

深度学习辅助压缩感知技术在心力衰竭患者心脏磁共振中的临床应用

严祥虎, 罗毅, 冉玲平, 夏黎明, 张诗雨, 黄璐

【摘要】 目的:与常规 T_2 加权黑血序列(T_2 W-DB)序列进行比较,探讨深度学习辅助压缩感知(ACS) T_2 W-DB 序列(ACS T_2 W-DB)在心力衰竭患者心脏磁共振检查中的应用价值。**方法:**前瞻性纳入 2021 年 8 月—12 月本院 10 例心力衰竭患者(心衰组)和 10 例健康志愿者(对照组),均进行左心室连续短轴常规 T_2 W-DB 序列和 ACS T_2 W-DB 扫描。分别记录常规 T_2 W-DB 和 ACS T_2 W-DB 序列的扫描时间,计算图像质量心肌信噪比(SNR)和心肌血池对比信噪比(CNR)以及图像质量主观评分。主观评分应用 Likert 评分量表对图像质量进行评估,具体评分内容包括总体图像质量、血池抑制效果、右心室游离壁、左心室游离壁和室间隔可视性。采用组内相关系数(ICC)评价两观察者间图像质量的客观定量指标一致性,采用加权 Kappa 系数评价两观察者间主观评分的一致性,采用配对 t 检验和 Wilcoxon 检验比较常规 T_2 W-DB 和单次激发 ACS T_2 W-DB 的图像质量客观定量指标、采集时间和主观评分。并记录图像运动伪影情况。**结果:**ACS T_2 W-DB 总采集时间(51.4 ± 8.3 s)明显短于常规 T_2 W-DB(79.8 ± 11.3 s, $P < 0.001$)。在心衰组中 ACS T_2 W-DB 的 SNR 和 CNR 均显著高于常规 T_2 W-DB($P = 0.042, 0.007$),且在健康对照组中 CNR 也高于常规 T_2 W-DB($P = 0.030$)。在健康对照组和心衰组中 ACS T_2 W-DB 的图像整体质量、血池抑制效果、右心室壁、左心室游离壁和室间隔可视性与常规 T_2 W-DB 相比差异均无统计学意义(P 均 > 0.05)。ACS T_2 W-DB 和常规 T_2 W-DB 图像质量客观定量指标和主观评分具有较好的一致性(P 均 < 0.05)。在心衰组中 ACS T_2 W-DB 图像伪影明显少于常规 T_2 W-DB。**结论:**与常规 T_2 W-DB 序列相比,ACS T_2 W-DB 可以显著缩短扫描时间,降低图像伪影,改善图像质量,有望成为心力衰竭患者 T_2 W-DB 的替代选择序列。

【关键词】 心脏磁共振; 心力衰竭; 深度学习; 压缩感知; T_2 加权黑血

【中图分类号】 R445.2; R541.6 **【文献标志码】** A **【文章编号】** 1000-0313(2023)03-0267-06

DOI:10.13609/j.cnki.1000-0313.2023.03.005

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Clinical application of deep learning-assisted compressive sensing technique of cardiac MRI in patients with heart failure YAN Xiang-hu, LUO Yi, RAN Ling-ping, et al. Department of Radiology, Tongji Hospital, Tongji Medical College, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430030, China

【Abstract】 Objective: To explore the value of deep learning-assisted compressive sensing (ACS) T_2 W-DB sequences (ACS T_2 W-DB) in cardiac magnetic resonance examination of heart failure patients, compared with conventional T_2 W-DB sequence. **Methods:** From August to December 2021, 10 patients with heart failure (heart failure group) and 10 healthy volunteers (control group) in our hospital were prospectively enrolled. Left ventricular continuous short axial conventional T_2 W-DB sequence and ACS T_2 W-DB scanning were performed. The scanning time of conventional T_2 W-DB and ACS T_2 W-DB sequences were recorded, and the myocardial signal-to-noise ratio (SNR) and myocardial blood pool contrast signal-to-noise ratio (CNR), as well as the subjective scores of image quality were calculated. The subjective scores were assessed by applying the Likert scale for image quality, specifically for overall image quality, blood pool inhibition effect, right ventricular free wall, left ven-

