

电磁学

DIANCIXUE SHIYAN JIAOXUE YU YANJIU

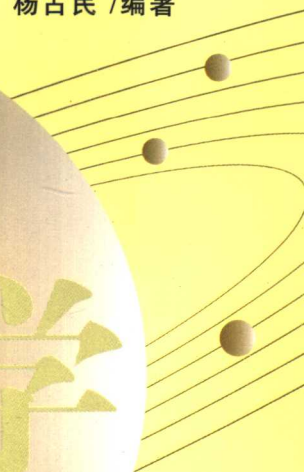


实验教学与研究

杨向东 杨占民 / 编著



电磁学



贵州科技出版社



电磁学

DIANCIXUE SHIYAN JIAOXUE YU YANJIU

实验教学与研究



杨向东 杨占民 / 编著



电磁学



贵州科技出版社

图书在版编目(CIP)数据

电磁学实验教学与研究/杨向东,杨占民编著. —贵阳:
贵州科技出版社,2007.6

ISBN 978 - 7 - 80662 - 541 - 5

I. 电… II. ①杨…②杨… III. 电磁学—实验—教学研究
IV. 0441 - 33

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2007)第 077485

出 版	贵州科技出版社
发 行	
地 址	贵阳市中华北路 289 号 邮政编码:550004
经 销	贵州省新华书店
印 刷	贵阳科海印务有限公司
开 本	850 mm × 1168 mm 1/32
印 张	8.125 印张 210 千字
版 次	2007 年 6 月第 1 版
印 次	2007 年 6 月第 1 次印刷
印 数	1 ~ 1 000
定 价	26.00 元

内 容 简 介

本书可作为师范院校物理教学专业电磁学实验教材。全书分两篇,第一篇介绍基本电磁学实验和设计性实验,第二篇介绍实验研究及学生进行实验研究的参考选题。本书是为了配合物理实验分为基础实验、设计性实验及研究性实验三个教学阶段的教学目的而编写,吸取了我国电磁学实验教学研究的一些新的实验方法,总结了作者多年实验教学研究成果,是为培养中学物理教师服务的。书中还涉及许多奥林匹克物理竞赛的内容,因此这本书不但对中学物理教师有参考价值,也是对奥林匹克物理竞赛感兴趣的学生有用的参考书。

编写说明

电磁学实验是大学物理实验的重要组成部分,随着教学改革的深入进行,原来的教材已不能满足教学的要求,需要重新编写。本书是在杨占民先生编著的《电磁学实验与研究》(贵州科技出版社,1998)的基础上重新编写的,本书编写时做了以下改进:

(一)因实验目的一词含义太宽泛,不利于教学评估,所以一律改为“实验目标”。

(二)对测量结果的评定,一律改用“标准不确定度”。本书在绪论部分对不确定度做了介绍,书中各个实验都采用标准不确定度处理实验数据。

(三)本书作者用大量的时间做了各种实验,并对实验结果进行了标准不确定度的处理,这对学生学习可能是有益的。通过实验及实验数据的处理,发现有些测量方法从理论上讲是好的,但在实际测量中确是行不通的,作者通过实验对各种实验方法进行了检验。

(四)为了更好地与当前的实验教学一致,本书分基础实验、设计性实验和研究性实验三个层次。

(五)许多电路图从原理上讲是正确的,但按图布线则不便于实验操作,本书从便于实验操作角度重新绘制了所有的实验电路图。

(六)本书主要参考了杨述武主编,杨介信、陈国英编写的《普通物理实验(电磁学部分)》(高等教育出版社,2000)及杨占民编著的《电磁学实验与研究》(贵州科技出版社,1998),其他参考书目列于书后。

在此特别感谢杨述武、杨介信及陈国英几位先生,没有他们的教导和鼓励,就不可能有这本书。

由于作者水平有限,书中缺点及错误不可避免,敬请指正。

杨向东

2006年10月7日于照壁山下

目 录

第一篇 电磁学实验

一、绪论	(1)
二、基础实验	(31)
实验一 伏安法测电阻	(31)
实验二 电表的扩程与改装	(38)
实验三 惠斯通电桥测中值电阻	(43)
实验四 板式电势差计测电池的电动势和内阻	(50)
实验五 晶体二极管正向伏安特性曲线研究	(57)
实验六 开尔文电桥测低电阻	(60)
实验七 箱式电势差计的使用	(67)
实验八 模拟法进行静电场描绘	(71)
实验九 灵敏电流计的特性研究	(78)
实验十 冲击电流计测量电容和电动势	(85)
实验十一 示波器的使用	(90)
实验十二 交流电桥	(98)
实验十三 霍尔效应测量磁场	(103)
三、设计性实验	(107)
实验一 伏安法测量金属的电阻率	(108)
实验二 补偿式伏安法研究晶体二极管的特性	(109)

