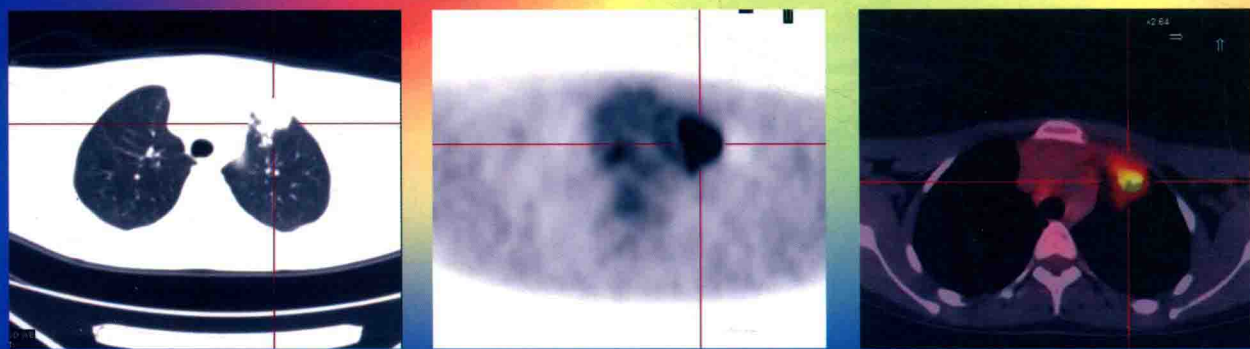


临床核医学进展：

SPECT-CT与PET-CT 技术与应用



陈绍亮 主编



科学出版社

临床核医学进展： SPECT-CT 与 PET-CT 技术与应用

陈绍亮 主编

科学出版社

北京

内 容 简 介

本书力图反映影像医学和核医学的基本理论、最新进展和特色。突出“新、深、精、少”原则,以“科学性、先进性、针对性、实用性”为目标,博采众长,介绍核医学的基本原理和最新的技术及方法,为有效地解决工作中的实际问题提供帮助,核医学工作者和影像医学工作者能各取所需,可在较短的时间内掌握和应用新的影像医学方法来诊断和治疗疾病。了解核医学能为各个临床科室解决的问题,并了解核医学今后的发展方向,有利于达到培养新形势下综合性人才的要求。

本书适合医学影像科工作者阅读;也适合临床医务工作者,特别是肿瘤科医师、血液科医师、妇科医师、内分泌科医师、呼吸科医师、普外科医师、神经科医师等阅读。其余临床各科的医师也可通过阅读本书,了解目前核医学在相应科室的临床应用效能。本书也可作为临床医学专业本科及研究生的参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

临床核医学进展: SPECT-CT 与 PET-CT 技术与应用 / 陈绍亮主编. —北京: 科学出版社, 2017. 4

ISBN 978-7-03-052501-7

I. ①临… II. ①陈… III. ①核医学 IV. ①R81

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 073604 号

责任编辑: 潘志坚

责任印制: 谭宏宇 / 封面设计: 殷 靓

科学出版社 出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码: 100717

<http://www.sciencep.com>

南京展望文化发展有限公司排版

上海锦佳印刷有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2017 年 4 月第 一 版 开本: 889×1194 1/16

2017 年 4 月第一次印刷 印张: 24

字数: 620 000

定价: 180.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)

《临床核医学进展:SPECT-CT 与 PET-CT 技术与应用》

编辑委员会

主 编 陈绍亮

副主编 马宏星 陈仰纯 程爱萍

编 委(按姓氏笔画排序)

- 马宏星 同济大学 附属同济医院
王卫东 无锡市人民医院
王雪梅 内蒙古医科大学附属医院
王 燕 上海中医药大学附属龙华医院
叶黛西 中国人民解放军第 101 医院
朱钧清 美国凯斯西储大学医学院
刘兴党 复旦大学附属华山医院
许长德 上海市第六人民医院南院
孙一文 南京大学医学院附属鼓楼医院
李文罡 中卫创业投资管理有限公司
李蓓蕾 复旦大学附属中山医院核医学科
杜倩倩 上海铠晞尔医疗器械贸易有限公司
吴金陵 武警广东总队医院
吴春英 美国凯斯西储大学医学院
何 薇 复旦大学附属华东医院
谷晓云 上海伴科生物科技有限公司
沈 隆 西门子中国有限公司
张 汐 复旦大学附属肿瘤医院
张国建 内蒙古医科大学附属医院
张慧玮 复旦大学附属华山医院

