578
C4-33
L53

基础物理实验

吕斯骅　段家忯　主编

A0961839

北京大学出版社
·北　京·

需要全本请访问 www.ertongbook.com

图书在版编目(CIP)数据

基础物理实验/吕斯骅,段家忯主编. —北京：北京大学出版社,2002.3
ISBN 7-301-05261-8

Ⅰ.基… Ⅱ.①吕… ②段… Ⅲ.物理-实验-高等学校-教材 Ⅳ.04-33

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2001)第 091437 号

书　　名：**基础物理实验**
著作责任者：吕斯骅　段家忯　主编
责任编辑：瞿　定
标准书号：ISBN 7-301-05261-8/O·0516
出 版 者：北京大学出版社
地　　址：北京市海淀区中关村北京大学校内　100871
网　　址：http://cbs.pku.edu.cn
电　　话：出版部 62752015　发行部 62754140　编辑部 62752021
电子信箱：zpup@pup.pku.edu.cn
排 版 者：北京高新特激光照排中心　62637627
印 刷 者：**北京大学印刷厂**
发 行 者：北京大学出版社
经 销 者：新华书店
787 毫米×1092 毫米　16 开本　24.875 印张　620 千字
2002 年 3 月第 1 版　2002 年 3 月第 1 次印刷
定　　价：34.00 元

前　言

基础物理实验是为理科学生开设的第一门物理实验课.它的任务是通过实验培养学生发现、分析和解决物理问题的能力.为此,必须让学生系统地掌握物理实验的基本知识、基本方法和基本技能.打好基础,提高学生的实验素质是我们在对实验课改革时必须注意的问题.我们认为"基础"是相对稳定的,同时又是随时代发展的,要从培养掌握现代科学技术的创新人才的高度来重新审视什么是"基础".随着科学技术的飞速发展,一些老的基本知识、方法和技能已退出历史舞台,一些原来属于近代物理实验的内容和实验技术已在科研、生产和生活中广泛普及,如低温、真空、光谱、核磁共振等,它们理所当然地应成为基础物理实验的范畴.随着传感器在实验中的广泛应用,单纯的力、热、电、光实验已改变为力、热、电、光、计(计算机)的综合实验,促进了力、热、电、光、计之间的融合,普物实验与近代物理实验课程间的重组与融合.因而对原有实验教学内容和教学体系必须进行全面改革.

在课程内容的改革方面,我们对原普通物理实验题目和内容进行了全面审视,力求站在现代科学技术水平的高度上,从培养21世纪高素质创新人才的目标出发,进行新的构想和精选基本内容.坚决淘汰已过时的内容、方法和手段,补充一些在物理学科中有代表性有应用价值的先进的实验内容、方法和手段,其中相当一部分是从科研成果转化来的实验.例如,在力学、热学实验中增加了低温、真空、材料热导等方面的实验;在电磁学实验中加强"示波"测量,引进了读出示波器和存储示波器,增加了虚拟仪器;在光学实验中用平台部分地取代导轨,用光栅光谱仪代替棱镜摄谱,用光电传感器代替目视,加强定量测量.还增加了传感器的应用内容,并在部分实验中用微机控制实验、采集和处理数据.

理科非物理类物理实验课以前只有普通物理的内容,因而严重滞后于物理学和物理实验技术的发展.在科学技术飞速发展的时代,化学、生物等学科的发展已进入分子、原子尺寸,他们大量应用现代光谱技术、核磁共振成像技术、核探测技术、X射线技术等.这就给物理实验基础课程内容的合理设置提出了要求,必须建立一个新的课程体系,即符合物理实验自身规律的合理和完整的体系.这个体系既包括精选的普物实验,又有新的近代物理实验,在内容上深入浅出,如:氢原子光谱,相对论的动量-动能关系,核磁共振,微波布拉格衍射,夫兰克-核兹实验,高温超导,全息照相等.我们选择这些新的近代物理实验的原则是,应该有重要的近代物理内容和现代实验技术,在化学、生物等领域有重要的应用价值,在科学和技术上是先进的实验装置并且引进计算机技术.

原来的普通物理实验课的教学模式是将力、热、电、光分块进行并独立排课,极大地限制了一些实验尤其是带有综合训练的实验题目和内容的开出.在对课程体系的改革中我们打破了这种分块进行的格式,将力、热、电、光和部分近代实验混合安排,即统一按训练的层次,循序渐进分阶段安排.在每个阶段各选择一定数量的力、热、电、光和近代实验,而且有明确的教学目的和要求.

