

电路信号与 系统实验教程

孙崇洲 主编

东南大学出版社

电路、信号与系统实验教程

孙崇洲 主编

本

东南大学出版社

2536/69

内 容 提 要

本书共分十一章:前九章介绍实验的基本知识,万用表的设计与使用、常用仪器的原理和使用方法,电压、相位、时间和频率、阻抗、频率特性、瞬态响应、信号频谱等的测量方法;第十章较系统地介绍电路、信号与系统的计算机辅助分析方法和有关程序,第十一章介绍18个电路、信号与系统实验、4个计算机实验、5个演示实验和自拟实验参考内容。本书对每个实验原理都作了概述,并配有适量的预习和练习题,可供高等院校电子技术类各专业选为实验教材,也可供其他相近专业师生参考。

责任编辑 张 克

电 路、信 号 与 系 统 实 验 教 程

孙崇洲 主编

东南大学出版社出版

(南京四牌楼2号)

江苏省新华书店发行 江苏大丰印刷二厂印刷

开本 787×1092毫米 1/32 印张 11.75 字数 318千字

1989年3月第1版 1989年3月第1次印刷

印数:1—5000册

ISBN 7-81023-150-2

TN·16 定价 2.45元

前 言

1981年以来,东南大学无线电技术专业进行了比较全面的教学改革,其改革内容之一是单独开设了“电路、信号与系统实验”课程。本书正是编者在总结六年以来改革实验教学和计算机教学的经验以后编写而成的。

“电路、信号与系统实验”课程的目的是训练学生的实验技能和科学实验方法,提高学生分析和解决问题的能力。由此,本书系统介绍了电路、信号与系统实验的基本知识和基本测量方法,列出了十八个实验,其实验内容与“电路分析”、“信号与线性系统”课程的教学以及基本测量方法的教学相配合,以便训练学生运用所学理论和基本测量方法进行实验研究。本书还介绍了电路的计算机辅助分析方法,提出了四个上机实验任务,并通过一个例题较详细地介绍了计算机实验步骤、上机操作和调试程序的方法,使学生得到计算机应用的初步训练。为便于因材施教,还列出了自拟实验参考内容,鼓励学生自己选择课题进行实验。

本书将实验任务书、演示实验说明集中在第十一章,基本仪器的介绍集中在第二章,电路的计算机辅助分析集中在第十章,以便于学生查阅。但在讲授本书时不必从头到尾按顺序讲授,而应配合各种基本测量方法的教学和“电路分析”、“信号与线性系统”课的教学进行有机的组合,下面提出一种教学安排,以供参考。

本书在二年级上、下两个学期分别与“电路分析”、“信号与线性系统”课同时讲授，周学时数为2，总学时数为64，其中课堂教学26学时，实验33学时，机动5学时。上学期：讲授第一章和第二章§2-1、§2-2(6学时)，做实验一、二和任选实验三至七中的两个实验(8学时)；讲授第十章§10-1至§10-5(6学时)，做计算机实验十九至二十一(9学时)；机动3学时。下学期：讲授第三章至第五章和§2-3至§2-5(4学时)，做实验八和演示实验一、二(2学时)；讲授第六章(2学时)，选做实验九至十一中的两个实验(4学时)；讲授第七章(2学时)，做实验十二和演示实验三(2学时)；讲授第八章(2学时)，做实验十三、十四和演示实验四(2学时)；讲授第九章及有关基本运算单元等内容(2学时)，选做实验十五至十八中的两个实验和演示实验五(4学时)；讲授§10-7(2学时)，做实验二十二(2学时)；机动2学时。

本书由孙崇洲主编，编者还有李振铎(部分自拟实验参考内容)，柯锡明(实验一至四)，何琴芳(实验十二、十三)，梁承清(实验十五、十六)，徐祖能(实验六、十一)，罗明生(实验十八)，其余由孙崇洲编写。

