

第3章 电子电路测量技术

在科学实验和生产实践的过程中，为了获取表征被研究对象的特征的定量信息，必须准确地进行测量。在测量过程中，由于各种原因，测量结果和待测量的客观真值之间总存在一定的差别，即测量误差。本章介绍电子电路的测量技术，阐述测量误差的理论，使学生、实验人员和科技工作者通过对实验测量数据的记录、处理和误差分析等的学习，训练并培养其实验的基本技能。

3.1 测量误差的基础知识

在真实测量中，由于各方面的原因，会对测量带来一系列误差。因此，要对测量误差技术有深刻的了解和学习，才能正确处理测量中所得到的数据。

3.1.1 测量的意义和范围

用仪器测量一个物理量而得到的测量值与被测物理量的真值之间总是存在一定差别的，称之为测量误差。测量误差是不可避免的，只能通过仪器性能的改善、测量技术的提高等手段来减小。一个有效测量结果的优劣，可用测量误差来衡量。

1. 测量的意义

测量的目的是要对客观事物获得定量的信息，无论是在日常生活中还是在科学研究过程中都要进行各种测量。所谓测量，就是将待测量与另一个同类的已知量进行比较，并把后者作为计量单位，从而确定被测量是该单位的多少倍。测量是从事社会活动以及科学实验的必备技能。测量方法得当，测量结果准确，可以帮助人们判断预期的结论，或达到预定的目标；倘若在测量时出现问题，则会给人们带来这样或那样的不良后果，可能将科学研究引向歧途，不仅会造成时间上、经济上、精力上的严重浪费或重大损失，甚至会得出一个与事实不符的结论。电路实验课也同样离不开对各种电量的测量，如电路是否正常、系统能否满足设计要求，实验结果的取得、故障的检查等

都是通过测量手段来实现的。因此,掌握正确的测量方法及手段,是从事科学技术研究工作最基本的实践能力,具有十分重要的意义。

2. 测量的范围

测量分为直接测量和间接测量两种。凡是使用测量仪器能直接得出结果的测量都是直接测量,如电路实验中用电流表或电压表来测量电路的电流或电压,用示波器测量电路波形的瞬时值等;而间接测量要先直接测量出一些相关量,然后由这些量之间的内在关系,经过数学运算来得到结果。例如,交流阻抗参数的测量,可通过测量电路的电流、电压、电功率后,经过相关方式计算而得到。显然,直接测量是间接测量的基础。直接测量是电路实验中的基本测量。

电路实验的测量大致包括以下几个方面:

(1) 元器件参数的测量,如电阻器的阻值、电容器的电容值、电感器的电感值等,这些参数可以通过直接测量获取,也可以通过间接测量来得到结果,例如“三表法”与“谐振法”都是对电阻器的阻值 R 、电感器的电感量 L 、电容器的电容量 C 进行间接测量的方法。

(2) 电路参数的测量,如电流、电压、功率、频率、相位等的测量。

(3) 系统参数的测量,如网络的输入阻抗、输出阻抗、网络函数等。这些只能用间接测量来获得。

3.1.2 测量误差的来源和分类

1. 误差的来源

(1) 仪器误差。它是指由于测量仪器本身的电气或机械等性能精度所造成的误差。例如,仪器校准不好、定度不准等。因此,减小仪器误差的方法是配备性能优良的仪器,或预先校准,确定其修正值,以便在测量结果中引入适当的补偿值来消除它。

(2) 参数误差。它是指由于使用元器件的精度不高,其实际参数与标定数值不符,或由于元器件老化而产生的误差。减小此类误差的方法是精选元器件并进行老化处理。

(3) 使用误差。又称操作误差,指测量过程中因操作不当而引起的误差。减小使用误差的方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仪器的操作能力。

(4) 环境误差。它是指由于外界环境(如温度、湿度、电磁场等)的影响而产生的误差。为了避免环境误差,电子仪器必须在规定的使用环境下工作。

(5) 人身误差。它是指由测量者个人特点引起的误差。例如，有人读指示刻度时习惯于超过或欠少等。为了消除这类误差，应提高测量技能，改变不正确的测量习惯并改进测量方法等。

(6) 方法误差。又称理论误差，它是指由于使用的测量方法不完善、理论依据不严密或者对某些经典测量方法做了不适当的修改简化而产生的误差，即指凡在测量结果的表达式中，没有得到反映的因素，而实际上这些因素在测量过程中，又起到一定的作用所引起的误差。例如，用伏安法测电阻时，若直接以电压表的示值与电流表的示值之比做测量结果，而不计仪表本身内阻的影响，就会引起方法误差。

2. 误差的分类

按性质和特点，误差可大致分为三类。

(1) 系统误差。在规定的测量条件下，对同一量进行多次测量时，如果误差的数值保持恒定，或按某种确定规律变化，则称这种误差为系统误差。

系统误差表明一个测量结果偏离真值或实际值的程度，系统误差的大小用准确度来表示。系统误差越小，测量准确度越高。系统误差有一定规律性，可以通过实验和分析找出原因，设法减弱和消除。

(2) 偶然误差，也叫随机误差。在规定的测量条件下，对同一量进行多次测量时，如果误差的数值发生不规则的变化，则称这种误差为偶然误差。例如，热骚动、外界干扰和测量人员感觉器官无规律的微小变化等引起的误差，便属于偶然误差。

