

电路实验

张维中 龚绍文

编

北京理工大学出版社

电 路 实 验

张维中 龚绍文 编

北京理工大学出版社

内 容 简 介

本教材是为配合开设《电路分析基础》课程而设计的实验教材。实验层次设计为:验证性、测量和简单设计性和综合性三个层次。综合性实验系每部分内容的总结,对学生能力的提高,素质的培养均有良好效果,极大地提高了学生对工程实践的兴趣。

大型综合实验为3个,每个9学时;基本实验12个,每个3学时。开设方法建议分为必做、选做和实验室开放,以弥补实验学时的不足。

本书可供高等工科院校电子类、自控类专业师生使用。

图书在版编目(CIP)数据

电路实验/张维中,龚绍文编. —北京:北京理工大学出版社, 1997. 8 (2001. 6 重印)

ISBN 7-81045-303-3

I. 电… I. ①张…②龚… II. 电路分析-实验-高等学校-教材 N. TM133

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (97) 第 13458 号

北京理工大学出版社出版发行

(北京市海淀区中关村南大街5号)

邮政编码 100081 电话(010)68912824

各地新华书店经售

北京市房山先锋印刷厂印刷

*

787 毫米×1092 毫米 32 开本 6.875 印张 150 千字

1997 年 8 月第 1 版 2001 年 6 月第 3 次印刷

印数:6001—10000 册 定价:8.50 元

※图书印装有误,可随时与我社退换※

前 言

本书是我校电类各专业本科生开设的“电路分析基础”课程的实验教材，也可作为同类院校的教学参考书。本教材内容安排上依次为直流电阻性电路，动态电路，正弦稳态电路实验。难易程度分为验证性、测量和简单设计性和综合性三个层次。考虑到教学改革的需要，对原有的实验内容进行了大幅度改进，并且作了如下一些思考：

1. 保留了必要的验证理论性的部分实验。如实验一，基本元件伏安特性测试；实验五，RC一阶动态电路响应的研究；实验八，RLC二阶动态电路响应的研究等。在保留的同时，对原有内容进行了适当的调整和增补，使其更为精炼。由于这些实验验证了电路中一些基本的概念，以及在实验过程中使用了电工和电子测量中的部分基本仪器，运用了一些基本测试方法，因此，这些基本训练还是有必要的。

2. 增添了新的电路实验元件——运算放大器，并且加进了运算放大器简单应用的一些实验。如实验三、八、十三、十五都涉及到运算放大器。

3. 增添了一些简单设计性实验。如实验三中带负载能力强的分压器和数模转换器的设计；实验六中当脉宽近于或小于电路时间常数时，RC电路在脉冲序列作用下，响应观测电路的设计；实验七中补偿分压器的设计；实验八中无阻尼等幅振荡电路的设计；实验九中楼道照明自动控制电路的设计；实验十三中实现RC移相振荡电路的设计。这些实验既要运

用所学的基本理论,方法,也要补充少量其它课程的部分知识,这有助于提高学生的求知欲,也有利于提高学生的分析能力和实际动手解决问题的能力。

4. 设置了比较综合的大型设计性实验,作为某段知识的小结和检查。如在做完直流电阻性电路基本实验后,设置了万用表的设计与装调综合实验;在动态电路部分设置了数字频率计/电容计的设计与装调综合实验;在正弦稳态电路部分设置了有源滤波器的设计综合实验。这些内容的开设可使实验室变为发挥学生才智的理想天地之一。

5. 由于实验学时有限,实验室条件的制约,实验内容不能面面俱到,因此在编写教材中给予了一定的侧重:电阻性电路突出对运算放大器的应用研究;动态电路中突出了RC一阶、RLC二阶零输入响应的观测和研究;正弦稳态电路中突出了频率响应的观测。此外,在仪器使用中突出了示波器的原理及应用,并配以录相教学。

