

文章编号: 0529-6579 (2000) S2-0210-06

新世纪《近代物理实验》课程建设*

李潮锐, 吴深尚

(中山大学理工学院, 广州 510275)

摘 要:《近代物理实验》涉及物理内容广泛, 但实验内容的相关性并未得到普遍重视. 本文将系列实验原始思想加以完善和拓展, 提出了新世纪《近代物理实验》课程建设的整体构想: 课程结构模块化, 教学方法系列化, 实验内容层次化, 测量技术现代化.

关键词: 近代物理; 物理实验; 实验技术

中图分类号: N41 **文献标识码:** B

1 《近代物理实验》现状

中山大学物理系《近代物理实验》从原《中级物理实验》复建时, 由世界银行贷款购置的部分智能仪器、成套专门实验设备, 更充实了近代物理实验内容, 提高近代物理教学实验技术. 据说, 教学内容也很接近当时美国大学同一层次的教学实验水平. 有许多准备出国留学的学生、学者, 临走前会到近代物理实验室有针对性地了解一些相关实验技术或具体操作. 国内也有多间大学选派教师到中山大学进修《近代物理实验》, 把中山大学的教学内容和方法带到他们的学校. 目前, 虽然物理系《近代物理实验》课程内容在全国高等学校中仍是比较全面, 但实验技术、教学内容只满足于大众化要求, 缺乏具有标志性意义的课程建设计划. 尽管, 近几年学校也有一些经费投入, 但由于近代物理教研室在课程内容建设规划中没有明确自己的教学定位, 只是简单地仿效兄弟院校的教学安排. 《近代物理实验》教学水平要达到国内一流重点大学的要求, 就要改变这种落后的实验教学模式, 更需要一种具有创新意识的力量, 推动新世纪《近代物理实验》课程建设.

2 新世纪《近代物理实验》课程建设方案

《近代物理实验》不同于其它课程, 由于它涉及物理内容广泛, 而且是一门集体合作的课程, 作为教研室主任不仅是该课程的负责人或主持人(course leader)也是一位项目经理(project manager). 作为课程负责人(主持人), 对课程中的每个实验的教学定位、在近代物理学发展中的作用以及相关实验技术的科研价值都要有较全面的了解和认识, 并指导

* 基金项目: 中山大学本科教学办学特色总结与研究资助项目; 中山大学实验室管理处资助项目
收稿日期: 2000-09-21; 作者简介: 李潮锐(1962~), 男, 副教授.

课程的整体教学运作;要明确每个主讲教师的教学内容、实验技术要求。由于近代物理实验之间有纵向也有横向关联,作为项目经理,应设计好教师授课内容的“接口标准”,协调各“模块”之间的连接,将大家的工作揉合在一起,整合成一个课程总体。只有这样,才能够顺利地实施新世纪《近代物理实验》课程建设方案。

2.1 《近代物理实验》课程内容

《近代物理实验》课程内容,应该包括:

(1) 近代物理支柱实验。这些实验在近代物理(特别是量子物理)发展史上具有重要意义。由这些实验结果抽象出现代物理概念,并形成近代物理理论,这些研究工作绝大多数都获得诺贝尔物理学奖。例如密立根(R.A.Milliken)的油滴实验;戴维逊(C.J.Davisson)、革末(L.H.Germer)和汤姆逊(G.P.Thomson)的电子衍射实验;霍尔效应(Hall Effect, 20世纪的诺贝尔物理学奖,有两次颁给了与这一效应相关的物理研究)。《近代物理实验》应优先加强、完善这些实验内容和测量技术。

(2) 近代物理技术实验。即研究方法或实验技术对现代物理研究具有影响力的实验。如X-射线衍射(X-ray diffraction)、吸收光谱分析,还有一些研究方法不仅使对近代物理的认识更为深入,而且影响多个学科对自然界的认识。例如:核磁共振(nuclear magnetic resonance, NMR)技术,它已成为在物理、化学、医学等许多领域的重要研究手段。真空(超高真空)和低温(超低温)技术对近代物理研究具有深刻的影响力,特别是为材料制备及物性研究提供了更广阔的空间。还有微弱信号检测技术和虚拟仪器技术实验。

