

## Ultrahigh field 5.0T cardiac MRI: Status, challenges and future

GE Linqi<sup>1</sup>, GUO Yubo<sup>2</sup>, WANG Haifeng<sup>1</sup>, ZHOU Yihang<sup>3</sup>, LIANG Dong<sup>3</sup>,  
ZHENG Hairong<sup>1</sup>, ZHU Yanjie<sup>1\*</sup>

(1. Paul C. Lauterbur Research Center for Biomedical Imaging, 3. Center for Medical AI, Shenzhen Institute of Advanced Technology, Chinese Academy of Sciences, Shenzhen 518055, China;  
2. Department of Radiology, State Key Laboratory of Complex Severe and Rare Diseases, Peking Union Medical College Hospital, Chinese Academy of Medical Sciences and Peking Union Medical College, Beijing 100730, China)

[Abstract] Conventional 1.5T and 3.0T cardiac MRI (CMRI) had been widely used. The ultrahigh field MR behaved better in image resolution and signal-to-noise ratio. The domestic 5.0T whole-body ultrahigh field MRI had better balance between the field strength and quality in CMRI, which was expected to improve imaging quality and efficiency. The status challenges and future of 5.0T CMRI were reviewed in this paper.

[Keywords] diagnostic techniques, cardiovascular; magnetic resonance imaging; electromagnetic fields; ultrahigh field  
DOI:10.13929/j.issn.1003-3289.2024.05.007

## 超高场 5.0T 心脏 MRI: 现状、挑战与未来

葛琳琪<sup>1</sup>, 郭玉博<sup>2</sup>, 王海峰<sup>1</sup>, 周谊航<sup>3</sup>, 梁 栋<sup>3</sup>, 郑海荣<sup>1</sup>, 朱燕杰<sup>1\*</sup>

(1. 中国科学院深圳先进技术研究院劳特伯生物医学成像研究中心, 3. 医学人工智能中心, 广东 深圳 518055;  
2. 中国医学科学院 北京协和医学院 北京协和医院重症国家重点实验室放射科, 北京 100730)

[摘要] 常规 1.5T 和 3.0T 心脏 MRI (CMRI) 已获广泛应用; 超高场 MRI 分辨率和信噪比更优, 5.0T 全身超高场 MRI 能更好地平衡心脏成像场强与质量, 有望提升成像质量及效率。本文就 5.0T CMRI 现状、挑战与未来发展方向进行综述。

[关键词] 诊断技术, 心血管; 磁共振成像; 电磁场; 超高场

[中图分类号] R322.11; R445.2 [文献标识码] A [文章编号] 1003-3289(2024)05-0666-05

心脏 MRI (cardiac MRI, CMRI) 可从不同方位及角度无创、精确评估心肌组织特性<sup>[1]</sup>, 具有软组织对比度及分辨率高、扫描视野大等优势, 可用于检查心脏结构、诊断心脏疾病、评估及监测心脏功能<sup>[2-5]</sup>。常规 1.5T 和 3.0T CMRI 已在临床广泛应用, 而新兴超高场 MRI 分辨率和信噪比 (signal-to-noise ratio, SNR) 表现更佳<sup>[6]</sup>、显示精细解剖结构效果更好<sup>[7-8]</sup>, 但用于心脏成像可能受到心电信号触发不稳定、场不均匀性、

射频功率沉积等限制<sup>[9]</sup>。近期 5.0T 全身超高场 MRI 更好地平衡了心脏成像场强与质量, 已初步用于心脏成像<sup>[10-11]</sup>。本文就 5.0T CMRI 现状、挑战与未来发展方法进行综述。

### 1 现状

CMRI 通过多种成像方法评估心脏结构、功能及其变化。其中, 电影成像技术可连续捕捉心脏运动<sup>[12]</sup>, 黑血成像可清晰显示心肌组织结构和形态<sup>[13-15]</sup>, 钆对比剂

