

大学基础物理推荐教材

大学基础物理实验

(电磁学分册)

刘少杰 编著 谭成章 主审

DAXUE JICHU WULI SHIYAN

南开大学出版社

内容提要

本书为《大学基础物理实验》的第二分册,内容为电磁学预备知识和实验两部分。预备知识部分介绍了实验中某些常用的电磁测量仪器的原理、技术指标及使用注意事项,并对实验报告的格式、写法作了相应的介绍;实验部分除有电磁学基本实验外,还保留了具有参考价值的传统实验,同时又增设了反映科学技术发展的新实验。全书共 28 个实验,每个实验均介绍与其相关的实验目的、引言、实验原理、仪器设备、实验内容及注意事项,并附有考查题和思考题,为教学工作和学生学习提供了方便。

本书可作为各高等院校理、工科及师范学院各专业电磁学实验课程的教材,也可供其他相关人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

大学基础物理实验·电磁学分册 / 刘少杰编著. —天津:南开大学出版社, 2002. 12
(全国计算机等级考试系列丛书)
ISBN 7-310-01749-8

I. 大... II. 刘... III. ①物理学—实验—高等学校—教材②电磁学—实验—高等学校—教材
IV. 04-33

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2002)第 038291 号

出版发行 南开大学出版社

地址:天津市南开区卫津路 94 号 邮编:300071

营销部电话:(022)23508339 23500755

营销部传真:(022)23508542

邮购部电话:(022)23502200

出版人 肖占鹏

承印 天津宝坻第二印刷厂印刷

经销 全国各地新华书店

版次 2002 年 12 月第 1 版

印次 2002 年 12 月第 1 次印刷

开本 787mm×1092mm 1/16

印张 10.5

字数 262 千字

印数 1—3000

定价 16.00 元

前 言

本书是在南开大学物理科学学院多年使用的《电磁学实验讲义》的基础上,经全面修改、补充,同时增加了近几年开设的新实验编撰而成。内容包括预备知识和选用的 28 个实验两部分。这些实验是我校理科各专业本科生教学实践中采用过的,是比较成熟的实验。

这些实验中,有相当数量的仪器装置是我们自己设计制造的。例如,“铁磁材料特性测量装置”、“多功能微伏表”等。这些仪器装置具有一定的针对性、实用性和先进性,并分别获得过各级奖项,且目前已应用于教学。

本书在编写过程中,遵循删繁就简、由浅入深、循序渐进的原则,对于那些较深的内容,也力求深入浅出地阐明其物理意义,以便学生掌握和运用。每个实验除介绍实验原理、实验内容等外,还有引言及注意事项,便于学生了解该实验的全貌和避免实验中的错误。篇末的考查题、思考题可帮助学生预习、总结和提高。在某些实验中强化了实践环节,如自制变压器、热电偶等,无疑对发挥学生的主观能动性、理论联系实际、增强学生的动手能力可起到促进作用。为了反映现代科学技术的发展,我们开设了新的实验和增加了新的实验内容,使学生可以了解一些新的实验仪器及测量手段,开阔他们的眼界。此外,还增加了力—电、光—电等方面具有综合性的实验内容,这对培养学生的综合实验能力是大有好处的。

电磁学实验教材的编写、实验的开设都凝集着本室教师和工程技术人员的心血和智慧。《电磁学实验讲义》就是由在本室先后工作过的同志们编写的。本次在改编过程中也参考了兄弟院校的有关教材,对此,特向他们致以谢意。

本书在编写过程中,得到了门振宇教授的热情支持和耐心指导。谭成章教授仔细审阅了初稿。二位先生提出了许多有益的、中肯的意见,在此,向二位先生表示诚挚的谢意。

本书在编写过程中,也得到了高立模教授、刘子臣教授以及陈平工程师的帮助;南开大学出版社也给予了热情支持与合作,在此,一并向他们表示由衷的感谢。

本书由谭成章教授主审。

由于编者水平有限,书中难免存在缺点和错误,恳请使用者批评指正。

编 者

2001 年 11 月于南开大学

目 录

预备知识	1
实验 1 模拟法测静电场	10
实验 2 伏安法测电阻	14
实验 3 用函数记录仪测量稳压二极管的伏安特性曲线	19
实验 4 电表改装	24
实验 5 灵敏检流计	30
实验 6 直流电位差计	36
实验 7 温差电偶分度与测温	41
实验 8 补偿法测光电流	44
实验 9 直流单臂电桥(惠斯登电桥)	48
实验 10 非平衡直流电桥	54
实验 11 直流双臂电桥(凯尔文电桥)	58
实验 12 电子荷质比的测定	63
实验 13 示波器的使用(一)	69
实验 14 示波器的使用(二)	78
实验 15 线性多用表	82
实验 16 冲击法测高阻和电容	87
实验 17 冲击法测螺线管内的磁感应强度	94
实验 18 冲击法测量铁磁材料的静态磁化特性曲线	98
实验 19 用霍耳元件测量磁场	103
实验 20 交流电桥	108
实验 21 RC、RL 及 RLC 串联电路的暂态过程	115
实验 22 RC、RL 串联电路的稳态特性	122
实验 23 简单谐振电路的特性	126
实验 24 用电子积分器测量铁磁材料的静态磁化特性曲线	133
实验 25 用计算机测量铁磁材料的静态磁化特性曲线	138
实验 26 用示波器观测铁磁材料的动态磁化特性曲线	142
实验 27 单相变压器	146
实验 28 三相交流电路	155

预备知识

§ 1 电气测量指示仪表

测量电气参数(如电压、电流、电阻、功率、频率及相位角等等)的指示仪表称为“电气测量指示仪表”。这里将简单地介绍几种实验中常用仪表(磁电式、电磁式及电动式仪表)的工作原理和技术指标。

