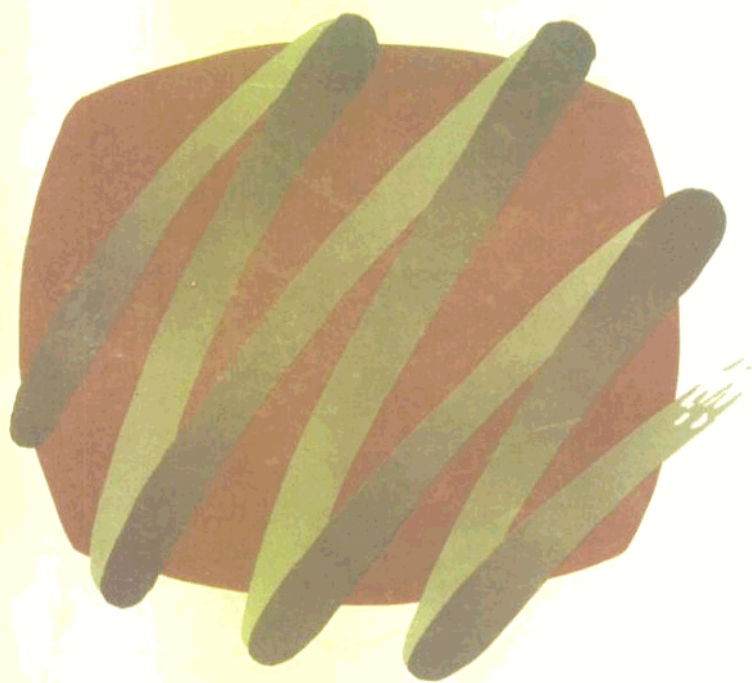


■ 王 玫 主 编  
■ 刘 宗 副主编

# 电工与电子技术实验教程



中国铁道出版社

# 前 言

实验教学是高等学校培养应用型人才的重要环节,对学生分析问题和解决问题能力的培养具有其它教学环节不可替代的重要作用。本书是根据国家教委电工学教学指导委员会及普通高等理工学院成人教育研究会电工学委员会最新修订的《电工技术》、《电子技术》和《电路及电子技术》课程教学基本要求而编写的实验课教材。

本书由两部分内容组成。第一部分为实验理论,主要包括电路、电机与控制、模拟及数字电子技术、电工及电子测量等。第二部分为推荐实验,主要是配合第一部分内容而给出的典型实验。本教程的编写是在多年来电工学实验教学和实验改革的基础上进行的,同时吸取了其它同类院校的经验。在内容选材上既考虑了实验教学与理论教学的相关性,又注意了使其具有一定的独立性、直观性和实用性;既有实验理论及方法,又有必要的实验操作和步骤。在内容编排上,注重了经典实验内容与当前的新技术和新设备的结合,力求从各种已经成熟的新技术中提炼出基本理论概念、基本指导思想、基本实验方法、基本操作技能,并结合理论教学和当前电工电子技术领域中的新知识、新器件,提出一些新的实验项目。为了增加本书的通用性,在教材中尽可能选用典型和通用的实验设备,并提出19个推荐实验项目。凡教学基本要求规定的实验内容,本教程都有相应的实验项目可供选用。

本书由北方交通大学王玫主编,大连铁道学院刘宗副主编。参加本书编写工作的有大连铁道学院梁海峰(第一章、第三章、第四章中的部分内容),北方交通大学李士明(第二章及附录一、二)、王玫(第四章及推荐实验中的实验八、十一)、黄勤河(推荐实验中的实验一、二、三)、王强(推荐实验中的实验四、五、六、十六)、宁涛(推荐实验中的实验十七、十八、十九及附录三、四),大连铁道学院刘宗(推荐实验中的实验七、九、十、十二、十三、十四、十五及附录五、六、七、八)。

本书由北方交通大学李守成教授主审,他认真仔细地审阅了书稿,指出了缺点及不妥之处,提出了许多修改意见和建议。

在本书编写过程中,大连铁道学院梁凤举副教授给予了很多关心和支持,并提出了宝贵意见。在此我们向为本书的出版付出辛勤劳动的同志们谨致以诚挚的谢意。

限于我们学识水平,加之编写时间仓促,本书难免有一些缺点、错误或不妥之处,恳请广大读者及同行们批评指正。

编 者

1996年3月

# 目 录

## 第一部分 实验理论

|                     |    |
|---------------------|----|
| 第一章 基本知识            | 1  |
| 第一节 实验规则            | 1  |
| 第二节 实验常识            | 1  |
| 第三节 电工仪器、仪表的使用知识    | 4  |
| 第二章 常用电工仪表与测量       | 6  |
| 第一节 测量误差与测量数据处理     | 6  |
| 第二节 电工仪表基本知识        | 11 |
| 第三节 常用电工仪表测量机构及工作原理 | 14 |
| 第四节 常用电量的测量         | 23 |
| 第三章 安全用电基本知识        | 29 |
| 第一节 保护接地和保护接零       | 29 |
| 第二节 电气火灾与预防         | 33 |
| 第三节 触电保护            | 35 |
| 第四章 常用电子测量仪器        | 37 |
| 第一节 电子式电压表          | 37 |
| 第二节 示波器             | 39 |
| 第三节 信号发生器           | 54 |
| 第四节 数字式仪器仪表         | 59 |

