



“十二五”普通高等教育本科国家级规划教材

高等学校物理实验教学示范中心系列教材

新编基础物理实验 (第二版)

吕斯骅 段家祗 张朝晖 主编

 高等教育出版社
HIGHER EDUCATION PRESS



“十二五”普通高等教育本科国家级规划教材

高等学校物理实验教学示范中心系列教材

新编基础物理实验 (第二版)

XINBIAN JICHU WULI SHIYAN

吕斯骅 段家柢 张朝晖 主编



高等教育出版社 北京
HIGHER EDUCATION PRESS BEIJING

内容提要

本书是北京大学基础物理实验中心 17 年教学改革的成果之一, 是“十二五”普通高等教育本科国家级规划教材和高等学校物理实验教学示范中心系列教材。本书坚持“加强基础、循序渐进、因材施教、全面提高”的改革思路, 将一批含有重要近代物理内容, 含有现代实验技术的实验和本校的科研成果引入教学, 构建了“强基础、高起点、多层次、综合性和研究性”的基础物理实验课程新体系。全书基础实验总数从第一版的 62 个优化为 40 个, 增加了光栅自成像、压电陶瓷、动态磁滞回线、多普勒测速等新实验, 重写了模拟示波器的使用、测量误差和数据处理、虚拟仪器、X 射线衍射等实验, 修改了电学实验基本知识等十余个实验, 去掉了“设计实验和综合物理实验”, 更突出了教材的基础性。

本书可作为高等学校理科各专业的教科书或参考书, 适合不同层次的教学需要。

图书在版编目 (CIP) 数据

新编基础物理实验/吕斯骅, 段家祗, 张朝晖主编. —2 版. —北京: 高等教育出版社, 2013. 8

ISBN 978-7-04-037811-5

I. ①新… II. ①吕…②段…③张… III. ①物理学-实验-高等学校-教材 IV. ①O4-33

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2013)第 136960 号

策划编辑 程福平 责任编辑 程福平 封面设计 于文燕 版式设计 马敬茹
插图绘制 尹 莉 责任校对 刁丽丽 责任印制 韩 刚

出版发行	高等教育出版社	网 址	http://www.hep.edu.cn
社 址	北京市西城区德外大街 4 号		http://www.hep.com.cn
邮政编码	100120	网上订购	http://www.landaco.com
印 刷	河北新华第一印刷有限责任公司		http://www.landaco.com.cn
开 本	787mm × 960mm 1/16	版 次	2006 年 1 月第 1 版
印 张	29		2013 年 8 月第 2 版
字 数	530 千字	印 次	2013 年 8 月第 1 次印刷
购书热线	010-58581118	定 价	44.80 元
咨询电话	400-810-0598		

本书如有缺页、倒页、脱页等质量问题, 请到所购图书销售部门联系调换
版权所有 侵权必究
物 料 号 37811-00

前 言

《新编基础物理实验》已出版7年了,7年的教学实践和探索使我们坚定了“加强基础、循序渐进、因材施教、全面提高”的改革思路,将一批含有重要近代物理内容、含有现代实验技术的实验和本校的科研成果引入教学,构建了“强基础、高起点、多层次、综合性和研究性”的基础物理实验课程新体系。为了使教材能反映我们7年的教改成果,更便于学生使用和贴近教学实际,编者决定对原教材作较大的修订。《新编基础物理实验》(第二版)秉承上述理念和7年的教学实践,保留“预科实验—基础实验-I—基础实验-II”的教学体系,调整了实验数目和内容,去掉了“设计实验和综合物理实验”,更突出了教材的基础性。

受实验学时的限制,预科实验和基础实验总数从62个优化为40个,压缩了1/3以上,增加了光栅自成像、压电陶瓷、动态磁滞回线、多普勒测速等新实验,重写了模拟示波器的使用、测量误差和数据处理、虚拟仪器、X射线衍射等实验,修改了电学实验基本知识等十余个实验。

为了培养学生的创新能力,仅在有限的基础物理实验课时内增加几个“综合性研究性的实验”是远远不够的,反而影响了“基础”教学,因而我们面向热爱物理实验且学有余力的优秀本科生开设了“研究性综合物理实验”选修课。课程以自由选题、综合研究、探索未知、学做科研为宗旨,突出因材施教的个性化教学模式,激发学生的创新思维,培养学生的科研素养和创新能力。开课十多年来,开展了两百多项课题研究,取得了优异的成绩,这些成果已超出本教材的范围,原来的“设计实验”早已退出历史。

