



21世纪高等学校规划教材
Textbook Series of 21st Century

电路实验教程

唐 巍 赵宇先 主编



中国电力出版社

<http://jc.cepp.com.cn>



21世纪高等学校规划教材
Textbook Series of 21st Century

电路实验教程

主 编 唐 巍 赵宇先

编 写 孙小燕

主 审 赵 非



中国电力出版社

<http://jc.cepp.com.cn>

内 容 提 要

本书为 21 世纪高等学校规划教材。

本书以系统性、实用性和先进性为宗旨,根据作者多年来从事电路课程及其实验教学改革的经验 and 体会,既有经典的传统实验,又有反映最新技术发展的实验;既有验证性的实验,又有设计型和综合型的实验(如电源等效变换、戴维南诺顿定理及最大功率传输、直流电路基本定理综合实验、电路过渡过程的研究、三相电路综合实验等);既有硬件的实验(如电阻温度计、受控源、数模转换器、负阻抗变换器等实用器件的设计、制作和装调),又有软件实验(包括应用虚拟实验平台 EWB/Multisim2001 对电路进行仿真模拟和应用 Matlab 软件求解电路的矩阵方程)。本书内容丰富,力求反映电路实验的最新技术手段,做到理论联系实际,原理、实验技术和实际应用并重,由浅入深,通俗易懂。

本书可作为高等学校电气、通信、电子、自动化、计算机类各专业的电路实验教学用书,也可供从事电工及电气应用的工程技术人员的学习与参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

电路实验教程/唐巍,赵宇先主编. —北京:中国电力出版社, 2005

21 世纪高等学校规划教材

ISBN 7-5083-3617-8

I. 电... II. ①唐... ②赵... III. 电路-实验-高等学校-教材 IV. TM13-33

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2005)第 108404 号

中国电力出版社出版、发行

(北京三里河路 6 号 100044 <http://jc.cepp.com.cn>)

汇鑫印务有限公司印刷

各地新华书店经售

*

2005 年 9 月第一版 2005 年 9 月北京第一次印刷

787 毫米×1092 毫米 16 开本 8.625 印张 197 千字

印数 0001—3000 册 定价 13.80 元

版 权 专 有 翻 印 必 究

(本书如有印装质量问题,我社发行部负责退换)

前 言

本书是根据高等院校《电路》课程教学的基本要求,结合近年电路课程及其实验教学改革的经验 and 现有实验设备条件编写而成。本书主要用于电路实验课的教学,重点在于训练学生的实验技能,提高学生分析和解决问题的能力,树立工程的观点和严谨的科学作风,帮助学生巩固和加深理解所学的理论知识。

本书内容的组织和编写注重电路实验教学的系统性,全书共分三部分。第一部分是电路实验基本知识,主要介绍电路实验课的目的、要求和学习方法,误差分析、有效数字和实验结果的处理,预习报告及实验报告的要求及编写,电路实验中常见故障及其一般排除方法。第二部分是电路实验,共有 20 个实验。实验 1~12 为电路基础实验,实验 13~16 为电路设计性实验,实验 17~20 为电路仿真实验。第三部分是附录,主要介绍电路实验所用 DGX-1 实验装置,常用电工仪表、电子仪器,GSY 型组合测量仪表及虚拟实验平台 EWB/Multisim2001 的特点和使用方法。

本书实验内容丰富,既有经典的传统实验,又有反映最新技术发展的实验;既有验证性的实验,又有设计性和综合性实验(如电源等效变换、戴维南诺顿定理及最大功率传输,直流电路基本定理综合实验,电路过渡过程的研究,三相电路综合实验);既有硬件实验(如电阻温度计、受控源、数模转换器、负阻抗变换器等实用器件的设计、制作和装调),又有软件实验(包括应用虚拟实验平台 EWB/Multisim 2001 对电路进行仿真模拟和应用 Matlab 软件求解电路矩阵方程)。20 个实验中,基础实验给出了实验线路和实验方法,而设计性实验的实验线路和实验方法可由学生自主拟订。

为了便于预习,本书在每次实验之前把与实验有关的仪表及设备列出来,把用到的仪表和设备的使用说明作为附录,为了做到与实验内容紧密配合,每个实验都提出了相应的预习要求,并编入了一些预习思考题,有利于学生对实验过程中出现的现象进行判断,也便于教师检查学生的预习情况。

本书由唐巍和赵宇先主编,孙小燕参加了部分内容的编写,全书由唐巍统稿,赵非主审。本书的编写得到了翟庆志、魏章怀的大力支持,翁荔老师和张希伟老师给予了大力协助,另有研究生王新花同学参加了本书的录入工作。在此对所有为本书的编写和出版工作提出意见和建议,并给予大力支持和热情帮助的同志表示衷心的感谢。

