

高等学校工程专科教材

# 电路及磁路 实验

陈意军 主编

高等教育出版社



高等学校工程专科教材

# 电路及磁路实验

陈意军 主编

高等教育出版社

(京) 112号

### 内 容 简 介

本书根据国家教委1990年审定的《高等学校工程专科电路及磁路教学基本要求》中实验要求编写,经国家教委高等学校工程专科电工基础课程教材编审小组审议通过,作为高等学校工程专科“电路及磁路”课程的实验教材。

本书分为四部分。第一部分为实验技术,它包括实验基本要求、实验基本知识、误差理论和实验结果处理;第二部分为实验项目,编入基本实验、综合实验共26个,包括直流电路、正弦交流电路、互感电路、三相电路、非正弦周期电流电路、动态电路、非线性电阻电路和磁路等方面内容;第三部分为常用电工仪器仪表知识,主要介绍了电工和电子仪器、仪表的原理和使用方法。附录部分介绍了复用表的设计、组装和调试;计算机辅助电路分析程序。

本书可作为高等学校工程专科电类(包括电子通信等)各专业实验课教材,还可供职工大学选用和有关工程技术人员参考。

高等学校工程专科教材

### 电路及磁路实验

陈意军 主编

高等教育出版社出版

新华书店总店科技发行所发行

中国科学院印刷厂印装

开本 787×1092 1/16 印张 9 字数 220 000

1993年11月第1版 1993年11月第1次印刷

印数 0001—3 241

ISBN 7-04-004441-2/TM·227

定价 3.30 元

## 前 言

本书根据国家教委1990年审定的《高等学校工程专科电路及磁路课程教学基本要求》(90~108学时和126~144学时)中实验要求编写,供高等学校工程专科电类(包括电子、通信等)各专业使用。

本书包括实验技术、实验项目、常用电工仪表与仪器和附录四部分。第一部分实验技术包括实验基本知识、测量方法和误差分析及实验结果的数据和图解处理等,力求反映工程实际,以培养学生严谨的工作作风、安全操作的习惯和良好的工程意识。第二部分为电路及磁路实验项目,共编入基本实验和综合实验二十六个。要完成全部实验需要的学时数较多,各学校可根据专业要求,灵活选择实验个数。考虑到各学校课程要求、设备条件、学生基础等方面不尽相同,为使本书具有一定的通用性,实验项目中的每个实验均安排有较多内容,且难度按梯度增加,但各部分相对具有一定的独立性,对于实验中难度较大的选作内容及较复杂的综合实验均用“\*”号注明,供使用者需要时自行选择。第三部分常用电工仪表和仪器中重点介绍了常用仪表和仪器的基本原理、使用方法,力求内容精简、以必需够用为度、强化使用。对于不单独设立“电路与磁路实验”课程的学校,第一部分及第三部分可作为学生课外自学内容。

高等工程专科学校培养应用型高级工程技术人才,要求工程专科学学生具有较强的动手能力和良好的实验技能。本书力求通过选择一些紧密联系工程实际的实验项目,特别是较为复杂的综合实验来强化学生的动手能力,提高学生实验基本技能和知识综合应用能力。由于综合实验涉及实验方案拟定、线路设计、参数计算、记录表格拟定和实验结果分析论证等,需要的时间会超过两小时,因此非实验操作内容可安排学生课外进行。

附录一介绍了复用表的设计、组装和调试,可供条件较好的学校开设电路课程设计时参考。附录二介绍了部分电路分析计算程序,目的是使学生初知一些计算机在电路中的应用,使学生计算机不断线,提高上机能力。

本书的编审工作是在国家教委高等学校工程专科电工基础课程教材编审小组的主持下进行的。全书由张洪让主审,蔡元宇、陈永祥、韩继生、王胜辉参加了审稿会议。本书经编审小组审定作为全国通用教材。参加本书编写的有:沈阳电力专科学校鞠振河编写第一部分及实验六、九、十二、十五、十六、十七、二十、二十四、二十五、二十六,其余由湘潭机电专科学校陈意军编写。全书由陈意军主编。

