

一体化 PET/MR 的机房建设与仪器安装

阮伟伟 刘芳 张永学 兰晓莉

华中科技大学同济医学院附属协和医院核医学科、分子影像湖北省重点实验室, 武汉 430022

通信作者: 兰晓莉, Email: hzslxl@163.com

【摘要】 一体化 PET/MR 克服了 PET 与 MRI 强磁场相关干扰的难题, 实现了 2 种模态影像的同步采集, 在医学影像学领域具有里程碑式的意义。PET/MR 检查既需要有放射性药物, 又要避免周边环境对 PET/MR 主磁场均匀性和射频场稳定性的影响。因此, 一体化 PET/MR 场地的选择和布局建设相比单一系统更加复杂, 其安装调试结果要求同时满足 2 种模态显像要求(显像质量及定量准确性)。该文将对一体化 PET/MR 的机房建设和仪器安装进行阐述和探讨, 以供同类项目建设过程中关键性问题的参考。

【关键词】 设施的设计和建造; 体层摄影术; 发射型计算机; 磁共振成像

基金项目: 湖北省技术创新专项(2017ACA182); 华中科技大学同济医学院研究型临床医师资助计划(5001530008)

DOI: 10.3760/cma.j.cn321828-20190926-01328

Room construction and installation of integrated PET/MR

Ruan Weiwei, Liu Fang, Zhang Yongxue, Lan Xiaoli

Department of Nuclear Medicine, Union Hospital, Tongji Medical College, Huazhong University of Science and Technology, Hubei Province Key Laboratory of Molecular Imaging, Wuhan 430022, China

Corresponding author: Lan Xiaoli, Email: hzslxl@163.com

【Abstract】 The integrated PET/MR overcomes the problem of interferences between PET and the strong magnetic field of MRI, realizing the simultaneous acquisition of two modalities, which is a milestone in the field of medical imaging. The use of PET/MR requires the radiopharmaceutical as well as avoids interferences to the homogeneity of main magnetic field and stability of radio-frequency field from surrounding environment. Therefore, the site selection and layout design about integrated PET/MR are more complicated than the single mode system, and the results of installation and debugging should satisfy two imaging modalities (imaging quality and quantitative accuracy). In this paper, the room construction, installation and debugging of integrated PET/MR are discussed, which can supply a reference about key issues in the construction of similar projects.

【Key words】 Facility Design and Construction; Tomography, emission-computed; Magnetic resonance imaging

Fund program: Technical Innovation Special Project of Hubei Province (2017ACA182); Research Clinician Grant Scheme of Tongji Medical College, Huazhong University of Science and Technology (5001530008)

DOI: 10.3760/cma.j.cn321828-20190926-01328

PET/MR 一体机是近年来核医学尖端分子影像仪器的重要进展, PET 侧重于早期功能显像, MRI 侧重于结构成像及多参数成像。一体化 PET/MR 将 PET 探测器整合在 MRI 线圈之中, 实现同步、等空间、等容积 PET 和 MRI 信号采集, 获得一站式功能显像与多序列多参数结构显像, 从而提高诊断的灵敏度和特异性^[1]。截至 2017 年 12 月 31 日, 全球一体化 PET/MR 约有 200 台, 其中我国国内公立医院安装 9 台^[2]。根据国卫财务发〔2018〕41 号文件, 至 2020 年, 全国公立医院将新装机 28 台。不同于 PET/CT 和 PET/CT+MR 的分体式设计, 一体化 PET/MR 安装有其独特的特点和要求。本文回顾本中心机房建设和设备安装的过程, 总结了该过程中的相关经验及注意事项, 为后期同类项目建设过程中的关键性问

