

# 血流向量成像技术在心脏瓣膜病中的应用进展

孟令华 王 伟 王岳恒

**摘 要** 心脏瓣膜病作为较常见的心脏病,随着病情进展可导致心脏血流动力学发生显著变化。血流向量成像技术既可观察心腔内血流流场的变化,又可评估心脏局部和整体功能的改变。本文就血流向量成像技术在心脏瓣膜病中的应用进展进行综述。

**关键词** 血流向量成像;心脏瓣膜病;能量损耗

[中图法分类号]R540.45;R542.5

[文献标识码]A

## Research progress of vector flow mapping technology in heart valve disease

MENG Linghua, WANG Wei, WANG Yueheng

Department of Cardiac Ultrasound, the Second Hospital of Hebei Medical University, Shijiazhuang 050000, China

**ABSTRACT** Heart valve disease is a common heart disease, which can lead to significant changes in cardiac hemodynamics with the progress of the disease. Vector flow mapping technology can be used not only to observe the changes of intracardiac blood flow field, but also can be used to evaluate the changes of local and global cardiac function. This article reviews the application and research progress of vector flow mapping technology in cardiac valvular disease.

**KEY WORDS** Vector flow mapping; Heart valve disease; Energy loss

心脏瓣膜病是指心脏一个或多个瓣膜因风湿热、黏液性变、退行性变、感染或创伤等导致的心脏疾病,其中风湿热是发展中国家瓣膜病的主要病因,退行性改变是发达国家瓣膜病的主要病因。该病进展至末期可发展为心力衰竭。有学者<sup>[1]</sup>认为心脏的解剖结构、心肌运动及心功能的改变与心腔内涡流形态、位置等相关。因此,探究心腔内血流动力学的早期改变对心脏疾病的诊断及疗效预测至关重要<sup>[2]</sup>。血流向量成像(VFM)技术既可观察心血管内血流动力学的改变,又可评价心脏局部和整体的功能,本文就VFM在心脏瓣膜病中的应用进展进行综述。

### 一、心血管流体力学检测方法

目前对于心血管血流动力学的研究方法主要有:超声粒子图像测速(PIV)、心脏磁共振(CMR)、计算机模拟(CFD)及VFM。PIV、CMR、CFD均有其不足之处:①PIV需对患者注射造影剂和跟踪颗粒,属有创操作,且不能准确测量 $>60$  cm/s的流速场<sup>[3]</sup>;②CMR不能提供足够的空间和时间分辨率、扫描时间长,加之心血管内与心血管外结构之间并无充分的对比度,使评估室壁附近的血流变化存在困难;③CFD虽可提供足够的时间和空间分辨率,但其可视化血流量通过公式计算获得,对于疾病状态

下的涡流改变尚无研究。VFM既可以获取与声束平行方向上的血流流速,又可通过连续方程计算得出与声束垂直方向上的血流速度,还具有安全、无创、便捷等优点。VFM可以显示出涡流的形成、分布、衍变,并衍生出量化指标以反映心腔内的流场信息(如涡流面积、循环、能量损耗、室壁剪切力等)。Uejima等<sup>[4]</sup>通过三维数字血流模拟技术首次证实了VFM技术的准确性。Asami等<sup>[5]</sup>比较了立体粒子图像测速仪获取单个心动周期内左室模型的三维速度图与VFM测量数据,证实了VFM技术在三维左室血流流场中的诊断准确性,为VFM技术诊断和预测疾病提供了理论依据。

### 二、心脏瓣膜病患者心腔内流体力学改变

#### 1. 二尖瓣病变

心腔内正常的流体力学改变受心脏结构和功能的影响。正常人舒张早期和晚期在靠近二尖瓣环处形成两个小漩涡,其中靠近前叶处涡流方向为逆时针,出现频率高,较稳定;后叶处涡流方向为顺时针,偶尔出现,欠稳定,此涡流有助于二尖瓣的关闭。当风湿性心脏病患者发生二尖瓣狭窄时,二尖瓣下流场均匀性变差<sup>[6]</sup>,且狭窄程度越重漩涡则越大越扁,其位置距二尖瓣环处越远,距左室中部越近<sup>[7]</sup>。有关二尖瓣关闭不全的实

