



创新性物理实验 设计与应用

汪 静 迟建卫 等 编著



科学出版社

创新性物理实验 设计与应用

汪 静 迟建卫 等 编著



科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书是为大学物理实验的较高层次的实验训练,培养学生运用物理实验知识和技能解决实际问题 and 独立从事科学研究工作而设计的. 为此,本书各实验与传统的“测量性验证性实验”不同,没有详细的实验步骤,只有实验背景及方法介绍、一系列的问题、实验要求和参考材料. 学生要在查找和阅读参考材料的基础上回答这些问题,才能明确实验原理并设计实验来完成实验的要求. 通过这样的实验训练,学生能深入理解物理原理,提高学习能力、实践应用能力、研究创新能力.

本书包含两类共 29 个实验项目,适合大学本科二年级到四年级学生阅读使用,适用于应用物理学专业及其他理工科各专业. 每个实验需要的学时数从三学时到一学期,实验的要求从初步学习如何设计实验到研究一个全新的课题. 其中,“物理实验设计与应用”特别注重运用物理实验知识与技术的应用,激发学生学习兴趣,培养学生将知识与技能转化为解决实际问题的能力;“物理实验创新研究”带有一些科学研究的性质,要求学生完成一个有创新意义的交叉性研究课题,培养学生独立从事科学研究能力. 本书在第 1 章较为详细地介绍了物理实验研究方法,使学生更好地完成实验研究.

本书也可以作为研究生和相关研究人员的参考书.

图书在版编目(CIP)数据

创新性物理实验设计与应用/汪静等编著. —北京:科学出版社, 2015. 1
ISBN 978-7-03-042850-9

I. ①创… II. ①汪… III. ①物理学-实验 IV. ①O4-33

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2014)第 305017 号

责任编辑:昌 盛 王 刚 / 责任校对:钟 洋
责任印制:徐晓晨 / 封面设计:迷底书装

科 学 出 版 社 出 版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码: 100717

<http://www.sciencep.com>

北京厚诚则铭印刷科技有限公司 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2015 年 1 月第 一 版 开本: 720×1000 1/16

2015 年 7 月第二次印刷 印张: 15

字数: 295 000

定价: 39.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

前 言

培养大学生的创新能力是提高高等教育质量的核心问题. 创新能力是教育培养和社会实践的结果, 是人们后天形成和发展起来的一种特殊能力. 物理实验是一门实验科学, 它不仅为物理学概念和原理的建立做出了贡献, 更重要的是, 它体现了人类社会的创新发展过程和创新成果. 大学物理实验引入高等教育已有 100 多年的历史, 在培养学生创新能力方面发挥着日益重要的作用. 物理实验实践教学是培养学生科学精神、创新能力和实践能力的重要环节.

长期以来, 大学物理实验内容基本限于验证性和测量性的, 大学物理实验教学过程中大都基于传统的模式, 包括实验的目的要求、实验原理、实验的仪器设备、实验的方法和步骤等. 学生阅读了教科书后, 只要到实验室已安排好的仪器设备上进行调整、测量、记录, 并进行适当的数据处理, 就可以得出结果, 完成实验. 虽然这样的实验教科书, 对学生初步学习如何进行物理实验、学会基本仪器的使用、加深对物理理论的了解, 都是有益的, 也是必要的. 但只有这样的实验, 对于学生解决实际问题的能力, 特别是创新能力的培养, 却是远远不够的. 令人欣喜的是, 近年来一些陆续出版的新教科书中添加了部分设计研究性物理实验项目, 但项目数有限, 且大都局限于物理学学科范围内.

本书为满足大学物理实验的较高层次的实验训练, 培养学生运用物理实验知识和技能解决实际问题 and 独立从事科学研究工作而设计. 为此, 本书各实验与传统的“测量性验证性实验”不同, 没有详细的实验步骤, 有的是实验背景及方法介绍、一系列的问题、实验要求和参考材料. 学生要在查找和阅读参考材料的基础上回答这些问题, 才能明确实验原理并设计实验来完成实验的要求. 通过这样的实验训练, 学生能深入理解物理原理, 提高学习能力、实践应用能力、研究创新能力. 本书通过科研内容提取移植、由企业生产和日常生活实际提升、由已有教学研究成果固化等多种渠道, 研究开发出一批物理与海洋、物理与生物、物理与环境等多学科交叉的实验项目, 强化设计性与应用性实验项目创新, 使实验教学内容与科研、工程、社会应用实践密切联系, 有利于培养学生的科学思维和创新意识.

