

第 章

电子线路实验基础知识

1.1 电子测量技术

1.1.1 电子测量概述

1. 电子测量

测量是为确定被测对象的量值而进行的实验过程。在这个过程中,人们常借助专门的测试仪器,将被测对象的大小直接或间接地与同类已知单位进行比较,取得用数值和单位共同表示的测量结果。测量结果由数值和单位两部分组成。

电子测量,从广义上讲,是指利用电子技术进行的测量;从狭义上讲,是指在电学中测量有关电的量值。

电子线路中的电子测量主要是指测量电子电路中的有关电的量值,其测量内容主要包括以下几个方面。

- (1) 电量的测量,即电流、电压、功率等的测量。
- (2) 电信号特性的测量,即信号波形和失真度、频率、相位、调幅度、逻辑状态等的测量。
- (3) 电路性能的测量,即电路的增益、衰减、灵敏度、频率特性等的测量。
- (4) 电路中元件参数的测量,即电阻、电容、电感、阻抗、品质因数等电子元件的参数测量。

2. 测量方法的分类

(1) 按照测量手段分类,有直接测量法、间接测量法和组合测量法。

① 直接测量法,是指直接得到被测量值的测量方法。如用电压表测量稳压电源的输出电压、欧姆表测量电阻等。

② 间接测量法,是指利用直接测量的量与被测量之间已知的函数关系,得到被测量值的测量方法。例如,测量放大器的电压放大倍数 A_u ,一般是分别测量交流输出电压 U_o 与交流输入电压 U_i ,然后通过函数关系 $A_u = U_o / U_i$,即可计算 A_u 。这种测量方法常用于被测量不便直接测量,或者利用间接测量法测量的结果比直接测量法测量的结果更为准确的场合。

③ 组合测量法,是兼用直接测量和间接测量的方法。在某些测量中,被测量与几个未知量有关,需要通过改变测量条件进行多次测量,根据被测量与未知量之间的函数关系联立

求解。

(2) 按照被测量性质分类,有时域测量法、频域测量法、数据域测量法和随机量测量法。

① 时域测量法,是指用于测量与时间有函数关系的量,如电压、电流等。它们的稳态值和有效值大多用仪表直接测量,而瞬时值可以通过示波器观察其波形,观察其值随时间变化的规律。

② 频域测量法,是指用于测量与频率有函数关系的量,如电路的电压增益、相移等。可以通过分析电路的幅频特性、相频特性等进行测量。

③ 数据域测量法,是指对数字逻辑量进行测量,如用逻辑分析仪可以同时观察许多单次并行的数据。

④ 随机量测量法,是指对各种噪声、干扰信号等随机量进行测量。

1.1.2 电压测量

电压是表征电信号特性的一个重要参数。电子电路的许多参数,如增益、频率特性、电流、功率等均可看作电压的派生量。各种电路的工作状态,如饱和、截止等,通常也都以电压的形式反映出来。因此,电压测量是许多电参数测量的基础。

在电压测量中,要根据被测电压的性质(直流或交流)、工作频率、波形、被测电路的阻抗、测量精度要求等来选择测量仪表的量程、阻抗、频率、准确度等级等。

1. 直流电压的测量

直流电压的测量方法主要有直接测量法和间接测量法两种。

1) 直接测量法

利用模拟式万用表或数字式万用表的直流电压挡对直流电压进行测量的方法是直流电压的直接测量法。

用模拟式万用表测量直流电压时,测量前应对万用表进行机械调零,注意被测电量的极性,选择合适的量程挡位,并能正确读数。一般来说,模拟式万用表的直流电压挡测量直流电压只适用于被测电路等效内阻很小或信号源内阻很小的情况。

数字式万用表不仅可以测量直流电压,还能显示被测直流电压的数值和极性。一般数字式万用表直流电压挡的输入电阻较高,至少在兆欧级,对被测电路影响很小。但极高的输出阻抗使其易受感应电压的影响,在一些电磁干扰比较强的场合测出的数据可能误差比较大。