一、工作原理

1. 磁电式仪表

磁电式仪表是利用永久磁铁的磁场和载流线圈的相互作用原理制成的,其结构如图 1 所示。在永久磁铁和圆柱形铁心的缝隙间装有一个可转动的线圈(称做动圈),线圈的轴尖被套在轴承里。当有电流通过动圈时,在磁场中产生的电磁力矩可使动圈转动,同时,与动圈固定在一起的游丝产生反作用力矩。当反作用力矩与电磁力矩相等时,动圈则停在某一位置上,固定在动圈轴上的指针便在刻度盘上指出被测电流的大小。

磁电式仪表与其他机电式指示仪表相比,具有准确度高、灵敏度高、消耗待测电路功率小及防御外磁场能力强(但怕过载)等一些优点,适合于实验中使用。它主要用于直流电压、直流电流的测量。

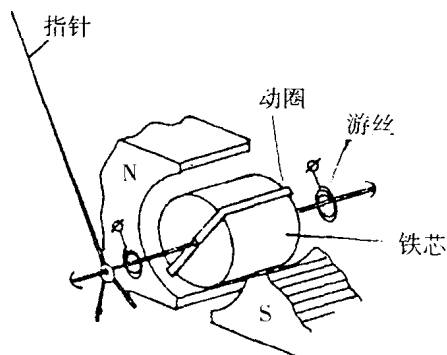


图 1

2. 电磁式仪表

电磁式仪表的测量机构有吸引型、排斥型和排斥—吸引型等三种类型。图 2 所示为排斥型,是根据动、定两个铁片在通有电流的固定线圈所产生的磁场中磁化后的相互作用原理制成的。当有电流通过固定线圈 1 时,其产生的磁场使得固定铁片 2 与可动铁片 3 同时磁化,并且这两个铁片的同一侧是同性的磁极,如图 2(b)所示。同性磁极相互排斥,从而使可动铁片 3 带动转轴及指针转动。当固定在转轴上的游丝 4 所产生的反作用力矩和转动力矩相等时,指针终将停在某一确定位置上,指示出被测量的数值来。易看出,当固定线圈所通的电流方向改变时,固定铁片 2 与可动铁片 3 被磁化了的极性也同时改变,仍为相斥状态,因此,所生转动力矩的方向不变,指针还是向原来的方向偏转。可见,电磁式仪表既可用于直流电流,也可用于交流电流的测量。

电磁式仪表具有结构简单、价格便宜、抗过载能力强并可交直流两用等优点,但由于靠待测电流产生的磁场较弱,易受外磁场影响。

3. 电动式仪表

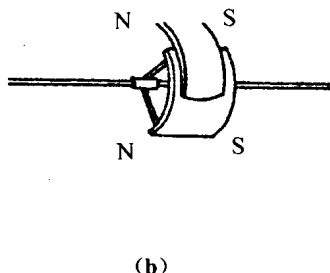
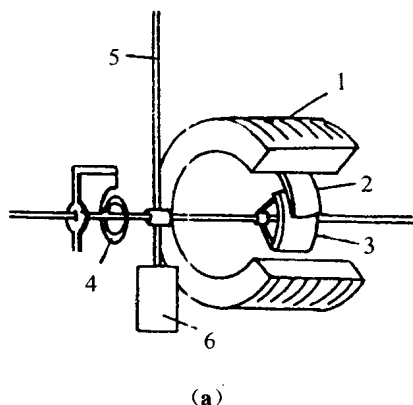
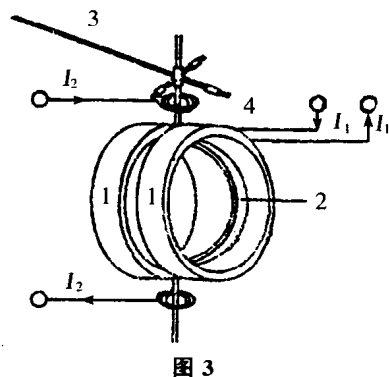


图 2

由前所述,磁电式仪表的磁场是由永久磁铁建立的。若利用通有电流的固定线圈去代替永久磁铁,便可构成“电动式仪表”。可见,电动式仪表是利用通有电流的固定线圈的磁场与通有电流的可动线圈间相互作用原理制成的,其结构如图 3 所示。给并行放置的定圈 1 通入电流 I_1 ,所产生的磁场将使通有电流 I_2 的动圈 2 发生转动,直到转动力矩与游丝 4 所产生的反作用力矩相平衡时为止。此时指针停在某一位置上,指示出被测量的数值。当电流 I_1 和 I_2 的方向同时改变时,动圈所受电磁力矩的方向不变。可见,电动式仪表也可做成交直流两用的仪表;不仅可以做成电流表、电压表,而且还可做成功率表。



电动式仪表准确度等级高,交、直流两用,常作为交直流标准表。但也存在着抗过载能力弱、易受外磁场影响等缺点。

二、仪表误差

1. 仪表正常工作条件

(1) 仪表指针在测量前要调整到零点。

(2) 按规定方向放置。表盘上的“ $\cap$ ”或“ $\rightarrow$ ”号,要求水平放置,“ $\perp$ ”号要求垂直放置,“ $\angle 60^\circ$ ”要求标度盘与水平面成 60° 角放置。

(3) 仪表周围的环境温度为 20°C ,或其他特定温度。仪表对环境温度的适应能力分为 A、B、C 三组。在表盘上分别用 Δ 、 $\triangle$ 、 $\triangle$ 表示。例如 A 组仪表,当环境温度每改变 $\pm 10^\circ\text{C}$ 时,将使仪表产生 $K\%$ 的附加误差(K 为仪表的准确度等级,下面将要讲到)。

