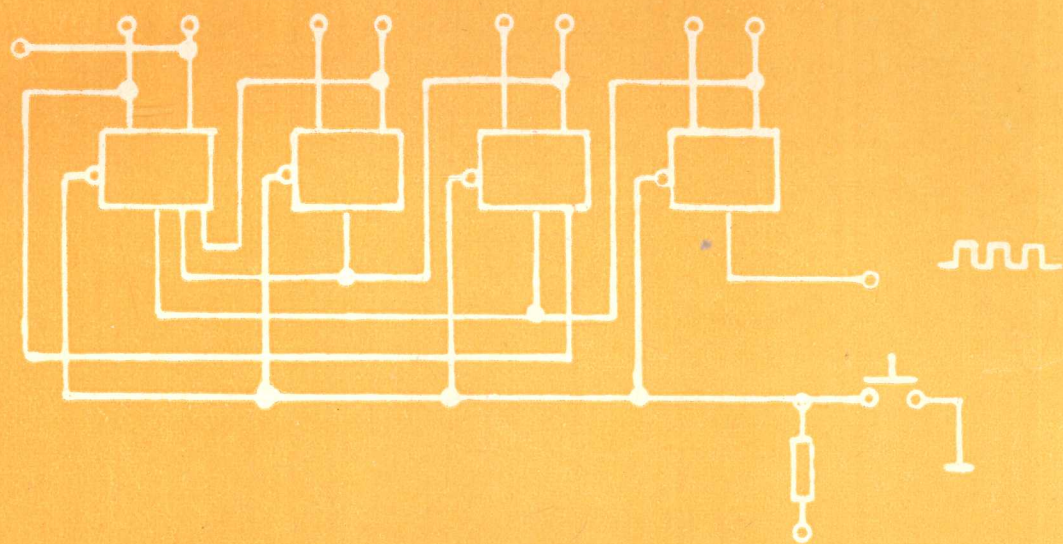


电气实验

主编 陈强华



武汉工业大学出版社

电 气 实 验

主 编 陈 强 华

编 委 刘 保 平 肖 仲 华 周 先 进
邓 银 章 陈 斌 黄 勇
吴 永 南 方 伟 陈 强 华

武 汉 工 业 大 学 出 版 社

(鄂)新登字 13 号

内 容 提 要

全书共分八章。先介绍电气实验的基本知识,包括误差计算、实验数据处理、常用仪表和常用仪器简介,并重点介绍万用表的原理和使用;再介绍基础电工实验、实用电工实验、模拟电路实验和脉冲与数字电路实验;最后以超外差式收音机的装配和调试作为综合实习。

本书以培养实际操作能力为主,与电气理论教学相结合。可作为中专和大学电工学与电子学实验教材,也可供工程技术人员和自学者参考。

电 气 实 验

©陈强华 主编

责任编辑 王建华

*

武汉工业大学出版社出版发行

(武汉市武昌珞狮路 14 号 邮政编码 430070)

孝感日报印刷厂印刷

*

开本: 787×1092 1/16 印张: 8.625 字数: 167 千

1994 年 11 月第 1 版 1994 年 11 月第 1 次印刷

印数 1 7000 册

ISBN 7-5629-0864-8/TM·16

定价: 5.60 元

前 言

“电气实验”是配合“电工学”和“电子学”教学而开设的一门实验课程。通过本课程的学习，使学生比较完整地、系统地学习电气实验的技术和方法，进行各种必要的操作训练，巩固和扩展所学的理论知识。使用本教材时应单独开课，单独考核，并与“电工学”、“电子学”的理论教学同步进行。根据各学校的实际情况可酌情选择本教材的全部或部分内容。本教材的学时分配建议如下：

	讲 授	操 作	备 注
第一章 电气实验基本知识	4	2	
第二章 万用表	2	4	
第三章 实验室常用仪器简介	4		
第四章 基础电工实验		18	
第五章 实用电工实验		12	
以上与“电工学”课程同步进行，合计 46 学时			
第六章 模拟电路实验		14	
第七章 脉冲与数字电路实验		8	
以上与“电子学”课程同步进行，合计 22 学时			
第八章 综合实习：超外差式收音机的装配和调试	实习可安排一星期		

本书由湖北省农机职教研究会电气工程学科委员会和黄冈大学组织编写。参加本书编写工作的有刘保平、肖仲华、周先进、邓银章、陈斌、黄勇、吴永南、方伟、陈强华等同志，由高级工程师陈强华任主编。