[基金项目] 国家自然科学基金(62322119)。

[第一作者] 葛琳琪(2002—), 女, 山东济宁人, 在读本科。研究方向: 生物医学工程。E-mail: lq.ge@siat.ac.cn

[通信作者] 朱燕杰, 中国科学院深圳先进技术研究院劳特伯生物医学成像研究中心, 518055。E-mail: yj.zhu@siat.ac.cn

[收稿日期] 2023-12-30 [修回日期] 2024-04-14

延迟强化(late gadolinium enhancement, LGE)成像技术可评估心肌纤维化情况<sup>[15-16]</sup>;而基于 T1、T2 和 T2\* 弛豫时间等定量成像技术<sup>[17-18]</sup>可量化反映心肌纤维化、水肿,以及炎症、蛋白和铁沉淀等心肌组织特性<sup>[19-20]</sup>,以区分急、慢性心肌损伤<sup>[21]</sup>。

当前 5.0T CMRI 所用成像技术包括以梯度回波 (gradient echo, GRE) 序列代替平衡稳态自由进动 (balanced steady-state free precession, bSSFP) 序列,以及优化快速自旋回波 (fast spin echo, FSE) 序列脉冲 FA 等,能在获取更高图像质量的同时提高成像稳定性,并保证射频比吸收率 (specific absorption rate, SAR) 不超出限制。得益于高磁场强度,相比 1.5T 或 3.0T,5.0T CMRI 的 SNR 及空间分辨率均更高,有助于显示微小结构、提高评估及诊断准确性。如以 GRE 序列采集的高分辨率电影成像的分辨率达  $1.0\text{ mm}\times 1.0\text{ mm}$ <sup>[10]</sup>,可清晰显示心腔轮廓、乳头肌和肌小梁;以相位敏感反转恢复 (phase sensitive inversion recovery, PSIR) 序列行 LGE 成像的分辨率达  $0.88\text{ mm}\times 0.88\text{ mm}$ <sup>[22]</sup>,可获得高分辨率和高对比度心脏图像,尤其适用于识别及定量分析心肌梗死、纤

维化或炎症等改变(图 1)。

## 2 挑战

磁流体效应、磁场不均匀等问题可能造成 5.0T CMRI 出现黑带伪影,使图像质量下降并增加重建难度等;心脏成像中的伪影可能掩盖或模糊关键解剖信息,增加分析图像难度、降低结果准确性与可靠性;伪影还可能与心肌梗死、纤维化等影像学表现相混淆而致误诊或漏诊。此外,超高场强可能造成 SAR 过高,导致局部过热风险等安全性问题。

2.1 磁流体效应干扰心电信号 心脏搏动可在 CMRI 中形成运动伪影而影响图像质量。利用心动周期中的心电信号于特定时刻采集图像或分段采集图像联合后处理技术可减少运动伪影;但心电信号可受磁流体效应干扰,引起超高场成像中心电触发不准确、心电信号发生畸变,导致运动伪影增加、成像时间延长等问题。磁流体效应指血液中的带电粒子(主要是离子)在磁场中移动而产生涡旋电流及微小磁场,与超高场强 MR 设备施加的磁场相互作用可致心电信号扭曲而难以准确检测 R 波触发信号(图 2);磁场强度越高,则磁流体效应越重。

