

虚拟实验原理与 教学应用

单美贤 李 艺 著

教育科学出版社

虚拟实验原理与 教学应用

单美贤 李 艺 著

教育科学出版社
· 北 京 ·

责任编辑 张杰夫
版式设计 尹明好
责任校对 贾静芳
责任印制 叶小峰

图书在版编目(CIP)数据

虚拟实验原理与教学应用 / 单美贤, 李艺著. —北京:
教育科学出版社, 2005. 3
ISBN 7-5041-2750-7

I. 虚... II. ①单...②李... III. 计算机辅助教学
—教学研究 IV. G434

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2005) 第 123131 号

出版发行 教育科学出版社

社 址 北京·朝阳区安慧北里安园甲 9 号

市场部电话 010-64989009

邮 编 100101

编辑部电话 010-64989307

传 真 010-64891796

网 址 <http://www.esph.com.cn>

经 销 各地新华书店

印 刷 涿州市星河印刷有限公司

开 本 787 毫米×1092 毫米 1/16

印 张 12.25

版 次 2005 年 3 月第 1 版

字 数 198 千

印 次 2005 年 3 月第 1 次印刷

定 价 20.00 元

印 数 1—3 000 册

如有印装质量问题,请到所购图书销售部门联系调换。

前言

在科学技术发展史上，科学实验的出现是一个重要分水岭，无数事实充分说明科学实验是知识的源泉，是推动社会进步及科技发展的重要动力。我们说到的虚拟实验，一般指的是使用某种技术手段模仿或者模拟的某种虚拟的实验场景，我们以它作为桥梁，克服资源、时间、人力等自然条件方面的局限，将真实世界中发生的实践经验与想像空间相联结，从而丰富我们的认知经验，拓展我们对世界的认识。一般而言，虚拟实验是在科学实验发展到一定阶段、人们采用部分虚拟对象代替真实对象而产生的，随着计算机技术的产生和发展，虚拟实验获得了更加长足的发展，逐步成为科学研究和科学实验中的一种强有力的工具。实际上，另外一类虚拟实验的作用及价值也是不可忽视的，这就是思想实验。思想实验又称理想实验或假想实验，是一种在高度理想化的条件下，在科学想像之中所进行的特殊的“试验”。思想实验是科学实验、形象思维与逻辑推理有机结合的产物，是科学发现这种创造性活动中最有启发性的方法之一。伽利略、爱因斯坦等许多科学大师都曾经借助理想实验延伸其理论的触角。

“虚拟世界既不是有形的物理现实，也不是根本不存在的虚无，它是一种特殊的存在，既不能简单地把它归为有形的物质，也不能简单地把它归为意识……它是由物质向意识转化的中间环节”。这种中间环节构筑起物质与意识之间的桥梁，有利于我们更好地认识物质、形成意识。虚拟实验正是这样的中间环节，相对于真实实验，虽然没有真实存在的实验对象，但它可以对虚拟事物进行操作，获得类似于真实实验的数据，从而为实验者提供一种经验支持。虚拟实验因其虚拟，而具备了真实实验所不具备的特殊优势，它可以打破时间、空间的限制，拓展我们实验的时空，可以虚拟生命起源、地球的形成之类的实验，可以虚拟地壳之内、太空之外的实验，甚至可以虚拟人类心理活动的实验，向我们展示我们从未感受过的时空景象。它还可以最大限度地节约我们的时间和财富，可以用几分钟

时间虚拟出人一生中某个器官的变化,可以用几十万之一比例的模型虚拟出长江三峡这一人类巨大工程,以最高的效率向我们展示已有的时空景象。

由于虚拟实验具有上述优势,人们很快发现它不仅应用于科学研究和科学实验,也可以将它引入教育教学活动。相对于理论教学,实验教学将理论知识和实践活动紧密结合起来,更具有直观性、实践性、科研性、综合性和创新性等特点,在学生能力培养和综合素质提高方面有其独特的作用。依据人类的认识规律和教学规律,借助于计算机等技术,有机地融合起教学内容、虚拟实验设备、教学指导、学生操作,将科学技术准确、安全、便捷、生动地呈现给学生,以提高学生的认识能力、实践能力和创新能力。随着虚拟实验越来越广泛地被各种教学活动所采用,这类实践活动越来越迫切地需要理论的指导;而随着实践经验积累得越来越多,也为系统性地理论总结提供了可以依赖的基础。本书就是为着这个目的,系统地展开关于虚拟实验及其教学应用问题的研究,一方面可以为虚拟实验教学应用提供指导,另一方面,至少为相关研究者今后持续关注这个话题提供有益的支持。