本书可作为中专和大学的电气实验课教材，也适于工程技术人员和自学者使用。

由于编者水平有限，缺点和错误在所难免，恳切希望读者批评指正。

编者

1994 年 11 月 22 日

目 录

第一章 电气实验基本知识	(1)
§ 1-1 概述	(1)
§ 1-2 实验数据的误差	(5)
§ 1-3 实验数据的处理	(7)
§ 1-4 常用仪表简介	(10)
§ 1-5 实验一 认识实验	(14)
第二章 万用表	(16)
§ 2-1 实验二 表头的扩程和校准	(16)
§ 2-2 万用表的工作原理	(18)
§ 2-3 实验三 万用表的使用	(23)
第三章 实验室常用仪器简介	(27)
§ 3-1 WY-30-1A/3A 型直流稳压电源	(27)
§ 3-2 XD2 型低频正弦波信号发生器	(28)
§ 3-3 DA16-1 型晶体管毫伏表	(30)
§ 3-4 ST-16 型通用示波器	(31)
§ 3-5 直流单臂电桥及电阻的测量	(36)
§ 3-6 交流电桥及电容、电感的测量	(37)
§ 3-7 磁通计的原理和使用	(40)
第四章 基础电工实验	(42)
§ 4-1 实验四 验证欧姆定律	(42)
§ 4-2 实验五 验证叠加原理	(43)
§ 4-3 实验六 验证戴维南定理	(44)
§ 4-4 实验七 验证基尔霍夫定律	(45)
§ 4-5 实验八 功率的测量	(46)
§ 4-6 实验九 日光灯电路及功率因数的提高	(51)
§ 4-7 实验十 RLC 串联电路及串联谐振	(53)
§ 4-8 实验十一 三相负载的星形连接和三角形连接	(54)
§ 4-9 实验十二 RC 电路的过渡过程	(56)
第五章 实用电工实验	(58)
§ 5-1 实验十三 单相变压器实验	(58)
§ 5-2 实验十四 三相异步电动机实验	(60)
§ 5-3 实验十五 三相异步电动机直接起动控制	(62)
§ 5-4 实验十六 三相异步电动机正反转控制	(64)
§ 5-5 实验十七 直流并激电动机的起动和调速	(65)

§ 5-6 实验十八 电度表的使用	(67)
第六章 模拟电路实验	(70)
§ 6-1 实验十九 单相整流、滤波和稳压电路	(70)
§ 6-2 实验二十 晶体二极管和三极管的测试	(72)
§ 6-3 实验二十一 单管共发射极放大电路	(76)
§ 6-4 实验二十二 LC 振荡电路	(78)
§ 6-5 实验二十三 串联型直流稳压电路的调整与测试	(79)
§ 6-6 实验二十四 单相半控桥式整流电路	(82)
§ 6-7 实验二十五 集成功率放大电路	(83)
第七章 脉冲与数字电路实验	(86)
§ 7-1 实验二十六 由集成“与非”门组成多谐振荡器	(86)
§ 7-2 实验二十七 多谐振荡器、单稳态和双稳态触发器	(87)
§ 7-3 实验二十八 计数、译码、显示电路	(88)
§ 7-4 实验二十九 555 时基电路的应用	(90)
第八章 综合实习：超外差式收音机的装配和调试	(93)
§ 8-1 收音机概述	(93)
§ 8-2 超外差式收音机电路原理	(97)
§ 8-3 收音机的装配	(120)
§ 8-4 超外差式收音机的调整与测试	(121)
§ 8-5 收音机的维修	(129)

第一章 电气实验基本知识

§ 1-1 概述

“电气实验”是配合“电工学”与“电子学”教学而开设的实验课程。通过各种操作训练,培养学生的实际动手能力,加深对理论知识的掌握和理解。通过本课程的学习,应达到如下的基本要求:

1. 能准确地读取、记录和处理实验数据,能对实验现象进行正确分析和总结,写出完整的实验报告。
2. 能正确使用常用的测量仪表和电子仪器,熟练地掌握万用表的使用方法。
3. 能正确检测常用的元器件,如阻容元件、半导体器件等。
4. 能按照电路图正确连接电路,熟练掌握焊接技术,合理布置实验现场,检测并排除电路故障。按实验内容的要求准确地完成各项实验。

一、实验课的基本方法

实验课可分为三个阶段进行。

1. 实验前的准备工作 为了高质量完成实验课,实验前要对实验内容进行预习,熟悉实验的内容和方法,懂得实验所依据的原理,明确实验的目的和要求等。

2. 实验操作 进入实验室,首先要了解实验规则及注意事项,并熟悉仪器的使用和调整方法,然后才进行实验。实验时,根据实验要求合理布置实验现场;按规定的步骤观察分析实验现象,读取和记录实验数据。实验内容完成后,对实验数据进行检查分析,若发现问题,应重新进行实验。

实验结束后,切断电源,拆除实验装置,整理仪器工具,对仪器进行必要的维护,最后清扫实验现场。

3. 实验报告 实验报告是实验工作的总结。实验报告要求文字通顺,表达清楚,图表清晰,结果正确。完整的实验报告应包括如下内容:

(1) 实验名称。

(2) 实验目的。

(3) 实验原理与内容。应简要地说明实验的电路及原理、实验步骤,并列实验依据的公式等。

(4) 主要仪器设备。

(5) 实验数据记录。

(6) 数据处理。对实验数据进行误差分析,并计算出最后测量结果。

(7) 实验结果。最后结果应包括测量值、误差和单位,并扼要地写出文字结论。

(8) 讨论与分析。回答实验思考题,分析误差的主要来源,简述实验的心得体会等。

二、电气实验的安全规则

为保障实验人员的人身安全和实验室仪器设备的安全,进入电气实验室应遵守各种安全规则,下面分别介绍。

1. 为保障实验人员人身安全,应遵守如下安全规则:

(1) 不得赤脚进行电气实验。进行强电实验时,实验现场地面应铺设绝缘胶垫。

(2) 实验电路接好后需认真检查,接电源时或进行高压测试时应单手操作,若有异常,立即断开电源。

(3) 不许带电操作,大于 24V 的电压就有可能引起触电事故。实验中如果有人触电,应迅速切断电源,然后采取相应的措施。

(4) 与本实验无关的其他电气设备不许乱动。在进行强电等具有一定危险的实验时,应有两人以上合作进行操作。

(5) 实验结束后,应立即切断电源,拆除连线。

2. 为保护实验的仪器设备,应遵守如下安全规则:

(1) 实验前应了解仪器设备的使用方法和注意事项,看清仪器设备所需电源电压值。

(2) 仪器设备应正确连线。线路接好后,应仔细检查,再经教师确认无误后,才能接通电源。

(3) 实验中不得随意扳动开关、旋钮,不得在带电情况下拆线或连线,不得在带电情况下插拔接插件、元器件和集成电路等。

(4) 实验时应随时注意仪器设备是否有异常现象发生,例如保险丝熔断、变压器烧焦冒烟、元器件发烫、异常响声等,如发现异常应立即切断电源、保持现场,待查明原因并排除故障后,方可重新实验。

(5) 仪器设备使用完毕后,各开关旋钮应扳至合适位置。仪器设备如有损坏,应及时报告教师检查处理。

(6) 保持实验室和仪器设备的整齐清洁。

三、实验室常用工具

进行电气实验时,实验室应准备如下工具:

1. 尖嘴钳 用来夹持导线或元器件引线,也可用来剪切导线。

2. 斜口钳 用于剪掉焊点上多余的线头或元器件焊接后的引线。

3. 剥线钳 用来剥去导线端头的绝缘层。

4. 钢丝钳 是钳夹和剪切的工具。常用的规格有 150mm、175mm 和 200mm 三种。

5. 螺丝刀 用于紧固或拆卸螺钉,有一字形和十字形两大类,每一类又有大小不同的型号。

6. 镊子 焊接时夹持导线或元器件。

7. 电工刀 用来切削电工器材,或切削绝缘导线的绝缘层。

8. 剪刀 用于剪切各种较薄的绝缘材料。

9. 试电笔 用来检查低压导体和电气设备外壳是否带电的辅助安全工具,其检测电压范围为 60~500V (指带电体与大地的电位差)。它由氖管、电阻、弹簧和笔身等部分组成。用试电笔测试带电体时,带电体经电笔、人体到大地形成通电回路,只要带电体与大地之间的电位差超过一定的数值,试电笔中的氖管就能发出红色的辉光。

试电笔使用时,氖管小窗朝向自己,以便于观察;应以手指触及笔尾的金属体,同时要

防止笔尖金属触及人体，以免触电。作成钢笔型式的试电笔如图 1-1 所示。

10. 电烙铁 是焊接的工具，它以电热丝作发热元件，常用的规格有 25W、45W、75W、100W 和 300W 多种，焊弱电元件时宜用 25W 和 45W 两种；焊强电元件时需用 45W 以上规格。电烙铁分内热式和外热式两种，发热元件分别装在烙铁头的内部或外层，其外形如图 1-2 所示。需要注意的是，对外热式烙铁，当新烙铁使用几次后，应将烙铁焊头取下，去掉与发热元件接触处的氧化层后再装上，以免焊头“烧死”在发热元件内。

电烙铁使用时，其金属外壳应通过接线柱妥善接地，以防漏电时触电。此外，还应为电烙铁准备烙铁架、焊锡丝和松香等。

11. 其他工具 电气实验中有时也使用一些钳工工具，例如钢锯、手电钻、钢锉、锤子、凿子等，这里不详细介绍。

四、基本焊接技术

在电气实验中，焊接工作是十分重要的，焊接质量的好坏，直接影响电路的工作性能。现将焊接技术的要点简介如下：

1. 对焊点的基本要求 用焊接方法连接

的接点，称作焊点。对焊点的要求是：具有良好的导电性和一定的机械强度，表面清洁有光泽，不应有毛刺、裂纹，焊点的大小要适当。

2. 焊料 目前市售的焊料多为焊锡丝，通常做成直径为 2~4mm 的细管，管中装有松香作助焊剂。常用焊锡丝的组成为锡 63%、铅 36.4%、铋 0.6%，其熔点为 190℃。