参与本次修订的有实验中心教师段家祗、张朝晖、刘丽玲、廖慧敏、李智、杨景、陈凯旋、裴谐第、吕斯骅和谢大骏、王越、傅遵涛、杜红林、王常生、秦志新、陈志忠、黄森林等多年参与实验教学的老师。特别要指出的是实验中心的四位中青年教师是本次编写的主力,他们的优质、高效和团结合作的精神保证了编写的质量和进度,也锻炼了这支“国家理科基地物理基础课程教学团队”。实验中心的郑纹、刘国超、沈言、田广等老师积极参与新实验的设计、加工、调试和旧实验的改进,为本书的出版作出了重要贡献。感谢钟锡华教授的宝贵建议,感谢高等教育出版社物理分社刘伟分社长和程福平编辑给予的支持。

编 者
2013年春节

郑重声明

高等教育出版社依法对本书享有专有出版权。任何未经许可的复制、销售行为均违反《中华人民共和国著作权法》，其行为人将承担相应的民事责任和行政责任；构成犯罪的，将被依法追究刑事责任。为了维护市场秩序，保护读者的合法权益，避免读者误用盗版书造成不良后果，我社将配合行政执法部门和司法机关对违法犯罪的单位和个人进行严厉打击。社会各界人士如发现上述侵权行为，希望及时举报，本社将奖励举报有功人员。

反盗版举报电话 (010)58581897 58582371 58581879

反盗版举报传真 (010)82086060

反盗版举报邮箱 dd@hep.com.cn

通信地址 北京市西城区德外大街4号 高等教育出版社法务部

邮政编码 100120

目 录

绪论	1
----------	---

预 科 实 验

实验一 测定冰的熔化热	7
实验二 电学实验基本知识	15
实验三 测量非线性元件的伏安特性	30
实验四 模拟示波器的使用	37
实验五 测量薄透镜的焦距	55
实验六 显微镜	62

基础实验-I

实验七 测量误差和数据处理	71
一、测量误差和测量结果的不确定度	72
二、处理数据的几种方法	85
实验八 测定金属的杨氏模量	114
一、CCD 成像系统测定杨氏模量	115
二、光杠杆装置测定杨氏模量	121
三、梁的弯曲测定杨氏模量	126
四、共振法测定杨氏模量	130
实验九 刚体转动实验	138
一、转动法测定刚体转动惯量	139
二、扭摆法测定刚体转动惯量	143
实验十 气轨上弹簧振子的简谐振动	147
实验十一 复摆实验	153
实验十二 测定介质中的声速	161
一、驻波法和相位法测定介质中的声速	162
二、多普勒法测定介质中的声速	169
实验十三 弦上驻波实验	176

实验十四	直流电桥测量电阻	183
实验十五	非平衡电桥测量铂电阻的温度系数	189
实验十六	霍尔效应测量磁场	197
实验十七	RLC 电路的谐振现象	205
实验十八	弗兰克-赫兹实验	213
实验十九	分光计的调节和掠入射法测量折射率	221
实验二十	光衍射的定量研究	234
实验二十一	观察光的偏振现象	243
实验二十二	迈克耳孙干涉仪	252

基础实验-II

实验二十三	高温超导材料特性测试和低温温度计	265
实验二十四	闪光法测定不良导体的热导率	281
实验二十五	动态法测定良导体的热导率	292
实验二十六	真空镀膜	302
实验二十七	交流电桥	314
实验二十八	RLC 串联电路的暂态过程	321
实验二十九	虚拟仪器在物理实验中的应用 ——伏安法测电阻与非线性元件	341
实验三十	用示波器观测动态磁滞回线	358
实验三十一	光栅特性及测定光波波长	366
实验三十二	光栅自成像现象的实验研究	372
实验三十三	偏振光的定量研究	380
实验三十四	全息照相	393
实验三十五	阿贝成像原理和空间滤波	402
实验三十六	光源的时间相干性	410
实验三十七	光栅光谱仪	419
	一、光栅光谱仪的校准和使用	420
	二、氢原子光谱	425
实验三十八	微波的布拉格衍射	431
实验三十九	X 射线衍射	438
实验四十	核磁共振	448

绪 论

物理学是一门重要的基础学科,是整个自然科学的基础.物理学的发展不仅推动了整个自然科学的发展,而且对人类的物质观、时空观、宇宙观和对整个人类文化都产生了极其深刻的影响.物理学又是当代技术发展的最主要源泉.

