

■ 高等院校精品教材

DAXUE WULI SHIYAN

大学物理实验

主 编 吴红玉 费金喜
副主编 雷 军 宋宇晨 黄培根



ZHEJIANG UNIVERSITY PRESS
浙江大学出版社

高等院校精品教材

大学物理实验

主 编 吴红玉 费金喜

副主编 雷 军 宋宇晨 黄培根



ZHEJIANG UNIVERSITY PRESS

浙江大学出版社

内容简介

本书从强化基本训练入手,重视实验的基本素质和创新意识的培养,探讨研究性学习和实践,特别是以创新精神对实践性的基础课教材的编写做了认真的探索。教材采用了实验误差理论—基础实验—设计实验—综合实验的架构,把内容的更新和严格的基础训练结合起来,编入了具有现代技术与应用性较强的实验项目,并将部分较为经典的近代物理实验收录其中,体现了传统实验内容的改进和时代特色。书中既考虑到多数学生的认识规律和教学的基本要求,也兼顾了优秀学生深入研究的需求,为因材施教提供了更多的教学层次和伸缩空间。

本书是众多师生长期坚持教学改革成果,全书共四个部分,精选了50个实验,内容适中,文字简练,可作为高等院校理工科及师范类物理专业的基础物理实验课教材,也可作为其他有关专业的教学参考书。

图书在版编目(CIP)数据

大学物理实验 / 吴红玉, 费金喜主编. —杭州: 浙江大学出版社, 2010. 6

ISBN 978-7-308-07608-1

I. ①大… II. ①吴… ②费… III. 物理学—实验—高等学校—教材 IV. ①04—33

中国版本图书馆CIP数据核字(2010)第095143号

大学物理实验

主 编 吴红玉 费金喜
副主编 雷 军 宋宇晨 黄培根

责任编辑 张 真
封面设计 刘依群
出版发行 浙江大学出版社
(杭州市天目山路148号 邮政编码310007)
(网址: <http://www.zjupress.com>)
排 版 杭州好友排版工作室
印 刷 富阳市育才印刷有限公司
开 本 787mm×1092mm 1/16
印 张 13.25
字 数 323千
版 次 2010年6月第1版 2010年6月第1次印刷
书 号 ISBN 978-7-308-07608-1
定 价 30.00元

版权所有 翻印必究 印装差错 负责调换
浙江大学出版社发行部邮购电话(0571)88925591

丽水学院特色教材建设出版资助

前 言

大学物理实验课是理工科各专业学生必修的一门实验课程,是本科生接受系统实验方法和实验技能训练的开端。随着科学技术的迅猛发展和实验教学改革的不断深入,大学物理实验课的教学从实验内容到实验技术都在不断更新变化。根据教育部颁发的《高等学校物理实验课程基本要求》,为适应 21 世纪高科技发展的需求,我们在实验选材上既保留了物理学的基本内容,又适当增添了部分近代物理的内容。这样既保证了基本训练,又增强了学生的动手能力、实践能力和培养提高了学生的创新意识。

本书是我们在多年教学实践的基础上,经过反复实践、不断改进、充实完善编写而成的。全书共分为四部分,第一部分绪论讲述了测量误差、不确定度和数据处理的基础知识。第二部分为基础性实验,共选编了 30 个力学、热学、电磁学和光学实验。第三部分为设计性实验,共选编了 10 个实验。第四部分为综合性实验,共选编了 10 个实验,这是在学生做了一定数量的基本实验,能对实验方法、仪器使用等方面作出恰当评价后,为了培养学生自主地进行科学研究工作的能力而设置的。设计性实验只提出实验任务和基本要求,让学生查阅相关资料,自行设计实验方案,选择仪器用具,完成实验测试,以更多地发挥学生的主观能动性和创造性。综合实验则要求学生自行综合已掌握的知识,或者学习某些学科的交叉知识,解决某一实际问题。这样,既保证了学生的基础实验,又提高了物理实验的综合设计能力,促使学生更好地完成物理学实验。考虑到物理实验课的独立性和面向低年级学生的特点,对于基本实验,编写时力求将实验原理叙述清楚,计算公式推导完整,使学生在实验预习时能掌握理论依据;实验内容与步骤亦尽可能具体,以加强对基本实验技能和基本实验方法的训练和指导。每个实验后都附有思考题,以引导学生在实验后进一步分析讨论,巩固和扩大所学知识。