3. 助焊剂 金属表面常生成一层氧化膜，在焊接时会阻碍焊锡的浸润，影响焊点的质量。助焊剂可以破坏金属表面的氧化膜，防止继续氧化，有利于焊接。一般

用松香作助焊剂。在工业化生产中，也经常采用液体类助焊剂喷涂在印制板上，其配方如下：

配方一 松香 80g，酒精 500ml，三乙醇胺 2~3 滴。

配方二 松香 30g，酒精 100ml，三乙醇胺 0.5ml，溴化水杨酸 5~6g，丙烯酸清漆 10~12g。

电气实验室中禁止使用焊油、焊膏之类腐蚀性助焊剂（这类助焊剂只限于焊接铁制件）。

4. 电烙铁的使用 新烙铁初次使用时，或烙铁经长时间使用后烙铁头表面氧化发黑时，应该用锉刀锉掉烙铁头的氧化物，然后再通电升温。升温后先沾松香，再使烙铁头吸上一层焊锡，称为烙铁“上锡”。烙铁上锡后，即可进行焊接。

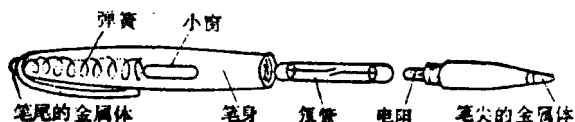


图 1-1 钢笔式低压电笔

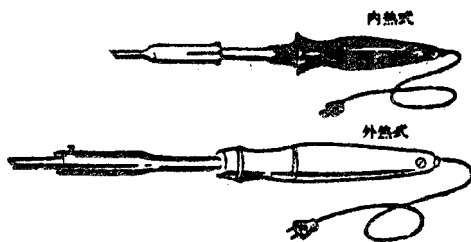


图 1-2 内热式与外热式电烙铁外形图

5. 焊接前的准备。

(1) 待焊接的导线端应该剥头、扭花，即用剥线钳去掉导线端的绝缘层，将多股导线捻成一股。待焊元器件的引线用刀具刮去表面氧化层，使引线露出金属本色（应该注意的是，有些晶体管和集成块引线及其他接插件，已经镀金或镀银处理，就不应作刮削处理了）。

(2) 浸锡。用带有焊锡的烙铁加热导线或元器件引线，并在松香块上来回移动，使引线或导线上均匀地镀上锡层。

(3) 根据焊点之间的距离，将元器件的引线折弯成所需要的形状。

6. 焊接方法

(1) 用烙铁头将被焊金属表面加热到焊锡熔化的温度。

(2) 将焊锡熔化并填充到被焊的金属表面及空隙中。

(3) 焊点焊好后移去电烙铁。

7. 注意事项

(1) 焊接时间要适当，从加热焊接点到焊料熔化再移去电烙铁一般在几秒钟内完成。时间太短则焊点达不到焊接温度，焊料未充分熔化，容易造成虚焊；时间太长焊点温度过高易损坏元器件，且助焊剂完全挥发失去助焊作用，使焊接质量差。

(2) 烙铁头温度要适当，一般将烙铁头放在松香块上，松香迅速熔化又不冒烟时的温度为宜。

(3) 焊料与助焊剂要适量，焊印制电路板时，焊料应包着引线、灌满连接盘为宜。

(4) 焊接点上焊料尚未凝固时，不应移动被焊导线或引线。

(5) 焊接时防止电烙铁烫坏周围导线和元器件；焊完后应剪掉多余的引线头。

(6) 焊接集成电路和场效应管时，一定要严格掌握温度和时间。同时在焊接前用试电笔检查电烙铁的外壳金属部分有无漏电或感应电存在，如有则将烙铁插头拔下，断开电源后利用余热焊接。

(7) 焊接怕热元器件时，可用镊子或尖嘴钳夹住元器件引线帮助散热。

焊接工作完成后，应检查有无虚焊、漏焊、错焊以及其他不合要求的现象。

五、印制电路板加工技术

在进行电气实验或产品试制时，常需要按设计的印制电路图形制作印制电路板。由于数量少，不可能采用工业化批量生产，这里介绍手工制板方法。

1. 裁板 将覆铜板按要求尺寸下料。

2. 复印 用复写纸将电路印制图形复印在覆铜板上，印制图形要预先进行设计。

3. 描图 将防腐蚀涂料用毛笔均匀地涂敷在复印的印制图形上，经过干燥形成防腐蚀保护层。

防腐涂料很多，例如虫胶片—酒精溶液、耐酸清漆—二甲苯溶液、沥青—甲苯溶液等，配制时应调成糊状，以便于涂敷。此外，油墨也可作为防腐涂料。

4. 腐蚀 将三氯化铁饱和水溶液置于瓷盘或塑料盘中，放入覆铜板进行腐蚀，未被涂料保护的铜箔被腐蚀掉。在腐蚀过程中可以搅拌或稍加热。

5. 清洗 腐蚀完毕取出印制板，用水洗净残液，晾干或烘干后，进行印制板打孔和机械加工；再用木炭沾水，擦洗覆盖在导电图形上的涂料和氧化层，直到导电图形光亮为止，再晾干或烘干。

