



PET/CT 虚拟仿真实验平台建设

王国平¹, 张小镛¹, 郭彦彬¹, 刘迎宾¹, 赵元弟^{1,2*}

(1. 华中科技大学生命科学与技术学院, 武汉 430074; 2. 华中科技大学武汉光电国家研究中心, 武汉 430074)

摘要: 随着《“健康中国 2030”规划纲要》的提出, 高端医疗设备成为国家重点支持的领域之一。正电子发射型计算机断层显像技术(PET)和计算机断层扫描技术(CT)是目前世界上很复杂、应用价值很高的医学影像学设备。设备操作复杂、价格昂贵、线下培训成本高等诸多不利因素使得 PET/CT 仪器的教学培训难以开展。本研究基于虚拟现实技术, 开发了一套 PET/CT 虚拟仿真实验平台, 该平台包括虚拟 PET/CT 科室场景漫游、仪器成像原理、仪器构造及仪器使用考核测评等多个功能。该平台适用于生物医学工程、医学影像学等相关专业的学生。基于该平台学生可随时随地学习 PET/CT 的相关知识、原理和使用方法, 不受时间和空间的限制。该平台特有的交互功能也可以较好地提高学生的参与感和探索欲, 达到更理想的教学效果。

关键词: PET/CT; 虚拟仿真实验; 教学改革; 医学影像设备

中图分类号: R318

文献标志码: A

DOI: 10.12179/1672-4550.20220608

Construction of the PET / CT Virtual Simulation Experimental Platform

WANG Guoping¹, ZHANG Xiaoyong¹, GUO Yanbin¹, LIU Yingbin¹, ZHAO Yuandi^{1, 2*}

(1. College of Life Science and Technology, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China;

2. Wuhan National Laboratory for Optoelectronics, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

Abstract: With the “Healthy China 2030” Plan, research on high-end medical devices is strongly supported by our country. positron emission tomography (PET)/computed tomography (CT) is one of the most complex and highest value medical imaging devices in the world. However, it is difficult to carry out the teaching and training of PET/CT, due to the adverse factors of complex equipment operation, expensive price and high cost of offline training. In this study, a PET/CT virtual simulation experiment platform was developed based on the virtual reality technology. The proposed system includes the functions of virtual PET/CT department scene roaming, imaging principle, instrument structure and the assessment and evaluation of instrument operations. The target users of the platform are students of biomedical engineering, medical imaging and other related majors. Based on this platform, students can learn the knowledge, principles and usage of PET/CT anytime and anywhere, regardless of time and space. The interactive functions featured by the platform can also better enhance students’ engagement and desire for exploration, achieving more desirable teaching and learning results.

Key words: PET/CT; virtual simulation experiment; teaching reform; medical imaging equipment

随着国民经济的发展和医疗水平的进步, 各种医学影像学技术已成为医生进行临床诊断和治疗的主要依据, 培养优秀医学影像技术人才的需求日渐增长。医学影像学是主要探讨 X 射线、 γ 射线、电磁场、超声波等媒介在机体内部的相互作用机理, 以图像的方式展示出机体内部结构、生

理功能状况、病理演变情况等, 以便医师对机体内部的健康状况做出精确医学诊断的一门学科^[1]。

CT 是现代医学诊断中较为常用的检查技术之一, 其通过控制 X 射线球管发射 X 射线束, 实现对机体特定厚度截面的扫描, 利用对侧的探测器获取穿透机体后的 X 射线, 基于图像重建算法得到

收稿日期: 2022-10-31; 修回日期: 2023-12-22

基金项目: 国家一流本科课程(2023220316); 华中科技大学卓越工程师自主培养新范式专项研究课题(5001170121); 华中科技大学教学研究项目(2023094); 华中科技大学本科课程责任教授项目; 华中科技大学研究生工作“院系+”重点项目(YJSYXJ202316)。

作者简介: 王国平(1979-), 男, 博士, 教授, 主要从事激光视觉与可视化及生物医学应用的研究。

*通信作者: 赵元弟(1972-), 男, 博士, 教授, 主要从事生物医学光子学与生物医学传感检测技术的研究。E-mail: zydi@mail.hust.edu.cn

