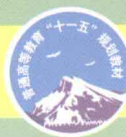


普通高等教育“十一五”规划教材
PUTONG GAODENG JIAOYU SHIYIWU GUIHUA JIAOCAI



DAXUE WULI SHIYAN JIAOCHENG

大学物理实验教程

滕道祥 主编



中国电力出版社

<http://jc.cepp.com.cn>

普通高等教育“十一五”规划教材
PUTONG GAODENG JIAOYU SHIYIWU GUIHUA JIAOCAI



DAXUE WULI SHIYAN JIAOCHENG

大学物理实验教程

主 编 滕道祥
副主编 殷春浩
编 写 滕绍勇 王克权 张 宁 陈 凯
王兆敏 徐孝昶 田厚强 尹成良
主 审 陈小兵



中国电力出版社

<http://jc.cepp.com.cn>

内 容 提 要

本书为普通高等教育“十一五”规划教材。

本书共分6章,主要内容包括绪论、误差理论、基础性实验、综合性实验、设计性与研究性实验、计算机与实验等。此外,附录部分还包括练习题及参考答案、常见电表标记符号及物理量单位,以供参考。本书秉承了“分层次、模块化、重能力”的教学原则。实验内容选题新颖,力求反映最新的科技信息,并与相关专业实验保持密切的联系。本书条理清楚、叙述详细,便于教师教学和学生自学。

本书可作为高等院校理工科大学物理实验课程的教材,也可供工程技术人员及实验工作者参考。

图书在版编目(CIP)数据

大学物理实验教程/滕道祥主编. —北京:中国电力出版社,
2009

普通高等教育“十一五”规划教材

ISBN 978-7-5083-9044-4

I. 大… II. 滕… III. 物理学-实验-高等学校-教材
IV. 04-33

中国版本图书馆CIP数据核字(2009)第106126号

中国电力出版社出版、发行

(北京三里河路6号 100044 <http://jc.cepp.com.cn>)

汇鑫印务有限公司印刷

各地新华书店经售

*

2009年8月第一版 2009年8月北京第一次印刷

787毫米×1092毫米 16开本 18印张 438千字

定价 28.80元

敬告读者

本书封面贴有防伪标签,加热后中心图案消失
本书如有印装质量问题,我社发行部负责退换

版权专有 翻印必究

前言

为贯彻落实教育部《关于进一步加强高等学校本科教学工作的若干意见》和《教育部关于以就业为导向深化高等职业教育改革的若干意见》的精神，加强教材建设，确保教材质量，中国电力教育协会组织制订了普通高等教育“十一五”教材规划。该规划强调适应不同层次、不同类型院校，满足学科发展和人才培养的需求，坚持专业基础课教材与教学急需的专业教材并重、新编与修订相结合。本书为新编教材。

本教材根据《高等工业学校物理实验课程教学基本要求》，结合笔者多年来的教学实践，总结近几年来教学改革和课程建设的经验编写而成。

本教材主要有以下特点：

(1) 打破了原教材中力、热、电、光及近代物理独立分块的实验体系，按照“分层次、模块化、重能力”的教学原则，建立了基础性实验、综合性实验、设计性与研究性实验、计算机与实验的实验体系，实验内容选题新颖，力求反映最新的科技信息，并与相关专业实验保持密切的联系。

(2) 根据国际上统一测量不确定度量化表示的进展情况，结合物理实验教学的实际，实行以不确定度评定实验结果的新方法。

(3) 解决了实验理论与具体实验项目相互脱节的矛盾，使之更有机地融合，为了调动和发挥学生学习的主动性、自主性和创造性，本教材加大了设计性与综合性实验的比重。

(4) 部分物理实验与多媒体课件相结合，易于教师开放式教学和学生自学，学生可以在做实验之前进行网上模拟仿真预习，因此本教材具有立体开放式教材的特点。

本书由滕道祥（徐州工程学院）担任主编、殷春浩（中国矿业大学）担任副主编，参加编写的人员有滕绍勇、王克权、张宁、陈凯、王兆敏、徐孝昶、田厚强、尹成良。

本书由扬州大学陈小兵教授担任主审，他对本书的编写提出了许多宝贵的意见和建议。在编写过程中，还参考了一些文献资料。在此一并致谢。

由于编者水平有限，时间仓促，书中疏漏和错误之处在所难免，恳请读者和同行专家、学者批评指正。

编者

2009年3月

目 录

前言

第一章 绪论	1
第一节 大学物理实验的地位和作用.....	1
第二节 大学物理实验课程的任务.....	2
第三节 大学物理实验课的要求.....	2
第四节 怎样进行物理实验.....	3
第五节 实验数据处理的方法.....	6
第六节 物理实验的基本方法	12
第二章 误差理论	21
第一节 实验数据的误差分析	21
第二节 不确定度	32
第三节 作图、制表和拟合.....	36
第三章 基础性实验	39
实验 1 测量及误差处理	39
实验 2 气垫导轨上的实验	45
实验 3 非线性元件的伏安特性研究	48
实验 4 基本电路的测量(1)	50
实验 5 基本电路的测量(2)	51
实验 6 整流滤波电路	53
实验 7 稳压电路	55
实验 8 元件参数的测量	58
实验 9 示波器的使用	60
实验 10 万用电表的使用	66
实验 11 函数信号发生器/计数器的使用	71
实验 12 透镜焦距的测定	74
第四章 综合性实验	79
实验 1 刚体转动惯量的测定	79
实验 2 测定钢丝的杨氏模量	83
实验 3 弦振动特性的研究	87
实验 4 空气比热容比值的测定	89
实验 5 金属线膨胀系数的测定	92
实验 6 自组惠斯登电桥测电阻	93
实验 7 双臂电桥测低值电阻	94
实验 8 磁滞回线和磁化曲线	102

