

周珺
编

大学物理

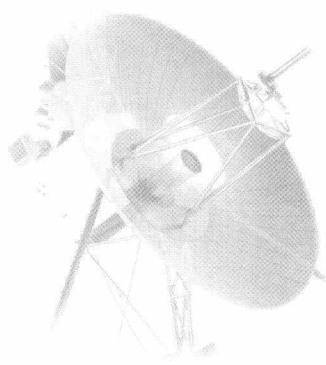
实验教程



甘肃民族出版社

大学物理 实验教程

周珺 编



 甘肃民族出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

大学物理实验教程 /周珺编. —兰州: 甘肃民族出版社,
2009.5
ISBN 978-7-5421-1495-2

I. 大… II. 周… 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 064741 号

书 名: 大学物理实验教程

作 者: 周珺 编

责任编辑: 刘新田 何晓霞

封面设计: 宁渔

出 版: 甘肃民族出版社(730030 兰州市南滨河东路 520 号)

发 行: 甘肃民族出版社发行部(730030 兰州市南滨河东路 520 号)

印 刷: 甘肃北辰印务有限公司

开 本: 880 毫米×1230 毫米 1/16 印张: 13 插页: 2

字 数: 380 千

版 次: 2009 年 1 月第 1 版 2009 年 1 月第 1 次印刷

印 数: 1~1 000 册

书 号: ISBN 978-7-5421-1495-2

定 价: 25.00 元

甘肃民族出版社图书若有破损、缺页或无文字现象,可直接与本社联系调换。
邮编: 730030 地址: 兰州市南滨河东路 520 号 网址: <http://www.gansumz.com>
投稿邮箱: liuxintian@yahoo.com.cn
发行部: 葛慧 联系电话: 0931-8773271(传真) E-mail: gsmzgehui3271@tom.com

版权所有 翻印必究

前 言

《大学物理实验教程》是为适应当前实验教学改革的要求,根据教育部《高等工业学校物理实验课程教学基本要求》和《高等教育面向 21 世纪教学内容和课程体系改革计划》的精神,以多年使用的讲义为基础并结合近年来实验教学改革实践的成果而编写的。内容广泛,深入浅出。

《大学物理实验教程》是理工科学生必修的一门重要基础实验课程,也是学生进入大学后较早接触到的一门全面系统的实验课程。为了使学生在有限的时间内能系统地掌握物理实验的基本知识和基本方法,培养学生的实验动手能力,促使学生积极参与实验,为后续实验课程奠定基础,《大学物理实验教程》在编写过程中打破了传统的实验教学内容体系,在熟悉基本仪器和基本测量的基础上,采用基本实验、综合设计性实验、研究性试验三结合的模式,这样既保证学生通过实验课能较好地掌握和运用理论知识,又能提高学生的实验技能。实践证明,这样的模式适合并满足大多数学生的需要。

《大学物理实验教程》第一章误差理论,第二章力学热学,第三章电磁学,第四章光学,第五章研究性综合实验,第六章电路及电子线路实验,第七章历年诺贝尔物理学奖得主及简历。

《大学物理实验教程》是对本人多年教学经验的总结,特别是近几年开展大学物理实验教学改革成果。同时,它也凝聚着每位教师和实验技术人员的辛勤劳动,是集体智慧的结晶。

编写第六章电路与电子实验是考虑到有的计算机专业要开设相关实验的需要,例如兰州交通大学数学与软件工程学院的计算机专业就有这样的设置。

编写适合教学改革需要的实验教材是一种探索,是一项凝聚教师集体劳动的工程。本人在编写本教材时,吸收了多年来在兰州交通大学物理实验室工作过的许多同仁的经验和成果,也参考和借鉴了兄弟院校的有关教材。另外,兰州理工大学刘遵周教授任教材的主编,提出了许多宝贵的建议,兰州交通大学研究生赵创要对本书的校核及排版工作付出了大量的精力和时间,在此,本人一并表示衷心的感谢!

由于时间短促,加之编写水平有限,难免有不妥和疏漏之处,恳请读者批评指正。

编 者

2008 年 8 月

绪 论

大学阶段物理实验课程的学习,不同于中学阶段的实验课。因为中学里的物理实验主要是为了扩大视野、丰富感性知识和增加动手机会,进而帮助同学了解和巩固课堂上所学的理论知识,它仅是物理课程教学的一个附属教学环节。但是,在大学阶段开设的物理实验课程是独立于《大学物理》课程之外,对学生进行科学实验基本训练的一门独立的必修基础实验课程,单独记分,是学生在高等学校受到系统实验基本训练的开端。它在培养学生运用实验手段去分析、观察、发现乃至研究、解决问题的能力方面,在提高学生科学实验素质方面,都起着重要的作用。同时,它也将为学生今后的学习、工作奠定良好的实验基础。

