

中央广播电视大学教材

电子仪器和测量原理

张学庄 张学孚 廖翊希 魏春珍 简德华 编著 董诗白 张

中央广播电视大学教材

电子仪器和测量原理

张学庄 张学孚 廖翊希 魏春珍 简德华 编 著
童诗白 张乃国 审 校

人民邮电出版社

内 容 提 要

本书是中央广播电视大学“电子仪器和测量原理”课程的教学用书。书中系统讲解了常用的电子仪器和测量原理,内容包括:示波器、晶体管特性图示仪、频率特性测试仪、频率时间测量方法及仪器、电压测量方法及仪器、电路参数的测量方法及仪器、信号发生器、逻辑量测试方法及仪器、误差分析与数据处理,以及电子仪器的维修。讲述具体、详细,实用性强,便于教学和读者自学。

中央广播电视大学教材

电子仪器和测量原理

Dianziyiqi he celiang yuanli

张学庄 张学孚 廖翊希 魏春珍 简德华 编 著
童诗白 张乃国 审 校

责任编辑 高丕武

人民邮电出版社出版

北京东长安街27号

北京第二新华印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行

各地新华书店经售

开 本: 787×1092 1/16 1988年12月 第 一 版
印 张: 26¹²/₁₆ 页数: 214 1988年12月 北京第1次印刷
字 数: 672 千字 插页: 2 印数: 1—11 000 册

ISBN7-115-03759-0/TN·161

定价: 5.40元

前 言

本书是根据中央广播电视大学理工科“电子仪器和测量原理”课程的教学大纲而编写的。在编写当中，考虑到远距离教学的特点，我们力求使内容通俗易懂，便于学员自学。同时，作为成人教育的教材，必须使理论同实际结合起来，既要保证理论的系统性，又要紧密联系实际应用，因而，我们在精选内容的基础上，对电子仪器的工作原理、功能和使用都有较细致的介绍。

本书1~4单元由湖南广播电视大学张学孚副教授编写，5~6、13~15单元由湖南广播电视大学廖翊希副教授编写，7~8、18单元由中南工业大学张学庄教授编写，9~11单元由贵州广播电视大学魏春珍副教授编写，12、16~17单元由四川广播电视大学简德华副教授编写。

书稿完成后，蒙清华大学童诗白教授、张乃国高级工程师审阅和修改，谨此致谢。

在本书编写过程中，中央广播电视大学王遵华教授给予了关怀和具体指导，北京市广播电视大学姚行洲老师还提供过7~8单元的初稿，景德镇无线电厂等单位提供了编写资料，在此一并表示感谢。

由于编者水平有限，加之编写时间仓促，书中不足以至错误之处，希望读者批评指正。

编 者
1988年 5 月

目 录

前言

第一单元 概述.....	1
第一节 电子测量的意义及特点.....	1
第二节 基本测量方法.....	3
第三节 电子测量仪器概述.....	7
第四节 电子测量误差的基本概念.....	8
第五节 电子仪器的发展.....	10
第二单元 示波器(一)	
——示波器原理.....	12
第一节 概述.....	13
第二节 波形显示原理.....	15
第三节 示波器的基本原理.....	21
第三单元 示波器(二)	
——典型示波器.....	36
第一节 S R 37 A 型二踪示波器.....	37
第二节 取样示波器.....	57
第三节 存储示波器 J S -3	62
第四单元 示波器(三)	
——示波器的应用.....	65
第一节 示波器的选择和使用.....	65
第二节 基本示波测量.....	70
第三节 示波器功能的扩展.....	84
第五单元 特性曲线测试仪(一)	
——晶体管特性图示仪.....	97
第一节 概述.....	97
第二节 图示仪的基本原理.....	98
第三节 阶梯波发生器.....	100
第四节 Q T -2图示仪及其应用.....	110
第六单元 特性曲线测试仪(二)	
——频率特性测试仪.....	122
第一节 概述.....	122
第二节 动态频率特性的测量原理.....	123
第三节 获得扫频信号的方法和电路.....	124
第四节 频率特性测试仪.....	133