本书是编者所在学校多年实验教学的结晶,因此特别感谢湘潭机电专科学校、沈阳电力专科学校电工教研室和实验室的各位老师,他们为本书的出版作出了积极贡献。

本书的初稿经周伯孚、叶国恭等老师仔细审阅,并提出宝贵意见,谨致以衷心感谢。

限于编者水平,书中不当或错误之处在所难免,衷心希望读者指正。

编 者

1992年12月

# 目 录

<b>第一部分 电路及磁路实验技术</b> .....	1	§ 2-12 实验十二 正弦交流电路中电阻器、电感器和电容器电路参数的测量	45
§ 1-1 实验的意义、目的和基本要求	1	§ 2-13 实验十三 $RLC$ 串联电路的谐振	48
一、实验课的意义	1	§ 2-14 实验十四 功率因数的提高	51
二、实验课目的	1	§ 2-15 实验十五 磁耦合线圈的研究	54
三、实验基本要求	1	§ 2-16 实验十六 三相电路中电压和电流的测量	56
§ 1-2 实验基本知识	2	§ 2-17 实验十七 三相电路功率的测量	59
一、电工仪器设备的选用	2	§ 2-18 实验十八 非正弦周期电流电路的研究	63
二、合理布局与正确接线	4	§ 2-19 实验十九 综合实验 无源二端网络参数的测量	65
三、正确操作和读测数据的方法	6	§ 2-20 实验二十 综合实验 电工仪器设备的选用	68
四、实验故障的分析和处理	6	§ 2-21 实验二十一 $RC$ 电路的响应	71
五、安全操作的规则	7	§ 2-22 实验二十二 二阶电路响应的研究	74
六、实验设计的基本方法	7	*§ 2-23 实验二十三 综合实验 运算放大器的应用	76
§ 1-3 测量方法和误差分析	8	§ 2-24 实验二十四 直流磁路的研究	80
一、测量方法	8	*§ 2-25 实验二十五 铁心线圈的综合研究	84
二、误差的简单分析	9	*§ 2-26 实验二十六 均匀传输线的模拟研究	87
§ 1-4 实验结果的数据处理及图解处理	13	<b>第三部分 常用电工仪表与仪器</b> .....	91
一、实验结果的数据处理	13	§ 3-1 电工仪表的基本知识	91
二、实验结果的图解处理	14	一、电工仪表的分类	91
思考题与习题	16	二、电工指示仪表的主要技术性能	91
<b>第二部分 电路及磁路实验内容</b> .....	18	三、电工指示仪表的表面标记	92
§ 2-1 实验一 直流电阻的测量	18	四、指示仪表的组成和原理	94
§ 2-2 实验二 电位测量和电路故障的处理	20	§ 3-2 磁电系仪表	95
§ 2-3 实验三 磁电系表头的应用	22	一、磁电系仪表的结构和工作原理	95
§ 2-4 实验四 电阻器与电源的伏安特性测定	24	二、磁电系电流表和电压表	97
§ 2-5 实验五 叠加定理和基尔霍夫定律的验证	27	三、欧姆表	98
§ 2-6 实验六 戴维南定理的研究	28	四、兆欧表	99
§ 2-7 实验七 受控源研究	31		
§ 2-8 实验八 非线性电阻研究	36		
*§ 2-9 实验九 综合实验 含受控源电路的综合分析	39		
§ 2-10 实验十 示波器使用	41		
§ 2-11 实验十一 正弦电路中电阻器、电感器和电容器特性研究	43		

§ 3-3 电磁系仪表 .....	100	四、信号发生器 .....	111
一、电磁系仪表的结构和工作原理 .....	101	五、电子示波器 .....	117
二、电磁系电流表和电压表 .....	102	六、电子管或晶体管电压表 .....	117
§ 3-4 电动系仪表 .....	103	七、数字复用表 .....	118
一、电动系仪表的结构和工作原理 .....	103	八、磁通计 .....	120
二、电动系功率表(瓦特表) .....	104	思考题与习题 .....	121
§ 3-5 常用电工仪器和设备 .....	107	附录一 复用表的设计、组装与调试 .....	122
一、电桥 .....	107	附录二 计算机辅助电路分析程序 .....	129
二、调压器 .....	109	参考文献 .....	136
三、晶体管直流稳压电源 .....	110		

# 第一部分 电路及磁路实验技术

## § 1-1 实验的意义、目的和基本要求

### 一、实验课的意义

现代科学技术的高速发展,要求工程技术人员既要有扎实的理论知识,又须具备良好的实验技能和解决工程实际问题的能力,这些均离不开实验课的基本训练。

实验课是培养工程技术人员的重要环节。对于工程技术人员来说,如果没有一定的理论知识及良好的科学实验能力,不仅不能做出创造性成果,也难于胜任本职工作。

### 二、实验课目的

1. 增加感性认识,巩固和扩展电路及磁路理论知识,加深对基本理论的理解,培养实际工作能力。
2. 学习实验的基本知识,进行实验技能的训练,掌握常用电工仪器设备的选用方法及测试技术。
3. 应用理论知识对实验结果进行数据处理和图解处理,提高分析和解决问题的能力。
4. 养成良好的实验习惯及安全用电的操作习惯,培养严肃的工作态度,严格的工作纪律及严谨的工作作风。

### 三、实验基本要求

#### 1. 实验前的预习

(1) 明确本次实验的目的和任务,结合实验原理复习有关理论。了解完成实验的方法和步骤,拟出实验的接线图及实验结果的记录图表。

(2) 理解并记住本次实验的注意事项。对实验中需用的仪器设备原理及使用方法作初步了解。

(3) 对实验可能产生的结果进行预估,以确定测试项目、实验测量次数和数据采集量、操作步骤等。

#### 2. 实验的进行

(1) 接线前了解所选各种仪器设备额定值及正确使用方法。

(2) 合理布局仪器仪表、被测对象的位置,既便于操作和方便读数,又对测量结果影响小。将所有电源开关、可调设备的旋钮(或手柄)置于最安全位置。

(3) 按照线路连接原则,合理连线,当检查无误后通电实验。

(4) 每次测量之后,立即将测量数据记在预习报告的表格中。原始数据记录纸上不允许有任何零散的多余数字,并要求用深色墨水笔书写。认为错误的数字,可在错误的数字下画一条整齐

