m/div
示波器	频率范围DC~1000MHz(通用), DC~18GHz(取样) 扫描速度200ps/div(通用), 10ps/div(取样) 灵敏度10 μ V/div(通用), 1mV/div(取样)
衰减测试	最高频率220GHz, 测试范围 0~150dB, 精确度0.0001dB
场强干扰测试	频率范围10kHz~51GHz, 灵敏度-40dB(0dB=1 μ V)
噪声测试	最高频率140GHz, 噪声系数范围 0~33dB, 精确度 ± 0.15 dB
半导体特性图示仪	电流范围 0.1 μ A/div~200A/div, 电压范围 5mV/div~50kV/div, 精确度2%
数字集成电路测试	动态测试精度1%, 钟脉冲频率20MHz, 测试速度10 μ s/次

① 这些数字是从同类仪器的很多产品中选录的,并不是单一仪器所能达到的最高水平。

二、电子测量仪器的分类^{〔8〕〔4〕〔5〕}

电子测量仪器品种繁多，目前已达几千种。为便于管理、研制、生产和学习，必须对它们进行适当的分类。

测量仪器包括量具、测试仪器、测试系统及附件等。按给定的量值，复制某一物理量的测量设备称为量具。例如，砝码是质量的量具，石英晶体振荡器是频率的量具等。测量仪器能把测量结果转换为人们能直接感觉的形式，如指针偏转、耳机发音、可见的图象或数字符号等。附件是仪器进行测试时必须配备的设备，如各种连接电缆、电压表的探头等。也可以利用附件改善或扩展测试功能，如各种测量放大器、示波器的探头、电子计数器的扩频设备等。若干测量仪器配以适当的附件，按一定的方式组合起来，就成为测试系统。它既可以是专用的，如雷达综合测试系统；也可以是通用的，如网络分析系统。

（一）按功能分类

电子测量仪器可分成专用仪器和通用仪器两大类。专用仪器是为特定目的而专门设计的，它只适用于特定的测试对象及测试条件。例如，微分增益和微分相位测试仪，是为研究彩色电视设备中亮度信号对色饱和度及色调的影响而专门设计的。它既不能用来测试雷达或通信设备的性能，也不能用来测试黑白电视设备的性能。许多计量用精密仪器，还必须在特定条件下工作。相反，通用仪器有较宽的适用范围。例如，通用的电压表、示波器、频率计等。它们既能用来测试雷达、通信、电视、电子计算机等各类电子设备，也能用来测试放大器、振荡器等电路部件，或电子管、晶体管、电阻、电容、电感等元器件。由于通用仪器具有很强的通用性，因此它们往往可作为测试系统或专用设备中的组件。例如，雷达综合测试仪主要是由信号发生器、功率计、波长计等仪器组成的。由于专用仪器只适用于特定的测试对象，因此它的设计在很大程度上受到测试对象的限制。

专用仪器可按其特定的设计目的分类。通用仪器则有多种分类方法，其中按仪器功能分类是最基本、最常用的方法。表0-2列出了通用电子测量仪器按功能分类的情况。

表0-2 通用电子测量仪器分类

序 号	类 别	主 要 品 种
1	电平测量仪器	电流表、电压表、多用表、毫伏计、微伏计、有效值电压表、选择性电压表、数字电压表、矢量电压表、功率计、电压标准、标准电压表
2	元件参数测试仪	RLC量具、RLC电桥、电容测试仪、Q表、毫欧表、绝缘电阻测试仪、电位器测试仪、元件分选仪、矢量阻抗表、阻抗图示仪、电子管参数测试仪、晶体管综合参数测试仪、晶体管高频参数测试仪、集成电路测试仪、测量线、驻波仪、时域反射计、波导元件、同轴元件
3	频率时间测量仪器	谐振式波长计、外差式波长计、电子计数器（通用计数器、自动微波频率计、计算计数器）、石英钟、原子钟、频率比对器、甚低频接收机
4	信号波形测量仪器	通用示波器、取样示波器、多束示波器、记忆示波器、超低频示波器、调制度测量仪、频偏仪、高压示波器
5	信号频谱分析仪器	谐波分析仪、失真仪、频谱分析仪、自动频谱仪、傅立叶分析仪、相关器
6	相位测量仪器	相敏电压表、数字相位计、移相器、延时器、群延时测试仪

