

大学物理实验

阎旭东 徐国旺

主编



科学出版社

www.sciencep.com

大学物理实验

阎旭东 徐国旺 主编

科学出版社

北京

内 容 简 介

本书根据教育部《高等工科大学物理实验课程教学基本要求》,结合理工院校专业设置特点和实验室一般情况,在多年教学实践的基础上编写而成。内容包括误差及数据处理、力学、热学、电磁学、光学、近代物理及计算机数值模拟物理实验等方面的38个实验项目。按照60学时的教学计划,依专业特点和开放式实验教学的要求,每个学生可选做20个实验。

本书注重实验原理,教学实践性强,讲究开放式实验教学,是一本理想的理工科大学物理实验课教材,也是相关教学、研究和实际工作者的参考读物和实验指南。

图书在版编目(CIP)数据

大学物理实验/阎旭东,徐国旺主编. —北京:科学出版社,2003.8

ISBN 7-03-012088-4

I. 大… II. ①阎…②徐… III. 物理学-实验-高等学校-教材
IV. O4-33

中国版本图书馆CIP数据核字(2003)第072962号

责任编辑:张颖兵/责任校对:王望荣

责任印制:高 嵘/封面设计:深白广告

科学出版社出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

武汉大学出版社印刷总厂印刷

科学出版社出版 各地新华书店经销

*

2003年8月第 一 版 开本:787×1092 1/16

2003年8月第一次印刷 印张:15 3/4

印数:1—8000

字数:360 000

定价:21.80元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

《大学物理实验》编委会

主 编	阎旭东	徐国旺		
副主编	陈之宜	马成长	别业广	陈义万
编 委	杨 昕	杨 涛	廖耀发	张培林
	闵 锐	吕 桦	谭保华	甘 路
	杨晓艳	江铭波		

前 言

本书是根据教育部颁发的《高等工科大学物理实验课程教学基本要求》，并结合理工科院校专业设置特点和一般物理实验室设备仪器的实际情况，在多年教学实践的基础上编写而成的。内容包括误差及数据处理、力学、热学、电磁学、光学、近代物理及计算机数值模拟物理实验等方面的38个实验项目。按照60学时的教学计划，结合各专业的特点和开放式实验教学的要求，每个学生可以选做20个实验。

开设大学物理实验课的目的：通过对物理实验现象的观测和分析，学习物理实验知识，加深对物理学原理的理解；培养学生从事科学实验研究的初步能力；养成学生实事求是的科学态度；培养学生严谨踏实的工作作风，勇于探索、坚韧不拔的钻研精神及团结协作的优良品德。本书在编写上注重实验原理的论述，对实验项目中主要仪器的结构、性能、调节和使用作了较详细的叙述，以适应开放式实验教学的需要。

本书包含了大学物理教学和大学物理实验教学一线骨干教师多年从事教学实践所积累的经验，是教学同仁们智慧的结晶。本书既涵盖了大学物理实验应有的知识点，是开放式实验教学的总结，教学实践性及操作性强；又自成体系，在一些知识点和教学点上不乏创意和独到见解。是一本理想的理工科大学物理实验课教材，也是相关教学、研究和实际工作者的参考读物和实验指南。

本书由阎旭东和徐国旺任主编，陈之宜、马成长、别业广和陈义万任副主编。本书绪论由张培林编写；第一部分由江铭波编写；第二部分的第一、二、三、四、五节及实验一由廖耀发编写；第二部分的第六节、实验十二、三十五、三十六、三十七及第五部分的第一、二、三、四节由马成长编写；实验二、三、五、十三、二十、二十一及二十三由徐国旺编写；实验四、二十九及三十八由闵锐编写；实验六、七、八及十四由阎旭东编写；实验九由杨昕编写；实验十、三十及三十一由甘路编写；实验十一、二十四及二十五由吕桦编写；实验十五、十六、十九、三十三及三十四由别业广编写；实验十七及十八由陈之宜编写；实验二十二由谭保华编写；实验二十六、二十七、二十八及三十二由陈义万编写；附录由杨晓艳编写。全书由阎旭东、徐国旺统稿、定稿。

