

❖ 心脏、血管影像学

Cardiac MR compressed sensing cine sequence for evaluating biventricular function in patients with congenital heart disease

XIE Jiaxin¹, GE Yinghui¹, LIN Qing¹, WEN Ru¹, WANG Jiajia¹, ZHANG Gejun^{1,2*}

(1. Department of Radiology, Central China Fuxai Hospital of Zhengzhou University, Fuxai Central China Cardiovascular Hospital, Henan Provincial Key Laboratory of Cardiology Medical Imaging, Zhengzhou 451460, China; 2. Department of Cardiovascular Medicine, National Center for Cardiovascular Disease, Fuxai Hospital, Chinese Academy of Medical Sciences, Beijing 100037, China)

[Abstract] **Objective** To observe the value of cardiac MR (CMR) compressed sensing (CS) sequence and conventional movie (CM) sequence for evaluating biventricular function in patients with congenital heart disease (CHD). **Methods** A total of 71 patients with CHD, including 31 cases with regular heart rhythm (regular heart rhythm group) and 40 cases with arrhythmia (arrhythmia group) were prospectively collected and scanned with CM and CS sequences. The scanning time of 2 sequences were recorded, and subjective scores of imaging quality of 2 kinds of images were compared. The differences, consistency and correlation between quantitative parameters of biventricular function measured on 2 kinds of images were analyzed. **Results** The acquisition time of CS was (18.87 ± 1.75) s, of CM was (147.56 ± 5.23) s, which was shortened by 87.21% than CS. The quality of both 2 kinds of images met the diagnostic requirements. The subjective scores of CS images were lower than that of CM in regular heart rhythm group ($4 [3, 5]$ vs. $4 [4, 5]$, $Z = -2.070$, $P = 0.038$), while of CS images were higher than that of CM images in arrhythmia group ($4 [4, 4]$ vs. $3 [4, 4]$, $Z = -2.673$, $P = 0.008$). No significant difference of the left ventricular function parameters was detected obtained based on 2 kinds of images in all 71 cases, nor in regular heart rhythm group as well as in arrhythmia group (all $P > 0.05$). Meanwhile, the right ventricular (RV) end-diastolic volume index (EDVI) obtained based on CM and CS images were not significantly different (all $P > 0.05$), but significant differences of ejection fraction (EF), end-systolic volume index (ESVI) and stroke volume index (SVI) were found in all 71 cases, in regular heart rhythm group and in arrhythmia group (all $P < 0.05$). CMR parameters of biventricular function measured on CM and CS images were all consistent and positively correlated (all $P < 0.05$). **Conclusion** CS sequence could be used to accurately assess biventricular function of CHD patients, significantly improve imaging quality and shorten scanning time.

[Keywords] heart diseases; ventricular function; magnetic resonance imaging, cine; prospective studies

DOI:10.13929/j.issn.1003-3289.2024.06.012

[第一作者] 谢佳鑫(1996—),女,河南焦作人,在读硕士,医师。研究方向:心血管影像学诊断。E-mail: xiejx97@163.com

[通信作者] 张戈军,郑州大学阜外华中医院 阜外华中中心血管病医院放射科 河南省心脏病影像医学重点实验室,451460;国家心血管病中心 中国医学科学院阜外医院心内科,100037。E-mail: gjzhang212@163.com

[收稿日期] 2024-01-28 [修回日期] 2024-02-24

心脏 MR 压缩感知电影序列用于评估先天性心脏病患者双心室功能

谢佳鑫¹, 葛英辉¹, 林青¹, 温茹¹, 王佳佳¹, 张戈军^{1,2*}

(1. 郑州大学阜外华中医院 阜外华中心血管病医院放射科 河南省心脏病影像医学重点实验室, 河南 郑州 451460; 2. 国家心血管病中心 中国医学科学院阜外医院心内科, 北京 100037)

