

DOI:10.3969/j.issn.1005-202X.2022.09.018

医学信号处理与医学仪器

基于uEXPLORER PET-CT机的NEMA标准性能检测方法

凌文嘉, 林晓琴, 龚琬玲, 陈曼珊

广东省人民医院(广东省医学科学院)医疗设备处, 广东 广州 510080

【摘要】目的:通过对uEXPLORER PET-CT机中PET子系统的基本结构原理分析以及对PET机按照NEMA标准进行性能测试,从而推广PET性能检测方法,并做好质量控制工作。**方法:**根据NEMA标准和原厂性能要求对该设备进行空间分辨率、灵敏度、散射分数和等效噪声计数率的测试,并评价性能结果。**结果:**NEMA空间分辨率距离射野中心1 cm处的横向结果为3.10 mm,轴向结果为3.28 mm;距离射野中心10 cm处的横断面径向结果为3.48 mm,横断面切向结果为3.24 mm,轴向为3.49 mm。NEMA灵敏度测试视场角中心位置结果为174.279 kcps/MBq;距离视场角中心10 cm处结果为180.261 kcps/MBq。NEMA散射分数的结果为36.7%。等效噪声计数率结果为1 569.5 kcps。**结论:**uEXPLORER PET-CT机PET子系统的NEMA标准性能检测结果符合标准要求,检测方法操作简便,过程合理,具有较好的可操作性并利于质量控制工作的推广。

【关键词】PET-CT;空间分辨率;灵敏度;性能检测

【中图分类号】R179.39;R318

【文献标志码】A

【文章编号】1005-202X(2022)09-1167-06

NEMA standard-based performance test for uEXPLORER PET-CT machine

LING Wenjia, LIN Xiaoqin, GONG Wanling, CHEN Manshan

Department of Medical Equipment, Guangdong Provincial People's Hospital (Guangdong Academy of Medical Sciences), Guangzhou 510080, China

Abstract: Objective To popularize the PET performance testing method and promote quality control through the analysis on the basic structure and principle of PET subsystem in uEXPLORER PET-CT machine and the performance test of PET machine according to NEMA standards. **Methods** According to the NEMA standard and the performance requirements of the factory, the equipment was tested for spatial resolution, sensitivity, scattering fraction and equivalent noise count rate, and the obtained results were evaluated. **Results** The NEMA spatial resolution at 1 cm from the center of the field was 3.10 mm in transverse direction and 3.28 mm in axial direction, and that at 10 cm from the center of the field was 3.48 mm in radial direction on transverse section, 3.24 mm in tangential direction on transverse section, and 3.49 mm in axial direction. The results of NEMA sensitivity test at 0 and 10 cm from FOV center were 174.279 kcps/MBq and 180.261 kcps/MBq. The NEMA scattering fraction was 36.7%, and the equivalent noise count rate was 1 569.5 kcps. **Conclusion** The results of NEMA standard-based performance test for uEXPLORER PET-CT machine PET subsystem conform to the requirements of the standard. The testing method with simple operation and reasonable process has a high operability, and it is conducive to the promotion of quality control.

Keywords: PET-CT; spatial resolution; sensitivity; performance test

前言

X线正电子发射断层扫描仪(PET-CT)是反映病变的基因、分子、代谢及功能状态的显像设备。它利

用正电子核素标记葡萄糖等人体代谢物作为显像剂,通过病灶对显像剂的摄取来反映其代谢变化,从而为临床提供疾病的生物代谢信息。PET-CT是PET与CT两种影像设备有机结合在一起形成的一种新设备,PET主要实现功能成像,CT实现结果成像^[1-4]。PET/CT完成能与结构的双模态显像,相比较于常见的CT、MR,它能更早且更清晰地发现肿瘤,是当今生命科学、医学影像技术发展新的里程碑。2019年我国联影公司研制的2 m全景动态扫描uEXPLORER PET/CT是核医学领域的重大突破,配

【收稿日期】2022-05-10

【基金项目】广东省自然科学基金(2021A1515011551)