(4) 除地磁场外,没有外来磁场。仪表抗外磁场影响的能力分 I、II、III、IV 级。例如对直流仪表加上 $400[\text{安匝/米}]$ 的直流均匀外磁场且在最不利方向的情况下,给各级仪表造成的附加误差分别为 0.5% 、 1.0% 、 2.5% 、 5.0% 。表盘上常用 $\square$ 、 $\square$ 、 $\square$ 、 $\square$ 表示这些等级。

(5) 对于交流仪表来说,所测电流或电压应该是规定频率范围内的正弦波形电流或电压。此外,如果仪表是在高压电路中使用,还要注意表壳的绝缘强度。例如表盘上所标 $\star$ 表示绝缘强度试验电压为 2kV 。

在测量读数时,要使视线垂直于表盘,以免出现“视差”。

2. 仪表的准确度等级

仪表在正常工作条件下进行测量时所具有的误差,成为仪表的基本误差。它是由于结构上和制作上的不完善而产生的,例如仪表轴尖与轴承的摩擦以及刻度线划分不精密等等原因所引起的误差都属于基本误差。

仪表按照其基本误差可分为 0.1、0.2、0.5、1.0、1.5、2.5、5.0 七个准确度等级。仪表的准确度等级是这样划分的:若该仪表的量限为 A_m ,在这个量限内该仪表的最大绝对误差为 Δm ,则定义该仪表的“引用误差” r_m 为:

$$r_m = \Delta m / A_m \times 100\% \quad (1)$$

最后根据引用误差 r_m 去套国家的七个准确度等级。例如 $r_m = 0.8\%$ 时,表明这只仪表的准确度等级优于 1.0 级而不够 0.5 级,只能定为 1.0 级,等等。我们使用仪表进行测量时,经常遇到的问题是,已知仪表的准确度等级 K ,所用量限为 A_m ,求测量的绝对误差 Δm 。由(1)式立刻得到:

$$\Delta m = A_m \times K\% \quad (2)$$

例如量限为 10A 的 0.5 级电流表,由(2)式知测量电流时所得绝对误差应为 0.05A。

三、仪表型号、主要规格

表示仪表结构型式的代号叫做“型号”,例如我们所用的磁电式直流复射式检流计的型号是“AC15”;我们所用的四量限磁电式直流电压表,其型号是“C32—V”。

实验时不仅应该记下所用仪表的型号,还要记下该仪表的主要规格,即:量限、内阻、准确度等级,对于交流电表还应记下其正常的工作频率范围。

四、万用表

万用表是由磁电式微安表头配以各种测量电路组成的多功能电表,其准确度等级虽然比较低,但功能较多,常可用来测量直流电压、直流电流、交流电压和电阻。有的万用表还可用来测量交流电流、电功率、电感量和电容量等。使用万用表进行测量可归结为选挡、调零、读数、复位四步。下面以测电阻为例来说明万用表的用法。

设被测电阻的阻值在 30~300 Ω 范围内。图 4 为 500 型万用表的面板图。

1. 选挡:就是根据被测量的种类和估计量值选拨万用表测量转换开关的挡位。欲测本例电阻,图 4 所示万用表的左右两只转换开关应分别旋至 Ω 和“10”位置。

2. 调零:万用表接入测量电路前,要先看看表针是否指在“机械零点”(即刻度尺的左端点)上,若偏离,可用改锥进行调整。使用欧姆挡位测电阻时,还需要调整“欧姆零点”,即:将两只表笔搭接起来(表示被测电阻为零),调 Ω 旋钮,使表针指在欧姆刻度尺的右端点,即 0 Ω 处。

3. 读数:调零完毕,即可将万用表接入测量电路(测电流时串入电路;测电压时并入电路;测电阻时,将待测电阻接在万用表的两只表笔间),按照表针的指示位置在相应的刻度尺上读出测量值。

测电压和电流时,表针偏转越接近量限,测量越准确;测电阻时,表针越接近欧姆刻度中心(在刻度尺弧长的中点上,如 500 型万用表 $\times 1$ 挡的欧姆刻度中心为 10 Ω),测量越准确。测电压和电流时,若表针已偏出刻度尺,表示选挡不妥,应立即断电并改挡位。若选挡错误严重(例如误用电流挡去测大电压),也许表针尚未偏到头,万用表已被烧坏。