物理学是实验的科学.人们通过观察物理现象,定量测量或测定物理量,并根据测量结果分析这些物理量之间的关系,从而实现了对物理规律的认识和证实.物理实验在物理学的建立发展过程中起着重要的和直接的推动作用,它是物理学的基础.对于已经建立起来的物理定律,如果和新的实验事实发生矛盾,就必须加以修正或改造.这样,物理学不断获得新的发展.正因为物理实验这样重要,而且它又有自身的特点和一套实验知识、实验方法、实验技术等独特的内容,所以在高等学校开设物理理论课的同时,还开设了物理实验课.这两门课程虽然有密切的联系,但是也有明显的区别.它们反映了人们研究物理学的两个不同的侧面.

物理实验是用实验的方法去研究物理学的规律.物理实验课的一个显著特点是它的实践性.做实验的时候,要充分考虑到各种实际的情况,得出的结论要尽量符合实际.在上物理理论课时,大家学习过质点、刚体的概念;在分析物体的某些运动时,常常假设运动是没有摩擦的.这种经过抽象的、理想化了的模型,对于理论研究无疑是重要的,但是在做实验的时候,情况就不同了.你到哪里去找真正的质点、刚体和没有摩擦的运动呢?这是找不到的.即使一个布朗微粒,它也有一定大小的体积,否则它就不会在同一时刻受到很多液体分子或气体分子在不同方向上的撞击;即使很坚硬的钢铁,它也有一定程度的弹性,否则就无法测量声波在其中传播的速率;气垫导轨是一种低摩擦实验装置,滑块在上面运动的摩擦阻力是很小的,可是气垫导轨上的不少物理实验,正是研究摩擦阻力对实验结果的影响;在实际生活中,甚至连一个真正的圆球也难以找到,因为对一个实际的“圆球”从不同的方向测量它的直径,数值往往是不相同的.所以实际情况与理想化了的模型是不同的.做实验的时候,就要考虑到这些差别.

实践性的另外一层意思是动手能力的培养和锻炼,这在实验课中占有重要的地位.必须进行实际的操作,光说不练是不行的.有的同学认为只要把实验原理、仪器装置、实验方法都看明白了,不必动手测量和计算,或者只粗略地测量和

估算一下,就算完成了实验.他们对实际的操作和计算缺乏兴趣,认为这并不重要,这种看法是不对的.要知道如果不去仔细地调整实验装置,不去仔细地进行测量和计算,就不能了解实验的微妙之处,就不能学到实验的真谛.这些同学往往眼高手低,“一看就懂,一做就错”.这也反映了他们对实验课的特点还缺乏认识.

大家可能很欣赏物理理论课程的系统性、逻辑性.在这方面,实验课的情况又不太相同.两个不同的实验题目之间可能很少有直接的内在联系,所以有时先做哪一个实验无关紧要.这也是实验课和理论课不同的地方.然而,一个物理实验涉及的知识领域往往是很宽广的,即使一个简单的力学实验,也常常涉及电学、光学、热学、机械学、电子学和计算机等方面的知识.所以物理实验课的另一个特点是综合性.它要求我们在做实验的时候,要根据具体情况灵活应用我们曾经学过的一切知识.一个优秀的实验工作者,他的知识面必须很宽广,不仅有丰富的理论知识,还要有丰富的实践经验;不仅在某一学科有较深的造诣,而且在其他学科领域也有一定的修养.有的人重理论,轻实验,认为搞理论高深复杂,搞实验低级简单.这实在是一种误解.目前我国的学生与发达国家的学生相比较,在理论知识方面并不比他们差,然而在实验方面,在动手能力方面,还存在一定的差距.这种情况应该引起我们的注意.

在谈了物理实验的重要作用和物理实验课的特点之后,再来谈谈开设物理实验课的目的以及怎样才能学好这门课程.