尽管每次测量某量时，其偶然误差的变化规律是不规则的，但实践证明，如果测量的次数足够多，那么偶然误差平均值的极限就会趋近于零。所以，多次测量某量的结果，它的算术平均值会接近于其真值。

大量测试结果表明，偶然误差是服从统计规律的。即误差小的出现概率

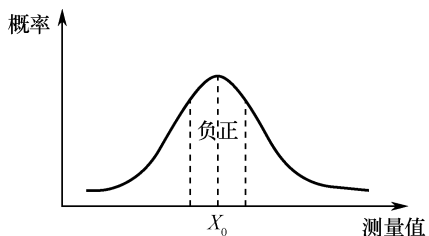


图 3.1 偶然误差分布概率图

高，误差大的出现概率低，而且大小相等的正负误差出现的概率相等，其概率密度分布规律如图 3.1 所示。这种分布曲线称为正态分布曲线。

(3) 过失误差。指在一定的测量条件下，测量值显著地偏离真值的误差。从性质上来看，它可能属于系统误差，也可能属于偶然误差，但其误差值一般都明显超过相同条件下的系统误差和

偶然误差,这种误差往往是由于测量者对仪器不了解、粗心等原因,导致测量结果严重偏离正确值。例如,读错刻度、记错数字、计算错误以及测量方法不对等引起的误差。通过统计检验方法和理论分析,确认是过失误差的测量数据,称为坏值或异常值,应该予以剔除。

3.1.3 削弱和消除系统误差的主要措施

对于偶然误差和过失误差的消除方法,前面已做简要介绍,这里只讨论消除系统误差的措施。

1. 对测量结果进行校准

对仪器定期进行检定,并确定校准值的大小,检查各种外界因素,如温度、湿度、气压、电场、磁场等对仪器指示的影响。

2. 替代法

替代法是指用一个可变的标准量代替被测量,且保持整个测量系统的工作状态不变,仪表本身和外界因素所产生的系统误差对测量结果没有影响。它常被广泛应用在测量元件参数上,如用电桥法或谐振法测量电容器的电容和线圈的电感量,可以消除对地电容、导线的分布电容、分布电感和电感线圈中的固有电容等因素对测量值的影响。

3. 正负误差相消法

这种方法可以消除外磁场对仪表的影响。它通过对被测量进行正反两次位置变换的测量,然后将测量结果取平均来消除误差。

4. 合理选择仪表量程

在仪表准确度已确定的情况下,量程大就意味着仪表指针偏转小,从而增大了相对误差(参见3.2.1节)。因此,在测量时要合理地选择量程,并尽可能地使仪表读数接近满量程位置。一般情况下,仪表的指针在 $2/3$ 满刻度以上时才有较准确的测量结果。因此,应依据测试估计值的大小(预算实验的理论值),在测量过程中合理选择仪表量程,方可得到较小的最大相对误差。

3.2 测量误差的数据表示、记录和处理

测量结果通常用数字和图形两种形式表示。对用数字表示的测量结果,在进行数据处理时,除了应注意有效数字的正确取舍外,还应制定出合理的数据处理方法,以减小测量过程中随机误差的影响。对以图形表示的测量结果,应

考虑坐标的选择和正确作图方法, 以及对所作图形的评定或经验公式的确定等。

3.2.1 测量误差的数据表示

1. 绝对误差

设被测物理量的真实值为 A_0 , 测量仪器给出的测量值为 X , 则绝对误差 ΔX 定义为

$$\Delta X = |X - A_0|$$

由于真实值 A_0 通常是无法得知的, 一般用更高一级的标准仪器的测量值或用理论值来代替。设该代替值为 A , 则绝对误差为

$$\Delta X = |X - A|$$

2. 相对误差

相对误差 γ_A 是绝对误差与被测真值的比值, 用百分数表示, 即

$$\gamma_A = \frac{\Delta X}{A} \times 100\%$$

虽然绝对误差能够直接给出测量结果误差的大小, 但却不能反映对测量结果的影响程度, 而相对误差则可以很好地解决这一问题。例如, 在测 1V 电压时的误差是 0.02V, 测 10V 电压时的误差是 0.2V, 两电压的绝对值误差相差 10 倍, 而两者的相对误差却是一样的, 即两者的测量效果是相同的。因此, 不论是电子测量, 还是其他方面的测量, 对误差进行度量时, 通常采用相对误差。

3. 引用误差

相对误差 (又称容许误差) 虽然可以说明测量结果的准确度, 并衡量测量结果和被测量实际值之间的差异程度, 但还不足以用来评价指示仪表的准确度。引用误差指一般测量仪器的准确度, 也叫容许误差。它是根据技术条件的要求规定某一类仪器的误差不应超过的最大范围。引用误差是为了衡量仪表质量定义的, 通常仪器 (包括量具) 技术说明书上所标明的误差都是指容许误差。绝对误差与仪器的满量程刻度值之比, 以百分数表示, 定义为引用误差:

$$\gamma_m = \frac{\Delta X}{A_m} \times 100\%$$

式中, γ_m 为引用误差, ΔX 为绝对误差, A_m 为仪表满刻度量程。

我国电工仪表的准确度等级 s 就是按引用误差 γ_m 分级的, 共分七级: 0.1、

0.2、0.5、1.0、1.5、2.5 和 5.0。例如， $s = 0.5$ ，习惯上写成 $\gamma_m = \pm 0.5\%$ 。

3.2.2 有效数字的表示和记录

在记录和计算数据时，必须掌握对有效数字的正确取舍。不能认为数据中小数点后面的位数越多，这个数据就越准确；也不能认为计算测量结果中保留的数位越多，准确度就越高。因为测量所得的结果都是近似值，这些近似值通常都用有效数字的形式来表示。