## 第二部分 推荐实验

|                               |    |
|-------------------------------|----|
| 第五章 电路理论                      | 61 |
| 实验一 直流电路                      | 61 |
| 实验二 日光灯电路及功率因数的提高             | 63 |
| 实验三 $RC$ 、 $RL$ 电路的暂态分析及其应用   | 66 |
| 实验四 串联谐振电路                    | 69 |
| 实验五 三相交流电路                    | 72 |
| 第六章 电机与控制                     | 75 |
| 实验六 小功率单相变压器                  | 75 |
| 实验七 异步电动机及其接触器控制              | 78 |
| 实验八 可编程控制器 (PLC) 在电机控制中的简单应用  | 79 |
| 实验九 时间控制的继电器接触控制电路            | 83 |
| 实验十 行程控制的继电器接触控制电路及多台电动机的联锁控制 | 84 |

|                             |     |
|-----------------------------|-----|
| 实验十一 直流并励电动机 .....          | 85  |
| 第七章 电子技术 .....              | 87  |
| 实验十二 整流、滤波及串联型稳压电源 .....    | 87  |
| 实验十三 单管低频电压放大电路 .....       | 89  |
| 实验十四 两级阻容耦合放大器 .....        | 91  |
| 实验十五 单相可控整流电路 .....         | 93  |
| 实验十六 集成运算放大器的线性应用 .....     | 94  |
| 实验十七 门电路及组合逻辑电路的实验分析 .....  | 98  |
| 实验十八 触发器及时序逻辑电路 .....       | 101 |
| 实验十九 集成逻辑电路及其应用 .....       | 105 |
| 附录 辅助知识 .....               | 109 |
| 附录一 常用电子元件的识别 .....         | 109 |
| 附录二 半导体器件的识别与判定 .....       | 116 |
| 附录三 常用集成电路的型号、参数及管脚排列 ..... | 123 |
| 附录四 SD-2 型电子电路实验台 .....     | 129 |
| 附录五 JWY-30 系列直流稳压电源 .....   | 132 |
| 附录六 分立元件模拟电路学习机 .....       | 133 |
| 附录七 SXJ-3B 型集成模拟电路学习机 ..... | 134 |
| 附录八 SXJ-3C 型数字电路学习机 .....   | 134 |
| 主要参考文献 .....                | 136 |

# 第一部分 实验理论

## 第一章 基本知识

### 第一节 实验规则

实验室是进行教学和科学研究的重要基地，实验时必须明确实验的基本规则，做到文明实验，不仅要提高实验质量，而且要确保人身和设备的安全，以获得较好的实验效益。学生在做实验时，必须做到：

- (1) 课前必须预习实验，未做预习报告者不得参加实验。
- (2) 认真聆听指导教师对实验的讲解，明确实验的具体要求。
- (3) 按指定实验桌就位，并检查实验设备。
- (4) 按实验步骤开始实验。实验过程中，要认真观测、详细记录。
- (5) 实验结束后，整理好实验设备、仪器、工具，经指导教师验收后方可离开实验室。
- (6) 整个实验过程不得喧哗，注意课堂纪律。
- (7) 按实验室规定严格遵守操作规程，切实注意安全，不准随意触摸、乱动仪器设备，特别是电源和带电设备，防止发生人身事故。
- (8) 对违犯操作规程、损坏仪器者应酌情进行赔偿，给予批评和处理。

### 第二节 实验常识

实验是学生把所学的理论知识付诸于实践的开端。只有具备了一些基本实验技能才能灵活地运用理论，解决实际问题。通过实验课，可以培养一个未来科技工作者的良好工作作风，因为要使实验课能够顺利进行，必须有理论联系实际、严肃认真、实事求是的科学态度。所以对于一个科技人员来讲，实验技能是工作能力的一个重要组成部分。

#### 一、实验前的准备

实验能否顺利进行，能否达到预期的效果，在很大程度上取决于预习是否充分。因此，实验之前应把实验目的、内容、原理、步骤，以及实验所需设备的型号和使用方法等做到详尽的了解以避免实验的盲目性。每一个实验都体现着一个原理的运用，而这一原理所阐述的内容就是实验所要验证的东西。换句话说，验证某一原理是实验的主要目的，实现这一原理所进行的测定，构成了实验的主要内容，而实验步骤的正确既保证实验结果的得出，又可以使实验安全顺利的进行。

若对实验的原理等没有充分的掌握，实验时就不明确要研究什么，要测量哪些量，也不能预测将会出现什么现象，只是机械的照教材进行操作，离开了教材就无从下手。用这种呆

板的方式做实验，既使能得出实验数据也不会了解其物理意义，更不能根据所测数据去推测和分析实验的最后结果。因此，为在规定时间内，高质量的完成实验课的任务，应作好实验前的预习。

## 二、实验室工作

电工实验要求实验者在具备一定理论知识的基础上，进行实验方法和实验技能的基本训练，要注重安全和准确两个方面。实验者要有条不紊的进行实验，细致地观察现象、测量数据和分析实验，认真地讨论实验结果，加深对电工学的概念和理论的理解。实验过程中应自觉的培养严肃认真、实事求是、遵守纪律的优良作风。任何草率与急躁，不按规程操作都会导致错误或失败。

### 1. 仪器设备的配备与检查

每次实验开始时，应先识别所用的仪器仪表，检查其类型，规格及数量，注意设备的容量参数、工作电压、工作电流不能超过额定值，仪表量程、准确度等级要合适，尽可能要求测量仪表对被测电路工作状态影响最小。然后，需将仪器放置、调整好，粗略检查仪表的好坏，并检查各仪表测量线是否导通，例如万用表置电阻挡，使测量棒短路，示数为零，则测量线完好；示波器测量线短路，在合适的灵敏度下，若测量线完好，屏幕应显示直线；稳压电源的输出用万用表直流电压挡测量，观测有无所需要的电压等等。

