

X 射线激发光学断层成像研究反哺医学物理教学的改革与实践

刘天帅^{1,2} 戎军艳^{1,2} 张文立^{1,2} 高 鹏^{1,2} 刘 洋^{1,2} 卢虹冰^{1,2}

(¹空军军医大学军事生物医学工程学系, 陕西 西安 710032;

² 陕西省生物电磁检测与智能感知重点实验室, 陕西 西安 710032)

摘 要 X 射线激发光学断层成像(X-ray luminescence computed tomography, XLCT)是一种结合 X 射线激发和光学探测的先进成像技术,在医学影像、材料科学及生物医学工程等领域具有广泛应用。随着该技术的不断发展,其研究成果不仅推动了科学研究的进步,也为高等教育特别是医学物理学、医学影像学及相关学科的教学提供了新的资源和方法。本文探讨 XLCT 研究如何反哺医学物理教学,包括促进跨学科融合、优化实验教学体系、推动问题导向学习(PBL)模式以及改进考核评估体系等方面,旨在为高校教学改革提供理论支持和实践方案。实践效果分析表明,XLCT 研究可有效反哺高校教学,提升学生的创新能力和实践水平,为培养高素质复合型人才提供有力支持。

关键词 X 射线激发光学成像(XLCT);教学反哺;跨学科融合;实验教学;问题导向学习(PBL)

FEEDBACK FROM X-RAY LUMINESCENCE COMPUTED TOMOGRAPHY RESEARCH TO REFORM AND PRACTICE IN MEDICAL PHYSICS EDUCATION

LIU Tianshuai^{1,2} RONG Junyan^{1,2} ZHANG Wenli^{1,2} GAO Peng^{1,2} LIU Yang^{1,2} LU Hongbing^{1,2}

(¹ Department of Military Biomedical Engineering, Air Force Medical University, Xi'an, Shaanxi 710032;

² Shaanxi Province Key Laboratory of Biomedical Electromagnetic Detection and Intelligent Perception, Xi'an, Shaanxi 710032)

Abstract X-ray luminescence computed tomography (XLCT) is an advanced imaging technology that combines X-ray excitation and optical detection, with wide applications in medical imaging, materials science, biomedical engineering, and other fields. With the continuous development of this technology, its research achievements have not only promoted the progress of scientific research but also provided new resources and methods for higher education, especially for the teaching of medical physics, medical imaging, and related disciplines. This article explores how XLCT research can feed back into medical physics teaching, including promoting interdisciplinary integration, optimizing the experimental teaching system, promoting problem-based learning (PBL) mode, and improving the assessment and evaluation system. The aim is to provide theoretical support and practical solutions for teaching reform in universities. The analysis of practical effects shows that XLCT research can effectively feed back into uni-

收稿日期: 2025-03-17

基金项目: 国家自然科学基金(12305350;12275355);国家重点研发计划(2023YFF0715400;2023YFF0715401)。

通信作者: 卢虹冰, luhb@fmmu.edu.cn。

引文格式: 刘天帅,戎军艳,张文立,等. X 射线激发光学断层成像研究反哺医学物理教学的改革与实践[J]. 物理与工程, 2025, 35(3): 126-133.

Cite this article: LIU T S, RONG J Y, ZHANG W L, et al. Feedback from X-ray luminescence computed tomography research to reform and practice in medical physics education[J]. Physics and Engineering, 2025, 35(3): 126-133. (in Chinese)

versity teaching, enhance students' innovation ability and practical level, and provide strong support for cultivating high-quality composite talents.

Key words X-ray luminescence computed tomography (XLCT); teaching feedback; interdisciplinary integration; experimental teaching; problem-based learning (PBL)

医学物理作为医学与物理学交叉的重要学科,在医学成像、放射治疗和生物医学工程等领域具有广泛的应用^[1,2]。其中,X射线成像技术是医学物理教学中的核心内容,而X射线激发光学断层成像(X-ray luminescence computed tomography, XLCT)作为一种新兴的多模态成像技术,在提高生物组织成像对比度、分辨率和特异性方面具有重要优势^[3,4]。将XLCT的研究成果引入医学物理教学,不仅能够丰富教学内容,还能够促进教学方法的改革,提升学生的创新思维和实践能力^[5]。

随着影像技术在医学、生物学、材料科学等领域的迅速发展,X射线激发光学断层成像(XLCT)因其高空间分辨率、强物质适应性和多功能探测能力,成为当前研究的重点方向之一^[6-9]。该技术利用X射线激发体内的纳米探针发出可见光或近红外(Near-infrared, NIR)光,经EMCCD(Electron-Multiplying CCD)探测并重建得到纳米探针在体内的三维分布。由于X射线良好的穿透性和准直性,XLCT可以达到更深的成像深度,同时X射线激发纳米探针的使用,可以有效地避免自体荧光和背景荧光的干扰,提高成像的对比度和分辨率^[10-12]。以上优势使得XLCT快速发展,在疾病诊断、新药研发、疗效监测等方面具有广阔的应用前景^[13,14]。