6. 镀银 如果必要, 可将清洁干净的印制板放入硝酸银饱和水溶液中镀银。镀银后取出印制板, 用水洗净残液, 晾干或烘干。

7. 涂助焊剂 将印制板除插头部位外, 涂上一层松香酒精作助焊剂, 晾干后即可进行焊接。

§ 1-2 实验数据的误差

在实验过程中, 需要读取许多实验数据。每个被测量值有一个真实值, 简称为真值。在实际测量该被测量时, 由于受各种因素的影响, 例如测量仪器精度、测量方法、测量的环境条件、测量者的能力等, 测量值与真值之间不可避免地存在着差异。这种差异定义为测量误差。

一、测量误差产生的原因及减少误差的方法

测量误差产生的原因主要有三个方面:

1. 系统误差

实验时, 在规定的条件下对同一测量值进行多次测量时, 如果误差的数值保持恒定, 或误差按某种确定的规律变化, 则这类误差称为系统误差。系统误差可以理解为, 由于测量系统本身的缺陷造成的测量误差。

(1) 仪器误差 由于仪器本身的机械或电气性能不良, 或仪器使用不当、仪器未经很好校准等造成的误差。减少仪器误差的方法是预先用精度高一级的仪器对测量仪器进行校准, 确定其修正值, 以便测量结果中引入适当的补偿值以消除或减少仪器误差。

(2) 使用误差 指在使用过程中, 仪器和设备的安装、调整不当, 或使用不正确等造成的误差。例如把规定垂直安放的仪器水平安放, 未按规定时间对仪器进行预热等都会产生使用误差。为了减少或消除这种误差, 必须严格按操作规程使用仪器, 提高实验技能等。

(3) 个人误差 由于测量者本身的生理特点或固有习惯所带来的误差, 例如分辨能力的高低、读数的习惯等。为了消除或减少这类误差, 应提高实验者本身技能, 改变不正确的测量习惯, 改进测量方法等。

(4) 理论和方法误差 实验所依据的理论和公式的近似性, 或者实验条件和测量方法不能满足理论公式的要求等引起的误差。例如用伏安法测电阻时, 若直接以电流表和电压表读数之比作为测试结果, 而不考虑电表本身内阻的影响, 就会产生较大的系统误差。

2. 偶然误差 (又称随机误差)

在规定的测量条件下对同一量进行多次测量时, 如果误差的数值发生不规则的变化, 则称这种误差为偶然误差。偶然误差是由于各种偶然因素引起的误差, 例如外界干扰、测量者读数偏差等引起的误差就属于偶然误差。由于存在偶然误差, 使测量值有时偏大, 有时偏小, 如果测试的次数足够多, 则偶然误差平均值的极限就会趋近于零。因此, 消除偶然误差的方法是进行多次测量, 并取算术平均值作为测量结果。

3. 过失误差

过失误差是明显歪曲测量结果的误差。这种误差是由于测量方法不当、错读数字、计算错误等过失引起。通过分析, 确认是过失误差的测量数据, 应该予以剔除。

二、测量误差的几种表示方法

1. 绝对误差

如果用 x_0 表示被测量的真值, x 表示测量仪器的指示值, 于是绝对误差 Δx 定义为

$$\Delta x = x - x_0$$

由于真值 x_0 一般无法求得, 在实际应用中常以高一级标准仪表的指示值来代替。必须指出的是, 高一级标准仪表的指示值与 x_0 之间也有误差, 只是误差小一些而已。

绝对误差 Δx 的单位与测量值的单位相同, 它反映了测量值偏离真实值的大小和方向, 即反映了测量的精确程度。有了绝对误差, 真值可表示为 $x_0 = x \pm \Delta x$ 。

2. 相对误差

相对误差 γ 是绝对误差与被测真值的比值。用百分数表示, 即

$$\gamma = \frac{\Delta x}{x_0} \times 100\%$$

当 $\Delta x \ll x_0$ 时,

$$\gamma \approx \frac{\Delta x}{x} \times 100\%$$

相对误差是没有单位的, 它反映了测量结果的相对精度。有了相对误差, 真值可表示为 $x_0 = x (1 \pm \gamma)$ 。

三、直接测量值的最佳值和误差估计

1. 在测量条件相同的情况下进行多次测量, 用多次测量的算术平均值作为测量结果的最佳值, 取算术平均偏差作为测量的绝对误差。即

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i = \frac{1}{n} (x_1 + x_2 + \cdots + x_n)$$

$$\overline{\Delta x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |x_i - \bar{x}| = \frac{1}{n} (|x_1 - \bar{x}| + |x_2 - \bar{x}| + \cdots + |x_n - \bar{x}|)$$

因而, 测量结果应表示为

$$x = \bar{x} \pm \overline{\Delta x}$$

其意义为: 被测量 x 的最佳值是 $\bar{x}$, 在误差区间 $(\bar{x} - \overline{\Delta x}) \sim (\bar{x} + \overline{\Delta x})$ 范围内最大可能地包含了真值。