开设物理实验课的目的简单来说有以下三点:

第一,使学生们学到物理实验的基本知识、基本方法和基本技能.它包括学会使用各种测量仪器,了解各种物理量的测量方法,学会观察分析各种实验现象,还要了解测量误差的理论知识,学会正确地记录和处理数据,正确地表达实验结果,对实验结果进行正确的分析评价,并在扎实的基本训练基础上,进一步进行设计实验,让学生通过自己设计实验,独立进行实验观测的过程,去发现新现象,研究新问题,并总结出规律性的实验结果,提高实验能力,为以后的科学研究工作或其他科学技术工作打下良好的实验基础.

第二,逐步培养起严肃认真、实事求是的科学态度和工作作风,养成良好的实验习惯.科学是老老实实的学问,来不得半点虚假和马虎.良好的实验习惯是做好实验的重要条件,一旦形成不好的习惯,以后就很难改正.要在每次实验中有意识地锻炼自己.

第三,通过实际的观察和测量,加深对物理理论知识的理解和掌握,同时激发大家对学习物理科学的兴趣.

为了上好每一次物理实验课,同学们要做好以下三个环节的工作:

(1) 做好预习

实验课前要把讲义上的实验内容仔细阅读一遍,弄明白这次实验的目的,依据什么原理和公式,有什么近似条件和要求;使用什么实验方法,特别是基本的测量方法;使用什么实验仪器以及要注意什么问题等.要准备一个实验记录的本子,预先写好测量公式、测量步骤,画好电路图、光路图、数据表格,以备上课时使用.

(2) 做好实验

到实验室后要遵守有关的规章制度,爱护仪器设备,注意安全.动手之前要先了解仪器的性能、规格、使用方法和操作规则,不要乱动仪器.调整仪器装置时要仔细认真,一丝不苟.还要注意满足测量公式所要求的实验条件.在整个实验过程中,要脑手并用.一方面,要多动脑筋,头脑里要有清晰的物理图像,对实验原理有比较透彻的理解,对实验中出现的各种现象要仔细观测.要有意识地去学着分析实验,对实验得到的结果要想一想是否符合物理规律,有没有道理.在进行某些操作之前,先想想可能会出现什么结果,然后再看看是否和预期的相符合.如果不相符合,要仔细分析原因,找出改进措施,绝不能拼凑数据.实验中不要只是机械地按讲义上或教师要求的实验步骤一步一步做完就算完事.实验过程中思想状态是积极主动的,还是消极被动的,对收获大小的影响极大.另一方面,要注意培养和锻炼自己的动手能力.实验操作要做到准确、熟练、快速.如在力学实验中如何调水平、调竖直;在电学实验中如何连接电路;在光学实验中如何调节元件共轴等,都是一些很基本的操作,都应该熟练掌握.动手能力还表现在能否及时发现并排除实验中可能遇到的某些故障.仪器装置的小毛病,可以在教师指导下自己动手解决.要注意学习教师是如何判断仪器故障,如何修复仪器的(指可能当场修复的情况).实验中还要养成记录好原始数据(就是在测量时直接从仪器上读出来的数据)的习惯,要一边测量,一边及时记录,要记得准确、清楚、有次序.做完实验,要将实验数据交给教师检查,得到认可后,再将仪器归整复原好,方可离开实验室.

(3) 写好实验报告

实验报告是对实验的全面总结.内容除实验名称和姓名外,一般包括:实验目的、仪器用具、原理公式、数据及结果等.要用指定的实验报告用纸并按规定的格式书写实验报告,要字迹清楚、文理通顺、图表正确.准确、完整而简明地表述实验报告中各部分内容.以上是实验课训练的重要方面之一.要按时交实验报告.

上述三个环节中,第二个环节虽然是主要的,但是对第一、第三个环节也绝不应忽视.只有这三个环节都做好了,才算是上好了物理实验课.