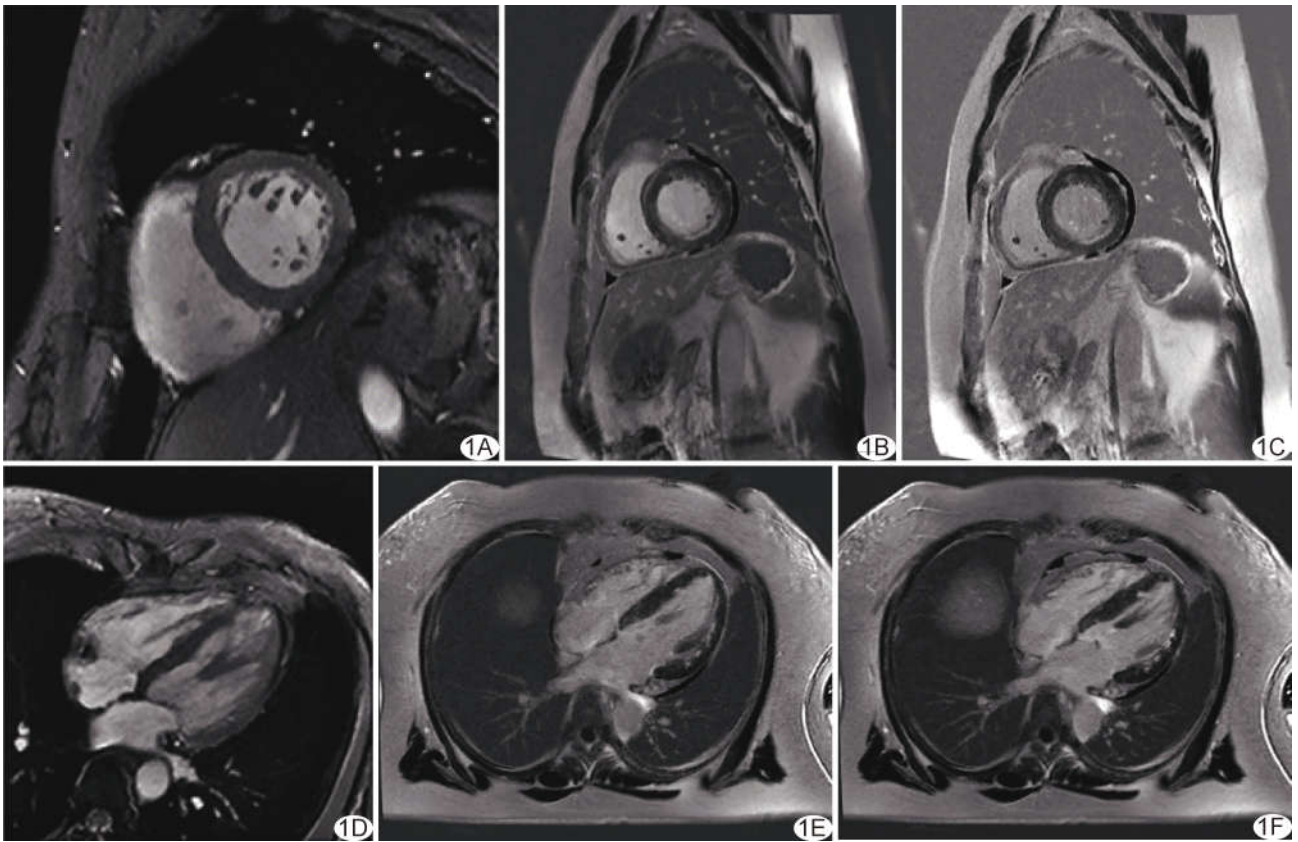


图 1 5.0T CMRI A~C. 短轴电影成像(A<sup>[10]</sup>)和 LGE 成像(B<sup>[10]</sup>、C),分辨率依次为  $1.0\text{ mm}\times 1.0\text{ mm}$ 、 $1.04\text{ mm}\times 1.04\text{ mm}$ 、 $0.88\text{ mm}\times 0.88\text{ mm}$ ; D~F. 长轴电影成像(D)和 LGE 成像(E、F),分辨率依次为  $1.0\text{ mm}\times 1.0\text{ mm}$ 、 $1.04\text{ mm}\times 1.04\text{ mm}$ 、 $0.88\text{ mm}\times 0.88\text{ mm}$

