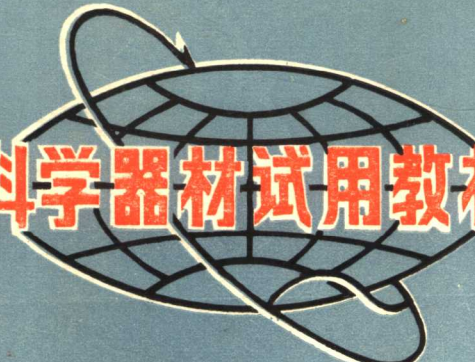




科学器材试用教材

DIANZICELIANGYIQI

电子测量仪器

中国科学院技术条件及进出口局
中国科学院干部进修学院

电 子 测 量 仪 器

主 编

吴 景 渊 孙 焕 根

中国科学院技术条件及进出口局

中国科学院干部进修学院

前 言

中共中央[1981]10号文件指出,科学院要抓好科研工作的基本建设。抓好器材工作,改善实验手段,是科研工作基本性建设的一个重要组成部分。

为建设一支具有高度文化知识和管理技术的科学器材队伍,适应科技现代化的需要,我院委托浙江大学、成都科技大学、西安光机所等单位编写了这套器材干部学习材料。定名为《科学器材试用教材》。全套书分为:仪器仪表、机械电工、材料、电子测量仪器、科学器材供应与管理五部分。其中:

仪器仪表:包括科学仪器与工业自动仪表,十五个分册,由黄邦达同志主编;

机械电工:包括机械设备和电工器材,两个分册,由赵沔、李全铭二同志主编;

材料:包括金属材料和非金属材料,九个分册,由佟锦川、胡仲培二同志主编;

电子测量仪器:由吴景渊、孙焕根二同志主编;

科学器材供应与管理:由陈东还同志主编。

此教材是根据器材工作的特点和我院常用的科学器材编写的。着重介绍科学器材的基本结构、原理、性能、参数、用途、使用维护技术及国内外发展动态。内容力求深入浅出,通俗易懂。

本教材适合具有一定工作经验的在职器材干部学习,也可作为培训具有高中文化程度的年青的器材干部的试用教材,还可供从事科研、生产、教学等部门实验、计划、管理干部学习参考。

在当今科学发展的情况下,科学器材日新月异,更新的速度也随之加速。此教材仅选择当今科学研究常用的仪器、设备和材料,今后将随着科学技术的发展不断地充实提高。

在教材编写过程中,得到了浙江大学,成都科技大学,厦门大学等单位的大力支持,谨致以衷心的感谢。向所有参加教材编写、修改及讨论工作的教师,科研和器材人员表示衷心的感谢。

这套教材是按照科学器材工作的要求和特点组织编写的,由于缺乏经验,不足之处在所难免,希望读者提出宝贵意见。

中国科学院技术条件及进出口局

中国科学院干部进修学院

一九八二年六月廿六日

编者话

本教材为中国科学院器材人员的培训而编写，同时也适用于其它研究部门器材人员的培训。教材也可供从事电子线路工作的技术人员作为选用仪器的参考书。

书中所涉及的仪器原理，主要以物理概念为主，力求深入浅出，图文并茂。不仅对构成仪器的主要原理进行阐述，而且对各类仪器的发展趋势有所提示。所采用的例子，按照“厚今薄古”的原则来归纳教材内容，因此具有一定的先进性和代表性。整体内容上按电子测量原理的分类来编排。

在使用本教材之前，建议具备一定的电子线路基础知识，以便达到良好的效果。

参加本教材的编写人员有：浙江大学：钱照明（第一章），王一鸣、冯志良（第二章），吴景渊、冯耀鑫（第三章），吴祥华（第四章），孙焕根（第五章），陈健（第六章），刘兴华（第七章），吴仲海（第九章）；科学院计算所：侯连赏（第八章）等同志。审议人员有：中国科学院：陈滨、侯连赏、胡运豪、丁安华、秦世昌、尹兰花等同志。在审编过程中，多次得到中国科学院侯连赏等同志的帮助。最后定稿时，浙大无线电系邵健中同志又对整个教材作了文字和部分内容的修改。