实验三	用补偿电路进行静电场描绘·····	(109)
实验四	冲击电流计测量电表内阻·····	(110)
实验五	示波器研究晶体二极管的特性·····	(110)
实验六	干电池输出功率的测量·····	(111)
实验七	用替代式伏安法测量发光二极管的特性 ·····	(112)
实验八	亥姆霍兹线圈磁场的测量·····	(112)

第二篇 电磁学实验研究

一、电磁学实验中的几种基本测量方法·····	(114)
二、电阻的测量·····	(137)
三、电池电动势的测量·····	(169)
四、电表内阻的测量·····	(192)
五、灵敏电流计内阻的测量·····	(213)
六、低电阻的测量·····	(222)
七、电容的测量·····	(232)
附录 研究性实验参考选题·····	(243)
参考文献·····	(247)

第一篇 电磁学实验

一、绪 论

(一) 电磁学实验操作规则

为了人身安全及保护仪器,同时也为了使实验顺利进行,特列出下面的操作规则,实验中务必遵守:

(1) 连接线路前,应先将所有仪器放在合适位置,以便在实验中确保安全,使操作和读数方便。

(2) 注意各仪器的规格是否合适。使用电表时要特别注意其量程及正负极性;滑线变阻器、电阻箱、电感及互感器等,要注意其额定电流和额定功率,切勿使用电器超过其额定值。

(3) 连接简单电路时,可从电源一极出发,顺次连接串联部分,而后连接并联部分。连接复杂电路时,要先连好一个个单元电路,然后围绕主要元件连接。

(4) 接好电路后,自己先检查一遍,将限流电阻置于最大,分压电路的分压调到最小,电阻应调到相应位置以保护仪表,开关应断开。

(5) 对全部电路,经检查认为正确后,再请教师检查,经教师允许后才能接通电源,进行实验。开始先做瞬间接通,看各仪表动作是否正常,如正常方可正式通电实验,否则应立即断开电源。

(6) 在改接电路或交换电表量程时,必须断开电源,而后换

接,以免发生危险或损坏仪器。

(7)实验中如发现异常现象,应先切断电源,然后再检查故障。

(8)做完实验,应先把有关仪器调到偏转的最小位置,然后切断电源,经教师检查后再拆线路。拆线路应先拆电源,最后将所有仪器还原,导线扎整齐,桌面收拾整洁。

(二)电磁学实验常用仪器简介

1. 电表

(1)磁电式电表。电表是实验中最常用最基本的仪器。目前我国高校电磁学实验中以磁电式电表为主,近年来又增添了数字式电表。随着实验设备的更新,电表数字化是一个发展方向。除以上两种电表外,还有电磁型、电动型以及静电型电表,此处只介绍常用的磁电式电表。

①磁电式电表简介。如图1-1所示,磁电式电表是在马蹄型永久磁铁的极掌中间有一圆筒形的空洞,里面有一长圆柱形软铁心,铁心外有一长方形线圈,线圈上固定一指针,在指针的转轴上又连接有游丝。当电流通过线圈时,线圈受到磁场力的作用而发生偏转,与此同时,和转轴相连的游丝产生反转力矩,当二力矩平衡时指针停止转动,指在一定的位罝。与轴连接的游丝又做电流引入线圈的引线,与线圈相连的轴的两端轴尖支持在宝石轴承里,可自由转动。

电表通电线圈所在的磁场是呈轴向辐射状磁场,故无论转到哪个方向,其所受力矩的大小是恒定的。若通过线圈的电流为 I ,磁感应强度是 B ,线圈为 N 圈,面积为 S ,则力矩 M 为:

$$M_t = BNSI \quad (1)$$

而游丝产生的作用力矩与转过的角度 θ 成正比:

$$M_D = -D\theta \quad (2)$$

指针停止转动时二力矩平衡,即:

$$M_I + M_D = 0$$

故 $BNIS = D\theta$

$$\theta = \frac{BNS}{D}I = S_i I \quad (3)$$

式中 $S_i = \frac{BNS}{D}$ 称做电表灵敏度常量,单位是 $\text{div} \cdot \text{A}^{-1}$, 它的倒

数 $K_i = \frac{1}{S_i}$ 称做电流计常量。

因为电表指针偏转的角度与通过电表的电流成正比,所以用来测量电流以及与电流有关的物理量,它的标度尺上的刻度是均匀的。

指针式电表设有调零器,保证指针在未通电时的位置为零。如果指针偏离了零点,可用小螺丝刀轻调电表外壳上的调零螺杆,使指针回零。

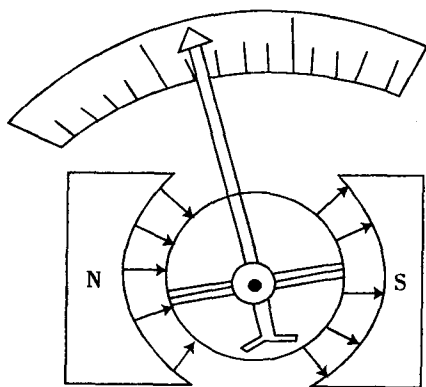


图1-1

磁电式仪表的线圈很细,允许通过的电流一般在几十微安到几十毫安之间,如果用它测较大电流必须进行改装,以扩大量程。没有改装过的小量程的电表叫表头,表头并联适当的小电阻就成了测量直流的电流表;表头串联适当的电阻就成了测量直流电压的电压表。使用电表时要注意它的极性、量程、内阻及级别。电表的量程即测量范围,如直流电流表有 $0 \sim 3 \text{ mA}$ 、 $0 \sim 15 \text{ mA}$ 、 $0 \sim 30$

mA、0 ~ 75 mA、0 ~ 150 mA 等等；直流电压表有 0 ~ 1 000 mV、0 ~ 2.5 V、0 ~ 5 V、0 ~ 10 V 等。直流电流表及电压表都有正负极之分，如某电表一个接线柱旁有“-”号，就表明是负接线柱，另一个无标号的接线柱为正接线柱。电表的内阻因量程的不同而不同。直流电流表若量程为几安，内阻一般在 $0.1\ \Omega$ 以下；量程在几毫安到几百毫安，内阻一般在几十欧；微安表头内阻在几百欧至几千欧不等。电压表的内阻是一个非常重要的参量，各量程的内阻与相应的电压之比是常数，记做“ Ω/V ”，都标明在表面上，电压表内阻 = 量程 $\times$ 每伏欧姆数。

使用电表时应该注意以下事项：

(a) 极性不要接错。直流电表标有“+”或“-”的符号，有时接线柱旁只有一个标有符号，另一个没有，若两个接线柱中一个标有“-”号，则另一个没有标的接线柱一定为正。接线时极性一定不要接错，否则电表反向偏转，会使电表受到损害。

(b) 量程要选得合适。测量前应先估计一下被测电流或电压的大小，选择合适的量程。在被测量不太清楚时，应先用大量程的电表试一下，如果指针偏转过小，再换合适的较小量程的电表。

(c) 在测量时，电压表要与被测的负载相并联，电流表要与被测的负载串联。

(d) 读数时两眼视线必须与表盘垂直。指针在两眼之间，指针与电表镜尺中的像重合，此时指针所对的刻度即读数，这样可以减小视差。

② 电表产生误差的原因。

(a) 电表的结构误差。电表在规定的条件下进行测量时，由于电表的结构不完善而引起的误差，如转动时轴承里的摩擦，磁场边缘处的磁感应强度不均匀及刻度划分不精确等引起的误差均为结构误差。

(b) 附加误差。由于偏离正常测量条件的某种因素的影响而

产生的误差叫附加误差。这种误差是针对偏离正常测量条件时的测量值与正常测量值之间的误差,非指相对于真值的误差。附加误差系指某一因素引起示值的变化,非指两个或两个以上因素引起的变化。故附加误差常冠以产生误差的原因,如电阻的温度附加误差等。

③电表的误差种类与级别。

(a)绝对误差。电表的指示值 x_i 与被测量的实际值 x_0 之间的误差叫绝对误差:

$$\Delta x_i = x_i - x_0 \quad (4)$$

(b)相对误差。绝对误差与被测量实际值 x_0 的比值叫相对误差,一般以 E 表示。

$$E = \frac{\Delta x_i}{x_0} \times 100\% \quad (5)$$

(c)引用误差。电表各处的绝对误差相差不大,而相对误差由于测量值不同变化很大,所以相对误差不便于描述电表的准确程度。

电表的引用误差是各点的绝对误差 Δx_i 与电表量程上限 $X_{\max}$ 之比值,以 E_n 表示:

$$E_n = \frac{\Delta x_i}{X_{\max}} \quad (6)$$

因各点的绝对误差 Δx_i 有差别,故引用误差也略有不同,但差别不大,所以用它来表示电表的准确程度更合适。最大的绝对误差 $\Delta x_{\max}$ 与电表量程 $X_{\max}$ 之比叫最大引用误差,电表的级别就是根据它来确定的。