由于水平有限，时间仓促，编者的初衷不一定能完全实现，缺点和不足在所难免，诚望读者批评指正。

编者

2003年6月

目 录

前 言	(i)
绪 论	(1)
第一部分 常用物理实验仪器及实验基础知识	(3)
一、物理实验室常用仪器	(3)
二、电磁学实验基础知识	(11)
三、光学实验基础知识	(11)
第二部分 误差分析及数据处理	(13)
一、测量与误差	(13)
二、系统误差与随机误差	(15)
三、不确定度	(18)
四、有效数字的概念	(23)
五、数据处理	(26)
六、实验结果的计算机处理	(29)
第三部分 基础物理实验	(36)
实验一 长度和密度的测量	(36)
实验二 气垫导轨上测滑块的速度和加速度	(44)
实验三 弹性碰撞和完全非弹性碰撞	(50)
实验四 用三线扭摆法测定物体的转动惯量	(53)
实验五 液体表面张力系数的测量	(57)
实验六 液体的黏滞系数	(63)
实验七 波在弦线上的传播的研究	(66)
实验八 重力加速度的测量	(69)
实验九 示波器的原理及使用	(75)
实验十 超声波在空气中的传播	(82)
实验十一 杨氏模量的测量	(87)
实验十二 静电场的模拟	(92)
实验十三 电位差计的校准和使用	(99)
实验十四 滑线变阻器制流电路和分压电路的研究	(106)
实验十五 用电桥法测量电阻	(112)
实验十六 灵敏电流计的研究	(118)
实验十七 电子射线束的电偏转	(124)
实验十八 电子射线束的磁偏转	(128)
实验十九 薄透镜焦距的测量	(132)
实验二十 分光计的结构与调整	(137)

实验二十一	用分光计测量三棱镜的折射率	(144)
实验二十二	用牛顿环测量透镜的曲率半径	(150)
实验二十三	用双棱镜测量光波的波长	(156)
实验二十四	阿贝折射仪的使用	(161)
实验二十五	显微镜和望远镜放大率的测量	(164)
第四部分	近代物理实验	(168)
实验二十六	迈克尔逊干涉仪的调整和使用	(168)
实验二十七	密立根油滴实验	(173)
实验二十八	光电效应法测量普朗克常数	(179)
实验二十九	电子荷质比的测量	(184)
实验三十	弗兰克-赫兹实验	(189)
实验三十一	霍尔效应	(195)
实验三十二	单缝衍射	(201)
实验三十三	光栅的衍射	(209)
实验三十四	光的全息实验	(211)
第五部分	计算机模拟物理实验	(215)
一、数值模拟的基本方法		(215)
二、数值计算中误差的传播		(216)
三、数值计算中的若干原则		(216)
四、数值计算中的单位选择		(217)
实验三十五	Mathematica 科学计算基础实验	(219)
实验三十六	Lorenz 动力系统实验研究	(224)
实验三十七	Logistic 映射中的混沌现象研究	(228)
实验三十八	蒙特卡罗方法的应用	(233)
附 录		(238)
一、中华人民共和国法定计量单位		(238)
二、常用数表及常数		(241)

绪 论

一、物理实验课的重要性

物理学是研究物质的结构、相互作用及运动规律的学科,是自然科学中最活跃的学科之一,它对人类社会的发展起到了极大的推动作用。物理规律的发现,物理理论的建立,都是以严格的科学实验为基础的。因此,掌握先进的实验技术,提高进行实验研究的能力,具有十分重要的意义。

随着科学技术的迅猛发展,作为理工院校培养的学生,仅有一定的基础理论知识是远远不够的,还必须在不断地探索、实验过程中,提高自己独立从事科学实验和应用科学技术的能力,以适应现代社会发展的要求。

《大学物理实验》是面向理工科各专业开设的一门实践性必修课程,是对理工科学生进行工程技术教育的基础性课程。它对树立学生科学的实验态度、培养学生实验动手能力、提高学生综合素质具有其他学科不可替代的重要作用。

二、物理实验课的教学目的

物理实验课的教学目的主要有以下几点:

- 1) 让学生掌握物理实验的基本理论和基本方法,初步培养学生的实验研究能力。
- 2) 使学生熟悉各种常用仪器和量具的结构、性能、调节方法及使用方法,培养其正确进行实验操作、准确进行测量的能力。
- 3) 让学生掌握正确处理实验数据、分析和估算实验误差的基本理论和方法,培养学生提交能正确反映实验过程和结果的实验报告的能力。
- 4) 培养学生严肃认真、实事求是、一丝不苟的科学作风。

此外,通过物理实验,培养学生理论联系实际的作风和坚忍不拔的钻研精神,提高学生分析、解决实际问题 and 科技写作的能力。

三、物理实验课的教学环节

物理实验课教学包括实验预习、实验操作和完成实验报告三个基本环节。

1. 实验预习

实验预习是实验成功与否的先决条件。要求在课前认真阅读相关实验的全部内容,明确实验的目的,理解实验原理,熟悉仪器性能,弄清要观察哪些现象、测量哪些物理量,用什么方法和仪器进行测量。进一步完善实验步骤,整理出实验要点,写出预习报告。

实验预习报告主要包括实验目的、仪器、原理、内容、步骤以及数据记录表格等几方面内容。

2. 实验操作

实验操作是实验课的中心环节。学生根据实验讲义的要求,在教师的指导下,自己独立完成实验操作的全过程。

学生进入实验室,首先要做好两项工作:

第一项工作是清点仪器。对照仪器项目检查实验桌上的仪器设备,如有短缺及损坏的情况,应及时向教师反映,予以补充或更换。实验中如有丢失或损坏的情况,应及时向教师报告,并填写事故报告单;

第二项工作是认识仪器。通过充分地观察,了解仪器的结构、特性、调节方法和使用方法。然后进行仪器的安装或调试,电路的连接和光路的调整等,为测量实验数据做好充分的准备。

测量实验数据时,要注意是否满足实验条件,是否正确执行操作规程,是否采用正确的读数方法,是否准确记录实验数据等等。实验中要实事求是,态度严肃认真,严格按操作规程进行。对实验中出现的問題应认真分析,慎重处理,必要时请教指导教师。

实验完成后,把实验过程中记录的原始数据呈交指导教师审阅,经指导教师认可后,学生才能结束实验。学生应整理好仪器,清理干净桌面方可离开实验室。值日生要负责打扫实验室卫生。

3. 实验报告

实验报告是对实验过程的全面总结,由学生在课后独立完成。

实验报告的内容除了包括预习报告的所有内容外,还包括数据记录、数据处理、误差、误差分析、实验结果或结论以及问题与讨论等等。

第一部分 常用物理实验仪器及实验基础知识

一、物理实验室常用仪器

1. 电源

电源分交流电源和直流电源 2 种。

(1) 交流电源(AC)

实验室常用的交流电为市电。它有单相、三相之分,可通过调压变压器(亦称自耦变压器)获得连续可调的交流电压。单相电压为 220V,频率为 50Hz。

(2) 直流电源(DC)

实验室普遍采用直流稳压电源和干电池作为直流电源。在输出电压符合要求的情况下,要注意电流是否在额定范围之内,电流过载,将导致电源急剧发热而损坏。稳压电源具有过载保护功能,使用中若短路或超负载,输出自动回零,排除过载原因后,重新开启电源,输出会恢复正常。

2. 标准电池

标准电池可以提供准确而稳定的电动势,是直流电动势的标准器,不能作为电源来使用。标准电池是汞镉电池。按形状有 H 型封闭式和单管封闭式, H 型封闭式标准电池结构如图 1-1 所示。按硫酸镉溶液的浓度又分为饱和式和非饱和式 2 种。饱和式的电动势稳定,但对温度的变化敏感。若 E_{20} 表 20℃ 时的电动势,则 t ℃ 时的电动势由下式进行修正:

$$E_t = E_{20} - 4 \times 10^{-5}(t - 20) - 10^{-6}(t - 20)^2 \text{V}$$

E_{20} 由生产厂家按产品级别给出(通常 $E_{20} \approx 1.01865 \text{V}$)。不饱和式不必进行温度校正。标准电池按准确度分为 I、II、III 3 个等级。I、II 级标准电池在 1min 之内的最大允许电流为 $1\mu\text{A}$,内阻不大于 1000Ω , III 级的最大允许电流为 $10\mu\text{A}$ 内阻不大于 600Ω 。