4. 复位:万用表用毕,应将量程转换开关复位至“·”挡,有的万用表不设此空挡,则应拨至

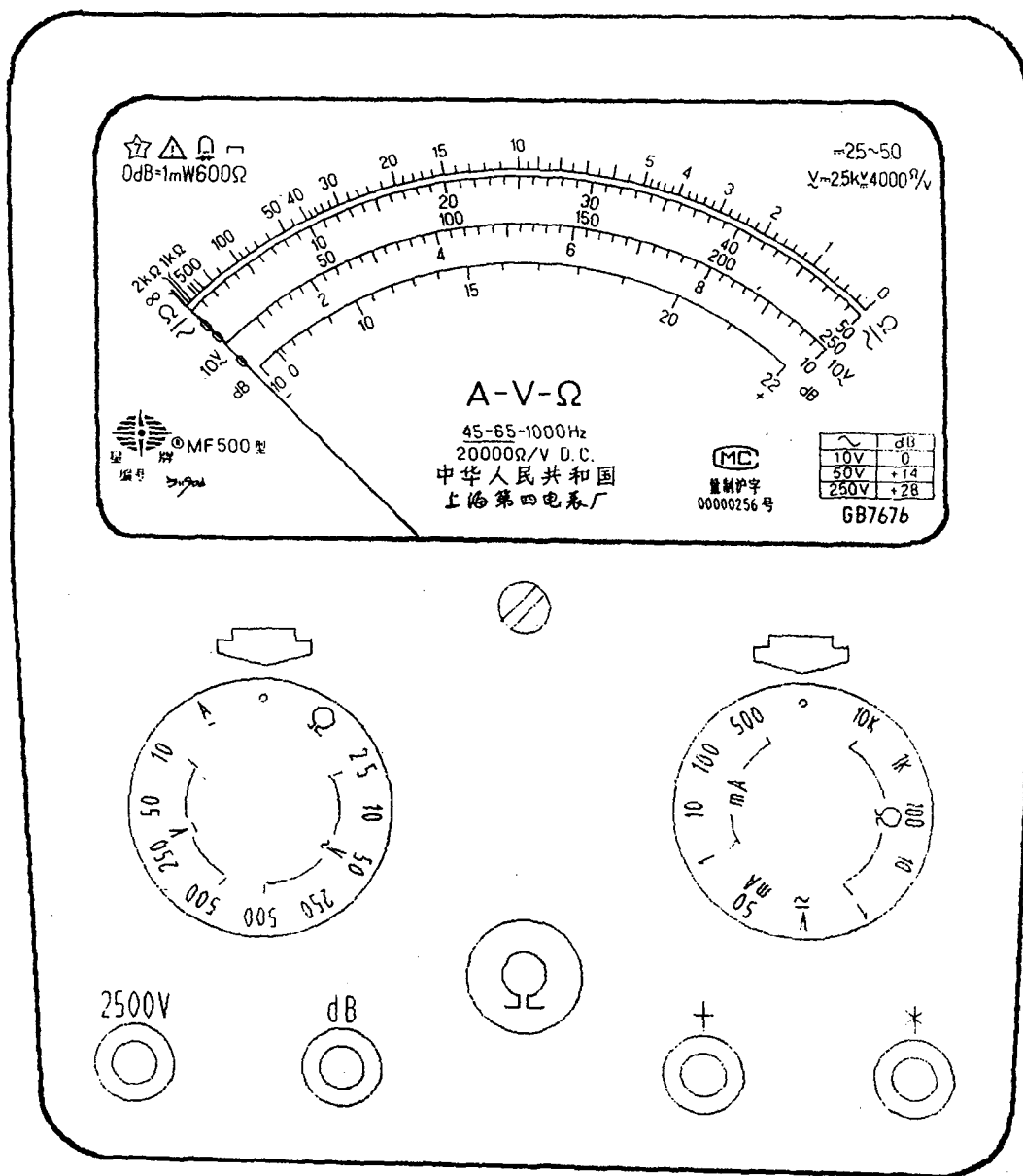


图 4

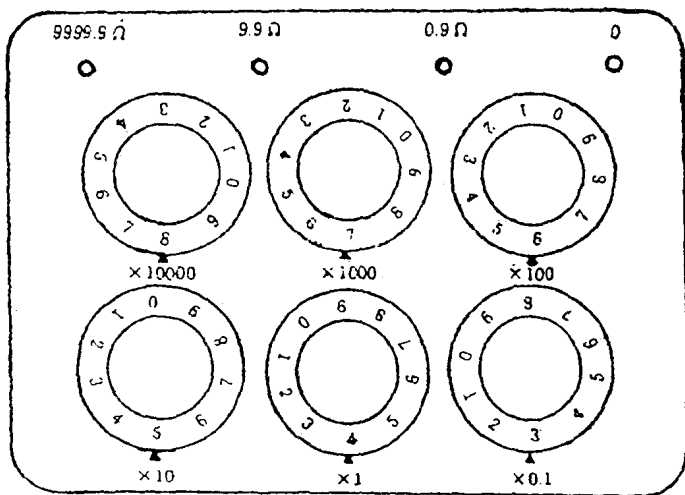
交流电压最高挡,这样最为安全。

§ 2 实验室常用的元件、电源

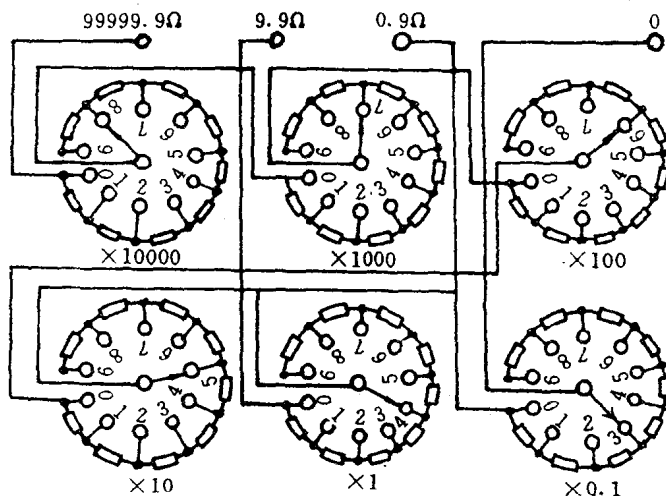
一、电阻箱

电阻箱作为可调的已知电阻而为实验中所常用。图 5 为 ZX21 型电阻箱的面板图和内部电路结构图。从面板图上可以看出该电阻箱有六个旋钮和四个接线柱。调节各个旋钮,可获得自 0.1 至 99 999.9 Ω 范围内间隔为 0.1 Ω 的任何标称阻值。例如图 5(a)中所示阻值为

87 654.3Ω。



(a)



(b)

