

SPECT 设备系统性能测试及分析

刘辉 安晶刚 宋颖

【摘要】 目的 通过对 SPECT 设备进行系统性能测试,分析影响系统性能指标的因素和系统性能指标之间的关系。**方法** 参考美国电气制造商协会(NEMA)标准以及厂家规范,测量了 12 个省市的 31 台 SPECT 设备的系统空间分辨力、系统平面灵敏度、断层空间分辨力等性能指标,这些指标全部是第一次检测时的测量结果。**结果** 系统空间分辨力: (7.90 ± 0.62) mm,最大值 9.46 mm,最小值 7.04 mm;系统平面灵敏度: (78.54 ± 13.17) $s^{-1} \cdot MBq^{-1}$,最大值 123.80 $s^{-1} \cdot MBq^{-1}$,最小值 56.70 $s^{-1} \cdot MBq^{-1}$;断层空间分辨力: (13.12 ± 2.59) mm,最大值 18.13 mm,最小值 8.45 mm,从数值上看,这 3 个指标的增减趋势是基本一致的,并且通过和厂家指标标准值的对比,3 个系统性能指标均满足临床要求。**结论** 系统平面灵敏度和空间分辨力是相互制约的,晶体厚度的增加可以提升系统平面灵敏度,但同时会对其系统空间分辨力和断层空间分辨力产生负面影响,所以不同的临床应用,需要选择合适的准直器类型和晶体厚度。

【关键词】 SPECT; NEMA 标准; 空间分辨力; 系统平面灵敏度

SPECT system performance test and analysis of results Liu Hui, An Jinggang, Song Ying. Key Laboratory of Radiological Protection and Nuclear Emergency, China CDC, National Institute for Radiological Protection, Chinese Center for Disease Control and Prevention, Beijing 100088, China

【Abstract】 Objective To analyze the influence factors on, and the relationship between, the system performance parameters by testing SPECT equipment. **Methods** By reference to National Electrical Manufacturers Association standards and manufacturer's specifications, the performances of a total of 31 SPECTs in 12 provinces were measured, for the first time, with regard to their system spatial resolution (SSR), system planar sensitivity (SPS) and tomographic spatial resolution (TPR). **Results** The results were as follows: (7.90 ± 0.62) mm for SSR, with the highest 9.46 mm and the lowest 7.04 mm; (78.54 ± 13.17) $s^{-1} \cdot MBq^{-1}$ for SPS, with the highest 123.80 $s^{-1} \cdot MBq^{-1}$ and the lowest 56.70 $s^{-1} \cdot MBq^{-1}$; and (13.12 ± 2.59) mm for TSR, with the highest 18.13 mm and the lowest 8.45 mm. These values indicated a nearly consistent upward and downward trend and could meet the clinical requirements by comparison with the manufacturer's specifications. **Conclusions** Mutual restrictions have been shown between SSR and SPS. Increased thickness of the system crystal plane can improve the SPS, but also has a negative impact on the SSR. For all the above reasons, it is the optimum solution to choose the right type of collimator and crystal thickness for different clinical applications.

【Key words】 SPECT; NEMA standard; Resolution; System planar sensitivity

单光子发射计算机断层装置(SPECT)在我国医院中的应用越来越广,在临床诊断应用中的地位日益重要。SPECT 设备不仅可以进行平扫、断层显像,还可以进行全身扫描显像,尤其有一部分设备增添了 CT 功能,可以进行衰减校正以及图像融合,从而会提升图像质量、提高诊断水平,但必须保证 SPECT 设备可靠的系统性能指标,包括系统空间分辨力、系统平面灵敏度、断层空间分辨力等,它们是

SPECT 整体性能的直接体现^[1-2]。本研究结合 31 台 SPECT 设备的系统性能指标,分析和探讨不同的晶体厚度对系统空间分辨力和系统平面灵敏度的影响以及断层空间分辨力的影响因素,在临床应用上应该根据不同的需求选择合适的机器类型。