由于时间仓促和水平有限,书中错误和不妥之处在所难免,衷心希望使用本书的师生提出宝贵意见和建议。

编 者

2005 年 8 月

目 录

前言

第一章 电路实验基本知识	1
第一节 电路实验课开设的目的及要求	1
第二节 电路实验课的学习方法	1
第三节 测量误差和误差分析	4
第四节 有效数字的表示与计算规则	8
第五节 实验结果的处理	10
第六节 电路实验预习报告及实验报告的编写	12
第七节 电路实验中常见故障及其一般排除方法	13
第二章 电路实验	16
实验 1 电路元件伏安特性的测试	16
实验 2 电源等效变换、戴维南(诺顿)定理及最大功率传输	18
实验 3 直流电路基本定理综合实验	24
实验 4 电路过渡过程的研究	28
实验 5 R 、 L 、 C 元件阻抗特性及交流等效参数的测定	32
实验 6 日光灯电路及功率因数的提高	37
实验 7 RLC 串联谐振电路的研究	41
实验 8 RC 选频网络特性的测试	44
实验 9 单相电能表的校验	47
实验 10 互感与变压器	49
实验 11 三相电路综合实验	55
实验 12 二端口网络参数的测定	60
实验 13 电阻温度计的制作	66
实验 14 运算放大器的应用——受控源、电压跟随器、 反相器和 DA 转换器的设计	68
实验 15 移相器的设计与测试	74
实验 16 负阻抗变换器的制作和应用	77
实验 17 RC 一阶电路动态特性的仿真	82
实验 18 RLC 串联谐振电路的仿真	85
实验 19 非正弦周期信号电路的仿真	86

实验 20 电路矩阵方程的计算机求解	88
附录 A DGX-1 型电工技术实验装置	93
附录 B 万用表	99
附录 C 功率表	102
附录 D SS-5702A 型双踪示波器	104
附录 E GSY 型组合测量仪表	111
附录 F 电路虚拟仿真平台 EWB/Multisim 2001	115
参考文献	132

第一章 电路实验基本知识

第一节 电路实验课开设的目的及要求

一、电路实验课的目的

(1) 学习常用电子仪器、仪表(包括万用表、直流稳压电源、低频信号发生器、毫安表、毫伏表及电子示波器等)的性能、工作原理及其使用方法。

(2) 学习并掌握基本的测量方法,包括电流与电压的测量,阻抗的测量,网络伏安特性的测量,网络频率的测量,以及网络动态响应的测量等。

(3) 培养初步的实验技能,包括正确选用仪器与仪表,制定合理的实验方案,实验中各种现象的观察和判断,实验数据的正确读取和处理,误差分析,实验报告的编写等。

二、电路实验室学生守则

学生在做实验时应保证人身安全、设备安全,爱护国家财产,培养科学作风。为此,学生应遵守下列守则:

- (1) 学生必须听从教师的指导,作好课前预习,按时按编组进行实验;
- (2) 严守纪律,按时开始实验,做完实验得到教师许可后方可离开实验室;
- (3) 接通电源前必须请教师检查电路;
- (4) 严禁带电拆线、接线;
- (5) 非本次实验用的设备器材,未经教师允许不得动用;
- (6) 实验必须以严肃的态度进行,严格遵守实验室的有关规定和仪器设备的操作规程,发生事故要保持镇定,迅速切断电源,并向老师报告;
- (7) 若自己增加实验内容,必须事先征得教师同意;
- (8) 实验完毕需经指导教师检查认可后,方可拆除线路,并将仪器设备恢复原状,归放整齐;
- (9) 保持实验室整洁、安静,实验室内不得吸烟、喧哗、乱扔杂物。

第二节 电路实验课的学习方法

为了学好实验课,一般应注意并做到以下几点。

一、端正学习态度,明确实验目的

学生要真正理解开设实验课的意义,认识到作为工科学生,不仅需要有广博的理论知识,而且还需要有较强的实际动手能力,这是当今社会的需要。因此在实验课的学习过程中,应积极主动,不能只凭一时兴趣或敷衍了事、投机取巧。

二、课前预习

电路实验受到时间和条件的限制,在规定时间内,学生能否顺利完成实验任务,达到实

验目的与要求,关键在于预习。预习的重点如下:

- (1) 明确实验目的、任务与要求。
- (2) 看懂实验原理、方法;熟悉并设计实验电路;制订出实验方案、拟定实验步骤;对提出的思考讨论题和注意事项要形成深刻印象,以便在实验操作过程中观察、解决和注意。
- (3) 估算实验结果,对实验结果做到心中有数,以便在实验中能及时发现问题以保证实验结果的正确性。
- (4) 根据实验目的、任务与要求,提出元器件、仪器仪表和设备清单(包括型号、规格、量程、容量、数量),对未使用过的仪器仪表和设备,要阅读使用说明书,掌握使用要领。
- (5) 设计实验数据表格。

