

# 奥林匹克物理实验

梁秀慧 刘雪林 曾贻伟 编著

北京大学出版社



# 奥林匹克物理实验

梁秀慧 刘雪林 曾贻伟 编著

北京大学出版社

## 图书在版编目(CIP)数据

奥林匹克物理实验/梁秀慧等编著。—北京:北京大学出版社,1994.7

ISBN 7-301-02566-1

I. 奥… II. 梁… III. 物理-实验-中学-教学参考资料  
IV. G634.7

中国版本图书馆 CIP 数据核字(94)第 03691 号

**书 名:**奥林匹克物理实验

**著作责任者:**梁秀慧 刘雪林 曾贻伟 编著

**责任编辑:**朱新邨

**标准书号:**ISBN 7-301-02566-1/G·264

**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

**电话:**出版部 62752015 发行部 62559712 编辑部 62752032

**排印者:**北京大学印刷厂

**发行者:**北京大学出版社

**经销者:**新华书店

**版本记录:**850×1168毫米 8.875印张 32开本 240千字

1994年7月第一版 1997年10月第四次印刷

**定 价:**10.00元

## 内 容 简 介

本书是在北京市奥林匹克物理学校使用的物理实验教材基础上改写的。全书包括力学、热学和分子物理、电学、光学共35个实验,内容的拟定参考了高中物理教材、全国中学生物理竞赛内容提要以及大学普通物理实验的部分内容。本书除了基本实验外,还安排有“设计实验”及“选作实验”,在每个实验中附有预习思考题和复习题,目的在于更好地提高学生的实验技能,培养学生的创造精神。

本书可作为中学奥林匹克物理学校教材,亦可供广大中学物理教师及有志于参加物理竞赛的高中学生参考。

## 前 言

为了贯彻“教育要面向现代化、面向世界、面向未来”的精神，我国从1984年开始，在中国科协领导下，中国物理学会每年举办一次全国中学生物理竞赛。这一竞赛从开始就受到了广大中学生的欢迎，每年都有数以万计的中学生参赛，10年来累计参赛人数已超过50万。在此基础上选拔的优秀选手在国际物理奥林匹克竞赛中，连续取得优良成绩。与此相适应，全国许多城市（特别是大城市）相继成立了中学生奥林匹克物理学校，中学生课外物理学习活动也很活跃。所有这些不仅为全国及国际中学生物理竞赛培养了后备选手，而更主要的是给物理成绩优异的中学生提供了进一步学习物理知识和增长才能的机会，为祖国的科技事业培养了人才。

全国中学生物理竞赛是一项规模大、水平高的竞赛，它无疑对我国的物理教学，尤其是中学生的物理教学起着一定的导向作用，注重物理实验便是其一。在每年的物理竞赛的预赛及决赛中，都专门有物理实验的考核。

物理实验是物理课的重要组成部分。物理实验教学不仅有助于学生真正理解和掌握物理学的理论，而且是提高学生分析问题，解决问题能力的不可缺少的环节。目前，在我国的中学物理教学中，大多数学校由于实验条件的限制，物理实验内容极少，学生只能看老师作些演示实验，很少有自己动手作实验的机会，因而我国中学生的物理实验知识和实验技能都比较薄弱。为了解决这一问题，近年来，有的重点中学增添了实验设备，并为高中生开设了物理实验选修课，全国各地的中学奥林匹克物理学校以

及各类以中学生学物理为内容的集训队、辅导班也开设了物理实验课，不少理工方面的高等学校还利用假期为中学生开放实验室，让他们自己动手作些物理实验。在这种情况下，教材便成为一个突出的问题。目前，指导中学生学习物理的教材很多，但是指导中学生学习物理实验的书籍并不多见。而采用大学普通物理实验教材，从内容到要求都不适合中学生的水平。“奥林匹克物理实验”一书正是在这种背景下编写的。

