

· 论 著 ·



全文二维码

主动脉缩窄三维重建后计算流体动力学分析及临床应用

欧阳达 何鹏 潘博 金鑫 田杰

重庆医科大学附属儿童医院胸心外科 国家住院医师规范化培训示范基地, 重庆 400014

通信作者: 田杰, Email: jietian@cqmu.edu.cn

【摘要】 目的 探讨三维重建后计算流体动力学分析对主动脉缩窄 (coarctation of aorta, COA) 诊断和治疗的临床作用及意义。 **方法** 回顾性分析重庆医科大学附属儿童医院 2017 年 3 月 1 日至 2021 年 2 月 28 日心血管科收治的 40 例 COA 患儿 (缩窄组) 及 20 例正常儿童 (正常组) 的临床资料和影像学数据, 结合统计学及计算流体动力学 (computational fluid dynamics, CFD) 方法进行分析, 挖掘其临床应用潜能。 **结果** 缩窄组 CFD 测得压差为 (63.1 ± 5.1) mmHg, 术前彩超测得压差为 (64.1 ± 5.2) mmHg, 差异无统计学意义 ($P > 0.05$); 正常组 CFD 测得压差为 (4.4 ± 1.0) mmHg, 与缩窄组的 CFD 及彩超压差比较, 差异均有统计学意义 ($P < 0.01$), 且相关数值符合临床诊断标准。基于 CTA 三维重建的 CFD 分析显示, 缩窄组缩窄段最大压力下降均 > 35 mmHg, 流体矢量图可见缩窄段压力急剧下降, 压力曲线呈“短距离内快速跌落”特征; 正常组对应位置压力下降均 < 10 mmHg, 压力变化平缓, 无显著跌落, 两组血流动力学特征差异显著。 **结论** CFD 与传统影像学在 COA 诊断中一致性良好, 能提供更丰富的血流动力学信息, 以更低成本、更少创伤实现对主动脉压力变化的精准评估, 对 COA 患儿的诊断和治疗具有全面系统的指导意义。

【关键词】 主动脉缩窄; 三维成像; 计算流体动力学; 心脏病学

DOI: 10.3760/cma.j.cn101785-202503023

Fluid dynamics analysis and clinical application of three-dimensional reconstruction of aortic constriction

Ouyang Da, He Peng, Pan Bo, Jin Xin, Tian Jie

Department of Thoracic and Cardiac Surgery, Affiliated Children's Hospital, Chongqing Medical University, National Demonstration Base for Standardized Training of Resident Physicians, Chongqing 400014, China

Corresponding author: Tian Jie, Email: jietian@cqmu.edu.cn

【Abstract】 Objective To explore the clinical role and significance of fluid dynamics analysis after three-dimensional reconstruction in the diagnosis and treatment of coarctation of the aorta (COA). **Methods** A retrospective analysis of the clinical data and imaging findings of 40 patients with COA (coarctation group) and 20 normal children (normal group) admitted from March 1, 2017 to February 28, 2021, combined with statistical methods and computational fluid dynamics (CFD) analysis to explore their clinical application potential. **Results** Pressure difference measured by CFD was (63.1 ± 5.1) mmHg in narrowed group while pressure difference measured by preoperative ultrasound (64.1 ± 5.2) mmHg. No statistically significant inter-group difference existed ($P > 0.05$); Pressure difference measured by CFD was (4.4 ± 1.0) mmHg in normal group and inter-group difference was statistically significant ($P < 0.01$) as compared with CFD and ultrasound pressure difference in narrowed group. The relevant values fulfilled the clinical diagnostic criteria. CFD analysis based upon CTA three-dimensional reconstruction indicated that maximum pressure drop in narrowed section of narrowed group was > 35 mmHg. Fluid vector diagram revealed a sharp pressure drop in narrowed section and pressure curve depicted a “a rapid drop over a short distance” characteristic; Pressure drop in the corresponding positions of normal group was < 10 mmHg with a gentle change in pressure and no marked drop. Significant inter-group differences existed in hemodynamic characteristics. **Conclusions** CFD offers an excellent consistency with traditional imaging in the diagnosis of COA, providing richer hemodynamic information and

achieving an accurate detection of aortic pressure changes at a lower cost and minimal trauma. It has comprehensive and systematic guiding significance for managing COA in children.