实验教材离不开实验室的建设和发展,这里凝聚了实验指导老师和实验技术人员的智慧和劳动。本书实际上是一项集体创作,除参加本次编写的人员外,还凝聚了丽水学院物理系全体老师的心血,在此表示我们的衷心感谢。参加本书编写工作的有吴红玉,主要负责力学实验部分的编写;费金喜主要负责光学实验部分的编写;宋宇晨主要负责热学实验部分的编写;雷军主要负责电磁学实验部分的编写;黄培根主要负责绪论的编写和部分插图的绘制等工作。

本书在编写过程中除得到许多实验指导教师的指导外,还参考并吸收了许多兄弟院校的有关资料和经验;在本书的编写和出版过程中得到了数理学院、丽水学院教务处的的大力支持,借此也表示我们的衷心感谢。

由于编者水平有限,编写时间仓促,书中难免有疏漏谬误之处,恳请读者批评指正。

编 者
2009 年 11 月

目 录

绪 论	1
-----	---

上 篇 大学物理基础实验

实验 1.1 长度测量	30
实验 1.2 单摆	34
实验 1.3 密度的测量	37
实验 1.4 精密称衡	41
实验 1.5 自由落体运动	44
实验 1.6 弦振动的研究	45
实验 1.7 杨氏模量的测定(拉伸法)	49
实验 1.8 倾斜气垫导轨上滑块运动的研究	54
实验 1.9 牛顿第二运动定律的验证	59
实验 1.10 空气比热容比的测定	63
实验 1.11 液体表面张力系数的测定	66
实验 1.12 混合法测量液体比汽化热	68
实验 1.13 金属线胀系数的测量	70
实验 1.14 导热系数的测量	74
实验 1.15 电烙铁和万用电表的使用	79
实验 1.16 伏安法测电阻	83
实验 1.17 二极管伏安特性的测定	86
实验 1.18 惠斯登电桥测电阻	88
实验 1.19 热敏电阻的温度特性研究	91
实验 1.20 测量电池的电动势和内阻	94

实验 1.21	用电磁感应法测磁场分布	97
实验 1.22	示波器的使用	101
实验 1.23	用示波器观测铁磁材料的磁化曲线和磁滞回线	107
实验 1.24	电子束偏转实验	119
实验 1.25	薄透镜焦距的测定	122
实验 1.26	分光计调整与使用及测棱镜的顶角	125
实验 1.27	最小偏向角法测量棱镜的折射率	133
实验 1.28	测定衍射光栅的光栅常数	136
实验 1.29	牛顿环实验	139
实验 1.30	夫琅和费单缝衍射图样的光强分布测定	142

中 篇 大学物理设计实验

实验 2.1	混合法测定固体的比热容	146
实验 2.2	碰撞实验	146
实验 2.3	重力加速度的研究	147
实验 2.4	惯性秤	148
实验 2.5	简谐振动的研究	148
实验 2.6	毛细管法测定润湿液体的表面张力系数实验	149
实验 2.7	光偏振现象的研究	149
实验 2.8	用焦利氏秤测不规则物体的密度	155
实验 2.9	望远镜的组装	155
实验 2.10	用光学方法测量细丝直径	156

下 篇 大学物理综合实验

实验 3.1	刚体转动的研究	157
实验 3.2	声速的测量	160

实验 3.3 电表改装与校准	166
实验 3.4 动态法测杨氏模量	173
实验 3.5 千分表法测金属线膨胀系数	177
实验 3.6 RLC 串并联谐振电路	181
实验 3.7 密立根油滴实验	183
实验 3.8 夫兰克-赫兹实验	188
实验 3.9 光电效应	194
实验 3.10 光速的测定	197
参考文献	201

绪 论

§ 1 大学物理实验课程的目的和任务

§ 1.1 物理实验在物理学发展史上的重要性

物理学是自然科学的基础,一直是科学技术的前沿,它的发展与突破总是标志着人类征服自然界的新的里程碑。同时,物理学也是建立在实验基础上的实验科学。无论是物理概念的建立还是物理规律的发现都必须以严格的科学实验为基础,并通过之后不断的科学实验来证实。整个物理学的发展过程经历了积累和变革的交替发展过程,不论在哪一个阶段,物理实验都起着重要的作用。

科学实验方法的开创者和奠基人是 16 世纪意大利物理学家伽利略,在他设计的斜面实验中,通过实验观测并运用推理概括的方法,最终得出了超越实验本身的更为普遍的规律:物体在光滑水平面上的运动是等速直线运动;各种物体沿铅直方向自由下落均作等加速直线运动,且具有相同的加速度。17 世纪,英国科学家牛顿正是在伽利略、开普勒工作的基础上,最终建立了完整的经典力学理论。伽利略的丰富的实验思想和实验方法对我们当今的物理实验仍有着重要的启示。