三、课上操作

课上操作的任务是将预定方案付诸实施的过程。在此过程中,一是完成实验任务,二是锻炼实验能力并养成一个良好的工作习惯,同时逐渐积累实践经验。因此,在课堂上要做到脑勤、手勤,善于发现问题、思考问题并解决问题。

1. 实验电路的连接

(1) 实验电路的连接应遵循以下三个原则:合理布局(使实验对象、仪器仪表之间的位置和距离,跨接导线长短等因素对实验结果的影响最小);便于操作、调整和读取数据;连接头不能过于集中,整体美观、简洁。

(2) 连接顺序应视电路复杂程度和操作者技术熟练程度自定。对初学者来说,可按照电路原理图一一对应接线。较复杂的电路,应先连接串联部分,后连接并联部分;同时考虑元器件、仪器仪表的同名端、极性和公共参考点等都应与电路原理图设定的位置一致;最后连接电源端。

接线时,避免在同一个端子上连接三根以上的连线,以减少因牵动一线而引起端子松动、接触不良或导线脱落。

(3) 对连接好的电路,一定要认真细致地检查,这是保证实验顺利进行、防止事故发生的重要环节。

2. 实验预操作

预操作(也称为试做)是指接通电源、输入量由零开始,在实验要求范围内快速、连续的调节各参量,观察实验全过程,然后将输入量回零。

预操作的目的是有以下三点:

- (1) 看看电路运行、仪表指示是否正常,进一步考验电路连接的正确性和发现故障;
- (2) 检验选用的元件、仪器仪表规格、量程是否合适;
- (3) 观察所测电量及数据的变化趋势,以便确定实验曲线取点。

3. 实验操作与读取数据操作

实验获得的数据是否合理、准确可靠与操作和读数有很大关系。操作与读数配合不好,不但会带来很大的附加误差,而且会增加处理数据的时间。由于影响因素较多且没有统一模式可循,实验者不能简单机械地操作、读数,单纯完成实验任务,而要注意总结经验,掌

握技能。例如,有些实验要求操作与读数可以快一些(线性电路,高电压、大电流),有些实验则要求操作与读数慢一些(非线性电路,频率特性);有些实验要求操作与读数同时进行(用秒表测定电容器放电曲线),有的实验则要求在反复操作中读数(测峰值、谷值,观察波形);还有些实验在操作停止后,同时读取一组数据(各种参数测量等)。

(1) 实验数据的判断。实验数据的判断是指在较短时间内,判断所读取的数据是否可靠合理,以便及时发现错测、错读、错记和漏测的数据,在实验线路未拆除之前,予以补测和订正。

数据判断的依据是实验测量获得的数据是否达到实验目的与要求,是否符合基本原理、基本定律或已经给出的参考标准。初学者可通过代入1~2组实验数据进行验算、作简图与理论或给定的参考标准进行比较,得出所读取的数据是否可靠的结论。对于探索性实验的测量数据或未给出参考标准的数据,应根据基本原理和定律判断。例如,测量交流参数时,应符合 $R \leq |Z|$, $|X| \leq |Z|$;测量功率时,应符合 $P \leq UI$, $\cos \varphi \leq 1$ 等。

(2) 异常值的处理。所谓异常值是指不符合实验目的与要求,或测量误差超过 $\pm 5\%$ 以上的实验数据。根据选定测量线路、方法及仪器仪表的灵敏度,一般情况下,实验误差均在 $\pm 5\%$ 范围内。异常值多半是测量、读数或记录方面的错误引起的,这些错误可以通过检验、重点测试得到订正。有时,异常值在多次重复测试中不变,则应找出其原因,不要轻易改动、舍弃。

4. 拆除实验线路、整理实验现场

拆除实验线路,意味着实验操作结束,必须在判断实验数据合格后才能进行。

拆除线路时,应先将各输入量回零,然后切断电源(包括仪器、仪表的电源),确认电路不带电后,先从电源端拆线。当被拆除线路中含有高压(指60V以上)、大容量电容器时,应先进行人工放电,以免触电。最后,不要忘记整理实验现场。

四、课后总结

课后总结有两个中心任务:一是对课前预习与课上操作的最后评估,一般以实验报告或论文的形式给出;二是提高撰写实验报告或科技论文的能力。总结要做的具体工作是:明确实验目的,掌握实验方法原理,对原始测量数据进行处理,对实验结果进行分析,对实验方法进行归纳改进并找出实验成功、失败的原因。在某次实验中,可能会出现这样那样的问题,最终导致实验结果不理想,但通过总结,找出原因(如操作上的失误,忽略了某些条件、因素等),实验的目的还是可以达到的。因此,总结是一个非常重要的环节,是收获的一环。

五、在实验中注意发挥理论知识的指导作用

应意识到,进行的每个实验都是有其理论基础和目的的,因此,实验前应对实验原理、电路的工作特性进行理论分析,制订出合理的实验方案。在实验出现问题时,应静下心来注意用所学的理论知识去解释、分析实验现象,从而找出解决问题的适当措施。在原因未查明之前,不要盲目操作。虽然盲目操作有时也能得到实验结果,但这样做不利于经验的积累及能力的提高。