[Key words] Aortic of Coarctation; Three-Dimensional Imaging; Computational Fluid Dynamics; Cardiology

DOI:10.3760/cma.j.cn101785-202503023

主动脉缩窄(coarctation of aorta, COA)是指主动脉腔由内膜嵴引起的局部变窄,占所有先天性心脏病(congenital heart disease, CHD)的5%~8%^[1-5],但COA病因尚不明确,通常被认为是孤立的心脏畸形。目前其诊疗是临床研究热点,但存在诊断标准较多未统一、术前评估复杂、围术期死亡率高、术后并发症多等问题,其临床症状和诊断结果已经明显脱节,缺乏更系统全面的工具辅助诊断和治疗,对于COA主要检查方式之一的彩超^[6-9]。虽可获得主动脉弓的直接征象,但容易发生主动脉弓的畸形漏诊;CT血管造影术(computed tomographic arteriography, CTA)能通过使用静脉造影剂和电离辐射以非常高的空间分辨率获得心内和心外结构数据^[10]。允许在二维中评估这些结构,并提供重建三维数据的能力。却没有进一步的分析方法和策略。因此基于Navier-Stokes方程图像的计算流体力学(computational fluid dynamics, CFD)方法被提出并有望从源头上解决当前该病临床诊断和治疗“脱离”的现状,因此本研究拟探讨其在临床上的应用^[11]。

资料与方法

一、研究对象

本研究为回顾性队列研究,收集重庆医科大学附属儿童医院2017年3月1日至2021年2月28日心血管科所有通过术前彩超及CTA明确诊断为COA并接受手术的患儿作为研究对象。纳入标准:①上肢动脉收缩压高于下肢动脉收缩压;②CTA下主动脉弓最狭窄处小于降主动脉50%;③术前彩超狭窄处压差大于50 mmHg(1 mmHg = 0.133 kPa);④经手术治疗证实为COA。同时我们设计了正常组,其纳入标准:我院住院期间行CT或彩超未诊断主动脉弓疾病,包括肺囊肿、肺腺瘤及肺脓肿等肺占位性病变。缩窄组与正常组排除标准:①新生儿阶段或其他科室诊断COA,但由于保守观察或放弃治疗死亡;②诊断COA合并其他心脏结构异常行手术或介入仅处理除主动脉缩窄以外其他畸形;③未记录四肢血压、体重等基本信息。最终我们选择

其中40例作为缩窄组及20例作为正常组,分析其缩窄段影像学检查结果。本研究经重庆医科大学附属儿童医院(No.(2021)年伦审(研)第(394)号)批准。获得患儿监护人的知情同意,并签署知情同意书。

二、研究方法

(一)检查设备

①超声心动图检查:记录主动脉弓跨狭窄处压力阶差。

②CTA检查:扫描范围从下颈部至膈肌水平,获得心内和心外结构数据的方式,并建立三维数据。

(二)计算流体力学检查方法

①数据重建:3D打印技术让CTA原始数据(CTA图像中分割出主动脉的舒张状态,包括升主动脉、主动脉弓和从它分支出来的血管以及降主动脉)进行三维重建,采用胸部大血管容积再现、最大密度投影等图像后处理技术,使升主动脉、主动脉弓、降主动脉及胸主动脉穿横膈处在斜矢状位上位于最大层面,立体显示主动脉弓缩窄位置及血管空间结构关系;

②网格化:对于三维重建后的图形,使用STAR-CCM+(v.12.06;Siemens PLM Software Inc., Texas, USA)的集成网格划分算法生成多面体网格;

③设参:使用ANSYS PRODUCTS进行峰值收缩主动脉血流的血流动力学模拟,并应用了无滑移边界条件在主动脉几何形状的入口处,标准化入口血压,指定了速度入口边界条件,运行计算出三维重建后的压力曲线变化图,计算不规则拓扑结构的几何中轴线及中轴线“距离”长度。