### 2. 接线

接线就是根据电路图将实际的器件用导线联接起来去完成满足特定要求的一种手段。实验的成功与否，在很大程度上取决于组装电路的正确与否。

首先，以电路图为依据，为方便测量，为简化接线，为人身安全，将各仪器设备位置合理摆放。其次，实验者必须明确电路图中各元件之间的联接关系，根据电路的结构特点，选择一个合理的接线步骤，一般是“先串后并”，“先分后合”，或“先主后辅”，接线前还要弄清电路图上节点与实验电路中各元件接头的对应关系。另外，养成良好的接线习惯，如走线要合理，尽量平直美观，布线要整齐，以便于检查。采用不同颜色的引线来区别不同的信号，例如电源用红线，公共端和地用黑线。元器件排列可沿 X、Y 方向，防止交叉相错，特别要防止引脚短路。导线的粗细长短要合适，大电流的线路要用粗导线，小电流的线路可以用细线。接线片不宜过于集中于一点，一般每个接线柱上的线头不要多于三个，以避免接触不良，电表接头上不得已不接两根导线，接线的松紧还要合适。电路各部分的地要接于一点，即所谓的共地，这样可以避免干扰信号的引入。接线过程一定要在断电条件下进行。总之，实验过程中要细致，尽量避免事故的发生。

### 3. 操作、观察、读数与记录

严格按规程操作，是实验得以顺利进行的保证。仔细观察实验现象，认真读取实验数据，可以最大限度的减少误差，是得到合理的实验结果的保证。操作过程中，注意人员之间分工协调，做到任务和目的明确。

操作之前认真检查电源，看极性、大小是否正确。操作时要注意：手合电源，眼观全局，若发生意外情况立刻断电源。观察实验现象与理论分析的是否一致，初步判断实验结果正确与否，再读数据。读数之前要使仪表量程及刻度合适。读数时，仪表应按规定形式（垂直或水平）放置，操作者姿式要正确，要求“眼、针、影成一线”，认准标尺及每一分格的数值，

要读取一位估计数（且只估算一位）。

记录要求完整清晰，力求表格化，数据必须记录在规定格式的原始记录纸上，要尊重原始记录，实验后不得随意涂改。

#### 4. 调试与故障检查

实验电路组装完毕后，接上电源，电路的功能并不一定就能马上实现，这是因为多种客观因素的影响是难以预测的，元器件性能上存在的问题，各种干扰信号的影响，以及在组装电路时由于工作疏忽所带来的错误等都会造成预想不到的后果，因此必须经过实验调整、补偿、纠正设计和组装中的不足之处，最后达到完满实现电路的功能。所以调试过程就是测量-判断-调整-再测量的反复过程。

由于电路的种类很多，组装电路的形式不同，影响电路的因素也很多，所以出现问题五花八门。这里只能从一些有共性的问题着手，介绍几点调试的原则，更多的问题需要在实际工作中有针对性的分析。

一般调试规则为：按照信号的流向，由前往后，逐个部分调整电路元件参数，排除各部分电路内部的故障和异常现象，使每一个部分电路的功能符合要求。

如电子线路的多级放大电路的调试，由于电子电路的特点是交直并存，所以要对静态和动态分别进行调试。

静态调试中，为防止干扰信号的加入，输入端要对地短路。通过理论计算，调节参数使各级静态工作点位于直流负载线的中间；若放大电路级数较多，还要考虑前级的静态工作点要低，后级的偏高，见图 1-1。总之，静态调试就是通过调电路参数，分别调各级静态工作点的位置，即所谓的分调。实验中往往在给定电路参数的情况下通过改变电路参数，来观察电路的不同工作情况。如调整静态工作点的位置观察饱和失真、截止失真。

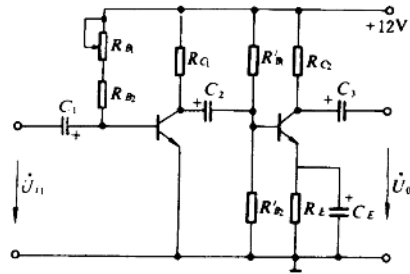


图 1-1 晶体管多级放大电路

动态调试是电路加上了输入信号情况下的

调试。这时，放大电路的前后级各项参数相互影响，称其为联调。常采用信号跟踪法，查找故障点。在动态调试过程中有时也需要综合各种实际问题，灵活地调整静态工作点。所以说，无论是动态调试，还是静态调试，其关系并不是独立的，而是互相制约、互为关联的。

在调试过程中总希望电路能顺利地实现电路功能，可往往事与愿违，故障总是不可避免的。因此分析、发现和排除故障是调试过程中不可避免的一个部分。通常寻找故障采用如下方法：

(1) 直接观察 例如：观察供电情况，电源的连接、数值及极性是否正确，保险丝是否熔断；观察仪器的功能量程等是否合适；观察元器件的安装情况，元件引脚连接有无发生错误，有无管脚间相碰等情况；接电源后，元件有无发烫、冒烟等情况现象。

(2) 参数测试 借助仪器测试电路中各点参数并与理论分析结果进行比较，如用万用表测各点电压值是否正常。

(3) 信号跟踪 在被调电路两端接入适当的信号，用示波器沿着电路中信号走向，监视

各点电压波形是否正常，以确定故障点。

(4) 替代法 用已调好的单元电路或元器件去取代嫌疑部分，判断故障点，并具体到元件、连接点或连接线，为排除故障创造条件。

### 三、实验报告的撰写

实验报告应在整理与计算实验数据并认真分析的基础上编写。它是实验工作的总结，为此要求用规定的作业纸统一规格编写。

#### 1. 预习报告

预习报告包括以下几项内容：

- (1) 实验名称。
- (2) 实验目的。
- (3) 设备的名称、规格或型号、数量和用途。
- (4) 简述实验步骤。
- (5) 实验电路。
- (6) 记录的表格和画曲线、波形的坐标。
- (7) 实验时的注意事项。

