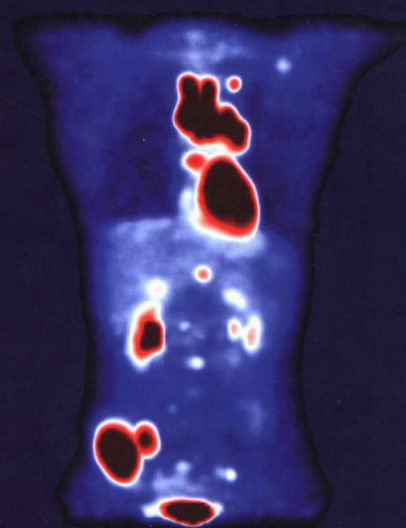
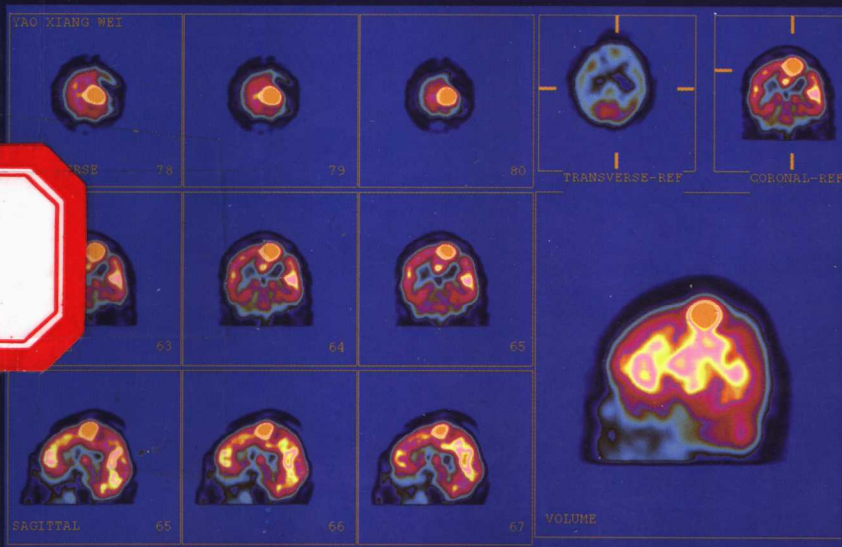
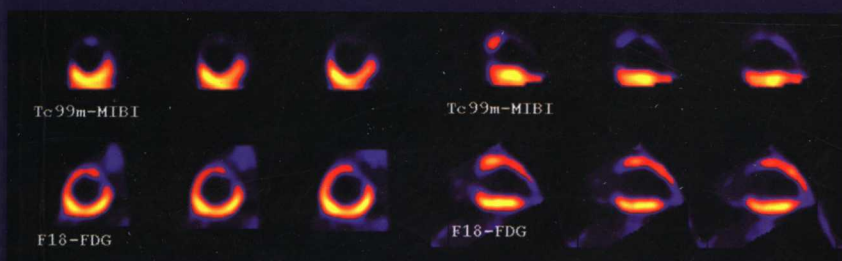


符合线路探测 正电子成像与临床

主编 王荣福



北京大学医学出版社

符合线路探测正电子成像与临床

主编 王荣福

编 委 (以姓氏笔画为序)

王荣福 北京大学第一医院
付占立 北京大学第一医院
冯彦林 广东佛山市第一人民医院
包尚联 北京大学重离子物理研究所
吴文凯 中国医学科学院肿瘤医院
张秀梅 北京积水潭医院
张春丽 北京大学第一医院
李立伟 北京空军总医院
杨熊飞 甘肃省兰州市人民医院
林景辉 北京大学第一医院
范 岩 北京大学第一医院
秦乃姗 北京大学第一医院
郭宗泽 中国医科大学第一附属医院
耿建华 中国医学科学院肿瘤医院

北京大学医学出版社

FUHE XIANLU TANCE ZHENGDIANZI CHENGXIANG YU LINCHUANG

图书在版编目 (CIP) 数据

符合线路探测正电子成像与临床/王荣福主编. —北京: 北京大学医学出版社, 2004. 9
ISBN 7-81071-596-8

I. 符… II. 王… III. 放射医学—研究
IV. R81

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2004) 第 047611 号

符合线路探测正电子成像与临床

主 编: 王荣福

出版发行: 北京大学医学出版社 (电话: 010-82802230)

