

超声评估动脉血流参数的应用进展与临床价值

吴可卿¹, 郝霁萍^{2*}, 高宇勤³

¹西安医学院研究生工作部, 陕西 西安

²西安市第九医院超声医学科, 陕西 西安

³西安市第九医院心血管内科, 陕西 西安

收稿日期: 2025年7月1日; 录用日期: 2025年7月24日; 发布日期: 2025年7月31日

摘要

超声评估动脉血流参数具有实时、无创、可重复的优点, 在血管疾病的诊断、预后评估中具有重要价值。近年来, 随着超声技术的快速发展, 超声造影、超微血流成像等新技术不断涌现, 显著提高了动脉血流动力学评估的精确性和临床应用范围。研究背景及意义方面, 动脉血流参数的变化与多种血管性疾病(如外周动脉狭窄、血栓形成等)密切相关, 早期准确评估有助于疾病的早期诊断、风险分层和制定治疗决策。主要研究内容包括超声血流参数(如血流速度、阻力指数、搏动指数等)的检测方法、不同动脉系统(如颈动脉、肾动脉及外周动脉)的应用进展, 以及新技术在血流动力学研究中的突破。临床价值总结显示, 超声血流参数评估不仅可用于疾病诊断和严重程度分级, 还能预测疾病风险、指导治疗方案, 并在术后随访和科研领域发挥重要作用。未来, 结合人工智能分析技术有望进一步提升超声血流评估的精准性和临床应用潜力。

关键词

血管疾病的诊断, 超微血流成像, 超声血流评估, 预测疾病风险, 阻力指数

Advances and Clinical Value of Ultrasound in Assessing Arterial Blood Flow Parameters

Keqing Wu¹, Jiping Hao^{2*}, Yuqin Gao³

¹Graduate Student Affairs Office, Xi'an Medical University, Xi'an Shaanxi

²Department of Ultrasound Medicine, Xi'an Ninth Hospital, Xi'an Shaanxi

³Cardiology Department, Xi'an Ninth Hospital, Xi'an Shaanxi

Received: Jul. 1st, 2025; accepted: Jul. 24th, 2025; published: Jul. 31st, 2025

*通讯作者。

文章引用: 吴可卿, 郝霁萍, 高宇勤. 超声评估动脉血流参数的应用进展与临床价值[J]. 临床医学进展, 2025, 15(8): 119-123. DOI: 10.12677/acm.2025.1582207

Abstract

Ultrasound assessment of arterial blood flow parameters, characterized by its real-time, non-invasive, and repeatable nature, holds significant value in the diagnosis and prognostic evaluation of vascular diseases. In recent years, with the rapid advancement of ultrasound technology, novel techniques such as contrast-enhanced ultrasound (CEUS) and Superb Microvascular Imaging (SMI) have emerged, substantially improving the accuracy of hemodynamic assessments and expanding their clinical applications. Regarding research background and significance, alterations in arterial blood flow parameters are closely associated with various vascular pathologies (e.g., peripheral artery stenosis, thrombosis). Early and accurate assessment facilitates timely diagnosis, risk stratification, and formulation of therapeutic decisions. The main research content encompasses: Detection methods for ultrasound hemodynamic parameters (e.g., flow velocity, resistive index, pulsatility index). Application advances across different arterial systems (e.g., carotid, renal, and peripheral arteries) technological breakthroughs in hemodynamic research using new imaging modalities. Clinical value analysis demonstrates that ultrasound assessment of blood flow parameters not only enables disease diagnosis and severity grading but also predicts disease risk, guides treatment planning, and plays a vital role in postoperative follow-up and scientific research. Looking ahead, integration with AI-based analytics is anticipated to further enhance the precision and clinical potential of ultrasound-based hemodynamic evaluation.

