



2023年SCMR 4D Flow 心血管磁共振 共识声明解读

贾溪, 赵世华*

作者单位 中国医学科学院北京协和医学院 国家心血管病中心 阜外医院磁共振影像科, 北京 100037

*通信作者 赵世华, E-mail: cjrzhaoshihua2009@163.com

中图分类号 R445.2; R541.7 文献标识码 A DOI 10.12015/issn.1674-8034.2024.03.001

本文引用格式 贾溪, 赵世华. 2023年SCMR 4D Flow 心血管磁共振共识声明解读[J]. 磁共振成像, 2024, 15(3): 1-6.

[摘要] 血流动力学评估对于心血管疾病的诊断和治疗十分重要, 四维心血管磁共振血流成像 (four-dimensional cardiovascular magnetic resonance flow imaging, 4D Flow CMR) 可在一次采集中全面、准确地评估血流。2023年心血管磁共振学会 (Society for Cardiovascular Magnetic Resonance, SCMR) 在2015版4D Flow CMR共识声明的基础上更新发布了新版共识声明, 为4D Flow CMR的采集参数的选择、后处理工作流程、整合入临床实践、推荐的出版标准提供建议, 并定义了临床中心的最低质量保证和验证标准, 以及对其局限性和未来展望进行讨论。笔者对新版共识声明进行解读与分析, 旨在为未来4D Flow CMR广泛应用于临床及该领域研究方向提供参考。

[关键词] 四维心血管磁共振血流成像; 心血管疾病; 临床实践; 科学研究; 共识声明; 磁共振成像

4D Flow cardiovascular magnetic resonance consensus statement of SCMR: 2023 update

JIA Xi, ZHAO Shihua*

Department of Magnetic Resonance Imaging, Fuwai Hospital, National Center for Cardiovascular Diseases of China, Chinese Academy of Medical Sciences and Peking Union Medical College, Beijing 100037, China

*Correspondence to ZHAO S H, E-mail: cjrzhaoshihua2009@163.com

Received 1 Nov 2023, Accepted 23 Feb 2024; DOI 10.12015/issn.1674-8034.2024.03.001

ACKNOWLEDGMENTS National Key R&D Program of China (No. 2021YFF0501400, 2021YFF0501404); National Natural Science Foundation of China (No. 81930044).

Cite this article as JIA X, ZHAO S H. 4D Flow cardiovascular magnetic resonance consensus statement of SCMR: 2023 update[J]. Chin J Magn Reson Imaging, 2024, 15(3): 1-6.

Abstract Hemodialysis evaluation is important for the diagnosis and treatment of cardiovascular disease. Four-dimensional cardiovascular magnetic resonance flow imaging (4D Flow CMR) can comprehensively and accurately evaluate blood flow. The Society for Cardiovascular Magnetic Resonance (SCMR) issued a new consensus statement in 2023 based on the 2015 4D Flow CMR consensus statement. The consensus includes recommendations provided for 4D Flow CMR acquisition parameter selection, post-processing workflow, integration into clinical practice, publication standards checklist, and definition of minimum quality assurance and validation criteria for clinical centers, as well as the current limitations and future. The author interpreted and analyzed the new version of the consensus statement, aiming to provide reference for the wide clinical application of 4D Flow CMR and the research direction of this field in the future.

Key words four-dimensional cardiovascular magnetic resonance flow imaging; cardiovascular disease; clinical practice; scientific research; consensus statement; magnetic resonance imaging

0 引言

四维心血管磁共振血流成像 (four-dimensional cardiovascular magnetic resonance flow imaging, 4D Flow CMR) 可在单次采集中提供全面的心血管血流的体内表征, 有助于理解心血管疾病的病理生理和临床表现。该技术同时对三个空间维度的血流进行速度编码, 并相对于三个空间维度和沿心脏周期的时间维度来解析血流速度 (3D+时间=4D)^[1]。目前临床最常用的CMR血流成像技术是单向速度编码的2D电影相位对比CMR (2D cine phase contrast CMR, 2D cine PC-CMR), 与之相比, 4D Flow CMR不仅能实现相当的血流体积定量, 还具有以下优势^[2]: (1) 利用质量守恒原理对数据进行评估和验证, 有利于数

据质量保证的标准化, 确保了4D Flow CMR测量数据具有良好的内部一致性; (2) 可在采集区域内的任何位置设置平面以实现回顾性地测量血流参数, 与需要多次扫描的2D cine PC-CMR相比更快^[3], 从而缩短低龄儿童的麻醉时间或失代偿患者的扫描时间; (3) 4D Flow CMR的瓣膜追踪技术使通过瓣膜的血流评估更加准确; (4) 能够评估所有空间方向的血流从而更精准地测量狭窄射流的峰值速度。另外, 与用计算机模拟真实流体模型计算得出结果的计算流体力学 (computational fluid dynamics, CFD) 相比, 4D Flow CMR是活体内直接测量, 其准确性和真实性更高。