图 5

电阻箱的主要规格：

1. 调整范围。例如 ZX21 型电阻箱的调整范围为 0.1~99 999.9Ω。

2. 准确度等级。电阻箱的准确度等级是依据其标称阻值的允许误差百分数来划分的。通常有 0.01、0.02、0.05、0.1、0.2、0.5、1.0 等几个级别。对于一个 a 级电阻箱，在环境温度为 (20±8)℃，相对湿度小于 80% 条件下，其允许误差为 a%。

电阻箱各旋钮的电刷存在着接触电阻，接触电阻的大小依其等级不同而异。例如 ZX21 型电阻箱 (0.1 级) 每个旋钮的接触电阻不大于 0.002Ω。接触电阻和允许误差构成电阻箱的基本误差，常用下式计算：

$$\frac{\Delta R}{R} = a\% + \frac{bm}{R} \quad (3)$$

式中 a 为电阻箱的级别； R 为电阻箱的示值； m 为实际使用的两引线端钮间的电阻箱旋钮数； b 为与准确度等级有关的系数 (实为电刷接触电阻)。由 (3) 式可以看出， R 较大时，接触误差很

小; R 为低阻时,接触电阻的误差则不可忽视。减少使用电阻箱的旋钮数可减小这一误差,因此当使用阻值不超过 9.9Ω 或 0.9Ω 时,要用图 5(a) 所示的 $0\sim 9.9\Omega$ 或 $0\sim 0.9\Omega$ 那对接线柱。

应切实注意的是,一只年久失修的电阻箱,不仅允许误差会超过本身的准确度等级的规定,而且由于氧化,电刷的接触电阻也会大大增加,甚至达到欧姆数量级以上。

3. 额定功率。电阻箱的额定功率一般均为 0.25W 。如果在使用中流过电阻箱的电流过大,而且超过额定功率值,轻则使阻值精度变差,重则烧坏电阻箱。

电阻箱中的电阻是用锰铜丝绕成的,因此,它的温度稳定性好。若在制作时,将锰铜丝顺反等匝地绕在扁状绝缘片上,则做成的电阻,其分布电感甚小,这种电阻箱可用于交流电路,故称“交流电阻箱”或“无感电阻箱”。然而它也有一定的适用频率范围,使用时应注意。

二、标准电阻、标准电容、标准自感、标准互感

对于这些元件的结构,此处不作介绍,只给出它们的主要规格项目,供实验记录时参考。

标准电阻——阻值、准确度等级、额定电流。

标准电容——电容量、准确度等级、额定电压。

标准自感——自感系数、准确度等级、额定电流。

标准互感——互感系数、准确度等级、额定电流。

三、电源

目前一般实验室使用的直流电源有三种:

1. 甲电池。它的标称电压值为 1.5V (实际上新出厂的甲电池其电动势可达 1.6V 以上),内阻约为 1Ω 左右。在长期使用中,它的电动势降到 1.4V 时,实验中就不再拿它当工作电源用。实验中甲电池的工作电流一般不要超过 100mA 。

2. 直流稳压电源。它的内阻很低,当其内阻远较负载电阻小时,可视为输出电压可调的恒压源。实验中要求记录它的输出电压调整范围和输出电流范围。

3. 直流稳流电源。它的内阻很高,当其内阻远较负载电阻大时,可视为输出电流可调的恒流源。实验中要求记录它的电流输出范围。

一般实验室所用的交流电源有两种:

1. 市电 220V 的单相电源及线电压为 380V 的三相电源。(实验时绝对避免触摸,否则有生命危险!)

2. 信号发生器。它是以市电 220V 为工作电源,产生不同频率、不同电压的正弦形电压信号、矩形电压信号等的电子仪器。实验时要求记录其输出电压范围、频率范围和频率精度。

四、标准电池

标准电池仅向电路提供电压标准,而不能提供能量。实验中使用的 BC7 型标准电池,其标称电动势在室温 20°C 时是 1.0186V ,每块标准电池的实际电动势由实验室给出。这种标准电池的内阻为 $1\text{k}\Omega$ 量级。

标准电池向电路提供的电流不要超过 $\pm 1\mu\text{A}$,瞬时也不要超过 $\pm 5\mu\text{A}$ 。因此绝对禁止用一般电压表去量标准电池的电压,也不准用手去摸标准电池的两极。

标准电池不得倾倒、震动、日晒、烘烤!

对于饱和式标准电池,它的电动势随室温的变化规律遵从下式:

$$E_t = E_{20} - 39.9 \times 10^{-6}(t-20) - 0.94 \times 10^{-6}(t-20)^2 + 0.009 \times 10^{-6}(t-20)^3 \text{ 伏} \quad (4)$$

式中 E_t 为 t °C 时的电动势; E_{20} 为 20 °C 时的电动势。

§ 3 实验记录和实验报告

实验记录,要写在实验者专门准备的本子中。项目要详尽,语言要简练,文字要清晰无误,线路图及表格等徒手画时要尽量整齐,但作测量曲线时必须用坐标纸和尺子严格认真地去画。所有记录都必须用钢笔或圆珠笔书写,避免涂改。如需要删改,必要时应注明原因;一份合格的实验记录,应为任何同行人员所能看懂。也许实验记录比实验报告更有保存价值。

实验报告是在实验记录的基础上,经过选择、整理、加工而成的,主要是写给别人看的。因此,实验报告应该要求书面整洁,条理清楚,文字通畅,容易看懂。

实验记录的格式大致这样:先写出实验题目、实验日期、实验时的室温、湿度或天气状况,然后再写出下列几项:

一、实验目的。

二、原理(要画电路图)。

三、主要仪器用具的编号、型号、规格。

四、测量数据,若同类数据有多组,应记在表格中。

五、数据处理,必要时应做曲线。

六、必要的说明、分析、讨论。

实验报告的格式大体如此,不再赘述。

下面将分别叙述如何列数据表和怎样作曲线图。

1. 列表的要求:

(1) 单个的实验数据一般写在表格之外,成组的数据(包括原始测量数据、必要的运算过程中的数据)列在表中。表格的形式应便于处理数据,便于看出有关量之间的关系。

(2) 物理量的名称代号及其单位应写在标题栏中,数据栏中不用再写单位。

(3) 所有数据的有效数字位数都要写对。

(4) 必要时加以说明。

例如测某电阻的伏安特性曲线,测得电阻上的电压 U 和流过的电流 I 的几组数据即可列成下表:

表 1

$U(\text{V})$	0.201	0.400	0.600	0.800	1.001
$I(\text{mA})$	2.40	4.81	7.19	9.60	12.00

若写成表 2 的形式就不好了。

表 2

0.201V	0.4V	0.6V	0.8V	1.00V
2.4mA	4.81mA	7.19mA	9.6mA	12mA

2. 作图规则

用一条曲线来表示两个物理量 X 、 Y 之间的函数关系,可以给人一种十分直观的印象。然而,要得到这样一条满意的曲线,必须从正确地选择实验方法和实验仪器开始。一般说来,如果 $Y-X$ 接近线性关系,我们便可以选择两只量限适当、准确度等级相近的单量限仪表去测它

们。若一个物理量作等差增长、另一个物理量以类等比方式作增长(或衰减)变化时,则前者可采用单量限仪表进行等绝对误差式的测量,后者可考虑用多量限仪表测量等等。按照上面的考虑,提出作图要求如下:

(1)选纸

作图一定要用坐标纸。表示类线性的函数关系,选用毫米格直角坐标纸。表示指数或对数函数关系,选用单对数坐标纸。表示幂函数关系,可选用双对数坐标纸。表示方位角的函数关系,可选用极坐标纸等等。

图纸大小的选择原则是:从图上读出的有效数字位数与测量数据有效数字的位数大体一致。根据经验,电磁学实验中所用的坐标纸,有 16 开纸大小即可。

(2)画坐标轴,写图名

用箭头标出坐标轴的方向。写出轴的名称及单位。在轴上每隔一定距离标明该轴的分度值。坐标轴的起点不一定选为零,以使画出的曲线充满整个图面。给坐标轴分度时,一般用 1mm 长度代表 1、2、5 这样一些数,不要代表 3、7 等数,否则读数时非常不便。

在图纸明显的位置写上图名(包括必要的说明)。

(3)标点

将测量数据用“+”、“×”、“○”、“△”、“□”等符号中的一种标到图面上,这些符号的范围半径应该等于测量数据的误差。这些符号的中心就是测量点的位置。

(4)连线

如果是校准曲线,应该用直尺把各点连成折线。对于其他直线或曲线,如不能恰好穿过所有数据点,也应穿过“+”、“○”等符号的区域并使所有数据点均匀分布在线的两侧。对于偏离过大的点应舍去不用或重新测量核对。

(5)曲线的改直

有些非线性的函数关系,经过适当变换可把曲线变成直线。如实验 14“示波器的使用(二)”中,电容 C 通过电阻 R 的放电规律为:

$$U = E e^{-\frac{t}{RC}} \quad (5)$$

如果在直角坐标纸上画 $U-t$ 曲线,则是一条按指数规律衰减的曲线。若对(5)式两边取对数,则化为下式:

$$\ln U = \ln E - \frac{1}{RC} t \quad (6)$$

我们作 $\ln U-t$ 曲线,则得一直线如图 6 所示。根据这条直线求出的电容值就是待测电容的平均值。求法为:

从直线上的两端取两点 $N_1(t_1, \ln U_1)$ 和 $N_2(t_2, \ln U_2)$, 算得直线斜率为 K :

$$K = \frac{\ln U_2 - \ln U_1}{t_2 - t_1} \quad (7)$$

由(6)式 $K = -\frac{1}{RC}$, 代入(7)式便求得:

$$C = -\frac{1}{KR} = \frac{t_2 - t_1}{(\ln U_1 - \ln U_2)R} \quad (8)$$

按照作图连线规则作出的图 6 中的直线,具有对多组测量数据取平均的含义,故由(8)式算出的电容值是测量的平均值。这就要求 N_1 、 N_2 点必须是从直线上取的,而不是从测量数据表中任意挑出来的。选点时,要求 N_1 、 N_2 相距尽量远,是为了读(8)式中的 $(t_2 - t_1)$ 和 $(\ln U_1 - \ln U_2)$

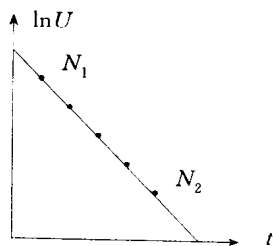


图6

都有足够多的有效数字,避免损失测量精度。

对于本例(5)式所示的指数函数,我们也可以用单对数坐标纸作图:将 t 标在均匀刻度轴上,将 U 直接标在对数刻度轴上,立刻就可画成直线,如图 7 所示。但从这种图的直线上求斜率时,所选 M_1 、 M_2 点的纵坐标,是 U_1 、 U_2 ,不是 $\ln U_1$ 、 $\ln U_2$,必须先算出 $\ln U_1$ 和 $\ln U_2$ 然后才能计算直线的斜率。