本书包含两类共 29 个实验项目, 适合大学本科二年级到四年级学生, 适用于应用物理学专业及其他理工科各专业的科技创新实践活动. 每个实验需要的学时数从三学时到一学期, 实验的要求从初步学习如何设计实验到研究一个全新的课题. 其中, “物理实验设计与应用”特别注重运用物理实验知识与技术的应用, 激发学生学习兴趣, 培养学生将知识与技能转化为解决实际问题的能力; “物理实验创

新研究”带有一些科学研究的性质,要求学生完成一个有创新意义的交叉性研究课题,培养学生独立从事科学研究能力.本书在第1章较为详细地介绍了物理实验研究方法,使学生更好地完成实验研究.

本书是由大连海洋大学物理实验教学中心的部分骨干教师根据自己多年教学与科学研究成果创新性地撰写而成.汪静(第1、2章;第3章3.1、3.2、3.6、3.7;第4章4.8、4.9)、迟建卫(第3章3.3~3.5、3.8、3.9、3.12、3.14~3.16)、曲冰(第3章3.10、3.13;第4章4.1、4.2、4.13)、潘超(第3章3.11;第4章4.7、4.10、4.11、4.12)、白亚乡(第4章4.3~4.5)、胡玉才(第4章4.6),全书由汪静统筹设计与修订.

限于编者水平,书中不当之处在所难免,希望使用本书的教师、同学和其他读者批评指正.

编 者

2014年6月

目 录

前言

第 1 章 物理实验研究方法与论文写作	1
1.1 物理实验研究方法	1
1.2 论文报告的撰写	4
第 2 章 物理实验数据处理方法	6
2.1 不确定度理论在物理实验中的应用	6
2.2 计算机处理物理实验数据的方法	12
第 3 章 物理实验设计与应用	24
3.1 鱼鳞片表面微观拓扑结构的测量与分析	24
3.2 毛发形态结构及拉伸性能分析	28
3.3 霍尔元件的应用	31
3.4 磁阻传感器与地磁场测量	36
3.5 可控硅调光灯设计	42
3.6 光盘表面沟槽结构润湿性研究	46
3.7 复制光栅的制作及光栅常数的测量	50
3.8 太阳镜的设计与应用	54
3.9 海水折射率测量	58
3.10 燃料电池特性的测量与分析	62
3.11 太阳能电池组装与光伏特性研究	70
3.12 人耳听觉听阈的测量	83
3.13 电子温度计的设计及人体温度测量	87
3.14 压力传感器设计及心律与血压测量	93
3.15 人体反应时间测试	98
3.16 A 类超声诊断与探伤	101
第 4 章 物理实验创新研究	110
4.1 光密度法测量微藻生物量的实验研究	110
4.2 强电磁场环境对水体的理化特性的影响	116
4.3 高压电场干燥特性研究	125
4.4 高压脉冲电场干燥预处理海参实验研究	136
4.5 高压静电场保鲜海虾的实验研究	146

4.6	水生生物强电场环境生物效应研究	154
4.7	高压静电纺丝法制备纳米纤维的实验研究	160
4.8	胶体光子晶体的制备与光特性研究	175
4.9	仿生微纳米表面的制备与表征	184
4.10	纳米 TiO_2 光触媒制备及抗菌特性研究	192
4.11	纳米 MnO_2 电极材料制备及电容性能研究	203
4.12	聚苯乙烯纳米纤维功能化及固定化生物酶的活性研究	214
4.13	仿生荷叶效应设计与表面性能研究	223
5	.....	.....
6	.....	.....
7	.....	.....
8	.....	.....
9	.....	.....
10	.....	.....
11	.....	.....
12	.....	.....
13	.....	.....
14	.....	.....
15	.....	.....
16	.....	.....
17	.....	.....
18	.....	.....
19	.....	.....
20	.....	.....
21	.....	.....
22	.....	.....
23	.....	.....
24	.....	.....
25	.....	.....
26	.....	.....
27	.....	.....
28	.....	.....
29	.....	.....
30	.....	.....
31	.....	.....
32	.....	.....
33	.....	.....
34	.....	.....
35	.....	.....
36	.....	.....
37	.....	.....
38	.....	.....
39	.....	.....
40	.....	.....
41	.....	.....
42	.....	.....
43	.....	.....
44	.....	.....
45	.....	.....
46	.....	.....
47	.....	.....
48	.....	.....
49	.....	.....
50	.....	.....