对电磁学的研究,始于法国科学家库仑,他用自己研制出的各种测量仪器对静电现象进行定量测量,于 1785 年总结出了电磁理论的基础——库仑定律。电与磁之间相互联系的突破性实验是丹麦的科学家奥斯特在 1820 年发现的,他在一次课堂教学中,观察到通电导线会引起附近小磁针的偏转,这个实验轰动了整个欧洲。接着法国的科学家安培又设计研究了通电导线之间的相互作用,并在 1822 年建立了安培定律。既然电能产生磁,磁能否产生电呢?这理所当然是当时很多科学家的研究课题。其中英国科学家法拉第进行了 10 年之久的实验研究,终于在 1831 年首次发现了电磁感应现象,总结出了电磁感应定律,并建立了场的概念。爱尔兰科学家麦克斯韦将电磁现象统一成完整的电磁场理论,且预言了电磁波的存在,并指出光也是一种电磁波,这是物理学史上一次重大的变革。但这只是一种假说,假说的证明还有待于实验。德国科学家赫兹用了 9 年时间终于用实验验证了电磁波的存在,最终使电磁场理论的地位得以确立。

在对光的本性的认识中,牛顿倡导的微粒说和荷兰物理学家惠更斯主张的波动说进行了长期的争论。最后英国科学家托马斯·杨在 1800 年发表了双缝干涉实验,才使波动说得以确认。由于光电效应实验揭示了光的粒子性,人们又认识到光具有波粒二象性。19 世纪初,多数物理学家对光和电磁波的传播不需要媒质的观点是不能接受的,因此假设宇宙空间

存在着一种称之为“以太”的媒质,它具有许多异常而又不合理的特性。正是在这种情况下,1887年美国物理学家迈克尔逊和莫雷合作,用干涉仪进行了有名的“以太风”实验,从而否定了“以太”的存在。

在物理学发展过程中,常常出现由于旧理论不能解释新的实验现象,从而促使新理论的诞生。19世纪以来,对黑体辐射、电磁波能量的测量,人们找不到适当的理论来解释,德国物理学家普朗克提出量子化的观点,圆满地解释了实验结果,这就是量子理论的开端。赫兹在电磁波存在的实验中,发现了光电效应现象,电磁波理论却不能解释它,这就促使德裔美籍科学家爱因斯坦提出了光量子假说。

当代获得诺贝尔物理学奖的成果均是物理学中划时代的、里程碑级的重大发现和发明。从1901年第一次授奖至今已有百余年的历史;有近150名获奖者。其中因物理实验方面的伟大发现或发明而获奖的占2/3以上。如1901年,首届诺贝尔物理学奖得主德国人伦琴因发现X射线而获奖;著名的美籍华人杨振宁、李政道于1956年发现在弱相互作用下没有任何实验能说明宇称守恒,这一学说当时震惊了世界物理学界,以世界著名物理大师前苏联的朗道为代表的反对派公开反对这一学说;然而另一位美籍华人女科学家吴健雄率领的课题组于1956年完成的 Co^{60} 衰变实验结果显示:弱相互作用下宇称不守恒。杨振宁和李政道因而于1957年获得诺贝尔物理学奖。1921年爱因斯坦因光电效应定律的发现而获得诺贝尔物理学奖,而他的具有划时代意义的相对论却没有获奖,究其根本原因是当时这一理论缺乏实验支持。随着实验技术的提高和完善,经过后来“光谱线的引力红移”实验及“雷达回波延迟”实验的完成,相对论才最终被人们接受。这些历史事实雄辩地说明了物理实验结果在物理学概念的提出、理论规律的确立及被公认的过程中所占的重要地位和所起的关键作用。

可以毫不夸张地说,没有物理实验就没有物理学的发展。因有赫兹的电磁波实验,才导致了意大利科学家马可尼和前苏联科学家波波夫无线电的发明;因有1909年卢瑟福的 α 粒子散射实验,才有40年后核能的利用。单一波长激光器的问世,带来巨大的技术变革;半导体的实验结果引起大规模集成电路和计算机技术的出现;霍尔效应的实验结果,产生大量以此效应为基础的新元件和新产品。正是由于实验手段的不断进步、仪器精度的不断提高、实验设计思想的巧妙创新等,才使得人类在认识自然界的历程中不断探索、发现,进而攀登更高的高峰。现在,物理实验的方法、思想、仪器和技术已经被普遍地应用在从物理学中不断分化出的新分支(如粒子物理、原子核物理、原子分子物理、凝聚态物理、激光物理、电子物理、等离子体物理等)以及从物理学和其他学科的交叉中生长出来的众多交叉学科(如天体物理、地球物理、化学物理、生物物理等)和各自然科学领域、技术部门,是推动科学技术发展的有力工具。当然,强调实验的重要性,绝不意味着轻视理论。任何轻视实验或轻视理论的想法都是错误的。特别是物理学发展到今天,用已经确立的理论来指导实验向新的未来领域探索,就显得更加重要。

