



# 电路实验技术基础

钱克猷 江维澄 编著



浙江大学出版社

# 电路实验技术基础

钱克猷 江维澄 编著

浙江大学出版社

## 内容简介

本书是在我校多年电路实验改革的基础上编写的。内容涉及基本电工测量仪器仪表、基本电工测量方法及基本实验设计技术等方面,侧重对实验误差的分析。其中第五篇的练习实验是本书的一个重要内容,许多实验理论、知识的学习、掌握和巩固是通过这些实验来达到的。

本书可作为大专院校电类专业的教材,也可供有关工程技术人员参考。

## 电路实验技术基础

钱克猷 江维澄 编著

责任编辑 杜希武

\* \* \*

浙江大学出版社出版

(杭州浙大路 38 号 邮政编码 310027)

(E-mail: zupress@mail.hz.zj.cn)

(网址: <http://www.zjupress.com>)

浙江大学出版社电脑排版中心排版

浙江良渚印刷厂印刷

浙江省新华书店发行

\* \* \*

787mm×1092mm 16 开 18.75 印张 477 千字

2000 年 6 月第 2 版 2001 年 6 月第 4 次印刷

印数: 7001—9000

ISBN 7-308-01916-0/TM·024 定价: 19.00 元

# 前 言

电路实验课的前身是电工基础实验,依附于电工基础课程,包括路和场两部分内容,主要是验证原理和掌握实验操作技术。从教学计划的角度来看,这样安排不甚合理。因为在本实验课之前,学生尚未受过基础实验训练,不具备确定实验结果可靠程度的必要技能,所以学生在实验中验证原理的正确性,实际上是不可能的。而操作技术,从学科的角度来看,要求由一门不以研究实验技术为目的的课程来担任,也是不合理的。70年代后,电工基础分为电路和电磁场两门课,实验也独立成为一门电路实验课程。电路实验的教学虽未脱离以往的内容,却给电路实验课的改革提供了方便。鉴于上述理由,我们从1989年开始对电路实验课进行改革,将该课程改变为电类实验基础课,着重于实验技能培养,培养学生实际工作能力和创造精神。本书是1989年以来经过六届实验教学改革实践的基础上编写的。

要打好电类实验基础,学生至少要掌握基本电工测量仪器仪表、基本电工测量方法的知识及基本实验设计技术和总结报告能力。本书第一、二两篇叙述基本电工测量仪器仪表和测量方法。在选材上以满足练习实验的需要为度并适当照顾内容的系统性。叙述上力求简单,以了解原理和特性为限度。为了满足教学进度及课程结构,某些提高仪表准确度及减少误差的措施,移至误差和数据处理中作为例子。这两篇中凡是练习实验要用到的有关内容,学生必须阅读并掌握。第三篇叙述实验中的误差,这是实验的核心工作。为了保证实验数据可靠性,实验一开始就要进行误差分析,并贯彻于实验整个过程。初学者在分析实验误差时,特别是对系统误差感到困难,本篇除介绍基本误差的分类方法和误差的消除方法外,还用较多篇幅介绍实践中的一些具体的系统误差,使读者从中得到启发和一些量的概念。由于本书主要对象是本科二年级学生,所以尽量将例子局限于本书和电路原理课程的水平。有些例子实际上就是练习实验中系统误差的理想化。个别例子(如电磁屏蔽)考虑到学生对其认识往往较为模糊,将来工作常会遇到,虽然从知识水平来讲可能超前了些,但今后不再有其他课程对其作系统叙述,故仍将其收入本书。对于这些内容学生可暂时接受其结论,了解其物理意义及量的概念。第四篇叙述实验设计中要注意的一些原则。原则上讲应放在最后阅读,但从学做实验的角度来看,提前粗读一遍是有好处的。本篇假定学生已掌握概率论和数理统计的知识。第五篇是实验任务书。各实验只给任务及可提供的设备,其余工作全由学生自行计划设计。到实验室做实验时,学生必须带有事先准备完整的实验计划书,对计划书的要求是只按计划书就能顺利完成实验任务。本书所有的练习实验均是综合性的。为了不使每个实验占用时间太多,实验系统都选得较小,以便学生能彻底搞清各个环节。实验是按先易后难的顺序安排,不能采用循环形式进行。各实验之间的内在联系比较密切,学生在一开始就要认真对待。任务书中列出了可供参考的章节目录,它对完成当前实验及掌握基本实验技术是很重要的。思考题与提示是为了帮助同学完成实验任务达到教学目的而设置的。思考题和提示应在实验设计阶段弄明白,但不要求专门逐题作书面回答,而应在计划书中直接或间接地体现这些内容。附录是练习实验要用到的仪器仪表的主要技术指标、性能以及某些标准规程。其目的是减少学生查阅资料的时间。