本教材就是对上述课程内容和体系改革成果的总结.在教材的第一单元中安排了7个实验作为正规训练前的预备阶段给学生进行练习,目的是缩小来自不同地区和学校的学生对基

本物理实验掌握程度的差别. 第二、三单元为基本实验，加强对学生的“三基”(基本知识、基本技能和基本方法)训练. 第四单元安排了一定数量的设计性和综合性实验供学生选择，目的是充分发挥他们的积极性、主动性，给他们创造一个独立进行实验全过程的条件. 在第五单元中我们安排了几个近代物理实验，这些实验题目就是根据上述对近代物理实验题目和内容的选择原则提出的. 对理科不同的系和专业可以从本教材的各单元中分别选择不同的题目组成实验循环. 经过几年的教学实践，我们认为这本教材所提供的实验题目和内容适合于理科各学科一、二年级学生学习.

物理实验课以及课程改革是全体实验课教员和实验技术人员的集体工作. 在本书出版之际，我们感谢几十年来在北京大学物理系普通物理实验和近代物理实验教学中作出过贡献的所有老师和实验技术人员.

教学改革是一项长期的和复杂的系统工程，我们深知改革还处于起步阶段，还有许多不完善和需要改进之处，本书只是六年改革的小结. 读者不难发现本书中还有不恰当的内容和错误，祈望广大教师和读者不吝指正. 希望不久的将来我们能奉献给大家一本符合现代教育理念的更为完善的教材.

编　者

2001 年 12 月

目　录

绪论 …… (1)

第一单元

实验一　单摆实验 …… (1)
实验二　测定冰的熔解热 …… (4)
实验三　电学实验基本知识 …… (11)
实验四　测量非线性元件的伏安特性 …… (27)
实验五　示波器的使用 …… (32)
（一）普通示波器 …… (32)
（二）读出示波器 …… (42)
实验六　测量薄透镜的焦距 …… (48)
实验七　显微镜 …… (53)

第二单元

实验八　测量误差和不确定度 …… (59)
（一）测量误差和测量结果的不确定度 …… (59)
（二）处理数据的几种方法 …… (73)
（三）关于不确定度的进一步的知识 …… (80)
实验九　测定金属的杨氏模量 …… (92)
（一）用金属丝的伸长测定杨氏模量 …… (92)
（二）用梁的弯曲测定杨氏模量 …… (97)
（三）用 CCD 成像系统测定杨氏模量 …… (101)
实验十　刚体转动实验 …… (106)
实验十一　气轨上弹簧振子的简谐振动 …… (110)
实验十二　扭摆的受迫振动 …… (114)
实验十三　用冷却法测定液体的比热容 …… (119)
实验十四　直流电桥 …… (122)
（一）用平衡电桥测量电阻 …… (122)
（二）用非平衡电桥测量铂电阻的温度系数 …… (127)
实验十五　用霍尔效应测量磁场 …… (132)
实验十六　*LC* 电路的谐振现象 …… (137)
实验十七　弗兰克-赫兹实验 …… (142)
实验十八　分光计 …… (147)
实验十九　光的干涉现象 …… (155)

需要全本请访问 www.ertongbook.com

实验二十 光衍射的定量研究…… (160)
实验二十一 迈克耳孙干涉仪…… (166)

第三单元

实验二十二 复摆实验…… (173)
实验二十三 测定空气的密度…… (179)
实验二十四 测定空气中的声速…… (187)
实验二十五 用闪光法测定不良导体的热导率…… (191)
实验二十六 用动态法测定良导体的热导率…… (198)
实验二十七 交流电桥…… (205)
实验二十八 交流电路…… (212)
(一) 测量交流电路功率…… (212)
(二) 单相供电电路及单相异步电动机…… (217)
实验二十九 *RC* 和 *RL* 串联电路的稳态特性…… (224)
实验三十 *RLC* 串联电路的暂态过程…… (229)
实验三十一 集成运算放大器的应用…… (237)
实验三十二 光栅特性及测定光波波长…… (246)
实验三十三 光的偏振现象…… (250)
实验三十四 单色仪…… (256)
实验三十五 全息照相…… (264)
实验三十六 阿贝成像原理和空间滤波…… (271)
实验三十七 光源的时间相干性…… (276)
实验三十八 夫琅禾费衍射现象…… (282)
实验三十九 测定物质的色散曲线…… (286)
实验四十 光学成像系统的分辨本领…… (289)

第四单元

设计实验一 测定速度和加速度…… (292)
设计实验二 测量质量和密度…… (294)
设计实验三 测定角速度和角加速度…… (295)
设计实验四 用应变片研究碰撞过程…… (296)
设计实验五 用霍尔传感器研究碰撞过程…… (298)
设计实验六 用传感器测弯曲应变并测定材料的杨氏模量…… (299)
设计实验七 自组光路用伸长法测定金属丝的杨氏模量…… (300)
设计实验八 冷却规律的研究…… (301)
设计实验九 测量小灯泡伏安特性曲线…… (302)
设计实验十 简易万用电表的设计及校准…… (303)
设计实验十一 测定光电二极管特性…… (306)
设计实验十二 测量 PN 结温度传感器的温度特性…… (307)