地 址: (100083) 北京市海淀区学院路 38 号 北京大学医学部院内

网 址: <http://www.pumpress.com.cn>

E - mail: booksale@bjmu.edu.cn

印 刷: 莱芜市圣龙印务书刊有限责任公司

经 销: 新华书店

责任编辑: 赵 蔚 责任校对: 金 彤 责任印制: 张京生

开 本: 787mm×1092mm 1/16 印张: 25 字数: 592 千字

版 次: 2004 年 9 月第 1 版 2004 年 9 月第 1 次印刷 印数: 1—2000 册

书 号: ISBN 7-81071-596-8/R·596

定 价: 57.00 元

版权所有, 违者必究

(凡属质量问题请与本社发行部联系退换)

本书由

北京大学医学部科学出版基金

资助出版

称之人体分子水平显像或探针技术的符合探测正电子成像是目前影像医学与核医学领域最先进的显像仪器，被美国 2000 年《时代周刊》评为最具有创意且已商业化的三大发明之一。符合探测正电子成像主要利用符合线路探测技术和正电子核素及其标记化合物进行成像，其图像能够反映出活体生理生化改变，并对这些变化具有相当高的灵敏度和特异性。正电子成像中目前在临床应用最多的是葡萄糖代谢显像，它可以从分子水平反映人体正常或疾病时的代谢状态。由于代谢变化在疾病很早的阶段就可出现，因此正电子成像能够进行疾病的早期诊断并为治疗决策提供客观依据，它是分子影像学的重要内容之一。

20 世纪 90 年代初，由于正电子成像在肿瘤诊断方面的突出优势，这一技术的应用逐步得到发展。我国于 1995 年开始引进这一技术，之后在全国各大城市相继开展。目前我国已有正电子成像设备 120 余台，其中专用型的正电子发射型计算机断层显像仪（positron emission tomography, PET）25 台；配有符合探测设备的双探头或三探头单光子计算机发射断层显像仪（single photon emission computed tomography, SPECT），即符合线路 SPECT（也称为 SPECT/PET）近 100 台。

北京大学第一医院于 1998 年在国内率先引进兼有符合探测功能的双探头 SPECT/PET，现已完成正电子显像数千例；并在国内连续三年成功举办“SPECT/PET 临床应用学习班”（国家级继续教育项目）；先后在国内专业杂志发表论文 30 多篇；多次应邀参加国内外学术会议并进行大会交流，受到国际、国内同行的高度评价。

利用 SPECT/PET 进行正电子成像称为符合线路探测正电子成像，这一技术有较高的性价比，相对于 PET 更易于在临床推广应用。近期国内 SPECT/PET 的数量呈逐年上升趋势，符合线路正电子成像在肿瘤、心血管、神经等领域已成为重要的检查手段之一。然而，目前国内尚未有系统、全面地介绍有关符合线路正电子显像的专著问世。为使临床医师进一步了解和熟悉符合线路正电子成像技术，并使之发挥更大更好的作用。编写一本相关的专著势在必行，故由我负责组织多位国内从事正电子成像的专家编写了本书。

在各位编者的共同努力下，经过半年的辛勤笔耕，《符合线路探测正电子成像与临床》终于问世了。本书从原理、仪器、药物、质控、结果判断等多个方面详细介绍了符合线路探测正电子成像，并重点讲述了这一技术在肿瘤、心血管系统和神经精神领域的临床应用，综合引用了国内外大量的有关研究成果。另外还精选了部分典型病例和少见病例以飨读者，在此感谢北京协和医院、北京宣武医院、北京武警总医院、第一军医大学南方医院和山东省肿瘤防治研究院 PET 中心及北京友谊医院核医学科为本书提供病例。希望本书能对影像医学与核医学的专业人员、相关临床专业的医师和有关领域的研究人员在临床和科研工作中有所指导和帮助。