本教材编写过程中，科学院所属各有关研究所和浙大部分同志为教材提供各种资料并提出不少宝贵意见。在组织编写本教材中，一直受到科学院朱国培同志和浙大周培源同志的关怀。另外，科学院刘素莲同志、浙大王锡源同志和浙大印刷厂邵建中等同志为早日出版本教材做了大量的工作。在此一并表示衷心的感谢。

由于编者水平有限和时间上的仓促，作为此类教材的编写一定尚存在不少错误和不妥之处，敬请读者不吝指正。

吴景渊 孙焕根

1983年12月于杭州

绪 言

1. 电子测量的重要性。

电子测量是最先进的测量技术。随着科学技术和生产的发展,电子测量愈来愈显示其优越性,电子测量仪器普遍使用在各个科学技术领域和国民经济各部门。测量方法日趋完善,仪器品种日新月异,测量对象日益广泛。电子测量仪器已经形成一个独立的门类。对于无线电测量以及非电测量的科学研究部门来说,正确选配各种电子测量仪器是亟待解决的重要任务。

科学研究部门、工农业生产、学校、商业、运输等大量使用电子测量仪器的单位,必须组织一定的人员,从事对电子测量仪理的设置、调配、维修、计量等工作,以利于充分地发挥仪器的作用。

电子测量仪器是用来实现测量的手段。仪器的完善性,性能的优劣程度以及配备的合理性,直接影响到测量结果,影响反映客观规律性,因此,从某种意义上来说,一个研究部门的科学技术水平,可以用测量仪器的水平来加以衡量。

2. 电子测量的特点

电子测量仪器具有以下几个基本特点:

(1) 频率范围极宽。从低端 10^{-5} 赫到高端的40千兆赫,甚至到达可见光的范围(88兆兆赫)。

(2) 量程广。电子测量仪器的量程宽广,例如电压量程从微伏级到千伏级,电阻量程从零点几欧到几十兆欧,它们均可分档读数,或者自动选择量程。

(3) 精确度高。电子测量仪器的精确度优于其它量具,例如利用氪86作为长度基准,误差约为 10^{-8} ;采用标准电池,直流电压误差约为 10^{-6} ;采用约瑟夫逊效应器件之后,微电压误差达到 10^{-8} ,采用原子频标,无线电频率及时间的测量误差已达到 10^{-13} 量级。

(4) 可以实现遥测。遥测的目的是可将仪器的传感器深入到人类不便于或无法进入的区域,例如太空、深海、高温或核反应堆等。应用电子测量仪器来完成这些禁区的测量,开阔了电子测量的应用范围。

(5) 速度快。电子运动与电磁波具有高速度。在现代科技领域里,测量的高速度具有重大的意义,例如导弹与人造卫星发射中心和运动过程的测量,原子核的裂变过程,超高速计算机的运转情况等,这些量都是瞬息万变的,只有依靠电子测量才能胜任。

(6) 易于实现测量的自动化。电子测量仪器或测量系统虽有以上这些优点,但测量的正确性往往依赖于预先的调整、校正、量程的选择、多次测量结果的数据处理和比较,以及进行复杂的运算等。复杂过程的处理,甚至故障的报警,需要“智能”化来作自动处理,这样的“智能”仪器,大大提高了测量的速度、精确度和可靠性,这将引起电子测量仪器领域里的重大改革。

在可以预见的将来,先进的、高速的、现代化的电子测量仪器的诞生和应用,必定会大大

地推动科学技术的迅速发展。

3. 电子测量的基本任务

电子测量是测量学的一个分支，同时又是无线电电子学的一个分支。广义的电子测量则是泛指采用无线电电子学的手段来对一切电的和非电的各种参数的测量，狭义的电子测量是指电子技术中各种电学量的测量，如电能量、信号特性、电路参数等的测量，早期称为无线电测量。

本教材的基本内容是：电子测量仪器的基本组成，仪器的主要功能，适用范围，分类，基本测量方法（以介绍投入商品的产品为主）等。此外，还介绍一些分类仪器的发展趋向，以便大家全面地考虑问题。