作者单位: 430030 武汉, 武汉华中科技大学同济医学院附属同济医院放射科(严祥虎、罗毅、冉玲平、夏黎明、黄璐); 200000 上海, 上海联影医疗科技股份有限公司(张诗雨)

作者简介: 严祥虎(1994—), 男, 湖北武汉人, 主管技师, 主要从事磁共振成像技术研究。

通讯作者: 黄璐, E-mail: tj_lhuang@hust.edu.cn

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(81873889); 湖北省科技计划青年基金(2021CFB060)

tricular free wall and interventricular septal visibility. The consistency of objective quantitative indexes of image quality between the two observers was evaluated by intraclass correlation coefficient (ICC) and the consistency of subjective scores between the two observers was evaluated by weighted Kappa coefficient. Paired t -test and Wilcoxon test were used to compare the objective quantitative indexes of image quality, acquisition time and subjective score of conventional T_2 W-DB and ACS T_2 W-DB. Image motion artifacts were recorded. **Results:** The total acquisition time of ACS T_2 W-DB ($51.4s \pm 8.3s$) was significantly shorter than that of conventional T_2 W-DB ($79.8 \pm 11.3s$, $P < 0.001$). The SNR and CNR of ACS T_2 W-DB in heart failure group were significantly higher than those of conventional T_2 W-DB ($P = 0.042, 0.007$), and CNR was higher than those of conventional T_2 W-DB ($P = 0.030$) in healthy control group. There was no significant difference in the overall image quality, blood pool inhibition effect, visibility of right ventricular wall, left ventricular free wall and interventricular septum of ACS T_2 W-DB compared with conventional T_2 W-DB in both healthy control and heart failure groups ($P > 0.05$). The objective quantitative indexes and subjective score of image quality of ACS T_2 W-DB and conventional T_2 W-DB were in good agreement ($P < 0.05$). ACS T_2 W-DB image artifacts were significantly less than conventional T_2 W-DB in the heart failure group. **Conclusion:** Compared with conventional T_2 W-DB sequence, ACS T_2 W-DB can significantly shorten the scan time, reduce image artifacts, and improve image quality, which is promising to be an alternative sequence of choice for T_2 W-DB in patients with heart failure.

【Key words】 Cardiac magnetic resonance; Heart failure; Deep learning; Compressed sensing; T_2 -weighted dark blood

脂肪抑制快速自旋回波 T_2 黑血加权 (T_2 weighted dark blood, T_2 W-DB) 序列已被常规用于心脏形态学评价, 以识别心肌水肿和显示解剖结构^[1], 因为该序列提供了良好的心肌-血池对比度、高信噪比 (signal noise ratio, SNR) 和高空间分辨力。然而, 常规 T_2 W-DB 序列即使在正常心肌中, 也会由于多种因素的干扰导致不一致的图像质量和不均匀信号的出现^[2-3], 这些技术限制严重影响了常规 T_2 W-DB 序列的临床应用^[1]。

常规 T_2 W-DB 序列图像质量受多个因素的干扰, 其中受呼吸运动干扰产生的伪影最为常见^[4-6]。常规 T_2 W-DB 序列采用并行成像 (parallel imaging, PI) 的加速方法, 采用多次屏气的扫描策略, 总扫描时间和单次屏气扫描时间均较长, 屏气不耐受患者容易因为屏气质量不佳而出现呼吸运动伪影。因此, 采用新的加速方法来缩短 T_2 W-DB 序列单次屏气时间有可能降低呼吸运动伪影。

深度学习技术最近被应用于 MR 加速, 与传统的 PI 相比, 深度学习技术具有改善图像质量和缩短扫描时间的潜力^[7]。以往有研究使用基于完全卷积神经网络结构 (convolutional neural networks, CNN) 进行深度学习的重建方法应用在心脏 2D 电影成像中, 获得了较小的重建误差和较快的重建速度^[8]。压缩感知技术 (compressed sensing, CS) 可以在不降低信噪比的情况下快速采集, 它已被广泛用于生物医学研究和临

