

· 专 论 Special comment ·

介入磁共振技术进展

张 堃, 钱巧云, 宁瑞鹏

【摘要】 介入磁共振(MR)是一种借助磁共振成像(MRI)技术导引手术的新型治疗方式。尽管产品化 MR 介入系统早已问世,但在实际应用中仍然面临许多技术挑战。该文先从 MR 兼容性、成像实时性和图像质量等方面进行探讨,然后以 MR 测温技术为例,具体分析了测温成像中面临的一些技术问题。

【关键词】 介入磁共振; 磁共振兼容性; 成像实时性; 图像质量; 磁共振测温

中图分类号:R445.2 文献标志码:A 文章编号:1008-794X(2019)-011-1020-04

Recent progress in the technology of interventional magnetic resonance ZHANG Kun, QIAN Qiaoyun, NING Ruipeng. School of Physics and Electronic Science, East China Normal University, Shanghai Key Lab of Magnetic Resonance, Shanghai 200241, China

Corresponding author: NING Ruipeng, E-mail: rpnig@phy.ecnu.edu.cn

【Abstract】 Interventional magnetic resonance (MR) is a new type of surgical treatment that is guided by magnetic resonance imaging (MRI). Although commercialized magnetic resonance interventional systems have already been available for a long time, interventional MR device is still facing many technical challenges in practical application. In this paper, the compatibility of MR, real-time imaging and image quality are discussed first, then, taking MR temperature measuring technology as an example, some technical problems in thermometry imaging are discussed in detail. (J Intervent Radiol, 2019, 28: 1020-1023)

【Key words】 interventional magnetic resonance; magnetic resonance compatibility; real-time imaging; image quality; magnetic resonance thermometry

血管腔内介入治疗是一种借助医学影像技术导引手术治疗,从而减少手术创伤的新型治疗方式。目前用于介入治疗的医学影像技术主要包括超声、CT 和 MRI^[1-3]。与前两者相比,MRI 具有空间分辨率高、软组织对比度高、可任意方向断层、可多平面多角度成像、无电离辐射等优点,也是目前唯一可以无创定量测量人体内部组织温度的影像技术^[4]。尽管产品化的 MR 介入系统在 20 世纪 90 年代末即已问世^[5],但受限于 MR 原理和相关技术发展,MR 介入在实际应用中仍然面临诸如 MR 兼容性、成像实时性、图像质量等技术挑战。

MR 扫描过程中,受检者处于静磁场、梯度磁场和射频场之中。这就要求在 MR 导引治疗时,所采用的手术器械和仪器设备需具有兼容性。MR 仪器

附近出现的铁磁性物质会“飞”向磁体,极易对受检者和操作人员造成伤害。因此,MR 介入治疗过程中应用的手术器械和治疗设备等,均需要满足磁兼容要求。根据静磁场强度,MR 系统可分为高场系统和低场系统。静磁场强度越高,对磁兼容要求也越高。在高场 MR 仪器附近,静磁场对手术器械所产生的影响不仅表现为使其移位,还可能因器械构造而表现为扭矩,导致器械误触发或不能准确调节,进而影响治疗效果和安全。此外,MR 扫描过程中梯度磁场和射频场可能会导致位于成像范围内的金属(包括非铁磁性金属)表面产生涡流,进而发热。因此,金属器械和设备除了需要满足磁兼容外,若其体积较大且位于成像区域附近,还需要考虑涡流发热等问题。

对于探针和人体植入物,除了磁兼容和涡流发热外,还需要考虑磁化率伪影问题。金属材料磁化率通常远高于生物组织,这种差异会严重影响 MR 图像质量,导致金属物附近的组织被伪影覆盖。目前 MR 兼容的医疗器械和植入物主要由钛合金制

DOI:10.3969/j.issn.1008-794X.2019.011.003

作者单位: 200241 上海 华东师范大学物理与电子科学学院、上海市磁共振重点实验室

通信作者: 宁瑞鹏 E-mail: rpnig@phy.ecnu.edu.cn

成,但钛合金材料在高场 MR 图像中的磁化率伪影仍然比较严重^[6],会导致图像失去诊断价值。近年随着材料科学发展,科研人员不断尝试开发低磁化率金属材料,尤其是抗磁性合金材料,发现了越来越多兼具 MR 兼容性和生物相容性的金属材料^[7]。这对于介入 MR 技术推广,必将起到极大的促进作用。

