

高等学校教材

普通物理实验

(一、力学及热学部分)

第三版

杨述武 主编

杨述武 马葭生 贾玉民 张景泉 编



高等教育出版社

图书在版编目(CIP)数据

普通物理实验 (1):力学及热学部分/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 7-04-007945-3

I. 普… II. 杨… III. ①物理学-实验-高等学校-教材
②力学-实验-高等学校-教材③热学-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 67338 号

普通物理实验(一、力学及热学部分) 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	1983 年 4 月第 1 版
印 张	8.875		2000 年 5 月第 3 版
字 数	220 000	印 次	2001 年 1 月第 2 次印刷
		定 价	8.80 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1分册,为力学及热学部分,共计37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;
4. 重写了绪论.

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

自1982年本书第一版出版以来,我国的普通物理实验教学有了很大的发展,在这种情况下,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,于1989年秋审订了普通物理实验教学基本要求(由国家教委高教司印发,供试行.见(89)教高司字122号文).我们以此基本要求为指导,对本书第一版进行了修订.在此将修订工作中的几点考虑简单介绍如下:

一、总的设想

1. 注意加强学生的基本训练,特别是加强操作技能及分析问题能力的培养.

2. 适当增加一些新的选题,扩充一些实验的内容,以供教师选择.

3. 适当简化有关实验步骤的描述,促使学生在实验中多想一想.

4. 修改实验,尽量使用通用设备,或实验室可以自制的装置.

二、关于数据处理

在绪论中对直接测量、间接测量和组合测量进行了比较详细的说明,对实验结果的评价引用了不确定度,但考虑到指导教师的意见可能不一致,所以不规定必须使用不确定度.

三、关于实验举例

这次修订时,对一部分实验给出了测定实例.在开始比较简单的几个实验中,列出实验测量实例的目的在于使学生一开始就注意记录与计算的规范化问题,以作为加强基本训练的一部分;而另外几个实验给出实测值则是考虑到它的特点.比如气轨上的碰撞,初速度是零的落体实验,空气密度的测定,弹簧振子的有效质量等实验给出了测量实例,有的是说明实验可以得到比较理想的

结果,有的是说明设备可以很简单,有的又是说明实验结果不是一个简单的问题.我们给出这些实例,是希望对学生有所启发,促进他们通过实验去探索一些问题.

四、在绪论中加入了一节关于实验的评价问题,我们认为引导学生去分析和评价自己的工作,对学生深入掌握实验的要求,提高分析问题的能力都有很大帮助,希望学生在这方面发挥自己的智慧.

参加本书修订工作的主要有华东师大物理系马葭生,辽宁师大物理系张景泉,陕西师大物理系贾玉民和东北师大物理系杨述武.此外北京师大物理系孟韵池,陕西师大物理系的吴俊林、刘志存、梁吉德,参加了修订工作.

本书修订时参考了复旦大学贾玉润、王公治、凌佩玲主编的《大学物理实验》,山东大学孟尔熹主编的《普通物理实验》,此外也参考了国内外物理教学杂志上的一些文章,在此向各位同行致谢.

本书自1982年出版以来,得到一些教师的批评与建议,我们除感谢他们之外,希望使用和参考本书的教师和学生能继续提出宝贵意见.

编者

1990年秋于长春

致学生读者

1. 在实验中取得好的结果,是实验者的期望,如果你明确实验的目的与要求,明确要观察的现象,明确仪器的调整与条件控制,那时你就会更接近于成功.

2. 实验中出现错误,是很难完全避免的,对初学者更是如此,但要努力防止做完实验后才发现实验全错了! 如果想到实验中可能有错,如果能随时检查实验的情况,如果会判断正确与错误,那时你就能及时发现和纠正错误.

3. 实验中取得好的数据,当然会使你高兴,但是每次实验只有几小时,对数值的精密度与准确度不能期望过高. 如果你不仅仅关心数据的好坏,而且在实验中能注意分析故障,在实验后又能做些回顾与思考,那时你的实验能力就会有较快的提高.