陈笃信同志审阅了全书，提出了许多宝贵的意见。杨悠金、王清年、陈建芸、张锡宁、邓碧玲等同志为开设实验做了大量的工作，在此表示衷心的感谢。

限于水平，书中存在不妥之处，恳请读者批评指正。

编者

1988年10月

目 录

第一章 电路实验的基本知识

- 1-1 实验任务和测量概念.....1
- 1-2 测量误差及其减小或消除方法.....3
- 1-3 电工测量仪表和电子测量仪器.....9
- 1-4 实验的注意事项.....15
- 1-5 实验故障及其一般排除方法.....21

第二章 电路实验常用仪器原理与使用

- 2-1 直流稳压电源.....24
- 2-2 万用表.....25
- 2-3 DA-16 型晶体管毫伏表.....48
- 2-4 信号发生器.....50
- 2-5 电子示波器.....57

第三章 电压测量

- 3-1 概述.....68
- 3-2 电压表法.....70
- 3-3 示波器法.....72

第四章 相位差测量

- 4-1 示波器法.....78
- 4-2 比较法.....81
- 4-3 直读法.....85

第五章 时间和频率的测量

- 5-1 无源测量法87
- 5-2 比较法89
- 5-3 计数法93

第六章 集中参数阻抗测量

- 6-1 概述94
- 6-2 电表法98
- 6-3 电桥法99
- 6-4 谐振法(Q表法)107

第七章 频率特性测量129

第八章 瞬态响应测量

- 8-1 系统响应133
- 8-2 响应波形测量135

第九章 信号频谱测量

- 9-1 概述140
- 9-2 用选频电压表测量频谱143
- 9-3 用频谱分析仪测量频谱144

第十章 网络的计算机辅助分析

- 10-1 线性代数方程组的计算机解法145
- 10-2 电阻电路的计算机辅助分析153
- 10-3 电路的计算机辅助正弦稳态分析165
- 10-4 计算机辅助分析线性电路的频率特性170
- 10-5 电路的计算机辅助瞬态分析184
- 10-6 简单非线性电阻电路的计算机辅助分析203
- 10-7 信号与系统的计算机辅助分析207
- 10-8 打印曲线子程序244

第十一章 实验任务书和演示实验说明

实验一	万用表的使用及元件伏安特性的测试	249
实验二	万用表的设计、制作及检测	254
实验三	网络理论的实验研究 I ——基尔霍夫定律 和叠加定理	255
实验四	网络理论的实验研究 II ——戴维南定理	257
实验五	受控源的实验研究 I	262
实验六	受控源的实验研究 II	264
实验七	双口网络的实验研究	272
实验八	示波器、信号发生器和毫伏表的使用	278
实验九	正弦交流电路中 R L C 元件的性能	281
演示实验一	用计数法测量相位差和频率	284
演示实验二	用示波器测量电压、时间和频率	284
实验十	互感的研究	285
实验十一	回转器参数的测试	289
实验十二	简单线性电路频率特性的研究	298
演示实验三	频率特性的测量	299
实验十三	一阶电路的瞬态响应	301
演示实验四	一阶电路的零输入响应、零状态响应 及完全响应	309
实验十四	二阶电路的瞬态响应	311
实验十五	信号波形及其频谱	315
演示实验五	方波与三角波信号的分解与合成	323
实验十六	抽样定理	327
实验十七	连续时间系统的模拟	334
实验十八	离散时间系统的模拟	340

实验十九 电阻电路的计算机辅助分析	343
实验二十 电路的计算机辅助正弦稳态分析	359
实验二十一 电路的计算机辅助瞬态分析	351
实验二十二 信号与系统的计算机辅助分析	362
自拟实验参考内容	362
参考文献	362

第一章 电路实验的基本知识

实验是人类认识客观事物的重要手段。很多科学成果都是通过大量实验而取得的。在理、工科大学里，实验与课堂讲授一样，是教学中不可缺少的重要环节。通过实验，使学生理论联系实际，从而对理论知识加深理解，并用所学得的理论去分析和解决实际问题，培养学生科学实验的能力。因此学生对实验应有足够的重视，在实验中应提倡严肃、严格、严密的科学态度和工作作风。