题提供参考。

一、一体化 PET/MR 的机房建设

1. 场地选址。一体化 PET/MR 场地选址既要考虑其开放性放射工作场所, 包括放射性药物生产、传输和使用等^[3]; 还要考虑系统存在的强磁场特点, 保证系统在运行中无外部干扰, 不影响磁场的均匀性和稳定性, 同时保证人员的安全和其他敏感设备功能不受磁场影响。选址原则有以下几点: (1) 应在核医学科或独立 PET 中心之内, 便于放射性药物传输与注射、注射后患者管理以及放射性废物管理; (2) 周围不能有大型的变电站或变压器输电机组, 应远离大型动力用电设施, 远离外部大型震动源, 如地铁、停车场、大型电机、电梯等, 以保持主磁场和射频场的稳定性和均匀性; (3) 应尽量在

地下或者地上一层,便于放射性防护以及保证地面的承重强度;(4)远离妇产科、儿科和人口密集处,避免注射过放射性核素的受检者途径以上区域;(5)除了设备间、磁体房、操作室之外,还需提供独立空间用以放置大型空调机和水冷机的室外机等。因此,选址需有足够大的空间并合理布局,相关建设面积应满足我国现行的《综合医院建设标准(建标 110-2008)》相关规定^[4]。

2. 布局设计。一体化 PET/MR 的布局主要考虑放射性药物及受检者注射放射性药物后的放射防护和磁体间的强磁场安全防护。图 1 为本中心一体化 PET/MR 机房主要布局的平面示意图。机房分布在本中心 1 楼,根据一体化 PET/MR 重新布局设计,包括更衣室、卫生间、设备间、磁体间、操作室和配电室,还有受检者的候诊室。另外,其布局设计中还应有预约台、问诊室、注射室和受检者休息室等。

注射室分为两部分,一部分用于完成注射前测量血糖、身高、体质量和埋置静脉通道,另一部分用于完成放射性核素药物的注射。休息室分为注射前休息室,注射后休息室(等待药物在体内达到稳定分布再行扫描,需有躺卧设施及避光、避声功能)及显像后休息室。注射室、注射后休息室和显像后休息室均需进行辐射防护。休息室与候诊室之间应有卫生间和更衣室。鉴于¹⁸F-脱氧葡萄糖(fluorodeoxyglucose, FDG)通过尿路排泄,卫生间仅为受检者专用,并需有辐射防护设计。更衣室用于受检者更换衣物,取出所有金属类或有磁性的物品,候诊室门口设置有金属探测门,进一步保证受检者身上金属物品已全部取出。设备间用于放置大型空调机、水冷机、液氮压缩机、射频梯度柜等电子设备,这些设备要求设备间的地面和墙面有防水、防潮,以及抗静电处理。为保证配电柜、稳压柜、梯度柜等大型设备摆放的稳定性和安全性,在静电地板下应安放支撑角铁支架,外涂防锈漆。设备间的水冷系统和空调系统都有室外机,为保证室外机组的正常制冷和通风散热,在其周围 1.5 m 的范围内不得再安装其他机房空调。

磁体间上下、前后、左右都须进行铁磁屏蔽,射频屏蔽和放射防护。铁磁屏蔽标准依照有关国家规定^[5],铁磁屏蔽使用硅钢板制作,射频屏蔽使用铜板制作^[6],辐射防护使用铅砖防护材料,最终测试屏蔽指标为 10~150 MHz 范围内的射频信号衰减 ≥ 100 dB。在磁体间的设计上,核心要求有以下几点:(1)地面需进行防水、防潮处理,考虑到 PET/MR 的重量,地面需进行加固和承重测试;(2)磁体间的上方要求安装紧急排风系统(确保磁体间有充足的通风换气以及足够的氧气含量)和失超管(保证在磁体失超时能将大量的氦气快速排到室外),由于失超管内的气体温度最低能达到-268℃,其外出口一定范围内应为限制区域,且不能有空调的进风口;(3)磁体间内采用直流照明,需提供直流电源;(4)磁体间内设置放射源库,用于放置 PET/MR 设备需要的校正放射源,存放需符合国家剧毒化学品、放射源存放场所治安防范要求^[7]。

