

0.44-73

普通物理 电磁学实验

范家师 编
(中山大学物理系)

211185/27



一九八〇年五月

731/185/27

前 言

物理学实质上是一门实验科学。一切物理理论都必须经过实验的验证,才能得到公认和发展。因此,要提高物理学教学质量,就必须加强物理实验,并把物理实验作为学生的一门独立的必修课程,尤其是物理系的学生更应如此。

根据1977年10月在苏州召开的全国高等学校理科教材会议制订的普通物理实验教学编写大纲,我校原有的实验讲义已不能适应新形势的要求,编者于1978年10月,以历年来我校物理系学生所用的讲义为基础,并参考兄弟院校的有关教材,重新编写《电磁学实验》讲义,以加强实验课教学。这本教材编成之后,经过在1977年和1978年入学的两届学生进行教学实施,又根据今年六月教育部部属综合性大学物理教材编审委员会会议修订的普通物理实验教学大纲的精神,作了进一步修改、补充编成本书。

这个教材的选题和内容安排,主要是考虑物理系、电子系学生电磁学实验课的性质和任务,同时也适当照顾到“工大”(或电视大学)学生的需要,共选了二十五个实验,供在不同情况下选用。为了更好地发挥学生的学习主动性和培养学生独立进行实验工作的能力,书中实验第21—25,是供学生选做的。这五个实验只提出目的要求,或只作一些启发性的提示,皆由学生借助有关参考资料和已学过的实验知识及实验方法,自己独立制订实验方案和完成实验。

本书之所以不完全采用国际单位制,是希望学生对熟悉

国际单位制与其它单位制的换算关系有所帮助。

考虑到“工大”（或电视大学）学生的需要，在附录中编写了实验误差基本知识和一些电工资料，这对其他专业学生查阅这些资料也提供了方便。

本书在编写过程中，我校物理系很多同志提出了不少宝贵意见，在绘图和校对方面，吴杰陶、卢敬业、黄光桂、全志义等同志协助做了大量工作。

由于编者水平所限，加之时间仓促，错误和不妥之处在所难免，诚恳地希望同志们给予批评指正。

编 者

1980年7月

目 录

绪 论	1
第一节 电磁测量仪表的一般知识	2
第二节 电磁测量方法简介	13
第三节 实验误差	16
第四节 电磁学实验中的要点	26
实验一 基本电学仪器的使用	29
实验二 静电场的研究	38
实验三 欧姆定律及电阻的串联、并联	41
实验四 简易万用电表的设计	44
实验五 用单电桥测电阻	57
实验六 用双臂电桥测低电阻	65
实验七 用补偿法测电动势	72
实验八 用直流补偿法校准电表	76
实验九 用电位差计校准温差电偶和测量 温差电动势	83
实验十 磁电式电流计的研究	87
实验十一 冲击电流计的原理和使用	96
实验十二 示波器的使用	106
实验十三 用交流电桥测量电容、电感	122
实验十四 单相交流电路的基本测量	133
实验十五 电动机的使用	140
实验十六 用冲击电流计测定螺线管轴线上	

的磁场强度	147
实验十七 磁化曲线的测定与磁滞回线的观测	152
实验十八 电子射线束的电聚焦和磁聚焦及 电子荷质比的测量	163
实验十九 电子射线束的电偏转	172
实验二十 电子射线束的磁偏转	178

选 做 实 验

实验二十一 测定电流计灵敏度及其内阻	183
实验二十二 用电位差计测量低内阻表头	184
实验二十三 用并联电阻式电容电桥测量电容 及其损耗因数	185
实验二十四 用冲击法测电动势、电容和高阻	185
实验二十五 测定通过钨丝灯泡电阻的电流强度 与两端电压的关系	188

附录一

表 1 常用电磁测量指示仪表和附件的符号	189
表 2 影响量的额定值及其允许偏差	192
表 3 影响量变化时各级仪表附加误差的规定	193
表 4 几种主要型式的仪表的性能比较	194

