

心电图成像在心律失常诊治中的研究进展

查克岚 叶强

(西南医科大学附属医院心血管内科, 四川 泸州 646000)

【摘要】心律失常可导致多种临床症状, 甚至猝死。现有心律失常诊断方法包括无创和有创两大类, 但精确度低或有创伤性。近年来, 心电图成像技术日臻成熟, 并逐渐应用于临床心律失常诊治, 现将心电图成像技术在心律失常诊疗中的进展进行综述。

【关键词】心电图成像; 心律失常; 心电图

【DOI】 10.16806/j.cnki.issn.1004-3934.2020.09.011

Electrocardiographic Imaging in Arrhythmia Diagnosis and Treatment

ZHA Kelan, YE Qiang

(Department of Cardiology, The Affiliated Hospital of Southwest Medical University, Luzhou 646000, Sichuan, China)

【Abstract】 Cardiac arrhythmias can cause a variety of clinical symptoms and even sudden death. The present diagnostic approaches include invasive and noninvasive methods, which are either low accuracy or invasive. Recent years, electrocardiographic imaging has been developed and applied in clinical practices. This paper will review the research progress of electrocardiographic imaging in arrhythmia diagnosis and treatment.

【Key words】 Electrocardiographic imaging; Arrhythmia; Electrocardiography

心电图作为无创的检查方法, 应用于临床已有100多年历史, 对心律失常的诊断和治疗提供了极大帮助, 并且在此基础上派生出多种检测技术, 如动态心电图、经食管心脏电生理、心腔内电生理、心电向量图和心磁图等, 尽管这些技术已揭示了大量心脏电生理机制和用于指导临床实践, 但仍存在各种问题, 如时空分布精确度不高, 操作有创等, 限制了人们进一步详细了解心脏电活动与疾病特征。

目前, 临床实践中多采用心腔内电生理标测技术诊断心肌传导阻滞点及潜在的折返环路, 指导消融靶点, 打断折返环, 防治心律失常发生。但这种技术需有创操作, 将标测电极经血管途径送入心腔内或经心包腔接触心外膜进行标测。由于电活动经多层心肌壁的跨壁传导导致信号变化也限制其价值, 因此, 学者们希望寻找一种无创的方法进行心脏电位的精确标测。

心电图成像 (electrocardiographic imaging, ECGI) 是通过体表多电极心电图数据逆向计算出心外膜电位、心外膜电图、等时线 (激动序列) 和复极化, 同时结合

体表三维解剖对心外膜电位变化进行重建, 即以心电图为基础结合心脏影像学的无创伤三维电标测系统, 可精确地诊断心律失常。经过20余年发展, 最近已有商品化的设备被批准应用于临床, 如美敦力公司的产品 EcVue™, 已获得美国FDA批准应用于临床, 现就ECGI的最新进展综述如下。

1 ECGI原理

ECGI这种非侵入性标测方法^[1], 其成像原理如下。

1.1 理论背景

ECGI物理学基础是在被动传导的躯干体积内, 跳动的心脏产生的电场受Laplace方程控制, ECGI通过在躯干体积内求解Laplace方程, 无创计算出心脏表面电势, 使用无创记录的躯干表面电势和心外膜与躯干表面几何关系作为输入, 这个步骤第一步是确定心外膜电位和躯干表面电位之间的关系, 利用边界元法 (boundary element method, BEM) 得到线性矩阵关系: $VT=AVE$, VT 代表躯干向量, VE 代表心外膜电位。矩阵A通过BEM编码确定心外膜和躯干表面之间的几何关系, 通

过逆向计算,即通过测量躯干电位获得心外膜电位。再与计算机断层扫描(computed tomography, CT)、心脏磁共振成像或双平面X线获得的躯干与心脏之间的几何关系融合,即可获得心外膜电激动顺序,并显示为等时线图^[2-3]。

1.2 体表电位标测技术

心电图输入是整个躯干表面在心动周期内每一时刻的电位分布。Rudy等为了获得这些信息,开发了能同时从180或224个通道进行记录的多极标测系统。负极电极上涂有Ag-AgCl,并通过带有驱动屏蔽的电线连接到高输入阻抗放大器,以降低噪音,并在无电解凝胶的情况下进行记录。电极被嵌入到橡胶背心以便使用,背心有多种型号用来适应不同的身体尺寸。标测系统记录的电位显示在一个矩阵网格上,矩阵网格代表从右腋窝