在高等教育领域,如何将最新的科研成果转化为教学资源,使学生能够接触前沿技术,培养实践能力和创新思维,是当前高校教学改革的重要议题^[15-18]。XLCT研究成果可以为相关课程提供:

(1) 跨学科的知识体系,促进物理、材料、生物医学、信息学等学科的融合。

(2) 创新型实验教学内容,提高学生的动手能力和实验设计能力。

(3) 案例驱动的学习模式,增强学生的分析能力和解决复杂问题的能力。

因此,将XLCT研究成果引入高校教学体系,不仅可以丰富课程内容,提高教学质量,还能培养

具有前沿技术素养的复合型人才,推动科学技术与教育的深度结合。

1 X射线激发光学断层成像(XLCT)技术概述

1.1 XLCT的基本原理

X射线激发纳米荧光粉是XLCT成像的发光材料,当受到X射线照射时,纳米荧光粉粒子与X射线之间发生相互作用,吸收X射线能量后,部分电子会发生能量跃迁,进而释放出光子,光子经过一系列的散射、吸收过程后到达成像物体表面,被探测器探测,完成成像采集过程,成像原理如图1所示。因此,XLCT成像包括以下三个核心过程:

(1) X射线激发:高能X射线照射材料,使材料中的电子被激发至高能态。

(2) 光学信号释放与探测:电子回落至基态时,释放可见光或近红外光,这些光信号通过高灵敏度探测器(如光谱仪、CCD相机)进行收集。

(3) 图像重建与分析:通过计算机算法处理采集到的光信号,并重构成像数据,实现对材料内部结构的高分辨率解析。

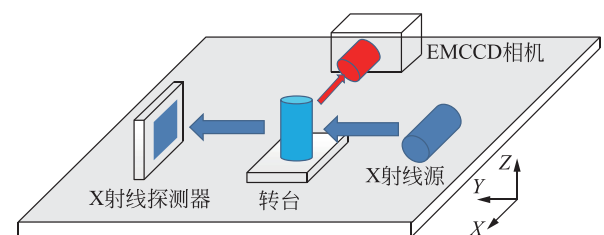


图1 XLCT成像原理示意图

1.2 XLCT的主要应用

XLCT技术广泛应用于多个高精尖领域,包括:

(1) 医学影像学:在X射线计算机断层成像(CT)、放射治疗监测以及分子影像学中,XLCT可用于增强病灶成像,提高早期疾病检测的精准度。

(2) 材料科学:用于分析半导体、纳米材料及光电材料的发光特性,为新材料的研发提供实验

依据。

(3) 生物医学研究:结合荧光探针,实现对细胞、组织等生物结构的高分辨率成像,助力疾病机理研究和新型生物标志物开发。

2 XLCT 研究对高校教学的反哺作用

2.1 促进跨学科融合,拓展学生知识体系

XLCT 技术涉及物理学、光学、材料科学、计算机科学及医学影像学等多个学科,其研究成果可作为跨学科教学案例,促进不同学科知识的整合。例如:

在医学影像学课程中,讲解 XLCT 的成像原理,使学生理解 X 射线与光学成像的结合方式。X 射线具有很强的穿透能力,可以深入到物体内部,提供深层组织的信息;而光学成像则具有高分辨率和高灵敏度的特点,能够提供详细的局部信息。在 XLCT 中,X 射线作为激发源,能够穿透物体并激发发光探针,而光学成像系统则负责采集和处理发光信号,两者的结合使得既可以获得物体内部的深层结构信息,又可以得到高分辨率的局部功能图像。

在医学信息学课程中,结合 XLCT 数据处理方法,提高学生对医学影像数据分析的能力。XLCT 成像通过 EMCCD 探测得到的投影数据重建得到生物体内的纳米探针位置(即肿瘤位置)。在体成像探针浓度较低时,投影的光子数较低,受到噪声的干扰,信噪比较低,导致 XLCT 重建困难。仿体实验表明(图 2),当浓度降至 5 mg/ml 时,投影受噪声影响严重,重建图像质量较差。为了进行在体成像,对投影数据中噪声分布和光子分布特性进行深入分析研究,构建低光子数

XLCT 混合噪声模型,实现投影噪声的有效抑制,是提高 XLCT 成像质量的基础和关键。

在生物医学工程课程中,探讨 XLCT 在生物标志物成像中的应用,帮助学生理解影像技术在生物医学中的重要性。肿瘤的发生和发展与多种生物标志物的异常表达密切相关。XLCT 可以通过标记特定的肿瘤生物标志物,实现肿瘤的早期诊断和精准定位。例如,将发光材料与肿瘤特异性抗体结合,通过 XLCT 成像可以观察到肿瘤组织中生物标志物的表达情况,从而判断肿瘤的类型、分期和转移情况。