床应用, 包括 T_2 W-DB 成像^[9]。

基于上述技术的发展, 本研究将基于 CNN 进行深度学习辅助压缩感知 (artificial intelligence assisted compressed sensing, ACS)^[10-11] 的加速框架应用于 T_2 W-DB 序列, 希望使用 ACS 技术在保证图像质量的同时缩短 T_2 W-DB 序列的单次屏气时间, 并与常规 PI 技术加速采集的 T_2 W-DB 图像进行比较, 探讨 ACS T_2 W-DB 序列在心力衰竭患者心脏磁共振检查中可行性。

材料与方法

1. 研究对象

本研究为前瞻性研究, 经医院伦理委员会批准 (批文号: 2020 伦审字 S155 号), 所有患者检查前签署知情同意书。连续收集 2021 年 8 月—12 月来我院行心脏磁共振检查的心力衰竭患者。纳入标准: ①临床诊断心力衰竭患者, 左室射血分数 (left ventricular ejection fraction, LVEF) $< 50\%$; ②均完成常规 T_2 W-DB 序列和 ACS T_2 W-DB 序列的扫描。排除标准: ①常规 T_2 W-DB 序列图像质量差未达到诊断要求; ②左心室短轴面 cine 序列图像不能分析心功能。最终入组 10 例患者, 男 8 例, 女 2 例, 年龄 28~64 岁, 平均 46 ± 13 岁。心脏疾病临床诊断包括 8 例扩张型心肌病、1 例肥厚型心肌病患者和 1 例高血压心脏病。同时纳入 10 例健康志愿者 (男 6 例, 女性 4 例, 年龄 27 ± 4 岁),

无心血管疾病病史,超声心动图和心电图检查正常。

2.MR 扫描

心脏磁共振成像采用 3.0T 磁共振扫描仪(uMR790,上海联影医疗科技股份有限公司),并配备 12×2 通道心脏线圈。扫描前对所有受试者进行了充分的呼吸训练以减少呼吸运动伪影,使用心电门控采集数据。所有受试者均在呼气后屏气行常规 T₂W-DB 序列和 ACS T₂W-DB 序列扫描,扫描范围涵盖左心室心尖至心底连续心脏短轴面共 9 层图像。记录两序列的单次屏气采集时间和总采集时间,详细成像参数见表 1。

表 1 常规 T₂W-DB 序列和 ACS T₂W-DB 序列参数

扫描参数	常规 T ₂ W-DB	ACS T ₂ W-DB
FOV/mm ²	400×320	400×320
层厚/mm	8.0	8.0
层间距/mm	2	2
采集矩阵	163×256	163×256
TE/ms	69.68	63.44
回波链长度	25	25
加速模式	PI	ACS
加速因子	2	3
理论采集时间	9×11 heartbeat	9×7 heartbeat

3.图像分析

由两名有 3 年以上心血管磁共振扫描经验的放射科技师在联影 MR 工作站上选择左心室中间段短轴面图像上独立手动绘制室间隔感兴趣区(region of interest,ROI)和血池 ROI,室间隔的勾画尽量避开心内膜和心外膜,得到心肌信号强度的平均值和标准差,血池 ROI 的勾画避开乳头肌,得到血池的平均值和标准差。心肌和血池的 ROI 勾画示意图 1 所示。计算

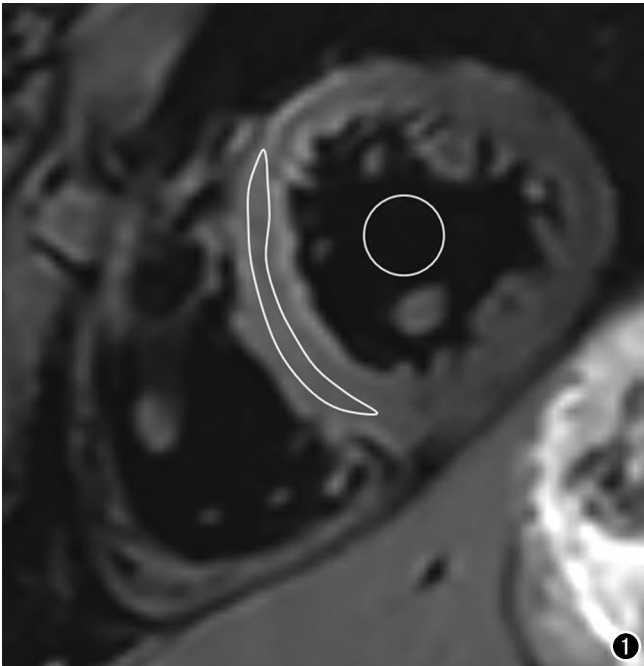


图 1 ROI 勾画示意图。

所有受试者的图像 SNR 和对比噪声比(contrast to noise ratio,CNR),心肌 SNR 和心肌-血池 CNR 的计算公式如下:

$$SNR = \frac{SI_{心肌}}{SD_{心肌}}$$
(1)

$$CNR = \frac{SI_{心肌} - SI_{血池}}{SD_{血池}}$$
(2)

由两位有 5 年以上心血管磁共振诊断经验的放射科医生使用 Likert 评分量表(1=无法诊断,2=差,3=一般,4=好,5=优)对常规 T₂W-DB 和 ACS T₂W-DB 序列的图像质量进行独立评估。评分内容包括五项标准:总体图像质量,血池抑制效果,右心室游离壁、左心室游离壁和室间隔的可视性,同时并记录图像运动伪影,包括左心室壁有无信号丢失、有无条纹或运动伪影。

4.统计学分析

使用 SPSS(version 23.0,Chicago,IL)进行统计学分析,定量数据应用 $\bar{x} \pm s$ 表示,定性数据采用频数(百分比)表示,首先对配对参数的差值进行正态性检验。若配对参数的差值满足正态分布,采用配对 *t* 检验进行分析;若不满足正态分布,采用配对 Wilcoxon 秩和检验进行分析。采用加权 Kappa 分析评估观察者间主观评分数据的一致性,采用组内相关系数(intraclass correlation coefficient,ICC)对图像质量客观定量评价参数的观察者间一致性进行评价。加权 Kappa 和 ICC 一致性评价标准:<0.20 认为一致性较差;0.21~0.40 认为一致性一般;0.41~0.60 认为一致性中等;0.61~0.80 认为一致性较好;0.81~1.00 认为一致性好。以 *P*<0.05 为差异有统计学意义。

结 果

心衰组患者 LVEF 26.2%±11.5%,健康对照组 LVEF 65.4%±5.2%。在整体受试者中 ACS T₂W-DB 总屏气时间(51.4±8.3 s)与常规 T₂W-DB (79.8±11.3 s)相比,缩短了 35.6%(*t*=27.026,*P*<0.001)。ACS T₂W-DB 单次屏气时间为(5.7±0.9)s,常规 T₂W-DB 单次屏气时间为(8.9±1.3)s,缩短了 36.0%(*t*=27.029,*P*<0.001)。

健康对照组和心衰组常规 T₂W-DB 和 ACS T₂W-DB 序列图像的主观评分和客观定量指标见表 2。在心衰组中 ACS T₂W-DB 与常规 T₂W-DB 相比显示出更好的心肌 SNR 和心肌 CNR(*P*=0.038、0.011),在健康对照组中,ACS T₂W-DB 的心肌 CNR 明显优于常规 T₂W-DB 序列(*P*=0.030)。在志愿者组和心衰组中,ACS T₂W-DB 的图像整体质量评分、血池抑制效果、右心室壁、左心室游离壁和室间隔可视性与常规 T₂W-DB 相比,差异均没有统计学意义(*P*