(续)

序 号	类 别	主 要 品 种
7	场强测量仪器	场强指示仪、场强测量仪、测量接收机、测量用电线
8	材料电磁特性测试仪器	介电常数测试仪器、导磁率测试仪、磁滞回线测试仪、介质损耗测试仪
9	模拟电路特性测试仪	频率特性测试仪、过渡特性测试仪、相位特性测试仪、噪声系数测试仪
10	数字电路特性测试仪	逻辑状态分析仪、逻辑时间关系分析仪、图象分析仪、逻辑脉冲发生器
11	信号发生器	低频信号发生器、高频信号发生器、微波信号发生器、函数发生器、合成信号发生器、扫频信号发生器、脉冲信号发生器
12	电信测试仪	电平振荡器、电平表、串音测试仪、线路故障测试仪、误码率测试仪
13	测试系统	网络分析仪、线路特性测试系统、微处理器开发系统
14	附属仪器	测量放大器、电源设备、记录器、打印机、测量变换器、量具

在这里需强调指出，在不过分地增大仪器体积、重量和价格的前提下，测量仪器最好具有较多的功能，以扩展其应用范围，提高使用灵活性。例如，现在有些信号发生器，不但有很宽的频带，而且可兼作频率计、调制系数测量仪。集成电路的发展，为电子测量仪器的多功能提供了坚实的物质基础。多功能的综合测试仪器正在大量地涌现出来。

(二) 按频段分类

在不同频段工作的电子设备，即使具有相似的功能，也往往迥然不同。例如，在高频段得到广泛应用的谐振式阻抗测量仪器，就不宜用在低频段测量阻抗。而在低频段工作得很好的电桥式阻抗测量仪器，就很难用在高频段。由于频率的影响，人们自然地吧电子测量仪器分成超低频、音频、超音频、高频、超高频等类别。交错地按功能和工作频段分类，是现代电子测量仪器最主要的分类方法。

(三) 其它分类方法

按测量精度可分为指示器、简易测量仪器、精密测量仪器和计量仪器。指示器只能作定性测试，简易测量仪器只能作较粗糙的定量分析，适用于生产和维修等场合。精密测量仪器能进行精确的定量测试，适用于实验室。计量仪器在同类仪器中具有最高的精确度，可作为计量标准，进行量值的传递。

按仪器的工作原理可分为模拟式和数字式两大类。

数字式测量仪器的工作原理是：通过模-数变换器把具有连续特性的被测量，变换成具有离散特性的数字量，从而得知被测物理量的数值。

模拟式电子测量仪器的基本原理是：把具有连续特性的被测量变换成可直接感觉的、具有连续特性的模拟量（如把电压变成指针偏转），或与同一类数值已知的模拟量相比较（如在外差式频率计中，把被测频率与已知频率比较）。早期的电子测量仪器几乎都是模拟式的，自五十年代出现第一台电子计数器后，数字仪器得到飞速发展，已伸展到电子测量各个领域。它的突出优点是快速、准确、易于集成化、便于与计算机配合。

电子测量仪器也可按使用条件分类^[4]。根据我国部颁标准规定，电子测量仪器按环境要求分为三组：

I 组：在良好的环境中使用的仪器，操作时要细心，只允许受到轻微的振动。

II 组：在一般的环境条件中使用的仪器，允许受到一般的振动和冲击。

III 组：在恶劣的环境条件中使用的仪器，允许在频繁的搬动和运输中受到较大的冲击和振动。

各组仪器适应的环境条件列于表 0-3 中。

表0-3 电子测量仪器的环境条件

组别	额定范围试验					贮存运输条件试验						
	温 度			湿 度		温 度				湿 度		
	最低℃	最高℃	试验时间 h	相对湿度 % (°C)	试验时间 h	最低℃	最高℃	试验时间 h	恢复时间 h	相对湿度 % (°C)	试验时间 h	恢复时间 h
I	+10	+35	4	80(35)	48	-40	+55	4	4	90(40)	48	24
II	-10	+40	4	80(40)	48	-40	+55	4	4	90(40)	48	24
III	-40	+55	4	90(35)	48	—	+70	4	4	—	—	—