自2015版4D Flow CMR共识声明^[2]发布以来,

收稿日期 2023-11-01 接受日期 2024-02-23

基金项目 国家重点研发项目 (编号: 2021YFF0501400, 2021YFF0501404); 国家自然科学基金项目 (编号: 81930044)

<https://www.chinesemri.com>

• 1 •

随着CMR扫描仪硬件和线圈、数据采集和重建策略、后处理工具的发展,4D Flow CMR的用户基础逐渐扩大,目前已在全球多个临床中心中常规使用,特别是应用于主动脉疾病、先天性心脏病及其他心血管疾病。然而,4D Flow CMR在临床实践和科学研究中的应用具有不同优先级。临床采集需要快速可靠的血流和流速定量,科学研究则优先考虑数据的全面性,由于缺乏预定义的金标准,其验证更为复杂。

心血管磁共振学会(Society for Cardiovascular Magnetic Resonance, SCMR)对先前发布的共识声明进行更新,制定了2023版4D Flow CMR共识声明^[1],提供了临床推荐采集参数、后处理工作流程、临床中心的最低质量保证和验证标准、临床实践整合的相关建议和推荐的出版标准,并讨论了该技术的局限性,对未来发展进行展望,以期进一步促进4D Flow CMR在全球临床工作流程中的广泛应用,并有助于保持高质量的出版标准。笔者就该共识声明进行以下解读,以方便国内同行参考学习。

1 临床推荐采集参数

使用4D Flow CMR采集的主要目标是实现高精度,其影响因素有很多,包括磁场强度、成像设备、接收器线圈、成像参数、心电门控、呼吸门控、患者准备与配合等。选择4D Flow CMR采集参数时需要平衡扫描精度和扫描时间,临床采集时间通常控制在5~10 min,将其添加至临床工作流程中,如钆延迟强化(late gadolinium enhanced, LGE)的等待期,可避免干扰既定扫描方案。

1.1 设备和设置

新版共识声明指出较高场强(如3 T)可改善信噪比(signal-to-noise ratio, SNR),有益于需要较高空间分辨率的低龄儿童,而身体尺寸较大的大龄儿童和成人在较低场强下即足以获得良好SNR,因此临床选择场强时应考虑患者年龄及身体尺寸等因素。另外,新版共识声明还提出了线圈的选择标准,其很大程度上取决于本地协议和可用性,数量需要与扫描仪及时重建数据的能力相平衡,常规用于标准心脏成像的线圈元件数量足以完成高质量4D Flow CMR采集。为保证数据质量,理想状态下应进行全容积覆盖成像,至少包括瓣膜、主动脉窦和肺动脉窦,扫描人员可通过扫描仪的解剖定位图像来确认视野是否覆盖感兴趣区(region of interest, ROI)。各单位可根据个体病理/不同年龄组对标准化方案进行调整以便使用。

1.2 扫描参数

患者的生理参数会影响血流成像的准确性和精确度。不同体型和心率会影响时空分辨率及SNR,进而影响速度噪声比(velocity noise ratio, VNR),因此该共识声明建议根据不同年龄组调整空间分辨

率。由于图像重建过程中使用空间插值,重建分辨率常高于基于视场和K空间矩阵大小的采集分辨率,而序列性能主要由采集分辨率定义,因此两种分辨率均应在科学出版物中说明。

非对比4D Flow CMR采集中应选择尽可能低的流速编码(velocity encoding limit, VENC),在避免速度混叠的同时保证足够的VNR,提高准确性。新版共识声明进一步明确VENC的选择标准,应比最大流速高10%,但不超过25%^[4],可根据既往影像学检查结果进行选择,否则可在主动脉瓣或ROI采用2D相位对比采集或快速速度侦察序列。若无先前2D相位对比采集,则根据是否怀疑管腔狭窄做出不同选择。怀疑狭窄者选择250 cm/s作为初始VENC,无可疑狭窄者按照以下标准选择:(1)大血管(肺动脉和主动脉),150 cm/s;(2)夹层假腔,50~150 cm/s;(3)静脉血流(Fontan患者包括心外导管和肺动脉),50~80 cm/s;(4)心腔内,100~150 cm/s。此外,双VENC、多VENC或可变VENC可以提高速度动态范围和VNR,研究^[5-7]表明左肺上叶切除术后患者通过双VENC的4D Flow CMR成像能够检出引起血栓形成的左房异常血流,而多VENC的4D Flow CMR成像还能提高检测主动脉低流量的准确度,以及路径线和流线的准确性,并且在心脏附近动静脉的流量测量中具有较好的准确性和可重复性,减少了观察者间变异。