材料与方 法

1. 研究对象:测量的 31 台 SPECT 设备分布在北京(1 台)、上海(3 台)、广东(5 台)、广西(6 台)、内蒙古(1 台)、河北(2 台)、湖南(4 台)、黑龙江(1 台)、湖北(3 台)、河南(3 台)、四川(1 台)、江苏(1 台)的 31 家三甲医院。其中黑龙江的 SPECT 设

备晶体是 1 英寸的,其余的均是 3/8 英寸(1 英寸 = 2.54 cm)。

2. 设备及材料:双线源模体、灵敏度模体、毛细管,按照 NEMA 标准自行研制。

3. 测量指标与方法:依据美国电气制造商协会(NEMA)标准、厂家规范以及国内相关标准,测量系统空间分辨力、系统平面灵敏度、断层空间分辨力等指标^[3,4]。在 SPECT 性能测试中使用⁹⁹Tc^m放射性药物,首先要进行能峰测试,防止能峰漂移过大,对测试结果造成影响。⁹⁹Tc^m的能量 140 keV,能窗宽度设置成 20%。系统性能测试需要安装上准直器,一般选用低能高分辨或低能通用准直器,而固有性能测试需要把准直器卸掉^[5]。所有的系统性能指标均是第一次测量的结果。

(1)系统空间分辨力:测量中所使用的模体是双线源模体,使用⁹⁹Tc^m溶液的体积约 1 ml,总活度约为 37 MBq,测量时机器的计数率一般 $\leq 3.0 \times 10^4$ /s。安装准直器,把探头设置成 H 模式(单探头放置水平),把灌有⁹⁹Tc^m的双线源模体放置于两个探头之间的中心视野,双线源到准直器的表面为 10 cm,并平行于探头的 y 轴方向。测试时选择静态采集协议,设置条件为:矩阵 512 × 512, ZOOM 为 1;每个探头的停止条件均是 2M 计数。

采集结束后,数据分析是计算双线源模体图像上每个像素点的点源的响应函数半高宽,最后计算所有像素点的半高宽平均值,该数值就是系统空间分辨力的值,单位 mm。

(2)系统平面灵敏度:测量中使用的是灵敏度模体,该模体注入⁹⁹Tc^m溶液后会形成一个面源,测量中需要 37 MBq 的⁹⁹Tc^m,需要准确记录注射到模体的活度和时间^[6]。安装准直器,把探头设置成 H 模式,把灌有⁹⁹Tc^m的双线源模体放置于两个探头之间的中心视野,每个探头上的准直器距离模体是 10 cm。测试时选择静态采集协议,设置矩阵 256 × 256,停止条件按时间为 300 s。在采集系统灵敏度性能指标的过程中,需要先进行对本底采集,然后再对含有⁹⁹Tc^m灵敏度模体进行采集。

数据处理时需要计算出本底计数 N_B ;含有放射源的计数 N ;灵敏度采集时模体中的放射性药物平均活度 A_1 ,灵敏度 $S = (N - N_B)/(300 \times A_1)$,单位 $s^{-1} \cdot MBq^{-1}$ 。

(3)断层空间分辨力:SPECT 在带准直器的情况下,采取断层采集的模式进行采集,重建后获取

横断面的图像数据,然后进行分析获得断层空间分辨力。断层空间分辨力在采集过程中使用的点源浓度一般是 1 110 MBq/ml,该点源需要放在内径 < 1 mm 的毛细玻璃管内,其径向长度一般 < 2 mm。参考文献[7]的方法,结合 NEMA 标准,在测试时,首先要使两个探头相对即 H 模式(若是单探头使其水平即可),然后把制作好的点源放置于距探头 15 cm,选测断层采集协议,旋转半径 15 cm,设置 128 × 128 的矩阵,每 3° 旋转 1 次。