目 录

绪言

第一章 电压测量仪器

§1—1 概述	1
一、电压测量的基本要求	1
二、电压测量仪器的主要特点	2
三、电压测量仪器的分类	3
§1—2 电压测量仪器	3
一、电子电压表的基本部件	3
二、模拟式电压测量仪器	10
三、数字电压表	17
四、特殊电压测量仪器	51
§1—3 电压测量仪器分类比较综合	56
§1—4 电压测量仪器发展趋势	65
一、数字电压表日益趋于取代模拟式电压表	65
二、数字电压表向小型化、手持化方向发展	66
三、数字电压表采用微处理机控制, 向智能化方向发展	66

第二章 信号发生器

§2—1 通用信号发生器的分类及用途	69
一、通用信号发生器分类	69
二、信号发生器用途例举	70
§2—2 正弦信号发生器	72
一、正弦振荡的基本概念	72
二、正弦发生器的主要指标及其定义	76
三、几种正弦发生器的简介	83
§2—3 脉冲信号发生器	101
一、脉冲信号发生器原理	102
二、脉冲信号发生器的功能参数	106
三、典型脉冲发生器	109
附表	113
§2—4 特种信号发生器	116
§2—5 信号发生器的发展概况	121

第三章 信号分析测量仪器

§3—1 示波器概述	123
一、示波参数的定义和测量要求	124
二、示波器的基本构成	125
三、示波器的分类	126
§3—2 示波器的功能参数	127
一、示波管工作原理	127
二、示波器的输入阻抗	132
三、放大与衰减	132
四、偏转灵敏度和偏转因数	132
五、频带与建立时间	133
六、扫速和时间因数	134
七、多踪与多线显示	134
八、同步系统(触发、自动、高频等)	135
九、扫描方式	138
十、视在延迟	140
十一、显示线性与测量精度	141
十二、波形存贮与单次显示	142
十三、功能扩展	143
§3—3 特殊功能示波器	146
一、通用示波器类型	147
二、取样示波器	151
三、记忆示波器	157
四、数字示波器	163
§3—4 示波器的附件——探头	168
一、无源探头	169
二、有源探头	170
三、无源电流探头	170
§3—5 频谱分析仪原理	171
§3—6 频谱分析仪类型及结构	173
一、扫频超外差式频谱分析仪	174
二、直接调谐式(<i>TRF</i>)频谱分析仪	175
三、多滤波器型实时频谱分析仪	176
四、取样变换数字式频谱分析仪	177
§3—7 频谱仪的主要技术指标	178
§3—8 部分频谱仪介绍	179
一、BP22型高频频谱分析仪	179

文献.....	186
---------	-----

第四章 频率测量仪器

§4—1 概述.....	188
§4—2 谐振式频率计.....	189
一、谐振式频率计的分类.....	189
二、谐振式频率计的基本工作原理.....	189
三、谐振式频率计的主要技术指标.....	192
四、谐振式频率计的用途与校准.....	193
§4—3 外差式频率计.....	194
一、外差式频率计的分类.....	194
二、外差式频率计的基本原理.....	194
三、外差式频率计的主要技术指标.....	197
§4—4 电子计数器.....	198
一、电子计数器的分类.....	198
二、通用电子计数器的基本原理.....	200
三、通用电子计数器的主要测试功能.....	203
四、通用电子计数器的主要技术指标.....	208
五、通用电子计数器主要单元电路.....	214
六、石英晶体振荡器.....	229
七、通用电子计数器的插件与配套设备.....	233
§4—5 频率计数器.....	237
一、外差法频率变换及其计数器.....	237
二、取样法及其仪器.....	238
三、置换法及其仪器.....	239
四、复合法及其仪器.....	241
§4—6 时间计数器.....	243
一、倒数计数器.....	244
二、内插法计数器.....	245
三、游标法计数器.....	246
§4—7 电子计数器发展趋势.....	248

第五章 网络特性的测量和仪器

§5—1 概述.....	250
一、为什么要网络分析?	250
二、什么是网络分析?	250
三、低频网络分析.....	251
四、高频网络分析.....	251

