



技工学校电子类通用教材

电子测量与仪器



劳动人事出版社

内 容 简 介

本书是根据原劳动人事部培训就业局、原电子工业部教育局组织制订的《电子测量与仪器教学大纲》编写，供技工学校招收二年制(高中毕业生)和三年制(初中毕业生)使用的统编教材。

本书共八章，主要包括：电子测量与仪器概述；电流、电压与电阻的测量；电感、电容的测量；半导体器件的测量；频率、时间和相位的测量；示波器及其在无线电测量中的应用；失真系数、调制系数和幅频特性的测量；信号发生器及其应用等。

本书也可作为青工培训和职工的自学用书。

本书由天津渤海无线电厂技工学校郭兴环、脱朝元，天津教育出版社王辛编写，郭兴环主编，天津大学王秉钧审稿。

说 明

当前,电子技术迅速发展,国民经济各部门对电子技术的应用日益广泛,对电子类专业技术工人的需求越来越迫切。为了满足技工学校培养电子类专业中级技术工人的需要,不断提高教学质量,加速实现我国的四个现代化,原劳动人事部培训就业局、原电子工业部教育局在前几年组织编写教材工作的基础上,于1986年成立技工学校电子类专业教材编审委员会,委托北京、天津、上海三市的电子工业部门,组织编写技工学校电子类专业通用教材。这次编写的教材有数学、物理、制图、电子电路基础、电子测量与仪器、收录机原理调试与维修、无线电基础、微型电子计算机原理、操作系统、程序设计基础、微型计算机原理及应用、数字逻辑电路、录像机原理、BASIC语言和PASCAL语言等十五种,由劳动人事出版社出版;另有电工基础、晶体管脉冲与数字电路、电视机原理调试与维修、无线电整机装配工艺基础、晶体管原理等五种,仍由天津科技出版社出版。其它课程的教材,以后将陆续组织编写。

上述教材是本着改革的精神组织编写的,力求做到理论与实际相结合,符合循序渐进的要求,从打好基础入手,突出操作技能训练的特点,并且尽量反映当前生产中采用新设备、新材料、新技术、新工艺的成就;力图使培养出来的学生,能够比较系统地掌握专业技术理论知识,学会一定操作技能,具有培养目标要求的文化素质和职业道德品质,以适合电子工业发展的需要。

这套教材供二年制(招收高中毕业生)和三年制(招收初中毕业生)的技工学校的学生使用,也适合青工培训和职工自学使用。在使用教材的过程中,希望读者提出批评和改进意见,以便再版时修订。

劳动部培训司

1988年7月

目 录

第一章 电子测量与仪器概述	1
§1-1 电子测量的意义	1
§1-2 电子测量的基本内容、特点和方法	1
§1-3 电子测量仪器的分类	3
§1-4 测量误差	4
第二章 电流、电压与电阻的测量	9
§2-1 概 述	9
§2-2 直流电流和电压的测量	9
§2-3 电阻的测量	12
§2-4 万用表	15
§2-5 电流、电压、电阻测量举例	23
§2-6 模拟式电压表(电子电压表)	29
§2-7 数字式电压表	33
§2-8 电压测量的发展方向	41
第三章 电容、电感的测量	43
§3-1 概 述	43
§3-2 电压——电流法	43
§3-3 电桥法	47
§3-4 谐振法	50
§3-5 Q表及其应用	53
第四章 半导体器件的测量	59
§4-1 概 述	59
§4-2 二极管的测量	59
§4-3 三极管的测量	63
§4-4 场效应管的测量	67
§4-5 用万用表测量二极管、三极管和场效应管	69
§4-6 集成电路的测量	76
§4-7 JSS-4A型晶体三极管低频h参数测量仪	83
§4-8 JT-1型晶体管特性图示仪	90
第五章 频率、时间和相位的测量	107
§5-1 概 述	108
§5-2 谐振法测量频率	108
§5-3 比较法测量频率	109

§5-4 电子计数器	112
§5-5 E312A型通用计数器	117
§5-6 相位的测量	125
第六章 示波器及其在无线电测量中的应用	130
§6-1 概 述	130
§6-2 示波管的基本工作原理	131
§6-3 波形显示原理	131
§6-4 示波器及其在无线电测量中的应用	133
§6-5 示波器测量的新发展	160
第七章 失真系数、调制系数和幅频特性的测量	155
§7-1 概 述	159
§7-2 失真系数的测量	160
§7-3 调制系数的测量	165
§7-4 幅频特性的测量	172
第八章 信号发生器及其应用	181
§8-1 概 述	181
§8-2 低频信号发生器	181
§8-3 高频信号发生器	185
§8-4 脉冲信号发生器	193
§8-5 合成信号发生器	198
§8-6 立体声信号发生器和调频立体声信号发生器	202
§8-7 电视信号发生器	208

