

电子测量仪器原理

上册

成都电讯工程学院
陈杰美 钱学济 编

国防工业出版社



88

5

3

4

79.88
605
513

电子测量仪器原理

上册

成都电讯工程学院

陈杰美 钱学济 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、同步及模-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。本书还介绍了电子测量仪器的新技术和新电路。

全书分上、下两册。上册主要讨论各种信号发生器和通用示波器。下册主要讨论取样示波器、频谱分析仪和各种数字式测量仪器。

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。

电子测量仪器原理

上 册

成都电讯工程学院

陈杰美 钱学济 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

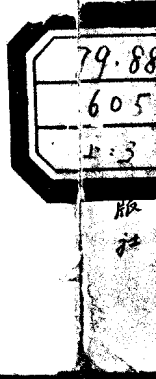
国防工业出版社印刷厂印装

*

787×1092¹/₁₆ 印张19 445千字

1980年7月第一版 1981年2月第二次印刷 印数：08,201—17,200册

统一书号：15034·2018 定价：2.00元



前 言

本书系高等学校工科电子类测量和仪器专业统编教材(试用)。

本书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。本课程应在全部基础课程及《电子测量原理》课完成后进行。

书中的内容是以仪器为线索来安排的,使读者建立起仪器的整机概念。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和扫频信号发生器。在信号分析仪器中,着重分析通用示波器、取样示波器和频谱分析仪。在数字式测量仪器中,主要分析电子计数器和数字电压表。这几种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。

本书是按讲授 200 学时编写的。实际授课学时可根据各校具体情况酌减,但最好不要低于 140 学时。在书中标有“*”的章节可以少讲或自学。每章皆附有思考题、习题和主要参考资料,以便复习和查阅。

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(双积分式或比较式)。

本书是按照 1978 年 3 月高等学校工科电子类专业教材会议所讨论审定的教学大纲编写的,由陈杰美同志主编。第一章、第六章至第十章,以及第十四章由陈杰美同志编写;第二章至第五章由钱学济同志编写;第十一章至第十三章由古天祥同志编写。

本书由南京工学院主审。上册的主审人为李樟云、邹家禄、沈祝平、詹宏英等同志。参加上册审稿的还有南京邮电学院、天津大学等单位。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意见,在此一并表示衷心感谢。

由于编者水平所限,书中定有不少缺点和错误,恳切希望读者批评指正。

编 者

目 录

第一章 电子测量仪器概论	1
§1-1 电子测量仪器的功用和特点	1
§1-2 电子测量仪器的分类	3
一、按功能分类	3
二、按频段分类	4
三、其它分类方法	4
§1-3 电子测量仪器的技术条件	5
一、误差	6
二、稳定性	6
三、分辨力	6
四、有效范围和动态范围	7
五、测试速率	7
六、可靠性	7
§1-4 电子测量仪器中的测量过程	7

第一篇 测量用信号发生器

第二章 信号发生器引论	9
§2-1 信号发生器的功用	9
§2-2 信号发生器的分类及主要工作特性	11
一、信号发生器的分类	11
二、正弦信号发生器的工作特性	12
§2-3 低频信号发生器	13
一、低频信号发生器的主要工作特性	13
二、低频信号发生器的工作原理	14
§2-4 函数发生器	18
一、函数发生器的工作原理	18
二、方波-三角波发生器	19
三、函数变换网络	19
§2-5 脉冲信号发生器	20
§2-6 信号发生器的发展概况	22
*第三章 高频信号发生器	24
§3-1 高频信号发生器的工作原理	24
§3-2 高频信号发生器的主振级	27
一、主振级的作用和工作特性	27
二、正弦振荡器的原理和电路	28
三、LC 正弦振荡器的分析	29
四、主振级的频率稳定	46
五、主振级的波段划分	50
§3-3 高频信号发生器中的调制	50
一、高频信号发生器中调制的作用和工作特性	50