4. 在实验中,你是主人,你不是机械地执行教师指令的操作员,如果在实验中努力使自己成为一个探索者,能不断地总结经验,那时你就会更主动、更自由,也就更有兴趣.

目 录

第三版前言	1
第二版前言	2
致学生读者	4
绪论	1
§ 1 普通物理实验的基础知识	1
§ 1-1 普通物理实验课的目的	1
§ 1-2 测量与仪器	2
§ 1-3 测量与误差	3
§ 1-4 系统误差	5
§ 1-5 偶然误差	6
§ 1-6 实验中的错误与错误数据	9
§ 1-7 测量不确定度	11
§ 1-8 有效数字	19
§ 1-9 实验图线的描绘	23
§ 1-10 组合测量与最佳直线参数	28
§ 1-11 实验报告	34
§ 2 力学、热学实验基本仪器	37
§ 2-1 游标卡尺	37
§ 2-2 螺旋测微计(千分尺)	40
§ 2-3 移测显微镜	42
§ 2-4 微小长度变化的测量	44
§ 2-5 停表	48
§ 2-6 电子计时器	48
§ 2-7 天平	51
§ 2-8 约利弹簧秤	56
§ 2-9 温度计	57
§ 2-10 水银气压计	62

§2-11 干湿泡湿度计	63
实验一 长度测量	66
实验二 单摆	69
实验三 精密称衡	74
实验四 密度的测量	79
实验五 偶然误差的统计规律	83
实验六 杨氏模量的测定(伸长法)	88
实验七 杨氏模量的测定(梁弯曲法)	92
实验八 切变模量的测定	97
实验九 自由落体运动	103
实验十 倾斜气垫导轨上滑块运动的研究	106
实验十一 牛顿第二运动定律的验证	114
实验十二 碰撞实验	119
实验十三 转动惯量的测定	125
实验十四 刚体转动的研究	129
实验十五 三线摆	133
实验十六 惯性秤	139
实验十七 弹簧振子的研究	143
实验十八 复摆振动的研究	148
实验十九 天平振动的研究	151
实验二十 可倒摆	155
实验二十一 双线摆振动的研究	163
实验二十二 阻尼振动	167
实验二十三 受迫振动(扭摆法)	173
实验二十四 弦振动的研究	180
实验二十五 声速的测量(超声)	186
实验二十六 声速的测量(可闻声)	194
实验二十七 液体粘度的测量(毛细管法)	197
实验二十八 液体粘度的测量(落球法)	205

实验二十九	表面张力系数的测定(拉脱法)	209
实验三十	表面张力系数的测定(毛细管法)	213
实验三十一	金属线胀系数的测量	218
实验三十二	固体比热容的测量(混合法)	223
	[附] 电热法测固体的比热容	229
实验三十三	水的汽化热的测定	233
实验三十四	冰的融化热的测定	237
实验三十五	水的沸点与压强关系的研究	240
实验三十六	良导体导热系数的测定	246
实验三十七	真空的获得与测量	251
附录	物理常量表	261

绪 论

§ 1 普通物理实验的基础知识

§ 1-1 普通物理实验课的目的

物理学是实验的科学。物理学新概念的确立和新规律的发现要依赖于反复实验。物理学上新的突破常常是通过新的实验技术得以实现的。物理实验的方法、思想、仪器和技术已经被普遍地应用在自然科学各个领域和技术部门。

普通物理实验课是对学生进行实验教育的入门课程，其教学目的在于使学生学习物理实验基础知识的同时，受到严格的训练，掌握初步的实验能力，养成良好的实验习惯和严谨的科学作风。

实验能力应包括动手能力和动脑能力。要训练安装、调整和操作实验装置的技能，又要培养设计实验步骤、选取实验条件、分析现象、判断故障和审查数据等方面的能力。

实验课虽然是在教师指导下的学习环节，但在实验课上学生的活动有较大的独立性，我们期望学生以研究者的态度去组装实验装置，进行观测与分析，探讨最佳实验方案，从中积累经验、锻炼技巧和机智，为以后独立设计实验方案和解决新的实验课题创造条件。

§ 1-2 测量与仪器

测量是指为确定被测量对象的量值而进行的被测物与仪器相比较的实验过程。

例如,一桌子的长度与米尺相比,得出桌子长度为 1.248 m;一铁块的质量与砝码相比(通过天平),得出铁块质量为 31.85 g.