#### 2. 实验报告

实验报告包括以下几项内容：

(1) 按表格的要求填写实验数据及观察到的现象，描绘实验测得的曲线和波形。

(2) 分析实验结果。一方面，如果实验是观察某一电路现象或波形，以及验证某一电路定律，则首先对实验结论作一个陈述。另一方面，要对误差进行分析。误差分析包括两方面的内容：一是确定实验结果的误差范围。因为在精确测量中确定实验结果的不准确范围与获得实验结果一样重要。实验结果是为了证明某种理论，而误差范围则是表示理论与实际的差距。二是找出影响实验结果的主要因素，从而采取相应的措施以减小误差，显然对于不同的实验，因所用的实验方法或所测量的物理量不同，误差分析的方式亦不尽相同。误差过大时，应分析原因，对误差作出合理解释，参见第二章第五节。

(3) 最后的讨论。它包括回答实验的思考题，陈述实验过程中观察到异常现象及其可能的解释，对实验仪器装置和实验方法的建议等。

## 第三节 电工仪器、仪表的使用知识

仪器和仪表都是贵重设备。因此，正确地使用仪器、仪表，既确保了设备安全，也提高了读数准确性和实验的有效性。因此，要求将上述内容作为实验课的基本技能来掌握。

### 1. 接线前的准备

接线前，须检查仪器、仪表的下列各项：

- (1) 首先应查对仪器、仪表等设备的名称、型号和规格应该与本次实验所要求的相符。
- (2) 查对仪器、仪表的电压额定值是否与电源电压相符，不符则会在实验中损坏设备或无法实验。

(3) 初步检查仪表是否完好。如指针式仪表，可轻轻摇晃仪表，看指针是否摆动，如不



摆动，说明指针转动不灵活，或有其它故障。注意已固定在仪器上的仪表，不可摇动，以免影响仪器内部其它器件。

(4) 须检查仪表指针是否指在零位。如万用表打电阻挡，两测量棒短路，指针应由电阻无穷处偏转到零，指针指零不准确，需用螺丝刀通过调零器调零。

(5) 了解仪器和仪表的使用方法 & 仪器面板上各旋钮的位置和作用，使用前应根据需要选择正确的旋钮挡，选放妥当后，不得随意转动旋钮，以免实验中由于旋钮位置不正确导致错误。

## 2. 接线后的注意事项

在电路连接完成，准备接通电源时，应先合电源开关，然后利用电流表插塞测量电流，利用电压表测量棒测量电压，保证安全准确。电路与电源断开前，应先将电流表插塞和测量棒脱离电路后断开电源，避免电路中的过电压和过电流使仪表损坏。电流表插座可代替电流表串入电路中，避免表中长时间流过电流。测量时，只需将与电流表相连的插塞插入插座即可读数，避免了重新拆装电路。

## 3. 使用仪器、仪表的注意事项

使用仪器、仪表时，必须注意以下几点：

(1) 须注意仪表测量时的摆放位置。不同的仪表需有不同的摆放位置，有些须竖立读数，如电子管毫伏表、晶体管毫伏表和直流稳压电源上的电表等固定式电表。有些则须平放读数，像万用表、电压表和电流表等携带式仪表。否则会影响读数的准确性。

(2) 要熟悉仪表刻度盘上的各种符号。特别是万用表刻度盘上的标尺、符号繁多，要注意不同的测量对应有不同的刻度标尺和符号，不可混淆。

(3) 要正确的选择量程。因为量程太小，指针过偏，容易损坏仪表，而量程太大，指针偏转不足，读数的准确性降低。一般，指针式仪表量程的选择应使指针显示在表盘的中部以上。最安全的做法是事先估算测量值的大小，根据指针的偏转情况，逐挡减小量程，使指针偏转角度合适。如测量  $800\Omega$  电阻，应选择  $1K$  量程而不宜用  $10k\Omega$  量程。对于万用表一类多量程仪表，更要谨慎地选择其量程。

(4) 在读数时，首先要搞清楚刻度盘上每一标尺小格所代表的数量，且对那些刻度盘上有镜面的仪表，应在指针和它在镜面上的影子重叠的角度上方可读数。以保证读数的准确性。

(5) 刚接上仪表瞬间，如发现指针反偏、打弯、超过满量程（极限位置）、冒烟、冒火花或有烤糊味等，应立即断开电源或拆除电表进行检查。

## 第二章 常用电工仪表与测量

### 第一节 测量误差与测量数据处理

测量是指通过试验的方法，去测定一个未知量的大小，这个未知量叫做“被测量”。一个量在被测量时，该量本身所具有的真实大小称为“真值”。在测量中由于人们对客观认识的局限性、测量器具不准确、手段不完善、测量条件发生变化及测量工作中的疏忽等原因，都会使测量结果与真值不同，这个差别就是测量误差。

不同的测量，对其测量误差的大小要求往往是不同的。随着科学技术的进步，对减小测量误差提出了越来越高的要求。我们学习掌握一定的误差理论和数据处理知识，为的是能合理设计和组织实验，正确地选用测量仪器、仪表和测量方法，减小测量误差，得到接近被测量真值的结果。

#### 一、仪表误差及误差表达方式

对于各种电工指示仪表，无论制造得如何精细及其质量如何优良，它的测量值与被测量的真值之间总是存在着某种程度的差异，这个差异称为仪表误差。仪表误差越小，说明仪表的测量值与实际值就越接近。因此，仪表的准确度用误差的大小来说明。

##### (一) 仪表误差的分类

###### 1. 基本误差

仪表在正常工作条件下，由于活动部分的摩擦，标尺刻度不准，零件装配不当等原因造成的误差，都属于仪表的基本误差。这是仪表本身固有的一种误差。

###### 2. 附加误差

当仪表工作超出规定的正常工作条件，如环境温度、电源电压、频率等因素偏离规定的正常条件时，都会造成额外的误差。这种由于工作条件的改变而造成额外误差称为仪表的附加误差。