所谓有效数字，是指从左边第一个非零的数字开始，到右边最后一个数字为止所包含的数字。例如，测得的频率为 0.0234MHz，它是由 2、3、4 三个有效数字表示的频率值。在其左边的两个“0”不是有效数字，因为它可以通过单位变换写成 23.4kHz。其中末尾数字“4”，通常是在测量读数时估计出来的，因此称它为“欠准”数字，其左边的各有效数字均是准确数字。准确数字和欠准数字对测量结果都是不可少的，它们都是有效数字。

1. 有效数字的正确表示

(1) 有效数字中，只应保留一个欠准数字。因此，在记取的测量数据中，只有最后一位有效数字是“欠准”数字。这样记取的数据表明被测量可能在最后一位数字变化 ± 1 个单位。例如，用一个刻度为 50 分度、量程为 50V 的电压表测得的电压为 41.6V，则该电压是用三位有效数字来表示的，其中 4 和 1 这两个数字是准确的，而 6 是欠准的。因为它是根据最小刻度估计出来的，它可能被估读成 5，也可能被估读成 7，所以测量结果也可以表示为 $(41.6 \pm 0.1)V$ 。

(2) 欠准数字中，特别要注意“0”的情况。例如，测量某电阻的数值为 13.600k Ω ，表明前面的四个位数 1、3、6、0 是准确数字，最后一个位数 0 是欠准数字。如果改写成 13.6k Ω ，则表明前面两个位数 1、3 是准确数字，最后一个位数 6 是欠准数字。这两种写法尽管表示同一个数值，但实际却反映了不同的测量准确度。

如果用“10”的方幂来表示一个数据，10 的方幂前面的数字都是有效数字。例如写成 $13.60 \times 10^3 \Omega$ ，则表明它的有效数字为 4 位。

有效数字不能因采用的单位变化而增减。例如，测某一电流结果记为 1A，它是一位有效数字，若欲用 mA 为单位，则不能记为 1000mA，因为 1000 是四位有效数字。再如，一个记录数字为 $13.5 \times 10^5 \Omega$ ，它表示三位有效数字，若用 k Ω 为单位，应记为 $13.5 \times 10^2 k\Omega$ ，不能记为 1350k Ω ；若用 M Ω 作为单位，应记为 1.35M Ω 。总之单位变化时，有效数字位数不应变化。

(3) 对于 π 、 $\sqrt{2}$ 等常数具有无限数位的有效数字，在运算时，可根据需要取适当的位数。

(4) 当测量误差已知时，测量结果的有效数字位数应取得与该误差的位数相一致。例如，某电压测量结果为 4.471V，若测量误差为 $\pm 0.05\text{V}$ ，则该结果应改为 4.47V。

2. 有效数字的记录

对于计量测定或通过各种计算获得的数据，在所规定的精确度范围以外的那些数字，一般都应该按照“四舍五入”的规则进行记录处理。

如果只取 n 位有效数字，那么第 $n+1$ 位及其以后的各位数字都应舍去。如采用“四舍五入”法则，对于 $n+1$ 位为“5”的数字则都是只入不舍的，这样就会产生较大的累计误差。目前广泛采用的“四舍五入”法则对 5 的处理是：当被舍的数字等于 5，而 5 之后有数字时，则可舍 5 进 1；若 5 之后无数字或为 0 时，只有在 5 之前为奇数，才能舍 5 进 1，如 5 之前为偶数（包括零），则舍 5 不进位。

下面是把有效数字保留到小数点后第二位的几个例子：

$$\begin{array}{ll} 73.9504 \rightarrow 73.95 & 3.22681 \rightarrow 3.23 \\ 523.745 \rightarrow 523.74 & 617.995 \rightarrow 618.00 \\ 89.9251 \rightarrow 89.93 & \end{array}$$

3.2.3 有效数字的运算

1. 加、减运算

由于参加加、减运算的各数据，必为相同单位的同一物理量，所以其精确度最差的就是小数点后面有效数字位数最少的。因此，在进行运算前应将各数据所保留的小数点后的位数处理成与精度最差的数据相同，然后再进行运算。

有时计算项目较多或测量数据较重要时，也可以多保留 1~2 位有效数字，以保证结果的精确性。

例如，求 214.75、32.945、0.015、4.305 四项之和：

$$\begin{array}{r} 214.75 \rightarrow 214.75 \\ 32.945 \rightarrow 32.94 \\ 0.015 \rightarrow 0.02 \\ + 4.305 \rightarrow 4.30 \\ \hline 252.01 \end{array}$$

