

# 国产 BHP6601 型 SPECT 固有性能测试

刘自来, 田嘉禾, 张锦明, 陈英茂, 邵明哲

(中国人民解放军总医院核医学科, 北京 100853)

**摘要:** 参照 94 版(美国)国家电气制造商协会(NEMA)标准和国外同类产品技术标准,按照 NEMA 标准制作的国产测量模型以及相应的放射源( $^{99}\text{Tc}^m$ 、 $^{131}\text{I}$ )对 SPECT 系统进行全面测试,其固有空间分辨率为 3.8 mm,固有非均匀性为  $\pm(2.1\% \sim 3.2\%)$ ,固有空间非线性为 0.1~0.6 mm。结果显示,其固有性能优于企业产品标准,计算方法科学,图像分辨率等数据结果好,测量指标达到或接近国外同类产品。

**关键词:** SPECT; 固有性能; NEMA 标准

**中图分类号:** TH774 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-7512(2004)02-0093-06

近年来,临床核医学影像技术发展很快,产品设备不断更新换代,产品质量不断提高。为了核医学设备国产化和核医学影像技术的进一步普及提高,按国家医疗器械委员会的相关规定和技术标准,北京滨松公司生产了首台国产 BHP6601 型 SPECT 扫描机。该机数字化程度较高,传统设备中需要硬件实现的能量、线性、均匀性及旋转中心等大量校正工作均已由软件改进方式实现(计算和存储方式的改变),从而降低了硬件的复杂性,使电路更简化,运行更稳定。采用 PCWindows 程序和汉化界面设计为设备操作提供了方便。为了临床应用方便,本工作拟参照 NEMA 标准<sup>[1]</sup>和厂家提供的技术标准<sup>[2]</sup>对扫描机进行全面的性能测试<sup>[3]</sup>和验证,并与西门子公司同类产品 ECAM 型扫描机的主要指标进行比较。

## 1 验证材料

### 1.1 主要仪器

BHP6601 型 SPECT 扫描机及配套设备:北京滨松公司生产。矩形单探头有效视野为 510 mm × 390 mm, NaI(Tl) 晶体尺寸为 585 mm × 470 mm × 9.5 mm,光电倍增管为 R6233(Φ76 mm), R6231(Φ51 mm) 共计 55 支。电子学系统

包括:前置放大器、可变增益主放大器、信号处理单元(SPU)、数据采集服务器,临床图像分析处理服务器和显示系统等。

### 1.2 测量用放射源

主源为 $^{99}\text{Tc}^m$ 点源,其 $\gamma$ 射线能量为 140 keV;辅源为 $^{67}\text{Ga}$ 源,其 $\gamma$ 射线能量分别为 93、185 和 209 keV;观测源为 $^{131}\text{I}$ 源,其 $\gamma$ 射线能量为 364 keV,三种源均为北京原子高科技术应用股份有限公司产品,使用放射性活度为 30~74 MBq。

### 1.3 测量用模型

铅栅模型:滨松公司生产的铅钨合金矩形缝模和四象限铅模。缝模厚 3 mm,缝宽 1 mm,缝间隔 30 mm,缝模大小足以平行覆盖或嵌入有效视野中。

## 2 测量方法和数据处理

### 2.1 固有空间分辨率

**2.1.1 测量方法** 利用标准点源和铅栅缝模测得 CFOV 和 UFOV。固有空间分辨率是分别通过 X、Y 方向上所有缝半高宽的平均值(W、V,像素)、多缝透射模型上缝的间隔(D, mm)和所有峰间距的平均值(S,像素)等几项的数学式所得:

$$FWHM = \frac{W \cdot D}{S} (\text{mm});$$

$$FWTM = \frac{V \cdot D}{S} (\text{mm})$$

点源与探测器的表面位置示于图 1。图 1 中,铅栅缝模固定于探头前端面,缝模区域完全覆盖探头有效视野。采用  $37 \text{ MBq } ^{99}\text{Tc}^m$  球形点源,直径  $2 \text{ mm}$  以内,点源到探测器表面中心的距离为有效视野最大边长的 5 倍, 20% 能量窗,  $1024 \times 1024$  矩阵,使用能量、线性及均匀性校正,放大倍数为 1.0,采集  $30 \times 10^6$  计数,获取 X、Y 二个方向上的图像矩阵数据。