这些实验可部分作为必修,部分作为选修,即可根据具体的主、客观条件取舍。

对电路实验的改革,我们起步于93年底,94年正式启动。我室电路课程组在对北京市兄弟院校有关单位调研的基础上,参阅了国内各类电工,电路实验教材,由龚绍文教授写出《电路实验总体规划》,课题组老师们进行了具体实验项目的设计和调试,并经适当删减、增补后确定了实验项目,并编写了校内教材。本教材已在本校试用两届,这次公开出版又经过龚绍文教授,张宝俊教授的审阅和指点,最后编写成本书。由于编者本人学识有限,书中不妥之处在所难免,恳请使用该教材的同行、读者和学生给予批评指正。

参加实验改革的有我校电子工程系电路课程组全体教师

及实验室全体实验技术人员，在编写本书过程中也得到他们的大力支持和鼓励，在此深表谢意。特别要感谢北京航空航天大学电工电子中心范天颖先生对本书进行了仔细的审阅，并提出了中肯意见。

编 者 1996.12

于北京理工大学电子工程系

目 录

第一章 引 论	(1)
一、实验和实验报告	(1)
二、测量及误差的基本概念	(2)
三、测量数据的处理	(7)
四、测量方法及测量仪器简述	(9)
五、实验操作与安全	(11)
第二章 实验项目	(13)
第一节 (实验一) 基本元件伏安特性测试	(13)
第二节 (实验二) 含源单口网络等效电路及其 参数的测定	(24)
第三节 (实验三) 运算放大器及其应用	(30)
第四节 (实验四) 万用表的设计与装调	(41)
第五节 (实验五) RC 一阶电路响应的研究	(58)
第六节 (实验六) RC 一阶电路脉冲序列响应 的观察	(66)
第七节 (实验七) 微分、积分、补偿分压器电路 的设计	(75)
第八节 (实验八) RLC 二阶电路响应的研究	(86)
第九节 (实验九) 楼道照明自动控制电路的设计 与装调	(95)
第十节 (实验十) 数字频率计和电容计的设计与 装调	(105)
第十一节 (实验十一) R, L, C 单一元件阻抗频率 特性及 RLC 串联低通电路	(117)

第十二节 (实验十二)	RLC 串联带通电路和 谐振	(126)
第十三节 (实验十三)	RC 移相振荡器	(133)
第十四节 (实验十四)	变压器实验	(140)
第十五节 (实验十五)	有源滤波器的设计与 装调	(146)
第三章 常用仪表简介		(166)
第一节 万用表		(166)
第二节 JWY - 30B 晶体管稳压电源		(171)
第三节 GB - 9B 真空管毫伏表		(173)
第四节 QS18A 型万能电桥		(174)
第五节 XC - 16A 脉冲信号发生器		(177)
第六节 XD2 型正弦信号发生器		(182)
第七节 CS - 1022 双踪示波器及其应用		(186)
主要参考文献		(211)

第一章 引 论

一、实验和实验报告

实践与理论的相互关系是早已为人们所熟知的，那么“电路分析基础”课的实验课的目的是什么？它又如何开设呢？这是一个值得研究的课题。作者个人以为通过实验过程，从获取的实验数据及结果去验证电路中的一些基本概念和基本定律，从而进一步巩固所学知识是必要的，也是重要的。然而，我们处在高科技迅速发展的今天，急需的是人材，在有限的实验课时内，只能做有限的事情，而这有限的事情应该是有效的事情。这就是说，曾被无数人验证并已在实践中应用的电路定律没有必要全部一一验证，承认它就是了。我们要做的事是对模糊的、尚不清楚的事物或现象设法去认识；对在测量过程中观察到的波形及现象能够分析、理解、或测定它；对实验最终获取的数据能够正确处理它。从而提高我们对预想的事情的“实现”能力，这应该就是实验课的目的。