§ 1-1 实验任务和测量概念

一、电路实验的任务

电路实验一般包括下列几个过程：

1. 设计、装配——制定实验方案，设计实验电路，选择和测量元件参数，再将元件按照实验电路图装配成实验装置。
2. 检验和调试——检查接线，调试电路，运用所学理论分析解决实验中的问题，排除故障，使实验装置能正常工作。
3. 技术指标的测量——测量实验装置的指标是否达到设计要求。

在这三个过程中，都要使用测量仪表和仪器对元件参数、电压、电流以及电路特性等进行测量。由此可知，实验是离不开测量的。

二、测量的概念

所谓测量就是把被测物理量直接或间接地与另一作为单位的同类标准量相比较，判定被测量值是标准量的多少倍，从而测定被测量值的大小。例如，我们测得电压为 220V，这就是说，电压等于以伏为电压单位的 220 倍。

1. 测量方法的分类

测量方法的分类形式很多，根据获得被测量结果的方法不同，可将测量分为直接测量和间接测量两大类。此外，在此两类方法的基础上还发展了一类组合测量。

① 直接测量

测量的结果能直接显示出被测量的数值，这类测量称为直接测量。例如用电压表测量电压、用电桥测量电阻、用数字式频率计测量频率等。直接测量简单易行，所需测量的时间短，并有可能达到很高的精度。

② 间接测量

一个测量的结果需要用上述直接测量的方法分别测出几个其他的量值，再通过一定的公式计算而得，这类测量称为间接测量。例如直接测出电阻 R 的阻值及其两端的电压 V ，由公式 $I = V/R$ 便可求出被测量电流 I 的值。

一般都采用直接测量，仅在直接测量不方便、误差大或缺乏直接测量的仪器等时才采用间接测量。

③ 组合测量

测量中，使各个未知量以不同的组合形式出现，根据直接测量和间接测量所得的数据，通过解一组联立方程而求出未知量的数值，这类测量称为组合测量。

例如，当电阻和温度的关系如下式所示时，

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

式中： R_{20} ——在 20°C 下该电阻的实际值(Ω)；

t ——摄氏温标的度数； α 及 β ——温度系数。

为了测出电阻材料的温度系数 α 和 β ，需在不同温度下测出不同的 R_t ，然后按上式求解联立方程组，可得到 α 和 β 值。

2. 测量的基本内容

电路实验所要测量的基本量包括以下几个方面：

- ① 与电能有关的电量，如电压、电流、电功率；
- ② 电路参数，如电阻、电感、电容、品质因素等；
- ③ 电信号的特性，如信号的波形、频率及相位等；
- ④ 电路的特性，如电路的频率特性、瞬变特性等。

§ 1-2 测量误差及其减小或消除方法

关于误差、有效数字等概念，在物理实验课里已经讲授。这里仅简单归纳产生误差的原因，重点叙述减小或消除测量误差的方法和一次测量误差的估计。

一、误差的性质及分类

根据误差的性质及其产生的原因，可将误差分成系统误差、偶然误差（又称随机误差）和过失误差。

1. 系统误差

在测量过程中，如果测量数据的误差具有恒定的或是遵循某一特定规律而变化的性质，则称为系统误差。

2. 偶然误差

在进行重复测量时，如果误差大小和正负完全是随机的，则称为偶然误差。但是，只要测量次数足够多，就可以

发现偶然误差服从如图 1-1 所示的正态分布的统计规律。

3. 过失误差

过失误差是指测量结果显著地偏离其实际值时所对应的误差。它主要是由于测量者的粗枝大叶，操作、读数、记录中发生差错所引起的。

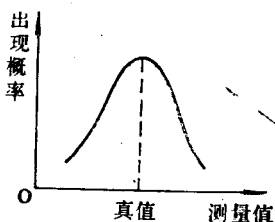


图 1-1 偶然误差的统计规律

二、减小或消除测量误差的方法

测量误差虽然是难免的，但是在可能的条件下应根据误差的性质和来源，采取措施使误差减小到最小。

通常，偶然误差较小，在实验中一般不予考虑。如需加以考虑时，可根据偶然误差服从正态分布的统计规律的性质，采用重复测量多次取其平均值的方法，来减小这种误差对测量结果的影响。

