

· 特约专稿 ·



作者简介:刘霞,上海交通大学医学院附属瑞金医院心脏科主任医师。主要临床工作是心电学和心律失常药物治疗,在临床工作中积累了大量的心电图诊断和心律失常药物治疗的经验和资料。独立主编心电图图谱5部。

曾任:

中国水利水电医学科学技术学会心电学分会副主委
中国医疗保健国际交流促进会心律与心电分会常务委员
中国医药生物技术协会心电学技术分会常务委员
中华医学会心电生理和起搏分会心电学组委员
临床心电图杂志常务编委
实用心电学杂志常务编委
心电学杂志常务编委

人工智能在 ECG 解读与临床应用

刘霞

【摘要】 一个多世纪以来,心电图在诊断心律失常、缺血/梗死及心肌肥厚方面的价值无可争议。在当前临床实践中,为确保诊断安全性,采用计算机辅助分析的诊断仍需医师进行最终复核判读。人工智能在心电图判读演进中的真正意义,远不止于实现自动化。人工智能正不断展现并验证其在水电图发现和发现心脏病变迹象方面的价值。在可预见的未来,人工智能应被设计用于增强而非取代人类的临床判断。

【关键词】 人工智能; 心电图

[中图分类号] R541.7 R540.4 [文献标识码] A [文章编号] 1005-0272(2025)06-0411-03

[引用格式] 刘霞. 人工智能在 ECG 解读与临床应用[J]. 临床心电学杂志, 2025, 34(6): 411-413.

Artificial Intelligence in ECG Interpretation and Clinical Application LIU Xia Department of Cardiology, Ruijin Hospital, Shanghai Jiao Tong University School of Medicine, Shanghai 200025, China

【Abstract】 For over a century, the electrocardiogram (ECG) in diagnosing arrhythmias, ischemia/infarction, and hypertrophy is undisputed. In current clinical practice, the diagnosis with computerized interpretation algorithms, still necessitate a final physician re-read to ensure diagnostic safety. The true significance of artificial intelligence (AI) in the evolution of ECG interpretation extends far beyond mere automation. AI is seeing and validating its value in ECG interpretation and detecting signs of heart disease. For the foreseeable future, AI should be designed to augment, not automate, human clinical judgment.

【Keywords】 Artificial Intelligence; Electrocardiogram

一个多世纪以来,心电图(ECG)始终以其无创和廉价的特性,为观察心脏电活动提供了重要窗口。对于心律失常、心肌缺血/梗死和心肌肥厚,ECG的诊断价值无可争议。

最初的 ECG 诊断与解读完全依赖于人类,毫无疑问存在很大的局限性。上世纪 50 年代末至 60 年

代初,通过模-数转换,将心电信号输入计算机转化成数字 ECG,由此开辟了 ECG 计算机自动诊断的道路。所谓计算机自动诊断,也称为“算法”,其实是计算机的程序,是通过一系列预设的逻辑和阈值规则来识别 ECG 异常。然而,由于人类判读的局限性以及计算机算法存在的误差,在当前临床实践中,为确

作者单位: 200025 上海,上海交通大学医学院附属瑞金医院心脏科

作者简介: 刘霞,主要从事心电图诊断和心律失常的药物治疗, E-mail: liuxia9110@163.com

保诊断安全,即便采用计算机辅助分析,仍需医师进行最终复核判读^[1]。

从最初的算法,到传统机器学习(1990s-2010s),再到当今的深度学习(2010s-至今),经历了近半个世纪的历程。近期,随着数据集的形成、计算能力的指数级增长以及人工智能(特别是深度学习)领域的突破,正将这项检查工具,从静态的诊断仪器转化为动态多维度的临床智能信息源。通过解读那些即使最专业人眼也难以捕捉的复杂模式、细微形态变化及错综时序关联,AI在ECG中的应用,正在重新定义我们最古老、最易获得的心脏检查的临床价值。通过解读心脏电信号中编码的深层生物信息,AI正在将ECG从简单的诊断工具提升为强大的数字生物标志物,不仅能够以超人的准确度诊断现有疾病,还能预测未来不良事件,并筛查一系列心脏及非心脏疾病。AI-ECG真正意义远远超出了单纯的自动化诊断。