1.3 对比剂和翻转角

具有短重复时间的扰相梯度回波序列无需对比剂即可生成相位对比血管造影图像。使用钆对比剂^[8]或超顺磁性氧化铁^[9]可缩短T1从而改善图像SNR和VNR,提高图像质量。然而对比剂并非必要使用,多数情况下不使用对比剂就能获得良好的图像质量,所以目前更倾向于非对比剂采集。

增加翻转角可优化成像参数^[10],新版共识声明进一步明确了翻转角的设定标准。非对比4D Flow CMR采集的标准翻转角应设定为接近Ernst角,即7°左右,重复时间和回波时间应尽可能短。关于使用对比剂后的翻转角,目前临床中心指南为:(1)给药后直接获得4D Flow CMR,15°~25°(1.5 T)和12°(3 T);(2)LGE后获得4D Flow CMR,较低翻转角(类似非对比度值);(3)使用超顺磁性氧化铁,15°~25°;(4)新生儿,由于特定吸收率(specific absorption rate, SAR)的限制翻转角应降为12°。

1.4 患者扫描前准备

4D Flow CMR扫描需要心电图(electrocardiogram, ECG)门控尽可能回顾性地捕捉心动周期内的动态变化,并通过可检测的R波来确保RR间期的一致性,因此需要操作人员监测ECG信号并估计采集时间,以确定电极是否需要重新定位,以免ECG信号不良导致扫描时间延长,图像质量和准确性降低。另外,呼吸运动抑制可提高图像质量,且无需延长扫描

时间。序列开发商或供应商应为是否针对特定序列行呼吸运动抑制提供指导和建议,目前多数临床中心不使用呼吸运动抑制。心率较快患者(如新生儿、精神紧张或运动期间人员,心率 >120 bpm)如需呼吸运动抑制,可考虑自门控等技术以最大限度地减少呼吸伪影。评估主动脉血流时,弹簧圈的位置应足够高以完全包围主动脉弓。4D Flow CMR 扫描时间可能相对较长,应在扫描开始前告知患者以减少不适感。

2 临床后处理工作流程

2015版4D Flow CMR 共识声明中详细描述了数据预处理步骤,包括校正涡流或伴随梯度场引起的相位偏移、避免速度混叠等,目前仍然适用,但相关数据处理方法可能因不同磁共振系统、序列、协议和应用而异。新版共识声明指出目前大多数4D Flow CMR 后处理分析软件包已获得临床常规基础血流量的监管机构批准,并且允许血液流动的可视化和各种高级研究参数的分析,如血流偏心率、动能等,部分软件包还包括瓣膜跟踪技术,可避免跨平面运动的问题。

2.1 步骤1:背景相位偏移校正

4D Flow CMR 需要校正与涡流和伴随的梯度场相关的相位偏移误差以实现精准流量测量。使用固定体模重复检查并从患者数据中减去静态组织的流量测量值可校正偏移误差^[1],但在临床实践中过于耗时,新版共识声明推荐可使用与之性能相当的静态组织插值偏移校正^[12],OECHTERING 等^[13]对4D Flow CMR 的多软件包和多供应商进行交叉研究同样发现,这一方法可提高结果的重复性和再现性。另外,由于ROI可能位于远离磁体等中心的位置,偏移误差会随着与磁体等中心的距离增加而增加,因此应特别注意大视场。

2.2 步骤2:速度抗混叠

最大血流速度超过所选 VENC 时,速度混叠会引起测量结果受损,相位展开可提高其测量精度。目前多数软件可以检测相邻体素速度值的较大偏移并自动校正。然而,新版共识声明提示应目测心脏收缩期和舒张期峰值以检查三个速度编码方向是否存在不可校正的速度混叠,受其影响的图像区域则不进行分析。

2.3 分割

新版共识声明详细描述了分割的具体方法和注意事项。软件提供的方案包括三维分割血管,或在成像体积中选取ROI,在其二维横截面上描绘血管轮廓来评估血流量。选择合适的ROI并进行定向和分割是血流和速度量化过程的重要部分^[14]。排除受伪影影响的区域,在与血管正交的二维平面中测量血管流量值。由于血管运动,应在整个心动周期中调