【作者简介】凌文嘉,工程师,研究方向:医疗设备质量控制及维护保养,E-mail: 1173656253@qq.com

【通信作者】陈曼珊,高级工程师,研究方向:医疗设备质控、大型医疗设备的管理,E-mail: 13825001568@126.com

置有 80 排 CT, 拥有超长的扫描视野。在一个屏气周期内就能实现对全身组织脏器的扫描及高清动态成像, 扫描灵敏度是传统 PET-CT 的 40 倍。科室可以用这台设备开展更多新的药物研发, 个性化精准诊疗等, 以满足临床多样化的检查需求^[5-8]。为了确保仪器系统处于良好的工作状态, 并获取高质量图像, 需做好日常质控及预防性保养工作。本文通过分析广东省人民医院新引进的 1 台联影 uEXPLORER PET/CT 基本结构和工作原理, 从 PET 角度探讨该设备的 NEMA 标准(美国国家电气制造商协会的 PET 检测标准)性能检测方法, 共 4 个检测项目: 空间分辨率、灵敏度、散射分数和等效噪声计数率^[9-12]。

1 PET 子系统基本结构和工作原理

该 PET/CT 机主要由 PET 系统、CT 系统、检查床、水冷机、软件系统、控制台组成。其中 PET 子系统位于机架后方, 主要部件包括探测器、电子系统、水冷系统, 其中探测器用来接收通过人体内示踪剂发射的 γ 射线, 经过光电转换后将接收到的射线转换为电信号, 电信号通过电子系统处理后提取位置、能量、时间等信息后将信号传输到计算机系统进行图像重建^[13-15], 水冷系统为探测器提供恒定的温度, PET 成像原理如图 1 所示。

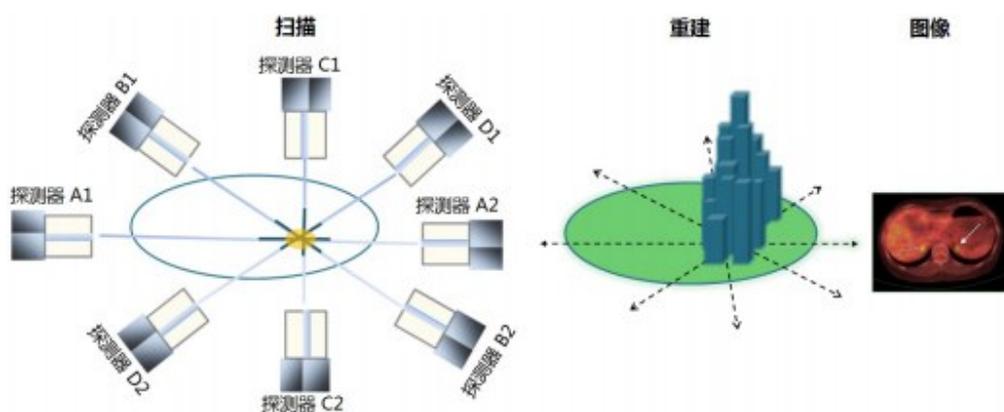


图 1 PET 成像原理

Figure 1 Principle of PET imaging

2 材料与方法

2.1 空间分辨率测量

空间分辨率是指两点间的最近距离, 对 PET 系统应测量横断面两个方向(径向和切向)的空间分辨率和轴向空间分辨率, 本次性能检测针对的是半高宽(FHWM), 空间分辨率要求为距离射野中心 1 cm 处的横向及轴向结果均为 3.5 mm; 距离射野中心 10 cm 处的横断面径向、切向结果及轴向结果 < 3.8 mm。首先将空间分辨率测试工装进行定位, 将工装安装在检查床上, 按照 NEMA 标准要求将 3 支毛细管插在工装上, 其 (X, Y) 坐标位置分别是 (0, 10 mm)、(100 mm, 0) 和 (0, 100 mm)。进行 CT 扫描, 并在 CT 图像上(偏离射野中心 1 cm 位置)确定毛细管顶端的位置, 根据此位置重新调整病床高度, 并微调测试工装在 X 方向的位置, 确保点源横截面位置正确, 再次扫描 CT, 在 3D viewer 界面记录线源顶端的床码值。毛细管 F^{18} -FDG(氟代脱氧葡萄糖)放射源模型点源制作方法: 准备 3 根毛细管点样(1 mm 内径), 准备活度浓度为 25 mCi/cc(925 MBq/mL)的 FDG, 放在小器