第一章 电子测量与仪器概述

§1-1 电子测量的意义

电子测量是指以电子技术理论为依据,以电子测量仪器和设备为手段,对待测量的电量和非电量所进行的测量。随着电子技术的不断发展,任何一项电子产品的研制和生产都需要进行大量的甚至是非常复杂的测量、数据处理、分析和归纳等工作。没有统一和精确的测量是无法保证产品质量的。如今,电子测量已经成为一门发展十分迅速,使用广泛,精度越来越高,并对现代科学技术的发展起着巨大推动作用的独立学科。从某种意义上说,科学技术发展的迅速很大程度上与电子测量技术水平密切相关。同时,科学技术本身的进步又给电子测量的进一步发展和完善创造了有利条件。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,而后者也是衡量一个国家科学技术水平的重要标志之一。

随着电子技术水平的提高以及新元件、新器件的涌现,各种电子测量仪器又得到了进一步的发展并出现了各种数字式仪器。近年来,电子计算技术的发展十分迅速,自七十年代初期开始,出现了电子计算技术与电子测量仪器相结合的崭新数字化测量系统,这样就可以对若干电参数自动进行测量,并可自动进行量程选择、数据记录、计算结果、修正误差、以至故障检查等。这种高速自动化仪器与测量技术称为“智能仪器与智能测量技术”。它的出现不仅打破了人们长期以来的若干传统观念,而且对整个电子技术和若干近代科学技术产生了巨大影响。例如,由于集成电路向大规模和超大规模发展,在一块硅片上就集成了几千个元器件,如果用一般的电子测量仪器逐个进行测量是根本不可能的,而用电子计算机控制的自动化大规模集成电路测试仪就能迅速自动地进行测试和分选,从而保证了大规模集成电路的质量及其应用。因此,计算技术与电子测量技术融为一体已成为目前电子测量与仪器发展的重要方向。

§1-2 电子测量的基本内容、特点和方法

一、电子测量的基本内容

1. 电能量的测量

如电流、电压、功率等。

2. 电路参数的测量

如电阻、电容、电感、阻抗、品质因数和损耗的测量。

3. 电信号波形参数的测量

如频率、周期、相位、失真度、调幅度、调频指数等。

4. 电路性能的测量

如放大量(增益)、衰减量、灵敏度、频率特性等。

5. 半导体器件的测量

如二极管、三极管、场效应管和集成电路的测量。

二、电子测量的基本特点

1. 频率范围宽

目前电子测量仪器的频率范围,低频端已进入 $10^{-4}\sim 10^{-5}\text{Hz}$,高频端已达 40GHz ($1\text{GHz}=10^9\text{Hz}$)甚至已进入可见光范围约 88THz ($1\text{THz}=10^{12}\text{Hz}$)。近年来由于采用了一些新技术(如取样技术、扫频技术、频率合成技术等)、新的宽频段元器件以及新电路新工艺等,电子测量技术正向着宽频段以至全频段方向发展。宽的工作频率范围,使电子测量仪器的应用更加广泛,使用更加方便。

2. 量程范围广

量程是指被测量的量值范围。如万用表可以测量 $1\mu\text{A}\sim 1\text{A}$ 的电流,量程达六个量级;电子电压表可测几百微伏到一千伏的电压,量程为七个量级;而数字式频率计其量程可达十几个量级以上。

3. 测量准确度高

准确度表示测量结果中的系统误差大小的程度。电子测量准确度比其他测量方法高得多,以时间和频率的测量为例,其准确度可达 10^{-13} 量级,这是目前物理量中测得最准确的一种。

4. 可以进行遥测

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。这对于远距离(如人造卫星)或人体难以接近的地方(如高压)的信号测量,具有特殊的意义。这也是电子测量在各门学科得到广泛应用的又一重要原因。

5. 易于实现自动化测量

目前已经出现了许多不同类型带微处理器的自动化示波器、信号发生器、数字电压表、频率计、频率分析仪以及计算机控制的自动化集成电路测试仪等,为实现自动化测量打下了基础。

三、电子测量方法

电子测量方法正确与否直接关系到测量工作能否正常进行,测量结果的可靠性如何。所以说,如果测量方法不合理,即使有精密的测量仪器或设备,也不可能得到理想的测量结果。

电子测量方法种类很多,目前较多的是按测量手续和方法来分类,有直接测量、间接测量和组合测量。

1. 直接测量

使用预先按照已知标准定度的电子仪器,对被测量值直接进行测定,从而获得数据的方法称为直接测量。例如,用电压表测电压,用电桥测电阻,用频率计测时间等。

必须注意,直接测量并不意味着就是用直读仪器进行测量。许多比较式仪器,如外差频率计、电位差计等虽然不一定能直接从仪器度盘上获得被测量值,但因参与测量的对象就是被测量本身,故仍属直接测量。

