

正电子发射计算机断层仪性能测试

广州军区广州总医院(广州,510010) 李小华节译 陈盛祖* 审校

编者按:去年以来,国内已有多台 PET在安装和投入临床应用,许多新引进的 SPECT也带有 PET符合成像功能。与 SPECT一样,为了保证 PET成像的质量,必须对其进行严格的验收测试和日常质量控制。为此,本刊特刊出美国国家电气制造商学会(NEMA)公布的 PET性能测试标准的中译文。文章节译自:

NEMA Standards Publication NU 2-1994

PERFORMANCE MEASUREMENTS OF POSITRON EMISSION TOMOGRAPHS

Published by National Electrical Manufacturers Association

摘要:详细介绍正电子发射断层(PET)显像的性能测试标准,包括测试模型的结构,测试指标的定义,以及空间分辨率、散射、灵敏度、计数特性和随即符合、均匀性、散射校正精度、计数率校正精度、衰减校正精度等性能指标的测试方法。

关键词:正电子发射断层 性能测试 NEMA标准

1 定义和符号

1.1 定义

轴向 FOV(轴向视野, axial field-of-view, FOV_{axial}):平行于 PET长轴的最大长度,在此范围内真实符合事件可以被探测

测试模型:是一个由纯聚甲基丙烯酸甲酯(PMMA)构成的正圆柱体,外部直径为 $203 \pm 3\text{mm}$,壁厚 $3 \pm 1\text{mm}$,内长 $190 \pm 1\text{mm}$ 。两端盖板用 PMMA材料,可注入水和放置内插件(见图 1)。

测试模型柱体插件:为三个正圆柱体模型,每个内长 $190\text{mm}(+10 - 5\text{mm})$,其中一个为直径 $50 \pm 3\text{mm}$ 的实心体,由比重在 $2.13 \sim 2.19$ 之间的材料(polytetrafluoroethylene)制成;另外两个为外部直径 $50 \pm 3\text{mm}$ 的可灌注的空心体,壁厚 $3 \pm 1\text{mm}$ 。在测试模型内,这三个插件放置在一起,它们位于距测试模型中心轴 $60 \pm 3\text{mm}$ 的半径处,相互间隔 $120 \pm 10^\circ$,并与测试模型中心

轴平行。

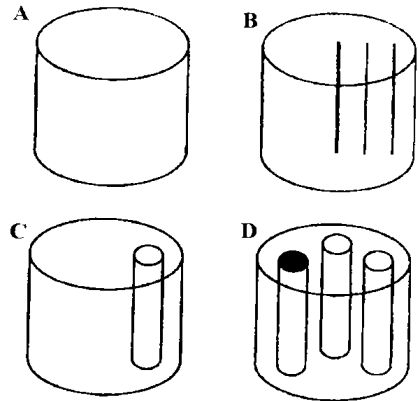


图 1 测试模型

- A. 无插件,用于测试系统灵敏度、计数率丢失、均匀性和计数率校正。
 B. 带有线源插件,用于测试散射。
 C. 带有注水圆柱体,用于测试散射校正。
 D. 带有分别注空气、水和实心圆柱体,用于测试衰减校正。

对于不用测试模型的测试,有两种简单的测试源:

* 中国医学科学院肿瘤医院(北京,100021)

可灌注点源: 是所有尺寸不大于 2mm 的液体源

可灌注线源: 由不锈钢制成, 长度至少等于轴向 FOV, 其它尺寸不超过 2mm

测试模型线源插件: 为可灌注的空心体, 内长至少 185mm, 其它尺寸不超过 2mm。它可以放置在测试模型内的 0 45 90mm (± 3mm) 的半径位置, 平行于断层长轴

横断 FOV (横断视野, transvers filed-of-view, FOV_{trans}): 垂直于 PET 成像长轴的最大圆形区域直径

1.2 标准符号

在本标准中, 每个量都由一定的符号来表示。符号通过它的下角标字符_{xxx}表示其在标准中所表示的基本量。所有表达为独立变量的量被表示为 Q_x , 下角标字母 x 是该变量的定义。

轴向响应函数: 通过沿断层轴方向以小间隔增量移动点源进行测试。

变异系数 (CV_{xxx})——用于均匀性测试

a. CV_i: 在切面 i 中所有感兴趣区 (ROI) 的变异系数

b. CV_{vol}: 系统中一个确定容积内所有 ROI 的变异系数

c. CV_{sys}: 系统中所有切面的变异系数
计数 (C_{xxx})——符合事件的数量。

a. C_{ROI}: 二维 ROI 中的事件数量

b. C_{tot}: 事件的总数量。

c. C: 被计数的真实事件数量。

d. C: 被计数的散射事件数量

e. C: 被计数的随机事件数量。

非均匀性 (NU_{xxx})——一对百分数 (+ $x\%$, - $y\%$), 相对于均值含义的变化, 用下角标字符表示为:

a. UN_i: 切面 i 中设置的二维区域的非均匀性

b. UN_{vol}: 系统的一个容积的非均匀性

c. UN_{sys}: 系统内所有切面的非均匀

性。

归一化轴向响应函数——相对点源切面灵敏度的轴向每点计数的响应函数。归一化后轴向响应函数下的面积等于 1

峰谷比率 (PV)——测试灵敏度作为轴向位置函数的变化

死时间百分比 (PDT_{xxx})——丢失计数作为输入计数的百分比

a. PDT_{i,j}: 采集 j 中切面 i 的死时间百分比。

b. PDT_{sys,j}: 采集 j 中整个系统的死时间百分比

放射性活度 (A_{xxx})——以 MBq 为单位的核素衰变率, 即每秒钟一百万次衰变。mCi 为可选单位, 即每秒钟三千七百万次衰变。

a. A₀: 初始时间 T_0 的活度

b. A_j: 第 j 次采集开始时的活度。

c. A_{ave,j}: 第 j 次采集的平均活度。

d. A_{cal}: 在时间 T_{ca} 的活度。

e. A_{t, peak}: 最大真实事件率时的活度

f. A_{t, 50%}: 50% 死时间时的活度。

g. A_r: 随机事件率等于真实事件率时的活度

采集初始时间 T_0 的活度 A_0 可通过校正活度 A_{ca} 按下式计算, 活度 A_{ca} 用活度计或井型计数器在时间 T_{ca} 测定:

$$A_0 = A_{cal} \exp\left[(T_{acq} - T_0) \ln 2 / T_{1/2}\right]$$

采集时间 T_{acq} 的平均活度可由采集起始时间 T_0 起始活度 A_0 核素半衰期 $T_{1/2}$ 和采集时间 T_{acq} 按下式计算:

$$A_{acq} = A_0 / \ln 2 (T_{1/2} / T_{acq}) (1 - \exp\left\{-T_{acq} / T_{1/2}\right\} \ln 2)$$

起始活度 A_j 由经活度计或井型计数器测定的 A_{ca} 和第 j 次经衰减校正的起始时间 T_j 按下式计算:

$$A_j = A_{cal} \exp\left[(T_{cal} - T_j) \ln 2 / T_{1/2}\right]$$

放射性浓度 (a_{xxx})——以 MBq/ml 为单

位的单位容积核素衰变率,即一百万次衰变每秒毫升。 mCi/ml 为可选单位,即三千七百万次衰变每秒毫升。其中:

- a. a_0 : 初始时间 T_0 的浓度。
- b. a_{ave} : 平均浓度
- c. $a_{t, peak}$: 最大真实事件率时的浓度
- d. $a_{t, 50\%}$: 50% 死时间时的浓度。
- e. $a = r$: 随机事件率等于真实事件率时的浓度。

