高等学校教材

电子线路实验

（第二版）

诸昌清　武元祯　雷有华　编

高等教育出版社

内容简介

本书是为高等院校电子、通信类本科生编写的电子线路实验教材。本书除有电子线路硬件实验外，还有电子线路的计算机模拟和计算机辅助测试实验。

全书共分五章。第一章为测量误差概述，第二章为电子测量仪器，其中介绍了常用电子仪器和很有发展前途的网络分析仪和逻辑分析仪的原理及使用。第三章为电子线路实验指示书，给出了十三个模拟电路基本实验、七个逻辑数字电路基本实验和五个综合训练的实验。第四章为电子线路的计算机辅助分析及测试。第五章为电子线路的计算机辅助分析及测试实验。

由于各部分实验相对独立，本书可供各种层次的本科和专科院校学生及有关科技人员使用。

本书经高等学校工科电工课程教学指导委员会电子线路课程教学指导小组委托谢嘉奎教授审阅。

高等学校教材
电子线路实验
（第二版）
诸昌清 武元祯 雷有华 编
*
高等教育出版社出版
新华书店北京发行所发行
四川省金堂新华印刷厂印装
*
开本 787×1092 1/16 印张 23 字数 524 000
1984年3月第1版
1991年4月第2版 1991年4月第1次印刷
印数 00 001—2 140
ISBN 7-04-003024-1/TN·142
定价 5.95 元

前　言

本书是为高等院校电子、通信类学生编写的电子线路实验教材。随着电子线路新理论、新电路的不断出现，电子线路已从分立元件电路向集成电路发展，实验和设计手段也向计算机辅助测试和计算机电路模拟发展。本书部分地反映了相应的内容。

本书共分五章。第一章和第二章是实验必备的基本知识。第一章简要介绍了实验中的误差及数据处理问题；第二章介绍了实验中常用电子仪器的基本原理、使用方法及注意事项。根据国家教育委员会制定的教学基本要求，第七节对低压直流稳压电源进行了较详细的分析。由于电子测量技术与大规模集成电路技术的紧密结合，出现了许多具有多种功能并可由计算机控制的智能化程控仪器，本章第八、九两节分别介绍了两种很有代表性的测试仪器，即用于网络分析的网络分析仪和用于数字域测试的逻辑分析仪。第三章是有关硬件电路的实验指示书，包括逻辑电路、模拟电路中的线性电路和非线性电路的实验内容。其中有足够数量的基本实验，以给学生打下坚实的实验基本功；还有相当数量的综合实验，使学生在练好基本功的基础上能进行简单的电路设计，能选择实验仪器、安排实验方案、调整实验电路、查找排除故障，培养学生独立解决实际问题的能力；另外也有一些反映现代电子技术最新发展的实验内容，可供少数学生选做。第四、五章是有关电子线路的计算机辅助分析和测试的内容。电子线路发展到集成化以后，计算机辅助分析和测试已成为不可缺少的工具。在电子线路实验教学中，应使学生初步掌握电子线路计算机辅助分析和测试的手段。本书从实验的角度简单介绍了电子线路计算机辅助测试和计算机模拟。第四章介绍了电子线路计算机模拟程序TADS-C2（模拟电路）和TADS-L2（逻辑电路）的功能及使用方法（此二程序由高等教育出版社出版）；另外，简单介绍了电子线路计算机辅助测试系统中使用的GPIB标准接口及测量仪器的程控等。第五章给出了模拟电路和逻辑电路的计算机模拟和计算机辅助测试的实验。

完成本书的全部实验共需240学时。也可选用部分实验，若选用第三章全部电路实验，需180学时，若只选用第三章中的基本实验，需130学时。

本书第一章，第二章（除第九节），第三章中实验十四、十五、十六、十七、二十、二十三，第四章第一部分及第五章中实验一、二、六、七、八由诸昌清同志编写。第三章除上述实验外的内容及附录由武元祯同志编写。第四章第二部分和第五章实验三、四、五，第二章第九节由雷有华同志编写。

本书编写过程中得到本教研组同志们的大力支持。东南大学谢嘉奎教授对此书进行了详细审阅，提出了不少宝贵意见。在此对他们表示感谢。

由于编者水平所限，书中难免存在错误，诚恳希望读者批评指正。

编　者

1989年10月于清华大学电子工程系

目　　录

第一章　测量误差概述

测量是通过实验获得对客观事物定量表征的过程。

测量技术是应用科学，测量所用的仪器是科学理论发展的成果，而测量结果是验证理论的客观标准。通过测量可以揭示自然界的奥秘，可以发现理论中存在的问题以及理论的、近似性和局限性，从而促进科学理论进一步发展。所以测量技术和科学理论的发展是相辅相成的。随着科学的发展，测量技术日趋完善，测量的精确度也越来越高。

根据获得测量结果的方法不同，可将测量分为两大类：

第一类是直接测量，它是直接从实验数据中获得测量结果。例如，用电流表测量电流，用欧姆表测量电阻等。

第二类是间接测量，直接测量的量不是被测量，而是与被测量有一定函数关系的几个量，经过该函数关系的运算，便可求得被测量。

但无论用什么测量方法，测量的结果都不是完全精确的，而是带有一定的误差。

§1　测量误差的概述

在测量中，由于测量仪器有限的精确度、测量方法不完善或测量者的生理限制和测量环境不同等各种因素，测量结果总是有误差的。即测量结果和被测量的真实值之间总有差别，这种差别被称为测量误差。误差始终存在于所有的测量过程中。进行测量的实验人员的任务是，在测量要求的范围内，力求使误差最小，并能对测量误差作出估计，以便有效地消除误差。为此，必须了解误差的定义、产生原因、计算方法等。下面首先讨论几种常用的误差定义。