的直线,暂不要擦去或更改,因为“错误”的数据有时经过比较后可能是对的。

(5) 实验中始终注意人身及设备安全。实验的进行要胆大心细,一丝不苟。如发现异常现象,应立即断开电源并及时查找原因。

(6) 实验结束,先断电源,暂不拆线。待认真检查实验结果没有遗漏和错误,请指导教师验收签字之后再拆除线路,复归仪器设备,导线整理成束,清理好实验台。

### 3. 实验报告

实验报告是实验工作的全面总结,其质量好坏不但是实验教学完成的凭证,而且对实验交流、成果推广或学术评价起着至关重要的作用。实验报告要简明、工整和真实。

#### (1) 报告内容

① 实验名称、日期、单位、实验者。

② 实验目的。

③ 实验原理与说明。

④ 实验任务及步骤。

⑤ 实验仪器设备。实验者应该列表记录所用仪器设备的名称、型号、规格、数量、编号等,以便整理数据发现问题时,可以按原编号仪器设备查对核实。

⑥ 实验结果及处理。这部分内容是根据原始记录整理而成的,主要包括数据、图表及计算。所有数据应一律采用国际单位。

⑦ 实验结论与分析或体会。这部分是实验报告的重点。

报告内容中第一至第五项应在预习中完成,并写出预习报告。

#### (2) 报告要求

选用规定的实验报告用纸,曲线和其他图形的绘制用坐标纸。要求实验报告文理通顺,简明扼要,字迹端正,图表清晰,分析合理,结论正确。

完整的实验报告应该附有指导教师签字的原始记录。

## § 1-2 实验基本知识

### 一、电工仪器设备的选用

#### 1. 仪器设备的选用

仪器设备的选用可总结为四个字:类、级、量、内。

类:指根据被测量的性质及测量对象的数值特点选择仪表设备的类型。

根据被测量是直流还是交流选择直流或交流仪表和设备。测量交流时,应区分是正弦交流还是非正弦交流。如果是正弦交流,采用任一种交流仪表(电流表或电压表)均可测量。如果是非正弦交流电流(电压),则应区别是测量有效值,平均值或最大值。有效值可用电磁系或电动系电流表(电压表)测量;平均值用整流系仪表测量;最大值用峰值表测量。测量交流时,还应考虑被测量的频率要求。一般常见的交流仪表(电磁系、电动系和感应系)频率范围较窄,当被测量的频率较高时应选择频率范围与其相适用的仪表,如电子仪表。

级:指选择仪表设备的准确度等级。

仪表准确度等级有 0.1、0.2、0.5、1.0、1.5、2.5 和 5.0 七级。其中 0.1~0.2 级常用作标准表或



作精确测量；0.5~1.5 级仪表用于实验室一般测量；1.5~5.0 级仪表常用作安装仪表或作工业测量。

量：指选择仪表的量程及设备的额定容量值。

对于仪表应合理选择量程再进入测量。量程小了易烧表或“打表”，量程太大则测量结果误差也大。一般工程测量中量程选择应为所估被测量最大值的 1.2~1.5 倍，仪表表针指示值尽可能不低于  $\frac{1}{2}$  的满偏读数。对于功率表特别注意被测量的电压和电流都不允许超过表的量

程。对于示波器应注意衰减器的档位，最大信号电压不能超过测试端的最大允许值。如果不知道被测量大小，则按先大(粗测)、后小(细测)的原则选择仪表的量限档位。

一般设备的铭牌上标有容量、参数及额定电压、电流等。设备和器件只有在额定条件下才能正常工作，使用中绝对不允许超过额定值，否则将损坏设备和器件。选用电源设备要考虑其额定电压、最大输出电流、额定输出功率等。选电阻器要考虑其额定功率；选电感线圈要考虑本身的载流量；选电容器时应注意其工作电压符合要求；对于交流调压器，除应注意输入电压符合要求外，还要注意输出电压及电流；对于连接导线，应注意其载流量。

内：指选择仪表设备的内阻。

实验中应根据被测对象的阻抗大小选择合适的仪表内阻。在图 1-1 所示电路中，当需测量电阻  $R$  两端电压时，如果电压表内阻  $R_V$  与被测对象的阻值相差不大，则电压表的接入将严重地改变被测电路原有工作状态，造成测量结果有很大的误差，甚至测量结果失去意义。例如，在图 1-1 中，假设电源电压  $U_s = 180\text{V}$ ， $R_0 = R = 20\text{k}\Omega$  电压表内阻  $R_V = 20\text{k}\Omega$ ，量程为 100V，在电压表未接入前

$$U_R = \frac{U_s R}{R_0 + R} = 90\text{V}$$

当接入电压表后，相当于在  $R$  两端并接上一个电阻  $R_V$ ，并联后的等效电阻为

$$\frac{R_V R}{R_V + R} = 10\text{k}\Omega$$

这时不论电压表的准确度有多高，电阻  $R$  两端的电压总是  $U_s/3$ ，即 60V，与原电路中  $R$  两端实际电压 90V 相差很大。显然这样的测量没有意义。