设计实验十三　热敏电阻温度开关……（308）
设计实验十四　数字温度计……（309）
设计实验十五　制作数字频率计……（310）
设计实验十六　用电流场模拟静电场……（315）
设计实验十七　测量地磁场强度的水平分量……（316）
设计实验十八　测量磁场分布……（317）
设计实验十九　测量磁场的能量……（318）
设计实验二十　电感器……（319）
设计实验二十一　测定互感器的互感系数……（320）
设计实验二十二　观测动态磁滞回线……（321）
设计实验二十三　测定电容……（322）
设计实验二十四　测定半波整流电容滤波电路负载电阻上消耗的平均功率……（323）
设计实验二十五　用霍尔传感器测量电机转速……（324）
设计实验二十六　*RC* 移相电路及测量相位差……（325）
设计实验二十七　黑盒子……（326）
设计实验二十八　测定按钮开关的开关时间……（327）
设计实验二十九　可控硅整流器……（328）
设计实验三十　测定真空二极管阴极材料的逸出功……（330）
设计实验三十一　红外传感探测器……（331）
设计实验三十二　超声测距……（332）
设计实验三十三　周期函数的傅里叶分析……（333）
设计实验三十四　快速傅里叶变换(FFT)及其在模拟光学现象中的应用……（335）
设计实验三十五　智能检测……（345）
设计实验三十六　用 M-干涉仪测量物质折射率和物体长度……（351）
设计实验三十七　测定椭圆偏振光强度分布图……（352）
设计实验三十八　测定物质的光吸收谱……（354）
设计实验三十九　用光栅多色仪测量蓝光发光材料的光吸收特性……（355）

第五单元

实验四十一　微波的布拉格衍射……（356）
实验四十二　用光学多通道分析器(OMA)研究氢原子光谱……（361）
实验四十三　用 β 粒子验证狭义相对论的动量-动能关系……（366）
实验四十四　核磁共振……（370）
实验四十五　高温超导材料特性测试和低温温度计……（376）

绪　论

物理实验在物理学的建立和发展中一直起着十分重要的作用.从人们认识客观事物的规律来看,总是先从实验事实出发,经过分析和归纳,上升为理论,然后再回到实践中去指导实践,并接受实践的检验.所以物理实验是物理学的基础.已经建立起来的物理定理,如果和新的实验事实发生矛盾,就必须对原来的定理加以修正或改造,这样,物理学就获得了新的发展.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、实验仪器的使用等独特的内容,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?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,一个物理实验涉及到的知识领域往往是很宽广的,即使一个简单的力学实验,也常常涉及到电学、光学、热学、机械学等方面的知识.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.据说,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说来有以下三点：

首先，学习物理实验的基本知识、基本方法和基本技能. 包括学习使用各种测量仪器，学习各种物理量的测量方法，观察分析各种实验现象，还要学习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等，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.

要上好一次物理实验课，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要求、原理、操作步骤以及应该注意的问题. 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，头脑里要有明确的物理图像，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，想一想是否合乎物理规律，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、调铅垂；在电学实验中如何连接电路；在光学实验中如何调节共轴等，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)，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，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.

第 一 单 元

实验一　单 摆 实 验

【目的要求】

1. 用单摆测定重力加速度；
2. 学习使用计时仪器(停表、光电计时器).
3. 学习在直角坐标纸上正确作图及处理数据；
4. 学习用最小二乘法作直线拟合.

【仪器用具】

单摆装置，带卡口的米尺，游标卡尺，电子停表，光电计时器.

【原　　理】

把一个金属小球拴在一根细长的线上(见图 1-1). 如果细线的质量比小球质量小很多，而球的直径又比细线的长度小很多，则此装置可看作是一个不计质量的细线系住一个质点，这样的装置就是单摆. 略去空气的阻力和浮力不计，在摆角很小时，小球的运动方程是