整ROI,可借助基于中心线的平面定位和基于配准的轮廓传播。

2.4 可视化

可视化有助于检测和理解不同病理中的血流变化,如分流或瓣膜功能不全。现有多种工具可完成可视化,例如基于速度的颜色编码、最大速度投影(maximum velocity projection, velocity MIP)、瞬时流线和时间分辨路径。共识声明中强调流线并不代表搏动血流的流动路径,而是提供有关瞬时速度场的信息,因此短流线可最大程度地减少误差。可视化应包括完整三维体积的动态可视化以及特定ROI的局部可视化^[15]。速度值倒置时,可视化可作为一种快速的质量评估方法。

2.5 量化

在解剖和血流可视化的引导下,可在解剖学标志或病理血流区域放置二维平面以测量血流参数。临床报告中应包括流量和流速等4D Flow CMR 衍生参数。另外要注意对定量数据进行内部一致性验证。

由于某些流动几何形状可能影响血流测量的准确性,新版共识声明补充了应对这些情况的测量方法,建议操作者应谨慎测量高速射流区域、湍流导致大量失相区域及高涡旋血流,尤其是升主动脉瘤或动脉瘤状肺动脉^[16]。此时可在异常血流区域外进行替代血流测量或联合使用心室容积测量以指导临床治疗,例如使用上腔静脉和降主动脉血流作为主动脉中的净前向血流。

目前许多软件包新增了瓣膜追踪技术,通过两个正交的电影视图(比如二尖瓣的左室两腔心和四腔心视图)来跟踪整个心动周期的瓣膜运动,重构垂直于反流射流的平面来量化瓣膜反流量,提高二尖瓣和三尖瓣流量评估的准确性,包括直接射流定量或间接定量法,均在新版共识声明中进行了具体介绍。(1)直接射流定量:适用于仅有一个中心射流的反流病变,如主动脉瓣反流、肺动脉瓣反流、功能性二尖瓣反流、或房室间隔缺损矫治术后房室瓣反流。其优势为无需对通过其他瓣膜或房室间隔的反流射流形态或质量守恒进行假设,且所有四个瓣膜的流量量化均来自同一平均心动周期的同一数据集。(2)间接定量法:即二尖瓣反流量化的标准CMR方法,包括减去主动脉净左心室搏动容积。瓣膜追踪技术改进了间接法,即从二尖瓣前向血流中减去主动脉净血流。该方法适用于有多个不同方向的射流或反流射流具有不可纠正的混叠,通过二尖瓣和主动脉瓣进行瓣膜跟踪,结果更加准确^[17-18]。

无论使用何种定量方法评估瓣膜反流量,均建议与标准方法交叉核对定量结果。若两种方法的反流量定量结果存在显著差异(>15 mL 或 $>10\%$),建议按照质量守恒原理(即进出腔室的流量应保持平衡)重新分析并调查原因:左心室每搏输出量(短轴电影

分割)=二尖瓣前向血流+主动脉后向血流=主动脉前向血流+二尖瓣后向血流。回顾性瓣膜追踪同样适用于心房颤动患者^[19],但存在流量被低估的风险,此时相对血流量化如反流分数则更为可靠。

3 质量保证和验证建议

为纳入标准临床实践,4D Flow CMR的采集必须达到质量阈值,为临床医师进行数据的准确定量提供信心,其准确性还受到供应商序列、采集参数和后处理软件的影响。另外,验证4D Flow CMR的序列开发、重建算法、后处理工作流程等多个方面对于科学研究的顺利推进也十分重要。因此,无论是在临床实践中还是研究背景下,初始验证和持续的质量保证都是4D Flow CMR应用的重要方面,新版共识声明针对这一部分在2015版的基础上进行了扩展。

3.1 临床使用的质量保证和验证建议

3.1.1 初始验证

一般建议在使用新序列、采集参数发生重大变化、或使用新的后处理平台时应该进行初步验证。声明建议使用标准的2D Flow和4D Flow CMR对健康受试者和/或没有任何心内或心外分流的患者采集10个数据集,至少包括:升主动脉、肺动脉干、左右肺动脉分支、上腔静脉、降主动脉和肺静脉。如有可能,建议在同一天或一个确定的短时间内(<1个月)对志愿者或患者进行重复扫描。

定量评估包括3个步骤:

(1)与2D Flow CMR比较。建议至少比较10个数据集中的升主动脉、肺动脉干、左右肺动脉分支、上腔静脉、降主动脉的前向血流和峰值速度。

(2)数据集内验证。利用质量守恒原理,质量既不产生也不破坏,因此流量应保持相等。可进行以下前向流量比较:主动脉流量(如果在窦上方测量,则增加5%的冠状动脉流量)=肺动脉流量;右肺动脉流量+左肺动脉流量=主肺动脉流量;肺动脉分支流量=肺静脉流量(如不相等则检查肺静脉异常);上腔静脉流量+降主动脉流量=升主动脉流量;此外,声明建议在升主动脉Valsalva窦和第一分支血管之间放置2~4个测量平面,同理,流量在所有平面内应相匹配(差异<5%)。

