

编者按

近年来,人工智能在心血管影像领域的发展势头迅猛,正深刻推动现代医学模式的变革,充分展现了其融入心血管临床实践的广阔前景。人工智能最突出的优势在于能高效处理海量、复杂的医疗数据,并挖掘出人类视觉易忽略的潜在特征与规律。在心血管影像分析中,人工智能可自动、精准地提取疾病相关的图像和数据特征,构建更系统的疾病诊断模型,从而显著提升影像学诊断的效率与准确性。可以预见,这一技术必将推动心血管疾病临床诊疗体系的深刻转型。本期专题聚焦人工智能在超声心动图中的应用,涵盖其在冠心病、心脏瓣膜疾病、介入心脏病学及多普勒参数测量等方面的最新进展,深入探讨了人工智能算法在提高图像解析精度、优化血流动力学评估、辅助术中决策等关键环节的具体实践。同时,结合前沿研究成果,专题系统梳理了当前技术的优势与瓶颈,以期对心血管影像的智能化发展提供理论依据和应用参考。

人工智能在超声心动图中的应用与进展

邓燕^{1,2},尹立雪^{1,2}

1. 四川省医学科学院·四川省人民医院(电子科技大学附属医院)心血管超声及心功能科,四川 成都 610072;2. 超声医学与计算心脏病学四川省重点实验室,四川省心血管病临床医学研究中心,国家心血管病临床医学研究中心分中心,四川 成都 610072

【摘要】 超声心动图是心血管疾病诊疗中的一线影像学技术,具有操作者依赖性强和检查时间长的局限性。人工智能(artificial intelligence, AI)技术正在迅速改变超声心动图的临床应用能力。AI 超声心动图的应用涉及超声心动图工作流程中的多个层面和多个环节以及不同的应用场景,包括:图像采集、质量评估、图像分析自动测量、特征抓取和系统化报告生成等。现有研究表明, AI 能够显著提升图像采集效率以及图像的解释性和诊断准确性。尽管如此, AI 在超声心动图中的应用仍面临诸多挑战,如:原始图像数据集质量差、“黑箱”特性和潜在的安全漏洞等。通过开发混合模型或多模态 AI 模型、建立大规模多样化的高质量图文数据库和采用联邦学习技术等有助于逐步解决以上相关问题,从而实现超声心动图分析过程的全自动化,有效提高心血管疾病诊断的准确率与检查效率、优化诊疗流程。

【关键词】 超声心动图;人工智能

【中图分类号】 R540.4⁺5

【文献标志码】 A

【文章编号】 1672-6170(2026)04-0001-05

Application and progress of artificial intelligence in echocardiography DENG Yan^{1,2}, YIN Li-xue^{1,2} 1. Department of Cardiovascular Ultrasound & Noninvasive Cardiology, Sichuan Academy of Medical Sciences & Sichuan Provincial People's Hospital (Affiliated Hospital of University of Electronic Science and Technology of China), Chengdu 610072, China; 2. Sichuan Provincial Key Laboratory of Ultrasound Medicine and Computational Cardiology, Sichuan Provincial Clinical Research Center for Cardiovascular Diseases, Branch Center of the National Clinical Research Center for Cardiovascular Diseases, Chengdu 610072, China

【Corresponding author】 YIN Li-xue

【Abstract】 Echocardiography is the first-line imaging technique in the diagnosis and treatment of cardiovascular diseases. However, it has limitations such as high operator dependence and long inspection time. Artificial intelligence (AI) technology is rapidly transforming the clinical application of echocardiography. The application of AI-based echocardiography involves multiple levels and stages of the echocardiography workflow, as well as different application scenarios. These include the image acquisition, quality assessment, automatic measurement of image analysis, feature extraction and systematic report generation. Existing studies demonstrate that AI can significantly improve the image acquisition efficiency, interpretability and diagnostic accuracy. Nevertheless, the application of AI in echocardiography still faces numerous challenges such as poor quality of raw image datasets, "black-box" characteristics and potential security vulnerabilities. These issues can be progressively solved through the development of hybrid or multimodal AI models, the establishment of large-scale, diverse, high-quality image-text database and the employment of federated learning techniques. Thereby, it can achieve the full automation of echocardiographic analysis, enhance the diagnostic accuracy and examination efficiency for cardiovascular diseases and optimize the clinical workflows.