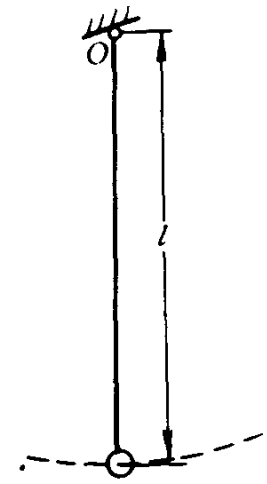


图　1-1

$$\ddot{x} + \frac{g}{l}x = 0, \tag{1.1}$$

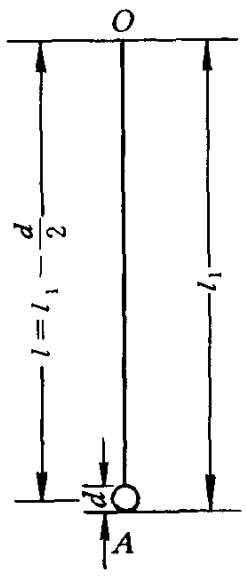


图　1-2

其中 x 是从平衡点开始计算的位移. 式(1.1)的解

$$x = A\cos(\omega t + \alpha), \tag{1.2}$$

其中 A，α 由初始条件决定，ω 是角频率，

$$\omega = \sqrt{\frac{g}{l}}.$$

单摆周期为

$$T = 2\pi/\omega = 2\pi\sqrt{l/g}, \tag{1.3}$$

式中 l 是单摆的摆长，就是从悬点到小球球心的距离；g 是重力加速度. 因而，单摆周期只与摆长和重力加速度有关. 如果测量出单摆的摆长和周期，就可以计算出重力加速度 g. 这是粗略测定重力加速度的一个简便方法.

【实验内容】

1. 固定摆长，测定重力加速度 g

(1) 测定摆长. 取摆长 l 为 100 cm 左右，先用带刀口的米尺测量悬点 O 到小球最低点 A 的距离 l_1，再用游标卡尺测小球沿摆长方向的直径 d，则摆长(如图 1-2)

$$l = l_1 - \frac{d}{2}.$$

悬点 O 的位置 x_1/cm	小球最低点 A 的位置 x_2/cm	$l_1=\lvert x_1-x_2\rvert$/cm	仪器零点	小球直径 d/cm

估计 l_1 的极限误差 e_{l_1}，d 的极限误差 e_d，计算出标准差

$$\sigma_{l_1} = \frac{e_{l_1}}{\sqrt{3}}, \quad \sigma_d = \frac{e_d}{\sqrt{3}},$$

则

$$\sigma_l = \left[\sigma_{l_1}^2 + \left(\frac{\sigma_d}{2}\right)^2\right]^{1/2},$$

则摆长

$$l = _____ \pm _____ \text{cm}.$$

(2) 测量单摆周期. 使单摆作小角度摆动，待摆动稳定后，用停表测量摆动 30 次所需的时间 $30T$，重复测量多次，求平均值.

	1	2	3	4	5	平 均
$30T$/s						

$$30T = _____ \pm _____ \text{s}.$$

在测量周期时，应选择摆球通过最低位置时计时，为了避免视差，在标尺中央放一个有竖直刻线的平面反射镜，每当摆线、刻线、摆球在镜中的像三者重合时计时.

(3) 由下式计算 g，并算出标准差 σ_g(计算时可把 $30T$ 作为一个量而不必求出 T).

$$g = \frac{4\pi^2 l}{T} = \frac{4\pi^2 l}{\left(\frac{30T}{30}\right)^2} = \frac{\pi^2 l \times 3600}{(30T)^2}, \tag{1.4}$$

$$g = _____ \pm _____[\ \ ].$$

2. 改变摆长，测定重力加速度 g

使 l 分别为 60，70，80，90，100，110，120 cm 左右，测出不同摆长下的 $30T$.

(1) 用直角坐标纸作 l-$(30T)^2$ 图，如果图是直线，说明什么？由直线的斜率求 g.

(2) 以 l 及相应的 $(30T)^2$ 的数据用最小二乘法作直线拟合，求斜率，并由此求出 g(参看实验八中“处理数据的几种方法”一节内容).

3. 固定摆长，改变摆角，测周期 T

使摆角分别为 10°，20°，30°，用光电计时器测摆动周期. 用周期 T 随摆角 θ 变化的公式

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{l}{g}}\left(1 + \frac{1}{4}\sin^2\frac{\theta}{2}\right), \tag{1.5}$$

需要全本请访问 www.ertongbook.com

计算出上述相应角度的周期数值，进行比较.

【思 考 题】

选择题

1. 测 $30T$ 而不直接测 T 是因为(　　).

(1) 多次测量能减小偶然误差；

(2) 能减小电子停表的误差；

(3) 能减小按停表不及时的误差.

2. 在小球最低点开始计算周期是(　　).

(1) 最低点便于观察；

(2) 在最低点安装反射镜比较方便；

(3) 因为在同样位置误差下，最低点的计时误差最小.