④分析:用Python语言编写程序及计算公式,从主动脉瓣上0.5 cm开始到降主动脉穿膈肌处血管中轴压力随着距离变化的变化趋势。通过CFD软件上模拟血流动力学信号,得出的数据与3D打印血管实际测量及手术室血管压力统计比较分析其准确性。最终得到沿着主动脉中轴的“距离-压力”曲线,判断血流动力学曲线曲率、落差最大的区域。

三、统计学分析

采用SPSS 22.0进行数据分析,计量资料以 $\bar{x} \pm$

s 表示,计数资料以率进行表示。使用 Bartlett's 检验判断方差齐性,发现三组间方差不齐。选择对方差不齐情况更为稳健的 Welch's 单因素方差分析进行总体差异比较,并在多重比较中采用 Dunnett's T3 检验对结果进行校正。 $P < 0.05$ 为差异有统计学意义。

结 果

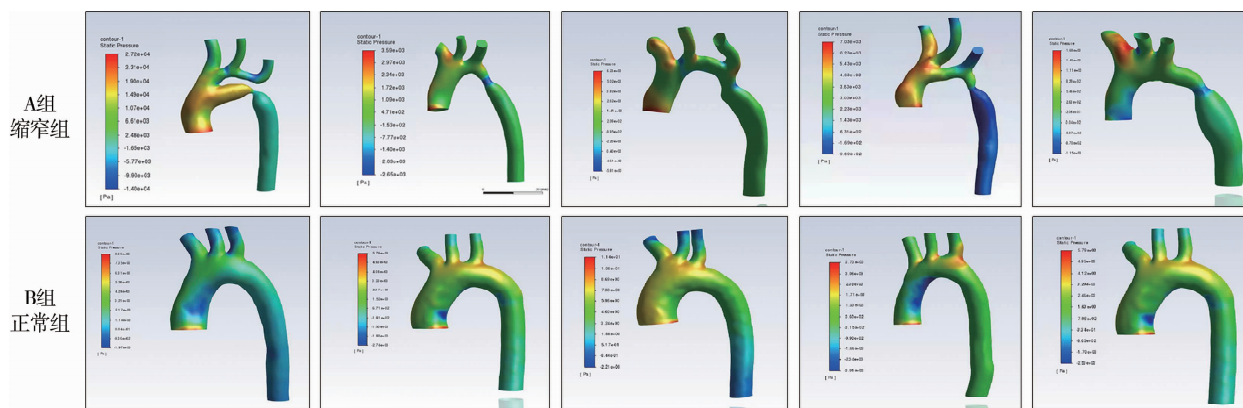
本研究最终纳入 40 例主动脉缩窄患儿(缩窄组)和 20 例正常儿童(正常组)。缩窄组:男 23 例,女 17 例;中位年龄 9.5 个月(范围 2.2 ~ 18.7 个月),其中 0 ~ 1 岁婴儿占 87.5% (35/40)。正常组:男 11 例,女 9 例;0 ~ 1 岁婴幼儿占 90% (18/20)。两组在年龄分布、性别比例上差异无统计学意义($P > 0.05$),基线特征具有可比性。

对两组研究对象的跨狭窄处压力差进行比较,结果显示:①缩窄组:CFD 测得的压差为 (63.1 ± 5.1) mmHg,术前超声心动图(彩超)测得的压差为

(64.1 ± 5.2) mmHg,两者比较差异无统计学意义($P > 0.05$),提示 CFD 与传统彩超在压差评估上具有良好一致性。②正常组:CFD 测得的压差为 (4.4 ± 1.0) mmHg,与缩窄组的 CFD 压差及彩超压差比较,差异均具有统计学意义($P < 0.01$),且符合 COA 临床诊断标准。

基于 CTA 三维重建的 CFD 分析显示的压力梯度变化图(图 1),我们可以很直观的看到缩窄组在标注的解剖学位置有着明显的血流动力学变化(压力变化),可以很直观的看到与正常组的血流动力学特征存在显著差异。