除高精度计量用仪器可以列入 I 组外，其它通用仪器都应满足 II 组的环境要求。对于在野外等恶劣条件下工作的仪器，应满足 III 组的环境条件。

按仪器的结构特点，电子测量仪器可分为袖珍式、便携式、台式、架式、插件式、协合式等。袖珍式（或称手持式）仪器，工作人员能一手握仪器，一手进行测试，因此能靠近测试部位进行测试，使用方便，常用的万用表就属于这一类。便携式有体积小、重量轻、低功耗、价格便宜及机械性能坚固等优点，这类仪器常内附直流电源。便携式仪器特别适用于现场维修工作。台式仪器适用于实验室、调试车间等。一般说来，它具有更优良的电气性能。架式仪器可以安装到专用机架上，以便和其它仪器或设备一起组成测试系统或专用设备。插件式仪器通常有一个主机和若干可更换的插件，改换不同的插件，不但可以改变整个仪器的性能，而且还能增添或改变仪器的功能。例如，〔美〕Tek7000 系列示波器，它不但可以组成各种性能的示波器，而且配以适当的插件后，还可以成为电压表、频率计、频谱仪、时域反射计等，还能进行温度等非电量测试。由于插件式仪器有十分优良的性能和灵活多变的功能，因此特别适宜于实验室使用。但一般说来，插件式仪器的主机和各个插件，不能作为一个单独的仪器使用，因此不便于携带。七十年代以来，逐步发展了一种组合式（或称协合式）结构，它的几个组件既可组成一个完整的多功能仪器，又可分开作单独的仪器使用。因此，它兼有插件式仪器的灵活性和便携式仪器的轻便性。

按仪器的操作方式，电子测量仪器可分为手动、遥控、程控、自动等类型。自动化是电子测量仪器目前发展的主要方向。

三、电子测量仪器的技术条件^{〔4〕〔6〕}

技术条件是规定仪器的用途、工作特性、工作条件，以及运输、贮存条件的技术文件。因此，无论是设计制造，还是使用维修都必须首先拟定或了解该仪器的技术条件。仪器的用途是研制或使用仪器的目的，它决定了仪器的功能，同时与仪器的工作条件、工作特性等密切相关。工作特性是用数值、公差范围等来表征仪器性能的量，习惯称为

技术指标。电子测量仪器的工作特性主要分为电气工作特性和一般工作特性两类。以电压表为例,电气工作特性包括量程、误差、工作频率范围、波形响应、输入特性等。它的一般工作特性包括电源、尺寸、重量、可靠性等。工作条件不但包括仪器适应的外界条件,而且还包括仪器的工作状态,如电压表有直流和交流工作状态之分。工作条件分两种情况:一是额定工作条件,它是工作特性有效范围和影响量(主要指影响仪器性能的各种外界因素)额定使用范围的总和。在额定工作条件范围内,仪器应满足规定的性能。另一种是基准条件,它是为了进行比较试验和校准试验而对各种影响量和影响特性规定的一组数值。贮存与运输条件是温度条件、湿度条件、大气压力条件、振动条件、冲击条件等的总和,在这些条件规定的范围内,仪器在非工作状态下贮存或运输而不致损坏,当它以后工作在额定工作条件时,其性能不会降低。

下面对电子测量仪器的工作特性中的一般问题作一些简要的说明。

(一) 误差

电子测量仪器的误差可用工作误差、固有误差、影响误差、稳定误差等来表示。据我国部颁标准规定,凡是成批生产的电子测量仪器,都应该给出工作误差极限。此误差极限在额定工作条件以内,影响量与影响特性为任何可能组合的情况下工作时都有效。这个原则对仪器制造厂提出了更高的要求,有利于产品质量的提高。对使用者来说则十分方便,免去了根据单项误差估算总误差的困难。