验研究<sup>[8]</sup>发现,动物实验犬不同程度二尖瓣反流时,二尖瓣前、后叶均可探及逆时针涡流,后叶涡流占据左室更大的空间,且随着反流程度的加重,其能量损耗增加并降低了血流传递效率,进而加重心力衰竭。当临床患者心力衰竭伴有不同程度功能性二尖瓣反流时,反流程度越重,则能量损耗越大。因此,VFM技术为功能性二尖瓣反流程度的评估提供了新指标,并希望应用于临床<sup>[9]</sup>。

除正常瓣膜结构改变可使心腔内血流流场发生变化外,人工瓣膜的植入及瓣膜成形术也可使心腔内正常涡流形态发生改变。当射血分数保留的患者进行二尖瓣置换术后,无论是机械瓣还是生物瓣,其左室腔内均产生逆时针方向运动的涡流,与术前相比能量损耗均增大<sup>[10-11]</sup>。研究<sup>[13-14]</sup>发现虽然术后涡流大小、最大向量速度得到明显改善,但人工机械瓣组的涡流大小及最大向量速度仍高于正常对照组,而人工生物瓣组则与正常对照组相似,进一步说明人工生物瓣更接近正常瓣膜解剖功能。此外,二尖瓣人工机械瓣由于放置位置不同,也可产生形态不同的涡流,放置于解剖位置的瓣膜可产生顺时针涡流,而放置于非解剖位置的瓣膜则产生逆时针涡流,并增加了心脏负担<sup>[15]</sup>。与术前相比,射血分数保留的患者二尖瓣成形术后其涡流方向未发生变化,仍为顺时针方向<sup>[10]</sup>,能量损耗不变<sup>[10]</sup>或增加<sup>[11,16]</sup>。在射血分数减少的患者中,由于射血分数降低使左室的形态更接近球形,经二尖瓣进入左室的血流未与室间隔相撞,进而形成接近正常方向的漩涡,故人工瓣膜置换组与瓣膜成形术组在血流模式上比较差异无统计学意义<sup>[11]</sup>。因此,在人工瓣膜植入或瓣膜成形术患者中,由于手术方式、植入瓣膜的种类、位置、左室的功能状态和心腔几何形状的不同,均可发生涡流形态的改变。由此可见,VFM技术既可评估瓣膜狭窄程度又可评估术后疗效。

## 2. 主动脉瓣病变

能量损耗的变化可反映心脏功能的改变<sup>[17]</sup>。对于射血分数保留的主动脉瓣狭窄患者,能量损耗的改变早于射血分数。研究<sup>[18]</sup>发现即使对照组与病例组射血分数无明显差异,病例组左室能量损耗随狭窄程度的加重均不同程度增加,为更早发现左室收缩功能的改变提供新的角度<sup>[18]</sup>。另一方面,瓣膜狭窄程度越重,左室舒张功能受损也随之加重,继而导致舒张期左室能量损耗增加,研究<sup>[19]</sup>发现能量损耗在评价左室舒张功能方面较单独测量的左室舒张早期最大血流速度更具优势。由此可见,能量损耗对于发现射血分数保留的主动脉瓣狭窄患者心脏功能的早期变化具有重要的临床指导价值。同时,能量损耗也可作为评估左室容量性负荷的指标。研究<sup>[20]</sup>发现,无论是通过人工干预实验模型犬所引起的急性主动脉瓣关闭不全,还是临床慢性主动脉瓣关闭不全的患者,其舒张期能量损耗的增加与主动脉瓣反流严重程度均呈正相关(均 $P<0.05$ )。另外,VFM技术还可作为评估主动脉瓣关闭不全严重程度新的量化方法,伴随反流程度的加重,升主动脉逆流率与降主动脉逆流率均不断增大,且升主动脉逆流率与反流束宽度、反流分数及反流瓣口面积均有良好的相关性( $r=0.932, 0.929, 0.891$ , 均 $P<0.05$ )<sup>[21-22]</sup>,

进一步证实降主动脉逆流率对于评估主动脉瓣反流程度具有较高的敏感性和特异性<sup>[22]</sup>。总之,应用VFM技术评估主动脉瓣病变程度具有较好的临床应用价值。