[摘要] **目的** 观察心脏 MR(CMR)压缩感知(CS)序列与常规电影(CM)序列用于评估先天性心脏病(CHD)患者双心室功能的价值。**方法** 前瞻性对 71 例 CHD 患者(心律齐组 31 例、心律不齐组 40 例)行心脏 CM 及 CS 序列扫描,记录 2 种序列扫描时间;对比 2 种图像质量主观评分,分析于 2 种图像上所测双心室功能定量参数的差异、一致性及其相关性。**结果** CS 图像采集时间为(18.87±1.75)s,较 CM[(147.56±5.23)s]缩短 87.21%。2 种图像质量均符合诊断要求,心律齐组 CS 图像主观评分低于 CM 图像 [4(3,5) vs. 4(4,5), $Z = -2.070$, $P = 0.038$];心律不齐组 CS 图像主观评分高于 CM 图像 [4(4,4) vs. 3(4,4), $Z = -2.673$, $P = 0.008$]。于 2 种图像所测全部 71 例、心律齐组及心律不齐组左心室功能参数差异均无统计学意义(P 均 >0.05)。基于 CM 与 CS 图像所获全部 71 例、心律齐组及心律不齐组右心室舒张末期容积指数(EDVI)差异均无统计学意义(P 均 >0.05),而射血分数(EF)、收缩末期容积指数(ESVI)及每搏输出量指数(SVI)差异均有统计学意义(P 均 <0.05)。于 CM 与 CS 图像所测双心室功能 CMR 参数的一致性均良好,且均呈正相关(P 均 <0.05)。**结论** 利用 CS 序列可在提高图像质量的同时准确评估 CHD 患者双心室功能并显著缩短扫描时间。

[关键词] 心脏病; 心室功能; 磁共振成像, 电影; 前瞻性研究

[中图分类号] R825.4; R445.2 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1003-3289(2024)06-0853-05

心脏 MR(cardiac MR, CMR)是临床评估心室形态和功能的金标准^[1-2]。临床对先天性心脏病(congenital heart disease, CHD)多以常规电影(conventional movie, CM)序列采集 CMR,扫描时间较长(约 3 min),需患者配合多次屏气,易产生运动或呼吸伪影。回顾性心电门控扫描技术依赖于规整心律,心律不齐将错误触发扫描 CM 序列而导致伪影^[3]。压缩感知(compressed sensing, CS)基于 k 空间非相干采样^[3]加快信号采集速度,并通过非线性重建^[4]增强图像的稀疏性。本研究观察 CS 序列用于评估 CHD 患者双心室功能的价值。

1 资料与方法

1.1 研究对象 前瞻性收集 2018 年 5 月—2023 年 5 月于阜外华中心血管病医院接受 CMR 检查的 71 例 CHD 患者,男 31 例、女 40 例,年龄 6~59 岁、平均(28.6±15.6)岁;体质量指数 12.35~35.16 kg/m²、平均(24.10±5.60)kg/m²;心率 56~144 次/分、平均(80.62±13.31)次/分;包括法洛四联症 28 例,房间隔缺损 15 例,室间隔缺损 11 例,房室间隔缺损 6 例,大动脉转位 3 例,右心室双出口 3 例,肺动脉闭锁 1 例,先天性肺动脉瓣关闭不全 1 例,先天性主动脉瓣二叶畸形 1 例,主肺动脉间隔缺损 1 例,埃布斯坦(Ebstein)畸形 1 例;其中 31 例心律齐(心律齐组)、40

例心律不齐(心律不齐组),后者包括窦性心律不齐 13 例、室性心律失常 2 例、房性心律失常 10 例、房室交界区性心律失常 7 例、室内传导阻滞 2 例及房室传导阻滞 6 例;均接受 CM 及 CS 序列扫描心脏。排除单心室解剖及 MR 图像质量不佳者。本研究经医院伦理委员会审查通过[(2021)伦审第(3)号];检查前患者均知情同意。

