

新概念

朱鹤年 编著 肖志刚 主审

# 基础物理 实验讲义

清华大学出版社

013952235

04-33  
604

# 新概念

# 基础物理 实验讲义

朱鹤年 编著



04-33  
604

清华大学出版社  
北京



北航 C1656123

013025282

## 内 容 简 介

本书主要面向物理与应用物理专业基础物理实验课程的教学,可作为一般大学物理实验课的参考书。全书分两篇,第1篇4章用全新的视角阐述了实验数据分析与经验证据评估的基础知识,融入了作者41年来从事设备仪器设计与计量学研究的心得与成果,总结了29年来负责物理实验教学独特体会与教学经验。这4章可作为误差理论与数据处理等相关课程的参考书,对仪器科学或测量技术方面的专业人员来说也有较多的新颖论述与方法可供借鉴。本书第2篇为积木式组合实验,第5~7章分别是以力学与热学、电磁学及热电传感器、光学及部分近代物理学实验为主体内容的积木式实验,共25组。大多数组合实验既有基础性内容,又含研究性、探索性内容。学生以基础实验的仪器为主体、选配实验室常用的仪表器具,自行架构积木式装置,选择、设计并完成组合实验任务。

本书得到2010年北京市教委重大支持项目的出版资助。

版权所有,侵权必究。侵权举报电话:010-62782989 13701121933

### 图书在版编目(CIP)数据

新概念基础物理实验讲义/朱鹤年编著.--北京:清华大学出版社,2013

ISBN 978-7-302-31752-4

I. ①新… II. ①朱… III. ①物理学—实验—高等学校—教学参考资料 IV. ①O4-33

中国版本图书馆CIP数据核字(2013)第055247号

责任编辑:朱红莲

封面设计:傅瑞学

责任校对:赵丽敏

责任印制:杨艳

出版发行:清华大学出版社

网 址: <http://www.tup.com.cn>, <http://www.wqbook.com>

地 址:北京清华大学学研大厦A座 邮 编:100084

社总机:010-62770175 邮 购:010-62786544

投稿与读者服务:010-62776969, [c-service@tup.tsinghua.edu.cn](mailto:c-service@tup.tsinghua.edu.cn)

质 量 反 馈:010-62772015, [zhiliang@tup.tsinghua.edu.cn](mailto:zhiliang@tup.tsinghua.edu.cn)

印 刷 者:北京富博印刷有限公司

装 订 者:北京市密云县京文制本装订厂

经 销:全国新华书店

开 本:185mm×260mm 印 张:18 字 数:435千字

版 次:2013年6月第1版 印 次:2013年6月第1次印刷

印 数:1~3000

定 价:38.00元

产品编号:037038-01



本书主要面向物理与应用物理专业基础物理实验课程的教学,笔者负责的课程是基础(普通)物理实验的首批国家级精品课之一,本书也部分反映了清华物理系复系 30 多年来该课程建设的理念与经验。

## 1. 关于书名

基础物理实验的课程名称,是早些年物理学教学指导委员会(原名理科物理教材编审委员会)提议的较规范的表述,用以取代内容已被拓展的“普通物理实验”。2011 年颁布的《高等学校物理学本科指导性专业规范》中阐述的定义有了进一步拓展:“基础物理实验由普通物理实验和近代物理实验组成。”目前北京大学、复旦大学等大致相应于普通物理实验内容的教材仍在沿用“基础物理实验”之称。将本书取名“讲义”,一是延续清华物理系复系后所用内部教材的名称,本书是首次正式出版的课程完整教材;二是书中讲“义”的比重较大,是有别于其他实验教程的特色。以讲义为书名,无自降自贬之义,存求新求精之心。

定语“新概念”想表达两重含义。本书第 1 篇是“实验数据分析与经验证据评估”,阐述了经验证据评估在科学中的作用。笔者摘引了《Science》主编 Alberts B. 于 2011 年 1 月在《Science》上发表的文章,力图说明:对经验证据获取、经验证据评估的知识学习与经验积累,是相辅相成的两个方面;掌握对科学本质的真正理解,获得关于产生和评估科学证据及其解释的经验,“这两点才是现代意义下‘科学教育’核心的要素”。本篇用新的视角撰写了相关内容,结合计量学与实验物理学的研究提出了多个具体的新判据、新方法、新命题或新的表述整合。

本书第 2 篇“积木式组合实验”中,每组实验都包括基础性实验内容,因为一定数量的“按菜谱炒菜式”的实验训练对大多数中国学生来说还是很有必要的。多数组合实验都包含多个带探索性内容的层次,这些层次与基础性实验内容相关,用实验室的基本仪表器具作积木式组合来完成。在基础物理实验课程建设中,这一教学模式是对国内外众多教学改进模式的一种新补充,也是相对于追求仪器高档化、频更新潮流的一个新对照。这是书名定语的第二重含义。

## 2. 对课程目标的多重表述以及对独立设课模式的讨论

对于课程定位,有多种各具特色的表述:(1)物理学教学指导委员会在 2011 年颁布的物理学、应用物理学本科指导性专业规范文件中,作了颇为简洁、中肯、恰当的表述,突出体现了课程的基础性、物理性与实践性,也强调了课程的重要性。规范中说:包括基础物理实验、专业物理实验在内的整个“实验课程是实验技能与科学研究能力培养的一个主要载体”;规范指出:实验技能、科研能力的培养是本科教学内容中实践体系整体的任务,创新能力培