§ 1.2 物理实验课的重要性

物理实验在物理学发展中起了重要的作用,同样,物理实验技术和工程技术是相融相通的。大学物理实验是工程技术的基础。在工程技术领域工作的人从事的工作不外乎材料制

作、加工、运转以及生产条件的控制。所有这些工作都离不开测量。这些测量方法和技巧多是物理实验中测量方法与技巧的移置或推广。工程技术要不断地探索新理论、新材料、新工艺,以求提高质量,降低成本,为此要进行科学实验。有关实验的设计、方法的确定、仪器的选择、数据处理等等同样也多是物理实验的移置与推广。正是在这个意义上,大学物理实验课是理工科学生必修的基础课,是学生进入大学后接受系统科学实验知识和技能训练的开端。它在培养学生运用实验手段去发现、观察、分析、研究、解决问题的能力方面,在提高学生科学素养方面,都起着至关重要的作用,将为学生今后的进一步学习和工作打下一个良好的实验基础。

物理实验在素质教育中充当重要角色。素质培养的核心是思维和创造能力的培养。从实验的角度看,人的思维和创造能力有“硬”和“软”两个方面。“硬”的方面表现为:基本实验技能与动手能力以及现代技术的应用水平。“软”的方面表现为:实验课题的选择、实验的设计思想和实验方法等。几十年来,物理实验教学的课程体系和教学内容正是从“硬”和“软”两个方面培养学生的思维和创造能力,激发他们强烈的求知欲望及严谨的科学作风和坚韧不拔的苦干精神。

§ 1.3 大学物理实验课的目的和任务

大学物理实验作为独立开设的一门必修基础课,它的主要目的和任务是:

1. 使学生获得物理实验的基本知识、基本方法和基本技能,也即“三基”的训练。学生必须充分认识到,科学实验能力的形成和提高,是建立在对“三基”的熟练掌握和灵活运用的基础上的。

2. 使学生具备从事科学实验的基本素质。这里包括理论联系实际和实事求是的科学态度;严肃认真、一丝不苟的工作作风,不怕挫折、积极进取的探索精神,遵守操作规程,爱护器材的良好习惯。

3. 培养基本的科学实验能力。就大学物理实验而言,基本的科学实验能力是指:

(1) 阅读理解能力。训练学生自行阅读实验教材和参考资料,正确理解实验要求和内容,做好实验前的准备。

(2) 动手操作能力。借助教材和仪器说明书,正确调整和使用常用的基本仪器,实施实验方案。

(3) 分析判断能力。运用所学的物理基本概念和知识,对实验现象和结果进行初步的分析判断,作出结论。

(4) 书写表达能力。正确记录和处理实验数据,绘制图线,说明实验结果,撰写合格的实验报告。

(5) 简单的实验设计能力。能根据课题要求,确定实验方法和条件,合理选择仪器,拟定具体的实验方案。

4. 通过实验的观察和分析,和课堂教学相互配合,从理论和实践的结合上加深对物理概念和规律的认识,巩固和扩大对物理内容的掌握程度。

物理实验课虽然是在教师指导下的学习环节,但在实验过程中,要尽可能发挥学习的主

动性,学生应以研究者的态度去进行实验,组装调整仪器,进行观察和分析,探讨最佳的实验方案,从中积累经验,训练技巧,为今后科学工作中设计实验方案、选择并使用新的仪器设备打下基础。同时,从大学物理实验一开始就应注意养成良好的科学态度和作风。

§ 2 大学物理实验课程的教学和要求

大学物理实验教学主要包括密切相关的三个教学环节,即实验前的准备(预习),实验的进行,实验后的报告。现就各教学环节提出如下具体要求。

1. 实验前的准备(预习)

科学实验是一种有目的的实践活动。尽管最初的实验通常由教师制订方案和提出要求,但学生在实验前必须力求理解实验方案的全貌。为此,实验前需认真阅读实验教材,明确该实验的目的要求、实验原理、要测的物理量及测量方法。对实验中涉及的仪器,预习时就要阅读教材中有关该仪器的介绍,弄清构造原理,使用操作方法和注意事项。必要时,还可到实验室观看仪器实物。另外,按列表法记录数据的要求,在数据记录本上设计好数据记录表格。在此基础上简明扼要地写出书面的预习报告。预习报告的内容有:

(1)实验目的:说明本实验的主要目的。

(2)实验原理:应在对实验原理理解的基础上,用自己的语言简要地叙述。一般应写出本实验所依据的主要公式和公式中各量的意义,明确实验中所要直接测定的物理量及测量方法。必要时,还应画出原理图、电路图或光路图。

(3)实验步骤及注意事项:这部分内容一般在实验教材中均有详细说明,因而预习报告中只要写出关键性的步骤和重要的注意事项,以保证实验的顺利进行。

2. 实验的进行

在进入实验室正式进行实验测量前,首先应核对提供的仪器设备是否完备,齐全。如有问题,应向指导教师反映解决。应仔细阅读教材中有关仪器的介绍和使用注意事项,做到按操作规程进行操作调试,切忌盲目操作。其次,要认真思考和安排好实验操作程序,不要一上来就急于求成,因为一些关键性步骤的疏忽或错误,会导致整个实验的失败。对于电学实验,一般还应由指导教师检查电路的接线正确无误后,才可接通电源。

实验测试中,不要单纯追求顺利地测好数据,要养成对实验现象仔细观察和对所测数据随时进行分析判断的习惯,这样才能及时发现和纠正差错。对实验中遇到的故障要积极思考,尽可能自己排除。要如实记录实验测量的原始数据,实验数据记录应做到整齐清洁而有条理,养成列表法记录数据的习惯,以便于计算和复核。反对用零碎的小纸片记录数据,开始时,如果没有把握直接记录在实验报告上,可另备一本专门的数据记录本。其他如对于基本仪器的使用,在实验中观察到的现象和存在问题,也可扼要记下。实验结束后,必须整理复原所使用的仪器,断开电源。

在实验中,实验报告上应记录的内容为:

(1)仪器。记录本实验中所用仪器的型号、编号和规格。记录仪器的编号和规格是一种良好的科学习惯,因为这样便于在原来的仪器上重复实验测量,复查实验结果。

(2)数据记录。要求如前所述。

3. 实验报告的书写

实验报告是一次实验的总结,由于实验是有目的和要求的,作为总结的报告,要对实验目的和要求给以回答。

报告的基本内容有:①目的,②实验原理,③仪器和用具,④实验内容和步骤,⑤记录,⑥数据处理,⑦结果与分析,⑧实验后的思考。

写实验报告也是学习的过程,绝不是抄写记录和计算结果,而是要思索,在思索中提高科学的素养,增强独立进行实验的能力。

以下介绍的几点,对写好报告有参考作用。

(1) 不确定度的分析

测量不确定度的分析与计算是实验工作的重要方面。计算不确定度的意义在于:

- 1) 可以正确评定测量的质量;
- 2) 从各来源的不确定度分量,说明测量有待改进的重点;
- 3) 从仪器引入的不确定度和非仪器引入不确定度的比较,说明仪器配置是否合理;
- 4) 增强分析不确定度的能力,对以后独立进行实验,预测不确定度是有利的基础。

(2) 测量结果的评价

在实际工作中,对测量的质量总是有要求的,比如实验要求相对不确定度不能大于百分之几。在学生实验中往往不明确提出具体的质量指标,这时如何评价测量的质量呢?

1) 计算不确定度和相对不确定度。如果总的相对不确定度比来源于仪器的相对不确定度不是显著过大,可以认为测量达到了仪器可以达到的精度。

2) 测量结果(y)和其公认值(标准值) A_y 相差不超过其标准不确定度 $u(y)$ 的 3 倍,即:

$$|y - A_y| \leq 3u(y) \quad (0.1)$$

则可以认为测量结果和公认值在测量误差范围内是一致的。

3) 当 $|y - A_y| > 3u(y)$ 时,可能是:

- a. 测量有错误;
- b. 存在未发现的比较大的不确定度来源;
- c. 实验原理或仪器有问题;
- d. A_y 作为 y 的近似真值是不合适的,即 y 不可与 A_y 进行比较。

若存在上述情况,要经分析,重复测量或调整实验去探索问题的所在。

4) 实际工作中的测量一般是面对未知的,因为如果已知就不必测量了。我们在不断的学习中,通过各种测量和分析,提高测量与分析的准确性,使我们对自己的测量结果和不确定度计算越来越有信心,这样,实验报告就不仅仅是针对一个实验,而是和我们的科学素质的提高密切相关的。

(3) 分析与思考

实验后可供思考的问题很多,比如:

- 1) 实验中遇到困难的处理;
- 2) 实验设计的特点是什么? 普遍意义何在?