皿内并注入少量红墨水, 每根点样未封的一端戳入微量的高吸水性树脂粉末(粉末在规格为 1 mm 毛细管子内的长度目测 1 mm 为佳), 随后清洁此管口。按上述步骤, 制作出 3 个 FDG 点源。

点源数据采集方法: 分别在 1/2 AFOV(轴向视野)位置与 1/4 AFOV 位置, 首先将制作好的 3 根点源, 按照 NEMA 标准要求的位置, 插入测试工装上, 将底座移动至 PET 位, 并将检查床位置移至之前记录的 1/2 AFOV 床码位置, 设定时间为 10 min 后进行数据采集。然后将检查床从 1/2 AFOV 位置移至 1/4 AFOV 位置, 在 1/4 AFOV 位置根据系统的轴向视场角(FOV)长度, 同样设定时间每 10 min 后进行数据采集。

2.2 灵敏度测试

灵敏度测试包含 FOV 中心与距离 FOV 中心 10 cm 位置两个点的灵敏度, 结果标准为 ≥ 150 kcps/MBq。安装灵敏度测试工装: 首先两个支架放置于 PET 扫描孔径之中, PET 侧支架的外沿与孔径圆筒缝齐平, 水平尺调平, 把 5 根铝管一一放于支架之上, 使得每根铝管在 PET 侧从支架外沿向外延伸长度相同, 在

每根铝管上做好标记。准备放射源:测得灵敏度测试所用的塑料软管被注入70 cm长水柱时的体积,按上述体积,将FDG放射源注入塑料管中,记录当时的活度以及采集时间,把线源插入最小直径铝管中,并在线源的塑料软管外壁标上记号。数据采集:将线源放置在FOV中心的卡槽上,从最小直径的铝管开始数据采集,将剩余铝管按从小到大的顺序逐次套在上次采集的铝管外,并进行扫描,每次扫描时间为5 min,且每次嵌套完铝管后需更换相对应卡槽,以保证线源在PET的FOV中心位置不变;每次更换完毕后,用水平尺检查工作的水平度,并作相应调整,最后记录每次扫描的初始时间和扫描持续时间,将卡槽移动至距离中心10 cm位置,重复上述4条步骤,并记录时间,见表1。

表1 FOV中心与距离中心10 cm处扫描时间记录

Table 1 Record of scanning time at FOV center and 10 cm from the center

第 <i>i</i> 次扫描	FOV中心		距离FOV中心10 cm位置	
	初始时间	持续时间/min	初始时间	持续时间/min
1	10:01:40	5	10:44:25	5
2	10:10:25	5	10:51:40	5
3	10:19:00	5	10:59:25	5
4	10:27:00	5	11:07:00	5
5	10:35:40	5	11:13:55	5

2.3 散射符合/等效噪声计数率测量

准备模型:把散射水模的4个聚四氟乙烯圆柱放

在病床上,在其轴心插入塑料棒,把4个圆柱连接起来,使用塑料管往内注入清水,插入散射水模的小孔中,确保小孔连接通畅,并在线源上做标定,使得放射源分布能够贯穿整个水模,量得整个线源内水柱长度达到70 cm时的体积。使用CT对其进行定位:通过CT螺旋扫描成像,记录水模中心的坐标值,根据从图像上得到的误差,调整水模和床高位置,直至水模中心位于FOV中心,线源孔位于水模中心轴的正下方。准备足够高活度的放射源,按照第一个步骤测得的体积准备清水,随后把放射源稀释于其中,将放射源注入塑料软管中,并记录其中的活度以及测量时间,并将塑料软管插入散射水模中。数据采集:使用NEMA NECR协议进行采集,设定好采集时间和暂停时间;采集过程耗时14.5 h,需记录采集初始时间。