实验 9	用模拟法测绘静电场	109
实验 10	分光计的调整及三棱镜折射率的测定	112
实验 11	用牛顿环测透镜曲率半径	119
实验 12	照相技术	121
实验 13	迈克尔逊干涉仪	125
实验 14	光电效应测定普朗克常数	130
实验 15	密立根油滴实验——电子电荷的测定	135
实验 16	PN 结正向压降温度特性实验	142
实验 17	透镜、显微镜系统及望远镜系统的综合实验	146
实验 18	居里点的测试实验	152
第五章	设计性与研究性实验	156
实验 1	太阳能电池特性研究	159
实验 2	霍尔效应及其应用	164
实验 3	二阶电路的响应研究	170
实验 4	电子束测试实验	172
实验 5	测定跳圈振动的频率	177
实验 6	传感器实验	179
实验 7	偏振光实验	186
实验 8	晶体的电光效应	196
实验 9	晶体磁光效应实验	204
实验 10	晶体声光效应实验	209
实验 11	夫兰克—赫兹实验	212
实验 12	电表改装与校准	217
实验 13	集成运算放大器及其简单应用	223
实验 14	数字万用表的设计	228
实验 15	小型制冷装置制冷量和制冷系数的研究	235
第六章	计算机与实验	249
实验 1	示波器仿真实验	253
实验 2	用拉伸法测量金属丝杨氏模量仿真实验	255
实验 3	核磁共振仿真实验	259
实验 4	密立根油滴仿真实验	263
实验 5	测定铁磁材料的磁化曲线和磁滞回线仿真实验	268
附录		273
附录 I	练习题	273
附录 II	练习题参考答案	275
附录 III	常见电表标记符号	276
附录 IV	物理量单位	277
参考文献		280

第一章 绪 论

第一节 大学物理实验的地位和作用

科学实验是科学理论的源泉和基础。近代科学技术与工程技术的重大成就都是经过科学实验取得的。物理学是一门实验科学,特别是大学物理,更与实验密不可分。在物理学的发展过程中,实验是决定性的因素。发现新的物理现象,寻找新的物理规律,验证物理定律等都只能依靠实验。正是 16 世纪伟大的实验物理学家伽利略,用他出色的实验工作把古代对物理现象的一些观察和研究引上了当代物理学的科学道路,使物理学发生了革命性的变化。力学中的许多基本定律,如自由落体定律、惯性定律等,都是由伽利略通过实验发现和总结出来的。电磁学的研究,也是从库仑发明扭秤并用来测量电荷之间的作用力开始的。由此可见离开物理实验,物理理论就将成为空中楼阁,无本之木。

物理实验是推动科学技术发展的原动力。20 世纪的科学技术,如电子物理、电子工程、机电工程、电子计算机技术、光信息科学工程等学科显然都是以物理学为基础的,同时也离不开大量物理学的实验;在材料科学中,各种材料的物性测试、许多新材料的发现(如高温超导材料等)和新材料制备方法的研究(如离子束注入、激光蒸发等),都离不开物理学的实验;在化学中,从光谱分析到量子化学、从放射性测量到激光分离同位素,也无不是物理的应用;在生物学的发展史中,离不开各类显微镜(光学显微镜、电子显微镜、X 光显微镜)的贡献,近代生命科学更离不开物理学,DNA 的双螺旋结构就是由美国遗传学家和英国物理学家共同建立并为 X 光衍射实验所证实的,而对 DNA 的操纵、切割、重组也都需要实验物理学家的帮助;在医学中,从 X 光透视、B 超诊断、CT 诊断、核磁共振诊断到各种理疗手段,包括放射性治疗、激光治疗等都是物理学的应用。物理学正在渗透到各个学科领域,而这种渗透无不与实验密切相关。显然,实验正是从物理学基础理论到其他应用学科的桥梁。只有真正掌握了物理实验的基本功,才能更有力地把物理原理应用到其他学科而产生质的飞跃。因此现代高级科技人才必须具有较强的物理实验能力。

物理实验是科学实验的重要基础,是培养人才的强有力的手段。物理实验是对理工科学生进行科学实验基本训练的必修课程,是系统实验方法和实验技能训练的开端。在学习、探索和开拓新的科技活动中,物理实验将是重要的工具。本课程通过对学生进行物理实验知识、实验方法、实验技能的训练,使学生对科学实验的过程与方法有所了解,以培养学生运用物理知识、物理方法进行科学实验的初步能力。

随着物理学的发展,人类积累了丰富的实验思想和实验方法,创造出了各种精密巧妙的仪器设备;同时,用于实验的数学方法以及计算机科学在实验中的应用等,使物理测量技术得到不断发展。这实际上已赋予物理实验以极其丰富的、不同于物理学本身的特有的内容,并逐步形成一门单独开设的具有重要教育价值和教育功能的实验课程。它不仅可以加深对理论的理解,更重要的是能使同学们获得基本的实验知识、技能和科学创新的能力,为今后从事科学研究和工程实践打下坚实的基础。

