

高等学校教材

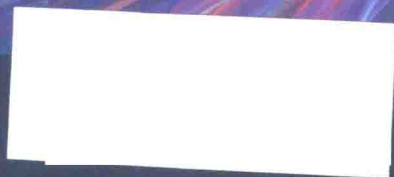
普通物理实验

(二、电磁学部分)

第三版

杨述武 主编

杨介信 陈国英 编



高等教育出版社

图书在版编目(CIP)数据

普通物理实验(2):电磁学部分/杨述武主编. —3版. —北京:高等教育出版社,2000(2001重印)

高等学校教材

ISBN 7-04-007946-1

I. 普… II. 杨… 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 (1999) 第 67323 号

普通物理实验(二、电磁学部分) 第三版

杨述武 主编

出版发行 高等教育出版社

社 址 北京市东城区沙滩后街 55 号

邮政编码 100009

电 话 010-64054588

传 真 010-64014048

网 址 <http://www.hep.edu.cn>

经 销 新华书店北京发行所

印 刷 高等教育出版社印刷厂

开 本 850×1168 1/32

版 次 1985 年 10 月第 1 版

印 张 10.375

2000 年 5 月第 3 版

字 数 250 000

印 次 2001 年 1 月第 2 次印刷

定 价 10.20 元

凡购买高等教育出版社图书,如有缺页、倒页、脱页等
质量问题,请在所购图书销售部门联系调换。

版权所有 侵权必究



内 容 提 要

《普通物理实验》一套共4册,分别为力学及热学部分,电磁学部分,光学部分,综合及设计部分,是在第2版前3册的基础上增订而成的。全书保持了原书通用性好、可读性强及注重能力培养的特色。同时,为了更好地适应教学需要,修改了前3册部分实验的论述;并增加了第4分册,专门推出一批较成熟、易推广的综合及设计性实验。本次修订时还改正了原书中的一些错误,并根据最新的有关国家标准和规范统一了有关名词、单位和符号,从而使全书更加科学化和规范化。

本书是这套书的第2分册,为电磁学部分,共计29个实验。可作为高等学校本科物理及相近专业普通物理实验课的教材,也可供师专及卫电使用。

第三版前言

本书自 1990 年修订之后,发现有些地方修订不细,承高等教育出版社大力协助,又进行了一次修订工作.主要工作有:

1. 根据全国自然科学名词审定委员会公布的《物理学名词(1996)》订正、统一了有关名词;
2. 对测量的评定,一律改用“标准不确定度”;
3. 修改了一部分实验的论述,订正了发现的错误.

我们感谢读者给予的支持,希望读者继续对本书提出批评和建议.

编者

1997 年秋

第二版前言

本书是在第一版的基础上,参照1989年国家教委高等学校理科物理学教材编审委员会物理实验编审小组拟订的“综合大学、师范院校普通物理实验教学基本要求”(由国家教委高教司颁发,供试行.见(89)教高司字122号文)组织修订的.

本书共收入29个实验,比第一版增加了5个实验,其中2个是基本电路实验,3个是实用性的实验.

本书在原有基础上着重考虑了以下几点:

1. 增强通用性

尽量使本书适应不同规格的仪器;

处理数据的方法不作统一规定,例如研究二物理量之间的关系,既可以用图解法,也可以用线性回归法或其它计算方法,我们希望学生能熟悉各种处理方法.

2. 增进易读性

适当删减字数,减少学生的阅读时间;

在原理部分增加些小标题,使学生阅读时容易抓住中心问题.

3. 加强手、脑并用的训练

注意加强动手训练;

努力使学生在动手操作时,增加分析的内容,而不是给学生一套操作指令.

本书的修订工作是在山东大学孟尔熹同志的倡议下,在高等教育出版社曹建庭同志的大力支持下进行的,东北师大赵元良同志对本书的修订提出了宝贵的意见.我们在修订此书时,着重参考了以下几本实验书:

贾玉润、王公治、凌佩玲主编,《大学物理实验》,复旦大学出版社,1987;

孟尔熹主编,《普通物理实验》,山东大学出版社,1988;

苏登记编著,《大学物理实验指南(电磁学分册)》,厦门大学出版社,1989;

赵元良编著,《普通物理实验(电磁学部分)》,东北师大校内教材,1990.

我们对鼓励和支持本书修订工作的各位同志致以衷心的感谢.

由于作者的水平和教学经验所限,修订本中不免有缺点和错误,请各位指导教师和同学批评指正.

编 者

1991年春

致学生读者

1. 你们已经做了力学和热学实验,有过成功的喜悦,也可能有过失败的苦恼,现在要开始做可能使你们更感兴趣的电磁学实验,因此应当回顾一下在过去的实验中为了做好实验是如何做的.