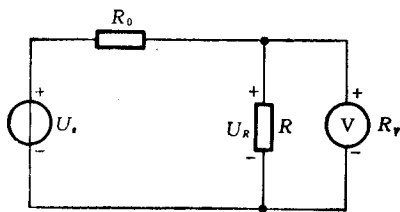


图 1-1

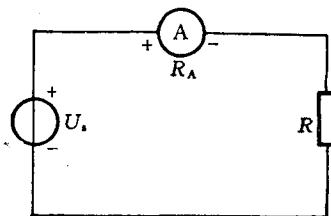


图 1-2

如果改用内阻  $R_V = 2000\text{k}\Omega$ ，量程仍为 100V 的电压表进行测量，测得电阻电压为 89.55V，此值与电阻两端的实际电压已非常接近。

由此可见，电压表的内阻越大对测量结果影响越小。一般工程测量中，当电压表内阻  $R_V \geq 100R$  时 ( $R$  为与电压表并联的被测对象的总的等效电阻)，就可以忽略电压表内阻的影响。

电流表在测量中串入被测电路,如图 1-2 所示。因此要求电流表内阻  $R_A$  越小越好。在一般工程测量中,当电流表内阻  $R_A \leq \frac{1}{100} R$  时 ( $R$  为与电流表串联的总等效电阻),就可以忽略电流表内阻的影响。

对于直流稳压电源、稳流电源等设备一般认为前者内阻为零,后者内阻为无穷大,即分别作为理想电压源和理想电流源看待。但对信号发生器等其他电源设备必须考虑其内阻。在使用有内阻的电源设备时,负载如需获得最大功率,必须考虑阻抗匹配。

## 2. 仪器设备的使用程序

(1) 使用或操作仪器设备之前,首先看清仪器设备的表面标记、铭牌参数及各端钮的功能。再查看连线、仪器设备的状态是否满足实验要求。

(2) 扳动仪器设备的开关、旋钮至实验要求的状态。如选好仪表量程,把电源设备的可调旋钮或手柄调至安全位置等。

(3) 对仪器设备进行试测、试用。

电压表是接两个表笔进行电压的试测。所谓试测指先将一表笔触在一个待测点上,另一支表笔瞬间触碰另一个待测点,看表针指示是否正常。如表针反偏,说明极性不对;表针变化急剧说明量程选择不合适。对于电流的测量,通常为了一表多用而利用插座代替电流表位置,当用接有电流表的插头插入插座进行电流测量时,仍可利用插座内弹簧片的弹力,通过插头的“试插”来判断极性 & 量程选择的正确性。

接好的实验线路,实验前先在电路中加入一小的试验电压(或电流),观察整个电路中各仪器设备的工作是否正常。发现异常及时作出处理。

(4) 在试测、试用无问题后,进行正式实验测量,获取实验结果。

按照上述程序使用仪器设备,既能避免误用仪器设备,又能防止误操作。即使在操作中出现了预想不到的问题时,也能使仪器设备不被损坏。

## 二、合理布局与正确接线

### 1. 合理布局

根据实验任务和仪器设备条件,合理安排各仪器设备和实验装置的位置,布线时避免不必要的交叉和跨越设备,防止出现影响操作、读数及产生不安全因素。电源设备靠近电源开关,仪表严禁放置歪斜或重叠。总之力求做到安全方便、整齐清晰,使实验操作顺手,又易于观察和读数。

图 1-3 和图 1-4 分别是伏安瓦计法测量正弦交流参数的两种布局接线图。图 1-3 中的仪表

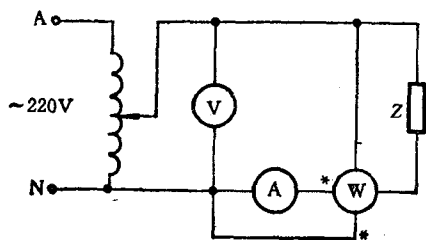


图 1-3

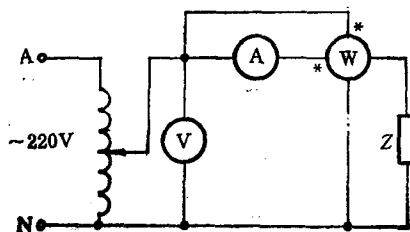


图 1-4

位于实验台的外侧,离操作者近,而且是接在零线上。既操作顺手,观察读数方便,又比较安全,是一种合理布局。图 1-4 的布局不便操作和读数,而且不安全,因而是不可取的。

## 2. 正确接线

接线时根据电路的特点,选择合理的接线步骤。正确接线的程序是:按图摆台,先串后并;先分后合,先主后辅。

(1) 按图摆台。首先根据合理布局所画出的原理图,找出各仪器、仪表与设备,放在实验台相应的位置。

(2) 先串后并。先连接串联回路(也称电流回路)中各器件,然后连接并联支路的器件。如图 1-5 所示电路,可先将电流表、功率表电流线圈、电阻器、电感线圈及电容器等逐个串联。再