在许多情况下, 多次测量是不可能或没有必要的, 这时可用一次测量值作为测量结果的最佳值, 取仪器或仪表误差作为测量误差。即

$$x = x_{\text{测}} \pm \Delta x_{\text{仪}}$$

仪器误差通常标在仪器说明书中, 仪表误差直接用仪表准确度来表示。仪表准确度将在 § 1-4 中进行介绍。

四、间接测量值的误差估计

间接测量值是由直接测量值通过计算得到的。直接测量值本身存在误差, 间接测量值也必然存在误差, 称为误差的传播。

1. 和差的误差传播

设直接测量值分别为 $x_1 \pm \Delta x_1$ 和 $x_2 \pm \Delta x_2$, 间接测量值为 y , y 与 x 的函数关系为

$$y = x_1 + x_2 \text{ 或 } y = x_1 - x_2$$

则 $\Delta y = |\Delta x_1| + |\Delta x_2|$

即在和差的运算中, 间接测量值的绝对误差等于各直接测量值绝对误差的绝对值之和。

例：设函数关系为 $C=A-B$,

其中 $A=100.1\pm 0.2$ (mA)

$B=2.3\pm 0.1$ (mA)

则 $C=A-B=100.1-2.3=97.8$ (mA)

$\Delta C=|\Delta A|+|\Delta B|=0.2+0.1=0.3$ (mA)

最后的结果记为

$C=97.8\pm 0.3$ (mA)。

2. 积商的误差传播

设直接测量值分别为 $x_1\pm\Delta x_1$ 和 $x_2\pm\Delta x_2$, 间接测量值为 y , 其函数关系为

$$y=x_1x_2$$

则 $\Delta y=|x_1\Delta x_2|+|x_2\Delta x_1|$

用相对误差表示, 则为

$$\frac{\Delta y}{y}=|\frac{\Delta x_2}{x_2}|+|\frac{\Delta x_1}{x_1}|=|\gamma_2|+|\gamma_1|$$

对于商的运算, 上述相对误差公式同样成立。因此, 在积和商的运算中, 间接测量值的相对误差等于各直接测量值因子的相对误差绝对值之和。对于较复杂运算的误差传播, 这里不作介绍。

例：设函数关系为： $y=\frac{A^2B}{C}$,

其中, $A=15.2\pm 0.5$ (m)

$B=0.80\pm 0.01$ (kg)

$C=6.4\pm 0.1$ (kg)

则有 $y=\frac{A^2B}{C}=28.88$ (m²)

间接测量值 y 的相对误差为

$$\begin{aligned}\frac{\Delta y}{y} &= 2\frac{\Delta A}{A} + \frac{\Delta B}{B} + \frac{\Delta C}{C} \\ &= 2 \times \frac{0.5}{15} + \frac{0.01}{0.80} + \frac{0.1}{6.4} \\ &\approx 0.067 + 0.013 + 0.016 \\ &\approx 0.096 = 9.6\%\end{aligned}$$

y 的绝对误差为

$$\Delta y = y \frac{\Delta y}{y} = 28.88 \times 9.6\% = 2.8 \text{ (m}^2\text{)}$$

最后的结果记为

$$y = 29 \pm 3 \text{ (m}^2\text{)}$$

需要说明的是, 每一步的结果均应标明单位, 而相对误差是没有单位的。计算过程中应按有效数的运算法则进行运算。关于有效数的运算法则将在下一节进行介绍。

§ 1-3 实验数据的处理

一、有效数字的概念

假设在实验中测得的频率为 0.0234MHz ，其中末位数字“4”是在测量读数时估计出来的，因此称它为“欠准”数字；“欠准”数字左边的“2”“3”是准确数字，而最左边的两个“0”通过计量单位的变换是可以消除的（可写成 23.4kHz ）。显然准确数字和欠准数字对测量结果都是不可缺少的，它们统称为有效数字。数 0.0234 和 23.4 的有效数字均为 3 位。

有效数字是一个近似数，其最末位的“欠准”数字，可以是在测量读数时估读出来，也可以将“欠准”位后面的数字经四舍五入得到。需要指出的是在记录数据时，只应保留一个欠准数字。

在欠准数字中，要特别注意“0”的情况。例如测量某电阻数值为 $18.500\text{k}\Omega$ ，表明前面 1、8、5、0 是准确数字，最后一位“0”是欠准数字。如果改写成 $18.5\text{k}\Omega$ ，则变为前面 1、8 是准确数字，最后一位“5”是欠准数字。这两个数字是不同的数，它们反映了不同的测量精度。

如果用指数形式表示数据，例如 $18.50 \times 10^3\Omega$ ，其有效数字为 4 位， 10 的方幂前面的数字都是有效数字。

二、近似数的运算法则

前面已述，有效数字是一个近似数，下面介绍近似数的运算法则（即有效数的运算法则）。

1. 近似数相加减，所得结果的位数，通常只保留到各个已知数都有的最后一位为止。已知数中过多的位数，可以先四舍五入到这一位的下一位，再进行计算。

例：对 $7.35 - 2.478 - 0.03419 + 18.6$ 作近似数的加减运算

解：因为 18.6 只精确到十分位，所以结果只要保留到十分位，可以先把数位过多的各数分别四舍五入到百分位后计算，得出的中间结果也都保留到百分位。因此，

$$7.35 - 2.478 - 0.03419 + 18.6$$

$$\approx 7.35 - 2.48 - 0.03 + 18.6$$

$$= 23.44 \approx 23.4$$

2. 近似数相乘除，所得结果的有效数字的个数，通常只保留到与已知数中有效数字个数最少的一个相同。已知数中过多的有效数字，可以先四舍五入到比结果应保留的有效数字的个数多一个，再进行计算。