五、网络分析仪·····	252
六、其它网络特性测试仪器·····	252
§5—2 阻抗测量和仪器·····	253
一、阻抗的概念·····	253
二、阻抗、反射系数和史密斯圆图·····	254
三、反射系数、归一化阻抗和电压驻波比·····	255
四、集中参数电路和分布参数电路·····	256
五、阻抗测量方法的分类·····	256
六、阻抗测量条件和特点·····	257
七、电桥法测量阻抗的原理·····	258
八、用开槽线测量阻抗·····	263
§5—3 相位测量和仪器·····	265
一、相位测量原理概述·····	265
二、数字相位计·····	267
三、微波相位计·····	269
四、用矢量电压表测相·····	272
五、利用补偿法测量相位移·····	274
六、计算计数器测相·····	274
七、相位测量仪器的技术指标·····	275
§5—4 群时延测量和仪器·····	275
一、概述·····	275
二、几个实用参量的物理概念·····	276
三、数字化群时延测量原理·····	278
四、用网络分析仪测量群时延·····	279
五、网络群时延测量仪的主要技术指标·····	280
§5—9 网络的幅频特性测量和仪器·····	280
一、变容管扫频图仪·····	280
二、磁调制扫频图仪·····	281
三、通用图仪·····	28 ²
四、频率标记·····	283
五、BT—3 型扫频仪·····	284
§5—6 网络分析仪·····	284
一、射频网络分析仪原理·····	286
二、射频自动网络分析仪原理·····	290
三、微波网络分析仪原理·····	292
四、微波网络分析仪各单元技术指标·····	303
§5—7 微波网络分析仪测试原理和应用·····	305
一、测试原理·····	305

二、微波网络分析仪应用	308
§5—8 特种网络分析仪	314
一、微波自动网络分析仪	314
二、六端口式网络分析仪	316
三、时域自动网络分析仪	318
四、时域自动网络分析仪 (TDANA) 与自动网络分析仪 (ANA), 六端口自动网络分析仪 (SPANNA) 的比较	320
五、微波网络分析仪的安全使用注意事项	321
文献	322

第六章 电子元器件参数测量仪器

第一部分 半导体器件参数测试仪	323
§6—1 半导体分立器件电参数测试	323
一、晶体三极管直流参数测试	324
二、晶体三极管交流参数测试	325
§6—2 半导体分立器件电参数测试仪	331
一、JT—1型晶体管特性图示仪	331
二、QG—6型超高频晶体管 f_T 参数测试仪	333
三、QK—6型晶体管开关时间测试仪	334
四、QG—17型高频晶体管 N_F , K_P 参数测试仪	336
§6—3 半导体逻辑集成电路电参数测试	339
一、半导体小规模逻辑集成电路电参数测试	339
二、半导体中大规模逻辑集成电路电参数测试	343
§6—4 半导体逻辑集成电路测试系统简介	352
一、大规模集成电路测试系统	355
二、半导体存储器测试系统简介	359
三、国内有关仪器简介	362
§6—5 半导体模拟集成电路电参数测试	367
一、输入特性及其测量	367
二、输出特性及其测量	370
三、传输特性及其测量	371
§6—6 半导体模拟集成电路电参数测试仪	373
§6—7 半导体器件参数测试仪展望	374
第二部分 电子元件参数测试仪	376
§6—8 电子元件参数测量仪器的分类	376
一、电阻参数测量仪器	376
二、电容参数测量仪器	377
三、电感参数测量仪器	377

四、元件参数综合测量仪器	377
五、Q表	378
§6—9 电子元件参数测量仪器基本原理	378
一、电桥	378
二、谐振法	382
§6—10 元件参数测试仪器简介	383
§6—11 电子元件参数测试仪简略表	387
§6—12 电子元件参数测试仪展望	389
文献	390

第七章 微波传输线和元件

§7—1 概述	391
§7—2 微波传输线	394
一、TEM波传输线	394
二、矩形波导	406
三、圆波导	415
§7—3 微波元件	417
一、连接元件	417
二、终端元件	422
三、匹配元件	427
四、衰减和相移元件	431
五、分支和桥式元件	437
六、过渡元件	441
七、定向耦合器	445
八、微波滤波器	447
九、波长计和晶体检波器	451
十、驻波测量线	455
十一、隔离器	457
十二、环行器	459
§7—4 微波元件的发展趋向	460
附录	464