2. 间接测量

不是直接对被测量进行测量，而是对与被测量有一定函数关系的其他物理量进行直接测量，然后通过函数关系的公式、曲线、表格求出被测量值，这种测量方法称为间接测量。例如，用电压表先测出回路电阻上的端电压，然后根据欧姆定律就可以算出电流值。一般来说，间接测量法的精确度要比直接测量法低。

3. 组合测量

— 将直接测量法和间接测量法兼用的测量方法，称为组合测量法。这种测量法比较复杂，费时间，但精度较高，一般适用于科学实验。

§1-3 电子测量仪器的分类

一、按功能分类

主要是专用仪器和通用仪器两类。

专用仪器是为特定目的而专门设计制造的，例如收音机生产中的专用信号发生器，它只输出几个特定频率和预定的电平，满足调试的需要。专用仪器的特点是结构简单，使用方便，投资少。

通用仪器通用性较强，故有较宽的使用范围，如电压表、信号源、频率计等。

通用电子测量仪器也可按功能来再分类，见表1-1。

表1-1 通用电子仪器分类

序	类 别	常 用 品 种
1	电平测量仪器	电流表、电压表、毫伏表、微伏表、数字式电压表、矢量电压表、功率计、电平表、标准电压表等
2	电路参数测量仪器 和元件、器件参数测试仪器	RLC测试电桥、电容测试仪、电感测试仪、Q表、欧姆表、绝缘电阻测量仪、阻抗图示仪等 电子管参数测试仪、晶体管参数测试仪、集成电路测试仪、测量线、驻波计等
3	频率时间相位测量 仪	谐振式波长计、外差式波长计、校准测试接收机、电子计数器、石英钟等
4	相位测量仪	矢量表、相敏电压表、数字式相位计、移相器、延时器、群延迟测试仪等
5	波形测量仪器	通用示波器、多踪示波器、取样示波器、超低频示波器、记忆示波器、调制度测试仪、频偏仪等
6	频谱分析仪器	谐波分析仪、频谱分析仪等
7	场强测量仪	测量用天线、测量接收机、场强测量仪等
8	模拟电路特性测试 仪	频率特性测试仪、相位特性测试仪、噪声系数测试仪等
9	数字电路特性测试 仪	逻辑状态分析仪、逻辑时间分析仪等
10	信号发生器	低频信号发生器、高频信号发生器、超高频信号发生器、脉冲信号发生器、扫频信号发生器、频率合成信号发生器
11	电信测试仪	电平振荡器等

二、按使用环境分类

原电子工业部部颁标准规定，电子测量仪器的使用环境分 I、II、III 组。

I 组：应在良好环境中使用，操作要细心，只允许受到轻微的振动。

II 组：可在一般环境中使用，允许受到一般的振动和冲击。

III 组：可在恶劣环境中使用，允许在频繁的搬动和运输中经受较大的振动和冲击。

电子仪器的环境条件见表1-2。

表1-2 电子仪器的环境条件

组别	额定使用范围试验				
	温度			湿度	
	最低 (°C)	最高 (°C)	试验时间 (h)	相对湿度% (°C)	试验时间 (h)
I	+10	+35	4	80(35)	48
II	-10	+40	4	80(40)	48
III	-40	+55	4	90(35)	48

组别	贮存、运输条件试验						
	温度				湿度		
	最低 (°C)	最高 (°C)	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	-40	+55	4	4	90(40)	48	24
II	-40	+55	4	4	90(40)	48	24
III	—	+70	4	4	—	—	—

电子仪器还可以按频段或工作原理分类。

§1-4 测量误差

一、误差的基本概念

通过电子测量所获得的数据，由于测量手段、测量方法、测量环境等影响，被测量的结果总是偏离真值(真实数值)，这样的偏差叫误差。真值是在某一时刻、某一位置或状态下，被测物理量的真正大小。在应用中，应根据所测误差的需要，用尽可能近于真值的数值来代替真值。如仪表指示值加上修正值后，就可作为真值。

二、测量误差的分类

按误差表示方法分类，有绝对误差、相对误差。

1. 绝对误差

绝对误差是测量仪表的指示值(X)与被测量真值(A_0)之间的差值。绝对误差为

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

由于真值 A_0 一般无法求得，所以在实际应用中常以高一级标准仪表的示值即实际值 A 来代替 A_0 ，因此

$$\Delta X = X - A \quad (1-2)$$

必须指出：高一级标准仪表也有误差，仅仅小一些而已，故 $A \approx A_0$ ，但 A 总比 X 更接近于 A_0 ，所以通常所指的绝对误差都是按上式定义。由于它是以代数差的形式给出误差的绝对

