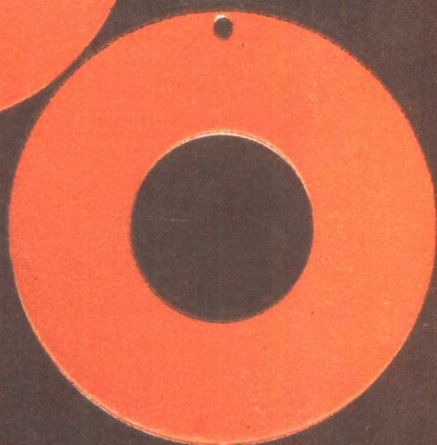


力学实验设计

龚镇雄
张世良

著



力学实验设计

龚镇雄 张世良 著

高等教育出版社

(京)112号

内 容 提 要

实验设计是物理实验的各个方面——实验方法、实验理论、仪器设计、实验技术、数据处理、误差分析以及渗透于其中的实验思想的集中体现。本书汇集了十六个力学实验,是作者在实验设计(包括仪器设计)方面的经验总结。

本书中每个实验按“设计思想”、“实验方案”、“仪器设计”、“实验结果”、“问题研讨”、“想想试试”及“背景材料”分项介绍,并且以实验设计为中心,对设计过程中的指导思想、思维方法、考虑的问题、具体的计算以及代表性的结果等作了系统的阐述。本书的“绪论——论物理教学实验的设计”部分,对设计的原则、内容和方法作了概括性的论述。

本书所涉及的仪器有数万件已在全国推广使用。本书可供大专院校的物理教师、实验室技术人员、从事教学仪器生产的工程技术人员、中学物理教师及有钻研精神的大专院校学生参考。

力学实验设计

姜镇雄 张世良 著

高等教育出版社出版
新华书店北京发行所发行
河北省香河县印刷厂印装

*

开本850×1168 1/32 印张 8.75 字数 210 000

1993年10月第1版 1993年10月第1次印刷

印数 0001—915

ISBN7-04-004143-X/O·1190

定价4.15元

前 言

本书汇集了我从1978年以后设计的力学实验的主要题目。其中除了气垫导轨的轨体和自由落体实验装置以外，其余实验连同其仪器装置都是自行设计的。

对过去已经出版的教材和教学指导书，我感到它们都只能把实验设计和改进的成果表达出来，或对其科学内容作一些研究和分析，而对设计和改进的依据、指导思想和过程中的各种具体考虑却无法予以比较充分的阐述，这些恰恰又往往是创造过程中最精华的东西；而且，也是为了把自己关于实验设计的观点、方法和成果总结出来，介绍出去，于是萌发了写这样一本书的想法。

作为一门独立的学科，物理实验在实验的方法和思想、实验的理论条件、实验设计（包括仪器装置的设计）、实验技术、数据处理和误差分析方面都有其自身的指导思想和内容，而实验设计则是一个纵贯全局的核心。它除了有其本身的内容之外，作为一个实验的整体，必然涉及实验的其他方面。本书着重讨论实验设计本身的内容和规律，而把其他方面作为实验设计的具体内容和成果来说明。

本书的绪论——论物理教学实验的设计，阐述了实验设计的含义，它在实验的各个部分中的地位及对发展和改革实验教学的意义，实验设计的内容和课题的选择，方案的确定，仪器装置的设计，并且讨论了有关实验设计的一些其它问题。这些内容体现了本人对实验设计的观点和做法。

本书汇集了十六个实验设计题目，每个题目是按以下栏目叙述的：“设计思想”——本实验设计的主要目的和指导思想；“实验方案”——实验设计内容的具体体现，这里对实验的原理和条件只作为结论介绍而不作详细叙述；“仪器设计”——仪器的物理设计、