(3)阅片者内和阅片者间比较(当后处理平台更改时/更新后)。建议参与临床服务的每位阅片者按照上述验证流程对所有10个数据集完成两次验证,间隔至少1周。理想状态下流量评估的差异应<5%,由于扫描间存在微小生理差异,扫描-重新扫描的差异在10%以内均可接受。

3.1.2 日常质量保证

相位对比和数据集的初始视觉评估应包括运动伪影、环绕伪影和心脏收缩期间任何混叠的评估。

应利用质量守恒原理进行数据集内验证的定量评估。至少完成上述“数据集内”的前向流量比较之一。其选择取决于潜在的解剖和生理学,应由阅片医师决定。

3.2 研究环境中的质量保证和验证建议

有几种方法可验证4D Flow CMR的序列开发、重建算法、后处理工作流程等多个方面,大致可分为:(1)体内研究;(2)体外研究;(3)计算机模拟。需要注意的是,目前尚无评估和验证4D Flow CMR所有方面的单一方法,且评估和验证方法需要针对特定的序列、参数或应用进行调整。

3.2.1 体内研究

体内研究用于评估和验证新的4D Flow CMR方法,并与其他方法(如超声心动图、2D Flow CMR及其他4D Flow CMR方法)进行比较^[20-22]。由于封闭系统内(心脏或主动脉)流入与流出量应相等,可使用质量守恒原理等一致性标准进行验证。该方法的主要优势在于能代表其最终效用,面临的挑战是无法获得先进的血液动力学参数(如壁面剪切应力、脉搏传导速度、湍流动能、涡度、压力梯度和心室内血流组分等)的参考数据。

3.2.2 体外研究

理想的或解剖学精确的血管和心脏模型中的体外体模研究,即流动体模,允许在已知和可重复的流动条件下进行评估和验证。其优势之一是能在同样的流动设置上进行多种不同参数设置的长时间扫描,之二是可以验证后处理软件,并将结果与流量计、“计时器和烧杯”和压力探针测量结果以及其他实验流体动力学技术(如粒子图像测速和直接压力测量)进行比较^[23]。其劣势是体外模型通常缺少真实的周围组织。除了具有真实几何形状和脉动流的高级流体模型有很高价值,简化的体模实验也可提供一定的价值。

3.2.3 计算机模拟

在数值速度数据中模拟4D Flow CMR测量,也称为合成体模和数字参考对象,允许在完全已知的流动环境中详细研究序列设计和参数设置的影响^[24-25]。该方法的另一个优势是可以使用更为逼真的周围组织来创建合成体模,这与重建算法和处理工具有关。也可考虑混合体外/合成体模,即将体外数据嵌入合成背景。其主要劣势是模拟逼真度的问题,即模拟结果反映现实的程度,而提高模拟逼真度需要更多的计算机资源。因此,模拟所需的完整度,与该研究在模拟时间和模拟完整性之间的权衡结果相关。

总之,4D Flow CMR方法的开发可以通过体内研究、体外研究、计算机模拟或其组合来评估和验证。

4 融入临床实践

将4D Flow CMR融入临床实践中时,要注意对4D Flow CMR序列进行初始验证,还需要考虑图像存储空间问题、集成图形处理单元(graphics processing units, GPUs)及较高的计算机处理器能力等,或者采用一些软件供应商提供的基于云的4D Flow CMR。

随着临床验证应用程序和后处理软件的出现,4D Flow CMR序列逐渐被添加到临床常规CMR操作规程中。关于4D Flow CMR在临床实践中的优先级,新版共识声明指出应考虑以下几个因素:(1)多数情况下非对比4D Flow CMR足以解决临床问题,如因其他临床问题需要使用钆对比剂,则应在CMR血管造影后或心肌LGE前的延迟期间使用;(2)临床适应证中包括血流量化(如分流评估、瓣膜反流量)时,4D Flow CMR具有更高优先级,应在成像流程中尽早完成;(3)在4D Flow CMR发挥辅助作用的病理(如主动脉瘤)中,应确保所有诊断序列在4D Flow CMR采集前完成。这对临床医师将4D Flow CMR技术融入临床实践起到了重要的指导作用。

该声明建议将流量和峰值速度的定量分析加入标准CMR报告模板,并建议开发一个工作流程以DICOM格式保存4D Flow CMR图像和视频,然后将其加载到标准观看平台上供临床医生和多学科团队会议使用。