例：对 $(80.43 \times 1.05) \div (24 \times 7.146)$ 作近似数的乘除计算。

解：因为 24 只有两个有效数字，所以结果只要保留两个有效数字。可以先把有效数字过多的各数分别四舍五入到有三个有效数字后计算，得出的中间结果也都保留三个有效数字。因此

$$(80.43 \times 1.05) \div (24 \times 7.146)$$

$$\approx (80.4 \times 1.05) \div (24 \times 7.15)$$

$$\approx 84.4 \div 172 \approx 0.491 \approx 0.49$$

3. 近似数平方或开平方，所得结果的有效数字的个数，通常只保留到与底数或被开方数的有效数字的个数相同位数。

例， $12.8^2 = 12.8 \times 12.8 \approx 164$

$$\sqrt{0.635} \approx 0.797$$

4. 近似数的混合计算，仍按照运算顺序进行计算，计算过程中得出的中间结果，一般要

比按照前面规则进行近似计算应保留的数字多一位。

5. 近似计算的注意事项

(1) 在进行计算时，首先要看题中所给的数是近似数还是准确数。近似数用近似计算法则进行计算，准确数则用一般方法进行计算。

(2) 上述法则中所说的近似计算保留数位的方法，只是在一般情况下通常采用的方法，在实际问题中，也可以根据具体情况，比上述法则所说的多保留或少保留一位数字。

(3) 在近似计算中，由于保留数位的不同或者计算次序的不同，得数也可能稍有不同，但都应看作是是正确的。

三、实验数据的处理方法

实验数据除按有效数字的法则正确取舍、正确运算之外，还需要将实验数据进行整理和分析，从中得出实验的最后结果并寻找出实验规律。下面介绍几种常用的实验数据处理方法。

1. 列表法

列表法就是将一组有关的实验数据和计算过程中的数值按照一定的形式和顺序列成表格。列表时要注意：

- (1) 表格设计要合理，便于记录、运算和检查。
- (2) 表中涉及的各物理量的符号、单位要交待清楚，而且还要注明实验条件等。
- (3) 表中的直接测量值和最后结果应正确地反映测量误差，有效数字的取舍要正确。

例如表 1-1 是用伏安特性法测线性电阻实验时的表格，测试数据和计算结果均可在表格中反映出。

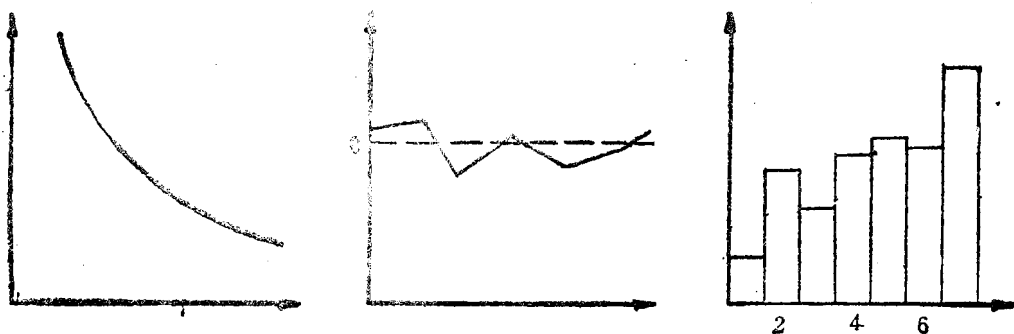
表 1-1

测量次数	1	2	3	4	5	6	7
I (mA)							
V (V)							
R (k Ω)							
平均值							

2. 作图法

作图法是在坐标纸上用图形描述出各物理量之间关系的一种方法。这种方法可以形象直观地表示出物理量的变化规律，便于寻找实验规律和总结经验公式。实验中常遇到的图形大致有三类：

- (1) 曲线图：用曲线表示在一定条件下，一个物理量与另一个物理量之间的依赖关系 (图 1-3 (a))。
- (2) 折线图：两个物理量的函数如果不规则，常把相邻观测点用直线联结而得到折线图。仪器的校正曲线常画成折线图 (图 1-3 (b))。
- (3) 直方图：在统计图表中常用直方图来表示物理量的变化情况 (图 1-3 (c))。



(a)

(b)

(c)