【基金项目】 国家科技重大专项资助项目(编号:2024ZD0527204)

【Key words】 Echocardiography; Artificial intelligence

【通讯作者简介】 尹立雪,男,主任医师,教授,博士研究生导师。国家杰出医师,国务院政府特殊津贴专家,卫生部有突出贡献中青年专家,四川省学术技术带头人。中华医学会理事,亚太超声心动图协会副主席,中华医学会超声医学分会第七、八和九届副主任委员,中国医师协会超声医师分会第一、二届副会长。主要研究方向:心血管超声。

超声心动图是心血管疾病的核心无创影像技术,能够实时动态评价心脏结构、功能与血流动力学。已经广泛应用于心血管疾病诊断、危险分层、治疗策略以及疗效和预后评估。传统超声心动图

高度依赖操作者技能与经验,图像采集和解读存在显著的观察者内和观察者间差异,且解读过程耗时费力,制约了其在临床中的高效应用与普及,也促使人们不断寻求新的技术手段来改进和完善超声心动图技术。人工智能(artificial intelligence, AI)技术的迅猛发展,尤其是机器学习和深度学习算法的突破,为解决超声心动图临床规模化即时应用的现存问题带来了新的契机^[1]。

1 AI 的基本概况

AI 是计算机科学的一个分支,旨在为建模和扩展人类大脑智能开发理论、方法和应用系统。根据学习机制的不同, AI 可分为机器学习和深度学习,其在医学研究中已得到广泛应用。

1.1 机器学习 机器学习是 AI 的一个重要子集,指的是通过研究交互作用来解决复杂大数据问题的一系列技术,其主要优势在于能够从大型数据集中提取有价值的信息,并自主执行模式识别和分类任务。机器学习算法分为不同的学习类别,称为监督学习、无监督学习、半监督学习和强化学习,其中,监督学习和无监督学习被频繁使用。

1.2 深度学习 深度学习是近年来 AI 算法蓬勃发展的一个新领域,可视为机器学习的延伸。深度学习从底层建立映射关系,构建一个模仿人脑神经反射回路的层次模型结构,从输入数据的底层到顶层逐级提取特征,实现信号的高级语义。这种分层模型结构被称为神经网络,以卷积神经网络(convolutional neural network, CNN)算法为代表,目前医学图像处理领域大多使用此算法^[2]。

1.3 AI 模型 超声心动图 AI 辅助图像分析模型主要包括两种方法:多步模型和端到端模型。多步模型使用专用神经网络按顺序解决特定任务,多步模型可视化每个步骤的预测,可以提高可解释性;端到端模型,通常称为“黑箱”模型,直接从图像中预测结果,无需中间步骤。多步模型在临床信任度和推广性上具有明显优势,而端到端模型则在大量样本、复杂任务场景中显示出卓越性能^[3]。

2 AI 在超声心动图中的应用与进展

AI 正在迅速改变超声心动图领域,通过利用机器学习,特别是深度学习, AI 可以提高图像采集、解释和诊断准确性。AI 解决了超声心动图长期存在的局限性,例如操作员依赖性和观察者间的变异性。从探头引导到自动定量工具, AI 系统提高了图

像质量,并减少了左心室射血分数等关键测量的变异性。最近的研究表明, AI 可以协助疾病分类,检测区域壁运动异常,并预测疾病进展,其准确度可与专家评估相媲美。AI 在超声心动图的应用涉及超声心动图工作流程中的多个层面与不同应用场景,包括图像采集、质量评估、图像分析和报告等,从使用原始超声心动图图像数据及非结构化文本提取数据的自然语言处理,到结构化报告中表格数据的数学建模以及基于 AI 的风险预测、聚类诊断、表型分组与临床决策等^[3]。