由于符合线路探测正电子成像发展时间较短，还属于一种新技术，加之时间仓促和学识水平有限，编写中难免有不妥或不足之处，诚请广大读者予以批评指正。

王荣福

主编简介



王荣福 医学和药学博士，教授，主任医师，博士生导师，1955年9月出生于福建南平市浦城县。1990年国家公派法国留学，在巴黎ORSAY核医学中心Service Hospitalier Frédéric Joliot从师Syrota和Mazière教授，专修PET在基础和临床医学应用研究。1992年10月和1995年6月分别毕业于法国巴黎五大和图卢兹三大，并获医学(MD)和药学(PhD)双博士学位。现任北京大学第一医院核医学科主任兼研究室主任及北京大学第一医院国家药品临床实验基地放射性药物专业负责人，全国“核技术及应用”重点学科—核医学学科学术带头人。兼任国家自然科学基金委员会评审专家，北京市普通高等学校医学工程与物理重点实验室学术委员会副主任委员，美国核医学协会会员，中华核医学分会秘书兼学术组副组长，中华医学会北京分会核医学专业委员会副主任委员，中国核学会同位素分会理事，北京核学会常务理事，高等学校科学技术和卫生部医药卫生同行评议专家，卫生部卫生技术专业考试委员会委员，中华医学科技奖和中华医学青年奖评审委员会委员，中华医学会医疗事故技术鉴定专家，中国医学装备协会医学装备专家。同时还担任印度《心脏病学杂志》国际编委会顾问委员，《中华医学杂志》和《中华医学杂志英文版》外审专家，《亚洲核医学》、《中华核医学》、《北京医学》、《国外医学放射医学核医学分册》、《中国医学计算机成像》、《中国医学影像技术》、《现代临床医学生物工程学》、《中华医学全科》、《美国中华医学进展》等多种专业杂志编委和《中华医学进展》、《中华医学研究》杂志常务编委及《中国核医学青年论坛杂志》执行主编。主要从事分子核医学包括放射性药物研发、单克隆放射免疫显像和治疗、受体研究、基因显像和治疗等和肿瘤核素诊治、高能正电子成像研究等临床核医学应用研究。多次应邀国外讲学和参加重大国际、国内专业学术会议并作大会论文报告和主持学术会议。发表论文、摘要、综述等170多篇；主编5年制全国高等医学院校教材《核医学》和辅导教材《核医学要点与自测》、北京大学医学部长学制教材《核医学》、《核医学教学实习片》及《核医学助学课件》，并参加编写专著20多部。多次获得国家级、部委级科研课题基金资助。同时获福建省“新长征突击手”和全国“新长征突击手”、美国核医学荣誉奖、香港紫荆花医学科研金奖、核医学卓越贡献奖、基础与临床医学结合科技进步奖、名医成就奖、优秀论文奖和优秀教师奖、北京市科技进步二等奖、American Medal of Honer等。

通讯地址：北京市西城区西什库大街8号北京大学第一医院核医学科

邮编：100034

联系电话：010-66551122 转 2732/2594，传真：010-66176450

E-mail: rongfu_wang2003@yahoo.com.cn

目 录

第一篇 总 论

第一章 符合线路探测正电子成像导论	(3)
第一节 符合线路探测正电子成像发展史	(3)
第二节 符合线路探测正电子成像原理	(4)
第三节 符合探测正电子成像主要技术条件	(6)
第四节 符合探测正电子成像的临床应用	(10)
第五节 前景与展望	(12)
第二章 符合线路探测正电子成像仪器	(14)
第一节 SPECT/PET 的结构和类型	(15)
第二节 SPECT/PET 的工作原理	(21)
第三节 几项重要性能指标	(24)
第四节 SPECT/PET 的质量控制	(26)
第五节 符合探测正电子成像的发展趋势	(36)
第三章 正电子放射性药物	(40)
第一节 医用回旋加速器	(40)
第二节 正电子放射性核素的生产	(44)
第三节 正电子放射性药物的标记	(48)
第四节 正电子放射性药物的质量保证与质量控制	(52)
第五节 临床应用的正电子放射性药物	(54)
第六节 正电子放射性药物的研究进展	(63)
第四章 核射线及其防护	(74)
第一节 核射线	(74)
第二节 核射线与物质的相互作用	(76)
第三节 辐射剂量学	(79)
第四节 电离辐射生物效应	(83)
第五节 放射防护的基本原则和措施	(89)
第六节 正电子放射性药物制备及应用中的防护	(94)

第五章 符合线路探测正电子成像临床质量控制 (100)

第一节 能量底物环境对¹⁸F-FDG 显像的影响 (100)

第二节 显像前准备 (110)

第三节 图像采集 (114)

第四节 图像处理 (118)

第五节 衰减校正 (119)

第六节 图像融合 (124)

第六章 符合线路探测正电子成像结果分析 (129)

第一节 目测法图像分析..... (129)

第二节 半定量法结果分析..... (133)

第三节 效能评价..... (143)

第二篇 临床应用

第七章 肿 瘤 (153)

第一节 肺癌 (154)

第二节 乳腺癌 (163)

第三节 脑部肿瘤 (169)

第四节 恶性淋巴瘤 (176)

第五节 大肠癌 (182)

第六节 胆系恶性肿瘤 (190)

第七节 鼻咽癌 (193)

第八节 宫颈癌 (197)

第八章 心血管系统 (202)

第一节 心肌代谢显像 (202)

第二节 心肌存活检测 (207)

第三节 存在问题及对策 (217)

第九章 神经精神系统 (221)

第一节 癫痫灶的定位 (221)

第二节 痴呆的诊断 (225)

第三节 帕金森病的诊断 (228)

第四节 精神疾病的研究 (233)