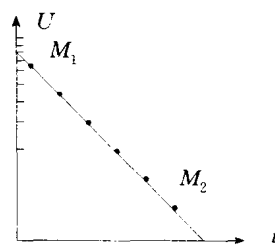


图7

实验 1 模拟法测静电场

一、目的要求

1. 了解用模拟法测量静电场的原理和方法。
2. 学会选择电极系统及电解槽进行静电场的模拟测量。

二、引言

在一些科研和生产实践中,往往需要了解带电体周围静电场的分布情况。静电场的分布可以用场强 E 和电位 U 来描述。由于标量在测量和计算上比矢量简单,一般常用电位 U 来描述。场中电位 U 的分布情况与带电体的形状、位置、数目及各自的电位以及周围介质有关,除少数几何形状对称且十分简单的电极系统外,一般是比较复杂的,因此难于用理论方法进行计算。用实验手段直接对静电场进行测量,通常也是相当困难的。因为利用磁电式仪表直接测量静电场的电位,由于场中没有电流流动,所以无法使用。何况任何磁电式仪表的内阻都远小于真空中或空气中的电阻。而静电式仪表本身为导体或电介质,置入场中后由于静电感应会使原电场发生显著畸变,从而使测量失去意义。

基于上述困难,静电场的测量一般采用间接测量的方法,即模拟法。其本质是在满足一定模拟条件下,对一种易于实现便于测量的场进行测量并得到准确结果,则与之对应的静电场也可得知。模拟法应用广泛,本实验采用稳恒电流场模拟测量真空中(或空气中)的静电场。稳恒电流场也可模拟测量不随时间变化的温度场、流体场等。

三、原理

1. 模拟原理

模拟法中所测量的量,不是我们直接要研究的对象。要使模拟场和被模拟场能互相对应起来,在理论上和实验上都有一定的要求。电磁场理论告诉我们,在一个稳定不随时间变化的场中,若其泛定方程及边界条件一旦确定,则它的解是惟一确定的。由此可得出结论,两个不同性质的物理场,若描述它们的泛定方程和边界条件相同,则它们的解是一一对应的。进一步讲,我们若对一种易于测量的场进行测量,那么与之对应的待测物理场也易得知。

本实验用稳恒电流场的电位分布模拟真空中(或空气中)静电场的电位分布,令 $U(x, y, z)$ 表示静电场中的电位分布函数,则在场中无源处电位分布遵从 Laplace 方程(后续电动力学课中会讲到),即:

$$\frac{\partial^2 U}{\partial^2 x} + \frac{\partial^2 U}{\partial^2 y} + \frac{\partial^2 U}{\partial^2 z} = 0 \quad (1.1)$$

对于稳恒电流场,除电极所在处以外的均匀导电介质中,电位分布也服从上述 Laplace 方程。若这两种场有相同或相似的边界条件,那么这两种场具有相同的电位分布。为了使这两种场具有相同或相似的边界条件,实验上模拟场即稳恒电流场应满足下面的模拟条件:

① 稳恒电流场中的电极形状必须和静电场中的带电体相同或相似,而且在场中的位置一致。这样可以用电源保持电极间电压恒定来模拟静电场中带电体上的电量恒定。

② 静电场中的导体在静电平衡条件下,其表面是等位面,表面附近的场强(或电力线)与表面垂直。与之对应的稳恒电流场则要求电极表面也是等位面,且电流线与表面垂直。为此必须使稳恒电流场中电极的电导率远大于导电介质的电导率;由于被模拟的是真空中或空气中的静电场,故要求稳恒电流场中导电介质的电导率要处处均匀;此外,模拟电流场中导电介质的电导率还应远大于与其接触的其他绝缘材料的电导率,以保证模拟场与被模拟场边界条件完全相同。

实验上电极系统常选用金属材料,导电介质可选用水、导电纸或导电玻璃等。若满足上述模拟条件,则稳恒电流场中导电介质内部的电场和静电场具有相同的电位分布规律。

2. 电解槽

水的电导率远小于金属电极的电导率,且均匀、经济方便,故本实验采用水作为稳恒电流场中的导电介质。将模拟电极系统置入足够大的水槽中,各电极加上适当的直流电压,即可模拟测量相应静电场的电位分布。我们把模拟用的水槽称为电解槽。根据槽内水深与电极尺寸大小的比较有“深槽”和“浅槽”之分。“深槽”一般用来模拟三维空间的静电场,而“浅槽”则多用来模拟二维平面的电场分布。

我们知道,带电体周围的电场分布通常是三维空间的,但当电场的分布具有某种对称性时,只要清楚某一二维平面上的电场分布,即可知其三维空间的电场分布。如长直同轴电缆内的电场,长平行输电线间的电场等,这些场的特点是除靠近端部的区域外,在垂直于导线的任一平面内电场分布都是相同的。所以只要模拟测量出垂直于导线的二维平面内的电场分布即可。

如对于长直同轴电缆内电场的模拟,其水槽的选取可采用如图 1.1 所示的平行层状模拟系统,称之为平行槽。可见只要测出水面上的等位线分布,便可知整个长同轴电缆内的等位面分布。

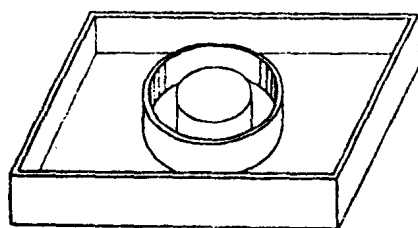


图 1.1

此外,对于稳恒电流场,有如下性质:沿等位面布设新电极并施以相应电位或沿电流线切割导电介质,均不改变电流场中的电场分布,据此可减小电解槽的体积,如图 1.2(a)为轴对称电极系统。其电场分布也具有轴对称性,可采用沿轴平面切割而形成的劈形模拟系统,如图 1.2(b)所示,为劈形槽。平行槽和劈形槽均属于“浅槽”。