2. 做电磁学实验,电路的设计与分析是很重要的,应明确电路中各部分的作用,选用合适的仪器,防止接线出错. 要注意,就是在最简单的电路——制流电路和分压电路的安排中,也时常会出错.

3. 调节仪器是很好的训练,要想调得又快又好,需有较高的操作技能,还要会分析.

4. 在实验中遇到故障时应在切断电源后审查:

(1) 电路设计正确否?

(2) 实际电路与电路图一致否? 例如在仪器的安排方面,接线特别是滑线变阻器的接线方面,两者是否一致.

(3) 仪器的功能、量限合适否?

(4) 参量的选择合适否? 等等.

分析故障并予以排除是培养分析能力的好机会,不要轻易求助别人.

5. 学习实验的最终目的是能独立做实验,这包括方案设计、仪器选择、步骤安排、参量选取、故障分析、数据处理和结果评论等方面,但这些方面的训练并不是通过某一个(或每一个)实验全面进行的,而是在每次实验中对其中某一方面做些探索.

6. 要牢记电磁学实验操作规程,养成科学的工作习惯.

电磁学实验操作规程

1. 联接电路时,必须有规整的电路图,对电路各部分的作用应明确,对电路中电源、仪器、电表及其他器具的规格应预先定好.

2. 选择出合用的仪器及用具,参照电路图将它们分布到实验台上,注意安全并能很方便地进行观察、操作和读数.

3. 对多功能、多量程的仪表,要调到合用的功能状态和量程,对灵敏度可调的仪器要先调到灵敏度最低的状态.

4. 连线时,应将电路分为主回路和支路,从电源一端开始沿主回路按顺序进行,其次为支路;主回路中必需有开关(先断开!);导线最好有几种颜色的,主、支回路分别用一种颜色.

5. 往接线柱上接导线时,应按顺时针方向将导线缠上.

6. 电路联接后,必须认真复查,可请指导教师检查,但是要确信自己所联电路是正确的,绝对不允许未经仔细审查电路就通电试试看!

7. 实验中途调换仪器、仪器换档、改变量程、改变接线,都要先切断电源.

8. 实验仪器显示任何不正常,都要先切断电源.

9. 实验结束时,将仪器调到最安全的状态再切断电源,如果时间容许应审查记录,看是否有漏测或错误,最后拆除连线,整理好仪器和导线.

目 录

第三版前言	1
第二版前言	1
致学生读者	1
电磁学实验操作规程	1
绪论	1
§1 测量数据处理的基本问题	1
§2 二个变量关系的研究——作图法	5
§3 二个变量线性关系的研究——分组算法	11
§4 二个变量关系的研究——最小二乘法	12
§5 电磁学实验基础知识	17
§5-1 电表	17
§5-2 万用电表	28
§5-3 电阻器	32
§5-4 直流电源	35
§5-5 电磁学实验中用的标准器	36
实验一 制流电路与分压电路	40
实验二 伏安法测电阻	49
实验三 伏安法测二极管的特性	56
实验四 静电场的描绘	59
实验五 用惠斯通电桥测电阻	67
实验六 半导体热敏电阻特性的研究	76
实验七 用板式电势差计测量电池的电动势和内阻	82
实验八 用箱式电势差计校正电表	89
实验九 低电阻的测量	98
实验十 万用电表的制作与定标	104
实验十一 灵敏电流计特性的研究	114

实验十二	冲击电流计特性的研究	126
实验十三	用冲击电流计测电容及高电阻	144
实验十四	用冲击电流计测螺线管内轴线上磁场的分布	151
实验十五	用冲击电流计测铁磁物质的磁化曲线	158
实验十六	磁场的描绘	166
实验十七	磁致伸缩系数的测定	175
实验十八	霍耳效应	189
实验十九	温差电偶的定标	201
实验二十	电子示波器的使用	209
实验二十一	铁磁物质动态磁滞回线的测试	222
实验二十二	电子束线的偏转	230
实验二十三	电子束线的聚焦	239
实验二十四	交流电路功率的测量	248
实验二十五	交流电桥	262
实验二十六	<i>LRC</i> 电路的稳态特性	275
实验二十七	<i>LRC</i> 电路的暂态过程研究	288
实验二十八	<i>LRC</i> 电路谐振特性的研究	302
实验二十九	地磁场水平分量测量	312

绪 论

§ 1 测量数据处理的基本问题

物理实验中对一物理量进行测量的主要目的是:(1)获得被测量的最可信赖值;(2)对最可信赖值的可靠性作出估价,即给出被测定量的真值在某个量值范围的一个评定.有关在普通物理实验范围内的数据处理理论及方法,已在《普通物理实验(一、力学、热学部分)》中有过介绍,在此只作必要的摘记与补充.