1.2 仪器与方法 采用 Siemens MAGNETOM Skyra 3.0T MR 仪及 18 通道心脏专用相控阵线圈。检查前对患者行屏气训练。先采用心电门控触发平衡稳态自由进动序列(balance steady-state free precession, bSSFP)获取双心室长、短轴位 CM 图像,参数:TR 4.46 ms,TE 1.40 ms,FOV 369 mm×369 mm,矩阵 208×148,层厚 8 mm,层间距 2 mm,FA 49°,采集时相 25,NEX 1;之后采集 CS 序列图像,TR 4.23 ms,TE 1.20 ms,FOV 360 mm×284 mm,FA 40°,采集时相 20,NEX 1,CS 加速因子 3。记录 2 种序列扫描时间。

1.3 评估图像质量 将所有图像导入 CVI 软件(5.9.1 版本,加拿大 Circle Cardiovascular Imaging 公司),由 2 名具有 5 年以上影像学诊断经验的主治医师参照 2013 年欧洲心血管磁共振质量评估标准^[5]对图像质量进行主观评分:1 分,质量差,难以识别心肌轮廓

伴大量伪影;2分,质量较差,心肌轮廓模糊伴中度伪影,不能满足诊断要求;3分,质量尚可,心肌轮廓较清晰伴轻度伪影,基本满足诊断要求;4分,质量好,心肌轮廓清晰伴少量伪影;5分,质量优,心肌轮廓清晰,无伪影;以 ≥ 3 分为图像可满足诊断需要。对2名医师评分的均值进行统计分析。

1.4 心功能分析 由上述2名医师根据心血管磁共振学会2020标准化方案^[6]分别采用CVI软件于2种图像中自动追踪并勾画左心室(left ventricle, LV)、右心室(right ventricle, RV)心内膜轮廓(包含心内膜小梁和乳头肌),必要时手动校正轮廓,并测量LV及RV射血分数(ejection fraction, EF)、舒张末期容积指数(end-diastolic volume index, EDVI)、收缩末期容积指数(end-systolic volume index, ESVI)及每搏输出量指数(stroke volume index, SVI)。

间隔1个月后由其中1名医师采用相同方法再次基于CS图像定量分析心功能。

1.5 统计学分析 采用SPSS 26.0和MedCalc 20.0统计分析软件。以组内相关系数(inter-class correlation coefficient, ICC)评估观察者内及观察者间测量心功能参数的一致性,以 $ICC < 0.40$ 为一致性较差, $0.40 \leq ICC < 0.75$ 为一致性一般, $ICC \geq 0.75$ 为一致性良好。以 $\bar{x} \pm s$ 表示符合正态分布计量资料,行配对 t 检验;以中位数(上下四分位数)表示偏态分布计量资料,行Wilcoxon秩和检验。采用Bland-Altman分析和线性回归分析观察基于2种图像所获心功能参数的一致性及其相关性。 $P < 0.05$ 为差异有统计学意义。

2 结果

2.1 图像质量 CM图像采集时间为 (147.56 ± 5.23) s,CS为 (18.87 ± 1.75) s,后者较前者缩短87.21%。

2种图像质量评分均 ≥ 3 分,可满足诊断需要。心律不齐组CS图像主观评分低于CM图像 $[4(3,5)$ vs. $4(4,5)$, $Z = -2.070$, $P = 0.038$,图1];心律不齐组CS