本书在钱克猷、江传桂、江维澄共同研讨的基础上,第一、二篇初稿由江维澄执笔,第三、四、五篇初稿由钱克猷执笔,并经共同审阅讨论修改。自 1989 年以来先后有 20 余位教师参加本课程的教学、教材讨论以及实验室工作,他们为编写本书提供了许多资料和意见,特别是童梅老师和刘芳老师,为讲义校对和插图做了大量工作。研究生费章君和田宝峡也为插图作了不少工作。在整个课程改革中得到我系领导的指导和支持,在此一并致以衷心感谢。

由于将电路实验作为电类实验基础进行教学是一种新的尝试,以及编者水平所限,书中难免有不周之处,诚恳希望读者批评指正。

编著者

1996 年 9 月 1 日

# 目 录

|                        |   |
|------------------------|---|
| 实验综述.....              | 1 |
| 0.1 实验的计划阶段 .....      | 1 |
| 0.2 实验的准备阶段 .....      | 2 |
| 0.3 实验的观察与测试阶段 .....   | 4 |
| 0.4 实验的分析整理和结果报告 ..... | 6 |

## 第一篇 电路实验中常用的仪器

|                        |    |
|------------------------|----|
| 第一章 电阻器、电感器和电容器 .....  | 9  |
| 1.1 电阻器 .....          | 9  |
| 1.2 电感器.....           | 13 |
| 1.3 电容器.....           | 17 |
| 1.4 导线.....            | 21 |
| 第二章 机电式仪表 .....        | 23 |
| 2.1 机电式仪表的运动方程.....    | 23 |
| 2.2 机电式仪表活动部分的结构.....  | 25 |
| 2.3 机电式仪表的一般特性及要求..... | 25 |
| 2.4 磁电系仪表.....         | 31 |
| 2.5 万用表.....           | 32 |
| 2.6 电磁系仪表.....         | 35 |
| 2.7 电动系仪表.....         | 36 |
| 2.8 感应系仪表.....         | 40 |
| 2.9 静电系仪表.....         | 43 |
| 第三章 比较式仪器 .....        | 45 |
| 3.1 直流电桥.....          | 45 |
| 3.2 直流电位差计.....        | 48 |
| 3.3 阻抗比平衡电桥.....       | 50 |
| 3.4 变压器电桥.....         | 56 |
| 3.5 电流比较仪.....         | 59 |

## 第二篇 电气测量的基本方法

|                       |    |
|-----------------------|----|
| 第四章 电路基本电量的测量 .....   | 62 |
| 4.1 中等量值电流和电压的测量..... | 62 |

|            |                               |           |
|------------|-------------------------------|-----------|
| 4.2        | 大电流的测量                        | 65        |
| 4.3        | 高电压的测量                        | 66        |
| 4.4        | 小电流和低电压的测量                    | 68        |
| 4.5        | 功率的测量                         | 68        |
| 4.6        | 三相有功功率的测量                     | 69        |
| 4.7        | 三相无功功率的测量                     | 71        |
| 4.8        | 非正弦电压、电流的测量                   | 74        |
| <b>第五章</b> | <b>电路基本电参数的测量</b>             | <b>76</b> |
| 5.1        | 直流电阻的一般测量                     | 76        |
| 5.2        | 直流电阻的精确测量                     | 80        |
| 5.3        | 绝缘材料电阻率的测量                    | 81        |
| 5.4        | 用交流电压表、电流表和功率表测量电路元件的等效阻抗(导纳) | 82        |
| 5.5        | 交流电桥的应用                       | 84        |
| 5.6        | 电容器参数的测量                      | 86        |
| 5.7        | 电感的测量                         | 89        |

### 第三篇 实验中的误差及数据处理

|            |                      |            |
|------------|----------------------|------------|
| <b>第六章</b> | <b>随机误差(偶然误差)</b>    | <b>94</b>  |
| 6.1        | 加权平均值                | 94         |
| 6.2        | 单位权的均方根误差            | 96         |
| 6.3        | 加权平均值的均方根误差(标准误差)    | 97         |
| 6.4        | 含系统误差时随机误差的均方根误差的计算  | 111        |
| 6.5        | 是否采用加权平均的判断          | 114        |
| <b>第七章</b> | <b>系统误差</b>          | <b>115</b> |
| 7.1        | 系统误差的分类及其发现和消除的一般原则  | 116        |
| 7.2        | 与温度有关的系统误差           | 123        |
| 7.3        | 电磁因素引起的系统误差          | 131        |
| 7.4        | 实验系统中杂散参数引起的系统误差     | 134        |
| 7.5        | 电压、电流测量电路中干扰的基本形式    | 137        |
| 7.6        | 消除、削弱干扰的方法           | 140        |
| 7.7        | 时间因素引起的系统误差          | 152        |
| 7.8        | 方法误差                 | 154        |
| 7.9        | 其他因素引起的系统误差          | 160        |
| <b>第八章</b> | <b>粗大误差</b>          | <b>164</b> |
| 8.1        | 粗大误差及其来源             | 164        |
| 8.2        | 粗大误差的剔除              | 164        |
| <b>第九章</b> | <b>误差的综合及实验结果的评定</b> | <b>169</b> |
| 9.1        | 已定的系统误差的合成           | 170        |

|                       |     |
|-----------------------|-----|
| 9.2 不确定的系统误差的合成 ..... | 171 |
| 9.3 随机误差的合成 .....     | 177 |
| 9.4 不同性质误差的合成 .....   | 180 |