绝对误差，用 Δx 表示，其定义为

$$\Delta x = x - A_0 \tag{1-1}$$

式中，x 为测量值，即仪表的示值；A_0 为被测量在指定环境下的真实值（简称真值）。真值是客观存在的，但由于人们对客观事物认识的局限性，测量值只能接近真值。因此在实际情况下，常用国家计量局的标准测得的量值（称指定值，用 A_s 表示）或计量检测网的直接上级标准测得的量值（称实际值，用 A 表示）作为真值。当用 A 代替 A_0 时，则有

$$\Delta x_A = x - A$$

这里，Δx_A 称为实际绝对误差，实际工作中经常使用这种误差。

测量中还经常用到修正值的概念，若用 δx 表示修正值，则其定义为

$$\delta x = -\Delta x = A_0 - x \tag{1-2}$$

上述绝对误差不能表明测量的精度。为表明测量精度，又定义了相对误差。

相对误差，用符号 γ 表示，其定义为

$$\gamma=\frac{\Delta x}{A_0}\times 100\% \tag{1-3}$$

此外又定义实际相对误差为

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

示值相对误差为

$$\gamma_x=\frac{\Delta x}{x}\times 100\%$$

测量中应用较广泛的是示值相对误差。相对误差可为正值，也可为负值。另外，还定义了相对修正值(或称相对补值)，它与相对误差大小相等，符号相反，用 γ_n 表示，即

$$\gamma_n=-\gamma=\frac{A_0-x}{A_0}\times 100\% \tag{1-4}$$

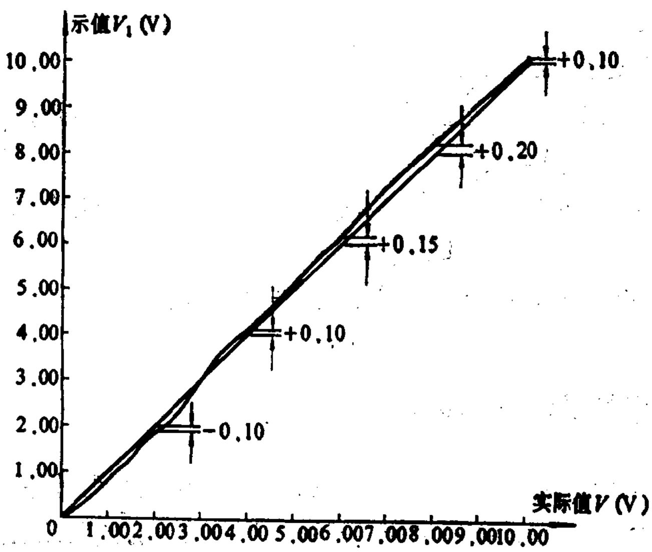

图1-1-1 某10 V 电压表示值 V_1 与实际值 V 的关系曲线

还必须注意到用仪表测量某些电学量，当该仪表的示值不相同时，测量的绝对误差和相对误差均不相同。例如，某电压表各点的示值 V_1 与实际值 V 之间有如图 1-1-1 中曲线所示的关系。图中实际值 V 是用检测网的直接上级精度足够高的电压表测出的电压值，即图 1-1-1 中的 45° 直线(本例以下讨论的测量误差均以实际值代替真值)。由曲线可见，电压表在 2 V、4 V、6 V、8 V 和 10 V 各点的绝对误差和相对误差分别为：

$$\Delta V_2=1.90-2.00=-0.10\ \text{V} \qquad \gamma_2=\frac{-0.10}{2.00}\times 100\%=-5\%$$

$$\Delta V_4=4.10-4.00=+0.1\ \text{V} \qquad \gamma_4=\frac{+0.10}{4.00}\times 100\%=+2.5\%$$

$$\Delta V_6=6.15-6.00=+0.15\ \text{V} \qquad \gamma_6=\frac{+0.15}{6.00}\times 100\%=+2.5\%$$

$$\Delta V_8=8.20-8.00=+0.2\ \text{V} \qquad \gamma_8=\frac{+0.2}{8.00}\times 100\%=+2.5\%$$

$$\Delta V_{10}=10.10-10.00=+0.1\ \text{V} \qquad \gamma_{10}=\frac{+0.1}{10.00}\times 100\%=+0.1\%$$

此例除说明同一仪表示值不同时测量的绝对误差和相对误差均不相同外，还说明由于一般仪表在整个量程范围内，相对于满量程值上的绝对误差 Δx 是很小的，所以要提高测量精度，即减小相对误差，在测量时应尽量使仪表指针指示在度盘的 2/3 至满量程的区域内。

§2 误差的传递

间接测量是由直接测量组成的，直接测量的误差必然会引起间接测量的误差，称为误差的传递。由于间接测量与直接测量的量之间的函数关系不同，直接测量引起间接测量的误差也不同。可以用误差传递公式来计算间接测量误差。下面介绍几种常用函数的误差传递公式。