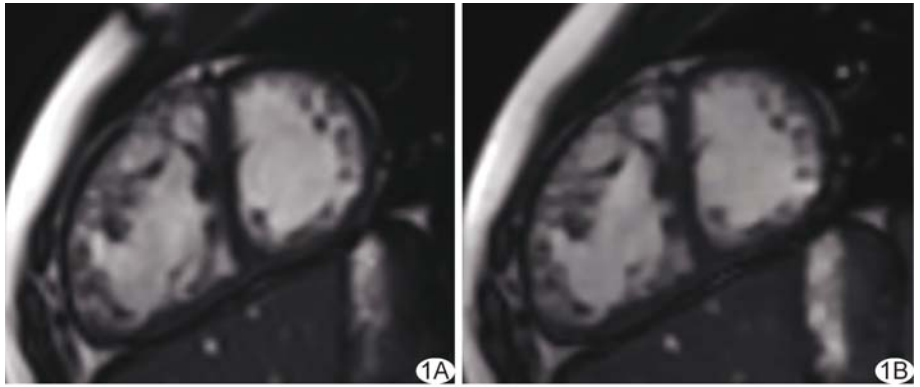


图1 心律不齐患者,男,15岁,法洛四联症术后,双心室短轴CMR图像 A. CM图像,图像质量主观评分为5分;B. CS图像,图像质量主观评分为4分



图2 心律不齐患者,男,54岁,房间隔缺损伴心房颤动,双心室短轴CMR图像 A. CM图像,图像质量主观评分为3分;B. CS图像,图像质量主观评分为4分

图像主观评分高于CM图像 $[4(4,4)$ vs. $3(4,4)$, $Z = -2.673$, $P = 0.008$,图2]。

2.2 心功能分析 观察者间基于2种图像测量心功能参数的一致性均良好(ICC 均 ≥ 0.87 , P 均 < 0.05);观察者内基于CS图像测量心功能参数的一致性均良好(ICC 均 ≥ 0.89 , P 均 < 0.05)。取其中1名医师测量结果进行统计分析。

基于2种图像所测全部71例、心律齐组及心律不齐组LV功能参数差异均无统计学意义(P 均 > 0.05)。于CM与CS图像所测全部71例、心律齐组及心律不齐组RVEF、RVESVI及RVSVI差异均有统计学意义(P 均 < 0.05),而RVEDVI差异均无统计学意义(P 均 > 0.05)。见表1。

2.3 一致性分析及相关性分析 Bland-Altman分析结果显示,基于CM与CS图像所测LV及RV心功能CMR参数差值的均值为 $-1.04 \sim 0.85$,差值均在95%一致性界限内(95% limits of agreement, 95% LoA),提示其一致性良好。基于2种图像所测LV及RV心功能CMR参数均呈正相关(P 均 < 0.05)。见表2。

表 1 基于 CM 与 CS 图像所测心功能参数比较

图像	LVEF (%)	LVEDVI (ml/m ²)	LVESVI (ml/m ²)	LVSVI (ml/m ²)	RVEF (%)	RVEDVI (ml/m ²)	RVESVI (ml/m ²)	RVSVI (ml/m ²)
全部 71 例								
CM	56.15±11.70	81.23±11.76	38.78±13.43	42.44±8.32	45.71±5.37	109.41±26.18	59.55±16.18	50.48±12.97
CS	56.10±11.65	80.79±12.11	38.27±13.64	42.52±8.32	44.97±5.58	110.23±26.71	61.23±16.67	49.38±12.73
t 值	0.460	1.155	1.248	-0.313	4.192	-1.389	-3.371	3.217
P 值	0.647	0.252	0.216	0.756	<0.001	0.169	<0.001	0.002
心律齐组								
CM(n=31)	58.13±10.67	81.80±9.10	42.69±9.77	39.11±6.68	45.03±4.74	110.06±25.68	60.98±16.89	49.66±10.94
CS(n=31)	58.05±10.41	81.11±9.54	41.84±10.4	39.27±7.39	44.40±4.92	110.59±26.52	62.62±17.40	48.59±10.87
t 值	-1.865	1.137	1.215	-0.468	2.705	-0.591	-2.289	2.511
P 值	0.640	0.264	0.234	0.643	0.011	0.559	0.029	0.018
心律不齐组								
CM(n=40)	54.61±12.36	80.78±13.57	35.75±15.12	45.03±8.62	46.25±5.82	108.91±26.87	58.44±15.73	51.11±14.45
CS(n=40)	54.59±12.45	80.54±13.89	35.5±15.26	45.04±8.21	45.42±6.07	109.95±27.19	60.15±16.22	50.00±14.12
t 值	0.160	0.499	0.510	-0.025	3.200	-1.322	-2.937	2.179
P 值	0.874	0.621	0.613	0.981	0.003	0.194	0.006	0.035