本书围绕虚拟实验系统及其教学应用问题展开分析,主要内容可以分为四个大的部分。

第一部分对虚拟实验的基本问题展开思考,阐述虚拟实验系统的特征和虚拟与真实间联结的纽带问题,包括第一、二章。基本观点是:现实世界与虚拟世界是整体的客观实在世界的两个相互补充的方面,人们不能没有对自然界的深刻体验,同样又离不开对生活空间的想像。虚拟世界是一个功能性的整体,是我们人类自身能够利用感觉器官进行感知的对象世界,它用确定性表达的不确定性,使我们处在一个奇特位置的世界中:既处于真实的现实世界中,又处于抽象的对象世界中,一旦我们在虚拟世界中理解了事物的特征与行为,则可以通过重新解释在虚拟世界发现的特征与行为,从而在我们真实的世界中来应用它们。虚拟实验系统是以数学理论、相似原理、信息技术、系统技术及其应用领域有关的专业技术为基础,以计算机和各种物理效应设备为工具,采用“面向对象”思想创建的,能够实时操作的、非实在的实验空间,在此环境中,实验者可以像在真实的环境中一样完成各种预定的实验项目。

第二部分论述虚拟实验系统的具体应用,包括第三、四章。基本观点是:虚拟实验系统所提供的任务整合了多重的内容和技能,既接近日常的

活动与实践,又简化了世界的复杂性,突出其中的特定规则,有助于学生用真实的方式来应用所学的知识,同时有助于学生意识到他们所学知识的相关性和意义性。因而在虚拟实验环境中,学生可以尝试着从他们自己的角度来观察世界,获得关于真实世界中各种现象的科学知识。在利用虚拟训练系统进行技能训练时,由于虚拟训练系统不可能与真实训练环境完全一样,所以要重视过程、重视观察、重视思维、重视综合、重视应用,注重培养学习者掌握解决问题的模式和策略,要启发学生把虚拟训练中学到的知识和技能运用于实践,促使其知识、技能得以拓展和完善。

第三部分论述虚拟实验实践策略,包括第五、六、七章。其基本观点是:使用虚拟实验系统辅助实验教学,可以在某种程度上改善实验教学条件,并也有可能限制学生能动性的发挥。在虚拟实验中,学生可以进行直接的学习,但教师要发挥的一个重要作用,就是提高学生对虚拟实验的概念、原则和技术的认识,从而使学生对自己所处的实验环境有一个全面的了解。虚拟实验系统的虚拟性特点使得实验教学的组织与实施更加复杂,既要考虑虚拟实验中存在的问题,又要结合实际情况应用虚拟实验系统。在选择实验教学方法时,要考虑学习目标、实验内容、学生特点、教师态度、实验环境等因素;采用合理的实验教学组织形式,有利于实验教学活动多样化,满足不同学生的不同学习要求,从而实现实验教学的个性化。

第四部分论述虚拟实验系统结构,包括第八、九、十章。在虚拟环境中,实验的成功与否,既与学生的认知活动密切相关,又离不开虚拟实验系统所提供的实验环境。了解虚拟实验系统的设计及常用的开发工具,以便根据实际的实验需要,或改进已有的虚拟实验系统,或开发新的虚拟实验系统,以提高学习者的实验兴趣,提高实验教学的针对性和实效性。

