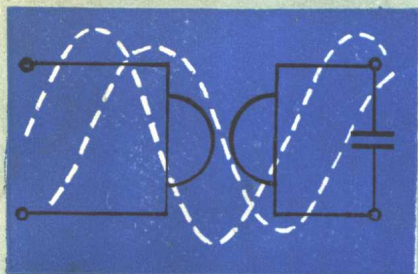


930740

电工基础

3



电路实验与量计

哈尔滨船舶工程学院电子教研室 编



$\sum I(S) = 0$	$\sum U(S) = 0$
$\sum i = 0$	$\sum \dot{U} = 0$
$\sum \dot{i} = 0$	$\sum u = 0$

国防工业出版社

电 工 基 础

第 三 册

电路实验与量计

哈尔滨船舶工程学院电工教研室 编

国防工业出版社

内 容 简 介

本书可与已出版的《电工基础》第一、二册配套使用。

本书共分七章。内容有：电路实验与测量的基本知识；测量仪器综述；电流、电压与功率的测量；元件参数测量；电参数的示波测量法；网络特性的测量；最后介绍电路实验，分6个单元，由22个实验组成。

本书较系统地阐述了电路实验与测量的基本知识和电路实验测量的原理与方法。可作为高等工科院校电类专业的实验课教材或教学参考书，也可作为工程技术人员的自学参考书。

电 工 基 础

第 三 册

电路实验与量计

哈尔滨船舶工程学院电工教研室 编

国防工业出版社出版、发行

(北京市海淀区紫竹院南路23号)

(邮政编码 100044)

新华书店经售

国防工业出版社印刷厂印装

787×1092 1/32 印张12⁸/₈ 271千字

1990年11月第一版 1990年11月第一次印刷 印数：0,001—5,000册

ISBN 7-118-00655-6/TM·17 定价：7.50元

前 言

在 1979 年我室编写的《电工基础》一书中，曾增加了一些近代电路理论知识。经过几年的教学实践，发现把这些内容集中放在几章内不太理想，内容显得有些庞杂。教学过程中，实验环节也有所削弱。因此，我们认为应该改革现行的《电工基础》的课程设置，拟设立《电路基础》、《网络分析导论》和《电路实验与量计》三门课，并增设《计算机辅助电路分析》、《非线性电路基础》和《网络综合基础》三门选修课。

这样的课程设置，各课程重点突出，体系较为合理。既能加强基础理论和实验环节，又能解决电工与物理、低频电路和信号分析等课程的衔接问题。同时还可适应各种专业的要求，选择所需课程组织教学。这个方案曾在我院电子工程系八一级和八二级试用过，效果较好。在此基础上，同时吸取广大读者对 1979 年版《电工基础》的意见，进行增订与改编。改编后的这套教材，沿用《电工基础》这一书名，但分成三册和三本选修课教材，陆续予以出版。

第三册为《电路实验与量计》。为了加强实践环节，培养学生的实验技能，同时考虑到二年级学生实际教学的需要，有必要增加电工量计的一些知识，以弥补现行教学计划中不设《电工量计》课程所造成的缺陷。我们将全书分两部分（计划学时数为 48 学时），第一部分为讲授内容，主要讲授电路实验与量计的基础知识和电路实验的原理与方法。通过这

段学习使学生获得有关电工量计的较为系统的基础知识和实验测量的原理和方法,以求在实验理论的指导下进行实际的操作,获得最佳效果。内容共分六章,即:电路实验与测量的基本知识;测量仪器综述;电流、电压与功率的测量;元件参数测量;电参数的示波测量法及网络特性测量。

第二部分为实验。为了实现《电路实验与量计》课程所应达到的要求,便于学生较深入的掌握重点内容,我们将全部 22 个实验分为 6 个单元,每个单元围绕一个专题,由几个实验组成,由浅入深,并且将验证性实验、研究性实验和小型设计性实验相搭配,其目的是使学生能较全面深入地掌握测量原理与方法,提高他们的实验能力。6 个单元为:电路基本变量的测量;元件参数测量方法的研究;网络频率特性测量方法;网络瞬态特性测量方法;有源网络及电路微机分析实验。