1. 大学物理实验课的基本教学环节

物理实验是学生在教师指导下独立进行实验的一种实践活动,实验课的教学安排不可能像书本教学那样使所有的学生按照同样的内容以同一进度进行,教学方式主要是学生自己动手,完成实验内容规定的任务,教师只是在关键的地方给予提示和指导,因此学习物理实验就要求同学们花比较大的工夫,有较强的独立工作能力。学好物理实验课的关键,在于把握住下列三个基本教学环节:

(1)实验前的预习。实验教材是进行实验的指导书。它对每个实验的目的与要求,实验原理都作了明确的阐述。因此,在上实验课前都要认真阅读,必要时还应阅读有关参考资料。对于所涉及的测量仪器,在预习时可阅读教材中有关对仪器的介绍,了解其构造原理、工作条件和操作规程等,必要时可到实验室去观察实物,并在此基础上写好预习报告,回答预习思考题。预习报告内容主要包括以下几个方面:①实验名称;②实验目的;③原理摘要(包括主要原理公式、列出有关测量的条件和将要被验证的规律。其中要明确哪些物理量是直接测量量,哪些物理量是间接测量量,用什么方法和测量仪器等,电学实验应绘出电原理图、光学实验应绘出光路图);④主要仪器设备;⑤在实验记录本上列出数据记录表格;⑥回答预习思考题。

上课时,指导教师将检查学生的预习情况,对于没有预习或未完成预习报告的学生,指导教师有权停止该生本次实验。

(2)实验中的操作。实验操作是实验的主要内容。实验时应遵守实验室规章制度;仔细阅读有关仪器使用的注意事项或仪器说明书;在教师指导下正确使用仪器,注意爱护、稳拿妥放、防止损坏,对于电磁学实验,必须由指导教师检查电路的连接正确无误后,方可接通电源进行实验。对于严重违反实验室规则者,指导教师应停止其实验,并按有关规定处理。

做好实验记录是科学实验的一项基本功。在观察、测量时,要做到正确读数、实事求是地记录客观现象和数据。在编好页码的实验记录本上,写明实验名称、实验日期、同组人,必要时还要注明天气、室温、大气压、温度等环境条件。接着要记下实验所用仪器装置的名称、型号、规格、编号和性能情况以及被测量的号码或者其他标记,以便日后需要时可以用来重复测量和利用仪器的准确度校核实验结果的误差,切勿将数据随意记录在草稿纸上,不可事后凭回忆“追忆”数据,更不可为拼凑数据而将实验记录随心所欲地涂改。

要逐步学会分析实验,排除实验中出现的各个故障。实验最后一般总会有数据结果,这些数据是否正确?靠什么去判断?数据的好坏又说明什么?实验结果是否正确?这些问题主要是靠分析实验本身来判断,即必须分析实验方法是否正确,它带来多大误差?仪器带来多大误差?实验环境有多大的影响等等。实验

后的讨论发挥同学们才智,是提高学生分析问题和解决问题能力的重要环节,应努力去做。但要注意,不要空发议论,应力求定量地分析问题,做到言之有据。往往有些同学,当实验数据和理论计算一致时,就会心满意足,简单地认为已经做好了这次实验;而一旦数据和计算差别较大,又会感到失望,抱怨仪器装置甚至拼凑数据,这两种态度都是实验教学和一切实验研究活动所不可取的。实际上,任何理论公式都是一定的理论上的抽象和简单化,而客观现实和实验所处的环境条件要复杂得多,实验结果必然带来和理论公式的差异,问题在于差异的大小是否合理。所以,不论数据好坏,都应逐步学会分析实验,找出成败的原因。

误差与数据处理知识是物理实验的特殊语言。实验做得好与差;两种方法测量同一物理量其结果是否一致;实验验证还是没有验证理论等,这不能凭感觉,而必须用实验数据和实验误差来下断言。只有领悟并运用这种语言,才能真正置身于实验之中,亲身感受到成功的喜悦。

实验结束,要把测得的数据交给指导老师检验通过,对不合理的或者错误的实验结果,经分析后还要补做或重做。离开实验室前要整理好使用过的仪器,做好清洁工作。

(3)实验后的报告。写实验报告的目的是为了培养和训练学生以书面形式总结工作或报告科研成果的能力。报告是实验成果的文字报告,所以最起码应该做到字迹清楚、文理通顺、图表正确、数据完整和结论明确。报告应予同行以清晰的思路、见解和新的启发才算得上一份成功的报告。一般应写在专用的实验报告纸上,下次实验时交指导教师批阅。实验报告的内容应包括:实验名称、实验目的、原理阐述、实验内容、数据记录、数据处理与结果分析、讨论等8个部分。

下面分别对“报告”中各部分的写法提出一些要求:

关于“实验名称”和“实验目的”,一般应与教材中提法一致。

关于“原理阐述”,应该在对原理理解的基础上用自己的语言简要叙述,要求做到简明扼要,图(原理图、光路图、电路图)文并茂,并列测量和计算所依据的公式,注明公式中各量的物理意义及公式的适用条件。