二、高频信号发生器中的调幅	51
三、高频信号发生器中的调频	55
§3-4 高频信号发生器的输出级	61
一、高频信号发生器输出级的作用和工作特性	61
二、电阻连续调节衰减器	62
三、电阻步进调节衰减器	62
四、电阻衰减器的误差	64
五、信号发生器输出端的阻抗	66
六、信号发生器的阻抗变换	67
第四章 合成信号发生器	71
§4-1 概述	71
§4-2 频率合成的基本原理	71
一、直接合成法	72
二、间接合成法	78
三、合成信号发生器的特点及其主要工作特性	81
§4-3 锁相环的基本原理	82
一、基本锁相环的传输函数	82
二、环路滤波器	86
三、二阶锁相环的传输特性	89
四、环路稳态相位差(终值误差)	92
五、环路暂态响应	96
六、锁相环的稳定性	100
§4-4 锁相环的同步与捕捉	101
一、同步和同步带宽	101
二、锁相环的捕捉	102
三、锁相环的辅助捕捉	106
四、锁定指示	110
五、锁相环参数的测试	112
§4-5 锁相环中的主要部件	115
一、压控振荡器	115
二、鉴相器	121
三、数字分频器	130
§4-6 合成信号发生器的寄生信号和噪声	134
一、寄生信号对正弦信号稳定性的影响	134
二、噪声对正弦信号的影响	136
三、锁相环的寄生信号和相位噪声	138
四、相位噪声的测试	144
§4-7 锁相合成信号发生器实例	147
一、十进锁相合成单元	147
二、锁相式十倍频器	152
*§4-8 合成信号发生器中的基准频率源	152
——高稳定石英晶体振荡器	152

一、精密石英晶体	152	三、偏转系统	187
二、石英晶体振荡器电路	154	四、偏转后加速	191
三、精密恒温装置	155	五、荧光屏	192
四、高稳定石英晶体振荡器电路实例	157	六、示波管的供电电路	194
第五章 扫频信号发生器	160	七、示波管的屏蔽	196
§5-1 概述	160	*§6-3 示波器的电源	196
一、扫频信号发生器的工作原理	160	一、概述	196
二、扫频信号发生器的应用	160	二、直流-直流变换器的工作原理	197
三、扫频信号发生器的工作特性	161	三、直流-直流变换器中的稳压	199
§5-2 扫频振荡器的扫频原理	162	第七章 通用电子射线示波器	202
一、磁调电感扫频振荡器	162	§7-1 通用示波器的Y信道	202
二、变容管扫频振荡器	163	一、概述	202
三、返波管扫频振荡器	165	二、Y信道输入电路	205
四、YIG扫频振荡器	169	三、Y信道前置放大器	213
		四、Y信道延迟级	226
		五、Y信道输出放大器	233
		六、示波器的多踪显示	241
		§7-2 通用示波器的X信道	247
		一、X信道部分的作用和工作特性	247
		二、扫描电压发生器	249
		三、扫描发生器环	257
		四、触发脉冲发生器	268
		五、同步	278
		六、双扫描系统	282
		七、X放大器	294
		附录 常用国产示波管的电气参数	300
第二篇 信号特性测量仪器			
第六章 电子射线示波器引论	176		
§6-1 概述	176		
一、电子射线示波器的功用	176		
二、电子射线示波器的发展过程	176		
三、示波器的分类	177		
四、示波器的基本工作原理	178		
五、示波器的主要工作特性	180		
*§6-2 电子射线示波管	185		
一、示波管的基本工作原理	185		
二、电子枪的工作原理	186		

第一章 电子测量仪器概论

§ 1-1 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, 现已广泛应用的傅里叶级数, 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, 才使得傅里叶级数所表达的频谱概念得到公认。从此以后, 傅里叶级数不但在电子科学技术中, 而且在机械振动和其它科学技术领域中, 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秘密的钥匙, 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研制系统的出现。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 1-1⁽²⁾ 列出了各类电子测量仪器的一些主要技术指标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 1-1 各类电子测量仪器目前水平

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	稳定度：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^{-8}
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 $10^{-16}\mu$ S~1000S，精确度0.01%
电容测试	测量范围 10^{-16} ~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 $\pm 0.15dB$
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。

§ 1-2 电子测量仪器的分类〔3〕〔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, 法码是质量的量具, 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用的设备, 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, 如雷达综合测试仪; 也可以是通用的, 如网络分析仪。

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、通讯、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 1-2 列出了通用电子测量仪器按功能分类的情况。