操作间是扫描技师和医师工作的地方,要求与磁体间之间有严格的铁磁和射频屏蔽、放射防护和噪声隔离。操作间通常会配备专门的图像后处理工作站和中文报告系统,以方便采集的图像得到医师的实时处理。设备间的电力改造是场地布局建设中重要的一环,直接关系到设备的安全和稳定使用。在安装前应充分了解 PET/MR 的电负荷情况、用电容量以及对电源质量、不间断电源等特殊要求,针对性地设计相应的配电系统。为确保电气安全,配电柜应具备防开盖锁定功能,机房空调、水冷机、照明及电源插座单独供电,与主系统用电分开。

二、一体化 PET/MR 的仪器安装

1. 体线圈与探测器的安装与测试。为保证探测器安全,体线圈和 PET 探测器是独立于主磁体之外运输和安装。图 2 展示了本中心一体化 PET/MR 中集成 PET 探测器的体线圈,里面为 MRI 发射、接收一体的体线圈,中间为体线圈屏蔽罩,可阻止外界交变磁场对体线圈中射频场的影响,同时也减小体线圈射频场对 PET 探测器影响;体线圈外层为 PET

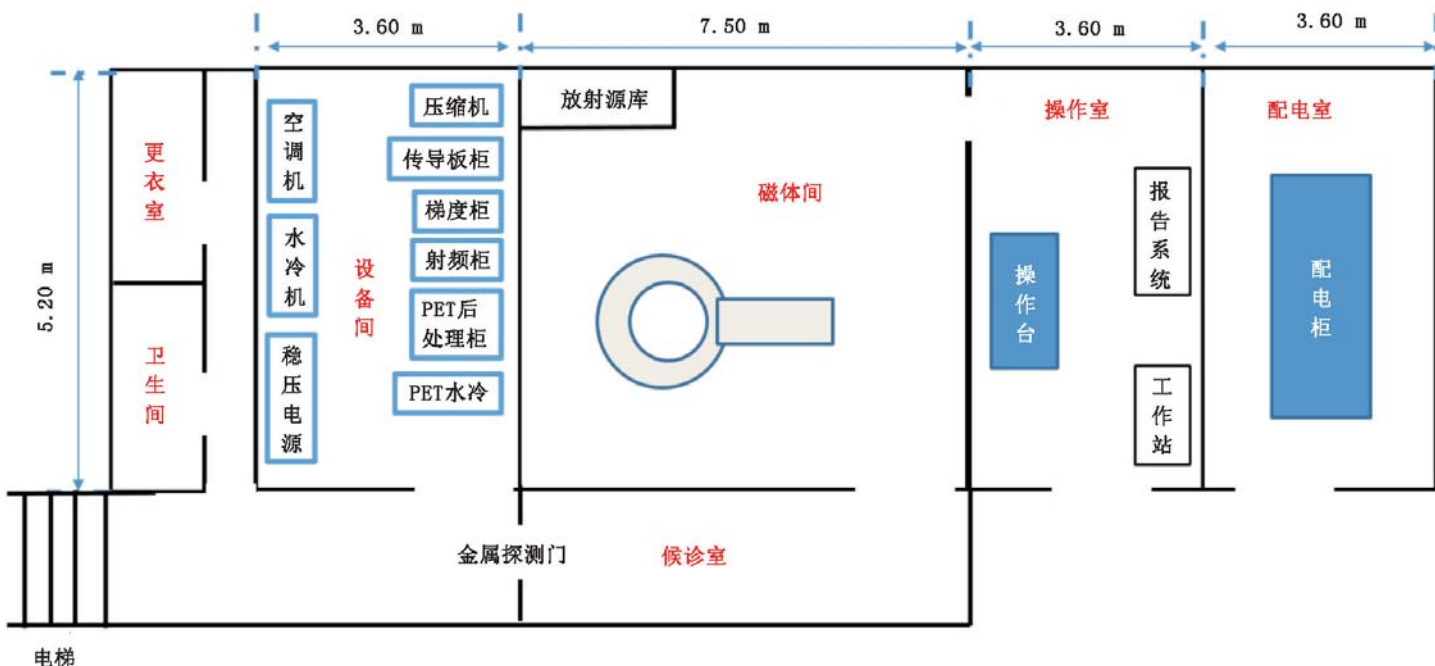


图 1 一体化 PET/MR 机房主要布局的平面示意图

探测器,由 28 个结构性能一致的探测器模块组成探测环,长度为 25 cm。单个探测器模块由 5 组 4×3 阵列的探测单元构成,单个探测单元由闪烁晶体和基于硅光电倍增管(silicon photomultiplier, SiPM)耦合组成。理论上,该 PET/MR 探测器的计数效率相当于传统 PET/CT 探测器的 3 倍,但考虑到 MR 线圈的衰减和由于 MR 序列的激发降低了 PET 计数,实际提升因子维持在 2 左右^[8]。

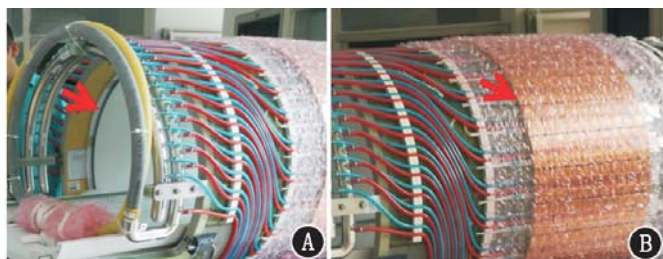


图 2 一体化 PET/MR 体线圈(A)与 PET 探测器(B)。A 图箭头所示为体线圈,B 图箭头所示为 PET 探测器模块