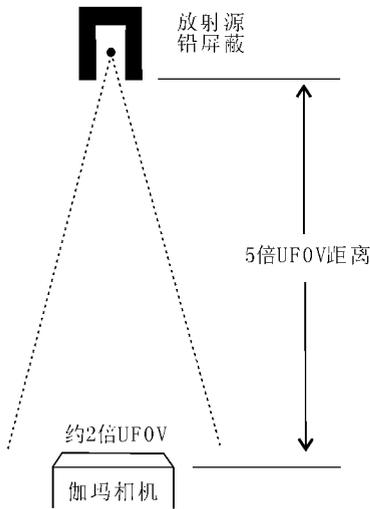


图 1 点源与探测器表面位置

**2.1.2 数据处理** 根据铅栅缝模原始数据,以像素号为横坐标,以计数为纵坐标,产生 X 或 Y 方向剖面曲线(Profile)。沿铅栅条缝方向,每隔  $30 \text{ mm}$  计算一剖面曲线。根据每条剖面曲线,使用线性插值法计算出对应每个铅栅条缝的峰值道计数。所有相邻剖面曲线作同样处理,得到二维峰值阵列。计算相邻峰中心间距,所有中心间距的平均值即对应实际的条缝间距( $30 \text{ mm}$ ),利用该关系,计算出实际像素大小,即换算因子。计算每个剖面曲线中每个条缝对应峰的半高宽(FWHM)和十分之一高宽(FWTM),取其平均值,并使用换算因子,即可获得以  $\text{mm}$  为单位的固有空间分辨率性能参数。随设备提供的质控程序,读取条缝铅栅原始图像数据,可以按照上面的步骤自动完成不同方位的固有空间分辨率的计算。

## 2.2 固有空间非线性

**2.2.1 测量方法** 同 2.1.1 固有空间分辨率测

量方法。

**2.2.2 数据处理** 铅模的缝对应的计数曲线示于图 2。找出图 2 中所有峰的半高宽,测算出所有相邻峰中心线间的距离,并使用换算因子计算每个峰间距的标准偏差,即可获得以  $\text{mm}$  为单位的微分线性指标。对二维峰值阵列进行最小二乘法拟合,计算拟合值与相应峰值的差,取所有差值的最大绝对值,并使用换算因子,即可获得以  $\text{mm}$  为单位的绝对线性指标。以同样的方法可以获得不同方向和不同视野范围内的线性指标。

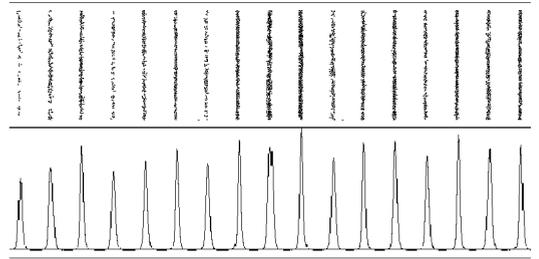


图 2 铅模的缝对应的计数曲线

## 2.3 固有非均匀性

**2.3.1 测量方法** CFOV 积分非均匀性( $IU_{ci}$ )和微分非均匀性( $DU_{ci}$ )分别为:

$$IU_{ci} = \pm \frac{C_{\max} - C_{\min}}{C_{\max} + C_{\min}} \times 100\%;$$

$$DU_{ci} = \pm \frac{|\Delta C|_{\max}}{C_{\max,0} + C_{\min,0}} \times 100\%$$

$C_{\max}$  为视野内所有非零像素中计数的最大值; $C_{\min}$  为视野内所有非零像素中计数的最小值。 $|\Delta C|_{\max}$  为像素行和列的所有像素组中任意两个像素计数差中的最大值; $C_{\max,0}$  为视野内得到  $|\Delta C|_{\max}$  的像素计数最大值; $C_{\min,0}$  为视野内得到  $|\Delta C|_{\max}$  的像素计数最小值。用同样方法可计算出 UFOV 的  $DU_{ci}$  和  $IU_{ci}$ 。采用  $30 \text{ MBq } ^{99}\text{Tc}^m$  点源, 20% 能量窗,  $64 \times 64$  矩阵,放大倍数为 1.0,采集总计数  $80 \times 10^6$  静态图像一帧。

**2.3.2 数据处理** 分别在带和不带均匀性校正电路的两种情况下测量。低计数归零:将所有小于平均计数 75% 的视野边缘像素及其邻近的边缘像素置于零(美国国家电气制造商协会标准, NEMA 标准)。使用九点滤波函数对低计数归零后的图像数据进行一次卷积平滑,分别计算每个像素与其相邻 5 个像素计数的最大值与最小值的比值,取其中比值最大的值作为微分非均匀性