2) 间接测量法

利用示波器对直流电压进行测量的方法是直流电压的间接测量法,即用已知电压值(一般为峰-峰值)的信号波形与被测信号电压波形比较,计算出电压值。用示波器测量直流电压时,首先应将示波器的通道灵敏度微调旋钮置校准挡,否则电压读数不准确。输入信号的耦合方式选择“直流耦合”,测量时可以根据垂直灵敏度“V/div”旋钮的指示值和显示屏上直流信号与地电位之间的相对高度“div”来计算电压值。另外,输入信号的大小不能超出示波器的最大允许输入电压(一般为400V)。

2. 交流电压的测量

由于放大电路的输入/输出信号一般是交流信号,对于一些动态指标经常用加入正弦电压信号的方法进行间接测量。实验中对正弦交流电压的测量,一般只测量有效值,特殊情况下才测量峰值。由于万用表结构的特点,其虽然也能测量交流电压,但对频率有一定的限制。因此,测量交流电压前,应根据测量的频率范围,选择合适的测量仪器和方法。

交流电压的测量方法主要有直接测量法和间接测量法两种。

1) 直接测量法

用模拟式万用表的交流电压挡测量交流电压时,应注意其内阻对被测电路的影响。另外,测量交流电压的频率范围较小,一般只能测量频率在1kHz以下的交流电压,测量的值为有效值。

用数字式万用表的交流电压挡测量交流电压时,由于其输入阻抗高,对被测电路的影响小,但同样存在测量频率范围小的缺点。

当信号频率较高时,可以采用不同规格的交流毫伏表测量交流电压。若信号频率在1MHz以内,可使用一般的交流毫伏表(最大量程为300V)来测量交流电压,所测量的交流电压一般为有效值。交流毫伏表的输入阻抗高,量程范围广,使用频率范围宽。一般交流毫伏表的金属机壳为接地端,另一端为被测信号输入端。因此,交流毫伏表只能测量电路中各点对地的交流电压,不能直接测量任意两点之间的交流电压。

2) 间接测量法

用示波器测量交流电压同测量直流电压一样,都需要将通道灵敏度微调旋钮置校准挡。用示波器测量交流电压时,若输入信号的耦合方式选择“直流耦合”,则交流电压中的直流分量将被保留;若输入信号的耦合方式选择“交流耦合”,则交流电压中的直流分量将被滤除。测量时可以根据垂直灵敏度“V/div”旋钮的指示值和波形在显示屏上的Y方向所占的格数值“div”来计算交流电压的峰-峰值,然后根据公式计算交流电压的有效值。

3. 脉冲电压的测量

如果数字电路中的信号电平要么是高电平要么是低电平,则这种信号称为脉冲信号。如果被测信号能稳定在某个电平上,则可以采用与测量直流电压相同的方法测量脉冲电压。

如果被测信号在高、低电平间不断变化,则需要采用示波器进行测量。用示波器不仅可以测出信号的高、低电平值,还可以观察到信号的变化规律以及信号的其他参数。

1.1.3 电流测量

电流测量也是电参数测量的基础,静态工作点、电流增益、功率等的测量以及许多实验调试、电路参数的测量,都离不开对电流的测量。与电压测量类似,由于测量仪器的接入会对测量结果带来一定的影响,也可能影响到电路的工作状态,实验中尽可能采用内阻较小的电流表进行测量。

电流的测量方法也有直接测量法和间接测量法两种。

1. 直流电流的测量

直流电流的直接测量法要求断开回路后,再将电流表串联接入回路中,根据电流表的读数即可对电路的电流进行测量。由于将电流表串联接入回路往往比较麻烦,容易因疏忽而造成测量仪表的损坏,因此,对直流电流的测量通常采用间接测量法。可以先测出取样电阻两端的电压 U ,然后根据欧姆定律 $I=U/R$ 计算电流。

如果被测支路中没有现成的取样电阻,也可以串入一个取样电阻进行间接测量。取样电阻的选取原则是对被测电路的影响越小越好,一般在 $1\sim 10\Omega$ 之间。