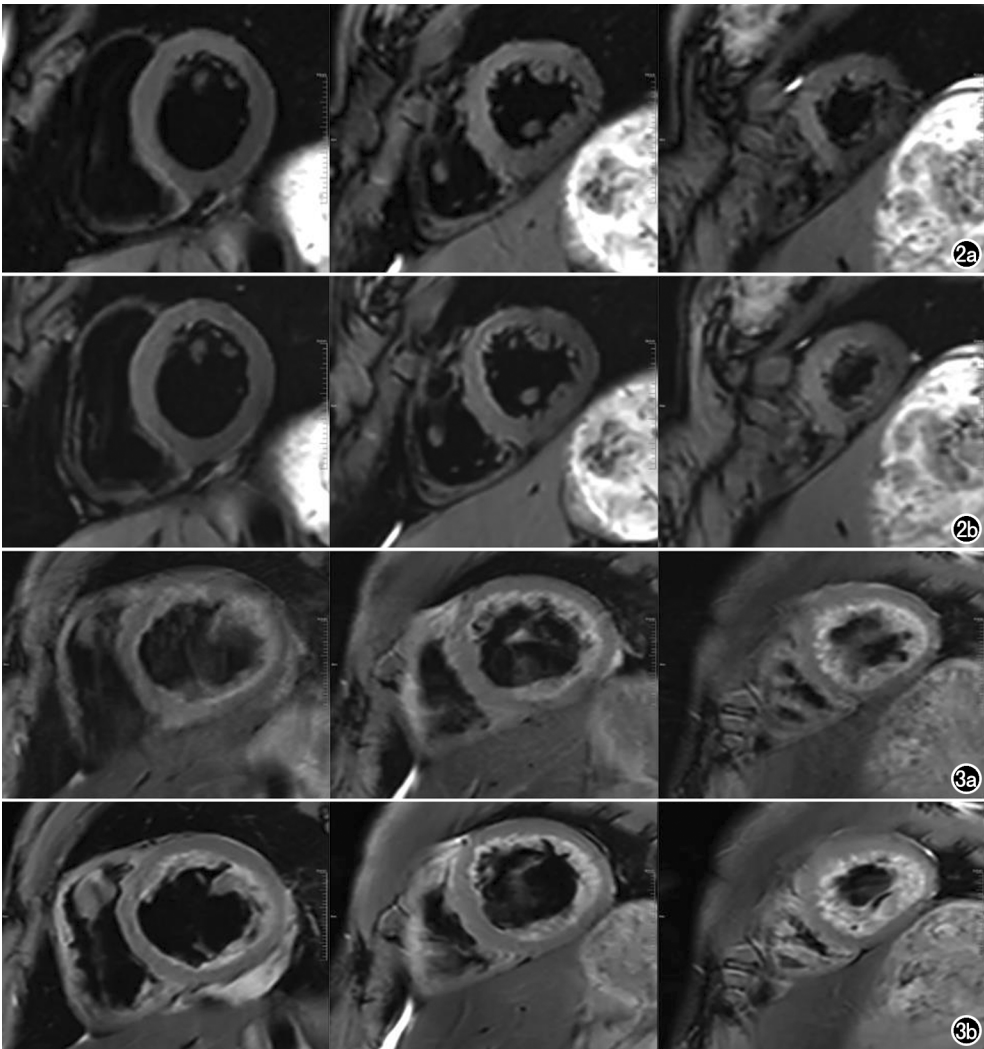


图2 志愿者组常规 T₂W-DB 序列与 ACS T₂W-DB 序列心脏短轴图像。女, 27 岁。a)常规 T₂W-DB 图像;b)ACS T₂W-DB 图像,均为多次屏气。由图可见,两序列对心脏局部或整体均显示较为良好。图3 心衰组常规 T₂W-DB 序列与 ACS T₂W-DB 序列心脏短轴图像。男,29 岁,被诊断为扩张性心肌病并伴有心包积液。a)常规 T₂W-DB 图像;b)ACS T₂W-DB 图像,均为多次屏气。由图可见,ACS T₂W-DB 图像整体呼吸运动伪影的控制以及血池抑制效果明显优于常规 T₂W-DB。

均>0.05)。图像伪影评估中,10 名患者中有 2 名(20%)在常规 T₂W-DB 上有左心室心肌信号丢失,另

有 2 名(20%)患者出现呼吸运动伪影,而 10 名患者中只有 1 名(10%)在 ACS T₂W-DB 上有运动伪影,在健康对照组中两序列均未出现明显运动伪影。健康对照组和心衰组图像见图 2、3。

在常规 T₂W-DB 和 ACS T₂W-DB 的序列定量和定性参数一致性分析中(表 3),由两个放射技师测量的 SNR 和 CNR 的结果都具有较好的一致性(ICC >0.600, *P* 均<0.05),两名放射科医师的主观图像质量评分具有良好一致性(Kappa 值均>0.600, *P* 均<0.05)。

