

## · 特约专稿 ·



**通信作者:**陈晋泰,现为香港科技大学(广州)助理教授、博士生导师兼副研究员。博士毕业于浙江大学计算机学院,曾在美国伊利诺伊大学香槟分校(University of Illinois Urbana-Champaign, UIUC)从事博士后研究。陈博士长期从事医学人工智能领域研究,主要研究方向包括医疗多模态大模型、结构化数据基础模型、智能药物设计与开发以及心脏病人工智能等。在 Nature Communications、ICML、ICLR、NeurIPS 等国际顶级期刊与会议发表论文七十余篇。科研成果曾获 ICME 最佳论文候选奖(前0.4%),在机器学习顶级国际会议口头报告六次、聚光灯展示一次,并获得中国电子学会科技进步二等奖、中国产学研合作促进会产学研合作创新成果二等奖、2025 世界人工智能大会“云帆奖·璀璨明星”提名奖等荣誉。曾担任 NeurIPS2025 领域主席并任 Nature Partner Journal Cardiovascular Health 编委。

## 基于人工智能的心电全景图:思想、方法与应用 前瞻

詹泽汇<sup>1,2</sup> 陈涵<sup>3</sup> 陈晋泰<sup>1</sup>

**【摘要】**传统 12 导联心电图在临床诊断中发挥着不可替代的作用,但其固定的导联配置限制了对心脏电活动进行多角度、全方位审视的能力。本文旨在系统阐述一种新兴技术——“心电全景图”的基本概念、技术原理及其临床转化潜力。心电全景图的核心思想是:利用人工智能模型,从有限物理导联信号中重建心脏电活动向量场,进而合成任意虚拟视角下的高保真心电图。本文以左、右束支传导阻滞为例,初步验证了该技术的有效性。结果显示,基于 I、II、V<sub>5</sub> 导联合成的 V<sub>1</sub>、V<sub>6</sub> 导联信号,在关键诊断特征(如 LBBB 的宽大 QS 波、RBBB 的“兔耳征”)上与真实信号高度一致;在进一步生成的多组非标准虚拟视角心电图中,疾病特异性波形仍能稳定呈现。这一结果表明,该技术突破了传统导联的物理限制,实现了对心脏电活动的全景化、动态化观测。

**【关键词】**心电全景图; 心电导联合成; 人工智能; 深度学习

**【中图分类号】**R541.7 R540.4 **【文献标识码】**A **【文章编号】**1005-0272(2025)06-0414-04

**【引用格式】**詹泽汇,陈涵,陈晋泰.基于人工智能的心电全景图:思想、方法与应用前瞻[J].临床心电学杂志,2025,34(6):414-417.

**Artificial-Intelligence-Generated Electrocardio Panorama: Concept, Methods and Prospects** ZHAN Zehui<sup>1,2</sup>, CHEN Han<sup>3</sup>, CHEN Jintai<sup>1</sup>. 1. Hong Kong University of Science and Technology (Guangzhou), Guangzhou Guangdong 511400; 2. School of Biomedical Engineering, Sun Yat-sen University, Guangzhou Guangdong 510275; 3. Department of Cardiovascular Medicine, The Second Affiliated Hospital of Zhejiang University School of Medicine, Hangzhou Zhejiang 310009, China

**【Abstract】**The conventional 12-lead electrocardiogram plays an essential role in clinical diagnosis, yet its fixed

作者单位:511400 广东 广州,香港科技大学(广州),信息枢纽,人工智能学域(詹泽汇,陈晋泰);510275 广东 广州,中山大学生物医学工程学院(詹泽汇);310009 浙江 杭州,浙江大学医学院附属第二医院心血管内科(陈涵)