养应该渗透在所有课程的教学和实践环节中。(2) Meiners H. F. 在《Laboratory physics》的第2版中对工科物理实验目的的概括我也比较欣赏,他的前两项表述是“A. 通过实际的实验引导学生理解领会物理实验方法的重要性; B. 将教科书的理论运用到实际问题之中,以加深对近代与经典物理学基本概念的理解”。(3)《Science》主编 Alberts B. 的文章中,把“加深对科学本质的理解”、“积累获取及评估经验证据的经验”作为现代大学自然科学教育特别是自然科学实验课程教学的核心任务(详见第1章),这一论述对本书的影响大。还有两类值得探讨的课程定位表述:(4)有的工科大学物理实验课的基本要求表述过于突出课程在科学实验能力、创新能力培养中的作用,在“本课程的具体任务”的大段表述中见不到“物理”二字,主要表述为培养基本科学实验技能、培养科学思维和创新意识、提高科学素养三点,对基础教学与科学实验间的划界有所模糊,对课程作用的表述偏高偏泛。作为重要基础课的物理实验只是大学人材培养中的一个环节,难以承受“最重要课程”或“首要显示窗口”之重负,基础课程对一些“创造性”教学环节的表述要避免作用拔高、内容泛化的现象。(5)有的实验室在宣传回归基础性方面优点明显,但口号只提知识传授、技能训练、作风培养等,类似于历史文化中让学生被传道、被授业的表述,略偏泛而看不出自然科学高等教育的特征。还有一些适度回避课程定位描述的聪明做法:例如有的课程不作明确的定位描述或提炼而重视实际的有特色的内容架构与教学过程,也有的课程定位表述看起来略带片面性而实际教学过程恰当、丰富并卓有成效。

从国家中长期教育发展纲要中可看出,培养数以千万计的高素质专门人才被看作高等教育任务之重点,同时要培养一大批拔尖创新人才。这一提法对课程建设有指导意义。15年来,我们曾多次强调基础物理实验课程的“四性”:基础性、物理性、实践性与相对稳定性。在绪论课中表述课程的任务是:(1)学习物理实验的基础知识,包括数据处理分析的基础知识,训练基本实验技能;(2)验证或加深理解物理理论,也通过一些实验环节学习理论知识,增强物理理论一般以观察与实验为重要基础的观念;(3)学习实验设计的初步知识,重视实验物理学方法的教学内容,重视科学哲学方面的教育与熏陶环节。这里提的任务(1)是遵循一般教学规律,回归课程的传统目标;任务(2)是力图突出学科特点,注意弱化传统文化的影响;任务(3)是基于本校研究型大学的育人定位,开展初步的探索性、研究性教学。

笔者与一些同行都把30年来基础物理实验单独设课看作是适合国情的改进,是展现实验物理学自身规律、专门方法及特有魅力的好方法,是纠正传统文化中轻视实验实践、缺失科学理性倾向的好机会,也是部分解决目前中学实验能力培养普遍有所欠缺问题的好条件。在与现行课程有交错或相近的内容方面,清华大学物理系在20世纪30年代虽然有4门物理课是讲课与实验各为周学时3,但另有7门单独设课的基础性实验课程。曾有学者提出要砍掉独立设课的基础物理实验课程,理由是皇家出版物核心教材名录中没有物理实验。笔者认为,英国A级中学实验教材的题目已涉及我国大学实验教材的多数章节,这是与国内中学教育的不同之处;基础性实验教学课程不同于专业实验课与实验物理学研究训练;虽然有10%左右的高实验素养学生厌倦“炒菜式”基础性实验,感到基础物理实验课“吃不饱”,这完全能通过因材施教来改进,而不一定砍掉面向90%学生的整体课程设置。自然科学教育中理论与实验两课合一是一种教学模式,但很难说是唯一合理的模式。

### 3. 对物理理论与物理实验关系的浅见

我们这一代人受过典型的科学哲学的教育,习惯认为物理理论源于物理实验,反复、严格的物理实验是检验理论命题正确性的唯一标准。从牛顿时代的许多学者到研究罗素哲学的清华教授张申府,都将“实验或经验主义(善意的)加算学……即数理经验论”当作近代“科学法或科学方法的精义”<sup>[1]</sup>。

在近百年来科学哲学涌现的许多流派或学者看来,虽然“作为经验知识来源的实验传统的特权地位”已被削弱,<sup>[2]120</sup>“实验结果在一定程度上依赖于理论,而且是可错的和可修改的”。<sup>[3]38</sup>但“无论如何,实验毕竟是感性经验的基本通道,是经验知识的基本源泉”(引自曾国屏教授来信)。实验结果的事实本身“是由世界的作用决定的”。<sup>[3]40</sup>完善的设计与理性的说明能使实验命题尽量与事实相符。实验“作为一项产生知识的活动”,“提供如何研究世界的新信息”。<sup>[2]123</sup>主要源于实验的经验检验不仅可能作为实证的较充分基础,或作为否证依据,而且“在当代科学中,运用探索性、非论证的实验依旧是重要的”。<sup>[2]118</sup>科学具有某种重要的“理论生命”<sup>[3]209</sup>,科学探索中的实验也常常具有“它自己的生命力”,<sup>[2]120</sup>“实验是科学的适当基础”。<sup>[3]38</sup>科学追求包括数学严密性在内的逻辑自洽性,寻求主要源于实验的可重复或可比对的经验证据支持。上述引文组合所述论点,是笔者逐步认识到的,可谓一孔之见。最后一句改编自文献[4]中刘华杰的论文。