§2.1 和、差函数的误差

设间接测量的量 y 与两个直接测量的量 x_1 和 x_2 之间的关系为

$$y=ax_1+bx_2$$

直接测量 x_1 和 x_2 时，测量值与实际值 A_{x_1} 和 A_{x_2} 之间的绝对误差分别为 Δx_1 和 Δx_2，即

$$x_1=A_{x_1}+\Delta x_1$$

$$x_2=A_{x_2}+\Delta x_2$$

假设间接测量的 y 值的绝对误差为 Δy，y 的实际值为 A_y。则有

$$\begin{aligned} y=A_y+\Delta y=ax_1+bx_2&=a(A_{x_1}+\Delta x_1)+b(A_{x_2}+\Delta x_2)\\ &=(aA_{x_1}+bA_{x_2})+a\Delta x_1+b\Delta x_2=A_y+a\Delta x_1+b\Delta x_2 \end{aligned}$$

所以间接测量的绝对误差为

$$\Delta y=a\Delta x_1+b\Delta x_2$$

同理，若 $y=ax_1-bx_2$，则

$$\Delta y=a\Delta x_1-b\Delta x_2$$

和与差函数的绝对误差都有四种组合，即间接测量可能使误差为正值或负值，但应取最坏情况来计算间接测量误差，所以在最坏情况下无论和或差函数的误差均为

$$\Delta y=|a\Delta x_1|+|b\Delta x_2| \tag{1-5}$$

和与差函数的相对误差为

$$\gamma_y=\frac{\Delta y}{A_y}=\frac{a\Delta x_1\pm b\Delta x_2}{A_y}=\frac{A_{x_1}}{A_y}\frac{a\Delta x_1}{A_{x_1}}\pm\frac{A_{x_2}}{A_y}\frac{b\Delta x_2}{A_{x_2}}$$

$$\gamma_y=\frac{A_{x_1}}{A_y}a\gamma_{x_1}\pm\frac{A_{x_2}}{A_y}b\gamma_{x_2} \tag{1-6}$$

或近似地用测量值 x_1、x_2 和计算值 y 代替实际值 A_{x_1}、A_{x_2} 和 A_y，则有

$$\gamma_y\approx\frac{x_1}{y}a\gamma_{x_1}\pm\frac{x_2}{y}b\gamma_{x_2} \tag{1-7}$$

其中，γ_{x_1} 和 γ_{x_2} 分别为测量 x_1 和 x_2 时的相对误差。

§2.2 积、商函数的误差

先求积函数的误差：

$$\begin{aligned} y=x_1x_2&=(A_{x_1}+\Delta x_1)(A_{x_2}+\Delta x_2)\\ &=A_{x_1}A_{x_2}+A_{x_1}\Delta x_2+A_{x_2}\Delta x_1+\Delta x_1\Delta x_2\\ &=A_y+A_{x_1}\Delta x_2+A_{x_2}\Delta x_1+\Delta x_1\Delta x_2 \end{aligned}$$

其中，$\Delta x_1 \Delta x_2$ 为二阶微小量，可忽略，则

$$y \approx A_y + A_{x_1}\Delta x_2 + A_{x_2}\Delta x_1 \approx A_y + \Delta y$$

即 y 的绝对误差为

$$\Delta y \approx A_{x_1}\Delta x_2 + A_{x_2}\Delta x_1 \approx x_1\Delta x_2 + x_2\Delta x_1 \tag{1-8}$$

y 的相对误差为

$$\gamma_y = \frac{\Delta y}{A_y} \approx \frac{A_{x_1}\Delta x_2 + A_{x_2}\Delta x_1}{A_{x_1}A_{x_2}} \approx \frac{\Delta x_1}{A_{x_1}} + \frac{\Delta x_2}{A_{x_2}} \approx \gamma_{x_1} + \gamma_{x_2} \tag{1-9}$$

下面求商的误差：

$$y = \frac{x_1}{x_2} = \frac{A_{x_1} + \Delta x_1}{A_{x_2} + \Delta x_2}$$

分母、分子同乘$(A_{x_2} - \Delta x_2)$，得

$$y = \frac{(A_{x_1} + \Delta x_1)(A_{x_2} - \Delta x_2)}{A_{x_2}^2 - \Delta x_2^2} = \frac{A_{x_1}A_{x_2} + A_{x_2}\Delta x_1 - A_{x_1}\Delta x_2 - \Delta x_1\Delta x_2}{A_{x_2}^2 - \Delta x_2^2}$$

忽略二阶微小量，则

$$y \approx \frac{A_{x_1}A_{x_2} + A_{x_2}\Delta x_1 - A_{x_1}\Delta x_2}{A_{x_2}^2} = \frac{A_{x_1}}{A_{x_2}} + \frac{A_{x_2}\Delta x_1 - A_{x_1}\Delta x_2}{A_{x_2}^2}$$

即 y 的绝对误差为

$$\Delta y \approx \frac{A_{x_2}\Delta x_1 - A_{x_1}\Delta x_2}{A_{x_2}^2} \tag{1-10}$$

y 的相对误差为

$$\gamma_y = \frac{\Delta y}{A_y} \approx \frac{A_{x_2}\Delta x_1 - A_{x_1}\Delta x_2}{A_{x_2}^2} \cdot \frac{A_{x_2}}{A_{x_1}} = \frac{\Delta x_1}{A_{x_1}} - \frac{\Delta x_2}{A_{x_2}} = \gamma_{x_1} - \gamma_{x_2} \tag{1-11}$$