第1章 物理实验研究方法 with 论文写作

物理学是以实验为本的科学. 在物理学发展过程中, 科学实验起到了十分重要的作用. 所谓实验是人们根据研究的目的, 运用科学仪器, 人为地控制、创造或纯化某种自然过程, 使之按预期的进程发展, 同时在尽可能减少干扰的情况下进行观测(定量的或定性的), 以探求该自然过程变化规律的一种科学活动. 物理实验是一门实验科学, 它不仅为物理学概念和原理的建立做出了贡献, 更重要的是, 它体现了人类社会的创新发展过程和创新成果. 大学物理实验引入高等教育已有 100 多年的历史, 在培养学生创新能力方面发挥着日益重要的作用.

研究性实验是模拟科学研究的过程进行的实验. 在一定意义上说, 一次研究性实验的过程就是一次科学研究的过程. 科学研究并没有一成不变的方法. 有些人埋头做科学实验, 通过细心观察发现了新的现象, 如伦琴发现 X 射线; 有些人按照概念做实验, 如居里夫人从大量的矿石里面提炼出放射性元素镭; 有些人通过广泛收集资料和观察, 悟出一些规律, 如达尔文的进化论; 也有些人提出了一些新概念, 如麦克斯韦的电磁场理论和爱因斯坦的相对论; 还有一些人是把不同的学科组织联系起来, 如维纳提出来的控制论. 本书力求引导和启发学生通过实验来学会如何剖析实验问题, 制定最佳实验方案, 独立操作, 培养文献检索、科技写作与团队精神等综合素质和能力, 并留给一些具有启发性的、开扩视野和思路的问题.

1.1 物理实验研究方法

1. 什么是科学研究

科学研究是人们为了建立、填补和完善某一领域(如自然、社会、思维等)客观规律的科学知识体系而进行的活动和工作. 科学研究的目的是要发展和深化人类的认识过程, 发现客观世界的某一本质的规律, 发明创造物质财富的方法和手段. 科学研究必须有一个新的结果作为衡量, 这个新的结果可能是新的发现, 可能是新的理论, 可能是新的方法, 也可能是一种器械或者是一种材料等. 总而言之, 科学研究就要求我们在前人研究基础上有所创新.

2. 科学研究具有客观性、创新性、多学科综合与交叉性

科学研究的客观性就是实事求是、尊重客观事实.

科学研究的目的是要有所创新,没有创新就没有科学进步.科学研究的创新应包括:①原创性的发现和发明,即发现前人未曾发现过的现象、规律,创造出别人还没有做出的新事物、新方法;②对原创性创新的整理和归纳,这种整理和归纳对于科学发展所做的贡献不亚于原创性的发现和发明,例如,门捷列夫正是在整理元素周期表的过程中发现元素周期律,并由此预言了新元素的存在及其性质;③原创性创新知识的集成和运用,知识创新成果的创造性传播、转化和规模产业化,也是一种很重要的创新,而且是一种把知识变成力量和物质财富的创新.弗兰西斯·培根说“知识就是力量”,但是如果没有这种运用和转化,知识就永远只是知识而已.

科学研究具有多学科综合与交叉性.科学发展到今天,出现了高度分化和高度综合的两种不同的趋势,各门学科纵横交错、联系紧密,于是在当代科学研究中表现出学科交叉的综合研究的特点.

3. 科学发展的一般顺序

(1)由科学思想形成的概念定义出一个确定的物理量;

(2)由此进一步确定此物理量的实验测定方法、仪器装置、实验配方等,从而得到大量的实验结果;

(3)总结这些实验结果,得出经验关系或定理;

(4)从理论上分析说明这些经验关系的本质,力求从理论上得出与实验结果相符的该物理量的计算方法,即人们一般所说的不仅要知其然还要知其所以然.