(3) 现代物理科研实验。这类实验的选择主要是结合本系近年的科研成果,取材于一些在研究方法或实验技术很有学习价值或应用前景的实验工作、科研开发项目。当然,对这类实验所讲授的物理内容和实验技术不要太强调完备,但要面向物理系全体学生。例如《高温超导物性研究》,这是一个很好的科研实验题材,它可以让了解本系科研中独特的实验测量技术及使用本系开发的实验测量设备。开设这一类教学实验,一方面,加强了近代物理实验内容和实验技术,更体现自己的教学特色;另一方面,学生将会把这些科技信息带进社会,形成一种潜在的科研开发市场。

要采用现代实验手段,部分实验要选用易于操作的现代化仪器设备(但不选择成套集成测量系统)。因为简单实验操作的基本训练已在《基础物理实验》完成,《近代物理实验》要尽可能给学生提供了解、学习使用现代化测量仪器的机会,从而让学生更侧重于实验的物理研究内容。将部分近代物理实验操作与现代计算机技术结合起来,采用现代科学测量手段,这也应该成为《近代物理实验》课程内容完善、提高的一项指标。图1(a)说明由这三大模块构成了近代物理实验的整体。上标1、2、3分别表示这3类实验。

2.2 《近代物理实验》教学方法

全国高等学校的《近代物理实验》教学方法大同小异,主要差别在于内容层次的深浅。事实上,大约在1985年,中山大学物理系近代物理教研室的老师(主要是陈仁术、李仲荣等老一辈教师)觉得近代物理实验中的电子自旋共振、核磁共振和光磁共振(光泵)这几个实验具有相同的波谱学研究方法。经过多次讨论,大家认识到按实验技术为主线对实验内容分组(也即“系列实验”)更有利于教与学。当时就做了一些小面积的试点。近几年,《近代物理实验》增加了铁磁共振实验内容。按实验技术编排近代物理实验内容是一种新的尝试。