陈仰纯 福建医科大学附属泉州第一医院
陈绍亮 复旦大学附属中山医院
林丽莉 浙江大学医学院附属第一医院
赵 军 上海东方医院
赵 欣 浙江大学医学院附属第一医院
赵 葵 浙江大学医学院附属第一医院 PET 中心
赵晋华 上海交通大学附属第一人民医院
赵瑞芳 复旦大学附属儿科医院
彭屹峰 上海中医药大学附属普陀医院
程爱萍 浙江省人民医院
管一晖 复旦大学附属华山医院
魏宝仁 复旦大学现代物理研究所

前 言

近年医学影像学发展迅速,尤其是各种不同的影像方法相互渗透,知识和技术更新快速,内容含量明显增加,涉及范围日益广泛和深入,在医学领域的重要性也日益提高。主要表现在以下三个方面。

首先,影像医学仪器发展快速,尤其是核医学仪器的发展迅猛,不但有更精确的仪器产生,而且许多大型仪器交叉,形成了新的复合型仪器。例如,PET-CT、SPECT-CT、PET-MRI 等的产生,其优势在于能同时分别提供结构信息和功能信息,并通过图像融合技术使这两种显像技术完美结合,极大地提高了对疾病定位与定性的能力。

其次,如今医学影像学越来越重视对比剂,或者说显像剂的研究。依靠不同的对比剂,可显示不同的病变组织。新显像剂的研制,扩大了影像医学的应用范围,也需要不断宣传,以便让临床医师掌握新方法,应用新方法。

最后,仪器和显像剂都需要人操作。新技术的发展也提高了对影像医学从业医师的要求。在应用 PET-CT 的初期,许多核医学医师并不精通 CT 断层解剖学,尚无法对 PET-CT 中的 CT 信息予以精确的专业解读。而放射学医师恰恰相反,正面临还不精通 PET 显像的问题。要保证 PET-CT 检查的影像得到最好的解读,PET-CT 的从业医师必须同时精通 PET 和 CT 这两个领域,在诊断时要结合诊断级别的 CT 显像信息和 PET 显像信息。这个目标需要在这两个领域都受过严格培训并达到相当水准的专业人士才能完成。

为了让核医学工作者和影像医学工作者能在较短的时间内掌握和应用新的影像医学方法来诊断和治疗疾病,了解核医学能为各个临床科室解决哪些问题,并了解核医学今后的发展方向,我们共同编写了本书。

主 编

2016 年 11 月 28 日

目 录

第一部分 技术篇

第一章 γ 照相机	3
第一节 γ 照相机主要结构	3
第二节 电路分析部分	6
第三节 γ 照相机的性能指标	8
第二章 单光子发射型计算机断层仪	10
第一节 SPECT 基本结构	10
第二节 SPECT 数据采集	11
第三节 SPECT 图像重建与衰减校正	12
第四节 NEMA 标准	12
第五节 SPECT 探测技术的发展	13
附 NEMA 标准举例: INTRINSIC SPATIAL RESOLUTION	14
第三章 正电子发射型计算机断层仪	18
第一节 PET 成像的物理基础	18
第二节 PET 的探测器	19
第三节 符合测量	21
第四节 PET 成像中的飞行时间技术	22
第五节 PET 仪技术上的发展	23
第四章 CT 与 MRI 成像原理	25
第一节 CT 成像原理与仪器	25
第二节 MRI 成像原理	30
第五章 PET-CT, SPECT-CT 与 PET-MRI	33
第一节 图像融合技术	33

第二节	PET-CT	34
第三节	SPECT-CT	35
第四节	PET-MRI	36
第五节	PET-MRI 与 PET-CT、SPECT-CT 的比较	38
第六章	放射化学和放射药物学	40
第一节	锝放射性药物	40
第二节	镓和铟标记放射性药物	50
第三节	氯化铊	52
第四节	碘标记放射性药物	53
第五节	PET 正电子放射性药物	55
第六节	治疗用放射性药物	66
第七节	放射性药物质量控制	70
第七章	核医学诊疗中的辐射安全	77