共同第一作者:詹泽汇,陈涵

通信作者:陈晋泰, E-mail: jintaiCHEN@hkust-gz.edu.cn

lead configuration restricts the ability to observe cardiac electrical activity from diverse and comprehensive viewpoints. This article presents a systematic overview of an emerging technology known as *Electrocardio Panorama*, outlining its conceptual foundation, technical framework and potential for clinical translation. The central idea is to use artificial intelligence generative models to reconstruct the vector field of cardiac electrical activity from a limited set of physical leads and to synthesize high-fidelity electrocardiograms from any virtual viewpoint. Using left and right bundle branch block as examples, we performed a preliminary evaluation of this approach. Signals synthesized for leads  $V_1$  and  $V_6$  from leads I, II and  $V_5$  reproduced key diagnostic characteristics with high fidelity, such as the broad QS complex typical of left bundle branch block and the “rabbit-ear” pattern associated with right bundle branch block. In the additional non-standard virtual viewpoints generated, disease-specific waveforms remained consistently identifiable. These findings demonstrate that this technique transcends the physical constraints of traditional lead systems and enables panoramic, dynamic visualization of cardiac electrical activity.

**【Keywords】** Electrocardio Panorama; ECG lead synthesis; artificial intelligence; deep learning

## 1 引言:从固定导联到基于人工智能的动态全景可视化的范式转变

标准 12 导联心电图<sup>[1]</sup>在临床实践中取得了巨大成功,但其导联位置与数量的标准化,本质上是诊断信息广度与临床操作便捷性之间的一种折衷。这种固定配置导致其对某些心脏区域的电活动敏感度不足。例如,后壁心肌梗死<sup>[2]</sup>时,特征性的 ST 段改变在常规导联上可能表现为“镜像性”改变(如  $V_1 \sim V_3$  导联 ST 段压低),而明确诊断往往需要加做后壁导联( $V_7 \sim V_9$ );Brugada 综合征<sup>[3]</sup>的特征性 ST 段抬高,在常规第 4 肋间放置的  $V_1 \sim V_2$  导联可能表现不典型,而将电极片上移至第 2 或第 3 肋间则能显著提高其检出率识别。此外,临床环境中存在多种导联体系,如手术室、重症监护室(ICU)中广泛使用的简化心电图监护贴片<sup>[4]</sup>,其电极位置与标准 12 导联迥异。这种简化体系在带来操作便利的同时,一方面导致监护期间获得的心电信号难以与标准诊断数据库进行直接对比,造成了信息隔阂;另一方面意味着心脏的电活动场在空间上被严重欠采样,如改良胸导联(如 CM5)虽对左心室前侧壁缺血敏感,但完全缺失了对心脏后壁、右心室等区域的直接观测视角。

为从根本上突破固定视角的局限,学者提出了心电图全景图<sup>[5]</sup>(Electrocardio Panorama, ECP)的概念。其基本思想是:在用户设定的条件下,基于心脏电活动向量理论,利用人工智能模型从有限的物理导联信号中实时生成任意虚拟视角的心电信号。此过程类似于计算机视觉中的三维重建,即通过多张图像生成三维场景,并可从任意角度渲染出相应图像<sup>[6]</sup>。这种方法在物理上仍保持相同数量的导联,但允许医师在心电分析过程中自由定义虚拟导联,从任意视角观察心脏电活动。

## 2 基于人工智能的心电全景图方法理论基础

心电图向量理论<sup>[7]</sup>是心电全景图技术的生理物理学基础,它为“从有限视角观测推演全景电活动”这一核心思想提供了坚实的理论依据。该理论将心脏在除极与复极过程中产生的复杂电活动,等效地简化为一个位于心脏电学中心、其大小和方向随时间不断变化的等效电偶极子,即“心电图向量”。

在这一模型框架下,体表任意一点记录到的电位变化,可被视为瞬时心电图向量在该特定导联方向上的投影或标量积。由此可知,临床常用的各导联信号(如标准 12 导联)并非相互独立,而是同一时空变化的心电图向量在不同空间方向上的映射。换言之,不同导联的心电信号可理解为对三维动态心电图向量的多方向采样。然而,想实现这一思想仍存在一定困难。

心电全景图技术正是要突破这有限几个固定采样的限制。其理论逻辑是:既然所有体表信号共同源于一个统一的心电图向量场,那么,通过有限的物理导联记录,应当能够逆向估计或逼近这个潜在的心电图向量场。一旦这个场被构建出来,理论上就可以计算出心电图向量在体表任意一点(即任意虚拟视角)的投影,从而合成出该位置的信号。