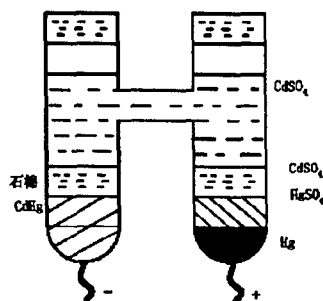


图 1-1 H 型封闭式标准电池

使用标准电池,电流不允许超过最大允许电流($1\sim 10\mu\text{A}$),接通标准电池的时间应尽可能的短暂,绝对不允许当电源使用,也不允许用伏特表(或万能表的伏特挡)测量端电压,不许倾斜、倒置、振动及烘烤。

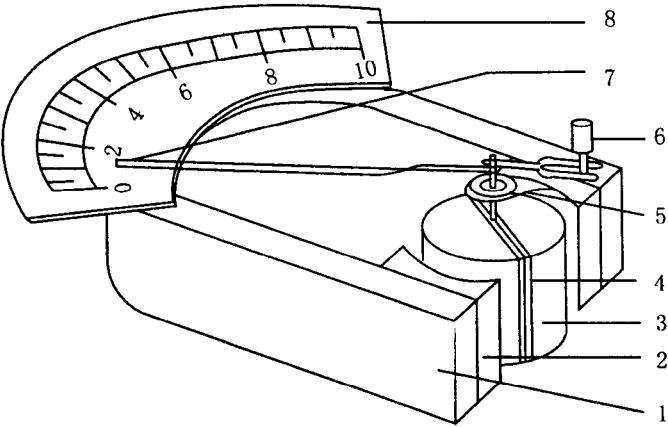
3. 电表

电流表和电压表的表头,绝大多数使用磁电式电表。因此只简要介绍这类电表。

磁电式电表的结构如图 1-2 所示。线圈置于永久磁铁和铁芯之间所形成的固定磁场中,整个线圈由轴承系统支撑,可绕其轴转动。线圈的端部分别与一对相反放置的螺旋状游丝相连。这对游丝的另一端与测量机构的固定部分相连,是用来产生反抗力矩的。同时也起着把电流引向线圈的作用。线圈轴的外端装有指针,从有分度的刻度盘上可以看出它的偏转程度。当有电流通过转动线圈时,线圈在磁场力的作用下发生转动,其所受的转动力矩为

$$M=nBSI$$

式中, n 为线圈匝数; S 是线圈的面积; B 是间隙中磁感应强度。



1. 永久磁铁 2. 极掌 3. 圆柱形铁心 4. 线圈 5. 游丝 6. 调零螺杆 7. 指针 8. 刻度盘

图 1-2 电磁式电表

当线圈转动 θ 角时,在平衡状态下,与线圈联动的指针就在仪表面上示出某刻度的位置,此时有

$$\theta = \frac{nBS}{D} \cdot I = kI$$

式中 D 为游丝的扭转系数。线圈偏转的角度和通过线圈的电流 I 成正比,这就是磁电式仪表读数刻度盘上的刻度呈线性分布的依据。比例系数 $k=nBS/D$ 为该仪表的电流灵敏度,其物理意义表示通过单位电流时仪表所偏转的角度。

表头的两端并联分流电阻,构成电流表,串联分压电阻,构成电压表。

各种电表按仪器误差的大小分为 0.1, 0.2, 0.5, 1.0, 1.5, 2.5 和 5.0 等 7 个等级。

各电表的量程为 A_m (即所用挡次的满刻度值),准确度等级为 k ,则电表指示的任意测量值的最大误差(系统误差)为 $\Delta A = \pm A_m \cdot k\%$ 。

电表使用方法及注意事项:

1) 注意正确联接电表。电流表必须串联在待测电路中,电压表必须与待测电压的电路并联。

2) 注意选择合适的量程。根据待测电流或电压的大小,选择合适的量程。若量程太小,过大的电流或电压会将电表损坏;量程过大,则指针偏转太小,使读数不准确。

3) 注意电表的极性。使用直流电表,必须注意电表的正负极。

4) 注意电表的安放位置。 $\perp$ ($\uparrow$) 为垂直放置; $\square$ ($\rightarrow$) 为水平放置; $\angle$ 为倾斜放置。

5) 注意避免读数视差。为了减小视差,读数时必须使视线垂直于刻度面,精密电表刻度槽下装有反光镜,读数时应使指针与它镜中的像重合。

6) 注意读出有效数字。

4. 检流计(灵敏电流计)

指针式检流计主要用于检测微小直流电流,它具有较高的灵敏度。它的特点是指针零点在刻度盘中央,便于测出不同方向的电流,常用于指示电路平衡。它的面板如图 1-3 所示。

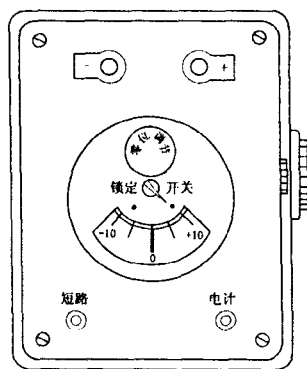


图 1-3 指针式检流计面板示意图

指针式检流计的主要指标有:

1) 检流计常数。指针每偏转 1 小格时,流过偏转线圈的电流强度。通常用“A/小格”作单位。检流计常数越小,则检流计灵敏。

2) 内阻。检流计内部直流电阻,以 R_g 表示。

指针式检流计的使用方法如下:

1) 首先将检流计的接线柱端钮按“+”、“-”标志正确接入电路。

2) 将小旋钮移向白色圆点位置,使指针处于自由摆动状态。并用零位调节器将指针调正零位。

3) 按下“电计”按钮,检流计即被接入电路。如需将检流计长期接入电路时,可将“电计”的按钮按下后转动一角度。

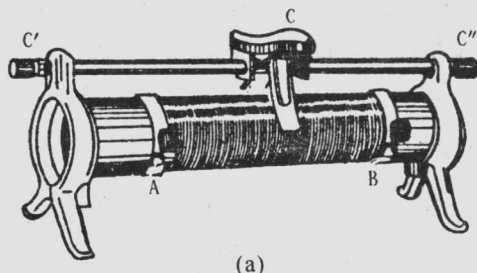
4) 若使用中指针不停地摆动,待指针通过中间零点位置时,按一下“短路”按钮马上松开,指针便立即停止。

5) 检流计应用完毕后必须将“电计”和“短路”按钮放松,并将小旋钮移向红色圆点位置,将指针锁住。

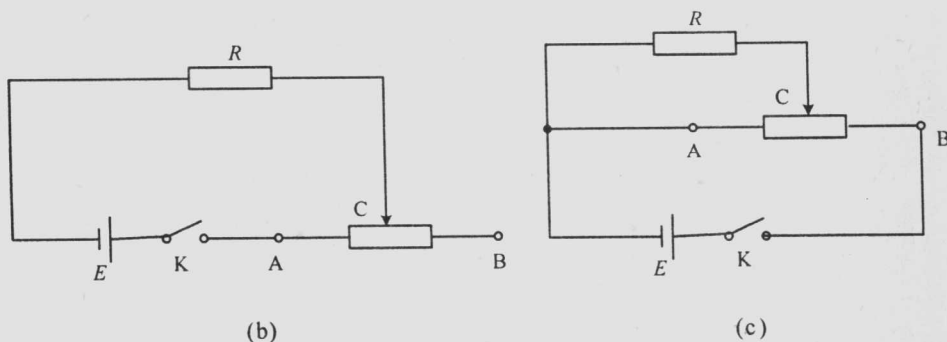
5. 电阻

(1) 滑线式变阻器

滑线式变阻器如图 1-4(a) 所示, 其阻值可以线性地连续改变。它是将涂有绝缘层的电阻丝绕在长直瓷管上, 其 2 端固定在接线柱 A、B 上制成的。滑头 C 与电阻丝紧密接触, 它滑动时能改变引出电阻值的大小。