2. 交流电流的测量

交流电流的测量一般都采用间接测量法。用间接法测量交流电流的方法与用间接法测量直流电流的方法相同,只是对取样电阻有一定的要求。

(1) 当电路工作频率在 20kHz 以上时,就不能选用普通线绕电阻作为取样电阻,高频时应选用薄膜电阻。

(2) 在测量时,需要将所有的接地端共地,取样电阻要连接在接地端,在 LC 振荡电路中,要接在低阻抗端。

1.1.4 幅频特性测量

放大器的频率特性分为幅频特性和相频特性。放大器的幅频特性是指,在输入正弦信号时放大电路的电压放大倍数与输入信号频率之间的关系曲线,由幅频特性可以得到放大器的通频带和选择性。幅频特性的测量方法有逐点测量法和仪器测量法,测量幅频特性的仪器主要是扫频仪。

1. 逐点测量法

用逐点测量法测量幅频特性时,利用示波器观察,保持输入正弦信号 U_i 为常数,改变输入信号的频率,分别测出不同的频率对应的不失真输出电压 U_o ,即可绘出幅频特性曲线,并能计算电压增益 $A_u=U_o/U_i$ 。

用逐点测量法测试幅频特性的框图如图 1.1.1 所示。测量时用一个频率可调的正弦信号发生器,使其输出电压的幅值恒定,将其信号作为被测电路的输入信号。每改变一次信号发生器的频率,用毫伏表或双踪示波器测量被测电路的输出电压值(注意:测量仪器的频带宽度要大于被测电路的带宽,在改变信号发生器的频率时,应保持信号发生器的输出电压值不变,同时要求被测电路的输出波形不能失真)。



图 1.1.1 用逐点测量法测试幅频特性的框图

测量时,应根据对电路幅频特性所预期的结果来选择频率点数;测量后,将所测各点的数值连接成曲线,就是被测电路的幅频特性曲线,常用的归一化幅频特性曲线如图 1.1.2 所

示。在幅频特性曲线中,当增益下降到中频区增益的 0.707 倍,即下降 3dB 时,相对应的低频频率和高频频率分别称为下限截止频率 f_L 和上限截止频率 f_H ,则电路的通频带为 $f_{BW} = f_H - f_L$ 。

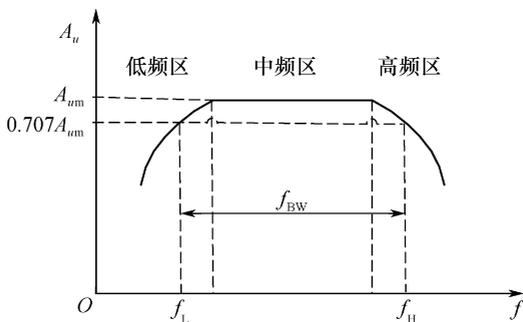


图 1.1.2 放大器的幅频特性曲线

2. 扫频法

扫频法就是用频率特性测试仪(扫频仪)测量二端口网络幅频特性的方法,是广泛使用的方法。

扫频仪集成了信号发生器和示波器的部分功能,其信号发生电路可以产生频率连续变化的等幅正弦信号,送至被测电路。扫频仪的信号检测电路对被测电路的输出信号进行测量,将结果与信号发生器的输出相除,得到电路在各个频率点的增益,并通过示波管显示出来。扫频仪所显示的电压增益一般用 dB 表示。

1.2 误差分析和数据处理

1.2.1 误差的来源和分类

1. 误差的来源

在测量过程中,由于受到测量仪器精度、测量方法、环境条件或测量者能力等因素的影响,测量结果和待测量的真值之间总存在一定差别,即测量误差。

测量误差的来源主要有以下几种。

1) 仪器误差

仪器误差是由于仪器本身的电气或机械性能不良所产生的误差,如校准误差、刻度误差等。消除仪器误差的方法为:事先对仪器进行校准,根据精度高的仪器确定修正值,在测量过程中根据修正值加入适当的补偿来抵消仪器误差。

2) 方法误差

方法误差又称为理论误差,是由于使用的测量方法不完善、理论依据不严密、采用不适当的简化和近似公式等所产生的误差。例如,用伏安法测量电阻时,若直接用电压指示值与电流指示值之比作为测量结果,而不计算电表本身内阻的影响,就可能引起误差。

3) 使用误差

使用误差又称为操作误差,是在使用仪器过程中,因安装、调节、布置不当或使用不正确等所引起的误差。测量者应严格按照操作规程使用仪器,提高实验技巧和对各种仪器的操作能力。