3 结果

3.1 空间分辨率测量值

把在1/2 AFOV和1/4 AFOV位置采集的所有数据拷贝至测试移动工作站,得出3个点源在X、Y、Z方向空间分辨率(FWHM),见表2。并利用设备自带的测试处理工具分析数据和汇总测试结果得到NEMA径向、切向和轴向空间分辨率(FWHM),见表3。结果显示NEMA空间分辨率距离射野中心1 cm处的横向结果为3.10 mm,轴向结果为3.28 mm;距离射野中心10 cm处的横断面径向结果为3.48 mm,横断面切向结果为3.24 mm,轴向结果为3.49 mm,其结果均符合标准。

表2 3个点源在X、Y、Z方向空间分辨率(FWHM, mm)

Table 2 Spatial resolution of 3 point sources in X, Y, Z directions (FWHM, mm)

坐标(X, Y)	1/2AFOV			1/4AFOV		
	X	Y	Z	X	Y	Z
(0, 10 mm)	3.1305	2.9758	3.2341	3.1516	3.1392	3.3353
(100 mm, 0)	3.4033	3.1656	3.3603	3.4945	3.2722	3.5023
(0, 100 mm)	3.2587	3.4071	3.5404	3.2480	3.5363	3.5637

表3 NEMA径向、切向和轴向空间分辨率(FWHM, mm)

Table 3 NEMA radial, tangential and axial spatial resolutions (FWHM, mm)

偏心1 cm		偏心10 cm		
横向	轴向	横断面径向	横断面切向	轴向
3.10	3.28	3.48	3.24	3.49

3.2 灵敏度测量值

2次数据采集结束后,将结果拷贝至测试移动工

作站中利用测试处理工具分析数据和汇总测试结果,如图2、图3所示。最终得到FOV中心位置系统灵敏度为174.279 kcps/MBq,距离FOV中心10 cm位置系统灵敏度为180.261 kcps/MBq,FOV中心位置系统灵敏度轴向曲线如图4所示,距离FOV中心10 cm位置系统灵敏度轴向曲线如图5所示,其结果符合灵敏度测试标准范围 ≥ 150 kcps/MBq。

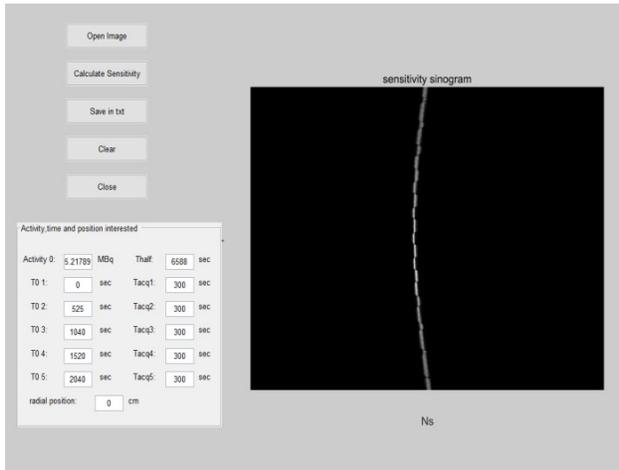


图 2 FOV 中心位置灵敏度测试数据
Figure 2 Sensitivity test data at FOV center

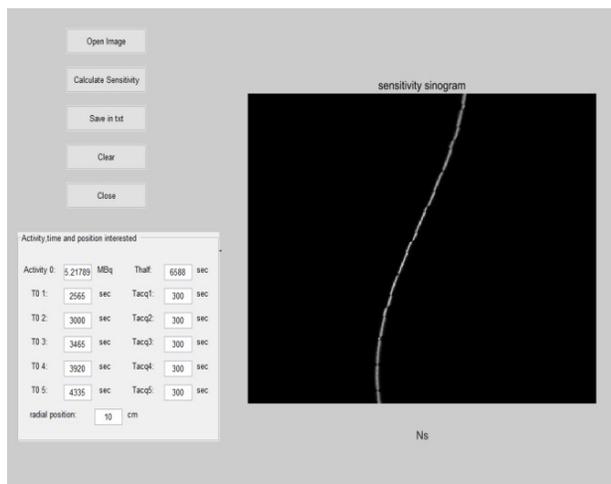


图 3 距离 FOV 中心 10 cm 位置灵敏度测试数据
Figure 3 Sensitivity test data at 10 cm from FOV center