##### (二) 误差表示方式

###### 1. 绝对误差

仪表的指示值 ( $A_x$ ) 和被测量的真值 ( $A_0$ ) 之间的差值称为绝对误差。绝对误差以  $\Delta$  表示，即

$$\Delta = A_x - A_0 \quad (2-1)$$

当  $A_x > A_0$  时， $\Delta$  是正值； $A_x < A_0$  时， $\Delta$  是负值，所以绝对误差是具有大小，正负和量纲的数值，它的大小和符号分别表示指示值偏离真值的程度和方向。计算时，可用标准表（用作校正工作仪表的高准确度仪表）的指示值作为被测量的真值。

〔例 2-1〕用一只标准电压表校准甲、乙两只电压表时，读得标准电压表的指示值为 50V，甲、乙两表的读数分别为 51V 和 49.5V，求它们的绝对误差。

解：由式 (2-1) 得

甲表的绝对误差

$$\Delta_{\text{甲}} = A_x - A_0 = 51\text{V} - 50\text{V} = 1\text{V}$$

乙表的绝对误差

$$\Delta_{\text{乙}} = A_x - A_0 = 49.5\text{V} - 50\text{V} = -0.5\text{V}$$

可见，乙表的指示比甲表准确。因此，在测量同一个量时，我们可以用绝对误差  $\Delta$  的绝对值来说明指示值偏离真值的程度，但不能说明测量的准确程度。

由式 (2-1) 可推得

$$A_0 = A_x + (-\Delta) = A_x + c \quad (2-2)$$

式 (2-2) 中  $c = -\Delta$  称为修正值 (更正值、校正值)。修正值与绝对误差的绝对值大小相等，符号相反。引入修正值，就可以对仪表指示值进行校正，清除其误差，得到被测量的实际值。

## 2. 相对误差

测量不同大小的被测量时，不能简单地用绝对误差来判断其准确程度。例如甲表在测量 100V 电压时，绝对误差  $\Delta_{\text{甲}} = +1\text{V}$ ，乙表在测量 10V 电压时，绝对误差  $\Delta_{\text{乙}} = +0.5\text{V}$ ，从这里的绝对误差来看，甲表大于乙表。但从仪表误差对测量结果的相对影响来看，却是乙表较大。因为甲表的误差只占被测量的 1%，而乙表的误差占被测量的 5%，所以乙表误差对测量结果的相对影响更大。因此，工程上通常采用相对误差来衡量测量结果的准确程度。

相对误差就是绝对误差  $\Delta$  与被测量真值  $A_0$  的比值。通常用百分数来表示，用符号  $r$  表示相对误差，即

$$r = \frac{\Delta}{A_0} \times 100\% \quad (2-3)$$

〔例 2-2〕已知甲表测量 100V 电压时， $\Delta_{\text{甲}} = +1\text{V}$ ，乙表测量 10V 电压时， $\Delta_{\text{乙}} = +0.5\text{V}$ ，求它们的相对误差。

解：甲表的相对误差

$$r_{\text{甲}} = \frac{\Delta_{\text{甲}}}{A_0} \times 100\% = \frac{1}{100} \times 100\% = 1\%$$

乙表的相对误差

$$r_{\text{乙}} = \frac{\Delta_{\text{乙}}}{A_0} \times 100\% = \frac{0.5}{10} \times 100\% = 5\%$$

可见，乙表的相对误差大于甲表。在误差较小，要求不太严格的场合，可用仪表的指示值代替实际值计算相对误差。即

$$r = \frac{\Delta}{A_x} \times 100\% \quad (2-4)$$

## 3. 引用误差

相对误差能表示测量结果的准确程度，却不能说明仪表本身的准确性能。同一块仪表，在测量不同的被测量时，由于摩擦等原因造成的绝对误差  $\Delta$  变化不大，但随着被测量的变化，仪表的指示值可在整个刻度范围内变化。因此，对应不同大小的被测量，就有不同的相对误差，我们很难用相对误差全面衡量一只仪表的准确性能。

〔例 2-3〕一只测量范围为 0~250V 的电压表，在测量 200V 电压时，绝对误差为 +1V。在

测量 10V 电压时, 绝对误差为 +0.9V, 求它们的相对误差。

解: 测量 200V 电压时, 相对误差为

$$r_1 = \frac{1}{200} \times 100\% = 0.5\%$$

测量 10V 电压时, 相对误差为

$$r_2 = \frac{0.9}{10} \times 100\% = 9\%$$

可见, 随着被测量的变化, 相对误差也跟着变化。因此就提出了引用误差, 以便更好地反映仪表的基本误差。

引用误差是指绝对误差  $\Delta$  与仪表测量上限  $A_m$  (仪表的满刻度值) 比值的百分数, 用  $r_m$  表示。即

$$r_m = \frac{\Delta}{A_m} \times 100\% \quad (2-5)$$

由于仪表的测量上限是一个常数, 而仪表的绝对误差又大体不变, 所以可用“引用误差”来表示仪表的准确度。引用误差实际上是测量上限的相对误差。

国家标准规定用最大引用误差来表示仪表的准确度等级, 即在正常工作条件下, 仪表进行测量时纯由基本误差构成的最大绝对误差  $\Delta_m$  与仪表量程  $A_m$  之比。准确度等级用  $K$  表示, 其表达式为

$$\pm K\% = \frac{\Delta_m}{A_m} \times 100\% \quad (2-6)$$

〔例 2-4〕用准确度为 0.5 级和上限为 10A 的电流表测量 4A 电流时, 求其最大可能出现的相对误差?