本书由陈式据主编,第七章第六单元由张保郁编写,其余均由郭志编写。由于我们的水平有限,难免有错误和不当之处,希望广大读者给予批评指正。

目 录

绪论	1
第一章 电路实验与测量的基本知识	5
§ 1-1 电路实验中测量的基本方法	5
§ 1-2 电路实验的测量误差	9
§ 1-3 实验结果的处理	17
§ 1-4 电路实验基本技能	27
§ 1-5 实验的准备与总结	32
第二章 测量仪器综述	37
§ 2-1 指针式仪表	38
§ 2-2 较量仪器	66
§ 2-3 电子仪器	80
第三章 电压、电流与功率的测量	90
§ 3-1 直流量与工频信号的测量方法	91
§ 3-2 低频信号的测量	97
§ 3-3 电平的概念与测量	106
§ 3-4 DA-16 毫伏表	110
第四章 元件参数的测量	115
§ 4-1 电阻的测量方法	115
§ 4-2 电容、电感、互感的测量方法	129
第五章 电参数的示波测量	149
§ 5-1 电子束的控制	150
§ 5-2 图像形成与稳定调节	154
§ 5-3 电子示波器的主要技术特性及其基本框图	159
§ 5-4 电子示波器的基本测量方法	163

第六章 网络特性的测量	172
§ 6-1 网络伏安特性的测量	173
§ 6-2 网络频率特性的测量	178
§ 6-3 网络瞬态特性的测量	183
第七章 电路实验	192
§ 7-1 第一单元 电路基本变量的测量	192
实验一 电路工作状态的测量	192
实验二 电压表读数与波形的关系	203
实验三 日光灯电路的实验研究	209
实验四 电表校验	217
实验五 电表设计	226
§ 7-2 第二单元 元件参数的测量	231
实验六 电阻测量方法的研究	232
实验七 谐振法测量元件参数	240
实验八 交流电桥法测量元件参数	253
实验九 示波法测量元件参数	260
§ 7-3 第三单元 网络频率特性的测量	270
实验十 T型网络幅频特性的测量	272
实验十一 网络相频特性与移相电路	280
实验十二 谐振电路	286
实验十三 选频网络的应用——阶音振荡器	297
§ 7-4 第四单元 网络瞬态特性的研究	302
实验十四 阶跃响应的研究	304
实验十五 冲激响应的研究	311
实验十六 波形变换电路的设计	316
§ 7-5 第五单元 有源网络基本特性的研究	323
实验十七 含受控源网络研究	323
实验十八 阻抗变换器	332

实验十九 高输入阻抗电压表的设计	346
§ 7-6 第六单元 电路的微机辅助分析	351
实验二十 用微机求解直流电路	352
实验二十一 用微机求解交流电路并输出频率特性	364
实验二十二 用微机求解瞬态电路	382

绪 论

科学实验是认识自然规律的基本手段。每一个新的科学发现都离不开科学实验，每一学科理论的建立都需要用实验来加以检验和证明。认识自然现象的本质，需要进行大量的实验，在千百次的实验中才能找出规律性的东西，上升为科学理论。一些自然现象一时不为人们所认识，也正是由于实验手段与方法还不足以取得本质性的资料和准确的数据所致。但随着科学水平的提高，科学实验手段的发展与创新，它们终将逐步为人们所认识。正如英国著名的科学实验的创始人罗吉尔·培根所指出：“没有实验任何新的东西都不能深知。”电路基本理论发展的历史也充分说明这一真理。雷电是一种自然现象，科学不发达时，给予了各种迷信的解释。科学家为了揭开雷电的奥秘，进行了大量的实验，富兰克林在雷雨天放风筝，风筝上带有两块金属片，引起火花放电，证明了闪电是一种放电现象；就在同一时期罗蒙诺索夫在房顶上竖起长长的铁杆，下端连接着金属片，他与另一名科学家利赫曼在雷雨天共同实验，闪电将至雷声未到，利赫曼已被电击，证明了电流的存在。法拉第则在长期的实验中发现了电磁感应现象，从而确定了作为电工理论基础的电磁感应定律。麦克斯韦在法拉第工作的基础上，总结前人对电磁现象研究的成果，用数学方法建立了电磁场的基本方程，并得出了光的本质是电磁波的预见。赫兹发表了电磁波的发生和接收的实验论文，证实了麦克斯韦的理论，从而成为电磁场