预 科 实 验

实验一

测定冰的熔化热

【目的要求】

- (1) 了解热学实验中的基本问题——量热和计温；
- (2) 了解粗略修正散热的方法；
- (3) 学习进行合理的实验安排和参量选择。

【仪器用具】

量热器,电子天平,数字温度计,冰,停表,干拭布。

【实验原理】

一定压强下晶体物质熔化时的温度,也就是该物质的固态和液态可以平衡共存的温度,称为该晶体物质在此压强下的熔点.单位质量的晶体物质在熔点时从固态全部变成液态所需要的热量,叫做该晶体物质的熔化热。

本实验用混合量热法来测定冰的熔化热.它的基本做法是:把待测的系统 A 和一个已知其热容的系统 B 混合起来,并设法使它们形成一个与外界没有热量交换的孤立系统 C($C=A+B$).这样 A(或 B)所放出的热量,全部为 B(或 A)所吸收.因为已知热容的系统在实验过程中所传递的热量 Q 可以由其温度的改变 δT 和热容 C 计算出来,即 $Q=C\delta T$,因此,待测系统在实验过程中所传递的热量也就知道了。

由此可见,保持系统为孤立系统是混合量热法所要求的基本实验条件.这要从实验装置、测量方法以及实验操作等各方面去保证.如果实验过程中系统与外界的热交换不能忽略,还要作散热(或吸热)修正。

我们知道,传递热量的方式有三种——传导、对流和辐射,所以必须使实验系统与环境之间的传导、对流和辐射都尽量减少,实验中使用量热器可以基本满足这样的要求。

现有质量为 m 、温度为 T_1 的冰(设在实验室环境下其熔点为 T_0),与质量为 m_0 、温度为 T_2 的水混合,冰全部熔化为水后的平衡温度为 T_3 . 设量热器的内筒和搅拌器的质量分别为 m_1 和 m_2 ,比热容分别为 c_1 和 c_2 . 水和冰的比热容分别为 c_0 和 c_3 . 温度计的热容为 δ_C . 如果实验系统为孤立系统,将冰投入盛有温度为 T_2 的水的量热器中,则有热平衡方程式为

$$\begin{aligned} m c_3 (T_0 - T_1) + m L + m c_0 (T_3 - T_0) \\ = (m_0 c_0 + m_1 c_1 + m_2 c_2 + \delta_C) (T_2 - T_3) \end{aligned} \quad (1.1)$$

式中: L 为冰的熔化热.因此,冰的熔化热 L 为

$$L = \frac{1}{m}(m_0 c_0 + m_1 c_1 + m_2 c_2 + \delta_c)(T_2 - T_3) - c_0(T_3 - T_0) - c_3(T_0 - T_1) \quad (1.2)$$

我们实验室所用内筒和搅拌器材料均为铜,其比热容 $c_1 = c_2 = 0.389 \times 10^3 \text{ J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$. 冰的比热容(在 $-40 \sim 0 \text{ }^\circ\text{C}$ 时) $c_3 = 1.80 \times 10^3 \text{ J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$. 水的比热容取 $c_0 = 4.18 \times 10^3 \text{ J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$. 在我们实验室条件下,冰的熔点可以近似认为是 $0 \text{ }^\circ\text{C}$, 即 $T_0 = 0 \text{ }^\circ\text{C}$.

为了尽可能使系统与外界交换的热量达到最小,除了使用量热器以外,在实验的操作过程中还还必须注意:不应当直接用手去把握量热器的任何部分;不应当在阳光的直接照射下或空气流动太快的地方(如通风过道、风扇旁等)进行实验;冬天要避免在火炉或暖气旁做实验等. 此外,由于系统与外界温度差越大时,在它们之间传递热量越快;时间越长,传递的热量越多,因此在进行量热实验时,要尽可能使系统与外界温度差小,并且尽量使实验过程进行得迅速.

另外还要指出的是,温度是热学中的一个基本物理量. 量热实验中必须测量温度. 一个系统的温度,只有在平衡态时才有意义,因此测温时必须使系统各处温度达到均匀. 用温度计的指示值代表系统温度,还必须使系统与温度计之间达到热平衡.

尽管注意到了上述的各个方面,但除非系统与环境的温度时时刻刻完全相同,否则就不可能完全达到绝热的要求. 因此,在作精密测量时,就需要采用一些办法来求出实验过程中实验系统究竟散失或吸收了多少热量,进而对实验结果进行修正.

我们介绍一种根据牛顿冷却定律粗略修正散热的方法.