第三节 测量误差和误差分析

真值,即被测量的真实值,在一定时间和空间内是一个客观存在的确定的数值。在测量中,由于人类对客观事物认识的局限性,仪器仪表的精度限制、测量方法的不完善性以及测量工作中常有的各种失误等,都会不可避免地使测量结果与被测量的真值之间有差别,这种差别就称为测量误差。

一、测量误差的分类

测量误差按其性质和特点,可分为系统误差、偶然误差和疏失误差三类。

1. 系统误差

在相同的测量条件下,多次测量同一个量时,误差的数值(大小和符号)均保持不变或按某种确定性规律变化的误差称为系统误差。系统误差通常是由测量器具、测量仪器和仪表本身的误差所产生的。此外,由于测量方法不完善以及测量者不正确的测量习惯等产生的测量误差也称为系统误差。系统误差的大小可以衡量测量数据与真值的偏离程度,即测量的准确度。系统误差越小,测量的结果就越准确。

由于系统误差具有一定的规律性,因此可以根据误差产生的原因,采取一定的措施,设法消除或加以修正。

2. 偶然误差(随机误差)

在测量过程中,由于某些偶然因素引起的误差称为偶然误差。例如,电磁场的微变、温度的起伏、空气扰动、大地微震、测量人员的感觉器官无规律的微小变化等,这些互不相关的独立因素产生的原因和规律无法掌握。因此,即使在完全相同的条件下进行多次测量,实验结果也不可能完全相同。

一次测量的偶然误差没有规律,但多次测量产生的偶然误差是服从正态分布规律的。即误差相对小的出现概率大,而误差相对大的出现概率小,大小相等的正负误差出现的概率也基本相等。如果测量的次数足够多,则偶然误差平均值的极限将趋于零。因此,如果想使测量结果有更大的可靠性,应把同一种测量重复做多次,取多次测量的平均值作为测量结果。

3. 疏失误差

由于测量者的疏忽过失而造成的误差称为疏失误差。它的产生原因有两个:一是实验者本身造成的;二是由于测量条件方面的原因。测量过程中由于操作者的粗心或不正确操作,例如读数的错误、记录或计算的差错、操作方法不正确、测量方法不合理;或者使用有毛病的仪器仪表、出现不允许的干扰等都可能导致疏失误差的出现。就测量数值而言,疏失误差一般都明显地超过正常情况下的系统误差和偶然误差。凡确认含有疏失误差的测量数据常称为“坏值”,不可采用,应该舍去。

二、测量值的误差表示方法

测量值的误差表示方式通常分为绝对误差和相对误差两种。

1. 绝对误差

被测量值(从测量仪器仪表直接测量得到或经过必要的计算得到的数据) x 与其真值 A

之差,称为 x 的绝对误差。绝对误差用 Δx 表示,即

$$\Delta x = x - A \quad (1-3-1)$$

因为从测量的角度讲,真值是一个理想的概念,不可能真正获得。因此,上式中的真值 A 通常用准确测量的实际值 x_0 来代替,即

$$\Delta x = x - x_0 \quad (1-3-2)$$

式中, x_0 是满足规定准确度,可以由高一标准测量仪器测量获得。

一般情况下,上式表示的实际绝对误差通常就称作绝对误差,并用来计算被测量的绝对误差值。绝对误差具有大小、正负和量纲。

测量值及其误差常写成 $x \pm \Delta x$ 的形式,其中 x 是测量值, $\pm \Delta x$ 表示最大可能的绝对误差(经常简称为绝对误差)。

2. 相对误差

两个大小不同的测量值,当它们的绝对误差相同时,准确程度并不相同。例如测量北京到上海的距离,如果绝对误差为 1m,则可以认为相当准确了;但如果测量飞机场跑道的长度时绝对误差也是 1m,则认为准确度很差。为了更加符合习惯地衡量测量值的准确程度,引入了相对误差的概念。

绝对误差与被测量的真值之比(用百分数表示)称为测量值的相对误差。相对误差可以表示为

$$\gamma = \frac{\Delta x}{A} \times 100\% \approx \frac{\Delta x}{x_0} \times 100\% \quad (1-3-3)$$

式中, x_0 是满足规定准确度的实际值。一般情况下,相对误差是用上式中的后一个算式来计算的。相对误差是一个纯数的量,与被测量的单位无关。

三、仪表和仪器的误差及其准确度

当仪表在规定的正常条件下工作时,其示值的绝对误差 ΔA 与其量程 A_m (即满刻度值)之比称为仪表的引用误差,用 γ_n 表示,即

$$\gamma_n = \frac{\Delta A}{A_m} \times 100\% \quad (1-3-4)$$

测量仪表在整个量程范围内所出现的最大引用误差称为仪表的容许误差,用 γ_{nm} 表示,即

$$\gamma_{nm} = \frac{\Delta A_m}{A_m} \times 100\% \quad (1-3-5)$$

式中, ΔA_m 是所有可能的绝对误差中绝对值最大者。根据以上定义,允许误差是单位测量值的最大可能绝对误差,它可以反映仪表的准确程度。通常,仪器(包括量具)的技术说明书中标明的误差都是指允许误差。