表 1-2 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、数字电压表、选择性电压表、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、驻波计、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、调制度测试仪、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、傅里叶分析仪、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
7	场强测量仪器	场强指示仪、场强测量仪、测量接收机、测量用天线

序号	类别	主要品种
8	材料电磁特性测试仪	介电常数测试仪、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、微处理器研制系统
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、调制度测量仪等。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的涌现出来。

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,人们自然地把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、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。

数字式测量仪器的基本原理是: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或是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 1-3 中。

表1-3 电子测量仪器的环境条件

组别	额定使用范围试验					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 %(℃)	试验时间 h	最低 ℃	最高 ℃	试验时间 h	恢复时间 h	相对湿度 %(℃)	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	90(10)	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。

§ 1-3 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与影响量（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。另一种情况是基准条件，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应有效。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相关。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	10 天
1 小时	30 天
3 小时	3 个月
7 小时	6 个月
24 小时	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，高精度仪器必然有高的分辨力，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 7 位数字，另一台有 8 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过后者。

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，因此测试速率必然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，过份地提高测试速率，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

可靠性是产品质量的重要标志。电子测量仪器的可靠性是指仪器在规定时间内和规定条件下，满足其技术条件规定性能的能力。本书第十四章将详细讨论这个问题。

§ 1-4 电子测量仪器中的测量过程

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件及系统电磁特性的量，如电阻、电容、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、

相位特性与群时延、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 1-4-1 来表示。

第二类参量通常是被动的，它们只有在适当的信号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 1-4-2 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。

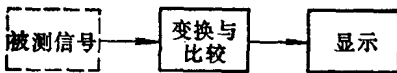


图1-4-1 电信号特性的一般测量过程

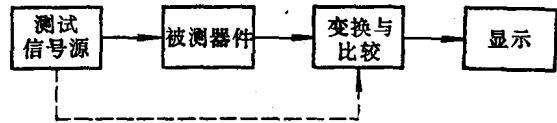


图1-4-2 电子元器件及系统特性的一般测量过程

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。

本章思考题和习题

1. 为什么说电子测量仪器是电子科学技术的基础和先锋？
2. 电子测量仪器主要有哪些特点？它为什么具有这些特点？
3. 为什么要对电子测量仪器进行分类？它的主要分类方法是什么？
4. 电子测量仪器的技术条件主要包括哪些内容？
5. 误差和分辨力之间有什么联系？有什么区别？
6. 稳定误差和影响误差有什么区别？
7. 给出仪器的工作误差有什么好处？
8. 你能分别举出 10 种电信号特性测试仪和 5 种测试信号源吗？
9. 你能举出 3 种由电信号特性测试仪和测试信号源组合而成的电子测量仪器吗？

参 考 资 料

- [1] B. M. 奥利弗, J. M. 卡奇, “电子测量和仪器”, 科学出版社, 1978.
- [2] “国外电子测量仪器发展简况”, 电子测量技术, 创刊号, 1977.
- [3] “Hewlett Packard Electronic Instruments and Systems”, 1977.
- [4] “电子测量仪器五个基础性部标准”, 无线电专业标准化通讯, 1975, 3.
- [5] Ю. С. Гаврилов и др., “Справочник по Радиоизмерительный Приборам”, Издательство Энергия, Москва, 1976.
- [6] 《电子工业技术词典》编辑委员会编, “电子工业技术词典——电子测量技术与设备”, 国防工业出版社, 1976.

第一篇 测量用信号发生器

第二章 信号发生器引论

本章主要讨论信号发生器的功用、分类、工作特性和发展概况，同时通过对低频信号发生器、函数发生器和脉冲信号发生器的简单介绍，对信号发生器的工作原理作一个初步的说明。

§ 2-1 信号发生器的功用

测量用信号发生器，是为进行电子测量提供符合一定技术要求的电信号的设备，它是电子测量中最基本、使用最广泛的电子测量仪器之一。

在电子测量技术领域内，几乎所有的电参量都需要或可以借助于信号发生器进行测量。下面举几个例子来说明测量用信号发生器的广泛应用。

(1) 测量晶体管参数

图 2-1-1 是一种测量晶体管参数的简易方法。信号发生器供给 $0.1\sim 1V$ 的正弦电压。电压表用来监测被测晶体管 BG 相应电极间的电压。当开关 K 置于“1”时，可测得 BG 的输入电阻。当 K 置于“2”时，可测得 BG 的共射电流放大系数 β 。改变信号发生器的输出频率，可测出 β 的频率特性，从而可得 BG 的截止频率 f_β 和特征频率 f_T 。调节 R_b ，还可测得 BG 在不同直流工作状态下的输入电阻和 β 值。