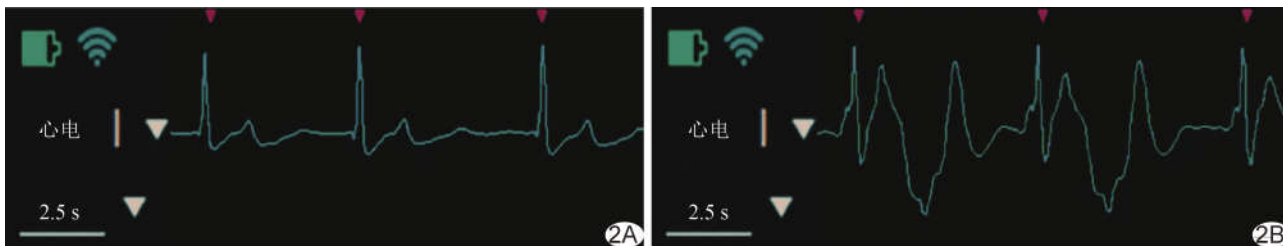


图 2 磁场外部(A)和受磁流体效应影响的磁体内部(B)心电信号曲线

2.2 磁场不均匀造成黑带伪影 超高场 MRI 中,主磁场(B<sub>0</sub>场)和射频场(B<sub>1</sub>场)不均匀可造成图像亮度不均匀及产生磁敏感性伪影等,使其应用受限<sup>[23-24]</sup>。

B<sub>0</sub>场不均匀主要由磁体自身缺陷、人体不同组织磁化率存在差异及磁体与人体相互作用造成;程度随场强增加而增加,不利于心脏等结构复杂器官成像。局部磁场不均匀导致相位失配可形成黑带伪影,在bSSFP序列等高对比度和快速梯度回波序列,以及心脏邻近肺部或膈肌区域等磁化率差异较大部位尤为明显。

B<sub>1</sub>场不均匀主要由短波射频效应引起;射频波长与场强成反比,随磁场强度增加,射频波波长缩短。5.0T MR设备的射频波波长为16 cm,显著低于1.5T(波长52 cm)、3.0T(波长26 cm)及人体全身宽度,导致受检者体内B<sub>1</sub>场分布不均匀,使大视野成像受限;还可因驻波效应致无法有效激发心肌组织引发信号丢失(主要见于FSE序列,图3)及产生黑带伪影(主要见于GRE序列,图4)等问题。

2.3 射频功率沉积致高 SAR 确保超高场 MR 应用安全性十分重要。高 SAR 意味着人体组织吸收更多射频能量并转化为热量,可致体内局部或整体温度升高,引发不适甚至组织损伤。随场强增加,射频功率沉积增加,可致人体局部过热,故需重点关注 SAR,但对此进行准确监测和调整相对复杂<sup>[25]</sup>。

### 3 成像优化

国产 5.0T 全身超高场 MR 设备已初步用于心脏

成像,通过引入人工智能(artificial intelligence, AI)技术<sup>[26]</sup>及优选成像序列等方式提高成像质量与安全性,最终可获得分辨率和 SNR 更高的 CMRI。

3.1 心脏匀场 引入 AI 技术可改进 B<sub>0</sub>场均匀性,有助于提高成像质量、缩短扫描时间<sup>[27]</sup>。利用 AI 技术可在一定程度上避免心电波形受磁流体效应干扰而减少成像限制<sup>[28-29]</sup>;CMRI 与 AI 相结合有可能简化成像流程、提高成像速度,在不影响图像质量的前提下缩短采集时间、改善磁场均匀性<sup>[30]</sup>。基于 AI 技术的通用匀场工具可准确分割心脏区域,有针对性地改善磁场均匀性。相比传统容积匀场方式,以 AI 匀场所获图像均匀性更高。