Keywords

Vascular Disease Diagnosis, Superb Microvascular Imaging, Ultrasound Blood Flow Assessment, Disease Risk Prediction, Resistance Index

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. 超声评估动脉血流参数的技术基础

超声评估动脉血流参数的核心技术基于多普勒效应，即当超声波遇到运动的红细胞时，反射波的频率会发生变化，即频移，频移的大小与血流速度成正比，方向与血流方向相关。通过测量频移，可以计算血流速度、判断血流方向。从而测量收缩期峰值流速(PSV, Peak Systolic Velocity)、舒张末期流速(EDV, End-Diastolic Velocity)，并可计算阻力指数(RI, Resistance Index)与搏动指数(PI, Pulsatility Index)等参数[1]。彩色多普勒成像则可以直观显示血流的方向。并且提供了一种可重复、无害和准确的血管解剖可视化方法。恶性肿瘤在生长过程中高度依赖充足的血液供应以维持其快速增殖。此过程伴随对宿主正常微细血管系统的广泛破坏，易形成动静脉瘘(arteriovenous fistula, AVF)、网络状血管结构或局部血管狭窄(vascular stenosis)，导致峰值血流速度(peak systolic velocity, PSV)显著升高。肿瘤内部新生的血管具有管腔细小、管壁薄弱、缺乏肌层的特点，形态上常表现为扭曲、受压或极不规则。此外，静脉内癌栓(venous tumor thrombus)的形成可阻塞血管形成盲端(blind end)，阻碍静脉回流，致使瘤内血管阻力(intratumoral vascular resistance)显著增高[2]。

2. 超声评估动脉血流的新技术进展

2.1. 超声造影

超声造影(CEUS)是一种功能成像技术。通过静脉注射含惰性气体微泡的声学造影剂。这些微泡作为

极其灵敏的血流示踪剂，能够通过肺循环并进入全身微循环系统。通过实时、动态地观察造影剂微泡在病灶内微血管中的分布模式、灌注时序以及廓清过程，CEUS 突破了常规超声在微血管显示能力上的局限。这种对微血管血流动力学的精细可视化[3]，为临床医生提供了超越常规灰阶和彩色多普勒超声的丰富诊断信息[4]。明显提高了对病灶的检出率、定性诊断能力以及评估消融后病灶残留活性或抗血管生成药物疗效，成为现代精准影像诊断的重要工具。超声造影(Contrast-Enhanced Ultrasound, CEUS)是诊断肝脏局灶性病变的关键影像学技术之一。新型超声造影剂示卓安(Sonazoid)具有独特的生物学特性，可被肝脏 Kupffer 细胞特异性吞噬。这一特性使其能够在注射后实现长达 1 小时以上的延迟相(即 Kupffer 相)稳定显影。由于肝脏恶性肿瘤(特别是肝细胞癌)常破坏或显著减少病灶内的 Kupffer 细胞，因此其在 Kupffer 相中通常呈现为低灌注区。通过对比分析病灶区域与周围非瘤肝组织在 Kupffer 相的灌注特征，并对病灶的灌注缺损程度进行分级评估，可显著提高肝细胞癌(Hepatocellular Carcinoma, HCC)与其他肝脏恶性肿瘤的鉴别诊断能力[5]。

2.2. 超微血流成像

超微血流成像(SMI)采用智能自适应算法，在保留极低速微血流信号的同时，能够有效抑制组织运动、呼吸及血管搏动产生的伪影干扰。相较于传统彩色多普勒或能量多普勒技术，SMI 无需依赖外源性超声造影剂，即可高灵敏度地显示低速血流和微小血管的精细结构，显著提升了对微循环灌注的评估能力[6]。甲状腺乳头状微小癌(Papillary Thyroid Microcarcinoma, PTMC)的典型超声特征包括：实性极低回声结节、纵横比 > 1 、边缘不规则及内部微钙化灶。这些表现易与甲状腺皱缩结节(benign regressive nodules)的声像图混淆。临床处理上，皱缩结节以随访观察为主且无需积极干预；而 PTMC 需行细针穿刺活检(Fine-Needle Aspiration, FNA)明确诊断。当前我国甲状腺结节的 FNA 普及率有限，多数诊疗决策仍依赖于二维灰阶超声特征、血流动力学参数及其他临床依据，因此精准鉴别结节性质至关重要。超微血流成像(Superb Microvascular Imaging, SMI)技术通过捕获微血管内极低速血流信号，突破了传统多普勒超声的敏感度限制，推动了超声诊断进入“微循环可视化”的新阶段[7]。