2. 乘、除运算

运算前对各数据的处理都应以有效数字位数最少的为标准，所得积和商的有效数字位数应与有效数字位数最少的那个数据相同。

例如，求 $0.0121 \times 25.645 \times 1.05782$ ，其中 0.0121 为三位有效数字，位数最少，所以应对另外两个数据进行处理：

$$25.645 \rightarrow 25.6$$

$$1.05782 \rightarrow 1.06$$

所以 $0.0121 \times 25.6 \times 1.06 = 0.3283456 \rightarrow 0.328$ 。

若有效数字位数最少的数据中，其第一位数为 8 或 9，则有效数字位数应多计一位。例如，上例中 0.0121 若改为 0.0921，则另外两个数据应取四位有效数字，即

$$25.645 \rightarrow 25.64$$

$$1.05782 \rightarrow 1.058$$

所以 $0.0921 \times 25.64 \times 1.058 = 2.49840775 \rightarrow 2.498$ 。

3. 乘方与开方运算

运算结果应比原始数据多保留一位数字，如 $(25.6)^2 = 655.4$ ， $\sqrt{4.8} = 2.19$ 。

4. 对数运算

对数运算前后的有效数字位数应相等，如 $\lg 7.564 = 0.8787515 \rightarrow 0.8788$ 。

3.2.4 实验数据的处理

实验测量所得到的测量值，在经过有效数字修约、运算处理后，有时仍看不出实验规律或结果，因此必须对这些实验数据进行整理、计算和分析，才能从中找出实验规律，得出结果。常用的实验数据处理方法为列表法和图示法。

1. 列表法

列表法是记录实验数据最常用的方法，测量时将测量结果填写在一个经过设计的、数据间有一定对应关系的表格中，以便清楚地从表格中得到各数据之间的简单关系。例如，表 3.1 所示的是某一电路输出的端电压值与负载电阻的对应关系。从表中可见，随着负载阻值的增大，其输出端电压值也增大，根据这几组数据可以绘出一条输出端电压与负载阻值变化的关系曲线。

表 3.1 输出端电压值与负载电阻的对应关系

R/Ω	0	100	200	300	500	1000	∞
U_L/V	0.01	2.00	4.00	6.00	10.00	20.00	24.00

列表法的关键是表格中测试点的设计，选择的测试点必须能够准确地反映测量量之间的关系，尤其不要遗漏一些关键测试点。例如，对于线性变化规律的测试量，如表 3.1 中的 $R=0$ 和 $R=\infty$ 这两点；对于非线性的测试量，若测试点描绘的曲线有转折区域，则在曲线的拐点附近要多选择几组测试点，如元件频率特性的实验（参阅第 6 章的表格）。

2. 图示法

图示法是指将测量数据用曲线表示的方法。在分析两个或多个物理量之间的关系时，用曲线表示它们之间的关系，往往比数字、公式表示更形象和直观。因此，测量结果常常要用曲线来表示。

在实际测量过程中，由于测量数据的离散性，如将测试点直接连接起来，所得曲线将呈折线状，如图 3.2 所示。但这样的曲线往往是错误的，应视情况绘出拟合曲线，使其成为一条光滑均匀的曲线，这个过程称为曲线的修匀，如图 3.3 所示。若测量数据点分散程度大时，则应将相应的点取平均值后再绘制曲线，如图 3.4 所示。对于明显脱离大多数测量数据所反映规律的个别点（称为奇异点），在修匀曲线的过程中应予以剔除。

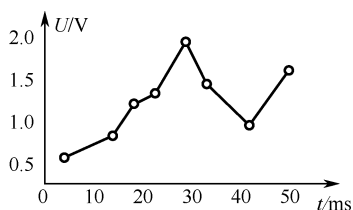


图 3.2 连成折线的各数据点（错误的曲线绘制）

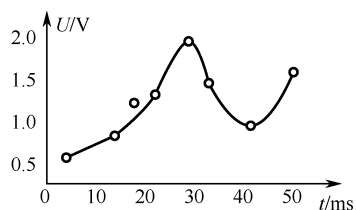


图 3.3 拟合后的实验数据曲线

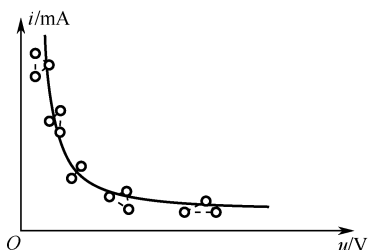


图 3.4 实验数据点分散程度大时的曲线绘制

绘制曲线时应注意以下几点:

(1) 选择合适的坐标系。坐标系有直角坐标系、极坐标系和对数坐标系,不同的坐标系应选用各自专用的坐标纸来描述。

(2) 正确标注坐标轴。在坐标系中,要标注原点。一般地,横坐标代表自变量,纵坐标代表因变量;在横、纵坐标轴的末端,要标明其所代表的物理量及其单位(参见 9.2.2 节)。

(3) 合理选取测试点并进行坐标分度。被测量的最大值和最小值都必须测出。在曲线变化陡峭和拐点部分要多取几个测试点,在曲线变化平缓部分可少取一些测试点(参见 6.3 节)。