可以反应机体各部位解剖结构的 CT 图像。在各种医学影像设备中，PET 较为复杂、应用价值较高，其将带正电子(如¹⁸F，¹⁵O 等)的放射性核素标记在参与机体新陈代谢的特定化合物上。当这些化合物被注射进入机体后，正电子会发生湮灭辐射，产生 γ 光子对。PET 设备中的环形探测器可以检测到湮灭辐射过程中 γ 光子对的释放时间、位置、数量等信息，并经过一系列复杂的信号处理算法重建出可以反映机体各部位代谢情况的 PET 图像。

PET/CT 作为一种多模态式高端医学影像设备，被广泛应用于多种临床场景，如肿瘤、神经系统、心脑血管等疾病的检查。它将能实现高灵敏度功能成像的 PET 和能实现高精度结构成像的 CT 有机结合在同一个设备，即保留了二者技术优势，又利用 CT 提供的高精度结构成像弥补了 PET 成像分辨率差、医师阅片困难等缺陷^[2]。根据《2022 年医用影像设备行业与联影医疗研究报告》的统计数据可知，2020 年中国 PET/CT 最低拥有量不足 0.7 台(每百万人，下同)，MRI 设备最低拥有量为 4.9 台，CT 设备的规模最大，达到了 9.4 台。同期其他发达国家的 PET/CT 最低拥有量数据分别为：美国 5.7 台，澳大利亚 3.7 台，比利时 2.9 台。由此可见，人口基数庞大的中国存在着高端医疗设备短缺、医疗资源分配不均、影像科医师配比不足等亟待解决的问题，与发达国家相比具有较大差距。因此，为了让学生对 CT、MRI、PET、PET/CT 等大型医学影像设备的成像原理、仪器构造、检查流程等有更深刻、直观的认识，除了通过图片和视频等资料进行课堂学习，各高校通常在学生专业实习环节会与医院的影像科合作，统一组织学生前往医院开展线下实

习。但 PET/CT 设备价格昂贵，配备的医院少，运行成本高且具备电离辐射，上述问题导致学生的线下实习工作难以开展。PET、CT 成像理论中所涉及的微观物理原理较为抽象，通过传统的教学方式难以使学生深刻理解，从而难以激发学生的学习欲、探索欲。

虚拟仿真教学是教学改革的重要组成部分，许多高校都积极地建设虚拟仿真教学基地，开展针对各学科领域的虚拟仿真教学实验，高等教育出版社也面向各大高校开放了国家级虚拟仿真实验教学项目共享平台-实验空间，以推动全国范围内的线上教学建设工作。国家对数字化教育资源的开发与共享愈加重视，为了积极响应教学改革政策，提升教学质量，我们建设了 PET/CT 的虚拟仿真平台，该平台可以让学生不受时间空间的限制，高效地学习 PET/CT 成像原理知识，熟悉 PET/CT 仪器的构造及使用流程。

1 系统架构

虚幻引擎 4(UE4)，是一款由 Epic Games 开发的，具有逼真视觉效果和完备开发环境的实时 3D 创作工具。该引擎中的蓝图可视化脚本系统采用面向对象的图形化编程方式，功能强大且易上手，对不善于编程的建模和美工人员也较为友好。

如图 1 所示，关卡蓝图是控制着场景内所有资源的主蓝图，负责整个系统中流程控制、用户管理、关卡逻辑、子蓝图调用等功能的实现与调度；控件蓝图则用于实现系统的某一特定功能，如登录功能、交互功能、UI 界面逻辑控制(包含场景漫游模块、原理展示模块、仪器构造模块、考核测评模块)等。