第七单元	频率时间测量方法及仪器(一)	
	——电子计数式频率计	144
第一节	概述	144
第二节	常用的频率测量方法	145
第三节	电子计数式频率计测频原理	149
第四节	电子计数式频率计	164
第五节	数字测频误差	167
第八单元	频率时间测量方法及仪器(二)	
	——通用电子计数器	171
第一节	电子计数器测量周期	171
第二节	电子计数器测量时间间隔	174
第三节	通用电子计数器	175
第四节	提高计数器测频上限和提高测频测时准确度的方法	183
第五节	时基晶振频率的校准	186
第六节	可自校的通用电子计数器	191
第九单元	电压测量方法及仪器(一)	
	——电压测量方法	197
第一节	电压的模拟测量方法	197
第二节	电压的数字测量方法	204
第三节	比较型直流数字电压表	208
第四节	积分型(V-F)直流数字电压表	210
第十单元	电压测量方法及仪器(二)	
	——数字电压表	214
第一节	双积分型直流数字电压表的工作原理	214
第二节	双积分型数字电压表电路原理	218
第三节	双积分型数字电压表单元电路	221
第十一单元	电压测量方法及仪器(三)	
	——数字万用表	248
第一节	概述	248
第二节	参数变换器	249
第三节	A/D变换器和显示电路	255
第四节	数字万用表的使用	259
第十二单元	电路参数的测量及仪器	264
第一节	概述	265
第二节	谐振法测量电容、电感和Q值	271
第三节	电容、电感与Q值的数字化测量	282

第十三单元	信号发生器(一)	
	——低频信号发生器	292
第一节	概述	292
第二节	低频信号发生器	295
第三节	低频信号发生器的使用 and 选型	311
第十四单元	信号发生器(二)	
	——高频信号发生器	314
第一节	高频信号发生器的工作原理	314
第二节	典型电路及其工作特性	316
第三节	高频信号发生器的选择和使用	327
第十五单元	信号发生器(三)	
	——其它类型信号发生器	332
第一节	概述	332
第二节	脉冲信号发生器	333
第三节	合成信号发生器	342
第四节	函数信号发生器	352
第十六单元	逻辑量测试方法及仪器	359
第一节	概述	360
第二节	逻辑量的测试	360
第三节	逻辑分析仪原理	364
第四节	逻辑分析仪举例	372
第十七单元	误差分析与数据处理	382
第一节	测量误差	382
第二节	测量数据处理	392
第三节	最佳测量方案的选择原则	398
第十八单元	电子仪器的维修	401
第一节	电子仪器维修的基本知识	401
第二节	电子仪器检修的步骤	408
第三节	检查故障的一般方法	410
第四节	故障分析与处理实例	414

第一单元 概述

学 习 辅 导

本单元介绍的主要内容是:

电子测量的意义、特点、内容及电子测量的基本方法,选择测量方法的原则;

电子仪器的分类、发展史和发展趋势;

电子测量和电子仪器误差概述。

第一节 电子测量的意义及特点

测量是人类认识和改造自然的重要手段。从定义上讲,测量就是人们为确定被测对象的量值而进行的实验过程。随着科学技术的发展,各学科之间的渗透越来越强,一个问题的研究,往往需要进行大量的测量、统计、分析和归纳工作。在此基础上,测量学逐步发展成为一门完整、精密、理论与实践相结合的学科。

一、电子测量的意义

英国科学家A·H·库克说过:“测量是技术生命的神经系统。我们通过测量认识周围的物质世界,通过测量把这些知识变成数字语言,然后用数学方法把它整理成合乎逻辑的系统;通过测量,可使这种系统性知识借助工程技术来改造物质;世界精密的测量是精确的知识和经济的设计所必需;方便的测量是敏捷的通信和有效的组织所必需。随着测量学的发展,特别是无线电电子学的应用,诞生了以电子技术为手段的测量,称为电子测量。

电子测量涉及到极宽频率范围内的所有电量、磁量以及各种非电量的测量。现在,电子测量已广泛应用于科学研究、实验测试、工业生产、无线电通信、遥测、数据处理以及医学、军事等领域,成为现代科学技术中不可缺少的手段。