值大小及符号, 故称绝对误差。

例如, 用普通电流表测电流其示值 $X = 0.78 \text{ mA}$, 如用精密标准电流计测得实际值 $A = 0.76 \text{ mA}$, 那么绝对误差即为

$$\Delta X = X - A = 0.78 - 0.76 = 0.02 \text{ mA}$$

必须指出, 绝对误差是有单位的量, 有符号的量。

与绝对误差 ΔX 相等而符号相反的值, 就是修正值, 用 c 表示

$$c = -\Delta X = A - X \quad (1-3)$$

例如, 用电压表测电压其示值 $X = 4.60 \text{ V}$, 已知电压表在这一点上的修正值 $c = -0.03 \text{ V}$, 则被测电压的实际值为

$$A = 4.60 - 0.03 = 4.57 \text{ V}$$

修正值不一定是具体的数, 也可以是曲线、公式或数表。

2. 相对误差

由于绝对误差往往不能说明测量质量的好坏, 即不能说明测量的准确度, 故一般采用相对误差。

(1) 实际相对误差 r_a 。实际相对误差用绝对误差 ΔX 与被测量的实际值 A 的百分比来表示, 即:

$$r_a = \Delta X / A \cdot 100\% \quad (1-4)$$

如前面测电流的例子: $\Delta X = 0.02 \text{ mA}$, $A = 0.76 \text{ mA}$, 则

$$r_a = \frac{0.02}{0.76} \approx 2.6\%$$

(2) 示值相对误差 r_x 。示值相对误差用绝对误差 ΔX 与仪表的示值 X 的百分比来表示, 即

$$r_x = \Delta X / X \cdot 100\% \quad (1-5)$$

在上述例子中, 已知 $\Delta X = 0.02 \text{ mA}$, $X = 0.78 \text{ mA}$, 故

$$r_x = \frac{0.02}{0.78} \approx 2.6\%$$

由上例可见, 当 r_a 及 r_x 之值不大时 (小于百分之几), A 与 X 很接近, 两者统称相对误差。当误差本身比较大 (大于 $5\% \sim 10\%$) 时, r_a 及 r_x 差别较大, 必须注明是实际相对误差 r_a 还是示值相对误差 r_x , 在大多数情况下, r_x 计算比较方便。

(3) 满度相对误差 r_m 。满度相对误差又称引用误差, 是用绝对误差 ΔX 与仪表的满度值 X_m 之比来表示, 即

$$r_m = \Delta X / X_m \cdot 100\% \quad (1-6)$$

电工仪表是按 r_m 值来分级的。常分 0.1 、 0.2 、 0.5 、 1.0 、 1.5 、 2.5 和 5.0 共七级。 0.5 级的电表就是 $r_m \leq \pm 0.5\%$ 。

例如, 某万用表为 2.5 级, 用 10 mA 档输入一电流, 读数为 5 mA , 试问相对误差为多少?

$r_m = \pm 2.5\%$, 满度时绝对误差 $\Delta X = \pm 2.5\% \times 10 \text{ mA} = \pm 0.25 \text{ mA}$, 那么在 5 mA 处的相对误差 $r_x = \pm 2.5\% \times \frac{10}{5} = \pm 5\%$ 。

由于满度相对误差 r_m 的分母是量级上限, 因此 r_m 的数值总是小于或等于示值相对误差, 对一个量程来说, X_m 是一个常数, 故 r_m 提供的实际上只是绝对误差。

为了减小示值误差,在选择指针式电表时,应尽可能使指针接近于满偏转(达满刻度的2/3以上)。但是,用万用表测电压时,选用量程越低,万用表测量内阻也就越小,故由于输入电阻的引入,误差也越大。另外,用万用表测电阻时,应尽可能使指针指到刻度盘中心位置附近,这时示值误差最小。

(4) 分贝误差 用分贝表示的相对误差,在电子测量仪器中应用十分广泛。当误差本身不大时,它与一般的相对误差之间有如下的简单关系。

对电流、电压类电参数:

$$r_{dB} \approx 8.69 r_x (\text{dB}) \quad (1-7)$$

$$r_x \approx 0.115 r_{dB} \quad (1-8)$$

对功率类电参数:

$$r_{dB} \approx 4.3 r_x (\text{dB}) \quad (1-9)$$

$$r_x \approx 0.23 r_{dB} \quad (1-10)$$

例如, DW-3型高频微伏表,测电压的误差为1.5dB,如用一般相对误差表示,则

$$r_x \approx 1.5 \times 0.115 \approx 0.17 = 17\%$$

三、测量误差的来源及性质

1. 仪器误差

人们将所有与仪器有关的误差,统称为仪器误差,它包括:

(1) 读数误差,如仪器在出厂前进行校准后仍存在的校准误差,每台仪器不可能具有完全一样的刻度误差,两个刻度标志之间的数据需要估计造成读数分辨误差,数字仪表中量值转化为数字时出现的 ± 1 的误差称为量化误差。