2.1 图像采集的智能化指导 图像采集是超声心动图检查的起始环节,其质量和准确性直接影响后续的诊断结果。在传统的超声心动图检查中,获取标准的心脏切面图像高度依赖超声技师的经验和操作技能。不同技师在探头的位置、角度、压力以及对心脏解剖结构的理解和判断等方面存在差异,导致获取的图像质量参差不齐,标准切面的获取难度较大且耗时较长。这不仅增加了技师的工作负担,也影响了超声心动图检查的效率和准确性。AI 技术的引入为解决这些问题提供了有效的途径。目前,已经开发出了 AI 驱动的成像引导系统,以提供实时探头调整建议^[4],一些供应商已经在商用超声设备中采用了这些技术。

2.2 图像质量优化 图像质量是影响超声心动图诊断准确性的关键因素之一,主要问题是成像中出现的噪声和伪影,在图像质量评估阶段,各种 AI 算法提供了不同的方法,如通过训练经典的机器学习算法,使用从原始图像中得出的直方图来自动评估超声心动图图像质量,其可对图像质量进行高准确性评估^[5]。

2.3 AI 与心脏结构与功能评估 AI 在评估腔室内径与容积、室壁厚度、节段性运动异常和心脏功能的计算方面呈现出高准确性的结果^[6-10]。AI 模型在量化左心室整体纵向应变方面也很准确,与传统使用的半自动方法不同,无需任何人工干预。新的斑点追踪深度学习技术,提高了节段应变测量的可重复性,与商业半自动软件整体纵向应变测量的观察者间可重复性相匹配,计算时间小于 1 秒,使常规节段应变评估成为现实。目前,已经开发了 AI 模型,可以直接从超声心动图图像评估左心室舒张功能,执行自动测量并将结果整合到舒张功能分级,与基于指南的左心室舒张功能障碍评估具有高度

的一致性^[8]。

2.4 AI 与负荷超声心动图 负荷超声心动图中负荷状态不同于静息状态,在峰值压力下心率加快、恢复期间心率指数级下降以及呼吸伪影等使整体和局部心室功能的分析变得更为复杂。AI 为负荷超声心动图提供了一种有价值且省时的辅助分析手段。

在前瞻性多中心的大型研究中,研究人员开发了自动图像处理方法,首先使用二维 CNN 对静息和负荷状态下超声心动图像进行视图分类,通过 3 个自动绘制轮廓 CNN 对每帧图像左室内膜边界进行轮廓处理,生成 31 个几何和运动学特征如整体纵向应变等,并训练了支持向量机、随机森林和逻辑回归 3 个监督机器学习分类器,最后创建一个集成机器学习分类器以识别冠状动脉造影显示有严重冠状动脉疾病的患者,临床医生使用这一工具使阅片者间一致性和识别疾病的灵敏度提高。在真实世界研究中,AI 通过负荷超声心动图计算的左心室射血分数和整体纵向应变能够提供独立和增量的预测价值,以识别除传统风险因素和诱导性缺血之外引起的显著冠状动脉疾病^[11~13]。

2.5 AI 与心肌造影 目前的心肌造影超声心动图(myocardial contrast echocardiography, MCE)定量分析软件需要操作者手动选择感兴趣区,耗时费力,且重复性差。因此国外开发了一种基于 AI 的定量心肌造影分析软件,该软件在单帧人工心肌分割的基础上,采用刚性配准算法自动跟踪所有其他帧中的心肌 ROI,采用单指数灌注模型对时间-强度数据进行拟合,由此实现心肌的半自动分割,并自动计算心肌血流灌注参数。国内有学者提出了一种用于全自动心肌分割的结合 CNN 和递归神经网络的编码器-解码器架构。编码器作为特征提取器,能够从不同分辨率的 MCE 序列中提取特征,从而提高了心肌分割准确性^[13,14]。

2.6 血管内超声(intravenous ultrasound, IVUS) IVUS 是目前应用最广泛的冠状动脉内成像方式,有研究通过对大规模 IVUS 图像数据集进行了包括管腔、血管和支架的标注,以 DeepLabv3 为主体构造了一个全卷积的编码器/解码器模型架构,采用 Res-Net34 特征作为编码器将图像编码为特征图;使用金字塔池化模块在多个尺度上提取信息,将底层与高层特征进一步融合,提升分割边界准确度;在解