例如用单摆测重力加速度的实验,实验设计并不复杂,但是从测量设计上它有很多巧妙之处。重力加速度之值较大,直接测量物体落下运动难以测好,而作为单摆它使加速度由 g 成为 $g \cdot \sin\theta$,而 $\sin\theta$ 很小,所以单摆运动加速度较小,振动较慢,容易测出振动周期。又,

单摆将落下的单向运动变成等周期的往复运动,测量 n 个周期 T 的时间 $t=nT$, 扩展被测量减小测量误差, 又可提高测量的准确度。再有使用铁球为摆球, 由于铁的密度远大于空气的密度, 使空气浮力引入的误差大为减小。

3) 对实验设计改进的设想和问题;

4) 对实验中出现的异常现象的分析与判断, 等等。

学生实验一般是按指定的方法, 使用指定的仪器进行的。由于实验方法与仪器是经仔细设计和反复实验检验过的, 一般均可能获得较好结果。对于学生实验, 虽然希望实验有好的结果, 但从根本上讲, 重要的不是结果如何好, 而是对实验设计的认识, 是实验全过程对学生的锻炼, 并且也为将来撰写科研论文打基础。因而, 如何撰写一份合格的实验报告, 是物理实验基本功训练的重要组成部分。

附: 实验报告范例

姓名 _____ 班级 _____ 学号 _____ 实验日期 _____

用单摆测定重力加速度

【实验目的】

1. 了解决定单摆运动周期的各种因素及关系;
2. 用单摆测定重力加速度。

【仪器用具】

单摆装置(钢球直径约 2cm, 摆线长度可调)、秒表(精度 0.1s)、游标卡尺(CT200-312 型, 0~15cm, 精度 0.02mm)、钢卷尺(0~200cm, 精度 0.1cm)。

【实验原理】

单摆由一条细线和一只小球组成。细线一端固定, 另一端连接小球。细线几乎没有弹性, 小球直径比线长小得多, 且细线质量比小球质量小得多。若把小球偏离平衡位置, 使摆线与铅垂线成 θ 角, 释放小球。在地球重力场的作用下, 小球围绕平衡位置作简谐振动。摆动周期为

$$T=2\pi\sqrt{\frac{l}{g}}\left(1+\frac{1}{4}\sin^2\frac{\theta}{2}+\dots\right) \quad (0.2)$$

其中 l 为摆长, 即摆线支点到小球质心的距离; g 为实验地的重力加速度。当 θ 很小时, 对式 (0.2) 取零级近似, 摆动周期近似为:

$$T=2\pi\sqrt{\frac{l}{g}} \quad (0.3)$$

若测出摆长 l 及周期 T , 即可计算出实验地点的重力加速度 g 。

测量周期 T 时, 为了提高测量精度、减小误差, 可连续测量单摆摆动多个周期的总时间, 再除以摆动次数来求出单次摆动的时间, 即周期。

【实验内容】

1. 测量不同摆长 l 对应的周期 T 。

1) 如图 0.1 所示, 用钢卷尺测量支点到小球上下端点的距离 l_1 及 l_2 , 计算摆长 $l = (l_1 + l_2) / 2$ 。

2) 分别调节摆长约等于 60、70、80、90、100cm, 保持初始摆角 $\theta \leq 4^\circ$, 用秒表测量单摆连续摆动 50 个周期的时间 t 。对应每个摆长, 重复测量 5 次。

2. 利用摆长约等于 100cm 的结果计算重力加速度。

3. 保持实验内容 2 的摆长约等于 100cm, 用秒表测量初始摆角 $\theta = 15^\circ$ 时, 单摆连续摆动 10 个周期的时间 t , 并讨论摆角较大时的摆动情况。

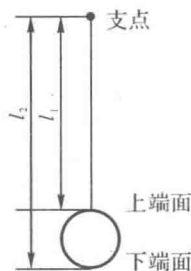


图 0.1 摆长测量示意图

【测量数据和数据处理】

1. 测量不同摆长 l 对应的周期 T , 数据见表 0.1

表 0.1 不同摆长对应的周期

摆长 l/cm		初始摆角 $\theta/^\circ$	50 个周期的时间 t/s							周期 T/s	
\bar{l}	$u(\bar{l})$		1	2	3	4	5	\bar{t}	$u(\bar{t})$	\bar{T}	$u(\bar{T})$
60.30	0.04	3	77.90	78.15	78.00	77.90	78.15	78.02	0.056	1.5604	0.0011
70.30	0.04	3	84.25	84.40	84.30	84.10	84.35	84.28	0.051	1.6856	0.0010
79.80	0.04	3	89.90	89.70	89.75	89.55	89.65	89.71	0.058	1.7942	0.0012
90.20	0.04	3	95.60	95.50	95.35	95.20	95.25	95.38	0.075	1.9076	0.0015
100.20	0.04	3	100.60	100.55	100.60	100.55	100.65	100.59	0.019	2.0118	0.00037
100.20*	0.04	15	20.20	19.80	20.30	19.90	20.10	20.06	0.093	2.0060	0.0093

