

CT-FFR的临床应用价值与研究进展

孙琳, 孟姮

北华大学附属医院影像科, 吉林 吉林

收稿日期: 2025年6月9日; 录用日期: 2025年7月2日; 发布日期: 2025年7月9日

摘要

冠心病是临床中最为常见的心血管疾病, 主要因冠脉粥样硬化引起的血管腔阻塞或狭窄, 导致心肌缺氧、缺血和坏死。对于这一疾病, 早诊断、早治疗是控制病情发展的关键, 但常规的诊疗手段往往存在一定局限, 诊断与治疗有待提升, 而CT-FFR在冠心病临床诊断与治疗中有着一定的应用价值, 可提升诊断全面性, 优化治疗效果。基于此, 本文主要对CT-FFR的原理进行简单概述, 探讨CT-FFR的临床应用价值, 并分析CT-FFR目前存在的局限性。

关键词

CT-FFR, 临床应用价值, 研究进展

The Clinical Application Value and Research Progress of CT-FFR

Lin Sun, Heng Meng

Department of Imaging, The Affiliated Hospital of Beihua University, Jilin Jilin

Received: Jun. 9th, 2025; accepted: Jul. 2nd, 2025; published: Jul. 9th, 2025

Abstract

Coronary heart disease (CHD) is the most common cardiovascular disease in clinical practice, which is mainly caused by coronary atherosclerosis, leading to myocardial hypoxia, ischemia and necrosis. Early diagnosis and treatment are key to controlling the progression of this disease, but conventional diagnostic and treatment methods often have certain limitations, and diagnosis and treatment need to be improved. CT-FFR has certain application value in the clinical diagnosis and treatment of coronary heart disease, which can improve the comprehensiveness of diagnosis and optimize treatment effectiveness. Based on this, this article mainly provides a brief overview of the principle of CT-FFR, explores the clinical application value of CT-FFR, and analyzes the current limitations of CT-FFR.

Keywords

CT-FFR, Clinical Application Value, Research Progress

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

当前已知的冠心病患者已达 1139 万人, 其发病率呈上升趋势。此类疾病会导致病人出现心力衰竭、急性心肌梗死等严重疾病, 因此, 对其进行精确的早期诊断与精确的诊疗十分关键。目前应用于冠心病的主要影像检查方法有冠脉造影术(ICA)和冠脉 CT 造影术(CCTA)。传统的 ICA、CCTA 仅反映了冠脉的解剖学结构, 单纯依靠目测来判断冠脉的狭窄程度与心肌缺血是否存在明显的相关性, 很难从功能上对其进行评估。而冠状动脉 CT 血流储备分数(CT-FFR)可以对冠心病的诊断与治疗提供新的发展方向。

2. CT-FFR 的原理

随着医疗技术的持续发展和进步, 冠状动脉 CT 血流储备分数(CT-FFR)被逐渐应用在临床中。这一技术属于一种无创的图像后处理技术, 主要是以冠脉 CT 血管造影图像为基础, 结合先进的计算机血流动力学和深度学习技术, 可同步反映冠脉的结构与生理状态, 进一步优化诊疗效果[1]。冠脉 CT 血管造影(CCTA)指的是利用高分辨率 CT 成像技术, 获得冠脉内的三维立体影像, 能够清楚地反映血管狭窄的程度, 斑块类型及部位。但是, 单纯从狭窄的角度并不能全面判断病人会否存在冠心病, 大约有 1/4 血管狭窄的病人并没有发生心肌缺血, 并且, 钙化的斑块会放大动脉的狭窄。

血流储备分数(FFR)是当下评估心外膜冠脉狭窄功能的“金标准”, 该血管所供应区域能获得的最大心肌血流量与同一区域理论上无狭窄时最大心肌血流量的比值。常规的 FFR 需要经介入式的冠脉内置入, 是一种有创性的检查方法, 存在着血管损伤、造影剂肾病等危险, 且价格昂贵。CT-FFR 旨在以非侵入性的方法, 利用相关数据来模拟充血状态下的 FFR 值[2]。

在临床应用 CT-FFR 时, 需要先利用 CT 影像构建个体化的冠脉 3D 建模, 剔除钙斑对冠脉的影响, 然后对血流速度、阻力等参数进行设定, 以模拟血管的最大充血情况。然后采用经典的冠脉建模技术, 重构出冠脉树和心肌组织的 3D 模型, 从而得到冠脉内的血液流动和血管内压状态。血流在经过纳维-斯托克斯方程(Navier-Stokes)转换下, 可以被模拟为牛顿流体, 以得到 FFR 数值[3]。在此基础上, 对血管壁弹性、血流量等多个数据进行全面整合, 综合多个因子, 得到冠脉内各因子之间的相对比值, 即 CT-FFR。在应用 CT-FFR 技术时应当注意, 在静止状态下, 冠脉的血液供应必须以心肌的需要为基础, 以求出静息状态下心脏对冠脉血液的需求量。