第五节 脑功能研究 (235)

第三篇 符合线路探测正电子成像在相关学科领域的应用

第十章 符合线路探测正电子成像在肺癌中的应用	(241)
第一节 概述	(241)
第二节 小肺癌的检出	(242)
第三节 小肺癌的鉴别诊断	(243)
第四节 小肺癌的分期	(248)
第五节 小肺癌疗效的监测和预后评价	(249)
第十一章 符合线路探测正电子成像在消化系统肿瘤中的应用	(252)
第一节 消化系统肿瘤发病现状和面临的问题	(252)
第二节 消化系统肿瘤的诊断方法	(253)
第三节 符合线路探测显像在消化道肿瘤诊断中的临床价值	(254)
第四节 符合线路探测显像在消化道肿瘤复发、转移中的临床价值	(254)
第五节 符合线路探测在预测消化道肿瘤治疗效果中的临床价值	(257)
第十二章 符合线路探测正电子成像在淋巴瘤中的应用	(260)
第一节 淋巴瘤发病和病理组织学	(260)
第二节 临床表现	(263)
第三节 淋巴瘤的诊断	(265)
第四节 鉴别诊断	(267)
第五节 淋巴瘤的临床分期	(269)
第六节 淋巴瘤的疗效评价	(271)
第七节 淋巴瘤的预后判断	(274)
第八节 黏膜相关淋巴组织淋巴瘤	(276)
第十三章 符合线路探测正电子成像在恶性骨肿瘤中的应用	(281)
第一节 显像剂及显像原理	(281)
第二节 临床应用	(281)
第三节 符合探测正电子 (^{18}F -FDG) 成像诊断骨转移瘤要点	(290)
第十四章 符合线路探测正电子成像在神经外科领域的应用	(293)
第一节 脑胶质瘤	(293)
第二节 颅脑损伤	(297)
第三节 脑血管病	(298)
第四节 其它	(300)

第十五章 核医学与图像储存和传输系统	(304)
第一节 引言.....	(304)
第二节 微型-PACS 中的基本概念和方法学简介	(306)
第三节 PACS 的基本概念	(313)
第四节 基于 DICOM 的 PACS 系统.....	(316)
第五节 医学信息系统的集成.....	(319)
第六节 针对核医学影像信息整合的图像处理技术.....	(321)
第七节 微型-PACS 在核医学科运行模式的设计	(327)
第十六章 核医学显像与 CT、MRI 进展	(332)
第一节 核医学影像与 CT、MRI 功能成像的比较	(332)
第二节 SPECT/CT、PET/CT 组合技术与复合影像诊断	(338)
第三节 未来医学影像学发展趋势及展望.....	(340)

第四篇 符合探测正电子成像典型病例精选

第十七章 临床病例精选	(345)
病例一	(345)
病例二	(349)
病例三	(352)
病例四	(356)
病例五	(359)
病例六	(362)
病例七	(364)
病例八	(367)
病例九	(370)
病例十	(372)
英文索引	(378)

第一篇

总 论

第一章 符合线路探测正电子成像导论

医用核仪器是一类通过检测引入人体内的放射性核素 (radionuclide) 及其标记化合物即放射性药物 (radiopharmaceutical) 在不同脏器和病变组织的摄取和清除程度来显示脏器和病变组织的形态、血供、功能、代谢、免疫特性、递质浓度和受体密度的放射性核素显像 (radionuclide imaging) 仪器, 主要包括 γ 照相机 (gamma camera)、单光子发射计算机断层显像仪 (single photon emission computed tomography, SPECT)、正电子发射型电子计算机断层显像仪 (positron emission computed tomography, PET)、符合线路正电子成像断层仪以及新近推出的在 PET 上加装计算机断层扫描机 (computed tomography, CT) 的 PET/CT。符合线路正电子成像断层仪是用 SPECT 实现正电子符合探测成像的一种新技术, 亦称为 SPECT/PET 或符合线路 SPECT, 它是目前我国正电子显像检查的主要仪器。