## 3. 肺动脉瓣病变

Honda等<sup>[23]</sup>应用VFM技术测量右室双出口修复术后经断层扫描提示肺动脉瓣狭窄窄后扩张的主肺动脉内的涡流形态及能量损耗变化,结果发现肺动脉瓣狭窄窄后扩张部分可见一较大涡流形成,且该处能量损耗增加;当进行肺动脉瓣成形联合切开后,主肺动脉内径变小,原有的涡流消失,能量损耗于收缩期显著减小。由此认为可将能量损耗应用于评估肺动脉瓣狭窄后负荷的变化。同时,研究<sup>[24]</sup>发现法洛四联症患者进行修补术后可引起不同程度的肺动脉瓣反流,其VFM定量参数肺动脉瓣反流率与CMR定量参数肺动脉瓣反流分数具有强相关性( $r=0.95, P<0.001$ ),即肺动脉瓣反流程度越重,肺动脉瓣反流率则越大,并进一步观察到室间隔完整型肺动脉瓣闭锁患者术后所引起的肺动脉瓣反流率同样与肺动脉瓣反流分数呈正相关。由此可见,VFM技术可准确定量分析先天性心脏病患者右室流出道梗阻修复术后引起的肺动脉瓣反流。Shibata等<sup>[25]</sup>首次将能量损耗作为法洛四联症修补术后肺动脉瓣反流或肺动脉瓣狭窄所致右室恶化的一个新的预测指标,结果表明术后引起的肺动脉瓣狭窄或反流均可导致收缩期能量损耗的增加。

## 三、VFM技术的局限性和展望

尽管目前VFM技术应用于不同疾病并取得了较好发展,但由于其图像分析基于二维平面图像,而心腔内血流变化为三维流场状态,因此该技术仍具有一定的局限性。综上所述,VFM技术不但可以通过定性参数来发现病理状态下心腔内血流动力学的改变,还可通过定量参数进行疾病的早期诊断和术后疗效预测,相信未来该技术能够更好地服务于临床。

## 参考文献

- [1] Föll D, Taeger S, Bode C, et al. Age, gender, blood pressure, and ventricular geometry influence normal 3D blood flow characteristics in the left heart[J]. *Eur Heart J Cardiovasc Imaging*, 2013, 14(4): 366-373.
- [2] Hong GR, Pedrizzetti G, Tonti G, et al. Characterization and quantification of vortex flow in the human left ventricle by contrast echocardiography using vector particle image velocimetry [J]. *JACC Cardiovasc Imaging*, 2008, 1(6): 705-717.
- [3] Kheradvar A, Houle H, Pedrizzetti G, et al. Echocardiographic particle image velocimetry: a novel technique for quantification of left ventricular blood vorticity pattern [J]. *J Am Soc Echocardiogr*, 2010, 23(1): 86-94.
- [4] Uejima T, Koike A, Sawada H, et al. A new echocardiographic method for identifying vortex flow in the left ventricle: numerical validation [J]. *Ultrasound Med Biol*, 2010, 36(5): 772-788.
- [5] Asami R, Tanaka T, Kawabata KI, et al. Accuracy and limitations of vector flow mapping: left ventricular phantom validation using stereo particle image velocimetry [J]. *J Echocardiogr*, 2017, 15(2): 57-66.
- [6] 黄品同, 尹贻梅, 邹春鹏, 等. 向量血流图技术对二尖瓣流场均匀