随着相关技术和学习理论的发展,虚拟实验系统将更为完善和人性化,更加适应实验教学发展的需要。本书虽然从一个层面或一个特定的视角对虚拟实验系统作了初步的研究,但限于作者的理论素养、知识积累和研究能力,一些观点也只是初步的,有待在今后的研究中深化。因此,来自任何方面的批评和建议都是对作者的研究工作的最大支持和鼓励。

作者
2004年10月

目 录

第一篇 导论	(1)
第一章 虚拟实验:发展、内涵和特征	(1)
第一节 虚拟实验的发展历程	(4)
第二节 虚拟实验系统的应用举例	(15)
第三节 虚拟实验系统的含义	(22)
第二章 虚拟与真实连结的纽带	(27)
第一节 相关概念界定	(27)
第二节 体验与经验	(33)
第三节 学习理论基础	(45)
第二篇 虚拟实验的具体应用	(50)
第三章 概念与技能掌握	(51)
第一节 概念掌握	(52)
第二节 技能训练	(60)
第三节 迁移应用	(71)
第四章 探究与合作学习	(84)
第一节 科学探究	(84)
第二节 互动协作	(93)
第三篇 虚拟实验实践策略	(101)
第五章 虚拟实验系统中的师生	(101)
第一节 虚拟实验中的学生	(102)
第二节 虚拟实验中的教师	(105)
第三节 相关研究分析	(108)
第六章 虚拟实验的教学方法与组织形式	(121)
第一节 教学方法选择策略	(121)

第二节	常用的教学方法简介	(124)
第三节	教学组织形式	(128)
第七章	虚拟实验系统的其他应用	(133)
第一节	虚拟实验室应用举例	(133)
第二节	远程虚拟实验室	(138)
第三节	智能化虚拟实验室	(142)
第四篇	虚拟实验系统结构	(144)
第八章	虚拟实验系统设计	(146)
第一节	模型概述	(146)
第二节	设计原则	(152)
第九章	虚拟实验环境架构	(164)
第一节	基本的虚拟实验系统	(164)
第二节	自适应虚拟实验系统	(168)
第三节	分布式虚拟实验系统	(173)
第十章	常用软件介绍	(181)

第一篇

1

导论

第一章 虚拟实验：发展、内涵和特征

在科学技术发展史上，科学实验的出现是一个重要分水岭。自从出现科学实验以后，科学技术以神奇的速度向前发展，在欧洲如此，在中国也是如此。中世纪的欧洲曾经历了长达一千多年的“黑暗时期”，神权高于王权，科学要为神学服务，有创见的科学先驱遭到迫害，科学凋零、停滞。科学实验兴起（1500—1600年）以后，大量的事实和科学发现，否定了宗教教义的种种主观臆测，冲破了经院哲学对思想的禁锢，使自然科学从神学中解放出来。科学实验形成一种完整的思想体系和方法论，经历了一百多年的历程——从培根、伽利略到牛顿。1687年牛顿的《自然哲学之数学原理》出版，标志着科学实验思想体系的形成。在该书里，牛顿提出了一整套“从经验事实概括为自然科学理论的方法”：从观察到实验开始，经过归纳、推理，寻求量的规律，提出假说，再进行验证，经过多次反复，直至找到普遍适用的定律。牛顿这一套科学实验的思想体系，无论在物理、化学、生物，还是在机械学、电工学等许多学科领域中被应用，都取得巨大成功，以至后来很多科学家认为，牛顿的科学实验思想体系对整个科技进步的贡献，远远超过“牛顿三大定律”。可以说，近代自然科学是在科学实验中产生和迅速发展起来的。

人类社会及现代科技发展上的无数事实早已充分说明了科学实验是知识的源泉，是推动社会进步及科技发展的重要动力。大家熟知的几位华裔诺贝尔奖得主，如丁肇中、杨振宁、李政道等，无一不强调科学实验对科技发明的重要性。现代科学技术的发展，特别是新兴学科、交叉学科的不