理论的基础，也为无线电通信创造了条件。基尔霍夫、安培、高斯、奥斯特这些著名的科学家都在科学实验的基础上，发表了各自的理论，后人为了纪念他们对科学的贡献，出现了不少以他们的名字来命名的定律或电磁单位。现代电路理论则凭借计算机这一新型的实验与计算的手段而蓬勃的发展起来。由此可见，科学实验在科学理论的形成与发展中所起的作用与地位。我们可以毫不夸张地说：科学实验是自然科学的根本，是科学理论的源泉。

科学实验不仅是认识自然的重要手段，而且是把科学技术知识应用于生产实践的联系环节。就电子工程领域而言，从电子管—晶体管—集成电路元器件的出现，它们都是在实验中研制出来的。各种先进的电子设备，则是为满足科学实验的需要，通过实验研制而投入生产。一个工程项目，不仅要有先进的设计，而且要经过方案的论证、实验调整与检验检测等各个环节，最后才能进行成果的鉴定。各种新工艺、新流程也是通过反复的实验，才趋于完善。虽然，科学实验不是以生产物质产品为目的，但是它是物质生产的一种特殊的准备，它是工程技术的基础。

近数百年来科学实验已经发展成为独立的社会实践，从少数科学家个别从事科学研究的实验室发展为现时的有专业技术人员管理的联合进行的实验基地，为学者和研究人员提供了科学实验的优越条件，对认识自然与改造自然发挥了巨大的作用。我国古代是一个科学发达的国家，对世界科学发展有过重大贡献。但是，由于受千年的封建科举制度的影响，形成了轻视实践与技艺的不良传统，科学实验不被重视，造成了国家科学技术的落后。这种历史的偏见，至今仍然在一部分人中存有影响。对于未来从事工程技术的大学生，不仅要

理解科学实验的重要性，而且还肩负着改变我国科学实验落后面貌的责任。著名现代实验物理学家丁肇中教授在获得诺贝尔奖金时说过：“中国有一句古话，‘劳心者治人，劳力者治于人’。这种落后的思想，对于发展中国家的青年有很大害处，由于这种思想，很多在发展中国家的学生们，倾向于理论研究，而避免实验工作。事实上自然科学理论不能离开实验的基础，特别是物理学，它是从实验产生的。我希望由于我这次得奖，能唤起在发展中国家学生的兴趣，而注意实验工作的重要性。”

科学实验是人们根据一定的研究目的，利用科学仪器、设备等物质手段，人为地控制或模拟自然现象，使自然过程以比较纯粹的或典型的形式表现出来，从而在有利的条件下研究自然规律的一种研究方法。工科院校是培养直接从事经济建设与国防建设的专业人才，他们不仅要上好理论课，汲取前人总结的科学规律，积累知识，打好坚实的理论基础，为探求未来作好理论的准备，而且要有工程技术开发的能力，具有解决生产与科研中各种实际问题的能力，具有发明创造的能力。因此必须重视实验，通过这一环节学习科学实验的方法，掌握科学实验的手段，学会如何去研究新事物，解决实际问题的本领，培养善于实事求是、独立思考、勇于创造的科学精神。

