

文章编号:1005-4642(2023)08-0043-05



互联网+物理

源于中国散裂中子源的示范性 虚拟仿真实验教学项目建设

马佳洪,叶晓靖,陈武喝

(华南理工大学物理与光电学院,广东 广州 510641)

摘要:基于中国散裂中子源的中子反射测试技术,采用中子反射科学计算模型,构建了沉浸式的、多路推进的、自主探索的、智能化的虚拟仿真实验项目。该实验运用科研算法实时计算,自动生成随机模型参量,每次实验不同且数据可科学分析,达到了真实实验的教学效果。该项目培养了学生的中子反射实验能力,锻炼了学生的自主探索精神,充分体现了“两性一度”的要求,拓展了物理实验教学的广度和深度,同时也宣传了我国取得的科研成就。

关键词:中子反射;中国散裂中子源;虚拟仿真实验;Unity

中图分类号:O571.53;O411.3

文献标识码:A

DOI:10.19655/j.cnki.1005-4642.2023.08.006

中子散射^[1-4]是人类探索物质微观结构的有力手段之一,中子具有高穿透性、对轻元素敏感、可分辨同位素,使用中子散射探测物质中核磁相互作用方面有独特优势。为了促进基础研究,加快前沿科技产业发展,我国于 2018 年建成了中国散裂中子源^[3-4](CSNS),小角度中子反射谱仪^[5]是首批建设的 3 台谱仪之一。若能将中子反射技术^[6]引入到物理实验中,将有助于拓展实验教学的广度和深度^[7-12],作为“十一五”期间重点建设的国家大科研平台,全球四大散裂中子源之一,直接用于本科教学不易实现。近年来,虚拟仿真技术在教学上得到了广泛应用^[13-26],目前教育部正在全国推动虚拟仿真实验教学中心^[13-17]和示范性虚拟仿真实验教学项目^[18-22]建设。本文以中子反射实验技术为对象,采用 Unity3D^[23-26]作为开发平台,开发建设了中子反射法测薄膜磁矩虚拟仿真实验项目。项目以科学计算模型为基础,搭建三维的虚拟实验环境和仪器,仿真实验操作,并根据交互操作实时计算中子反射实验数据,最后进行数据分析处理获得薄膜参量,构成流程完整的虚拟仿真实验项目。

1 中子反射实验技术

1.1 中子束的产生

中子束的产生如图 1 所示,CSNS 先利用

80 MeV 负氢离子直线加速器将负氢离子加速到 0.2 倍光速,再利用 1.6 GeV 快循环质子同步加速器将剥离电子的氢核(即质子)加速到 0.9 倍光速。高速的质子轰击由多片厚度不同的钨片叠合而成的靶体,吸收了质子的钨原子不稳定而发射出中子和质子,发射出来的高能中子和质子再轰击其他的钨原子核,发生散裂级联反应,产生更多的中子,最终产生高通量、短脉冲中子束。产生的中子能量很高,需要经过慢化器慢化后,成为可供实验的热中子或者冷中子。

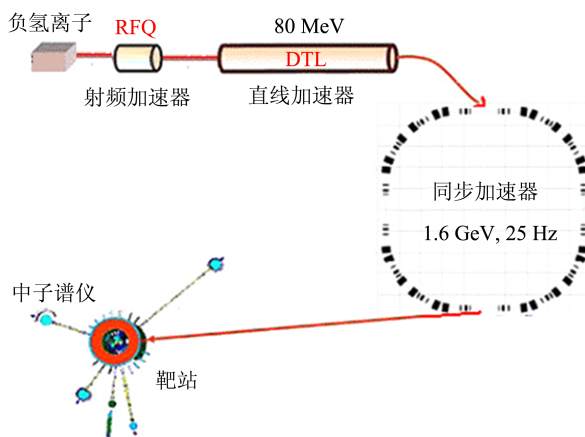


图 1 中子束的产生过程图

1.2 中子反射原理

中子的穿透性很强,只有在掠入射(跟薄膜表

收稿日期:2023-04-20

作者简介:马佳洪(1978—),男,广东汕头人,华南理工大学物理与光电学院高级实验师,博士,主要从事凝聚态物理方面的研究工作。E-mail:phjhma@scut.edu.cn

面的夹角小于 3° 时中子才有可能被反射,但还是会入射到材料内部并发生反射,因此中子反射率反映了薄膜材料内部的信息,例如材料成分、薄膜厚度、原子磁矩等,一般可观测尺度为 $0.5 \text{ nm} \sim 0.5 \text{ }\mu\text{m}$.