(二) 稳定性

在工作条件恒定的情况下,在规定时间内,仪器保持其指示值或供给值不变的能力称为仪器的稳定性。因此,稳定性只是直接与时间有关。稳定性的高低由稳定误差来表征。如果把时间也看作一种影响量时,则稳定误差就是时间影响误差。不应该把温度、供电电压等的影响量变化而致的影响误差,也看成稳定误差。在给出稳定误差的同时,必须给出相应的时间间隔,否则所给的稳定误差就没有任何实际意义。我国部颁标准规定,时间间隔应从下列数值中选取:

15分钟; 1小时; 3小时; 7小时;
24小时; 10天; 30天; 3个月; 6个月; 1年。

(三) 分辨力

分辨力是指测量仪器可能检测出的被测参量最小变化的能力。一般说来,数字式仪器的分辨力是读数装置最后一位的一个数字。模拟式仪器的分辨力,是读数装置的最小刻度的一半。显然,仪器的绝对误差不可能小于仪器的分辨力。分辨力与误差有联系又有区别,高精度仪器必须有高的分辨力,但决不能说有高分辨力的仪器必然有高的精度。例如,有两台电子计数器,一台有七位数字,另一台有八位数字,显然后一台较前一台有更高的分辨力,但如果前者的时基准确度为 10^{-7} ,后者的时基准确度为 10^{-6} ,那么前者的测频精度完全可能高于后者。

当测量目的不在于确定被测量的绝对数值,而在于相对某一参考值的变化情况时,仪器的分辨力具有十分重要的意义。例如,在测试频率稳定度、频率响应,以及进行谐波分析时就是如此。

(四) 有效范围和动态范围

被测量的有效范围是仪器在满足误差要求的情况下，被测量的最大值与最小值之差，习惯上称为仪器的量程。量程的宽窄是仪器通用性的重要标志。为了覆盖足够宽的量程，通用仪器常常需要分档。一般按 1-2-5 或 1-3 或 10 进位的序列来划分档级，这样既醒目又便于计算。显然，仪器量程的下限不可能小于它的最高分辨力，同时仪器的分辨力可能随量程的换档而变化。

动态范围是仪器在不调整量程档级（包括细调）和满足误差要求的情况下，被测物理量的最大相对变化范围。宽的动态范围使我们能同时检测幅度差别很大的多个信号，可以避免因量程换档而引入附加误差。在分析信号频谱、测试噪声或干扰信号时，宽的动态范围具有特别重要的意义。

（五）测试速率

测试速率是指单位时间内，仪器读取被测量数值的次数。直读式仪器的测试速率高于非直读式仪器，而数字直读式仪器较指针直读式仪器又快速得多。随着仪器的自动化，测试速率愈来愈成为电子测量仪器的重要工作特性。

由于高速过程占有更宽的频带，因此测试速率必须和仪器的有效工作频率范围密切相关。这就是说，为了提高仪器的测试速率，必须相应地展宽其工作频率范围。反过来说，如果在仪器工作频率范围一定的情况下，过分地提高测试速率，必然会引起被测量的失真，因此也就会出现较大的测量误差。

研究测试速率、测量误差和频率范围之间的关系，是电子测量理论迫切需要解决的重要课题。具体地讨论各种电子测量仪器的测试速率、测量误差和频率范围及其相互之间的联系，是设计制造电子测量仪器时必须解决的技术问题。

（六）可靠性

可靠性是反映产品是否耐用的一种综合质量指标，它定义为产品在规定条件下完成规定任务的概率。所谓规定条件，是指规定的时间以及规定的工作条件和维护条件。对可靠性的研究，包括产品设计、制造、使用和维护的各个阶段。仪器的可靠性是一个非常重要的指标，这是因为：

- （1）电子仪器的功能愈来愈重要，因仪器失效而造成的损失也就愈来愈大；
- （2）仪器的组成愈来愈复杂，使用元、器件及零、部件愈来愈多，因此仪器失效的可能性也可能愈大；
- （3）对仪器工作条件的要求愈来愈严格，因此仪器失效的可能性也愈大；
- （4）新技术、新材料、新工艺、新仪器不断涌现，由于缺乏经验，因此必须注意进行可靠性的研究。