还可利用并行发射技术改善 B<sub>1</sub>场不均匀性<sup>[31-36]</sup>,即同时以多个独立控制的射频线圈发射射频脉冲,分别设置每个通道的射频幅值和相位,以使多通道射频场相互补充。与传统单一射频源发射相比,并行发射技术可提供的可控参数更多、设置更为灵活,能有效提高目标区域内 B<sub>1</sub>场的均匀性,改善或避免驻波效应及黑带伪影而提升图像质量(图5)。此外,AI 技术能准确分割心脏结构,此优势亦可用于 B<sub>1</sub>匀场。

3.2 定量成像 5.0T CMR 可提供更高的信号强度和分辨率,但 T<sub>1</sub>弛豫时间延长、T<sub>2</sub><sup>\*</sup>弛豫时间缩短,前者可致 T<sub>1</sub>改良 Look-Locker 反转恢复(modified Look-Locker inversion recovery, MOLLI)<sup>[37]</sup>序列成像中的磁化矢量恢复不足而严重低估 T<sub>1</sub>值,后者则可使 T<sub>2</sub><sup>\*</sup>定量序列图像 SNR 下降;二者均能在一定程

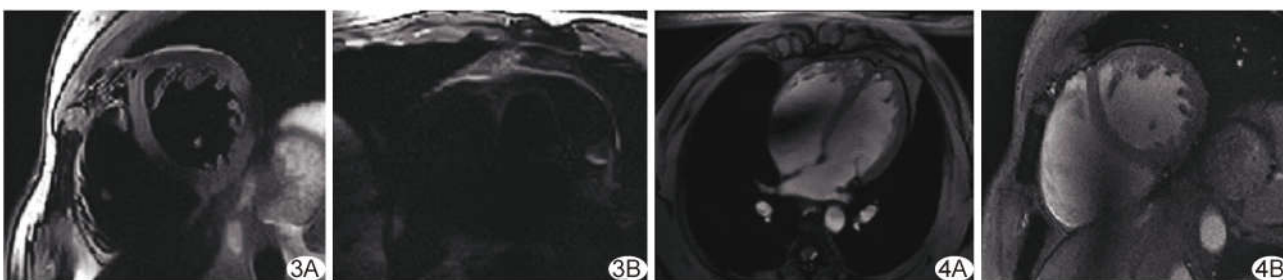


图 3 5.0T CMR FSE 序列图像 A. 无法分辨近膈肌处心肌组织; B. 无法分辨心脏轮廓 明显黑带伪影 A. 长轴; B. 短轴

图 4 5.0T CMR GRE 序列图示右心室区域

度上导致图像质量和对比度降低。但 5.0T CMR 的上述特征并非完全劣势, T1 时间增加可在 T1 定量成像中显示更多信息, 借助特殊成像序列和后处理技术, 如连续 GRE 采集的 Look-Locker 技术(图 6), 或结合读出校正等方式<sup>[37]</sup>, 或可进一步提升 5.0T CMR 定量成像性能。

3.3 控制 SAR 降低射频脉冲功率或持续时间, 以及延长脉冲间隔时间均可降低 SAR, 但均使超高场 MR 序列和技术、尤其 SAR 敏感的高分辨率或高对比度成像序列应用受限, 进而影响图像质量或扫描效率。作为常用 CMR 序列之一的 bSSFP 序列亦属高 SAR 序列, 难以用于超高场 MRI, 故 5.0T CMRI 采用 GRE 序列, 虽提升 SNR 的效果有所降低, 但能在一定程度上克服 bSSFP 序列对主磁场不均匀性较为敏感及高 SAR 等不足。此外, 针对 T2 准备脉冲等 SAR 相对比较高的序列, 可通过调整脉冲序列、优化脉冲 FA 或选择替代方案降低 SAR, 以提高其应用安全性。