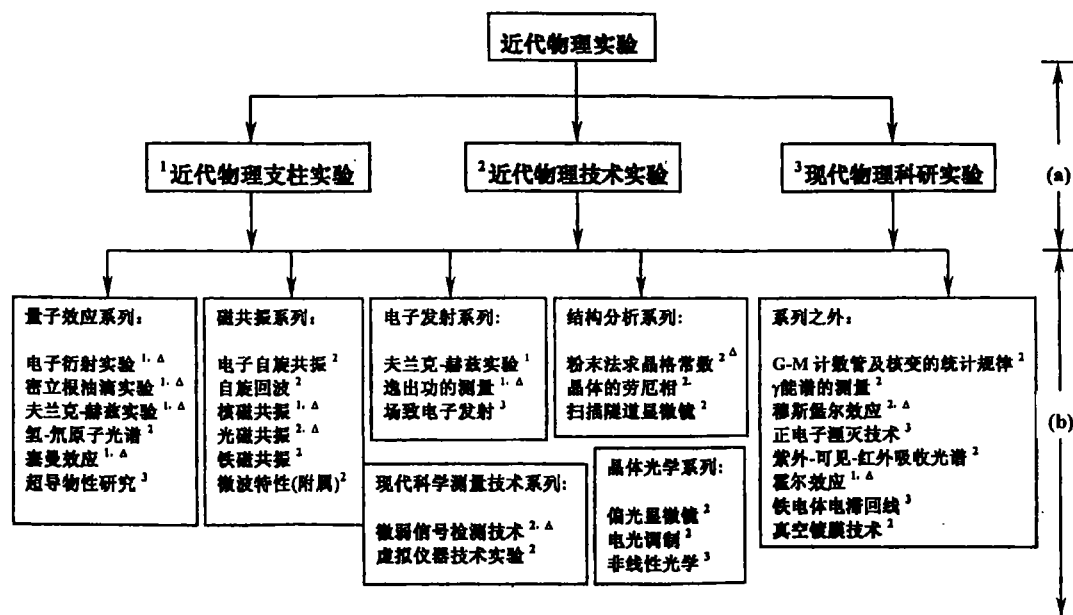


图1 课程结构和教学内容、方法

经过这十几年的教学实践,系列实验的模式得到肯定.但是,到目前为止,也仅有这么一个实验系列——磁共振吸收系列.我们应该对这一模式给予充分的重视和支持,并进一步系统化发展成为具有标志性意义的实验教学方法.从实验技术上,我们不可能将所有的近代物理实验全部归纳到简单的几个系列中去,但从物理概念上,我们可以找出各个实验物理思想密切相关部分,从这些关联的实验构架出一个个实验系列.而且,同一系列中的各个实验的具体要求应有层次结构,从物理原理、基本实验方法到科研应用都要有明确的教学定位.这应该是系列实验原始思想的完善与发展.图1(b)列出了近代物理实验的系列分类.上标1、2、3的意义与图1(a)对应,其中带(Δ)为重点近代物理实验.

量子效应系列中的电子衍射实验是构成量子力学最基本的实验之一,在近代物理发展中具有非常重要的地位.由它证实了法国物理学家德布罗意(L.de Broglie)于1924年提出的微观粒子的波动性假设,并测出了德布罗意波长.每个物理学的大学生都应该了解这一实验.密立根(R.A.Milliken)油滴实验测出了基本荷电单位 $e = 1.602 \times 10^{-19} \text{ C}$,并且证明了电荷的量子性.该实验的设计思想和方法富有创造性,实验数据处理方法非常精彩,很有学习价值.这个实验应该开设,而且应该使教学内容更丰富,让学生有足够的时间测量几十甚至上百荷电油滴粒子,用严谨的科学方法寻找基本荷电单位.目前,我们也已有一些改进实验方法的构想.夫兰克-赫兹(F-H)实验也是近代物理发展中一个非常重要的实验,它首次用实验证实了玻尔氢原子理论中原子定态能级的存在.目前,这个实验普遍仅停留在 Hg 第1激发电位的测量.事实上,只要改进实验数据采集方式,获得更丰富的原始数据,实验内容可以包括:①能用更科学的方法求 Hg 第一激发电位;②热电子发射材料的功函数;③热电子的统计分布;④改变 Hg 蒸汽压、热电子发射密度,还可以测量 Hg 原子较高激发电位.塞曼(P.Zeeman)效应证实了原子具有磁矩和空间量子化,通过它可以精确测定电子的荷质比 e/m .这个实验的光谱测量方法也很巧妙:首先通过普通的

色散棱镜将光源的特征光谱分开,再利用法布里-珀罗(F-P)标准具将每条特征谱线的塞曼分裂分辨开来。这种所谓的正交法,要在实验教学中讨论分析,让学生了解每个近代物理实验除了具有特定的物理内容,也有值得学习的实验方法和技巧。超导现象是宏观量子效应的代表,由于1986年液氮温区的高温超导材料的研制成功,使这一在1911年由昂纳斯(K. Onnes)发现的超导现象更备受人们的关注。该实验教学内容应该包括:①由于实验需要低温环境,所以要了解低温技术与获得的操作、温度标定和测量方法;②学习四线低电阻测量方法以及初步了解弱信号测量技术;③学习简单的材料磁性测量方法;④超导基本参数的测定。

磁共振系列主要包括电子自旋共振(ESR)、核磁共振(NMR)、光磁共振、铁磁共振及自旋回波实验。电子自旋共振吸收研究的是由电子自旋 S 引起的原子能级精细结构;核磁共振研究的是核自旋 I 引起的原子能级超精细结构。两者研究的是处于原子同一能态分裂能级之间的共振吸收现象。光磁共振研究的是由电子自旋 S 和轨道 L 的耦合 $J = L + S$ 在外磁场产生的精细结构;或进一步由 J 与核自旋 I 耦合而成 $F = J + I$ 所产生的超精细结构。实验中使用光抽运方法从而达到实现不同能态的(超)精细结构能级之间的共振吸收。在磁共振的测量结果表征中,我们要强调的是:由于自旋-晶格相互作用,电子有一定的能级寿命,从而相应的能级有一定的宽度;由于自旋-自旋相互作用产生内部局域有一定的内磁场分布,从而使满足共振吸收条件的外磁场 B 并非唯一,也有一个分布范围。因此,共振吸收谱线具有一定的宽度,并非单色。根据测不准原理,也可以用能级寿命,或是弛豫参数来表征。事实上,这是同一现象的两种描述。与ESR类似,核磁共振吸收存在有:自旋-晶格弛豫和自旋-自旋弛豫。测量、分析核磁共振吸收的弛豫过程正是自旋回波的实验内容。对该实验的理解和结果分析需要有较好的量子力学知识,但如果能将塞曼效应和共振吸收的物理原理、实验方法关联在一起,相信能取得更好的教学效果。