(a)



(b)

(c)

图 1-4 滑线式变阻器

滑线式变阻器在电路中有 2 种用法：

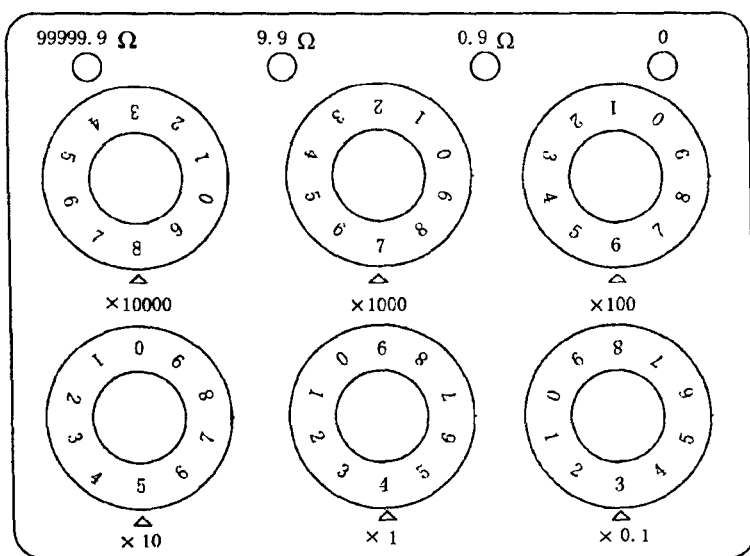
1) 制流器。将滑线式电阻接成如图 1-4(b) 所示的电路, 即构成制流器, 可用来改变电路中电流的大小。