集成 PET 探测器的体线圈置入磁体腔之前,需进行水冷循环测试和 PET 探测器信号通讯测试,以保证一体化探测器体线圈安装后的可用性。水冷循环测试用于观察整个系统的密封情况,在 PET 探测器的专用水冷机运行之后进行。PET 探测器信号通信测试用于确认 PET 探测器与信号后处理部分硬件连接的完整性,测试完成之后,利用专门的机械装置,将集成的一体化 PET 探测器体线圈放入磁体腔内最佳位置并进行固定。

2. 一体化 PET/MR 的励磁。励磁是超导性磁共振设备必经历的一个过程,其核心是将磁体内部处于超导态的螺线管线圈充以一定大小的电流,由于线圈处于超导态,电流在线圈上以没有损耗的形式流动,根据法拉第电磁感应定律,线圈周围以及内部会产生磁场,即 MRI 的主磁场。这使线圈上的电流从零到达到一定值,进而使线圈内部产生稳定磁场的过程被称为励磁。经过励磁以后,主磁体中的主线圈具有强大的电流,并产生期望的磁场强度或是中心频率。目前一体化 PET/MR 的磁场强度是 3.0 T,励磁后对应的磁场中心频率为 127.98 MHz。

3. 一体化 PET/MR 调试。主要分为三大部分: MRI 匀场校正, MRI 线圈和 PET 系统校正。超导磁共振成像系统的成像性能以及图像质量高度依赖于在成像空间内的磁场均匀度。由于磁体设计、制造及安装环境等因素的影响,超导磁体主磁场的均匀性需要通过匀场校正才能达到一定的均匀度标准,一般而言,磁体空间内的磁场不均匀度最好小于百万分之 5。超导磁体 MRI 系统的匀场技术有 2 种,一种是有源匀场技术,通过改变通电线圈里的反馈电流对成像空间内的磁场均匀度进行补偿;另一种是无源匀场技术,通过优化一系列的匀场片(磁性材料,一般是电工钢)的分布进行匀场,这种技术一旦实施,后期不需要通电维护,具备廉价和高灵活性的特点^[9]。无源匀场技术中的匀场片被固定在超导磁体内壁的抽屉中,其被磁化后在成像空间产生感化磁场补偿主磁场的均匀性。一体化 PET/MR 在安装校正过程中使用无源方式来进行匀场,除上述的优势外,还能够减少通电线圈的使用,避免减小检查磁体的孔径。匀场过程中,测