EA37/07

结构设计和工艺设计；“实验结果”——取一组有代表性的数据(为节省篇幅,只列出平均值)说明实验设计的效果；“问题研讨”——对实验设计和实验内容中的一些有意义的或有启迪的问题展开较深入的讨论,但并不说明这是实验的主要问题；“想想试试”——把实验设计中一些类似的问题和实验方案中的某些部分留给读者自己去完成,同时提出一些开阔性的问题；“背景材料”——这里包括几个方面的内容,即历史资料,与本实验体现同样或类似的实验思想的著名实验和部分数学推导或附录等。这样,围绕实验设计这个中心,力求系统性,并有启迪性,是与一般的教材和指导书有很大区别的。本书也是一本资料性的书,它提供了目前全国普遍使用的仪器的有关性能参量。

本书中所设计的仪器装置,都是在许多工厂的和实验室的工程技术人员合作下完成的,他们参与了工艺、外观设计和部分结构设计。其中有西安教学仪器厂的朱象华(复摆,悬挂碰撞仪)、张云河(扭转盘摆)、刁理选(双线摆),北京大学物理系的张建恒(轨摆,模拟分子碰撞),北京大学仪器厂的祖保胜(刚体转动实验仪I),北京海淀区东方仪器仪表厂和东升教学仪器厂的常惠恩(长度测量组盒、密度测量组盒、梁的弯曲实验组盒、刚体转动实验仪II及单摆)。张世良同志协助我完成了终稿的编写工作,并选编了“背景材料”的大部分内容,对本书的完成付出了巨大的劳动,所以本书也是我们合作的成果。王瑞乘同志为本书绘制了插图。对于这些同志的合作,在此谨表示衷心的感谢。

虞福春老师一直关心本书的完成,并撰写了序言;对本书的完稿提供帮助的还有常慧云、刘雪林、陈征、兰肇荣等同志。本书所述内容的形成和不断完善是多年教学实践的积累,这就必然得到了同事、同学和校内外同行的启发、合作和帮助,也融汇了他们的智慧。特别要提出的是,还有使本书中所述的仪器装置变成实物并有数万件在全国推广使用的各个工厂的领导和管理人员、工程

技术人员、工人和业务人员以及在使用中不断提出意见和建议而使我能不断有所改进的各地的老师们和我的许多学生们。对于所有帮助和关心过我的同志，谨表示深深的敬意。

书中肯定有不正确或疏漏之处，恳请批评指正。对一些问题也可能有不同的见解，也欢迎共同研究讨论。

龚镇雄 于北京大学物理系

1990.7

代 序

近十年来,我国高等院校的物理实验教学(包括普通物理实验和近代物理实验),普遍受到重视,无论在教学内容、教学形式和方法、仪器设计等方面,都有很大提高和发展,与世界先进国家的著名高等院校的实验教学相比,毫无逊色,在某些方面甚至有所超过。这种进步是和广大的实验教师献身于实验教学,实验技术人员的创造性劳动,实验仪器设计与制造部门的积极支持分不开的。当然,这种进步也有教学的对象——学生的一部分贡献。由于教学的特殊性,教学本身是一个不断重复和再生的过程。教师从学生那里获得反响,它有效地促成教学内容和教学方法的改进。没有这种智能的响应,教学过程便将停留在沉闷死板的状态。十年来在国家教委和中国物理学会教学研究委员会的积极支持下,在全国召开了多次高等院校物理实验教学经验交流和研讨会,对物理实验教学的提高与发展,也起了重要的促进作用。这十年来的成绩和经验可以概括如下: 1. 排出了许多新实验,一部分是由科研成果转过来的,一部分是由国外引进的,一部分是教师自己创造的。 2. 设计了许多新的教学仪器,有些新教学仪器的内容与技术水平是非常高的。 3. 在教学形式与方法上有许多改进和新的创造。例如,有设计性实验,开放性实验,参观性(所谓“走廊式”实验)等等。 4. 对部分实验教学内容,曾进行了深入研究。 5. 对教学实验的目的曾进行了探讨。例如,工科院校的物理教学实验如何进行,如何把微机引进物理实验中,如何把实验与物理学史结合起来等等。十年来我们积累了丰富多采的经验,这些经验是极其宝贵的,但到目前为止,这些经验还是比较分散的。我认为,如何把这些分散在各个实验中的思想、观点、方法和技术的精华加以分析和综合,抽象和概括出其中具有普遍指导意义的规律,似乎是

