

# FFR CT: 一种制定冠心病治疗计划的新依据

刘尚典 罗滨\*

深圳市宝安区人民医院心血管外科 深圳 518000

**摘要:** 随着影像学的逐渐进步, 冠脉 CTA 造影 (CTCA) 改变了疑似冠状动脉疾病的诊断流程, 其对冠心病具有较高的诊断准确性。与传统的有创冠状动脉造影相比, 它的无创性使其风险和成本更低。然而其对血流动力学的判断比较有限。评估病变是否具有血流动力学意义的金标准是 FFR (血流储备分数) 的评估。血流储备分数是一种血管造影技术, 通过比较主动脉压力与狭窄的远端压力来评估病变的血流动力学意义。但因其是有创操作, 在临床应用当中也受到了限制。依靠 CTCA 的 CT 数据计算出来的 FFR CT 的出现, 提供了无创的评估病变血流动力学的方法。它产生了一个冠状动脉的三维模型, 给出了沿每个主要冠状动脉血管的多个点的 FFR 值。FFR CT 和 CTCA 共同为冠心病提供了一个全面的评估, 为冠心病提供了一种制定冠心病治疗计划的新依据。

**关键词:** FFR CT; 冠心病; CTCA

## 1. 研究方法

随着影像学的逐渐进步, 影像的采集以及后期处理技术的逐渐成熟, 冠脉 CTA 造影 (CTCA) 已经从可选择的诊断手段, 一跃成为稳定性心绞痛患者以及疑似冠心病患者一线的诊断手段<sup>[1]</sup>。CTCA 不仅能够准确地评估管腔狭窄的程度, 还能评估高危斑块的详细信息, 例如斑块部位的血管重塑, 斑块负荷, 从而提供了额外的风险分层信息。为动脉粥样硬化以及冠状动脉狭窄提供了强力的图像证据, 为冠心病的诊断与治疗提供了根据<sup>[2-5]</sup>。

尽管越来越多的临床应用数据和技术不断改进, 导致了图像质量改善明显, 但是冠脉 CTA 检测仍然只能从解剖角度进行血管病变的检测。然而, 管腔狭窄的程度并不能提供该病变在应激条件下的功能变化的定量信息, 特别是对于中度 (50-70%) 狭窄病变显得尤为明显。这些缺陷都导致 CTCA 不能作为血管重建的依据<sup>[6,7]</sup>。

目前有创冠状动脉造影 (ICA) 仍然是冠心病诊断及治疗的主要诊断标准也是治疗计划制定的主要依据。但是因为其判断病变严重程度也是主要依靠视觉评估, 用直径狭窄的百分比进行描述。仅使用血管狭窄的视觉评估, 而没有针对其功能进行判断, 很容易受到观察者自身原因等外在因素的影响, 可能会导致冠脉治疗出现误差经常导致对血管动力学不稳定或不是患者症状的罪犯的病变进行血管重建<sup>[6,8-10]</sup>。

血流储备分数 (Fractional flow reserve, FFR) 是一种血管

造影技术, 通过比较主动脉压力与狭窄的远端压力来评估病变的血流动力学意义<sup>[11]</sup>。这种方法解决了与狭窄严重程度评估相关的许多局限性, 但因其是有创操作, 在临床应用当中也受到了限制<sup>[12,13]</sup>。随着冠状动脉横断面成像不断进步, FFR CT 革命性地研究出来。此类技术于 2010 年首次应用于临床, 其主要的目的是提供类似于侵袭性 FFR 的信息, 但不仅针对罪犯病变血管, 而且针对 CTA 成像下的整个冠状动脉血管情况。Navier-Stokes 方程构成了 FFR CT 评估计算血流动力学的计算基础<sup>[14]</sup>。