对和、差、积、商函数误差公式的使用，作以下几点说明：

1．计算和、差函数误差时，先计算绝对误差较方便，因为 $\Delta y = a\Delta x_1 \pm b\Delta x_2$，只有加(或减)运算，如需计算相对误差，只要将已计算出的 Δy 代入 $\gamma_y = \Delta y / A_y$ 即可。而计算积、商函数误差时，先计算相对误差较方便，因为 $\gamma_y = \gamma_{x_1} \pm \gamma_{x_2}$，如需计算绝对误差，再将已算出的 γ_y 代入 $\Delta y = \gamma_y y$ 即可。

2．由上述推导总结出两个很重要的误差传递规律，即：

(1) 和(差)函数的绝对误差等于各量的绝对误差相加(减)(当 $y = x_1 \pm x_2$ 时)。

(2) 积(商)函数的相对误差等于各量的相对误差相加(减)。

在使用按上述两条规律推导出的较复杂的误差公式来估计测量误差时，一般要取最大误差，即估计得最保险。在推导式 (1-10) 的过程中，是将所有误差绝对值相加来得到保险估计。但并非所有情况下最大误差均为各项误差绝对值相加。例如：

$$y = x_1(x_1 - x_2)$$

求其绝对误差的步骤如下：

$$y = x_1^2 - x_1x_2$$

令

$$y_1 = x_1^2; \quad y_2 = x_1 \cdot x_2$$

$$\gamma_{y_1} = \gamma_{x_1} + \gamma_{x_1} = 2\frac{\Delta x_1}{x_1}$$

$$\gamma_{y_2}=\gamma_{x_1}+\gamma_{x_2}=\frac{\Delta x_1}{x_1}+\frac{\Delta x_2}{x_2}$$

$$\Delta y_1=y_1\gamma_{y_1}=x_1^2\,\frac{2\Delta x_1}{x_1}=2x_1\Delta x_1$$

$$\Delta y_2=y_2\gamma_{y_2}=x_1x_2\left(\frac{\Delta x_1}{x_1}+\frac{\Delta x_2}{x_2}\right)=x_2\Delta x_1+x_1\Delta x_2$$

若这时不加考虑就直接用各误差的绝对值相加求 Δy，即

$$\Delta y=|\Delta y_1|+|\Delta y_2|$$

而 Δy_2 在最坏的情况下为 $|x_2\Delta x_1|+|x_1\Delta x_2|$，得

$$\Delta y=|2x_1\Delta x_1|+|x_2\Delta x_1|+|x_1\Delta x_2| \tag{1-12}$$

这就错了。因为 Δy 应为

$$\Delta y=\Delta y_1-\Delta y_2$$

$$\Delta y=2x_1\Delta x_1-[x_2\Delta x_1+x_1\Delta x_2] \tag{1-13}$$

即

$$\Delta y=(2x_1-x_2)\Delta x_1-x_1\Delta x_2$$

这时取最大误差为

$$\Delta y=|(2x_1-x_2)\Delta x_1|+|x_1\Delta x_2| \tag{1-14}$$

式(1-14)的结果是正确的，式(1-12)之所以错误，是将式(1-13)中第一项里的 Δx_1 看做正误差、将第二项里的 Δx_1 看做负误差而得到的结果。第一、二两项误差均由 Δx_1 引起的，只能对 Δx_1 取同一符号。所以只能用式(1-14)，而不能用式(1-12)计算 Δy。因此必须注意，对于同一个量在不同项中引起的误差必须用相同的符号，不能简单地认为误差绝对值相加就是最大误差。

从以上推导的几种函数误差传递公式可以看出，所有误差传递公式和函数的微分具有相同的形式。这是因为误差本身就是测量的微小偏差，它相当于函数的增量。下面给出用微分形式表示的函数误差传递公式。

当间接测量与 x_1、x_2、…、x_m 有多元函数关系的 y 值时，即

$$y=f(x_1,\ x_2,\ \cdots,\ x_m)$$

且 x_1、x_2、…、x_m 的测量误差互不相关，则测量的绝对误差为

$$\Delta y=\frac{\partial f}{\partial x_1}\Delta x_1+\frac{\partial f}{\partial x_2}\Delta x_2+\cdots+\frac{\partial f}{\partial x_m}\Delta x_m$$

即

$$\Delta y=\sum_{i=1}^{m}\frac{\partial f}{\partial x_i}\Delta x_i \qquad i=1,\ 2,\ \cdots,\ m \tag{1-15}$$

式(1-15)为误差传递公式，即由直接测量的绝对误差求函数绝对误差的一般公式。

多元函数的相对误差为

$$\gamma_y=\frac{\Delta y}{y}=\frac{1}{y}\sum_{i=1}^{m}\frac{\partial f}{\partial x_i}\Delta x_i$$

$$\gamma_y=\sum_{i=1}^{m}\frac{f_i'}{f(x)}\Delta x_i \tag{1-16}$$

对于单变量函数，有

$$\frac{f'}{f(x)}=\frac{\frac{\mathrm{d}f(x)}{\mathrm{d}x}}{f(x)}=\frac{\mathrm{d}\ln f(x)}{\mathrm{d}x}$$

相应地对多元函数，有

$$\frac{f'}{f(x)}=\frac{\partial \ln f(x)}{\partial x_i}$$

代入式(1-16)得

$$\gamma_y=\frac{\Delta y}{y}=\sum_{i=1}^{m}\frac{\partial \ln f(x)}{\partial x_i}\Delta x_i \qquad (1\text{-}17)$$