(4) 分别标明记号。测试点的记号可用点“•”、圈“○”、叉“×”、三角“△”等表示。同一条曲线测试点的记号要相同,而不同类别的数据,应以不同的记号加以区分。特别是对于一些复杂的实验电路,借助 Multisim 软件进行仿真实验,可以预先了解实验数据以及曲线、波形或其他图形的变化趋势,这对于判断实验结果及描绘曲线等,都很有帮助(参见 8.2 节)。

3.3 基本电量的测量方法

在电路实验中,经常要对各种电信号参数进行测量。由于各参数的性质不同,测量方法与测量所用的仪器也不尽相同,从而有多种用于测量电路参数的仪器和测量方法。下面介绍几种常用电信号参数的测试原理与测量方法。通过实验操作过程,可提高学生对基本实验测量技能的运用能力,掌握各种仪器设备的正确使用和操作方法。

3.3.1 电压的测量

在集总参数电路中,电压、电流和功率是表征电信号的三个基本参量,而电压的测量又是各种电量测量的基础。例如,增益、衰减、频率特性、失真度、调幅度等都以电压测量作为基础;还有许多电路参数可以通过测量电压后计算出,如电流、功率等。因此,掌握电压的测量方法是电路基础实验的专业技能,也是实验的重要手段。

被测电压主要有以下几个特点:

(1) 频率范围宽,可能是直流、工频、超低频、低频、高频、超高频。

(2) 波形种类繁多,除常见的正弦波外,还有直流、方波、脉冲波、调幅波及其他波形,如图 3.5 所示。

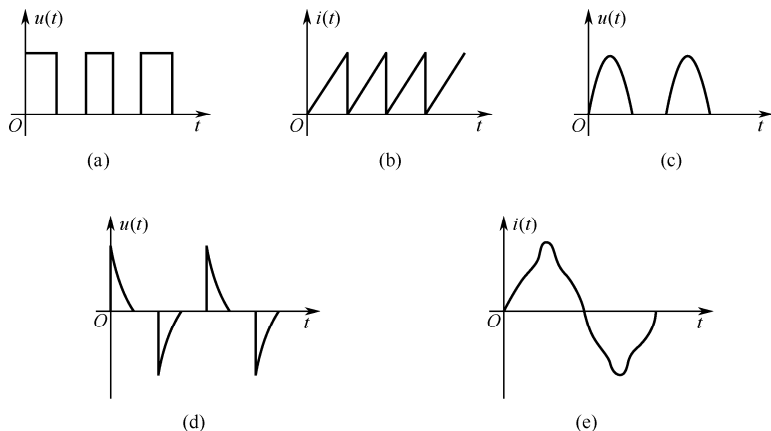


图 3.5 繁多的波形种类

- (3) 数值变化范围大，从微毫伏直到几十千伏。
- (4) 所在电路具有不同的内阻，可能很高，也可能很低。

由于被测电压具有不同的特点，因此选择测量方案和仪器应满足以下几点要求：

- (1) 频率范围。
- (2) 电压范围。
- (3) 输入阻抗。
- (4) 仪表精度。
- (5) 波形特征。

电压幅度的测量方法主要有直读测量法和示波器测量法两种。

1. 用电压表测量

电压表的种类很多，可分为模拟式和数字式、直流电压表和交流电压表等。通过电压表的读数直接读取电压幅值的方法称为直读测量法。这种方法简单直观，是最基本的方法。除此之外，还有补偿法和微差法。注意，电压表一定要并联在被测电路两端。

测量直流电压要注意正负极性，测量交流电压要注意根据其频率范围，选择使用万用表或交流毫伏表。当用电压表测量正弦交流时，指针指示的数值是正弦有效值。但是对于函数关系复杂或未知的非正弦电压，此时最好采用示波器测量。

2. 用示波器测量

用示波器测量电压最主要的特点是，能够正确地测定波形的峰值及波形

各部分的大小，因此在需要测量某些非正弦波形的峰值或某部分波形的大小时，用示波器进行测量便成为必需的方法。

(1) 直接法（又称标尺法）

双踪示波器的 Y 轴灵敏度已标出 $[(\text{mV}\sim\text{V})/\text{DIV}]$ 。使用前，要用校准信号校准各挡的灵敏度。然后，将被测信号加于示波器的 Y 输入端，从荧屏上直接读出被测电压波形的高度（DIV）。被测电压幅值灵敏度 = $(\text{mV}\sim\text{V})/\text{DIV}\times$ 高度（DIV）。

该测量方法会由于 Y 轴放大器增益的不稳定性而产生测量误差。

(2) 比较法

用没有标出 Y 轴灵敏度的示波器测电压时，需要用比较法。测量时，先给示波器输入峰峰值为 5V 的方波信号，调节 Y 轴增幅，使其在屏幕的 Y 轴上占 5DIV，则 Y 轴灵敏度为 1V/DIV。对被测信号进行观察，如果读出正弦波信号的峰峰值为 4V，则幅值为 2V，有效值为 $\sqrt{2}=1.414\text{V}$ 。

这种测量方法会由于屏幕上光迹和标尺刻度不在同一个平面上而产生读数误差。

用示波器测幅值时应注意：被测信号从 Y 轴输入端加入时，必须采用 DC 耦合方式，否则将会被滤除直流成分，只剩下交流部分，而不能反映真实情况。

电路实验常用来测量电压幅度的仪表和仪器有数字万用表、交流毫伏表和示波器。它们的性能比较如表 3.2 所示。实验中只有使仪器本身的技术特性与被测信号的特性相对应，才能取得良好的测量结果。