第二部分 临床应用篇

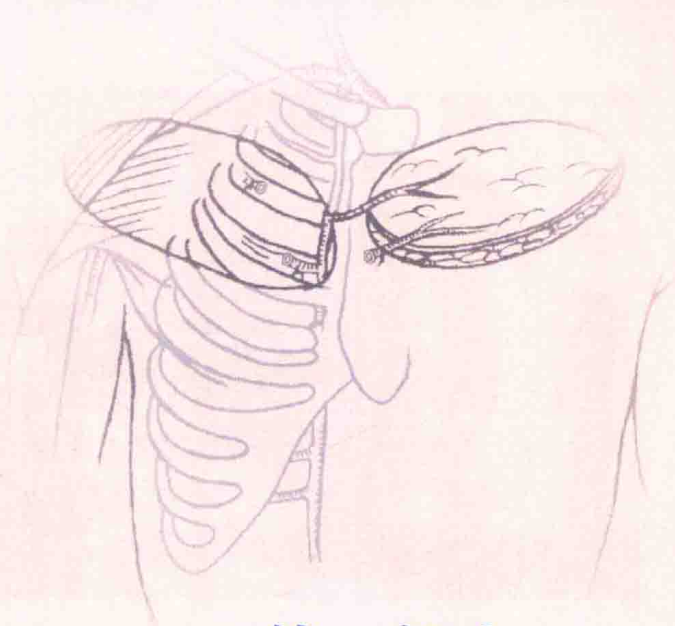
第八章	中枢神经系统显像: 平面、SPECT 和 SPECT-CT	83
第一节	脑血流灌注显像	83
第二节	SPECT-CT 脑显像的临床应用	84
第三节	脑池显像	98
第九章	PET-CT 神经系统应用	100
第一节	概述	100
第二节	脑肿瘤与 PET	100
第三节	认知障碍与 PET	104
第四节	精神疾病、心理障碍与 PET	106
第五节	运动障碍性疾病与 PET	107
第六节	癫痫与 PET	109
第七节	脑血管疾病与 PET	111
第八节	受体显像与 PET	111
第九节	发展方向	112

第十章 核心脏病学	114
第一节 心肌灌注显像	114
第二节 心肌葡萄糖代谢显像	121
第三节 放射性核素心脏功能显像	122
第四节 亲心肌梗死显像与心肌乏氧显像	125
第五节 心脏神经受体显像	126
第十一章 PET-CT 显像在心脏疾病中的应用	128
第一节 正电子心肌灌注显像	128
第二节 ^{18}F -FDG 心肌代谢显像	131
第三节 心脏神经支配显像	133
小结	135
第十二章 SPECT-CT 肿瘤显像	136
第一节 $^{99\text{m}}\text{Tc}$ -MDP 骨骼 SPECT-CT 显像	136
第二节 前哨淋巴结 SPECT-CT 显像	137
第三节 ^{111}In -奥曲肽 SPECT-CT 显像	140
第四节 MIBG SPECT-CT 显像	141
第五节 $^{99\text{m}}\text{Tc}$ -sestamibi 甲状腺旁腺腺瘤 SPECT-CT 显像	143
第十三章 ^{18}F-FDG PET-CT 肿瘤显像概说	146
第一节 ^{18}F -FDG 的体内代谢	146
第二节 ^{18}F -FDG PET-CT 肿瘤显像检查前准备及注意事项	146
第三节 ^{18}F -FDG PET-CT 肿瘤显像在各类肿瘤病变中的应用	147
第四节 ^{18}F -FDG PET-CT 肿瘤显像的不足	155
总结	155
第十四章 淋巴瘤	156
第一节 ^{18}F -FDG PET-CT 显像在淋巴瘤临床诊疗中的应用	156
第二节 不同病理学类型淋巴瘤 ^{18}F -FDG PET-CT 显像特点	162
第三节 特殊部位淋巴瘤 ^{18}F -FDG PET-CT 显像表现	165
第四节 新型显像剂在淋巴瘤中的应用	167
第十五章 头颈部肿瘤 PET-CT 应用	169
第一节 概述	169