指标。搜索有效视野(UFOV)或中心视野(CFOV, 75%有效视野)中像素计数的最大值与最小值,其比值即为积分非均匀性指标。

### 2.4 固有能量分辨率及多窗配位

**2.4.1 测量方法** 采用  $30 \text{ MBq } ^{99}\text{Tc}^m$  点源, 20%能量窗, 使用能量校正, 确定能峰道数, 多道分析器道宽设置为 1 024, 采集  $20 \times 10^6$  总计数。用相同条件可测量并绘出其它核素(如  $^{131}\text{I}$ ) 能谱曲线。多个光电峰的核素(如  $^{67}\text{Ga}$ ) 采用多窗分析器采集处理。

**2.4.2 数据处理** 根据采集的能谱曲线, 用插值法计算  $^{99}\text{Tc}^m$  或  $^{131}\text{I}$  对应能峰的峰值计数, 计算出峰道数。根据多道分析器已经刻度的转换因子、计数峰值道数、半高峰对应的左右两个道数的能量值, 用能量分辨率定义, (能量半高宽/峰值能量)  $\times 100\%$ , 计算出能量分辨率指标。 $^{67}\text{Ga}$  采用多窗空间配位, 其不同的光电峰, 采用“重心法”确定图像的计数分布中心, 根据不同能量窗的图像计数用像素坐标计算出峰间的位移值, 即固有多窗空间配位, 此配位值需精确到 0.1 mm。

### 2.5 固有计数率特性

**2.5.1 测量方法** 将  $74 \text{ MBq } ^{99}\text{Tc}^m$  点源置于铅屏蔽罐中, 距离探测器表面中心 77.8~850.0 cm, 由远及近设置 16 个距离点, 20%能量窗, 将能峰置于能量窗中央。测量 100 s 本底计数, 观测计数时间均采用 20 s, 分别记录测量点的计数和时间。

**2.5.2 数据处理** 由本底计数计算出本底计数率, 分别计算出减去本底计数率后的观测计数率, 然后分别计算出观测计数率所对应的真实计

数率和 20% 损失计数率, 绘制计数率特性曲线, 得出计数率特性参数和最大计数率。

## 3 结果与讨论

### 3.1 固有空间分辨率

其测试计算结果列于表 1, 图像和曲线示于图 2~4。

由表 1 可知, 本工作所有实测值均在厂家提供的标准值以内, 部分测量结果优于 ECAM 设备性能。图 2 中所有条缝分辨清晰, 对应曲线规则, 无明显差异, 每条曲线半高宽取值接近。图 3~4 为实测模型图, 图像分辨清晰。固有空间分辨率是设备的重要性能指标, 测量要严格遵循 NEMA 标准操作。如果计数率太高, 采集时间太短, 容易产生计数溢出, 其数据图像不准确、不真实, 不能反应设备的真实固有性能; 计数太低, 不仅耗时太长, 且增加本底噪声, 使图像质量变差, 太长时间的采集也不适合临床应用。模型测量必须获取 X、Y 两个方向上的数据, 相邻峰中心线间距要精确到 0.1 个像素, 分辨率要精确到 0.1 mm。固有分辨率的好坏直接影响设备的系统分辨率, 从而影响到临床病灶的分辨。固有空间分辨率除以上数据化处理外, 还可用四象限铅栅模型平行于视野的 X 轴和 Y 轴作两次静态图像采集, 用肉眼观察有效视野内分辨率情况。四象限条缝宽度分别为 2.4、3.2、4.0 和 4.8 mm。肉眼观察最佳分辨率为 3.2 mm。临床最终图像主要是通过人眼观察和分辨, 故此项检测具有临床实际意义。为了使电子学电路稳定、测量结果真实可信, 最好在设备通电 8 h 以后测量, 并保持电压稳定。

表 1 固有性能测量结果

设备型号	测试视野 企业标准	空间分辨率/mm		空间非线性/mm		非均匀性/%		ER/%	$10^{-3} C_{\max}/s^{-1}$
		FWHM	FWTM	DI	AL	DU	IU		
BHP	CFOV	3.8	6.9	0.1	0.4	$\pm 2.1$	$\pm 2.5$	9.8	142
6601	标准	$\leq 3.8$	$\leq 7.0$	$\leq 0.1$	$\leq 0.4$	$\pm 2.2$	$\pm 2.8$	$\leq 9.9$	$\geq 140$
	UFOV	3.8	7.0	0.2	0.6	$\pm 2.3$	$\pm 3.2$		
ECAM	标准	$\leq 3.9$	$\leq 7.2$	$\leq 0.2$	$\leq 0.6$	$\pm 2.5$	$\pm 3.5$		
	CFOV	4.1	7.8	0.24	0.44	$\pm 2.54$	$\pm 2.94$	9.4	240
	UFOV	4.2	8.0	0.24	0.69	$\pm 2.74$	$\pm 3.74$		