断出现,实际上已经打破了学科之间、理论研究与实验之间的界限。随着21世纪信息时代和知识经济的来临,个人拥有知识的老化程度不断加剧,只有不断接受新知识,获取新知识并最终创造新知识的人才能适应时代发展的需求。科学实验是人类认识自然,并最终改造自然的最直接的活动,只有在不断的实践经验中建立起较强的科技开发能力和科研创新能力,才能创造新知识。因而,实验教学是培养学生创新意识和能力的重要环节。在教学活动中,学生不仅可以通过观察实验现象、分析实验数据、总结实验结果去验证已有的知识,同时也是更重要的,实验是一个积极的、发挥主观能动性的再创造过程。实验教学过程不仅可以培养学生“严谨、求实、勤奋、创新”的科学学风,还可以培养他们的团队精神、协调能力、环保意识等基本素质。

实验教学是指在教师指导下,使学生亲自动手、运用实验手段、借助仪器设备、选择适当技术方法,观察、探索自然现象的运动变化,从而获取感性知识,加深理解,进而揭示实验对象的本质的活动。实验教学过程把理论知识和实践活动、间接经验与直接经验、抽象与形象相结合,相对于理论教学更具有直观性、实践性、科研性、综合性与创新性等特点,决定了它在育人方面尤其是在学生能力培养和综合素质提高方面有其独特的作用,是整个教学体系的重要组成部分和基石。实验教学主要有以下几个方面的功能。

①实验教学能培养学生良好的意志品质。通过实验活动,可以培养学生认真观察、实事求是的科学态度,严谨认真、一丝不苟的工作作风,敏锐的观察能力、探索精神和坚强的毅力。

②实验教学有利于优化学生的知识结构,可以激发学生爱科学、学科学的兴趣和求知欲。具备知识传授、能力培养和素质教育的实验教学,不仅向学生传授实验技术知识,更重要的是能教给学生如何通过实践获得更多的知识。实验过程中直观形象的实验现象,既增强学生的感性认识,使其从死记硬背、生搬硬套中解放出来,又使学生在看、听、做、思中学到知识,激发学生的学习兴趣。

③实验教学具有训练技能的作用。技能是在掌握知识的基础上,通过反复练习而逐步形成的。学生积累了一定的理论知识和技能,就可以开展比较复杂的综合实验、设计性实验,从而对已掌握的知识和技能起到深化与拓展的作用。

④实验教学能提高学生的多种能力。实验教学不仅能很好地配合课堂

教学, 提高教学质量, 更重要的是培养学生的基本实验能力(如: 观察能力、动手能力、思维能力), 创造性实验能力(如: 分析和解决问题的能力、创新应用能力)。实验过程中, 学生通过实验操作, 使其能力和智力得到积累和提高。

⑤具有探索未知、推动科学发展的作用。许多科学成果是在大量的实验中得来的, 这表明了实验与科学的内在联系。即使是在基础实验中, 也可引导学生在观察异常现象中进行分析探索, 发展创造性思维, 从而就有可能总结出具有科学研究价值的经验和规律来。

近年来, 伴随着教育教学改革的不断深化, 实验教学改革取得了一定的进展, 但由于受传统教育观念的影响, 实验教学中还存在着不少令人担忧的问题: 实验室硬件建设的资金投入相对不足, 维修周期长, 导致实验室管理人员不敢放手让学生使用, 加之仪器设备更新率低, 实验教学内容陈旧, 无法激发学生的实验积极性; 实验室开放的时间少, 实验者感到很不方便; 实验内容的深度和广度不够, 大多数教学实验主要是验证书本上的理论、读取一些数据的单一性实验; 多数实验给出具体实验步骤, 学生依样画葫芦, 自己的操作、探索少; 实验教学没有定位于“立足于应用”这一层面上, 忽略与生产实际的有机联系, 不能充分体现现代科学技术的更新发展等等。