第二节	鼻咽癌	174
第三节	鼻窦癌	179
第四节	咽癌	180
第五节	舌癌	182
第六节	喉癌	184
第十六章	乳腺癌 PET-CT 应用	187
第一节	概述	187
第二节	乳腺癌 ¹⁸ F-FDG PET-CT 图像表现	189
第三节	PET-CT 在乳腺癌中的临床应用	192
第四节	乳腺癌 PET-CT 显像进展	196
第十七章	内分泌系统	198
第一节	甲状腺显像	198
第二节	甲状旁腺显像	200
第十八章	呼吸系统	202
第一节	概述	202
第二节	肺灌注显像	202
第三节	肺通气显像	206
第四节	V/Q 显像的临床应用	208
第十九章	V/Q 显像在呼吸困难鉴别诊断中的临床应用	217
第二十章	肺部肿瘤 PET-CT 应用	224
第一节	概述	224
第二节	¹⁸ F-FDG PET-CT 肺部肿瘤检查适应证及技术操作要点	225
第三节	PET-CT 在肺癌诊疗中的应用价值	227
第四节	其他 PET 显像剂的应用	242
第五节	小结	243
第二十一章	消化系统	245
第一节	唾液腺	245
第二节	口咽	246
第三节	食管	247

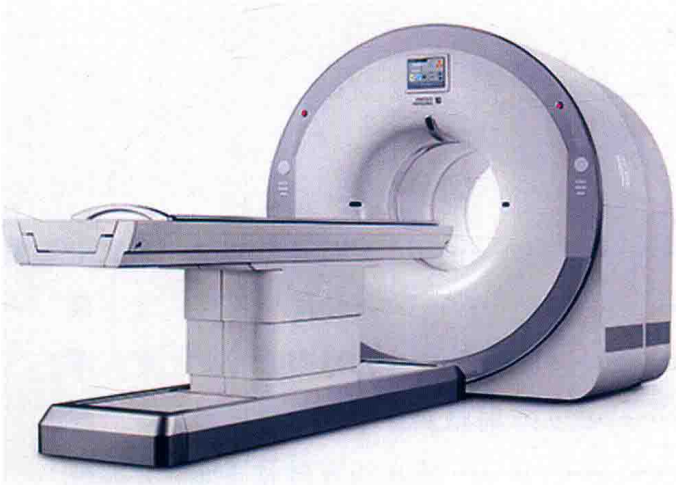
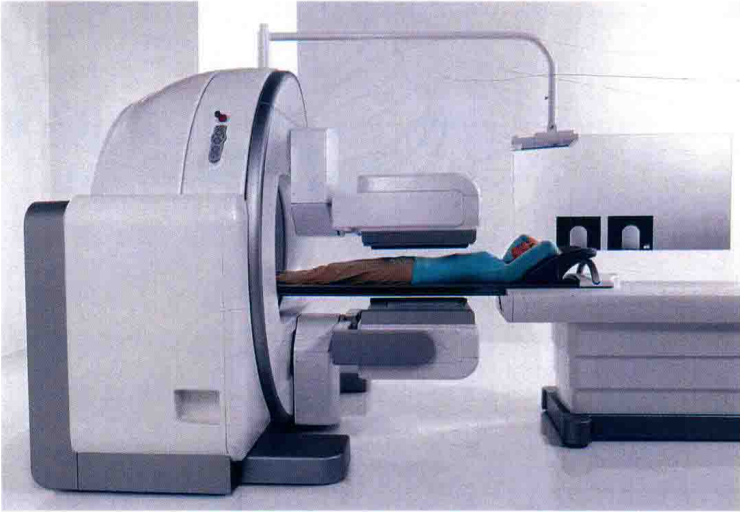
第四节	胃食管反流	248
第五节	胃排空	249
第六节	胃肠道出血	250
第六节	肝和脾	251
第七节	^{99m}Tc -标记红细胞探测肝血管瘤	252
第八节	肝胆显像	253
第九节	肠胃(胆汁)反流显像	254
第十节	呼气试验 ^{14}C -标记复合物	255
第二十二章	PET-CT 在消化道肿瘤诊疗中的应用	257
第二十三章	泌尿生殖系统	268
第一节	肾动态显像	268
第二节	介入试验	269
第三节	肾静态显像	270
第二十四章	泌尿生殖系统肿瘤 PET-CT 应用	272
第一节	常见肾肿瘤的 PET-CT 应用状况	272
第二节	前列腺癌的 PET-CT 应用状况	273
第三节	膀胱癌的 PET-CT 应用状况	273
第四节	子宫颈癌的 PET-CT 应用状况	274
第五节	子宫内膜癌的 PET-CT 应用状况	274
第六节	卵巢癌的 PET-CT 应用状况	274
第二十五章	骨骼系统	276
第一节	显像剂和显像原理	276
第二节	图像分析	277
第三节	放射性核素骨显像的适应证	279
第四节	放射性核素骨显像的临床应用	280
第五节	骨 SPECT-CT 断层显像	291
第六节	PET 骨显像	293
第七节	^{67}Ga 和 ^{111}In 白细胞显像在骨关节疾病中的应用	293
第二十六章	血液淋巴系统	294
第一节	前哨淋巴结显像	294