对于单层均匀薄膜,薄膜材料对中子的散射势为 V ,基体材料对中子的散射势为 V_s ,中子的质量为 m ,能量为 E ,薄膜厚度为 d ,则中子的反射率 R 可表示为

$$\begin{pmatrix} t_n \\ r_n \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{k_n + k_{n-1}}{2k_n} \exp [i(k_{n-1} - k_n)z_{n-1}] & \frac{k_n - k_{n-1}}{2k_n} \exp [-i(k_{n-1} - k_n)z_{n-1}] \\ \frac{k_n - k_{n-1}}{2k_n} \exp [i(k_{n-1} - k_n)z_{n-1}] & \frac{k_n + k_{n-1}}{2k_n} \exp [-i(k_{n-1} - k_n)z_{n-1}] \end{pmatrix} \begin{pmatrix} t_{n-1} \\ r_{n-1} \end{pmatrix}, \quad (3)$$

其中 k_n 为第 n 层波矢, z_n 为第 n 层的边界坐标,则第 N 层的透射系数和反射系数为

$$\begin{pmatrix} t_N \\ r_N \end{pmatrix} = M_N \begin{pmatrix} t_{N-1} \\ r_{N-1} \end{pmatrix} = M_N M_{N-1} \cdots M_n \cdots M_2 \begin{pmatrix} t_1 \\ r_1 \end{pmatrix} = M \begin{pmatrix} t_1 \\ r_1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} m_{11} & m_{12} \\ m_{21} & m_{22} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} t_1 \\ r_1 \end{pmatrix}, \quad (4)$$

整个多层膜的中子反射率为

$$R = \left(\frac{m_{21}}{m_{22}} \right)^2. \quad (5)$$

一些材料对中子有较强的吸收能力,由这些材料制成的薄膜会降低中子的反射率,在散射势上添加虚部可准确计算其反射率.薄膜的界面质量也会影响反射率,对于具有一定粗糙度的界面,需要在散射势中加入描述粗糙度的因子后进行理论模拟.

1.3 数据分析

实验测得薄膜的中子反射率曲线后,需要对数据进行分析获取薄膜的参量.数据分析的流程如图 2 所示,构建初始试探计算模型,设置好初始

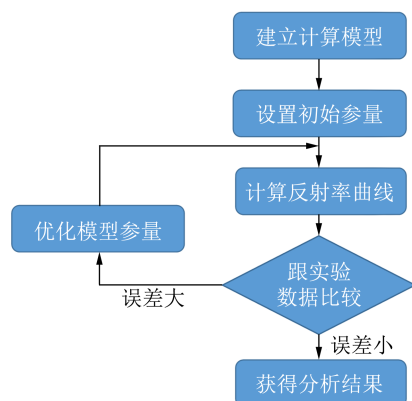


图 2 中子反射率数据分析流程图

$$R = \frac{(k_0^2 - k^2)(k_s^2 - k^2) \sin^2(kd) + (k_0 k - k k_s)^2}{(k_0^2 - k^2)(k_s^2 - k^2) \sin^2(kd) + (k_0 k + k k_s)^2}, \quad (1)$$

其中

$$\begin{cases} k_0^2 = 2mE/\hbar^2, \\ k^2 = 2m(E - V)/\hbar^2, \\ k_s^2 = 2m(E - V_s)/\hbar^2. \end{cases} \quad (2)$$

对于 N 层的多层膜,相邻两层的透射系数 t_n 和反射系数 r_n 满足以下关系:

$$\begin{pmatrix} t_n \\ r_n \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{k_n - k_{n-1}}{2k_n} \exp [-i(k_{n-1} - k_n)z_{n-1}] & \frac{k_n + k_{n-1}}{2k_n} \exp [-i(k_{n-1} - k_n)z_{n-1}] \\ \frac{k_n + k_{n-1}}{2k_n} \exp [i(k_{n-1} - k_n)z_{n-1}] & \frac{k_n - k_{n-1}}{2k_n} \exp [i(k_{n-1} - k_n)z_{n-1}] \end{pmatrix} \begin{pmatrix} t_{n-1} \\ r_{n-1} \end{pmatrix}, \quad (3)$$

参量,指定要优化的变量及其优先级,根据理论计算得到中子反射率曲线数据;然后评估理论数据和实验测量结果的拟合误差,如果拟合误差大就需要优化模型参量,再次进行计算和拟合;如此循环,直到拟合误差足够小,此时即可认为理论计算模型的参量就是薄膜的实际参量.