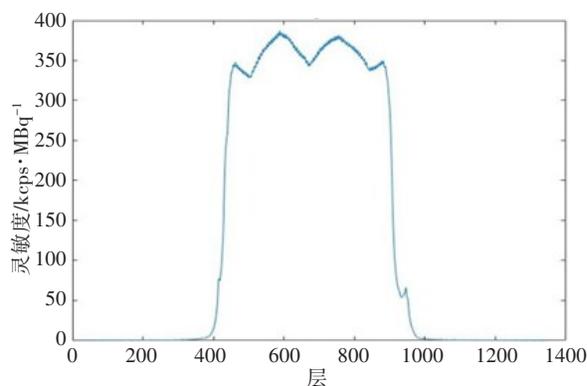


图 4 FOV 中心灵敏度轴向曲线
Figure 4 Axial sensitivity at FOV center

3.3 散射符合/等效噪声计数率测量值

把之前采集到的数据拷贝至测试移动工作站后利用NECR测试处理工具分析数据,其分析界面如图6所示。最终得到计数率活度,如图7所示。散射分

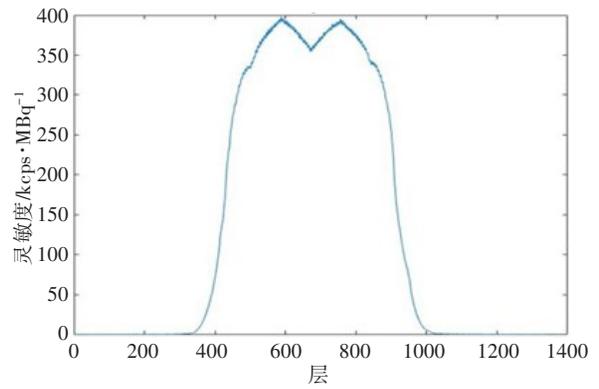


图 5 距离 FOV 中心 10 cm 位置灵敏度轴向曲线
Figure 5 Axial sensitivity at 10 cm from FOV center

数活度曲线如图8所示。NECR计数率活度曲线如图9所示。

根据计数率活度曲线数据得出真计数率峰值 $R_{r, peak} = 5379.8$ keps, 真计数率峰值对应的活度 $a_{r, peak} = 24.04$ kBq/cc; 根据散射分数活度曲线得出NECR计数率峰值对应的散射分数 $SF = 36.7\%$, 低活度时的散射分数 $SF = 35.3\%$, NEMA散射分数符合在NECR计数率峰值处标准要求 $\leq 45\%$; 根据NECR计数率活度曲线得出等效噪声计数率峰值 $R_{NEC, peak} = 1569.5$ keps, 此时对应的活度 $a_{NEC, peak} = 15.4$ kBq/cc, 结果符合NEMA等效噪声计数率要求 ≥ 1350 keps。