今后物理实验教学中的一个重要的和值得探讨和研究的课题。可喜的是,龚镇雄同志根据他三十余年从事物理实验教学经验,写成这本《力学实验设计》,试图寻找物理实验中本身存在的规律性东西。他研究了历史上的著名实验,当前世界前沿的著名实验,以及国内外现有的教学实验,并把这些实验的思想、观点和方法和自己的教学实践结合起来,在力学实验的范围内,设计许多新的实验,有的是在原有仪器基础上,根据新的实验方案,作了改进并重新设计了仪器。总之,他突出“实验设计”这一概念,是想把教师对物理实验教学中的物理思想和教学目的,其中包括思想、方法、设计、理论条件、操作、数据、分析等众多的内涵,归纳和落实在“实验设计”之中,把它作为一切实验所共有的东西,即规律性的东西,并把这种规律性作为指导新实验的具体设计的原则。我认为,这一尝试对今后物理实验教学的提高与发展,是有意义的,是值得参考的。这里我提出一个问题,在十年来物理实验教学获得丰富成果以后,展望未来,物理实验教学将向何处去?我想,恐怕不仅仅是多排一些新实验,采取更多样的教学形式和方法吧。从学术的角度考虑,我们能否把物理实验教学作为一门“物理实验学”去寻找其中的原则和规律呢?也许这是我们广大物理实验教师和有关工作者感兴趣的问题。

虞福春

1990年8月19日

目 录

绪论——论物理教学实验的设计	1
一、长度测量	18
二、质量和密度测量	35
三、测定杨氏弹性模量	51
四、单摆实验	72
五、自由落体实验	83
六、匀速运动和匀加速运动的研究	99
七、简谐振动和阻尼振动	114
八、碰撞实验	128
九、刚体转动实验	149
十、用极限法测定瞬时速度	179
十一、模拟分子碰撞实验	194
十二、双盘扭摆实验	208
十三、复摆实验	222
十四、圆环摆实验	238
十五、双线摆实验	255
十六、轨摆	261

绪 论

——论物理教学实验的设计

一、实验设计的意义

从根本上来说,自然科学来自实践并用于实践。实验是研究自然科学最重要的手段,它自成体系,自有独特的规律。物理学就是一门实验的科学。物理实验不仅在物理学发展中起了重大作用,而且物理实验的方法、思想等在自然科学与各个技术部门,甚至艺术领域,都有普遍应用。

在大学理科专业,特别是物理类专业的教学计划中,物理实验是贯穿始终的课程,它与理论课共同成为培养专门人才的主要阵地。

作为一门独立的学科,物理实验在实验的方法和思想、实验的理论条件、实验设计(包括仪器装置的设计)、实验技术、数据处理以及误差分析等方面都有其自身的独特内容和指导思想,而实验设计则是贯穿其始终的核心。它是发展实验和个人提高实验水平的最积极的因素,是改进实验的关键。实验设计能力既可体现个人的综合能力,又可促进个人综合能力的提高。

本文将结合书中所汇集的实验,就有关物理教学实验设计的各方面一一提出看法。这些看法都是针对基础力学实验而言的,对其他各类实验仅供参考。

二、实验设计的含义

1. 仪器设计

这是实验设计中最重要的一项内容,也是最基本的一项内容。仪器是实验的物质基础,一种新的构思、一个新的设想,最终

都是要通过仪器装置来实现。新的突破经常是伴随着新的仪器装备一起出现的。只有从仪器装置设计开始,才能最完美地体现设计思想,达到尽量好的教学效果。

本书实验中所用仪器多数是新设计的,有些连同实验本身都是全新的,如“长度测量”、“双线摆”、“圆环摆”、“扭转盘摆”等;有些则是在原有仪器的基础上做了改进,并重新设计而成。其中有的小型化了,如“测定杨氏模量”实验装置和“悬柱的碰撞”装置等;有的组盒化了,如“密度测量”组盒等;有的变成可拆装置,如“单摆”等;有的则是几乎完全改变了原有仪器的样式,如“刚体转动”实验装置等。