对于空间分布的静电场的模拟,可在“深槽”中配以一定形状的电极,产生三维稳恒电流场,然后测量其空间电位分布即可。

值得注意的是,用稳恒电流场模拟静电场时,由于所用导电介质即水中导电离子向电极附近的聚集和电极附近发生的电解反应,增大了电极附近的场强,从而破坏了稳恒电流场和静电场的相似性,使模拟失真。为此实验时电极间加交流电压。当交流电压频率 f 适当高时,即可克服电极间加直流电压时稳恒电流场分布的失真。交流电源频率 f 也不能过高, f 的高低首先要保证场中电极和导电介质构成的电容忽略不计,其次应使该电磁波的波长 $\lambda(\lambda=c/f)$ 远大于电流场内相距最远两点间的距离,这样才能保证在每个时刻交流电流场和稳恒电流场的电位分布相似。这种交流电流场称做“似稳电流场”。通常 f 选为几百到几千 Hz,可满足上述消

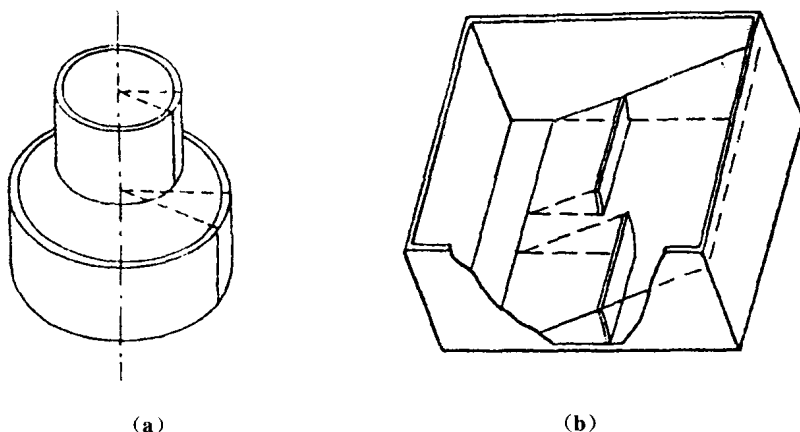


图 1.2

失真和似稳场的要求。

四、仪器用具

交流信号发生器,分压箱,交流毫伏表,探针,几种电极系统,水槽等。

五、实验内容

1. 测长同轴圆筒电极系统横截面内的等位线。

按图 1.3 联接电路。将水槽注入 3mm 左右深的水并将水槽调成水平;再将圆柱及圆环电极同心地放在槽中间;然后微调水量,使电极与水恰好成平行层。

设电源电压为 U_0 (调成 5 伏),调节分压箱 R ,使图中的电压 U 分别为 $0.3 U_0$ 、 $0.5 U_0$ 、 $0.7 U_0$ 、 $0.9 U_0$,对应每一电压值在槽中移动探针,找到毫伏表示数最小(因有外界电磁场干扰,毫伏表不能示零)的诸点,应在一个圆上,算出各等位圆的平均半径 r 作 $U/U_0 - \ln r$ 曲线应为直线

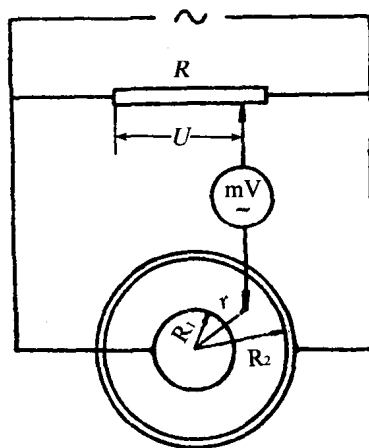


图 1.3

对于所模拟的电极系统,由电磁学理论算出的电位分布为

$$U/U_0 = \ln \frac{r}{R_1} / \ln \frac{R_2}{R_1} \quad (1.2)$$

式中 R_2 为外电极的内半径; R_1 为内电极半径; r 为电位 U 的等位圆半径。依(1.2)式作 $U/U_0 - \ln r$ 理论曲线,如与实验曲线吻合,说明模拟条件正确,否则应改变电源频率 f ,擦洗电极,检查电极位置,查看水层形状,重新测量,直至实验与理论相符。记下此时的 f 值。

2. 测量其他电极系统的电位分布。

六、注意事项

1. 实验时信号发生器的输出电压可调至最大(5V),以相对减弱空间杂散电磁场对测量的影响(提高测量的信噪比)。

2. 探针移到等位点附近时,应减小毫伏表的量程,以提高判别等位点的精度。

3. 探针需与探测的水面垂直。

七、考查题

1. 描绘静电场时为什么测 U 而不测 E ? 为什么用稳恒电流场模拟静电场? 又为什么用似稳电流场进行模拟?
2. 用部分场模拟时, 截取电极系统的原则是什么?
3. 交流电源的频率选得过低或过高为什么都不行?

八、思考题

1. 如图 1.4 中, 外电极附近的水面向上弯曲, 那么测出的等位圆的分布是向中心收缩还是向外扩张? 为什么? 若外电极的内表面未擦净, 等位圆又如何变化呢?
2. 两个金属球, 半径均为 a , 球心相距为 b , 两球间加电压为 U , 请画图说明用什么形状的电解槽和电极系统来测绘球间电位分布。
3. 本实验为什么不用交流毫伏表直接测似稳电流场中的等位线, 而是采用图 1.3 所示平衡电桥法?
4. 如何模拟测量长平行板电容器间的电场分布? 画图说明。
5. 点电荷所激发的静电场可以用二维平面的稳恒电流场模拟吗? 为什么? 试画图说明用什么形状的电解槽和电极系统来测绘场内的电位分布。

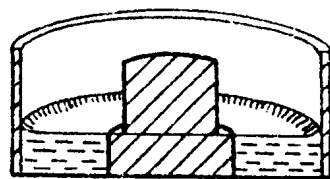


图 1.4