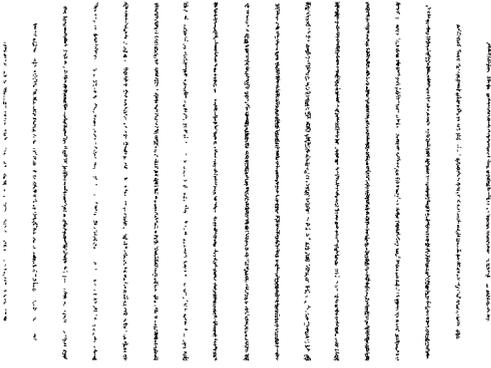


图 3 固有空间线性和空间分辨率

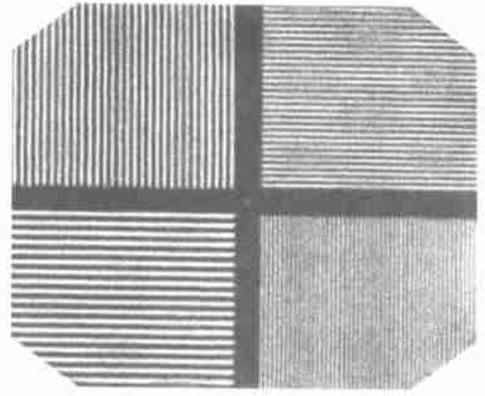


图 4 实测四象限空间分辨率图像

### 3.2 固有空间非线性

固有空间非线性结果也列于表 1。由表 1 可知, CFOV 微分非线性为 0.1 mm, 绝对非线性为 0.4 mm。UFOV 微分非线性为 0.2 mm, 绝对非线性为 0.6 mm。图 3 为实测线性图像。微分非线性是通过像素和距离的计算, 找出邻峰中心线间距和平均值, 从而得到 X、Y 二方向在限定距离内的位置畸变值或位移值。绝对非线性是通过观测值和拟合值之间的最大差值, 在探测视野内计算出 X、Y 轴方向上的位置畸变或位移。除以上的数字定量计算外, 还可采用图片肉眼观察的方法来判定铅条的位移, 从而确定空间非线性的大小。其线性精确到 0.1 mm, 否则需重新调试。线性是决定图像畸变的重要因素, 必须分获 X、Y 二方向上的差值。可分别将二方向上获取的数据拟合成一组二维的等间隔平行线组成垂直相交网格, 找出观测值和拟合网格交点之间位移的最大值。通过严格的非线性测量, 得到准确的线性结果。

### 3.3 固有非均匀性

测量结果列于表 1。非均匀性是不受任何干扰情况下, 测量整个探测器视野内均匀入射的  $\gamma$  射线计数密度的最大变化或单位面积计数密度的变化。计算非均匀性时将所有小于平均计数 75% 的边缘像素置为零, 像素纳入 UFOV 的分析中, 且此步骤仅能操作一次, 否则计算结果不真实; 而分析 CFOV 时, 其像素至少要有 50% 的区域在中心视野内。将阈值外像素置为零, 用平滑后的值除以非零加权因子之和进行归一化处理, 其各种非均匀性计算精确到 0.1%。均匀性

的好坏关系到临床影像的真、假、阴、阳性诊断, 固有非均匀性除以上的量化计算外, 还可采用屏显法和光片法用肉眼观察其图像均匀性分布情况, 一般无明显“冷、热”区及管圈痕迹表示均匀性合格。在日常工作中, 需要经常测试观察该指标的变化, 测量电子线路和电流脉冲的稳定性。分别计算 CFOV、UFOV 计数中偏离像素平均计数超过 10%、5%、2.5% 的像素数目, 并分别计算它们占全部非零像素总数的百分比。图 5 为采集的真实均匀图, 由图 5 可看出此图像均匀性好, 未产生任何伪影和膈像。