第二节 大学物理实验课程的任务

1. 培养学生了解并掌握物理实验的基本方法、实验技能

通过对学生进行基本物理实验方法与技术、常用物理量的测量、常用仪器的使用、实验现象的观察与分析的训练,使学生了解并掌握物理实验的一些基本知识,加深对物理学基本原理的理解,学会物理实验的一些基本技能。

(1)了解与掌握物理实验的基本方法。如比较法、零示法(平衡法、补偿法)、放大法、换测法、模拟法等。

(2)掌握常用物理量的测量方法及常用仪器的使用。如长度、时间、电流、电阻、电动势、磁感强度、互感系数、波长、折射率、焦距等能够测量的物理量;卡尺、千分尺、电流表、电压表、稳压电源、电桥、电位差计、示波器、气垫导轨、毫秒计、分光计、干涉仪、读数显微镜等基本仪器的使用。

2. 培养与提高学生的科学实验能力

(1)能够阅读实验教材、理解实验的基本原理与内容。

(2)能借助教材或仪器使用说明书正确使用常用仪器。

(3)能正确取得实验数据,处理数据,绘制图表、曲线,能分析、说明实验现象与结果,能进行简单的分析误差,写出简明扼要的实验报告。

3. 培养与提高学生的科学实验素养

培养学生严肃认真、实事求是的科学态度;遵守操作规程、遵守纪律、爱护公共财物、相互协作的优良品德;理论联系实际、不怕困难勇于探索的精神。

第三节 大学物理实验课的要求

物理实验既然那么重要,怎样才能通过物理实验课教学使学生掌握物理实验的基本功,达到培养高素质创新人才的目的呢?概括起来,应通过物理实验课程达到以下3个基本要求。

(1)在物理实验的基本知识、基本方法、基本技能方面(三基)得到严格而系统地训练,是做好物理实验的基础。

基本知识包括实验的原理、各类仪器的结构与工作机理、实验的误差分析与不确定度评定、实验结果的表述方法、如何对实验结果进行分析与判断等。

基本方法包括如何根据实验目的和要求确定实验的思路与方案、如何选择和正确使用仪器、如何减少各类误差、如何采用一些特殊方法来获得通常难以获得的结果等。

基本技能包括各种调节与测试技术(粗调、微调、准直、调零、读数、定标、……),真空技术(真空获得、维持、测量、应用、……),电工技术(识别元件、焊接、排除故障、安全用电、……),电子技术(微电流检测、弱信号放大、……),传感器技术(力传感器、位移传感器、温度传感器、磁传感器、光传感器、……),金工技术(机械制图及基本的车工和钳工技术等)以及查阅文献的能力、自学能力、协作共事的能力、总结归纳能力、口头表达能力等。

这种三基训练有时可能会比较枯燥,却是完全必要的,它体现了最基本的实际动手能力,因而首先必须保证这一要求的实现。没有这种严格的基本训练,就很难成为高素质的

人才。

(2) 学习用实验方法研究物理现象、验证物理规律,加深对物理理论的理解和掌握,并在实践中提高发现问题、分析问题和解决问题的能力。研究物理现象和验证物理规律是进行物理实验的基本目标。在学习“三基”的过程中要有意识地学习这种能力。一般的“验证性实验”虽然是教师安排好的,但学生应仔细体会其中的奥妙所在,不应只按所规定的步骤操作、记数据、得结果就算完成。要多问几个为什么,想一想不按所规定的步骤去做会有什么问题,或者能否想出别的方法来达到同样的目的?在一定的条件下,经老师同意,也可以做自己设计的实验。

进行物理实验也是真正理解和掌握物理理论的重要手段。只从书本上得到的知识往往是不完整的、不具体的。只有通过实验,才能使抽象的概念和深奥的理论变成具体的知识和实际的经验,变为在解决实际问题中的有力工具。因此,要真正理解和掌握物理理论,是不能只从课堂上学习的,还要必须到实验室去学习,亲自动手、亲身体会,才能学到真正有血有肉的活生生的物理。

在实验中往往会遇到一些意想不到的问题。这些问题虽然可能不是实验研究的主要对象,但也不应轻易放过。这常常是提高分析问题、解决问题能力的好机会。要注意观察、及时记录、认真分析,有必要时可以进行深入研究。实际上,科学史上不少重要发现都是在意想不到的情况下“偶然”出现的。

(3) 养成实事求是的科学态度和积极创新的科学精神。这是在整个物理教学过程中都要贯彻的要求,而在物理实验教学中是特别重要的。因为物理学研究“物”之“理”,就是从“实事”中去求“是”,所以严肃认真的物理学工作者都坚持“实践是检验真理的唯一标准”。物理学中的“实践”主要就是物理实验,在物理实验课中最能培养实事求是、严谨踏实的科学态度。任何弄虚作假,篡改甚至伪造数据的行为都是绝对不能允许的,也是比较容易发现的。在物理实验课中,严格规定了记录数据不准用铅笔,不能用涂改液,误记或错记数据的更改要写明理由并经指导教师认可等,都是为了帮助学生养成实事求是的良好习惯。实际上,实验结果是什么就是什么,没有“好”、“坏”之分。与原来预想不一致的实验结果不仅不应随便舍弃,还应特别重视,它可能是某个新发现的开端。历史上许多新的物理理论都是由于旧理论无法解释某些实验现象而建立起来的。因此,实事求是的严谨态度与积极创新的科学作风是相联系的。在严谨的实验中才能发现真正的问题,而解决这些问题往往就需要坚韧不拔的毅力和积极创新的思维。实际上,只要认真去做实验,就一定会发现许多问题,其中有些问题是教师也未必能解决的。所以,实验室应当可以成为培养学生求实态度和创新精神的最好场所。