诚然，具有先进的设备与正确的测试手段是有效率的，优先的。然而，在低年级学生所掌握的有限知识中，在先进的仪表仪器尚不能进入到基础实验室中时，我们仍然有必要去探索如何使学生先迈上这一台阶。我们的目的很清楚，通过指导书的提示及帮助，加之你的勤奋及努力，能为你成为一名具有严谨科学工作作风的，开拓进取的工程师、学者、科学家而助一臂之力。

由于没有设置先行的测量课，因此在讲义中包含了部分有关测量、测量技术方面的基本知识，不求完美，仅为必需。虽则如此，为避免盲目实践，仍要求进入实验前的同学将这部分内容读一读，以便获得良好的收效。

实验报告的书写反映了实验者对基础知识掌握的扎实程度，也反映了对实验内容、过程、结果的分析、归纳、判断能力，应予以足够的重视。

实验报告应包含下列基本内容：实验名称、日期、班级、姓名；实验目的、线路及参数，理论分析与计算、各种实测数据、曲线；结论、误差分析、问题，成绩及评语。

二、测量及误差的基本概念

实验离不开测量。测量又称检测，测试。测量是人对客观世界的一种能动过程，是进行科学研究的一种重要手段。通过测量，我们可以获取到所研究对象的各种有关信息，形成定性或定量的认识，从而总结出客观规律，得出正确的结论，以便于在建立科学的理论或是应用中提供可靠的依据。

为获取各种有关信息在测量中采用的一系列方法及手段统称为测量技术。

在实际测量中我们获取到的信息通常为两种。一种是必需的或者是本就期望得到的；一种是隐含在当前获取到的信息中，尚需进一步的处理及提取的。

测量的原理是比较。这就是说将被测量与相同性质的标准量进行比较，以获得两者之间的数量关系。

1. 单位制

目前，我国均采用国际单位制。表 1-1 列出了电路分析中常用的国际制单位。

表 1-1

量	单位 名称	代 号	
		中文	国际
电流	安培	安	A
电压	伏特	伏	V
功率	瓦特	瓦	W
频率	赫兹	赫	Hz
电阻	欧姆	欧	Ω
电感	亨利	亨	H
电容	法拉	法	F
时间	秒	秒	s

在实际使用中,有时感到这单位太大或太小,便在这些单位中加上表 1-2 所示词冠,用以表示这些单位被一个以 10 为底的正次幂或负次幂相乘后所得到的辅助单位。

表 1-2

词 冠	代 号		因数
	中文	国际	
吉咖(giga)	吉	G	10^9
兆(mega)	兆	M	10^6
千(kilo)	千	k	10^3
毫(milli)	毫	m	10^{-3}
微(micro)	微	μ	10^{-6}
纳诺(nano)	纳	n	10^{-9}
皮可(pico)	皮	p	10^{-12}

2. 电子测量的基本内容

- (1) 电量的测量。如电流、电压、功率的测量。
- (2) 电路参数的测量。如电阻、电容、电感、阻抗、品质因数、损耗等的测量。
- (3) 电信号波形参数的测量。如频率、周期、相位、失真度、调幅度、调频指数等的测量。
- (4) 电路性能的测量。如放大量、衰减量、灵敏度、频率特性等的测量。
- (5) 半导体器件的测量。如二极管、三极管、场效应管、集成电路组件的测量。

3. 测量误差

被测量的真实数值叫真值。测量结果和被测量真值的差别叫测量误差。

测量误差按表示方法分为绝对误差和相对误差。按误差的性质和特点分为系统误差、随机误差和粗大误差。

(1) 绝对误差

定义式
$$\Delta X = X - A_0$$

式中 ΔX ——表示绝对误差；

X ——表示被测量的仪表指示值；

A_0 ——表示真值。

真值：被测量的真值虽然是客观存在的，但是一般无法确切地给出。为了解决实际中的计算问题，下述一些值可以近似认为是真值。

- (a) 理论真值。如等边三角形中的一个角是 60° 就是真值。
- (b) 指定真值（约定真值）。指定真值常指计量学方面的“基准”或“标准”。它代表了当代国家技术水平的标准值。
- (c) 实际值。它是指在一般性测量中，由更高一级标准仪