关于“实验内容”,概括性地写出实验进行的主要过程,设计型实验应该写出关键性的步骤和注意事项。

关于“数据记录”,一般要求以列表形式来反映完整而清晰的原始测量数据。

关于“数据处理与结果分析”,要求写出数据处理的主要过程、图线、误差分析等。在计算处理完成以后,必须以醒目的方式完整地表示出实验结果。

关于“讨论”(包括回答讨论题),一般讨论内容不受限制,可以是对观察到的实验现象进行分析,对结果和误差原因进行分析,也可以对实验方案及其改进意见进行讨论评述。这是实验报告中最开放、最灵活的部分,重在说理,所以能反映实验者观察和分析能力的高低。报告无疑应该按照自己的思路来写,特别受赞赏的是有关自身体会的经验之谈。

2. 如何学好大学物理实验课

大学物理实验是一门实践性课程,学生能在自己独立工作的过程中增长知识、提高能力。因而上述教学目的能否达到,在很大程度上取决于学生自己是否努力。鉴于我国目前中学阶段对学生实验的训练普遍比较薄弱的现状,在大学阶段想学好物理实验课程,不仅要多花力气、下苦工夫,还应当特别注意改进自己的学习方法。

(1)要注意掌握基本的实验方法和测量技术。基本的实验方法和测量技术在实际工作中会经常用到,并且是复杂的方法和技术的基礎。学习时不但要搞清它们的基本道理,还应该逐步地熟悉和牢记它们,且能运用这些方法和技术设计一些简单的实验。任何一种实验方法和测量技术都有着它应用的条件、优缺点和局限性,只有亲自做了一定数量的实验后,才会对这些条件、优缺点和局限性有切身的体会。

(2)要有意识地培养良好的实验习惯。在开始做实验之前,应当先认真阅读实验教材和有关仪器资

料,这样你才有可能对将要做的实验工作具体而清楚地了解;而当你完成一个实验的同时,一定要有一份完整而真实的实验记录,这样,你才有可能在需要时随时查阅这些记录,从而在处理数据、分析结果时,有足够的第一手资料;才能帮助你正确地去理解,你到底在做什么实验。在实验过程中,凡有必要,应重复测量若干次,多测读几次,一般总要比只读一次为好(至少能确保不读错!)。要注意记录实验的环境条件(如室温、气压、温度、仪表名称、规格、量程和精度等),注意实验仪器在安置和使用上的要求和特点,有时甚至还要注意纠正自己不正确的操作习惯和姿势。良好的习惯需要经过很多次的总结、反思和回顾以后才能形成。而良好的实验习惯,对保证实验的正常进行,确保实验中的安全,防止差错的发生,都有很好的作用。如果就单个实验习惯而言,由于比较易于理解,又不难掌握,反而容易被初学者所忽视。无数实践证明,良好习惯的养成,只有在实验的过程中有意识地去锻炼自己才行。

在具体的实验课题中,有些实验的完成需要两个或多个同组实验者的合作,与他们共同讨论、分析实验的结果,将会使你获得比你独自分析有着更多的收益。有时,在做实验时,如果受时间或条件的限制,仅来得及完成实验任务的二分之一或更少,但只要坚持认真去做,也比仓促而马虎地赶完全部实验任务获益更多。

(3)要注意养成善于分析的习惯。实验中要善于捕捉和分析实验现象,力争独立地排除实验中各种可能出现的故障,并锻炼自己自主发现问题、分析问题和解决问题的能力。如:实验数据是否合理、正确?靠什么判断?数据的好或坏又说明了什么?实验结果的可靠性和正确性又如何?这些问题的解决,主要依靠分析实验的本身和实验的过程去判断;换言之,就是实验方法是否正确、合理?它可能引入多大的误差?实验仪器又会带来多少误差?实验环境、条件的影响又将如何?

为了帮助初学者克服实验经验少,还没有掌握一整套分析实验的方法等实际情况,作为大学基础教学实验的物理实验往往在实验教材中安排少数已有十分确切理论结合的实验课题,使初学者便于联系和判断实验结果的正确性。但千万不要误认为做实验的目的只是为了得到一个标准的实验结果。如果获得的实验数据与标准数据符合了就高兴,一旦有所差别,就大失所望,抱怨仪器或装置不好,甚至拼凑数据,这些表现都是不正确的,是违背科学的。事实上,任何理论公式和结论都是经过一定的抽象并被简化了的,而客观事实与实验所处的环境条件则要复杂得多,实验结果与理论公式、结论之间发生差别是必然会有,问题是差异有多大?是否合理?不论实验结果或数据的好坏,都应养成分析的习惯。当然也不要贸然下结论。首先要检查自己的操作和读数,注意实验装置和环境条件。若操作和读数经检查正确无误,那么毛病可能出现在仪器和装置本身。

小的故障、小的毛病,实验者应力求自己动手去排除,起码也应留意教师或实验室工作人员是怎么着手解决的。仪器失灵,也要学习教师如何去判定仪器失灵或故障所在?怎样修复?在此还应着重指出,能否发现仪器装置的故障,及时迅速修复,这也是一个人实验能力强弱的重要表现,初学者应要求自己逐步提高这方面的能力。