### 3.4 固有能量分辨率

采用本仪器测量  $^{99}\text{Tc}^m$  时, 能量分辨率为 9.7% (正常  $\leq 9.9\%$ )。可利用多道分析器测量不同的能峰值, 其测量脉冲幅度的道宽应不大于光电峰半高宽的 5%。超过电子学噪声水平的积分计数率应不超过  $2 \times 10^4 \text{ s}^{-1}$ , 峰道计数应大于  $10^4$ , 固有能量分辨率的测量计算精确到 0.1%。

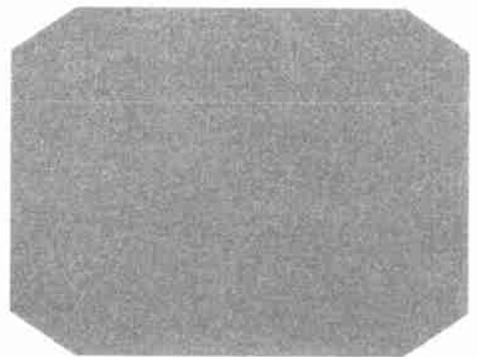


图 5 实测空间均匀性图像

在进行能量分辨率测量之前,需严格校准多道分析器,其刻度的准确性以及在测量能量范围内的能量线性都将影响能量分辨率测量的精度。<sup>67</sup>Ga 多窗空间配位测量后,其多峰图像计数分布中心之间 20 个位移中的最大值为 1.4 mm,标准值应 ≤ 1.8 mm。高能核素主要用于设备的系统性能测量,固有性能测量以低能<sup>99</sup>Tc<sup>m</sup>为基准测试源,高能测量只需改变一下峰值道数,确定高峰期即可。国外同类产品也无更多的高能固有性能测量数据参照。

### 3.5 固有计数率特性

从曲线图上得到固有最大计数率为 142 × 10<sup>3</sup>/s。测量固有最大计数率及计数率特性更严格的方法是利用<sup>99</sup>Tc<sup>m</sup>自然衰变规律改变入射计

数率来进行的。但是由于进行连续测量其至少需要 48 h 以上,实际操作困难,因此,选择了“距离平方反比法”测量,计算时要注意计数时间不同。另外还有铜片衰减法,这些测量方法均为国际通用方法。因为<sup>99</sup>Tc<sup>m</sup>衰变较快,故在测量中应尽量缩短时间,常规在 30 min 内完成。最大计数率和计数率特性不够即会产生计数泄漏,造成图像假像,尤其是动态曲线失真、峰值压低、曲线平坦等现象。故在定期检测中,其指标不能相差 ± 20%,否则需要对设备进行检修和调试。计数率特性示于表 2 和图 6。由表 2 和图 6 可直接看到理想计数,20% 损失计数和实测计数的关系,从而掌握设备计数性能、放射性药物剂量和放射性生理分布三者的关系。

表 2 固有计数率特性测量

$d/cm$	$850 \times 850 / (d_j \times d_j)$	$10^{-3} N_j$	$10^{-3} C_j / s^{-1}$	$10^{-3} R_j / s^{-1}$	$C_j \approx 0.8 R_j$
850.0	1.000	112.1	4.99	4.99	3.992
749.5	1.286	144.0	6.59	6.42	5.136
684.6	1.542	169.5	7.86	7.69	6.152
616.5	1.901	206.7	9.72	9.49	7.592
554.6	2.349	253.1	12.04	11.72	9.376
496.2	2.934	315.0	15.14	14.64	11.712
438.8	3.752	400.8	19.43	18.72	14.976
385.5	4.862	511.7	24.97	24.26	19.408
322.1	6.964	707.6	34.77	34.75	27.800
258.5	10.812	1 061.3	52.45	53.95	43.160
196.5	18.712	1 710.9	84.93	93.37	74.696
155.6	29.841	2 375.5	118.16	148.91	119.128
137.6	38.159	2 739.3	136.35	190.42	152.336
121.9	48.622	3 025.6	150.67	242.62	194.096
99.6	72.831	2 672.1	132.99	363.43	290.744
77.8	119.365	2 304.4	114.61	595.63	476.504

注:  $d$  = 源距探头距离,  $j$  = 测试点序号,  $d_j$  = 不同测点距离,  $N_j$  = 20 s 观测计数,  $C_j$  = 观测计数率,  $R_j$  = 真计数率