码器侧,选用二维卷积对融合的特征图进行解码来分割 IVUS 上的管腔、血管和支架结构,并证明与人类专家相比,其提出的基于深度学习的方法提供了出色的分割性能。

IVUS 除了提供冠状动脉的实时横断面图像,还能帮助临床医生推断动脉粥样硬化斑块的组成。随机驱动组织学的新技术研究通过学习标记数据,掌握针对组织特异性超声波背向散射的统计物理特性以及信号的基本置信度评估方法,用于预测斑块中的异质组织组成,从而评估斑块易损性^[12,15]。

3 AI 在心脏疾病超声心动图检测中的应用

结合深度学习的超声心动图为中心疾病检测提供了变革性的能力。AI 通过自动编码和整合图像序列中的大量信息,可以识别数据中复杂的特征,例如心肌回声、运动和瓣膜功能的细微变化,以识别表征特定心脏疾病。

3.1 心肌病的智能诊断与分型 根据欧洲心脏病学会最近的指南,心肌病分为 5 种主要亚型,即:肥厚型心肌病、扩张型心肌病、致心律失常性右心室心肌病、非扩张型左心室心肌病和限制性心肌病。

左心室肥厚可由多种病因引起,“不明原因”肥厚的鉴别诊断对于患者管理和预后至关重要。AI 模型在对心室肥厚的根本原因进行分类、促进有效诊断和预后以及预防并发症方面显示出潜力。CNN 长短期记忆深度学习算法研究可以帮助区分左心室肥厚的常见病因(即高血压性心脏病、肥厚型心肌病和心脏淀粉样变性),深度学习算法的诊断准确率显著高于超声心动图专家。法布雷病由于临床表现的异质性和多系统性,其诊断具有挑战性,近期 AI 的研究构建了法布雷病的统计“表型生物标志物”,取得了较强的分析性能。整合心电图和超声心动图数据开发的多模态融合网络模型研究表明,左心室肥厚的病因学诊断灵敏度和特异度均较高^[16]。

缺血性和非缺血性病因的区分在患者管理中至关重要,基于临床和超声心动图数据的机器学习模型研究可以区分缺血性和非缺血性左心室扩张,该研究开发了四种不同的机器学习模型,即随机森林、逻辑回归、神经网络和 XGBoost,其中 XGBoost 模型的准确性最高。

基于两个包含心肌病样本的公共数据集的机器学习算法研究测试了几个机器学习模型,包括支

持向量机、朴素贝叶斯、决策树、K 最近邻、梯度增强机、极端梯度增强和随机森林,用于确定关键候选基因,以构建有利于区分致心律失常性心肌病和扩张型心肌病的预测模型,结果表明随机森林模型性能最佳。

ResNet50 深度学习模型可用于区分缩窄性心包炎和心脏淀粉样变性。结合临床参数、常规超声心动图和斑点追踪超声心动图数据的机器学习方法,可用于区分限制性心肌病和缩窄性心包炎。

3.2 心脏瓣膜病 (valvular heart disease, VHD) 的智能诊断 在过去的 30 年里,全球 VHD 的发病率增加了 45%,检测 VHD 的金标准方法是超声心动图,需要精确的诊断和分级工具来为治疗策略提供信息。

深度学习的进步发展了诊断和量化常见心脏瓣膜病的算法。三阶段深度学习模型研究通过视图分类筛查 VHD(主动脉瓣和二尖瓣病变),并在阳性时执行分割以提供与严重程度相关的指标,训练 CNN 分别检测主动脉瓣反流和二尖瓣反流时左心室流出道或左心房内的血流信号,研究结果表明与经验丰富的医生相比,瓣膜病变严重程度的准确性相当并进行了前瞻性验证。进一步开发的 CNN 模型可用于自动识别涉及主动脉瓣和/或二尖瓣的风湿性心脏瓣膜病、二尖瓣人工瓣;通过心电图和超声心动图筛查中度或重度主动脉狭窄。基于二尖瓣彩色多普勒图像进行心尖视图评估的深度学习算法,已在大量研究和队列中证明了二尖瓣反流严重程度的准确分类,这种仅使用彩色多普勒评估的简单方法在自动筛查二尖瓣反流方面具有很大的潜力^[17]。此外,AI 对近端等速度表面积的自动评估已被证明是可行的,基于深度学习的模型与全自动的参考测量值一致。近年来开发的三维超声心动图自动评估瓣膜算法,能够自动评估主动脉瓣、二尖瓣和三尖瓣病变。