(4)要掌握好每个实验的重点。每个实验中都有较多的内容,首先应完成基本内容,这既是基础,也是重点。所以必须注意实验的目的,这样可以提高学习效率。完成基本内容后,如果时间许可,可以根据自己的具体实际情况,尝试去分析一下实验可能存在的一些问题,如使用仪器的精度、可靠性,实验条件是否已被满足?怎样给予证实?或进一步提出改进实验的建议,试做一些新的实验内容等。当然,不应简单地重复。

3.怎样上好物理实验课

三个主要教学环节

- (1)实验预习——实验能否取得主动的关键。
- (2)实验操作。
- (3)实验报告——实验的总结。

实验报告内容为:

- ①实验名称;
- ②实验目的;
- ③原理简述(原理图、电路图或光路图,以及主要计算公式等);
- ④主要实验仪器设备;
- ⑤实验数据表格、数据处理计算主要过程、作图及实验结果和结论;
- ⑥实验现象分析、误差评估、小结和讨论。

总之,物理实验课有着自己的特点和规律,要学好这门课不是一件容易的事情。希望同学们在学习过程中不断提高对它的兴趣,打好基础,注意把自己培养成优秀的科学技术人才。

目 录

绪论	(1)
1.大学物理实验课的基本教学环节	(1)
2.如何学好大学物理实验课	(2)
3.怎样上好物理实验课	(3)
第一章 误差理论	(1)
1.测量	(1)
2.有效数字的读取	(1)
3.有效数字的运算	(1)
4.有效数字尾数的舍入规则	(2)
5.误差	(2)
6.数据处理的作图法逐差法最小二乘法	(6)
第二章 力学 热学	(9)
实验项目 1 拉伸法测量钢丝的杨氏模量	(9)
实验项目 2 三线摆测量转动惯量	(15)
实验项目 3 扭摆法测量转动惯量	(18)
实验项目 4 驻波法测声速	(22)
实验项目 5 拉脱法测定液体表面张力系数	(23)
实验项目 6 落球法测定液体粘滞系数	(26)
实验项目 7 冷却法测量金属的比热容	(27)
第三章 电磁学	(32)
实验项目 1 密立根油滴实验	(32)
实验项目 2 十一线电位差计测量电池电动势及内阻	(38)
实验项目 3 箱式电位差计	(39)
实验项目 4 示波器的调整与使用(一)	(42)
实验项目 5 示波器的调整与使用(二)	(51)
实验项目 6 线性与非线性电阻	(54)
实验项目 7 惠斯通电桥测电阻	(57)
实验项目 8 开尔文电桥测量金属的电阻率	(59)
实验项目 9 霍尔元件测量磁场	(64)
实验项目 10 霍尔传感器测量磁化曲线与磁滞回线	(70)
实验项目 11 示波器测绘铁磁材料的磁化曲线与磁滞回线	(73)
实验项目 12 霍尔传感器传输速度测量实验	(80)
实验项目 13 RLC 串联交流电路谐振特性的研究	(83)
实验项目 14 静电场的模拟测绘	(84)

第四章 光学	(88)
实验项目 1 薄透镜焦距测量	(88)
实验项目 2 望远镜与显微镜的组装	(91)
实验项目 3 分光计的调整与使用	(92)
实验项目 4 光栅常数的测量	(98)
实验项目 5 牛顿环与劈尖干涉	(100)
实验项目 6 迈克尔逊干涉仪	(105)
实验项目 7 光电效应测普朗克常数	(108)
实验项目 8 硅光电池特性的研究	(111)
第五章 研究性综合实验	(114)
实验项目 1 超声波探伤实验	(114)
实验项目 2 微波检测实验	(119)
实验项目 3 夫兰克-赫兹实验	(124)
实验项目 4 光的偏振现象的研究	(126)
实验项目 5 全息照相	(129)
实验项目 6 电光调制器性能测试及应用	(131)
实验项目 7 非线性电路振荡周期的分岔与混沌实验	(136)
实验项目 8 光速的测量试验	(139)
实验项目 9 激光拉曼光谱	(141)
实验项目 10 数字信号光纤传输技术实验	(144)
实验项目 11 多普勒效应综合实验	(146)
第六章 电路及电子线路实验	(153)
实验项目 1 常用电子仪器的使用	(153)
实验项目 2 叠加原理和戴维宁定理	(155)
实验项目 3 电感电容的频率特性	(158)
实验项目 4 线性与非线性电阻的伏安特性	(160)
实验项目 5 二极管与三极管的简易测试	(163)
实验项目 6 整流、滤波和稳压电路的研究	(164)
实验项目 7 低频单管电压放大器的研究	(167)
实验项目 8 集成运放的基本运算电路	(169)
实验项目 9 文氏桥式正弦波振荡器	(171)
实验项目 10 基本逻辑门逻辑功能测试及使用	(172)
实验项目 11 触发器及其使用	(175)
实验项目 12 计数器与译码器	(177)
实验项目 13 555 定时器的应用	(180)
第七章 历年诺贝尔物理学奖得主及简历	(182)
附录 1 物理学常用数表	(189)
附录 2 中华人民共和国法定计量单位	(194)
参考文献	(197)