量磁体中心直径为 48 cm 的球形区域的场强均匀度,利用 Shimtool 软件(美国 GE 公司)对匀场度进行获取和分析,然后自动计算出匀场片的数量和位置。

MRI 线圈的校正即利用水膜测试和校正各种线圈的中心位置、射频功率的准确性和线圈发射、接收的均匀性。一体化 PET/MR 的线圈包括 PET/MR 的线圈套件与 PET/MR 兼容的传统 MRI 线圈。一体化 PET/MR 线圈套件可在无需重新定位患者或更换线圈的情况下对患者头、颈、脊柱、腹部、骨盆、下肢、血管或长骨显像。一体化 PET/MR 系统还可兼容多种类型的动物线圈,满足对大小鼠、兔子、猴子等实验动物的研究需求。PET 系统校正包括探测器的校正和 PET 定量准确计数校正。探测器校正采用⁶⁸Ge 放射源模型校正 PET 探测模块各单元探测器能量增益的一致性、空间定位的准确性、灵敏度的均一性和时间符合性能。准确计数校正采用灌注的¹⁸F-FDG 的柱状放射源模型,获取放射源计数与 PET 图像标准摄取值(standardized uptake value, SUV)之间的校正系数,确保 SUV 的准确性^[10]。PET 校正过程中会生成一系列的校正参数文件,以保证数据采集和重建中不出错。

三、总结

一体化 PET/MR 真正结合了 PET 与 MRI 两大影像学高端设备,在疑难病症的定位、定性和精准定量上充分发挥多模态的优势,成为提升临床医师诊断信心的利器,特别在神经系统病变、恶性肿瘤精确诊断、心血管系统等方面,具有很好的发展前景^[1,11]。然而,一体化 PET/MR 的临床使用同样也面临着很多问题,不仅价格昂贵、显像时间较长,且安装条件相比于单一模态和 PET/CT 要求更加严格、质量控制和检查流程还不完善等^[12]。目前,一体化 PET/MR 的临床使用才刚刚开始,其场地选址、布局设计及安装校正是一体化 PET/MR 临床使用的首要步骤,对于系统正式使用后的规范化、流程化、高效性及显像性能具有重要的影响。

利益冲突 所有作者均声明不存在利益冲突

参 考 文 献

- [1] 田嘉禾,张永学. PET/MR: 分子影像发展的新契机[J]. 中华核医学与分子影像杂志, 2014, 34(6): 421-422. DOI:10.3760/cma.j.issn.2095-2848.2014.06.001.
Tian JH, Zhang YX. PET/MR: the new opportunity of molecular imaging development[J]. Chin J Nucl Med Mol Imaging, 2014, 34(6): 421-422. DOI:10.3760/cma.j.issn.2095-2848.2014.06.001.
- [2] 中华医学会核医学分会. 2018 年全国核医学现状普查结果简报[J]. 中华核医学与分子影像杂志, 2018, 38(12): 813-814. DOI:10.3760/cma.j.issn.2095-2848.2018.12.010.
Chinese Society of Nuclear Medicine. A brief report on the results of the national survey of nuclear medicine in 2018[J]. Chin J Nucl Med Mol Imaging, 2018, 38(12): 813-814. DOI:10.3760/cma.j.issn.2095-2848.2018.12.010.
- [3] 耿建华,陈英茂,陈盛祖,等. PET/CT 正电子药物中心的建设之二——场地选址与设计[J]. 中国医学装备, 2011, 8(9): 10-13. DOI:10.3969/j.issn.1672-8270.2011.09.003.
Geng JH, Chen YM, Chen SZ, et al. Establishment of PET/CT positron radiopharmaceutical center: site selection and design[J]. Chin Med Equip, 2011, 8(9): 10-13. DOI:10.3969/j.issn.1672-8270.2011.09.003.