1 AI-ECG在临床检测中的价值

1.1 心律失常的检测

对于长程心电监护,24小时乃至多日监测所产生的大数据,人工判读时不仅工作量繁重,更易出现疏漏。AI的价值在于提升诊断准确性与工作效率。AI算法在此领域显著优于人工分析,一项关键研究表明,与技术人员分析相比,AI模型对严重心律失常(包括完全性房室传导阻滞、室性心动过速及心房颤动)的漏诊率降低了14倍^[2]。尽管AI模型的假阳性率略高,但其能以99.9%的可信度排除严重心律失常,这为临床提供了至关重要的安全保障与工作效率。但此类应用的目标,并非取代心脏科医师的最终审核,而是将繁琐易错的初筛流程自动化。AI充当高灵敏度过滤器,确保不遗漏任何关键事件,使医师精力集中于审核与确认AI标记的异常。该技术将有助解决了全球心血管诊疗领域的痛点,即缺乏能专业解读长程心电数据的医师或技术人员。

与心律失常自动诊断不同的是,AI能将ECG拓展到更深层次的解读。其中最引人注目的成就,是能够从患者在正常窦性心律时记录的10秒ECG中,检测阵发性心房颤动的可能。深度学习模型并非简单识别心房颤动,而是探测其潜在的细微“特征信号”,这种特征信号代表了心房电-结构重构(如纤维化或心房扩大)的累积效应,这些改变常见于心房颤动易感人群。研究表明有模型通过同一患者的多次ECG检测实现了83%的预测准确率^[3]。

1.2 急性心肌梗死的检测

在急诊环境中,在ECG上快速准确诊断急性心肌梗死至关重要,AI的价值在于提升ECG诊断的精准性和风险评估。涉及近8500名患者的多中心前瞻性研究,评估了一项AI-ECG模型,发现该模型诊断急性心肌梗死的准确率与成熟的HEART临床风险评估相当,且显著优于急诊医师的初始评估及单独高敏肌钙蛋白检测;用于识别需紧急重建冠脉血运的深度学习模型,其表现远超临床医师的ECG判读,准确度与高敏肌钙蛋白检测持平^[4]。这些研究的优势在于AI能检测细微的缺血征象,尤其是难以通过初始ECG诊断的非ST段抬高型心肌梗死患者。

1.3 心肌肥厚的检测

在心肌肥厚等结构性改变的检测中,相比传统ECG电压标准,AI模型具有更优的诊断性能,尤其对年轻患者群体。一项评估通过12导联ECG检测左心室肥厚的AI算法发现:在相同特异度下,AI算法的灵敏度较心脏病专家评估提升159.9%^[5]。肥厚型心肌病是以心肌肥厚为特征的遗传性疾病,可通过AI模型与运动员良性生理性肥厚进行有效区分。

2 AI-ECG临床应用的拓展

2.1 结构性和瓣膜性心脏病的识别

对于结构性和瓣膜性心脏病的识别,AI-ECG能检测以往仅能通过心脏影像学发现的结构性心脏病变。左心室射血分数是评估心脏收缩功能的关键指标,AI模型能通过分析12导联ECG,能识别中重度左心室射血分数降低的患者^[6]。其原理在于AI通过学习ECG波形中与心肌收缩力降低相关的细微复杂模式,将ECG转化为低成本、易普及的筛查工具,精准筛选需要接受超声心动图确诊的患者。在瓣膜性心脏病领域,仅凭ECG检测中重度主动脉瓣狭窄的AI算法,是基于超过12万份ECG数据训练的模型,可在超声心动图确诊前最长24个月,识别主动脉瓣狭窄的电信号特征^[7]。

2.2 揭示全身和非心脏疾病

AI-ECG的诊断范畴现已超越心血管系统,表明ECG有潜力成为评估全身健康的生物标志物。心脏电生理系统对代谢和激素变化高度敏感,而AI能够精准捕捉这些非心脏疾病的细微特征。如心脏对过量的甲状腺激素高度敏感,甲状腺功能亢进时可能导致心动过速及其他电生理改变。深度学习模型已成功地从12导联ECG中识别甲状腺功能亢进的“电信号特征”,这些人工智能模型可构建一张“巨

网”,自动标记出可能患有甲状腺功能亢进的人群^[8]。AI能够利用ECG来评估个人的“生理年龄”,当AI预测的ECG年龄显著高于患者实际年龄时,已被证明是全因死亡率的一个强大独立预测因子^[9]。