2 虚拟仿真实验设计

本项目建设依据“以虚仿实,以实为基”的原则,对仿真计算模型、虚拟场景呈现和实验流程等方面进行了精心设计,力求达到真实实验的教学效果,同时发挥出真实实验所不具备的多媒体教学优势.

2.1 仿真计算模型

上一节中介绍了中子反射的原理,不论是单层膜还是多层膜,都有严格的科学模型.为了保证实验的先进性,项目直接采用科学模型作为仿真计算模型,如图 3 所示,据此编写了数值计算反射率的算法,根据薄膜参量、环境条件和仪器部件的不同设置,可以实时计算出中子反射率曲线.项目完全满足虚拟仿真实验教学的要求:实验采用科学的仿真计算模型,数据符合客观规律,可以根据不同的实验操作做出符合客观规律的反应,同时允许实验者独立、自由地设置各种参量.由于采用先进的仿真计算模型,项目也有自身的特色和优势:开始的薄膜参量是随机生成的,每次实验都不相同,数据可以用科研工具分析,这决定了项目是真正“活”的实验,而不只是多媒体教学演示课件.

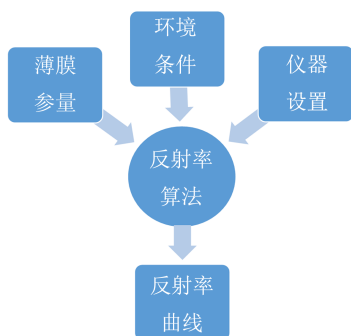


图 3 仿真计算模型

2.2 虚拟场景呈现

虚拟场景呈现包括虚拟实验环境和仪器、仿真交互操作、实验现象等。为了方便实验者顺利开展仿真实验,加强对实验的理解,提高实验教学效果,项目构建了三维的实验室环境和实验仪器,营造逼真、直观的实验场景,为实验者提供沉浸式的实验体验。实验者以第一人称操作模式,多路径自由探索实验,相比线性流程的实验步骤,更符合真实实验逻辑,在不同路径的探索中能更全面、深刻地掌握实验的操作步骤。通过友好的交互界面,巧妙设计的交互方式,让实验者通过人机交互完成仿真实验操作,例如鼠标移动到可操作部件上会有手形鼠标提示,背包系统可以方便地拖取实验物品。程序以三维交互动画的形式展现仪器调节过程,以光线代表中子束,随着仪器的调节,光线的反射角度和反射效果按规律实时计算更新,让原本无法看到的、抽象的中子反射过程,直观形象地展示出来,如图 4 所示,加深了实验者对实验的印象和理解。程序还会记录了实验者的实验操作情况,包括步骤完成情况、操作顺序、是否符合安全操作规范等,并据此智能化评估实验操作成绩。

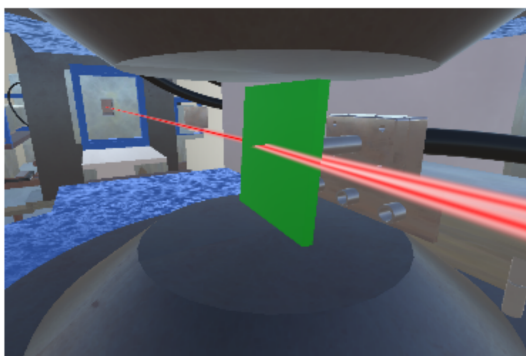


图 4 中子束反射效果图

2.3 实验流程

实验流程根据中子反射测试流程设计,力求反映真实实验操作,确保实验者可以通过仿真实验掌握对应的实验知识。

1) 实验流程跟真实实验一致,同样包括实验操作与测量、实验数据处理等实验环节,不但可以培养学生实验操作能力,也可培养学生数据分析能力。

2) 薄膜参量、实验环境、实验仪器等方面操作设置可以独立开展,实验者不需要按固定的先后顺序完成实验,在符合逻辑的情况下,可以按不同路径完成实验,仿真实验都能给出符合规律的实验结果。

3) 薄膜参量开始是随机产生的,实验者需要通过实验测试和数据分析才能得到薄膜参量。由于每次实验都不相同,这避免了一些仿真实验每次实验结果都大致相同的缺点,达到真正的实验训练的作用。

4) 在实验操作过程中,每个关键步骤都有实验引导说明,如图 5 所示,操作失误有提示,保证可以自主探索仿真实验,不会因为不懂操作方式导致无法开展实验;特别在安全知识方面,确保经过仿真实验后能掌握正确的安全操作步骤。