1. 直接测量

设 x_1, x_2, \dots, x_n 为某一物理量 X 的 n 个等精度测量值,则可按以下顺序处理数据.

(1) 求算术平均值 \bar{x}

$$\bar{x} = \Sigma x_i / n \quad (0-1-1)$$

(2) 计算测量列标准偏差 s

$$s = [\Sigma(x_i - \bar{x})^2 / (n-1)]^{1/2} \quad (0-1-2)$$

(3) 剔除坏数据(格罗布斯判据)

当某一测量值 x_k 满足下列关系时,可认为是坏数据而剔除

$$x_k < \bar{x} - G_n \cdot s \quad \text{或} \quad x_k > \bar{x} + G_n \cdot s \quad (0-1-3)$$

式中 G_n 为格罗布斯判据系数.各 n 值的 G_n 值见下表.

(4) 剔除坏数据后,再求平均值 \bar{x} 、测量列标准偏差 s 及平均值标准偏差 $s(\bar{x})$.

$$s(\bar{x}) = s/\sqrt{n} \quad (0-1-4)$$

格罗布斯判据系数表

n	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
G_n	1.15	1.46	1.67	1.82	1.94	2.03	2.11	2.18	2.23	2.29
n	13	14	15	16	17	18	19	20	25	30
G_n	2.33	2.37	2.41	2.48	2.47	2.50	2.53	2.56	2.66	2.74

(5) 一般取剔除坏数据后的算术平均值为真值的最佳估计值。当测量值中某项系统误差 ζ 的符号与大小已知时,则取其符号相反值 ($-\zeta$) 为修正值,平均值加修正值为被测量 X 的真值的最佳估计值,即

$$X = \bar{x} + (-\zeta) \quad (0-1-5)$$

(6) 直接测量的不确定度

测量的理想是获得被测量在测量条件下的真值,但是由于测量时不可避免的误差,测量结果将偏离真值。因为测量结果是真值的近似值,所以应给出此近似值可靠程度的评价,测量不确定度就是此评价的指标。

测得值不等于真值,可以设想真值就在测得值附近的一个量值范围内,测量不确定度就是评定此量值范围。设测得值为 x ,其测量不确定度为 $u(x)$,则真值可能在量值范围 $[x - u(x), x + u(x)]$ 之中。显然,不确定度 $u(x)$ 越小,此量值范围就越窄,用此测得值 x 作为真值的估计值就越可靠。

对测量不确定度的评定,常以估计标准偏差去表示大小,这时称其为标准不确定度。

测量误差有偶然误差和系统误差,对其评定方法也不同。

① A类标准不确定度的评定 这是针对偶然误差的,当求出被测量 X 的平均值标准偏差 $s(\bar{x})$

$$s(\bar{x}) = \sqrt{\frac{\sum(x_i - \bar{x})^2}{n \cdot (n-1)}}$$

则 A 类标准不确定度 $u_A(x)$ 等于算术平均值标准偏差,即

$$u_A(x) = s(\bar{x}) \quad (0-1-6)$$

按误差理论的高斯分布, 如果不存在其它误差, 则量值范围 $[\bar{x} - u(x), \bar{x} + u(x)]$ 中包括真值的概率为 68%。如扩大量值范围为 $[\bar{x} - 1.96u(x), \bar{x} + 1.96u(x)]$, 则其中包括真值的概率为 95%, 此时 $1.96u(x)$ 称为置信概率 95% 的不确定度。

② B 类标准不确定度的评定 这是针对系统误差的, B 类评定, 有的依据仪器说明书或检定书, 有的依据仪器的准确度等级, 有的则粗略的依据仪器的分度值或经验, 从这些信息可以获得该项系统误差的极限值 Δ (有的标出容许误差或示值误差), 对此误差, 一般按误差理论的均匀分布处理, 其标准差为 $\Delta/\sqrt{3}$, 则 B 类标准不确定度 $u_B(x)$ 取为

$$u_B(x) = \frac{\Delta}{\sqrt{3}} \quad (0-1-7)$$

但实际上该项误差的分布可能不是严格的均匀分布, 那时上式中的换算系数将和 $\sqrt{3}$ 不同, 在此是近似的处理。

例如, 使用一准确度等级为 0.5 级, 量程 0~100 mA 的电流计测一电路的电流强度 I , 则由电流计的基本误差引入的 I 的标准不确定度就是 B 类评定, $\Delta = 0.5\% \times 100 \text{ mA}$, 则