【附　　录】

光电计时器

本实验室所用光电计时器即 BD100 型智能频率计. 它是以 MCS-51 系列单片微型计算机为核心构成智能化测时仪器. 其输入部分由两路光电门及 4 个命令键组成，输出部分为 6 位发光数码管. 仪器通电后，开始执行芯片内部固化的专用程序，该程序首先初始化仪器各项内部参数，启动系统时钟，然后进入等待状态. 此后若光电门被挡光，相应的光信号被光电接收电路转换成电信号，触发单片机进入中断服务子程序. 该子程序按照系统时钟读取并存储挡光时刻，本仪器最多可存储 52 次挡光时刻. 当用 4 个按键输入命令时，仪器根据命令种类对存储数据进行一系列运算，显示出相应结果(时间间隔、周期、频率等).

本仪器是针对力学实验需要而设计的，适用于一般物体运动或低频机械振动的测量，测时范围(相邻两次挡光时间间隔)为 100 μs～4000 s，测时精度为 10 μs.

实验二　测定冰的熔解热

【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. 进行实验安排和参量选择.

【仪器用具】

量热器，物理天平或电子天平，数字温度计(－10.0～100.0℃一支)，玻璃皿，冰，停表，干拭布.

【原　　理】

1. 一般概念

一定压强下晶体物质熔解时的温度，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解热.

本实验用混合量热法来测定冰的熔解热. 它的基本作法是：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，是可以由其温度的改变 δT 和热容 C 计算出来的，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. 这要从仪器装置、测量方法以及实验操作等各方面去保证. 如果实验过程中与外界的热交换不能忽略，就要作散热或吸热修正.

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，必须使系统与温度计之间达到热平衡.

2. 装置简介

为了使实验系统(包括待测系统与已知其热容的系统)成为一个孤立系统，我们采用量热器. 传递热量的方式有三种：传导、对流和辐射. 因此，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，量热器可以满足这样的要求.

量热器的种类很多，因测量的目的、要求、测量精度的不同而异. 最简单的一种如图 2-1 所示，由良导体做成的内筒置于一较大的外筒中组成. 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量热实验了.

内筒置于一绝热架上，外筒用绝热盖盖住，因此空气与外界对流很小. 又因空气是不良导体，所以内、外筒间借传导方式传递的热量便可以减至很小. 同时由于内筒的外壁及外筒的内外壁都电镀得十分光亮，使得它们发射或吸收辐射热的本领变得很小，于是我们进行实验的系统和环境之间因辐射而产生热量的传递也可以减小. 这样的量热器已经可以使实验系统粗略地接近于一个孤立系统了.

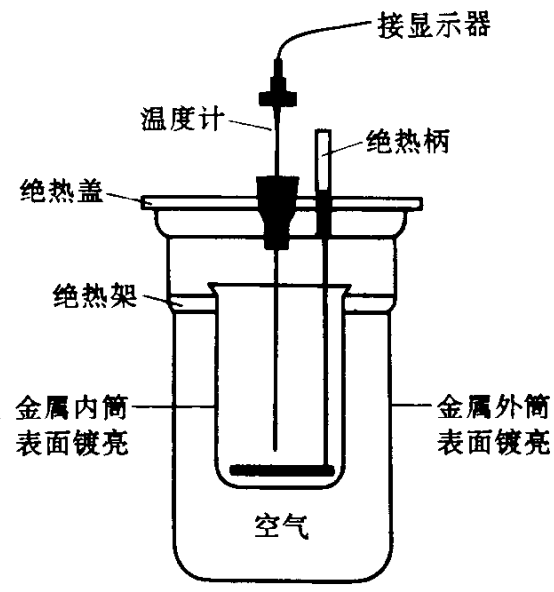


图 2-1　量热器示意图

3. 实验原理

若有质量为 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、温度为 T_2 的水混合，冰全部熔解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. 温度计的热容为 δ_C. 冰的比热容为 c_3. 如果实验系统为孤立系统，将冰投入盛有 T_2 水的量热器中，则有热平衡方程式为

$$\begin{aligned} &Mc_3(T_0 - T_1) + ML + Mc_0(T_3 - T_0) \\ &\quad = (mc_0 + m_1c_1 + m_2c_2 + \delta_C)(T_2 - T_3), \end{aligned} \tag{2.1}$$

所以冰的熔解热 L 为

$$L = \frac{1}{M}(mc_0 + m_1c_1 + m_2c_2 + \delta_C)(T_2 - T_3) - c_0(T_3 - T_0) - c_3(T_0 - T_1), \tag{2.2}$$

其中，L 为冰的熔解热.