基于患者的检查数据, 我们为每个患者制作了冠状动脉的三维模型。这个模型主要基于三个科学原理: 1) 静息时的冠状动脉血流流量可以依据心肌质量进行定量。该质量可以从体积 CTCA 数据提取出来的心肌体积计算出来。2) 静止时的微循环阻力与管腔的大小成反比。3) 对腺苷的血管舒张反应是可预测的<sup>[15]</sup>。该三维模型的建立, 很好地反映了每个患者的解剖特征和功能特征 (图 1)。FFR CT 在重复性上有着很明显的优势, 同时在准确性上, 与侵入性 FFR 不相上下。根据一项研究, 同一患者行两次 FFR CT 检查, 第一次和第二次 FFR CT 分析值之间的差异为 0.035, 而在侵入性 FFR 重复测量值之间的差异为 0.043<sup>[16]</sup>。

和有创 FFR 一样, CT FFR 的阈值也为 0.8。狭窄后 FFR CT 值小于或等于 0.80 表明此狭窄可能具有血流动力学意义<sup>[17,18]</sup>。另外, 如果 FFR CT 值大于 0.80, 表明该病变不

太可能具有血流动力学意义。因此，这种病变可以通过系统的内科药物治疗进行管理，而不需要进一步检测<sup>[19,20]</sup>。

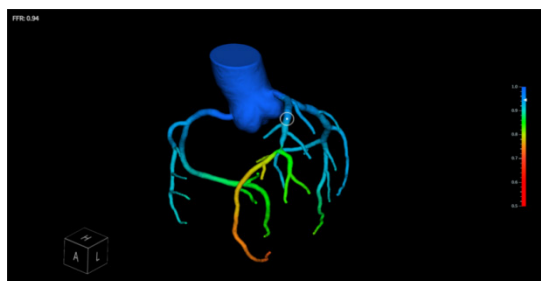


图1 经过数据处理，应用不同颜色体现血管不同的 FFR CT 值

如果 FFR CT 值  $<0.75$ ，那么提示患者的病变带来明显的功能缺血。侵袭性 FFR 和 FFRCT 值在 0.75 或以下之间也有最高的一致性<sup>[19]</sup>。但是对于检测值在 0.75–0.80 之间的病变治疗方案却是略有模糊的一个区域，对于 0.75–0.80 之间的病变，临床管理方案需要进一步与其他危险因素和 CT 成像因素的相结合进行分析制定。在这种情况下，进一步的治疗决定不仅取决于病变所涉及的特定血管、狭窄的位置和斑块稳定情况，还取决于患者病变具体累及的冠脉层级。建议对于较小，侧支病变，即使是 FFR CT 值  $\leq 0.75$  的患者，也可以通过系统的内科药物治疗进行管理，而不是进行进一步有创血管造影干预<sup>[21]</sup>。

FFR CT 相较于侵入性 FFR 存在着一定的优势，左右冠状动脉系统及其主要的分支，FFRCT 值都同时给出相应的测量，而侵入性的 FFR 只能依靠着导丝导管前进到特定病变位置，从而提供固定位置的病变信息。三维模型的建立，可以同时提供每个不同血管，不同病变点的测量结果。然而，研究表明建议使用病变远端 2–3cm 的 FFR 值来解释由该病变引起的血流动力学损害，而不是最大管腔狭窄本身的值<sup>[22]</sup>。这种数值的测量取值是为了避免与病变下游近端压力恢复带来的血流动力学改变，从而影响 FFR 值的改变和不准确。因为 FFR 值随着血流向病变下游流动而逐渐降低。这可能是因为弥漫性冠状动脉疾病或连续病变的影响。而在连续病变的情况下，很难确定是哪些病变导致了血管狭窄从而造成血流动力学改变（图 2）。

如果是连续性病变，针对血流动力学的评估，建议取每 10–20mm 病变长度评估 FFR 值。如果 FFR 值下降的血管没有可识别的罪犯病变，则需要进一步的风险因素调查和风险分级。重要的是要记住，在确定是否需要 ICA 或血管重建时，