4. 物理实验研究的基本程序

对于一个具体的研究课题,从开始选题到研究工作结束,整个过程必须按照一定的程序进行.不过科学实验过程中的许多工作都要经过反复修改甚至推翻重来的,即通过实践、修正、实践的多次反复,不断加以完善.

(1)确定研究课题.

选题不仅要有科学性、创新性、实用性,还要考虑实现的可能性.研究性实践活动的课题往往都是指导教师给定的,不仅要求教师把握科学需求和研究趋势,还要注意课题的难度,过难或过易的研究课题都可能给学生的研究性实践活动带来不利的影响.不过,该环节一般与调研环节是强耦合的,调研的结果可能会进一步修正研究课题的具体任务.

(2)课题调研.

针对给定的研究课题,通过实地或查阅文献等调查研究,回答下述问题:在该课题上国内外有哪些研究者,已经做了哪些工作,这些工作如何分类、有何优缺点,当前最好的方法已经做到了什么程度,还有什么问题没有解决,目前的发展趋势是什么等.这是科学研究中至关重要的一环.如果调研上出了问题,就会导致重复了

别人的工作,或者解决了别人早已解决了的问题,或者做了远不及别人已完成的成果.在调查研究过程中,要坚持独立思考,不要被文献资料束缚了自己的思想.

在调研阶段,师生共进是非常重要的.学生有足够的时间和精力阅读大量的论文,从而能够把握更多的文献和细节,但可能因缺少全局观而判断力不足,因而难以形成有效的知识体系;而教师往往本就在相关领域具有一定的基础,而且知识体系更全面,可以形成更好的判断.因此,在这一阶段,学生与导师应该多交流,共同形成对研究方向的准确把握,从而提出真正有价值的学术问题.

(3) 制定实验方案.

实验方案是完成课题的关键,在大量调研的基础上,作出研究全过程的蓝图,选择突破口和切实可行的技术路线,包括研究理论依据,建立物理模型,选择适当类型的实验和实验方法,设计正确的测量方法和路线,恰当的选择实验仪器设备等.在实验方案中还要探究最佳实验条件.实验方案还应兼顾数据处理的方法及误差的合理估计与制定方案的关系.实验方案应具有先进性、预见性和切实可行性.请教师对实验方案进行把关,避免研究性实践活动出现大的偏差.

① 选择实验方法.

根据课题研究对象的性质与特点,收集各种可能的实验方法,在分析和比较各种实验方法的适用条件、可能达到的实验精度以及可行性和经济因素后,选择符合实验要求的最佳实验方法.

② 选择最佳测量方法.

实验方法确定后,需要选择一种最佳测量方法,最充分发挥现有仪器设备的效能,使各物理量的测量结果误差最小.

测量中,产生误差的原因是复杂的,根据误差的性质和产生的原因,将误差分为系统误差、随机误差和粗大误差三类.

粗大误差的发生是由于实验者的过于疲劳或疏忽大意,或环境条件的突然变化而引起的.对于这类误差,首先要设法判断其是否存在,然后应用相应的法则将此类误差剔除.

在相同的条件下,对同一物理量进行多次重复的等精度测量,每次测量的误差绝对值时大时小,误差时正时负,任何一次测量值的误差都是随机的,这类误差称为随机误差.对于这类误差,主要是采用等精度多次测量的方法来尽量减小其影响.对于一些等间隔、线性变化的连续序列数据的处理,则可以采用逐差法和最小二乘法等.

在一定条件下,对同一物理量进行多次重复测量时,误差的绝对值和符号保持不变,或在条件改变时按某一确定规律变化的误差,称为系统误差.系统误差的来源主要有仪器误差、方法理论误差、环境误差、个人误差等.对于系统误差,应有针对性运用各种基本测量方法予以发现和减小.要仔细观察与研究对测量原理和方

法的推演过程,检验或校准每一件仪器,分析每一个实验条件,考虑每一步调整和测量,注意每一种因素对实验的影响等。

③选用仪器设备。

根据实验目的和精度要求,选用最简单、最经济的符合要求的仪器。衡量仪器的主要技术指标是分辨率和精确度,即仪器能够测量的最小值和仪器误差。可以用误差分析来实现仪器的最佳选择。若实验中选用多种仪器,还应注意合理配套和仪器误差的合理分配。