解: 由式 (2-6), 该电流表最大绝对误差的绝对值为

$$|\Delta_m| = \left| \frac{K \times A_m}{100} \right| = \left| \frac{0.5 \times 10}{100} \right| = 0.05A$$

测 4A 电流时, 可能出现的最大相对误差为

$$r = \frac{\Delta_m}{A_x} \times 100\% = \frac{0.05}{4} \times 100\% = 1.25\%$$

由此可见, 在一般情况下, 测量结果的准确程度 (其最大相对误差), 并不等于仪表的准确度, 两者不能混淆。因此, 选用仪表时, 不仅要考虑仪表的准确度, 还要根据被测量的大小, 选择合适的仪表量程, 才能保证测量结果的准确性。

〔例 2-5〕用 0.2 级和上限量程为 100A 的电流表测 4A 电流时, 求其最大相对误差。

解: 由式 (2-6) 得出该表的最大绝对误差的绝对值为

$$|\Delta_m| = \left| \frac{K \times A_m}{100} \right| = \left| \frac{0.2 \times 100}{100} \right| = 0.2A$$

测 4A 时, 可能出现的最大相对误差为

$$r = \frac{\Delta_m}{A_x} \times 100\% = \frac{0.2}{4} \times 100\% = 5\%$$

可见, 仪表的准确度虽然提高了, 但测量的最大相对误差反而增大了。所以只片面追求仪表的准确度等级, 而忽略对仪表量程的合理选择, 就无法保证测量结果的准确性。因此, 选择仪表时应使被测量值处在仪表量程的 2/3 以上。

## 二、测量误差的来源及分类

根据误差的性质不同，测量误差一般分为系统误差、随机（偶然）误差和疏忽误差。

### （一）系统误差

在相同条件下，多次测量同一量值时，误差的绝对值和符号保持不变，或条件改变时，按一定规律变化的误差称为系统误差。产生系统误差的原因有以下几种：

（1）测量用仪器仪表在设计和制作上的缺陷。如刻度的偏差、仪表的零位偏移、刻度盘或指针安装偏心等。

（2）测量时的实际温度、湿度及电源电压等环境条件与仪器仪表要求的工作条件不一致。

（3）采用近似的测量方法或近似的计算公式等。

（4）测量人员读数时，习惯偏于某一方向或有滞后倾向等原因引起的误差。

### （二）随机误差

在相同条件下，多次测量同一量值时，绝对值和符号均以不可预定方式变化的误差称为随机误差。产生随机误差的原因有以下几种：

（1）测量用仪器仪表中零部件之间的配合不符合要求或产生噪声等。

（2）温度及电源电压的频繁波动，电磁场干扰，台基振动等。

（3）测量人员读数的无规律，不稳定等原因所引起的误差。

### （三）疏忽误差

测量时，由于疏忽引起的测量值明显地偏离实际值所形成的误差称为疏忽误差。产生疏忽误差的原因有以下几种：

（1）在测量中，测量人员疏忽造成的错误读数、错误操作或记录等。

（2）测量条件的突然变化，如电源电压、机械冲击等原因产生的疏忽误差。

## 三、减小测量误差的方法

### （一）系统误差

系统误差的特点是在测量条件一定时，误差为一确定数值。虽然产生系统误差的原因是多方面的，但总是有规律的。对其产生误差的根源采取一定的技术措施，以减小系统误差的影响。如仪器不准，通过检验取得修正值以减小系统误差，或者是选择合理的测量方法，配置适当的仪器仪表并对仪表及时地进行校正。

### （二）随机误差

这一类误差的特点是在多次测量中，误差绝对值的波动有一定的界限，正负误差出现的机会相同，如图 2-1 所示。

$A_0$  假设为实际值。根据用统计学的知识分析知道，当测量次数足够多时，随机误差的算术平均值趋近于零。因此，可以通过取多次测量值的平均值的办法来消除随机误差。

### （三）疏忽误差

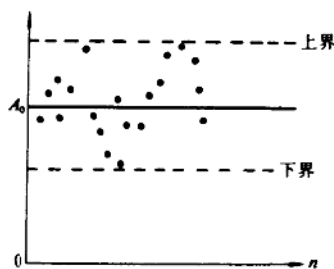


图 2-1 随机误差分布图

凡是由于疏忽误差所造成的明显错误数据均称为坏值，应当剔除不用。

综上所述，三种误差同时存在的情况下，对于含有疏忽误差的测量值，一经确认，应当首先予以剔除；对于随机误差采用统计学求平均值的方法来削弱它的影响；系统误差较难发现，须在测量之前采取一定的技术措施来减少它的影响，如对仪表进行校正，配置适当的仪器仪表，选择合理的测量方法等。

#### 四、测量数据处理

经过测量取得测量数据后，通常要对这些数据进行计算、分析、整理，有时还要画成表格或曲线，也就是进行数据处理。它是建立在误差分析的基础上，经过去粗取精、去伪存真、分析整理引出正确结论。

##### (一) 有效数字

由于在测量中不可避免地存在误差，并且仪器仪表的分辨能力有一定的限制，测量数据就不可能完全准确。测量数据进行计算时，遇到如  $\pi$ 、 $e$ 、 $\sqrt{2}$  等无理数也只能取近似值。因此，我们得到的数据通常只是一个近似数。当我们用这个数表示一个量时，为了表示得确切，通常规定误差不得超过末位单位数字的一半。如末位数字是个位，则包含的误差绝对值应不大于 0.5。对于这种误差不大于末位单位数字一半的数，从它左边第一个不为零的数字起，直到右面最后一个数字止，都叫作有效数字。