电子测量是一门发展非常迅速,与现代科学技术密切相关,并对现代科学技术的发展起着重大推动作用的独立学科。从某种意义上说,近代科学技术的水平是由电子测量的水平来保证和体现的;电子测量的水平,也是衡量一个国家科学技术水平的重要标志之一。

二、电子测量的特点

与其它的测量相比,电子测量具有以下几个突出的特点:

1. 测量频率范围宽

电子测量除测量直流电量外,还可以测量交流电量,其频率范围可低至 $10^{-4}Hz$,高至 $10^{12}Hz$ 左右。如果使用各种传感器,将非电量转化为电量,那么电子测量的使用范围就更广泛。但应注意,在不同的频率范围内,不仅被测量的种类有所不同,即使是测量同一电量,所需要采用的测量方法和使用的测量仪器也往往不同。所以有时把测量或供给同一电量的仪

器, 根据使用频率范围不同而分成许多种, 例如低频信号发生器、音频信号发生器、高频信号发生器等。但是近年来出现了许多可在较宽频率范围内工作的仪器, 则为广大用户提供了一机多用的方便。

2. 仪器量程范围

量程是仪器所能测试各种参数的范围。由于被测电量的大小相差较大, 因而要求测量仪器的量程要很宽。电子测量仪器具有相当宽广的量程。例如, 一台数字电压表, 可以测出从纳伏(nV)级至千伏(kV)级的电压, 其量程达11个数量级; 一台用于测量频率的电子计数器式频率计, 其量程可达17个数量级。

3. 测量准确度高

电子测量的准确度比其它测量方法高得多, 特别是对频率和时间的测量, 由于采用了原子频标和原子秒作为基准, 误差减小到 10^{-13} 量级, 这是目前人类在测量准确度方面达到的最高指标。例如钟表是测量时间最通用的仪器, 一只普通钟表, 一昼夜误差为30秒左右, 其相对误差约为 3.5×10^{-4} , 最好的天文钟的误差为每昼夜0.1秒, 约为 1×10^{-6} 。但是, 目前使用的铯原子钟, 误差为 10^{-12} 数量级, 即几千万年仅差1秒。电子测量的准确度高, 正是它在现代科学技术领域得到广泛应用的重要原因之一。由于目前频率测量的准确度高, 所以人们往往尽可能地把其它参数变换成频率信号再进行测量。

例如, 许多数字式电压表, 就是把电压变换成时间或频率, 然后, 用测量时间或频率的技术和装置来得到被测电压的值。与此相反, 在直读式音频频率计中, 却把频率变换成电压或电流, 再用电压表或电流表读出被测频率值。类似的例子还有很多。

4. 测量速度快

电子测量具有其他测量方法通常无法类比的高速度。这也是它在现代科学技术领域内得到广泛应用的另一个重要原因。例如, 洲际导弹的发射和运行过程中就需要快速测出它的工作参数, 通过电子计算机运算, 再对它的运行发出控制信号, 使其达到预期的目标。对这个过程的测量如果速度较慢, 就不能进行及时调整, 自动控制就会失去作用。随着科学技术的发展, 对测量过程和测量数据处理的速度都提出了越来越高的要求。例如, 在工业自动控制系统中, 对于生产线上进行的“在线测量”或者对于测量结果的数据处理, 都要求高速度, 这样才能及时发出控制信号; 还有, 希望对同一量在相同条件下进行多次测量, 再用求平均值的方法得出测量误差的过程中, 也要用到高速测量, 以保证在短时间内各次测量的环境条件基本不变。

5. 易于实现遥测

电子测量的一个突出优点是可以通过各种类型的传感器实现遥测、遥控。例如, 对于遥远距离或环境恶劣的、人体不便于接触或无法到达的区域(如人造卫星、深海、地下、核反应堆内等), 可通过传感器或通过电磁波、光、辐射等方式进行测量。

6. 易于实现测量过程自动化和测量仪器微机化

由于大规模集成电路和微型计算机的应用, 使电子测量出现了崭新的局面。例如在测量

中能够实现程控、遥控、自动转换量程、自动调节、自动校准、自动诊断故障和自动修复，对于测量结果可以进行自动记录、自动进行数据运算、分析和处理。目前已出现了许多类型带微处理器的自动化示波器、信号发生器、数字式频率计、数字式电压表、数字式频谱分析仪以及受计算机控制的自动化集成电路测试仪、自动网络分析仪和其他自动测试系统。