式(1-17)为计算函数相对误差的一般公式。

下面举例说明测量误差及误差传递问题。

例 1 图 1-2-1 所示为晶体管放大器，要求测量该放大器静态工作时晶体管 3DG4 的发射结压降 V_{BEQ}。测量所用电压表，有如图 1-1-1 所示的误差特性。求出测量的绝对误差和相对误差。

解：假设电压表的内阻很大，可不考虑表内阻对测量的影响。另外由于所用电压表满量程为 10 V，而通常晶体管在放大区工作时，V_{BEQ} 约为 0.7 V，用 10 V 量程的表测约为 0.7 V 的电压，读数易产生误差，且易产生较大的相对误差。因此采用测量 V_B 和 V_E 然后用公式 $V_{BEQ}=V_B-V_E$ 来计算出测量结果的方法。

测量 V_B 时，电压表的示值为 $V_{B1}=4.60$ V；测量 V_E 时，电压表的示值为 $V_{E1}=3.95$ V。由图 1-1-1 可知，它们的实际值分别为 $V_B=4.50$ V，$V_E=3.80$ V。即测量的绝对误差分别为 $\Delta V_B=V_{B1}-V_B=4.60\text{ V}-4.50\text{ V}=0.10$ V；$\Delta V_E=V_{E1}-V_E=3.95\text{ V}-3.80\text{ V}=0.15$ V，间接测得的 $V_{BEQ}=V_{B1}-V_{E1}=4.60\text{ V}-3.95\text{ V}=0.65$ V，测得的 V_{BEQ} 的绝对误差为 $\Delta V_{BEQ}=\Delta V_B-\Delta V_E=0.10\text{ V}-0.15\text{ V}=-0.05$ V，V_{BEQ} 的相对误差为 $\gamma_{BE}\approx\frac{\Delta V_{BEQ}}{V_{BEQ}}=\frac{-0.05}{0.65}\times 100\%=-7.69\%$。

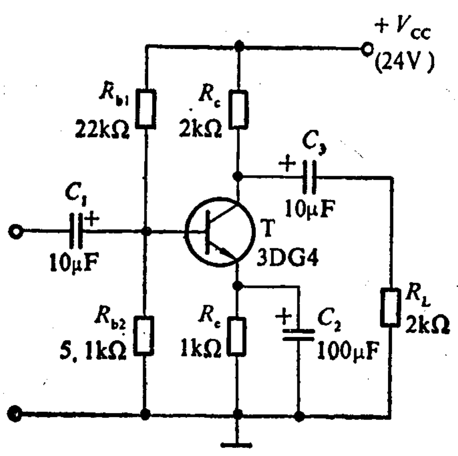

图 1-2-1 晶体管放大器

例 2 测量图 1-2-1 所示晶体管放大器静态工作时的发射极电流 I_{EQ}，测量仍用有图 1-1-1 所示误差特性的电压表。

解：要求测量 I_{EQ} 值。在测量电流时，需要断开被测电流支路，将电流表串入进行测量，测量完毕又需复原电路，因此测量非常不便。通常测量 I_{EQ} 值采用测量电阻 R_e（或用 R_e 的标称值代替）及其上的电压 V_E，然后用公式 $I_{EQ}=\frac{V_E}{R_e}$ 得到要求的测量结果。

测量电压时，仍认为可不计电压表内阻。电阻的测量值用标称值 R_e 代替：

$$R_e=1.00\text{ k}\Omega$$

电阻的相对误差用电阻上标明的值，例如用 ±5%，即 $\gamma_R=\pm5\%$。

电阻的绝对误差为

$$\Delta R_e=R_e\times(\pm5\%)=1.00\ \mathrm{k\Omega}\times(\pm5\%)=\pm0.05\ \mathrm{k\Omega}$$

电压测量值 $V_{E1}=3.95$ V。

电压测量值的绝对误差为

$$\Delta V_E=V_{E1}-V_E=3.95\ \mathrm{V}-3.80\ \mathrm{V}=0.15\ \mathrm{V}$$

电压测量相对误差为

$$\gamma_V=\frac{0.15}{3.95}=3.80\%$$

电流测量结果为

$$I_{EQ}=\frac{V_{E1}}{R_e}=\frac{3.95\ \mathrm{V}}{1.00\ \mathrm{k\Omega}}=3.95\ \mathrm{mA}$$

计算测量的误差时，均用测量值代替实际值。

测量 I_{EQ} 的绝对误差：

$$\Delta I_{EQ}=\frac{R_e\Delta V_E-V_E\Delta R_e}{R_e^2}=\frac{1.00\ \mathrm{k\Omega}\times0.15\ \mathrm{V}-3.95\ \mathrm{V}\times(\pm0.05\ \mathrm{k\Omega})}{(1.00\ \mathrm{k\Omega})^2}$$

$$=0.15\mp0.198=\begin{cases}-0.048\ \mathrm{mA}\\ 0.348\ \mathrm{mA}\end{cases}$$

最坏情况为 $\Delta I_{EQ}=0.348$ mA。

I_{EQ} 的最大相对误差为

$$\gamma_I=\frac{\Delta I_{EQ}}{I_{EQ}}=\frac{0.348}{3.95}=8.8\%$$

或用 $\gamma_I=\gamma_V-\gamma_R=3.80\%-(\pm5\%)=\begin{cases}8.8\%\\1.2\%\end{cases}$