结构分析选择了晶体劳厄相、粉末法求晶格常数和扫描隧道电子显微镜(STM)实验。X射线衍射结构分析技术除了用于单晶材料的结构分析,目前使用更普遍的是多相材料的晶格常数测定和材料组份分析。现代X射线衍射仪通常使用闪烁或正比计数器作检测仪代替原始的照相底片,由检测器移动来记录衍射图样。对于粉末样品(陶瓷材料)晶面取向各向同性,原则上,一次测量便可以记录所有晶面的衍射强度。由于测量方法的改进,实验应将重点放在结果分析和技术应用上。常规的结构分析,是通过与PDF卡对比或PDF数据库检索,找出被测材料的可能结构以及各个结构的组份。其实,对于多晶X射线衍射分析,更重要的是我们应如何寻找新材料结构。当然粉末多相分析难以给出准确地答案,但“trial-and-error”方法可以给我们一些可能的选择。这种方法目前仍不成熟,但却颇流行。应该让学生了解这些发展的趋势。还有,由多晶材料的衍射谱线宽度可以推测晶粒的大小,由衍射谱线的强度分布可以了解材料的晶化程度。总之,多晶X-射线衍射分析是目前材料分析最常用的技术手段。扫描隧道电子显微镜(STM)是80年代发展起来的材料形貌分析技术。它的测量原理是利用量子力学的电子隧道效应。目前购置的是较为简单的教学设备,仅能分辨几个纳米(或更差的几十nm)量级的材料颗粒分布或材料表面缺陷分析。使用这样的设备不容易让学生较直接地认识STM的物理原理,但可以作为一种物质表面结构分析技术介绍给学生,并让学生学习分析实验的结果,同时也要给学生介绍数据处理过程所使用的计算机图形学。

电子发射系列实验中夫兰克-赫兹(F-H)实验也可以成为一个引子,但逸出功的测量实验是这一系列的重心.电子从材料表面逃逸,需要一定的能量,这便是所谓的逸出功.教学实验中采用的是理查逊(Richardson)的热电子发射方法.根据电子的费米-狄拉克统计分布及费米面附近电子因获得热能而逃逸的几率,在由外场 E 作用下所测得热发射电流密度而推断出电极材料的电子逸出功函数.实验原理、测量技术比较简单,但实验数据处理方法比较复杂,一环扣一环,最后结果是由一些中间结果间接得出的.这是科研中经常碰到的处理方法.事实上,这个实验所引出的物理内容是很丰富的,但现时的教学安排并没有很好地体现这一点.要让学生理解这种实验分析方法.由于实验数据比较多,实验的操作方法需要改进,采用计算机测控技术,结合近几年很热门的平板显示技术研究中场致电子发射课题,将学习的重点集中于物理过程分析.

现代科学测量技术主要介绍微弱信号检测技术和虚拟仪器技术实验.直流电信号精密测量中的许多技术问题在 Keithley 出版的小册子 *Low Level Measurements* 有详细的分析,包括弱电流(电荷)、低电压、低电阻或高电阻的测量方法.微弱信号检测是一门重要的实验技术,对周期性信号目前常用的主要有锁相放大技术和取样积分方法.虚拟仪器是近年来才发展起来的科学测量技术新概念,它不仅应用于科研,也渐渐成为工业自动化控制、质量管理的标准技术,《近代物理实验》课程应开设这一技术相关的实验.虚拟仪器技术介乎于经典实验方法与现代集成实验环境,它是一种更能充分发挥学生(或科研人员)创造思维和动手能力的实验操作技术.现时会以一个独立的实验开设,但相信将来会把这一技术渗透到各个近代物理实验中去.