表 3.2 数字万用表、交流毫伏表、示波器性能比较

仪表或仪器名称	电压范围	频率范围	输入阻抗范围
VC97 型数字万用表	直流 1000V，交流 700V	700V 量程: 50~100Hz 其余量程: 50~500Hz	500mV 量程: > 100MΩ 其余量程为 10MΩ
UT56 型数字万用表	直流 1000V，交流 750V	50~500Hz	直流, 10MΩ; 交流, 2MΩ
AS2295D 型交流毫伏表	300μV~300V（有效值）	5Hz~2MHz	1kHz 时, 2MΩ
SS-7802A 型示波器	40V（峰峰值）	直流~20MHz	电阻 1MΩ，电容 20pF
DS5062 型示波器	40V（峰峰值）	直流~60MHz	电阻 1MΩ，电容 13pF

3. 分贝数的测量

(1) 分贝的概念

在测量放大器、衰减器以及通信系统的有关参数时，通常不直接测量电路中某点的电压或负载吸收的功率，而是要了解各个环节的增益与衰减的情

况，即要知道输出端 U_o 相对于输入端 U_i 变化的比，测量输出与输入之间的倍率，通常用对数表示，我们称之为“电平”，单位用 dB（分贝）表示。分贝测量实际上是交流电压的测量，指示表盘上以相对数值 dB 来刻度，如毫伏表、万用表、信号源均有 dB 刻度。当电压比的单位用分贝数表示时，表示式为

$$\text{dB数} = 20\lg \frac{U_o}{U_i} \text{ 或 } \text{dB数} = 10\lg \frac{P_o}{P_i}$$

直接用电压比或功率比的表示方法，往往因数量级太大而不便于作图计算。而用分贝表示就不存在这一问题，况且可以简化多级放大器放大倍数的计算。特别是在电声领域，人耳对声音强弱的感觉，不是与声功率的大小成正比的，而是与声功率的对数成正比的。因此，用功率比的对数来表示放大倍数或衰减倍数，更能适应人耳的听觉规律。

(2) 分贝数的测量

电平是一个相对量，必须确定一个功率基准 P_0 或电压基准 U_0 。我们定义：功率电平是指电路上某点的功率 P_x 与基准功率 $P_0 = 1\text{mW}$ 的比值用对数表示。通常基准功率 P_0 规定为在 600Ω 电阻上消耗 1mW 的功率，所以功率电平表示为

$$K_p[\text{dB}] = 10\lg \frac{P_x}{P_0} = 10\lg P_x$$

根据上述定义，若电路中某点的功率为 1mW ，显然此点的功率电平为 0dB 。

由 $P_0 = U_0^2/R$ ， $R = 600\Omega$ ，可知 $U_0 = \sqrt{P_0 R} = \sqrt{10^{-3} \times 600} = 0.775\text{V}$ 。我们定义电路中任意点电压 U_x 和基准电压 $U_0 = 0.775\text{V}$ 的比值取对数，为电压电平，即

$$K_v[\text{dB}] = 20\lg \frac{U_x}{U_0} = 10\lg \frac{U_x}{0.775}$$

根据上述定义，若电路中某点的电压为 0.775V ，显然此点的电平为 0dB 。所以在毫伏表与万用表的 dB 标尺上，相应于 0.775V 处刻有 0dB 的标志，大于 0.775V 时分贝为正值，小于 0.775V 时分贝则为负值。

分贝是用对数表示的功率比的单位，当它移用到电压比上时，应区别是相同电阻上的电压还是不同电阻上的电压。但很多仪器上的衰减器，各衰减挡的输出电阻是不同的，而它仍按 $20\lg(U_o/U_i)$ 的表达式来决定分贝数的刻度；还有放大器的放大倍数，虽然输入电阻与输出电阻往往差异非常大，当用分贝数来表示电压放大倍数时，也还是取 $20\lg(U_o/U_i)$ 这个表达式。将分贝当做量度的相对单位。如某信号源定 $1\mu\text{V}$ 为 0dB ，则 1V 为 120dB 。当毫伏表

的量程置于×1伏挡时，直接由表头的读数得到分贝值；当量程为其他各挡时，应将读数加一修正值：

实际值 = 所选挡的仪器读数 + 修正值

$$\text{修正值} = 10 \lg \frac{600\Omega}{Z_i} \quad (Z_i \text{ 为所测点的阻抗})$$

例如，若毫伏表挡位指示为3V/10dB，在量程为3V挡时，仪器读数为-2dB，则实际值为-2 + 10 = 8dB。

3.3.2 网络的频域测量

正弦信号激励下，网络稳态响应与激励之间的关系称为网络函数。网络函数是一复数，若 \dot{E} 为激励函数， \dot{R} 为稳态响应，其一般形式定义为

$$H(j\omega) = \frac{\dot{R}}{\dot{E}} = |H(j\omega)| \angle \varphi(j\omega)$$

式中， $|H(j\omega)|$ 为网络函数的模， $\angle \varphi(j\omega)$ 为网络函数的幅角。它们都是频率的函数，分别称为网络的幅频特性和相频特性。二者又统称为频率特性（参见9.1节）。