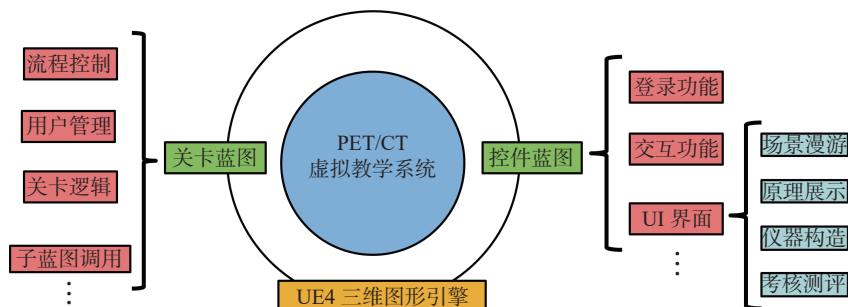


图 1 PET/CT 虚拟仿真系统平台架构图

目前，国内已发布了一些专门用于磁共振、CT 等成像方式的虚拟教学系统，但针对 PET、

PET/CT 的虚拟教学系统较少。因此，我们根据自身科研背景和授课内容，基于虚幻引擎和蓝图脚

本系统开发了有自主知识产权的 PET/CT 虚拟仿真实验平台。

该平台采用经典的客户端(client)/服务器(server)(C/S)两级架构, 系统响应速度快、运行稳定, 相较于浏览器(browser)/服务器(server)(B/S)架构, 便于学生在校内网络环境下使用。PET/CT 虚拟仿真实验平台客户端可运行在学生的 PC 电脑上, 主要包括账号密码登录验证、学习界面渲染显示、学生使用情况记录、考核成绩评分, 并将考核结果上传到后台数据库等功能。后端采用 MySQL 数据库存储用户的账户信息及使用记录。

2 实验内容

针对上述 PET/CT 检查的特点以及教学中亟待解决的难点, 我们设计了一个 PET/CT 虚拟仿真实验平台, 该平台基于虚拟仿真、人机交互、实时渲染等技术构建了包括常规医院影像科的 PET/CT 检查室、控制室、打印室、病房、病例等的高精度三维模型。为了全面提升学生从课堂理论到实践训练的学习体验, 设计了 PET/CT 科室的场景漫游、PET 和 CT 的成像原理展示、PET/CT 仪器构造介绍、考核测评这 4 个环节, 如图 2 所示, 帮助学生熟悉 PET/CT 检查的全过程。

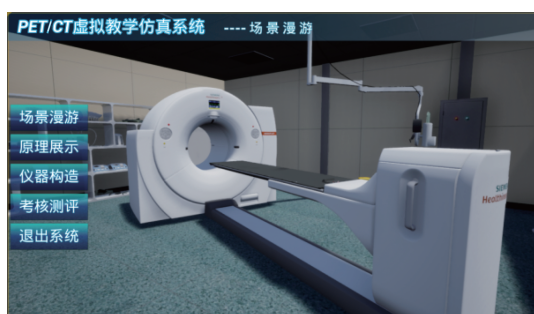


图2 UI 布局

2.1 场景漫游

场景漫游模块包括第一人称和第三人称视角随意切换功能。用户可利用鼠标和键盘浏览整个 PET/CT 科室虚拟场景, 观察各类医疗仪器的外形细节。在三维场景中, 用户可使用多种交互功能, 增强沉浸感, 如用户经过某个房间时, 房门可自动打开等。用户首先进入的是 PET/CT 检查前进行各项准备的病房, 如图 3 所示, 房间内的两扇医用蓝色折叠屏风包围着病床, 病房的右侧布置有监护仪、输液杆、移动餐桌、置物台。用户

进入的第二个房间是 PET/CT 检查室, 如图 4 所示, 房间内包含 PET/CT 仪器、机械臂、置物台、医疗废物回收箱等。控制室如图 5 所示, 包含电脑、键盘鼠标、椅子、文件柜等, 通过透明玻璃医生可以观察检查室内仪器的实时运行情况。控制室左侧是打印室, 如图 6 所示, 患者可以使用自助打印机打印出检查结果的影像胶片。