用放射性活度 A_{xxx} 除以容积 V 得到在容积 V 内均匀分布的放射性浓度:

$$a_{xxx} = A_{xxx} / V$$

平均浓度为:

$$a_{ave} = A_{ave} / V$$

核素半衰期 ($T_{1/2}$)——核素衰减一半所经历的时间。核素 ^{18}F 的 $T_{1/2}$ 为 6 588 秒钟 (109. 8 分钟, 1. 830 小时)

率 (R_{xxx})——符合事件率,即每秒测量的符合事件,定义为符合计数除以间隔时间 T_{acq}

- a. R_{ROI} : 二维 ROI 中的率
- b. R_{tot} : 总事件率
- c. R_{Extr} : 潜在的事件率 (无丢失)
- d. R_t : 真实事件率
- e. R_s : 散射事件率
- f. R_r : 随机事件率
- h. $R_{t, peak}$: R_t 饱和时的真实事件率。
- i. $R_{t, 50\%}$: 50% 死时间时发生的真实事件率

j. $R = r$: 随机事件率等于真实事件率时的事件率

浓度率 (r_{xxx})——每单位放射性浓度的符合事件率,即每秒每放射性浓度的符合事件,定义为在时间间隔 T_{acq} 内得到的符合率除以平均浓度 a_{ave}

- a. r_{ROI} : 单位平均浓度 a_{ave} 的二维 ROI 内事件率
- b. r_{tot} : 单位平均浓度 a_{ave} 的总事件率。
- c. r_t : 单位平均浓度 a_{ave} 的真实事件

率。

- d. r_s : 单位平均浓度 a_{ave} 的散射事件率。
- e. r_r : 单位平均浓度 a_{ave} 的随机事件率。

相对点源切面灵敏度——对低放射性点源符合事件率的测试,点源活度低于可忽略计数率丢失时的活度值。相对点源切面灵敏度或轴向灵敏度为各轴向响应函数中所有计数的总和

残留散射分数 (ΔSF_{corr})——散射放射校正后重建图像的误差

- a. $\Delta SF_{corr, i}$: 切面 i 的残留散射分数。
- b. $\Delta SF_{corr, sys}$: 取所有切面平均的整个系统的残留散射分数

散射分数 (SF)——断层视野的横向 ROI 中散射符合事件与散射总数和真实符合事件的比率

灵敏度 (S)——对放射源符合事件率的测量,放射源活度低于可忽略计数率丢失时的活度值

- a. S_i : 切面 i 的灵敏度。
- b. S_{tot} : 系统总灵敏度

正弦图——横断图像的二维投影空间表达,二维空间的一维表示距断层中心的半径距离,另一维表示投影角度。

空间分辨率 ($FWHM_{xxx}$)——二维或三维空间脉冲函数断层空间响应的半高宽

- a. $FWHM_{rad}$: 横断平面的径向半高宽。
- b. $FWHM_{tan}$: 横断平面的切向半高宽。
- c. $FWHM_{ax}$: 轴向平面的切向半高宽。

标准偏差 (S_{xxx})——用于部分的均匀性测试表示:

- a. S_i : 对切面 i 中所有 ROI, 测试值的标准偏差
- b. S_{vol} : 对系统确定区域中所有 ROI, 测试值的标准偏差
- c. S_{sys} : 对系统所有切面, 测试值的标准

偏差

时间 (T_{xx})——以秒为单位的相对时间。

- a. $T_{1/2}$ 一个半衰期的时间间隔
- b. $T_{acq,j}$ 采集 j 的时间间隔
- c. T_0 : 采集的开始时间。
- d. T_{cat} 井型计数器的测量时间。

容积 (V)——以毫升为单位的物理容积。

2 总论

2.1 目的

本标准的目的是评价 PET 的性能。厂家可引用这些标准化的测试详细叙述他们产品的性能水平。由于这些测试对于工业生产是实用的,故用户可以用于比较不同厂家的断层仪。

测试中使用的器件或方法对于大多数使用者是可行的。因此,这一标准化的测试步骤也可以被用户用于断层仪安装前后的验收测试。部分测试可用于质量控制。

2.2 前言

标准化委员会努力制定该测试方法,使之能够适用于目前所有的 PET,包括:多环、连续探测器和时间飞行。对于可以预期的发展也尽可能考虑在其中。

需要评价性能的断层仪要具有适合人体的横断 FOV,以及至少 260mm 的探测直径以达到测试步骤目的。测试模型的长度为 19.0cm,以满足小于 17.0cm 轴向 FOV 所有断层切面的性能测试。对于轴向 FOV 大于 17.0cm 的断层仪,测试模型放置在轴的中心位置,仅可得到中心 17.0cm 的信息。

2.3 一致性

所有测试必须在不改变仪器任何参数的情况下进行,这些参数是有严格的相互依存限制的,除非在一特定的测试中有专门指定。它们包括(但不限于):能窗、符合定时窗、脉冲总和、增加空间采样的移动(如摆动

或轴向传递)、重建滤波器、象素尺寸、切面厚度、轴向接收角度和轴向平均或平滑。

重建滤波器、矩阵和象素尺寸由厂家推荐,并在所有 NEMA 测试中保持固定,除非在一特定的测试中有专门指定。

在进行二维断层图像重建前,大多数系统将原始测量组织为对应于横断切面的平行投影矩阵。这样会导致在半径距离增加时,依赖于轴向接收角度的定位错误,尤其是在轴向。一些系统通过调整隔离屏蔽改变轴向接收角度,而另一些通过软件改变角度。对于采集和重建三维测量的系统,假定它的容积成像可以被分切为平行平面,用于数据分析。

接收角度由厂家推荐,并在所有 NEMA 测试中保持固定。

空气中点源的散射线明显小于人体,然而会有来自铅屏蔽的散射,它们不会被符合条件所排除。此外,对正电子事件的定位能力依赖于事件的能量,尤其是对于使用晶体光电倍增管编码的系统。因此,必须确定用于测试的能量窗,它应由厂家推荐设置,并在所有 NEMA 断层性能测试中保持固定。

对于使用测试模型的所有测试,假定只有测试模型在 FOV 中。任何 FOV 中其它的衰减物质,例如固定材料,也许会影响测试结果。所以,当使用模型进行测试时,测试模型应该悬挂在 FOV 中心。

2.4 等价性

所有测试要求用 ^{18}F 由于正电子射程、活度校准等原因,使用其它核素,如 ^{67}Ga ,有些测试会导致显著不同的结果。

以上测试结果均要求活度计或井型探测器已使用国家标准和技术学会的参考源或者活度与上述参考源相近的源进行了校准。

3 空间分辨率

3.1 概论

系统空间分辨率表示系统分辨两个经图像重建的点源的能力。系统空间分辨率通过

在空气中采集点源或线源,然后用陡峭的滤波器重建图像的方法进行测试。尽管这种方法与物体成像时存在组织散射和有限的光量子数并不相符(此时要求平滑重建滤波),但它能够提供各种PET的最佳状况的比较,指出最高能够达到的性能。

3.2 目的

测定一个放射源重建图像的点扩展函数(PSF)的宽度,或一个置于垂直于测试方向的伸延放射源重建图像的线扩展函数(LSF)的宽度。可以使用点源和线源。扩展函数的宽度由其FWHM表示。

有两种方法测试物体在轴向被分辨的程度:一是轴向分辨率,在一个固定点进行测试,仅适用于具有足够良好轴向采样(至少小于轴向剖面FWHM的3倍)的PET以产生有效的结果;二是轴向切面宽度(通常称为“切面厚度”),通过一个点源沿扫描轴向小间隔递增移动进行测试,适用于各种PET。