至于过失误差，在测量中只要认真仔细，严格要求，就能避免。对于确认是过失误差的测量数据，应该舍去不计。

系统误差虽有一定规律性，但是需要通过试验，研究分析发生误差的原因，然后加以防止和消除。根据不同的发生原因，系统误差大体分为四类：

1. 工具误差，是指由于测量仪器设备在构造上的缺点，如仪器本身校准不好，定度不准确等所引起的误差。减小这种误差的方法是预先校准好量具和仪器，纠正存在的毛病，防止误差的产生，或确定其本身的误差值，然后在测量数据中引入适当的补值来减小误差。

2. 装置误差,是由于测量仪器和其它设备的安装不当或使用不正确所造成的误差,以及由于外界环境条件的改变(如温度、湿度、气压、电磁场等)所引起的误差。对这类误差的消除方法是:测量仪器设备的安放必须遵守使用规定(如水平或垂直放置,并注意避开过强的外部电磁场等)。

3. 人为误差,是由于测量者本身的习惯和偏向以及由于人的感觉器官不完善而造成的误差。对于这类误差的消除方法,应以测量者本身提高测量技巧,工作细心严格等主观努力去解决。对于一些不易纠正的个人癖病,可以采取更换人员的方法来发现和纠正。

4. 方法误差,是由于所采用的测量方法本身带来的误差。如测量方法所依据的理论不够严格,对所用方法探讨不够以及采用不适当的简化或近似公式等等,都会引起测量结果的误差。对这类误差要靠严格的分析研究加以消除。例如,在用伏安法测电阻时,若直接以伏特计的指示数与安培计的指示数之比作为测量结果,而不计及电表本身电阻的影响,则这个方法本身便包含有理论误差。

对于系统误差,如不能用简单的方法确定或消除,还可以用一些特殊测量方法来加以抵消。下面介绍其中的两种方法:

1. 代替法,在测量时,先对被测量进行测量,并记取测量数据,然后用一已知标准量替代被测量,并改变已知标准量的数值,使测量装置恢复到原来的测量数值,则这时已知标准量的数值,就是被测定量的数值。由于两者的测量条件相同,因此可以消除包括仪器内部结构,仪表不准确和装置不妥善等所引起的系统误差。

2. 正负误差抵消法,即在相反的情况下进行两次测量,使两次所发生的误差,等值而异号,然后取两次结果的平均

值，便可将误差抵消。例如在有强外磁场影响的情况下测量电流，可将电流表转动 180° 再测量一次，取两次测量的平均值，就可以消除外磁场引起的误差。

三、一次测量的误差估计

在大多数工程测量中，通常总是根据实际需要，对测量数据的误差预先规定一个限度（例如 $\pm 0.1\%$ ， $\pm 0.5\%$ 等），只要不超过这个限度就满足了，并不要求确定实有的误差大小，更没有必要不切实际地对测量准确度提出苛刻的要求。因此，在这种测量中，只须注意选用准确度（或容许误差）满足要求的仪器来进行测量就行了，而且，通常只进行一次测量，只要根据测量仪器的容许误差，估计出测量数据中可能包含的最大误差，看它是否超过所要求的限度。对于其中实有的系统误差，一般不作具体的分析和估算；而对于偶然误差，由于只进行一次测量，也无法加以计算。

1. 直接测量法误差估计

一般仪器说明书所给出的容许误差，就可作为用直接测量法测量数值时所包含的最大可能误差。但是，对于直读式仪器（如采用电表或度盘指示的仪器），如果仪器说明书给出的容许误差是用满度相对误差的形式表示时，则测量数据的最大可能误差还与仪器的量程的指示值有关，必须按如下方法进行估算。

设所用仪器说明书上标明容许满度相对误差为 γ_m ，则定义

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

其中 ΔA_m —— 仪表的最大绝对误差；

A_m ——仪表量程的满度值。

由上式可得仪表度盘上任意点的最大可能绝对误差为

$$\Delta A_m = \gamma_m A_m \quad (1-1)$$

设在测量时仪表度盘上指示点所对应的测量数据为 A ，则该测量的最大可能相对误差 γ_{\max} 为

$$\gamma_{\max} = \frac{\Delta A_m}{A} \times 100\% = \frac{\gamma_m A_m}{100\%} \times \frac{100\%}{A} = \gamma_m \frac{A_m}{A} \quad (1-2)$$