测量分为直接测量与间接测量。

直接测量是指被测量和仪器直接比较,得出被测量量值的测量。前面的二例均为直接测量。

间接测量是指由一个或几个直接测得量经已知函数关系计算出被测量量值的测量。例如,测量单摆的摆长 l 和振动周期 T ,由已知的公式 $g = 4\pi^2 l/T^2$ 算出重力加速度 g 值的过程就是间接测量。

测量仪器是指用以直接或间接测出被测对象量值的所有器具。如,游标卡尺、天平、停表、惠斯登电桥、照度计等等。

测量结果给出被测量的量值,它包括两部分,数值和单位(不标出单位的数值不能是量值!)

一个国家的最准确的计量器具是一些主基准,在全国各地则有由主基准校准过的工作基准,实验室使用的仪器已直接或间接用工作基准进行校准过。

仪器的准确度等级 测量时是以仪器为标准进行比较,当然要求仪器准确。不过由于测量的目的不同对仪器准确程度的要求也不同,比如称量金戒指的天平必需准确到 0.001 g,而粮店卖粮的台秤差几克都是无关紧要的。为了适应各种测量对仪器的准确程度的不同要求,国家规定工厂生产的仪器分为若干准确度等级。各类各等级的仪器,又有对准确程度的具体规定。例如 1 级螺旋测微计,测量范围小于 50 mm,最大误差不超过 ± 0.004 mm,又如 1.0 级电流表,测量范围为 0~500 mA 的最大误差不超过 ± 5 mA。

实验时要恰当地选取仪器。仪器使用不当对仪器和实验均不利。表示仪器的性能有许多指标,其中最基本的是测量范围和准确度等级。当被测量超过仪器的测量范围时,首先对仪器会造成损伤,其次可能测不出量值(如电流表),或勉强测出(如天平),但误差将增大。对仪器的准确度等级的选择也要适当,一般是在满足测量要求的条件下,尽量选用准确程度低的仪器。减少准确度高的仪器的使用次数,可以减少在反复使用时的损耗,延长其使用寿命。

习 题 一

1. 测量就是比较,试说明如下的测量是如何体现比较的:

- (1) 用杆秤称量一个西瓜的重量;
- (2) 用弹簧秤称一新生婴儿的重量;
- (3) 用秒表测一摆动时间;
- (4) 用万能表测一电阻器的阻值。

2. 你知道如何去做下面的测量吗?

- (1) 跑百米的时间;
- (2) 子弹的速度;
- (3) 声音的速度。

§ 1-3 测量与误差

物理实验时要对一些物理量进行测量。各被测量在实验当时条件下均有不依人的意志为转移的真实大小,称此值为被测量的真值。测量的理想结果是真值,但是它是不能确知的,因为,首先测量仪器只能准确到一定程度;其次有环境条件的影响,并且观测者操作和读数不能十分准确,理论也有近似性,所以测得值和真值总是不一致的。定义测得值减去真值的差为测得值的误差,即

$$\text{测得值}(x) - \text{真值}(a) = \text{误差}(\epsilon).$$

误差 ϵ 是一代数值,当 $x \geq a$ 时, $\epsilon \geq 0$; $x < a$ 时, $\epsilon < 0$ 。由于真值

是不能确知的,所以测得值的误差也不能确切知道,在此情况下,测量的任务是:

(1) 给出被测量真值的最佳估计值;

(2) 给出真值最佳估计值的可靠程度的估计.