(4)实验实施过程。

实验过程中要进行最佳实验条件的探索实验。实验中要注意运用理论指导实践,有针对性地运用各种测量方法减少实验的系统误差。在实验过程中必须严格遵守实验室规章制度和实验规程,仔细观察,认真、实事求是地记录实验数据和过程细节,养成良好的实验工作作风。

(5)结果分析与讨论。

对积累的大量实验数据进行认真的整理和综合分析。可以用表格、曲线、图解、照片等分析总结实验结果。对于主要的实验结果,通常要逐项探讨、判断分析;探讨所得结果与研究目的或假设的关系以及与他人研究结果的比较与分析;对研究结果的解释(是否符合原来的期望);重要研究结果的意义(推论)。这是由表及里,从现象到规律,从感性到理性的提炼升华过程。

(6)得出结论。

上述实验结果如果足够充分而且对比丰富,则提供了宝贵的第一手资料,足以支撑一些基本的结论。更重要的是,所谓“实践出真知”,就是这些结果和对比分析为我们提供了更为宝贵的经验,可以使我們更深刻地认识相关课题领域存在的真实问题是什么,什么样的思路可能是有效的,进而使我们可以进一步提出新问题或者新的解决思路,从而再次回到科研流程的第4个步骤上。在这样一个节点上,教师和学生的深入讨论是发现新问题、诞生新思路的法宝。

1.2 论文报告的撰写

科学论文和研究工作报告是科学研究的永久性记录和总结。通常由以下几部分组成:

1. 引言

引言(或绪论)简要说明研究工作的目的、范围、相关领域的前人工作和知识空白、理论基础和分析、研究设想、研究方法和实验设计、预期结果和意义等。引言应言简意赅,不要与摘要雷同,不要成为摘要的注释。一般教科书中已有的知识,在引言中不必赘述。比较短的论文可以只用小段文字起着引言的效用。学位论文需要反

映作者已掌握了坚实的基础理论和系统的专门知识,具有开阔的科学视野,对研究方案作了充分论证,因此有关历史回顾和前人工作的综合评述以及理论分析等,可以单独成章,用足够的文字叙述。

引言的目的是给出作者进行本项工作的原因及目的,因此应给出必要的背景材料,让对这一领域并不特别熟悉的读者能够了解进行这方面研究的意义、前人已达到的水平、已解决和尚待解决的问题,最后应用一两句话说明论文的目的和主要创新之处。

2. 正文

正文是核心部分,占主要篇幅,可以包括调查对象、实验和观测方法、仪器设备、材料原料、实验和观测结果、计算方法和编程原理、数据资料、经过加工整理的图表、形成的论点和导出的结论等。论文主体的内容应包括以下两部分:

(1)材料和方法。材料包括材料来源、性质、数量、选取和处理事项等。方法包括实验仪器、设备、实验条件、测试方法等。

(2)实验结果与分析讨论。以图或表等手段整理实验结果,进行结果的分析和讨论,包括:通过数理统计和误差分析说明结果的可靠性、可重复性、范围等;进行实验结果与理论计算结果的比较(包括不正常现象和数据的分析);实验结果部分的讨论。值得注意的是:必须在正文中说明图表的结果及其直接意义;复杂图表应指出作者强调或希望读者注意的问题。

对研究内容及成果应进行较全面、客观的理论阐述,应着重指出本研究内容中的创新、改进与实际应用之处。理论分析中,应将他人研究成果单独书写,并注明出处,不得将其与本人提出的理论分析混淆在一起。对于将其他领域的理论、结果引用到本研究领域者,应说明该理论的出处,并论述引用的可行性与有效性。

3. 结论

结论是最终的、总体的结论,不是正文中各段的小结的简单重复。结论应该准确、完整、明确、精练。如果不可能导出应有的结论,也可以在没有结论的情况下进行必要的讨论,可以在结论或讨论中提出建议、研究设想、仪器设备改进意见、尚待解决的问题等。

4. 参考文献

列出撰写论文所参考引用的主要文献,参考文献应按照论文中引用出现的顺序列出,并加以序号。需要注意的是,教材、产品说明书、各类标准、各种报纸上刊登的文章及未公开发表的研究报告等通常不宜作为参考文献引用;引用网上参考文献时,应注明该文献的准确网页地址。

第2章 物理实验数据处理方法

2.1 不确定度理论在物理实验中的应用

创新研究性实验的核心是设计实验方案,并在实验中检验方案的合理性.在制定实验方案时,应考虑选择合理的实验方法,选择或设计最佳测量方法和测量路线,合理挑选实验仪器设备及选择有利的测量条件.下面介绍用不确定度理论选择最佳实验方案,使测量量的相对不确定度达到最小,即达到实验方案的最优化.