第二节	淋巴系统显像	295
第二十七章	儿科核医学	297
第一节	儿科核医学特点	297
第二节	骨骼系统	297
第三节	泌尿系统	305
第四节	消化系统	316
第五节	甲状腺显像	323
第六节	PET-CT 显像在儿科肿瘤的临床应用	324
第二十八章	放射性核素治疗	326
第一节	甲状腺功能亢进症的放射性核素治疗	326
第二节	甲状腺癌转移灶的放射性核素治疗	327
第三节	骨转移癌的止痛治疗	328
第四节	放射性近距离治疗	330
第五节	云克在治疗中的应用	330
 第三部分 基础篇 		
第二十九章	核物理基础	333
第一节	原子及原子核	333
第二节	放射性核素的衰变类型	336
第三节	放射性核素的衰变规律	339
第四节	放射性核素的来源	343
第五节	射线与物质的相互作用	348
第三十章	核医学仪器	351
第一节	γ 光子探测器	351
第二节	放射性分析测量仪和功能测定仪	357
附录	用于临床核医学的放射性核素和放射性药物	360
主要参考文献	364



第一部分

技术篇



第一章 γ 照相机

伽玛(γ)射线和单光子的初步概念： γ 射线是原子核能级跃迁蜕变时释放出波长极短、能量极大、穿透力极强的电磁波。 γ 射线的波长短于 0.001 nm(医用 X 线的波长在 0.008 nm 以上)。 ^{99m}Tc 、 ^{131}I 等核素在衰变过程中发射出单方向的单个 γ 光子,因而称为单光子核素。这类放射性核素一般由反应堆生产,往往是富中子核素。有别于另一些加速器生产的在衰变过程中通过湮没辐射产生一对方向相反的 γ 光子——双光子的核素。

第一节 γ 照相机主要结构

γ 照相机是核医学最基本的显像仪器,它主要由 γ 闪烁探测器、探测器支架、专用的计算机系统和显示系统组成。 γ 闪烁探测器主要由晶体、准直器、光导、光电倍增管、前置放大器等构成,它实际上是一种能量转换器,其作用是将探测到的射线能量转换成可以记录的电脉冲信号,具有准直探测和定位 γ 射线的功能。

基本组成： γ 照相机的核心部件是由准直器、闪烁体探测器和用于定位的电阻矩阵共同构成的探头,如图 1-1 所示(图中没有包括准直器)。整个探测系统封装在一个“U”形外壳内,靠近“U”形外壳开口处的是碘化钠[NaI(Tl)]晶体,后面依次为光电倍增管和电子学系统(包括电阻矩阵),在晶体与光电倍增管之间还填充光导硅油。

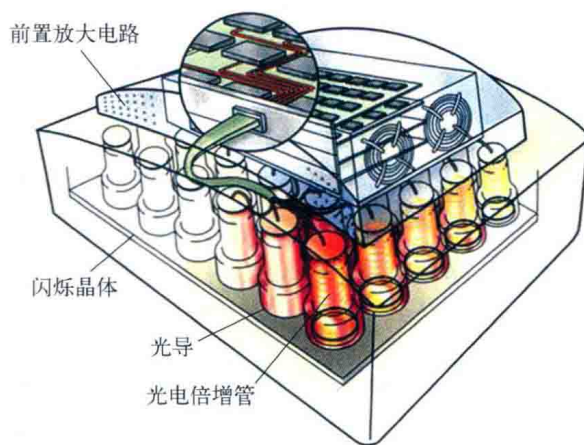


图 1-1 γ 照相机探头

一、准直器

由于核素每次衰变时,辐射能量方向(γ 射线的发射方向)是不可预知的。因此为了最终成像的需要,探测器必须只接受特定方向上的 γ 射线,而滤去其他方向上的 γ 射线。