随着所选响应和激励的不同，网络函数可以有以下6种类型，如图3.6所示：

$$\begin{aligned} \text{策动点阻抗: } z_{11} &= \left. \frac{\dot{U}_1}{\dot{I}_1} \right|_{i_2=0} & \text{策动点导纳: } y_{11} &= \left. \frac{\dot{I}_1}{\dot{U}_1} \right|_{\dot{U}_2=0} \\ \text{转移阻抗: } z_{21} &= \left. \frac{\dot{U}_2}{\dot{I}_1} \right|_{i_2=0} & \text{转移导纳: } y_{21} &= \left. \frac{\dot{I}_2}{\dot{U}_1} \right|_{\dot{U}_2=0} \\ \text{传输电压比: } t_{11} &= \left. \frac{\dot{U}_2}{\dot{U}_1} \right|_{i_2=0} & \text{传输电流比: } h_{21} &= \left. \frac{\dot{I}_2}{\dot{I}_1} \right|_{\dot{U}_2=0} \end{aligned}$$

一般用得较多的是策动点阻抗和传输电压比。网络函数可以分为两大类：一类是激励和响应属于同一端口，此时网络函数称为输入函数，如输入阻抗或导纳；另一类是激励和响应不属于同一端口，此时称之为转移函数或传输函数，如转移阻抗、传输电流比等。

通过实验也可测量出频率特性。根据测量手段不同，可分为逐点描述法和扫频测量法。

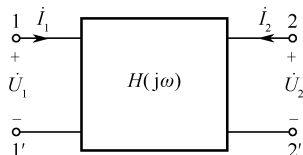


图 3.6 网络函数示意图

1. 逐点描述法

在电路实验中，可采用如图 3.7 所示的电路，测量策动点的阻抗。保持信号源输出幅度为一定值，根据被测网络频率作用的范围，改变信号源的频率，用毫伏表测量网络的输入电压 U 和取样电阻 R_0 上的电压 U_R 。需要说明的是，由于信号源的一端是接地的，因此被测网络的策动点端子不能接地，只能用信号源电压 U_s 近似代替策动点端子电压 U ，图中 R_0 是为测量电流而接入的，应很小，一般为 $1\sim 10\Omega$ ，测量出此电阻上的电压 U_R ，算出网络在不同频率时的

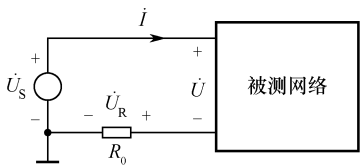


图 3.7 策动点阻抗的示例电路

电流值 $I = U_R / R_0$ ，即可得策动点阻抗的模 $|Z| = U_s / I$ 。对不同频率时策动点的阻抗模作曲线，就可得到策动点阻抗的幅频特性曲线。

用示波器的双踪法，测出不同频率时信号源电压和取样电阻上的电压的相位差，即可求得策动点阻抗的幅角，并作出相频特性曲线。

2. 扫频仪法

频率特性测试仪是一种用示波管直接显示网络频率特性曲线的专用仪器，在测量宽频带放大器、接收机的中频放大器、高频放大器及滤波器等频率特性中得到广泛应用。

扫频仪的基本思想有两方面：一方面是把逐点法中用手动改变频率的正弦信号源改造为频率随时间按一定规律反复变化的正弦信号源，称为扫频信号源；另一方面是将频率特性直接显示在示波管屏幕上。

测量过程中，要注意如下几个问题：

(1) 测量时应考虑信号源内阻对被测网络的影响。例如，测 RLC 串联谐振电路的幅频特性，要求信号源的内阻小，可用电压源；测并联谐振电路时要求信号源的内阻大，则应用电流源。但可变频率的电流源很少，通常采用电压源串联一个数百千欧的电阻，作为等效恒流源使用。

(2) 测量时应保持输入信号为一定值。一般信号源均有内阻，作为信号源负载的被测网络，随频率改变，网络的输入阻抗也有所变化，因而引起信号源输出的变化，使测量误差增加。故要求每次改变频率后，均应重新调节信号源的输出，使其保持为一定值。这样测量结果才能反映网络自身的特性（参见 6.3 节）。

(3) 在多台电子仪器共同使用时, 应注意共地连接, 否则测量误差将增大, 甚至出现不合理的现象(参见 9.2 节)。

(4) 正确选用坐标纸并选好坐标, 使所作的曲线能反映被测网络的特性。

3.3.3 网络的时域测量

对于线性网络, 根据响应与激励的因果关系, 可将响应分解为零输入响应和零状态响应。零输入响应是激励为零时, 仅由初始状态引起的响应。零状态响应是初始状态为零时, 仅由激励引起的响应。初始状态与激励共同引起的响应称为全响应。所以

$$\text{全响应} = \text{零输入响应} + \text{零状态响应}$$

若网络是稳定的, 则零输入响应总是具有指数衰减的形式。对于一阶网络, 零输入响应的一般形式是

$$x(t) = x(0^+)e^{-\frac{t}{\tau}}$$

响应是按指数规律单调衰减的, 衰减的快慢与网络参数有关, 即取决于网络的时间常数 τ 。对于 RC 电路, $\tau = RC$; 对于 RL 电路, $\tau = L/R$ 。零输入响应与网络的初始状态呈线性关系。