3.3 缺血性心脏病 超声心动图是疑似心肌梗死诊断评估中最常用的无创成像工具,用于检测区域左心室壁运动异常,通过超声心动图准确识别室壁运动异常需要训练有素且经验丰富的医生,基于深度学习的 AI 模型可用于检测节段性室壁运动异常及节段性应变异常具有将心肌梗死与应激性心肌病等疾病区分开来的能力^[18],AI 负荷超声心动图有益于经验不足的临床医生和已知图像难以解释

的患者。

3.4 肺动脉高压 呼吸困难是超声心动图检查的常见指征,需要准确评估肺动脉压。肺动脉压通常使用多普勒成像的三尖瓣反流速度来估计,可以通过 AI 超声心动图准确量化。肺压升高也会导致右心室扩大和功能障碍,这可以在二维超声心动图图像上检测到。通过仅在心尖四腔视图图像上训练的 AI 模型可以准确检测肺动脉高压,其他 AI 算法可进一步对肺动脉高压进行分类,区分毛细血管前肺高压和毛细血管后肺高压,其预测准确性明显优于基于指南的超声心动图评估^[17]。

综上所述,AI 在超声心动图中的应用显示出巨大的潜力,提高了诊断的准确性、效率和一致性,特别是在图像质量优化、自动图像分析、早期病变检测和个性化治疗方面,并可应用于不同场景,如超声心动图培训、经食管超声心动图、床旁超声心动图、围术期和重症监护监测、可穿戴式设备、远程医疗以及疾病管理等。

尽管目前 AI 在医学影像诊断领域应用广泛,但其在超声领域受到的关注远不如 CT 或 MRI,尤其在超声心动图领域,尚需要很长的时间去探索。首先,心脏不同于其他器官,形态功能更为复杂,需要基于实时动态图像观察,且图像质量受不同操作手法及不同设备的影响,使得标准化的数据集收集和标注存在困难;其次,AI 的“黑箱”特性让医生难以从临床角度理解模型的决策,其不透明性增加了发现模型错误和偏见的难度,也难以建立对模型决策的信任;最后,在医学中使用 AI 涉及法律伦理问题,潜在的安全漏洞可能导致大规模数据泄露,使患者信息受到威胁,未来前瞻性试验可能受到限制。

虽然存在上述诸多挑战,AI 辅助医疗影像仍是今后必然的发展趋势,可通过开发具有增强可解释性和可视化技术的 AI 模型来阐明决策过程;开发混合模型或多模态模型,提高透明度和可信度,减轻偏差效应;促进跨机构数据共享和协作,同时建立或利用大规模多样化的数据库,采用联邦学习技术进行模型训练,无需直接数据共享,可以有效保护数据隐私,从而增强模型的通用性和公平性;制定更健全的法律法规等途径逐步解决相关问题,以实现 AI 在超声心动图中的常规应用,最终目标是实现整个超声心动图分析过程的全自动化,提高心血管疾病诊断的准确率与检查效率,优化诊疗流程。