3. CT-FFR 的临床应用价值

3.1. 安全无创

常规 FFR 需要通过股动脉或桡动脉将压力微丝经动脉或桡动脉置入, 易导致严重的心血管损害、造影剂肾病和心律失常, 发生率约 0.1%~0.5%, 对于 75 岁以上、凝血紊乱或对对比剂敏感的老年人有明显的禁忌证。而安全性、无创性是 CT-FFR 最明显的优势之一, 这一技术属于一种无创检查, 只需要进行 CCTA 的常规扫描, 经过后期的影像后处理和算法运算得到 FFR, 不需要使用导丝进行测量, 可以有效地防止

仪器在测量时损伤血管, 降低病人不良反应发生率[4]。

与常规 FFR 相比, 其成像时所受到的辐射剂量要小得多。应用 CT-FFR 技术时, 并不需要使用额外的血管扩张药物来使冠脉达到最大的充血程度, 可有效地防止患者出现副作用, 保障患者的舒适度。ADVANCE 临床试验(5083 例)研究结果表明, 90 日内 CT-FFR > 0.80 的病人未出现死亡和心梗, 1 年内心血管不良事件的发病率也只有 0.2%, 与有创 FFR 阴性患者相当。另外, CT-FFR 可用于门诊可疑先心病的筛查, 而无需介入性检测; 对于稳定型冠状动脉疾病的病人, 通过定期的动态观察, 可以用 CT-FFR 来无创性地监控疾病的发展, 而不是单纯的有侵入性的检查, 从而在最大程度上提高检查的安全性, 保障病人检查依从度。

3.2. 提高诊断准确性

针对冠心病患者, 目前尚不能通过 CCTA、CAG 等方法精确地判断冠心病患者的病情, 而 CT-FFR 不仅可以反映病变的解剖结构, 还可以反映患者的血流动力学变化, 可以将血管内狭窄位置、斑块性质、血管重建形态等解剖特征与血流动力学模拟数据相结合, 打破单纯解剖评价的局限性。因此可以参照 CT-FFR 来, 进一步提高诊断的准确性, 判断病人有无心肌缺血以及是否需要经皮冠状动脉介入治疗[5]。2019 年 ACC 年会上公布的 PACIFIC 研究中, 共包括 208 名稳定性心绞痛病人, 均接受了 CTA、CT-FFR、PET 等检查, 与其他检查手段相比 CT-FFR 诊断效果最佳, 其诊断敏感性为 90%, 特异性为 86%, 准确率为 87%。《2020 年冠脉 CT 血流储备分数应用中国专家建议》也建议在临床中使用 CT-FFR 作为冠状动脉疾病的临床诊断治疗、预后评价、血管再通等决策之一。

在多支病变诊断中, 找到导致心脏供血不足的重要原因是其诊断重点, 仅用 CAG 不能精确诊断, 而且不是所有的多支病变的动脉都能导致心肌缺血。CT-FFR 可以精确地找到“罪犯”的动脉并引导其再通, 可以减少置入的支架数量, 从而减少治疗费用, 同时也可以降低接受旁路移植的患者的比率。另外, CT-FFR 可作为一种有效的预警冠状动脉疾病的危险因素。刘琪等人[6]研究表明, CT-FFR 阳性者的不良心血管事件发病率为 38.7%, 比 CT-FFR 阴性者高 3.8% ($P < 0.05$), 并且, 出现不良心血管事件的病人 CT-FFR 的阳性率和冠脉狭窄的严重程度均明显增高($P < 0.05$)。

3.3. 加强模拟支架的真实性

常规的支架放置方法主要依靠手术过程中的动脉造影进行解剖评价, 而忽视了病灶对血液流动的真实作用, 从而造成过度置入或置入不足。CT-FFR 能准确再现病灶的长度、曲率、分支角度和斑块的分布情况, 从而提高了支架植入的真实性、科学性。CT-FFR 值与冠脉狭窄的程度无关, 但呈现出一种曲线的变化, 采取计算流体力学方法和血流动力学基本原理可以在简化的几何模型上对受损的冠脉进行模拟。