不应该单独使用 FFR 值作为治疗的依据<sup>[23]</sup>。

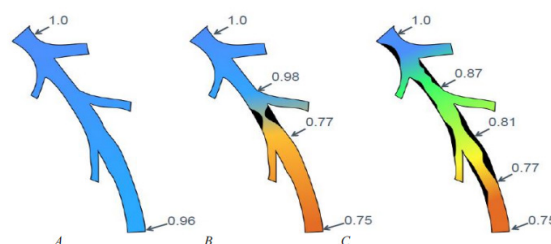


图2 A 正常的血管成像：FFR 值没有明显的减低 B 局灶性显著狭窄伴 FFR 值立即下降（PCI 的罪犯病变靶点）C 弥漫性多灶性疾病伴中度狭窄，导致 FFR 值逐渐下降（没有可识别的 PCI 目标）

在应用 CTCA 评估血管的时候，小的血管或者侧枝血管可能被忽视，其 FFR 值也可能为  $<0.80$ 。虽然这些血管可能并不是重要的血管，但是它们可以一定程度上反映上级血管的 FFR 值情况。在 CTCA 成像中诊断为严重狭窄的病变，其 FFR CT 值超过 0.80，这种患者可以应用系统的药物治疗，不进行血管重建，在随访中，未见不良事件<sup>[24]</sup>。

与任何诊断方式一样，依托于 CTCA 病例的 FFR CT 测量评估也是存在局限性的。其中最重要的一个局限性就是无法评估冠脉支架或冠脉旁路移植的病例。FFR CT 无法对冠脉旁路移植患者的所有桥血管情况进行同时的评估。而针对冠脉支架的患者，冠脉的功能分析和带有支架的血管评估 FFR CT 有一定的限制性。在冠状动脉支架的情况下，带有原位支架的血管不能进行分析，在冠状动脉功能分析中显影为灰色<sup>[25]</sup>（图 3）。然而，如果支架位于左主干支架或两个主血管（如 LAD 和 RCA），那么这种病例并不能完全处理。

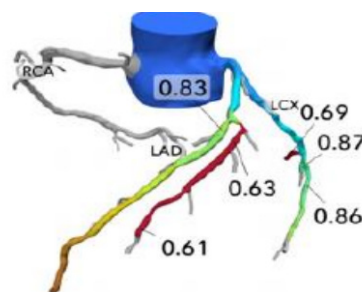


图3 右冠状动脉主干存在支架图像分析呈灰色<sup>[25]</sup>

应用 FFR CT 评估冠脉血管舒张功能时，在检查前 3–5 分钟需舌下含服 0.8mg 硝酸盐制剂，如果患者存在硝酸盐使用的禁忌证的话，会影响到 FFR CT 的评估结果。

与所有的横断面诊断技术类似，图像质量对于评估的准确性是至关重要的。很多引起血管腔解剖界限显现不明确

的原因, 类似于运动、心率控制不足等情况, 都可能造成图像没法处理, 从而最终导致 FFR CT 无法测量。在所有情况下, 都建议对重建的数据进行调整, 以获得更好的对比度。

各种研究已经证明了 FFR CT 在低费用的同时有着很好的安全性和准确性。FFRCT RIPCORD 研究表明, 与单纯应用冠状动脉 CTA 相比, 结合 FFRCT 结果对冠心病患者的诊断以及治疗方案的制订有着更积极的影响<sup>[26]</sup>。同时多中心的前瞻性研究已经证明了 FFR CT 在评估临床结果方面有着很积极的作用<sup>[27]</sup>。有研究表明针对计划做冠脉造影的患者, 术前接受冠状动脉 CTA 和 FFRCT 检查, 其每条血管的敏感性和特异性高达 84% 和 86%<sup>[21]</sup>。

SYNTAX 评分是一种应用侵入性检测方法对患者血管情况进行评估的方法, 从而帮助临床医生为患者选择最佳的治疗方案。最近研究显示, 利用非侵入性检查方法 FFR CT 计算 SYNTAX 评分, 得到了与侵入性患者相似的结果, 并将 30% 的患者从高风险或者中风险分类中重新分类为低风险患者<sup>[28]</sup>。最近的研究进展显示, 针对病变是否引起缺血, 应用基于 FFR 的虚拟支架植入, 虚拟进行评估其诊断准确率接近 96%。