第四节 怎样进行物理实验

一、预习

预习是上好实验课的基础和前提。没有预习,或许可以听好一堂理论课,但绝不可能较好地地完成一堂实验课。预习的基本要求是仔细阅读教材,了解实验的目的和要求,理解实验原理、了解方法,了解仪器设备及使用方法。一些实验有供预习的 CAI 软件,学生可以从电脑上更清晰地看到实验概况。一些实验还有预习的 CAI 软件,学生最好在规定时间内去实验室看一下实验的仪器设备状况。有些实验还需要翻阅一些参考书,通过预习,应对将做的实验有一个

初步的了解,写好预习报告(包括实验目的、原理、步骤、电路或光路图及数据表格等)。有些实验不要求另写正式报告的,预习报告就是正式报告了,要特别认真撰写(按以下关于“实验报告”的要求写)。预习报告中,数据表格是很重要的,往往是真正理解了如何做实验才能画好这个表格。表中要留有余地,以便有估计不到的情况发生时能够记录下来。直接测量的量和间接测量的量(由直接测量的量计算所得的量)在表中要清楚地分开,不应混淆。

二、实验操作与记录

实验室与教室的最大区别就是实验室中有大量的仪器设备和实验材料,在不同的实验室中,还分别有大功率电源、自来水源、煤气、压缩空气以及放射性物质、激光、易燃易爆物品或其他有毒、有害物品等。因此,进入实验室前必须详细了解并严格遵守实验室的各项规章制度。这些规章制度是为保护人身安全和仪器设备安全而规定的,违反了就可能酿成事故。

做实验时,要胆大心细、严肃认真、一丝不苟。对于精密贵重的仪器或元件,特别要注意稳拿妥放,防止损坏。在电学实验中,必须经教师检查无误后才可接通电源。在使用任何仪器前,必须先看注意事项或说明书;在调节时,应先粗调后微调;在读数时,应先取大量程后取小量程;实验完成后,应整理好仪器设备,关好水、电、煤气等,方可离开实验室等。这些都是一个实验工作者的基本素质,且要成为良好的习惯。

实验记录是做实验的重要组成部分,它应全面真实反映实验的全过程,包括实验的主要步骤(必要时写明为什么要采取这样的步骤)、观察与测量的条件和情况以及观察到的现象和测量到的数据(为了清楚起见,数据常用表格来记录,制表方法详见第二章第三节)。不仅要记录与预想一致的数据和现象,更要记录与预想不一致的数据和现象。记录应尽量清晰、详尽。科学研究中的实验记录本是极其宝贵的资料,要长期保存,因此必须认真对待。

关于实验操作与记录,以下两点是要特别注意的。

(1) 实验中,不仅要动手而且要动脑,而且更重要的是动脑。做实验是为了学习从事科学研究工作的能力,学会某些仪器设备的使用方法不仅是目的,而更重要的是手段。只有在实验中认真动手积极动脑,才能触类旁通,掌握实验的真谛,学到从实践中发现问题、分析问题、解决问题的真功夫。其中,发现问题是解决问题的第一步,有所发现才能有所创造。因此,在实验过程中要十分注意各种实验现象。不仅对主要的预先估计到的现象,要认真观察、仔细测量、工整记录;对于一些次要的现象、预先没有估计到的现象,也要注意观察和如实记录,以便进行分析和讨论。

(2) 数据记录必须真实,决不可任意伪造或篡改,这是一个科学工作者的基本道德素养。教学实验与科学实验不同,在教学实验中,实验结果往往是预知的,或有公认值的。实验结果与公认值不一致的情况是经常发生的。这种不一致的原因,不一定是因为学生操作的失误、概念理解不当或计算错误,它也可能是由于仪器设备不正常或环境等其他原因造成的,决不可认为实验结果与公认值越接近,就表明实验做得越好,得分也会越高;更不可为追求实验结果与公认值的一致而伪造或篡改实验记录。从学生学习的角度讲,过程比结果更重要,教师对学生的培养与评价,侧重于实验的态度与作风,以及发现、分析、解决问题的能力。

三、遵守实验室守则

(1) 实验前应认真预习,按时上实验课。

(2) 进入实验室,必须衣着整洁、保持安静,严禁闲谈喧哗、吸烟、随地吐痰。不得随意动用与本次实验无关的仪器设备。

(3) 遵守实验室规则,服从教师指导,按规定和步骤进行实验。认真观察和分析实验现

象,如实记录实验数据,不得抄袭他人的实验结果。

(4) 注意安全,严格遵守操作规程。爱护仪器设备,节约用水、电和药品、试剂、元器件等。凡违反操作规程或不听从教师指导而造成仪器设备损坏等事故者,必须写出书面检查,并按学校有关规定赔偿损失。