(d)电表的级别。根据国家规定,电表分为 7 个等级,即: 0.1, 0.2, 0.5, 1.0, 1.5, 2.5, 5.0。

电表的级别由最大引用误差的大小确定。设电表级别为 a , 则:

$$a\% = \frac{\Delta x_{\max}}{X_{\max}} \times 100\%$$

例如某电表引用误差大于 0.2% 而小于 0.5%, 该表就定为 0.5 级表; $0.5\% < a\% < 1\%$ 的电表定为 1.0 级表。已知电表的量程及级别就可计算出该电表的绝对误差。如电压表的量程为 10 V。级别为 0.5 级, 则 $\Delta U_{\max} = 0.5\% \times 10 \text{ V} = 0.05 \text{ V} (50 \text{ mV})$ 。

(e) 电表读数的有效位数。电表测量值的有效位数值由电表的绝对误差决定:

$$\Delta x_{\max} = X_{\max} \cdot a\%$$

例如: 15 mA 1.0 级的电表, 读数为 12.5 mA, 应如何记数?

由电表的级别和量程先求出绝对误差:

$$\Delta I_{\max} = 15 \times 1\% = 0.15 \text{ mA} \approx 0.2 \text{ mA}$$

测量结果应表示为:

$$I = (12.5 \pm 0.2) \text{ mA}$$

如果测量值要参与运算, 则要在最小分度间再估读一位。

(2) 数字式电表。数字式电表通过模拟—数字(A/D)转换器将连续变化的模拟量变为离散的数字量, 经过处理, 再通过数码显示器以十进制方式显示测量结果。数字式电表具有磁电式电表不可比拟的特点和优势。近年来, 以数字测量为基础的智能检测迅猛发展, 在各个领域得到了广泛应用。

数字万用电表是一种功能强、精度高、测量速度快、使用方便的数字仪表, 在工作、学习中的应用十分普遍, 也是物理实验中使用的主要仪表之一。它可以测量直流电压、直流电流、电阻、交流电压、交流电流, 还可以测量二极管的正向压降, 也可以进行电路或器件通断测试(用蜂鸣音响表示)。有些数字万用电表还可以测量电容、三极管 h_{FE} 参数、温度、频率等物理量。数字万用电表一般具有误操作报警及过载保护功能, 使用时更加方便。

数字万用电表是在直流数字电压表的基础上配接各种变换器构成的。由于结构组成的特点, 数字万用电表的主要技术指标以及误差表示方法与磁电式电表不同。以直流数字电压表 200 mV

和 2 V 量程式为例,说明数字万用电表的特点和主要的技术指标:

位数	量程	输入阻抗/M Ω	准确度	分辨率/mV
3 $\frac{1}{2}$	200 mV	10	$\pm (0.5 \times \% \text{ 读数} \pm 1 \text{ 个数字})$	0.1
3 $\frac{1}{2}$	2 V	10	$\pm (0.5 \% \times \text{读数} \pm 1 \text{ 个数字})$	1

数字万用电表具有准确度高,灵敏度高和测量速度快等优点,测量结果以数字显示,消除了磁电式仪表的读数误差。

数字万用电表能显示的位数,由整数位和分数位组成,能显示 0~9 所有数字的是整数位;反之称为分数位。分数位的数值是以最大显示值的最高位数字为分子,以满量程时的最高位数字为分母。例如对于规格如上表介绍的数字万用电表,其最大显示值是 1999,最高位只能是 0 或 1,满量程数值为 2000,因此分数位是 $1/2$,称为 3 $\frac{1}{2}$ 位(也称做三位半)。

精确度高是数字万用电表的主要优点之一。数字万用电表的准确度由两部分组成:

$$\Delta U = \pm \alpha \% U_x \pm \text{几个数字}$$

其中 U_x 为读数值, $\alpha \% U_x$ 称为读数误差,而“几个数字”则表示使用该量程时的最小误差。第一部分误差反映了 A/D 转换器和功能转换器的综合误差,而第二部分误差反映了数字化(量化)处理带来的误差。例如,用上表中的量程为 200 mV 的直流数字电压表测量 100 mV 的电压,其读数为 100.0 mV,因而误差为 $0.5 \text{ mV} + 0.1 \text{ mV} = 0.6 \text{ mV}$ 。可见,数字万用电表的准确度要高于磁电式电表。

