高等学校试用教材

普通物理实验

（二、电磁学部分）

杨介信　陈国英　编

高等教育出版社

高等学校试用教材

普通物理实验

（二、电磁学部分）

杨介信　陈国英

高等教育出版社

内 容 简 介

本书是根据教育部制定的高等师范院校物理专业普通物理实验教学大纲的电磁学部分编写的，共廿个实验．可供高等院校物理专业普通物理实验课程作试用教材，也可供其它有关专业普通物理实验课程参考。

责任编辑　曹建庭

高等学校试用教材

普通物理实验

（二、电磁学部分）

杨介信　陈国英

*

高等教育出版社出版

新华书店北京发行所发行

北京大白楼印刷厂印装

*

开本 850×1168　1/32　印张 10.5　字数 265,000

1985年10月第1版　　1985年10月第1次印刷

印数　00,001—10,800

书号 13010·01128　　定价 2.20 元

前　　言

本书是根据教育部1980年制订的高等师范院校物理专业普通物理教学大纲的电磁学部分编写的. 于80年全国高师审稿会议通过. 本书可作为高等师范院校物理系教材，也可作为综合性大学与工科院校物理实验课的教学参考书.

结合该教材的编写，我们和有关兄弟院校举办了四期全国高师电磁学实验学习讨论班，对电磁学实验中的误差理论及每个实验的内容和方法进行了分析和讨论.

本教材共包括二十个实验. 其中实验六和实验十一有(a)和(b)两个内容,实验十三有(a)、(b)和(c)三个内容. 尽管内容不全相同，但实验的原理和使用的仪器及方法彼此接近. 这便使兄弟院校结合各校的条件和设备有更多的选择和考虑余地.

与一个实验有关的参考问题,作为附记写在有关实验之后,可供进一步研究、参考.

基于计算技术的发展和推动,以及避免学生负担过重,建议在搞清误差概念、误差计算的基础上,尽量采用带有可编程序和统计计算的计算器，或者计算机进行数据处理及误差计算，这样不但可节省时间,而且更有利于提高实验的质量.

为了作好实验前的预习，建议学生在看完实验内容和要求之后,回答有关的预习思考题,以达到弄清概念、明确要求. 实验完成之后可借助于复习思考题进行分析和讨论,达到温故知新、循序渐进.

本书以华东师大"电磁学实验讲义"为蓝本，参考并吸收了各兄弟院校特别是北京师大(曾贻伟、龚德纯、杨春元)、西南师院(阎

其昌)和山东大学(孟尔熹)所提供的有关资料和经验,最后由杨介信、陈国英编写而成的.

在本书的修改定稿工作中,邬学文和林抒同志曾给了我们热情的指导和帮助. 上海师范大学张梦心和吴祥兴同志对全稿作了修改,使我们受益不浅. 特别是责任编辑曹建庭同志为了提高教材的质量,一丝不苟地多次反复审阅和修改,对本书的定稿工作提出了很多宝贵的意见. 多期全国高师电磁学实验学习讨论班的全体同志对本书的内容和方法提出了许多有益的建议,尤其是杨述武、李影、赵元良等实验教学经验非常丰富的老师们卓有见识的意见,给予我们极大支持和鼓励,在这里,我们谨致以衷心的感谢. 由于作者的水平和教学经验有限,编写中不免有许多的缺点和错误,请各位教师和同学批评指正.

编　者

1984年

对电磁学实验教学的建议

电磁学实验是继力学、热学实验之后开设的第三组基础物理实验. 它主要包括: 电场和磁场的描绘; 直流电路, 交流电路和暂态电路; 带电粒子在电场、磁场中的运动和非电量与电量的相互转换等四个方面内容.