采集结束后,重建图像时重建方法为滤波反投影,选择横断面图像中点源最亮的一帧图进行计算,算出其半高宽作为断层空间分辨力,单位 mm。

4. 评价标准:依据 NEMA 标准以及参考厂家出厂标准^[3],在测量结果中若是双探头的,选择其中一个比较差的数值作为统计数据,若是单探头的则直接把该数值作为统计数据。系统空间分辨力的合格值 ≤ 10 mm;系统平面灵敏度的合格值 $\geq 60 s^{-1} \cdot MBq^{-1}$;断层空间分辨力的合格值 ≤ 17 mm。考虑测试时模体摆位误差,放射性计数的统计涨落和活度计测量误差等因素,最后测量结果的合格值范围放宽 10%。

结 果

1. 系统平面灵敏度:结果列于表 1。由表 1 可知,31 台设备的系统平面灵敏度测量结果 $(78.54 \pm 13.17) s^{-1} \cdot MBq^{-1}$,最大值 $123.80 s^{-1} \cdot MBq^{-1}$,最小值 $56.70 s^{-1} \cdot MBq^{-1}$,该指标的测量结果范围波动较大,其中有 1 台设备的系统平面灵敏度 $> 100 s^{-1} \cdot MBq^{-1}$,经核查分析,这台设备的晶体均是 1 英寸的,并且这台设备的系统空间分辨力也是最差的,表明晶体厚度对系统平面灵敏度影响较大。经分析这些设备的系统平面灵敏度都在厂家的合格值范围内。

2. 系统空间分辨力:结果列于表 1。由表 1 可知,31 台设备的系统空间率测量结果 (7.90 ± 0.62) mm,最大值 9.46 mm,最小值 7.04 mm,87.1% 的设备的系统空间分辨力都集中在 7.0 ~ 8.5 mm 之间,其余设备也都符合厂家要求。从结果中可以明显看出,系统灵敏度越好的机器,其系统空间分辨力就越差。

3. 断层空间分辨力:结果列于表 1。由表 1 可知,31 台设备的系统平面灵敏度测量结果 (13.12 ± 2.59) mm,最大值 18.13 mm,最小值 8.45 mm,断层

空间分辨力的测量结果范围很广,但这些都符合厂家的合格值。

表 1 31 台设备系统性能指标(系统空间分辨力、系统平面灵敏度、断层空间分辨力)测量结果

编号	系统空间分辨力 (mm)	系统平面灵敏度 ($s^{-1} \cdot MBq^{-1}$)	断层空间 分辨力(mm)
1	7.44	85.80	9.51
2	7.47	79.14	18.13
3	7.65	68.53	14.13
4	8.10	76.78	11.63
5	7.22	70.89	10.28
6	8.28	67.12	15.89
7	8.14	70.69	14.58
8	7.39	85.20	15.26
9	8.22	81.15	17.45
10	9.46	123.80	13.71
11	7.59	93.10	10.99
12	7.40	76.95	11.89
13	7.83	83.08	11.73
14	8.03	88.61	11.74
15	7.75	93.50	12.67
16	8.08	74.76	11.91
17	7.31	79.70	12.11
18	7.26	63.04	12.02
19	7.43	69.54	8.60
20	7.64	70.00	14.40
21	8.17	70.10	15.63
22	7.71	84.90	8.45
23	7.74	63.00	14.88
24	7.44	68.70	11.90
25	7.97	92.80	14.27
26	8.86	56.70	13.10
27	8.06	86.30	16.25
28	7.04	59.60	8.89
29	9.25	86.60	16.40
30	9.36	88.80	16.10
31	7.76	75.99	12.30

从表 1 可以看出,系统平面灵敏度的值越大,系统空间分辨力及断层空间分辨力的值也会越大;从数值上分析可以得出,这 3 个指标的增减趋势是基本一致的。系统平面灵敏度越大越好,而空间分辨力越小越好,表明系统平面灵敏度与系统空间分辨力及断层空间分辨力是相互制约的。

讨 论

SPECT 设备系统性能对于核医学临床诊断的应用是至关重要的,因为系统性能指标的测量条件和受检者做检查时是一样的,均使用准直器。与固有性能相比,系统性能更能直接体现出 SPECT 设备的临床采集性能,同时也是核医学设备性能好坏的直观体现。