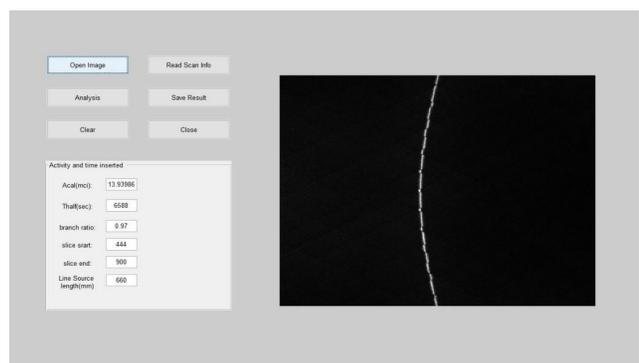


图 6 NECR 测试处理工具分析界面
Figure 6 NECR test processing tool analysis interface

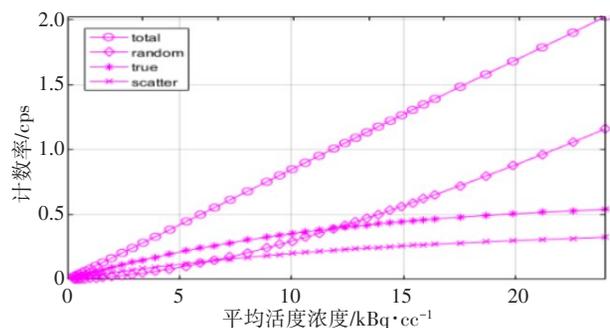


图 7 计数率活度曲线
Figure 7 Counting rate-activity curve

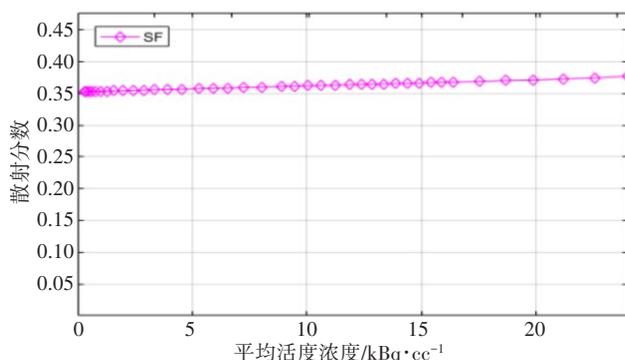


图8 散射分数活度曲线

Figure 8 Scattering fraction-activity curve

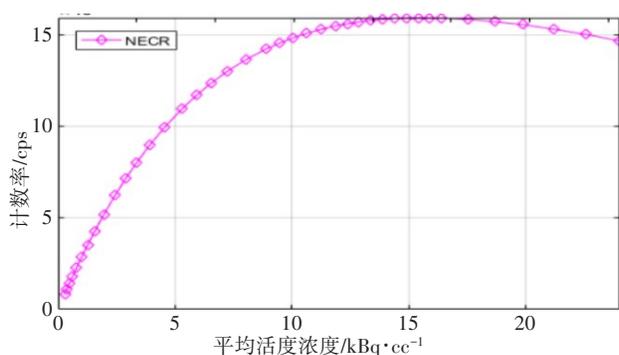


图9 NECR 计数率活度曲线

Figure 9 NECR count rate-activity curve

4 讨论

依据检测标准,本次联影 uEXPLORER PET/CT 的 PET 系统的空间分辨率、灵敏度和散射/随机/计数损失等性能指标测试均通过,具体结论见表 4。

本文阐述的 4 个性能检测方法与传统进口 PET-CT 机型检测方法相比,无需进入维修模式。并且空间分辨力的测试过程中,增加点源位置的复检,提高了位置的精准度;灵敏度测试采集数据时间短可重复性强,使得流程更加顺畅。散射分数、等效噪声计数率检测无需重复设置条件,具有较好的可操作性。综合分析该检测方法与传统进口机型的检测对比有较大的改变,但是操作简便,过程合理,并利于质量控制工作的推广。希望本文的基于 uEXPLORER PET-CT 机的 NEMA 标准性能检测方法能为 PET-CT 机的质量控制及预防性维护保养提供参考,并通过快速、高质量地完成 PET-CT 机的性能检测工作,以提高机器的高效稳定运行,保证患者的生命安全^[16-18]。

由于该设备结构复杂、精密元器件众多,因此日常保养工作中需关注机器环境温度,大型医疗设备环境要求正常温度为 20~24 °C,湿度要求为 40%~60%。在以后的工作中可进一步关注温湿度的变化对设备性能的影响程度的研究。

表 4 本次性能检测结论

Table 4 Performance test conclusions

检测项	验收通过标准	测量结果	是否通过
NEMA 空间分辨率			
偏心 1 cm 横断面	≤3.5 mm	3.10 mm	通过
偏心 10 cm 横断面径向	≤3.8 mm	3.48 mm	通过
偏心 10 cm 横断面切向	≤3.8 mm	3.24 mm	通过
偏心 1 cm 轴向	≤3.5 mm	3.28 mm	通过
偏心 10 cm 轴向	≤3.8 mm	3.49 mm	通过
NEMA 散射分数	NECR 峰值处≤45%	36.7%	通过
NEMA 等效噪声计数率	≥1 350 kcps	1 570 kcps	通过
NEMA 灵敏度(FOV 中心位置)	≥150 kcps/MBq	174 kcps/MBq	通过
NEMA 灵敏度(距离 FO 中心 10 cm 位置)	≥150 kcps/MBq	180 kcps/MBq	通过