讨 论

本研究在心脏 T₂W-DB 序列上应用了深度学习辅助压缩感知的(ACS)的加速框架,与传统的并行采集(PI)加速的 T₂W-DB 相比,屏气时间缩短了 36%。ACS T₂W-DB 序列的图像质量在心衰组和正常组中均明显优于基于 PI 加速的常规 T₂W-DB 序列,并且在心衰组中 ACS T₂W-DB 序列伪影更少。

不断进步的 MR 加速技术是 ACS 技术能够应用于心脏 T₂ 加权黑血成像的前提。之前的研究中发现,CS 技术能使 MR 成像获

表2 常规 T₂W-DB 和 ACS T₂W-DB 定量测值和定性评价

参数	健康对照组				心衰组			
	常规 T ₂ W-DB	ACS T ₂ W-DB	<i>t</i> / <i>Z</i>	<i>P</i> 值	常规 T ₂ W-DB	ACS T ₂ W-DB	<i>t</i> / <i>Z</i>	<i>P</i> 值
整体图像质量	4.3±0.4	4.1±0.3	-1.633	0.102	3.6±0.8	3.7±0.4	-0.378	0.705
血池抑制效果	4.9±0.1	4.9±0.2	-1.000	0.317	4.0±0.7	4.1±0.6	-1.414	0.157
右室游离壁可视性	3.9±0.7	3.9±0.6	-0.577	0.564	3.7±0.4	3.8±0.4	-1.134	0.257
左室游离壁可视性	4.5±0.5	4.4±0.5	-0.816	0.414	3.7±0.7	3.9±0.5	-1.125	0.247
室间隔可视性	4.8±0.4	4.7±0.3	0.707	0.480	4.1±0.6	3.9±0.6	0	0.990
SNR	83.0±39.0	97.8±21.9	-1.918	0.087	50.0±19.0	67.6±33.4	-2.419	0.042*
CNR	77.7±38.4	99.9±25.6	-2.567	0.030*	46.0±19.1	75.6±37.1	-3.639	0.007*

注:* *P*<0.05

表 3 常规 T₂W-DB 和单次激发 ACS T₂W-DB 的观察者一致性

参数	健康对照组		心衰组	
	常规 T ₂ W-DB	ACS T ₂ W-DB	常规 T ₂ W-DB	ACS T ₂ W-DB
整体图像质量	0.783	0.762	0.878	0.821
血池抑制效果	0.643	0.615	0.865	0.722
右室游离壁可视性	0.643	0.821	0.737	0.737
左室游离壁可视性	0.737	0.828	0.884	0.615
室间隔可视性	0.762	0.737	0.853	0.821
SNR	0.826	0.823	0.796	0.808
CNR	0.833	0.792	0.809	0.827

注: P 均 < 0.05

得更快的采集速度,得益于其绕过了不相干 K 空间欠采样的 Nyquist-Shannon 采样标准^[12]。理论上,假设原始数据是可压缩的,通过对随机欠采样的原始数据进行非线性优化,忽略不会影响图像效果的非有效信息,可以在不降低图像质量的情况下实现非线性重建。而 CS-MRI 面临的主要挑战是找到合适的稀疏变换算法,以实现从随机和高度欠采样的 K 空间数据中重建出未被破坏或去锯齿的图像。近年来,深度学习方法通过训练深度神经网络(deep neural networks,DNN)来实现重建欠采样 K 空间数据,DNN 以 K 空间测量值(或零填充重建)作为输入并产生重建图像^[13-14],这些方法已经被证明比传统的 CS-MRI 重建速度更快,同时保持了同等的图像质量。从大体来说,CS-MRI 已经通过使用 DNN 结构重建解决了一个广义逆问题类似于实现图像超高分辨率^[15-16]、去噪和信息恢复^[17]。在最近关于 CNN 的研究中,有人提出了一种 U-Net 架构来重建图像,这种完全卷积的网络结构最初用于图像分割,通过收缩和扩展路径来同时捕获全局和局部背景图像^[18],发现使用 CNN 能更好地解决上述问题^[19]。U-Net 深度学习网络目前已经广泛应用于医学图像的脏器分割^[20-21]。