2.2 优化实验教学,提高学生实践能力

XLCT 研究成果可直接应用于高校实验教学,为学生提供更前沿的实验案例。例如:

光学发光实验:作为国内最早开展 XLCT 成像研究的团队之一,本课题组自主搭建了多套不同能量段的 X 射线激发光学成像平台(图 3),分别为高分辨显微 CT/XLCT 双模成像平台、160kV 活体 X 射线激发多功能成像平台以及 225kV X 射线短波红外活体成像平台。基于以上成像平台,可以进行不同材料在 X 射线激发下的光学响应,让学生理解 XLCT 的基本工作机制。

针对本科实验教学需求,本研究对 X 射线激发光学断层成像平台进行了三方面改进:首先,在硬件层面增加双重联锁装置(钥匙开关+软件权限控制),确保 X 射线光源仅在防护铅门关闭时启动;软件端设置操作日志自动记录功能,实时监测异常操作并弹出语音提示(如“剂量超过教学阈值,X 射线源无法启动,建议降低 10%”)。其次,开发集成自动化控制界面,将 XLCT 成像系统拆解为“参数设置-CT 数据采集-光学数据采集-结果分析”四大教学模块,开发交互式操作界面(图 4

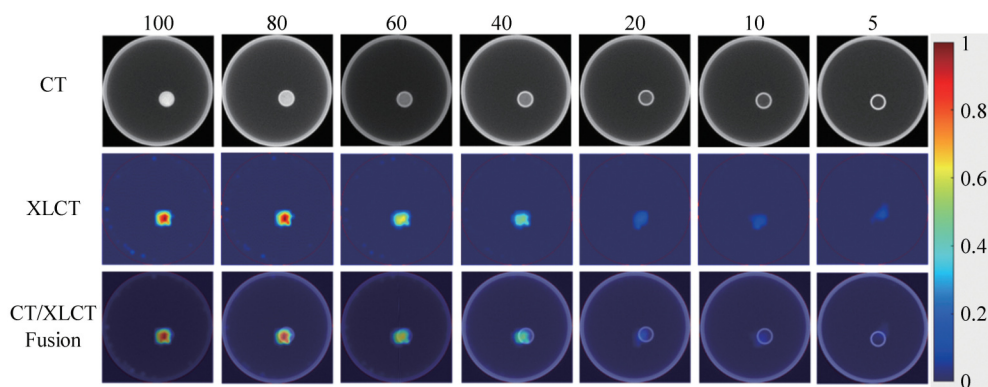


图 2 不同浓度(5~100mg/ml)纳米探针下的成像结果

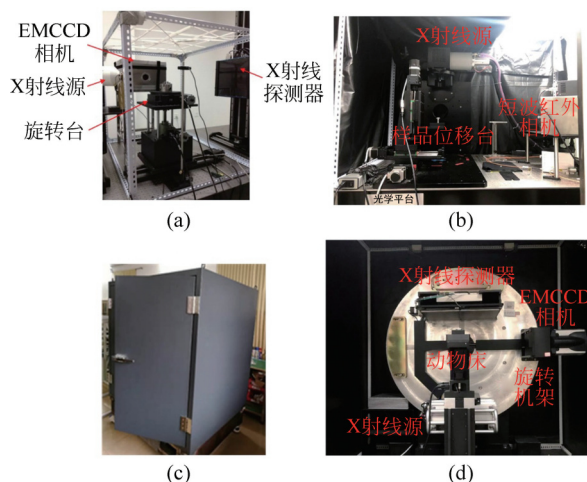


图3 X射线激发光学成像平台

(a) 高分辨显微 CT/XLCT 双模成像平台; (b) 225kV X 射线短波红外活体成像平台; (c)~(d) 160kV 活体 X 射线激发多功能成像平台外观和内部结构

(a)和(b))。最后,实验内容进行分层设计与难度降维,基础实验(面向低年级),提供预处理后的标准数据文件,聚焦“不同 X 射线剂量对成像对比度的影响”等原理验证(图 4(c)和(d)),避免学生陷入数据清洗细节;进阶实验(面向高年级),开放部分算法参数调节(如正则化参数、迭代次数),要求学生对比不同参数下的重建图像质量。”