## 第四篇 实验设计

|                       |     |
|-----------------------|-----|
| <b>第十章 实验设计</b> ..... | 182 |
| 10.1 实验方案的制定 .....    | 182 |
| 10.2 设备及辅助设备的选择 ..... | 193 |
| 10.3 数据的选择 .....      | 197 |
| 10.4 误差的分配 .....      | 207 |
| 10.5 微小误差 .....       | 210 |
| 10.6 合理的结构 .....      | 211 |
| 10.7 实验操作步骤设计 .....   | 211 |

## 第五篇 实验任务书

|                                                             |     |
|-------------------------------------------------------------|-----|
| 实验一 直流电流测定 .....                                            | 213 |
| 实验二 直流电表的检定 .....                                           | 215 |
| 实验三 电流电压测量 .....                                            | 217 |
| 实验四 电流电压的测量及电表内阻对电路影响的修正 .....                              | 218 |
| 实验五 实验曲线和经验公式 .....                                         | 219 |
| 实验六 对称三相电路电压、电流及功率的测量 .....                                 | 220 |
| 实验七 不对称三相电路电压、电流及功率的测量 .....                                | 221 |
| 实验八 电路的频率特性及各元件等效参数的确定 .....                                | 222 |
| 实验九 电路变量与参数的选择和误差分析在提高实验准确度中的应用(一)——互感的测定(一) .....          | 224 |
| 实验十 电路变量与参数的选择和误差分析在提高实验准确度中的应用(二)——互感的测定(二) .....          | 227 |
| 实验十一 电路变量与参数的选择和误差分析在提高实验准确度中的应用(三)——交流无源一端口网络等效参数的测定 ..... | 229 |
| 实验十二 功率测量及实验中的误差分析 .....                                    | 232 |
| 实验十三 交流电桥的参数选择与平衡调节——交流电桥(一) .....                          | 234 |
| 实验十四 交流电桥的参数选择与平衡调节——交流电桥(二) .....                          | 236 |
| 实验十五 电路变量与参数的选择和误差分析在提高实验准确度中的应用(四)——电感、电阻、互感的测定 .....      | 238 |
| 实验十六 元件和屏蔽间的分布电容的测定——屏蔽、接地、测量端及电源端的使用 .....                 | 239 |
| 实验十七 用最小二乘法求电路的参数 .....                                     | 241 |

|                                           |     |
|-------------------------------------------|-----|
| 实验十八 计算机在实验中的应用(一)——电感器、电容器的等效参数的测定 ..... | 243 |
| 实验十九 计算机在实验中的应用(二)——电路时间常数的测定 .....       | 244 |

## 附 录

|                                      |     |
|--------------------------------------|-----|
| 附录一 用曲线处理实验结果 .....                  | 245 |
| 附录二 直流电表的检定 .....                    | 255 |
| 附录三 实验报告(例子) .....                   | 258 |
| 附录四 实验室常用仪器的使用说明 .....               | 265 |
| 一、C31 型直流电表                          |     |
| 二、J2362 型电阻箱                         |     |
| 三、500 型万用表                           |     |
| 四、直流稳压稳流电源                           |     |
| 五、T19-mA 交直流两用电流表                    |     |
| 六、L <sub>2</sub> -V 型平均值电压表          |     |
| 七、自耦变压器                              |     |
| 八、XD17A/C 型宽频带函数发生器                  |     |
| 九、GB-9B 型电子管毫伏表                      |     |
| 十、GX3-4 十进式电感箱                       |     |
| 十一、RX7 十进式电容箱(RX7/1)                 |     |
| 十二、D9W-1 型瓦特表                        |     |
| 十三、XD7 低频信号发生器                       |     |
| 十四、DA-16B 晶体管毫伏表                     |     |
| 十五、ZX38A/11(ZX38A/1)交直流电阻箱           |     |
| 十六、电子测量仪器的误差表示                       |     |
| 附录五 几种随机变量的分布表 .....                 | 279 |
| 附表一 标准正态分布表 .....                    | 279 |
| 附表二 $t$ 分布的 $t_{\epsilon}$ 数值表 ..... | 281 |
| 附表三 $\chi^2$ 分布表 .....               | 282 |
| 附录六 实验任务的说明 .....                    | 284 |
| 参考文献 .....                           | 290 |