针对实验教学中存在的诸多问题, 许多学校一方面增加投入改善实验教学条件、改进实验教学方法, 如某大学普通物理实验课中, 正在进行“速度与加速度”的教学, 教师在开始时只用很短时间讲了主题, 然后用了较长的时间组织学生在讲台上做“斜面滚球”实验, 测出数据, 投影到墙上, 让全班学生计算运动距离和时间的关系, 整理出自己的公式, 然后讨论, 最后教师讲了速度、加速度的一些基本定律, 讲了历史上伟大的科学家怎么用这个实验发现定律的。与此同时, 正逐步在实验教学环节中引入虚拟实验, 例如美国巴尔的摩 Johns Hopkins University 的化学工程系教授卡尔威在电脑网络上建立了一个虚拟实验室, 模拟各种实验, 让工程系的学生可以通过电脑网络来做实验, 尝试解决工程上遇到的各种问题。如在一个虚拟的钻井实验中, 学生可以知道某个位置的油井的深度, 从而估计油层的形状及开采所需费用^①。虚拟实验可以模拟现实中的某一领域的知识, 系统的交互性和快速响应以保持学习者的兴趣, 或部分替代真实

① <http://www.wx.net.cn/qyxz/no4/7.htm>

实验环境, 或为进行真正的实验做准备, 是真实实验的有力支持。

另外, 网络的出现与发展, 使得远程教育取得了很大的成功, 但大多数教育机构意识到一个主要的挑战来自通过互联网提供实验课程的困难, 而工程学中的实验部分是不可缺少的。在传统的远距离教育中, 实验教学的解决方法一般有以下几种形式^①。

①录像带: 英国开放大学使用录像带, 另外也利用其他远程教育技术。如果实验教学中只需简单的实验介绍, 那么放映此实验的录像带就可以寄给学生。测试时, 由在线的主考者提问以对学生作出评价。

②家庭工具包: 如果实验必须动手, 就给学生发送一个定制的家庭工具包 (包含有使用说明)。英国开放大学设计了一些便于学生使用的工具包。然而, 要提供这样一些课程 (如电路设计、微处理器等) 的工具包成本非常大, 因此是不太可能的, 另一方面, 学生可能没有相应的附加设备。

③本地安排: 对于学校实验室附近的学生来说, 这种方法可能是最好的选择, 但它受到实验室自身的限制, 如时间、设备、教师的指导等。

随着网络技术和虚拟现实技术的不断发展, 基于网络的虚拟实验系统 (如下文将要介绍的麻省理工学院的 WebLab 等) 克服了传统远距离教育的局限性, 它将为学生提供一种协作式的、个性化的实验环境。借助远程虚拟实验, 独特的或昂贵的设备可以为几所大学共享, 这样学生可以从大量的实验室资源中选择实验设备, 进一步拓展了远程教育的适用领域。

物理资源的缺乏 (包括实验设备和教职员工) 和实验的实际环境 (危险性实验等) 限制了对学生的实验需求的满足, 而虚拟现实技术及相关技术的发展水平已使虚拟实验可以胜任对真实实验室的模拟, 虚拟实验的发展历程已经证实了这一点。

第一节 虚拟实验的发展历程

模拟实验是一种应用广泛的科学实验方式, 这种实验方式古已有之,

^① Bassem Alhalabi, Virtual Labs VS Remote Labs: Between Myth & Reality, Center for Distance Education Technologies (CDET) Florida Atlantic University

例如,我国宋代著名思想家沈括^①就用半面涂粉的弹丸来模拟月亮,以探讨月亮、太阳之形态,以及月食等现象。《梦溪笔谈》卷七载曰:“日月之形如丸。何以知之?以月盈亏可验也。月本无光,犹银丸。日耀之乃光耳。光之初生,日在其傍,故光侧而所见才如钩;日渐远,则斜照,而光稍满,如一弹丸,以粉涂其半,侧视之,则粉状如钩;对视之,则正圆。此有以知其如丸也。”显然,模拟实验已在这里初露端倪,尽管它还很原始、粗糙。随着近代科学技术和社会生产力的迅速发展,人们进行模拟实验的愿望越来越强,进行的尝试也愈来愈广泛。如1829年法国科学家柯西模拟梁和板的振动的实验,1883年雷诺模拟管流的实验,以及此后美国人莱特兄弟俩进行的在航空史上影响深远的“风洞实验”等等。经过几百年的发展,模拟实验终于在20世纪成为一种基本的、用途广泛的、效果卓著的新型实验方法。