## 3 基本方法

心电全景图生成技术的核心目标,是建立一种能够基于有限物理导联信号,合成任意虚拟视角心电信号的映射模型。为此,该方法首先需对不同导联信号的“视角”进行形式化定义,将每个导联记录的心电信号视为从该特定“视角”对心脏电活动场的投影观测。为构建心电全景图,陈等学者<sup>[5]</sup>以心脏电学中心为原点构建球面坐标系,其三个坐标轴定义如下: $x$ 轴对应人体矢状轴(前后方向),正方向指向

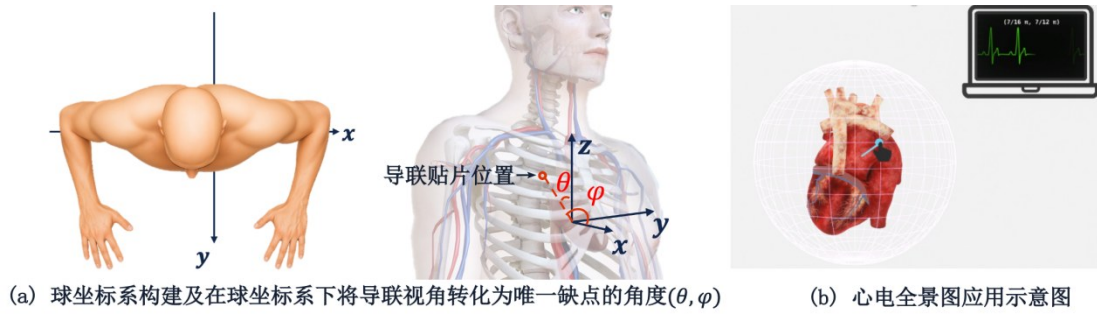


图1 心电全景图的贴片位置表达与应用方法示意图

身体前方; $y$ 轴对应逆前额轴(左右方向),正方向指向身体左侧; $z$ 轴对应垂直轴(头脚方向),正方向指向身体头部。在该球坐标系中,每个观察视角由极角 $\theta$ 和方位角 $\varphi$ 参数化,用以刻画体表电极片相对于心脏电学中心(近似心脏几何中心)的空间几何关系。

对于多个输入导联,其记录的心电信号记为 $X = \{x_1, x_2, x_3, \dots, x_l\}$ ,对应的视角参数记为 $A = \{(\theta_1, \varphi_1), (\theta_2, \varphi_2), (\theta_3, \varphi_3), \dots, (\theta_l, \varphi_l)\}$ 。用户期望生成的目标视角集合记为 $A_q = \{(\theta_{q1}, \varphi_{q1}), (\theta_{q2}, \varphi_{q2}), \dots, (\theta_{qn}, \varphi_{qn})\}$ 。因此,模型的输入可形式化为一个三元组 $(X, A_m, A_q)$ ,分别表示输入导联信号、其对应的视角参数以及目标视角参数,输出则为从目标视角合成的心电信号。值得注意的是, $A_q$ 可在实时条件下动态调整,从而实现任意视角的心电信号生成。

#### 4 虚拟视角的重建效果

为评估心电全景图的重建效果,我们基于I、II、V<sub>5</sub>导联心电,运用心电全景图算法Nef-Net<sup>[8]</sup>合成不同视角的心电信号,观察左束支传导阻滞(LBBB)与右束支传导阻滞(RBBB)患者在真实导联与合成导联中的心电图表现(需要强调的是,在模型训练过程中,算法并未“见过”目标合成导联或进行任何专门训练),重点评估该技术在关键诊断特征还原方面的准确性。