在此基础上, 综合分析支架及病变冠脉扩张引起的不规则形变, 以及支架在狭窄处的扩张过程, 以及支架植入后的血液流动状态, 使得所建立的支架模型更符合实际。这样可以减少因扩张引起的血管损害, 改善其临床效果和预后[7]。有关调查显示, 以 CT-FFR 模拟为基础的血管内皮内支架植入治疗组, 与单独解剖引导组相比, 血管内皮内再狭窄发生率明显降低, 而每名病人平均每组 1.2 个支架植入。该方法特别适合于 SYNTAX 病人和复杂性疾病的病人, 采用先模拟后干预的方法, 使手术中的盲目性变为可预测的精确性, 提高远期疗效。

3.4. 评估心肌缺血的严重程度

CT-FFR 能精确地评价冠脉关键狭窄损伤的局部缺血性, 改变现有的重形态轻功能的解剖评价方法。

CT-FFR 是由血流动力学模拟产生的 FFR 值, 能直观地反映在最大充盈情况下冠脉狭窄对血液流动的约束作用。在常规条件下, CT-FFR 的理论值是“1”。欧美和国内的指导原则都建议以“0.8”为临界值。当 FFR 小于 0.75, 提示有很大的可能是由于病变导致了心肌缺血, 这时候可以进行相关手术治疗。若 FFR > 0.80, 则损伤所致的心肌缺血概率较低, 应考虑采取药物治疗。FFR 范围在 0.75~0.80 之间属于“灰色区域”, 需要根据病人的其他症状以及各项检测指标, 对用药进行适当的调节后, 才能确定介入手术或血管重建的可行性[8]。

3.5. 基于深度学习的 CT-FFR

深度学习作为一门新兴的人工智能学科, 主要研究如何构建并仿真大脑对海量信息的处理能力。其核心是构建能够模拟人类大脑的解析式神经网络, 并通过对海量数据的不同层面的提取和分析, 进而实现对新的样本的智能化辨识和预测。基于深度学习的 CT-FFR 能够模拟人脑的神经网络特性, 实现分布的、并行的、实时的、高效的数据分析, 从而达到提升诊断准确性、降低诊断速度、降低诊断代价的目的。

我国目前已经实现商业化的以深度学习为基础的 CT-FFR 为深脉分数软件(DEEPVESSELEFFR, KeyaMedical, 中国北京), 其工作思路是: 通过对血管解剖和血液流动的直观学习, 抽取重要的特征参量, 建立一套完整的血管树 FFR 的预测方法, 并将其用于新的检测, 从而在确保精确的前提下, 实现全血管树的 FFR 的快速求解[9]。这一技术使用自行研发的树状网络递归神经网络方法, 将多层次网络与循环网络的优点相结合, 分别从不同的血管通路中提取出不同的影像特征、结构特征及功能性特征, 并将这些特征与血管通路的特征相对应, 形成一种新的特征矢量。并且, 该技术还融合了血管通路中每一点的局部特性, 并将其作为整体来处理, 从而获得完整的血液流动特性, 其优势在于能够兼顾局部与整体之间的联系。

在实践中, 此技术可以准确、迅速地对整个动脉通路中各个节点的血流速度进行准确、准确的预测, 大大提升了算法的运算速度。目前已有大量研究表明, DEEPVESSELEFFR 在评估心肌功能缺血方面具有较高的精度和可信度, 并有助于临床决策、病人预后和降低成本。一项多中心临床研究显示, 以 442 例患者为研究对象, 共进行 544 条冠脉分析。经研究表明, 以机器学习为基础的 CT-FFR 灵敏度为 0.84, 特异度为 0.94, 准确度为 0.90, 可显著提升其临床诊断效果。

4. CT-FFR 的目前存在的局限性

4.1. 软件算法存在的局限性

CT-FFR 在冠心病诊疗中的价值已获初步认可, 但其临床应用仍面临多方面局限性, 需结合技术特性与现有证据进行科学评估。当前 CT-FFR 的临床证据主要来源于特定厂商的计算软件, 各平台采用的核心算法, 比如计算流体力学 CFD、深度学习模型等, 因工作机理上的差别, 使得各个系统在计算逻辑、参数修正方式和检验序列等方面存在一定的差别。另外, 因为各类型软件在纳入标准、图像预处理过程和评价方法等方面均有一定差别, 如果将单一软件的研究结果简单地推广到其他软件, 会产生较大的错误。

4.2. 对 CCTA 图像质量高度依赖

在临床诊断与治疗中应用 CT-FFR 时, 其诊断准确性受多种因素的影响。CCTA 三维解剖重构的准确性是影响其主要因素之一, 由于成像信号的信噪比较低、内腔亮度不足、运动伪影、错层伪影等因素的存在, 使得 CT-FFR 成像效果受到很大的限制。并且, 患者的生理状态也会对检测结果造成一定的影响, 心跳速度较高会导致影像中的移动伪迹增多, 降低了对血管边缘和斑块的解析, 进而导致 CT-FFR 的计算效果受到一定的干扰, 所以, 对于常规 64 排窄体探测器 CT 成像中, 患者心率应当不超过 70 次/分