模拟(simulation)即选取一个物理的或抽象的系统的某些行为特征,用另一系统来表示它们的过程。模拟实验是根据物理模型与实际系统间的相似性,来研究实际系统某些行为特征的实验方法。俄罗斯圣彼得堡市克雷洛夫中央科学研究院2001年7月5日进行了打捞以及运送“库尔斯克”号核潜艇残骸的波动模拟实验^②。实验在一个与海洋条件相似的大型水池中进行,实验室中的气候条件与巴伦支海夏天和秋天的气候条件相近,实验的目的主要是检验打捞核潜艇的牵引装置及运输设备是否牢固可靠。参与实验的是一艘只有“库尔斯克”号五十分之一大小的模型和一艘驳船。实验时,通过驳船将“库尔斯克”号模型沉入水底,加以5级人造浪为模拟自然条件,然后开始进行打捞。实验中模拟了打捞“库尔斯克”核潜艇以及将核潜艇运往海岸时可能遇到的各种情形。模拟实验中使用的模型与“库尔斯克”号是两个互不相关的实体,只是在功能、作用、能力等方面是相似的。

随着数学理论、相似理论、计算技术等的发展,仿真技术逐步得到应用。仿真方法的应用最早可追溯到1773年,法国自然学家用仿真方法做物理实验估计 π 值(数学模型);1876年,美国统计学家第一次用仿真方法做随机数实验(数学模型);1908年,W. S. Gosset用仿真方法证明

① 桂起权、张掌然著:《人与自然的对话——观察与实验》,浙江科学技术出版社,1990年版,第135页

② <http://www.sina.com.cn>, 2001-07-06, 新华网

“t 分布法”（数学模型）；1940 年代初，美国开始了飞行模拟器的设计（数学—物理效应模型）。

仿真（emulation）即用另一数据处理系统，主要是用硬件来全部或部分地模仿某一数据处理系统，以至于模仿的系统能像被模仿的系统一样接受同样的数据，执行同样的程序，获得同样的结果。仿真实验是利用数学模型或数学—物理效应模型，并借助于专家经验知识、统计数据和信息资料对实验结果进行分析研究的实验方法。为了破解巨型行星上的小月形物的奥秘，康奈尔大学的行星科学家们使用世界上最强大的电脑群以模拟 10 亿年前木星上的小月形物体的运动^①。通过 3 个月的计算周期，“速度 1 号”计算机群成功模拟出造成木星上的月形物体运动的宇宙环境，当把假设的月形物体的轨道数据输入电脑后，计算结果也就随之出来了，据此数据，天文学家们得到了对 12 个已知的小的木星月形物的不寻常的运行轨道的解释。

1966 年，美国 MIT（麻省理工学院）的林肯实验室开始了头盔式显示器的研制，揭开了虚拟现实技术研究与应用的序幕。虚拟现实是一种多维的经历，这种经历全部或部分地由计算机引起，并且经历这种环境的人将其作为现实环境而接受。1983 年，美国的 DARPA（先进防御研究项目机构）开始开发实用的虚拟战场，设计出了 SIMNET 系统，到 1989 年，形成了约 260 个地面装甲仿真器及通讯网络、指挥所和数据处理设备等互联的网络，结点分布在美国和德国的 11 个城市。人们把虚拟现实环境中进行的实验称之为虚拟实验——借助于虚拟现实技术所创建的实验环境（虚拟现实模型）进行研究分析的实验方法。

虚拟实验是依托“虚拟现实”技术而产生和发展的一种实验模式。虚拟实验在广义上似乎也是一种模拟实验，但它在实验的本体逼真性和应用普适性，以及在给予实验者现场实时感受和实验效果等方面，传统的模拟实验和仿真实验是根本无法相比的。虚拟实验一般是通过虚拟实验室而进行的。虚拟实验室是由虚拟现实技术生成的一类适于进行虚拟实验的实验系统；包括相应实验室环境、有关的实验仪器设备、实验对象以及实验信息资源等，可以是某一现实实验室的真实实现，也可以是虚拟构想成的实验室。