在电磁学实验中, 用惠斯通电桥测中值电阻; 用电位差计测量电动势和校准电压表或电流表; 用冲击电流计测量电量或短暂变化的电流; 用示波器观察波形及其有关测量和电场、磁场的描绘等属于需要重点掌握的方法;

用伏特计、安培计测量二极管的安-伏特性; 用开耳芬电桥测量低阻值电阻; 用交流电桥测量电感量和电容量; 电路中的幅频和相频特性测试法和带电粒子在电场、磁场中的运动等属于需要基本掌握的方法;

非平衡电桥的应用; 灵敏电流计的特性研究; 用示波器观察和研究 *LRC* 电路的暂态过程和非电量的电测法等, 属于需要一般掌握的方法.

通过电磁学实验, 要求学生: 正确使用电磁学中的基本仪器; 熟练运用基本测量方法, 独立排除一般的常见故障, 能比较正确地分析实验中存在的系统误差, 提出些改进的意见和合理的建议, 并运用偶然误差处理的方法计算平均值、标准差、作图和推导出经验公式.

按照大纲本书选编了廿个实验. 每个实验内容按四学时(预习一学时, 实习三学时)安排. 全部实验[包括实验前讲授"误差和数据处理基本知识(三)"、阶段小结、复习和考试]共需二十五周, 约一个半学期完成. 课内与课外学时比约为 1:1.5.

目　录

前言……1

对电磁学实验教学的建议……3

绪论……1

实验一　静电场的描绘……36

实验二　伏安法测二极管的特性……46

实验三　灵敏电流计特性的研究……59

实验四　用惠斯通电桥测电阻……74

实验五　半导体热敏电阻特性的研究……87

实验六a　用板式电位差计测量电池的电动势和内阻……94

实验六b　用箱式电位差计校正电表……103

实验七　万用电表的制作和定标……116

实验八　磁场的描绘……134

实验九　用开耳芬电桥测量低电阻……147

实验十　磁致伸缩系数的测定……158

实验十一a　霍耳效应……170

实验十一b　热电偶的分度……182

实验十二　冲击电流计特性的研究……189

实验十三a　用冲击电流计测电容及高电阻……207

实验十三b　用冲击电流计测螺线管内轴向磁场的分布……214

实验十三c　用冲击电流计测铁磁物质的磁化曲线……220

实验十四　示波器的使用……228

实验十五　电子束线的偏转……244

实验十六　电子束线的聚焦……258

实验十七　交流电桥……………………………………………269
实验十八　*LRC* 电路的稳态研究………………………………282
实验十九　*LRC* 电路谐振特性的研究…………………………296
实验二十　*LRC* 电路的暂态过程研究…………………………311

绪　论

§1　关于实验测量的一些基本概念

我们知道，物理量的测量值与它的真正值或者平均值之间总有差异，这种差异称为误差．测量值的平均值与它的真正值的差异足够大时，我们就说，测量值存在**系统误差**，用 $\delta(=\bar{x}-x_0)$ 表示（$\bar{x}$ 为测量值的平均值，x_0 为它的真正值或者准确值*），它描述测量结果的准确程度，δ 值越小准确度越高，反之则越低．测量值与平均值的差异称为**偶然误差**或称**残差**、**偏差**，用 ν 或 $\Delta(=x-\bar{x})$ 表示，它描述测量结果的精密程度．ν（或者 Δ）越小，测量精密度越高，有效数字位数一定较多，反之，测量精密度越低，有效数字位数较少．当平均值与准确值很接近时，偶然误差与系统误差常常不容易区分．如果测量结果不仅准确而且又非常精密，即包含的两种误差都小，那么测量的精确度就高．

由于测量就是拿待测量直接或间接地与另一个已知量相比较，因此测量可分为直接测量和间接测量两种．例如单摆摆长的测量为直接测量，用单摆测量重力加速度是基于测量摆长和单摆的振动周期之后，根据公式计算得到，因此重力加速度是间接测量到的．同一个量可由多次也可由单次测量来完成，多次测量又可分为多次等精密度（或称多次等精度）测量和多次不等精密度（或称多次多精度）测量．对于以上各种测量，如何恰当地确定测量结果和它的误差大小，这是数据处理中的重要内容．

---

* **真正值**是绝对准确的值，**准确值**是相对准确的值，准确值比**测量值**更准确些．例如圆周率的真正值是 $\pi=3.14159265\cdots$，测量值可能是 3.1416，则准确值是 3.141592．