电路实验是基础课向专业课过渡的一门技术基础实验课，对于科学实验方法的掌握，实验技能的提高，独立工作能力的培养，具有明显的作用。电路实验的目的是：

1. 通过电路实验运用所学的理论知识，为研究与发现问题作准备。
2. 通过电路实验学习与掌握研究问题的方法，加强基本

实验技能的训练，培养独立工作的能力与勇于创造的精神。

3. 通过实验养成工程技术人员应有的科学态度与严格的科学工作作风。

电路实验的基本要求是：

1. 掌握电路实验的基本原理与方法

- ① 基本电量（电流、电压、功率）的测量方法；
- ② 电路参数（频率、相位、元件特性）的测量方法；
- ③ 网络基本特性（伏安特性、频率特性、瞬态特性）

的测量方法；

④ 含源网络的测量方法。

2. 加强实验基本操作技能的训练

- ① 电路实验常用仪器、仪表的操作技能；
- ② 电路的实验调整与排除故障的技能；
- ③ 电路焊装及其必要的工艺技能。

3. 培养电路实验设计与计算的能力

- ① 具有制定实验方案、计算电路参数的能力；
- ② 具有用微机进行电路分析的能力；
- ③ 具有选用设备独立组织实验的能力。

4. 编写合乎规范的实验总结（报告）

- ① 具有正确处理实验数据与误差分析的能力；
- ② 正确绘制实验曲线与图表的能力；
- ③ 正确分析实验结果作出合理结论的能力。

第一章 电路实验与测量的基本知识

§ 1-1 电路实验中测量的基本方法

一、测量的基本概念

实验在工程技术和科学研究中占有重要地位。实验是依据研究事物的目的，构成实验装置，通过一定的测试设备、按照一定的原理和方法，取得测量数值，从而对客观事物获得认识的过程。因此实验离不开测量，不存在不要测量的实验。以电路实验为例，一般包含下列过程：

① 实验设计——根据实验的目的与要求，制定实验方案，设计与计算实验电路的参数；

② 实验电路的安装与调试——选测元件、焊接组装、调整工作状态；

③ 观察与测量——选用合适的仪器、仪表，用合理的方法测量技术指标，检验是否达到预定的目标。

完成上述过程，需要采用一定的测量方法和使用一定的测量仪器。因此实验与测量是不可分割的。

所谓测量，是指将被测量与同种类的作为单位的量进行对比，并用确切的数值与单位来表示被测量的大小。实质上，测量是一个比较的过程。例如被测量是电压，把它与作为电压的单位量——“V”进行比较，比较的结果由比较的数值和单位“V”来表示。测量市电电压为220V，就是说它等于以“V”为单位的220倍。如果被测量是与国家计量部门作

为基准或标准的单位相比较，这种过程便属于计量的范畴。从这个意义上来说，计量是测量的一种特殊的形式。计量与测量两者密切联系，但又是含意不同的两个概念。测量是用基准量（或标准）检验过的测量仪器与被测量进行比较，以获得数量的概念，认为被测量的真实数值是客观存在的，其误差是由测量仪器与测量方法等引起的。而计量是使用高精度的基准量与一般的测量仪器或量具进行比较，从而确定测量仪器或量具的精确程度，以保证测量的可靠性，其误差是由测量仪器或量具本身所引起的。可见，计量是一门保证测量的精确度和统一性的专门的学科。

二、电路实验中测量的基本方法

若要取得实验的结果，必须进行测量；若要完成测量任务，就要有一定的测量方法。由于被测量种类繁多、范围宽广，因而测量的原理与方法也各不相同，分类有别。电路实验中主要有下述分类的方法。

1. 直接测量与间接测量

直接测量——能够直接得到被测量值，而不需要与其它量进行计算的测量方法。如电压表测量电压，电流表测量电流，电桥测量电阻，数字频率计测量频率等。测量的准确程度，主要决定于所用测量仪表的级别与测量方法是否合理。

间接测量——需要先分别测出几个量，然后通过一定的公式进行计算的测量方法。例如要测量功率因数角 φ ，需要分别测出 P 、 U 、 I 三个量，然后用公式 $P=UI\cos\varphi$ 进行计算，才能得到 φ 。间接测量的特点是需要测出多个量，且根据不同量选用不同的仪表，比较麻烦，与直接测量相比，其测量误差较大，只在缺少直接测量仪器时或者直接测量误差过大的情况下才被采用。

组合测量——当被测量有数个，通过直接测量和间接测量取得数值，列写相应的方程，解联立方程而获得被测量的方法。例如要测量电阻的温度系数 α 和 β ，则由

$$R_t = R_{20} [1 + \alpha (t - 20) + \beta (t - 20)^2]$$

式，其中 R_{20} 为 20°C 时电阻的实际值， t 为温度。故应测出温度为 20°C 及 t_1 、 t_2 时的电阻值，得

$$\left. \begin{aligned} R_{t_1} &= R_{20} [1 + \alpha (t_1 - 20) + \beta (t_1 - 20)^2] \\ R_{t_2} &= R_{20} [1 + \alpha (t_2 - 20) + \beta (t_2 - 20)^2] \end{aligned} \right\}$$