一个系统的温度如果高于环境温度,它就要散失热量. 实验证明,当温度差相当小时(例如在 $10 \sim 15 \text{ }^\circ\text{C}$ 范围里),散热速率与温度差成正比,此即牛顿冷却定律. 用数学形式表示为

$$\frac{\delta q}{\delta t} = K(T - \theta) \quad (1.3)$$

式中: δq 是系统散失的热量, δt 是相应的时间间隔, K 是一个常量(称为散热常量),它与系统表面积成正比并随表面的吸收或发射辐射热的本领而变, T 和 θ 分别是我们所考虑的系统及环境的温度, $\delta q/\delta t$ 称为散热速率,表示单位时间内系统散失的热量.

已知当 $T > \theta$ 时, $\frac{\delta q}{\delta t} > 0$, 系统向外散热; 当 $T < \theta$ 时, $\frac{\delta q}{\delta t} < 0$, 系统从环境吸热. 我们可以取系统的初温 $T_2 > \theta$, 终温 $T_3 < \theta$, 以设法使整个实验过程中系统与外界间的热量传递前后彼此抵消.

实验中的具体情况是:在刚投入冰时,水温高,冰的有效面积大,熔化快,因此系统表面温度 T (即量热器中水的温度) 降低较快;随着冰的不断熔化,冰块逐渐变小,水温逐渐降低,冰熔化就慢了,水温的降低也就变慢起来. 量热器中水温随时间的变化曲线如图 1-1 所示.

根据式 (1.3), $\delta q = K(T - \theta) \delta t$, 实验过程中, 即系统温度从 T_2 变为 T_3 的这段时间 ($t_2 \rightarrow t_3$) 内系统与环境间交换的热量为

$$q = \int_{t_2}^{t_3} K(T - \theta) dt \quad (1.4)$$

式 (1.4) 可写成

$$q = K \int_{t_2}^{t_\theta} (T - \theta) dt + K \int_{t_\theta}^{t_3} (T - \theta) dt \quad (1.5)$$

前一项 $T - \theta > 0$, 系统散热, 后一项 $T - \theta < 0$, 系统吸热, 对应于图 1-1 中面积

$$S_A = \int_{t_2}^{t_\theta} (T - \theta) dt, \quad S_B = \int_{t_\theta}^{t_3} (T - \theta) dt$$

由此可见, S_A 与系统向外界散失的热量成正比, 即 $q_{\text{散}} = K S_A$; S_B 与系统从外界吸收的热量成正比, 即 $q_{\text{吸}} = K S_B$. 因此, 只要使 $S_A \approx S_B$, 系统对外界的散热和吸热就可以相互抵消.

要使 $S_A \approx S_B$, 就必须使 $(T_2 - \theta) > (\theta - T_3)$, 究竟 T_2 和 T_3 应取多少, 或 $(T_2 - \theta) : (\theta - T_3)$ 应取多少, 要在实验中根据具体情况选定.

上述这种使散热与吸热相互抵消的做法, 不仅要求水的初温比环境温度高, 末温比环境温度低, 而且对初温、末温与环境温度相差的幅度要求比较严格, 需要经过若干次的试验. 根据经验, 当 $(T_2 - \theta) : (\theta - T_3) \approx 10 : 3$ 时, 可以得到 $S_A \approx S_B$.

另外, 还有通过修正初、终温对系统进行散热修正的方法, 请见本实验 [附录].

【实验装置】

1. 量热器

量热器的种类很多, 因测量的目的、要求和测量精度的不同而异. 最简单的一种如图 1-2 所示, 由良导体做成的内筒置于一个较大的外筒中组成. 通常在内筒中放水、温度计及搅拌器, 这些东西 (内筒、温度计、搅拌器及水) 连同放进的待测物体就构成了我们所考虑的 (进行实验的) 系统. 内筒、水、温度计和搅拌器的热容是可以计算出来或实测得到的, 因此根据前述的混合量热法就可以进行

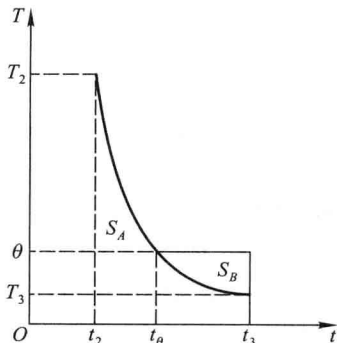


图 1-1 用补偿法粗略修正散热示意图