- 性的研究[J].中华超声影像学杂志,2010,19(5):382-385.
- [7] 陈倬,李治安,何怡华,等.应用超声向量血流图对二尖瓣狭窄后左室流场的初步研究[J].中国超声医学杂志,2011,27(7):612-616.
- [8] Shimizu M, Tanaka R, Fukushima R, et al. Evaluation of diastolic blood flow dynamic of the left ventricle in dogs with mitral valve regurgitation using vector flow mapping [J]. Iran J Vet Res, 2014, 47(2):93-98.
- [9] Soyama Y, Vader J. The impact of mitral regurgitation on left ventricular energy loss by vector flow mapping in patients with heart failure [J]. Circ J, 2018, 138(1):32-37.
- [10] Akiyama K, Nakamura N, Itatani K, et al. Flow-dynamics assessment of mitral-valve surgery by intraoperative vector flow mapping [J]. Interact Cardiovasc Thorac Surg, 2017, 24(6):869-875.
- [11] Yoshida S, Miyagawa S, Fukushima S, et al. Cardiac function and type of mitral valve surgery affect postoperative blood flow pattern in the left ventricle [J]. Circ J, 2018, 83(1):130-138.
- [12] Pedrizzetti G, Domenichini F, Tonti G. On the left ventricular vortex reversal after mitral valve replacement [J]. Ann Biomed Eng, 2010, 38(3):769-373.
- [13] 陈倬,李治安,何怡华,等.超声向量血流图对二叶式人工机械瓣置换术后左心室流场的研究[J].中华超声影像学杂志,2011,20(4):277-281.
- [14] 李建华,王庆慧,丁云川,等.二尖瓣狭窄及人工瓣膜置换左室流场的超声向量血流图[J].昆明医科大学学报,2015,36(10):22-27.
- [15] Nakashima K, Itatani K, Kitamura T, et al. Energy dynamics of the intraventricular vortex after mitral valve surgery [J]. Heart Vessels, 2017, 32(9):1123-1129.
- [16] 王莹,李亚南,崔存英,等.血流向量成像技术评价二尖瓣成形患者左心室舒张功能的研究[J].中华超声影像学杂志,2019,28(2):94-99.
- [17] Gharib M, Rambod E, Kheradvar A, et al. Optimal vortex formation as an index of cardiac health [J]. Proc Natl Acad Sci USA, 2006, 103(16):6305-6308.
- [18] 刘瑞杰,李亚南,王莹,等.血流向量成像技术对射血分数保留的主动脉瓣狭窄患者左心室收缩功能的研究[J].中华超声影像学杂志,2019,28(3):211-217.
- [19] Liu R, Cui C, Li Y, et al. Analysis of left ventricular diastolic energy loss in patients with aortic stenosis with preserved ejection fraction by using vector flow mapping [J]. Echocardiography, 2019, 36(12):2216-2226.
- [20] Stugaard M, Koriyama H, Katsuki K, et al. Energy loss in the left ventricle obtained by vector flow mapping as a new quantitative measure of severity of aortic regurgitation: a combined experimental and clinical study [J]. Eur Heart J Cardiovasc Imaging, 2015, 16(7):723-730.
- [21] Li C, Zhang J, Li X, et al. Quantification of chronic aortic regurgitation by vector flow mapping: a novel echocardiographic method [J]. Eur J Echocardiogr, 2010, 11(2):119-124.
- [22] Cai YY, Wei X, Li C, et al. New echocardiographic method for chronic aortic regurgitation: diastolic retrograde ratio in the descending aorta by vector flow mapping [J]. Int J Cardiovasc Imaging, 2019, 35(3):461-468.
- [23] Honda T, Itatani K, Miyaji K, et al. Assessment of the vortex flow in the post-stenotic dilatation above the pulmonary valve stenosis in an infant using echocardiography vector flow mapping [J]. Eur Heart J, 2014, 35(5):306.
- [24] Ashley HM, Vivian WY, Ming YN, et al. Quantification of pulmonary regurgitation by vector flow mapping in congenital heart patients after repair of right ventricular outflow obstruction: a preliminary study [J]. J Am Soc Echocardiogr, 2017, 30(10):984-991.
- [25] Shibata M, Itatani K, Hayashi TY, et al. Flow energy loss as a predictive parameter for right ventricular deterioration caused by pulmonary regurgitation after tetralogy of Fallot repair [J]. Pediatr Cardiol, 2018, 39(4):731-742.

(收稿日期:2020-09-16)

## 超声及影像学专业常用术语中英文对照

CDFI (color Doppler flow imaging) —— 彩色多普勒血流成像  
 CT (computed tomography) —— 计算机断层成像  
 CTA —— CT血管造影  
 PET (positron emission tomography) —— 正电子发射计算机断层显像  
 DSA (digital subtraction angiography) —— 数字减影血管造影技术  
 MRI (magnetic resonance imaging) —— 磁共振成像  
 MRA (magnetic resonance angiography) —— 磁共振血管造影  
 今后本刊将在文中直接使用以上专业术语的英文缩写,不再注明英文全称。

本刊编辑部