4) 人为误差

人为误差是由于测量者本身的原因所引起的误差,如测量者的分辨能力、习惯等。

5) 环境误差

环境误差是指由于受到温度、湿度、大气压、电磁场、机械振动、光照等影响所产生的附加误差。

2. 误差的分类

根据测量误差的性质及产生的原因,可分为系统误差、随机误差和粗大误差三种。

1) 系统误差

系统误差是指在相同条件下,重复测量同一参数值时,误差的大小和符号保持不变,或按照一定规律变化的误差。

系统误差产生的原因主要有:测量仪器本身的不完善或不准确等;测量时的环境条件和仪器要求的环境条件不一致;测量者读数误差等。

系统误差一般可通过实验或分析方法,查明其变化规律及产生原因,因此这种误差是可以预测的,也是可以减小或消除的。

2) 随机误差

随机误差是指在相同条件下,重复测量同一参数值时,误差大小和符号是无规律变化的误差。

随机误差不能用实验的方法消除。但在多次重复测量时,可以根据随机误差的统计规律了解其分布特性,对其大小及测量结果的可靠性进行估计,或通过多次重复测量,取其平均值来消除随机误差。

3) 粗大误差

粗大误差是指在一定测量条件下,由于测量者对仪器不了解或粗心而导致读数不正确,使其测量值远远偏离实际值时所对应的误差。粗大误差的特点是误差大小明显超过正常测量条件下的系统误差和随机误差。含有粗大误差的测量值为坏值,需要将其从测量数据中剔除。

1.2.2 误差的表示方法

误差可以用绝对误差和相对误差来表示。

1. 绝对误差

设被测量的真值为 X_0 , 测量仪器的示值为 X , 则绝对误差为

$$\Delta X = X - X_0 \quad (1.2.1)$$

被测量的真值虽然是客观存在的,但一般无法测得,只能尽量逼近它。通常用高级标准

仪表测量的示值来代替真值。

2. 相对误差

绝对误差的大小往往不能确切地反映被测量的准确程度。工程上,常采用相对误差来比较测量结果的准确程度。

相对误差又分为实际相对误差、示值相对误差和引用(或满度)相对误差。

1) 实际相对误差

实际相对误差 γ_0 是绝对误差 ΔX 与被测量的真值 X_0 之比,即

$$\gamma_0 = \frac{\Delta X}{X_0} \times 100\% \quad (1.2.2)$$

2) 示值相对误差

示值相对误差 γ_X 是绝对误差 ΔX 与测量仪器的示值 X 之比,即

$$\gamma_X = \frac{\Delta X}{X} \times 100\% \quad (1.2.3)$$

3) 引用(或满度)相对误差

引用(或满度)相对误差简称满度误差。满度误差 γ_m 是绝对误差 ΔX 与测量仪器某一量程的满刻度值 X_m 之比,即

$$\gamma_m = \frac{\Delta X}{X_m} \times 100\% \quad (1.2.4)$$

满度误差是应用最多的表示方法。我国电工仪表的准确度就是按满度误差来规定等级的。

1.2.3 实验数据的处理

在实验中,通过各种仪器观察得到的数据和波形是分析实验结果的主要依据。直接观察仪器显示得到的数据称为原始数据,经过分析、计算、综合后用来反映实验结果的数据称为结论数据。原始数据很重要,读取、记录原始数据时,方法和读数应正确。

1. 实验数据的读取

仪器显示的测量结果有指针指示、波形显示和数字显示共三种类型。使用不同类型的仪器进行测量时,应采用正确的数据读取方法,减小读数误差。

1) 指针指示式仪器的数据读取

读取指针指示式仪器的数据时,首先要确定表盘刻度线上各分度线所表示的刻度值,然后根据指针所指示的位置进行读数。当指针指在刻度上两条分度线之间时,需要估读一个近似的读数。使用指针指示式仪表时,应根据测量值的大小合理选用量程,以减小误差。

2) 数字显示式仪器的数据读取

数字显示式仪器是靠发光二极管显示屏或液晶显示屏或数码管显示屏来直接显示测量结果。使用数字显示式仪器,可以直接读取数据,有的仪器还可以显示测量单位。使用数字显示式仪器读取的数据比较准确。使用数字显示式仪表时,应根据测量值的大小合理选用量程,尽可能多地显示几位有效数字,以提高测量精度。