如图2所示,在诊断LBBB与RBBB的核心导联(V<sub>1</sub>与V<sub>6</sub>)上,心电全景图合成信号与真实信号展现出高度一致性。在LBBB案例中,合成V<sub>1</sub>导联( $\theta=90^\circ, \varphi=-10^\circ$ )准确再现了特征性的宽大深陷的QS/rs波。同时,合成V<sub>6</sub>导联( $\theta=96^\circ, \varphi=0^\circ$ )亦清晰呈现出宽钝有切迹的R波,且伴有相应的继发性ST-T改变。在RBBB案例中,合成V<sub>1</sub>导联( $\theta=90^\circ, \varphi=10^\circ$ )精准捕捉了典型的“兔耳征”(rsR'波群),准确反映了右心室延迟除极的向量变化。这表明,心电全景图模

型深刻理解了束支阻滞的病理生理基础,能够在外置的标准导联位置上,完美复现具有诊断决定性的波形细节。

心电全景图可以通过构建心脏电生理场,生成不同视角的心电信号,从而展示心脏电生理活动的不同特征。图3展示了心电全景图在非标准、任意虚拟视角下的合成能力。在给定的三组不同球面坐标参数( $\theta=90^\circ, \varphi=130^\circ$ )、( $\theta=132^\circ, \varphi=-99^\circ$ )、( $\theta=140^\circ, \varphi=100^\circ$ ),技术合成了相应的虚拟导联心电图。结果显示,合成信号在不同视角下能稳定地呈现出目标疾病的本质特征。在RBBB的虚拟视角( $\theta=132^\circ, \varphi=-99^\circ$ )下,捕捉到了典型的rsR波群;而在LBBB的虚拟视角( $\theta=90^\circ, \varphi=130^\circ$ )下,反映左心室主导除极的QRS波群呈宽钝、有切迹的R波形态也呈现出来;在LBBB的虚拟视角( $\theta=132^\circ, \varphi=-99^\circ$ )下,QRS波群呈宽大而深的QS型。这一发现证明,心电全景图方法真正重建了心脏的三维空间除极动态向量,且能够推演出从心脏球体模型任意角度“观察”所能得到的电信号,突破了传统电极贴放位置的物理限制。

基于此原理,在面对特定心血管疾病需依赖特定导联位置进行诊断时:例如在Brugada综合征诊断时,在常规第4肋间记录的V<sub>1</sub>、V<sub>2</sub>导联中可能表现不典型,传统需将电极片上移置第2或第3肋间以显著提高检出率,但心电全景图可直接通过输入对应的视角坐标参数即可见到对应虚拟视角的心电信号,为临床提供更优的观测窗口。

#### 5 未来研究

尽管心电全景图技术展现出广阔的应用前景,但其临床落地仍面临多重挑战:首先,临床有效性的系统验证是基础。需通过前瞻性临床研究建立标准化的数据采集与质量控制体系,并验证合成信号的临床可用性与诊断一致性。其次,技术可解释性是实现“可信医疗”的关键。目前全景图生成仍依赖复杂的深度学习模型,计算过程透明度不足。后续研

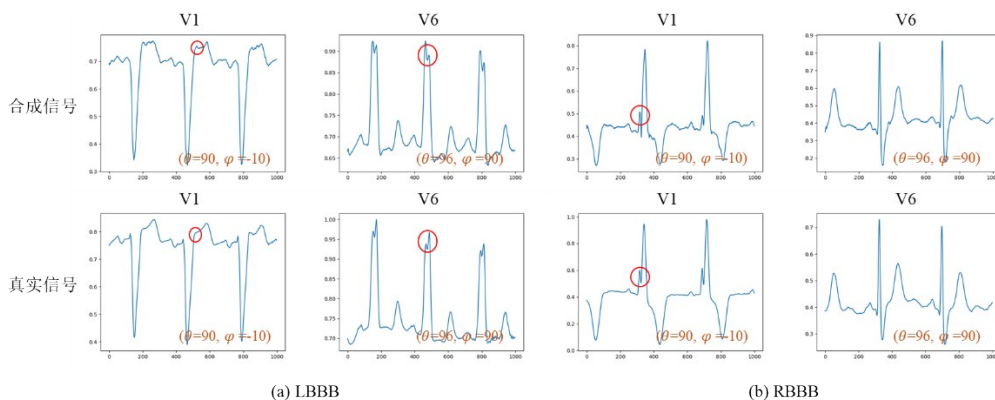


图2 LBBB和RBBB患者的V<sub>1</sub>、V<sub>6</sub>导联心电图以及心电全景图算法基于I、II、V<sub>5</sub>导联心电合成的V<sub>1</sub>、V<sub>6</sub>导联心电图