解此联立方程，可得电阻的温度系数 α 和 β 。

2. 直读测量与比较测量

直读测量——用预先按标准量检定合格的仪表，测量未知量，能够直接从仪器仪表的刻度线上读出测量结果的方法。例如用电压表测量电压，用瓦特表测量功率都是直读测量法。它是根据仪表的读数来显示被测量的大小，而作为计量标准的量具不直接参与测量的过程。直读测量法的特点是操作简便，测量效率高，使用广泛，但测量的精度不是很高，一般能满足工程测量的需要。

比较测量——被测量与标准量直接进行比较而获得测量结果的方法。如用电位差计测量电压，标准电池参与比较；用电桥测电阻（或电容、电感），标准电阻（标准电容、标准电感）参与比较。这种测量方法应具备一定的条件，使用的电学量具与器具较多，操作稍为复杂，测量的精度高，适用于精密测量。

直读测量法与直接测量法、比较测量法与间接测量法它们彼此并不相同，而是互有交叉的。这些测量方法在电路实验中均有应用。在实际工作过程中，采用何种测量方法，是根

据被测精度的要求与测量仪表的情况而灵活确定的。同一个物理量在不同场合,可以采用不同的测量方法。如测量电阻,当要求精度不高(如5%以下),可以用万用表直接测量,或伏安法间接测量,它们都属于直读测量法。当测量精度在1%以上,则用电桥法或电位差计法直接测量,这是比较测量法。我们大体上可以这样来理解:直接测量与间接测量是从使用单一仪表或多种仪表的角度来分类的,其测量精度符合误差合成的法则;直读测量与比较测量则是从工程测量与精密测量的角度来分类的,使用测量仪器的精度与条件不同。

3. 以被测对象的参数分类

根据电路实验所涉及的范围,可分为:

电路基本变量的测量——主要指直流、工频、低频范围内的电压、电流、功率的基本测量方法;

电路参数与元件参数及其特性的测量——包含电阻、电容、电感、互感、受控源等元器件的特性的测量方法;

网络特性的测量——包含网络幅频特性、网络相频特性、网络瞬态特性的测量方法。

我们在进行电路实验时,主要是理解测量原理与掌握基本的测量方法。以电压测量为例,它是电路实验中一个重要的基本的被测量。若为直流与工频时,可 adopt 电磁变换原理制成的指针式仪表直接测量;若测量精度要求较高时,可采用比较原理制成的电位差计法进行测量;若被测频率较工频为高时,可采用波形变换原理的检波电压表测量;若要了解瞬时特性时,可采用波形显示原理的示波法测量,等等。每一种测量原理又可有不同的测量方法。理解测量原理,掌握测量方法,注意测量条件是测量中至关重要的事情。

§ 1-2 电路实验的测量误差

在电路实验过程中，我们是通过测量取得数量的概念来认识电路的基本规律与特性的。为此，总希望测量能取得准确的结果，也就是要获得真实的数值，称为“真值”。但是由于人们对客观事物认识有局限性，或受测量工具的某些限制或因测量方法的不完善、测量环境的差异以及测量人员的技术水平与习惯等因素所致，使得测量的结果不是真值，而是近似值，这种差异就叫做测量误差。测量误差反映了测量结果的可信程度。当测量误差超过一定限度时，由测量结果所做出的结论将没有什么意义，甚至对工作带来危害。可见，测量的价值在于测量的精确程度。我们研究与认识测量误差正是要知道测量误差是如何正确表示的，不同测量方法会带来多大误差，以及了解误差的来源，从而设法减小测量误差，使误差控制在允许范围内，以满足工作的需要。这些都是进行实验时所必须具有的基本概念。

一、误差的表示方法

1. 绝对误差

测量误差用绝对误差与相对误差来表示。若被测量的真值为 X_0 ，测量值（又称示值）为 X ，则绝对误差定义为：

$$\Delta X = X - X_0 \quad (1.1)$$

绝对误差表示测量的近似程度，也就是与真值相差多少，它是一个绝对量值。若测量值大于真值，绝对误差为正；反之为负。它是以真值作为衡量的基准，来表示测量数值偏差的大小。绝对误差是一个有单位的量，其单位与被测量的单位相同。

由于真值是一个理想的数值，是很难知道的，通常是把