钟。如果患者有心肌桥, 尤其是 LAD 患者, 心肌桥的近端动脉更容易变窄, 心肌桥周围的空腔也会变小 [10]。此外, 在 CCTA 成像之前, 患者有没有使用过硝酸酯类的药物, 以及使用的剂量都会对影像的成像效果造成一定的影响, 进而会对 CT-FFR 的计算精度造成一定的影响。按照 SCCT 指导原则, 若病人需要使用硝酸酯类药物, 则应当尽量采取喷雾剂。

4.3. 严重钙化病变诊断性有待提升

在 CT-FFR 研究中, 钙化病变是重点研究内容之一, 虽然目前已有一些针对钙化的方法, 例如阈值化结合形态分析对模型进行了改进, 但依旧存在明显问题。由于钙化斑的高密度, 使得内部空腔的界限变得很不清晰, 因此在图像分割过程中, 往往会将其与周围的组织相混淆, 从而造成了较低的检测结果。又或者, 由于钙化层的存在, 会使偏心型的动脉粥样硬化变得更容易被忽略, 延误临床干预。

5. 结束语

综上所述, 与 CCTA、CAG 等检查手段相比, CT-FFR 可反映冠脉内各个病灶及各个部位的生理学变化, 能够提高检查结果的全面性、综合性, 进而为后续诊断与治疗提供必要的参考信息。目前 CT-FFR 的应用范围并不广泛, 一般适用于 CAG 诊断为冠心病患者或已有冠心病患者。这就需要医务工作人员对 CT-FFR 的应用进行持续探究, 拓宽 CT-FFR 使用范围, 提高其使用价值, 进一步促进我国医疗水平的发展与进步。

参考文献

- [1] 毛亮, 王小强, 刘晓龙, 翟宁, 陈月芹. 右冠状动脉起自左冠窦患者的 CT 解剖及 CT-FFR 特征与临床症状的相关性研究[J]. CT 理论与应用研究(中英文), 2025, 34(1): 17-22.
- [2] 徐敏, 瞿华. 冠状动脉 CT 血管成像联合 CT-FFR 对冠心病心肌缺血影响因素的研究[J]. 中国现代医生, 2024, 62(25): 66-69.
- [3] 杨旭东, 黄心怡, 石士奎. 基于人工智能测量的冠状动脉钙化积分与 CT-FFR 及斑块特征的相关性[J]. 分子影像学杂志, 2024, 47(8): 844-850.
- [4] 张佳佳, 任克. CT-FFR 对老年冠心病患者主要不良心脏事件的预测价值[J]. 心血管病防治知识, 2024, 14(16): 33-35, 39.
- [5] 孙刚, 常艺桐, 徐娜, 孟庆涛, 朱霓. 冠状动脉周围脂肪 CT 衰减指数联合 CT-FFR 对急性冠状动脉综合征患者 MACE 事件预测价值[J]. 中国 CT 和 MRI 杂志, 2024, 22(7): 90-92.
- [6] 刘琪, 窦勇, 王雅玲, 邓勇志. 冠状动脉 CT-FFR 值对冠心病患者不良心血管事件发生的影响[J]. 影像研究与医学应用, 2024, 8(14): 18-21.
- [7] 魏凯, 王玺, 何柏, 赵子强, 张威, 荆晶, 单冬凯. 基于 CCTA 的 Δ CT-FFR 对重度钙化冠状动脉功能学评估的临床价值分析[J]. 解放军医学杂志, 2024, 49(2): 144-151.
- [8] 曹红岩, 蔡晓航, 孙国臣. CCTA 及 CT-FFR 评估冠脉病变特异性缺血的价值观察[J]. 中国 CT 和 MRI 杂志, 2023, 21(5): 52-54.
- [9] 王圣楠, 卜荣生, 杜静茹, 王耀国, 吴淳淳. CT-FFR 参数联合斑块定量技术在心肌缺血再灌注损伤预测中的应用[J]. 中国医学物理学杂志, 2023, 40(1): 66-70.
- [10] 徐彧, 杜丰夷, 刘蕾, 杨燕, 赵思敏, 李小圳, 赵天佐, 陈正光. 基于深度学习下 CT-FFR 与 CCS 患者危险因素的相关探讨[J]. 中国 CT 和 MRI 杂志, 2022, 20(9): 179-181.