2.3. 超声向量血流成像

超声向量血流成像(V-Flow)是一种突破性的血流可视化与量化技术。与传统依赖多普勒频移原理的超声方法不同，V-Flow 通过直接解析声束内散射粒子的运动向量，实现了对血流方向、绝对流速以及流线形态的直观、实时显示。其核心优势在于彻底摆脱了角度依赖性的限制，即可在任何扫描角度下获取准确的血流动力学信息，定量评估血流紊乱程度[8][9]。随着心房颤动发病率的持续攀升，学界对患者左心房(Left Atrium, LA)尤其是左心耳(Left Atrial Appendage, LAA)的形态学改变、功能异常及病理机制的研究日益深入。同时，关于左心耳内部血流动力学特征(如涡流分布、剪切应力等)的探索仍显著不足。血流向量成像技术(Vector Flow Mapping, VFM)凭借其对心腔内涡流强度、旋转方向及能量耗散的精确量化能力，近年来已成为血流动力学研究的重要工具[10]。

3. 超声评估动脉血流参数在不同系统的应用进展

3.1. 心血管系统

冠心病的病理基础是冠状动脉发生粥样硬化。由此会导致冠状动脉管壁增厚、脂质斑块形成，进而造成血管管腔的渐进性狭窄甚至完全闭塞。其严重后果是心肌的血液灌注量显著减少和氧气供应不足，从而引发心绞痛、心肌梗死等临床症状。鉴于冠状动脉和颈动脉在血管生物学、粥样硬化发生机制方面具有高度的相似性，颈动脉超声检查所获得的参数：颈动脉内中膜厚度、斑块形态学特征、血管狭窄程

度等,为临床评估冠心病提供了重要的辅助信息。这些参数不仅在冠心病的辅助诊断中具有一定的参考价值,也广泛应用于监测疾病治疗效果,如降脂、抗动脉硬化治疗的效果以及预测患者发生主要心血管事件的风险,即预后评估[11][12]。颈动脉超声检查作为一种无创、可重复性高的影像学手段,能够实时、动态地监测颈动脉粥样硬化病变的进展程度与性质变化。这些客观、量化的参数为脑卒中的预防策略制定、高危人群筛查、以及已发生卒中患者的病情评估与疗效监测提供了科学、直观的影像学依据[13][14]。颈动脉血流动力学参数的精确测量是评估颈部动脉狭窄程度的关键无创手段[15]。超声评估动脉血流参数在外周动脉疾病的临床评估中具有不可或缺的价值。在肾脏多普勒超声评估中,收缩期峰值流速(PSV)和舒张末期流速(EDV)是反映肾脏整体血管床充盈状态及血流灌注水平的重要参数。PSV指的是收缩期峰值血流速度,而EDV则反映舒张末期流速。更为关键的是,肾动脉血流阻力指数(RI)作为一个计算性指标, $RI = (PSV - EDV) / PSV$,其价值更加突出。它不仅能够有效地量化评估肾血管床的总体阻力状态,更能间接揭示肾内微循环结构的特征性改变。相较于其他多普勒参数,RI具有显著的角度非依赖性优势,即其测量值受超声束与血流方向夹角的影响较小,这大大提高了其测量的稳定性和可比性[2]。正是基于RI对血管阻力、微血管特征的反映能力以及测量的稳定性,RI一直被认为是反映肾血流变化敏感且可靠的标记物,反映的是舒张末期血管远端的阻力情况,RI值越小,说明血管远端阻力越低,反之说明血管远端阻力越高[16][17]。