(5) 在实验过程中若仪器设备发生故障,应立即报告指导人员及时处理。

(6) 实验完毕,应主动协助指导教师整理好实验用品,切断水、电、气源,清扫实验场地。

(7) 按指导教师要求,及时认真完成实验报告。凡实验报告不合格者,均须重做。平时实验成绩不及格者,不得参加本门课程的考试。

四、掌握物理实验课的学习特点

1. 实验前的预习——实验的基础

实验前的预习是一次“思想实验”的练习,同学们在课前要认真阅读实验讲义和有关资料,理解实验原理、方法和目的,然后在脑子中“操作”这一实验,拟出实验步骤,思考可能出现的问题和得出怎样的结论,最后写出预习报告。预习报告内容包括如下几方面:①实验名称;②实验目的;③实验原理摘要:主要原理公式及简要说明,画出必要的原理图、电路图或光路图;④主要仪器设备(型号、规格等);⑤实验内容及注意事项,重点写出“做什么,怎么做”,哪些量是直接测量的,各用什么仪器和方法测量?哪些量是间接测量的,结果的不确定度如何估算等;⑥列出数据记录表格。未完成预习和预习报告者,教师有权停止其实验或成绩降挡。

2. 实验中的操作——实践的过程

①遵守实验室规则;②了解实验仪器的使用及注意事项;③正式测量之前可作试验性探索操作;④仔细观察和认真分析实验现象;⑤如实记录实验数据和现象。

在实验操作中要逐步学会分析实验,排除实验中出现的各种故障,而不能过分地依赖教师;对所得结果要作出粗略的判断,与理论预期相一致后,再交教师签字认可。

离开实验室前,要整理好所用的仪器,做好清洁工作,数据记录须经教师审阅签名。

3. 实验后的报告——实验的总结

实验报告是实验工作的总结,要求文字通顺、字迹工整、图表规范、数据完备和结论明确。一份好的实验报告还应给同行以清晰的思路、见解和新的启迪。同学们要养成在实验操作后尽早写出实验报告的习惯,即对原始数据进行处理和分析,得出实验结果并进行不确定度评估和讨论。

预习报告、数据记录和实验报告均用实验室编制的实验报告册。

五、写好实验报告

实验报告通常分三部分。

(一) 预习报告

预习报告为正式报告的前期内容,要求在实验前写好,内容包括:

(1) 实验名称。

(2) 实验目的。

(3) 实验原理摘要:在理解的基础上,用简短的文字扼要阐述实验原理,切忌照抄。力求图文并茂。图是指原理图、电路图或光路图;写出实验所用的主要公式,说明各物理量的意义和单位,以及公式的适用条件等。

(4) 主要仪器设备(型号、规格等)。

(5) 实验内容及注意事项,重点写出“做什么”、“怎么做”。

(6) 列出记录数据的表格。

(二) 实验记录

实验记录是进行实验的一项基本功,同学们要在实验课上完成且要养成这个良好的习惯。内容包括以下几点。

(1) 仪器:记录实验所用主要仪器的编号和规格。记录仪器编号是一个好的工作习惯,便于以后必要时对实验进行复查。

(2) 实验内容和实验现象记录。

(3) 数据:数据记录应做到整洁清晰、有条理,尽量采用列表法。表格栏内要注明物理单位。要实事求是地记录客观现象和实验数据,不能只记结果而略去原始数据,更不可为拼凑数据而对实验记录作随心所欲的修改。

(三) 数据处理与计算

数据处理及计算在实验后进行。内容包括:

(1) 作图、计算结果和作不确定度估算。

(2) 结果:按标准形式写出实验结果(测量值,不确定度和物理单位),有必要时注明实验条件。

(3) 作业题:完成教师指定的思考题。

(4) 对实验中出现的说明和讨论,以及实验心得或建议等。

第五节 实验数据处理的方法

研究物理量间的变化关系,可以从实验中测出一系列相互对应的数据点,这些数据都存在不确定度。怎样通过这些数据点得到最可靠的实验结果或物理规律,这主要靠正确的数据处理方法。物理实验中常用的数据处理方法有列表法、作图法、逐差法、最小二乘法、线性拟合等。

一、列表法

在记录和处理数据时,要将数据列成表格,用表格表示数据显得清楚明了,有关物理量之间的关系以及数据和处理数据过程中存在的问题都能在表格中显示出来。

列表的基本要求如下。

(1) 各栏目均应标注名称和单位。

(2) 列入表中的主要应是原始数据,计算过程中的一些中间结果和最后结果也可列入表中,但应写出计算公式,要尽量从表格中使人看到数据处理的方法和思路,而不能把列表变成简单的数据堆积。

(3) 栏目的顺序应充分注意数据的联系和计算的程序,力求条理性 and 简明化。

(4) 必要的附加说明,如测量仪器的规格、测量条件、表格名称等。

在基础实验中,一般都列出了记录和数据处理的表格,以供同学们参考。

二、作图法

实验的目的常常是研究两个物理量之间的数量关系。这种关系有时是用公式表示的,有时是用作图的方法表示的。用图线表示实验结果可以形象、直观、简便地表达物理量间的变化关系。其作用如下。

(1) 研究物理量之间的变化规律,找出对应的函数关系或经验公式,能形象、直观地表示

出相应的变化情况。

(2) 求出实验的某些结果,如直线方程 $y = mx + b$, 可根据曲线斜率求出 m 值,从曲线截距获取 b 值。

(3) 用内插法可从曲线上读取没有进行测量的某些量值。

(4) 用外推法可从曲线延伸部分估读出原测量数据范围以外的量值。

(5) 可帮助发现实验中个别测量的粗大误差,同时,作图连线对数据点可起到平均的作用,从而减少随机误差。

(6) 把某些复杂的函数关系,通过一定的变换用直线图表示出来。

【例 1-5-1】 由 $pV = C$, 可将 $p-V$ 图线(曲线)改为 $p-\frac{1}{V}$ 图线(直线),直线斜率为 C ,如图 1-5-1 所示。