第一章 误差理论

1. 测量

物理实验以测量为基础,所谓测量,就是用合适的工具或仪器,通过科学的方法,将反映被测对象某些特征的物理量(被测物理量)与选作标准单位的同类物理量进行比较的过程,其比值即为被测物理量的测量值。

1.1 直接测量

直接将待测物理量与选定的同类物理量的标准单位相比较直接得到测量值。

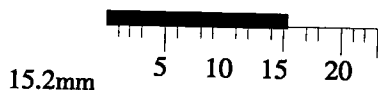
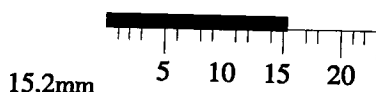
1.2 间接测量

利用直接测量的量与被测量之间的已知函数关系,求得该被测物理量。

测量值=读数值(有效数字)+单位

有效数字=可靠数字+可疑数字

2. 有效数字的读取



3. 有效数字的运算

3.1 加、减法

诸量相加(相减)时,其和(差)数在小数点后所应保留的位数与诸数中小数点后位数最少的一个相同。

$$\begin{array}{r} 4.178 \\ + 21.3 \\ \hline 25.478 = 25.5 \end{array}$$

3.2 乘、除法

诸量相乘(除)后其积(商)所保留的有效数字,只须与诸因子中有效数字最少的一个相同。

$$\begin{array}{r} 4.178 \\ \times 10.1 \\ \hline 4178 \\ 41780 \\ \hline 421978 \end{array}$$

$$\begin{array}{r} 4178 \\ 421978 = 42.2 \end{array}$$

3.3 乘方开方

有效数字与其底的有效数字相同。

3.4 对数函数

运算后的尾数位数与真数位数相同。

例: $\lg 1.938 = 0.2973$

$$\lg 1938 = 3 + \lg 1.938 = 3.2973$$

3.5 指数函数

运算后的有效数字的位数与指数的小数点后的位数相同(包括紧接小数点后的零)。

$$\text{例: } 106.25 = 1.8 \times 10^6$$

$$100.0035 = 1.008$$

3.6 三角函数

取位随角度有效数字而定。

$$\text{例: } \sin 30^\circ 00' = 0.5000$$

$$\cos 20^\circ 16' = 0.9381$$

正确数不适用有效数字的运算规则。

取常数与测量值的有效数字的位数相同。

4. 有效数字尾数的舍入规则

①若舍去部分的数值小于所保留的末位数单位的 $1/2$, 末位数不变。

②若舍去部分的数值大于保留的末位数单位的 $1/2$, 末位数加 1。

③若舍去部分的数值恰好等于保留的末位数单位的 $1/2$, 当末位数为偶数时, 保持不变; 为奇数时, 末位数加 1。

$$\text{例: } 4.32749 \rightarrow 4.327 \quad 4.32751 \rightarrow 4.328$$

$$4.32750 \rightarrow 4.328 \quad 4.32850 \rightarrow 4.328$$

通俗地说: 四舍六入, 五凑偶。

5. 误差

对一待测物理量 x

$$dx = \text{测量结果 } x - \text{真值 } \mu$$

5.1 真值

物理量在一定实验条件下的客观存在值。

测量误差存在于一切测量过程中, 可以控制得越来越小, 不可能为零。

误差分为: 系统误差、随机误差。

5.2 系统误差

定义: 在对同一被测量的多次测量过程中, 绝对值和符号保持恒定或随测量条件的改变而按确定的规律变化。

产生原因: 由于测量仪器、测量方法、环境带入。

分类及处理方法:

(1) 已定系统误差: 必须修正电表、螺旋测微计的零位误差; 测电压、电流时由于忽略表内阻引起的误差。

(2) 未定系统误差: 要估计出分布范围如, 螺旋测微计制造时的螺纹公差等。

5.3 随机误差的处理

定义: 在对同一量的多次重复测量中绝对值和符号以不可预知方式变化的测量误差分量。

产生原因: 实验条件和环境因素无规则的起伏变化, 引起测量值围绕真值发生涨落的变化。

例如: 电表轴承的摩擦力变动螺旋测微计测力在一定范围内随机变化; 操作读数时的视差影响。

(1) 小误差出现的概率比大误差出现的概率大。

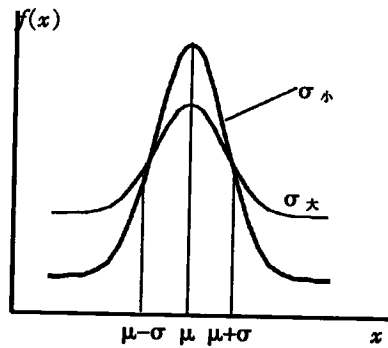
(2) 无穷多次测量时服从正态分布。

(3) 具有抵偿性: 取多次测量的平均值有利于消减随机误差。

5.4 标准差表示测量值的离散程度

标准差小: 表示测得值很密集, 随机误差分布范围窄, 测量的精密度高。

标准差大:表示测得值很分散,随机误差分布范围宽,测量的精密度低。



$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}}$$

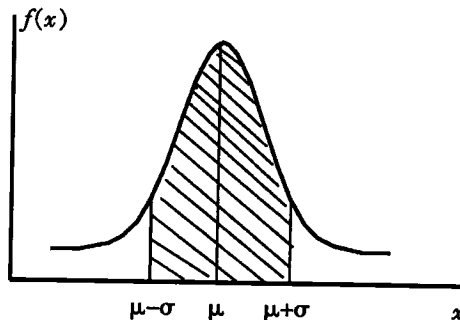
任意一次测量值落入区间 $[\mu - \sigma, \mu + \sigma]$ 的概率为 $P = \int_{\mu - \sigma}^{\mu + \sigma} f(x) dx = 0.683$ 。这个概率叫置信概率,也称为置信度。对应的区间叫置信区间,表示为 $x = \mu \pm \sigma$ 。

扩大置信区间,可增加置信概率

$$[\mu - 2\sigma, \mu + 2\sigma] \quad P = \int_{\mu - 2\sigma}^{\mu + 2\sigma} f(x) dx = 0.954$$

$$[\mu - 3\sigma, \mu + 3\sigma] \quad P = \int_{\mu - 3\sigma}^{\mu + 3\sigma} f(x) dx = 0.997$$

在测量次数 n 较小的情况下,测量量将呈 t 分布,其分布函数为:



n 较小时,偏离正态分布较多, n 较大时,趋于正态分布。

t 分布时,置信区间和置信度的计算需要对特殊函数积分,且不同的测量次数对应不同的值,计算很繁。

5.5 平均值

假定对一个物理量进行了 n 次测量,测得的值为 x_i ($i = 1, 2, \dots, n$)

$$\bar{x} = \left(\sum_{i=1}^n x_i \right) / n$$

可以用多次测量的算术平均值作为被测量的最佳估计值,测量次数 n 为无穷大时,算术平均值等于真值。

5.6 标准偏差

有限测量时,算术平均值不等于真值,它的标准偏差为:

$$\sigma_{\bar{x}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\bar{x} - x_i)^2}{n(n-1)}} = \frac{\sigma_x}{\sqrt{n}}$$

待测物理量处于区间 $[\bar{x} - \sigma_{\bar{x}}, \bar{x} + \sigma_{\bar{x}}]$ 内的概率为 0.683。

物理实验中,置信度一般取作 0.95,这时 t 分布相应的置信区间可写为:

表 1-1 t 分布的置信区间表

n	3	4	5	6	7
$\frac{t_{0.95}}{\sqrt{n}}$	2.48	1.59	1.24	1.05	0.926

一般,我们取测量次数为 6 次。

5.7 测量结果的不确定度表示

概念:不确定度 u 是由于测量误差存在而对被测量值不能确定的程度。

意义:不确定度是一定置信概率下的误差限值,反映了可能存在的误差分布范围。置信概率一般取 0.95。

组成:

A 类分量 ΔA : 可以用统计学方法估算的分量,一般指随机误差。

测量次数很大时: $\Delta A = 2\sigma_{\bar{x}} = \frac{2}{\sqrt{n}}\sigma_x$

测量次数不大时: $\Delta A = \frac{t}{\sqrt{n}}\sigma_x$

B 类分量 ΔB : 不能用统计学方法估算的分量,一般指系统误差。若不特别说明

$$\Delta B = \frac{\text{仪器允差}}{c}$$

c 叫置信因子,置信度取 0.95 时, $c=1.05$

合成方法:

$$u_x = \sqrt{\Delta A^2 + \Delta B^2}$$

相对不确定度:

$$u_m = \frac{u_x}{x} \times 100\%$$

结果表示:

$$\begin{cases} x = \bar{x} \pm u_x \\ u_m = \frac{u_x}{x} \times 100\% \end{cases}$$

注意:

(1) 平均值有效数字位数不要超过测量值的有效数字。

(2) 不确定度和相对不确定度保留 1~2 位有效数字。

(3) 不确定度的最后一位数字要和平均值的对齐。

例:

$$\begin{cases} x = (10.800 \pm 0.02) \text{ cm} \\ u_m = 0.08\% \end{cases} \quad \begin{cases} x = (10.80 \pm 0.02) \text{ cm} \\ u_m = 0.2\% \end{cases}$$

$$\begin{cases} x = (10.800 \pm 0.123) \text{ cm} \\ u_m = 1.11\% \end{cases} \quad \begin{cases} x = (10.80 \pm 0.12) \text{ cm} \\ u_m = 1\% \end{cases}$$

测量错误:

$$\begin{cases} x = (10.800 \pm 0.02) \text{ cm} \\ u_m = 0.02\% \end{cases} \quad \begin{cases} x = (10.80 \pm 0.12) \text{ cm} \\ u_m = 1\% \end{cases}$$