我们实验室所用内筒和搅拌器材料为铜，$c_1 = c_2 = 0.389 \times 10^3$ J/(kg · K). 冰的比热容(在 $-40 \sim 0$℃时)$c_3 = 1.80 \times 10^3$ J/(kg · K). 水的比热容取为 $c_0 = 4.18 \times 10^3$ J/(kg · K). 在我们实验室条件下，冰的熔点也可以认为是 0℃，即 $T_0 = 0$℃.

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也必须予以注意：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作实验等. 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，并尽量使实验过程进行得迅速.

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.

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(不超过 10～15℃)，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

$$\frac{\delta q}{\delta t} = K(T - \theta), \tag{2.3}$$

这里 δq 是系统散失的热量，δt 是时间间隔，K 是一个常数(称为散热常数)，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.

本实验中，我们介绍一种根据牛顿冷却定律粗略修正散热的方法.

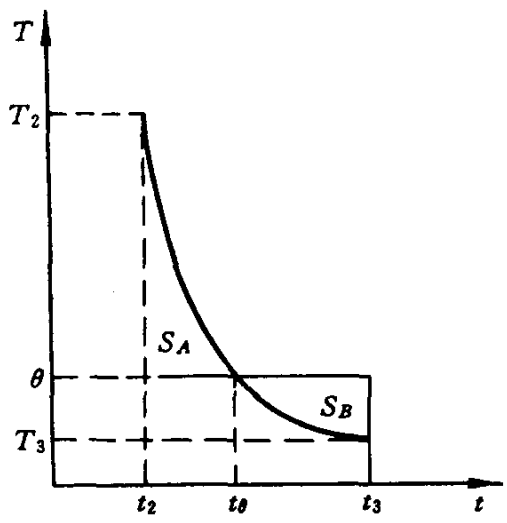


图 2-2

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环境间的热量传递前后彼此抵消.

实验中的具体情况：在刚投入冰时，水温高，冰的有效面积大，熔解快，因此系统表面温度 T（即量热器中水温）降低较快；随着冰的不断熔化，冰块逐渐变小，水温逐渐降低，冰熔解就慢了，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 2-2 所示.

根据(2.3)式，$\delta q=K(T-\theta)\delta t$，实验过程中，即系统温度从 T_2 变为 T_3 这段时间($t_2\rightarrow t_3$)内系统与环境间交换的热量为

$$q=\int_{t_2}^{t_3}K(T-\theta)\mathrm{d}t. \tag{2.4}$$

(2.4)式可写成

$$q=K\int_{t_2}^{t_\theta}(T-\theta)\mathrm{d}t+K\int_{t_\theta}^{t_3}(T-\theta)\mathrm{d}t, \tag{2.5}$$

前一项 $T-\theta>0$，系统散热，后一项 $T-\theta<0$，系统吸热，对应于图 2-2 中面积

$$S_A=\int_{t_2}^{t_\theta}(T-\theta)\mathrm{d}t,\qquad S_B=K\int_{t_\theta}^{t_3}(T-\theta)\mathrm{d}t.$$

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

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作法，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. 往往经过若干次的试验，效果可能仍然不够理想.

下面介绍另外一种方法，这种方法对量热器中水的初温和末温没有什么限制.

如图 2-3，在 $t=t_2$ 时投入冰块，在 $t=t_3$ 时冰块熔化完毕. 在投入冰块前，系统的温度沿 $T_2''T_2$ 变化，在冰块熔化完毕后，系统温度沿 T_3T_3'' 变化. $T_2''T_2$ 和 T_3T_3'' 实际上都很接近直线. 作 $T_2''T_2$ 的延长线到 T_2'，作 $T_3''T_3$ 的延长线到 T_3'，连接 $T_2'T_3'$，使 $T_2'T_3'$ 与 T 轴平行，且使面积 $S_1+S_2=S_3$，用 T_2' 代替 T_2，用 T_3' 代替 T_3，代入(2.2)式求 L，就得到系统与环境没有发生热量交换的实验结果. 其理由如下：

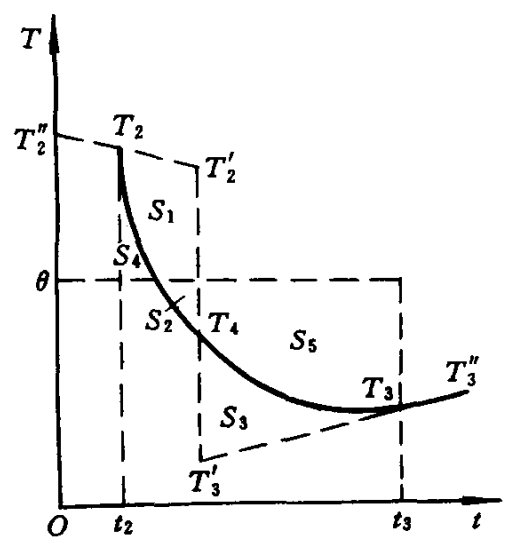


图 2-3

实际的温度变化本来是 $T_2''T_2T_4T_3T_3''$. 在从冰块投入到

冰块熔化完毕的过程中，系统散失的热量相当于面积 S_4，从环境吸收的热量相当于面积 S_2+S_5. 综合两者，系统共吸收的热量相当于面积 $S=S_2+S_5-S_4$.