一、不确定度的定义

不确定度是由于测量误差的存在而对被测量值不能肯定的程度,是用来表征被测量的真值以某种置信概率存在的范围.不确定度可分为两类分量:一类是用统计方法估计的 A 类分量 U_A ;另一类是用非统计方法估计的 B 类分量 U_B .不同的误差来源对应着不同的不确定度,设测量量 x 的不确定度来源有 k 个,则合成不确定度采用方和根合成法,即

$$U(x) = \sqrt{\sum_{i=1}^k U_i^2(x)} \quad (2.1.1)$$

式中的 $U_i(x)$ 可以是 A 类分量,也可以是 B 类分量.但值得特别注意的是,只有置信概率相同的 $U_i(x)$ 才能用上式合成,合成不确定度 $U(x)$ 的置信概率与参与合成的各分量的概率相同.

二、测量结果的正确表达与不确定度评定

(一) A 类不确定度

在相同的条件下,对某物理量 x 作 n 次独立测量,得到的 x 值为 $x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$,则测量结果的最佳值为平均值

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (2.1.2)$$

它的不确定度为

$$U_A(\bar{x}) = t \cdot \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n(n-1)}} \quad (2.1.3)$$

式中的 t 与测量次数和置信概率有关,如表 2.1.1 所示.

表 2.1.1 不同测量次数和置信概率下的 t 值

测量次数	3	4	5	6	7	8	9	10	20
$t_{0.683}$	1.32	1.20	1.14	1.11	1.09	1.08	1.07	1.06	1.03
$t_{0.95}$	4.30	3.18	2.78	2.57	2.45	2.36	2.31	2.26	2.09
$t_{0.95}/\sqrt{n}$	2.48	1.59	1.20	1.05	0.93	0.83	0.77	0.72	0.47

从表 2.1.1 中可以看出,当测量次数较多且置信概率为 0.683 时, $t \approx 1$, 所以在一些普通物理实验教材中,为了简便,通常取 $t=1$, 即 $U_A(\bar{x}) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n(n-1)}}$; 此时表示测量范围 $[\bar{x} - U_A(\bar{x}), \bar{x} + U_A(\bar{x})]$ 中包括真值的概率为 68.3%.

此外,当测量次数 $6 \leq n \leq 10$, 且置信概率为 0.95 时, $t_{0.95}/\sqrt{n} \approx 1$, 所以在一些物理实验教材中,通常取 $t_{0.95}/\sqrt{n} = 1$, 即 $U_A(\bar{x}) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{(n-1)}}$. 此时测量范围 $[\bar{x} - U_A(\bar{x}), \bar{x} + U_A(\bar{x})]$ 扩大,真值处于此范围的概率为 95%.

(二) B 类不确定度

对某物理量 x 进行单次测量,则 B 类不确定度由测量不确定度 U_{B1} 和仪器不确定度 U_{B2} 两部分组成. 测量不确定度 U_{B1} 是由估读引起的,通常取仪器分度值的 $\frac{1}{10}$ 、 $\frac{1}{5}$ 、 $\frac{1}{2}$, 视具体情况而定. 仪器不确定度 U_{B2} 是由仪器本身的特性决定的,它定义为

$$U_{B2} = K_P \frac{\Delta_{\text{ins}}}{C} \quad (2.1.4)$$

式中, Δ_{ins} 为仪器说明书上给出的不确定度限值(即最大误差); K_P 为一定置信概率下相应分布的置信因子; C 为相应分布的置信系数. 仪器不确定度 U_{B2} 的概率分布通常有正态分布、均匀分布、三角分布等. 如果仪器说明书上只给出 Δ_{ins} , 而没有关于不确定度概率分布的信息,一般按均匀分布处理. 此时,当置信概率为 0.683 时, $U_{B2} = \Delta_{\text{ins}}/\sqrt{3}$; 当置信概率为 0.95 时, $U_{B2} \approx \Delta_{\text{ins}}$.