基于以上技术的发展,使得使用 CNN 结构进行深度学习的 ACS 加速技术在 T₂W-DB 序列中应用并且获得高分辨率的图像成为了可能。本研究已经证明了在明显缩短时间的情况下,相较于常规 T₂W-DB 序列,ACS T₂W-DB 序列能够获得不弱于甚至更具有优势的图像质量。在本研究中,ACS T₂W-DB 序列仅仅需要屏气 6 秒钟左右就可以获得一层心脏短轴切面数据,这降低了患者单次屏气过长带来的负担、提高了患者配合度,从而解决了常规 T₂W-DB 容易出现呼吸运动伪影或心肌信号丢失的问题,进一步降低了运动伪影出现的概率,这在不能长时间屏气的心力衰竭患者中效果更加明显。

本研究将所有的受试者分为心衰组和健康对照组,发现在健康对照组中 ACS T₂W-DB 序列仅 CNR 显著高于常规 T₂W-DB,在其余定量和定性评估中没有显著差异性,很大的可能原因就是健康对照组检查

配合度非常好,如优质的屏气质量、良好的心功能,这种良好的配合度使得常规 T₂W-DB 序列与 ACS T₂W-DB 获得了同样优质的图像。但通常在临床中,进行 CMR 检查的患者,有各种各样的心血管疾病以及年龄等个体差异导致不利于 CMR 成像的因素,这些因素使得 ACS T₂W-DB 序列的优势可能在实际临床应用中更加突出,这些在本研究中已经被验证,在心衰患者中,ACS T₂W-DB 序列具有更高的 CNR、SNR 以及更少的伪影。

本研究有以下两个不足之处:第一,本研究受制于纳入病例样本较小,心力衰竭患者耐受性较差,部分患者无法平躺较长时间,无法完成整个心脏磁共振检查,如何在达到诊断目的的前提下缩短心脏磁共振扫描时间是未来的磁共振发展方向。第二,本研究未对 ACS T₂W-DB 序列对心动过速患者是否适用进行研究,通常过快的心率会导致磁化矢量的恢复不足从而影响图像的质量^[22],不过临床上对于高心率的患者通常会提前给予降心率的药物来尽量完成 CMR 检查。

综上所述,ACS T₂W-DB 序列与常规 T₂W-DB 序列相比不仅可以显著缩短心力衰竭患者的单次屏气时间,而且可以通过减少运动伪影来改善图像质量,并且由于总体扫描时间的显著缩短,极大地简化了临床工作流程。

参考文献:

[1] Simonetti OP, Finn JP, White RD, et al. "Black blood" T₂-weighted inversion-recovery MR imaging of the heart[J]. Radiology, 1996, 199(1): 49-57.

[2] Kellman P, Aletras AH, Mancini C, et al. T₂-prepared SSFP improves diagnostic confidence in edema imaging in acute myocardial infarction compared to turbo spin echo[J]. Magn Reson Med, 2007, 57(5): 891-897.

[3] Edelman RR, Botelho M, Pursnani A, et al. Improved dark blood imaging of the heart using radial balanced steady-state free precession[J]. J Cardiovasc Magn Reson, 2016, 18(1): 69.

[4] Steen H, Voss F, André F, et al. Clinical feasibility study for detection of myocardial oedema by a cine SSFP sequence in comparison to a conventional T₂-weighted sequence[J]. Clin Res Cardiol, 2012, 101(2): 125-131.