本书是在北京市奥林匹克物理学校使用的物理实验讲义基础上，总结这几年的教学经验改写而成的。本书具有以下特点：

(1) 本书属于高中物理与大学普通物理之间的一个过渡层次，它是在高中物理的基础上加以扩展、提高，但又不同于大学教材。在选材方面尽量照顾高中的水平，比如力学、电学实验题目相对多一些，光学实验题目就少一些。在语言文字方面力求通俗易懂、深入浅出，叙述尽量详尽又避免繁琐冗杂。在内容格式上，每篇分“引言”、“实验仪器”、“实验原理”、“实验内容”、“预习思考题”、“复习题”等项目，层次分明，便于阅读。在数学工具方面，绝大多数场合下只使用初等数学，偶而用一点高等数学(如求导数)，这对中学生拓展知识可能也有所裨益。与高中物理比较，本书在实验的设计思想、原理以及一些测量方法的特点方面都有较深入的讨论；对测量结果的有效数字及误差分析也有一定的要求。使学生通过实验得到初步的科学训练，对测量结果能作初步的科学评价。

(2) 本书强调在物理实验中要加强基本功的训练，我们认为这对于开始接触物理实验的学生来说是非常重要的。在实验中，要求他们掌握基本的物理实验知识，学习使用常用的基本仪器，掌握一些物理量的测量方法。注意培养学生理论联系实际，用实验方法研究物理规律，解决实际问题的能力，使他们逐步养成严肃认真、实事求是的科学作风和良好的工作习惯。这些要求贯穿于

绪论及每个实验之中。

(3) 本书在强调基本功训练的同时,注意发挥学生的主动性,培养学生的创造精神。在操作步骤上,不规定得太死,让学生有思考的余地。书中安排了比较多的“设计实验”和“选作实验”,实践表明,这些实验有助于学生巩固已学的知识,提高实验技能和发挥学习的主动精神。而每个实验中的预习思考题和复习题可以帮助学生掌握实验内容,引导学生深入思考一些问题。

(4) 本书内容有广泛的适用性。参考“全国中学生物理竞赛内容提要”,本书选取力学实验11个,热学和分子物理实验5个,电学实验15个,光学实验4个。这些都是物理实验中最基本、最有代表性的实验,所用的仪器也都常见和容易买到。各级奥林匹克物理学校以及集训队、辅导班都可以从中选取适合自己的内容。本书还可供广大中学物理教师、高中学生尤其是有志于参加各类物理竞赛的高中学生参考。

多年来,先后有十几位老师参加了北京市奥林匹克物理学校的物理实验教学的工作,为本书的编写积累了宝贵的经验。本书还参考了北京大学和北京师范大学的普通物理实验教材的部分内容。因此,可以说这本书是许多教师多年教学的集体成果。刘瑞雯和林定移二位同志为本书绘图,北京大学出版社的朱新邨同志为此书的早日出版给以热情支持和帮助,在此一并表示衷心的感谢。由于编写这样一本既不同于中学教材又不同于大学教材的书,毕竟是第一次尝试,并限于编写者水平,不当之处在所难免,恳切希望同行专家及广大读者不吝批评指正。

编 写 者

1994年3月于北京大学

# 目 录

|                                 |       |
|---------------------------------|-------|
| 绪论 .....                        | (1)   |
| 第一节 与同学们谈谈物理实验课 .....           | (1)   |
| 第二节 测量误差的基本知识 .....             | (5)   |
| 第三节 有效数字 .....                  | (15)  |
| 第四节 测量误差和有效数字理论的应用举例 .....      | (16)  |
| 第五节 用作图处理数据的方法 .....            | (23)  |
| 附 录 与本书有关的导数、偏导数、全微分的计算方法 ..... | (27)  |
| 实验1 长度测量 .....                  | (28)  |
| √实验2 测定物质密度 .....               | (38)  |
| √实验3 测定金属丝的杨氏模量 .....           | (46)  |
| 实验4 刚体转动实验 .....                | (58)  |
| 实验5 气轨上的实验之一, 平均速度和瞬时速度 .....   | (70)  |
| 实验6 气轨上的实验之二, 验证牛顿第二定律 .....    | (79)  |
| 实验7 气轨上的实验之三, 滑块的碰撞 .....       | (83)  |
| 实验8 气轨上的实验之四, 简谐振动 .....        | (89)  |
| 实验9 测定重力加速度 .....               | (94)  |
| I. 用单摆测定重力加速度 .....             | (94)  |
| II. 用自由落体测定重力加速度 .....          | (97)  |
| 实验10 弦上驻波 .....                 | (105) |
| 实验11 驻波法测声速 .....               | (110) |
| 实验12 测定冰的熔化热 .....              | (114) |
| 实验13 混合法测固体比热容 .....            | (123) |
| 实验14 用冷却法测定液体的比热容 .....         | (127) |
| 实验15 水的汽化热的测定 .....             | (132) |