(2) 仪器内部元器件热噪声等引起的测量灵敏度受到限制,从而带来的内部噪声误差。

(3) 动态误差,在进行动态测量时,人们常常快速测读结果,但在观察时电路中常会出现显示的结果尚未达到稳定状态,这就必然造成动态误差。

(4) 稳定误差,是由仪器中电子器件的老化、电源电压的变化等所导致,相对说是比较稳定的误差。

因为仪器所带来的误差是多种多样的,凡上述没有包括的误差都归纳为其它误差。

2. 使用误差

这是泛指与测量过程中因操作不当而引起的误差,也称操作误差。

3. 人身误差

由于人的感觉器官不完善所产生的误差。

4. 影响误差(环境误差)

由于测量工作受外界影响(如温度、湿度、气压、电磁场、光照、声音、放射线、机械震动等)产生的误差。

5. 方法误差

由于测量时所使用的方法不完善、所依据的理论不严密或测量定义不明确等所导致的误差。

例如:用谐振式波长计测频率,常选用

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (1-11)$$

来获得测量结果。严格讲这个公式是不完善的，它是假定 L 、 C 中的损耗 r_L 与 r_C 均为零的前提下才准确。所以，应用下式计算

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \cdot \sqrt{\frac{1-r_L^2 \cdot C/L}{1-r_C^2 \cdot C/L}} \quad (1-12)$$

这种误差称为方法误差。

如果按照误差性质分类，有系统误差、随机误差和粗大误差三大类。

1. 系统误差

在一定条件下，凡误差的大小和符号固定不变或按某种确切函数规律变化的误差，称为系统误差。它表明了一个测量结果偏离真值或实际值的程度，一般用正确度来表征系统误差大小，系统误差越小，正确度越高。

2. 随机误差

随机误差，又称偶然误差。这是一种在单次测量时误差可大可小、可正可负，但多次测量其平均值趋于零的误差。随机误差没有确切的函数关系，所以它不是系差。然而它服从随机变量的规律，如果通过大量的观测，是可以确定出它的统计规律的。精密度用以反映偶然误差大小的程度，而准确度(精确度)则反映了系统误差和偶然误差它们综合误差大小的程度。

3. 粗大误差

粗大误差是明显歪曲测量结果的误差。这种误差来自测量方法不当、影响较大的偶然因素或粗心等原因。

例如，用一块内阻为 $10\text{ k}\Omega/\text{V}$ 、量程为 2.5 V 档的万用表去测量一放大器，如图 1-1 所示。

分别测得 $U_b = -0.88\text{ V}$ $U_e = -0.92\text{ V}$ ，然后计算得出 $U_{be} = U_b - U_e = +0.04\text{ V}$ 。根据上述测量结果，放大器必然处于截止状态，而实际放大器却工作正常，且 $U_{be} = -0.32\text{ V}$ 。这是由于该万用表 2.5 V 档内阻仅为 $2.5 \times 10 = 25\text{ k}\Omega$ ，它并联在基极与地之间，显著减小了下偏置电阻，测出的 U_b 值就比实际值小，这属于测试方法不当，应该直接测基极和发射极之间的电压或选用高阻抗电压表测量。

四、减小误差的方法

对任何一物理量的测量，除应对待测项目的工作原理有比较清楚的了解外，还应掌握测量的方法，才能准确迅速地完成任务。

从误差的来源着手去减小误差，这是最根本的途径和最有效的措施。

1. 减小方法误差

一是对被测量对象选用合理的测量方法，二是选用合理精度的仪器仪表，最后还要有一个合理的测试环境。

2. 减小使用误差

最好的办法是测量前详细阅读仪器的使用说明书，严格遵守操作规程，提高实验技巧和对各种现象的分析能力。

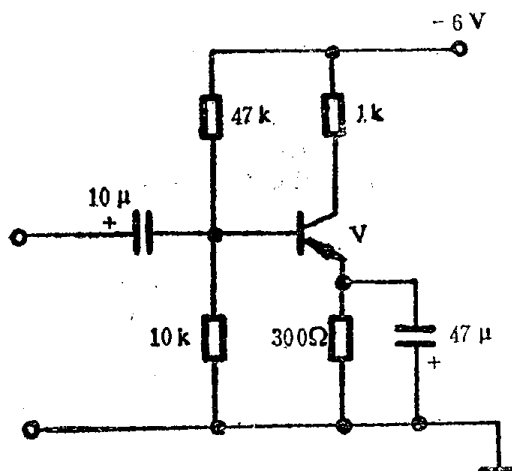


图1-1 放大器电路图

3. 减小人身误差

除人的耳、眼等感觉器官所产生的不可克服的因素外，应尽量提高操作技巧和改进方法，减小和改善人身误差。

1. 减小仪器误差

因为仪器误差主要产生于仪器本身，所以按时计量和校准，正确使用仪器仪表是减小仪器误差的重要环节。

习 题

1. 什么叫电子测量？电子测量的方法有哪几种？

2. 测量误差有哪几种？怎样减小误差？

3. 解释下列各名词：

绝对误差、相对误差、系统误差、随机误差。

4. 用0.5级上量限250V的电压表测220V和110V电压，试计算并比较两次测量的最大相对误差？

5. 被测量的实际值电压为10V，现有：

(1) 150V，0.5级电压表一只

(2) 15V，2.5级电压表一只

问：选择哪只电压表测量误差较小？

第二章 电流、电压与电阻的测量

§2-1 概 述

电流、电压与电阻的测量是电子测量的基本内容。电流、电压的测量包括直流电流、电压和交流电流、电压。交流电流、电压又有低频和高频之分。电阻的测量包括直流电阻和交流电阻。但在工频范围内，交流电阻与直流电阻是近似相等的。