由式(1-2)可知，最大可能相对误差 γ_{\max} 不仅决定于仪表的容许误差 γ_m ，而且与仪表指示值 A 对其满度值 A_m 之比有关。 A 值越小，误差越大。因此，在使用指针式仪表时，应正确选择仪表的量程，使被测参量的测定值，尽量出现在接近满度值的区域内为好。

2. 间接测量法误差估计

设被测量 y 与 n 个直接测量值 x_1, x_2, \dots, x_n 的函数关系为

$$y = f(x_1, x_2, \dots, x_n) \quad (1-3)$$

并设 $\Delta x_1, \Delta x_2, \dots, \Delta x_n$ 分别代表 x_1, x_2, \dots, x_n 的最大可能误差，则被测量 y 的最大可能误差 Δy 为

$$\Delta y = \frac{\partial y}{\partial x_1} \Delta x_1 + \frac{\partial y}{\partial x_2} \Delta x_2 + \dots + \frac{\partial y}{\partial x_n} \Delta x_n \quad (1-4)$$

下面以几种比较常见的具体函数关系为例来说明：

① 被测量等于多个直接测量值的积或商，即

$$y = x_1^m x_2^n x_3^p \quad (1-5)$$

其中 y 为被测量， x_1, x_2, x_3 为直接测量的数据，指数 m, n, p 都可能是正或负的整数或分数。为了求得误差之间的关系

式，将式(1-5)两边取对数

$$\lg y = m \lg x_1 + n \lg x_2 + p \lg x_3$$

再将上式微分得

$$\frac{dy}{y} = m \frac{dx_1}{x_1} + n \frac{dx_2}{x_2} + p \frac{dx_3}{x_3}$$

将微分 dy , dx_1 , dx_2 , dx_3 分别用微增量 $\Delta y, \Delta x_1, \Delta x_2, \Delta x_3$ (可看作绝对误差) 来代替, 则可得关系式

$$\frac{\Delta y}{y} = |m| \cdot \frac{\Delta x_1}{x_1} + |n| \cdot \frac{\Delta x_2}{x_2} + |p| \cdot \frac{\Delta x_3}{x_3} \quad (1-6)$$

或写成

$$\gamma_y = |m| \cdot \gamma_{x_1} + |n| \cdot \gamma_{x_2} + |p| \cdot \gamma_{x_3} \quad (1-7)$$

为了估计被测量 A 的最大可能误差, 应取最不利的情况, 故在式(1-6), (1-7)中 m, n, p 均取绝对值。

当已知直接测量值 x_1, x_2, x_3 的最大可能相对误差分别为 $\gamma_{x_1}, \gamma_{x_2}, \gamma_{x_3}$ 时, 则由式(1-7)就可求得被测量 A 的最大可能相对误差。如果要求 y 的测量数据达到某种预先规定的准确度时, 则由式(1-7)大致估算出各次直接测量应达到的准确度。

例如, 根据关系式 $W = V^2 R^{-1} t$ 测量消耗于某电路器件内的电能, 则通过直接测量取得被测器件两端电压 V , 电阻 R , 以及时间 t 。设各直接测量值的最大可能相对误差为 $\gamma_V = \pm 1\%$, $\gamma_R = \pm 0.5\%$, $\gamma_t = \pm 1.5\%$, 则 W 的最大可能相对误差 γ_W 可根据式(1-7)估算如下:

$$\begin{aligned} \gamma_W &= 2\gamma_V + |-1| \cdot \gamma_R + \gamma_t \\ &= 2 \times 1\% + 0.5\% + 1.5\% = 4\% \end{aligned}$$

即取 W 的最大可能相对误差 $\gamma_W = \pm 4\%$ 。

② 被测量为两个直接测量值的和或差