仪器不可靠的原因是错综复杂的，既有设计、制造、使用人员主观方面的因素，也有客观方面的因素；既有技术上的原因，也有组织管理上的原因；既有设计方面的原因，也有生产和使用方面的原因。因此，可靠性工作具有牵涉面广、战线长、综合性强等特点。可靠性工作的基本内容大致如表 0-4 所示。

四、电子测量仪器中的测量过程及基本组成原理

尽管在电子测量中的被测参量是多种多样的，但大致可分为两大类。一类是表征电信号各种特性的量，如电压、电流、功率、频率、相位、时间与周期、波形与频谱、信号之间的相关性等。另一类是表征各种电子元器件及系统电磁特性的量，如电阻、电容、

表0-4 可靠性工作的基本内容

基本理论	可靠性技术				可靠性管理			教育与 技术交流
	设计研制	生产制造	使用	试验	可靠性标准	国家级管理	企业级管理	
可靠性数学、可靠性物理、环境技术、设计技术、预测技术、基础试验、数据处理技术	可靠性分配、可靠性预计、元器件及材料的合理使用、维修性设计、可靠性与维修性的试验评价、数据的收集分析	元器件及材料的选购、生产设备的保养、生产环境的净化、工艺筛选、质量控制、数据的收集分析	包装、存储、运输、维护技术、备分与更新、数据的收集分析	寿命及失效效率试验、环境试验、筛选试验、非破坏性测试技术、失效分析、测试设备及分析设备、数据的收集分析	基准标准、试验标准、验证标准、管理标准、产品标准	制订方针政策、编制规划、下达协调任务、制订验证制度、建立数据中心、进行标准管理、组织宣传教育、进行国际协作	建立可靠性管理组织、制订规章制度、实施质量监督、进行宣传教育	编制教材、举办讲座、人员培训、专业会议、情报交流

电感、阻抗与导纳、输入与输出特性、传输与反馈特性、噪声特性、过渡特性、频率与幅度特性、相位特性与群延时、状态分析与误码率、介电系数与导磁率等。

第一类参量是主动的，它们可直接送到测量电路与作为标准的同类参量相比较，或者在测量电路中，先进行适当的变换（如同类参量间的幅度变换、频率变换、波形变换；不同类参量间的转换、数-模或模-数变换等），再与已知的标准相比较，比较的结果由指示部分显示出来。因此，第一类参量的一般测量过程可以用图 0-0-1 来表示。

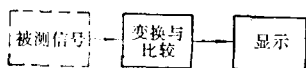


图0-0-1 电信号特性的一般测量过程

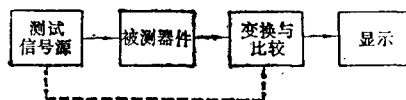


图0-0-2 电子元器件及系统特性的一般测量过程

第二类参量一般是被动的，它们只有在适当信号的作用下才能显露其固有的特性。如一个电阻器只有加上电压或电流时，才能表现出它的电阻值。为了测量放大器的放大系数，必须先在放大器的输入端馈以适当的电信号，然后测出放大器输入端和输出端的信号幅度。因此，第二类参量的一般测量过程是：把已知特性的电信号加到被测元器件或系统，然后从被测件中某一适当地方得到包含被测件特性的电信号。此时，第二类参量实际上已经转换为第一类参量。再按第一类参量的测量过程进行测量，则可得到被测件的特性。第二类参量的一般测量过程可用图 0-0-2 来说明。图中虚线表示作为标准的测试信号与包含被测件特性的信号进行比较。

由上述可知，从测量过程来看，电子测量仪器大致可分为三类，即电信号特性测试仪、测试信号源、电信号特性测试与测试信号源的组合。其中，前两类是最基本的。

常用的测试信号源是正弦信号发生器和脉冲信号发生器，其中以正弦信号发生器为最多。电子示波器和频谱仪是“全息”电信号特性测试仪；数字计数器和数字电压表是最常用的数字式信号特性测试仪。这几类仪器将是本书讨论的重点。