【参考文献】

- [1] Myhre PL, Grenne B, Asch FM, et al. Artificial intelligence-enhanced echocardiography in cardiovascular disease management[J]. Nat Rev Cardiol, 2026, 23(3): 164-182.
- [2] Krittanawong C, Omar AMS, Narula S, et al. Deep learning for echocardiography: introduction for clinicians and future vision; state-of-the-art review[J]. Life (Basel), 2023, 13(4): 1029.
- [3] Sakamoto A, Kaneko T, Sato E, et al. Artificial intelligence in echocardiography: current applications and future perspectives[J]. J Echocardiogr, 2025, 23(4): 231-240.
- [4] Trost B, Rodrigues L, Ong C, et al. Artificial intelligence empowers novice users to acquire diagnostic-quality echocardiography[J]. JACC Adv, 2025, 4(8): 102005.
- [5] Luong C, Liao Z, Abdi A, et al. Automated estimation of echocardiogram image quality in hospitalized patients[J]. Int J Cardiovasc Imaging, 2021, 37(1): 229-239.
- [6] Howard JP, Stowell CC, Cole GD, et al. Automated left ventricular dimension assessment using artificial intelligence developed and validated by a UK-wide collaborative[J]. Circ Cardiovasc Imaging, 2021, 14(5): e011951.
- [7] Moal O, Roger E, Lamouroux A, et al. Explicit and automatic ejection fraction assessment on 2D cardiac ultrasound with a deep learning-based approach[J]. Comput Biol Med, 2022, 146: 105637.
- [8] Park J, Jeon J, Yoon YE, et al. Artificial intelligence-enhanced automation of left ventricular diastolic assessment: a pilot study for feasibility, diagnostic validation, and outcome prediction[J]. Cardiovasc Diagn Ther, 2024, 14(3): 352-366.
- [9] Murayama M, Sugimori H, Yoshimura T, et al. Deep learning to assess right ventricular ejection fraction from two-dimensional echocardiograms in precapillary pulmonary hypertension[J]. Echocardiography, 2024, 41(4): e15812.
- [10] Lin X, Yang F, Chen Y, et al. Echocardiography-based AI detection of regional wall motion abnormalities and quantification of cardiac function in myocardial infarction[J]. Front Cardiovasc Med, 2022, 9: 903660.
- [11] O'Driscoll JM, Hawkes W, Beqiri A, et al. Left ventricular assessment with artificial intelligence increases the diagnostic accuracy of stress echocardiography[J]. Eur Heart J Open, 2022, 2(5): oeac059.
- [12] Muraki R, Teramoto A, Sugimoto K, et al. Automated detection scheme for acute myocardial infarction using convolutional neural network and long short-term memory[J]. PLoS One, 2022, 17(2): e0264002.
- [13] 谢圆圆, 李冬梅, 毛鑫乐, 等. 人工智能在超声诊断冠心病中的应用现状[J/OL]. 中华医学超声杂志(电子版), 2024, 21(2): 170-174.
- [14] Li M, Zeng D, Xie Q, et al. A deep learning approach with temporal consistency for automatic myocardial segmentation of quantitative myocardial contrast echocardiography[J]. Int J Cardiovasc Imaging, 2021, 37(6): 1967-1978.
- [15] Cho H, Kang SJ, Min HS, et al. Intravascular ultrasound-based deep learning for plaque characterization in coronary artery disease[J]. Atherosclerosis, 2021, 324: 69-75.
- [16] Soto JT, Weston Hughes J, Sanchez PA, et al. Multimodal deep learning enhances diagnostic precision in left ventricular hypertrophy[J]. Eur Heart J Digit Health, 2022, 3(3): 380-389.
- [17] Vrudhula A, Duffy G, Vukadinovic M, et al. High-throughput deep learning detection of mitral regurgitation[J]. Circulation, 2024, 150(12): 923-933.
- [18] Hirata Y, Tsuji T, Kotoku J, et al. Echocardiographic artificial intelligence for pulmonary hypertension classification[J]. Heart, 2024, 110(8): 586-593.

(收稿日期:2026-05-06;修回日期:2026-05-18)

(本文编辑:侯晓林)

《实用医院临床杂志》征订启事

《实用医院临床杂志》(CN 51-1669/R,ISSN 1672-6170)是由国家新闻出版总署批准,四川省卫生健康委员会主管,四川省医学科学院·四川省人民医院主办的临床医学综合期刊,为中国科技论文统计源期刊(中国科技核心期刊),本刊以每期进行专题讨论为特色,主要栏目有专题讨论、专家论坛、基础研究、临床研究与实践、综述等。围绕医学领域内的热点、难点问题进行讨论,介绍各专业领域新理论、新观念、新知识、新技术、新名词,充分体现了临床实用性和多学科综合性的特点,对各级医务人员的临床实践具有较好的指导作用。希望广大读者一如既往的关心和支持本刊,积极订阅。

本刊为双月刊,大16开本,200页,每册20.00元,全年120元,全国各地邮局均可订阅(邮发代号:62-261)。地址:四川省成都市一环路西二段32号四川省医学科学院·四川省人民医院内《实用医院临床杂志》编辑部,邮编:610072。

官网:<http://syylcz.scsyxxzx.com>;8907。电话:028-87394696,87394697,87714683。

Email:syylc@vip.sina.com。

本刊编辑部