|      |                    |       |
|------|--------------------|-------|
| 实验16 | 液体表面张力系数的测定 .....  | (136) |
| 实验17 | 电学实验基本知识 .....     | (142) |
| 实验18 | 伏安法测电阻 .....       | (156) |
| 实验19 | 电表内阻的测量 .....      | (161) |
| 实验20 | 电表的扩程和校准 .....     | (167) |
| 实验21 | 惠斯通电桥 .....        | (172) |
| 实验22 | 测量电源电动势及内阻 .....   | (178) |
| 实验23 | 学生型电势差计的使用 .....   | (184) |
| 实验24 | 简易多用电表的设计和校准 ..... | (192) |
| 实验25 | 热敏电阻的温度特性 .....    | (198) |
| 实验26 | 光点检流计的使用 .....     | (203) |
| 实验27 | 示波器的使用(一) .....    | (211) |
| 实验28 | 示波器的使用(二) .....    | (225) |
| 实验29 | 电感和电容的测量 .....     | (232) |
| 实验30 | 黑盒子实验 .....        | (236) |
| 实验31 | 日光灯电路功率的测量 .....   | (239) |
| 实验32 | 薄透镜焦距的测量 .....     | (247) |
| 实验33 | 自组望远镜 .....        | (256) |
| 实验34 | 折射率的测定 .....       | (261) |
| 实验35 | 光的干涉现象的观测 .....    | (266) |

# 绪 论

## 第一节 与同学们谈谈物理实验课

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律，如果和新的实验事实发生矛盾，就必须对原来的定律加以修正或改造，这样，物理学就获得了新的发展。正因为物理实验这样重要，所以在高等学校和奥林匹克学校里开设物理课的同时，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。物理实验课的第一个特点是实践性。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。在上物理课时，大家学习过质点、刚体的概念；在分析物体的某些运动规律时，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（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。气垫导轨是近一二十年来发展起来的一种新

型的低摩擦实验装置，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，其内容的相当一部分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”从不同的位置测量它的直径，数值往往是不相同的。所以，实际的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，就不能学到实验课的真谛。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、条理性。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，以致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，物理实验课另外一个特点是综合性。它要求我们在做实验的时候，要根据具体情况灵活运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，这实在是一种曲解。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，再来谈谈我们奥林匹克物理学校开设物理实验课的目的以及怎样才能上好这门课程。

同学们利用寒暑假到某些大学的物理实验室做若干个物理实验，对于开阔视野、开发智力、培养对物理科学的兴趣是很有意义的。在这里可以接触到比中学更丰富多样的实验仪器，接受比中学里层次更高一级的物理实验的训练，这对于你们今后的学习，对于加速你们的成材过程，无疑是很有帮助的。说得再具体一点，我们开设物理实验课的目的有以下3点：

首先，学习一些物理实验的基本知识、基本方法和基本技能。这包括学习使用各种基本的测量仪器，学习各种物理量的基本测量方法，还要学习测量误差和有效数字的初步理论，会正确地记录和处理数据，正确地表达实验结果，为以后的物理实验课程乃至将来的科学技术工作打下良好的实验基础。