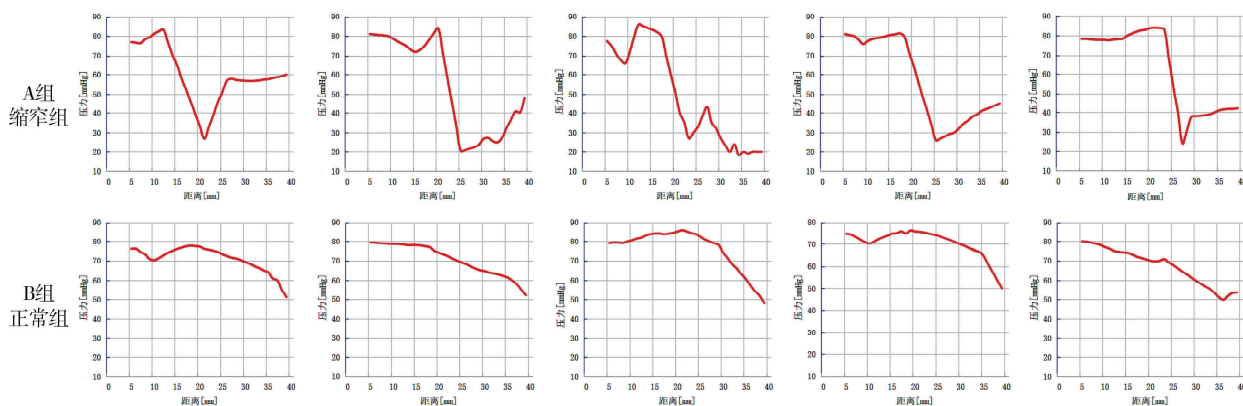
基于 CTA 三维重建的 CFD 分析的方式导出我们的流体矢量与压力曲线图(图 2),我们得出:①缩窄组的流体矢量图可见缩窄段压力急剧下降,压力曲线呈现“短距离内快速跌落”的特征(存在明显压力“拐点”);正常组压力变化平缓,无显著跌落。缩窄组患儿的主动脉缩窄段最大压力下降均 > 35 mmHg,而正常组对应位置的压下降均 < 10 mmHg。



注 两组均为缩窄组与正常组中随机选出的五组 CTA 三维重建后的压力梯度变化图,A 组中红圈为我们标注的缩窄处解剖学位置,每张图片左侧为压力柱状参考数值(不同颜色对应不同压力),右侧为主动脉缩窄三维重建后模型对应的压力,与左侧压力柱状图颜色对应

图 1 主动脉缩窄三维重建后计算流体动力学分析压力梯度变化图

Fig.1 Change diagram of pressure gradients



注 两组均与图 1 相对应的流体矢量与压力曲线图,图片横坐标代表距离开口处的距离,纵坐标为对应距离的压力值

图 2 主动脉缩窄三维重建后计算流体动力学分析流体矢量与压力曲线图

Fig.2 Fluid vector and pressure curve diagram

讨 论

本研究结果显示,缩窄组患儿的 CFD 测得压差为 (63.1 ± 5.1) mmHg,与术前彩超测得的 (64.1 ± 5.2) mmHg 比较,差异无统计学意义($P > 0.05$),提示两者在跨狭窄处压力差的评估上具有良好一致性。这一结果验证了 CFD 作为一种新兴技术在 COA 诊断中的可靠性,其与临床已广泛应用的彩超检查结果高度吻合,说明 CFD 能够作为补充或替代手段,为 COA 的诊断提供客观、准确的压力差数据。同时缩窄组的 CFD 压差与正常组 (4.4 ± 1.0) mmHg 比较,差异具有统计学意义($P < 0.01$),且符合 COA 临床诊断标准,进一步证实了 CFD 在区分病变组与正常组中的有效性。传统彩超虽为 COA 常用检查方式,但受透声条件、操作者技术等因素影响,存在 5.4% 的漏诊率,且难以清晰显示主动脉远心端及侧支循环;而 CFD 基于 CTA 三维重建,可规避上述局限,在压差评估中展现出与彩超相当的临床效能,为 COA 的精准诊断提供了新选择。