# 实验综述

实验是为了认识世界或事物,为了检验某种科学理论或假定而进行的操作或活动。实验的一个最基本的结果是提供表示现象或物体可定性或定量测定的属性——“量”。量是以数值与单位来表示的。实验结果是认识世界或事物、检验理论或假定的依据。因此对实验的要求首先是结果应该是正确的。实验结果的正确与否直接影响人们对客观事物的认识,但由于种种原因,实验不能百分之百地反映客观事物的原来面貌。为了确定人们对事物的认识的可靠程度,首先要确定实验结果的可靠程度,也就是说实验结果除了要给出量的量值、单位外还必须给出量值的可靠程度。实验结果的可靠程度以及可靠程度的确定,是决定于实验装置与实验者的实验技术,因此我们要学习用实验手段正确地获取实验结果的技能。

正确地获得各待求量仅仅是我们认识客观事物的初级阶段,我们还必须对这些资料作进一步的加工和处理,进行科学的归纳、抽象,找出客观事物的内在联系及规律,这也是我们学习的另一方面内容。

一个完整的实验过程包括实验计划、实验准备、测试与观察、结果整理四个阶段,各个阶段完成的好坏均会影响实验的质量。

## 0.1 实验的计划阶段

电气工程实验内容十分丰富,但抽象来说无非是测定各电路变量、电路参数和一些非电量的测定,并根据这些测量结果进行归纳分析得出规律、结论。测量任务大致可分三类:第一类是确定被测量的量值及其准确度。第二类是在一定的准确度要求下确定被测量的量值,第三类是寻找最佳测量方案,使在一定的设备条件下获得最佳效果。

一般除简单的熟悉的实验只须在脑中作一简单的规划外,通常为完成一定的实验任务,首先应根据任务要求和设备条件选定可行的实验方案。并按所选方案拟定实验计划。这阶段的工作和实验的进度、费用、成败都有直接的关系,实验所需采取的实验方案均应在这一阶段完成。实验计划一般要成文,以便征求有关人员意见并送上级审批。同时成文的过程也就是思维积极活动和严密思考的过程。它能使计划更加周密完善,以期用最少的投资取得最佳的效果。而且有了文字记载能避免准备阶段及测试与观察阶段发生遗漏现象。在以往的教学某些同学由于实验时漏测个别数据事后进行补测,但补测时原实验条件又已发生了变化,而使补测的数据与原数据不能同时有效,因而导致重做整个实验。在非练习性的实验工作中某些数据的漏测,就不是简单地重做实验的问题,而往往要重新化费许多人力、物力和时间了。

实验计划可包括以下内容:

(1)实验标题 实验报告(计划)是一个技术文件,和其他的文章、文件一样要有一个标

题标明其目的和任务,实验工作中,某些实验要进行多次,对于这些大同小异的实验要在标题上加以区分,以便以后查阅。

(2)实验任务 在该栏内除说明任务外还要分析做该实验的必要性。对于本课程的一些实验,在这项目内仅需简单地说明一下。

(3)实验原理 除了一些简单的或常规的定型的测试外,一般均要对实验的原理加以说明,特别是应用了非常规的原理更要阐述清楚。否则事过境迁可能连设计者本人也弄不清当初的想法。在原理的叙述中要简明扼要避免繁琐。

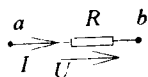


图 0-1

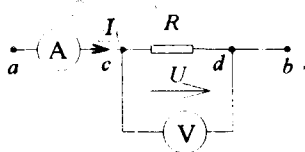


图 0-2

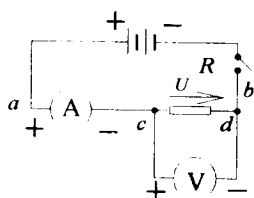


图 0-3

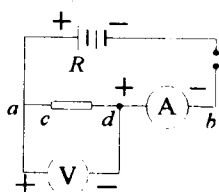


图 0-4

(4)实验系统 电工实验的整个系统往往是由一些通用的仪器、仪表和某些实验对象构成,这时只要画出整个系统的接线图就可以。必须注意实验的接线图与电路理论中的电路图是不同的。在电路理论中图 0-1 表示支路  $ab$  是一个电阻支路,其通过电流为  $I$ ,两端电压为  $U$ 。在实验中测定电阻器所通过的电流及其两端的电压时,实验装置的部分线路图,应如图 0-2 所示。这里  $R$  是一个电阻器或电阻器的参数。 $I$ 、 $U$  分别表示电流表  $A$  的电流及电压表  $V$  两端的电压。图 0-2 还不是一个完整的实验装置线路图,一个完整装置,起码还应包括实验用的电源,控制电路用的开关。图 0-3 才是一种可以进行实验的接线图。要注意,在实验时若将电流表接在电源的负极侧,而成为图 0-4 的实验接线图,则实验结果可能与图 0-3 有所差别\*。因此图 0-3 和图 0-4 是不一样的。为了获得合理的测试数据,在设计实验接线图时,对元件的合理布局、连接应加以考虑。实验时要严格按设计的接线图接线,必要时还要画出实验安装图。