在实验中常常用作图法研究 x 与 y，即二个变量间的关系.根据作出的曲线与标准曲线比较可得到二个变量间的经验公式，这种方法比较简单和直观，但是精密度较差，作出的曲线不易准确、可靠，如果采用**回归分析法（也称最小二乘法）**处理二个变量间的关系，那么得到的函数关系（或经验公式）比作图法可信、精确，缺点是计算比较麻烦，不过借助于电子计算机或计算器*完全可以克服这缺点，这是一个重要的数据处理方法，也是由实验上升到理论的一种常用方法.

为了提高测量结果的准确度，必须对测量的原理、仪器和用具以及处理方法进行细致地分析和研究.由于测量方法的不正确，测量系统会严重地影响着工作系统的正常状态，造成测量结果准确度的降低，甚至得到错误的结论，因此检查实验数据时应首先研究本实验所允许的系统误差范围，如果实验数据超出预计范围，就要分析产生误差的各种可能原因，然后逐个检查和排除，只有这样，才能在实验中形成和建立正确的物理概念，培养和提高分析问题、解决问题的能力，学会和运用科学的测量方法.

§2 一次直接测量

有许多待测量不可能进行多次重复测量，也有不少的待测量能一次精确地测定，没有必要多次重复测量，这两种情况都是一次测量就得到结果的，我们称为一次直接测量.一次直接测量如何合理地确定它的测量结果值和它的误差范围，是最基本而又非常普遍的问题.在电磁学实验中，一次直接测量用得较多，例如用电表测量电流、电压或者其他量，其值都是根据电表指针偏离零位的角度大小来度量的，如图 0-1 所示，指针指示着 7.20mA 电流，估

---

* 有的电子计算器，如 EL5002 型科学计算器可以直接计算回归方法中的有关常数.

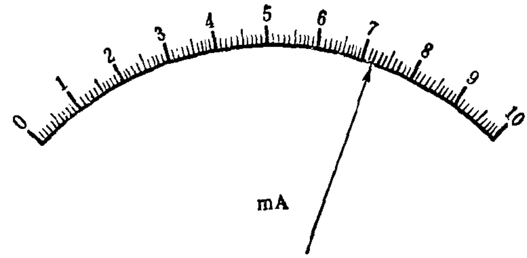

图 0-1　电流计读数.

计值 $\bar{U}$ 有一定的参考意义，为了估计电流值的误差范围，必须知道电表的级别，若电表的级别为 1.0 级，即指示值带有不大于满量程 1% 的系统误差．图 0-1 所示的电流表由于它满量程的电流值为 10.0 毫安，根据一级表的要求，则电流表的系统误差

$$\delta \leqslant 10.0 \times 0.01 = 0.10(\mathrm{mA}).$$

即电流测量值和它的范围可写成：　$I = 7.20 \pm 0.10\ (\mathrm{mA})$．根据指针的位置可读到 0.01 (mA)，但是级别告诉我们电流值只准确到小数后第一位，因此最后正确的结果应写成：$I = 7.2 \pm 0.1(\mathrm{mA})$．由于通常计量仪器的最小分度值是按仪器所能达到的准确度来确定的，因此读数时按最小分度值读取就可以了．通常 1 级表有100 个分度，0.5 级表有 $\left(\frac{1}{0.005} = \right)$200 个分度，2.5 级表有 $\left(\frac{1}{0.025} = \right)$40 个分度…．对于那些需要作进一步运算的读数，可在最小分度间再估读一位，估读值根据实验者判别的能力来确定，一般可估读到最小分度的 1/10、1/4 或 1/2．

在力、热学实验中，我们常用天平称衡物体的重量，它与电桥、电位差计的平衡（指零）法原理相同．当天平平衡时，指针指在“0”刻线上，物体的重量就是砝码的重量，当物体的重量增加一个小重量，或者平衡时，砝码盘中再增加一个小砝码，天平将失去平衡，指针偏离“0”线，若指针偏离“0”线的格数为 α(div)，两盘相差