表 2 基于 CM 与 CS 图像所测心功能参数的一致性及其相关性

一致性或相关性	统计值	LVEF (%)	LVEDVI (ml/m ²)	LVESVI (ml/m ²)	LVSVI (ml/m ²)	RVEF (%)	RVEDVI (ml/m ²)	RVESVI (ml/m ²)	RVSVI (ml/m ²)
全部 71 例									
Bland-Altman 分析	差值均值	0.05	0.44	0.51	-0.08	-0.24	-0.82	-0.22	-0.60
	95%LoA 下限	-1.67	-5.80	-6.28	-4.14	-4.42	-10.57	-7.87	-6.73
	95%LoA 上限	1.77	6.67	7.30	3.99	3.94	8.93	11.55	5.53
相关性	B 值	1.001	1.003	0.971	0.958	0.993	0.993	0.983	0.969
	R ² 值	0.994	0.931	0.931	0.939	0.855	0.965	0.946	0.940
心律齐组(n=31)									
Bland-Altman 分析	差值均值	0.09	0.69	0.85	-0.17	0.02	-0.53	-0.33	-0.20
	95%LoA 下限	-1.86	-5.91	-6.81	-4.02	-4.66	-10.38	-9.07	-6.48
	95%LoA 上限	2.03	7.29	8.51	3.69	4.70	9.32	8.41	6.07
相关性	B 值	1.002	1.014	0.981	0.970	0.972	0.981	0.986	1.069
	R ² 值	0.992	0.876	0.859	0.933	0.739	0.964	0.935	0.914
心律不齐组(n=40)									
Bland-Altman 分析	差值均值	-0.60	0.24	0.25	-0.01	-0.45	-1.04	-0.14	-0.91
	95%LoA 下限	-6.73	-5.75	-5.83	-4.27	-4.21	-10.81	-6.93	-6.93
	95%LoA 上限	5.53	6.24	6.33	4.26	3.32	14.76	6.65	5.11
相关性	B 值	1.004	0.995	0.981	0.952	1.005	0.999	0.988	0.922
	R ² 值	0.996	0.952	0.959	0.937	0.905	0.966	0.956	0.953

3 讨论

临床常通过多切面、bSSFP 电影成像^[7]采集标准 CMR,其中包含大量无效信息。CS 技术应用稀疏采样和非线性迭代重建技术,可提高图像空间分辨率、缩短扫描时间,已用于全身多系统^[8-9]。采用非相干欠采样法采集图像可使伪影不规则散在分布于图像中,通过设定阈值能区分伪影与真实信号,有助于去除伪影。非线性迭代重建可保证重建图像与原始图像的一致性,并尽可能去除伪影。本研究结果显示,CM 图像采集时间为(147.56±5.23)s,CS 为(18.87±1.75)s,后

者较前者缩短 87.21%,提示利用 CS 序列对 CHD 患者行 CMR 可明显提高工作效率。

既往研究^[10-11]应用 CS 电影序列对心律失常患者行 CMR 检查,发现 CS 电影序列能显著降低心律失常所致图像伪影、提高图像质量。本研究结果显示,心律齐组 CS 图像所示心脏解剖细节稍逊于 CM 图像,CS 图像主观评分低于 CM 图像,可能由于采用不相干欠采样,迭代重建过程中无法完全去除不连贯的欠采样时可致图像模糊;而心律不齐组 CS 图像主观评分高于 CM 图像,原因在于 CS 序列扫描可减少心律失常