作为一个物理实验教学工作者,很难回避科学哲学的基本观点。以上综述会受到两种批评:一方面会因不坚持物理实验是检验理论命题的唯一标准而被诟病;另一方面也会受到基本否定物理实验重要性的部分学者的反对,文献[2]中也说过:“在很大程度上,哲学家忽视了实验的创造性、探索性和建构性方面。”在目前的物理学教育中,实际上两种倾向都存在,一方面是不重视追求包括数学严密性在内的逻辑自洽性,不理解自然科学追求对理论的说明这一要义;另一方面是不重视以物理实验为主要进路的经验证据获取、评估与探索实践。陈皓明教授等在探讨钱学森之问时曾说,逻辑学教学的削弱或缺失是目前科学教育的大问题之一,本书第3章中所批评的累积法就是违背数理逻辑的一个具体表现。口头上重视实验而实际上泛化之,也是一种不容忽视的倾向。由局域实例或低概率结果就断言命题被实证或“与实际一致”的说法,在科研与教学研究论文中并不少见。

在儒学的传统文化中轻实践、轻实验的思想影响是根深蒂固的。众所周知的孔子句摘“吾不如老农”只是儒家的愚民之词,《论语》第十三篇“子路”中未经删节的原文是:“樊迟请学稼。子曰:‘吾不如老农。’请学为圃。曰:‘吾不如老圃。’樊迟出,子曰:‘小人哉,樊须也!上好礼,则民莫敢不敬;上好义,则民莫敢不服;上好信,则民莫敢不用情。夫如是,则四方之民襁负其子而至矣,焉用稼?’”。儒学与近现代自然科学所倡导的科学理性是格格不入的,李约瑟在《中国科学技术史(第二卷)科学思想史》中说:“在整个中国历史上,儒家反对对自然进行科学的探索,并反对对技术做科学的解释和推广。”儒学在自然科学教育中的影响表现在既漠视实验实践和经验证据,又漠视逻辑自洽性和数学严密性。

### 4. 不确定度评定方法研究的自我经历与反思

我对不确定度的研究经历了三个阶段。第一阶段始于1984年,在负责全校工科物理实验时,依据现代误差理论与测量技术的常用方法,提出了教学中不确定度评定的简化方法,

接着部分参与了以钱钟泰教授为首的中国计量科学院(NIM)研究组的相关研究,重点在质疑与修正早期版本的测量不确定度评定指南,许多工作是在钱教授的指导或影响下进行的,也从肖明耀、刘智敏的论著中受到了不少启发,部分结果反映到了拙作《物理实验研究》与《基础物理实验教程——物理实验的数据处理与实验设计》中。初期我们受到的质疑与批评颇多,主因是与1980年不确定度建议书不合。1993年后NIM两任院长支持并参与了相关研究,王大珩院士也在连续两天的高层研讨会上作了指导性发言。接着NIM钱钟泰为首、清华大学为第二署名单位等向国际计量局(BIPM)提交了对不确定度评定指南的长篇修改建议书(该建议书为钱钟泰教授力作,其他署名人只作了一些建议或辅助性工作),潘必卿教授也代表NIM在致BIPM局长的信中提出了一般测量中增加极限值合成方法的具体建议。

第二阶段是在2002年后,不确定度体系虽然在完善之中,但应用面日益广泛,它与现代误差理论的“经典”体系的矛盾也颇突出,国内物理实验教材中两类不确定度评定方法的对立现象比较明显。笔者还看到:少数教材在基本概念上有若干瑕疵。一些片面论点或命题导致评定结果错误的现象也不少。结合物理实验课程建设,笔者比较分析了标准差合成与极限值合成两种模式的异同,重点揭示了两类模式所隐含的主要假设或约定,明确指出两类模式均非公理化的实质:两类模式都以统计学为理论基础与方法依据,又都基于实验计量学与仪器仪表科学的实际实在;B类不确定度分量所大致对应的未定系统误差分量也具有一定的随机性是相当普遍的客观现象,这是两类分量方和根合成的基础,而方和根合成又是测量不确定度评定中国际协商约定的最重要的原则之一。在《新概念物理实验测量引论:数据分析与不确定度评定基础》一书中,笔者力图阐述两类模式基础依据相同、部分约定相似、方法实质相通、评定结果相近的事实,修正了某些教材中的一些非规范表述。

近年,结合对不确定度评定中2008年版指南与蒙特卡罗方法(MCM)等相关文件及其应用案例的研究,笔者体会到不确定度分量合成的三种方法(标准差合成、极限值合成与蒙特卡罗方法)各有其依据与一定合理性,但对大学生及一般技术人员来说是较难理解与掌握的关键环节。研究中发现指南的两个重要案例及所关联的技术方法存在瑕疵,几个规范性方法或经验规则也有逻辑自洽性方面的缺陷。针对这些问题的研究成果主要反映在本书第1篇中。