附录二 标准量具和实验室电源介绍

(一) 实验室常用标准量具

1、 标准电池	196
2、 标准电阻	201
3、 标准电感	203
4、 标准电容	204

(二) 实验室电源

附录三 有关公式的推导

(一)	磁电式电流计运动理论公式的推导	212
(二)	冲击电流计运动理论公式的推导	216
(三)	算术平均值的简便计算公式的推导	219
(四)	标准偏差的简便计算公式的推导	220
附录四	实验误差和数据处理	223
(一)	实验误差的基本知识	223
(二)	有效数字	236
(三)	实验数据的作图处理	241
附录五	电工资料	246
(一)	室内明线装置时导线容许的最大电流	246
(二)	保险丝的选用	246
(三)	单层密绕空心线圈电感的计算	248
(四)	小型变压器设计	248
(五)	电动机	255
(六)	焊接技术	260
(七)	安全用电简介	264

緒 论

电磁学实验是物理学实验的重要组成部分之一。这不仅是因为电磁测量在物理学和其他科学领域中获得了极其广泛的应用，而且是后继课程实验的重要基础和使学生在实验室中对电磁的基本规律、现象进行考察分析的基本训练。因此，我们要求牢固地掌握常用的电磁测量仪器、仪表的原理、构造、性能和使用方法，在实验中用到的精密仪器、仪表和电子仪器的性能及使用方法，也能一般地掌握；学会测量基本量（电流、电压、功率、位相角、电容、电感、磁场强度等）的基本原理和方法，初步学会在实验室中考察，分析电磁基本规律和现象，懂得如何减少测量误差以及对测量结果进行分析处理。

所谓电磁测量，就是将被测电量或磁量与作为测量单位的同类电量或磁量进行比较而确定未知量的过程，测量仪器通常分为直读仪器和较量仪器两大类。

直读仪器——在电磁测量过程中不需要度量器直接参与工作而能够随时指示出被测量的数值的仪表，如电流表、电压表、功率表等，带有记录装置的自动记录仪表也属于这一类。

较量仪器——在电磁测量过程中需要度量器直接参与工作才能确定被测量数值的测量仪器，例如用直流电桥测量电阻就必须要有电阻的量度器（标准电阻）的配合使用才行。常用的较量仪器有直流电桥、电位差计等。

在下面，我们介绍仪表的基本知识、测量方法、实验误

差和电磁学实验中的要点。这些内容是电磁学实验必需具备的最基本的知识。

第一节 电磁测量仪表的一般知识

一、仪表的分类

电磁测量仪表的种类繁多，分类方法也很多。了解仪表的分类，可帮助我们认识仪表的特性。

1、按工作电流的种类分为直流仪表、交流仪表、交直流两用仪表。

2、按被测量的种类分为电流表（安培表、毫安表、微安表）；电压表（伏特表、毫伏表、微伏表）；欧姆表；电度表（瓦时表）；高阻表（兆欧表）；相位表（或功率因素表）；功率表（瓦特表）；频率表和多种用途的仪表，如万用表，伏安表（电压、电流表）等。

3、按工作原理分为磁电系；电磁系；电动系；感应系；整流系；静电系；热电系；电子系等。

4、按使用方式分为开关板式和可携式。

此外，按仪表准确度等级可分为0.1、0.2、0.5、1.0、1.5、2.5、5.0七级；按仪表对电磁场的防御能力可分为Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ、Ⅳ级；按仪表的使用条件可分为A、B、C三组（在仪表刻度盘或说明书上不标注组别即为A组仪表）。仪表型式符号及有关性能标记的含义见附录一表1。

二、仪表的组成

仪表的种类很多，但是它们的主要作用都是将被测量变换成仪表活动部分的偏转角位移。为此，仪表通常由测量机构和测量线路二部分组成（如图1—1方框图所示）。

测量线路的作用是将被测量 x （如电流、电压等）变换成为测量机构可以直接测量的电磁量，如电流表的分流器、电压表的附加电阻的电路等都是测量线路。

测量机构是仪表的核心部分，是靠它实现仪表偏转角位移的。

仪表的组成可以用下面的方框图表示。

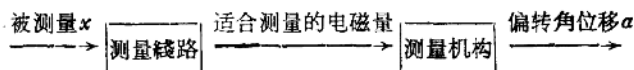


图 1 仪表的组成方框图

仪表的测量机构可分为活动部分及固定部分，而用以指示被测数值的指针或光标指示器就装在活动部分上。

测量机构的主要作用是：

(1) 产生转动力矩

要使仪表的指针转动，在测量机构内必须有转动力矩作用在仪表的活动部分上。转动力矩一般是由磁场和电流（或铁磁材料）的相互作用产生的，而磁场的建立可以利用永久磁铁，也可以利用通有电流的线圈。磁电系仪表是利用固定的永久磁铁的磁场与通有直流电流的可动线圈间的相互作用产生转动力矩的；电磁系仪表是利用通有电流的线圈的磁场与铁片的相互作用（或在磁场中的两个铁片的相互作用）产