(5)部件说明 如果实验装置中有一些为本实验专门设计的设备或装置时,对此要加以详细的叙述,并附必要的图纸。其他现成的设备只需写出设备型号规格即可。

(6)设备清单 根据实验的需要列出设备的名称、规格、型号、编号(实验时记录)、在接线图中的代号,作为准备或采购(借用)仪器设备的依据。

(7)实验条件 实验的结果和其进行时周围的环境有密切的关系。因此,实验往往是在

\* 注意各部件对地泄漏电阻及各端钮对地电位的影响。

一定的控制条件下进行的,在实验计划中应同时考虑实验条件。有些实验结果与实验条件有密切关系,则实验条件作为实验数据中的参变量出现,这就要求人为地加以控制。有些条件对实验结果影响不太大,或虽有较大的影响但不易控制而实验本身又并不要求其具有某一特定的值,对于这种条件则可据当时的具体情况记录下来即可。

通常的条件有气温、湿度、气压、日期、地点、屏蔽……。测试条件往往容易被初学者所忽视。在实际工作中,有时为实验准备必要的条件往往比实验本身所花费的财力物力大得多,甚至因实验条件不具备使实验不能进行。因此,在计划阶段就要认真对待,使实验能在较宽的测试条件下取得一致的结果。

(8)实验步骤、观察内容、待测数据、表格、注意事项 实验中要取那些数据,电路参数变量取多少,用何测量仪表,量程取多少,取多少数据,数据如何分布以及实验是否要重复进行,重复的次数均应在计划阶段的实验设计中加以考虑并基本上加以确定。这是因为在这阶段设计者的思路最完整,考虑最全面;随着计划工作的深入具体化,可能发现有些数据要采取原先计划所未考虑的取法,因而要部分地或全部地改变方案措施,由于此刻尚处在设计阶段,计划尚未全面实施,这种改变比以后阶段发现再来改变,损失要少得多;此外如果将这步工作放在测试时再来考虑,还可能会因时间匆促考虑不周出现漏测、漏记甚至导致失败或因需考虑计算而延长了实验时间增大了实验中的系统误差,或因在测试阶段边测边考虑分散了精力影响实验中的观察力。

特别要说明,实验的步骤对实验的结果有重大的影响,应该给予充分的注意和安排,并加以详细的记录。例如数据读取的顺序,操作顺序以及它们进行的速度等均会影响实验的结果。如根据按测值顺序排列的剩余误差的分布曲线就可以发现是否有变值系统误差存在。实验步骤还应该考虑到保证实验安全所必需的措施,实验步骤考虑不周或步骤顺序错误还可能会导致事故或失败,如使用输出可调的电压(电流)源时,未将电压(电流)调节旋钮放至合适的位置,在合电源时就有可能因电压(电流)不合适导致电表或设备损坏。在某些电路中有多个开关,它们的开断、闭合顺序可能有严格的规定。否则会造成事故,如断开电感支路可能会导致过电压损坏设备等等。

(9)参加人员 实验要多少人,什么人参加,每人的职责,都要事先考虑,不能临时拉夫。

(10)可能出现的故障及其后果以及应该采取的预防措施

实验计划是一项仔细并一定要做的工作,应给予充分的重视。经验证明,仔细的计划不仅可以提高工作效率,避免许多不必要的麻烦,还会由于作过周密计划使实验者的观察力变得敏锐,应变能力加强。另一方面还要看到即使在实验的计划阶段进行了周密的考虑,在实施的过程中还可能会出现一些未料的情况,此时要根据具体情况,对实验计划加以补充修改。这种情况的出现也是实际工作中的正常现象,不能因此而放松实验的计划工作。实验计划制定得是否周密,在很大程度上能反映计划制定者的实验水平。

## 0.2 实验的准备阶段

本阶段要具体完成实验实施方案中的各项任务。它包括配置设备、检查设备、安装系统和调试系统等内容。首先要检查设备规格、数量是否齐全,设备是否完好,手柄、旋钮的实际

位置与其指示是否一致,并熟悉设备的使用方法,某些设备还需做自校正等等。接着按实验线路图进行安装接线,整个实验系统的各仪器仪表放置和布线均要合理、清晰并便于操作。接线完毕应清理不必要的导线和设备,并将仪器设备调整到备用状态,如电表、自耦变压器的零位,电位器触头、开关、电源的正确初始位置。然后进行预工作,使实验系统接近所需的实验状态,或使某些设备预置于设计所要求的状态。

值得一提的是仪器、仪表、实验对象的历史状态往往是不能忽视的。例如磁性材料事前有否磁化过,对以后的磁化过程是有影响的;金属材料的冷作、热处理会对其导电、磁化性能发生影响;仪表仪器是否工作过(可能温度较高)或长期未用(可能某些接触部分氧化了);有否经运输搬动\*,使用前存放地点的环境状态如何等等,都将影响实验的结果。

一般在正式测试前要进行预测试。预测试工作是一个初学者容易疏忽的步骤,但它却可能成为实验成败的关键,其内容也应在实验计划中预先考虑,预测试有以下一些目的:

其一是检验各部分工作是否正常,电工实验装置中常存在接线松动、虚焊、导线的隐蔽断点、接线错误、碰线等隐患,在测试之前通过预测试可以发现并排除隐患,使在正式测试时能顺利观察现象读取数据。因此这时的首要任务是检查实验系统是否正常工作。

其二是熟悉操作过程,如果实验是由多人合作进行则可协调操作。

其三是预测试可以使实验者对实验的全貌有一个数量的概念。对其特点有一初步的认识,并可检验实验计划是否正确合理完整,以便最后确定正确的步骤及合理地选取数据。

预测试完毕要注意使整个系统复原,使在正式测试前所有仪器设备重新处于正确的初始状态。一般实验均要进行预测试,但对那些经预测后不能复原或复原较麻烦的则不进行,如破坏性实验,化学反应,温升试验(不能马上复原)等。

### 0.3 实验的观察与测试阶段

预测试结束,实验系统复原后,即可按实验计划进行实验操作、观察现象、完成测试任务。这阶段要做的工作根据具体实验任务不同而异,本节只介绍这阶段的一些共同问题。

进入实验现场首先要记录仪器及设备编号(以便以后检查)及现场的环境条件。如:日期、地点、气温、气压、湿度等等。其中日期是一个重要的数据,日期除可区分不同时间进行的同一实验结果外,还隐含着许多信息,如星期天的供电情况就可能与平常有区别。

进行实验的实验人员要采取恰当的姿势,使能最大限度地观察实验系统,便于操作、读数,不良的实验姿势,会增加工作强度,容易使人疲劳,导致精力分散降低观察力。

实验的安全是实验者必须注意的事项。安全包括人身与设备两方面。周密的计划,正确的操作,对设备和实验的深刻理解,以及实验人员的严肃认真的实验作风,均会提高实验的安全性。此外,实验时最好地上有绝缘垫,有些设备要有良好的接地,实验系统可能也要有良好的接地网,一般不带电改接线路,不轻率超越使用条件使用仪器设备,在与他人合作进行实验时要互通信息,特别是接通与切断电源时要打招呼,尽可能用单手进行操作,这些都是实验得以安全进行的重要措施。

---

\* 搬动仪器时常使一些电气或机械连接处发生松动;个别仪器搬动后性能还可能发生改变,如有些标准电池等。

实验数据记录要确切,现场就要用有效数字记录,而不是事后整理数据时再添加有效的零或去掉无效的数字,因为事后可能记忆模糊,使数据的有效数字搞错或使判断发生困难。数据的有效数字错误常发生在单位转换时添上不应该添的“零”或去掉有用的“零”;也可能发生在标尺的示值与表征的量之间有某一换算系数时使结果产生错误,记录数据时不要忘了单位,没有单位的数据是无意义的,事后补添单位也可能会困难。当一个量进行两次测量其值不一致时常会丢弃第一次的值保留第二次值,这是不恰当的,因为两次测量是平等的,第二次值异于第一次值可能是由于随机误差所致或别的原因,不一定是读错所致。

改变仪表量程其指示值的误差也会改变,对被测系统的影响也随量程改变而改变。因此要随时记下该数据所对应的量程。

实验的数据一般不强求取便于计算或画图的数值,有时为了使读数为整数,往往要增加调节时间延长实验进程,因而增大了实验的系统误差。实际上作图和数据计算的时间在整个实验过程中所占的比例是不大的,因而数据不是整数而增加的运算时间是很有限的。

实验者的观察力与在实验中获得信息多少有很大的关系。观察力是实验者的知识、经验、对事物总体的了解程度、感觉器官的灵敏度以及注意力的一种综合反映。观察力经过训练是可以提高的。经验告诉我们,多数不正常的实验系统,在开始实验的一瞬间,就可以在各仪表的示值上或其他部分表现出异常的信息。所以一个有经验的实验者总是在开始实验的一瞬间,把注意力放在检查系统工作是否正常。倘若他对实验的总体是了解的,而又有一定的分析能力,很快地就会对系统工作是否正常作出判断。有经验的实验者总是一面观察或读取数据,同时又照顾到其他仪表或装置所出现的现象。初学者常常对实验中的许多信息反应迟钝,而在实验中经过锻炼之后可以对一些细小的信息作出反应,如可以注意到仪表过载时指针撞击所发出的细微响声。稍有经验的人可以辨别出常用电气设备中材料过热时所发出的气味,而无经验者则要待室内烟雾弥漫时才发觉。实验中许多初看似乎是无关的现象,往往可以向我们提供许多有用的信息。自然这要运用我们所掌握的知识。例如学校、机关或工厂的作息铃声,可以告知这时工厂上班了或下班了,实验室的电源电压因此会降低或升高。如果工厂有某些间歇运行的大设备,就可能会使电源电压出现间歇的波动,可能还会使电流的波形发生畸变。学校熄灯铃响后,夜深人静供电电压可能升至 240V 甚至更高。下课铃响了实验室楼上的同学活动起来,振动传到楼下可能使光标式检流计的光标模糊。远处的雷声可能预示着当时采集的信号受到干扰。听到了通常听不到的远处的火车声音,可能意味着大气气压有剧烈的变化,此刻对高电压的实验数据(如气隙的放电电压)就会有较大的影响。总之,要提高实验中的观察力,就要注意在实验中充分地运用我们的大脑、五官、手脚以及可以感知的器官,要学习他人的经验,也要不断地总结自己在实验中的点滴具体经验,并加以抽象使之成为一般指导原则。