现代先进的医疗设备是促进医学事业发展的重要先决条件之一。PET 是当今核医学领域最先进的技术, 但由于存在仪器昂贵和配套人员以及后期投入等一系列问题, 临床难以普及推广使用。世界上 PET 仪安装在一些大城市的医学中心, 我国北京地区已经安装四台 PET, 上海、广州、淄博、西安、济南、天津、武汉、重庆、哈尔滨和福州等城市相继引进 PET 和/或 PET/CT 高新技术。随着医疗制度改革和医疗保险制度的实行, PET 的高昂检查收费对多数患者来说负担很重, 因此, 亟待研制出适合我国国情的核医学正电子成像仪器, 而 SPECT/PET 的问世满足了这一要求。SPECT/PET 能够用双探头或三探头 SPECT 进行符合探测, 实现了正电子断层成像, 该机同时兼备单光子断层显像功能。它的特点是既可作为普通 SPECT 使用, 同时又具备部分 PET 功能, 如能进行 ^{18}F [^{18}F] 标记的氟代脱氧葡萄糖 (^{18}F -fluorodeoxyglucose, ^{18}F -FDG) 代谢显像用于肿瘤诊断、心肌细胞存活检测和脑代谢变化研究等, 还可以进行一些神经递质和受体显像研究。通过临床验证, SPECT/PET 的图像质量和临床价值均已得到肯定。

SPECT/PET 主要由双探头或三探头 SPECT 系统、符合探测线路 (coincidence detection circuit) 和衰减校正 (attenuation correction, AC) 等部分组成。该设备不需要笨重的铅准直器, 而是利用符合探测技术由成对的探测装置接收湮灭辐射 (annihilation radiation) 产生的两个方向相反 (互成 180°)、能量相等 (511 keV) 的 γ 光子, 经计算机处理重建后获得各种断层影像和有关参数, 从而对病变做出定性或定量诊断。SPECT/PET 已获得美国药物管理局 (food and drug administration, FDA) 批准生产和中国药品监督管理局 (state drug administration, SDA) 准许引进, 这无疑对我国正电子成像事业发展具有重大的推动作用。

第一节 符合线路探测正电子成像发展史

正电子符合探测技术的研究早在 20 世纪 50 年代就已开始, Anger 等人在厚晶体的 γ

照相机上配以高能准直器进行了单光子的正电子放射性核素 (511 keV) 平面显像, 不少学者或专家还做了正电子发射断层显像的尝试, 由于当时科学技术水平限制, 尚未成功。70 年代初继 X-CT 新技术的出现, 正电子显像技术发展迅速, 并推出第一台适于临床应用的 PET。到 70 年代中期第一台商业 PET 问世, 历经 20 年不断改进和完善, PET 技术已经成熟, 国外已广泛用于临床。我国山东淄博万杰医院于 1994 年在国内首家引进美国 GE 公司 Advance PET, 之后北京、上海、广州、西安、济南、天津、武汉、重庆、哈尔滨和福州等城市相继引进或安装了 PET, 至今已做了数万多例病人。然而, PET 设备价格昂贵, 还要考虑到安装生产发射正电子放射性核素的加速器、合成示踪剂的全套装置以及配套人员和经营管理各种费用开支等多种因素, 使得国内大多数医院难以对这种高新技术进行投资, 因此, PET 有它的局限性。近年来, 世界上生产核医学仪器的各家公司结合发展中国家的国情并遵循市场的需求在双探头或三探头 SPECT 机上进行正电子符合探测成像的开发与研究, 取得了重大成功, 并很快投入到临床应用。

目前国际上有荷兰飞利浦公司、美国通用电气公司和德国西门子公司先后研制出进行符合线路正电子成像的 SPECT/PET 产品, 产品命名不同, 也各有其特色, 但符合探测的原理相同。SPECT/PET 与 PET 相比价格便宜, 使半衰期较长的正电子核素 (如 ^{18}F) 及其标记化合物广泛应用于临床成为可能, 大大促进了我国正电子显像的发展。

第二节 符合线路探测正电子成像原理

符合线路探测正电子成像原理 (图 1-1) 是利用湮灭辐射产生的两个 γ 光子的直线性和同时性。当正电子放射性核素及其标记化合物引入人体内参与某种代谢或生化过程时自发地、不断地衰变发射出正电子, 每个正电子与周围环境中一个负电子发生湮灭辐射, 并发射出一对能量相等 (511 keV) 在同一直线上方向相反的 γ 光子, 而后分别被两个相对的探头接收, 并产生位置信号。目前各厂家生产的 SPECT 机械结构已完全能满足这一要求。这种利用湮灭辐射和两个相对探头做符合测量对射线进行限束的技术称之为电子准直 (electrical collimation)。与常规 SPECT 探头不同, SPECT/PET 成像不需要机械准直器, 从而大大提高了探测效率。符合线路只记录在一定时间范围内同时到达两个探头的两个光子, 由于正电子的湮灭产生 γ 光子的空间位置到达两个探头面的距离不同, 因而两个 γ 光子所飞行的时间将有一定的差别, 将这种时间差别显示为脉冲幅度, 即可计算正电子湮灭产生的空间位置。在实际测量中, 往往规定一个时间差范围, 即符合时间窗。例如某公司产品提供的符合时间窗为 15 ns, 就是说在 15 ns 内进入的两个光子视为同时发生的 γ 光子, 予以探测, 在 15 ns 外的两个 γ 光子不予以探测, 为此排除了散射光子的探测。在这个时间间隔 (快符合线路的分辨时间) 内而被误认为“同时”发生而探测下来的即不是一个正电子产生 γ 光子称之为随机符合 (random coincidence)。随机符合为两个不相关 γ 光子分别在时间幅度变换器分析范围内到达两个探头所产生的信号, 与计数率成正比关系, 提高计数率不能降低随机符合, 只能通过能量道可以去掉一部分。随机符合增加图像噪音, 严重影响图像对比度, 必须加以限制。由于随机符合在总符合中的比例仅占 1%, 因此, 要提高正电子成像的信噪比, SPECT/PET 探测要求每个探头计数率至少达 1 000 kcps 以上。荷兰飞利浦的 Vertex^{plus} EPIC 可达 2 400 kcps。由于符合探测的复杂性, 尽管