3) 波形显示式仪器的数据读取

波形显示式仪器可将被测量的波形直观地显示在荧光屏上,根据波形即可读出被测量的相关数据。波形显示式仪器的数据读取方法:先根据量程旋钮分别确定在 X 轴、Y 轴方向每一坐标格所代表的值,然后根据波形在 X 轴、Y 轴方向所占的格数计算相关数据。使用波形显示式仪器时,首先应调整好仪器的“亮度”和“聚焦”,使显示出的波形细而清晰,以便准确地读数。

2. 实验数据的记录

实验数据的正确记录很重要。记录的实验数据都应注明单位,必要时需要记下测量条件。

实验过程中,所测量的结果都是近似值,这些近似值通常用有效数字的形式表示。有效数字是指从数据左边第一个非零数字开始直到右边最后一个数字为止所包含的数字。右边最后一位数字通常是测量时估读出来的,称为欠准数字,其左边的有效数字都是准确数字。

记录数据时,应只保留 1 位欠准数字。欠准数字和准确数字都是有效数字,对测量结果都是不可缺少的。

3. 实验数据的处理

实验结果可以用数字、表格或曲线来表示。

1) 有效数字的处理

对于测量或通过计算获得的数据,在规定精度范围外的数字,一般都应按照“四舍五入”的规则进行处理。

当测量结果需要进行中间运算时,其运算应遵循有效数字的运算规则。有效数字的取舍,原则上取决于参与运算的各数中精度最差的那一项。

2) 表格的绘制

在数字电路实验中,常用真值表描述组合电路的输出与输入之间的关系,用状态表描述时序电路的输出和次态与输入和现态之间的关系。在实验过程中,应根据测量的数据及已知数据绘制相应表格,更加直观地显示两个物理量之间的关系。

3) 曲线的绘制

在模拟电路实验中,常用曲线表示输出信号随输入信号连续变化的规律,如放大器的电压增益随信号频率的变化规律。

根据测量数据进行曲线绘制时,需要注意以下几点。

(1) 合理选择坐标系。最常用的是直角坐标系,自变量用横轴(X 轴)表示,因变量用纵轴(Y 轴)表示。

(2) 合理选择坐标分度,标明坐标轴的名称和单位。纵轴和横轴的分度不一定选取一样,应根据具体情况适当选择。其原则是既能反映曲线的变化特征以便于分析,又不至于产生错觉。

(3) 合理选择测量点。通常自变量和因变量的最小值点与最大值点都需要测量出来,在曲线变化剧烈的区域多取几个测量点,在曲线平坦的区域可以少取几个测量点。

(4) 正确拟合曲线。根据各测量点的位置,用直线或适当的曲线将各测量点用平滑的

线连接起来。由于测量数据本身存在测量误差,因此在拟合曲线时,并不要求所有的测量点都要在曲线上,但要求曲线比较平滑且尽可能地靠近各测量点,使测量点均匀地分布在曲线的两边。

1.3 常用电子元件的识别

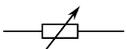
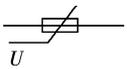
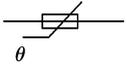
任何电子电路都是以电子元件为基础,常用的电子元件有电阻、电容、电感、半导体器件(二极管、晶体管、场效应管)以及集成电路等。

1.3.1 电阻、电容、电感的识别

1. 电阻器

电阻器是电子电路中最常用的元件之一,简称电阻。在电路中,电阻的主要作用是降压、分压、限流、分流。电阻器按结构和应用场合,通常可以分为固定电阻器、电位器、敏感电阻器和排阻。各类电阻器的图形符号见表 1.3.1。

表 1.3.1 电阻器图形符号表

图形符号	说明	图形符号	说明
	电阻器一般符号		0.125W 电阻器
	可变(可调)电阻器		0.25W 电阻器
	压敏电阻器		0.5W 电阻器
	热敏电阻器		1W 电阻器
	光敏电阻器		滑线式变阻器