从哲学上反思,笔者参与的前期研究主要是从真值(或约定真值)的客观性出发,重点在质疑与修正早期版本的不确定度评定指南,配合钱钟泰教授分析揭示相关方法的多个案例的分量分析与计量实际相悖的事实;第二阶段研究中笔者逐步理解到:不同哲学流派对于真值概念有不同的、难以调和的看法,科学的社会建构学说强调科学与社会生产、生活之间的交互作用,需要不拘泥于经典真值观,以开放、兼容的态度适度调和本质上并非截然对立的几种具体的技术方法体系。笔者在近阶段提出的不确定度分量合成的技术综合方法(THM)等,则是基于尽可能保留指南体系的优点特点,修正其有违逻辑自洽性的瑕疵,将其扩展运用到非线性分量合成等问题之中,用经典方法与MCM的部分思路或优点修正、补充指南方法,同时把复杂的评定合成过程简化为能简单使用的填数式Excel工作表,这样做表面上像是统一于指南模式的架构,实际融入了“经典”误差理论、MCM等的研究成果和经验,既注意追求应用统计学理论方法的逻辑自洽性(即追求知识的统一性与兼容性),又充分重视国际测量技术交流日益普及的实际规范、实际标准。在数据分析与不确定度评定这一技术性较强的非公理化方法体系中,服务于科学、服务于生产技术与社会交流是必须考虑的



重要出发点。

20 多年来,在数据分析与经验证据评估方面的教学中,笔者提出了一些与相近教材有所不同的命题,主要有:(1)对误差的正态分布律的普遍性从两方面质疑,一是由中心极限定理推导时所用的误差分量“足够多、均匀小”的前提缺乏哲学依据,二是相当多的测量误差分布的实例不服从(严格的)正态分布。(2)从斜率及其标准差评定结果分散性过大、适用范围窄等方面论述大学实验不宜用逐差法。(3)引述统计学经典论著阐明不能用相关系数独立评价直线拟合质量。(4)质疑几种传统的高度异常值——统计离群值的判据,构建了正态分布前提下的用统计允许限的新判据,提出了直线拟合时统计离群值的初步判据、二元(次)回归中统计离群值的粗略判据。(5)在不包含微观或宇观量的一般测量中,阐述了除极少数用比较测量仪的实验之外,影响测量结果准确度的主要误差分量是系统性误差分量。(6)阐明未定系统误差分量也具有一定的随机性,这种随机性是不确定度分量方和根合成这一国际约定规则能基本成立的实践基础。(7)阐述在数据分析过程中需要考虑的多个主从关系,尝试初建了误差分析与不确定度评定教学体系的非公理化架构。(8)从标准差或不确定度合成时的微小分量判据与修约标准出发,导出独立测量结果有效数字表示的一般规则,指出非独立结果标准差有效位数可能多于两位的确定方法。(9)揭示了测量不确定度评定指南(GUM)方法的隐含假定及其与 NIM 建议方法的相通本质。(10)较系统地综述了测量实验设计的要点与思路。(11)用反证法论述测量多点散布数据直线拟合的主要目的是消减有一定随机性的未定系差影响,从一般拟合时因变量常不满足高斯-马尔科夫(G-M)假定的事实出发质疑 Working-Hoteling 置信带公式,指出它会导致斜率等参量的标准差随自由度增加而趋于零的逻辑性瑕疵,初步提出了替代 Working-Hoteling 置信带公式的调和算法与考虑 B 类分量影响的扩展近似算法。(12)创建了第 4 章所述的不确定度分量合成的综合技术法(THM)。(13)提出了几种新的数据分析评定方法,如直线拟合中用的经验调和法、在数字电压表相对测量或钟形线型分析中用的未定系差随机化方法等。(14)对相关教材或出版物中较普遍的一些缺乏逻辑性或与实际相悖的概念、命题或方法作了简析、批评或修正,正本清源,力求数据处理过程的科学性与规范性。此外,在经验证据评估方法的学习或练习中我们还主张:在基础实验课中,多数实验不要求做不确定度的评定计算,部分实验只算 A 类或 B 类,要求全面评定的实验很少,要求会用或会套用这些方法,并强调要特别重视这些方法的应用范围、主要假定或适用前提,但对其导出过程只要求初步理解或了解大致思路。

## 5. 教材使用说明与积木式多层次实验模式回顾

基础物理实验系列课程现分为 3 学期,共 128 学时。1999 年为适应基础科学班的教材,在第 3 学期逐步开展了积木式多层次实验的教学。我们有近 1/4 的学时“放羊”,让学生自选题目和时间独立完成,实验报告要求也低;约 2/5 学时是抓基础的主要由助教随堂指导的“炒菜式”实验,其中近半数实验要求写完整实验报告。这两部分实验安排在前两学期  $2 \times 48$  学时之中,每学期做 9~11 组约 4 学时的实验,大多数实验的讲义见本书后 3 章。少数实验讲义放在学校的网络学堂上,如相对论实验、超导实验、拉伸法测弹性模量等,作者未及对这几个实验的原讲义提出新颖立论或成熟改进见解,故未列入本书选题范围。本书 6.1 节及 7.1 节的前 6 小节是要求学生实验前仔细阅读的内容。

每学期有绪论课与涉及前 4 章部分内容的必听课(学时约占 1/10),前 4 章部分章节安



排自学或上选听课,选听课中还有一些讲座,如系差分析在教学科研中的案例及未定系差随机化、多种直线拟合方法的比较分析、回归的相关系数与回归系数的相关性、测量实验设计概论等。数据处理用(包括选听课所讲方法)的大部分专门的 Excel 表格见清华大学出版社网站(网址: [www.tup.com.cn](http://www.tup.com.cn),在该网址搜索本书的网页)。