在用 T_2' 代替 T_2、用 T_3' 代替 T_3 后，我们得到另一条新的温度曲线 $T_2''T_2T_2'T_3'T_3T_3''$. 在从冰块投入到冰块熔化完毕的过程中，系统散失的热量相当于面积 S_1+S_4，从环境吸收的热量相当于面积 S_3+S_5. 综合两者，系统共吸收的热量相当于面积 $S'=S_3+S_5-S_1-S_4$.

因为作图时已使 $S_1+S_2=S_3$，所以有 $S'=S$. 这说明，新的温度曲线与实际温度曲线是等价的.

新的温度曲线的物理意义是：它把系统与环境交换热量的过程与冰熔化的过程分割开来，从 T_2 到 T_2' 和从 T_3' 到 T_3 是系统与环境交换热量的过程，从 T_2' 到 T_3' 是冰熔化的过程. 由于冰熔化的过程变为无限短，自然没有机会进行热量交换. 因而从 T_2' 到 T_3'，便仅仅是由于冰的熔化而引起的水温的变化. 这一方法把对散热的修正转换为对初温和末温的修正. 它对量热器中水的初温和末温原则上没有任何限制，即使 T_2，T_3 都大于 θ 或两者都小于 θ 也是可以的. 但考虑到牛顿冷却定律成立的条件以及其他因素，还是在 θ 附近为好，即最好还是使 $T_2>\theta$，$T_3<\theta$，但它们与 θ 的差值可以不受限制.

【仪器描述】

1. 物理天平

天平是一种等臂杠杆，按其称衡的精确度分等级，精确度较低的是物理天平，精确度较高的是分析天平，不同精确程度的天平配置不同等级的砝码. 各种等级天平和砝码的允许误差都有规定，可以查看产品说明书或检定证书. 天平的规格除了等级以外主要还有最大称量和感量（或灵敏度）. 最大称量是天平允许称量的最大质量. 感量就是天平的摆针标度尺上零点平衡位置（这时天平两个秤盘上的质量相等，摆针在标度尺的中间）偏转一个最小分格时，天平两秤盘上的质量差，一般来说，感量的大小应该与天平感码（游码）读数的最小分度值相适应（例如相差不超过一个数量级）. 灵敏度是感量的倒数，即天平平衡时，在一个盘中加单位质量后摆针偏转的格数.

物理天平的构造如图 2-4 所示. 在横梁 BB′ 的中点和两端共有三个刀口. 中间刀口 a 安置在支柱 H 顶端的玛瑙刀垫上，作为横梁的支点. 在两端的刀口 b 和 b′ 悬挂两个秤盘 p 和 p′.

每架物理天平都配有一套砝码，实验室常用的物理天平中有一种最大称量为 500 g，因 1 g 以下的砝码太小，用起来很不方便，所以在横梁上附有可以移动的游码 D. 横梁上每个分度值为 50 mg，拨动游码 D 在横梁上向右移动一个分度，就相当于在右盘中加 50 mg 的砝码. 实验室常用的另一种物理天平的称量为 1000 g，最小分度值为 0.1 g（感量为 0.1 g/分格）.

横梁下部装有读数指针 J. 立柱 H 上装有标尺 S. 根据指针在刻度标牌上的示数来判断天平是否平衡.

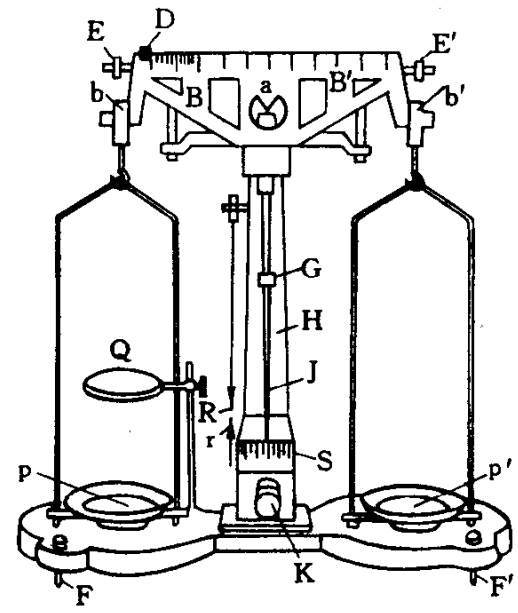


图　2-4

为了方便某些实验，在底板左面装有托架 Q. 例如，用阿基米德原理测量物体的体积时，可将盛有水的烧杯放在托架上，以便将物体浸沉在水中进行称衡.