2. 实验方案设计

这是利用已有的仪器装置,对实验内容、实验安排和参量选择、数据处理方法或其他方面所作出的设计。这是一种再开发,可以使人施展才华。

利用已有的装置来实现新的实验方案,其中有的还要附加设计一些仪器装置或零部件,例如“轨摆实验”、“模拟分子碰撞实验”、“用极限法测定瞬时速度实验”等;还有些实验不需要重新设计仪器零部件,利用现有仪器即可安排新内容,如“匀速和匀加速运动的研究”、“自由落体”、“气轨上的简谐振动、碰撞”等实验。

3. 局部设计

实验设计并不一定要作整个实验方案或整个实验装置的设计。实验内容或实验的某一部分,或装置中的某一部件的改进,都应算作实验设计。因为就其性质而言都是设计性的、开创性的。本来,大的设计或整体的设计也是从局部的、部分的设计开始的。而且除了一些全新的整体的设计之外,许多实验方案的设计或仪器装置的改进,也只是其中某一点或某几点上的改进而已。实际上,改进或新的设计的动机往往是在某一点上受到启发或觉得不尽如人意而产生的。

三、教学实验的特点和实验设计的目的

作为教学实验设计,除考虑实验本身的内容之外,还必须考虑其教学性质和课程特点。

1. 必须达到课程规定的培养目标和训练目的

国家教委高等教育司 1989 年 11 月 29 日印发的《综合大学物理专业(四年制)普通物理实验教学基本要求》中指出,“本课程的主要目的是:使学生在物理实验的基本知识、基本方法和基本技能方面受到较系统的训练,理论联系实际,培养学生初步的实验能力、良好的实验习惯以及严谨的科学作风,使学生逐步养成良好的实验素质,同时又为后继的实验课程以及走向社会后的工作打好基础。”

根据上述规定,物理实验作为主要的基础课,要强调基本训练内容的充实,要把各方面基本内容包括在内,要扩大学生在实验方面的知识,还要特别注意培养学生结合实际、勤于思考的习惯。这就要求实验设计为教师提出问题或为学生思考问题提供尽量充分的环境和条件,比如安排一些可以改变条件的因素(如斜度、阻尼、振幅等),设置一些可以略去的因素(如小孔、缺口、附加质量等),安排一些在精密测量中能显示其影响的因素(如摆动角度的变化等)。

为了提高学生的实验素质,除了学习实验方法、知识和技能以外,实验设计还要尽量有意识地体现各种实验思想,使学生在实验过程中得到某种熏陶和影响。

实验设计中有时还要故意设置一些程序或“陷阱”,让学生把容易犯的错误暴露出来,以便引起重视。例如把待测物体的直径选择得使学生容易少读 0.5 mm 等。

在设计单个实验时,可以作系列设计的考虑,即把不同的内容安排在不同的实验中,每个实验可以有所侧重,有的重要训练内容

可以有重复,可以在不同的教学阶段有不同的深度要求。

2. 要让学生通过本身的实践来达到培养训练的目的

学生在实验课中动手实践,应包括对实验装置的组装、调节、测量、排除故障,并且要在实践中养成良好的操作习惯。“黑盒”型的实验装置或纯观察的实验内容和安排应尽量减少。即使是观察现象的实验,也要尽量通过自己动手,改变条件,根据实际得到的结果来分析实验所显示的规律。在实验过程中,会出现许多原来意想不到的现象和问题,可以由此激发学生作进一步的分析、思考并且去寻找解决问题的办法,从而培养学生理论联系实际的能力。

3. 作为教学实验的仪器,重要的是能满足教学的需要,不必追求尽量高的精密程度。要能够承受接连不断的拆装、调试、测量,特别是要能够承受非正常操作,而且装置的各部件通用性要好,适应性要强,便于应付经常出现的破缺或磨损,也便于进行内容深浅不同、繁简不一的多种实验;还可以适应不同水平的学生作不同实验的需要。所以仪器结构要尽量简单,突出主要部分,便于揭示其物理过程,也利于降低成本和保养修复。