$$u_B(I) = (0.5\% \times 100) \text{ mA} / \sqrt{3} = 0.29 \text{ mA}$$

③ 合成标准不确定度 $u_c(x)$

被测量 x 不确定度的 A 类评定或 B 类评定, 均为所求不确定度的一部分, 最后要合并为合成标准不确定度。参加合成的标准不确定度, 不论来自 A 类评定还是 B 类评定, 都是等价的, 设要合成的标准不确定度有 k 项, 用方和根方式合成, 即

$$u_c(x) = \sqrt{\sum_{i=1}^k u^2(x_i)} \quad (0-1-8)$$

2. 间接测量

(1) 真值的最佳估计值 设 $y = y(x_1, x_2, \dots, x_m)$, 即间接测量值 y 是由 m 个直接测量值求出, 则 y 的最佳估计值取为

$$y = y(\bar{x}_1, \bar{x}_2, \dots, \bar{x}_m)$$

(2) 不确定度的合成传递(合成) 已知 $y = y(x_1, x_2, \dots, x_m)$, 又设 x_1, x_2, \dots, x_m 的标准不确定度为 $u(x_1), u(x_2), \dots, u(x_m)$, 则不确定度传递公式, 或 y 的合成标准不确定度为

$$u_c(y) = \sqrt{\left(\frac{\partial y}{\partial x_1} u(x_1)\right)^2 + \left(\frac{\partial y}{\partial x_2} u(x_2)\right)^2 + \dots + \left(\frac{\partial y}{\partial x_m} u(x_m)\right)^2} \quad (0-1-9)$$

对幂函数 $y = Ax_1^a \cdot x_2^b \cdots x_m^k$, A 为无量纲量, 则为

$$u_c(y) = y \sqrt{\left(a \frac{u(x_1)}{x_1}\right)^2 + \left(b \frac{u(x_2)}{x_2}\right)^2 + \dots + \left(k \frac{u(x_m)}{x_m}\right)^2} \quad (0-1-10)$$

3. 非等精度测量值的综合

当待测量是用不同方法或不同准确度仪器测得的, 这些测量值为非等精度测量值, 从这些测量值求最可信赖值, 要用加权平均. 设 x_1, x_2, \dots, x_n 的权分别为 p_1, p_2, \dots, p_n , 则加权平均为

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n p_i x_i}{\sum_{i=1}^n p_i} \quad (0-1-11)$$

参照式(0-1-9), 可得加权平均 \bar{x} 的标准不确定度合成公式为

$$u(\bar{x}) = \left[\left(\frac{p_1}{\sum p_i}\right)^2 u^2(x_1) + \left(\frac{p_2}{\sum p_i}\right)^2 u^2(x_2) + \dots + \left(\frac{p_n}{\sum p_i}\right)^2 u^2(x_n) \right]^{1/2} = \left[\frac{\sum p_i^2 u^2(x_i)}{(\sum p_i)^2} \right]^{1/2}$$

理论分析可知, 权 p_i 与其相应标准不确定度的平方成反比, 因此上式可写成

$$u(\bar{x}) = \left[\frac{\sum \left(\frac{1}{u^2(x_i)}\right)^2 u^2(x_i)}{\left(\sum \frac{1}{u^2(x_i)}\right)^2} \right]^{1/2} = \left[\frac{1}{\sum \frac{1}{u^2(x_i)}} \right]^{1/2} \quad (0-1-12)$$

例：已知同一个电阻的三种(或三组)测量结果值：

$$R_1 = (350 \pm 1) \Omega$$

$$R_2 = (350.3 \pm 0.2) \Omega$$

$$R_3 = (350.25 \pm 0.05) \Omega$$

(表示式中“ \pm ”符号后是标准不确定度。)

求：电阻的平均值 \bar{R} 及其标准不确定度 $u(\bar{R})$ 。

解：根据 p_i 与 $u^2(R_i)$ 成反比，有

$$p_i = k/u^2(R_i)$$

式中 k 为比例常数。由给定的测量结果可以得到

$$p_1 : p_2 : p_3 = k/u^2(R_1) : k/u^2(R_2) : k/u^2(R_3) = k : 25k : 400k$$

若取 $k=1$ ，则各权之比就是最简单的整数比，即 $p_1=1$ ， $p_2=25$ ， $p_3=400$ ，由(0-1-11)和(0-1-12)式可以求得 \bar{R} 和 $u(\bar{R})$ 。

$$\begin{aligned}\bar{R} &= \frac{1 \times 350 + 25 \times 350.3 + 400 \times 350.25}{1 + 25 + 400} = \frac{149\ 208}{426} \\ &= 350.25\end{aligned}$$

$$u(\bar{R}) = \frac{1}{\sqrt{\sum \frac{1}{u^2(R_i)}}} = \frac{1}{\sqrt{\frac{1}{1} + \frac{1}{0.2^2} + \frac{1}{0.05^2}}} = 0.048 = 0.05$$