3.2. 产科

在临床产科超声检查中,胎儿动脉血流动力学的准确测量是监测胎儿健康状况的关键环节。收缩期峰值血流速度与舒张末期血流速度的比值(systolic/diastolic velocity ratio, S/D)、阻力指数(resistance index, RI)和搏动指数(pulsatility index, PI),作为三大核心超声指标,凭借其对血流灌注量和末梢循环阻抗变化的反映,这些血流参数成为了临床医师判断胎儿生长发育、胎盘功能及潜在病理状态的重要依据[18]。S/D比值通过计算收缩期峰值血流速度与舒张末期血流速度的数值关系,直观展现了血管在不同心动周期阶段的血流变化。当胎盘循环功能良好时,血管阻力较低,舒张期仍有充足血流供应,S/D比值维持在正常范围;而当胎盘出现老化、血管痉挛等病理改变,导致末梢循环阻力升高,舒张期血流减少,S/D比值便会显著上升。阻力指数(RI)则从另一个角度量化血管阻力,其计算公式综合考虑了收缩期和舒张期血流速度,能够更精准地反映血管床的阻力状态。RI值的变化不仅与胎盘血管的发育程度相关,还与胎儿心脏功能、母体血压等因素密切相关,是评估胎儿血液循环状态的重要参考[19]。相较于前两者,搏动指数(PI)具有独特的临床应用[20]。PI通过计算血管血流速度的波动幅度与平均血流速度的比值,全面反映了整个心动周期的血流动力学特征。在实际超声探测过程中,PI不受血管探测角度的影响,即使在胎儿体位不佳、血管显示角度不理想的情况下,依然能够获得稳定可靠的测量值。这种高稳定性和准确性,使得PI在产科超声检查中备受青睐,尤其在评估胎儿脐动脉、大脑中动脉等关键血管时,为临床诊断提供了更为精准的依据。凭借对血流灌注量和末梢循环阻抗变化的敏锐捕捉,成为了临床医师判断胎儿生长发育、胎盘功能及潜在病理状态的重要依据[21]。

4. 结论

超声评估动脉血流参数作为一种无创、可重复、成本效益高的影像学方法,在多种动脉疾病的诊断、治疗监测和预后评估中发挥着重要作用。随着超声技术的不断发展,新的成像模式和人工智能技术的结合,超声在动脉血流评估中的应用范围将不断扩大,准确性和可靠性将进一步提高。尽管存在一些局限性,超声技术仍然是评估动脉血流参数的重要工具,并有望在未来的个性化医疗和精准医学中发挥更大的作用。临床医生应充分认识超声评估动脉血流参数的价值,合理应用这一技术,为患者提供更优质的医疗服务。