2) 分压器。其接法如图 1-4(c) 所示, 用来改变电路中电压的大小。

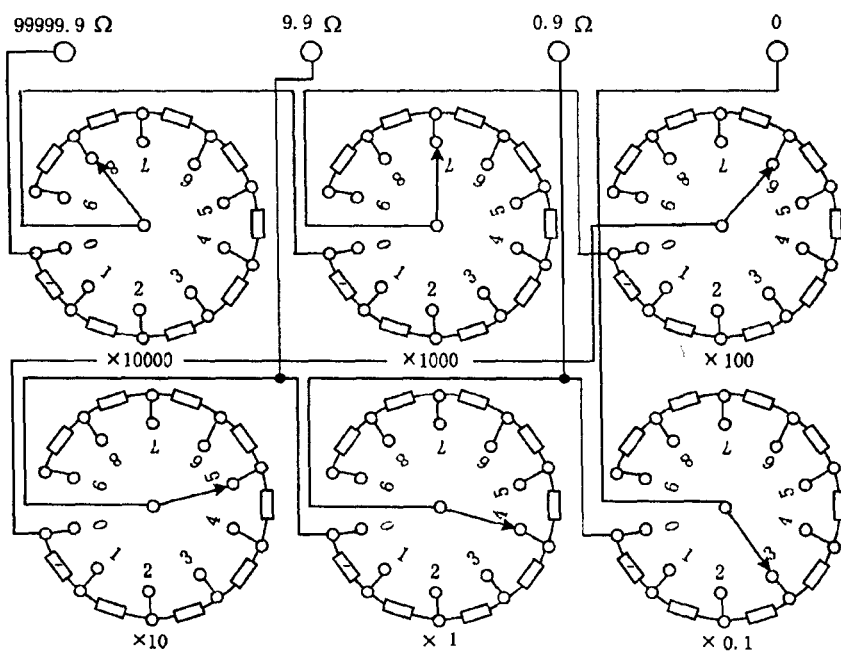
(2) 旋转式电阻箱

旋转式电阻箱由数组电阻串联而成, 每组由 9 个等值的电阻线圈组成。改变各旋钮的位置, 可以得到不同的阻值。

图 1-5 所示为常用的 ZX21 型旋转式电阻箱, 它的阻值准确, 可作为标准电阻用。其最大电阻可达 99999.9Ω , 由“0”与“99999.9”2 个接线柱引出。若电路中仅需“ $0\sim 9.9\Omega$ ”或“ $0\sim 0.9\Omega$ ”, 则分别由“0”与“9.9”或“0”与“0.9”2 个线柱引出。这样可以避免电阻箱其余部分的接触电阻和导线电阻对低电阻的附加误差。这是种 6 旋钮电阻箱, 6 个旋钮分别控制十分之一位 ($\times 0.1$)、个位 ($\times 1$)、十位 ($\times 10$)、百位 ($\times 100$)、千位 ($\times 1000$) 和万位 ($\times 10000$) 的电阻值。



(a) 面板图



(b) 内部线路示意图

图 1-5 旋转式电阻箱

电阻箱指示的阻值是各旋钮指示值之和。例如： $\times 10000$ 位挡的旋钮指示为 8， $\times 1000$ 挡指示为 7， $\times 100$ 挡指示为 6， $\times 10$ 挡为 5， $\times 1$ 挡为 4， $\times 0.1$ 挡为 3，则电阻箱指示的阻值

为 87654.3Ω 。

根据标准,电阻箱准确度等级分为 0.01,0.02,0.05,0.1,0.2,0.5 和 1.0 等 7 个等级。电阻箱的仪器误差,通常由下面的公式计算:

绝对误差
$$\Delta R_{\text{仪}} = \pm (Ra + bm)\%$$

相对误差
$$\Delta R_{\text{仪}}/R = (a + b \frac{m}{R})\%$$

式中, a 为电阻箱的准确度等级; R 为电阻箱所示的值; b 是与准确度等级有关的系数; m 是所使用的电阻箱的旋钮数。

使用电阻箱时,为确保其准确度,不得超过其额定功率或最大允许电流。不能使电阻值为零。已免损坏其他仪表。当遇到电阻由 90Ω 变为 100Ω 时,应先将 $\times 100$ 拨到 1 处,然后再将 $\times 10$ 挡拨至 0。

6. 常用光源

能够发光的物体统称为光源。实验室中常用的是将电能转换为光能的光源——电光源,常见的有热辐射光源、气体放电光源和激光光源 3 类。

(1) 热辐射光源

白炽灯和卤素灯是常用的热辐射光源。

(2) 气体放电光源

使电流通过气体(包括某些金属蒸气)而发光的光源称为气体放电光源。其中钠光灯和汞灯是实验室中最常用的单色光源。

钠光灯结构如图 1-6 所示。在额定电压(220V)下,钠光灯管壁温度升至约 260°C 时管内钠蒸气压约为 $3 \times 10^{-3}\text{Pa}$,发出波长为 589.0nm (纳米)和 589.6nm 两种单色黄光最强,可达 85%。而其他几种波长的光(818.0nm 和 819.5nm 等),仅有 15%。因此,在一般应用时,可以 589.0nm 和 589.6nm 的平均值 589.3nm 作为钠光灯的波长值。

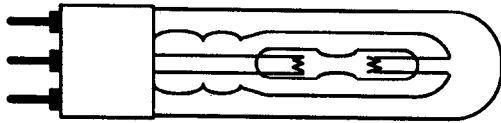


图 1-6 钠光灯

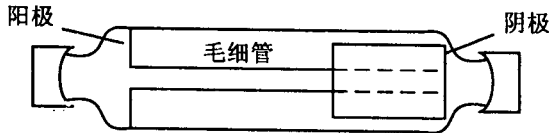


图 1-8 氦氖激光管

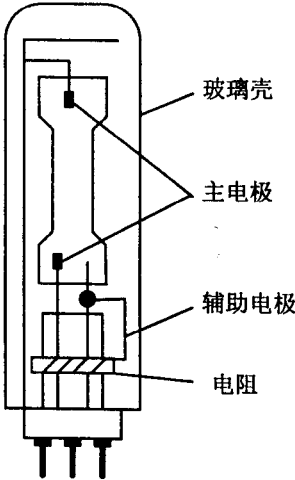


图 1-7 汞灯

汞灯结构如图 1-7 所示。汞灯可按蒸气压的高低,分为低压汞灯、高压汞灯和超高压汞。低压汞灯最为常用,其电源电压与管端工作电压分别为 220V 和 20V,正常点燃时发出青紫色光,其中主要包括 5 种单色光,它们的波长分别是 579.0nm(黄)、577.0nm(黄)、546.1nm(绿)、435.8nm(蓝)、404.7(紫)。