第八章 智能化测试系统

§8—1 智能化测试系统的特点与构成	468
一、概述	468
二、智能化测试系统基本组成	469
§8—2 仪器的电调与程控	469
一、电调原理概述	469

二、程控原理概述·····	474
三、仪器测试数据的输出·····	478
四、程控仪器接收与传送数据的编码格式·····	479
§8—3 接口系统·····	481
一、概述·····	481
二、IEEE—488标准接口系统·····	483
三、CAMAC—488标准接口系统·····	510
文献·····	513

第九章 电子测量仪器的安全使用和维护技术

§9—1 概述·····	514
§9—2 电源供电·····	514
§9—3 仪器选择·····	517
§9—4 仪器接口·····	520
§9—5 仪器校准与检修·····	523
§9—6 仪器维护与保养·····	539
文献·····	541

第一章 电压测量仪器

§—1 概 述

在电子技术领域中,电压是最重要的基本参量之一。许多电参量,如电子设备的灵敏度、频率特性、选择性、增益、衰减、调制度、失真度、效率以及噪声系数等技术指标均是电压的派生量;各种电路的工作状态,如静态工作点、谐振、差拍、平衡等,通常也是用电压量来表征的;电子设备的控制信号、反馈信号、报警信号以及其它信息也主要地表现为电压量。因此,为适应各种测量要求而设计的类别繁多的电压测量仪器成为我们现在生产科研、实验工作中必不可少的工具。

为了正确地选择和使用电压测量仪器,了解电压测量的基本要求是十分重要的。

一、电压测量的基本要求

根据欲测电压信号的性质,进行正确的电压测量必须满足下列基本要求:

被测电压的频率必须在电压表频率有效范围内。

测量电压时,必须十分注意被测电压的频率,因为任何电压表都有一定的测量频率范围,也就是说,电压表只有在它规定的频率范围内,指出值才能保证达到规定的测量精度,否则将产生很大的误差。一般要求电压表的频率范围越宽越好。

被测电压必须在电压表的量程范围内。

在实际工作中,需要测量的未知电压可能小至零点几微伏($10^{-7}V$),高至数万伏。为了进行正确的测量,就必须正确选择电压表的量程,不仅必须使该量程的极限值高于被测电压,而且应选择该量程的极限值接近被测电压值,以便获得清晰、精确的测量结果。

必须考虑被测未知电压的波形和所用电压表的波形响应。

所有直流电压表均是用纯直流定度的。除非特殊注明,所有交流电压表均是用纯粹的(失真度极小的)单频正弦交流电压有效值定度的。这就是说,只有当被测直流电压是纯直流时,或被测交流电压是不失真的正弦波时,电压表的指示值才在电压表规定的测量误差范围内。在实际的测量中,被测电压往往不如上述那样简单,例如,被测直流电压上可能叠加了某些可观的交流干扰电压,被测交流电压可能不是单频纯正弦波。图1—1—1示出了几种有代表性的被测电压波形图,当在这些情况下进行测量时,必须仔细考虑电压表的波形响应,否则电压表指示值将与被测电压值之间产生很大误差,甚至使测量结果失去意义。