本书的文献索引中,少数标准文献未写全出版社、页码等信息,因为除纸质出版物外,多个网站已有方便查阅的不同版次文档,标准文档页数也较少。少数手册、著作未注页码,因其章节目录中已有相关标题。个别文献引用了较早的版本,因为笔者认为这些版本中反映了较重要的原始信息。

积木式多层次实验近年为 32 学时,以前两学期修过的实验为基础,不追求完整的探索性,而是包含探索性层次;不注重提出问题,而重视自主解决问题;不太看重结果,而注重含探索性的学习训练过程。每轮提出 8~15 组多层次实验题,不少层次含有探索性内容,要求学生自选并完成一组,也可重点深入地做少数几个层次。学生在做完基础性实验后,参考教材对实验任务或探索性问题的简要提示,结合实验解决有关联的问题,也鼓励在条件允许范围内自主提出新任务。实验室每周开放 5 个白天和 3 个晚上。学生自选时间做实验,每次实验时间要记录,原始数据要签字后照相备份,期末交一份有篇幅限制的“大”报告。期中有分专题讨论或简要的学生口头交流,每周安排几次答疑。

积木式多层次实验模式力图突出体现实验在物理学中的重要性,强调数理结合,启发学生的主动探索和有条理质疑(organized skepticism)的精神:(1)“从事研究工作的科学家约定的世界,比理论的理想化世界复杂得多。”<sup>[2]125</sup>模式力图让学生体会到:物理实验实际比教科书中的理想化命题复杂得多。以实验观测为重要依据,能对某些命题提供经验支持,或有助于提出改进假说。这一过程就是教学目标之一。(2)多层次实验中有一些适度跳跃和破缺。跳跃过程就是探索性自学与实验的训练。发现“破缺”,观测到尚未能建模或尚未找到文献说明的实验现象并作不一定成功的初步探索,此过程本身就可看作是探索性教学的收获。(3)用基础性仪器为主体搭建积木式装置,以增强综合实验能力。学习实验设计、测量实验设计的基础知识,选择、优化并实践实验方案 and 数据分析程序;部分实验能“将仪器的分辨率与准确度用到极致”,从而体会数理结合、优化方法的重要性和实验者的能动作用。(4)学习运用数据处理与实验结果分析的系统性概念和方法,积累评估经验证据的经验。

2000—2011 年该模式共实施了 14 轮,有 1400 人修了该子课程,完成多层次实验的大报告 1700 份。虽然近半数学生抱怨“所用学时/学分”高、部分人感到成绩未达期望值,但大多数人认为该模式的收获显著大于其他实验课。一些同学在报告中写道:本模式是“第一次”接近真正意义的科学探索,是风险几乎为零的科学实验预演,“像是经历了一番洗礼”,在挫折磨炼、反复实践、思考求索中对物理实验有了更深刻的认识。

我校物理类专业的基础实验注重教学内容的相对稳定性,年更新率低,可持续性强。2011 年分实验室固定资产原值不到 160 万元,12 年中有近一半时间课程专任教师、工程师共 2 人。

教学中我们注意融入一些科学研究的经验与成果,特别注意将数据分析与经验证据评估方面的新方法、新思路融入实验设计与测量过程,用积木式仪器获得超越常规实验或部分专业仪器的高准确度或高分辨率。典型案例有:半定量研究多种温度传感器的非线性,液晶空盒厚度的高准确干涉测量,以测角仪(分光计)为主体用多种方案观测 HD 波数差,比最

小偏向角法准确度高数倍的折射率组合测量法,赛电桥的电阻比较测量法,替代铁谱的 He-Ne 谱非线性内插法,小数重合法将短腔 FP 间隔测准到 1nm 左右等。我们的教学中有大量的定性观测与半定量测量的环节,精密与准确不是实验的重要目的,重点是学习运用实验方法与测量方法,通过一系列典型的案例来体会方法设计、数理结合的重要性,让学生受到追求逻辑自洽性(包括数学严密性)、敢于质疑与探索的科学理性精神的熏陶。郭宝光(Prof. Wayne State Univ.)曾经评价说:“... Above all, I applaud your philosophy of not letting the students be satisfied with the standard fares and challenge them to apply further thoughtful analysis to squeeze out the last drop of resolution or accuracy from the equipment available. Of all the schools that I have visited, which include the very best in China and US, plus a few European schools, yours is second to none.”(摘引自网站“高等学校实验教学示范中心/物理/清华大学/基本信息”)。引文末句是笔者感到当之尚愧的过誉之词。教学中我们还有一些不足:4.1%的不及格率在实验类课程中略高;工作量大而使部分同学有畏难情绪;实验学习收获的积累性、隐性、后效性以及模式的系统目标往往未能让学生充分理解;开放中对少数同学有时也未能及时指导或督促等。