5.8 直接测量量不确定度估算过程与表示

- (1) 求测量数据的平均测量值,判断有无应当剔除的异常数据,如有,剔除后重新计算。
- (2) 用已知系统误差修正平均值。
- (3) 计算标准差。
- (4) 标准差乘以与 0.95 置信度对应的系数得到。
- (5) 根据仪器允差确定。
- (6) 合成不确定度。
- (7) 表示测量结果。

5.9 直接测量不确定度计算举例

例 1: 用螺旋测微计测某一钢丝的直径,6 次测量值 L_i 分别为: 0.249, 0.250, 0.247, 0.251, 0.253, 0.250; 同时读得螺旋测微计的零位为: +0.004, 单位 mm, 已知螺旋测微计的仪器允差为: $\Delta_{\text{仪}}=0.004\text{mm}$, 请给出完整的测量结果。

解: $\bar{L}=(\sum L_i)/n=0.250(\text{mm})$ 没有异常数据,不用剔除,考虑到零位修正

$$\bar{L}=0.250-0.004=0.246(\text{mm})$$

$$\sigma_L=\sqrt{\sum (\bar{L}-L_i)/(n-1)}=0.002(\text{mm})$$

$$\Delta A=\frac{t_{0.95}}{\sqrt{n}}\sigma_n=1.05\approx 0.002(\text{mm}) \quad \Delta B=\frac{\Delta_{\text{仪}}}{1.05}\sigma_n\approx 0.004(\text{mm})$$

$$u_L=\sqrt{\Delta A^2+\Delta B^2}\approx 0.004(\text{mm}) \quad u_{L\%}=\frac{u_L}{L}\times 100\%=2\%$$

测量结果表示为

$$\left\{ \begin{array}{l} L=0.246\pm 0.004(\text{mm}) \\ u_{L\%}=2\% \end{array} \right.$$

5.10 间接测量不确定度的计算

设待测量与各直接测量之间有函数关系:

$$x=f(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n)$$

则待测量的平均值可直接用各量平均值计算待测量的不确定度与各直接测量量的不确定度的关系为:

$$(1) u_x=\sqrt{\sum_i \left(\frac{\partial f}{\partial x_i} u_{xi}\right)^2} \quad \text{计算和差形式方便}$$

$$(2) \frac{u_x}{x}=\sqrt{\sum_i \left(\frac{\partial \ln f}{\partial x_i} u_{xi}\right)^2} \quad \text{计算乘除指数形式方便}$$

常用公式	$x=x_1+x_2$	$u_x=\sqrt{u_{x1}^2+u_{x2}^2}$
	$x=x_1x_2$ 或 x_1/x_2	$u_x=\sqrt{u_{x1}^2+u_{x2}^2}$
	$x=x_1^k x_2^m$	$u_x=\sqrt{(ku_{x1})^2+(mu_{x2})^2}$

同学们可以用偏微分知识自己推导这些公式。

5.11 间接测量的不确定度合成过程

- (1) 求出各直接测量量的平均值和不确定度(加减)或相对不确定度(乘除、指数)。
- (2) 根据公式合成不确定度或相对不确定度,利用平均值并求出相对不确定度或不确定度。
- (3) 用各量的平均值求出间接测量量的平均值。

(4)表示测量结果。

5.12 间接测量量的不确定度合成举例

例 2: 已测得金属环的外径 $D_2=3.600\pm0.004\text{cm}$

内径 $D_1=2.880\pm0.004\text{cm}$

高度 $h=2.575\pm0.004\text{cm}$

求体积的测量结果。

解:

$$\text{求环体积平均值 } \bar{V} = \frac{\pi}{4} (\bar{D}_2^2 - \bar{D}_1^2) h = 9.36 (\text{cm}^3)$$

推导不确定度合成公式

$$\begin{aligned} u_V &= \sqrt{\sum_i \left(\frac{\partial f}{\partial x_i} u_{x_i} \right)^2} = \sqrt{\left(\frac{\partial f}{\partial D_1} u_{D_1} \right)^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial D_2} u_{D_2} \right)^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial h} u_h \right)^2} \\ &= \frac{\pi}{4} \sqrt{(2D_1 h u_{D_1})^2 + (2D_2 h u_{D_2})^2 + [D_2^2 + D_1^2 u_h]^2} = 0.080 (\text{cm}^3) \end{aligned}$$

$$\text{求相对不确定度 } u_{rV} = \frac{u_V}{V} = 0.8\%$$

$$\text{结果表示 } \begin{cases} V = 9.436 \pm 0.080 (\text{cm}^3) \\ u_{rV} = 0.8\% \end{cases}$$