一般来说,多数仪器或量具都有生产厂家或计量机构按照国家标准给出的精确度等级或允许的误差范围,有的标明在仪器上,其不确定度限值可直接查出或由仪器的级别算出.

例如,通用游标卡尺的分度值有 0.02mm 和 0.05mm 两种,其仪器不确定度限值就分别取 $\pm 0.02\text{mm}$, $\pm 0.05\text{mm}$;电表的不确定度限值为 $A_m \cdot a\%$,其中 A_m 为使用 m 挡的量程, a 为电表的精度等级.电表一般分为 0.1, 0.2, 0.5, 1.0, 1.5, 2.5 和 5.0 七个级别,数值越大精度越低.对于没有标定的测量仪器,其仪器不确定度限值取最小刻度的一半,甚至还可以根据实际情况再作估计.对于数字显示的仪器,其仪器不确定度限值取最小分度值.

(三) 不确定度的合成

由正态分布、均匀分布、三角分布所求得直接测量量不确定度可以按如下规则合成.

1. 多次测量量的不确定度合成

在相同条件下,对 x 进行多次测量时,待测量 x 的不确定度 $U(x)$ 由 $U_A(x)$ 和仪器不确定度 U_{Bz} 合成,即

$$U(x) = \sqrt{U_A^2(x) + U_{\text{Bz}}^2(x)} \quad (2.1.5)$$

2. 单次测量量的不确定度合成

对 x 进行单次测量时,待测量 x 的不确定度 $U(x)$ 由测量不确定度 $U_{\text{B1}}(x)$ 和仪器不确定度 U_{Bz} 合成,即

$$U(x) = \sqrt{U_{\text{B1}}^2(x) + U_{\text{Bz}}^2(x)} \quad (2.1.6)$$

(四) 不确定度的传递

在很多实验中,进行的测量是间接测量.间接测量的结果是由直接测量量根据一定的数学公式计算出来的.这样一来,直接测量量的不确定度就必然要传递到间接测量结果.若 $y = f(x_1, x_2, x_3, \dots, x_N)$, 且各 x_i 相互独立,则测量结果 y 的绝对不确定度传递公式为

$$U(y) = \sqrt{\sum_{i=1}^N \left(\frac{\partial f}{\partial x_i} \right)^2 U^2(x_i)} \quad (2.1.7)$$

测量结果 y 的相对不确定度传递公式为

$$\frac{U(y)}{y} = \sqrt{\sum_{i=1}^N \left(\frac{\partial \ln f}{\partial x_i} \right)^2 U^2(x_i)} \quad (2.1.8)$$

如果函数形式是若干个直接测量量相加减,则先计算间接测量量的绝对不确定度比较方便;如果函数形式是若干个直接测量量相乘除,则先计算间接测量量的相对不确定度比较方便.常用函数的不确定度传递公式如表 2.1.2 所示.

表 2.1.2 常用函数的不确定度传递公式

函数表达式	不确定度传递公式
$y = x_1 \pm x_2$	$U(y) = \sqrt{U^2(x_1) + U^2(x_2)}$
$y = x_1 \cdot x_2$ $y = x_1 / x_2$	$\frac{U(y)}{y} = \sqrt{\left(\frac{U(x_1)}{x_1}\right)^2 + \left(\frac{U(x_2)}{x_2}\right)^2}$
$y = kx$ (k 为常数)	$U(y) = kU(x)$
$y = x^n$	$\frac{U(y)}{y} = n \frac{U(x)}{x}$
$y = \sqrt{x}$	$\frac{U(y)}{y} = \frac{1}{n} \frac{U(x)}{x}$
$y = \sin x$	$U(y) = |\cos x| U(x)$
$y = \cos x$	$U(y) = |\sin x| U(x)$
$y = e^x$	$U(y) = e^x U(x)$
$y = \ln x$	$U(y) = \frac{U(x)}{x}$

三、测量结果的不确定度评定步骤

1. 直接测量量的不确定度评定步骤

(1) 修正测量数据中的可定系统误差;