5 结论

综上所述,PET 性能测试中空间分辨力、灵敏度、散射分数、等效噪声计数率都是直接评价机器性能的重要指标^[19-20]。例如当 PET-CT 检测检查发现 SUV 值(标准摄入值)异常时,是否是患者自身肿瘤组织摄取 18F-FDG 示踪剂定量指标引起的个别现象,还是因为设备的原因导致的整体现象? 当出现整体现象时,设备的性能检测结果尤为重要,因此为保证设

备系统的正常运行和扫描图像质量,需要定期对设备进行系统的性能检测。PET-CT 作为高风险大型医疗设备在日常工作中做好机器的性能检测及质控工作,不仅能延长机器寿命,而且保证图像质量,满足临床需求^[21-22]。通过推广性能检测方法并熟悉性能检测流程,从而能够持续定期进行性能监测和具体了解机器的性能状况,对核医学的质量控制工作具有重要意义。

【参考文献】

- [1] 余冬兰, 刘阳萍, 易畅, 等. PET/CT的PET质量控制[J]. 中国医疗设备, 2015, 30(5): 125-127.
Yu DL, Liu YP, Yi C, et al. Quality control of PET/CT[J]. China Medical Devices, 2015, 30(5): 125-127.
- [2] 孙涛, 韩善清, 汪家旺. PET/CT成像原理、优势及临床应用[J]. 中国医学物理学杂志, 2010, 27(1): 1581-1582.
Sun T, Han SQ, Wang JW. Imaging theory, predominance and clinical application of PET/CT[J]. Chinese Journal of Medical Physics, 2010, 27(1): 1581-1582.
- [3] 付鑫, 任宁, 邝忠华, 等. PET/MRI仪器研发的历史和现状[J]. 中国医学物理学杂志, 2018, 35(10): 1181-1186.
Fu X, Reng N, Kuang ZH, et al. History and current status of development of PET/MRI scanner[J]. Chinese Journal of Medical Physics, 2018, 35(10): 1181-1186.
- [4] 丁言国, 叶崇志. 上海新漫LYSO晶体商用于全景动态扫描PET-CT uEXPLORER探索者[J]. 人工晶体学报, 2021, 50(10): 1991.
Ding YG, Ye CZ. Shanghai xinman lyso crystal is commercially used in panoramic dynamic scanning PET-CT Explorer[J]. Journal of Synthetic Crystals, 2021, 50(10): 1991.
- [5] 刘龙, 陈颖, 储呈晨, 等. 不完全修复下PET/CT设备故障分析[J]. 中国医疗设备, 2021, 36(5): 130-133.
Liu L, Chen Y, Chu CC, et al. Failure analysis of PET/CT with imperfect repair[J]. China Medical Devices, 2021, 36(5): 130-133.
- [6] Lee HY, Chung JK, Jeong JM, et al. Comparison of FDG-PET findings of brain metastasis from non-small-cell lung cancer and small-cell lung cancer[J]. Ann Nucl Med, 2007, 22(4): 281-286.
- [7] 张鹏, 张璞, 孙劼, 等. PET-CT性能检测技术的研究进展[J]. 中国医疗设备, 2019, 34(11): 11-15.
Zhang P, Zhang P, Sun J, et al. Research progress on PET-CT performance testing technology et al. [J]. China Medical Devices, 2019, 34(11): 11-15.
- [8] 吴寒, 璐紫昭, 张锦明, 等. 我国PET/CT质控与评价体系中质量控制模型的研究[J]. 中国医学计算机成像杂志, 2021, 27(1): 42-46.
Wu H, Ju ZZ, Zhang JM, et al. Study on quality control model of PET/CT quality control and evaluation system in China [J]. Chinese Computed Medical Imaging, 2021, 27(1): 42-46.
- [9] 尚长浩. PET-CT质量及风险控制[J]. 中国医学装备, 2012, 9(4): 50-53.
Shang CH. PET-CT quality and risk control [J]. China Medical Equipment, 2012, 9(4): 50-53.
- [10] 钱根年, 陈自谦, 钟群, 等. PET/CT成像系统的质量控制[J]. 中国医疗设备, 2019, 34(2): 1-4.
Qian GN, Chen ZQ, Zhong Q, et al. Quality control of PET/CT system [J]. China Medical Devices, 2019, 34(2): 1-4.