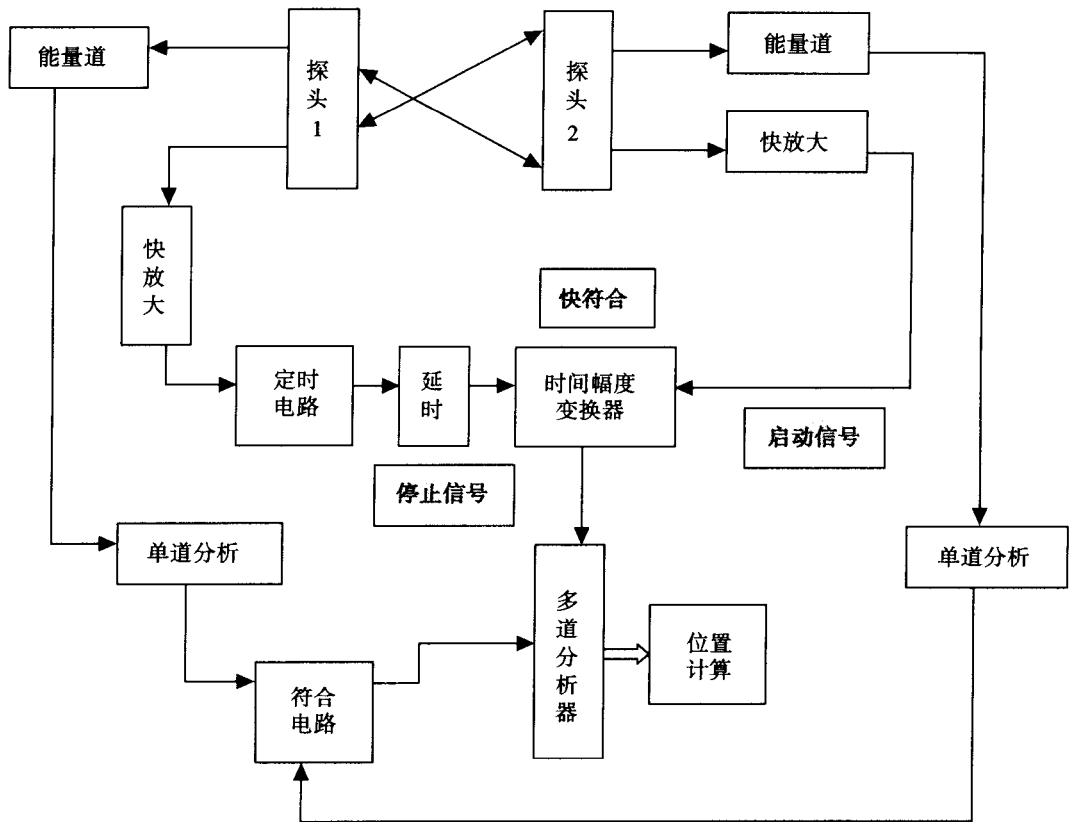


图 1-1 SPECT/PET 工作原理示意图

511 keV 光子比低能光子在组织中的穿透能力强，吸收少，但其在组织中的衰减将严重影响图像质量。原 ADAC 和 Marconi 公司的 SPECT/PET 衰减校正分别采用单光子放射性核素铯 [^{137}Cs] ($T_{1/2}$ 30.14 年, 662 keV) 和钡 [^{133}Ba] ($T_{1/2}$ 10.9 年, 365 keV)，在注入正电子核素及其标记化合物后进行发射 (emission) 采集和透射 (transmission) 采集 (即通常所说的 T+E)，大大节省了成像时间。德国西门子公司的 SPECT/PET 衰减校正采用软件计算方法。美国通用电气公司的 SPECT/PET 衰减校正采用 CT 发射的 X 射线，检查前先进行透射采集 (约 10 min)，之后进行发射采集，同时可进行同机解剖结构与功能代谢图像融合，对病灶可做出精确定位诊断。通常对心脏、纵隔、腹部、盆腔部位病灶要做衰减校正，可大大提高靶/非靶组织的对比度，有利于发现微小病变，提高正确诊断率。