的小重量为 δm，则天平的灵敏度

$$S_l=\alpha/\delta m(\text{div}^*\cdot\text{g}^{-1})\text{或者}(\text{div}\cdot\text{kg}^{-1}).$$

它的倒数就是天平的感量，即

$$K_l=\delta m/\alpha\quad(\text{g}^*\cdot\text{div}^{-1})\text{或者}(\text{kg}\cdot\text{div}^{-1}).$$

显然，天平两盘相差单位质量时，指针偏离的格数越多，天平的灵敏度越高，即天平的感量越小．例如天平平衡时物体的重量为 $P=145.02(\text{g})$，当游码偏离平衡位置一个分度时(即 0.01g)，天平指针正好偏转一个分度，则

$$S_l=1.0\text{div}/0.01\text{g}=1.0\times10^2(\text{div}\cdot\text{g}^{-1}),$$

$$K_l=0.010(\text{g}\cdot\text{div}^{-1}).$$

如果天平的最小分度就是它能达到的最高准确度，那么待测物体的重量应该写成

$$P=145.02\pm0.01(\text{g}).$$

实验时利用灵敏度的概念可以方便地计算出待测物体的重量及其误差，例如称衡上述物体时，当砝码 $P_1=145.0$ g 时，指针偏在"+2"的分度线上，当砝码 $P_2=145.1$g 时，指针偏在"−8"分度线上，由于天平平衡点附近的灵敏度保持不变**，因此

$$S_l=\frac{\alpha_1}{P_x-P_1}=\frac{\alpha_2}{P_x-P_2}=\cdots.$$

式中 α_1 和 α_2 分别是砝码 P_1 和 P_2 时的偏格，现 $\alpha_1=+2.0(\text{div})$，$\alpha_2=-8.0(\text{div})$，因此

$$S_l=\frac{2.0}{P_x-145.0}=\frac{-8.0}{P_x-145.1},$$

解上述方程，得到 $P_x=145.020(\text{g})$，将 P_x 代入上述方程，求得 $S_l=1.0\times10^2(\text{div}\cdot\text{g}^{-1})$，或者 $K_l=0.010(\text{g}\cdot\text{div}^{-1})$．所以待测物体

* "div"是 division 的缩写，意为"分度"．

** 天平的灵敏度与它的构造有关，特别与秤臂的长短有关，在平衡点附近，秤量变化甚小，秤臂几乎不变，所以天平的灵敏度认为保持不变．

的重量，考虑了天平的准确度后得到

$$P_x = 145.02 \pm 0.01(\mathrm{g}).$$

§3 一次间接测量

有许多待测量不便于直接测量，例如前面提及的用单摆测量的重力加速度，可用计时仪器测量单摆的一次全振动时间作为周期，用米尺一次量得单摆的摆长，最后算得的重力加速度就是一次间接测量到的待测量，它的测量误差应该怎样来确定呢？

令一次间接测量的待测量为 w，它由许多直接量 x_1、x_2、…、x_n 决定，并且有确定的函数关系式

$$w = f(x_1, x_2, \cdots, x_n).$$

对于各直接量的误差分别表示为 δ_1、δ_2、…、δ_n，则 w 的误差由

$$\delta_w = \left(\frac{\partial f}{\partial x_1}\right)\delta_1 + \left(\frac{\partial f}{\partial x_2}\right)\delta_2 + \cdots + \left(\frac{\partial f}{\partial x_n}\right)\delta_n \tag{0-1}$$

确定．如果各直接量间的关系属于乘、除、指数、对数等形式，那么先对 w 取对数，然后再微分(即**对数微分法**)，求得 w 的相对误差计算表示式，

取对数得 $\qquad \ln w = \ln f(x_1, x_2, \cdots, x_n)$，

两边微分得 $\qquad d(\ln w) = d\ln f(x_1, x_2, \cdots, x_n)$，

展开后变为 $\qquad \dfrac{1}{w}dw = \dfrac{\partial \ln f}{\partial x_1}dx_1 + \dfrac{\partial \ln f}{\partial x_2}dx_2 + \cdots + \dfrac{\partial \ln f}{\partial x_n}dx_n.$