图 1-3

作图时应注意如下几点：

(1) 一般是将数据先列表，再作图。选择适当的坐标纸，按作图要求标明物理量、单位、测试条件等。坐标原点不一定是变量的零点，横坐标和纵坐标的比例要适当。

(2) 在坐标纸上描出测试点时应当用符号“+”或“×”标出。把各测试点连接成直线或曲线时，并不要求直线或曲线通过所有的测试点，而应剔除偏差较大的点。

(3) 在曲线上求斜率时，应减小误差，用来计算的点 (x_1, y_1) 和 (x_2, y_2) 不应取得太近，也不应取直接测量点，因为这将失去作图取平均值的意义。斜率可用下述公式求得。

$$k = \frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1}$$

§ 1—4 常用仪表简介

常用仪表有磁电式仪表、电磁式仪表和电动式仪表几种，下面分别进行介绍。

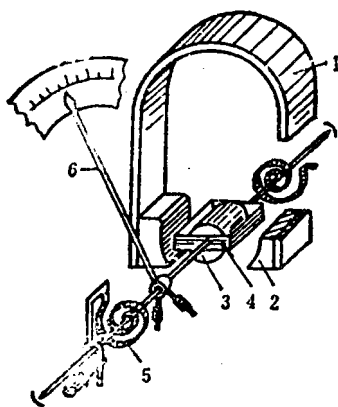
一、磁电式仪表

在进行直流电流和直流电压的测量时，都采用磁电式仪表，它的结构如图 1—4 (a) 所示。其固定部分由永久磁铁 1 和处在磁极 2 中间的圆柱形铁芯 3 组成。可动部分由绕在铝框上的矩形线圈 4、支持在轴承上的转轴和游丝 5、指针 6 等部件组成。当矩形线圈通过直流电流时，电流所产生的磁场和永久磁铁的磁场相互作用，如图 1—4 (b) 所示，使线圈绕转轴偏转，偏转角度与通过线圈的电流成正比。

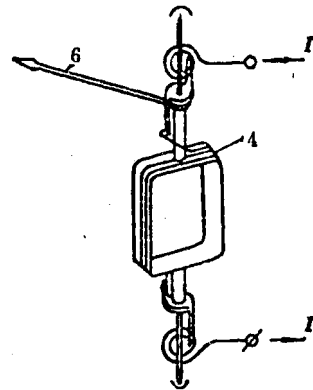
磁电式仪表具有准确、灵敏、功耗小和刻度均匀等优点。因此，在电子测量中获得广泛应用。它不仅可以直接用于电流的测量，而且在电子仪器上可用作指示器。在磁电式仪表中加上整流装置，还可以用于交流电量的测量。

二、电磁式仪表

在交流电流和交流电压的测量中，通常采用电磁式仪表，它的实际结构如图 1—5 所示。固定部分由圆形固定线圈 1 和装在线圈内部的弧形定铁片 2 所组成。可动部分由装在转轴 3



(a)



(b)

图 1-4 磁电式仪表机构

(a) 结构图 (b) 作用图

1—永久磁铁；2—磁极；3—圆柱形铁芯；4—矩形线圈；5—游丝；6—指针

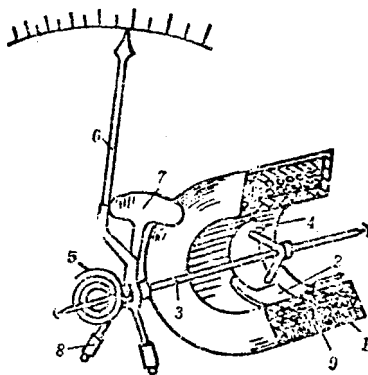


图 1-5 电磁式仪表机构

1—固定线圈；2—定铁片；3—转轴；4—动铁片；
5—弹簧游丝；6—指针；7—阻尼片；

8—平衡锤；9—磁屏蔽

上的动铁片 4、指针 6、弹簧游丝 5 等部件组成。当线圈通入电流时，处在线圈内部的定铁片和动铁片同时被磁化，两铁片因极性相同而互相排斥，动铁片被排斥而带动转轴使指针偏转，指针的偏转角近似地与通过线圈的电流的平方成正比。

电磁式仪表从结构原理上来说，既可以用于交流电的测量，也可以用于直流电的测量。但由于电磁式仪表接交流电时，动片已被交变电流磁化，没有磁滞误差，仪表的偏转取决于平均转矩。如接直流电时，这种磁滞误差可能很大，而且不稳定。所以说，电磁式仪表更适用于交流电流和交流电压的测量。

三、电动式仪表

交流电路功率的测量可使用电动式仪表。电动式仪表的作用原理与磁电式仪表有些相似，不过在电动式测量机构中用来产生磁场的不是永久磁铁而是两个完全相同的固定线圈，因而电动式仪表由固定线圈、活动线圈和转动机构组成，如图 1-6 所示。

当固定线圈中通过电流 I_1 时，线圈内部便产生磁场，这个磁场与流过可动线圈电流 I_2 相互作用的结果，便产生驱动力矩使可动线圈和指针偏转。偏转角的大小与流过固定线圈电流 I_1 及流过可动线圈的电流 I_2 的乘积成正比，并且与两电流之间的相位差有关。