生转动力矩的；电动系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的相互作用产生转动力矩的；感应系仪表是利用通有交流的固定线圈与在可动铝盘中所感应的电流的相互作用产生转动力矩的，等等。

转动力矩 M 的大小是被测量 x 的函数，即

$$M = F_1(x)$$

(2) 产生反作用力矩

如果仪表只有转动力矩作用在活动部分上，则不管被测量为何值，活动部分都会偏转到满刻度位置，直到不能再转动为止，因而无法指示出被测量的大小。所以仪表的测量机构内还必须要有反作用力矩 M_α 作用在仪表的活动部分上，其方向与转动力矩相反，而大小是仪表活动部分偏转角位移的函数，即

$$M_\alpha = F_2(\alpha)$$

当测量被测量时，转动力矩作用在仪表活动部分上，使它发生偏转，同时反作用力矩也作用在活动部分上，且随着偏转角的增大而增大，当转动力矩与反作用力矩相等时，指针就停止下来，指示出被测量的数值。因此

$$\alpha = F(x)$$

在仪表中产生反作用力矩是利用机械力（如利用游丝在变形后具有恢复原状的弹性力及利用悬丝或张丝的扭力）、电磁力、磁场中导体的涡流作用等产生的。

从上式可知，仪表的刻度不一定是线性的。

(3) 产生阻尼力矩

从理论上说，在仪表中，当转动力矩和反作用力矩相等时，仪表指针应静止在某一平衡位置，由于仪表活动部分具有惯性，它不能立刻就停止下来，而是围绕这个平衡位置摆

动，这就造成读数的困难。为了缩短这个摆动的时间，必须使仪表活动部分在摆动过程中受到一个与摆动方向相反的力矩的作用，这种力矩称为阻尼力矩，它能使仪表活动部分更快静止在最后的平衡位置上。产生阻尼力矩的装置称为阻尼器，仪表中常用的阻尼器有空气阻尼器、磁感应阻尼器等。

总的来说，转动力矩和反作用力矩是仪表内部的一对主要矛盾，两者相互作用决定了仪表的稳定偏转位置，而转动力矩又是主要矛盾的主要方面，正是由于产生转动力矩的方法和机构各不相同，从而构成了各种不同类型的仪表。

三、磁电系仪表

磁电系仪表在仪表中占有极其重要的地位，应用广泛。它常用于直流电路中测量电流和电压；当加上整流器时，也可以用来测量交流电流和电压；当加上变换器时，还可以用于多种非电量的测量，例如磁量、温度、压力等等；当采用特殊结构时，可以构成检流计，用来测量极其微小的电流（如 10^{-10} 安）。在这里，我们要着重介绍磁电系仪表的结构和工作原理。

1、磁电系仪表的结构

磁电系仪表的结构如图2所示。它的磁路系统是固定的，而构成活动部分的是活动线圈、指示器（如指针或灯光反射镜）、转轴、张丝或悬丝等。

通常磁电系仪表的磁路系统包括永磁铁，连接在永久磁铁两端的半圆筒形的“极掌”，两极掌间空腔中固定联接于支架上的园柱形铁芯。极掌与园柱形铁芯之间有一定的气隙。在气隙中的活动线圈，是在一个矩形铝框上用很细的绝缘铜线绕制成的，其两端各连接一个“半轴”，轴尖支持在

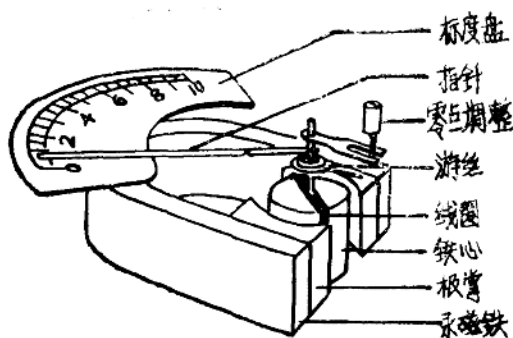


图2 磁电系电流计结构图

宝石轴承里，可以自由转动。指针被固定在“半轴”上。

磁电系仪表通常是用“游丝”产生反作用力矩的，它的一端被固定在仪表的支架上，另一端被固定在转轴上，当仪表的活动部分受到转动力矩的作用而转动时，游丝也随轴而扭转变形，但有力图恢复原状的特性，因此产生了反作用力矩。通过动圈的电流愈大，仪表指针偏转的角度也越大，游丝的反作用力矩也就越大。在磁电系仪表中产生反作用力矩的游丝有两个，螺旋方向是相反的，兼由它们把电流引入动圈的引线。如果用张丝产生反作用力矩，仪表的灵敏度更高。