霍尔效应是物理学研究中一个很重要的实验,由它可以分析半导体、导体、超导体载流子的荷电特性.从经典霍尔效应到量子霍尔效应,20世纪的诺贝尔物理学奖有2次颁给了与这一效应相关的物理研究.如超导一样,量子霍尔效应是宏观量子效应,但它需要在强磁场、超低温环境才能观察到.目前,开设量子霍尔效应实验有困难,但可以开设一个经典实验(经典霍尔效应的实验技术并不太难),重点在于它的物理原理、在近代物理科学发展中的价值以及与物理系科研相关的实验内容.

穆斯堡尔效应主要用于测量原子核能级的超精细结构、确定核磁矩、核激发态寿命、固体内电场与磁场的大小及研究固体的晶格振动.这一效应在实验上有2处设计很巧妙:①把处于激发态的原子核嵌在晶格中,有效地增加吸收体的质量,使反冲能量损失接近于零,从而达到“无反冲”的目的;②使源或吸收体有一定的多普勒速度,其值大小与谱线宽度和超精细相互作用大小相关,从而达到共振吸收的目的.从物理原理角度,塞曼效应、磁共振系列实验和穆斯堡尔效应,可以整合成一个塞曼效应系列.

实验结果的数据分析和可视化表征将以现代计算机为主要工具.去年近代物理教研室由学生参与编写了有针对性的误差分析、结果表征的软件包.为使数据处理方法更加具有普适性,正考虑为学生提供更方便的 Origin 科学数据分析环境.

上面,我们介绍了《近代物理实验》课程建设的主体框架:课程结构由支柱实验、技术实验和科研实验三部分组成;按系列实验的思想将课程内容编织成一张网,每个实验便是网中的一个结点;每个系列中的实验按层次给予明确的教学定位,不再像过去那样设置在同一水平,要有先后、高低以及范围重点之分;为每个实验准备相关的理论、技术、应用发展的资料,特别是对获得了诺贝尔物理学奖的重要实验,尽量查阅有关实验原理、设

计思想的原始文章, 并提供给学生参考、阅读。目前, 尽管网中结点的大小 (即实验内容的广度和深度) 以及它们之间的连线粗细 (即关联的程度) 仍需要在教学实践中更进一步具体化, 但新世纪《近代物理实验》课程建设的整体思想已经很清晰: 课程结构模块化, 教学方法系列化, 实验内容层次化, 测量技术现代化。

3 《近代物理实验》教学管理

物理学是一门实验的科学, 不管是经典物理还是近代物理, 物理理论的提出和形成都源于对实验现象的抽象和逻辑推理。大学物理实验不应简单地采用验证理论的教学方式, 而应该以研究发现、综合分析的模式。所以, 《近代物理实验》要求学生以研究的态度完成课程内容。每个学生每年将完成 12~15 个近代物理实验, 其中有 8 个是必修重点实验。重点实验的教学内容包括实验的物理原理、实验原理和结果分析, (在教师指导下) 让学生自己设计、完成实验的具体操作, 从而增加学生在实验教学中的主动性。《近代物理实验》还需要开设一门配套的《近代物理实验技术》课程, 以本硕连读班学生为主要授课对象, 介绍一些相关的现代实验技术、科研方法。

《近代物理实验》应尽可能使用现代化仪器设备和采用现代测量技术, 在保证实验教学任务之余, 可以考虑支持科研、开发的需要。用户的研究成果 (文章) 将成为每个实验教学档案的一部分。事实上, 这也是实验教学素材积累的途径, 并使课程内容更具特色。

参考文献:

- [1] 郑裕芳, 李仲荣. 近代物理实验. 广州: 中山大学出版社, 1989.
- [2] 张孔时, 丁慎训. 物理实验教程 (近代物理实验部分). 北京: 清华大学出版社, 1991.
- [3] 戴乐山, 戴道宣. 近代物理实验. 上海: 复旦大学出版社, 1995.

Suggestion on Modern Physics Laboratory

LI Chao-rui^{*}, WU Shen-shang

Abstract: In general, modern physics experiments covered almost those led to major advances in modern physics, mostly quantum theory, but each of them was introduced and performed individually in college laboratory. In this paper, special attention is paid to the relations among the experiments, and then they are grouped into several series on the principle of their physics theory. Finally, the teaching process and purposes of modern physics laboratory are outlined.

Keywords: modern physics; physics experiment; experimental technique

^{*} School of Physics & Engineering, Zhongshan University, Guangzhou 510275, China