#### 4 展望

相比 1.5T 和 3.0T, 5.0T MR 具有高 SNR 和高分辨率成像优势。5.0T CMRI 的可行性和可重复性均已得到证实<sup>[38]</sup>; 5.0T CMR 高分辨率 LGE 可提供更多图像细节、清晰显示细小心肌梗死。未来应充分发挥设备潜力, 提升心脏成像扫描效率, 实现基于 5.0T CMR 的多模态成像及心脏代谢成像等突破。

利益冲突: 全体作者声明无利益冲突。

作者贡献: 葛琳琪查阅文献、撰写文章; 郭玉博查阅文献; 王海峰、周谊航、梁栋、郑海荣修改文章; 朱燕杰指导、审阅文章和经费支持。

#### [参考文献]

[1] HOLTACKERS R J, WILDBERGER J E, WINTERSPERGER B J, et al. Impact of field strength in clinical cardiac magnetic resonance imaging[J]. Invest Radiol, 2021, 56(11):764-772.

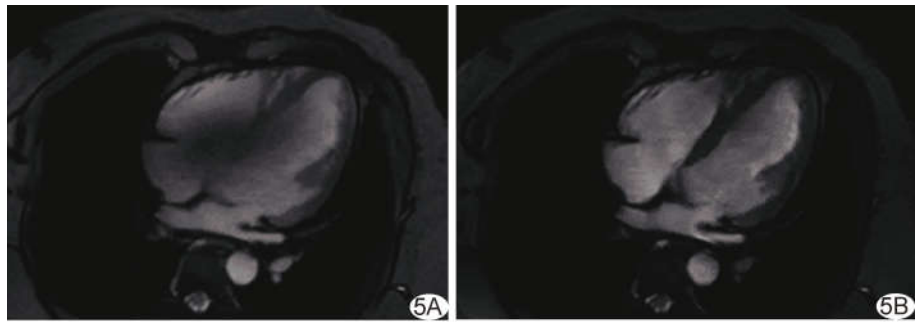


图 5 引入射频匀场技术前(A)、后(B)5.0T CMR 电影图像

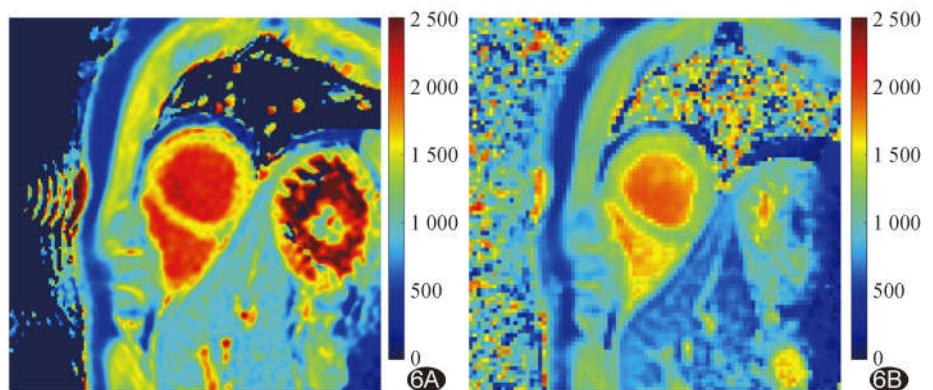


图 6 利用 5.0T 以 Look-Locker 技术(A)和 MOLLI 技术(B)连续 GRE 采集的定量 CMRI

- [2] LEINER T, BOGAERT J, FRIEDRICH M G, et al. SCMR Position Paper (2020) on clinical indications for cardiovascular magnetic resonance[J]. J Cardiovasc Magn Reson, 2020, 22(1):76.
- [3] GUO R, WEINGÄRTNER S, ŠIURYTE P, et al. Emerging techniques in cardiac magnetic resonance imaging [J]. J Magn Reson Imaging, 2022, 55(4):1043-1059.
- [4] SEETHARAM K, LERAKIS S. Cardiac magnetic resonance imaging: The future is bright [J]. F1000Res, 2019, 8: F1000 Faculty Rev-1636.
- [5] DEMIRKIRAN A, EVERAARS H, AMIER R P, et al. Cardiovascular magnetic resonance techniques for tissue characterization after acute myocardial injury [J]. Eur Heart J Cardiovasc Imaging, 2019, 20(7):723-734.
- [6] BARISANO G, SEPEHRBAND F, MA S, et al. Clinical 7 T MRI: Are we there yet? A review about magnetic resonance imaging at ultra-high field [J]. Br J Radiol, 2019, 92(1094):20180492.
- [7] LADD M E, BACHERT P, MEYERSPEER M, et al. Pros and cons of ultra-high-field MRI/MRS for human application [J]. Prog Nucl Magn Reson Spectrosc, 2018, 109:1-50.
- [8] LOTT J, PLATT T, NIESPOREK S C, et al. Corrections of myocardial tissue sodium concentration measurements in human cardiac <sup>23</sup>Na MRI at 7 Tesla [J]. Magn Reson Med, 2019, 82(1):159-173.
- [9] REITER T, LOHR D, HOCK M, et al. On the way to routine cardiac MRI at 7 Tesla - A pilot study on consecutive 84