5 推荐的出版标准

4D Flow CMR相关的技术出版物(通常旨在提出和评估新技术)和临床研究(将4D Flow CMR应用于临床问题)的推荐标准存在差异。新版共识声明中补充了包含4D Flow CMR的科学出版物应遵循的基本和推荐标准。高质量和标准化的出版物将使提出的序列方案更易于复制并应用于临床,促进更高质量的荟萃分析,以推动该领域向前发展,因此以下推荐标准应被严格遵守。

具体思路:(1)引言。对于基于先验假设的研究,研究目的中应清楚地说明所有假设。(2)方法-采集。所有可能影响4D Flow CMR数据质量的数据处理方法均应作出说明,包括对涡流、梯度场不均匀导致的失真、体内内移相和伴随梯度场、速度混叠以及噪声滤波的校正方法(如果不使用市售序列和数据处理软件)。另外,许多参数会影响4D Flow CMR数据的图像质量和属性,包括硬件细节、采集参数和后处理软件,因此均应进行报告。(3)方法-数据处理。数据处理可由商业CE和FDA批准的软件包完成,而内部开发的工具可进一步推动技术的发展。开源软件解决方案促进了可重复性研究,此类工具的可用性应在出版物中说明。对于商业可用及开源软件,应详细说明其发布版本。(4)方法-量化。数据处理后

可从速度场中提取血流动力学参数,进而推导出一系列指标,每个指标都与特定的应用程序相关。因此,应详细描述分析方法,以便在其他中心进行类似的分析。(5)方法-统计。临床诊断和/或结局研究需要根据功效分析设计足够的样本量。方法部分应包括一个统计段落,描述研究规模下所使用的统计方法;(6)结果。结果部分应包括纳入排除的受试者数量、排除原因和数据质量保证的评估结果,至少包括数据集内验证以及数据子集的阅片者间和阅片者内一致性。考虑到算法及其性能的多样性,还应说明是否存在速度混叠,并估计速度场的校正效果如何。定量结果最好以表格形式展示,除此之外,还应展示典型图片或精心制作的插图。若出版商允许,可将视频作为补充材料。应对解剖结构作出注释。定量参数应包括色条。如果在可视化中使用粒子轨迹,应明确其类型(如路径线、流线)。(7)讨论。如果采集设置与此次或之前的建议存在显著差异,或参与者间有差异,应在局限性中说明,并讨论差异对结果的影响。(8)参考文献。对方法和技术的引用应参考原著。

这些建议标准有助于保证高质量出版物,改善审查过程,并便于比较不同出版物,因此应被严格遵守。

6 局限性和未来展望

目前想要实现4D Flow CMR的广泛应用,仍然面临一些挑战,包括由于单个用户选择的VENC而导致的速度动态范围有限、长且不可预测的扫描时间、大型数据集的数据存储(尤其在临床工作流程中)以及手动且耗时的数据处理(影响用户信心)。目前的几项新进展有望在未来克服以上挑战。(1)加速技术:可缩短采集时间或在同等采集时间内采集更多的数据,减少与速度编码相关联的动态范围问题。4D Flow CMR技术通常基于单个预定义的VENC来测量血流速度,但加速技术已实现具有双或多VENC速度编码的4D Flow CMR^[26-27],可以获得具有低VENC采集的良好VNR但无速度混叠的4D Flow CMR数据。(2)呼吸和心脏自门控技术:可简化和流线化采集,以优化临床工作流程。然而,由于重建时间的问题目前未被允许用于临床。(3)加速数据处理 workflow:目前4D Flow CMR的数据分析工作流程通常是非标准化且耗时的,限制其可重复性和临床转化。克服这些限制需要开发具有最小用户依赖性的有效图像分析策略,机器学习在这一方面具有相当大的潜力。

7 总结

总之,4D Flow CMR现已从“漂亮的图片”转变为在临床实践中量化血流的可靠成像方法,它不再

只是研究人员的工具,也成为了临床医生的工具,可独特地提供心血管血流的全面、体内表征,对于解释心血管疾病的病理生理和临床表现至关重要。该共识声明旨在帮助临床医师在临床工作中启用4D Flow CMR,并为临床和研究环境设定标准,以确保高质量4D Flow CMR输出。

作者利益冲突声明:全体作者均声明无利益冲突。

作者贡献声明:赵世华设计本研究的方案,对稿件的重要内容进行了修改;贾溪起草和撰写稿件,获取、分析并解释本研究的数据;赵世华获得国家重点研发计划项目、国家自然科学基金项目资金资助。全体作者都同意发表最后的修改稿,同意对本研究的所有方面负责,确保本研究的准确性和诚信。