最坏情况为 $\gamma_I=8.8\%$。

§3 测量数据的处理

这节介绍如何读取和记录实验数据和如何对实验数据进行计算的问题。

§3.1 有效数字

数有正确数和近似数之别，例如，1/2、2、80 和 π、e、$\sqrt{2}$ 等均为正确数。当需要用数字表示π、e 和 $\sqrt{2}$时，可写为 3.141、2.713 和 1.414 等，这些数只与 π、e 和 $\sqrt{2}$ 相近似，而并不相等，所以它们是近似数。近似数是接近于正确数而又不恰好等于正确数的数。

前面讲过，测量总存在误差，多次测量的平均值也存在误差，而不能等于真值。此外，间接测量需要用直接测量的结果进行计算，有时计算过程中会遇到无理数。所有这些情况均使得数据是近似数，如何用近似数恰当地表示测量结果，就涉及到有效数字问题。下面对有效数字作简单介绍。

例如，在测量一个电压时，测量结果可能记为 6 mV，也可能记为 6.00 mV，从数值的观点来看，它们似乎没有区别，但从测量的意义来看，它们有根本的不同，记为 6 mV 表示 6 mV 以后小数位的数量是没有测出的量，它完全可能不是“0”。而 6.00 mV 表明 6 mV 以后的两位小数测量到了，而且其第一位确实就是“0”，第二位为存疑数。由此可见，对测量结果的数字记录应有严格的要求，在测量中判断哪些数应该记或不该记的标准是误差。在有误差的那位数字以左的各位数字都是可靠数字，均应记；有误差的那位数字为存疑数，也应记；而有误差的那位数字以右的各位数字都是不确定的，用任何数字表示都是无效的，都不应该记。因此，在测量中，称从最左面一位非零数字起到含有误差的那位存疑数字止的所有各位数字为有效数字。

例如，测量一个电阻，记录其值为 10.43 Ω，其中 1043 是四位有效数字；又如测量一电压，记录其值为 0.0063 V，只有 63 两位为有效数字，因为根据有效数字的定义，最左面第一个非零数字(此处为 6)以左的零不算有效数字。再如，测量一电流，记录其值为 1000 mA，是四位有效数字，若以 A 为单位记录此数，应写为 1.000 A，不能写为 1 A，因为 1 A 只有一位有效数字，而实际测量精度达到四位有效数字。由此三例总结出用有效数字记录测量结果时的几点注意事项：

1. 用有效数字来表示测量结果时，可以从有效数字的位数估计出测量的误差。一般规定误差不超过有效数字末位单位数字的一半。例如，测量结果记为 1.000 A，小数点后第三位为末位有效数字，其单位数字为 0.001 A，单位数字的一半即 0.0005 A，测量误差可能为正或负，所以 1.000 A 这一记法表示测量误差为 ±0.0005 A。由此可见，记录测量的结果有严格的要求，不要少记有效数字位数，少记会带来附加误差；也不要多记有效数字位数，多记则夸大了测量精度。

2. 有关“0”是否为有效数字的问题：非零数字中间的“0”是有效数字，如第一例中的 10.43 Ω，中间的“0”是有效数字；“0”在最左面是非有效数字，如第二例中的 0.0063 V，三个“0”均非有效数字，这三个“0”只是补充定位用的，不算有效数字，即有效数字位数与小数点位置无关；此外，“0”在最右面应为有效数字，若测量精度达不到，不能在数字右面随意加“0”，如第三例中记为 1000 mA 或 1.000 A 说明测量误差达到 ±0.0005 A，若测量误差是 ±0.005 A 那就只能记为 1.00 A。

3. 有效数字不能因采用的单位变化而增或减。如第三例中，用 A 作单位，记作 1.000 A，用 mA 作单位，记作 1000 mA，二者均为四位有效数字。又如，有一测量结果记为 1 A，它是一位有效数字，若欲用 mA 为单位，不能记为 1000 mA，因为 1000 是四位有效数字，这样记夸大了测量精度，这时应记作 1×10^3 mA，它仍是一位有效数字。再如，一个记录数字为 13.5×10^5 Ω，它表示有三位有效数字，若用 kΩ 为单位，应记作 13.5×10^2 kΩ，不能记作 1350 kΩ，若用 MΩ 作单位，应记作 1.35 MΩ。总之，单位变化时，有效数字位数不应变化。

§ 3.2　数字的舍入原则

在利用测量数据进行计算的过程中，为使计算结果反映测量误差，必须注意计算过程中所

用数字和计算结果数字保留几位有效数字的问题。若需保留 n 位有效数字，(多于 n 位的数字应根据舍入原则进行处理。在一般数字计算中采用四舍五入，但在测量中由于数据要反映测量误差，因此从数字出现的概率和舍入后引起的舍入误差的考虑出发，采用如下舍入原则。