3.3 方法

对于所有系统,空间分辨率应在横断切面的径向和切向两个方向进行测试。另外,对于轴向采样大于轴向响应函数FWHM 3倍的系统,应该测试轴向分辨率。

横断视野(横断FOV)和图像矩阵尺寸决定了横断切面的像素尺寸。为了精确地测试扩展函数的宽度,它的FWHM应该至少跨越10个像素。然而,一个典型的脑成像检查要求260mm的FOV, 128×128 的矩阵和6mm的空间分辨,这样FWHM就只跨越3个像素。因此,在重建中,应该使像素尺寸接近FWHM的1/10,并作为横断空间分辨率测试的一个条件加以注明。

对于容积成像系统,横向和轴向体积元尺寸应接近FWHM的1/10,并作为空间分辨率测试的一个条件。

对于所有系统,通过小间隔递增移动一个放射源获得响应函数对轴向切面宽度进行测试,递增尺寸应接近FWHM的1/10。这表

明一个由计算机控制的扫描床将用于放射源的准确定位。

3.3.1 核素

测试使用的核素是 ^{18}F ,核素的活度应使其产生的死时间丢失率或随机符合率不超过总事件率的5%。

3.3.2 放射源分布

点源和线源符合在1.1节定义的要求。

3.3.2.1 横向分辨率

悬挂在空气中(减少散射)的线源用于测试横向空间分辨率。线源平行于断层长轴,在垂直于断层长轴的卡笛尔坐标上沿径向依次间隔50mm放置(见图2)。对于横断FOV小于310mm的断层仪,线源的半径位置为: $r=0, 50, 100\text{mm}$;横断FOV达到410mm的断层仪,线源的半径位置为: $r=0, 50, 100, 150\text{mm}$;大横断FOV的断层仪,线源置于9个半径位置: $r=0, 50, 100, 150, 200\text{mm}$ 。每个位置得到两个FWHM,分别为径向和切向。

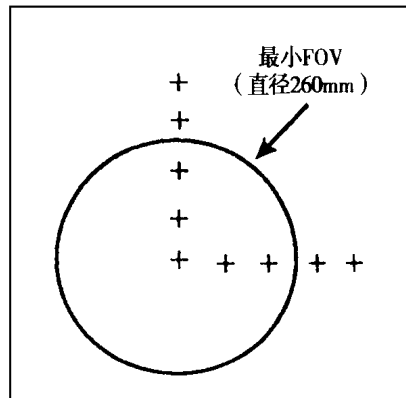


图2 测试横断平面横向分辨率的线源位置。实线圆周表示直径为260mm的最小FOV边界。

3.3.2.2 轴向切面宽度

悬挂在空气中的点源响应用于测试所有系统。点源在整个断层长度范围沿轴向做小间隔递增移动。对于横断FOV小于310mm的断层仪,点源置于三个位置: $r=0, 50, 100\text{mm}$;横断FOV大于410mm的断层仪,点源置于四个位置: $r=0, 50, 100, 150\text{mm}$;而大横断FOV的断层仪,点源置于五个位置: r

= 0, 50, 100, 150, 200mm(见图 3)。点源沿轴向取样间隔为轴向响应函数 FWHM 的 1/10

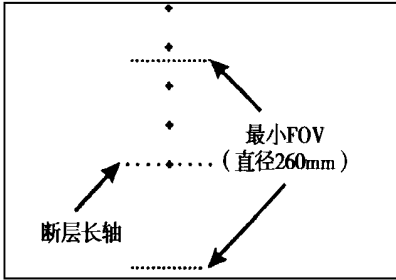


图 3 测试轴向分辨率的点源位置
虚线表示 260mm 的最小 FOV 边界

3.3.2.3 轴向分辨率

对于轴向采样间隔小于或等于 1/3 轴向响应函数 FWHM 的断层仪,轴向空间分辨率由测试悬挂在空气中的点源决定

点源沿径向以 50mm 的间隔放置,起始位置在中心,范围取决于横断 FOV,如在轴向切面宽度中的描述

横断 FOV 小于 310mm 的断层仪取三个位置: $r = 0, 50, 100\text{mm}$;横断 FOV 达到 410mm 的断层仪取四个位置: $r = 0, 50, 100, 150\text{mm}$;大横断 FOV 的断层仪取五个位置: $r = 0, 50, 100, 150, 200\text{mm}$ 每个点源以 20mm 的轴向间隔成像,开始位置在扫描中心,延伸至轴向 FOV 边缘内 10mm

3.3.3 数据采集

对上述所有源和位置进行采集,每个响应函数至少采集 50 000 计数,每个源的每个切面至少采集 50 000 计数 除了切面宽度测试外,可以使用多个放射源进行测试

3.3.4 数据处理

数据要进行死时间丢失和随机符合校正,测试使用的核素为 ^{18}F ,核素的活度应使其产生的死时间丢失率或随机符合率不超过总事件率的 5%。所有的空间分辨率数据采用 Ramp 滤波器重建,取投影空间确定的 Nyquist 频率为 Cutoff 值 轴向切面宽度不需重建

3.4 分析

在横断图像上,通过计数分布的峰值位置在两个正交方向作剖面图,得到两个一维的响应函数。在线源响应函数上分别计算两个方向的横向空间分辨率 FWHM

在最靠近点源的切面上,通过计数分布的峰值位置沿轴向作容积图像的剖面图,得到一个一维的响应函数。在点源响应函数上计算轴向空间分辨率 FWHM

记录在每一轴向位置点源的每一平面采集的计数,作出一维响应函数 通过该响应函数确定切面宽度 FWHM 该计算在每个半径位置的点源上重复,得到的是轴向响应函数

FWHM 由响应函数的峰值、最大象素值 1/2 处相邻象素间的线性插值确定(见图 4)。结果值用距离 (mm) 表示,象素尺寸乘以象素数目得到距离。

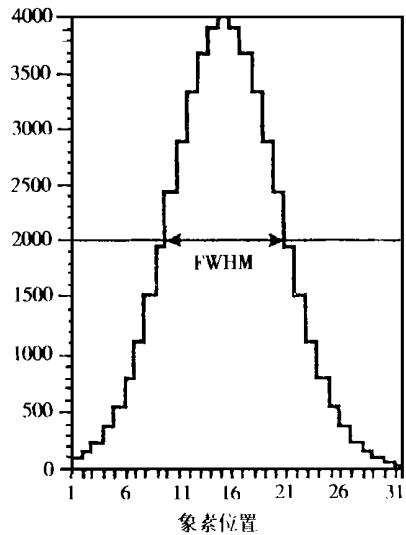


图 4 用内插法确定 FWHM 的典型响应函数

3.5 报告

在各半径位置取所有切面计算径向和切向分辨率 FWHM 的平均值,报告为系统分辨率

轴向切面宽度报告为每一半径位置所有切面的每种型式(例如,偶数、奇数)的平均值。横断象素尺寸 (mm) 和轴向递增值 (mm)

也应报告

对于可以进行轴向分辨率测试的系统,轴向分辨率报告为每一半径位置所有切面的平均值。轴向像素尺寸(mm)也应报告

应报告可灌注放射源的尺寸。

4 散射测试

4.1 概论

正电子湮灭辐射产生的 γ 射线引起的散射会导致假的位置符合事件。不同设计和配置的PET,对散射有不同的灵敏度。

4.2 目的

测定散射的相对灵敏度。对于整个断层仪系统,散射用散射分数(SF)表示;在每一切面中,用散射分数值表示。

4.3 方法

测试通过单线源成像进行,线源置于注水测试模型内三个半径位置。

假设无散射的事件落在每个线源正弦图图像中心的40mm宽度内。选择这一宽度的理由是在这个区域宽度内散射值是相对不敏感的,以及大多数PET的线源图像中非散射事件很少会落到20mm以外(见图5)