基于 CTA 三维重建的 CFD 分析进一步揭示了 COA 患儿与正常儿童的血流动力学差异:①缩窄组患儿缩窄段最大压力下降均 > 35 mmHg,而正常组对应位置压力下降均 < 10 mmHg,这一量化差异直观反映了 COA 患儿因主动脉局部狭窄导致的血流动力学异常,与正常组平缓的压力变化形成鲜明对比。该结果从功能层面量化了缩窄的严重程度,较传统仅依赖狭窄直径的评估方式更能反映病变对血流的实际影响。②缩窄组的流体矢量图可见缩窄段压力“短距离内快速跌落”,压力曲线存在明显“拐点”;而正常组压力变化平缓,无显著跌落。这种可视化的血流动力学特征,不仅能准确定位缩窄部位,还能动态展示血流在主动脉路径上的变化规律,为理解 COA 的病理生理机制(如近心端高血压、远心端血供不足)提供了直接证据,相较于传统影像学技术,CFD 展现出多方面优势:①功能评估的全面性:传统 CTA、MRI 等主要提供解剖学信息,而 CFD 可进一步提供压力梯度、流体矢量等功能学参数,从“形态 + 功能”双维度评估病变,弥补了单纯解剖学指标无法反映血流动力学影响的缺陷。②无创性与经济性:相较于有创的血管导管测压(需麻醉、成本高、影响血流动力学),CFD 基于无创 CTA 数据即可完成分析,降低了患者痛苦与检查风险,且成本更低。③直观性与指导性:“距离压力”

曲线、流体矢量图等可视化结果,能让临床医师更直观地理解主动脉整体压力变化过程,为术前评估、术后疗效判断(如术后压差变化是否需再次干预)提供系统指导,基于患者特定血流动力学对图像 CFD 分析可预测治疗后的血流动力学,改变的血流动力学与主动脉的病理影响及患者的长期预后都可能存在相关^[12-14]。

本研究的主要局限在于样本量较小(40 例缩窄组、20 例正常组),暂不足以拟定新的 COA 诊断标准,且 CFD 技术在国内临床应用仍处于起步阶段,其准确性需更大样本量的多中心研究验证。此外,CFD 分析依赖 CTA 三维重建的精度,如何进一步优化图像分割、网格划分等技术环节,以提高血流动力学模拟的真实性,仍需深入探索。

综上,CFD 与传统影像学在 COA 诊断中一致性良好,且能提供更为丰富的血流动力学信息,以更低成本、更少创伤实现对主动脉压力变化的精准评估,为 COA 的诊断、治疗方案制定及预后判断提供了更系统、全面的指导,有望成为未来心血管疾病诊疗的重要技术手段。

利益冲突 所有作者声明不存在利益冲突

作者贡献声明 欧阳达、金鑫负责文献检索,欧阳达、何鹏、潘博、金鑫、田杰负责论文设计调查,欧阳达、何鹏、潘博、金鑫负责数据收集与分析,欧阳达、金鑫负责论文结果撰写,金鑫、田杰负责论文讨论分析,并对文章知识性内容进行审阅

参 考 文 献

- [1] Karaosmanoglu AD, Khawaja RDA, Onur MR, et al. CT and MRI of aortic coarctation: pre-and postsurgical findings[J]. AJR Am J Roentgenol, 2015, 204(3): W224-W233. DOI: 10.2214/AJR.14.12529.
- [2] Nigro G, Russo V, Rago A, et al. Heterogeneity of ventricular repolarization in newborns with severe aortic coarctation[J]. Pediatr Cardiol, 2012, 33(2): 302-306. DOI: 10.1007/s00246-011-0132-4.
- [3] Xu J, Zhao HL, Wang XY, et al. Accuracy, image quality, and radiation dose of prospectively ECG-triggered high-pitch dual-source CT angiography in infants and children with complex coarctation of the aorta[J]. Acad Radiol, 2014, 21(10): 1248-1254. DOI: 10.1016/j.acra.2014.04.019.
- [4] Baumgartner H, Bonhoeffer P, De Groot NMS, et al. ESC guidelines for the management of grown-up congenital heart disease (new version 2010)[J]. Eur Heart J, 2010, 31(23): 2915-2957. DOI: 10.1093/eurheartj/ehq249.
- [5] Singh S, Hakim FA, Sharma A, et al. Hypoplasia, pseudocoarctation and coarctation of the aorta-a systematic review[J]. Heart Lung Circ, 2015, 24(2): 110-118. DOI: 10.1016/j.hlc.2014.08.006.
- [6] Wu YH, Li JS, Wu C, et al. Diagnosis and surgical repair for coarctation of the aorta with intracardiac defects: a single center ex-