五、电子测量仪器的数字化、自动化和智能化^{〔7〕〔8〕}

近一、二十年，电子仪器的发展十分迅速，其面貌发生了巨大的变化。电子仪器的数字化、自动化和智能化，便是一个重要标志。

（一）电子仪器数字化和单机自动化

五十年代初期就出现了数字式仪器，例如数字式频率计和数字电压表等。数字仪器一出现，就显示出它的巨大优越性。首先，数字仪器对显示方式作了重大变革，数字显示不但直观、清晰，更重要的是它对测量的分辨力和精度没有任何影响和限制；数字仪器采用的数字测量技术，把各种被测模拟量转换成数字量，再利用数字电路的各种逻辑功能（如数字计数、数据存储、数字运算、逻辑判别、时序控制等）来完成其测量任务的。数字测量可以达到很高的测量精度，同时也很容易实现测量过程的自动化。事实上，五十年代初期设计出的第一台数字电压表，则是利用数字电路的逻辑功能，模仿手工操作直流电位差计的程序，控制测量的全过程，实现了直流电压的高精度的自动测量。同样，六十年代研制的数字式自动平衡电桥，是根据电桥调节平衡的原理和步骤，利用数字逻辑电路来自动调节平衡，实现电容测量的自动化。仪器的数字化是实现仪器自动化的基础。在仪器数字化的过程中就伴随着仪器的单机自动化，这是因为利用数字电路的各种逻辑功能，很容易实现测量过程的自动化。

（二）测试系统的自动化

一台电子仪器的测试功能是有限的。在完成一个较复杂的测试任务时，需用几种不同功能的仪器来组成一个测试系统。如图 0-0-3 所示的频率特性测试，需用信号发生器和电压

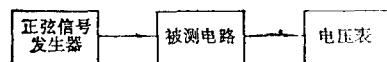


图0-0-3 一个简单的频率特性测试系统

表。尽管频率特性的测试并不复杂，但如果由手工操作进行测量，其测试过程是相当繁琐的，包括了不少繁复的操作，既费时又易出差错。当测试任务更复杂，其测试过程也就更繁复了，这就促使人们寻求电子仪器及系统的更高级的自动化。

早期电子仪器的自动化是靠模拟技术来实现的。例如，将图 0-0-3 中的正弦信号发生器改为扫频信号发生器，将电压表改为包络示波器，并让扫频信号发生器的扫描电压作为示波器的水平偏转电压，则可在示波器的荧光屏上直接显示出被测器件的频率特性。早期出现的扫频测量技术和函数曲线显示技术是测量自动化的开端，但这种模拟式的自动化测试系统有如下缺点：（1）自动化程度不高。例如，测试的中心频率、扫描范围、电平等都需人工置定，难于实现自适应扫描，所以它最多只能算作半自动的。（2）测量精度差。例如，频率特性测试精度可能要比精密的点频测试技术低一至二个数量级。（3）难于和电子计算机相配合，难于和其它仪器一起组建自动测试系统。（4）难于制作通用的标准件，造价昂贵。

当测试任务比较复杂，要求自动化程度很高时，需用多台仪器组成一个大型自动测试系统，这个系统由一个单独的控制器（通常是计算机）进行测试过程控制和测量结果的处理。控制器与受控仪器间需要进行信息的交换，完成这一任务的设备称为接口。为了执行信息的发送与接收，接口必须具有编码、译码的能力，此外还要能进行电平与阻抗的变换，并满足一定的机械和电气要求。利用控制器、可接受程控的仪器和适当的接口，则可以构成各种自动测试系统。

在六十年代以前，各种仪器的接口是各不相同的，因此当需要把若干仪器联成一个自动测试系统时，必须为每一仪器设计专门的接口。各接口放置在一个单独的机箱内，称为接口卡片箱，如图 0-0-4 所示。图中，计算机用作测试系统的控制器，接口处理器用来协调各接口的工作。这种接口卡片箱是专门为某一特定的自动测试系统设计制造的，只