说明: (1) “*”号表示最后一行数据为连续摆动 $n=10$ 个周期的时间。其他数据为连续摆动 $n=50$ 个周期的时间。

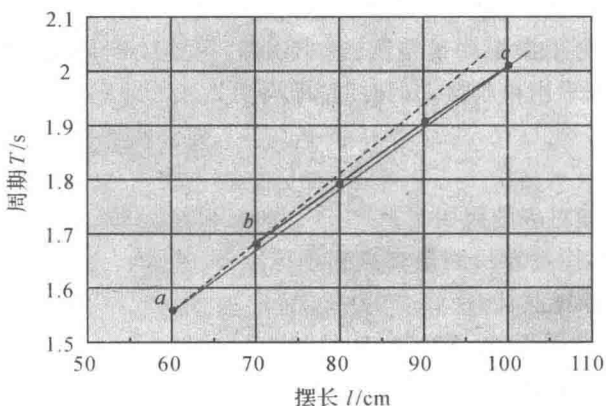
(2) 钢卷尺最小刻度 0.1cm。由于摆长只测量了一次, 故取误差

$$u(\bar{l}_1) = u(\bar{l}_2) = 0.1/\sqrt{3} = 0.058\text{cm}, \text{ 所以 } u(\bar{l}) = \sqrt{\left(\frac{\partial l}{\partial l_1}\right)^2 u(\bar{l}_1)^2 + \left(\frac{\partial l}{\partial l_2}\right)^2 u(\bar{l}_2)^2} = 0.04\text{cm}$$

$$(3) \bar{t} = \left(\sum_{i=1}^5 t_i / 5\right), u(\bar{t}) = \sqrt{\sum_{i=1}^5 (\bar{t} - t_i)^2 / [5 \times (5-1)]}, \bar{T} = \frac{\bar{t}}{n}, u(\bar{T}) = u(\bar{t}) / n$$

2. 找出 T 随 l 变化的函数关系

根据表 0.1, 作出周期 T 随摆长 l 变化的关系如图 0.2 黑实线所示。图中点线为过 a 点和 c 点的理想直线, 短划线为过 a 点和 b 点的理想直线。实验点明显偏离了直线, 说明 T 随 l 产生非线性变化。应考虑用其他的函数关系拟合。

图 0.2 摆动周期 T 随摆长 l 的变化关系

由于 T 随 l 单调增加,故两者可能符合 $T=Al^\alpha$ 的指数关系,其中 A 和 α 为待定参数。两边取对数得:

$$\log T = \log A + \alpha \log l \quad (0.4)$$

可见,若指数关系成立,则在双对数坐标纸上重画 $T-l$ 关系曲线应为一 条直线。

图略,确为一条直线。取 $a(60.30\text{cm}, 1.5604\text{s})$, $b(100.20\text{cm}, 2.0118\text{s})$ 两点的数值分别代入式(0.4),两式相减可得直线斜率 α 为:

$$\alpha = \frac{\lg(T_b - T_a)}{\lg(l_b - l_a)} = \frac{\lg 2.0118 - \lg 1.5604}{\lg 100.20 - \lg 60.30} = 0.50033 \quad (0.5)$$

$$u(\alpha) = \left[\left(\frac{\partial \alpha}{\partial T_b} u(T_b) \right)^2 + \left(\frac{\partial \alpha}{\partial T_a} u(T_a) \right)^2 + \left(\frac{\partial \alpha}{\partial l_b} u(l_b) \right)^2 + \left(\frac{\partial \alpha}{\partial l_a} u(l_a) \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} = 0.0002 \quad (0.6)$$