2.3 预后评估与风险分层能力

人工智能ECG最深刻的能力在于预测未来风险。通过分析ECG信号中复杂的整体信息,一些模型能生成强大的预后预测,以超越传统方法的精准度对患者不良预后风险进行分层。一项基于近19万名患者的超百万份ECG数据验证,仅需单次12导联ECG即可生成个体化生存曲线,预测多种未来不良事件的时序风险^[10]。更值得注意的是,在临床专家判定为“正常”ECG中,模型仍保持预测能力,揭示其能检测人眼不可见的亚临床疾病信号。AI-ECG正推动临床风险概念的模式转变:从应用静态的群体风险评估,转向生成动态的超个性化风险评估。传统风险计算器通过有限临床变量将患者归入宽泛类别,其输出是基于人群统计学的概率估计。与之相反,AI-ECG模型是基于分析个体独有ECG波形的高维原始数据——包含数千数据点的生物信号。其输出非单一静态风险值,而是预测个体随时间推移的风险轨迹,生成个性化生存曲线。

3 AI-ECG的发展

AI-ECG从前景广阔的研究概念,转化为常规临床诊疗工具的过程充满挑战。

这一过程的第一步是需要经受严格的监管审查,在中国,AI-ECG的监管框架主要由国家药品监督管理局(NMPA)主导构建。在国际上,AI-ECG被归类为“作为医疗器械的软件”进行监管,在美国,由食品药品监督管理局(FDA)监管,心脏病学中AI算法是仅次于放射学的第二大类别;在欧洲,监管体系由欧洲药品管理局及各成员国主管机构协调管理。

第二过程是实现与现有临床工作流程的无缝衔接,整合到复杂、快节奏的临床医疗环境中。不应将AI-ECG工具视为临床判断的替代品,而应视其为强大的辅助系统。最优的工作流程是人与AI的协作:AI充当高灵敏度的筛查与决策支持工具,而临床医生则提供关键的终末环节——结合临床情境进行解读并参与共同决策。成功应用不仅仅在于购买软件,而是以无缝且有效地整合这些工具。在考虑引

进时,应强烈倾向于那些已在多样化患者群体中经过严谨、前瞻性、多中心临床试验验证,并已证明能明确改善临床结局或工作流程效率的AI工具。

尽管AI-ECG技术前景广阔、发展迅猛,但从有效性验证走向常规化、普惠化的临床实践之路上仍存在重重障碍。这些挑战横跨技术、伦理与人文三大领域,唯有克服它们,才能真正释放这些强大工具的全部潜力。

参考文献

- [1] YEHUALASHET MA, FRIEDHELM S, BISRAT DD, et al. Interpretable machine learning techniques in ECG-based heart disease classification[J]: A systematic review, 2022, 13(1): 111. DOI: 10.3390/diagnostics13010111.
- [2] Jeff Healey. AI is better than humans at analyzing long-term ECG recordings. Nature Medicine, 10 Feb 2025.
- [3] The Lancet: Deep learning AI may identify atrial fibrillation from a normal rhythm ECG. News Release 1 Aug 2019.
- [4] MIN S L, TAE GS, YOUNGJOO L, et al. Artificial intelligence applied to electrocardiogram to rule out acute myocardial infarction: the ROMIAE multicentre study. Eur Heart J, 2025, 46(20): 1917-1929.
- [5] Anthony C. P. AI and ECG Interpretation: Insights and Trends for Today's Cardiologists. GE HealthCare Oct 06, 2021.
- [6] PIERRE ELIAS, SNEHA SJ, TIMOTHY POTERUCHA, et al. Artificial Intelligence for Cardiovascular Care—Part 1: Advances: JACC Review Topic of the Week[J]. JACC, 2024, 83(24): 2472-2486. DOI: 10.1016/j.jacc.2024.03.400.
- [7] FDA Grants Breakthrough Device Designation for HeartSciences' AI-ECG Algorithm News Heart Valve Technology. June 12, 2025.
- [8] CHIN LIN, FENG-CHIH KUO, TOM CHAU, et al. Artificial intelligence-enabled electrocardiography contributes to hyperthyroidism detection and outcome prediction[J]. Commun Med (Lond), 2024, 4(1): 42. DOI: 10.1038/s43856-024-00472-4.
- [9] ROHAN KHERA, EVANGELOS K. O, GIRISH NN, et al. Transforming Cardiovascular Care With Artificial Intelligence: From Discovery to Practice: JACC State-of-the-Art Review[J]. JACC, 2024,84(1): 97-114. DOI: 10.1016/j.jacc.2024.05.003.
- [10] SAU A, PASTIKA L, SIELIWONCZYK E, et al. Artificial intelligence-enabled electrocardiogram for mortality and cardiovascular risk estimation: a model development and validation study[J]. Lancet Digit Health, 2024, 6(11): e791-e802.

(收稿日期:2025-11-15)