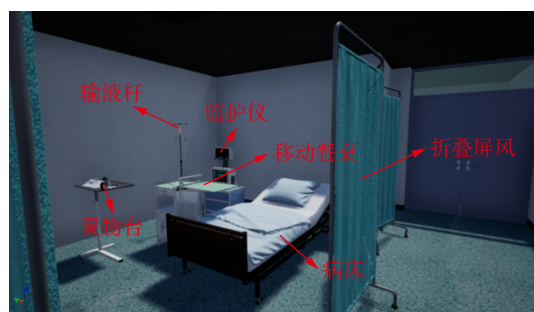


图3 病房

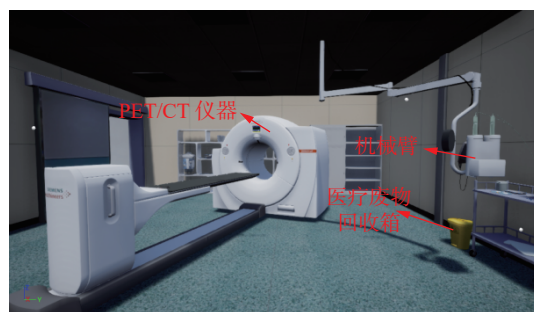


图4 PET/CT 检查室

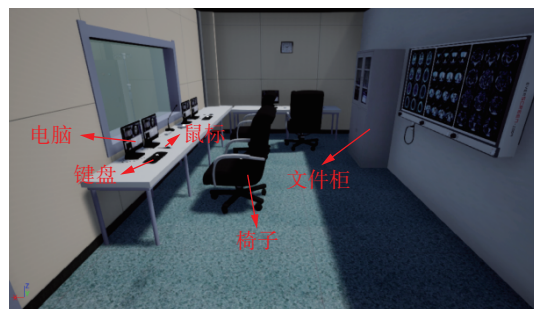


图5 控制室



图6 打印室

2.2 原理展示

如图 7 所示, 原理展示环节设计由易到难、层层递进, 可以分为 PET 和 CT 两个部分, 从基本知识点、核心原理到 PET/CT 仪器使用, 通过模型、动画、语音等形式生动现象地展示 PET/CT 基本成像原理中涉及的所有宏观到微观的变化过程, 将抽象晦涩的成像原理以动画展示、语音讲解相融合的方式进行呈现, 由浅入深地引导学生提高自身自主性学习、探索性学习的意识。

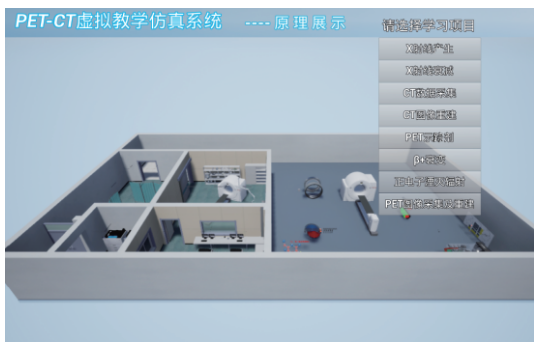


图 7 原理展示部分

2.2.1 PET/CT 基本原理(CT 部分)

1) X 射线衰减

X 射线是一种具有较强穿透力, 携带较大能量的电磁波。CT 成像的物理本质是人体各组织对 X 射线衰减系数的成像, 其指导思想是确定 X 射线衰减系数值在机体某一厚度剖面上的二维分布。X 射线在透射机体的过程中不可避免地撞击到人体组织的原子核外电子, 从而损失部分能量。所以人体组织对 X 射线的吸收能力可以通过其透射机体前后的能量差值来进行定量计算, 即衰减系数值^[3]。

依据朗伯-比尔(Lambert-Beer)定律, 衰减系数是机体自身属性和 X 射线能量的函数, 可反映人体不同组织对 X 射线吸收情况的差异。因此, CT 可以利用衰减系数区分人体各组织, 实现对人体组织的高精度重建。

2) 雷登(Radon)变换

在第 1 点中往往把 X 射线透射的物体假设为单一的、均匀的理想介质, 但在实际情况中机体有皮肤、骨骼、肌肉、血液等等不同物质, 每一种的衰减系数都不一样。每个探测器接收到的信号通过计算得出的是探测器方向上衰减系数的线积分。