对于指针式仪表,设允许误差的绝对值为

$$|\gamma_{nm}| = \frac{|\Delta A_m|}{A_m} \times 100\% \leq \alpha\% \quad (1-3-6)$$

式中, α 定义为仪表的准确度等级,它表明了仪表容许误差绝对值的大小。机电式指针仪表的准确度等级与其容许误差的关系列在表 1-3-1 中。从表 1-3-1 可以看出,允许误差的

绝对值 $\leq 0.1\%$ 的仪表即为0.1级表；容许误差的绝对值 $\leq 0.2\%$ 的仪表即为0.2级表等。由表1-3-1可见，准确度等级的数值越小，容许误差越小，仪表的准确度越高。0.1级和0.2级仪表通常作为标准表用于校验其他仪表，实验室一般用0.5~1.0级仪表，工厂用作监视生产过程的仪表一般是1.0~5.0级。

表 1-3-1

仪表准确度等级

准确度等级指数 α	0.1	0.2	0.5	1.0	1.5	2.5	5.0
允许误差 (%)	± 0.1	± 0.2	± 0.5	± 1.0	± 1.5	± 2.5	± 5.0

由式(1-3-6)得，任一测量值的绝对误差的绝对值最多为

$$|\Delta A_m| \leq \alpha\% A_m \quad (1-3-7)$$

当仪表的指示值为 x 时，可能产生的相对误差的最大绝对值为

$$|\gamma_m| = \frac{|\Delta A_m|}{x} \times 100\% \leq \alpha\% \frac{A_m}{x} \quad (1-3-8)$$

式中， A_m 是量程。式(1-3-8)表明，测量值 x 越接近仪表的量程，相对误差的绝对值越小。为了充分利用仪表的准确度，应选择合适量程的仪表或选择仪表上合适的量程档，以使被测量的量值大于仪表量程的2/3以上。

四、系统误差的消除

偶然误差由于服从统计规律，多次测量后取平均值可以消除；疏失误差一般都明显地超过正常情况下的误差，可舍去。因此，对测量精确度影响最大的是系统误差。本节着重介绍系统误差的消除方法。

1. 消除由测量仪器和仪表所引起的系统误差

设计用于测量的标准量具和仪器、仪表的依据是它们的技术条件。制造过程中产生的误差是基本容许误差，属于系统误差，基本容许误差决定了仪器（包括量具）、仪表的准确度等级。在测量实践中要根据测量精确度的要求选用不同准确度等级的仪器、仪表。

仪器、仪表的使用条件偏离其出厂时规定的标准条件，还将产生附加误差。附加误差与仪表的安装、调整及使用环境有关，在测量前要进行认真的观察研究，针对具体问题予以解决或估量其影响的大小。

精密仪器、仪表还可以使用校正公式、曲线、表格或修正值。例如，某个仪表如果已知绝对误差 Δ 等于测量值 x 与准确值 x_0 的差值，即 $\Delta = x - x_0$ ，则准确值可以用式(1-3-9)计算。

$$x_0 = x - \Delta = x + \epsilon \quad (1-3-9)$$

式中， $\epsilon = -\Delta$ 是误差修正值。

2. 消除由测量方法或理论分析所引起的系统误差

由于理论分析不全面或者采用了近似公式都会引起误差。例如，测量电路与被测对象之间的相互影响、测量线路中的漏电、引线及接触电阻、平衡电路中的示零指示器的误差、理想运算放大器与实际放大器之间的差异、数字与模拟量之间的转换、计算机的舍入误差等，都是产生误差的原因。这些情况应尽量设法避免。但由于这些因素很多，所以有时并不能完

全消除, 而只能估计其影响。

3. 消除由测量人员所引起的误差

由实验者的反应速度和固有习惯等生理特点所引起的误差属于人员误差。如记录一个信号时, 观测者有超前或滞后读数的倾向, 而且这种倾向因人而异; 又如, 当使用带有耳机的交流电桥测量电路参数时, 实验者听觉灵敏度不同, 也会导致不同结果。这些由实验者个人生理特点引起的系统误差, 将反映到测量结果中去。目前, 数字化仪器和仪表已经很普及, 由听觉、视觉差异引起的这项误差也就随之消失。尽管如此, 但由于多数实验还是靠人来直接操作, 操作者带来的温度、静电等影响有时也要考虑。