## 2. 结论

FFR CT 可以被称为一种革命性的冠状动脉疾病无创的评估技术。最新更新的 UK NHS NICE CG95 指南中将 FFR CT 作为评估典型 / 非典型胸痛的一线调查手段, 并建议对 CTCA 图像显示中度狭窄以上的病变进行 FFR CT 功能成像的检查。然而针对患者治疗方案的制订, 应该将 FFR CT 值与 CTCA 的图像结果相结合。同时患者的临床信息, 风险分级情况, 在下一步检查以及特定病变的血运重建方面也同样非常重要。CTCA 联合 FFR CT 值评估冠状动脉疾病可能实现一站式检测, 减少了患者从诊断到治疗的总时间, 并减少不必要的侵入性检测。目前, 由于对高质量成像、成本和后处理时间的需求的限制, 其作用主要是在诊断不确定的情况下作为冠状动脉 CTA 的强大辅助手段。总而言之, FFR CT 是一种相对较新的、不断发展的技术, 未来其临床应用将不断扩大。

利益冲突声明: 所有作者声明无利益冲突。

## 参考文献:

[1]Williams M, Shambrook J, Nicol E. The assessment of patients with stable chest pain. *Heart*, 2018;104:691–699.

[2]Williams MC, Moss A, Nicol E, Newby DE. Cardiac CT improves outcomes in stable coronary heart disease: results of recent clinical trials. *Curr Cardiovasc Imaging Rep*, 2017;10:14.

[3]董小波, 张仲慧, 郭庆乐, 焦鹏飞. CTCA 定量参数对冠心病患者短期病死预测价值。临床误诊误治, 2024, 37 (08)。

[4]陆晓玲. 128 排 CT 冠状动脉成像与冠状动脉造影对壁冠状动脉诊断价值的对比。影像研究与医学应用, 2024, 8 (05)。

[5]蔡炜, 陈恩, 范林, 等. 冠状动脉生理学功能评估技术的发展现状。福建医科大学学报, 2022, 56 (04) 。

[6]Yan RT, Miller JM, Rochitte CE, et al. Predictors of inaccurate coronary arterial stenosis assessment by CT angiography. *JACC Cardiovasc Imaging*, 2013;6:963–972.

[7]Patel MR, Peterson ED, Dai D, et al. Low diagnostic yield of elective coronary angiography. *N Engl J Med*, 2010;362(10):886 – 895.

[8]Detre KM, Wright E, Murphy ML, Takaro T. Observer agreement in evaluating coronary angiograms. *Circulation*, 1975; 52:979–986.

[9]Leape LL, Park RE, Bashore TM, et al. Effect of variability in the interpretation of coronary angiograms on the appropriateness of use of coronary revascularization procedures. *Am Heart J*, 2000; 139:106–113.

[10]Nallamothu BK, Spertus JA, Lansky AJ, et al. Comparison of clinical interpretation with visual assessment and quantitative coronary angiography in patients undergoing percutaneous coronary intervention in contemporary practice: the Assessing Angiography (A2) Project. *Circulation*, 2013; 127:1793–1800.

[11]Achenbach S, Rudolph T, Rieber J, et al. Performing and interpreting fractional flow reserve measurements in clinical practice: an expert consensus document. *Interv Cardiol*, 2017; 12:97–109.

[12]Levine GN, Bates ER, Blankenship JC, et al. 2011 ACCF/AHA/SCAI Guideline for Percutaneous Coronary Intervention. A report of the American College of Cardiology Foundation/American Heart Association Task Force on Practice Guidelines and the Society for Cardiovascular Angiography and

Interventions. *J Am Coll Cardiol*, 2011;58(24):e44 – 122.

[13]Task Force Members, Montalescot G, Sechtem U, et al. 2013 ESC guidelines on the management of stable coronary artery disease: the Task Force on the management of stable coronary artery disease of the European Society of Cardiology. *Eur Heart J*, 2013;34(38):2949–3003.

[14]Taylor CA, Fonte TA, Min JK. Computational fluid dynamics applied to cardiac computed tomography for noninvasive quantification of fractional flow reserve: scientific basis. *J Am Coll Cardiol*, 2013;61(22):2233–2241.