(2) 计算多次测量列的算术平均值 $\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i$, 将其作为测量结果的最佳值; 对于单次测量, $x_{\text{测}}$ 即为测量结果的最佳值;

(3) 计算测量列中单次测量值的标准偏差 $s_D = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{(n-1)}}$, 审查各测量值, 剔除坏值, 然后对余下的测量值再求算术平均值 $\bar{x}$ 和单次测量值的标准偏差 s_D ;

(4) 计算不确定度 $U(x)$;

(5) 写出最终测量结果, 多次测量: $x = \bar{x} \pm U(x)$ (单位), 单次测量: $x = x_{\text{测}} \pm U(x)$ (单位); 相对不确定度 $E(x) = \frac{U(x)}{x} \times 100\%$, 注明置信概率 P .

2. 间接测量量的不确定度评定步骤

(1) 按照直接测量量不确定度评定的步骤, 计算出各直接测量量的不确定度 $U(x_1), U(x_2), U(x_3), \dots, U(x_n)$;

(2) 计算间接测量量的最佳值 $\bar{y} = f(\bar{x}_1, \bar{x}_2, \bar{x}_3, \dots, \bar{x}_N)$;

(3) 计算不确定度 $U(y)$;

(4) 写出最终测量结果, $y = \bar{y} \pm U(y) = f(\bar{x}_1, \bar{x}_2, \bar{x}_3, \dots, \bar{x}_N) \pm U(y)$; 相对不确定度 $E(y) = \frac{U(y)}{\bar{y}} \times 100\%$, 注明置信概率 P .

四、分析确定最有利的测量条件

所谓最有利条件是指按该条件测量,能使间接测量量的不确定度为最小.由

$U(y) = \sqrt{\sum_{i=1}^N \left(\frac{\partial f}{\partial x_i}\right)^2 U^2(x_i)}$ 知,要使间接测量量的不确定度最小,则应使各传递系数 $\frac{\partial f}{\partial x_i}$ 都达到最小.实际测量中,应尽可能使对总不确定度贡献最大的主要传递系数减小.当各个主要传递系数都减小到最小限度时,即满足了最有利的测量条件.

五、分析和选择实验方案与测量方法

在间接测量中,每个独立测量量的不确定度都会对最终结果的不确定度有贡献,因此可用它来分析各独立的直接测量量值的不确定度对间接测量量结果的不确定度的影响,从而为最佳实验方案提供理论的依据.

对于同一个研究对象,当实验室可提供不同的实验条件设备时,可根据已有的实验设备设计出若干个不同的实验方案,为了使测量的最终结果最接近真值,也可根据不确定度的概念选择测量不确定度最小的方案为最佳方案.

例 2.1.1 若需测量某一电阻上所消耗的功率时,可采用如下三个方案:

(1) 直接测量 I, u , 可由公式 $P = Iu$ 计算;

(2) 直接测量 u, R , 可由公式 $P = \frac{u^2}{R}$ 计算;

(3) 直接测量 I, R , 可由公式 $P = I^2 R$ 计算.

当实验室配用电流表、电压表、电阻的相对不确定度分别为 $E(u) = 0.5\%$, $E(I) = 1.0\%$, $E(R) = 1.5\%$ 时,问采用哪种方案最好?

解 由间接测量量的相对不确定度传递公式计算得

$$(1) E(P_1) = \sqrt{\left(\frac{U(I)}{I}\right)^2 + \left(\frac{U(u)}{u}\right)^2} = \sqrt{E^2(I) + E^2(u)} = 1.1\%$$

$$(2) E(P_2) = \sqrt{\left(\frac{U(R)}{R}\right)^2 + \left(2 \frac{U(u)}{u}\right)^2} = \sqrt{E^2(R) + 4E^2(u)} = 1.8\%$$

$$(3) E(P_3) = \sqrt{\left(\frac{U(R)}{R}\right)^2 + \left(2 \frac{U(I)}{I}\right)^2} = \sqrt{E^2(R) + 4E^2(I)} = 2.5\%$$

可见,在给定的实验条件下选用实验方案(1),通过测电压和电流来求功率,可使测量结果的不确定度最小,其测量结果最可靠.

六、挑选测量仪器

物理模型确定后,相应的函数关系 $y = f(x_1, x_2, x_3, \dots, x_N)$ 就确立了. 根据函