系统空间分辨力是指在使用准直器的条件下,SPECT 设备分辨出空间中两个放射性点源的能力,其具体表示值是点源的响应函数半高宽。系统空间分辨力代表了机器设备分辨图像中两个相邻点源的能力,这个指标在临床上具有重要的意义,尤其是在核医学设备的空间分辨力普遍不高的情况下显得尤为突出。

系统灵敏度是指在使用准直器的条件下,SPECT 在单位时间内探测到平面源的计数与其活度值之比。系统灵敏度描述了入射到探头上的 γ 光子被探测到的概率,描述的是每个探头对放射源(放射性药物)的响应能力,该指标与空间分辨力密切相关。

系统平面灵敏度和系统空间分辨力直接反映了 SPECT 的准直器性能。准直器的选择需要平衡系统平面灵敏度和系统空间分辨力,这是因为系统空间分辨力和系统平面灵敏度是相辅相成的,并且相互制约。对于 SPECT 性能来说,系统空间分辨力和断层空间分辨力越小越好,系统平面灵敏度越大越好。从本研究结果可以看出,这 2 个指标的测量结果走势基本一致,这就验证了系统平面灵敏度和系统空间分辨力是相矛盾和相互制约的。从晶体尺寸的角度来分析,晶体厚度为 1 英寸的设备,其系统平面灵敏度高,同时,系统空间分辨力指标较差。从 SPECT 的设计及其物理特性来看,影响机器性能一般是光电倍增管、电路设计以及准直器类型,同时从上述分析来看,晶体厚度的尺寸对 SPECT 的空间分辨力和灵敏度影响也很大。综上分析得出,3/8 英寸晶体的设备的空间分辨力较高而系统平面灵敏度稍差,而 1 英寸晶体的设备反之。

断层空间分辨力除了与设备使用的准直器类型以及晶体的厚度有关,还受其他因素如衰减校正以及重建算法的影响。该指标需要进行软件重建以后再分析,不同的重建方法以及重建滤波的选择对其影响也很大,再加上机器本身硬件性能的影响,所以造成了断层空间分辨力的测量结果范围波动较大。

范向勇等^[8]虽然测量了 SPECT 设备的系统和固有性能指标,提出了日常质量控制的重要性,但是只测量了 4 台 SPECT,数量偏少。刘辉等^[9]测量了 42 台 SPECT 设备的固有均匀性、固有空间分辨力、固有空间线性和计数率特性等指标,从其测量结果探讨 SPECT 设备质量控制效果和意义,但只测

量了 SPECT 设备不带准直器的情况下的固有性能,然而临床应用都是在使用准直器情况下进行图像采集的,SPECT 设备系统性能更能体现出其临床性能。本研究完整地测量了 SPECT 设备的系统性能指标,为临床应用提供了可靠的数据,为 SPECT 设备质量保障提供了可执行方面的依据。不足之处,还需要进一步研究固有性能指标对系统性能指标的影响。

从满足核医学临床应用的角度来讲,质量保证是指使患者检查的结果尽可能地接近实际而没有伪影或者差错;质量控制就是为了实现质量保证的实际行动,所以现在厂家提倡使用单位要重视日质控、周质控以及月质控,还需要定期保养^[10]。定期质量控制,才能获取清楚以及可靠准确的医学影像,提高核医学诊断质量。

参 考 文 献

[1] 裴著果. 影像核医学[M]. 3 版. 北京:人民卫生出版社, 2007.
 [2] Brian F. Hutton. The origins of SPECT and SPECT/CT[J]. Eur