电子测量技术的一系列优点，使它广泛应用于科学技术的各个领域。今天几乎找不到哪一个科技领域没有应用电子测量技术。大到天文观测、宇宙航天，小到物质结构、基本粒子；从复杂深奥的生命、细胞、遗传问题到日常的工农业生产、医学、商业各部门，都越来越多地采用了电子测量技术和设备。

三、电子测量的内容

随着科学技术的不断发展，测量的内容愈来愈多。电参数的测量分为电磁测量和电子测量两类。前者着重研究交直流电量的指示测量法与比较测量法，以及磁量的测量方法，是“电磁测量”课程的任务；后者是以电子技术理论为依据，以电子测量仪器和设备为手段，对电量或非电量进行测量，是本课程研究的任务。

电子测量的内容包括：

- (1) 电能量的测量，如电流、电压、功率、电场强度等的测量；
- (2) 电路参数的测量，如电阻、电感、电容、阻抗、品质因数、电子器件参数等的测量；
- (3) 电信号特性的测量，如频率、波形、周期、时间、相位、调幅度、调频指数、失真度噪声以及逻辑状态等的测量；
- (4) 电子设备和仪器性能的测量，如放大倍数、衰减量、灵敏度、通频带、噪声指数等的测量。
- (5) 特性曲线的显示，如幅频特性、器件特性等的显示。

上述各种待测电参数中，频率、时间、电压、相位、阻抗等是基本电参数，对他们的测量是其他许多派生参数测量的基础。

另外，随着电子技术的发展，人们力图通过传感器将许多非电量变换成电信号，再利用电子技术进行测量。例如天文观测、宇宙航行、地震预报、矿物探测及生产过程检测中的温度、压力、流量、液面、速度、位移、以及成分分析等，都可以转换成电信号进行测量。

电子测量除了对电参数进行稳态测量以外，还可以对自动控制系统的过渡过程及频率特性等进行动态测量。

第二节 基本测量方法

在测量过程中采用正确的测量方法是非常重要的，它直接关系到测量工作能否正常进行及其有效性。如果测量方法不合理，即使有精密的测量仪器或设备，也不能得到理想的测量结果，甚至会得出错误的结论。因此，必须根据不同测量任务的要求，进行认真分析，找出切实可行的测量方法，然后选择合适的测量仪器组成测量系统，进行实际测量。

一、测量方法的分类

一个物理量的测量，可以通过不同的方法来实现。测量方法的分类方法很多，下面列出的是一些常见的分类方法：

按测量手续分类	- 直接测量 - 间接测量 - 组合测量
按测量方法分类	- 直读测量法 - 比较测量法
按测量方式分类	- 替代测量法 - 指零测量法 - 差值测量法
按被测量性质分类	- 时域测量 - 频域测量 - 数据域测量 - 随机测量
按被测量的距离分类	- 原位测量 - 远距离测量
按自动化程度分类	- 自动测量 - 非自动测量
按测量过程中被测量是否随时间变化分类	- 静态测量 - 动态测量

二、基本测量方法

1. 按测量手续分类

(1) 直接测量 用预先按已知标准量定度好的测量仪器,对某一未知量直接进行测量,从而得到被测量值的测量方法称为直接测量。例如,用数字频率计测频率,用电压表测量晶体管的工作电压,就属于直接测量。

必须注意,直接测量并不意味着就是用直读仪表进行测量。用某些比较式仪器测量,例如用电桥测电阻,虽然不是用直读测量法,但因可以直接从仪器度盘上获得被测量值,故仍属于直接测量。

(2) 间接测量 对一个与被测量有确切函数关系的物理量进行直接测量,然后通过代表该函数关系的公式、曲线或表格,求出被测量值的方法,称为间接测量。例如,要测量集电极电流 I_C ,不必断开集电极电路串入电流表进行直接测量,而可用直流电压表测出集电极电阻 R_C 上的电压值 U_{RC} [见图1-1(a)],然后再除以已知电阻值 R_C ,即求得被测电流

$$I_C = \frac{U_{RC}}{R_C} \quad (1-1)$$

若 $U_{RC} = 2\text{V}$, $R_C = 1\text{k}\Omega$, 则

$$I_C = \frac{2\text{V}}{1\text{k}\Omega} = 2\text{mA}$$

又如要测量某功率放大器的输出功率 P_O ,若没有功率表时,可用间接法测量。如图1-1(b)所示,用一已知电阻 R_L 作为负载,用电压表测量负载电阻上的电压 U_O ,则可计算出功率放大器的输出功率