医学影像数据分析实验:提供真实的 XLCT 影像数据(图 5),让学生使用软件进行数据处理、噪声去除和图像重建,提高数据分析能力。XLCT

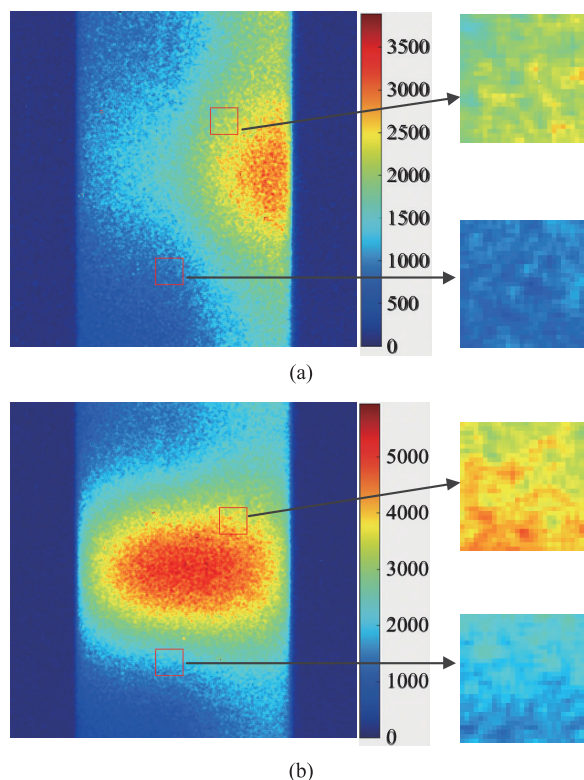
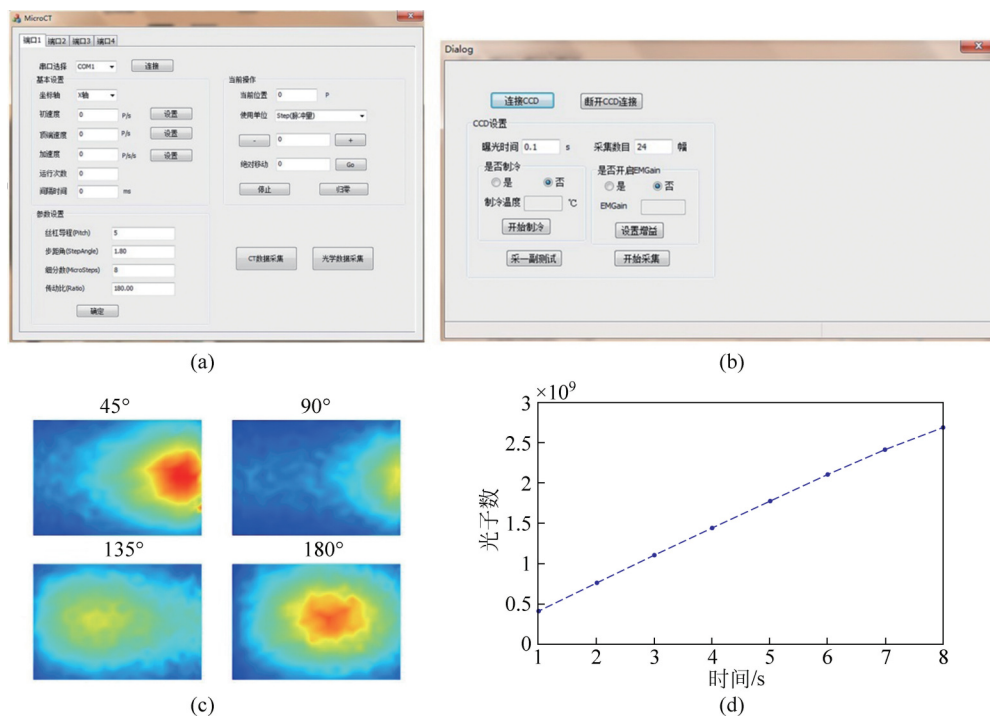
图5 不同浓度纳米探针 XLCT 成像投影
(a) 1mg/ml; (b) 5mg/ml

图4 X射线激发光学成像数据采集及分析

(a) 系统参数设置; (b) 光学数据采集; (c) 不同角度下的 XLCT 投影数据; (d) 不同采集时间下的投影光子数

投影图像的噪声构成较为复杂,主要包括暗电流噪声、读出噪声,以及由弱光子信号引发的统计噪声(即光子散粒噪声)。其中,暗电流与读出噪声为与光信号强度无关的固有噪声(暗场条件下主导),光子散粒噪声是由于光信号输入而产生的噪声,很难通过硬件等方法进行抑制,且主要受光信号强度,曝光时间等影响。

在暗场条件下,通过分析各像素点的投影值变化规律,系统研究积分时间对 EMCCD 成像噪声特性的影响,即在未激发 X 射线条件下,对 EMCCD 采集投影图像中暗电流噪声和读出噪声进行研究。图 6(a)展示了暗场条件下曝光时间为 1s 的投影图像,图 6(b)则展示了暗场条件下,不同曝光时间对应的投影图像像素点分布情况及其高斯拟合结果。实验表明,随着曝光时间的增加,高斯分布拟合优度逐渐下降,噪声分析揭示其原因为由于曝光时间增加,暗电流噪声在总噪声中的占比不断上升,而读出噪声水平保持相对稳定,整体噪声分布从以读出噪声为主导的高斯分布向多种噪声成分共存的混合分布模式转变。该发现为成像实验中曝光时间的优化选择提供了理论依据,对提升图像信噪比具有重要意义。