在测试的进行过程中,应尽可能及时地对数据作初步的分析,以便及时地发现问题,当即采取可能的必要措施提高实验质量。例如实验的数据分散性较大,那就要采取一定措施降低其偶然误差或增加预定的实验重复次数。实验数据中某些不合理的但有规律的变化,可能是某个因素作用的系统误差,应该及时地检查加以消除或降低。如果实验是为求某种相关关系的(如变量与时间、变量与变量、变量与参数等的关系),则在测试时应采用合理的顺序进行测试,使变化趋势清晰,同时还应及时地大略画出这种关系曲线,它能提供某种启示,从而可以当即决定在某些范围内增减观测数据,这点对复杂的实验尤为重要。

实验完毕整理设备和环境是一种良好的实验工作作风。实验做完以后不要忙于拆线整理场所,而要尽可能地在现场对数据、现象进行分析计算。在检查实验的异常情况时,应保持实验的原有状态(设备、位置、参数、环境、人员、方法等)。先检查原状态,然后逐渐逐个地改变可能的因素,以证实判断的正确性,当某因素改变起作用时,还得复原检查是否重新出现异常情况,弄清异常现象的原因,切忌大幅度地改变或将整个系统重新建立,这可能会使原来出现的异常现象在新状态下永不出现成为不解之谜。

实验完毕时要对周围环境条件加以复查,以了解整个实验过程中有多少改变及这些变化是否超出了允许范围,对于一些重要的或在恶劣条件下进行的实验,在实验后还应重新对仪器进行检验,以便判断实验期间仪器的品质有否改变。

## 0.4 实验的分析整理和结果报告

这是实验的最后阶段,它对整个实验的重要性是不言而喻的。同样的数据经较好的处理和分析可以获得更好的结果。美国的旅行者二号探测器经过12年的运行到海王星附近时,探测器中某些装置的性能已经减退甚至失效,从探测器发回的信号质量也差了,但由于计算技术发展,现在从分析这些信号中得到的信息却比当初从信号中所得到的多得多,由此可见实验结果分析处理的重要性。

这阶段工作的依据是实验记录(数据和观察的现象及其他)。首先应对这些数据和现象进行去粗存精、去伪存真的处理工作,确定数据的准确程度和取值的范围(即误差分析)。在这基础上再进行分析、抽象,由表及里找出事物的内在联系和规律。

误差分析一般有二种做法:一种称作综合实验分析,它将研究装置在规定的环境条件下用适当准确度的标准仪表进行一系列测定,根据数据处理结果确定其系统误差与偶然误差;另一种称作单项误差分析法,它对可能引起的误差因素及其单项误差值进行分析并确定其值及各项误差的综合值。

实验现象和数据是前三个阶段工作的宝贵成果。对待数据和所记录的现象常出现如下不珍惜成果的现象:其一是轻易放弃已得到的数据。认为数据太多整理麻烦,或者由于这些数据不合人意而被舍弃。常遇到这样的情形:一人说他在实验中发现了某些异常现象……,当进一步追问其数据记录时,回答往往是我将它丢了(没用处)。其实这是很可惜的。因为这些数据可能为寻找实验中的某隐患提供线索,也可能是一个新发现的宝贵线索。在科学史中这种情况并不罕见,如卢瑟福的二位年青助手在 $\alpha$ 粒子轰击金箔的练习性实验中,意外发现个别的 $\alpha$ 粒子被金箔弹回,卢瑟福抓住这现象进行研究,导致了卢瑟福原子模型的建立,就是其中一个著名的例子。由此可见,一个客观的不是虚假的实验数据是不可轻易丢弃的。其二是一大堆数据不整理不分析,这可能是由于实验结果不合愿望,也可能是不会分析所致。实际上这除对后人可能有用外就当时的研究而言几乎无异于丢弃数据。以上两点都是应该避免的。

在整理数据时,要充分发挥曲线和表格的作用。将数据按一定规律进行整理形成表格曲线。特别是曲线它可以给人明确概念,迅速地发现规律,发现一些异常的数据,有助于分析研究。例如门捷列也夫将元素按原子量进行列表排列,发现了元素的周期律,预言了某些元素