从散射尾部和40mm宽带的两交点所做的线段用于估计散射在该宽带内的量,该线段下的区域加上宽带两侧的分布等于散射估计量。

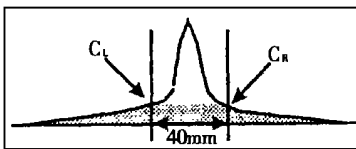


图5 在散射介质中,放射源的计数密度正弦投影

对于均匀分布放射源的散射估计是假定存在一个缓慢变化的径向依赖。在这一假设中,断层仪中心轴处线源的散射分数测试被用于达到22.5mm半径的横截面区域。距轴线45mm处线源的散射分数被用于22.5mm至67.5mm之间的环带。同样,距轴线90mm

处线源的散射分数被用于67.5mm至100mm之间的环带(见图6)。这三个散射分数值根据各自应用的区域做加权处理,产生加权均值。三个环带的加权值依次为1.8, 10.75

4.3.1 核素

测试使用的核素是 ^{18}F ,核素的活度应使其产生的死时间丢失率或随机符合率不超过总事件率的5%。

4.3.2 放射源分布

测试模型注入无放射性的水作为散射介质。测试模型内依次在0, 45, 90mm半径位置插入线源插件,线源平行于柱体模型的轴线。模型置于FOV的轴向和横向中心。

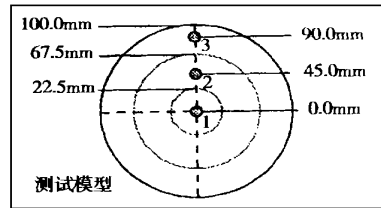


图6 用于均匀散射计算的线源散射测试环形区域

4.3.3 数据采集

采集每一半径位置线源的正弦图数据。对于较小的轴向FOV或测试模型位置中心17.0cm内,每一切面至少采集200,000计数。所有采集使用相同的采集时间。

4.3.4 数据处理

数据要进行死时间丢失和随机符合校正,但不做散射和衰减校正。

4.4 分析

测试模型两端1cm内的所有切面的正弦图要进行分析。如果断层仪的轴向FOV小于17.0cm,所有切面都要被分析。

每一正弦图 i 内所有位置超过测试模型中心12cm外的像素计数被设定为0。在正弦图内每一投影角度 α ,寻找具有最大值的像素作为线源响应的中心位置。移动各投影使含有最大计数的像素对准正弦图的中心象

素,对准后产生一个总投影,总投影中的象素值是每一与总投影象素具有相同径向偏移的各角度投影象素之和:

$$C_{r,i,k} = \sum_a C_{r-\max,a,i,k}$$

式中 r 是一个投影的象素号码, \max 表示在该投影中具有最大值的象素位置, i 表示切面, $k = 1, 2, 3$, 分别表示在半径 0-45-90mm 位置的线源

总投影中包含两个计数点 $C_{L,i,k}$ 和 $C_{R,i,k}$ (见图 5), 分别是正弦图中心 40mm 宽带边缘的左右象素密度。采用线性插值法确定总投影中心象素两侧 20mm 处的象素密度。用这两个象素密度 $C_{L,i,k}$ 和 $C_{R,i,k}$ 的平均值乘以 40mm 宽带内的象素数目(含小数数值), 再加上宽带外部象素的计数, 得到 k 位置线源第 i 切面的散射计数 $C_{S,i,k}$

总投影所有象素值相加得到事件总计数 $C_{\text{tot},i,k}$ 对于 k 位置线源, 计算在整个数据采集时间间隔 $T_{\text{acq},k}$ 期间的平均放射性活度 $A_{\text{ave},k}$ (见 1.2 节)

均匀分布放射源的每一切面散射分数 SFi 按下式计算:

$$SFi = [(C_{S,i,1}/T_{\text{acq},1}) + 8(C_{S,i,2}/T_{\text{ave},2}) + 10.75(C_{S,i,2}/T_{\text{ave},2})] / [(C_{\text{tot},i,1}/T_{\text{ave},1}) + 8(C_{\text{tot},i,2}/T_{\text{ave},2}) + 10.75(C_{\text{tot},i,2}/T_{\text{ave},2})]$$

式中下角标 1, 2, 3 分别表示位置在 0-45-90mm 半径的线源

4.5 报告

对每一切面的测试进行分析, 得到 SFi 列表。取 SFi 平均值得到均匀放射源的系统散射分数 SF

5 灵敏度测试

5.1 概论

灵敏度定义为在忽略计数率丢失的情况下, 一定放射性活度的放射源产生符合事件的探测率。一些断层仪的灵敏度随轴向位置

变化, 相对灵敏度剖面测试能定量测试这种非均匀性

5.2 目的

测试分两种: 第一种是在探头未作任何灵敏度校正之前, 测试 PET 每一个图像平面的平均灵敏度; 第二种是测定轴向灵敏度均匀性

测试在低计数率下进行, 以略去随机和死时间校正。测试不涉及重建中的噪声分布, 也不涉及重建算法对图像噪声的影响。所以, 灵敏度测试不能预测重建图像噪声

5.3 方法

含有已知放射性活度的已知容量水置于 PET 的 FOV 中。测试计数率, 计算系统灵敏度。测试依赖于井型计数器或活度计的分析精度。要保证这类计数仪器的绝对校正精度小于 10% 是困难的, 如果要求较高的绝对校正精度, 应考虑正电子发射的绝对参考标准

相对灵敏度剖面测试使用第 3 节的轴向切面宽度测试

测试要做散射分数校正, 以得到真实符合灵敏度, 单位为每毫升/每衰减计数。

5.3.1 核素

测试使用的核素是 ^{18}F , 核素的活度应使其产生的死时间丢失率或随机符合率不超过总事件率的 2%。通过测定注入模型的放射性总量(用活度计测量)和模型的容积确定模型内的初始活度, 也可用经校准的井型计数器测量取自模型的样本确定初始活度。尽量缩短活度测定与灵敏度测试之间的时间

5.3.2 放射源分布

用于灵敏度测试和相对灵敏度剖面测试的放射源分布描述如下。

5.3.2.1 灵敏度测试

测试模型灌满水, 无气泡, 加入已知活度的核素。模型置于 FOV 的轴向和横断面中心位置。

5.3.2.2 相对灵敏度剖面测试

点源悬挂在空气中, 沿断层仪的整个轴

向长度做小间隔递增移动,测试点源的响应。点源位于断层仪横断面中心,轴向递增移动间隔为轴向响应函数的 $1/10$ FWHM。测试在所有系统中进行。

5.3.3 数据采集

5.3.3.1 灵敏度测试

对于较小的轴向 FOV 或测试模型位于中心 17.0cm 内的切面,每一切面至少采集 $200\,000$ 计数。数据收集为正弦图,不需重建。

5.3.3.2 相对灵敏度剖面测试

每个剖面至少采集 $50\,000$ 计数,使用第3节介绍的轴向切面宽度测试方法。

5.3.4 数据处理

对正弦图做随机校正和死时间校正,但不做探头归一化、衰减校正或散射校正。每个符合事件被记录为一个仅一次通过断层 FOV 的事件计数。求和每一轴向位置采集的计数,得到一维响应函数,从而确定轴向响应函数。

5.4 分析

5.4.1 灵敏度测试

对模型的放射性活度进行衰减校正,确定数据采集时间段内的平均活度 a_{ave} (见第1.2节)。在每一切面 120mm 半径内,通过求和正弦图内所有像素值,得到总计数 $C_{i,tot,120\text{mm}}$ 。

用下式得到无散射事件的切面灵敏度 S_i :

$$S_i = (C_{i,tot,120\text{mm}} / T_{acq}) [(1 - SF_i) / a_{ave}]$$

轴向 FOV 内断层所有切面的 S_i 之总和为总体系统灵敏度 S_{tot} 。

5.4.2 相对灵敏度剖面测试

通过求和每个响应函数的计数,计算相对点源切面灵敏度。应对每一切面的轴向响应函数作切面灵敏度变化的归一化处理,即将每步采集的计数除以相对点源灵敏度。归一化后的轴向响应函数绘制为以 mm 为单位的距离函数,并显示为曲线图。