值得注意的是，在数字左边的零不是有效数字，而数字中间和右面的零都是有效数字。例如 0.0038k $\Omega$ ，左面的三个零就不是有效数字，因为它们可以通过单位变换为 3.8 $\Omega$ ，可见只有两位有效数字。再有像 3.860V 这样的数字，最右边的一个零也是有效数字，它对应着测量的准确程度，我们不能任意把它改成 3.86V 或 3.8600V，因为这意味测量准确程度的变化。3.860V 表明误差绝对值不应超过 0.0005V，而改写成 3.86V 或 3.8600V 表明的误差绝对值不超过 0.005V 或 0.00005V，显然这就不对了，因为它不符合有效数字的位数与误差大小相适应的原则。

##### (二) 数字的舍入规则

当需要  $n$  位有效数字时，对超过  $n$  位的数字就要根据舍入规则进行处理。古典的“四舍五入”法则是不完善的，现多不使用。目前广泛采用的“舍入规则”（当保留  $n$  位有效数字时）如下：

1. 若后面的数字小于第  $n$  位单位数字的 0.5 就舍掉。
2. 若后面的数字大于第  $n$  位单位数字的 0.5，则第  $n$  位数字进 1。
3. 若后面的数字恰为第  $n$  位单位数字的 0.5，若第  $n$  位数字为偶数或零时，则舍掉后面的数字，若第  $n$  位数字为奇数，则第  $n$  位数字加 1。

概括起来是“小于 5 舍，大于 5 入，等于 5 时取偶数”。

〔例 2-6〕将下列数字保留 3 位有效数字，

45.77, 36.251, 43.035, 38050, 47.15

解：45.77  $\rightarrow$  45.8 (0.07 > 0.05, 进 1)

36.251  $\rightarrow$  36.3 (0.051 > 0.05, 进 1)

43.035  $\rightarrow$  43.0 (0.035 < 0.05, 舍掉)

38050  $\rightarrow$  380  $\times 10^2$  (第 4 位是 5, 第 3 位为零, 舍掉)

47.15—→47.2 (第4位是5,第3位是奇数,进1)

### (三) 测量结果表示法

对于一个测量结果应该如何表示,目前国内外尚无统一规定。总的说来,只要表示的测量结果能正确反映被测量的真实大小和它的可信程度,同时数据表达不过于冗长就可以了。

对于测量的误差值,一般只需取一位到两位数字,过多的位数没有什么太大意义。因此,在用一个数值表示测量结果时,常在有效数字后多给出1~2位数字,这样表示的测量结果数值称为有效安全数字。下面介绍这种用一个数值表示测量结果的具体作法:

- (1) 由误差或不确定度的大小定出测量值有效数字最低位的位置。
- (2) 从有效数字最低位向右多取1~2位安全数字。
- (3) 根据舍入规则处理其余数字。

如某电阻的电阻值为 $40.67 \pm 0.41 \Omega$ ,因为不确定度为 $\pm 0.41 \Omega$ ,不大于阻值个位单位数字的一半,所以有效数字最低位是个位。这样该电阻取一位安全数字时为 $40.7 \Omega$ ,取两位安全数字时为 $40.67 \Omega$ 。

## 第二节 电工仪表基本知识

### 一、电工仪表的基本组成和工作原理

电工指示仪表的种类很多,但它们的主要作用都是将被测量转换成仪表活动部分的偏转角位移量。电工指示仪表一般由测量线路和测量机构两部分组成,如图2-2所示。

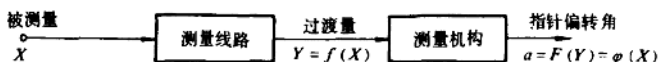


图2-2 电工指示仪表基本组成示意图

被测量常常不能直接加到测量机构上,首先要将被测量转换成测量机构可以接受的过渡量,这个把被测量转换为过渡量的部分叫测量线路。如电压表的附加电阻,电流表的分流器电路等都是测量线路。把过渡量能按一定关系转换成偏转角的机构叫测量机构。测量机构由活动部分和固定部分组成,它是仪表的核心。它主要的作用是产生使仪表的指示器偏转的转动力矩,以及使指示器保持平衡和迅速稳定的反作用力矩及阻尼力矩。

测量时,被测量经过测量线路变为过渡量加到测量机构上。测量机构活动部分在偏转力矩的作用下偏转,同时产生反作用力矩的部件所产生的反作用力矩也作用在活动部件上,且随着偏转角度的增大而增大。当转动力矩与反作用力矩相等时,可动部分便停止下来。由于可动部分具有惯性,以致可动部分达到平衡时不能迅速停止下来,而是在平衡位置附近来回摆动。测量机构中的阻尼装置产生的阻尼力矩通过吸收可动部分摆动能量,使其迅速停止在平衡位置上,指出被测量的数值大小。

转动力矩可以由电磁力、电力、电场力和其它力产生,产生转动力矩的原理和方法不同,就构成不同系列的指示仪表。如磁电式仪表是利用可动线圈和永久磁铁间的电磁力产生

转动力矩。电动式仪表是利用可动线圈和固定线圈之间的电动力产生转动力矩。

当仪表的可动部分在转动力矩作用下发生偏转时，如果没有反作用力矩与之平衡，那么不管被测量多大，可动部分都要偏转到最大值，一直到不能转动为止。就像不挂砝的称一样，只能反映被测量的有无，而不能测量被测量的大小。反作用力矩总是和转动力矩方向相反，随着转动力矩的增大而增大，直到完全相等为止。此时可动部分稳定于某个偏转角，以达到表示被测量大小的目的。反作用力矩一般利用弹性元件变形后的弹力产生，如利用游丝（弹簧）的弹力或悬丝的扭力。此外还有电磁力产生的反作用力矩，如比率计。