表所测得的值，称为实际值，用字母 A 表示并代替真值 A_0 ，则绝对误差可表示为：

$$\Delta X = X - A$$

式中， $A \neq A_0$ 。

但一般认为更高级的仪表的误差与当前使用测量仪表的误差之比，若小于 $1/3 \sim 1/20$ 时，就可认为其示值为真值。

绝对误差有数值大小、符号、单位，它不能正确反映测量的精确度。

(2) 相对误差

(a) 实际相对误差 γ_a

$$\gamma_a = (\Delta X / A) \times 100\%$$

(b) 示值相对误差 γ_r 。即绝对误差与仪表测量的指示值之比，用百分数表示为：

$$\gamma_r = (\Delta X / X) \times 100\%$$

(c) 满度相对误差 γ_m 。即绝对误差 ΔX 和仪表满度值 X_m 之比，用百分数表示为：

$$\gamma_m = (\Delta X / X_m) \times 100\%$$

常用电工仪表的等级就是按 γ_m 分级的。应该指出的是，使用电工仪表测量电流、电压时，应使指针尽可能接近于满偏转（满刻度的 $2/3$ 以上）。而使用万用表欧姆挡测试电阻值时，则应使指针尽可能接近于该挡中的中心刻度线，以使测量误差尽可能小。

(d) 分贝误差。它是指用对数表示的相对误差，记作 γ (dB)。当误差不大时，它和一般相对误差 γ 有如下关系。

对电压、电流参数有：

$$\gamma_{u,i \text{ 分贝}} = 20 \lg(1 + \gamma_{u,i}) \quad (\text{dB})$$

对功率类参数有：

$$\gamma_{p, \text{分贝}} = 10 \lg(1 + \gamma_p) \quad (\text{dB})$$

或简单写为下面对应的两式：

$$\gamma_{u, i, \text{分贝}} = 8.69 \gamma_{u, i} (\text{dB});$$

$$\gamma_{p, \text{分贝}} = 4.3 \gamma_p (\text{dB})$$

(3) 系统误差。系统误差是按误差的特点分类的一种误差。它是指在测量过程中，误差的数值恒定不变或遵循一定的规律而变化的误差。

(a) 恒定系差。如 1Ω 标准电阻实际值为 0.99Ω ，这 0.01Ω 差值为恒定。

(b) 变值系差。它主要分累进性系统误差（即表现为误差为逐次递增或递减）、周期性系统误差和其它按复杂规律变化的误差。

(4) 随机误差。随机误差也称偶然误差，也是按误差特点分类的一种误差。它是指在单次测量中，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。

随机误差的特征是：

(a) 有界性：多次测量，随机误差的绝对值不会超过一定的界限。

(b) 单峰性：绝对值小的误差出现的机会比绝对值大的误差出现的机会多。

(c) 对称性：它表现为绝对值相等的正负误差出现的机会是均等的。

(d) 抵偿性：随机误差就个体来说是无规律的，但从整体来说服从统计规律。它的算术平均值随着测量次数的无限增多而趋近于零。

(5) 粗大误差。粗大误差也是按误差特点分类的一种误差。它是指明显歪曲测量结果的误差。

三、测量数据的处理

1. 测试技术中常用的两个术语

(1) 准确度。指测量结果与被测量真值的接近程度。反映了系统误差的影响程度。

(2) 精密度。指在重复测量同一系统中所得结果相互一致的程度。它反映了随机误差的影响程度。

2. 测量数据的读取

测量数据的读取应注意以下几点：

(1) 仪表应先进行预热和调零。

(2) 选择合适的仪表，同时合理选择仪表的量程。

(3) 注意读取数据的正确姿势。

(4) 当仪表指针与刻度线不重合时，应凭目测估读一位欠准数字。

3. 有效数字

(1) 简单概念。如用 100mA 量程的电流表测量某支路中的电流，读数为 78.4mA，则前面两个数“78”是准确的、可靠的读数，称“可靠数字”；而最后一位数字“4”是估读的，称“欠准数字”，两者合起来称“有效数字”。它的有效数字为三位，如果对其运算，其结果也只应保留三位有效数字。