直流电流、电压和交流(工频)电流、电压可以使用电工仪表如交直流电流表、电压表和万用表等测量，高频电压可以使用电子电压表测量。在电子线路中，电压的频率可以从直流到数百兆赫范围内变化，这就需要有从测量直流到数百千赫的低频电压表，以及从几百千赫到数百兆赫的高频或超高频电压表来测量。对于微伏级或微伏以下的直流或交流电压必须用灵敏度很高的电子电压表或多位数字电压表来测量。同时，电子线路简化成等效电路其等效电阻往往在几千欧至几兆欧数量级，由于测量仪器的输入阻抗就是被测电路的额外负载，为了使仪器的接入对被测电路的影响尽量小，因此要求测量仪器应具有较高的输入电阻。电阻的测量可以通过欧姆表、阻抗电桥等实现。

本章主要讲述电流、电压和电阻的基本测量方法，重点介绍万用表和电子电压表、数字电压表的原理和使用。

§2-2 直流电流和电压的测量

一、直流电流的测量

测量电流用的仪表称为电流表，电流表必须和电路串联，如图2-1a所示。为了使电流表的接入不影响电路的原始状态，电流表本身的内阻要尽量小，或者说与负载阻抗相比要足够

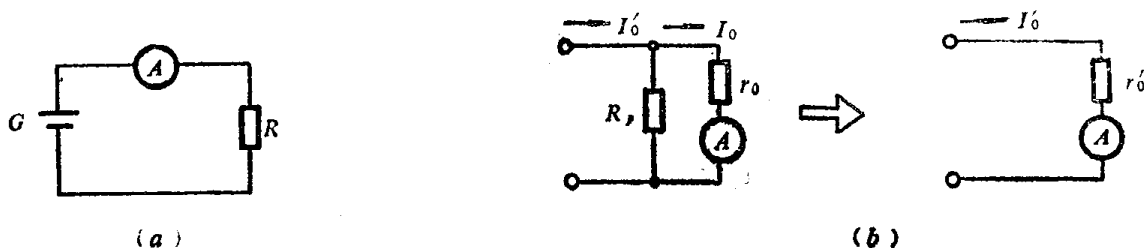


图2-1 电流表的接线

(a) 电流表直接接入 (b) 电流表与分流器并联接入

小。否则，被测电流将因电流表的接入而发生变化。

电流表的测量范围通常称为量程。电流表按其量程的不同，可分为安培表、毫安表、微安表。任何电流表，它的量程是一定的，不能在超过量程的情况下使用。例如，量程为1安

培的电流表,就不能用来测量超过1安培的电流,否则就可能烧毁电表。为了测量更大的电流,就必须扩大电流表的量程。扩大电流表量程的方法,通常采用分流器。分流器实际上就是一个和电流表并联的低值电阻,用以分走部分被测电流,如图2-1b所示。设电流表原先的满度值为 I_0 ,内阻为 r_0 。要求将满度值扩大到 I'_0 ,显然,电流量程扩大的倍数

$$n = \frac{I'_0}{I_0}$$

分流电阻为

$$R_p = \frac{r_0}{n-1} \quad (2-1)$$

扩大量程后的电流表的内阻发生了变化,用 r'_0 表示,它等于 r_0 和 R_p 的并联值即

$$r'_0 = \frac{r_0 \cdot R_p}{r_0 + R_p} = \frac{r_0}{n} \quad (2-2)$$

例2-1 有一电流表,满度值为 $100\mu\text{A}$,内阻为 $1\text{k}\Omega$,要求将量程扩大到满度值为 1mA ,求分流电阻和量程扩大后的内阻值。