将式中 d 改为 δ，就成为相对误差表示式了，

$$\frac{\delta_w}{w} = \frac{\partial \ln f}{\partial x_1}\delta_1 + \frac{\partial \ln f}{\partial x_2}\delta_2 + \cdots + \frac{\partial \ln f}{\partial x_n}\delta_n. \tag{0-2}$$

式中$\left(\dfrac{\partial \ln f}{\partial x_i}\right)$，$(i = 1, 2, \cdots, n)$称为 x_i 的**误差系数**，也称为 δ_i 的**权**．

如果 δ_1、δ_2、…、δ_n 都是固定的系统误差，有确定的正、负号，只要将各误差值连同符号一起代入(0-1)式或(0-2)式，然后进行运算就可得到间接量的系统误差值. 如果各 δ_i 值没有确定的符号而有偶然性，那么，在最不利情况下可能出现的最大误差可以这样来计算，先将各误差项取绝对值，然后求它们的算术和，求得的结果就是间接量的误差值.

在间接量的误差展开式中，我们可以计算出各误差项的数值大小并进行比较，称数值最大项为最大误差项. 如果它存在极小值，则最大误差项满足极小值的实验条件常称为实验的最佳条件. 最佳条件时的测量误差要根据该条件时的误差表示式进行计算. 一般而言，最大误差系数值减小时，其他误差系数值会随之增加. 如果较大的几个误差项的数值基本相等，根据误差正负出现的机会相等的原理，误差项之间相消的可能性较多，因此，实验误差常常比理论计算值要小得多. 特别要注意的是，在最佳条件测量时，间接量的偶然误差值确实会显著降低，但是，如果不能满足最佳条件要求，实验便会给测量结果带来由于偏离最佳条件而产生的系统误差.

§4 多次直接测量

单次测量具有较大的偶然性，因而结果的精确度较差，为了提高测量精度，消除粗差*，在可能条件下都是采用多次测量法. 根据最小二乘法原理可以证明，多次等精度独立测量结果的算术平均值，可作为待测量的最可信赖值或者最佳值，用 $\bar{x}$ 表示，即

---

* 粗差就是粗大误差，由某种特殊原因造成的，已近于或者就是实验中的错误数据，应该去掉.

$$\bar{x}=\frac{\sum_{i=1}^{n} x_i}{n}\,^{*},\tag{0-3}$$

式中 n 是多次测量的次数，x_1、x_2、…、x_n 称为待测量 x 的测量列.

为了衡量测量列中各测量值 x_i 的接近程度(即精密度)，通常采用平均绝对误差(Δ)和标准误差(σ)，即标准差，或又称为均方根差($r.m.s.$)．它们的表示式为

$$\Delta=\frac{\Sigma\,|x_i-\bar{x}|}{n},\tag{0-4}$$

$$\sigma=\sqrt{\frac{\Sigma\,(x_i-\bar{x})^2}{n-1}}.\tag{0-5}$$

对于偶然性误差(或称为随机误差)，用标准差更能反映测量值变化的情况，特别对较大的偶然误差或者粗差非常敏感，因此在实验和计量工作中应用得最为广泛.

统计计算结果告诉我们，如果测量值的数目 n 足够大，那么在测量列中任意一个测量值 x，在$(\bar{x}-\sigma,\ \bar{x}+\sigma)$范围内出现的机会为 68.3%，在$(\bar{x}-3\sigma,\ \bar{x}+3\sigma)$范围内出现的机会为 99.7%．因此为