要特别注意的是,实验作图不是示意图,而是用图来表达实验中得到物理量间的关系,同时还要求反映出测量的准确程度,因而必须按一定原则作图。

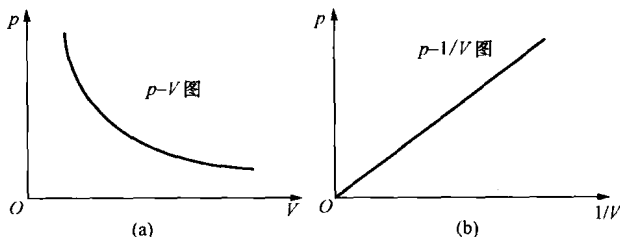


图 1-5-1 将曲线改为直线

(a) $P-V$ 图; (b) $P-1/V$ 图

1. 作图规则

(1) 选用合适的坐标纸。

根据作图参量的性质,选用毫米直角坐标纸、双对数坐标纸、单对数坐标纸或其他坐标纸等。坐标纸的大小应根据测得数据的大小、有效数字多少及结果的需要来定。基础物理实验常用毫米直角坐标纸。

(2) 坐标轴的比例与标度。

- 1) 一般以横轴代表自变量,纵轴代表因变量,在轴的末端标以代表正方向的箭头;
- 2) 轴的末端近旁标明所代表的物理量及其单位;
- 3) 适当选取横轴和纵轴的比例和坐标起点,使曲线大体上充满整个图纸;
- 4) 图上实验点的坐标读数的有效数字位数不能少于实验数据的有效数字位数;
- 5) 标度划分应得当,通常用 1、2、5 间隔,而不选用 3、7、9 间隔来标度。
- 6) 横轴和纵轴的标度可以不同,交点可不为零;
- 7) 若数据特别大或特别小,则可用乘积因子表示。

(3) 曲线的标点与连线。

1) 数据点应该用大小适当的明显标志 $\times$ 、 $\odot$ 、 $\triangle$,同一张图上的几条曲线应采用不同的标志。注意不可用“ $\cdot$ ”号,因为连线时会把点盖住,因而不能清楚地看出点与线的偏离情况及分析实验中的问题。

2) 连线要光滑,不一定要通过所有的数据点。因为每个实验点的误差情况不一定相同,因此不应强求曲线通过每一个实验点而连成折线(仪表的校正曲线不在此例)。应该按实验点的总趋势连成光滑的曲线或直线,要做到图线两侧的实验点与图线的距离最为接近且分布大体均匀。图线正穿过实验点时,可以在此点处断开。

(4) 写明图线特征和名称。利用图上空白位置注明实验条件和从图线上得出的某些参

数,如截距、斜率、极大值、极小值、拐点和渐近线等。有时需要通过计算求一些特征量,图上还须标出被选计算点的坐标及计算结果,最后写上图的名称。

2. 图解法求拟合直线的斜率和截距

设拟合直线为

$$y = mx + b \quad (1-5-1)$$

(1) 求斜率,即

$$m = \frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1} \quad (1-5-2)$$

可在所作直线上选取两点 $p_1(x_1, y_1)$ 和 $p_2(x_2, y_2)$ 代入式(1-5-2)求得。 p_1 与 p_2 两点一般不取原来测量的数据点,并且要尽可能相距得远些,在图上标出它们的坐标。为便于计算, x_1 和 x_2 两数值可选取整数,斜率的有效数字要按有效数字的规则计算。

(2) 求截距:如果横坐标的起点为零,则直线的截距可直接从图线中读出,否则可用下式计算截距,即

$$b = \frac{x_2 y_1 - x_1 y_2}{x_2 - x_1} \quad (1-5-3)$$

3. 校正曲线

此外,还有一种校正曲线。作校正曲线除连线方法与上述作图要求不同外,其余均相同。校正曲线的相邻数据点间用直线连接,全图成为不光滑的折线。之所以连折线是因为在两个校正点之间的变化关系是未知的,因而用线性插入法予以近似。例如在“电表改装与校准”实验中,用准确度等级高一级的电表校准改装的电表所作的校准图,这种图线要附在被校正的仪表上作为示值的修正。

由于作图时图纸的不均匀性、连线的近似性、线的粗细等因素,不可避免地会带入误差,因此从图上计算测量结果的不确定度就没有多大意义了。一般在正确分度情况下,只用有效数字表示计算结果。要确定测量结果不确定度则需应用解析方法。但是,在报道实验结果时,一幅精美的曲线胜过千言描述,所以作图法在实验教学中有其特殊的地位。

【例 1-5-2】 用惠斯登电桥测定铜丝在不同温度下的电阻值。数据见表 1-5-1。试求铜丝的电阻与温度的关系。

表 1-5-1

数 据 表

温度 $t(^{\circ}\text{C})$	24.0	26.5	31.1	35.0	40.3	45.0	49.7	54.9
电阻 $R(\Omega)$	2.897	2.919	2.969	3.003	3.059	3.107	3.155	3.207