零状态响应除了与网络参数有关外, 还取决于外加激励, 由于外加激励是多种多样的, 因而响应也是多样的。但是, 有两种零状态响应是基本的, 即网络的阶跃响应和冲激响应。阶跃响应是网络在阶跃信号激励下的零状态响应; 冲激响应是网络在冲激信号激励下的零状态响应。线性电路对随时间按任意规律变化的信号的响应, 是它的单位冲激响应与输入函数的卷积。因此, 只要求得到网络的单位冲激响应, 就可以通过卷积求得网络的零状态响应。一个电路的单位冲激响应是其单位阶跃响应对时间的导数, 单位阶跃响应是其单位冲激响应对时间的积分。因此, 网络的阶跃响应与冲激响应, 可以表征一个网络的特性。

用示波器可以观察瞬态特性的波形。网络的瞬态特性是时间的函数, 因此可以用示波器来观察响应的波形。但由于响应的瞬态过程通常都是很短的, 而且往往是非周期的, 除示波器的单次扫描可以观察外, 很难获得稳定的波形。为了方便观察响应波形, 必须使其周期性地重复出现。网络的阶跃响应、冲激响应和脉冲响应的观测可以参考第 8 章。一阶电路响应的测量, 包括时间常数的测量, 积分波形、微分波形的观测, 以及二阶电路响应的测量, 均可参阅本书第 8 章。

3.3.4 减小误差的途径

进行有效而可靠的测量，只有将误差控制在一定范围内，才能满足精度的需求。所谓精度（即精确度或准确度）是指测量的指示值与实际值之间的一致程度。在给定实验仪器的条件下，应从以下方面减小误差来提高测量精度。

1. 合理选择量程与正确使用仪表

仪表的精度等级是由引用误差来标明的。例如，某仪表在规定的使用条件下，最大绝对误差范围为最大量程（满刻度值）的 0.5%，用这个引用误差百分数的分子作为该仪表精度等级，即该仪表的精度是 0.5 级。虽然有引用误差，但它不是该仪表在实际测量中出现的误差，仪表的最大绝对误差与其量程成正比。因此在不超出量程的情况下，选择的量程越小，测量精度越高。这样，当指针在偏转过刻度盘 2/3 以上的位置时，测量才准确。

同等级的仪表在测量同一个值时，会出现不同的误差，严重时两表误差正负异号；指针式仪表与数字仪表混用时，也会加大误差值。在实际测量中，同一组数据应当用同一个仪表测量，以消除附加的误差。例如，某些电压源、电流源等仪器，自身带有电压表或电流表，这些仪表的显示值与学生在实验中所测的其他电压或电流值，是使用两个仪表测量的值，不应作为同一组数据来处理。另外，一些仪表使用时的放置方式对测量误差也是有影响的，如立式仪表卧式使用时测量误差可能会增大，因而在使用仪表时应该注意仪表是立式使用还是卧式使用，不要用错。

2. 合理选择测试电路与适当选择元器件的参数

测量仪器的接入对被测电路会产生一定的影响，根据电路结构及仪器特性的不同，将待测量仪器合理地接入电路，可有效降低测量误差。如在测量电阻的伏安特性时，应根据电阻的大小来确定电流表与电压表的相对位置。

在研究电路特性时，需要对元器件的参数进行调整，如对电阻值或电容值的调整（电感值的调整范围有限），应选择电阻值使电路的输入电阻（或阻抗）远大于信号源的输入内阻，选择电容值使电路的输出阻抗远小于测试仪器的输入阻抗。

3. 正确读取数据

使用模拟式仪表进行测量时，测量结果通常是用刻度给出的，因此在读取数据时，首先要姿势正确；正面观测仪表，视线应该垂直于刻度盘；弄清每个分格所代表的量值，根据有效位确定估读分格的数位，然后直接读出所

测量的电量值。使用数字仪表时，有效数字的位数体现在每个测量数据中。例如，用数字万用表测量电压时，无论是 mV 级还是 V 级，仪表均显示 3 位半或 4 位半数字，记录数据时，应根据有效位，将多余的数位舍去。这样既保证了测量精度，又节省了时间，数据也显得整齐。

练习与思考

1. 简述测量误差的定义和来源，绝对误差和相对误差有何联系和区别？
2. 根据实验测得的数据和有效数字的运算，分别计算下列各题的有效数字。
 - (1) 求 $412.18 + 94.265 + 0.961 + 28.351 + 7.55$ 。
 - (2) 求 $0.035 \times 54.245 \times 1.06798$ 。
 - (3) 求 $0.087 \times 64.25 \times 1.058$ 。
 - (4) $(2.6)^2 = \underline{\hspace{2cm}}$ ， $\sqrt{6.05} = \underline{\hspace{2cm}}$ ， $20 \lg 9.654 = \underline{\hspace{2cm}}$ 。
3. 为什么信号源发生器的输出电压幅度在接入被测电路后可能会发生变化？其变化程度与什么因素有关？
4. 应该如何测量带有直流成分的交流电压信号？