(2) 有效数字的正确表示。当按照测试要求确定了有效数字的位数后，每一测量数据只应有一位欠准数字，即最后一位是欠准数字，而它前面的各位数字必须是准确的“可靠数字”。

只与计量单位有关的“0”不计入有效数字。如 184mA 可写成 0.184A，两种写法的有效数字都是三位。

小数点后的“0”不能随意省略。例如某电阻值 15.00Ω 和

15 Ω 两种写法差别极大。前者15.00 Ω 中,表示小数点后第二位“0”是欠准数字,而后者15 Ω 中,其个位“5”就是欠准数字,它可能是14 Ω 或16 Ω 。

当数字很大时,“0”也不能随意取舍。

(3) 四舍五入化整规则。测量技术中,当将有效数字修约时,应遵守规定:“小于5舍,大于5入,等于5取偶。”

例如对下列数字取三位有效数字:

18.23 $\longrightarrow$ 18.2 (第四位数字小于5,舍去。)

18.28 $\longrightarrow$ 18.3 (第四位数字大于5,入。)

18.25 $\longrightarrow$ 18.2 (第四位数字等于5,舍去,因第三位数字为偶。)

18.15 $\longrightarrow$ 18.2 (第四位数字等于5,入,因第三位数字为奇,应取偶。)

(4) 有效数字的运算法则。相加减的数字中,如有小数,则以小数点后面位数最少的那个数为标准,将其它数进行修约,使其它数的小数点后的位数仅比它多保留一位,计算结果也以它为标准相修约。

如三数相加: $222.1 + 0.777 + 2.34 = ?$

修约后应为: $222.1 + 0.78 + 2.34 = (225.22) = 225.2$

有效数字相乘应注意到乘积的误差总是大于任何一个乘数的误差。当几个数相乘时,应以其中有效数字最少的那个数为标准,对其它数进行修约,修约到比该数多一位有效数字,然后再进行运算。计算结果的有效数字的位数应与作为标准的那个数的位数相一致。

如: $8.5 \times 10.3 \times 102.4 = ?$

这时以8.5为标准对其余两数进行修约后为:

$8.5 \times 10.3 \times 102$; 计算结果为8930.10,则根据上述法则,

其结果应为 8900。

4. 曲线修匀

所谓曲线修匀就是对测量过程中所获取的数据点所进行的一种图解处理方法。在许多测量中，测量的目的不单单是为获得一个或几个量值，而是要在测量数据的基础上得到某些量之间的关系曲线。由于实际测量中存在着误差，且有限次的测量所得到的数据只是关系曲线上的一些离散点，简单地将这些离散点连成一条折线是不行的，必须对此进行一定的处理即对曲线进行修匀。修匀中应注意：

(1) 以被测量及相关量为坐标变量，选取合适的坐标系，常用的为直角坐标系。当变量变化范围很宽时，常采用对数坐标。

(2) 测量的数据点必须足够。曲线的线性段数据可适当少，但非线性段测量数据点又应足够多。

(3) 纵、横坐标分度比例可以不同，但比例分度要适当，一般应与测量的精确度相适应。

(4) 绘制曲线应是靠近数据点的一条光滑而无斜率突变的曲线。有时，可采用数据分组的办法，取各组几何重心连接成的平滑曲线。

四、测量方法及测量仪器简述

1. 测量方法

一个物理量的测量可以通过不同的方法来实现。在测试方案确定之后，选择合理的测量方法就是至关重要的了。我们可以选择直接测量法也可采用间接测量法或是两者的组合。我们可以根据读取数据的方式不同选择直读测量或比较测量，也可根据条件选择自动或非自动测量。另外也可根据