## 6. 课程建设的历史沿革

顾秉林教授 2003 年在为拙作所写的序言中说“清华大学物理系历来十分重视实验研究与实验教学。首任系主任叶企孙教授就是一位杰出的实验物理学家。叶先生等在 1921 年发表的用 X 射线衍射实验测得的普朗克常量曾被国际上沿用达 16 年之久。他亲自为物理实验写教材、作序言,针对我国当时普遍存在的物理教学中实验训练少之缺憾,强调物理实验对物理系学生培养的重要性。对于当年像李政道这样的理论天赋很好的学生,叶先生同意他可以免修一些理论课,但不能免修实验课,足见其对物理实验教学之重视。在叶先生等老一辈物理学家的倡导下,抗战胜利后清华大学物理系的教学实验已经具有了相当的规模。”坚持“理论与实验并重”是老清华大学物理系贯彻始终的基本教学理念。20 世纪 30 年代清华大学物理系开出的必修、选修课程 36 门中,独立开设的实验课程有 14 门,理论为主包含实验周学时各为 3 的课程 5 门。要求学生 4 年中至少要有物理理论 24 学分、物理实验 12 学分。学生实际课内总学时数实验课多于理论课,因为 19 门实验相关课程中有 16 门是每周 3 学时,对应 1 学分。有包括中级物理实验在内的 11 门课与现行基础物理实验课内容有较多的互含、交错。(摘引自朱邦芬编《清华物理八十年》,清华大学出版社,2006)

“十年动乱”后不久,物理实验室恢复,接着 1982 年物理系复系。李功平先生是复系后的首任物理实验室主任,针对物理专业培养的需要,他开始负责筹建面向物理系的基础物理实验分室并开出本课程。李功平先生、侯华生老师是第一、二任课程负责人,笔者 1984 年起曾任实验室主任数年,1997 年后才由负责工科物理实验转而具体负责本课程。30 多年来,课程教学组一直坚持让同学多动手,创造实验室开放条件,鼓励学生独立思考与探索,重视对理论命题的学习运用或验证,重视课程的基础性与物理性,将重视实验过程与重视数据分析、结果评估相结合,引入了不少新的数据处理或实验设计教学环节,改进了不少仪器。许多老师与工程师在实验室建设、新实验开发、教材编写与实验教学任务完成等方面做了大量工作,付出了辛勤劳动的汗水与心血。参与了课程教学与建设、工作量累计时间在一年以上的教师有李功平、侯华生、李世权、张申余、柏乃炳、邓华、刘胜茂、邬淑婉、谢起程、路峻岭、凌

勇、孙家林、肖志刚和朱美红等,参与了课程建设与相关实验室建设的工程技术人员有汤晓英、赵静兰、王长江、常缨和朱玲等。他们中路峻岭、王长江、常缨及肖志刚,是与笔者一道完成课程任务共事时间最长、切磋教学内容最多的四位同仁,特别是肖志刚、路峻岭两位,在教学研究方面与笔者的交流讨论多,对笔者启发帮助也大。本书第2篇中的许多实验内容及相关讲义,如弹簧振子、弦振动、质量热容、热敏电阻、冲击电流计、粘度测量等实验,上述多位同事都对排出实验、改制仪器、编写讲义做出了直接的贡献。课程有幸被评为较早的基础物理实验国家级精品课,上述同事们的努力与工作基础、工科物理实验教学组的广大教师与技术人员的关心与帮助都起了非常大的作用,例如本书第2篇中的5.5节、6.2节、7.6节等的第一批教学装置就是在笔者提出后分别由马兴坤、魏宝英、钱启予等同志具体负责排出的。本书完稿之际,我谨向他们致以深深的谢意。

肖志刚博士审阅了全书,朱美红博士对本书提出了许多修改建议,常缨硕士修改绘制了主要图表。访问学者杨小静和卢光哲对本书的前4章也提出了部分修改建议。多年来,各届学生的勤奋学习态度、主动探索精神与互动交流,也是促使我们的教学水平不断提高的原因之一。教学研究还得到了直接参与教学的多位助教、多位访问学者的帮助与支持。

本书相关的研究、教学工作的完成,得到了清华大学张玫教授、尚仁成教授、陈泽民教授、李世群教授、邓景康教授、吴念乐教授、朱邦芬教授、阮东教授和张留碗教授等多位老师的直接关心、支持与帮助,也得到了北京大学龚镇雄教授、吴思成教授、段家祗教授等多位国内同行学者的关心、勉励与帮助。在遇到教学指导上的质疑与教育管理上的批评时,是耿完楨教授、夏学江教授、丁慎训教授与吴敏生教授、顾秉林教授、黄贺生教授等给予了勉励支持和理解帮助,使我们的教学研究与改进探索得以继续完善与深入。

自2011年春退休以来,未全了却公家事,常可快阁倚晚晴。还上点课,做一点感兴趣的小研究,读一点哲学书,也可静心反思以往的研究与教学。29年前,受李功平先生之荐、徐亦庄先生之命由光学专业转入以负责基础物理实验教学为主的岗位,李功平先生坚持真理的精神与徐亦庄先生献身教育的品格给我的印象很深。教学名师夏学江教授严谨治学、甘为人梯的风范对我的影响也很大。

本书完稿之年,是导师张培林教授从教60年。他的科学探索精神和严谨的作风,他淡泊名利、严于律己的品格,他对后来学子的不断关心和勉励深深教育了我,谨以本书表达学生对他的感谢与敬意。

朱鹤年

2013年1月于蓝旗营

## 参考文献

- [1] 张申府. 科学方法与科学组织[J]. 中国建设, 1947年10月.
- [2] Newton-Smith W H, A companion to the philosophy of science[M]. Blackwell Pub. Ltd., 2000. 成素梅, 等, 译. 上海: 上海科学技术出版社, 2006.
- [3] Chalmers A. F., What is This Thing Called Science? [M] 3rd ed. University of Queensland Press. 1999.
- [4] 王大珩, 等. 论科学精神[M]. 北京: 中央编译出版社, 2001.