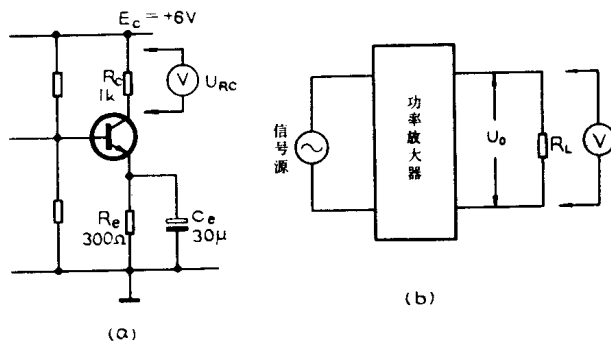


图 1-1 间接测量示例

$$P_o = \frac{U_o^2}{R_L} \quad (1-2)$$

若 $U_o = 2\text{ V}$, $R_L = 8\ \Omega$, 则

$$P_o = \frac{2^2}{8} = 0.5\text{ W}$$

(3) 组合测量 在某些测量中, 被测量与几个未知量有关, 测量一次无法得出完整的结果, 则可改变测量条件并进行多次测量, 然后按被测量与未知量之间的函数关系组成联立方程, 最后求解, 得出各未知量。此种测量方法称为组合测量。它是一种兼用直接测量与间接测量的方法。

例如, 为了测量电阻的温度系数, 则可利用电阻值与温度间的关系公式:

$$R_t = R_{20} + \alpha(t - 20) + \beta(t - 20)^2 \quad (1-3)$$

式中: α 、 β 为电阻的温度系数。

R_{20} 为电阻在 20°C 时的数值。

t 为测试温度。

当 R_{20} 、 α 、 β 都为未知量时, 可采用组合测量法。改变测试温度, 分别在 t_1 、 t_2 及 t_3 三种温度下, 测出对应的电阻值 R_{t1} 、 R_{t2} 和 R_{t3} , 然后代入上述公式, 可得一组联立方程。

$$\begin{cases} R_{t1} = R_{20} + \alpha(t_1 - 20) + \beta(t_1 - 20)^2 \\ R_{t2} = R_{20} + \alpha(t_2 - 20) + \beta(t_2 - 20)^2 \\ R_{t3} = R_{20} + \alpha(t_3 - 20) + \beta(t_3 - 20)^2 \end{cases} \quad (1-4)$$

解此联立方程组后, 便可求得 α 、 β 和 R_{20} 。

上面介绍的三种方法中, 直接测量的优点是测量过程简单迅速, 在工程技术中采用得比较广泛。但有的被测量不便于直接测量时, 则须采用间接测量。

间接测量法比较费时, 仅在缺乏直接测量仪器、不便于直接测量或直接测量误差较大时使用。间接测量法多用于科学实验, 而在生产及工程技术中应用较少。

组合测量比上述两种测量方法都复杂, 而且更费时间。但是它容易达到较高的准确度, 是一种特殊的精密测量方法, 适用于科学实验或一些特殊的场合。

2. 以被测量的性质分类

尽管被测的电参数种类繁多, 但它们总要在一定的电路或网络中以不同的物理现象表现

出自己的特点。这些物理现象有的表现为时间的函数，有的表现为频率的函数，随着计算机的广泛应用，传统的时域或频域测量方法已难以适用需要，引出了数据域测量等新的分支。

(1) 时域测量 以时间为函数的量，例如电压、电流等，它们的稳态值、有效值多用仪表直接测量；它们的瞬时值可通过示波器等仪器显示其波形，以便观测其随时间变化的规律。