如果将成像机体的切片分割成一个个无限小

的体积元素, 即体素, 并且标上 x/y 坐标, 那么 CT 图像则可视作一个二维函数 $f(x,y)$, CT 图像的本质是 X 射线衰减系数分布, 因此每个体素的像素值与该体素的衰减系数值一一对应^[4]。假定每个体素足够小, 且为单一均匀的介质, 那么发射一排平行或扇形的 X 射线束则可以得到该方向上机体截面衰减系数的一维分布, 当 X 射线源绕机体以固定角度转动, 就可以得到不同投影角度下衰减系数的一维分布。通过把射线排列位置作为纵坐标, 旋转角度作为横坐标, 衰减系数总积分作为输出值, 得到一副二维图像, 上述过程即雷登变换。

3) 图像重建

在第 2 点中实现了 CT 中雷登变换的过程, 并得到了在不同转换角度下的投影值, 对投影值再做一维的傅里叶变换(Fourier transform, FT), 根据傅里叶中心切片定理和滤波反投影图像重建模型可知: 原衰减系数函数在任何方位上的投影函数的一维 FT 函数, 是原衰减系数函数的二维 FT 函数在平面上沿经过原位置且同方向的直线上的值, 将 FT 变换的结果填充整个 uv 平面, 并对 uv 平面的所有值进行二维傅里叶逆变换, 即可得到重建图像^[5-6]。

2.2.2 PET/CT 基本原理(PET 部分)

1) 放射性核素定义及核素的制备

用户可以点击 UI 按钮来启动医用回旋加速器, 产生放射性核素, 放射性核素¹⁸F 标记到葡萄糖上产生¹⁸F-FDG。

放射性核素是一种极不稳定的原子核, 它会因为自发地放出射线而衰变成为稳固的核素。带电粒子会在医用回旋加速器的圆形轨道里不断加速并最终极高的速度轰击靶核, 制造出携带正电子的放射性核素^[7]。如将正电子核素¹⁸F 标记在葡萄糖上就产生了¹⁸F-FDG 分子, 它是 PET 最常用的显像剂, 在将合成的¹⁸F-FDG 分子注入机体后, 人体不同部位的富集情况可反映出机体各部位的代谢情况^[8]。

2) 衰变、PET 常用放射性核素及半衰期

在该小节中通过图片展示 β^+ 衰变的公式、PET 常见核素的半衰期以及播放产生衰变的动画。

放射性核素自主释放出的粒子迅速转化为另一种粒子的过程称为衰变, 衰变的类型主要包括 α 衰变、 β 衰变以及 γ 衰变等。PET 成像过程中主

要发生 β^+ 衰变, 即原子核中的质子释放正电子和中微子并衰变为中子的过程^[9]。碳 11、氮 13、氧 15、氟 18 等都是 PET 显像剂中较为常见的放射性核素, 这些核素会进行 β^+ 衰变, 释放出正电子, 其中氟 18 的半衰期为 110 min 左右, 氧 15 的半衰期则只有 2 min。

3) 正电子湮没辐射

通过动画的形式, 主要展示放射性核素衰变释放正电子, 正电子与机体内电子碰撞产生 γ 光子对的全过程。

放射性核素氟 18 发生 β^+ 衰变, 释放出的正电子在机体内运动了极短时间之后, 和原子核外电子发生碰撞并产生相互作用, 发射出两个飞行方向相反, 携带相同能量的 γ 光子, 这个过程被称为湮没辐射^[10]。

4) 数据采集

通过动画展示在第 3 点中产生的一对 γ 光子被探测器块转化为电子的过程。

一个完整的环形 PET 探测器由若干小型探测器单元构成, 每个探测器单元中包括闪烁晶体和光电倍增管两个部分。湮没辐射作用下形成的一对 γ 光子穿透机体组织, 分别击中对称位置的两个探测器单元上的闪烁晶体, 在光电效应和康普顿效应等物理作用下 γ 光子能量被吸收, 形成次级电子并发射出大量低能荧光光子^[11]。闪烁晶体周围涂抹有反射层, 这样低能荧光光子无法进入相邻的闪烁晶体, 只能在内部反射并最终进入光电倍增管。