使用钠光灯和汞灯时,灯管必须与一定规格的镇流器串联后才能接到电源上去,以稳定工作电流。点燃后通常要预热 3~4 分钟才能正常工作。熄灭后也需冷却 3~4 分钟才可重新开启。

(3) 激光光源

激光是一种亮度极高,单色性、方向性极好,空间相干性和时间相干性都很高的光。激光器的发光原理是受激发射而发光。激光器的种类很多,如氦氖激光器、氦镉激光器、氩离子激光器、二氧化碳激光器、红宝石激光器等。

实验室中常用的激光器是氦氖(He-Ne)激光器,它由激光工作物质(如图 1-8 所示的激光管中的氦氖混合气体),激励装置和光学谐振腔 3 部分组成,氦氖激光器发出的光波波长为 632.8nm,输出功率在几毫瓦到十几毫瓦之间。多数氦氖激光管的管长为 200~300mm,且 2 端加有高压(约 1500~8000V),操作时应严防触及,光波能量集中,故切勿迎着激光束直接观看激光,否则未扩束的激光将造成人眼视网膜的永久损伤。

表 1-1 电路中常用电器元件的符号

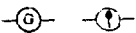
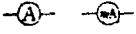
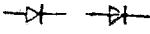
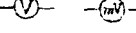
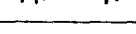
名 称	符 号	名 称	符 号
电 流 计		变 压 器	
电 流 表		二 级 管 (晶 体)	
电 压 表		三 级 管 (晶 体)	
直 流 电	— DC	指 示 灯	
交 流 电	~ AC	单 刀 单 掷 开 关	
交 直 流 两 用	≈	双 刀 单 掷 开 关	
电 源、电 池		双 刀 双 掷 开 关	
电 容		接 地	
电 阻		联 接 线 路	
可 变 电 阻		不 联 接 线 路	
电 感 线 圈			

表 1-2 常见电气仪表盘面上的标记符号及其意义

	名 称	符 号	意 义		名 称	符 号	意 义
电 表 类 型	磁电式		表示电表的基本结构	放置 方向	电表直放	⊥或↑	表示电表表面放置的方向
	整流式				电表平放	┌ 或 →	
	热偶式				电表与水平 60°	∠60°	
	电子管式			高压及绝缘	高压⚡警戒		电表能经受 50Hz、 2kV 交流电压, 历时 1min 的绝缘强度试验
	晶体管式				耐压 2kV		
	电动式				☆	☆	
	电磁式 (铁动式)				耐压 500V	☆	
电 表 级 别	0.1 级	⓪.1	一般作标准用表	防外 磁场 等级	磁电式一级 防外磁场		在 5T 外磁场影响下, 电表指示数的变化一级 不超过量程的百分 比; 一级±0.5%; 二级±1.0%; 三级±2.5%; 四级±5.0%
	0.2 级	⓪.2			二级防外磁场		
	0.5 级	⓪.5	一般测量或指示数值 用		三级防外磁场		
	1.0 级	①.0			四级防外磁场		
	1.5 级	①.5		A 组仪表		一般仪表, 通常不标 符号在 0~±40℃条 件下工作	
	2.5 级	②.5			B 组仪表		在 -20~+50℃条 件下工作
	5.0 级	⑤.0			C 组仪表		在 -40~+60℃条 件下工作
电 流 种 类	直 流	—	表示电表可测的电学 量类型	工作 环境	热型仪表		在 -10~+50℃, 湿 度不大于 98%条 件下使用
	交流(单相)	~					* A、B、C 三组仪表使 用时相对湿度都低 于 95%
	交直流两用	≈					
	三相交流	≈					