(2) 频域测量 以频率为函数的量，例如电路的增益、相位移等，可通过分析电路的频率特性或频谱特性等方法进行测量。

(3) 数据域测量 指对数字量进行测量。例如，用具有多个输入通道的逻辑分析仪，可以同时观测许多单次并行的数据；对于微处理器地址线、数据线上的信号，既可显示时序波形，也可用“1”、“0”显示其逻辑状态。

(4) 随机测量 这是目前较新的测量技术，例如对各类噪声、干扰信号等的测量均属于随机测量。

三、选择测量方法的原则

在测量之前，应首先研究被测量本身的特点、所需要的准确程度、环境条件及所具有的测量设备等，进行综合考虑以确定采用哪种测量方法及选择哪些测量设备。只有这样，才能保证不损坏器件，减小测量误差。否则，可能出现如下几种情况：

1. 测量数据不准确

测量中产生较大的测量误差，使测得值不可信。例如图1-2所示的电压测量中，若 R_o 与 R_u 的阻值接近，则所测电压受到 R_o 分压的影响，从而使测出值偏低。若 $R_o = 80\text{k}\Omega$ ， $R_u = 120\text{k}\Omega$ ， $U = 5\text{V}$ ，则

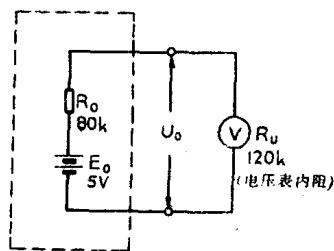


图 1-2 用万用表测高内阻回路电压

$$\begin{aligned} E_o &= \frac{R_u}{R_o + R_u} \times U \\ &= \frac{120}{80 + 120} \times 5 \\ &= 3\text{V} \end{aligned}$$

式中， E_o 为电压表的指示值。可见，实际值为 5V 的电压，测得值为 3V ，误差很大。这时应采用高内阻电压表来测。

2. 损坏测量仪器（仪表）

在测量中若被测量的幅值超出测量仪器（仪表）的量程，则容易损坏测量仪器（仪表）。

3. 损坏被测设备或元器件等

在测量电路参数时，若不考虑仪器加入电路后的影响，往往会产生过大的电流或电压，可能引起被测件的损坏。

因此，合理选择测量方法和仪器是电子测量中的基本问题。

第三节 电子测量仪器概述

所谓测量仪器(仪表),是指用于检测或测量一个量或为测量目的供给一个量的器具,包括各种指示式仪器(仪表)、比较式仪器(仪表)、记录式仪器(仪表)、信号源、稳定电源以及传感器等。利用电子技术测量电(或非电)量的测量仪器,称为电子测量仪器。

电子测量仪器的种类繁多,一般可分为专用仪器和通用仪器两大类。专用仪器是指为某一个或几个专门目的而设计的,一般不能移作它用。例如电视彩色信号发生器只能用来测试彩色电视接收机,不能用来测试雷达或通信接收机,甚至黑白电视接收机也不能用它测试。通用仪器是为了测量某一个或某一些基本电参量而设计的,它能用于各种电子测量。例如电子示波器既可用于雷达和电视设备的测量,也可用于通信机和电子计算机的测量。通用仪器也常用来作为测量系统中的组成单元,也可以作为某些专用设备中的一个构件。

通用仪器按照其功能,可分为如下几类:

1. 信号发生器

信号发生器主要用来提供各种所需的信号。根据用途的不同,有各种波形、各种频率和各种功率的信号发生器。如调频调幅信号发生器、微波信号发生器、脉冲信号发生器、扫频信号发生器、噪音信号发生器、函数信号发生器等。

2. 信号分析仪器

信号分析仪器主要用来观测、分析和记录各种电量的变化。根据显示和记录方式的不同,信号分析仪器可分为时域分析仪和频域分析仪两大类,前者包括各种示波器,后者包括各种波形分析仪和频谱分析仪。

3. 频率、时间和相位测量仪器

频率、时间和相位测量仪器主要用来测量电信号的频率、时间间隔和相位。这类仪器有各种频率计、波长表、相位计,以及各种时间、频率标准等。

4. 网络特性测量仪

网络特性测量仪有阻抗测试仪、频率特性测试仪及网络分析仪等,主要用来测量电气网络的各种特性。这些特性主要指频率特性、噪声特性、阻抗特性、功率特性。

5. 电子元件测试仪

元器件测试仪主要用来测量各种电子元件的各种电参数是否符合要求。根据测试对象的不同,可分为电子管测试仪、晶体管测试仪(图示仪)、集成电路(模拟、数字)测试仪和电路元件(如电阻、电感、电容)测试仪等。