无需进行用以校正断层采样不足的切面厚度的内插或反卷积处理。

分析归一化的轴向响应函数,以确定当点源靠近每一切面中心时剖面的最大值(峰)。每一切面记录一个最大值。一对交叉切面剖面的像素值记录为最小值(谷)。

对于每个最小(交叉)值 i ,峰与谷的比率按下式计算:

$$PVi = (\text{Maximum}_i + \text{Maximum}_{i+1}) / 2\text{Minimum}_i$$

计算平均值 PV_{ave} 。

5.5 报告

5.5.1 灵敏度

对每一切面,在整个轴向 FOV 列表 S_i , 并报告 S_{tot} 。

5.5.2 相对灵敏度剖面

对所有切面绘制归一化轴向响应函数,报告相对点源切面灵敏度,以及每一谷 i 的峰谷比率 PVi 和平均峰谷比率 PV_{ave} 。

6 计数丢失和随机符合测试

6.1 概论

计数丢失和随机符合率测试表征一台 PET 对高活度放射源的测量精度和重复性。

6.2 目的

测试不同放射性活度水平下,由于①系统死时间和②随机事件造成的计数丢失。

6.3 方法

开始测试时,一个活度相对强的源被放置在 PET 的 FOV 中。随着源活度的衰减,随机事件率的下降比真实事件率的下降迅速,并最终可以被忽略。随着源活度衰减,系统处理符合事件的效率得到改善,计数丢失最终可被忽略。在随机率和计数丢失可被忽略条件下对真实符合计数率的测试,可用于估计在高活度水平下的计数丢失,对系统响应进行校正。该方法的精度受到校正测试中计数率丢失和随机率的限制。

6.3.1 核素

用于这项测试的放射性核素为 ¹⁸F 放射性的活度要足够大,能够引起真实计数率达到 50% 的死时间丢失,并使下述两项率值的其中一项可被测试:

- a. $R_{r, peak}$ 峰值真实计数率
- b. $R_{r, r}$ 随机计数率等于真实计数率时的计数率

确定注入模型的放射性活度(用校准的活度计测量)和模型的内部容积,也可从模型中抽出的样品(用校准的井型探测器测量)确定模型的放射性初始浓度

6.3.2 放射源分布

测试模型内灌满水,排除气泡,加入已测定的核素。模型置于横向和轴向 FOV 中央。

6.3.3 数据采集

数据采集间隔要小于核素半衰期的一半,并直到真实事件的计数丢失率少于总计数的 1% 和随机率少于真实计数率的 1%。各次的采集持续时间 $T_{acq, j}$ 少于半衰期的 1/10

在足够高的计数率下至少测试三次,并有足够长的采集持续时间,这对于提供合理的统计数据,避免分析误差是重要的。因此,期望厂家为他们的断层仪推荐一个规程,包括开始放射性浓度、采集次数和采集持续时间。

6.3.4 数据处理

对于轴向 FOV 小于或等于 17.0cm 的断层仪,每一切面 i 的每次采集 j 产生正弦图。对于轴向 FOV 大于 17.0cm 的断层仪,正弦图在中心 17.0cm 内产生。测试中不进行探头灵敏度、探头移动(例如摆动)、随机、散射、死时间或衰减的校正。

6.4 分析

计算每一采集 j 的平均活度 $A_{ave, j}$ 和平均放射性浓度 $a_{ave, j}$ (见第 1.2 节)。

6.4.1 死时间测试

在全部视野中,求和每个正弦图的计数。根据断层仪的设计,这一步骤产生 $C_{t+ s, r, i, j}$ 或 $C_{t+ s, i, j}$, 即在第 j 次采集的第 i 个切面的计

数。从 $C_{t+ s, r, i, j}$ 中减去随机计数 $C_{r, i, j}$ 得到 $C_{t+ s, i, j}$

根据厂家的推荐, $C_{r, i, j}$ 可以通过标准的处理技术获得,例如测试单符合和延迟符合。

用下式计算真实及散射计数率 $R_{t+ s, i, j}$:

$$R_{t+ s, i, j} = C_{t+ s, i, j} / T_{acq, j}$$

对每一切面 i , 计算 $R_{Extr, i, j}$, 如果已经没有死时间丢失, $R_{Extr, i, j}$ 应在采集 j 被测试。为了减少统计涨落影响, $R_{Extr, i, j}$ 按下式计算:

$$R_{Extr, i, j} = (A_{ave, j} / 3) \sum_{k=1}^3 (R_{t+ s, i, k} / A_{ave, k})$$

$k=1$ 表示最低活度的采集。

对于每一采集 j 的每一切面 i , 死时间百分比 $PDT_{i, j}$ 按下式计算:

$$PDT_{i, j} = 100 - 100(R_{t+ s, i, j} / R_{Extr, i, j})\%$$

在每一切面 i , 线性插值用于确定死时间百分比 $PDT_{i, j} = 50\%$ 时的放射性浓度

每一切面值的相加得到系统值,按下式计算系统的真实及散射计数率 $R_{t+ s, sys, j}$:

$$R_{t+ s, sys, j} = \sum_{k=1}^I R_{t+ s, i, j}$$

I 是轴向 FOV 内的切面数目, FOV 等于或小于 17.0cm

计算每一采集 j 无死时间丢失的 $R_{Extr, sys, j}$:

$$R_{Extr, sys, j} = \sum_{k=1}^I R_{Extr, i, j}$$

I 是轴向 FOV 内的切面数目, FOV 等于或小于 17.0cm

计算每一采集 j 的系统死时间百分比 $PDT_{sys, j}$:

$$PDT_{sys, j} = 100 - 100(R_{t+ s, sys, j} / R_{Extr, sys, j})\%$$

线性插值用于确定死时间百分比 $PDT_{sys, j} = 50\%$ 时的放射性浓度。

6.4.2 真实事件率测试

在每一切面划一个宽度 240mm 跨越所有角度的矩形 ROI, 中心对准正弦图的径向轴, 求和每一正弦图 ROI 的计数。依据断层

仪设计的不同,这一过程将产生 $C_{ROI, \# s, r, i, j}$ 或 $C_{ROI, \# s, i, j}$, 即第 j 次采集的第 i 切面的计数。从 $C_{ROI, \# s, r, i, j}$ 减去随机计数 $C_{ROI, r, i, j}$ 得到 $C_{ROI, \# s, i, j}$ 真实计数率 $R_{ROI, t, i, j}$, 按下式计算:

$$R_{ROI, t, i, j} = (C_{ROI, \# s, i, j} / T_{acq, j}) (1 - SF_i)$$

SF_i 为第 4 节所介绍的散射分数

$$R_{ROI, r, i, j} = C_{ROI, r, i, j} / T_{acq, j}$$

对于没有死时间丢失的采集 j , 计算每一切面 i 的 $R_{ROI, Extr, i, j}$ 为了减少统计误差, $R_{ROI, Extr, i, j}$ 按下式得到:

$$R_{ROI, Extr, i, j} = (A_{ave, j} / 3) \sum_{k=1}^3 R_{ROI, t, i, k} / A_{ave, k}$$