4. 作为教学实验设计,要考虑教学效率,包括教师授课效率和管理效率。比如在安排实验或选择仪器参数时,要使教师能根据学生直接测量的结果立即看出最后结果,或利用图表及近似计算能简捷算出实验最后结果。当然仪器的小型化及组盒化会便于实验室管理。

四、实验设计的内容

1. 体现某种实验方法

实验方法是指适用于不同实验门类的、具有一般通用意义的方法,而不是指具体测量某一个物理量的方法。例如寻找物理量之间关系的方法、验证理论的方法以及比较法、替代法、零示法、交替测量法、模拟方法、示踪方法等。

例如“碰撞”实验体现直接检验理论的方法；“简谐振动”实验用图示描点方法比较理论曲线与实验曲线来验证理论公式；“多用密度秤”中包含有直接替代法等。

2. 建立某种理论模型

当你提出某种理论时，必须用实验予以验证。有时整个实验就是为建立某种理论模型；有时则是作为实验内容或仪器性能的一部分，或作为某一个细节的发展，需要理论联系实际予以研究。一个理论公式到底在哪一级上作近似，也是建立理论模型的一种类型。有时这是封闭性或半封闭性的，即用于实现或验证已提出的模型，确定参量；有时则是开放性的，可以更多地发挥学生的理论创造能力或设计能力。

3. 认识实验条件

实验条件是指实验中所用的全部理论依据，体现在数据测量公式上或显示在图象上所要求的理论条件。理论公式的每一步推导，会引入各种条件；某些实验方法要求保持同样的物理条件；实验的仪器装置要求在一定的环境条件下使用；数据处理方法及物理量本身的性质有时也要求一定条件。所有这些条件的总和就构成整个实验的实验条件。

实验条件是否能满足，需要满足的程度以及偏离实验条件多大会产生多大误差，在实验方案的确定、仪器设计、装置调节和实验操作时是贯穿始终的一个问题，应该以此为目标作出实验设计。

例如在“刚体”实验中，就着重体现了理论推导的每一步骤和数据处理过程中引进哪些实验条件，以及从仪器设计、装置调节和实验测量中如何满足实验条件和需要满足的程度。

4. 学习仪器装置知识

有时为了把某种仪器或部件引入实验，就安排设计了某个实验。有时为了掌握使用仪器的基本方法而设计了某些装置或安排

了某些操作。有时则只是为了介绍某些有关仪器装置的知识。

例如，当初安排气轨和数字频率计的实验是为了把这些新技术装置引入实验。在“匀速和匀加速运动”等实验中，安排使用可以累计计时的“多功能智能式计时器”，而设计具有 150 个分度的球径仪是为了使学生学习有关零点、仪器的分度值与读数的关系以及注意测量时的螺距差用的。

5. 训练实验操作技能

实验操作内容有很多方面，如操作安排、装置调节、仪器和装置选择、实验技能以及实验习惯等。有很多实验就是为训练实验操作技能而设计的。

例如在“自由落体”和“运动”实验中作出实验安排以消除时间零点和位置零点的影响。正确的调节步骤的训练设计在“凯特可逆摆”实验中。减少误差的内容安排在“单摆”实验里。连续记录大量数据也是一种训练，这部分内容设计在“运动”实验中。对称测量可以消除或减小误差的内容，安排在“简振”实验中。渐近法安排在“悬柱碰撞”实验中。测量中随时判断数据的规律性和合理性以及实验中实验条件的保证等内容安排在“刚体”实验中等等。

6. 学习数据处理方法

数据处理方法包括作图法、逐差法、回归法、平均法等处理组合测量数据的方法，还包括近似计算、估算等方法，以及一些习惯处理方法。数据处理贯穿整个实验过程的始终。它常常同实验方法联系在一起。