关于什么是最佳估计值,留到后面去讨论,但是可以想到最佳估计值必定误差比较小.为了减小误差就要分析误差的来源,实际上任何测量的误差都是多种因素引入误差的综合效应.现在以用单摆测重力加速度为例做些分析.

物理论中的单摆,是用一无质量无弹性的线,挂起一质点,在摆角接近零时,摆长 l 和周期 T 之间存在 $T = 2\pi \sqrt{l/g}$ 的关系,其中 g 为当地的重力加速度.

在用单摆测重力加速度的测量中,误差的来源大致有如下几方面:① 米尺和停表本身不准确;② 对仪器的操作不准确;③ 仪器读数不准确;④ 摆线质量不为零;⑤ 摆锤体积不为零;⑥ 摆角大小不为零;⑦ 存在空气浮力和阻力;⑧ 支点状态不理想;⑨ 支架震动或空气流动.

对误差的来源可以概括为五个方面:(1) 理论,(2) 仪器,(3) 实验装置,(4) 实验条件,(5) 观测者和监视器.

在相同条件下的重复测量中,所得测量值一般不尽相同,这表示每次测量的误差不同,并且在测量之前不可预知测量值是偏大些或偏小些,例如用手按秒表测摆的振动周期每次不尽相同的情形.这是偶然因素造成的,这一类误差称为偶然误差.

还有如下的不同的测量例子:

(1) 用一块 2.5 级 $0 \sim 1$ A 的安培计测一回路的电流强度 I 为 0.73 A,而用另一块 0.5 级 $0 \sim 1$ A 的安培计测同一回路电流为 0.716 A;

(2) 用一天平称一物体质量,物体在左盘,砝码在右盘,平衡时,砝码值为 74.251 9 g,物体与砝码交换后则为 74.250 1 g;

(3) 测一单摆的振动周期 T , 当摆的最大摆角在 5° 附近时测得 $T_1 = 1.983$ s, 摆角达 10° 附近时为 $T_2 = 1.987$ s.

上述各项测量值的差异在重复测量时依然不变, 这表示其误差的符号和大小是恒定的, 此类误差称为系统误差.

测量值的误差均同时包涵偶然误差和系统误差, 研究误差的目的是:

- (1) 尽量减小测量值中的误差;
- (2) 对残存的误差的大小给出某种估计值.

绝对误差与相对误差 设被测量 X 的测量值为 x , 其真值为 a , 误差 $\epsilon = x - a$, ϵ 与 a 的比值 $\epsilon_r = \epsilon/a$ 称为相对误差, 对应 ϵ_r 也称 ϵ 为绝对误差, 但应注意绝对误差和误差绝对值 $|\epsilon|$ 不同. 实际上绝对误差 ϵ 与真值 a 不可确知, 在以后将讨论对它做某种估计.

§ 1-4 系 统 误 差

对实验进行理论分析或对比实验之后, 可以得知其系统误差的来源, 并可采取一定的措施去削减系统误差. 在 § 1-3 中提到的实例(2)是由于天平左右臂长不完全相等引入的系统误差, 可将物体放在天平左盘、右盘上各称一次取平均去消除. 实例(3)是由于摆的周期与振幅有关, 缩小振幅可以减小此项系统误差, 但是振幅不宜过小, 当测量要求更高时, 可根据理论分析得出的修正公式去补正. 实例(1)是仪器自身的误差问题.

工厂生产仪器要经过设计、选材、加工、组装和校验一系列过程, 在此生产过程中产品将或多或少偏离设计值, 这是仪器的基本误差. 国家规定工厂生产某一准确度等级的某种仪器, 仪器的基本误差必须小于相应等级的容许误差. 例如, 生产 2.5 级 0~100 mA 电流表, 在测量范围内指示值的误差要小于 $2.5\% \times 100$ mA, 即 2.5 mA, 生产 0.5 级 0~100 mA 电流表, 指示值的误差要小于

0.5% × 100 mA, 即 0.5 mA. 因而 0.5 级电流表测量值比 2.5 级电流表测量值更可靠. 但是任何精密的仪器都是有误差的.