第二，初步培养起严肃认真、实事求是的科学态度和工作作风，从一开始就注意形成良好的实验习惯。科学是老老实实的学问，来不得半点虚假和马虎。在调整仪器装置，进行观察测量的过程中，要严格仔细，一丝不苟。当发现实验结果与预期的不符合时，要仔细分析原因，不能拼凑数据。要遵守实验室规则，爱护公物，注意安全。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，以后就很难纠正。好的习惯不是上几次实验课就能形成的，要注意积累，从点滴做起。

第三，通过实际的观察和测量，加深对物理概念和物理规律的理解和掌握，帮助巩固物理理论知识；同时激发大家对学习物理科学的兴趣。比如，同学们在学习波动理论时，可能会感到抽象，不好理解。可是一做“弦上驻波实验”，形象直观的实验现

象会给你很大帮助，而且在实验中你还会看到一些原来想象不到的现象，启发你进一步探索的兴趣。不少同学做过这个实验以后，都觉得很有意思。

要上好一次物理实验课，同学们要抓住 3 个环节：

第一个环节，做好预习。实验课前要把书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。要想一想实验中需要注意些什么问题。书上的预习思考题可以帮助预习。

第二个环节，做好实验。首先要了解仪器装置的性能、规格，使用方法和操作规则，在这之前，不要乱动仪器。调整仪器装置时，要注意满足测量公式所要求的条件。在整个实验过程中，要手脑并用。一方面，要多动脑筋，头脑里要有明确的物理图像，对实验所依据的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。在进行某一操作之前，先想想可能出现什么结果，然后再看看是否和预期的相符合。不要只是机械地按书上或老师要求的实验步骤一步一步做完了就算完事。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，可以在老师指导下自己动手解决。要注意学习老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。

第三个环节，写好实验报告。实验报告是对实验的全面总结，一般包括：实验目的、仪器用具、实验原理、数据及结果等内容。准确地、清楚地、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。常见一些同学因表达能力不好而在物理竞赛中影响了成绩，这种情况应该引起注意。

上述3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3个环节都做好了，才算是上好了物理实验课。

## 第二节 测量误差的基本知识

### 一、什么是测量误差

物理学是一门实验科学。对它的研究离不开对各种物理量进行测量。同学们做物理实验，其主要内容也是进行这种测量。测量可分为两种：可以由仪器直接读出测量结果的叫直接测量；由直接测量结果经过计算才能得到所需结果的叫间接测量。每一个待测的物理量在一定条件下具有固定的大小，我们称之为该物理量的真值。当我们进行测量时，由于实验理论的近似性，实验仪器灵敏度或分辨率的局限性，环境条件的不稳定性等等因素的影响，测量结果总是不可能绝对精确。待测物理量的真值同我们的测量值之间总是存在某种差异，这种差异就称为测量误差。我们定义：

$$\text{测量误差} = \text{测量值} - \text{真值}$$

由测量所得的一切数据，都毫无例外地包含有一定量的测量误差。没有误差的测量结果是不存在的。测量误差存在于一切测

量之中，贯穿于测量过程的始终。随着科学技术水平的不断提高，测量误差可以被控制得越来越小，但是却永远不会降低到零值。这些就是我们对测量误差问题的总认识。

## 二、测量误差理论和物理实验的关系

既然测量误差的存在是一切测量中的普遍现象，那么，研究测量误差的性质和产生的原因，研究如何有效地减小测量误差对实验结果的影响，研究如何科学地表达含有测量误差的实验结果，以及对实验结果如何评价等等，这一系列问题就显得十分重要。正是在这样的背景下，产生并发展了一门专门的科学，这就是测量误差理论。当然，要想深入地讨论测量误差理论，需要有丰富的实验经验和较多的数学知识，这里只能对其基本的方面作些简单介绍。我们学习测量误差理论，要着重了解它的物理意义，逐步建立起误差分析的思想，学会正确地进行数据处理，这对于做好物理实验是非常重要的。