图 5 实验引导说明

5) 每个关键步骤有实验操作对应知识点,如图 6 所示,阐明每个步骤的作用及其原理,这样在实验过程中就可逐渐掌握相关知识。

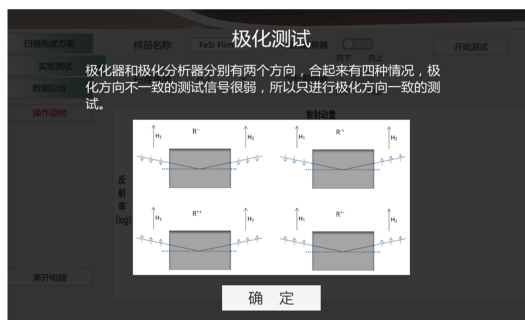


图 6 实验知识点

3 虚拟仿真实验步骤

实验主要包括以下步骤:

1) 观看视频资料,学习关于中国散裂中子源的相关知识。

2) 到样品室取薄膜,并用激光散斑法筛选出合格的薄膜。

3) 到散射室安装待测薄膜,包括开门、安装、关门环节,因为散射室有辐射,开门和关门有安全要求,必须在散射室安全控制台上按照严格的流程操作,如图 7 所示。



图 7 散射室安全控制台

4) 到控制室通过仪器控制电脑对中子反射谱仪进行初步设置和细致调节。初步设置包括设置初始反射角、设置实验磁场、设置使用的仪器部件;细致调节则需要调节薄膜的位置和角度,使得中子束打到薄膜中心,并反射到探测器的中心。

5) 通过测试电脑,设置好扫描角度方案,分角度、分极化方向开展测试,得到中子反射率数据,将分段数据拟合完整反射率曲线,如图 8 所示,并保存数据。

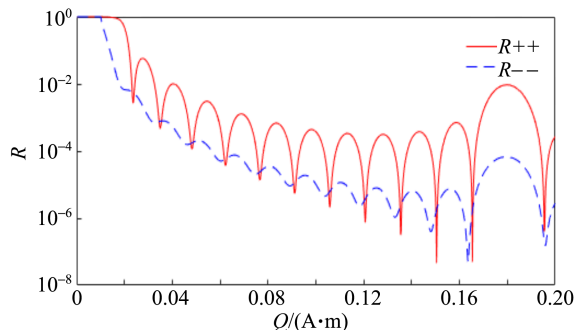


图 8 中子反射率曲线

6) 将数据导入到科研工具软件 GenX 中,在其中建立薄膜计算模型,设置初始参量,指定要优化的变量及其优先级,开始数据拟合得到薄膜

参量。

7) 回到仿真实验程序,输入分析结果并提交,查看实验成绩和实验操作错误列表。

8) 自由设置薄膜参量,重新进行中子反射测试,开展深入学习与研究。

4 结束语

中子散射是研究物质静态结构和微观动力学性质的前沿科学技术,有必要引入到物理实验教学中,以促进物理实验教学的发展。基于国家大科学装置 CSNS 首批建设的中子反射谱仪,运用先进的三维编程动画技术 Unity3D,建成了虚拟场景逼真、交互操作方便、体验真实的虚拟仿真实验项目。实验采用随机模型参量,运用科研算法实时计算,每次实验不相同,数据可科学分析,实验流程跟真实实验一致,可培养实验者综合实验能力。实验以第一人称视角多路推进,可自由设置各个方面模型参量,实验过程有实验提示和实验知识学习,可锻炼学生自主探索能力。项目来自于国家大科学平台,是高危险、高成本实验,符合“以虚补实,以实为主,能实不虚,虚实结合”的建设原则;同时属于前沿科技成果,充分体现了高阶性、创新性与挑战度的要求;既拓展了物理实验教学的广度和深度,同时也宣传了我国取得的科研成就,既有科学实验培养作用,也有课程思政教育效果。项目于 2020 年获评国家级虚拟仿真实验教学一流课程,后续将不断完善并推广本实验,为物理实验教学发展而努力。

参考文献:

- [1] 王芳卫,严启伟,梁天骄,等. 第一讲 中子散射与散裂中子源[J]. 物理,2005,34(10):731-738.
- [2] 孙凯,李天富,陈东风. 中子散射及相关技术的发展与应用[J]. 原子能科学技术,2020,54(S1):35-46.
- [3] 王芳卫. 中国散裂中子源[J]. 科学,2014,66(4):16-20.
- [4] 陈和生. 中国散裂中子源[J]. 现代物理知识,2016,28(1):3-10.
- [5] 詹晓芝,肖松文,吴岩延,等. 多功能中子反射谱仪[J]. 现代物理知识,2016,28(1):23-27.
- [6] 陈波,黄朝强,李新喜. 中子反射实验技术[J]. 中国核科技报告,2006(2):20-37.
- [7] 蔡志岗. “N+1”创新教学模式[J]. 物理实验,2017,37(10):30.