由 $\Delta U = \pm \alpha \% U_x \pm \text{几个数字}$ 可知,误差的第一部分与读数值有关,而第二部分与读数值无关。如果选用 2 V 量程测量 100 mV 电压,读数为 100 mV,其误差则是 $0.5 \text{ mV} + 1 \text{ mV} = 1.5 \text{ mV}$ 。这显然要比选用 200 mV 量程的误差大。因此使用时应选取略大于被

测值的量程,以减小误差。

分辨率是数字电压表能够显示被测电压的最小变化值,即最小量程显示器末位跳变一个字所对应的最小输入电压。分辨率反映了仪表的灵敏度。要注意分辨率和准确度是两个不同的概念,不要混淆。

输入阻抗相当于电表内阻。输入阻抗高是数字万用电表的又一优点。直流数字电压表的输入阻抗一般都高于 $10\text{ M}\Omega$,而且与量程无关,因此使用时电表的接入误差一般可以忽略不计。

需要注意的是,直流电流表的内阻并不是非常小,例如上述数字万用电表 $200\text{ }\mu\text{A}$ 量程的内阻约为 $1\text{ k}\Omega$ 。使用时应查看说明书或进行检测。

数字万用电表测量速度快,自动化程度高。直流数字电压表完成一次测量的时间很短,可小于几微秒;但是在测量高阻时,测量时间稍长,大约要几秒钟。有的数字万用电表内使用了微处理器,仪表有很强的数据存贮、计算、自检等功能,可通过接口和计算机连接构成智能检测系统。

数字万用电表功能多样。使用数字万用电表进行交流测量时,应注意了解仪表的频率响应范围。

数字万用电表的使用方法及注意事项:

(a)数字万用电表功能强,量程多。使用前应阅读说明书,了解仪器的性能、使用方法及注意事项。

(b)使用前应检查电表电源。便携式数字万用电表一般使用内置 9 V 的电池。按下电源键,如果显示电池电压不足的图形,则必须更换电池。还要注意测试表笔插口旁的警示符号,它提示使用者留意测试电压或电流不要超过指示数字。

(c)选择合适的功能量程进行测量。首先要看清所用数字万用电表的功能和量程,根据被测量的种类(交流或直流,电压、电流或电阻)及大小将选择开关调到合适位置。如果不清楚被测量

大小,应选择最大量程进行试测。

(d)测量直流电压。选择 DCV 量程。将红表笔插入 $V\Omega$ 孔,黑表笔插入 COM 孔内,并保证接触良好。测量时,表笔应并接在被测电阻或电源两端。在显示测值大小时,同时显示红表笔的极性。使用时如只在最高位显示“1”,表示被测量超过量程,应换用更大的量程进行测量。不得接入高于 1000 V 的直流电压或 750 V 以上的交流电压。测量时(特别是测量高压时),双手不得接触表笔的金属部分。

(e)测量直流电流。选择 DCA 量程。将红表笔插入 A 孔。如果电流大于 2 A,则应插到 10 A 插孔。电流表应串联接入被测电路。电流量程各挡的内阻并非很小,应注意查看说明书,一般 $200\ \mu\text{A}$ 挡的内阻约为 $1000\ \Omega$; $2\ \text{mA}$ 挡的约为 $100\ \Omega$; $20\ \text{mA}$ 挡的约为 $10\ \Omega$ 。使用数字万用电表测量直流电流前,一定要进行核算,避免电流过大造成损坏。切忌用电流量程去测量电压。

(f)测量电阻。选择 Ω 量程。将红表笔插入 $V\Omega$ 孔,黑表笔插入 COM 孔内,并保证接触良好。测量时,表笔应并接在被测电阻两端。使用电阻挡测量时,会接通表内电源,而且各挡电流不同(应注意查看说明书),因此不得测量带电电阻。在测量额定电流较小的元件时,也应特别注意,避免烧坏被测元件。红表笔为高电压,黑表笔为低电压。使用电阻量程两表笔断开时,电表示值为“1”,说明这时电阻为无穷大。将两电表表笔短接,电表示值应该为零;如果不为零,所显示的是短路电阻值,以后测量时应作为系统误差扣除。测量时,双手不要同时接触表笔的金属部分,以免影响测量精度,在测量高阻时尤其要注意。

(g)测量交流电压和交流电流。将功能开关(或功能键)置于 AC 处。检测交流电压不得高于 750 V。检测频率一般为 $45 \sim 1000\ \text{Hz}$ 。表笔位置和测试方法与测量直流电压和直流电流时相同。

使用完毕,关闭电源开关。