解 以温度 t 为横坐标,电阻 R 为纵坐标。横坐标选取 2mm 代表 1.0°C ,纵坐标 2mm 代表 0.010Ω 。绘制铜丝电阻与温度曲线如图 1-5-2 所示。由图中数据点分布可知,铜丝电阻与温度为线性关系,满足下面线性方程,即

$$R = \alpha + \beta t$$

在图线上取两点(见图 1-5-2),计算截距和斜率得

$$\beta = \frac{3.197 - 2.909}{54.0 - 25.0} = 9.93 \times 10^{-3} (\Omega/^{\circ}\text{C})$$

$$\alpha = \frac{54.0 \times 2.090 - 25.0 \times 3.197}{54.0 - 25.0} = 2.66 (\Omega)$$

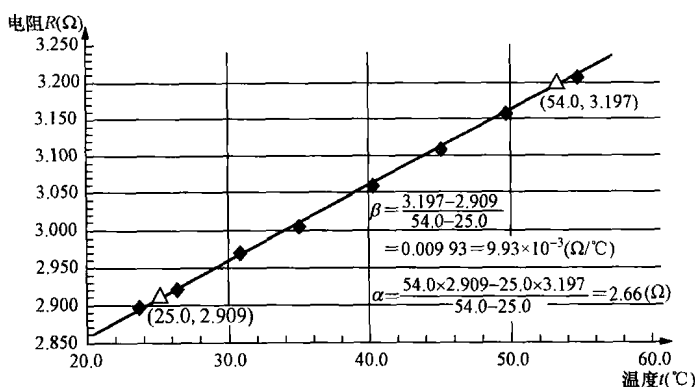


图 1-5-2 铜丝电阻与温度的关系

所以,铜丝电阻与温度的关系为

$$R = 2.66 + 9.93 \times 10^{-3} t (\Omega)$$

如果两物理量成正比,在实验中常作多次测量,用图解法求比例系数,这样做的结果可比单次测量准确得多。

三、逐差法

当两个被测物理变量之间存在多项函数关系,且自变量为等间距变化时,常常用逐差法处理测量数据。

逐差法就是把实验得到的偶数组数据分成前后两组,将对应项分别相减。这样做可以充分利用数据,具有对实验数据取平均和减少随机误差的效果。另外,还可以对实验数据进行逐次相减,这样可验证被测量之间的函数关系,及时发现数据差错或数据规律。

例如用拉伸法测定弹簧劲度系数,已知在弹性限度范围内,伸长量 x 与拉力 F 之间满足

$$F = kx$$

关系。等间距地改变拉力(负荷),将测得一组数据列于表 1-5-2 中。

表 1-5-2

数 据 表

砝码质量 $m_i(\text{g})$	弹簧伸长位置 $l_i(\text{cm})$	逐次相减 $\Delta l_i = l_{i+1} - l_i(\text{cm})$	等间隔对应项相减 $\Delta l_5 = l_{i+5} - l_i(\text{cm})$
1×100.0	10.00	0.81	4.00
2×100.0	10.81	0.79	
3×100.0	11.59	0.83	4.01
4×100.0	12.42	0.79	
5×100.0	13.21	0.79	4.02
6×100.0	14.00	0.82	
7×100.0	14.82	0.79	3.99
8×100.0	15.61	0.80	
9×100.0	16.42	0.78	3.98
10×100.0	17.19		

由逐次相减的数据可判出 Δl_i 基本相等,验证了 x 与 F 之间的线性关系。实际上,这“逐

差验证”工作,在实验过程中可随时进行,以判别测量是否正确。

而求弹簧劲度系数 k (直线的斜率),则利用等间隔对应项逐差的结果,即将表中数据分成高组 ($l_{10}, l_9, l_8, l_7, l_6$) 和低组 (l_5, l_4, l_3, l_2, l_1),然后对应项相减求平均值,得

$$\begin{aligned}\Delta \bar{l}_5 &= \frac{1}{5}[(l_{10} - l_5) + (l_9 - l_4) + (l_8 - l_3) + (l_7 - l_2) + (l_6 - l_1)] \\ &= \frac{1}{5}(4.00 + 4.01 + 4.02 + 3.99 + 3.98) = 4.00(\text{cm})\end{aligned}$$

于是

$$\bar{k} = \frac{\Delta \bar{l}_5}{5mg} = \frac{4.00 \times 10^{-2}}{5 \times 100.0 \times 10^{-3} \times 9.80} = 8.16 \times 10^{-3}(\text{m/N})$$

对本例的进一步分析可知,由分组逐差求出 $\Delta \bar{l}_5$,然后算出弹簧劲度系数 k ,相当于利用了所有数据点连了 5 条直线,分别求出每条直线的斜率后再取平均值,所以用逐差法求得的结果比作图法要准确些。

用逐差法得到的结果,还可以估算它的随机误差。本例由分组逐差得到的 5 个 Δl_5 ,可视为 5 次独立的重复测量,求出其标准偏差。从而进一步求出弹簧劲度系数 k 的不确定度。

四、实验数据的直接拟合(线性回归)

作图法虽然在数据处理中是一个很便利的方法,但它不是建立在严格统计理论基础上的数据处理方法,在作图纸上人工拟合直线(或曲线)时有一定的主观随意性,往往会引入附加误差,尤其在根据图线确定常数时,这种误差有时很明显。为了克服这一缺点,在数据统计中研究了直线拟合问题(或称一元线性回归问题),常用的是一种以最小二乘法为基础的实验数据处理方法。