参考文献[References]

- [1] BISSELL M M, RAIMONDI F, AIT ALI L, et al. 4D Flow cardiovascular magnetic resonance consensus statement: 2023 update[J/OL]. J Cardiovasc Magn Reson, 2023, 25(1): 40 [2023-11-09]. <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/37474977/>. DOI: 10.1186/s12968-023-00942-z.
- [2] DYVERFELDT P, BISSELL M, BARKER A J, et al. 4D flow cardiovascular magnetic resonance consensus statement[J/OL]. J Cardiovasc Magn Reson, 2015, 17(1): 72 [2023-11-09]. <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/26257141/>. DOI: 10.1186/s12968-015-0174-5.
- [3] VALVERDE I, NORDMEYER S, URIBE S, et al. Systemic-to-pulmonary collateral flow in patients with palliated univentricular heart physiology: measurement using cardiovascular magnetic resonance 4D velocity acquisition[J/OL]. J Cardiovasc Magn Reson, 2012, 14(1): 25 [2023-11-09]. <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/22541134/>. DOI: 10.1186/1532-429X-14-25.
- [4] FRATZ S, CHUNG T, GREIL G F, et al. Guidelines and protocols for cardiovascular magnetic resonance in children and adults with congenital heart disease: SCMR expert consensus group on congenital heart disease[J/OL]. J Cardiovasc Magn Reson, 2013, 15(1): 51 [2023-11-09]. <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/23763839/>. DOI: 10.1186/1532-429X-15-51.
- [5] CALLAGHAN F M, KOZOR R, SHERRAH A G, et al. Use of multi-velocity encoding 4D flow MRI to improve quantification of flow patterns in the aorta[J]. J Magn Reson Imaging, 2016, 43(2): 352-363. DOI: 10.1002/jmri.24991.
- [6] MOERSDORF R, TREUTLEIN M, KROEGER J R, et al. Precision, reproducibility and applicability of an undersampled multi-vec 4D flow MRI sequence for the assessment of cardiac hemodynamics[J/OL]. Magn Reson Imaging, 2019, 61: 73-82 [2023-11-09]. <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/31100318/>. DOI: 10.1016/j.mri.2019.05.015.
- [7] NAKAZA M, MATSUMOTO M, SEKINE T, et al. Dual-VENC 4D flow MRI can detect abnormal blood flow in the left atrium that potentially causes thrombosis formation after left upper lobectomy[J]. Magn Reson Med Sci, 2022, 21(3): 433-443. DOI: 10.2463/mrms.mp.2020-0170.
- [8] HESS A T, BISSELL M M, NTUSI N A, et al. Aortic 4D flow: quantification of signal-to-noise ratio as a function of field strength and contrast enhancement for 1.5T, 3T, and 7T[J]. Magn Reson Med, 2015, 73(5): 1864-1871. DOI: 10.1002/mrm.25317.
- [9] VASANAWALA S S, NGUYEN K L, HOPE M D, et al. Safety and technique of ferumoxytol administration for MRI[J]. Magn Reson Med, 2016, 75(5): 2107-2111. DOI: 10.1002/mrm.26151.
- [10] TERADA M, TAKEHARA Y, ISODA H, et al. Technical background for 4D flow MR imaging[J]. Magn Reson Med Sci, 2022, 21(2): 267-277. DOI: 10.2463/mrms.rev.2021-0104.
- [11] CHERNOBELSKY A, SHUBAYEV O, COMEAU C R, et al. Baseline correction of phase contrast images improves quantification of blood flow in the great vessels[J]. J Cardiovasc Magn Reson, 2007, 9(4): 681-685. DOI: 10.1080/10976640601187588.
- [12] MINDERHOUD S C S, VAN DER VELDE N, WENTZEL J J, et al. The clinical impact of phase offset errors and different correction methods in cardiovascular magnetic resonance phase contrast imaging: a multi-scanner study[J/OL]. J Cardiovasc Magn Reson, 2020, 22(1): 68 [2023-11-09]. <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/32938483/>. DOI: 10.1186/s12968-020-00659-3.
- [13] OECHTERING T H, NOWAK A, SIEREN M M, et al. Repeatability and reproducibility of various 4D Flow MRI postprocessing software programs in a multi-software and multi-vendor cross-over comparison study[J/OL]. J Cardiovasc Magn Reson, 2023, 25(1): 22 [2023-11-09]. <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/36978131/>. DOI: 10.1186/s12968-023-00921-4.