所致伪影,使其图像质量较 CM 更优。

本研究基于 2 种图像所测 LV 功能 CMR 参数差异均无统计学意义,与 VERMERSCH 等^[12]的结果相符;以 CM 与 CS 图像所获全部 71 例、心律齐组及心律不齐组 RVEF、RVESVI 及 RVSVI 差异均有统计学意义,与 LONGÈRE 等^[13]的结果相似;以 CM 与 CS 图像所测全部 71 例、心律齐组及心律不齐组心功能参数具有良好一致性且均呈正相关。以上结果提示,对于心律不齐的 CHD 患者,CS 图像质量更高,用于定量分析心功能更为可靠。

综上,CS 序列可在保证图像质量的同时准确评估 CHD 患者双心室功能,并能显著缩短扫描时间。但本研究样本量较小,且未分析不屏气状态下 CMR 图像,有待后续进一步观察。

利益冲突:全体作者声明无利益冲突。

作者贡献:谢佳鑫查阅文献、统计分析、撰写和修改文章;葛英辉指导、研究设计和修改文章;林青研究实施、图像处理;温茹图像分析;王佳佳图像分析、修改文章;张戈军修改和审阅文章。

[参考文献]

- [1] 国际心血管磁共振学会中国区委员会,中国医疗保健国际交流促进会心血管磁共振分会.心血管磁共振成像技术检查规范中国专家共识[J].中国医学影像技术,2019,35(2):161-169.
- [2] BAUMGARTNER H, de BACKER J, BABU-NARAYAN S V, et al. 2020 ESC guidelines for the management of adult congenital heart disease[J]. Eur Heart J, 2021,42(6):563-645.
- [3] CURIONE D, CILIBERTI P, MONTI C B, et al. Compressed sensing cardiac cine imaging compared with standard balanced steady-state free precession cine imaging in a pediatric population[J]. Radiol Cardiothorac Imaging, 2022,4(2):e210109.
- [4] ALLEN B D, CARR M, BOTELHO M P, et al. Highly accelerated cardiac MRI using iterative SENSE reconstruction: Initial clinical experience[J]. Int J Cardiovasc Imaging, 2016,32(6):955-963.
- [5] KLINKE V, MUZZARELLI S, LAURIERS N, et al. Quality assessment of cardiovascular magnetic resonance in the setting of the European CMR registry: Description and validation of standardized criteria[J]. J Cardiovasc Magn Reson, 2013,15(1):55.
- [6] 王家鑫,尹刚,贺光军,等.2020 年心血管磁共振学会标准化图像判读与后处理解读[J].磁共振成像,2020,11(10):843-847.
- [7] 王家鑫,杨凯,赵世华.2020 SCMR 心血管磁共振临床指征专家共识解读[J].磁共振成像,2021,12(5):85-89.
- [8] 李玮,全硕,张晓东,等.压缩感知及梯度自旋回波序列优化 3D MR 胰胆管成像图像质量的可行性[J].中国介入影像与治疗学,2022,19(11):720-724.
- [9] 林青,王佳佳,孙明华,等.心脏磁共振压缩感知电影序列的临床应用[J].中国医学影像技术,2020,36(2):281-286.
- [10] WANG J, LIN Q, PAN Y, et al. The accuracy of compressed sensing cardiovascular magnetic resonance imaging in heart failure classifications [J]. Int J Cardiovasc Imaging, 2020, 36(6):1157-1166.
- [11] LONGÈRE B, ALLARD P E, GKIZAS C V, et al. Compressed sensing real-time cine reduces CMR arrhythmia-related artifacts[J]. J Clin Med, 2021,10(15):3274.
- [12] VERMERSCH M, LONGÈRE B, COISNE A, et al. Compressed sensing real-time cine imaging for assessment of ventricular function, volumes and mass in clinical practice[J]. Eur Radiol, 2020,30(1):609-619.
- [13] LONGÈRE B, PAGNIEZ J, COISNE A, et al. Right ventricular volume and function assessment in congenital heart disease using CMR compressed-sensing real-time cine imaging [J]. J Clin Med, 2021,10(9):1930.