[5] Zhu Y, Yang D, Zou L, et al. T₂ STIR preparation for single-shot

- cardiovascular magnetic resonance myocardial edema imaging[J]. J Cardiovasc Magn Reson, 2019, 21(1):72.
- [6] Hu C, Huber S, Latif SR, et al. Reverse double inversion-recovery: improving motion robustness of cardiac T₂-weighted dark-blood turbo spin-echo sequence[J]. J Magn Reson Imaging, 2018, 47(6): 1498-1508.
- [7] Wang S, Su Z, Ying L, et al. Accelerating magnetic resonance imaging via deep learning[J]. Proc IEEE Int Symp Biomed Imaging, 2016:514-517.
- [8] Schlemper J, Caballero J, Hajnal JV, et al. A deep cascade of convolutional neural networks for dynamic mr image reconstruction[J]. IEEE Trans Med Imaging, 2018, 37(2):491-503.
- [9] Yuda K, Yoshida T, Furukawa Y, et al. Myocardial T₂-weighted black-blood imaging with a deep learning constrained compressed SENSE reconstruction[J]. Magn Reson Med, 2021, 29:2667.
- [10] Zhai R, Huang X, Zhao Y, et al. Intelligent incorporation of AI with model constraints for MRI acceleration[J]. Mag Reson Med, 2021, 27:1760.
- [11] Wang S, Cao G, Wang Y, et al. Review and prospect: artificial intelligence in advanced medical imaging[J]. Front Radio, 2021, 1: 781868. <https://doi.org/10.3389/fradi.2021.781868>.
- [12] Donoho DL. Compressed sensing[J]. IEEE Trans Inform Theory, 2006, 52(4):1289-1306.
- [13] Xiang L, Chen Y, Chang W, et al. Ultra-fast T₂-weighted MR reconstruction using complementary T₁-weighted information[J]. Med Image Comput Comput Assist Interv, 2018, 11070:215-223.
- [14] Cheng JY, Chen F, Pauly JM, et al. Method for performing magnetic resonance imaging reconstruction with unsupervised deep learning[P]. Google Patents, Patent No. 10, 740, 931. Washington, DC; U.S. Patent and Trademark Office, 2020.
- [15] Srinivasan K, Ankur A, Sharma A. Super-resolution of magnetic resonance images using deep convolutional neural networks[J]. 2017 IEEE International Conference on Consumer Electronics-Taiwan (ICCE-TW). Taipei, Taiwan: IEEE, 2017:41-42.
- [16] Dong C, Loy CC, He K, et al. Image super-resolution using deep convolutional networks[J]. IEEE Trans Pattern Anal Mach Intell, 2016, 38(2):295-307.
- [17] Xie J, Xu L, Chen E. Image denoising and inpainting with deep neural networks[J]. Advances in Neural Information Processing Systems, 2012:341-349.
- [18] Ronneberger O, Fischer P, Brox T. U-Net: convolutional Networks for biomedical image segmentation[M]. International Conference on Medical Image Computing and Computer-Assisted Intervention: Springer, 2015:234-241.
- [19] Sheng R, Zheng L, Jin K, et al. Single-breath-hold T₂WI liver MRI with deep learning-based reconstruction: A clinical feasibility study in comparison to conventional multi-breath-hold T₂WI liver MRI[J]. Magn Reson Imaging, 2021, 81:75-81.
- [20] 奈日乐, 林子楹, 额·图娅, 等. 基于深度学习探索 3D MRU 尿路分割的初步研究[J]. 放射学实践, 2022, 37(7):865-869.
- [21] 郭丽, 赵凯, 朱逸峰, 等. 使用 U-Net 深度学习网络对腰椎矢状 T₂WI 图像自动分割的可行性研究[J]. 放射学实践, 2022, 37(2):229-234.
- [22] Srichai MB, Lim RP, Lath N, et al. Diagnostic performance of dark-blood T₂-weighted CMR for evaluation of acute myocardial injury[J]. Invest Radiol, 2013, 48(1):24-31.

(收稿日期:2022-01-19 修回日期:2022-08-29)

下期要目

HBV DWI 预测兔肾缺血再灌注损伤程度的
实验研究

基于 DSC-PWI 对肺癌脑转移肿瘤患者 ASL 最佳
标记延迟时间分析

深度学习重建算法对肺 CT 量化分析及图像质量的
影响

CT 肺功能评估 2 型糖尿病肺部损害的应用价值
人工智能辅助下的压缩感知技术在肝脏 T₂WI 成像
中的应用

儿童胶质神经元和神经元肿瘤的影像学表现

影像组学和临床特征联合预测前循环急性缺血性卒中临床
功能预后

基于动脉自旋标记成像分析帕金森病神经代谢网络拓扑
属性改变的研究

基于超声弹性成像及磁共振 ZOOMit IVIM 成像预测
甲状腺乳头状癌侵袭性的研究

基于计算流体力学仿真技术的冠状动脉 CT 无创血流储备
分数诊断心肌缺血的初步探索

CT 重建算法对基于深度学习的非门控冠脉钙化积分模型
诊断心血管风险分类效能的影响