最后结果

$$R = (350.25 \pm 0.05) \Omega$$

注意： k 取任意值对计算结果没有影响，但 k 取得合适时，计算就比较简单，并且各种测量值的权都是简单的正整数。

§ 2 二个变量关系的研究——作图法

研究二个变量的关系就是用曲线或函数式将二个变量的联系

表现出来. 对于如何作图已在力学实验中讨论过, 在此仅讨论变量间的函数关系. 这类问题有两种不同的情况:

- (1) 已知二个变量函数关系的形式, 但是其中有未知参量;
- (2) 二个变量函数关系的形式尚未知.

现在分别就这两种情况进行讨论.

A. 二个变量函数关系的形式已知时

如果二个变量 x, y 间是直线关系, 即

$$y = a + bx \quad (0-2-1)$$

则可用 n 组测量值 (x_i, y_i) 作图, 所得直线的截距即参量 a , 而斜率是参量 b .

但是, 实验中二个变量的关系往往不是直线关系, 例如, 弹簧振子的振动周期 T 和所加负载 m 的关系为

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{m + cm_0}{k}}$$

式中 m_0 为弹簧自身的质量, π 为圆周率, c 和 k 为待定参量. 测量不同 m 对应的 T , 可以作 $T - m$ 图线, 图 0-2-1 为其一例. 由于它是曲线, 因而无法从图上得出待定参量值. 类似这种情况, 可以设法改换变量, 将函数关系转变为直线关系, 对此周期公式可以改成为

$$T^2 = \left(\frac{4\pi^2 cm_0}{k}\right) + \left(\frac{4\pi^2}{k}\right)m$$

它表示 T^2 和 m 间为直线关系. 即作 $T^2 - m$ 直线(图 0-2-2), 从图上求出截距 a , 斜率 b , 则

$$a = \frac{4\pi^2 cm_0}{k}$$

$$b = \frac{4\pi^2}{k}$$

由此可求出 k 和 c 之值(m_0, π 为已知).

即对于非线性函数, 要通过变换变量使之成为线性函数, 再用

作图法求出截距和斜率,进而确定待定参量.

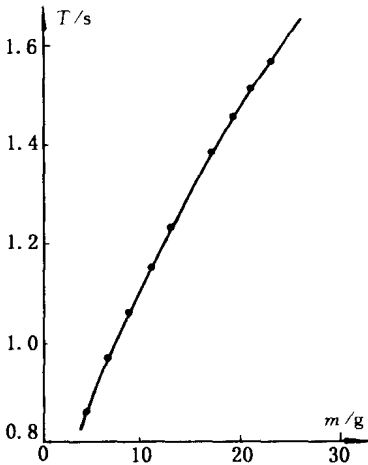


图 0-2-1

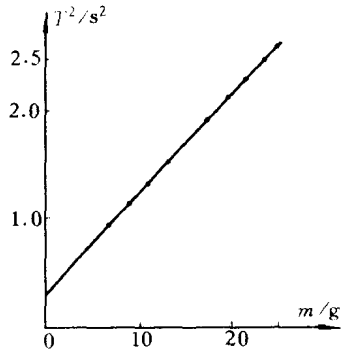


图 0-2-2

实际的非线性函数如何变换要看函数的形式,例如

$$y = ae^{-bx} \dots\dots\dots [\ln y] = \ln a - b[x]$$

$$y = R \frac{E-x}{x} \dots\dots\dots [y] = -R + R \cdot E \left[\frac{1}{x} \right]$$

$$y = ax^b \dots\dots\dots [\ln y] = \ln a + b[\ln x]$$

$$y = ax + bx^2 \dots\dots\dots \left[\frac{y}{x} \right] = a + b[x]$$

上列式中的括号[]为变换后的变量.

B. 二个变量的函数关系形式尚未知时

首先用测量值作图,如果得一直线,则从图上求出截距和斜率,函数关系就完全确定了;当得到的是曲线时,就要分析曲线的形式,参照已知的函数曲线(如图 0-2-3),给出假定的函数式,再用上述 A 中处理非线性函数的方法,使之线性化,但这样做不一定一次就成功,可能要反复几次才可得出较好的结果.下面举一例对此过程作些说明.