五、系统误差的计算

工程上的测量误差主要指系统误差, 偶然误差由于对整个测量过程影响较小, 可忽略不计。

1. 直接测量的误差计算

在直接测量的情况下, 主要的系统误差即为所使用的仪器和仪表本身的容许误差。这时的误差一般可以根据测量仪表本身的准确度等级计算。例如仪表测量时的读数为 x , 仪表量程为 A_m , 仪表的准确度等级为 α , 则测量结果可能出现的最大相对误差为

$$|\gamma_m| = \alpha\% \frac{A_m}{x} \quad (1-3-10)$$

若测量条件不满足仪表的正常工作条件, 则还须考虑附加误差。这时测量结果的最大误差应是仪表的基本容许误差和附加误差两者之和。关于附加误差的计算方法可查阅国家仪器仪表标准的有关规定。

2. 间接测量的误差计算

间接测量需要通过一次或多次测量, 然后根据公式或物理定律计算出被测量的结果。间接测量时, 每次测量的误差都将对最终的计算结果产生影响。

设间接测量的被测量 y 与直接测量的各个量 $x_1, x_2, \dots, x_n$ 之间的函数关系为

$$y = f(x_1, x_2, \dots, x_n) \quad (1-3-11)$$

令 $\Delta x_1, \Delta x_2, \dots, \Delta x_n$ 分别表示直接测量的各个量 $x_1, x_2, \dots, x_n$ 在测量时产生的绝对误差, Δy 表示 y 的间接测量的绝对误差。则由式 (1-3-11) 有

$$y + \Delta y = f(x_1 + \Delta x_1, x_2 + \Delta x_2, \dots, x_n + \Delta x_n) \quad (1-3-12)$$

将式 (1-3-12) 的右边按泰勒级数展开, 并略去高阶导数项, 得

$$f(x_1 + \Delta x_1, x_2 + \Delta x_2, \dots, x_n + \Delta x_n) \approx f(x_1 + x_2 + \dots + x_n) + \frac{\partial f}{\partial x_1} \Delta x_1 + \frac{\partial f}{\partial x_2} \Delta x_2 + \dots + \frac{\partial f}{\partial x_n} \Delta x_n \quad (1-3-13)$$

将式 (1-3-11) 和式 (1-3-13) 同时代入式 (1-3-12) 得

$$\Delta y = \frac{\partial f}{\partial x_1} \Delta x_1 + \frac{\partial f}{\partial x_2} \Delta x_2 + \dots + \frac{\partial f}{\partial x_n} \Delta x_n \quad (1-3-14)$$

$$\Delta k = \frac{\partial f}{\partial x_k} \Delta x_k \quad (1-3-15)$$

它表示各直接被测量 $x_1, x_2, \dots, x_n$ 的误差在间接测量结果中所引起的绝对误差。由式

(1-3-14)和式(1-3-15)有

$$\Delta y = \sum_{k=1}^n \Delta k \quad (1-3-16)$$

最不利的情况是式(1-3-16)求和号中的各项误差均同号,此时最大绝对误差为

$$\Delta y_m = \pm \sum_{k=1}^n |\Delta k| \quad (1-3-17)$$

最大相对误差为

$$\gamma_m = \frac{\Delta y_m}{y} \quad (1-3-18)$$

第四节 有效数字的表示与计算规则

一、有效数字的概念

由于在测量过程中不可避免地存在着一定的误差,并且仪表的分辨能力有一定的限制,因此测量数据就不可能完全准确。在一般情况下,测量结果中的最后一位数字(包括零)通常是估读的欠准数字。例如,已测得某个电压为15.3 V,这里的前两位数字“1”和“5”是准确可靠的,称为“准确数字”,最后一位数字“3”则是估计数值,称为“欠准数字”,欠准数字只有一位。准确数字加上欠准数字称为有效数字。

测量结果的有效数字位数应该与测量误差相对应。测量结果未标明测量误差时,一般认为其误差的绝对值不超过末位有效数字的单位的1/2。例如,末位有效数字是个位,则包含的误差绝对值应不大于0.5;末位数的有效数字是十位,则包含的误差绝对值应不大于5。

二、有效数字的正确表示

(1) 数字“0”既可以是有有效数字,也可以不是有效数字。例如,某一电流为0.076 A,其左边的两个“0”就不是有效数字,因为它并未提供有关测量结果的任何信息,通过单位的换算可把它写成76 mA,可见该电流值只有两位有效数字。像106这样的数字,中间的“0”自然是有效数字,因为它表示十位数字是零。一般也可以这样定义有效数字,即“从左边第一个非零的数字开始直到右边最后一个数字为止所包含的数字称为有效数字”。还要注意,像0.60 A这样的数字,最后一个“0”也是有效数字,因为它反映了测量结果的误差程度,即表明包含的误差绝对值应不大于0.005 A,所以不能随意省去。