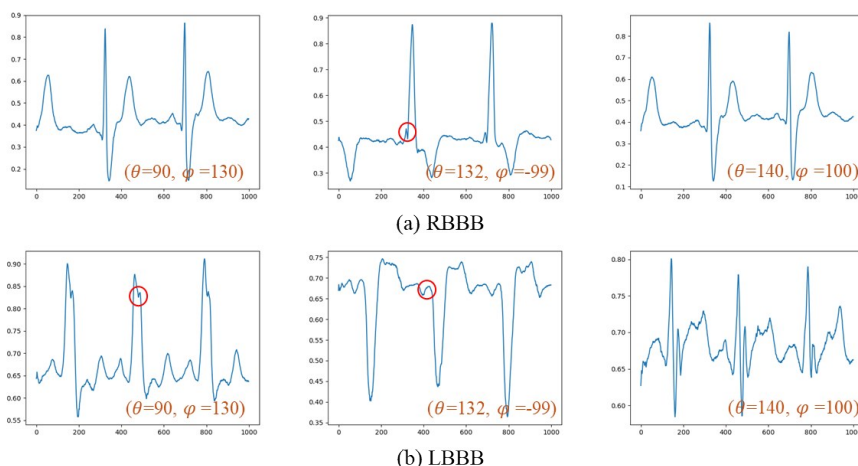


图3 心电全景图算法基于I、II、V<sub>5</sub>导联心电合成的其他视角心电图

究可深入探讨波形生成的生理与物理机制,揭示模型推理的内在逻辑,以提升医生对算法的理解与信任。最后,个性化与自适应能力是技术突破的方向。未来的系统应能根据个体差异(例如心脏解剖结构、体型、性别等因素)动态调整模型参数,从而在真实而复杂的临床场景中保持稳定性与精确性。

参考文献

[1] HOLTER N J. New method for heart studies[J]. Noninvasive Electrocardiol, 1998, 3(4): 381-387.  
 [2] VAN GORSELEN E O F, VERHEUGT F W A, MEURSING B T J, et al. Posterior myocardial infarction: the dark side of the moon[J]. Neth Heart J, 2007, 15(1): 16-21.  
 [3] BERNE P, BRUGADA J. Brugada syndrome 2012[J]. Circ J, 2012, 76(7): 1563-1571.  
 [4] DREW B J, CALIFF R M, FUNK M, et al. Practice standards for electrocardiographic monitoring in hospital settings: an American Heart Association scientific statement from the Councils on

Cardiovascular Nursing, Clinical Cardiology, and Cardiovascular Disease in the Young: endorsed by the International Society of Computerized Electrocardiology and the American Association of Critical-Care Nurses[J]. Circulation, 2004, 110(17): 2721-2746.  
 [5] CHEN J, ZHENG X, YU H, et al. Electrocardio Panorama: Synthesizing New ECG Views with Self-supervision[J]. In Proceedings of the International Joint Conference on Artificial Intelligence 2021 Aug. arXiv preprint arXiv: 2105.06293  
 [6] Mildenhall B, Srinivasan PP, Tancik M, Barron JT, Ramamoorthi R, Ng R. Nerf: Representing scenes as neural radiance fields for view synthesis[J]. Communications of the ACM, 2021, 65(1): 99-106.  
 [7] GRANT R P. Spatial vector electrocardiography; a method for calculating the spatial electrical vectors of the heart from conventional leads[J]. Circulation, 1950, 2(5): 676-695..  
 [8] ZEHUI ZHAN, YAOJUN HU, JIAJING ZHAN, et al. NEF-NET+: Adapting Electrocardio panorama in the wild[J]. arXiv preprint arXiv: 2511.02880. 2025.

(收稿日期: 2025-11-01)