6. 电波特性测试仪

电波特性测试仪是主要用于对电波传播、电磁场强度、干扰强度等参量进行测量的仪器,如测试接收机、场强计、干扰测量仪等。

7. 辅助仪器

辅助仪器主要用于配合上述各种仪器对信号进行放大、检波、隔离、衰减,以便使这些仪器更充分地发挥作用。各种交直流放大器、选频放大器、检波器、衰减器、滤波器、记录器以及交直流稳压电源等均为辅助仪器。

此外,还有近年来发展起来的逻辑分析仪等。

可以看出,电子测量仪器品种繁多,其型号更多。本课程只选取一些应用较广的通用电子测量仪器予以介绍。

第四节 电子测量误差的基本概念

一个物理量在被观测时,能完全明确、肯定地表示一个量的值,称为该量的**真值**(用 A_0 表示)。

在测量过程中,由于人们对于客观认识的局限性,以及测量工具不准确、测量手段不完善、受环境的影响或测量工作中的疏忽等原因,都会使测量结果与被测量的真值不同,这个差异称为**测量误差**。

因为测量误差是在测量中不可避免的,所以,我们对每次测量都有个误差范围的限制。如果误差超过了这个限制,表明测得值与真值相差太大,测量结果以及由此所得到的结论就显得毫无意义。同样,如果测量误差太小,应用中所要求的准确度与之相差太多,那么,为得到这么精确的数值所花费的大量劳动也就没有必要。因此,在测量中,对误差进行研究是十分重要的。在此,仅介绍一些测量误差的基本概念。

一、测量误差的表示方法

1. 几个术语

(1) **约定真值** 指足够接近一个量真值的量。从使用它的目的来考虑,它与真值的差可以忽略不计。约定真值通过借用某种方法或使用高几级准确度的仪器来确定。为了简化,一般情况下,可把约定真值称为真值。

(2) **标称值** 标准器具上标注的数值称为标称值。例如,标准电池上标出的电势为 $1.0186V$,此值即标称值。

(3) **示值** 对于测量仪器,指其指示值(或称测得值),对于供给量仪器(信号源等),指其设置值。

(4) **影响量** 指影响测量仪器示值的任何量,例如温度等。影响量不是测量的对象,它可以是仪器外部的,也可以是仪器内部的。

(5) **准确度** 表征测量仪器的示值与相应的真值接近程度的一种品质。示值越接近真值,则准确度越高。

2. 测量误差的表示方法

(1) **绝对误差** 测得值 X 与被测量的真值 A_0 之差,称为绝对误差。

$$\Delta X = X - A_0 \quad (1-5)$$

在实际测量中, 由于 A_0 无法得到, 可用约定真值 A 代替。因此, 通常使用的表达式为

$$\Delta X = X - A \quad (1-6)$$

ΔX 是具有大小、正负和单位的数值。

与 ΔX 的绝对值相等、但符号相反的值称为修正值 (用 C 表示), 即

$$C = -\Delta X = A - X \quad (1-7)$$

通过检定 (校准), 由上一级标准以表格、曲线或公式的形式给出受检仪器的修正值。因此, 将测得值与已知的修正值相加, 即可算出被测量的约定真值:

$$A = X + C \quad (1-8)$$

在智能仪器和自动测量系统中, 可利用编程或列表的形式将修正值储存起来, 在测量中进行自动修正。

绝对误差能够表示测得值与约定真值的偏差程度, 但不能反映测量的准确度。为此, 引出相对误差。

(2) 相对误差 相对误差是将绝对误差与被测量之值综合考虑的结果, 一般的表达方式 为绝对误差与被测量约定真值之比的百分数:

$$\gamma_x = \frac{\Delta X}{A} \times 100\% \quad (1-9)$$

在已知误差很小或要求不高的场合, 可用示值相对误差表示, 它是绝对误差与仪器示值 之比的百分数, 即

$$\gamma_x = \frac{\Delta X}{X} \times 100\% \quad (1-10)$$

对于测量仪器则用引用误差 (也称满度相对误差) 来表示。它是绝对误差与仪器 (仪表) 量程 (即满度值) X_m 之比的百分数, 即

$$\gamma_v = \frac{\Delta X}{X_m} \times 100\% \quad (1-11)$$

式中 ΔX 如取各分度点绝对误差的最大值时, 称为最大引用误差, 用以表征仪表的准确 度等级。因此, γ_v 是该仪器 (仪表) 准确度的数值, 而不是表示测得值准确度的。

相对误差的对数表达形式, 称为分贝误差。对于电压、电流等电参数

$$\gamma_{dB} = 20 \lg \left(1 + \frac{\Delta X}{X} \right) \text{ [dB]} \quad (1-12)$$

对于功率等电参数

$$\gamma_{dB} = 10 \lg \left(1 + \frac{\Delta X}{X} \right) \text{ [dB]} \quad (1-13)$$

相对误差十分恰当地表示了测量水平。测得值的相对误差越小, 其准确度越高。

二、电子测量仪器的误差

在电子测量中, 由于电子测量仪器本身性能不完善所产生的误差, 称为电子测量仪器的 误差。它包括如下几类。

1. 固有误差

固有误差指在基准工作条件下测得的仪器误差。

基准工作条件,是指一组有公差的基准值(例如环境温度 $20 \pm 2^{\circ}\text{C}$ 等)或有基准范围的影响量(例如温度、湿度、气压、电源电压等环境条件)。

2. 工作误差

工作误差是在额定工作条件内任一值上测得的某一性能特性的误差。在影响量的工作范围内,各影响量的最不利组合点上,产生工作误差的最大值。

3. 稳定误差

由于测量仪器稳定性不好,引起性能特性的变化,产生的误差称为稳定误差。例如,由于元器件老化,使仪器性能对供电电源或环境条件敏感,造成零点漂移或读数变化等现象。

4. 变动量

变动量是反映影响量所引起的误差。当一个影响量相继取两个不同值时,对于被测量的同一数值,测量仪器给出的示值之差,称为电子测量仪器的变动量。

关于误差的研究,在第十七单元中还要作专门的叙述。

第五节 电子仪器的发展

一、电子仪器的发展简史

本世纪初,随着电子管及电子元件的出现,以电子管为主要元件的电子仪器诞生了。电子管电压表、阴极射线示波器、高低频信号发生器等相继出现。

40年代,晶体管问世,但到50年代才广泛应用。此后,采用晶体管的电子仪器越来越多。

60年代初,集成电路问世,采用集成电路制作的电子仪器,特别是数字仪表不断涌现。仪器的准确度大为提高,体积、重量、功耗下降。同时,在工业、科技和军事方面应用的各种电子设备和仪表的种类及数量也越来越多。

60年代后期,计算机开始广泛应用,出现了计算机控制的自动测试系统。

1971年,微处理机问世。1975年,微机化仪器增至七、八十种。现在,微机化仪器的数量已达数千种。在仪器中,采用单片微处理器,就能满足一般的控制与数据处理功能的需要。也有些多功能、高性能的智能仪器采用了多个或多位微处理器。微机化仪器无论在性能方面,还是在可靠性方面,都比传统仪器强。但目前这种仪器价格偏高。

1975年,在美国出现了第一台个人计算机。不久,1981年,美国即推出以Apple-II机为基础的双通道数字存储示波器,这是最早的个人仪器。这种以个人计算机为基础,加适当的内插件、外插件、测试台及相应的软件所构成的测量仪器、测试工具及设备,统称为个人仪器。

近几年来个人仪器发展极为迅速。在电子仪器领域中,从普通的数字万用表,数字计数器、计时器、函数发生器、信号发生器,到复杂的频谱分析仪、逻辑分析仪、自动设计用的逻辑模拟器、开发微机应用的仿真器、大规模集成电路测试仪等,其性能不亚于昂贵的专用仪器。

个人仪器的优点是明显的。以微机为基础,其丰富的软件资源可供仪器处理数据用,