近来人们开始对符合线路正电子成像仪探头晶体材料进行研究。碘化钠 (NaI) 晶体不能有效地捕捉正电子湮灭辐射产生的 γ 光子，而锗酸铋 (bismuth germanate, BGO) 在转换低能 γ 光子为光信号时转换率也不佳。目前西门子公司正在与 CTI 公司共同开发研究硅酸镧 (lutetium oxyorthosilicate, LSO) 晶体，它具有发光衰减期极短，仅为 50 ns (NaI 为 200 ns)，且光子累积效应 (pile up effect) 呈大幅度地降低的特点。实验初步证明 LSO 晶体转换低能 γ 光子为光信号时其转换率既接近 NaI 晶体性能要求，又与 BGO 晶体相媲美，能较高密度地、有效地捕捉 511 keV 的 γ 光子，目前认为 LSO 晶体用于

SPECT/PET 符合线路探测技术富有前景。荷兰飞利浦公司则研制推出了硅酸钆 (gadolinium oxyorthosilicate, GSO) 晶体。此外, 光电倍增管将来会向半导体方向发展。随着计算机技术的开发应用和迅速发展, ADAC 公司 (现属于飞利浦公司) 在 1999 年美国北美放射学会推出 Vertex 60 机型, 图像处理速度大大加快, 使得符合线路探测技术更加完善。美国通用电气公司新推出的 Entegra 处理系统内存大, 功能强。

SPECT/PET 成像分辨率和灵敏度高, 空间分辨率 (FWHM) 佳, 可达 5 mm, 几乎接近于 PET。SPECT/PET 设备比 PET 价格便宜, 并兼备有 SPECT 和 PET 功能。 ^{18}F -FDG SPECT/PET 显像可进行身体任何部位的正电子成像包括脑功能代谢研究、心肌细胞存活性检测及全身各部位肿瘤成像。当然, SPECT/PET 图像质量与 PET 相比略显逊色。1998 年德国柏林第八届世界联盟核医学和生物学大会上专家们一致认为对直径小于 1.5 cm 的肿瘤病灶的诊断、疗效监测和预后评价以及在脑功能和受体研究方面, PET 与 SPECT/PET 相比具有绝对优势。

第三节 符合探测正电子成像主要技术条件

早在 1953 年 Brownell 和 Sweet 就提出了通过探测正电子衰变过程中产生的湮灭辐射进行符合成像的可行性。1958 年 Anger 利用双探头 γ 照相机首次进行了该项技术的尝试, 当时由于 γ 照相机计数率低、计算机处理速度慢等限制未能应用于临床。以后采用六角形或环形多晶体的专用正电子探测系统 (即 PET) 得到快速发展并应用于临床, 但由于 PET 造价高、资金回报率低、正电子示踪剂不易获得以及 PET 只能进行正电子显像等原因, 使 PET 未能推广应用。人们设想有一种价格相对低廉的多用途系统, 既能进行正电子符合探测又能进行普通的单光子显像, 实现一机多用, 此即关于双探头符合线路正电子成像设备的构想。由于目前 SPECT 系统主要为低能核素 ($<200\text{ keV}$) 探测而设计, 因此要在普通大视野 SPECT 的基础上实现正电子符合成像, 尚需对其进行硬件和软件上的改造。

一、SPECT 的改造

1. 拓宽脉冲—高度分析器能谱 拓宽能谱主要采用调节高压来实现。一些厂家采用调节高压来拓宽整个采集能谱, 另一些厂家则采用单独的高压设置, 通过降低高压和重新校准脉冲—高度分析器进入到高能采集模式, 但在该模式下不能进行低能核素, 如铊 [^{201}Tl]、锝 [$^{99\text{m}}\text{Tc}$] 的采集, 因此不能进行超高能准直器下的双核素显像。

2. 重建均匀度及线性校正表 众所周知, 视野的均匀性是能量依赖性的。制造商通过使用低能和中能线性与均匀性校正表来使视野均匀度达到诊断要求, 但当能量扩展到 511 keV 时, 其相应的线性及均匀性校正表也要随之扩展。对此, 不同厂商所采用的解决方案有所不同, 有的采用中能校正表, 有的重新制作新的高能校正表, 还有的采用二者结合, 如采用中能线性校正表和高能均匀度校正表。