$k=1$ 为最低活度的采集

在每一切面 i , 用线性插值计算当真实计数率等于随机计数率时的计数率和浓度。

按下式计算系统真实计数率 $R_{ROI, t, sys, j}$:

$$R_{ROI, t, sys, j} = \sum_{i=1}^I R_{ROI, t, i, j}$$

I 是轴向 FOV 内的切面数目, FOV 等于或小于 17.0cm

按下式计算系统随机计数率 $R_{ROI, r, sys, j}$:

$$R_{ROI, r, sys, j} = \sum_{i=1}^I R_{ROI, r, i, j}$$

I 是轴向 FOV 内的切面数目, FOV 等于或小于 17.0cm

用线性插值计算当系统真实计数率等于随机计数率时的计数率和浓度

计算系统 $R_{ROI, Extr, sys, j}$:

$$R_{ROI, Extr, sys, j} = \sum_{i=1}^I R_{ROI, Extr, i, j}$$

I 是轴向 FOV 内的切面数目, FOV 等于或小于 17.0cm

6.5 报告

6.5.1 死时间测试

对于每一切面 i , 列出死时间百分比 PDT_i 等于 50% 的浓度

画出浓度对于死时间百分比的函数, 报告系统死时间百分比 PDT_{sys} 等于 50% 的浓度。

6.5.2 真实事件率测试

对于每一切面 i , 列出下述两组参数中较小的一组:

a. 真实率 $R_{ROI, t, i}$: 随机率 $R_{ROI, r, i}$ 时的真实率

b. 真实率 $R_{ROI, t, peak, i}$: 峰值或饱和时的真实率

对于系统, 作出下述三个作为放射源浓度 $a_{ave, j}$ 的量:

a. $R_{ROI, t, sys, j}$: 系统真实率。

b. $R_{ROI, r, sys, j}$: 系统随机率。

c. $R_{ROI, Extr, sys, j}$: 外延系统真实率

对于系统, 也要报告下述两组参数中较小的一组:

a. 真实率 $R_{ROI, t, sys}$: 随机率 $R_{ROI, r, sys}$ 时的真实率。

b. 真实率 $R_{ROI, t, sys, peak}$: 峰值或饱和时的真实率。

同时列出对应的活性浓度

7 均匀性测试

7.1 概论

系统均匀性描述在 FOV 内相同放射性活度与位置无关的能力。在 PET 视野内, 均匀分布的核素对均匀性响应发生偏差, 形成伪影, 它限制定量分析放射性物质分布的能力。这些偏差的测试指出非均匀性的程度, 小的值表示均匀性较好。

7.2 目的

提供在一些成像平面内和体积中测量的平均偏差和最大偏差

7.3 方法

对一个内装有均匀分布核素的, 伸延在断层轴向视野的和限定直径的正圆柱模型的断层分析, 是均匀性响应的有效测试方法。

测试分析前必须进行自衰减校正。至少有两种衰减校正方法: 通过一个或多个外部源的穿透测量; 通过圆柱体数学描述, 由已知介质衰减率导出衰减校正的估计。计算的衰

减方法不受外部非均匀性的影响,在测试中选用能获得更高的 PET固有均匀性精度的方法

7.3.1 核素

测试使用的核素是 ¹⁸F,核素的活度应使其在采集开始时产生的死时间丢失率或随机符合率不超过总事件率的 20%。

7.3.2 放射源分布

测试模型注满水,排出空气,加入经活度测定的放射性核素。模型放置在 FOV 轴向中心位置偏离中心轴 25mm 处

7.3.3 数据采集

模型采集时间要保证每一平面的平均不小于 20M 计数

7.3.4 数据处理

对于轴向 FOV 小于 17.0cm 的断层仪,所有切面要被重建 如果轴向 FOV 大于 17.0cm,仅重建落入中心 17.0cm 范围内的切面 应用所有校正(归一化、切面灵敏度、死时间、随机和散射),除非仪器不提供。使用计算的衰减校正方法,衰减系数应与其它测试相同,并按下述方法报告其数值。采用标准矩阵和象素尺寸,以及截止频率为 Nyquist 频率的 Ramp 滤波器进行重建, Nyquist 频率在投影空间确定

7.4 分析

相对灵敏度测试方法:在模型图像中心做直径 175mm 的圆,圆内用正交直线划分为边长大约 10mm 的方形区域,区域互不覆盖。在每个方形区域中,边长小于或等于 10mm,区域内的象素数目应为整数 仅测试完整的方形区域,忽略围绕边缘的不完整方形区域(见图 7)。

7.4.1 切面均匀性

在每一重建切面计算切面内均匀性——最大和最小百分比非均匀性 NU_i :

$$NU_i = \left[\begin{array}{l} + 100\{[\text{Max}(C_k) - \text{Ave}(C_k)] / \text{Ave}(C_k)\} \% \\ - 100\{[\text{Ave}(C_k) - \text{Min}(C_k)] / \text{Ave}(C_k)\} \% \end{array} \right]$$

式中,在每一切面 i 对于方形区域 k : $\text{Max}(C_k)$ = 最大计数, $\text{Ave}(C_k)$ = 平均计数, $\text{Min}(C_k)$ = 最小计数

(C_k) = 最大计数, $\text{Ave}(C_k)$ = 平均计数, $\text{Min}(C_k)$ = 最小计数

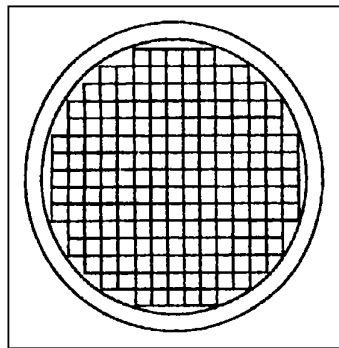


图 7 测试相对灵敏度的 ROI 分区

在每一切面 i 计算标准偏差 s_i 和变异系数 CV_i :

$$s_i = \left\{ 1 / (k - 1) \sum_{k=1}^k [C_k - \text{Ave}(C_k)]^2 \right\}^{1/2}$$
$$CV_i = [100 s_i / \text{Ave}(C_k)] \%$$

式中, k 是切面 i 中方形区域的号码

7.4.2 体积均匀性

计算 PET 整个 FOV(体积)的均匀性——体积的最大和最小百分比非均匀性 NU_{vol} :

$$NU_{vol} = \left[\begin{array}{l} + 100\{[\text{Max}(C_j) - \text{Ave}(C_j)] / \text{Ave}(C_j)\} \% \\ - 100\{[\text{Ave}(C_j) - \text{Min}(C_j)] / \text{Ave}(C_j)\} \% \end{array} \right]$$

式中,在任一重建切面对于方形区域 j : $\text{Max}(C_j)$ = 最大计数, $\text{Ave}(C_j)$ = 平均计数, $\text{Min}(C_j)$ = 最小计数。

在每一体积计算标准偏差 s_i 和变异系数 CV_i :

$$s_{vol} = \left\{ 1 / (j - 1) \sum_{j=1}^j [C_j - \text{Ave}(C_j)]^2 \right\}^{1/2}$$
$$CV_{vol} = [100 s_{vol} / \text{Ave}(C_{vol})] \%$$

式中, j 是方形区域的号码

7.4.3 系统均匀性

计算交互(所有切面)均匀性——最大和最小百分比非均匀性 NU_{sys} :

$$NU_{sys} = \left[\begin{array}{l} + 100\{[\text{Max}(C_i) - \text{Ave}(C_i)] / \text{Ave}(C_i)\} \% \\ - 100\{[\text{Min}(C_i)] / \text{Ave}(C_i)\} \% \end{array} \right]$$

式中,对任一重建切面 i : $\text{Max}(C_i)$ = 在切面 i 中所有方形区域 k 平均计数的最大值,即

$\text{Max} [\text{Ave}(C_k)]$; $\text{Ave}(C_i)$ = 在切面 i 中所有方形区域 k 平均计数的平均值, 即 $\text{Ave} [\text{Ave}(C_k)]$; $\text{Min}(C_i)$ = 在切面 i 中所有方形区域 k 平均计数的最小值, 即 $\text{Min} [\text{Ave}(C_k)]$