比较于其它医学影像技术,MR 是一种扫描速度较慢的成像技术。提高成像速度,一直是 MR 领域科研人员和工程师的共同追求。随着近年高场超导系统和超快速成像方法的推广,MR 扫描速度得到了很大提升。从仪器硬件角度,梯度磁场切换速率对 MR 扫描速度有很大影响,切换速率越高,扫描速度越快。然而在梯度磁场不断切换过程中,梯度线圈在磁场作用下会发生振荡,从而产生梯度噪声。根据梯度噪声产生原理可知,磁场强度越高,梯度切换速率越大,则梯度噪声越强。因此,在高场 MR 系统上进行快速扫描时,噪声往往非常大,而低场系统梯度噪声通常较小。常规应用中为了保护受检者听力,可以为其佩戴耳塞。但在介入治疗过程中,医护人员也将长时间处于强噪声环境中,也需要注意保护听力。在不改变 MR 仪器硬件前提下,优化数据采集方案是一种降低梯度噪声的有效方法。在经过优化的数据采集方案中,K 空间填充次序与常规扫描时填充次序不同,可以在保持数据采集时间基本不变的情况下,避免梯度磁场在短时间内剧烈切换,从而降低梯度噪声。从脉冲序列和图像重建角度,尽管提高 MR 扫描速度的方法很多,但均需要在图像信噪比、空间分辨率与成像速度之间进行取舍。根据成像原理,高场 MR 图像的信噪比要优于低场系统所得的图像。因此,很多快速和超快速成像方法主要应用于高场 MR 系统。尽管理论上这些方法也可以应用于低场 MR,但由于低场 MR 图像信噪比低,不宜采用牺牲信噪比的方法来换取成像速度,因而低场成像实时性较差。尽管如此,由于低场 MR 成像系统具有更高的空间开放度^[8],低场仪器在介入 MR 领域一直占据着重要地位,而低场快速扫描技术也一直受到国内 MR 厂商和序列研究开发人员的关注。近年来国内低场 MR 成像技术得到了快速发展,例如上海爱立峰医疗科技公司的低场 0.4T MR,目前可以实现 5 s 每幅图像的扫描速度,该图像刷新率可以满足介入治疗的一般需求。进一步分析可以发现,介入治疗过程中不同时间点获得的 MR 图像之间具有很高的相似度。利用这一特点,结合部分 K 空间填充技术和稀疏采样技

术,可以一定程度上提高低场 MR 扫描速度,使其进一步满足介入治疗对图像刷新率和延迟时间的要求。

评价医学图像质量的主要指标包括信噪比、对比度和分辨力。影响 MR 图像质量的因素包括内在因素和外在因素。内在因素由组织特性决定,一般包括质子密度、T1 和 T2、化学位移、分子扩散、流动和灌注等,而外在因素主要包括成像方法、参数及仪器状态。产品化的 MR 仪器,一般会针对扫描部位和常规诊断的需求,提供默认扫描方案。这些扫描方案是根据大量实际案例中医师对图像质量的评价,以及具体仪器配置和性能而设定,但目前介入 MR 图像质量评价标准尚未完全确定。典型的介入 MR 包括术前定位和边界勾画、术中监控及术后评估,其中评价术前和术后图像质量可以参考常规诊断标准。然而,评价术中监控的图像质量往往难以采用常规标准,这主要是由于术中监控需要的不仅是组织结构信息(结构图),通常还需要其它特征信息(特征图),例如肿瘤热消融过程中 MR 成像被用于监控人体组织温度分布情况^[9],而温度分布图质量很难用常规 MR 图像质量标准来评价。客观定量地评价特征图质量,对保证 MR 术中监控的有效性非常重要,同时也对促进介入 MR 技术发展非常重要,而建立完善的评价体系,离不开临床医师、工程师和科研人员的共同努力。以下以 MR 测温技术为例,具体分析 MR 成像在热疗监控过程中需要注意的技术问题。

近年来,微创热疗在肿瘤治疗领域受到越来越广泛的关注。热疗是一种利用温度升高引起机体生理变化而达到治疗疾病目的的方法。在微创热疗中,既要保证对肿瘤有效治疗,又要尽量减少治疗对正常组织造成的损伤。因此,热疗过程中监控肿瘤组织和周围正常组织的温度,对实现“微创”有着举足轻重的作用。目前用于无创活体测温的医学影像技术主要包括彩色超声、CT 和 MRI。与彩色超声和 CT 相比,MRI 除了具有分辨率高、软组织对比度高等特点,还具有图像对比度与组织温度相关性高的优势。热疗过程中借助 MR 图像,医师不但可以对病灶进行精确定位和边界勾画,还可以根据组织温度分布及时调节所施加的热剂量,从而在有效治疗的同时降低对正常组织的损伤。因此,MR 测温被认为是具有发展前景的无创活体测温技术。