阻尼力矩通常利用空气阻尼或利用可动部分中的电磁力产生阻尼（涡流阻尼）来吸收可动部分摆动的能量。它只有在可动部分运动时才产生。它的大小和可动部分的运动速度无关，与偏转角有关。它的方向总是和可动部分的运动方向相反。

## 二、常用电工仪表的分类

常用电工仪表的分类方法有：按工作原理分类，按被测量的名称（或单位）分类，按使用方法分类等等。

根据工作原理可分为：磁电式仪表、电磁式仪表、电动式仪表、感应式仪表和整流式仪表等。

根据被测量的名称（或单位）可分为：电压表（伏特表）、电流表（安培表）、功率表（瓦特表）等。

根据使用方式分类有开关板式和可携式仪表。

## 三、常用电工仪表的主要技术指标

为了保证仪表测量结果的准确、可靠，使用电工仪表时应注意以下几项技术指标。

### （一）准确度

目前，我国生产的电工指示仪表的准确度按国标规定分为七级，它主要根据仪表的基本误差来确定。当在规定的正常工作条件下，相应的基本误差不应超出表 2-1 所规定的数值。

表 2-1 仪表的准确度等级

| 准确度等级 | 0.1  | 0.2  | 0.5  | 1.0  | 1.5  | 2.5  | 5.0  |
|-------|------|------|------|------|------|------|------|
| 基本误差% | ±0.1 | ±0.2 | ±0.5 | ±1.0 | ±1.5 | ±2.5 | ±5.0 |

通常 0.1 与 0.2 级仪表多用作标准表，0.5 级与 1.0 级多用于实验室测量，1.5 级以上仪表多用于工业测量。选用仪表时，不仅要考虑仪表的准确度等级，还要根据被测量的大小，选择合适的仪表量程，使被测量数值处在仪表量程的 1/2 或 2/3 以上，才能保证测量结果的准确性。

### （二）灵敏度

在电工指示仪表中，被测量的变化将引起仪表可动部分偏转角的变化。如果被测量变化了  $\Delta_x$ ，引起偏转角相应变化  $\Delta_a$ ，则  $\Delta_a$  与  $\Delta_x$  的比值就是仪表的灵敏度，用  $S$  表示。即

$$S = \frac{\Delta_a}{\Delta_x} \quad (2-7)$$

对于标尺刻度均匀的仪表，其灵敏度是一个常数，即灵敏度的值等于单位被测量所引起



的偏转角位移。对于标尺刻度不均匀的仪表，其灵敏度是一个变量。在标尺刻度较密的部分，灵敏度低，读数误差较大。

灵敏度表示了仪表对被测量的反应能力，也反映了仪表所能测量的最小被测量。选择仪表的灵敏度时，要考虑被测量的要求，灵敏度过高，仪表的量程可能太小；灵敏度过低，仪表不能反应出被测量的较小变化。因此，要恰当地选择灵敏度适合的仪表，不应片面追求高灵敏度。

有些仪表使用“仪表常数”（即灵敏度的倒数）或“分辨率”来表示对被测量的反应能力。例如分辨率  $2\mu\text{V}$ ，即仪表对  $2\mu\text{V}$  电压变化有明显的反应。

### （三）仪表的功率损耗

仪表接入电路时，仪表本身也要损耗一定的能量。如果仪表损耗的功率过大将对被测电路产生大的影响，必然造成测量误差的增大。因此，仪表本身的功率损耗应尽量小。

### （四）读数装置

仪表的标度尺上的刻度应尽量均匀，以利于读取数值。标度尺刻度不均匀的仪表，在分度线密集的位置上，灵敏度低，读数误差大，在这部分标度尺上进行测量时，读数不能保证应有的准确度。因此，对标度尺不均匀的仪表，要求在刻度盘上标明其工作部分。一般规定其仪表工作部分的长度不应小于标度尺全长的 85%。

### （五）仪表的阻尼装置

由于仪表可动部分的惯性，当接入被测量或被测量突然变化时，指示器不能迅速稳定在指示值上，而在稳定位置的左右摆动，以致不能迅速取得测量读数。为减少指示器摆动时间，仪表都设有阻尼装置。

仪表阻尼是否良好，通常用阻尼时间衡量。所谓阻尼时间是指仪表从接入被测量开始到指示器在稳定位置左右的摆动不大于标度尺全长的 1% 为止的时间。按规定普通仪表的阻尼时间应不超过 4 秒钟。质量好的仪表，阻尼时间只有 1.5 秒钟左右。

### （六）绝缘强度和过载能力

仪表的电气线路和外壳之间应有良好的绝缘，以保证仪表在正常工作和使用时的安全。绝缘强度是指仪表的绝缘电阻所能耐受的试验电压数值。

过载能力是指仪表的负载当超过额定值以上时，仪表所承受的程度。一种情况是，当负载超过额定值并延续一段时间，引起仪表有关部分升温，这种过载称为热过载或延时过载。如果仪表质量较差，则升温过高，可使仪表损坏。另一种情况是，仪表的负载突然超过额定值，则在测量机构转动动力矩作用下，仪表可动部分迅速冲向极限位置发生机械撞击，这种过载叫机械过载或短时过载。如果是质量较差的仪表，短时过载可能引起仪表内部元件的机械损坏，如指针撞断或阻尼板变形等。

在实际应用中，由于仪表过载是在所难免的，因此，各式各样的仪表均要具有一定的过载能力。

## 四、常用电工仪表的表面标记符号

电工指示仪表的技术特性各不相同，为便于选择和使用，常把这些技术特性用不同的符号标示在仪表的表面上。它用来表明仪表的类型、测量对象、测量范围、准确度等级和使用条件等等。电工仪表常用标记符号见表 2-2。