虽然模拟实验、仿真实验和虚拟实验三者的技术支持和实现手段各不

^① <http://tech.enorth.com.cn/kxts/wjzm/000211552.html>, 2002-05-12

相同,但其基本思想是相通的,即借助另一系统(物理模型、数学模型或数学—物理效应模型、虚拟现实模型)来研究相对复杂或抽象的实际系统。为了便于表述,在本书中我们一律用“虚拟实验”这一词汇。综上所述,我们可以看出虚拟实验的发展大致经历了思维模型与逻辑分析阶段、模拟仿真阶段(书中侧重于描述计算机仿真)和虚拟现实三个阶段^①。①思维模型与逻辑分析阶段是以科学实验为基础,以逻辑推理为根据,在思想中塑造实验模型(即思想实验)的实验方式。例如伽利略发现惯性定律的理想实验,他在实验中设想了一个既没有摩擦也没有任何外力作用的永远运动的物体。②计算机仿真阶段是以系统数学模型为基础,在一定假设条件下利用计算机对实验对象的数学模型进行的信息处理过程。计算机仿真是分析评价现有系统运行状态或设计优化系统性能的一种技术手段,在航空航天、工程设计、生态环境等领域中有着广泛的应用。③虚拟现实阶段是以虚拟现实技术为基础,通过模拟人与周围真实环境交互方式而建立的观察界面进行实验的过程。虚拟现实技术的多感知、交互性、自主性等特点,突出了实验的形象性和直观性。例如美国柯达公司利用能进行三维动态分析的计算机系统来设计新型的胶片,工程师们在虚拟的空间中进行实验操作,感光胶的合成过程和曝光时所进行的光化学反应,都不再是一些抽象的数据,原来无法想像的过程变得一目了然。②

一、思想实验

思想实验又称为理想实验或假想实验,是一种在高度理想化的条件下,在科学想像之中所进行的特殊的“试验”。思想实验是科学实验、形象思维与逻辑推理有机结合的产物,是科学发现这种创造性活动中最有启发性的方法之一。在思想实验中,实验者使用理想化的仪器设备(如伽利略的绝对光滑的斜面、平面,爱因斯坦的理想列车与理想升降机),在极端理想化的条件下(如无摩擦、无空气阻力,或者完全摆脱引力影响处在“自由空间”之中)对实验对象(各种理想客体)进行“操作”和“观察”。

① 赵时亮:《虚拟实验:从思想实验到虚拟现实》,《科学技术与辩证法》,1999年第6期,第21~25页

② 李锦涛、刘国香:《虚拟环境技术》,中国铁道出版社,1996年版,第156页

1638年,伽利略在《两门新科学》一书中设计了一个自由落体的思辨型的思想实验^①:有质量为 M 和 m 的二物体($M > m$)自由下落,如果 M 快, m 慢,那么把两者捆在一起下落,由于有了 m 这个慢的因素的参与,捆绑体比 M 落得慢些。然而另一个方面捆绑体的质量 $(M + m) > M$,按越大越快的原则又应比 M 快些。两个推论相悖,所以快慢与质量无关,应同时落地。从而开始动摇了亚里士多德统治2000年的经验结论。接着他又提出了一个光滑钢球无摩擦自由滚动可至无限的思想实验。从而有力地证明了外力不是使物体运动的原因,而是使速度变化的原因。

从对近代科学中思想实验的历史考察,我们可以看到,思想实验是按真实实验的格式展开的一种复杂的思维推理活动。其思想操作包括以下几个层面:①对从未进行过的或潜在的可以实现的实验的预想;②对真实实验的理想化抽象或外推,即理想实验;③现实中不存在、与经验相矛盾的,但逻辑上讲得通、科学上有意义的想像。这些思想操作不必物化(有的不能物化)就可得到确定的结论。由此可见,思想实验具有以下特点^②。