计算系统标准偏差 s 和变异系数 CV_s :

$$s_{\text{sys}} = \{ 1 / (i - 1) \sum_{k=1}^i [G - \text{Ave}(C_i)]^2 \}^{1/2}$$

$$CV_{\text{sys}} = [100 s_{\text{sys}} / \text{Ave}(C_i)] \%$$

式中, i 为重建切面的号码

7.5 报告

列出在测试中使用的校正, 指出哪种可能的校正被应用

报告每一切面的切面非均匀性 NU_i 和切面变异系数 CV_i , 体积非均匀性 NU_{vol} 和体积变异系数 CV_{vol} , 系统非均匀性 NU_{sys} 和系统变异系数 CV_{sys}

8 精度: 散射校正

8.1 概论

第 4 节描述的散射分数测试指出了 PET 对散射符合的灵敏度。散射校正方法试图消除散射。散射的精度由散射校正后重建图像的残留散射表示。在断面不同的轴向位置, 残留散射不同

8.2 目的

测试 PET 软件所采用的散射校正方法的精度。

8.3 方法

8.3.1 核素

测试使用的核素是 ^{18}F , 核素的活度使其产生的死时间丢失率或随机符合率不超过总事件率的 5%。

8.3.2 放射源分布

测试模型置于 FOV 轴向中心位置偏离中心轴 25mm 处。50mm 的插件置于模型中轴的 $60 \pm 3\text{mm}$ 半径的 240° 位置, 如图 8 所示。中空圆柱体插件注入无放射性水, 排除空气。已测定活度的放射性核素加入模型内, 并充分搅匀。

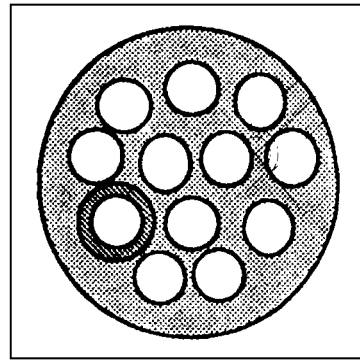


图 8 测试残留散射的 ROI 插件和测试模型几何分布

8.3.3 数据采集

在一个单独的发射采集期间, 每一切面至少采集 2M 计数

8.3.4 数据处理

对于轴向 FOV 小于 17.0cm 的断层仪, 所有切面要被重建。如果轴向 FOV 大于 17.0cm, 仅重建落入中心 17.0cm 范围内的切面

应用死时间、随机和散射校正, 除非仪器不提供。

采用标准矩阵和象素尺寸, 以及截止频率为 Nyquist 频率的 Ramp 滤波器进行重建, Nyquist 频率在投影空间确定

使用计算的衰减校正方法。衰减系数应与其它测试相同, 并按下述方法报告其数值

8.4 分析

在每一重建切面设定 12 个 ROI, ROI 直径为 $30 \pm 3\text{mm}$, 每个 ROI 包含相同的象素数。其中一个 ROI 置于无放射插件图像中心, 其它 11 个 ROI 的位置见图 8, 它们的边缘距离模型图像的周边和插件图像的周边至少 20mm。测试每一切面 i 的每一个 ROI 的计数

对于每一切面 i , 散射校正后的残留散射分数 $\Delta SF_{\text{corr},i}$ 按下式计算:

$$\Delta SF_{\text{corr},i} = 100 (C_{\text{cyl},i} / C_{\text{ave},i}) \%$$

式中 $C_{cyl,i}$ 是切面 i 圆柱体插件图像 ROI 的计数, $C_{ave,i}$ 是切面 i 其它 11 个 ROI 计数平均值 取 $\Delta SF_{corr,i}$ 的平均值得到系统的残留 ΔSF_{corr}

8.5 报告

列表标出可用于测试的校正。使用的衰减校正系数也要报告。

列表报告每一切面的 ΔSF_{corr} 和系统残留散射分数值 ΔSF_{corr}

9 精度: 计数率校正

9.1 概论

为了在各种条件下定量测量放射源的活度, PET 通常要对死时间和随机事件进行补偿, 这种校正的精确性, 尤其是在临床高计数率情况下, 一般由偏值反映出来, 在断层中用计数表示偏值。以下的测试假设放射源为一简单分布, 显然这与千变万化的临床条件是不相同的, 采用临床条件测试需要大量的时间, 同时需要操作高活度的放射源

9.2 目的

测定影像中死时间丢失和随机计数的校正精度。

9.3 方法

第 6.3.3 节中采集的用于测试随机率和死时间丢失的测试模型数据可用于测试死时间和随机符合校正后的计数率净误差。

校正后真实计数率与从低计数率延伸得到的计数率之间的比较时, 假设在低计数率时来自死时间和随机的偏差可以忽略。使用所有校正

9.3.1 核素

测试使用的核素是 ^{18}F , 放射性的活度要足以使导致真实事件率达到 50% 的死时间丢失。选择下列中的一项进行测试:

- a. $R_{r, peak}$ 真实计数率的峰值
- b. $R_{r, r}$ 随机计数率等于真实计数率时的计数率

依据注入模型的放射性活度 (用经校准

的活度计测定) 和模型的内部容积确定模型内核素的初始浓度, 也可用经校准的井型探测器测量取自模型的样品

9.3.2 放射源分布

测试模型灌满水, 排出空气, 加入放射性核素 模型置于 FOV 中心

9.3.3 数据采集

测试的采集时间间隔应小于 1/2 半衰期, 直到真实事件的计数丢失率小于总计数 1.0% 和随机率小于真实率的 1.0%。每次单独的采集时间 $T_{acq,j}$ 小于半衰期的 1/4

最后三次采集必须有足够高的计数率和足够长的采集时间, 以保证合适的统计量, 避免分析不精确 厂家应该为他们的仪器提供测试规程, 包括初始活度, 采集次数和持续时间。

9.3.4 数据处理

对于轴向 FOV 小于 17.0cm 的断层仪, 所有切面要被重建 如果轴向 FOV 大于 17.0cm, 仅重建落入中心 17.0cm 范围内的切面 应用所有校正 采用标准矩阵和象素尺寸, 以及截止频率为 Nyquist 频率的 Ramp 滤波器重建图像, Nyquist 频率在投影空间确定

9.4 分析

对每一重建图像 i 进行分析, 对每一采集 j 计算源的平均活度 $A_{ave,j}$ (见第 1.2 节)

在每一切面的模型重建图像中心做直径 180mm 的圆形 ROI 测试每一切面 i 和采集 j 的真实计数 $C_{ROI,i,j}$ 按下式计算真实计数率 $R_{ROI,i,j}$:

$$R_{ROI,i,j} = C_{ROI,i,j} / T_{acq,j}$$

对每一切面 i 计算延伸真实计数率 $R_{Ext,r,i,j}$, 它已从没有死时间丢失的采集 j 获得。为了减少统计影响, $R_{Ext,r,i,j}$ 按下式计算:

$$R_{Ext,r,i,j} = (A_{ave,j} / 3) \sum_{k=1}^3 (R_{ROI,i,k} / A_{ave,k})$$

$k=1$ 表示活度最低时的采集

按下式计算每一采集 j 的每一切面 i 的

相对计数率误差 $\Delta r_{i,j}$, 单位为百分比:

$$\Delta r_{i,j} = 100 - 100(R_{ROI,i,j} / R_{Ext,i,j})\%$$

9.5 报告

对于每一切面, 列出 $\Delta n_{i,j}$ 和 $A_{ave,j}$ 的值, 取 $\Delta n_{i,j}$ 对于 $a_{ave,i,j}$ 的切面以线性图形轴画出最高和最低值曲线。数据点可以连接成真实连续曲线。在三个最低值 $a_{t,peak}$, $a_{t,50\%}$ 和 $a_{t=r}$, 使用线性插值计算每一曲线的偏移 Δr_i , 三个最低值在第 6.4.1 节中确定。