MR 测温方法主要包括质子共振频率法、扩散系数法和纵向弛豫时间法。其中质子共振频率法被

认为是最具临床应用前景的高场 MR 测温方法^[10-11]。该方法基本原理是,温度变化会引起氢原子核周围电子云分布发生变化,进而导致氢核共振频率发生微小偏移。尽管这种共振频率偏移非常微小,但只要设置合适的回波时间,即可引起 MR 信号相位的显著变化。因此,为了可以清晰地呈现质子共振频率变化,一般会采用 GRE 序列或 FLASH 序列进行扫描,并利用所获相位图像信息来表示温度的空间分布。与另外两种 MR 测温方法相比,质子共振频率测温法最大优点是,除脂肪外,测量其它组织温度时不需要针对不同组织进行校正。由于脂肪内质子共振频率变化与其它组织不同,在实际测温过程中一般要对脂肪信号进行抑制。

目前,MR 测温研究主要集中在超导系统上进行。超导 MRI 系统具有扫描速度快、图像质量高等优点,但常规超导系统主要用于临床诊断,其腔体空间狭小,不利于实施术中监控。尽管超导系统的磁体也可以设计成开放式结构,但其造价相当昂贵。此外,由于磁极间存在相互作用,出于机械稳定性和安全性等方面考虑,开放式超导系统场强往往只达到略高于永磁系统水平。与之相比,低场永磁系统价格和维护费用低,开放度高,便于实施术中监控。但基于低场永磁系统进行 MR 测温成像,需要解决一些技术问题。

首先,永磁体产生的磁场强度和磁场空间分布对环境温度的改变非常敏感。此外,由于结构开放度高和主磁场一般为垂直场等原因,永磁系统对外界电磁场的波动比超导系统更加敏感。为了消除这些因素对测温结果产生的不良影响,一方面需要对系统安装和运行环境进行严格监控,另一方面需要配备独立的监控系统^[12],对 MR 成像系统的场漂移和场分布改变进行监控,以便在后续图像处理过程中对测温结果进行补偿和校正。

其次,高场 MR 测温广泛采用的质子共振频率法,其结果对温度的灵敏度正比于主磁场强度。因此,若采用该方法进行测温,相同温度改变要累计出同样的相位变化,在低场系统上所需的回波时间将是超导系统的几倍。此外,回波时间增加会导致信噪比下降,为了获得相同的测温灵敏度,就需要增加扫描累加次数。这将导致扫描时间急剧增加,既造成测温实时性下降,又加剧了场漂对测温结果的影响。因此,在低场永磁系统上进行测温,质子共振频率法不是最好的选择,应考虑另外两种 MR 测温方法,即扩散系数测温法和纵向弛豫时间测温法。

扩散系数测温法^[13]的原理是物体温度升高,其内部分子的布朗运动加剧,扩散系数随之改变,因此可以通过高扩散系数的弥散加权成像(DWI)获得温度分布信息。然而在低场 MR 系统上,DWI 信号强度非常低,且扫描序列对梯度场强度要求很高,一般低场 MR 系统的配置无法满足。此外,即使为低场系统配备了特殊的梯度单元,强梯度电流导致的发热必然引起场漂和场分布改变加剧,仍然会导致低场测温精度下降,因此该方法的测温稳定性在永磁系统中难以得到保证。

纵向弛豫时间测温法的原理是,当组织温度升高时,其内部质子与其周围环境之间相互作用会随之改变,进而导致纵向弛豫时间发生改变^[14]。一般来说,在组织未被彻底破坏之前,其纵向弛豫时间随温度升高而增加,因而在 T1 加权图像中被加热的部分信号强度会变低。纵向弛豫时间测温法的缺点主要在于温度-图像灰度曲线依赖组织类型,这主要是由不同组织的 T1 不同所导致。因此,该测温方法在高场 MR 系统中的整体效果不如质子共振频率测温法。但在低场系统中,由于大部分组织 T1 值均比其在高场系统上的 T1 值小,温度-图像灰度曲线在组织间差异也随之减小。在不需要精确测量温度值情况下,尤其是只需要确定温度范围或是否达到温度阈值的应用场景下,纵向弛豫时间法是实现低场 MR 测温的较好选择。

总体而言,低场永磁 MR 测温成像在测温精度和实时性等方面虽不如高场超导系统,但在空间开放度和兼容性方面的优势非常明显。尽管在高场 MR 系统上纵向弛豫时间法的测温效果不如质子共振频率法,但前者是实现低场 MR 测温的好方法。随着软硬件技术和脉冲序列技术的发展,相信低场 MR 成像技术在介入治疗领域的应用,将会越来越广泛。

[参 考 文 献]