(2) 对于像315000 Ω这样的数字,若在百位数上就包含误差,则它实际上只有4位有效数字,这时百位数上的“0”是有效数字不能省去,但十位和个位数上的“0”,虽然不是有效数字,可是它们都要用来表示数字的位数,也不能随意省去。为了区别上述数字中后面的3个“0”,通常用有效数字乘以10的方幂的形式,例如把315000 Ω写成 $3.150 \times 10^5 \Omega$,就很清楚地表明有效数字的位数只有4位,包含的误差绝对值不大于50 Ω。由这个例子还可以看出,不是数字的位数保留得越多越好,而是要按照有效数字的位数保留数字,这个处理数字的过程常称为“修约”。

(3) 表示常数的数字,可以认为它的有效数字的位数是无限多的。

三、有效数字的修约规则

对于计量测定或通过各种计算得到的结果数据,在规定的精度范围之外的那些数字,应按下述舍入原则处理:如果只取 N 位有效数字时,当超过 N 位的数字不等于 5 时,按大于 5 则入、小于 5 则舍的原则处理;当超过 N 位的数字正好等于 5 时,要看该数的前一位数是奇数还是偶数,奇数则入,偶数则舍,即“奇进偶不进”。例如,把下列箭头左端的数各删掉一位有效数字,按上述原则即得右端之结果。

$$4.186 \rightarrow 4.19$$

$$62.734 \rightarrow 62.73$$

$$0.825 \rightarrow 0.82$$

$$0.815 \rightarrow 0.82$$

间接测量数据是通过直接测量数据进行加、减、乘、除等运算得到的。运算结果应取的有效数字位数原则上由参加运算各数中,精度最差的那个数来决定。例如, $10.8725 + 6.13 + 21.432 = 38.4345$ 应取 38.43; $3.98 \times 4.125 / 2.5 = 6.567$ 应取 6.6。

这种处理方法比较简单,适用于要求不很严格的场合。若需精确计算,尚有严格规则可循,可查阅误差理论的有关内容。

四、有效数字的运算规则

1. 加减运算

由于进行加减运算的各数据必为相同单位的同一种物理量,所以精度最差的数就是小数点后面有效数字位数最少的。因此,在进行加减运算之前,应先将各数据进行处理。以小数点后面有效数字位数最少的数据为准,把其余各数据的小数点后面的位数修约成比精度最差的数多保留一位小数,然后再进行运算。运算结果所保留的小数点后面的位数和精度最差的数相等。加减运算的规则与小数点的位置有关。

【例 1-1】 已知 $R_1 = 15.7\Omega$, $R_2 = 6.088\Omega$, $R_3 = 2.055\Omega$, 求三个串联电阻的等效电阻 R 。

解 首先对相加的各电阻值进行有效数字处理,把 R_2 、 R_3 的阻值修约到比小数点后位数最少的 R_1 的阻值多保留一位小数,即

$$R_2 = 6.09\Omega, R_3 = 2.06\Omega$$

进行加法运算得

$$R = R_1 + R_2 + R_3 = 15.7 + 6.09 + 2.06 = 23.85\Omega$$

最后,对运算结果进行修约,根据“奇进偶不进”原则得

$$R = 23.8\Omega$$

2. 乘除运算

运算前,以有效数字位数最少的数为标准,将其他各数修约为有效数字位数与其相同;运算后的结果(积或商)要再次修约,使结果的有效数字位数还要与有效数字位数最少的数的位数相同。乘除运算的规则仅与有效数字的位数有关,而与小数点的位置无关。

【例 1-2】 求 $0.00276 \times 203.5 \times 88.525 = ?$

解 上述 3 个乘数中,有效数字位数最少的是 0.00276,有三位有效数字。所以将 203.5、88.525 分别修约为 204、88.5,即

$$0.00276 \times 204 \times 88.5 = 49.82904$$

最后,对运算结果修约,得乘积为 49.8。

如果有效数字位数最少的数中,其最高位的数字是 8 或 9,则修约时,其他数字的有效数字位数要多计一位,但结果的有效数字位数应与有效数字位数最少的数位数相同。

【例 1-3】 已知 $R = 50.371\Omega$, 流过的电流 $I = 0.087\text{ A}$, 求端电压 U 。

解 先对相乘除中的各项进行修约,因为 $I = 0.087\text{ A}$, 虽然只有两位有效数字,但其最高位数字是“8”,故将 R 写为 $R = 50.4\Omega$, 进行乘除运算得

$$U = RI = 0.087 \times 50.4 = 4.3848\text{ V}$$

对计算结果进行修约,得 $U = 4.4\text{ V}$ 。

3. 乘方及开方运算

乘方及开方运算的计算结果应比原始数据多保留一位有效数字。

$$(14.3)^3 = 2.924 \times 10^3, \sqrt[3]{6.88} = 1.902, \sqrt{0.5} = 0.71$$

4. 对数运算

对数运算的计算结果应和原始数据的有效数字位数相等。

$$\lg 2.89 = 0.461, \ln 203 = 5.31$$

第五节 实验结果的处理

对实验(测量)结果的处理通常采用列表法和曲线法两种方式。

一、列表法

列表法就是将测取的原始数据进行整理分类后放在一个特制的表格里,其目的是为了将所有数据有序地放在一起,既可以使实验结果一目了然,也为对其进行分析提供方便。

用列表法能否达到上述目的,制表是关键,因此制表时要注意以下问题:

(1) 项目齐全。即原始数据、中间数据、最终结果以及理论值、误差分析等不可缺项。

(2) 项目名称简练易懂。项目名称可采用字母或文字,但一定要符合习惯。有量纲的要给出单位,间接量要给出计算公式;如果公式不易在表中给出,可在表后用加注的方法给出。

(3) 测试条件明确。对大多数测试,都是在特定条件下进行的,因此,只有当给出测试条件时,测试结果才有意义。当测试条件不变时,可以把测试条件放在表格里;也可以放在表格外明显的地方,如右上角。

(4) 制表规范、合理,易读懂,表达的信息完整。

二、曲线法

利用各种关系曲线表达实验结果的方法属于图示处理方法,这种方法对于研究网络各参数对其特性(如传输特性等)的影响是十分有用的。

表达实验结果的曲线通常有特性曲线和响应曲线两种类型。

1. 特性曲线

用列表法可以把所有的实验数据有序地集中在一起,以便对其进行观察和分析。但在研究器件、电路的特性时(如伏—安特性、频率特性),仅有数据表格还不能准确地反映出电

路的变化规律。原因是：一般电路的变化规律是连续的，而表格中的数据却是有限的、间断的。因此，这就需把表格中的数据作为点的坐标放在坐标系中，然后用线段将这些点连接起来，形成一条曲线。用这样的方法绘制曲线叫做描点法，绘制的曲线叫做电路的特性曲线。用特性曲线描述实验结果，具有直观完整、可获取更多信息的优点，但在绘制时要注意以下几点。

(1) 以处理后的实验数据为根据，合理选择各坐标分度单位，建立完备且合适的坐标系。完备，即坐标轴的方向、原点、刻度、函数变量及单位俱全；合适，是指坐标轴刻度的比例大小合适，它决定了曲线图形的大小，除特殊要求外，一般按得到正方形或1:1.5的矩形图面来选定各坐标的分度单位。

以直角坐标为例，其横坐标和纵坐标的比例不一定要选取得相同，坐标的分度值也不一定都要从坐标原点“0”开始，具体应以方便读数、分析和使用为原则适当选择。在一组数据中，自变量和应变量均有最低值和最高值，可将低于最低值的某一整数作为起点，高于最高值的某一整数作为终点，以使所画的曲线占满坐标图面。为了说明实验结果和使用方便，在图中一定要将坐标轴的分度值标记出来，标记时所用的有效数字的位数应与原始数据有效数字的位数相同。

(2) 常用的作图坐标有直角坐标、半对数坐标、对数坐标和极坐标等。在电路实验中，前两种坐标用得比较多。当自变量变化的范围不大时，可以采用直角坐标，一般以函数 $y = f(x)$ 的自变量 x 作为横坐标即可；当自变量变化的范围较大时，为了观察曲线的全貌，一般采用半对数坐标，这时是以自变量 x 的常用对数 $\lg x$ 作为横坐标。

(3) 测量时要将所有的特殊点（如最大点、最小点、零点等）取到。例如在极值附近，测量点应更加密集，尽可能测出真正的极值；此外应按照曲线曲率小的地方多取、曲率大的地方少取的原则，取足够数量的点。

(4) 绘制曲线时，可剔除坏点（坏点可以标在图上，但曲线不用通过该点，只供分析时用）。坏点是指因操作或其他原因引起的测量结果与理论不符、脱离正常规律的点。

(5) 曲线要光滑，粗细一致。由于测量数据不可避免地存在误差，所以在一般情况下不可以直接将各数据点连成一条折线，也不要作出一条弯曲很多的曲线硬性通过所有的数据点。

(6) 当曲线的形状完全未知时，在预测量的操作过程中可先缓慢调节自变量 x ，并粗略地观察 y 的变化情况，以便做到“心中有数”。在正式测量时，就可以恰当的选择测量点，既保证了测量的精度，又提高了测量工作的效率。

2. 响应曲线

在实验室进行实验，对电路进行测量可看成是用仪器对电路进行求解。测量结果有的只是一个数值，但大多数情况则是一个函数（波形）。为了记录测量结果，就必须从测量仪器（多为图形显示仪器）上将其画下来。绘制的近似程度直接影响着测量结果的准确程度，因此在画图时一定要保持和原图一致或对应成比例。在绘制时，要注意做到以下几点：

(1) 首先将响应曲线的位置、大小调整合适，使曲线处在一个既携带了全部信息又便于绘制的状态。