- perience based on 93 infants [J]. *Front Pediatr*, 2020, 8: 49. DOI:10.3389/fped.2020.00049.
- [7] Goubergrits L, Riesenkampff E, Yevtushenko P, et al. MRI-based computational fluid dynamics for diagnosis and treatment prediction; clinical validation study in patients with coarctation of aorta [J]. *J Magn Reson Imaging*, 2015, 41 (4): 909-916. DOI:10.1002/jmri.24639.
- [8] 毛乐. 主动脉缩窄伴弓发育不良形态学及手术计算流体力学研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2016. DOI:10.27307/d.cnki.gsytu.2016.004857.
Mao L. Study of morphologic and surgical computational fluid dynamics on aortic coarctation with hypoplastic aortic arch [D]. Shanghai: Shanghai Jiaotong University, 2016. DOI: 10.27307/d.cnki.gsytu.2016.004857.
- [9] Vigneswaran TV, Bellsham-Revell HR, Chubb H, et al. Early postnatal echocardiography in neonates with a prenatal suspicion of coarctation of the aorta [J]. *Pediatr Cardiol*, 2020, 41 (4): 772-780. DOI:10.1007/s00246-020-02310-5.
- [10] Nie P, Wang X, Cheng Z, et al. The value of low-dose prospective ECG-gated dual-source CT angiography in the diagnosis of coarctation of the aorta in infants and children [J]. *Clin Radiol*, 2012, 67 (8): 738-745. DOI:10.1016/j.crad.2011.12.007.
- [11] Şişli E, Kalın S, Tuncer ON, et al. Comparison between nomograms used to define pediatric aortic arch hypoplasia; retrospective evaluation among patients less than 1 year old with coarctation of the aorta [J]. *Pediatr Cardiol*, 2019, 40 (6): 1190-1198. DOI:10.1007/s00246-019-02130-2.
- [12] Ladisa JF Jr, Taylor CA, Feinstein JA. Aortic coarctation: recent developments in experimental and computational methods to assess treatments for this simple condition [J]. *Prog Pediatr Cardiol*, 2010, 30 (1): 45-49. DOI:10.1016/j.ppedcard.2010.09.006.
- [13] Midulla M, Moreno R, Baali A, et al. Haemodynamic imaging of thoracic stent-grafts by computational fluid dynamics (CFD): presentation of a patient-specific method combining magnetic resonance imaging and numerical simulations [J]. *Eur Radiol*, 2012, 22 (10): 2094-2102. DOI:10.1007/s00330-012-2465-7.
- [14] Vergara C, Viscardi F, Antiga L, et al. Influence of bicuspid valve geometry on ascending aortic fluid dynamics: a parametric study [J]. *Artif Organs*, 2012, 36 (4): 368-378. DOI:10.1111/j.1525-1594.2011.01356.x.

(收稿日期:2025-03-09)

本文引用格式: 欧阳达, 何鹏, 潘博, 等. 主动脉缩窄三维重建后计算流体力学分析及临床应用 [J]. 临床小儿外科杂志, 2026, 25 (9): 877-881. DOI:10.3760/cma.j.cn101785-202503023.

Citing this article as: Ouyang D, He P, Pan B, et al. Fluid dynamics analysis and clinical application of three-dimensional reconstruction of aortic constriction [J]. *J Clin Ped Sur*, 2026, 25 (9): 877-881. DOI:10.3760/cma.j.cn101785-202503023.