对系统误差的研究主要是:

- (1) 探索系统误差的来源, 设计实验方案消除或削减该项误差;
- (2) 估计残存系统误差的可能的范围.

§ 1-5 偶然误差

在同一条件下, 对同一物理量进行重复测量, 各次测得值一般不完全相同, 这是由于测量时存在偶然误差. 一个测得值的偶然误差是多项偶然因素综合作用的结果, 在测量前不能得知测得值将偏大或偏小.

用手控制数字毫秒计, 测量一摆的周期共 100 次, 测量值的大小变化不定, 似乎没有规律, 其实这种偶然现象服从统计规律. 现将测得值分布的区域等分为 9 个区间, 统计各区间内测量值的个

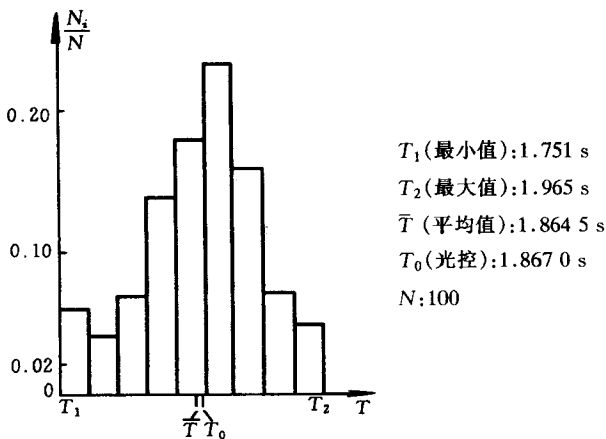


图 0-1-1

数 N_i , 以测量值为横坐标, N_i/N 为纵坐标 (N 为总数) 作统计直方图, 图 0-1-1 是一次实验的结果。

从图上可以看出, 比较多的测量值集中在分布区域的中部, 而区域的左右两半的测量值个数都接近一半, 由此可以设想被测量的真值就在数据比较集中的部分。

在上述测量之后, 用光电门控制一台数字毫秒计去测同一个摆的周期, 测 10 次, 测量值分布在 1.866 s 到 1.868 s 的小区域中, 由于此时的偶然误差显著小于前者, 可将光电控制测量值的平均值 T_0 作为手控测量的近似真值, 对于测量值的偶然误差作如下统计, 取 $T_0 = 1.8670$ s, 则

$$\begin{aligned} T_i - T_0 < 0 (\epsilon_i \leq 0) & \quad \text{占 48\%} \\ T_i - T_0 \geq 0 (\epsilon_i > 0) & \quad \text{占 52\%} \end{aligned}$$

多次测量均有同上相似的结果, 因而得出如下几点认识:

- (1) 每次测量的偶然误差是不确定的。
- (2) 出现正号或负号偶然误差的机会相近。
- (3) 出现绝对值小的偶然误差的机会多一些。

算术平均值 设 n 次测量值 x_1, x_2, \dots, x_n 的误差为 $\epsilon_1, \epsilon_2, \dots, \epsilon_n$, 真值为 a , 则

$$(x_1 - a) + (x_2 - a) + \dots + (x_n - a) = \epsilon_1 + \epsilon_2 + \dots + \epsilon_n$$

将上式展开整理后, 两侧除以 n , 得

$$\frac{1}{n}(x_1 + x_2 + \dots + x_n) - a = \frac{1}{n}(\epsilon_1 + \epsilon_2 + \dots + \epsilon_n)$$

它表示算术平均值的误差, 等于各测量值误差的平均, 假如各测量值的误差只是偶然误差, 而偶然误差有正有负, 相加时可抵消一些, 所以 n 越大, 算术平均值越接近真值。因此可以用算术平均值作为被测量真值的最佳估计值。

又当测量值的误差中包含有已知的系统误差, 则相加时它们不能抵消, 这时应当用算术平均值加上修正值为被测量真值的最佳估计值(修正值与系统误差绝对值相等, 符号相反)。