- [14] CASCIARO M E, PASCANER A F, GULENEA F N, et al. 4D flow MRI: impact of region of interest size, angulation and spatial resolution on aortic flow assessment[J/OL]. Physiol Meas, 2021, 42(3) [2023-11-09]. <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/33567412/>. DOI: 10.1088/1361-6579/abe525.
- [15] HSIAO A, LUSTIG M, ALLEY M T, et al. Evaluation of valvular insufficiency and shunts with parallel-imaging compressed-sensing 4D phase-contrast MR imaging with stereoscopic 3D velocity-fusion volume-rendered visualization[J]. Radiology, 2012, 265(1): 87-95. DOI: 10.1148/radiol.12120055.
- [16] HSIAO A, LUSTIG M, ALLEY M T, et al. Rapid pediatric cardiac assessment of flow and ventricular volume with compressed sensing parallel imaging volumetric cine phase-contrast MRI[J/OL]. AJR Am J Roentgenol, 2012, 198(3): W250-W259 [2023-11-09]. <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/22358022/>. DOI: 10.2214/AJR.11.6969.
- [17] FIDOCK B, ARCHER G, BARKER N, et al. Standard and emerging CMR methods for mitral regurgitation quantification[J/OL]. Int J Cardiol, 2021, 331: 316-321 [2023-11-09]. <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/33548381/>. DOI: 10.1016/j.ijcard.2021.01.066.
- [18] SPAMPINATO R A, JAHNKE C, CRELIER G, et al. Quantification of regurgitation in mitral valve prolapse with four-dimensional flow cardiovascular magnetic resonance[J/OL]. J Cardiovasc Magn Reson, 2021, 23(1): 87 [2023-11-09]. <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/34233708/>. DOI: 10.1186/s12968-021-00783-8.
- [19] MILLS M T, GRAFTON-CLARKE C, WILLIAMS G, et al. Feasibility and validation of trans-valvular flow derived by four-dimensional flow cardiovascular magnetic resonance imaging in patients with atrial fibrillation[J/OL]. Wellcome Open Res, 2021, 6: 73 [2023-11-09]. <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/34095509/>. DOI: 10.12688/wellcomeopenres.16655.2.
- [20] BRIX L, RINGGAARD S, RASMUSSEN A, et al. Three dimensional three component whole heart cardiovascular magnetic resonance velocity mapping: comparison of flow measurements from 3D and 2D acquisitions[J/OL]. J Cardiovasc Magn Reson, 2009, 11(1): 3 [2023-11-09]. <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/19232119/>. DOI: 10.1186/1532-429X-11-3.
- [21] NORDMEYER S, RIESENKAMPFF E, MESSROGHLI D, et al. Four-dimensional velocity-encoded magnetic resonance imaging improves blood flow quantification in patients with complex accelerated flow[J]. J Magn Reson Imaging, 2013, 37(1): 208-216. DOI: 10.1002/jmri.23793.
- [22] URIBE S, BEERBAUM P, SØRENSEN T S, et al. Four-dimensional (4D) flow of the whole heart and great vessels using real-time respiratory self-gating[J]. Magn Reson Med, 2009, 62(4): 984-992. DOI: 10.1002/mrm.22090.
- [23] HA H, KVITTING J P, DYVERFELDT P, et al. Validation of pressure drop assessment using 4D flow MRI-based turbulence production in various shapes of aortic stenoses[J]. Magn Reson Med, 2019, 81(2): 893-906. DOI: 10.1002/mrm.27437.
- [24] PUISEUX T, SEWONU A, MORENO R, et al. Numerical simulation of time-resolved 3D phase-contrast magnetic resonance imaging[J/OL]. PLoS One, 2021, 16(3): e0248816 [2023-11-09]. <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/33770130/>. DOI: 10.1371/journal.pone.0248816.
- [25] DIRIX P, BUOSO S, PEPER E S, et al. Synthesis of patient-specific multipoint 4D flow MRI data of turbulent aortic flow downstream of stenotic valves[J/OL]. Sci Rep, 2022, 12(1): 16004 [2023-11-09]. <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/36163357/>. DOI: 10.1038/s41598-022-20121-x.
- [26] NETT E J, JOHNSON K M, FRYDRYCHOWICZ A, et al. Four-dimensional phase contrast MRI with accelerated dual velocity encoding[J]. J Magn Reson Imaging, 2012, 35(6): 1462-1471. DOI: 10.1002/jmri.23588.
- [27] SCHNELL S, ANSARI S A, WU C, et al. Accelerated dual-vec 4D flow MRI for neurovascular applications[J]. J Magn Reson Imaging, 2017, 46(1): 102-114. DOI: 10.1002/jmri.25595.