# 目 录

## CONTENTS

### 第 1 篇 实验数据分析与经验证据评估

第 1 章 数据分析与不确定度评定基础	3
1.1 物理量与测量	3
1.2 误差的定义、分类及简要处理方法	4
1.2.1 测量误差的定义	4
1.2.2 误差的分类及简要处理方法	5
1.3 直接测量结果的不确定度评定	8
1.3.1 测量不确定度的概念及其与误差、误差限的关系	8
1.3.2 不确定度的简化评定方法	10
1.3.3 教学实验中关于仪器误差限的讨论	13
1.3.4 计算举例	15
1.3.5 相对标准不确定度/相对扩展不确定度	15
1.4 方和根合成时标准差或不确定度的微小分量判据	16
1.5 间接测量结果的不确定度合成	16
1.5.1 间接测量量的不确定度合成	16
1.5.2 灵敏系数 $c_k =  \partial f / \partial X_k $ 的数值计算方法	17
1.6 直线拟合方法	18
1.6.1 截距为零直线的 LSM 拟合	19
1.6.2 一般直线的 LSM 拟合	19
1.6.3 拟合参量的标准差与不确定度的扩展算法	22
1.6.4 计算举例	25
1.6.5 直线拟合质量判断的简要说明	26
1.6.6 加权直线拟合	27
1.7 有效数字的修约方法简介	27
1.7.1 有效数字的定义	27
1.7.2 修约间隔和修约规则	28
1.7.3 实验数据的有效位数确定	28
1.8 结束语	30
参考文献	30

第 2 章 物理实验中的统计离群值识别与结果判断 .....	33
2.1 统计允许区间的确定 .....	33
2.1.1 正态样本总体均值未知时的双侧统计允许限 .....	33
2.1.2 均匀分布总体方差未知时的双侧 STL 因子 .....	34
2.1.3 正态总体的单侧 STL 因子 .....	35
2.2 正态样本统计离群值的判断 .....	36
2.2.1 统计离群值判断的常用前提与目的 .....	36
2.2.2 离群值判断的统计量 .....	36
2.2.3 传统教材中几种离群值判据简析 .....	37
2.2.4 谨慎使用标准推荐的 Grubbs 方法 .....	37
2.2.5 用 STL 构建统计离群值的新判据 .....	38
2.2.6 谨慎地处理统计离群值 .....	39
2.3 误差服从正态分布时直线拟合统计离群值的近似判据 .....	40
2.3.1 直线拟合时的统计离群值判据 .....	40
2.3.2 用经验调和法取代 LSM 回归 .....	40
2.4 二次回归中统计离群值的粗略判据 .....	41
2.4.1 运用 STL 的粗略判据 .....	41
2.4.2 比较残差平方和的补充判据 .....	41
2.5 教学实验中的几个验证判据 .....	42
2.5.1 测量结果定性、半定量与定量的初步分类 .....	42
2.5.2 两个不确定度评定结果之间的一致性 .....	42
2.5.3 MCM 等计算方法纯数学过程结果的一致性(或收敛性)判据 .....	43
2.5.4 验证性实验的判据 .....	43
2.5.5 标准偏差过小与误差的普遍性原理相悖 .....	43
2.6 建模时准一次方程增加高次项的合理性讨论 .....	44
2.6.1 教学中模型方程的拟合质量 .....	44
2.6.2 模型中增加高阶项的合理性讨论 .....	45
2.6.3 规律未知或缺乏理想数据时多项式建模的初步讨论 .....	45
2.7 参考伯奇比确定加权平均值的标准差 .....	46
参考文献 .....	48
第 3 章 蒙特卡罗方法在物理实验中的应用简介 .....	50
3.1 MCM 的一般原理 .....	50
3.1.1 MCM 的两类应用对象 .....	50
3.1.2 MCM 求解的基本环节 .....	51
3.2 用 MCM 分析实验误差的影响——热敏电阻实验 .....	51

3.3	用 MCM 选择实验参量——椭偏法的人射角选择 .....	52
3.4	用 MCM 合成 B 类不确定度分量——砝码质量检定 .....	53
3.4.1	输入量与输出量之间的线性关系往往不满足 .....	53
3.4.2	砝码质量不确定度的 MCM 评定 .....	53
3.4.3	MCM 合成的扩展不确定度一般偏小 .....	55
3.4.4	对 MCM 合成不确定度乘以扩大系数 .....	55
3.5	用 MCM 否定回归的累积法 .....	57
3.5.1	平均时求标准差的累积法不是灰色方法 .....	57
3.5.2	累积法直线拟合中的隐含权因子 .....	58
3.5.3	多元回归或高次回归中用 MCM 否定累积法 .....	59
3.5.4	追求逻辑自洽性,避免局域经验主义倾向 .....	60
	参考文献 .....	61
<b>第 4 章</b>	<b>不确定度合成的技术综合方法 (THM) .....</b>	<b>62</b>
4.1	几类不确定度合成方法的初步比较与评述 .....	62
4.1.1	不同合成法中隐含的假定与约定 .....	62
4.1.2	决定数据处理方法体系的实际出发点 .....	63
4.1.3	三类不确定度合成方法的初步比较 .....	63
4.2	输入输出之间非线性关系时的误差传递 .....	65
4.2.1	线性关系的一般处理思路 .....	65
4.2.2	非线性问题的典型案例 .....	66
4.3	不确定度合成的 THM(技术综合法) .....	67
4.3.1	建立非线性问题的一般模型 .....	67
4.3.2	广义正交参量法求灵敏系数 .....	67
4.3.3	不确定度合成方法的综合 .....	68
4.4	重视测量控制过程,确定输入量分布特征 .....	69
4.4.1	均匀或正态分布误差平方项的分布特征 .....	69
4.4.2	分量自由度的估算 .....	70
4.4.3	误差二次项分量的自由度及包含因子 .....	71
	参考文献 .....	72