通常仪表还有一个“调零器”，“调零器”的一端与游丝相连，如果使用前指针不指在零位，可用起子轻轻调节露在表壳外面的“调零器”的螺杆，使指针指在零位。

磁电系仪表一般是利用绕有动圈的铝架来产生阻尼力矩，从而阻止动圈来回摆动。

2、磁电系仪表的工作原理

当永久磁场中的动圈有电流通过时，动圈与磁场相互作用产生一定大小的转动力矩，使其发生偏转，同时与动圈同联在一起的游丝因动圈偏转而发生变形，产生了反作用力矩，且随着活动部分偏转角度的增加而增加。当反作用力矩增加到与转动力矩相等的时候，活动部分最终将停留在相应位置，仪表指针就在标度尺上指示出被测量的数值。

磁电系仪表测量机构气隙中的磁场是均匀的辐射形状分布的，如图 3 所示。设它的磁感应强度为 B ，当动圈通过电流 I 时，作用在动圈与磁场方向垂直的每一边的磁力 F 为：

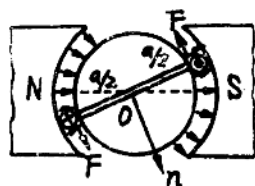


图 3 电流计中的径向磁场与线圈

$$F = BILN \quad (1)$$

式中 L 表示动圈与磁场方向垂直的边的长度； N 表示动圈的匝数。考虑到动圈与磁场方向垂直的两边受到相同的作用力，所以，作用在动圈上的力矩 M 为：

$$M = 2Fr = 2BILNr$$

式中 r 表示铝框中心到框边的距离，动圈所包含的面积 $A = 2rF$ ，则

$$M = BIN A \quad (2)$$

若指针偏转的角度为 α ，则游丝产生的反作用力矩 M_α 为：

$$M_\alpha = D\alpha \quad (3)$$

式中 D 是游丝的反作用系数，其大小由材料性质和尺寸决

定。

当指针在刻度尺上某一位置静止时，转动力矩和反作用力矩相等，即：

$$M = M_d \quad (4)$$

由(2)式、(3)式和(4)式可得：

$$\alpha = \frac{BAN}{D} I = SI \quad (5)$$

式中的 $S = \frac{BAN}{D}$ 为仪表的灵敏度，是仪表的一个重要参量，对某一仪表而言，它是一个常数，因为 B 、 A 、 N 、 D 等量决定于仪表的结构和材料性质，仪表一经造好，这些数值就固定了。

从(5)式可见，由于 α 与 I 成正比，所以，磁电系仪表的刻度是线性的。

四、仪表的误差和准确度

1. 仪表的误差及其表达形式

仪表的误差是仪表的主要特性，它决定了仪表读数对被测量的实际值的接近程度，即准确度。根据引起误差的原因，仪表的误差可分为两种：

(1) 基本误差——仪表在规定的正常条件下进行测量时所具有的误差，它是仪表本身所固有的，是由于结构上和制作技术上的不完善而产生的。如轴承里的摩擦和刻度不准确等原因而产生的。