- examinations[J]. PLoS One, 2021, 16(7):e0252797.
- [10] LIN L, LIU P, SUN G, et al. Bi-ventricular assessment with cardiovascular magnetic resonance at 5 Tesla: A pilot study[J]. Front Cardiovasc Med, 2022, 9:913707.
- [11] LAN L, HU H, SUN W, et al. Feasibility of cardiovascular magnetic resonance imaging at 5T in comparison to 3T [J/OL]. (2022-10-25)[2023-12-30]. <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-2171514/v1>.
- [12] CURTIS A D, CHENG H M. Primer and historical review on rapid cardiac CINE MRI[J]. J Magn Reson Imaging, 2022, 55(2):373-388.
- [13] GUAN X, CHEN Y, YANG H J, et al. Assessment of intramyocardial hemorrhage with dark-blood T2\*-weighted cardiovascular magnetic resonance [J]. J Cardiovasc Magn Reson, 2021, 23(1):88.
- [14] KAWEL-BOEHM N, BREMERICH J. Dark-blood late gadolinium enhancement: A major advance for cardiac MRI[J]. Radiology, 2022, 305(2):339-340.
- [15] HOLTACKERS R J, Van De HEYNING C M, Chiribiri A, et al. Dark-blood late gadolinium enhancement cardiovascular magnetic resonance for improved detection of subendocardial scar: A review of current techniques[J]. J Cardiovasc Magn Reson, 2021, 23(1):96.
- [16] STEVENSON A, BRAY J J H, TREGIDGO L, et al. Prognostic value of late gadolinium enhancement detected on cardiac magnetic resonance in cardiac sarcoidosis [J]. JACC Cardiovasc Imaging, 2023, 16(3):345-357.
- [17] SERAPHIM A, KNOTT K D, AUGUSTO J, et al. Quantitative cardiac MRI[J]. J Magn Reson Imaging, 2020, 51(3):693-711.
- [18] JEROSCH-HEROLD M, COELHO-FILHO O. Cardiac MRI T1 and T2 mapping: A new crystal ball?[J]. Radiology, 2022, 305(2):327-328.
- [19] PALMISANO A, BENEDETTI G, FALETTI R, et al. Early T1 myocardial MRI mapping: Value in detecting myocardial hyperemia in acute myocarditis[J]. Radiology, 2020, 295(2):316-325.
- [20] BAESSLER B, LUECKE C, LURZ J, et al. Cardiac MRI and texture analysis of myocardial T1 and T2 maps in myocarditis with acute versus chronic symptoms of heart failure [J]. Radiology, 2019, 292(3):608-617.
- [21] WARNICA W, Al-ARNAWOOT A, STANIMIROVIC A, et al. Clinical impact of cardiac MRI T1 and T2 parametric mapping in patients with suspected cardiomyopathy[J]. Radiology, 2022, 305(2):319-326.
- [22] PENNIG L, LENNARTZ S, WAGNER A, et al. Clinical application of free-breathing 3D whole heart late gadolinium enhancement cardiovascular magnetic resonance with high isotropic spatial resolution using Compressed SENSE [J]. J Cardiovasc Magn Reson, 2020, 22(1):89.