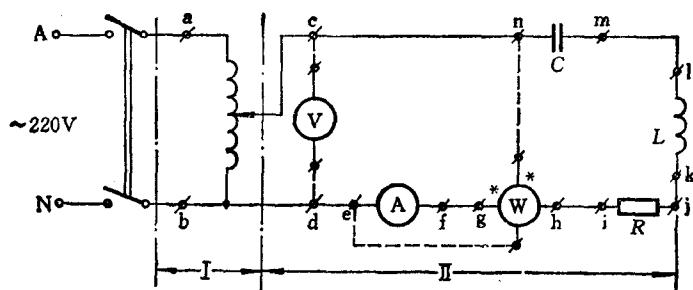


图 1-5

将电压表、功率表电压线圈分别并在  $cd$  之间和  $en$  之间。

(3) 先分后合。复杂的线路要根据其特点分成几个部分。如图 1-5 所示电路可分成 I, II 两部分。先连各部分线路,再将各分线路连成一个完整的线路。

(4) 先主后辅。如果所连的线路是一个复杂的系统,通常是先连主回路后连辅助回路(又称控制回路)。

连接电路还应注意,导线长短要适中。接线太长则缠绕不清,不便检查;太短则牵扯仪器,易脱线造成事故。导线的接线片不宜过多集中于一点,每点最好不超过两个接线片。对于图 1-6 (a) 的原理电路图来说,图 1-6(b) 的接线合理;而图 1-6(c) 的接线则不妥。

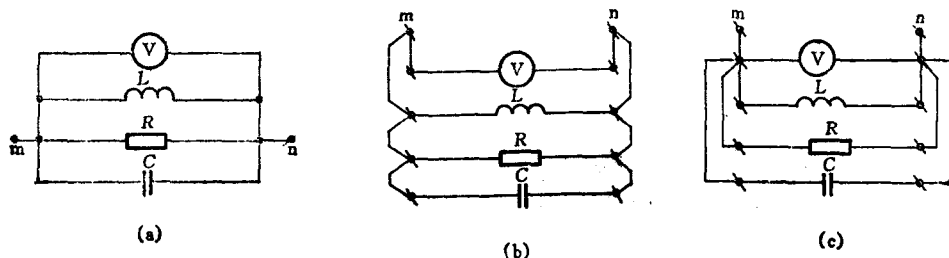


图 1-6

### 三、正确操作和读测数据的方法

#### 1. 正确操作的方法

先连线,后合电源开关,再观察整个线路上的所有设备、仪表。如发现有不正常现象(光、热、声、味、烟及表针指示异常等)应立即断开电源,查找原因。若电路正常,先粗略确定一些关键数据,做到心中有数,再进行正式测量,读取实验结果。

#### 2. 正确读测数据的方法

正确读测数据要求做到只读取实测数据的实际偏转格数,而不直读含有单位的读数值。为了减小视值误差,读数时用单眼;为了符合有效数字要求,读数时要根据仪表最小刻度单位或准确度等级确定有效数字位数。即当仪表指示器指示在两条刻度(分度)线之间时,必须估读一位数字(欠准数字)。

例如某电压表量程  $U_m = 75V$ , 表盘总格数  $\alpha_m = 150$  格,表针指在 123 格与 124 格之间,读测结果为  $\alpha = 123.4$  格,其中 4 为欠准确数字。仪表常数

$$c_v = U_m / \alpha_m = 75 \text{ 伏} / 150 \text{ 格} = 0.5 \text{ 伏/格}$$

则实测的电压为仪表常数乘以表针偏转格数,即

$$U = c_v \cdot \alpha = 0.5 \text{ 伏/格} \times 123.4 \text{ 格} = 61.7 \text{ 伏}$$

如果指针指在 123 格,则应记为  $\alpha = 123.0$  格,而不能记为  $\alpha = 123$  格,否则误差人为增大 10 倍。

### 四、实验故障的分析和处理

排除实验故障是培养实际工作能力的的一个重要方面,它不但需要一定的理论基础,还需要较熟练的实验技能,应在实验中不断总结经验。

#### 1. 产生故障的常见原因

- (1) 电路连接点接触不良,导线内部断线。
- (2) 器件、导线裸露部分相碰造成短路。
- (3) 电路连线错误,测试条件不对。
- (4) 器件参数不合适,实验装置、器件使用条件不符。
- (5) 仪器设备或器件损坏。

#### 2. 故障处理的一般步骤

- (1) 出现故障立即切断电源,避免故障扩大。
- (2) 检查电路器件的外观,查找有无外观异常的器件。
- (3) 根据故障现象,判断故障性质。故障可分为两大类:一类属破坏性故障,可使仪器设备、器件等造成损坏,其现象是烟、味、声、热等。另一类属非破坏性故障,其现象是无电压、无电流,电压或电流值不正常及波形异常等。
- (4) 根据故障性质,确定故障的检查方法。对破坏性故障只能采用断电检查方法,可用欧姆表检查线路的通断、短路或器件阻值等。对非破坏性故障,可采用断电检查,也可采用通电检查或两者结合的方法。