电压表的输入阻抗应远高于被测电压二端之间的输出阻抗。

测量电压时,为使被测电路工作状态不受电压表的影响和保证测量的精确度,要求电

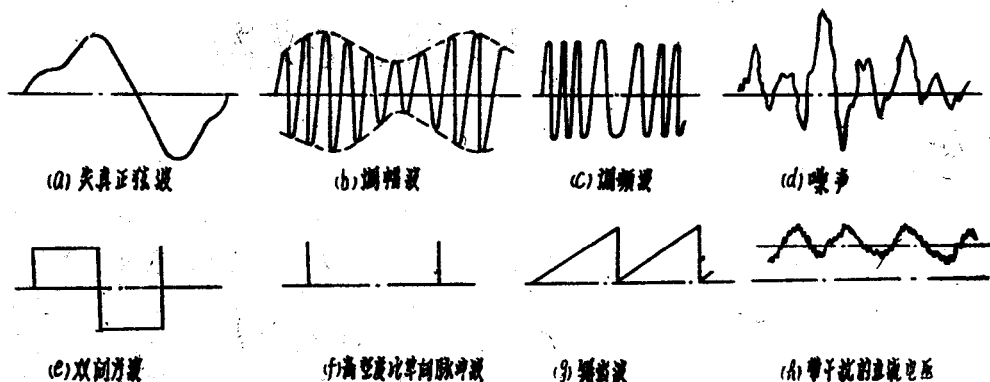


图 1—1—1 几种典型的电压波形

压表的输入阻抗尽可能小。在测量高频电压时，输入电容特别值得重视。因为，当频率高时，输入电容容抗变低，如 $3PF$ 的输入电容，当工作频率为 $1MHz$ 时，容抗为 $53K\Omega$ ，而工作频率有 $1GHz$ 时，容抗只有 53Ω

电压表的精确度应优于电压测量要求的精确度。

二、电压测量仪器的主要特点

应用电子技术、计算技术和自动控制技术发展起来的电子电压表具有以下几个特点：

1. 频率范围极广

目前，电压表的频率范围大约从0赫一直到几个 GHz 。近年来随着 $7mm$ 、 $3.5mm$ 等超小型同轴电缆的相继研究成功，电压表的上限频率到1972年就已达到 $36GHz$ 。

2. 可测电压范围极宽

通常，电压表可测电压上限在 $1000V$ 以下，少数可达几十千伏~几百千伏。电压表可测电压的下限，一般为零点几微伏($10^{-7}V$)到几毫伏。随着科学技术的发展，数年前国外已生产出分辨力达 $10^{-9}V$ ($1nV$)的直流数字电压表。而利用约瑟夫逊效应，已能测出 $10^{-12}V$ 的电压(理论上可达 $2.07 \times 10^{-17}V$)。

3. 输入阻抗极高

电压表的输入阻抗由输入电阻和输入电容两部分并联组成。

影响输入电阻的因素比较多，而且它不是一个常数。直流时，输入电阻可以做得很高，一般电压表为 $1M\Omega \sim 10M\Omega$ ，高质量的直流数字电压表可做到高达几千 $M\Omega$ 。但是，随着工作频率的增高，输入电阻将大大下降。

输入电容主要受到器件及结构尺寸的限制，一般电压表的输入电容可作到 $1-10PF$ 左右。

4. 测量精确度可做得很高

对直流电压，利用数字电压表很容易使测量精度达到 $10^{-4} \sim 10^{-6}$ 甚至更高。

对交流电压,随频率及电压数值的不同,交流电压表的测量精度差异很大,大多在 10^{-2} 量级,最高可做到 10^{-5} 量级。

5. 易于实现多功能化、数字化、自动化

三、电压测量仪器的分类

电压测量仪器有许多分类法,通常,按读数显示方法分为两类:一类是被测的电压转换成电表指针的机械偏转,称为模拟式电压表;另一类是应用数字技术,把被测的电压用数字量显示出来,称为数字式电压表。按被测电压的频率又可分为三大类:直流电压表,超低频电压表($0.00001\sim 1\text{Hz}$),交流电压表(几 $\text{Hz}\sim$ 几 GHz)。

在种类繁多的电子电压表中,由于技术(包括电路及工艺方面)、经济和使用方面等原因,它们的性能往往都只能具有一个方面或几个方面的特点,因此它们各自存在着一定的使用局限性。例如,有的灵敏度较高(mV 级),但频率范围不宽(几十赫到几百千赫或视频 10MHz 以下);有的工作频率可作得较高(例如,达几百兆赫以上),但却只能测量较高的电压(1V);有的虽然可在几百兆赫甚至几千兆赫的频率范围内测量出很低的电压(μV 级),但测量精度不高,操作也较复杂。

目前,新型的电压表将传统的电子测量技术、计算技术、自动化技术紧密地结合在一起,向着宽频段、高灵敏度、高精度、多功能、数字化及自动化方向发展。这些电压表实际上是一个综合电压测量系统,它们虽然具有十分优越的技术性能,但是造价昂贵,需要较高的技术水平维护。因此,它们不可能代替日常大量使用的常规电压表,而主要用于精密测量及科研部门和高级实验室中。