这是通过处于闪烁晶体前端的准直器对患者体内射来的 γ 射线进行准直来实现的(图 1-2)。

准直器放置在受检体与闪烁体探测器之间,是由铅钨合金等重元素金属材料制成,选择重元素是因为其对 γ 光子的吸收作用大。准直器的小孔可以做成圆形、方形或六边形,小孔区域覆盖整个 NaI(Tl)晶体的表面。从图 1-3 可以发现,通常情况下,小孔的孔径越小,则 γ 照相机的空间分辨率越高。一方面,受加工工艺限制,想要把小孔做到非常小是很难的;另一方面,小孔直径太小会影响图像的对比度。对于一个灵敏面积直径为 50 cm 的探头,高空间分辨率的准直器小孔的数量通常在 10^4 量级。

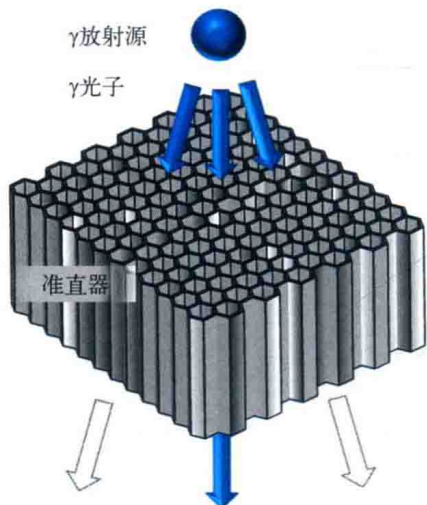


图 1-2 平行孔准直器结构示意图

实线表示 γ 光子通过准直器被闪烁体吸收,
空心线表示 γ 光子被准直器壁吸收

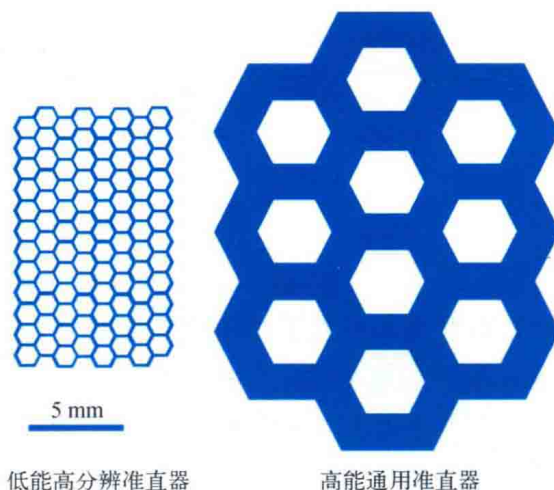


图 1-3 不同能量不同分辨率平行孔准直器比较

1. 准直器的分类 根据入射的 γ 光子能量,核医学显像仪器用的准直器有低能、中能和高能之分。其主要差别在于小孔的高度和壁厚不同。 γ 光子的穿透力随能量的增加而增强,为了阻止 γ 光子穿过孔壁进入另一个小孔打到晶体上,需要适当增加壁厚。通常限制 150 keV 以下的 γ 光子可选用低能准直器,限制 150~300 keV 的 γ 光子选用中能准直器,而 300~600 keV 的 γ 光子则需用高能准直器。

根据准直器的功能特性和几何结构的不同,准直器的种类可分为平行孔准直器、针孔准直器、汇聚型准直器及发散型准直器等。使用时可根据 γ 光子的能量、被检测组织的位置和大小进行灵活选择。根据临床需要,可选择扇形准直器(fan beam),以获得放大的器官图像(如脑扫描);针孔准直器(用于探测小器官,如甲状腺、髋关节);高灵敏准直器(牺牲图像质量,以获取更高的采集速度);超高分辨准直器(牺牲系统灵敏度,以提高图像质量)。

2. 准直器的空间分辨力 γ 照相机的空间分辨力很大程度上取决于准直器的空间分辨力,这里以平行孔准直器为例,分析其空间分辨力与几何尺寸之间的关系。如图 1-4 所示,平行孔准直器的孔径为 d ,准直器壁厚为 t ,孔的高度为 L ,准直器到受检体光源距离为 D ,则由其几何尺寸决定的空间分辨 R 为

$$R = d(D+L)/L \quad (1-1)$$

从式(1-1)中可知, d 越小,则其空间分辨力越好; L 越大,空间分辨力也会有所提高。实际使用中,受检体到准直器的距离 D 一般远大于 L ,因此 L 对空间分辨力的影响不明显。