通电检查主要是用电压表检查电路有关部分的电压是否正常。以图 1-7 所示线路为例说明

电压表法在通电检查故障中的具体应用。假设图中  $a, b, \dots, m, n$  分别为各器件的接线端, 它们之间用导线连接(虚线表示)。故障现象为开关  $S$  闭合后电流表无读数。若取  $n$  点为电位参考点, 从  $a$  点开始依次用电压表测量各点的电位值。若测得  $U_a = U_{s1}$ , 表明电源  $U_{s1}$  正常,  $na$  之间线路完好。再测  $U_b$ , 若  $U_b = 0$ , 说明  $a, b$  间开路; 若  $U_b = U_{s1}$ , 则  $a, b$  间线路完好。再检查  $U_c$  等, 直到查出故障。欧姆表法与电压表法是检查故障的两种常用方法, 通常是配合使用。

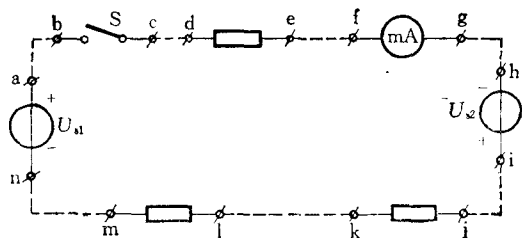


图 1-7

### 五、安全操作的规则

为了防止触电事故的发生, 实验前应熟悉安全用电常识, 实验中必须严格遵守安全用电制度和操作规程。安全操作的规则是: 先接线路后通电; 先断电源后拆线; 设备外壳要接地。

为了方便, 测量电压时, 电压表经常不作固定连线, 此时测试表笔须接在电压表的接线端钮上, 不得接在电源板的接线柱上, 否则会因两支表笔相碰造成短路事故。

电气设备(如电子仪器)在正常运行情况下外壳不带电, 一旦这些设备的绝缘性能降低, 会出现漏电现象, 外壳就会带电。如果人体接触带电的外壳会出现触电, 也称单相触电。因此电气设备金属外壳常与大地直接连起来, 或者在电源中点接地的低压系统中, 把电气设备的金属外壳部分与中线相连, 以确保实验者的安全。前者叫保护接地, 后者叫保护接零。

### 六、实验设计的基本方法

实验设计是指给定某个实验题目和要求, 确定实验方案, 正确选择所需的实验仪器仪表和设备, 自拟实验线路, 进行实验, 并解决实验中遇到的各种问题。实验设计的程序:

#### 1. 实验方案的确定

根据实验课题、任务、要求等选择可行的实验方案, 既要考虑可靠的理论依据, 又要考虑有无实现的可能性。实验方案能否正确拟定, 是实验设计的成败关键。如果偏废正确的测量方案, 一味追求高精度仪表、仪器, 反而得不到预期的实验目的。因此需要综合理论知识和实际经验, 将两者融合在一起, 才有可能作出好的实验方案。

#### 确定实验方案的步骤

(1) 实验原理的研究。包括了解与实验题目有关的理论知识, 选择实验电路、实验方法及实验方式等。

(2) 仪器设备与器件的选择。包括电路参数的计算, 仪器设备和器件的型号、规格、数量的选择等。

(3) 实验条件的确定。包括电源电压, 信号源频率的选择, 测试范围的确定等。

#### 2. 实验过程中出现问题的处理

(1) 得不到预期的实验结果。先检查电路、仪器设备、实验方法、实验条件等, 再检查实验方案, 然后修订实验方案。

(2) 实验结果与理论不一致。仔细观察现象,分析数据并找出原因。

(3) 误差偏大。分析产生误差的原因,找出减小误差的方法。

### 3. 实验结果的分析

实验结果分析应紧扣实验题目和要求。它包括实验结果的理论解释;实验误差分析;实验方案的评价与改进意见;解决实验问题的体会等。

实验设计不但能巩固和扩展理论知识,而且能提高实验技能,丰富实践经验。它是实验能力和独立工作能力的综合锻炼。

## § 1-3 测量方法和误差分析

### 一、测量方法

所谓测量,是通过实验的方法,把被测量与同类单位量进行比较的过程。

#### 1. 测量方法的分类

(1) 根据获得测量结果的方式不同,测量方法分为三类。

① 直接测量。用测量仪器仪表直接得到被测量的数值。例如用电流表测电流,用电桥测电阻等。

② 间接测量。先测出与被测量有关的几个中间量,然后通过计算求得被测量。如用伏安法测量电阻。

③ 组合测量。在直接测量和间接测量所得到的实验数据基础上,通过联立求解各函数关系方程得到被测量。例如电阻温度系数  $\alpha$  和  $\beta$  的测量。电阻值 ( $R_t$ ) 与温度 ( $t$ ) 之间的关系为