10 精度: 衰减校正

10.1 概论

PET对 FOV 内任意分布的衰减介质的校正有明确的理论依据, 这就是对穿过 FOV 的湮灭辐射进行穿透测量。衰减校正的精度对 PET 的定量分析极为重要。

10.2 目的

测试穿透衰减校正方法的精度

10.3 方法

对穿过非均匀衰减介质的外部辐射穿透量进行处理, 用于衰减校正矩阵, 该矩阵作为重建处理的一部分被用于投影数据。真实活度值的一致性为衰减校正精度的一项指标。

10.3.1 核素

测试使用的核素是 ^{18}F , 核素的活度应使其产生的死时间丢失率或随机符合率超过总事件率的 5%。

10.3.2 放射源分布

测试模型置于 FOV 轴向中心位置偏离中心轴 25mm 处。3 个 50mm 的插件置于模型中轴 $60 \pm 3\text{mm}$ 半径, 间隔 120° 位置, 如图 9 所示。

对于穿透测试, 模型内注入无放射性的水。一个中空的圆柱体插件注入无放射性空气, 另外一个注入水。

对于发射测试, 已测定活度的放射性核素加入模型内, 并和水充分搅匀。插件的内容不变。

10.3.3 数据采集

按仪器厂家推荐的方法进行模型的穿透扫描。对于发射测试, 测试模型内加入定量的放射性, 采用标准成像采集方式, 每一切面至少有 2M 计数。

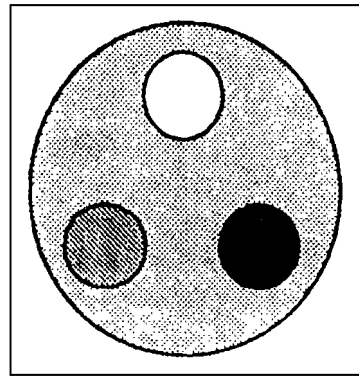


图 9 装有插件的测试模型, 上方为注空气插件, 左为注水插件, 右为实心插件

穿透和发射测试依次进行, 随后作相应处理。如果两次测试之间模型被移走, 必须精确地重新定位。如果先进行发射扫描, 必须经过 10 个半衰期后才能作穿透测试。

10.3.4 数据处理

对于轴向 FOV 等于或小于 17.0cm 的断层仪, 所有切面要被重建。如果轴向 FOV 大于 17.0cm, 仅重建落入中心 17.0cm 范围内的切面。应用所有校正。采用标准矩阵和象素尺寸, 以及截止频率为 Nyquist 频率的 Ramp 滤波器重建图像, Nyquist 频率在投影空间确定。发射数据重建中使用所有校正, 包括由穿透测试得到的衰减校正。

10.4 分析

在发射图像中的每一切面, 定义 3 个直径为 30mm 的圆形 ROI 分别对准空气、水、实心的插件图像, 在活度均匀区域定义 9 个直径为 30mm 的圆形 ROI, 如图 10 所示, 外部 6 个 30mm ROI 全部定位在模型轴心 60mm 半径位置。记录每一切面 i 每个 ROI 的总计数:

$$C_{air,i}, C_{solid,i}, C_{water,i}, C_{1,i}, C_{2,i}, \dots, C_{9,i}$$

氡浓度组的 RR (95% CI)和配对分析相似,分别为 1.00, 1.30(0.9~ 1.8), 0.91(0.6~ 1.3)和 1.44(0.9~ 2.3)。对可能影响氡浓度与 RR 的变量如家庭总收入、诊断年龄、出生顺序、出生体重、性别、居住类型、TWA 磁场照射、父母的职业和吸烟习惯等分析表明,这些因素都不影响氡水平和 ALL 的 RR

结论:以往生态学调查提出关于室内氡暴露可引起相当数量儿童白血病的有争论的假设,本研究对总的或各群组进行分析,没有发现室内氡暴露与儿童 ALL 有关,不支持此假设。

(杨觉雄摘 王燮华校)

022 直肠腺癌的保守疗法——放射治疗 [英] / Maingon P. // Int J Radiat Oncol Biol Phys. 1998, 40(5): 1077- 1085

方法: 151例(男 78例,女 73例,平均 71岁)直肠腺癌患者以治愈为目的接受单纯放疗。按临床症状分五组: T₁A 52例(34%)、T₁B 24例(15%)、T₂A 25例(17%)、T₂B 37例(25%)和 T₃ 13例(8%)。151例中, 129例(85%)接受腔内 X 射线接触治疗(ICRT), 45例(30%)近距离治疗(BT) 其中,单独 ICRT 69%(8~ 20Gy/min,在 4~ 6周中共计 90~

120Gy/3~ 4次);联合 BT 7.5%;外照射(RT,采用会阴野加后野,在 17~ 19天中共计 30Gy/10次)联合 ICRT(20~ 35Gy/1~ 2次)和/或 BT(15~ 30Gy/1~ 2次)者 34例(22.5%)。放疗后 3个月评价疗效,随访时间不等。

结果:完全反应率为 93%。有进展: T₁A 为 1/52, T₁B 为 3/24, T₂B 为 5/37, T₃ 为 1/13; ICRT 为 3/97, ICRT+ BT 为 1/12, RT+ BT+ ICRT 为 3/22, RT+ BT 为 2/20 伴转移 10例(11%)。肿瘤大小及活动度明显影响局部失败率(P= 0.009及 0.007)。年龄(P= 0.34)、肉眼检查(P= 0.54)、分化程度(P= 0.88)、绒毛样腺瘤史(P= 0.49)和肿瘤在直肠的位置(P= 0.27)与复发无关。平均随访 65个月,转移 17例,死亡 75例,5年实际生存率为 57%,特殊生存率 66%。严重的晚期反应(3级)为 3.8%。

作者指出,腔内放疗技术(ICRT伴或不伴 BT)对 T₁和 T₂直肠癌患者有较高治愈率且保存了括约肌功能。T₂病例可采用 RT联合 ICRT或外科切除手术。补救手术对局部失败病例的成功率是 46%, 30%保存括约肌,最终括约肌保存率为 84%,括约肌功能正常者为 98%。

(骆建华摘 曾兴炳校)

(上接第 25页)

其中,下角标数字表示在活度均匀区域的 9个 ROI

计算每一切面 *i* 的归一化计数:

$$C_{N,i} = \sum_{k=1}^9 (C_{k,i} / 9)$$

按下式计算每一切面 *i* 中每个插件的相对误差 $\Delta C_{insert,i}$,单位为百分比:

$$\Delta C_{insert,i} = 100(C_{insert,i} / C_{N,i})\%$$

式中 *insert*表示空气、实心和水

每一切面的非均匀性按下式计算:

$$NU_{A,i} = \left[\begin{array}{l} + 100\{ [\text{Max}(C_{k,i}) - C_{N,i}] / C_{N,i} \}\% \\ - 100\{ [C_{N,i} - \text{Min}(C_{k,i})] / C_{N,i} \}\% \end{array} \right]$$

10.5 报告

列出每一切面 *i* 的 $\Delta C_{air,i}$, $\Delta C_{solid,i}$ 和 $\Delta C_{water,i}$,报告这些误差的平均值。

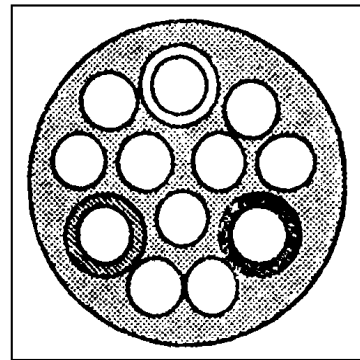


图 10 3个位于插件中心的 30mm区域和 9个用于归一化、均匀性计算的 30mm区域

列出每一切面 *i* 的 $NU_{A,i}$ 值

(收稿日期: 1998-08-02)