当需保留 n 位有效数字时，n 位以后余下的全部数值小于第 n 位单位数字的一半，则舍去；大于第 n 位单位数字的一半，则向第 n 位进 1；若等于第 n 位单位数字的一半，则视第 n 位数字的奇偶而定，第 n 位为偶数，则舍去第 n 位以后的数字，第 n 位为奇数，则向第 n 位进 1。这种舍入原则，只有当余下的数值等于第 n 位单位数字的一半时，才与古典的四舍五入的舍入原则相同。例如，有一数字为 301.5，要保留三位有效数字，根据古典的四舍五入原则，应写为 302，根据这里提出的舍入原则，也是 302；但有一数字为 302.5，要求保留三位有效数字，由古典法为 303，根据这里的舍入原则，应为 302。这里采用与古典四舍五入不同的舍入原则，是考虑到尽量减小舍入误差。因为第 n 位以后的数字从 1 到 9 出现的概率相同，使大于 5 或小于 5 舍入后引起的误差可以抵消。例如，第 $n+1$ 位为 1 或 9 引起的舍入误差为 -1 和 $+1$，多次舍入时，由于舍入概率相同，使舍入引起的误差可以抵消。若第 n 位后的数字恰是第 n 位单位数字的 0.5，由于第 n 位为奇数和偶数的概率相同，使舍入的概率相同，多次舍入也就会使舍入误差抵消，且舍入的结果为偶数，用它作为被除数时，除尽的机会比奇数多，有利于减小计算误差。

例如，26554、35.238 和 756.5 三个数，欲保留三位有效数字($n=3$)，经舍入后应为何值？其中 26554 应为 266×10^2，因为要求保留三位有效数字，后两位无效，用 $\times10^2$ 表示，第三位以后余下的全部数值为 54，大于第三位单位数 100 的一半，则入到第三位，得到所求的结果；第二个数 35.238 经舍入后应为 35.2，因为余下的全部数值 0.038 小于 0.1 的一半，则舍去；第三个数应为 756，因余下的全部数值恰为 1 的一半，第三位 6 又是偶数，则舍去 0.5。

§3.3 有效数字位数的保留

如前所述，测量值均存在误差，即测量值均为近似值，所以有关测量结果的计算均为近似计算，且计算结果也存在误差。用近似值进行计算，要求计算结果的最后一位数应当是存疑数字。不要多计算或少计算位数。根据以下一些考虑确定计算所用数据及计算结果数据应保留几位有效数字。

1. 加运算

对近似数进行加运算时，若计算结果的近似数为

$$x=x_1+x_2+\cdots+x_m=\sum_{i=1}^{m}x_i \qquad (i=1,\ 2,\ \cdots,\ m)$$

其中，x_1、x_2、…、x_m 均为近似数，它们的绝对误差分别为 Δx_1、Δx_2、…、Δx_m，和的绝对误差为

$$\Delta x=\Delta x_1+\Delta x_2+\cdots+\Delta x_m$$

由于 Δx_1、Δx_2、…、Δx_m 的值可能为正或负，所以有

$$\begin{aligned}\Delta x&=\Delta x_1+\Delta x_2+\cdots+\Delta x_m\\&\leqslant|\Delta x_1|+|\Delta x_2|+\cdots+|\Delta x_m|\end{aligned}\tag{1-18}$$

和的相对误差为

$$\gamma=\frac{\Delta x}{x}=\frac{x_1}{x}\gamma_1+\frac{x_2}{x}\gamma_2+\cdots+\frac{x_m}{x}\gamma_m$$

其中，γ_1、γ_2、…、γ_m 分别为各相加数的相对误差，第 k 项的相对误差为 γ_k，令它为所有相加各项中相对误差最大的一项，则有

$$\gamma\leqslant\frac{x_1}{x}\gamma_k+\frac{x_2}{x}\gamma_k+\cdots+\frac{x_m}{x}\gamma_k=\frac{x_1+x_2+\cdots+x_m}{x}\gamma_k$$

即

$$\gamma\leqslant\gamma_k \tag{1-19}$$

同理，令 γ_j 为所有相加各项中相对误差最小的一项，则有

$$\gamma\geqslant\gamma_j \tag{1-20}$$

由式(1-18)可知，和的绝对误差小于或等于相加各项绝对误差绝对值之和。由式(1-19)和(1-20)可知，和的相对误差介于相加各项中最大相对误差与最小相对误差之间。近似加法计算结果所保留的有效数字位数应满足这两个条件。通常按以下方法进行近似数加法运算就能满足上述要求，即相加各项中有一误差最大的项，其它项均舍入到与误差最大项的末位对齐，然后进行计算。

例如，1.369+17.2+8.64，按照一般加法计算结果为27.209，该数若舍入到与最大误差项17.2有相同位数则为27.2。因为最大误差项17.2在小数点后有一位有效数字，因此其它两项均按§3.2的舍入原则舍入到小数点后一位（即与误差最大项17.2的末位对齐），因此1.4+17.2+8.6=27.2。有时为了避免在大量运算中因舍入造成的误差积累过大，可将其它项舍入到最大误差项末位的后一位，该位称为安全数字位，然后进行计算，计算结果再舍入到与误差最大项的末位对齐。例如，0.402+8.7+4.567+5.765，按照一般运算结果为19.434，若将该计算结果值舍入到与误差最大项8.7小数点后有同位数，则结果为19.4。若不用安全位进行近似计算，则应为0.4+8.7+4.6+5.8=19.5，与前面计算的19.4相差0.1。若用安全位计算则为0.40+8.7+4.57+5.76=19.43，再舍到19.4。由此可见多留一位安全数字的作用。

2．减运算

设 $x=x_1-x_2$，则最大绝对误差为

$$\Delta x_m=|\Delta x_1|+|\Delta x_2| \tag{1-21}$$

相对误差为

$$\gamma_x=\frac{\Delta x}{x}=\frac{|\Delta x_1|+|\Delta x_2|}{x}=\frac{x_1}{x}\gamma_1+\frac{x_2}{x}\gamma_2 \tag{1-22}$$