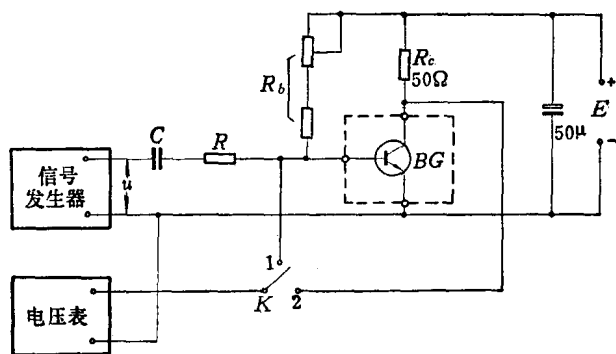


图2-1-1 晶体管参数测量方法

(2) C 、 L 、 Q 的测量

图 2-1-2 是一种利用信号发生器测量电容 C 、电感 L 、品质因数 Q 的方法。

测量 C 时，先选用一适当的标准电感 L ，按图 2-1-2 连接，调节正弦信号发生器的输出频率 f ，使电压表读数最大，即 LC 回路达到串联谐振。由此测得 C 的数值为

$$C = \frac{1}{4\pi^2 L f^2} \quad (2.1.1)$$

若已知 C 值, 则可按同样方法测量电感, 其值为

$$L = \frac{1}{4\pi^2 C f^2} \quad (2.1.2)$$

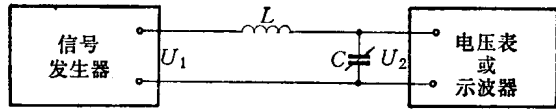


图2-1-2 C 、 L 、 Q 的测量方法

用电压表测出 LC 回路的谐振电压 U_2 , 它与信号发生器输出电压 U_1 的比值即为 LC 谐振回路的品质因数 Q (若信号发生器的输出电阻很小, 以至它引入回路的损耗可以忽略)。常用的 Q 表就是按上述原理制成的。

(3) 放大器的测试

放大器是电子设备中常见的基本电路, 它的主要参数 (如放大系数、频率特性或过渡特性、失真系数和噪声系数等) 的测试都离不开信号发生器。图 2-1-3 是一种测试放大器的常用方法。信号发生器的输出正弦电压 U_1 经被测放大器放大后得 U_2 , U_2 与 U_1 的比值就是该放大器的放大系数。 U_1 、 U_2 由示波器测出。图中 R_1 、 R_2 是被测放大器所需的匹配电阻。改变信号发生器的输出频率,

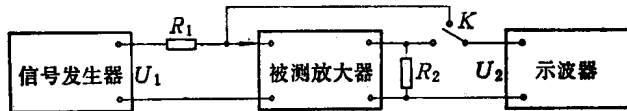


图2-1-3 放大器测试方法

则可得被测放大器的频率特性。如果用非线性失真仪或谐波分析仪代替示波器, 就可得放大器的非线性失真系数。如果信号发生器的输出

信号不再是正弦波, 而是矩形脉冲波, 那么从示波器上显示的图象, 就可以确定被测放大器的过渡特性, 如上升时间、下降时间、平顶下垂、上冲等。

如果用功率计代替示波器作监测器, 就可利用信号发生器来确定被测放大器的噪声系数。放大器噪声系数的测量方案如图 2-1-4 所示。

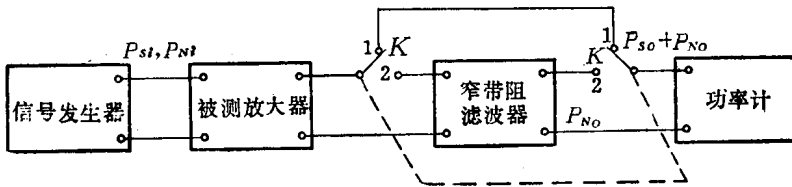


图2-1-4 放大器噪声系数测量方法

放大器噪声系数 N_F 是它的输入信噪比与输出信噪比之比值, 即

$$N_F = \frac{P_{st}/P_{Nt}}{P_{so}/P_{No}} \quad (2.1.3)$$

式中 P_{st} 、 P_{so} ——分别为输入和输出信号功率;