2.3 推动问题导向学习(PBL),培养创新思维

基于问题的学习(Problem-Based Learning, PBL)教学模式强调以学生为中心,通过实际问题

的解决来促进学生的自主学习和知识构建^[19,20]。XLCT 技术作为生物医学工程领域的一项前沿技术,其复杂性和广泛应用为 PBL 教学模式提供了丰富且极具价值的案例资源。

1) 设计真实问题情境

基于 XLCT 技术的复杂性和应用场景,教师可以设计一系列真实的问题情境。例如,基于实验室已经搭建的锥束 XLCT 成像系统,可以通过仿体实验和小鼠在体实验(图 7),实现基于 XLCT 技术的早期肿瘤诊断。这样的问题情境能够激发学生的学习兴趣,让他们在解决实际问题的过程中深入理解 XLCT 技术的原理和应用。

2) 培养学生的团队合作和沟通能力

在 PBL 教学模式中,学生通常需要分组合作来解决问题。在如何实现基于 XLCT 技术的早期肿瘤诊断案例中,学生可以分工合作,分别负责不同的任务,如查阅文献了解 XLCT 技术的最新进展、设计实验方案、进行数据分析等。通过团队协作任务,学生能在互动实践中提升协同能力与沟通技巧。

3) 促进学生的自主学习和知识构建

由于 XLCT 技术的复杂性,学生在解决相关问题时需要自主查阅大量的文献资料,深入学习相关的知识。例如,为了设计一个合理的 XLCT 成像实验方案,学生需要了解 X 射线的物理性质、

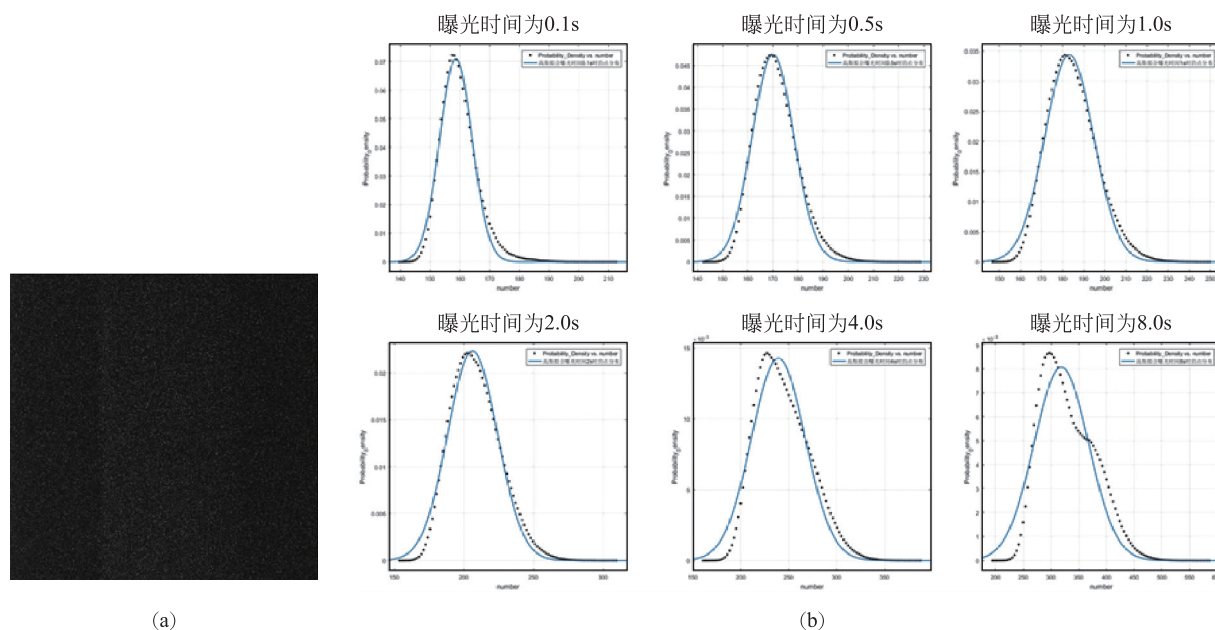


图 6 不同曝光时间下投影数据分析

(a) 暗场条件曝光时间为 1s 时投影图像; (b) 不同曝光时间下投影图像各数据点分布(离散点曲线)以及高斯拟合曲线(连续曲线)