当 $x_1\gg x_2$ 时，$x\approx x_1$，则有

$$\gamma_x\approx\gamma_1 \tag{1-23}$$

在这种情况下，差数 x 的有效数字位数应与被减数 x_1 的有效数字位数相同，因此计算时把减数舍入到与被减数的末位对齐再相减，或减数多留一位安全数字，相减后差数再舍入到与被减数的末位对齐。

若被减数与减数相差很小，如 $5314.82-5314.71=0.11$，减数与被减数均为六位有效数字，而计算结果只有两位有效数字，原始数据的绝对误差为 0.005，相对误差为 $\frac{1}{10^6}$。而由式(1-21)可知，两数差的最大绝对误差为 $0.005+0.005=0.01$，差的相对误差为 $\frac{0.01}{0.11}\approx 10\%$，比原始数据的误差大了一万倍。因此，在对实验数据进行近似计算时，要避免用两个相近的数相减，以免增加误差。

3．乘(除)运算

设近似数为 $x=x_1x_2$ 或 $x=x_1/x_2$，运算结果最大相对误差为

$$\gamma_{xm}=|\gamma_1|+|\gamma_2| \tag{1-24}$$

由式(1-24)可见，进行乘、除运算的次数越多，相对误差也越大，必须注意这一问题。用以下乘(除)法运算规则可满足式(1-24)，即当有效数字位数相同的数进行乘(除)运算时，计算结果要保留相同位数的有效数字。例如，$3.55\times1.23=4.3665$，积只要保留到小数点后第二位即可，即乘积记为 4.37。

当几个有效数字位数不同的数相乘(除)时，将各数预先舍入到有效数字位数最少的因子的位数，再进行运算，最后将积(商)值舍入到与有效数字位数最少的因子有相同位数。例如，$0.385\times9.712\times26.164$，其中有效数字位数最少的因子是 0.385。因此各数均舍入到三位有效数字，即 $0.385\times9.71\times26.2$，计算如下

$$\begin{array}{r} 0.385 \\ \times\quad 9.71 \\ \hline 385 \\ 2695 \\ 3465 \\ \hline 3.73835 \end{array} \longleftarrow \text{中间结果舍入到三位有效数字} \qquad\qquad \begin{array}{r} 3.74 \\ \times\quad 2.62 \\ \hline 748 \\ 2244 \\ 748 \\ \hline 9.7988 \end{array}$$

计算结果舍入到三位有效数，即 9.80。有时为了避免计算造成的附加误差，各因子比有效数字位数最少的因子多取一位安全数字。

第二章　电子测量仪器

电子测量仪器在电子线路实验和电子科学技术的发展中起着很重要的作用。掌握了电子测量仪器的原理和性能，就能很好地使用或开发它们。利用它们有效地解决电子线路设计、故障查找及维修、电路参数和性能的测量等方面的问题，使它们更好地为发展电子科学技术服务。

电子科学技术发展迅速，相应地电子测量仪器也得到了快速的发展，为适应这种发展的要求，本章除介绍最常用的示波器、晶体管参数图示仪、信号发生器、失真仪、Q 表、扫频仪和稳压电源外，还介绍一些较新的电子测量仪器，如网络分析仪和逻辑分析仪等。另外，对于基本常用仪器，不单是介绍国产仪器，还介绍了部分采用较新技术的国外仪器，这些仪器目前在我国已得到较广泛的应用。

§1　示波器的原理和应用

示波器的应用很广泛，它是一种综合性的电信号测试仪器，可测量电信号的幅度、频率和相位等。其突出特点是能直接观察到信号的波形，这是其它仪器所不能代替的。示波器种类很多，有通用示波器、多线或多踪示波器、采样示波器和存储示波器等。本节仅结合常用的BS-601型双踪示波器介绍示波器的基本原理、组成方框图、主要技术指标和使用方法。

§1.1　示波管

示波器的核心部分为示波管。它的功能是把电信号转变为光信号。本节仅介绍单电子束静电偏转示波管的基本工作原理。

单电子束静电偏转示波管由电子枪、偏转系统和荧光屏三部分组成。电子枪具有产生电子和使电子聚集成束并加速的作用；偏转系统使电子束按电信号大小而偏转；电子束打在荧光物质上使之发光，这样荧光屏就能把电子束的运动转换为光迹。这三部分均在真空的玻壳中。示波管内部结构如图 2-1-1 所示。

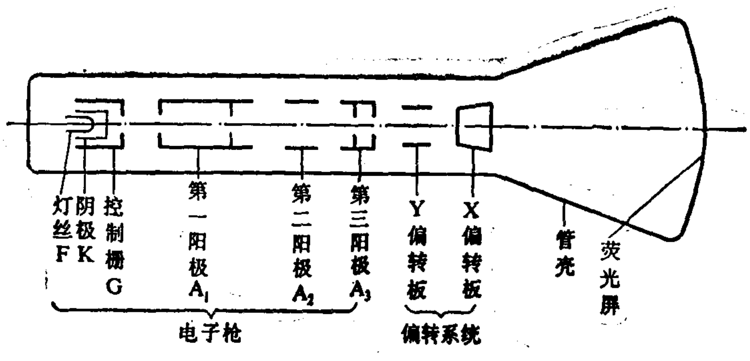

图 2-1-1　示波管内部结构剖面图