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

式中  $t$  为电阻温度的摄氏度数,  $R_{20}$  是温度为  $20^\circ\text{C}$  时的电阻值,  $\alpha$ 、 $\beta$  是待求的电阻温度系数。若分别测量  $20^\circ\text{C}$  和  $t_1$ 、 $t_2$  时的电阻值  $R_{20}$ 、 $R_{t_1}$  和  $R_{t_2}$ , 联立求解下列方程

$$R_{t_1} = R_{20}[1 + \alpha(t_1 - 20) + \beta(t_1 - 20)^2]$$

$$R_{t_2} = R_{20}[1 + \alpha(t_2 - 20) + \beta(t_2 - 20)^2]$$

即可得到电阻的温度系数  $\alpha$  和  $\beta$ 。

(2) 根据获得测量结果的数值方法不同,测量可分为两类:

① 直读法。根据测量仪表的指示值直接读出被测量的数值。如用电压表测电压,用欧姆表测电阻等。这种方法简便、快速,但仪表的准确度限制了测量的准确度。

② 比较法。将被测量与已知标准量在比较仪器中进行比较,从而获得被测量数值。它又分为零值法(如用电桥测电阻),差值法(如用电位差计测电池电动势)及代替法(如在保持各测量仪器状态不变的情况下,用标准电阻代替磁电系表头,而获得该表头的内阻)。比较法测量准确度高,适用于精密测量,但所用仪器设备比较复杂,操作麻烦。

#### 2. 测量方法的选择

在实验中测量方法的选择通常考虑以下几个要求:

(1) 足够的灵敏度;

(2) 适当的准确度;

(3) 对被测电路状态的影响要尽量小;

- (4) 测量简便可靠;
- (5) 测量前的准备工作和测量后的数据处理尽可能简便;
- (6) 对被测量性质作深入了解。如参数是否线性、数量级如何、对波形和频率有无要求、对测量过程的稳定性有无要求等。

根据上述要求,合理选择测量方法及有关的仪器仪表和设备。

## 二、误差的简单分析

测量时,无论采用什么测量方法、何种测量方式,都不可避免地会受到测量工具、方法、环境等因素的影响,产生测量误差。所谓测量误差,是指测量结果与被测量的真值(或实际值)之间的差异。

### 1. 误差的分类

- (1) 按误差来源分: 工具误差、使用误差、人身误差、环境误差及方法误差。
- (2) 按误差性质分: 系统误差、随机误差、疏失误差。
- (3) 按表示方法分: 绝对误差、相对误差、引用误差。

### 2. 误差的表示方法

#### (1) 绝对误差

被测量的给出值  $A_x$  与被测量的真值  $A_0$  (或实际值) 之间的差值称为绝对误差。用  $\Delta$  表示为:

$$\Delta = A_x - A_0 \quad (1-1)$$

式中给出值  $A_x$  指:

- ① 在测量时,它为被测量的读测值;
- ② 在检定仪表时,它为被检刻度线指示值;
- ③ 在检定度量器(如标准电阻)时,它为被检度量器的标称值,即铭牌上标明值;
- ④ 在近似计算中,它为所取的近似值。

式中真值  $A_0$  是指在规定的条件下,被测量所具有的真实值大小。实际测量中,通常用更高一级的标准仪表所测得值来代替。

#### (2) 相对误差

绝对误差  $\Delta$  与被测量的真值  $A_0$  比值的百分数称为相对误差。用  $\gamma$  表示为

$$\gamma = \frac{\Delta}{A_0} \times 100\% \quad (1-2)$$

式中被测量的真值  $A_0$  较难求,但被测量的给出值  $A_x$  与真值  $A_0$  相差不大,常用  $A_x$  代替  $A_0$ , 相对误差可近似表示为

$$\gamma = \frac{\Delta}{A_x} \times 100\% \quad (1-3)$$

式(1-3)说明,仪表指示值越大,其测量相对误差越小。

**例 1-1** A 表在测量实际值为 100V 的电压时,示值为 99V, B 表在测量实际值为 1000V 的电压时,示值为 1002V, 求两表的测量误差。

**解** 设 A、B 两表的测量绝对误差分别为  $\Delta_A$ 、 $\Delta_B$ , 相对误差分别为  $\gamma_A$ 、 $\gamma_B$ , 则

$$\Delta_A = (99 - 100)V = -1V$$

$$\Delta_B = (1002 - 1000)V = 2V$$

$$\gamma_A = \frac{-1}{100} \times 100\% = -1\%$$

$$\gamma_B = \frac{2}{1000} \times 100\% = 0.2\%$$

相对误差表明误差对测量结果的相对影响,反映了实际情况。

### (3) 引用误差

绝对误差  $\Delta$  与仪表的上量限  $A_m$  比值的百分数称为引用误差  $\gamma_n$ , 表示为

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

由于仪表标尺各处的绝对误差不同,因此标尺各处的引用误差也不同,若用全标尺上绝对误差最大值  $\Delta_m$  与仪表上量限  $A_m$  比值的百分数表示最大引用误差,则

$$\gamma_{n,m} = \frac{\Delta_m}{A_m} \times 100\% \quad (1-5)$$

最大引用误差是仪表在正常工作条件下不应超过的最大相对误差。仪表在规定工作条件下,在标尺工作部分的所有刻度上,允许的最大引用误差称为仪表的准确度,用符号  $K$  表示为