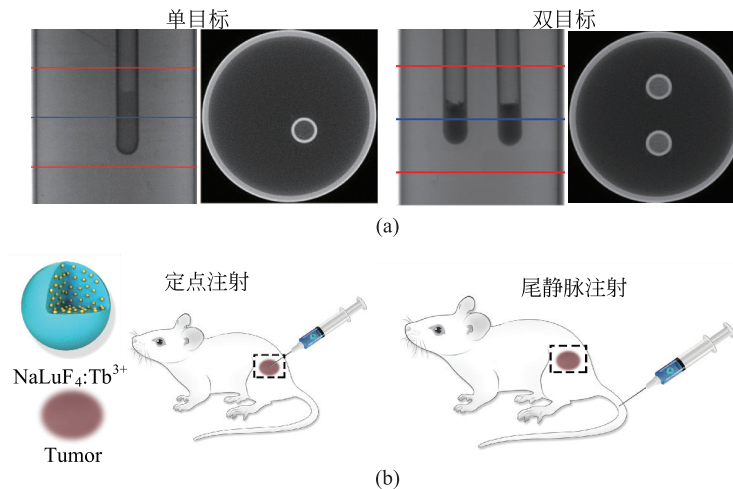


图7 XLCT 仿体和在体实验设置
(a) 仿体; (b) 在体

发光材料的特性、探测器的工作原理以及数据处理算法等方面的知识。通过自主学习,学生能够构建起自己的知识体系,提高学习效果。

2.4 改进考核评估方式,增强综合能力测评

传统考试模式难以全面评估学生的实践和创新能力,可结合 XLCT 技术采用多元化考核方式:

1) 实验操作考核

要求学生根据给定的研究课题,设计一个基于 XLCT 技术的实验方案。例如,设计一个用于肿瘤早期诊断的 XLCT 实验,学生需要考虑样本的制备方法、X 射线的剂量和照射角度、探测器的选择和参数设置、数据采集和处理方法等。通过实验设计考核,能够评估学生对 XLCT 技术原理的理解和应用能力,以及学生的创新思维和实验设计能力。

在实验室中,让学生实际操作 XLCT 成像系统,完成实验过程。考核学生在样本制备、仪器操作、数据采集等方面的技能。例如,观察学生是否能够正确制备发光标记的样本,是否能够熟练操作 X 射线源和探测器,是否能够准确记录和处理实验数据等。通过实验操作技能考核,能够评估学生的实践动手能力和解决实际问题的能力。

2) 项目设计考核

要求学生以小组形式提交一个基于 XLCT 技术的项目提案。项目提案应包括项目的研究背景、研究目的、研究内容、技术路线、预期成果等。例如,学生可以提出一个利用 XLCT 技术进行药物研发的项目提案,阐述如何利用 XLCT 技术监

测药物在体内的分布和代谢情况。通过项目提案考核,能够评估学生的团队合作能力、文献查阅能力和项目规划能力。

学生根据项目提案开展项目研究,并在规定的时间内完成项目实施。最后,学生需要以小组形式进行项目汇报,展示项目的研究成果。考核学生在项目实施过程中的团队协作能力、问题解决能力和成果展示能力。例如,观察学生在项目实施过程中是否能够合理分工、有效沟通,是否能够及时解决遇到的问题,项目汇报是否清晰、准确等。

3) 理论与实践结合考核

给出一些基于 XLCT 技术的实际应用案例,要求学生进行分析和讨论。例如,提供一个关于 XLCT 技术在肿瘤诊断中的应用案例,让学生分析该案例中 XLCT 技术的优势和局限性,以及如何进一步改进该技术。通过案例分析考核,能够评估学生对 XLCT 技术的综合理解能力和分析问题的能力。

在传统理论考试的基础上,增加一些与 XLCT 技术实践应用相关的题目。例如,考查学生对 XLCT 技术实验原理、数据处理方法、临床应用场景等方面的理解。通过理论考试,能够评估学生对理论知识的掌握程度以及将理论知识与实践应用相结合的能力。

3 实践效果分析

X 射线激发光学断层成像研究反哺教学的改

革自 2024—2025 学年第 1 学期在生物医学工程专业 2022 级($n=16$)实施,作为实验组。以“X 射线剂量-成像质量关系验证”实验为例,基于 X 射线激发光学断层成像平台,实验组进行实操实验,撰写包含数据对比与误差分析的实验报告。生物医学工程专业 2021 级($n=20$)作为对照组,通过 Monte Carlo 仿真软件(MCNP, Geant4)模拟 X 射线传输过程,完成理论推导与仿真结果分析。

从实验设计合理性、实验原理阐述完整度、实验报告规范性三个方面评价学生实验成绩,统计分析结果如表 1 所示。通过对比分析发现,实验组的实验设计合理性、实验原理阐述完整度和实验报告规范性均显著高于对照组,表明基于 X 射线激发光学断层成像平台的实验教学模式有效提升了课程教学效果。针对实验组学生的问卷调查显示(表 2,有效回收率 100%),93.75% 的实验组学生认为“实操平台显著提升了对 X 射线激发光学断层成像物理机制的理解”,87.50% 的实验组学生建议“增加更多科研平台转化的实验项目”。另外,基于 X 射线激发光学断层成像平台,学生已能自主设计 X 射线/光学双模态成像实验,相关成果获全国大学生生物医学工程创新设计竞赛一等奖 1 项、三等奖 1 项和中国大学生计算机设计大赛西北赛区一等奖 2 项、全国三等奖 1 项。