- [11] 陈蕾蕾, 陈自谦, 许尚文, 等. PET/CT显像常见伪影及质量控制[J]. 中国医疗设备, 2019, 34(2): 17-20.
Chen LL, Chen ZQ, Xu SW, et al. Artifacts of PET/CT image and quality control[J]. China Medical Devices, 2019, 34(2): 17-20.
- [12] 张连宇, 耿建华. PET/CT中的CT剂量和质量控制[J]. 中国医学影像技术, 2011, 27(11): 2365-2367.
Zhang LY, Geng JH. Quality and dose control of CT component in PET/CT[J]. Chinese Journal of Medical Imaging Technology, 2011, 27(11): 2365-2367.
- [13] 陈自谦. 大型医学影像设备质量控制与质量管理的现状与思考[J]. 中国医疗设备, 2018, 33(10): 1-6.
Chen ZQ. Current state and consideration of quality control and management in Medical Devices[J]. China Medical Devices, 2018, 33(10): 1-6.
- [14] 刘嘉宁, 耿建华. PET质量控制标准与性能测试研究进展[J]. 中国医学装备, 2021, 18(7): 171-177.
Liu JN, Geng JH. Advances in QC standard and performance testing of PET[J]. China Medical Equipment, 2021, 18(7): 171-177.
- [15] 王瑞, 陈英茂, 耿建华. PET图像质量的影响因素及评估方法[J]. 中国医学装备, 2021, 18(2): 169-173.
Wang R, Chen YM, Geng JH. Influencing factors and assessment methods of PET image quality[J]. China Medical Equipment, 2021, 18(2): 169-173.
- [16] 刘家全, 耿义强, 姚树林, 等. 一体化PET/MR成像设备质量控制的研究[J]. 中国医学装备, 2020, 17(7): 1-6.
Liu JJ, Geng YQ, Yao SL, et al. A research on quality control of integrated PET/MR imaging equipment [J]. China Medical Equipment, 2020, 17(7): 1-6.
- [17] 耿建华, 陈英茂, 陈盛祖, 等. 新政策下再议PET/CT设备的配置条件和选型方案[J]. 中国医学装备, 2019, 16(10): 100-104.
Geng JH, Chen YM, Chen SZ, et al. The configuration conditions and type-selecting scheme of PET/CT equipment under new policy[J]. China Medical Equipment, 2019, 16(10): 100-104.
- [18] Tixier F, Le Rest CC, Hatt M, et al. Intratumor heterogeneity characterized by textural features on baseline 18 F-FDG PET images predicts response to concomitant radiochemotherapy in esophageal cancer[J]. J Nucl Med, 2011, 52(3): 369-378.
- [19] 谷晓芳, 鲍雅晴, 贺丽萍. PET/CT动物实验相关问题的思考[J]. 中国医疗器械杂志, 2022, 46(4): 454-458.
Gu XF, Bao YQ, He LP. Consideration on animal experiment in PET/CT[J]. Chinese Journal of Medical Instrumentation, 2022, 46(4): 454-458.
- [20] 段长江. 浅谈PET/CT的计量检测[J]. 中国卫生产业, 2013, 10(33): 194-196.
Duan CJ. Discussion on PET/CT metrological measurement[J]. China Health Industry, 2013, 10(33): 194-196.
- [21] Ponnambalam M, Balakrishnan G, Maran P. Watershed algorithm based segmentation for handwritten text identification[J]. ICTACT J Image Video Process, 2014, 4(3): 767-772.
- [22] 王瑜歆, 王立刚. PET-CT不良事件收集与分析[J]. 中国医疗设备, 2019, 34(11): 138-140.
Wang YX, Wang LG. Collection and analysis of adverse events related to PET-CT[J]. China Medical Devices, 2019, 34(11): 138-140.

(编辑:薛泽玲)