仪表的正常工作条件是指（详细规定见附录一表2）：

- i) 仪表指针调整到零；
- ii) 仪表按规定的位置安放；

iii) 周围的温度是 20°C ，或是仪表上所标明的温度；

iv) 除地磁外，没有外来磁场；

v) 对交流仪表，电流波形为正弦波，频率是所规定的频率值。

(2) 附加误差——除上述基本误差以外，当仪表不是在正常条件下工作时，还会出现误差，称为“附加误差”。引起仪表示值变化所形成的附加误差的规定见附录一表3。

(3) 仪表误差的表达形式

在力学实验中同学们学过绝对误差和相对误差，但是仪表误差不能用它们表示。因为绝对误差不能反映出两个测量结果究竟那个准确，相对误差虽然可以说明测量结果和被测量的差异程度，但它不能说明仪表性能的好坏，这是因为对于同一仪表来说，它所具有的基本误差，例如摩擦带来的误差等近于某一常数，这样就使得在仪表的标度尺的各个不同部分，相对误差不是一个常数，而且变化很大。因此，电磁测量仪表的基本误差要用一种新的所谓“相对额定误差”（或称“引用误差”）来表示。**相对额定误差就是仪表的绝对误差与仪表测量上限的比值，用百分数表示。**用 β 表示相对额定误差，则有：

$$\beta = \frac{a_x - a}{a_m} \times 100\% \quad (6)$$

式中 a_x 为仪表测量得到的被测量的数值； a 是被测量的实际值（通常以标准表的示值作为被测量的实际值）； a_m 是测量上限，即仪表的量程。对双向标度尺的仪表，测量上限是零标两边测量限绝对值之和。无零位标度尺的指针式仪表，测量上限是标度尺工作部分上下量限差；无零位标度尺的振簧式仪表，测量上限就是仪表的指示值。标度尺特性为对数

的、双曲线的或指数为 3 及 3 以上级数的仪表，测量上限是标度尺工作部分的长度。

对于一个仪表（除无零位标度尺的振簧式仪表等），相对额定误差 β 和测量上限 a_m 已定，测量结果的绝对误差 $a_x - a = a_m \beta$ ，测量结果的相对误差 $E = \frac{a_x - a}{a_x} = \frac{a_m \beta}{a_x}$ ，测量值与测量上限相差愈大，相对误差愈大。

附加误差表表示方法与基本误差表示方法相同。

（4）仪表的准确度

仪表的准确度就是仪表所允许的最大相对额定误差，以 K 表示它的准确度等级，则有：

$$\pm K \% = \frac{\Delta_m}{a_m} \times 100 \% \quad (7)$$

式中的 Δ_m 是仪表的最大绝对误差， a_m 是测量上限。仪表的准确度，我国国家标准规定为七级，即 0.1, 0.2, 0.5, 1.0, 1.5, 2.5, 5.0 级，我国旧标准中准确度的最后一级为 4.0 级，所以目前产品目录中 5.0 级和 4.0 级都有。此外，由于仪表制造工业的不断发展，目前已出现 0.05 级的仪表，各等级准确度的仪表在规定条件下使用时的相对额定误差不应超出下表所规定的值。所谓多少级仪表就是其最大相对额定误差是多少。

各级仪表的基本误差

仪表的准确度等级	0.1	0.2	0.5	1.0	1.5	2.5	5.0
基本误差%（相对额定误差）	± 0.1	± 0.2	± 0.5	± 1.0	± 1.5	± 2.5	± 5.0

五、仪表的灵敏度和仪表常数

在测量过程中,如果被测量变化一个很小的 ΔX 值,引起测量仪表活动部分偏转角改变一个 $\Delta \alpha$,则 $\Delta \alpha$ 与 ΔX 的比值称为该仪表的灵敏度,用符号 S 表示,即

$$S = \frac{\Delta \alpha}{\Delta X}$$

当 $\Delta X \rightarrow 0$ 时,

$$S = \lim_{\Delta X \rightarrow 0} \frac{\Delta \alpha}{\Delta X} = \frac{d\alpha}{dX} \quad (8)$$

这个定义不适用于积算仪表,如电度表。由上式可见,被测量 X 不同(如电流、电压、电量),则 S 的量纲不同。因此,在用灵敏度这个概念时,应说明“仪表对电流的灵敏度 S_i ”或是“仪表对电压的灵敏度 S_v ”等等。

对线性刻度的仪表,则

$$S = \frac{\alpha}{X}$$

这时灵敏度的大小就等于一个单位的被测量引入测量仪表所引起的偏转格数。

灵敏度的倒数称为“仪表常数”,用符号 C 表示,即

$$C = \frac{1}{S}$$

同样需指明是“电流灵敏度 C_i ”还是“电压灵敏度 C_v ”,测量值就等于仪表常数 C 与指针偏转角位移 α 的乘积。

灵敏度是仪表的重要技术特性之一, C 的数值越小,也就是 S 的数值越大,仪表的灵敏度就越高。