1. 思想实验具有实验的可操作性

思想实验不是实际进行的实验,是头脑中的实验。它之所以被称为“实验”,是因为这种思维活动是按照实验的要求展开,是可操作的。R·哈里^③指出:“所谓思想实验是在想像中操作模型时形成的”。在思想实验中,假设观测者运用假想仪器对假想客体进行操作,这种操作是在想像中进行和仿真的。操作者主要根据自己的认识和思考,使用贮存于头脑中的经验表象、语言材料,通过分析、想像、类比和逻辑推理,进行想像的操作。

思想实验使用的假想仪器是假想主体对客体作用的基本手段。爱因斯坦在确定同时性的程序定义时,认为光按直线以恒速传播,核对两个同样的钟的同步的程序是:测好两只钟的距离,找到它的中点,守在两只钟旁的两个观察者,当各自的钟指向七点时发信号,如两信号在中点相遇,则这两只钟便是同步了。或者,设 A 、 B 两钟的距离是 L , A 处的观察者在

① 王泽良:《思想实验的作用和意义》,《工科物理》,2000年第2期,第64页

② 王荣德:《思想实验及其在科学发展中的作用》,《科学学研究》19(1),2001年第3期,第14~21页

③ R. Harre ed: The Science, their Origin and Method [M]. Glasgow, Beackie, 1967, P145

A 钟指零时发信号，而 B 处的观察者在收到信号时，将 B 钟拨到 $t = L/C$ ，如此时再从 B 处发信号，则 A 处接到信号时，A 钟的指针应在 $(t + L/C)$ 处。用这样的方法就可建立一套同步的钟的网络。爱因斯坦说：“在我们相对论里，我在空间每一点上都安放了钟；但实际上在我的房间里，甚至连一只钟都没有。”在这里，他以各点的同步钟为假想仪器，对时间、空间进行观察，终于导出了“同时”的相对性，并成为建立狭义相对论的一个关键。假想客体不断变化的形象是思想实验最主要的内容，也是思想实验操作的必然过程。假想的主体和仪器都是为此而存在，并在对假想客体的观察和作用的过程中，揭露被研究事物的本质和相互联系，从而达到思想实验预定的目的。

2. 思想实验具有严密的逻辑性

在思想实验进行过程中，逻辑推理是它的基本指向，科学家在构思思想实验时，可以充分自由地想像；他可以根据自己掌握的经验和知识、当时的科学水平，就被研究的客体进行充分地联想，联想从何而发、向何方延伸也是随机的。当众多形象材料、经验表象在科学家脑海中涌现时，其展开和联系则常常求助于与此有关的概念和关系。这些概念与关系既同下一步的逻辑思维联系着，又同构思前预定的目的联系着。只要逻辑推理允许，它甚至也接纳那些违背“经验事实”的，或同已确定的“物理规律”相对立的表象进入思想实验中。比如，爱因斯坦在创立相对论的过程中，为了阐明同时性的相对性，他突破了牛顿力学的绝对时空观，建立“爱因斯坦列车”、“时钟佯谬”等思想模型，逻辑思维把高速运动的列车、观察者、闪光、时钟等形象以及它们在空间中的位置进行联系和展开，使之成为有理有据、条理清晰的思维图像。

所以，思想实验的操作过程，既是想像自由展开的过程，又是逻辑运动的过程。在这中间，逻辑起着主导作用，它引导、控制着想像，保证想像既是丰富的，又不是胡思乱想。想像活动为逻辑运动提供了可靠的素材基础，逻辑运动在想像提供的形象运动中操作展开。两者相辅相成，浑为一体。

3. 思想实验具有高度的创造性

科学家做思想实验的目的，是为了揭示事物内部的规律性，因此其探索是没有先例的，带有高度的创造性。爱因斯坦和英费尔德在《物理学的进化》^①中指出：“任何一个理论的目的是指导我们理解新的情况，启

^① 爱因斯坦、英费尔德：《物理学的进化》，上海科技出版社，1962年版，第66页