- [4] 中华人民共和国卫生部.综合医院建设标准(建标 110-2008) [M].北京:中国计划出版社, 2008.
Ministry of Health of the People's Republic of China. General Hospital Construction Standard (Building Standard 110-2008) [M]. Beijing: China Planning Press, 2008.
- [5] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. GB/T 12190-2006 电磁屏蔽室屏蔽效能的测量方法[S].北京:中国标准出版社, 2006.
General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China. GB/T 12190-2006 Method for measuring the shielding effectiveness of electromagnetic shielding enclosures[S]. Beijing: Standards Press of China, 2006.
- [6] 何洪林,赵育新,吴昌爽,等.医用磁共振设备机房的设计布局及屏蔽效能检测[J].医疗卫生装备, 2012, 33(5): 88-91. DOI:10.3969/j.issn.1003-8868.2012.05.038.
He HL, Zhao YX, Wu CS, et al. Layout design and shielding performance evaluation of medical MRI equipment rooms[J]. Chin Med Equip J, 2012, 33(5): 88-91. DOI:10.3969/j.issn.1003-8868.2012.05.038.
- [7] 中华人民共和国公安部. GA 1002-2012 剧毒化学品、放射源存放场所治安防范要求[S].北京:中国标准出版社, 2012.
The Ministry of Public Security of the People's Republic of China. GA 1002-2012 Public security protection requirements for hypertoxic chemicals and radioactive sources storage site[S]. Beijing: Standards Press of China, 2012.
- [8] Queiroz MA, Delso G, Wollenweber S, et al. Dose optimization in TOF-PET/MR compared to TOF-PET/CT[J]. PLoS One, 2015, 10(7): e0128842. DOI:10.1371/journal.pone.0128842.
- [9] 孔霞.超导磁共振成像系统的无源匀场算法研究[D].杭州:浙江大学, 2016.
Kong X. Research of passive shimming algorithms for the superconducting MRI systems[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2016.
- [10] 陆汉魁. PET 显像的散射校正和衰减校正[J].中华核医学杂志, 2004, 24(1): 58-60. DOI:10.3760/cma.j.issn.2095-2848.2004.01.028.
Lu HK. The scattering and attenuation correction for PET imaging[J]. Chin J Nucl Med, 2004, 24(1): 58-60. DOI:10.3760/cma.j.issn.2095-2848.2004.01.028.
- [11] Herzog H, Lerche C. Advances in clinical PET/MRI instrumentation[J]. PET Clin, 2016, 11(2): 95-103. DOI:10.1016/j.cpet.2015.09.001.
- [12] 阮伟伟,刘芳,孙逊,等.一体化 TOF-PET/MR 的临床应用与挑战[J].中国医学影像技术, 2018, 34(12): 1905-1908. DOI:10.13929/j.1003-3289.201804014.
Ruan WW, Liu F, Sun X, et al. Clinical application and challenge of integrative TOF-PET/MR[J]. Chin J Med Imaging Technol, 2018, 34(12): 1905-1908. DOI:10.13929/j.1003-3289.201804014.

(收稿日期:2019-09-26)

· 读者 · 作者 · 编者 ·

本刊对论文中化学元素与核素符号书写的要求

根据国家标准 GB3100~3102-1993《量和单位》,本刊对论文中化学元素与核素符号的书写规定如下。

- (1) 化学元素符号使用罗马(正)体,首字母大写,在符号后不加圆点。
- (2) 核素的核子数(质量数)标注在元素符号的左上角。例如: ^{14}N , ^{60}Co , 不写成 $^{14}\text{氮}$ 或 N^{14} , $^{60}\text{钴}$ 或 Co^{60} 。
- (3) 分子中核素的原子数标注在核素符号的右下角。例如: $^{14}\text{N}_2$ 。
- (4) 质子数(原子序数)标注在元素符号的左下角。例如: $_{82}\text{Pb}$, $_{26}\text{Fe}$ 。
- (5) 离子价和表明阴、阳离子的符号“+”或“-”标注于元素符号的右上角,离子价数写在符号前。例如:正 2 价的镁离子,应写成 Mg^{2+} , 不宜写成 Mg^{++} 。
- (6) 激发态标注在元素符号的右上角。例如: $^{99}\text{Tc}^m$, 不写成 $^{99m}\text{锝}$ 、 Tc^{99m} 或 ^{99m}Tc 。

本刊编辑部