- [8] 彭勇宜,李宏建,郭光华. 基于学生创新能力培养的近代物理实验教学改革创新研究[J]. 创新与创业教育, 2016,7(1):122-125.
- [9] 张朝晖. 发展研究型基础物理实验教学的理念与实践[J]. 物理实验, 2021,41(7):37-41.
- [10] 洪澜,蔡修奋,李佼洋,等. 基于虚拟仿真实验的创新能力培养[J]. 物理实验, 2018,38(9):43-47.
- [11] 乐永康,龚新高,苏卫锋,等. 虚实结合的物理实验教学[J]. 物理实验, 2017,37(1):39-43.
- [12] 李金环. 基础物理实验 PPBL 教学模式探索[J]. 物理实验, 2017,37(10):31.
- [13] 李平,毛昌杰,徐进. 开展国家级虚拟仿真实验教学中心建设提高高校实验教学信息化水平[J]. 实验室研究与探索, 2013,32(11):5-8.
- [14] 张增明,王中平,张宪锋,等. 国家级物理虚拟仿真实验教学中心的建设实践[J]. 实验技术与管理, 2015,32(12):146-149.
- [15] 王卫国. 虚拟仿真实验教学中心建设思考与建议[J]. 实验室研究与探索, 2013,32(12):5-8.
- [16] 徐明,熊宏齐,吴刚,等. 土木工程虚拟仿真实验教学中心建设[J]. 实验室研究与探索, 2016,35(2):139-142,216.
- [17] 王甜,王茂林,林宏辉. 生物类虚拟仿真实验教学中心建设中的问题与对策[J]. 实验室研究与探索, 2017,36(3):153-156,163.
- [18] 熊宏齐. 国家虚拟仿真实验教学项目的新时代教学特征[J]. 实验技术与管理, 2019,36(9):1-4.
- [19] 张敬南,张缪钟. 实验教学中虚拟仿真技术应用的研究[J]. 实验技术与管理, 2013,30(12):101-104.
- [20] 张勇,贾洪声,刘惠莲,等. 示范性虚拟仿真实验教学一流课程的建设与应用[J]. 物理实验, 2021,41(6):41-45.
- [21] 邱馗,于天彪,陈培媛,等. 虚拟现实技术在机械工程实验教学中的应用[J]. 实验技术与管理, 2014,31(10):10-12.
- [22] 侯冬曼,陈武喝,马佳洪. 基于 OpenGL 的虚拟仿真实验设计[J]. 实验室研究与探索, 2019,38(6):89-92.
- [23] 梁文耀,刘基. 基于 Unity 的激光全息法制作微结构的虚拟仿真实验开发[J]. 物理实验, 2019,39(3):42-47.
- [24] 朱柱. 基于 Unity3D 的虚拟实验系统设计与应用研究[D]. 武汉:华中师范大学, 2012.
- [25] 牛海波,李育新,刘会玲,等. 基于 Unity 3D 的物理实验仪器虚拟系统[J]. 物理实验, 2021,41(11):32-37.
- [26] 徐芊歆,唐芳. 基于 Unity3D 的光栅自成像虚拟仿真实验[J]. 物理实验, 2020,40(6):53-56.

Construction of demonstrative virtual simulation experiment teaching project from China spallation neutron source

MA Jiahong, YE Xiaojing, CHEN Wuhe

(School of Physics and Optoelectronic Technology,
South China University of Technology, Guangzhou 510641, China)

Abstract: Taking the neutron reflection test technology of China spallation neutron source as the object, and directly using the scientific calculation model of neutron reflection, an immersive, multi-channel, autonomous and intelligent virtual simulation experiment project was constructed. This experiment used scientific research algorithms to calculate in real-time and automatically generates random model parameters, each experiment was different and the data could be scientifically analyzed, thus the teaching effect of a real experiment could be achieved. The project had cultivated students' ability to conduct neutron reflection experiments, exercised their independent exploration spirit, expanded the breadth and depth of physics experiment teaching, and also promoted the scientific research achievements in China.

Key words: neutron reflection; China spallation neutron source; virtual simulation experiment; Unity

[编辑:郭伟]