- [23] MULLEN M, GARWOOD M. Contemporary approaches to high-field magnetic resonance imaging with large field inhomogeneity[J]. Prog Nucl Magn Reson Spectrosc, 2020, 120-121:95-108.
- [24] NGO G C, BILGIC B, GAGOSKI B A, et al. Correction of magnetic field inhomogeneity effects for fast quantitative susceptibility mapping [J]. Magn Reson Med, 2019, 81(3):1645-1658.
- [25] FIEDLER T M, LADD M E, BITZ A K. SAR simulations & safety[J]. Neuroimage, 2018, 168:33-58.
- [26] 高家红, 雷皓, 陈群, 等. 磁共振成像发展综述[J]. 中国科学(生命科学), 2020, 50(11):1285-1295.
- [27] EDALATI M, ZHENG Y, WATKINS M P, et al. Implementation and prospective clinical validation of AI-based planning and shimming techniques in cardiac MRI [J]. Med Phys, 2022, 49(1):129-143.
- [28] CHOWDHURY M H, CHOWDHURY M E H, KHAN M S, et al. Self-attention MHDNet: A novel deep learning model for the detection of R-peaks in the electrocardiogram signals corrupted with magnetohydrodynamic effect[J]. Bioengineering (Basel), 2023, 10(5):542.
- [29] MEHRI M, CALMON G, ODILLE F, et al. A generative adversarial network to synthesize 3D magnetohydrodynamic distortions for electrocardiogram analyses applied to cardiac magnetic resonance imaging[J]. Sensors (Basel), 2023, 23(21):8691.
- [30] AIAREF S J, ANCHOUCHE K, SINGH G, et al. Clinical applications of machine learning in cardiovascular disease and its relevance to cardiac imaging[J]. Eur Heart J, 2019, 40(24):1975-1986.
- [31] STEENSMA B R, VOOGT I J, LEINER T, et al. An 8-channel Tx/Rx dipole array combined with 16 Rx loops for high-resolution functional cardiac imaging at 7 T [J]. MAGMA, 2018, 31(1):7-18.
- [32] ORZADA S, SOLBACH K, GRATZ M, et al. A 32-channel parallel transmit system add-on for 7T MRI [J]. PLoS One, 2019, 14(9):e0222452.
- [33] DENIZ C M. Parallel transmission for ultrahigh field MRI[J]. Top Magn Reson Imaging, 2019, 28(3):159-171.
- [34] RIETSCH S H G, ORZADA S, BITZ A K, et al. Parallel transmit capability of various RF transmit elements and arrays at 7T MRI[J]. Magn Reson Med, 2018, 79(2):1116-1126.
- [35] 骆俊. 5T 磁共振无磁射频功率放大技术研究[D]. 重庆:重庆理工大学, 2022:2.
- [36] 尹雪彤. 5T 人体磁共振多通道射频激发方法[D]. 北京:中国科学院大学, 2022:3.
- [37] SHAO J, NGUYEN K L, NATSUAKI Y, et al. Instantaneous signal loss simulation (InSiL): An improved algorithm for myocardial TI mapping using the MOLLI sequence[J]. J Magn Reson Imaging, 2015, 41(3):721-729.
- [38] 曾开奇, 韦少丽, 王光明, 等. 基于国产替代背景下的 5.0T 核磁共振新技术进展及其优势分析[J]. 中国医疗器械信息, 2023, 29(24):41-43.