$$x<\bar{x}-3\sigma$$

或

$$x>\bar{x}+3\sigma$$

---

* 令 $\nu^2=\sum_{i=1}^{n}(x_i-\bar{x})^2$，为了使 $\nu^2\to\min$，合理选择 $\bar{x}$，即计算

$$\frac{d\nu^2}{d\bar{x}}=0$$

的条件，可以得到 $\sum_{i=1}^{n}2(x_i-\bar{x})(-1)=0$，即 $\sum_{i=1}^{n}x_i-\sum_{i=1}^{n}\bar{x}=0$，$\bar{x}=\frac{\Sigma x_i}{n}$，由于

$$\frac{d}{d\bar{x}}\left(\frac{d\nu^2}{d\bar{x}}\right)>0,$$

因此 $\bar{x}$ 的表示式是 $\nu^2\to\min$ 时的条件．证毕．

的测量值实际是不大可能的，所以把$(\bar{x}-3\sigma,\ \bar{x}+3\sigma)$定为测量列的范围，$3\sigma$为偶然误差的误差界，超过误差界的测量值便认为是“粗差”，应该予以剔除．如果测量值的数目（即测量次数）较少($n\leqslant 10$)，用3σ作为粗差鉴别标准会剔不出粗差．肖维勒采用了比较合理的剔除粗差的标准，即肖维勒准则．肖维勒标准认为，对于以相同精度相互独立测量到的数据，若测量值x_i满足

$$|x_i-\bar{x}|>\omega_n\sigma \tag{0-6}$$

时，则x_i就是粗差，应该在测量列中剔除它．上式中的ω_n值与测量值的个数n有关，可查阅下表．由表可知，3σ作为误差界时需要测量200次左右，测量次数越少，ω_n值也越小，测量值允许的范围也越小．

表 0-1　$\omega_n \sim n$ 的关系

n	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
ω_n	1.38	1.53	1.65	1.73	1.80	1.86	1.92	1.96	2.00	2.03
n	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22
ω_n	2.07	2.10	2.13	2.15	2.17	2.20	2.22	2.24	2.26	2.28
n	23	24	25	30	40	50	75	100	200	
ω_n	2.30	2.31	2.33	2.39	2.49	2.58	2.71	2.81	3.02	

为了确定算术平均值的有效数字位数（即精密度），应该先计算算术平均值的标准差$\sigma_{\bar{x}}$．可以证明

$$\sigma_{\bar{x}}=\frac{\sigma}{\sqrt{n}}^{*}. \tag{0-7}$$

由上式可知，当测量次数增加时，算术平均值的精密度随着提高．n值无限增加时，由于各种偶然因素的影响，σ同时增加，最后$\sigma_{\bar{x}}$趋于某一确定值，因此过多的测量次数不会提高平均值的测量精

* 可参阅张世箕编著“测量误差及数据处理”第20页中的推导．

密度. 算术平均值的一般表示式写作

$$\bar{x} \pm \sigma_{\bar{x}} = \quad \pm \quad (单位),$$

而不能写作

$$\bar{x} \pm \sigma = \quad \pm \quad (单位).$$

[例题 1] 用相同的方法重复测量十五次温度，得到如下数据. 试确定所测温度的最佳值和它的标准差.

i	1	2	3	4	5	6	7	
t_i(°C)	20.42	20.43	20.40	20.43	20.42	20.43	20.39	
i	8	9	10	11	12	13	14	15
t_i(°C)	20.20	20.40	20.43	20.42	20.41	20.39	20.39	20.40

根据(0-3)、(0-5)式可知

$$\bar{t} = \frac{\sum_{i=1}^{15} t_i}{n}$$

$$= \frac{20.42 + 20.43 + \cdots + 20.40}{15} = 20.40^*,$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{15}(t_i - \bar{t})^2}{n-2}}$$

$$= \sqrt{\frac{(20.42-20.40)^2 + (20.43-20.40)^2 + \cdots + (20.40-20.40)^2}{15-1}}$$

$$= 0.06.$$

为了检查各种 t_i 值是否带有粗差，先取 3σ 作为取舍标准，由于 $3\sigma = 3 \times 0.06 = 0.18$，因此 t_i 值应在下列范围内

* 计算时为了使 $\bar{t}$ 与 t_i 的有效数字位数一致，取 $\bar{t} = 20.40$.