J Nucl Med Mol Imag,2014,41(S1):3-16.
 [3] National Electrical Manufactures Association. NEMA standards publication NU1-2007: Performance measurements of gamma cameras[S]. Washington DC:NEMA, 2007.
 [4] 国家质量监督检验检疫总局. GB/T 18988. 3-2013 放射性核素成像设备性能和试验规则(第 3 部分):伽马照相机全身成像系统[S]. 北京:中国标准出版社, 2013.
 [5] 孟庆乐,杨瑞,王峰. 双探头 SPECT 仪质量控制方法探讨[J]. 医疗卫生装备,2010,31(7):116,132.
 [6] 邵明哲,陈英茂,姚树林,等. SPECT 设备平面成像性能评估与验收测试[J]. 中国医学装备, 2011, 8(12):1-4.
 [7] 梁艺华,覃伟武,叶俭,等. 单光子发射计算机断层摄影术/计算机断层扫描的质量控制与质量保证[J]. 中国基层医药, 2010,17(19):2600-2602.
 [8] 范向勇,周献锋,马加一. SPECT 质量控制检测探讨[J]. 中国医学装备,2014,11(3):8-9.
 [9] 刘辉,安晶刚,宋颖. SPECT 设备固有性能测试及结果分析[J]. 中国医学装备,2012,9(12):17-18.
 [10] Si HW, Geng JH, Chen SZ. Status of nuclear medicine in Beijing: insights from the Beijing quality control centre survey 2005-2006[J]. Nucl Med Commun,2008,29(3):298-302.

(收稿日期:2014-09-19)

防护水平剂量标准的 TLD 核查结果

李德红 邬蒙蒙 李兴东

为检查防护水平热释光剂量传递的准确性,更好地为防护水平热释光剂量量值传递提供质量保证,同时对标准实验室的仪器的准确度、量值、程序和技术能力进行验证,国际原子能机构/世界卫生组织(IAEA/WHO)在成员国范围内专门开展防护水平热释光剂量计(TLD)的质量控制比对^[1-3]。IAEA 根据国际辐射防护剂量监测的发展现状,对防护水平剂量标准的核查方案进行了修订,提出今后各参加核查实验室只能使用¹³⁷Cs γ 射线辐射场对 TLD 样品进行辐照,而不再采用⁶⁰Co γ 射线辐射场^[4]。中国计量科学研究院(NIM)于 2012 年参加了该项比对工作,现将比对结果进行报道。

一、材料与方法

1. 实验仪器:本次比对采用的是美国 Standard Imaging 公司生产的型号 Exradin A5 的防护水平电离室。使用自主研发的电离电流测量控制系统进行 Exradin A5 电离室年稳定性 >0.3%,本底电流 <1 × 10⁻¹⁴ A。采用法国 Fimel 公司生产的型号为 PCL3 TLD 自动读出 TLD 的测量结果^[5]。

2. 比对样品制备:样品由 IAEA 剂量学实验室统一提供,共 4 支,均为有机玻璃封装结构。IAEA 剂量学实验室对同批次的 LiF(Mg, Cu, P)粉末经过退火处理后,采用有机玻璃管封装,并以不同颜色和编号作为区分。其中两支 TLD 用于记录运输和贮存过程中的本底剂量,不照射;另两支 TLD 样品在¹³⁷Cs 辐射场中受照。为防止样品受到意外的照射,IAEA 建议平时将样品置于屏蔽容器中。

3. 检测方法:根据比对步骤,首先需要测量¹³⁷Cs γ 辐射场中拟进行 TLD 照射位置处的空气比释动能率^[6],计算方法如公式(1)所示:

$$K_a = N_k \cdot M \cdot \frac{(273.15 + T)}{(273.15 + 20)} \cdot \frac{101.325}{P} \quad (1)$$

式中,K_a为 20℃、101.325 kPa 条件下,采用电离室和静电计测得电离室中心位置处空气比释动能率,Gy/s;N_k为电离室校准因子,Gy/C;M 为测量系统显示值,A;T 和 P 分别为测量过程中环境温度,℃和气压,kPa。由于在空气中进行辐照和空气比释动能率测量,应考虑环境的温度和气压的修正。此外,实际辐照时还需考虑辐照器快门开关过程可能会导致时间端效应的问题。