物理天平的操作步骤：

(1) 调节水平螺钉 F 和 F′使支柱铅直，这可由铅锤 R 的尖端与底座上的准钉 r 尖端是否对准来检查(或由天平底座上的水平仪检查).

(2) 调整零点. 把游码 D 拨到刻度“0”处，将秤盘吊钩挂在两端刀口上. 将止动旋扭 K 向右旋转，支起天平横梁，观察指针 J 摆动情况，判断天平是否平衡. 当 J 在标度尺 S 的中线左右作等幅摆动时，天平即平衡了. 如不平衡，可以调整平衡螺母 E 及 E′.

(3) 称衡. 将待测物体放在左盘内，砝码放在右盘内，进行称衡.

(4) 每次称衡完毕，将 K 向左旋转，放下横梁. 全部称完后将秤盘摘离刀口.

物理天平的操作规则：

仪器的操作规则是为了保证正确使用仪器和保持仪器不受损坏而规定的. 物理天平的操作规则如下：

(1) 天平的负载量不得超过其最大称量，以免损坏刀口或压弯横梁.

(2) 为了避免刀口受冲击而损坏，必须切记：在取放物体、取放砝码、调节平衡螺母以及不使用天平时，都必须将天平止动. 只有在判断天平是否平衡时才将天平启动. 天平启、止时动作要轻，止动时最好在天平指针接近标牌中间刻度时进行.

(3) 砝码不得用手拿取，只准用镊子夹取. 从盘上取下砝码后应立即放入砝码盒中.

(4) 天平的各部分以及砝码都要防锈、防蚀. 高温物体、液体及带腐蚀性的化学药品不得直接放在秤盘内秤衡.

物理天平的最大允许误差或称允差，是技术规范、规程等对它所允许的误差极限值，可查阅相关技术标准得到. 本实验所用物理天平规格：量程 500 g；分度值 0.05 g；满量程使用时允差为 0.08 g，1/2 量程为 0.06 g，1/3 量程为 0.04 g.

2. 电子天平

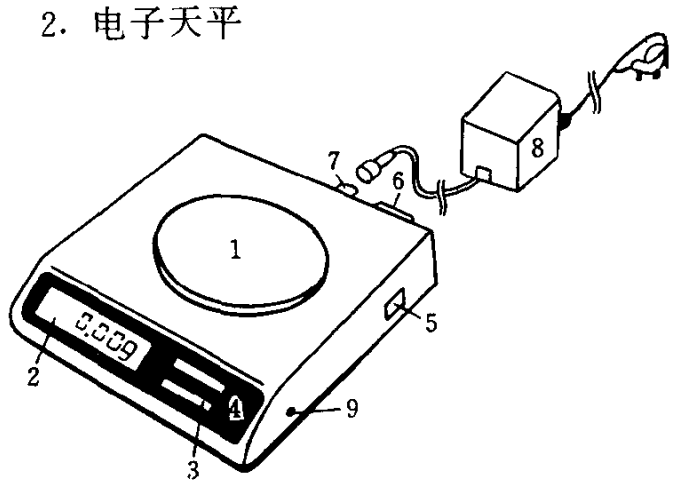


图 2-5 DJ500(1000)精密电子天平

1. 秤盘　4. 校正键(CAL)　7. 电源插座
2. 称量显示窗　5. 开关　8. 稳压电源
3. 去皮键(T)　6. 数据输出接口　9. 程序调用开关

本实验室用的电子天平外型见图 2-5 所示. 由称量传感器、电子线路及数字显示等几个主要部分组成. 最大称量为 500 g(或 1000 g)，最小分度值 0.01 g，允差为±0.02 g，稳定时间为 3 s.

电子天平操作规则：

(1) 天平的负载量不得超过其最大称量.

(2) 天平开机后应有 30 分钟预热时间.

(3) 为确保天平称量正确，使用前应进行校准(校准方法及步骤见实验室使用说明牌)并隔一定时间(如 2 小时左右)校准一次.

(4) 称量时将待测物置于秤盘中央.

(5) 天平工作台应使用水平工作台或其他防震工作台.

3. 数字温度计

数字温度计主要由温度(热电)传感器、放大电路和数字显示几部分组成. 本实验室用的温

需要全本请访问 www.ertongbook.com