- [1] 朱海云,程永德. 介入放射学抑或介入医学[J]. 介入放射学杂志, 2017, 26: 577-578.
- [2] 方可薇,张莉,岳茜,等. 磁共振介入在肝细胞癌治疗中的应用[J]. 影像诊断与介入放射学, 2018, 27: 147-150.
- [3] 钟红珊,徐克. 中国介入医学发展的亮点,痛点与焦点[J]. 介入放射学杂志, 2019, 28: 407-410.
- [4] Kahn T, Busse H. Interventional Magnetic Resonance Imaging [M]. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2012: 3-16.
- [5] 虞上宠,吴剑,胡曙光. 磁共振导航微创技术的研究进展[J]. 北京生物医学工程, 2015, 34: 520-525.
- [6] Lee MJ, Kim S, Lee SA, et al. Overcoming artifacts from

- metallic orthopedic implants at high-field-strength MR imaging and multidetector CT[J]. Radiographics, 2007, 27: 791-803.
- [7] 任伊宾, 李俊, 王青川, 等. 磁共振兼容合金研究[J]. 金属学报, 2017, 53: 1323-1330.
- [8] 罗时石, 王泽港, 胡建伟, 等. 磁共振介入技术与原则[J]. 医学影像学杂志, 2003, 13: 943-946.
- [9] Ferenc AJ. MR-guided focused ultrasound surgery[J]. Annu Rev Med, 2009, 60: 417-430.
- [10] De Poorter J, De Wagter C, De Deene Y, et al. Noninvasive MRI thermometry with the proton resonance frequency (PRF) method: in vivo results in human muscle[J]. Magn Reson Med, 1995, 33: 74-81.
- [11] McDannold N, Tempny C, Jolesz F, et al. Evaluation of referenceless thermometry in MRI-guided focused ultrasound surgery of uterine fibroids[J]. J Magn Reson Imaging, 2008, 28: 1026-1032.
- [12] 宁瑞鹏, 朱岩, 李颀. 一种简单的 MR 兼容测温装置[J]. 波谱学杂志, 2010, 27: 157-162.
- [13] Bihan DL, Delannoy J, Levin RL. Temperature mapping with MR imaging of molecular diffusion: application to hyperthermia[J]. Radiology, 1989, 171: 853-857.
- [14] Schwarzbauer C, Zange J, Adolf H, et al. Fast measurement of temperature distributions by rapid T1 mapping[J]. J Magn Reson Series B, 1995, 106: 178-180.
- (收稿日期:2019-04-29)
(本文编辑:边 倩)

·学术争鸣 Academic contending·

读《吗啡注射液复合右美托咪定在肝动脉灌注化疗栓塞治疗肝癌术中的应用》一文有感

编辑部老师:您好!

近日阅读发表于贵刊 2019 年第 28 卷第 8 期第 738 页《吗啡注射液复合右美托咪定在肝动脉灌注化疗栓塞治疗肝癌术中的应用》^[1]一文有几处疑惑。一是文章自述为双盲研究,然而方法部分却有“研究组患者 TACE 术后按维持量继续泵入右美托咪定 6 h,根据患者疼痛情况调整右美托咪定泵入剂量,对照组根据疼痛情况补充吗啡注射液”描述。这两种止痛方式截然不同,如何予以双盲研究未予描述清楚。二是文章定义手术时间为自动脉穿刺开始至压迫止血,研究组和对照组平均手术时间分别为 29.3 min 和 30.2 min,所有患者均应用微导管灌注奥沙利铂(100 mg/m²),然后用碘油+表柔比星栓塞,最后用空白微球栓塞,而整个手术仅需要 30 min。文章纳入患者为巴塞罗那临床肝癌(BCLC)分期 B/C 期,肿瘤状态为多个或存在血管浸润,或存在转移,病情复杂,是否存在肝外血管供血,是否进行充分的血管造影未予交待;根据相关指南^[2]中肝动脉灌注化疗药物的时间应≥20 min,相信该组患者灌注时间也不会太短,但问题是总

手术时间为 30 min,是否达到了指南要求的栓塞终点。三是所有患者肝动脉灌注化疗栓塞术前均预防性应用吗啡,这是否符合伦理,会否造成吗啡滥用,能否真正达到止痛作用(患者疼痛多发生于术后若干小时),均需好好探讨。

读者:贾中芝

南京医科大学附属常州第二人民医院介入血管科

[参考文献]

- [1] 杨学刚, 吴戈, 何乾文, 等. 吗啡注射液复合右美托咪定在肝动脉灌注化疗栓塞治疗肝癌术中的应用[J]. 介入放射学杂志, 2019, 28: 738-741.
- [2] 中国医师协会介入医师分会. 中国肝细胞癌经动脉化疗栓塞治疗(TACE)临床实践指南[J]. 介入放射学杂志, 2018, 27: 1117-1126.