## 2 小结

本研究采用通用规则和新方法相结合,利用数值量化和肉眼观察对设备性能进行判定,并与国外成熟产品 ECAM 设备进行比较。诸多性能指标测定结果证明,国产 6601 型 SPECT 的晶体、光电倍增管、电子线路等选材优良,操作和校正程序设计合理,其固有性能已经达到或接近国

外同类产品标准。测量过程中,设备性能稳定,运动系统安全,测量模型制作标准,测量方法规范,质控程序合理,物理数学计算科学,固有性能测量数据可靠,结果结论明确。以上结果为今后探讨规范同类国产设备的质量控制,性能测量提供

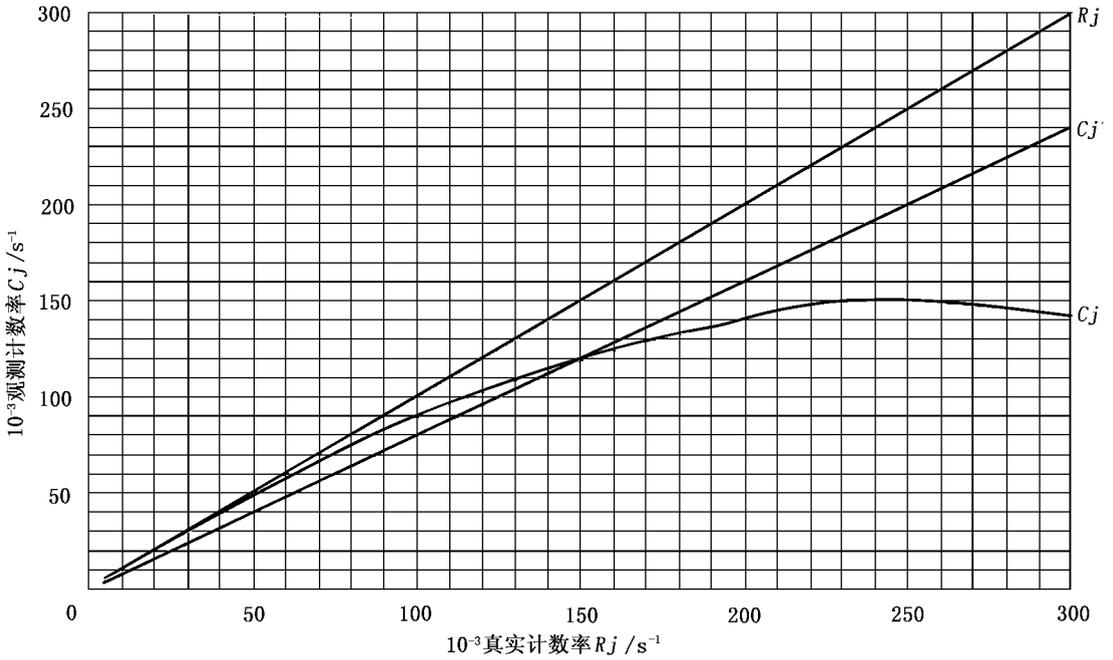


图 6 计数率特性曲线  
( $C_j' = 0.8R_j$ )

#### 参考文献:

[1] NEMA Standards Publication. Performance Measurements of Scintillation Cameras[M]. Washington: National Electrical Manufacturers Association, 1994.

[2] 郑筱萸. 药品临床试验管理规范(GCP)[M]. 北京:中国医药科技出版社, 2000.8.  
[3] 潘屏南, 刘自来. 现代大型医用设备[M]. 北京:中国医药科技出版社, 2002.5.

## The Intrinsic Function Measurement of First Domestic BHP6601 SPECT

LIU Zi-lai, TIAN Jia-he, ZHANG Jin-ming, CHEN Ying-mao, SHAO Ming-zhe  
(Department of Nuclear Medicine, The PLA General Hospital, Beijing 100853, China)

**Abstract:** The quality of domestic SPECT are appraised and the intrinsic function index of the new equipment are inquired. The appraisal are carried out following NEMA (National Electrical Manufacturers Association) standard set in 1994 and other technology standard of SPECT. The models and radiation source ( $^{99}\text{Tc}^m$ ,  $^{131}\text{I}$ ) are prepared according to NEMA standard. Intrinsic spatial resolution is 3.8 mm, intrinsic non-uniformity  $\pm(2.1\% \sim 3.2\%)$ , intrinsic spatial non-linearity 0.1~0.6 mm. The results of intrinsic function measured are better than the enterprise product standard, calculate methods are right, images resolution etc are satisfied, index measured achieve.

**Key words:** SPECT; intrinsic function; NEMA standard