解 量程扩大倍数

$$n = \frac{1000}{100} = 10$$

分流电阻

$$R_p = \frac{1000}{10-1} \approx 111.1\Omega$$

扩大量程后的内阻

$$r'_0 = \frac{1000}{10} = 100\Omega$$

二、直流电压的测量

测量电压用的仪表,称为电压表。测量电压,电压表应跨接在被测电压的两端,即和被测电压的电路或负载并联,如图2-2a所示。

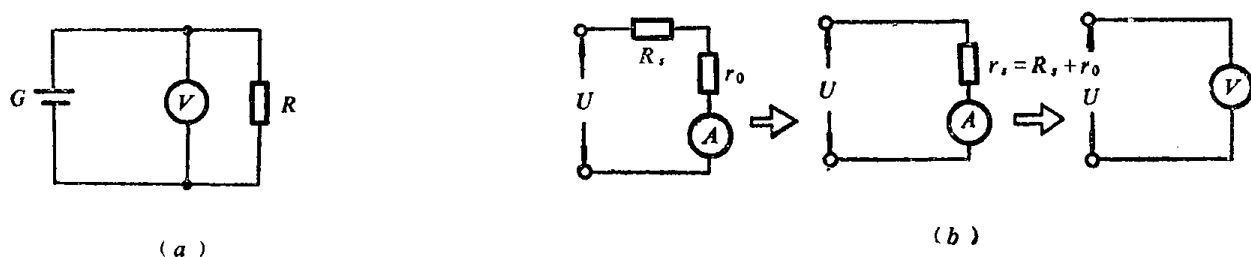


图2-2 电压表的接线

(a) 电压表直接接入 (b) 电流表通过串联电阻接入

为了不影响电路的工作状态,电压表的内阻应尽量大,或者说与负载阻抗相比要足够大,以免由于电压表的接入而使被测电路的电压发生变化,影响测量的准确度。

电压表的工作原理是以电流表为基础的。设已知电流表的内阻 r_0 和满度电流 I_0 ,则由欧姆定律可求得电表端电压 $U = r_0 I_0$ 。

因此,将电流表的刻度直接刻成电压值,这只电流表就成为一只电压表了。

例2-2 一只满度值为 $100\mu\text{A}$,内阻为 $1\text{k}\Omega$ 的电流表,作为电压表使用,电压的满度值为

$$U_0 = 1 \times 10^3 \times 100 \times 10^{-6} = 0.1\text{V}$$

但是，一般电流表的 r_0 和 I_0 的乘积是很小，约在零点几伏左右，因此，不能用电流表直接测量较大的电压。若将电流表改成一只适当量程的电压表，只需串联适当的电阻 R_s （称为附加电阻）就可以了，如图2-2b所示。

设电流表的满度值为 I_0 ，内阻为 r_0 ，若把它改成一只满度值为 U_0 的电压表，则应串入的电阻 R_s 为

$$U_0 = (R_s + r_0) I_0$$

$$R_s = \frac{U_0}{I_0} - r_0 \quad (2-3)$$

因此，电压表的总内阻 r_s 变为

$$r_s = R_s + r_0 \quad (2-4)$$

例2-3 有一电流表，满度值为 $100\mu\text{A}$ ，内阻为 $1\text{k}\Omega$ ，要改成一只满度值为 100V 的电压表，求串联电阻值？

$$\text{解 } R_s = \frac{U_0}{I_0} - r_0 = \frac{100}{100 \times 10^{-6}} - 1000 = 1000 \times 10^3 - 1000 \approx 1000\text{k}\Omega$$