等。

对待数据要避免成见。若对所需的数据有先入为主的想法或带某种主观的意愿。则在观察与测试阶段可能会使读数偏向有利于意愿的方面<sup>\*</sup>，而在整理阶段可能会有意无意地排斥某些数据，甚至会出现伪造数据的现象。若能毫无成见（不等于对实验进程没有判断），一般会比较迅速、比较准确地解析实验的结果。实验的原始数据或分析得到的数据，在一定限度内进行“调整”是可以的。如仪器不准经校正后原数据要作相应的修改；如读数的准确度比所要求的准确度高亦可作些调整（如去掉一些有效数字）。但这种修改要非常小心。无论如何调整，在报告中一定要保留原始数据。

外推法在数学和工程中常有使用，但要注意在工程或实验中使用外推法可能会出严重的差错。如给出一白炽灯的伏安特性曲线如图 0-5 中实线所示，问加电压  $U_c$  时，电流值是多少？若  $U_c$  与  $U_a$  相差不大，一般可用  $a$ 、 $b$  两点的电压电流值外推出  $U_c$  时的电流，如虚线延长至  $c$  点。然而这时可能电灯因过载已烧毁，实际上电流是零。类似地，当我们将坐标中的数据点连成一条曲线时是采用内插值的原理，它也会出现类似的情况。因为不论外推还是内插都是建立在曲线是连续的，或曲线在推广的区域内与其原有部分

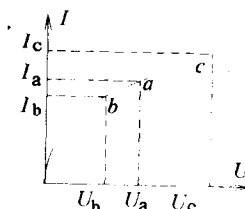


图 0-5

有相同的规律的假设上。实际上由于事物在不同的发展阶段有不同的主要因素在起作用，因而就有可能发生曲线的不连续或在曲线的不同区间表现出不同的特点，因此当将一些离散的点连成曲线时，首先要确定其间是按同样的规律连续变化的才行。一般说来，如果有足够密的观测点或者在预测时连续地改变相应的量看曲线是否连续，就可以较容易地确定曲线应该通过什么部位，所以实验的观察数据总应尽量取多些。

要辨别有用的数据和有偶然因素影响或错误的数据常常是困难的事。错误的解释和不会识别有用的数据，其结果可能是丢弃了唯一能反映真实状态的实验数据。

在数据取舍问题上有两种假设：一种假设是把那些和大多数数据有显著“偏离”的数据，看作是某种无法控制的因素和偶然影响的结果，认为是无效的；另一种是认为全部的测试结果都是预期的真实的，全部予以保留。采用上述假设处理数据，均隐含着犯错误的危险性，因此必须仔细分析。采用统计数学的方法来处理观察数据是一个比较有规律、有系统性的处理方法，它是建立在第一种假设的基础上。这样做只有在对被观测对象有深刻了解时才是可行的，否则就有抛弃真实数据的可能，增加实验数据，扩大实验或改进实验技术均可减小犯错误的危险性。所以总的来说实验数据充分与否是评定一个实验好坏的重要指标之一。

实验中的所有数据，除数学公式中的某些常数（如  $(a+b)^2 = a^2 + 2ab + b^2$  中的 2）外，不论是多么准确，也不论是多么粗糙均要说明其可靠的程度。可靠程度要用数量表示，而不应笼统地说由于实验的水平、仪器的误差而存在一定的误差。当对数据的可靠程度要求不很严格时一般可以采用有效数字的表示方法，否则要表示出其不确定的程度，错误的表示方法会降低或失去数据的价值或给引用者带来错误。

<sup>\*</sup> 1950 年前测得的光速数值都很一致，50 年代以后由于采用了比以前精密得多的方法，发现以前的结果显然是不正确的（偏离超过了所给出的均方根误差的 4 倍）。类似的情况，特别是测定值是由权威人士最先给出时，可能性是很大的。

实验结论是实验的成果,依据要充分,语言要肯定,切忌使用“大概”、“可能”、“或许”之类不确定的词汇。为了把这些不确定的词汇去掉,就要求实验者仔细观察实验现象,认真测量实验数据,并对实验数据进行充分的分析研究。如果还不能得出明确的实验结论,则可能需要修改实验方案或计划,用更精密的实验或扩大实验测试内容,来取得更充分更可靠的依据。对实验者来说这就是实验技术上的一次提高。

应当指出,实验的各个阶段并不是截然分开的几个阶段。考虑的(进行的)顺序往往是互相交错的。如制订方案时可能要考虑设备,而设备又是据方案而定;实验步骤据方案而定,但改变实验的步骤也可能会改变实验的方案;实验结果的数据处理是据前阶段的结果进行,但采用不同的数据处理方法,可能要求不同的实验方案步骤等等。实际上这是一个多次反复的过程。

实验报告是一份工作报告,因此要对实验的任务、原理、方法、设备、过程和分析等主要方面要有明确的叙述,叙述条理要清楚,其中的公式、图、表、曲线应有符号、编号、标题、名称等说明,使人阅读后对其总体和各主要细节均能了解,并且只有一种理解。