$$\pm K\% = \frac{|\Delta_m|}{A_m} \times 100\% \quad (1-6)$$

在我国根据 GB776-76 《电测指示仪表通用技术条件》规定,仪表准确度分为 0.1、0.2、0.5、1.0、1.5、2.5 和 5.0 七级。

### 3. 工程测量中最大误差的估算

由于测量过程中,测量误差总是不可避免的。因此,在测量工作结束之后不仅要确定被测量的数值,而且还要确定测量结果中所包含的误差大小,以评估测量结果的可信程度。

在工程测量中,随机误差与系统误差相比往往很小,除精密测量之外,可以略去不计。对常规实验数据进行处理,通常只考虑系统误差的影响。

#### (1) 直接测量中误差的估算

系统误差主要来源是工具误差和方法误差。工具误差又分为基本误差和附加误差。

##### ① 基本误差的估算

仪表在正常条件(规定温度、压力、放置方式等)下使用,由于结构和工艺等原因产生的误差称为基本误差。它是仪表本身固有的。若用直读仪表测量时,已知仪表准确度等级为  $K$ , 最大量限为  $A_m$ , 可能出现的最大绝对误差为

$$\Delta_m = \pm \frac{K\% \cdot A_m}{100\%} = \pm K\% \cdot A_m \quad (1-7)$$

仪表读数为  $A_x$  时,测量可能出现的最大相对误差为

$$\gamma = \pm \frac{K\% \cdot A_m}{A_x} \times 100\% \quad (1-8)$$

**例 1-2** 一只量限为  $U_m = 300V$ , 准确度  $K$  为 0.5 级的电压表, 求其指示值分别为  $U_{n1} =$



220V 和  $U_{x2} = 300V$  时测量基本误差  $\gamma_1$  和  $\gamma_{20}$

解

$$\gamma_1 = \pm \frac{K\% \cdot U_m}{U_{x1}} \times 100\% = \pm \frac{0.5\% \times 300}{220} \times 100\% = \pm 0.68\%$$

$$\gamma_{20} = \pm \frac{K\% \cdot U_m}{U_{x2}} \times 100\% = \pm \frac{0.5\% \times 300}{300} \times 100\% = \pm 0.5\%$$

可见,仪表的准确度直接影响测量结果的准确度。但仪表的准确度不一定是测量结果的准确度,后者与被测量的大小有关。被测量愈小,测量相对误差愈大,只有当被测量数值等于最大量限时,测量相对误差才等于  $\pm K\%$ 。因此选用仪表除了考虑准确度外,还要合理选用量程,只有这样才能获得较高的测量准确度。

### ② 附加误差的估算

仪表偏离正常使用条件,如温度、湿度、波形、频率、放置方式及周围杂散电磁场等超出仪表的允许范围(这些均属于外界因素的影响),仪表产生的误差为附加误差。当这些外界因素在规定的最大允许范围变化时,仪表附加误差的表示方法与基本误差相同。

例如,在指示仪表中,正常情况下,规定温度为  $(20 \pm 2)^\circ\text{C}$ ,在例 1-2 中如果测量温度为  $30^\circ\text{C}$ ,超出规定温度变化范围,但小于  $10^\circ\text{C}$ ,则它引起的附加误差用引用误差表示,为仪表等级的百分数,也就是  $\pm 0.5\%$ 。因此在这种情况下测量的最大相对误差应该为基本误差和附加误差的总和,即为所估算的基本误差的两倍。仪表两次示值时测量总误差分别为  $\pm(0.68 + 0.68)\% = \pm 1.4\%$ ;  $\pm(0.5 + 0.5)\% = \pm 1\%$ 。

各类仪表的附加误差计算方法均有各自的规定,需计算时,参照有关规定。

### ③ 方法误差的估算

方法误差主要是测量方法及依据的理论不严密而造成的。需要考虑时应视具体情况分析计算。例如,在图 1-1 中,电压表未接入之前  $U_R = 90V$ ,当接入  $R_V = 20k\Omega$  的电压表后  $U_R = 60V$ ,此时由于测量方法引起的误差为

$$\gamma = \frac{60 - 90}{90} \times 100\% = -33\%$$

## (2) 间接测量中最大误差的估算

间接测量中,除考虑直接测量中的工具误差和方法误差之外,还要考虑计算时可能造成的最大误差。

### ① 被测量为两个直接测量量之和

设  $y = x_1 + x_2$ ,  $x_1$ 、 $x_2$  为二个直接测量量,如用  $\Delta_y$  表示被测量的绝对误差,  $\Delta_{x1}$ 、 $\Delta_{x2}$  分别为直接测量  $x_1$ 、 $x_2$  的绝对误差,则

$$y + \Delta_y = (x_1 + \Delta_{x1}) + (x_2 + \Delta_{x2}) \quad (1-9)$$

$$\Delta_y = \Delta_{x1} + \Delta_{x2} \quad (1-10)$$

将式 (1-10) 两边同除以  $y$ , 得

$$\frac{\Delta_y}{y} = \frac{\Delta_{x1}}{y} + \frac{\Delta_{x2}}{y} \quad (1-11)$$

被测量的最大相对误差应出现在各个直接测量量的误差都为同一符号的情况,即