表 1 实验成绩评价

组别	人数	实验设计 合理性	实验原理 阐述完整度	实验报告 规范性
对照组	20	84.23±5.92	80.88±5.43	85.38±4.69
实验组	16	90.09±4.37	88.47±4.13	93.03±3.20
p		<0.01	<0.01	<0.01

表 2 问卷调查结果

指标	提高	不变	减少
对 X 射线激发光学断层成像物理机制的理解	15/16	1/16	0/16
科研平台转化的实验项目	14/16	2/16	0/16

4 总结与讨论

在当今科学技术飞速发展的时代,跨学科研究成果不断涌现,为各领域的发展带来了新的机

遇和挑战。X 射线激发发光断层成像作为一种结合 X 射线激发和光学探测的先进成像技术,凭借其独特的成像原理和卓越的性能,在医学影像和材料科学等领域取得了显著的研究进展。同时,XLCT 研究蕴含的丰富科学内涵和实践价值,也为高等教育提供了宝贵的教学资源。通过跨学科融合、实验教学优化、PBL 教学推广以及考核方式改进等多维度实践路径,XLCT 研究可有效反哺高校教学,提升学生的创新能力和实践水平,为培养高素质复合型人才提供有力支持。

XLCT 研究反哺医学物理教学的改革与实践取得了一定的成效,但在教学资源和学生基础差异等方面还存在一些问题,需要进一步改进和完善。首先,XLCT 技术作为一项前沿研究技术,相关的教学资源相对匮乏。学校可以加强与科研机构和合作,共同建设 XLCT 实验教学平台,共享教学资源。其次,由于 XLCT 技术涉及多学科知识交叉,对学生的基础知识要求较高。教师可以实施分层教学策略,依据学生知识储备与基础能力的差异进行层级划分,针对各层次学生的实际情况,量身定制差异化的教学目标与课程内容,以此精准适配不同学习进度与能力水平学生的发展需求,确保教学活动更具针对性与实效性。在今后的医学物理教学中,应继续加强前沿研究成果与教学的结合,不断探索教学改革的新思路和新方法,培养适应现代医学发展需求的高素质医学物理人才。

参 考 文 献

- [1] 殷芳芳,杨振宇,蔡璟,等. 中国医学物理学科的建设与探索专家共识[J]. 中国医学物理学杂志, 2024, 41(4): 397-403.
YIN F F, YANG Z Y, CAI J, et al. Expert consensus on the construction and exploration of medical physics discipline in China[J]. Chinese Journal of Medical Physics, 2024, 41(4): 397-403. (in Chinese)
- [2] 王小力,王傅民,吕腾博. 医工学科交叉“物理治疗医学”课程建设研究与实践[J]. 中国大学教学, 2024, 9: 21-26.
WANG X L, WANG F M, LV T B. Research and practice on the curriculum construction of “Physical Therapy Medicine” in the interdisciplinary field of medicine and engineering[J]. China University Teaching, 2024, 9: 21-26. (in Chinese)
- [3] LIU T S, RONG J Y, HAO W Q, et al. Cone-beam X-ray luminescence computed tomography based on MLEM with adaptive FISTA initial image[J]. Computer Methods and