最小二乘法原理:若能找到一条最佳的拟合直线,那么这条拟合直线上各相应点的值与测量值之差的平方和在所有拟合直线中应是最小的。

设在某一实验中,可控物理量取 $x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$ 值时,对应物理量依次取 $y_1, y_2, y_3, \dots, y_n$ 值。我们讨论最简单的情况,即每个测量值都是等精度的,而且假定测量值 x_i 的误差很小,主要误差都出现在 y_i 的测量上。显然,如果从 (x_i, y_i) 中任取两个数据点,就可以得到一条直线,只不过这条直线的误差有可能很大。直线拟合的任务就是用数学分析的方法从这些观测量中求出一个误差最小的最佳经验公式,即

$$y = mx + b \quad (1-5-4)$$

按这一经验公式作出的图线虽然不一定通过每个实验点,但是它以最接近这些实验点的方式平滑地穿过它们。

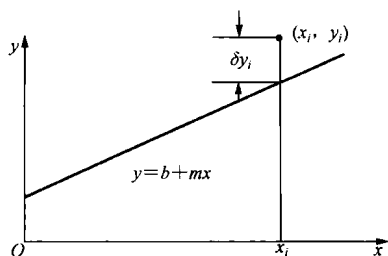


图 1-5-3 线性回归

显然,对应于每一个 x_i 值,观测值 y_i 和最佳经验式的 y 的值之间存在一偏差 δy_i (见图 1-5-3),我们称之为观测值 y_i 的偏差,即

$$\delta y_i = y_i - y = y_i - (b + mx_i) \quad (i = 1, 2, 3, \dots, n) \quad (1-5-5)$$

根据最小二乘法的原理,当 y_i 偏差的平方和为最小时,由极值原理可求出常数 b 和 m 。由此可得最佳拟合直线。

设 s 表示 δy_i 的平方和, 它应满足

$$s = \min \sum (\delta y_i)^2 = \min \sum [y_i - (b + mx_i)]^2 \quad (1-5-6)$$

式中: x_i 和 y_i 是测量值, 均是已知量, 而 b 和 m 是待求的。因此, s 实际上是 b 和 m 的函数。令 s 对 b 和 m 的偏导数为零, 即可解出满足上式的 b 和 m 值(要验证这一点, 还需证明二阶导数大于零, 这里从略)。

$$\frac{\partial s}{\partial b} = -2 \sum (y_i - b - mx_i) = 0$$

$$\frac{\partial s}{\partial m} = -2 \sum (y_i - b - mx_i)x_i = 0$$

解上述联立方程得

$$b = \frac{\sum x_i y_i \sum x_i - \sum y_i \sum x_i^2}{(\sum x_i)^2 - n \sum x_i^2} \quad (1-5-7)$$

$$m = \frac{\sum x_i \sum y_i - n \sum x_i y_i}{(\sum x_i)^2 - n \sum x_i^2} \quad (1-5-8)$$

将 b 和 m 值代入直线方程, 即得最佳经验公式(1-5-4)。

用最小二乘法求得的常数 b 和 m 是“最佳”的, 但并不是没有误差, 它们的误差估计比较复杂, 本教程不作要求。一般说, 如果一系列测量值的 δy_i 大, 那么, 由这列数据求得的 b 和 m 值的误差也大, 由此定出的经验公式可靠程度就低; 如果一系列测量值的 δy_i 小, 那么, 由这列数据求得的 b 和 m 值的误差也小, 由此定出的经验公式可靠程度就高。

用回归法处理数据最困难的问题在于函数形式的选取。函数形式的选取主要靠理论分析, 在理论还不清楚的场合, 只能靠实验数据的变化趋势来推测。这样对同一组实验数据, 不同的人员可能取不同的函数形式, 得出不同的结果。为判明所得结果是否合理, 在待定常数确定以后, 还需要计算相关系数 r 。对一元线性回归, r 的定义为

$$r = \frac{\sum \Delta x_i \sum \Delta y_i}{\sqrt{\sum (\Delta x_i)^2} \sqrt{\sum (\Delta y_i)^2}} \quad (1-5-9)$$

式中: $\Delta x_i = x_i - \bar{x}$; $\Delta y_i = y_i - \bar{y}$ 。

可以证明 r 值总是在 0 和 1 之间, r 值越接近于 1, 说明实验数据点密集地分布在所求得的直线旁, 用线性函数进行回归是合适的, 如图 1-5-4 所示。相反, 如果 r 值远小于 1 而接近零, 说明实验数据对求得的直线很分散(见图 1-5-5), 即线性回归不妥, 必须用其他函数重新试探。

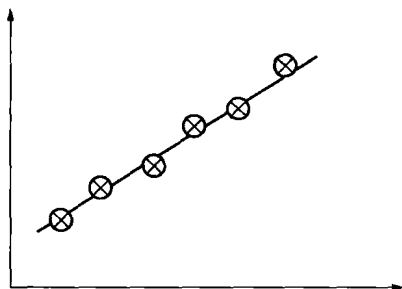


图 1-5-4 r 值接近于 1

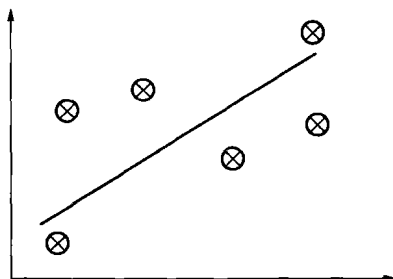


图 1-5-5 r 值接近于 0