一个物理实验自始至终都与测量误差理论有密切的关系。首先，测量误差理论可以帮助我们正确地设计实验方案，合理地选择实验仪器，以使用最小的代价取得最好的结果。不能片面地要求仪器越高级越好，环境条件越稳定越好，测量次数越多越好，等等。第二，测量误差理论可以帮助我们正确地进行实验操作，从而减小误差对实验结果的影响。要正确地调整仪器装置，注意满足理论所要求的实验条件，正确地使用仪器，合理安排操作步骤等。特别值得指出的是，一个比较复杂的实验，往往只有少数几个物理量是主要的，它们的准确与否对结果影响很大；测量误差理论可以帮助我们抓住主要矛盾，把精力用在关键的地方。可以说，实验过程中的每一步操作都与测量误差理论密切相关。第三，测量误差理论可以帮助我们正确处理数据，科学地表达实验结果。这一点，下面将要具体说明。在表达实验结果时，给出的

不确定度要力求符合实际，既不能太小，也不能太大。否则，前者由于夸大了实验结果的精确度有可能对实际工作造成危害，后者又由于过分保守有可能造成浪费，比如它可能导致拒绝使用一台本来可以使用的仪器。第四，测量误差理论可以帮助我们对实验结果进行分析判断，从而得出适当的结论。例如1894年英国物理学家瑞利测定空气中氮气的密度与他从分解氨气所得到的氮气的密度不同，他肯定两者的差异超出了实验的误差范围（他当时认为空气中除了氧都是氮）。后来进一步的研究，导致了空气中氩气的发现。历史上这一类例子很多。判断实验结果是验证了还是推翻了理论假设，就要看实验结果与理论值的差异是否落在实验的误差范围之内。

### 三、偶然误差和系统误差

按照习惯的分类方法，根据误差的性质，可以把测量误差分为偶然误差和系统误差两种。

#### 1. 偶然误差

由于偶然的不确定的因素造成每一次测量值的无规则的涨落，测量值对真值的偏离时大时小，时正时负，没有一定的规律，这类误差称为偶然误差。

造成偶然误差的因素是多方面的，如仪器性能和测量者感官分辨力的统计涨落，环境条件（如温度、湿度、气压、气流、微震……）的微小波动，测量对象本身的不确定性（如气压、放射性物质单位时间内衰变的粒子数、小球直径或金属丝直径……等）。偶然误差往往是这些大量的互相独立的微小的因素综合作用的结果。

偶然误差的特点是它的随机性。如果在相同的宏观条件下，对某一物理量进行多次测量，当测量次数足够大时，便可以发现这些测量值呈现出一定的规律性——统计规律性，即它们服从某

种概率分布。实践表明，大多数偶然误差（其中也包括我们以后经常要遇到的多次测量的算术平均值的偶然误差）服从或近似服从正态分布。服从正态分布的偶然误差具有以下特点：

1) 单峰性：绝对值小的偶然误差出现的概率比绝对值大的偶然误差出现的概率大。

2) 对称性：绝对值相等的正误差与负误差出现的概率相等。

3) 有界性：在一定测量条件下，误差的绝对值不会超过一定界限。

4) 抵偿性：各误差的算术平均值随测量次数增多而趋于零，即：

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (N_i - N') = 0$$

其中， $N'$ 代表真值， $N_i$ 是第  $i$  次测量值， $n$  为测量次数。

抵偿性是这类偶然误差最重要的特性。当  $n \rightarrow \infty$  时，任何一个偶然误差都可以与另一个绝对值与其相等、符号与其相反的偶然误差相抵消，所有测量值的算术平均值就等于真值，这时测量结果的偶然误差为零。由此我们看到：第一，用多次测量的算术平均值作为测量的最佳值是科学的；第二，增加测量的次数，可以减小偶然误差。

## 2. 系统误差

在相同条件下，多次测量同一物理量时，测量值对真值的偏离（包括大小和方向）总是相同的，这类误差称为系统误差。系统误差的来源大致有：

1) 理论公式的近似性：例如单摆的周期公式  $T = 2\pi\sqrt{\frac{l}{g}}$  成立条件是摆角趋于零，而在利用这一公式求重力加速度时，摆角为