3. 增加探头屏蔽 由于 511 keV 的 γ 光子能量高, 其穿透力较低能 γ 光子明显增强, 如 511 keV γ 光子 1/10 铅吸收厚度为 13.5 mm, 而 140 keV γ 光子 1/10 铅吸收厚度仅为 0.9 mm, 因此进行符合探测需增加探头的屏蔽能力。

4. 增加晶体厚度 普通 SPECT 主要为探测低能核素 (<200 keV) 而设计, 多采用 3/8 英寸 (9.5 mm) NaI (Tl) 晶体, 这主要是因为该厚度的晶体对低能 γ 光子的探测有着良好的空间分辨率、满意的探测效率和适宜的造价。由于 511 keV 的 γ 光子能量高, 穿透力强, 因此 3/8 英寸晶体对其探测效率大大低于低能 γ 光子, 如 3/8 英寸 NaI (Tl) 晶体对 140 keV 的 γ 光子的探测效率为 84%, 而对 511 keV 的 γ 光子的探测效率只有 13%。此外, 由于符合探测要求两个探头同时探测到一次湮灭事件产生的一对 511 keV 的 γ 光子, 不同于单光子探测, 符合探测的效率是两个探头探测效率的乘积 ($13\% \times 13\% = 1.69\%$), 因此, 从符合探测角度来讲, 为提高探测效率应增加晶体厚度 (理想厚度是 2 英寸), 但这必然导致低能探测的分辨率降低。为使这一新系统既能满足高能符合探测又能满足低能单光子探测的需要, 就需要采用一个折中方案。

研究表明, 适当增加晶体厚度所造成的固有分辨率下降, 对临床的影响意义不大。例如, 在低能条件下, 应用低能高分辨准直器测定的距准直器 10 cm 远处的系统分辨率, 在 3/8 与 5/8 英寸晶体仅相差 0.2 mm。这是因为除非探头紧贴被探测物体, 系统分辨率的主要影响因素是准直器, 而非晶体厚度。将晶体厚度由 3/8 英寸增加到 5/8 英寸时, 对 511 keV γ 光子的单探头探测效率由 13% 提高到 21%, 增加了 0.6 倍, 而符合探测效率则由 1.69% 提高到 4.41% ($21\% \times 21\% = 4.41\%$), 增加了 1.6 倍, 因此增加晶体厚度对符合成像的探测效率较单光子成像影响更显著。目前符合成像常采用的晶体厚度有 1/2 英寸 (12.7 mm)、5/8 英寸 (15.9 mm)、3/4 英寸 (19.1 mm)。但晶体厚度达到 1 英寸后, 低能探测的空间分辨率将显著下降, 为此有些制造商采用特殊的晶体切割技术, 使其既能满足高能探测的灵敏度又能满足低能探测的分辨率。

5. 提高单探头计数率 由于符合探测的效率较低, 需要增加单探头的计数率以保证采集到能满足临床需要的符合计数。当 511 keV 高能 γ 光子的能量完全被晶体吸收后, 产生的可见光子数量是 140 keV γ 光子的 4 倍, 因此在光电倍增管输出端产生的电脉冲信号较强, 这样牺牲部分能量分辨率, 而只测量该电脉冲信号的起始端, 则可将每个电脉冲的测量时间由 1 μ s 缩短到 200 ns, 这样就大大减少了探测的死时间, 提高了计数率。此外, 一些制造商采用探头分区技术, 以降低每次闪烁事件的光电倍增管响应数目, 使探头某一区域内的闪烁事件相对不受其它区域闪烁事件的影响, 从而提高计数率。

6. 增加符合电路 即在两个探头间安装一个高精度的时间控制模块, 并将时间窗设置为 15 ns, 以保证两个探头能同时探测到一次正电子湮灭事件所产生的两个 511 keV γ 光子。

二、双探头符合探测正电子成像中的物理问题

(一) 真符合、随机符合和散射符合

在双探头符合成像的采集过程中, 两个探头呈相对 180°角, 通过步进或连续旋转模式绕被测物体旋转 180°。正电子湮灭辐射产生的两个互呈 180°角的 511 keV γ 光子, 在符合时间窗 (通常为 15 ns) 内被两个探头分别探测到, 作为一次有效符合计数被记录, 称为真符合。湮灭辐射发生在被探测到的两个 γ 光子连线的某一位置上, 由于每个符合计数均包含有探头旋转的位置、两个 γ 光子在各自探头上的坐标以及相应的能量信号, 因此, 通过多时间点、多角度的探测即可确定湮灭辐射发生的确切位置。由此可见, 符合探测不