三、磁电式仪表

在直流电流和电压的测量中，都采用磁电式仪表，它的实际结构如图2-3a所示。固定部

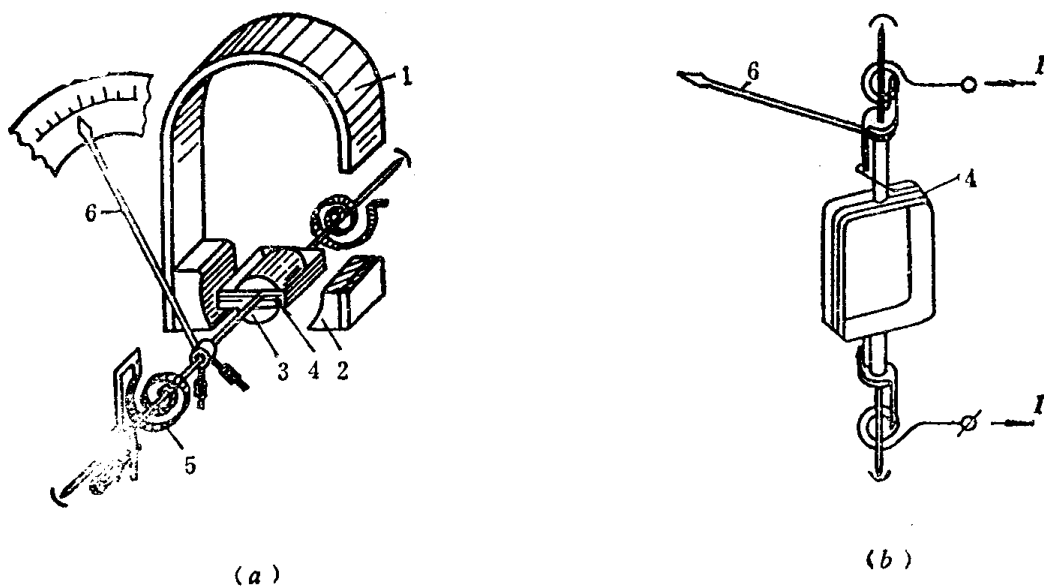


图2-3 磁电式仪表机构

(a) 结构图 (b) 作用图

1—永久磁铁 2—磁极 3—圆柱形铁芯 4—矩形线圈 5—游丝 6—指针

分由永久磁铁1和处在磁极2中间的圆柱形铁芯3组成。可动部分由绕在铝框上的矩形线圈4、支持在轴承上的转轴和游丝5、指针6等部件组成。当矩形线圈通过直流电流时，电流所产生的磁场和永久磁铁的磁场相互作用，如图2-3b所示，使线圈绕轴偏转，偏转角度与通过线圈的电流成正比。

磁电式仪表具有准确、灵敏、功耗小和刻度均匀等优点。因此，在电子测量中获得广泛应用。它不仅可以直接用于电流的测量，而且在电子仪器上可作指示器。在磁电式仪表中加上整流装置，还可以用于交流电量测量。

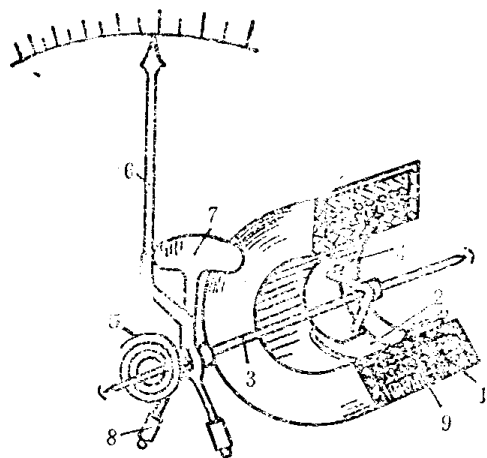


图2-4 电磁式仪表机构

1—固定线圈 2—定铁片 3—转轴 4—动铁片 5—弹簧游丝 6—指针 7—阻尼片 8—平衡锤 9—磁屏蔽

四、电磁式仪表

在交流电流和电压的测量中，通常采用电磁式仪表，它的实际结构如图 2-4 所示。固定部分由圆形固定线圈 1 和装在线圈内部的弧形定铁片 2 所组成。可动部分由装在转轴 3 上的动铁片 4、指针 6、弹簧游丝 5 等部件组成。当线圈通入电流时，处在线圈内部的定铁片和动铁片同时被磁化，两铁片因极性相同而互相排斥，动铁片被推斥而带动转轴使指针偏转，指针的偏转角近似地与通过线圈的电流的平方成正比。

电磁式仪表从结构原理上来说，既可以用于交流，也可以用于直流。但由于电磁式仪表接交流时，动片已被交变电流磁化，没有磁滞误差，仪表的偏转取决于平均转矩。如接直流时，这种磁滞误差可能很大，而且不稳定。所以说，电磁式仪表更适用于交流电流和电压的测量。

§2-3 电阻的测量

电阻的测量是属于电路参数测量的一部分，测量的方法按所用仪表的不同，可分为指示仪表法和较量仪表法两种。较量仪表法通过和标准量的比较来确定被测参数，因而测量的准确度较高。指示仪表法又分为直读法（如用万用表的欧姆档测电阻）和间接法（如伏安法测电阻）两种。选择测量方法时，应考虑被测量的性质和大小，以及对测量准确度的要求。例如，在电阻的测量中，通常把电阻分为小电阻（ 1Ω 以下），中电阻（ $1\Omega\sim 0.1M\Omega$ ）和大电阻（ $0.1M\Omega$ 以上）三类，数值不同的电阻，其适用的测量方法也不同。

电阻的测量方法比较见表2-1。

表2-1

直流电阻测量方法比较

测量方法	应用范围	优缺点	备注
万用表法	中电阻	直接读数，使用方便，测量误差大	
伏安法	中电阻	能在电阻工作状态下测量。误差与所用电流表、电压表准确度有关，测量结果须经计算	
兆欧表法	大电阻	直接读数，使用方便，误差较大	
单臂电桥法	中电阻	直接读数，准确度高，操作麻烦	
双臂电桥法	小电阻	直接读数，准确度高，操作麻烦	
微欧计法	$100\mu\Omega\sim 1000\mu\Omega$	直接读数，准确度高	

一、万用表测量电阻

用来测量电阻的仪表称为欧姆表，用万用表测电阻时，它是一个多量程的欧姆表，如图 2-5 所示。当转换开关 S 拨到欧姆档（例如“ $R\times 1$ ”档）并将被测电阻跨接在万用表的“+”、“-”输入端上，表头内就有电流流过。根据图 2-5 所示原理电路