光电倍增管, 是一种可用来探测弱光信号的真空电子器件, 它的内部结构包含一个光阴极、一个阳极和数个倍增极。当低能荧光光子撞击到光阴极时, 由于光电效应会产生光电子, 而这种光电子受各极间电位分布等原因所形成的加速和聚焦效应影响, 在每一个倍增极上不停激发成倍的二级发射电子, 最终在阳极板上可收集到大量二级发射电子^[12]。

5) 符合探测

完整的探测器环上会发生大量闪烁事件, 这一步将依序播放真符合事件动画、散射符合事件动画、随机符合事件动画。

湮没辐射产生的一对 γ 光子具有互成 180° 、飞行时间相同等特性, 因此, 符合探测要求两个成对的探头之间互成 180° , 且同时探测到 γ 光子

才能被记录为符合事件。这个过程需要通过一种高精度的符合系统来实现甄别, 同一符合事件中的两个 γ 光子被记录的时间差要小于符合系统设置的时间窗宽, 一般定为 12~15 ns^[13]。探测到的符合事件可以分为 3 种类型: 真符合事件, 其可以正确定位湮没辐射发生的位置; 散射符合事件, 即 γ 光子在穿透机体时发生了光电效应与康普顿散射, 损失了部分能量, 偏离了原来的飞行方向^[14], 导致探测到的两个 γ 光子的连线并不经过湮没辐射发生的真实位置, 会提供错误的定位信号, 需要剔除; 随机符合事件, 指在同一时间窗内探测到了来自两个不同湮没辐射产生的 γ 光子, 如图 8 所示, 即探测到的两个 γ 光子来自于两个几乎同时发生的独立湮没事件。随机符合事件不含任何定位信息, 因此该事件会增加 PET 图像的噪声。

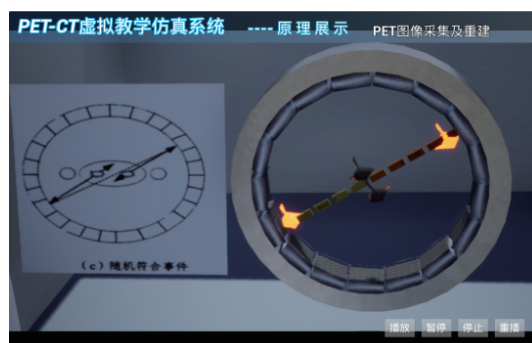


图 8 PET 图像采集与重建——随机符合事件

6) 图像重建算法(迭代法)

PET 图像的简单重建一般采用迭代方法, 即从一幅初始图像开始, 对图像的估计值进行逐步地迭代修正, 渐渐逼近图像真实值的过程^[15]。假设图像各像素的初始估计值均为 10, 根据竖直方向的实际投影值比例对图像的估计值进行迭代修正, 得到显示的结果。接下来, 再根据水平方向的实际投影值对图像的估计值进行迭代修正。最后, 根据对角方向的实际投影值对图像的估计值进行迭代修正, 进而通过数据矩阵的数次迭代变化得到最终的重建图片。

2.3 仪器构造

在仪器构造部分, 我们不仅对真实的 PET/CT 仪器进行了逼真的三维建模, 并且对该仪器的内部结构, 如 PET 探测环、PET 探测器块、闪烁晶体、光电倍增管、CT 探测器、x 线球管等也进行了精细建模, 如图 9 所示。

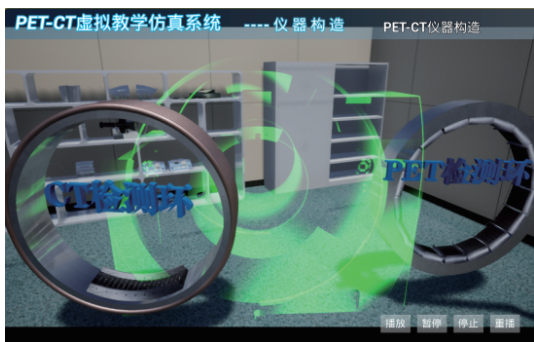


图 9 PET/CT 仪器构造

在 PET/CT 检查室场景中，学生可以详细学习上述硬件结构的名称、外观及功能，加深对 PET/CT 基本原理的理解，有助于学生对 PET/CT 完整知识框架的构建。