## 第 2 篇 积木式组合实验:基础性实验与探索性层次

<b>第 5 章</b>	<b>力学与热学类实验 .....</b>	<b>75</b>
5.1	弹簧振子实验与多种拟合方法练习 .....	75
5.2	波耳共振仪实验 .....	81
5.3	扭秤法测引力常量 .....	89
5.4	弯曲共振法测弹性模量及其温度系数 .....	95
5.5	用传感器测空气相对压力系数 .....	103



5.6	液体质量热容的测量与对流换热模型初步比较	110
5.7	弦振动测量与正交设计初步	117
5.8	气体、液体和固体中的声速测量	123
5.9	液体粘度测量的三种方法	128
	参考文献	134
<b>第6章</b>	<b>电磁学及热电传感器实验</b>	<b>136</b>
6.1	电磁学实验须知及基本仪器介绍	136
6.1.1	要特别重视实验室的安全操作	136
6.1.2	直流电源	136
6.1.3	交直流电表	137
6.1.4	滑线变阻器	139
6.1.5	电阻箱	139
6.1.6	电磁学实验接线注意事项	140
6.2	伏安特性测量与戴维南定理验证	141
6.3	冲击法测电容与磁通密度	148
6.4	灵敏电流计的特性研究	158
6.5	电阻比较测量与直流电桥	163
6.6	半导体热敏电阻的特性研究	170
6.7	比较法测温度传感器的非线性	175
	参考文献	183
<b>第7章</b>	<b>光学及部分近代物理实验、综合类实验</b>	<b>185</b>
7.1	光学实验的基础知识	185
7.1.1	人员生理特性对测量的限制	185
7.1.2	视差	187
7.1.3	仪器调整中常用的两种调焦判据	187
7.1.4	共轴调节	188
7.1.5	几何光学中的符号规则	188
7.1.6	要重视安全,重视光学元件和仪器的保养维护	189
7.1.7	大气折射率与常用光源谱线波长	189
7.2	透镜焦距的测量	192
7.3	内调焦望远镜的物镜组研究	197
7.4	用测角仪测棱镜角度与折射率	203
7.5	迈克耳孙干涉仪的调整和使用	213
7.6	迈克耳孙干涉仪测空气折射率	219
7.7	光栅衍射与里德伯常量测量	222
7.8	铍玻璃的吸收特性研究	230

---

7.9 偏振光学系列实验 .....	239
7.10 塞曼效应的观测与 F-P 标准具的使用 .....	251
7.11 功函数的测量 .....	263
参考文献 .....	269
附录 A 书中所用的 Excel 工作表目录(见网站) .....	271

## 第 1 篇

# 实验数据分析与经验证据评估

清华大学理学院前院长周光召教授曾说：“为什么 20 世纪最重要的物理学发现又恰恰在德国的土地上发生？首先德国人非常重视实验和实验数据的分析。从普朗克开始分析黑体辐射到后来原子物理中玻尔提出他的原子论，最关键的就是对光谱的分析。当时德国对光谱的分析可能是最多的，包括海森伯就是从光谱分析而提出矩阵力学的。他们的理论是和实验密切地结合在一起的，这是德国物理最大的一个特点。第二个特点就是德国有很强的数学传统。当时德国尽管其他学科不怎么发达，数学已经超过英国了，在 20 世纪，德国就有黎曼、高斯、希尔伯特，本世纪初就成为世界的第一位，哥廷根一直是世界的数学中心。第三个特点是德国非常有哲学传统。这三个条件：理论紧密地和实验结合在一起，非常强的数学传统和打破哲学上的机械论，对于德国能在这种环境下产生 20 世纪最伟大的科学发现起了决定性的作用。”<sup>[1.01]</sup>

科学是系统的知识体系，科学是探索自然的过程，科学也被看作一种社会建构<sup>[1.02]</sup>。虽然不同学派的定义不同，但普遍认为科学的适当目的是追求对理论的说明，“达到越来越深刻、越来越统一和越来越有预见力的理论”<sup>[1.03]</sup>。科学追求包括数学严密性在内的逻辑自洽性，寻求主要源于科学实验的可重复或可对比的经验证据的支持<sup>[1.04]</sup>。对实验提供的只是检验理论的观点有两类批评，其中“The most serious philosophical objection is that logical positivism and post-positivist philosophies of science have undermined experiment’s traditional, privileged position as a source of empirical knowledge”<sup>[1.05]</sup><sup>120</sup>，实验证据相对于理论的独立性也被质疑<sup>[1.06]</sup><sup>38</sup>，但实验毕竟是感性经验的基本通道，是经验知识的重要源泉（引自曾国屏教授对作者的来信），不能轻视实验在科学探索中的重要性。实验不仅能对理论命题提供一定程度的可重复经验证据支持、或对否认提供有条理的质疑参考。而且，“As a knowledge-producing activity, experiment engages the inchoate, the practical, and the particular. ... An essential role of experimentation is to provide new