参考文献

- [1] 郭琳琳, 王文, 王海燕. 超声评估不同病理分期老年卵巢癌患者血流动力学变化及其对预后的预测价值[J]. 临床超声医学杂志, 2025, 27(3): 193-197.
- [2] 张文芳, 王志刚, 张群霞, 等. 多普勒超声收缩期峰值与阻力指数在鉴别诊断乳腺肿瘤中的应用价值[J]. 临床超声医学杂志, 2008(5): 309-311.
- [3] 汤郎, 胡滨, 刘启平, 等. 二维超声联合超声造影预测甲状腺乳头状癌颈部淋巴结转移的价值[J]. 中国医学计算机成像杂志, 2025, 31(2): 257-262.
- [4] Kaloshina, A.A. and Sheremet, N.L. (2022) The Importance of OCT Angiography and Doppler Ultrasound Methods in Diagnosis of Optic Neuropathies. *Vestnik oftal'mologii*, **138**, 132-139. <https://doi.org/10.17116/oftalma2022138031132>
- [5] 张哲元, 王修明, 谭庆亭, 等. 超声造影 Kupffer 相病灶与非瘤肝实质强度比值鉴别肝细胞癌与肝内胆管细胞癌/肝转移癌[J]. 中国医学影像技术, 2025, 41(6): 933-937.
- [6] 马雪松, 王莉, 岳嵩, 等. 超微血流成像评估胎盘血流灌注的应用进展[J]. 临床超声医学杂志, 2025, 27(3): 258-260.
- [7] 张玉德, 杜海霞, 毕文贇. 高频超声联合超微血流成像技术在 C-TIRADS 4A 类及以上甲状腺结节鉴别诊断中的应用价值[J]. 山东医药, 2025, 65(5): 109-112.
- [8] 周易, 王珊, 尹立雪, 等. 超声向量血流成像在评估糖尿病患者颈动脉粥样硬化中的应用[J]. 中国医学影像学杂志, 2024, 32(2): 187-192.
- [9] 赵蕊, 郑海宁, 童一砂, 等. 超声 V Flow 技术定量评价犬股动脉狭窄后血流紊乱规律的实验研究[J]. 中国超声医学杂志, 2022, 38(12): 1413-1415.
- [10] 蔡宇燕, 魏薪, 张晓玲, 等. 血流向量成像技术对非瓣膜性心房颤动患者左心耳血流流场特点的定量分析[J]. 四川大学学报(医学版), 2018, 49(1): 119-123.
- [11] Liao, H., Chen, Q., Liu, L., Zhong, S. and Xiao, C. (2022) Utilization of Risk Scores for Coronary Heart Disease Diagnosis in Rural China. *International Journal of General Medicine*, **15**, 2541-2548. <https://doi.org/10.2147/ijgm.s355573>
- [12] Gunda, S.T., Yip, J.H., Ng, V.T., Chen, Z., Han, X., Chen, X., et al. (2024) The Diagnostic Accuracy of Transcranial Color-Coded Doppler Ultrasound Technique in Stratifying Intracranial Cerebral Artery Stenoses in Cerebrovascular Disease Patients: A Systematic Review and Meta-Analysis. *Journal of Clinical Medicine*, **13**, Article No. 1507. <https://doi.org/10.3390/jcm13051507>
- [13] 周利, 徐莉, 邵汝升, 等. 颈动脉超声定量参数联合血清 miR-128b、miR-146a 对急性缺血性脑卒中的诊断价值及对预后的评价意义[J]. 影像科学与光化学, 2021, 39(3): 401-406.
- [14] Guo, L., Pan, J., Li, F., Zhao, L. and Shi, Y. (2021) A Novel Brain Targeted Plasma Exosomes Enhance the Neuroprotective Efficacy of Edaravone in Ischemic Stroke. *IET Nanobiotechnology*, **15**, 107-116. <https://doi.org/10.1049/nbt2.12003>
- [15] 刘文聪, 赵冀安, 马晓雯, 等. 基于颈动脉超声和经颅多普勒彩超评价中西医结合治疗颈动脉狭窄的短-中期前瞻研究[J/OL]. 中华中医药学刊, 2025. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/21.1546.r.20250317.1904.024.html>, 2025-06-24.
- [16] 刘旭峰, 郝霁萍, 王述进, 等. 疏风活血方对糖尿病肾病肾血流参数及相关因素的影响[J]. 陕西中医, 2017, 38(12): 1708-1710.
- [17] 侯超, 李明星. 肾动脉血流动力学参数在子痫前期的检测价值[J]. 中国超声医学杂志, 2018, 34(5): 445-448.
- [18] 陈慧, 陈海宁, 梁旭霞. 超声多普勒测定脑-胎盘比在产科的应用[J]. 中国实用妇科与产科杂志, 2022, 38(4): 409-415.
- [19] 刘玉姗, 肖永志, 曾施, 等. 中晚孕期正常胎儿大脑前动脉血流参数与孕周的相关性[J]. 中南大学学报(医学版), 2018, 43(9): 994-999.
- [20] 高颖, 杨莉莉, 金永合, 等. MAP、PLGF、UtA-PI 联合临床风险因素综合预测妊娠期高血压疾病的临床价值[J]. 河北北方学院学报(自然科学版), 2025, 41(10): 23-27.
- [21] 罗丹青, 林邯枫, 李微微. 早孕期子宫动脉搏动指数联合胎盘生长因子和平均动脉压对预测子痫前期的价值研究[J]. 黔南民族医学学报, 2024, 37(2): 151-155.