[15]Ball C, Pontone G, Rabbat M. Fractional Flow Reserve Derived from Coronary Computed Tomography Angiography Datasets: The Next Frontier in Noninvasive Assessment of Coronary Artery Disease. *Biomed Res Int*, 2018;2018:2680430.

[16]Gaur S, Bezerra HG, Lassen JF, et al. Fractional flow reserve derived from coronary CT angiography: Variation of repeated analyses. *J Cardiovasc Comput Tomogr*, 2014;8(4):307–314.

[17]Nørgaard BL, Leipsic J, Gaur S, et al. Diagnostic performance of noninvasive fractional flow reserve derived from coronary computed tomography angiography in suspected coronary artery disease: the NXT Trial(Analysis of Coronary Blood Flow using CT Angiography: Next Steps. *J Am Coll Cardiol*, 2014;63(12):1145–1155.

[18]Driessen RS, Danad I, Stuijzand WJ, et al. Comparison of coronary computed tomography angiography, fractional flow reserve, and perfusion imaging for ischemia diagnosis. *J Am Coll Cardiol*, 2019;73(2):161–173.

[19]Nørgaard BL, Hjørt J, Gaur S, et al. Clinical use of coronary CTA-derived FFR for decision-making in stable CAD. *JACC Cardiovasc Imaging*, 2017;10(5):541–550.

[20]Patel MR, Nørgaard BL, Fairbairn TA, et al. 1-Year Impact on Medical Practice and Clinical Outcomes of FFRCT: The ADVANCE Registry. *JACC Cardiovasc Imaging*, 2020;13(1 Pt 1):97–105.

[21]Nørgaard BL, Terkelsen CJ, Mathiassen ON, et al. Coronary CT angiographic and flow reserve-guided management of patients with stable ischemic heart disease. *J Am Coll Cardiol*, 2018;72(18):2123–2134.

[22]Toth GG, Johnson NP, Jeremias A, et al. Standardization of Fractional Flow Reserve Measurements. *J Am Coll Cardiol*, 2016;68(7):742–753.

[23] Kueh SH, Mooney J, Ohana M, et al. Fractional flow reservederived from coronary computed tomography angiography reclassification rate using value distal to lesion compared to lowest value. *J Cardiovasc Comput Tomogr*, 2017;11(6):462–467.

[24] Jensen JM, Bøtker HE, Mathiassen ON, et al. Computed tomography derived fractional flow reserve testing in stable patients with typical angina pectoris: influence on downstream rate of invasive coronary angiography. *Eur Heart J Cardiovasc Imaging*, 2018;19(4):405–414.

[25]Samavia Raza, Maria Efstathiou. CT coronary angiogram with FFR CT – a revolution in the diagnostic flow of coronary artery disease. *J Ayub Med Coll Abbottabad*, 2021; 33(3): 376–381.

[26]Curzen NP, Nolan J, Zaman AG, Nørgaard BL, Rajani R. Does the Routine Availability of CT-Derived FFR Influence Management of Patients with Stable Chest Pain Compared to CT Angiography Alone? The FFRCT RIPCORDER Study. *JACC Cardiovasc Imaging*, 2016;9(10):1188–1194.

[27]Douglas PS, Pontone G, Hlatky MA, et al. Clinical outcomes of fractional flow reserve by computed tomographic angiography-guided diagnostic strategies vs. usual care in patients with suspected coronary artery disease: The prospective longitudinal trial of FFR(CT): outcome and resource impacts study. *Eur Heart J*, 2015;36(47):3359–3367.

[28]Collet C, Miyazaki Y, Ryan N, et al. Fractional Flow Reserve derived from Computed Tomographic Angiography in patients with Multivessel CAD. *J Am Coll Cardiol*, 2018;71(24):2756–2769.

#### 作者简介:

刘尚典 (1986—), 男, 汉族, 黑龙江省五大连池市人, 博士, 深圳市宝安区人民医院, 副主任医师, 研究方向: 冠脉缺血再灌注损伤, 主动脉疾病机理, 肺损伤

通讯作者: 罗滨

#### 基金项目:

深圳市自然科学基金, 编号: (JCYJ20230807141100002)