P_{Nt} 、 P_{No} ——分别为输入和输出噪声功率。

放大器输入信噪比即为信号发生器的信噪比, 它一般是已知的。因此, 测出放大器输出信号功率 P_{so} 和输出噪声功率 P_{No} , 就可确定放大器的噪声系数。由图 2-1-4 可见, 当开关 K 置于“1”时, 功率计测出 $P_{so} + P_{No}$; 当开关 K 置于“2”时, 由于调谐到信号频率上的窄带阻滤波器的抑制作用, 功率计测出 P_{No} , 故噪声系数 N_F 得以确定。

(4) 接收机的测试

接收机的各项电气参数可用信号发生器直接进行测定，测试方案如图 2-1-5 所示。信号发生器通过标准发射天线向被测接收机发送测试信号，被测接收机通过标准接收天线或机内天线接收测试信号。在规定的测试条件下，被测接收机达到额定输出功率时，信号发生器的输出电平就直接表征了被测接收机的灵敏度。改变信号发生器的频率，并维持接收机始终处在额定输出功率上。这时，信号发生器输出电平随频率变化的情况就直接表征了被测接收机的选择性。

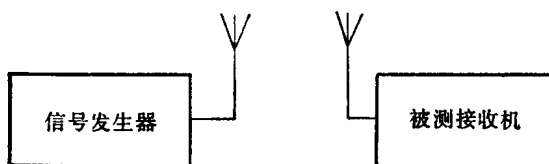


图2-1-5 接收机测试连接图

§ 2-2 信号发生器的分类及主要工作特性

一、信号发生器的分类

信号发生器应用广泛，种类繁多。首先，信号发生器可分为通用和专用两大类。专用信号发生器是为某种特殊的测量目的而研制的，如电视信号发生器，编码脉冲信号发生器、频谱发生器等。这种发生器的特性为其测量对象所制约，这里不作讨论。其次，信号发生器按输出波形可分为正弦信号发生器，脉冲信号发生器，函数发生器，噪声发生器等。常用的是前两种，尤以第一种使用最多。它也是我们讨论的主要内容。正弦信号发生器又可按如下方法进行分类。

(一) 按频段分

- (1) 超低频信号发生器 频率在 $0.0001\sim 1000\text{Hz}$ 范围内。
- (2) 低频信号发生器 频率在 $1\text{Hz}\sim 20\text{kHz}$ 或 1MHz 范围内。其中用得最多的是音频信号发生器，其频率范围是 $20\text{Hz}\sim 20\text{kHz}$ 。
- (3) 视频信号发生器 频率在 $20\text{Hz}\sim 10\text{MHz}$ 范围内。
- (4) 高频信号发生器 频率在 $200\text{kHz}\sim 30\text{MHz}$ 范围内，即大致相当于长、中、短波段的范围。
- (5) 甚高频信号发生器 频率在 $30\sim 300\text{MHz}$ 范围内，即相当于米波波带。
- (6) 超高频信号发生器 一般频率在 300MHz 以上，相当于分米波波带、厘米波波带等。工作在厘米波及更短波长的信号发生器常称微波信号发生器。

应该指出的是，上述的频段划分并非是完全严格的。一方面，目前许多信号发生器都能工作在极宽的频率范围内，例如从数十千赫到 1GHz 或更高频率的信号发生器大量出现。国外将这种宽频段信号发生器称为射频信号发生器。另一方面，频段有不同的划分方法。例如，我国就很少有甚高频信号发生器的称呼，而将工作在 $200\text{kHz}\sim 300\text{MHz}$ 频段内的信号发生器统称为高频信号发生器。再则，对于一个具体的产品，它可能工作在某一频段的全部，也可能只工作在某频段的部分频率上，也可能占据多个频段。

(二) 按性能优劣分

- (1) 信号发生器 主要用来供给各种电子测量设备或其它电子设备以高频能量，如向电桥、测量线、谐振回路、天线等供给能量，以便测试其性能。信号发生器一般具有较大的