§1—2 电压测量仪器

一、电子电压表基本部件

电子电压表最基本的部件包括有,电子放大器,新型的交一直流变换器和模—数变换器。

(一) 电子放大器

为了提高电压测量的灵敏度,现代电压表几乎无例外地都采用各种放大器:交流放大器、直流放大器、运算放大器等。为了保证这些放大器具有优越的性能,它们均采取了深度负反馈的措施。

电压表中交流放大器的功能,是将被测微弱电压不失真地放大到需要的电平,因此它们必须有足够高的放大倍数和足够宽的通频带,足够高的输入阻抗、足够宽的动态范围(即在此范围内,保证放大器的输入与输出电压之间有良好的线性关系),足够小的非线性失真,足够小的噪声(这时 1mV 以下微弱电压测量尤为重要)。

至于电压表中使用的直流放大器除了应具备交流放大器类似特点以外,还要求它具有

小的零点漂移。所谓零点漂移指的是，当放大器的供电电压不稳，电路中元件参数变化，尤其是环境温度变化时，将引起放大器输出端电位发生变化（表现为缓慢的漂移），电压表指示值也随之发生变动，从而造成严重的测量误差。放大器的放大倍数越大，如不采取特殊措施）零点漂移也越大。所以，在要求放大倍数不高的电压表中，直流放大器均采用简单的对称差动放大电路，在要求放大倍数高的高灵敏度的电压表中，直流放大器通常采用各种低零漂低噪声的调制型（斩波式）直流放大器电路。

在调制型直流放大器中，关键元件是斩波器，它可分为可变电阻式和可变电抗式两类。

可变电阻式斩波器包括：机械斩波器、二极管斩波器、晶体管斩波器、场效应管（FET）斩波器、光电斩波器和霍尔效应斩波器等。

可变电抗式斩波器包括：磁调制式斩波器、振动电容式斩波器、变容二极管式斩波器和感应导电式斩波器等。

目前，在电压测量仪器中，用得最为广泛的斩波器是：机械斩波器、场效应管斩波器、光电斩波器。

机械斩波器的主要优点是，输入阻抗高（高达 $10^5 \sim 10^7 \Omega$ 以上）、漂移小、变换效率高、噪声低及灵敏度高、受温度影响小。它的主要缺点是使用寿命短（一般为5000~20000小时），不能经受较强的振动，使用频率低（一般为50Hz或400Hz，个别达1KHz）。由于机械斩波器具有低噪声、低漂移的突出优点，因此直到现在仍在许多精度较高的仪器中被广泛的应用着。

另一类用得较为普遍的是场效应管斩波器。与晶体管斩波器相比，它具有输入阻抗高、噪声低、效率高、稳定性好、动态范围宽、漂移较小等优点。

光电斩波器的突出优点是有机触点，可靠性很高，寿命长，这在近代发展的全固态设计中具有重要意义，另外，对电磁干扰不敏感，仪器便于屏蔽，噪声很小。它们的主要缺点是，由于光电器件惰性大，调制频率做不高，及光敏电阻值随温度变化较大。基于它的突出优点，近年来发展很快，例如：法国TE925型毫微伏五位直流数字电压表（最低量程 $10\mu V$ ，灵敏度 $1\mu V$ ）中前置直流放大器就是采用的这种调制放大器。

（二）基本检波器

检波器是实现交一直流变换的主要部件，它的任务是把交流电压变换成直流电压，它不仅是一般交流电子电压表的关键部件之一，也是交流数字电压表的重要组成部分。本节着重介绍三种最基本的检波器——平均值检波器、峰值检波器、有效值检波器的基本工作原理。

1. 交流电压的表征

一个交流电压的大小，可以用平均值、峰值、有效值来表征。下面分别介绍其意义。

峰值 $\hat{U}$

任意一个电压 $u(t)$ ，在所观察的时间或一个周期内，其电压所能达到的最大值，称为该交流电压的峰值，记为 $\hat{U}$ ，如图1—2—1所示。

由图1—2—1可见，一般情况下，正峰值 $\hat{U}_+$ 与负峰值 $\hat{U}_-$ 不相等，当 $u(t)$ 的平均分量