2.4 考核测评

基于课程教学大纲和课程需求，系统设置了 20 道理论考核题目，在规定时间内完成，其中包括了 PET/CT 中的核心知识点，如图 10 所示。系统将按照学生的答题正确率和用时进行自动评分，生成记录学生学习情况、错误答题解析等内容的电子实验报告，并将最终得分实时上传到后台数据库。

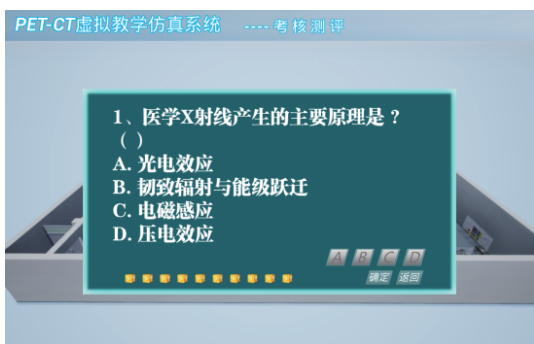


图 10 考核测评题目

3 系统特色

3.1 教学内容覆盖面广泛，PET/CT 融合教学

实验平台以学生为中心，利用可自由交互的场景模型，生动地呈现了 PET/CT 设备的运行原理、仪器结构及整个 PET/CT 科室场景。实验内容以华中科技大学生命科学与技术学院生物医学工程系分子医学影像学课程教学内容为基础，综合了医学影像技术学、核医学、医学图像处理等多门课程的方法、原理及技术，融合了专业实践对学生理论水平和技能素养的要求，具有“微观可

视化”“数理公式模型化”等特色。

3.2 还原真实 PET/CT 科室场景，解决难以大规模统一展开医院参观学习的问题

实验平台基于 3Dmax 软件实现了真实 PET/CT 科室场景、PET/CT 仪器构造细节、微观分子以及 PET/CT 原理学习的高精度三维建模。目前大部分高校都没有成立针对 PET/CT 成像原理的实验平台，主要原因在于：

- 1) PET/CT 设备价格昂贵，运行及维护成本高；
- 2) 临床设备难以具象化地呈现设备运行的原理；
- 3) 由学生操作和运行设备存在安全隐患。

因此，在以往的教学过程中，会依靠专业实习来让学生们走进医院，使其对 PET/CT 设备的运行过程和基本原理有所了解。但这种方式受限于配备 PET/CT 设备的医院少，设备占用紧张，出于安全性考虑难以近距离观察等一系列问题，线下实习变得更难以实现。随着计算机性能的提升和虚拟现实(virtual reality, VR)、增强现实(augmented reality, AR)、混合现实(mixed reality, MR)等技术的兴起，虚拟教学系统的呈现效果也更加逼真^[16]，且克服了时空的阻碍，学生可随时随地进行 PET/CT 仪器结构、成像原理、使用方法的学习，平台的特色互动设计也可以大大地提高学生的参与感和探索欲，提升教学效果和教学质量。

4 结束语

本系统基于虚拟仿真、人机交互、实时渲染等技术，构建了具有 PET/CT 科室虚拟场景漫游、PET/CT 原理学习、PET/CT 仪器构造解析、考核测评等功能的 PET/CT 虚拟仿真实验平台。目前该平台已经在华中科技大学生命科学与技术学院生物医学工程系 2018 级、2019 级、2020 级本科生的分子医学影像学课程中投入使用。该平台有助于学生们对抽象的课堂理论知识有更加具象化的理解，增强学生的交互感、体验感及学习热情。

本系统填补了 PET/CT 虚拟仿真实验教学平台的空白，后续将与本团队开发的核磁共振成像(magnetic resonance imaging, MRI)虚拟仿真实验平台^[17]整合，构建综合性、共享性大型医学影像虚拟仿真实验平台，为相关专业学生共享更优质的教学资源。

(下转第 143 页)