- Programs in Biomedicine, 2023, 229: 107265.
- [4] PRATX G, CARPENTER C, SUN C, et al. X-Ray Luminescence Computed Tomography via Selective Excitation: A Feasibility Study[J]. IEEE Transactions on Medical Imaging, 2010, 29: 1992-1999.
- [5] 董仕练, 唐涵. 以拉曼光谱技术为引: 浅谈大学物理实验中的医学和物理学科交融[J]. 物理与工程, 2022, 32(4): 150-155.
- DONG S L, TANG H. Taking Raman spectroscopy technology as an example: A brief discussion on the integration of medicine and physics in college physics experiments[J]. Physics and Engineering, 2022, 32(4): 150-155. (in Chinese)
- [6] ZHANG H, HAI L, KOU J, et al. OPK_SNCA: Optimized prior knowledge via sparse non-convex approach for cone-beam X-ray luminescence computed tomography imaging[J]. Computer Methods and Programs in Biomedicine, 2022, 215: 106645.
- [7] LIU T S, RONG J Y, GAO P, et al. Regularized reconstruction based on joint L1 and total variation for sparse-view cone-beam X-ray luminescence computed tomography[J]. Biomedical Optics Express, 2019, 10(1): 1-17.
- [8] 韩景灏, 贾梦宇, 周仲兴, 等. 采用光子计数测量的高灵敏度锥束 XLCT[J]. 中国激光, 2024, 51(3): 21-27.
- HAN J H, JIA M Y, ZHOU Z X, et al. High-sensitivity cone-beam XLCT using photon-counting measurement[J]. Chinese Journal of Lasers, 2024, 51(3): 21-27. (in Chinese)
- [9] 张文元, 海琳琦, 刘英杰, 等. 一种基于改进多光谱的稀疏角 CB-XLCT 成像方法[J]. 计算机与现代化, 2022, 5: 96-101.
- ZHANG W Y, HAI L Q, LIU Y J, et al. A sparse-angle CB-XLCT imaging method based on improved multispectral technique[J]. Computer and Modernization, 2022, 5: 96-101. (in Chinese)
- [10] LIU T S, HUANG S E, LI R J, et al. Dual and Multi-Target Cone-Beam X-ray Luminescence Computed Tomography Based on the DeepCB-XLCT Network[J]. Bioengineering (Basel, Switzerland), 2024, 11(9): 874.
- [11] WANG Y F, WANG H Y, ZHU Q Q, et al. SBL-LCGL: sparse Bayesian learning based on Laplace distribution for robust cone-beam x-ray luminescence computed tomography[J]. Physics in Medicine & Biology, 2024, 69(17): 175020.
- [12] 周仲兴, 郭司琪, 贾梦宇, 等. 基于分组注意力残差网络的锥束 XLCT 成像[J]. 天津大学学报(自然科学与工程技术版), 2022, 55(10): 1082-1092.
- ZHOU Z X, GUO S Q, JIA M Y, et al. Cone-beam XLCT imaging based on grouped attention residual network[J]. Journal of Tianjin University (Science and Technology), 2022, 55(10): 1082-1092. (in Chinese)
- [13] HONG Z, CHEN Z, CHEN Q, et al. Advancing X-ray Luminescence for Imaging, Biosensing, and Theragnostics[J]. Accounts of Chemical Research, 2023, 56(1): 37-51.
- [14] PEI P, CHEN Y, SUN C X, et al. X-ray-activated persistent luminescence nanomaterials for NIR-II imaging[J]. Nature Nanotechnology, 2021, 16(9): 1011-1018.
- [15] 徐鹏, 吕辉, 马新国. 电磁特性研究反哺电磁波教学——从粗糙面散射、透射和吸收看懂菲涅耳反射、折射和布儒斯特角[J]. 物理与工程, 2024, 34(6): 19-26.
- XU P, LV H, MA X G. Research on electromagnetic characteristics feeding back to electromagnetic wave teaching—Understanding Fresnel reflection, refraction and Brewster's angle from rough-surface scattering, transmission and absorption[J]. Physics and Engineering, 2024, 34(6): 19-26. (in Chinese)
- [16] 戎军艳, 高鹏, 刘天帅, 等. X 射线诊疗创新平台助力医学物理硕博学生培养[J]. 物理与工程, 2024, 34(5): 121-126, 197.
- RONG J Y, GAO P, LIU T S, et al. The innovation platform for X-ray diagnosis and treatment facilitating the cultivation of undergraduate, master and doctoral students in medical physics[J]. Physics and Engineering, 2024, 34(5): 121-126, 197. (in Chinese)
- [17] 陈明星, 欧阳方平. 科研反哺教学的固体物理学课程教学改革与实践[J]. 物理与工程, 2023, 33(3): 10-13, 20.
- CHEN M X, OUYANG F P. Teaching reform and practice of solid-state physics course with scientific research feeding back to teaching[J]. Physics and Engineering, 2023, 33(3): 10-13, 20. (in Chinese)
- [18] 任冀峰, 张昆亚, 钱秀清, 等. 科研反哺教学在生物力学实验教学中的探索与实践[J]. 北京生物医学工程, 2024, 43(4): 415-419.
- REN J F, ZHANG K Y, QIAN X Q, et al. Exploration and practice of scientific research feeding back to teaching in biomechanics experimental teaching[J]. Beijing Biomedical Engineering, 2024, 43(4): 415-419. (in Chinese)
- [19] 吴浩, 于重重, 孙践知, 等. 基于分层次 PBL 教学模式的在线仿真教学探索[J]. 计算机仿真, 2023, 40(12): 342-347.
- WU H, YU C C, SUN J Z, et al. Exploration of online simulation teaching based on hierarchical PBL teaching model[J]. Computer Simulation, 2023, 40(12): 342-347. (in Chinese)
- [20] 孙天宝, AMANDA F, 冯纯, 等. PBL 教学结合标准化病人考核在康复治疗师规范化培训中的应用[J]. 中华物理医学与康复杂志, 2023, 45(9): 830-833.
- SUN T B, AMANDA F, FENG C, et al. Application of PBL teaching combined with standardized patient assessment in the standardized training of rehabilitation therapists[J]. Chinese Journal of Physical Medicine and Rehabilitation, 2023, 45(9): 830-833. (in Chinese)