下面对上述四类电阻器进行逐一介绍。

1) 固定电阻器

固定电阻器是一种阻值固定不变的电阻器,由于制作材料和工艺不同,可分为膜式电阻(包括碳膜电阻 RT、金属膜电阻 RJ、合成膜电阻 RH 和氧化膜电阻 RY)、实芯式电阻和金属线绕电阻 RX,目前实验中常用的为碳膜电阻和金属膜电阻,实物外形如图 1.3.1 所示。

(1) 标称阻值

标注在电阻器上的阻值称为标称阻值。为了便于生产,同时考虑能够满足实际使用的需要,国家规定了一系列数值作为产品的标准,这一系列值就是电阻的标称系列值。电阻器是厂家生产出来的,但标称值是根据国家制定的标准系列标注的,不是厂家任意标定的。国家规定电阻器阻值的系列标称值,该标称值分 E-24、E-12 和 E-6 三个系列,具体见表 1.3.2。

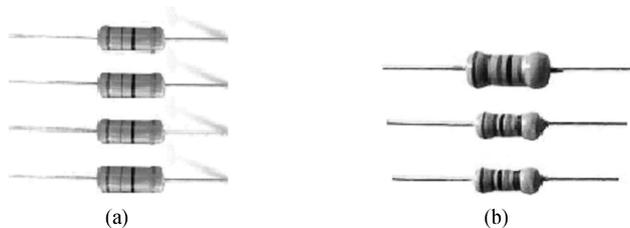


图 1.3.1 碳膜电阻和金属膜电阻实物

(a) 碳膜电阻；(b) 金属膜电阻

表 1.3.2 标称阻值表

标称阻值系列	允许误差/%	误差等级	标称值
E-24	±5	I	1.0、1.1、1.2、1.3、1.5、1.6、1.8、2.0、2.2、2.4、2.7、3.0、3.3、3.6、3.9、4.3、4.7、5.1、5.6、6.2、6.8、7.5、8.2、9.1
E-12	±10	II	1.0、1.2、1.5、1.8、2.2、2.7、3.3、3.9、4.7、5.6、6.8、8.2
E-6	±20	III	1.0、1.5、2.2、3.3、3.9、4.7、6.8

国家标准规定,生产某系列的电阻器,其标称阻值应等于该系列中标称值的 10^n (n 为正整数)倍。如生产 E-24 系列的电阻器,厂家可以生产标称阻值为 1.3Ω 、 13Ω 、 130Ω 、 $1.3k\Omega$ 、 $13k\Omega$ 、 $130k\Omega$ 、 $1.3M\Omega$ …的电阻器,而不能生产标称阻值为 1.4Ω 、 14Ω 、 140Ω …的电阻器。

电阻器的实际阻值与标称阻值往往有一定的差距,称为误差。电阻器阻值和误差的标注方法有直标法和色环法。

① 直标法

直标法是指用文字符号(包括数字和字母)在电阻器上直接标注出阻值和误差的方法。直标法的阻值单位有欧姆(Ω)、千欧($k\Omega$)和兆欧($M\Omega$)。误差大小表示一般有两种:一是用罗马数字 I、II、III 分别表示误差 $\pm 5\%$ 、 $\pm 10\%$ 、 $\pm 20\%$,如果不标注误差,则误差为 $\pm 20\%$;二是用字母来表示,各字母对应的误差见表 1.3.3,如 J、K 分别表示误差 $\pm 5\%$ 、 $\pm 10\%$ 。

表 1.3.3 字母误差表

字母	对应误差	字母	对应误差
W	±0.05%	G	±2%
B	±0.1%	J	±5%
C	±0.25%	K	±10%
D	±0.5%	M	±20%
F	±1%	N	±30%

直标法常见形式主要有以下几种。

a. 用“数值+单位+误差”表示。图 1.3.2(a)所示的 4 只电阻器都是采用这种表示方法,表示电阻器阻值为 $12k\Omega$,误差 $\pm 10\%$ 。

b. 用“数值+单位”表示。这种标注法没有标出误差,表示误差默认 $\pm 20\%$,图 1.3.2(b)中所示的两只电阻器阻值均为 $12k\Omega$,误差 $\pm 20\%$ 。

c. 用单位代表小数点表示。图 1.3.2(c)所示的 4 只电阻采用这种表示方法。

d. 用数字直接表示。图 1.3.2(d)所示的两只电阻均采用数字直接表示法。