例如在“分子碰撞”实验中就包括了直线图、曲线图、用直角坐标纸作图以及用对数坐标纸作图和图线的外推、相加、相减、求极值等多种作图方法。线性回归在自变量等间距变化时的简便算法设计放在“杨氏模量”和“刚体”实验里，而把二元线性回归设计放在找出“圆环摆”的内、外径与周期关系的实验里。估算方法放在不同直径圆环摆的缺口、指针的转动惯量的数量级以及当作质点或

不当质点, 其对质心位置及对结果的影响里。“ v ”实验(用极限法测瞬时速度)中设计了非线性外推方法。“落体”和“梁”的实验中安排了二次逐差和三次逐差。近似计算则安排在“密度”和“盘摆”实验里作图时变量的设置上, 等等。

7. 学习误差分析方法

误差分析包括多方面内容, 也是贯穿实验始终的重要环节, 它包括误差的各种计算、估算、影响误差大小因素的分析、实验条件不满足对实验结果的影响、测量结果中误差的表述等。

例如, 各种偏离实验条件的调节及近似公式的误差对结果的影响着重安排在“伸长”实验中光杠杆镜尺组的调整上; 质量本身及其误差可略去的方法, 设计在“长度”实验中, 重复出现的量的误差的计算方法体现在“长度”和“密度”实验中; 用误差分析对实验验证作出判断的方法, 放在“碰撞”实验中, 把某一个因素对结果产生影响归结为某一个或某几个物理量上的系统误差分析方法, 设计在一些“摆”的周期实验上, 等等。

8. 体现某种实验思想

我们在进行各部分实验时, 都在某种思想的指导下去进行设计、安排、操作、测量, 进行数据处理, 以得到尽量好的结果, 我们称这种指导思想为实验思想。

例如, “把不易测准的量转化为易测准的量”的思想体现在用阿基米德原理测定不规则固体的“密度”实验里, “多测几个容易测准的量而绕过不易测准的量”的思想体现在“刚体”实验中, 是把摩擦力放到图线的截距上, “同一组数据用不同方法处理可以有不同结果而体现不同物理模型”的思想体现在“落体”实验测定重力加速度的不同公式及多次测量求气轨上滑块的瞬时速度的运算顺序上, “总误差既决定于各直接测量量的误差, 又决定于误差传递系数”的思想, 体现在“环摆”实验中以减小误差传递系数的方法来减少总误差以及“长度”实验中的仪器选择方法上等等。

9. 引入新的物理内容

除了上述内容之外,实验设计还常常根据物理学科的发展或本专业、本校或本实验室的需要来增添内容。

例如“双盘摆扭”实验是为了引入折合转动惯量而设计的;“分子碰撞”实验显示了分子间的作用力,是分子物理实验的一种补充;“轨摆”实验填补了非匀加速的非惯性参考系以及两种非惯性参考系叠加的教学实验的空缺,等等。

10. 充实完善现有实验

已有的实验可以充实、发展、深化、拓宽,以全新的面貌出现。

例如“简振”实验,从原有的检验周期与振子质量的关系到增加周期与劲度系数的关系,从而有了更加完整的对弹簧振子周期公式的验证。再加上运动学和机械能守恒的内容,这个实验就包括了简谐振动的全部内容。“刚体”、“复摆”、“多用秤”等实验都在原有基础上作了补充和完善。

五、选择设计课题和确定设计方案

实验设计的过程应包括选择课题、确定方案、设计仪器装置以及通过实验检验及最后定方案这几个步骤。实验设计的过程是一个创造过程,有时随同一个新仪器装置的出现,也就是完成了一项发明或实用新型仪器的创造。

1. 选择设计课题

这是进行实验设计的第一步。设计课题选择得好坏直接影响成果的水平。它可以从以下几个途径入手,

(1) 教学实践。实践是最积极的因素,是提出问题的最重要的源泉。物理实验教师一方面从事科学实践,另一方面也从事教学实践。反复接触,反复思考,就会产生出各种各样的设想来。这其中可能有的是批评整个实验、整套仪器,但更多的是萌发一些改进的设想。