6. 数据处理的作图法逐差法最小二乘法

6.1 作图法处理实验数据

作图法可形象、直观地显示出物理量之间的函数关系,也可用来求某些物理参数,因此它是一种重要的数据处理方法。作图时要先整理出数据表格,并要用坐标纸作图。

作图步骤: 实验数据列表如 1-2。

表 1-2 伏安法测电阻实验数据

U (V)	0.74	1.52	2.33	3.08	3.66	4.49	5.24	5.98	6.76	7.50
I (mA)	2.00	4.01	6.22	8.20	9.75	12.00	13.99	15.92	18.00	20.01

(1)选择合适的坐标分度值,确定坐标纸的大小坐标分度值的选取应能基本反映测量值的准确度或精密度。

根据表 1-2 数据 U 轴可选 1mm 对应于 0.10V, I 轴可选 1mm 对应于 0.20mA, 并可定坐标纸的大小(略大于坐标范围、数据范围)约为 130mm×130mm。

(2)标明坐标轴。用粗实线画坐标轴,用箭头标轴方向,标坐标轴的名称或符号、单位,再按顺序标出坐标轴整分格上的量值。

(3)标实验点。实验点可用“x”、“#”、“*”等符号标出(同一坐标系下不同曲线用不同的符号)。

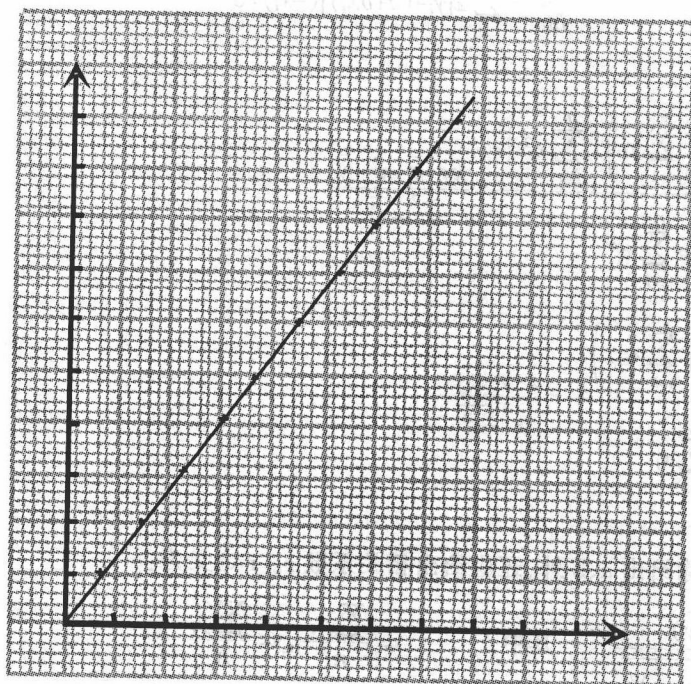
(4)连成图线。用直尺、曲线板等把点连成直线、光滑曲线。一般不强求直线或曲线通过每个实验点,应使图线两边的实验点与图线最为接近且分布大体均匀。图线正穿过实验点时可以在点处断开。

(5)标出图线特征。在图上空白位置标明实验条件或从图上得出的某些参数。如利用所绘直线可给出被测电阻 R 大小,从所绘直线上读取两点 A、B 的坐标就可求出 R 值。

6.2 标出图名

在图线下方或空白位置写出图线的名称及某些必要的说明。

至此一张图才算完成。



6.3 逐差法

(1) 意义: 在多次测量下算术平均值更接近真值。

(2) 条件: ①两个物理量之间最简单的函数关系为线性关系。

$$\text{即 } Y=a+bx$$

②由 $x(\Delta x)$ 等间距的变化而引起 $y(\Delta y)$ 的线性变化。

(3) 方法: n 为偶个测量值, 即 $y_1, y_2, y_3, y_4, y_5, y_6, \dots, y_n$

则分两组: $y_1, y_2, y_3, y_4, y_5, \dots, y_{n/2}$

$$y_{n/2+1}, \dots, y_n$$

$$\overline{\Delta y} = \frac{[(y_{n/2+1} - y_1) + \dots + (y_n - y_{n/2})]}{n/2}$$

n 为奇数个测量值, 即 $y_1, y_2, y_3, y_4, y_5, y_6, \dots, y_n$

则分两组: $y_1, y_2, y_3, y_4, y_5, \dots, y_{n/2}$

$$y_{n/2+1}, \dots, y_n$$

$$\overline{\Delta y} = \frac{[(y_{n/2+1} - y_1) + \dots + (y_n - y_{n/2})]}{n-1/2}$$

6.4 最小二乘法直线拟合

设此两物理量 x, y 满足线性关系 $y=a+bx$

等精度地测得一组互相独立的实验数据

$$\{x_i, y_i\} \quad i=1, \dots, n$$

当所测各 y_i 值与拟合直线上的 $a+bx_i$ 之间偏差的平方和最小, 即 $Q = \sum_{i=1}^n [y_i - (a+bx_i)]^2$ 最小时, Q 叫残差, 所得系数 a, b 最好拟合公式即为最佳经验公式。

$$\frac{\partial Q}{\partial a} = \sum_{i=1}^n 2[y_i - (a+bx_i)](-1) = 0$$