所以

$$\alpha = 0.5003 \pm 0.0002 = 0.5003 \times (1 \pm 0.04\%) \quad (0.7)$$

可见, $T \propto l^{1/2}$, 即 $T^2 \propto l$, 此定量关系有 0.04% 的精度。

3. 计算 l/T^2 的值并估计其误差范围

表 0.2 l/T^2 数值计算表

摆长 $l \pm u(l)/\text{cm}$	周期 $T \pm u(T)/\text{s}$	$lT^{-2}/\text{cm} \cdot \text{s}^{-2}$	$u(l/T^2)/\text{cm} \cdot \text{s}^{-2} *$	$u(l/T^2)/l/T^2$
60.30 ± 0.04	1.5604 ± 0.0011	24.76	0.038	0.16%
70.30 ± 0.04	1.6856 ± 0.0010	24.74	0.032	0.13%
79.80 ± 0.04	1.7942 ± 0.0012	24.79	0.035	0.14%
90.20 ± 0.04	1.9076 ± 0.0015	24.79	0.040	0.16%
100.20 ± 0.04	2.0118 ± 0.00037	24.76	0.013	0.054%

$$* : u(l/T^2) = (l/T^2) \times \sqrt{\left(\frac{u(l)}{l}\right)^2 + 4\left(\frac{u(T)}{T}\right)^2}$$

由表 0.2 第 3 列的一组 lT^{-2} 值(24.76, 24.74, 24.79, 24.79, 24.76) $\text{cm} \cdot \text{s}^{-2}$ 可得 lT^{-2} 的平均值及误差为:

$$lT^{-2} = 24.768 \text{cm} \cdot \text{s}^{-2} \quad (0.8)$$

$$u(lT^{-2}) = \left[\frac{1}{5 \times 4} \sum_{i=1}^5 (\overline{lT^{-2}} - lT_i^{-2})^2 \right]^{\frac{1}{2}} = 0.0097 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-2} \quad (0.9)$$

$$E = 0.0097 / 24.768 = 0.039\% \quad (0.10)$$

可见 lT^{-2} 在 0.04% 的误差范围内可认为是个不变的恒量, 与式(0.7)的结果一致, 即 $T \propto l^{1/2}$ 。

(可见, 用第 2 部分直线拟合方法求解的精度与第 3 部分计算结果的精度为同一数量级。)

4. 计算重力加速度 g 的算术平均值:

用表 0.1 中第 5 行的数据计算 g 值, 此时 $l = 100.20 \text{ cm}$, $u(\bar{l}) = 0.04 \text{ cm}$, $\bar{T} = 2.0118 \text{ s}$, $u(\bar{T}) = 0.00037 \text{ s}$, 则

$$\bar{g} = 4\pi \frac{l}{T^2} = 4 \times 3.1416^2 \times \frac{100.20}{2.0118^2} = 977.37 \text{ cm/s}^2 \quad (0.11)$$

计算重力加速度的标准误差,

$$u(\bar{g}) = \bar{g} \left[\left(\frac{u(\bar{l})}{\bar{l}} \right)^2 + 4 \left(\frac{u(\bar{T})}{\bar{T}} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} = 0.53 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-2} \quad (0.12)$$

测量结果为

$$g = 977.4 \pm 0.6 \text{ (cm/s}^2\text{)} \quad (0.13)$$

5. 由于空气的阻尼使单摆的振幅衰减得很快, 经过 10 个周期后, 振幅已经从初始时的 15° 左右减少到 5° 左右, 所以用这种方法难以判断单摆周期和初始摆角间的数量关系是否满足式(0.2)。由表 0.1 的可见, 初始摆角为 15° 时周期为 2.0060 s , 要比初始摆角为 3° 时的周期 2.0118 s 还要小, 与式(0.2)比较, 连定性上都是错误的, 必须重新设计实验加以研究。

【讨论分析】

1. 从实验结果可知单摆周期公式 $T = 2\pi \sqrt{\frac{l}{g}}$ 当摆角较小时在一定精度上是成立的;

2. 从误差计算公式知, 在摆长和周期的相对标准误差相等时, 周期的相对标准误差对重力加速度的标准误差影响较大, 所以在测量中要努力提高周期的测量精度。采用连续测量 50 个周期的时间可以把秒表的仪器误差平均分配在 50 个周期中, 从而提高了单个周期的测量精度;

3. 由于单摆小球经过最低点时的速度最大, 从最低点开始和停止记数可以减少测量误差。

§ 3 大学物理实验的误差分析

物理学, 和任何一门其他的自然科学一样, 都是建立在实验或观测的基础上的。实验和观测的直接结果就是数据。数据, 无论直接用肉眼观测, 还是用仪器测量, 总是有误差的。要从数据中得到有意义的物理结果, 必须经过数据处理和误差分析。所以, 任何一个实验物理工作者, 都必须掌握数据处理和误差分析, 才能准确地得出测量所得的物理结果。其实, 一个理论物理工作者也应懂得数据处理和误差分析, 否则不能正确理解实验给出的物理结