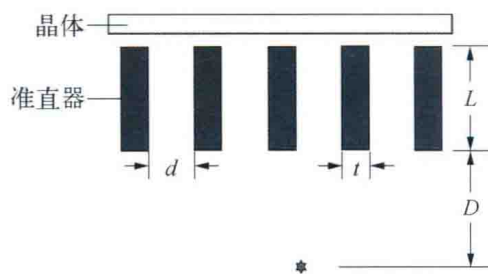


图 1-4 平行孔准直器的几何结构

随着 d 的减小和 L 的增大,准直器的空间分辨并不会无限提高。原因是随着孔变细变长, γ 照相机获得的图像对比度迅速下降,进而影响图像质量。为此,人们引入了调制传递函数(modulation transfer function, MTF)来表示空间分辨力,这是一种比较客观的评价核素显像空间分辨力的方法。一般通过光学系统输出图像的对比度比实

物的对比度要差,这个对比度的变化量与空间频率特性有密切的关系,把输出像与实物的对比度之比称为调制传递函数:

$$MTF = \frac{M_I}{M_S} \quad (1-2)$$

式中, M_S 为实物对比度, M_I 为图像对比度,一个成像系统的 MTF 值是可以测量的。

平行孔准直器中均匀排列的铅条在空间上周期分布,一个铅条和一个空隙的宽度为空间周期,其倒数,即单位长度上空间周期的个数称为空间频率。当空间频率较低时,投影函数为周期变化的矩形波,图像边缘清晰,接近理想情况, $MTF=1$ 。随着空间频率的增大,即铅条变密时,投影函数的曲线不再是矩形波,而逐渐过渡为类似正弦波形,此时铅条的边缘在像中变得模糊,铅条的分辨越来越困难, $MTF<1$ 。当图像完全不能分辨铅条时, $MTF=0$ 。由此可见,准直器的孔变小并不一定提高图像质量。

3. 准直器的灵敏度 射向准直器的 γ 光子只有小部分能够穿过准直器进入闪烁体,其余部分被准直器吸收掉。 γ 光子通过准直器的效率即为准直器的灵敏度(sensitivity)。准直器的应用曾经是核医学成像的一大进步,但目前准直器却成为核医学影像发展的主要障碍,原因是准直器导致 γ 照相机的灵敏度大幅降低,实际上受检体中只有不到 0.01% 的 γ 光子被闪烁体探测器记录。也就是说只有很少一部分射线被利用。必须指出的是:尽管准直器的应用导致大量 γ 光子被过滤掉,核医学成像设备的灵敏度仍高于其他成像设备,如计算机断层扫描(CT)和磁共振成像(MRI)。在后文的正电子发射型计算机断层成像(PET)中,采用电子准直器代替铅准直器,灵敏度将显著提高。

二、闪烁晶体

如何探测穿透力极强的 γ 射线?

人们发现了一些物质在吸收高能粒子或射线后,可将能量转换为低能量的可见光光子。其表现为物质在遭受高能 γ 射线轰击时,会向外发出闪光。为了更好地探测这些闪光,通常在实际应用中将这些物质加工成晶体,因此称为闪烁晶体。

目前主流的探测晶体是 NaI 晶体。NaI 晶体的特性如表 1-1 所示。

表 1-1 闪烁晶体 NaI 的特性

闪烁晶体	密度 (g/cm^3)	输出 光波 长(nm)	光输出量 (光子数/ keV)	γ 射线有效衰减 深度(140 keV) (mm)	吸收 93% 140 keV γ 光子时的晶体 深度(mm)	光输出量与 温度的关系	余辉 时间 (ms)	熔点 ($^{\circ}\text{C}$)	潮解
NaI: Tl	3.67	415	41	4.1	10.0	$-0.3\% \text{C}^{-1}$	250	650.85	容易潮解

通过测量一个 γ 光子轰击在 NaI 晶体上造成的“闪光”亮度,我们可以知道这次 γ 射线的大概能量。

γ 照相机的灵敏面积(field of view, FOV)比较大(直径或边长为 45~50 cm),为了能至少探测人体一个器官内的药物分布状况,晶体尺寸要略大于 FOV,宽度在 50 cm 左右,长度在 38 cm 左右。为了在 γ 射线探测效率与最终图像质量之间达到优化,目前绝大部分厂家提供的 NaI 晶体的厚度,在 9.5 mm(3/8 in, 1 in \approx 25.4 mm)(约 2 倍的 140 keV γ 射线衰减深度)。要求所用 NaI(Tl)晶体非常均匀、没有裂痕、密封好、透明度高。