线切开的躯干表面,前躯干表面显示在网格的左半部分,躯干后表面显示在网格的右半部分[图1,心电图腰带(ECG belt)]。由于人体胸廓差异,心脏定位出现偏差,体表电位标测不能准确地显示出心脏局部电活动的时间空间特征,更不能提供心律失常期间心脏激动顺序变化,因而临床应用受限^[4]。

1.3 ECGI技术

ECGI是针对体表电位标测时空精确性不足的进一步发展。心脏和胸廓几何形态融合到心电图逆向运算的数学模型中,最常用的方法是边界元法,利用各种数学方法来计算心外膜表面及体表间的电位变化,通过对电位变化的精确量化进一步研究心脏的电生理活动^[4](图1, ECGI)。

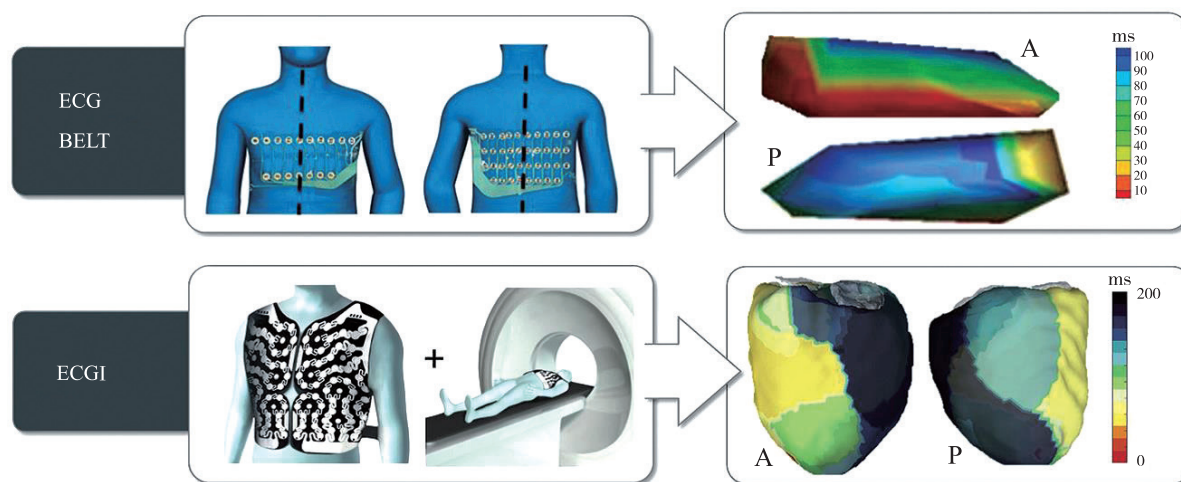


图1 两种体表电位标测技术

2 ECGI应用现状

ECGI可较精确地计算出心外膜及体表电位变化,而通过这种细微的电位变化及对心脏电激动的重新构型,可更深入地研究正常心脏和病理情况下心脏局部异常电位活动,从而明确电生理机制,且这种方法无创伤和可持续标测。目前关于ECGI在心律失常诊疗中的应用如下。

2.1 心房颤动

心房颤动(房颤)尤其是持续性房颤的电生理机制尚未完全研究清楚,有众多学术假说来推导房颤的形成机制,并针对性地进行导管消融,但临床效果不佳。近来,一些研究表明房颤是由心房局部折返或局灶性病变所驱动和维持,然而,通过目前标测方法很难动态标测到房颤起源,因而最近有学者应用ECGI方法研究房颤的发生机制。

在阵发性房颤中,Dubois等^[5]先用ECGI标测出心房折返或局灶驱动(多位于左心房后壁肺静脉开口附

近),23例患者总共标测到657个驱动子,再用多级标测系统如PentaRay对ECGI标测所确定的区域进行标测和消融。结果发现,致心律失常事件绝大多数起源于左心房,其中89%为折返,75%为局灶,经导管消融均成功终止房颤,该研究中ECGI标测确认肺静脉是阵发性房颤的触发灶。

在持续性房颤中,通过ECGI无创高密度标测得到心房折返和局灶兴奋的驱动子,指导导管消融驱动子。研究者设定的消融终点为:局部电位周长延长,电位由复杂且多波折变为单电位,房颤即刻终止率为80%,随访1年68%患者维持窦性心律,并且消融所用时间远低于传统消融策略。因此,对于持续性房颤消融,ECGI标测下直接对局部驱动子消融可减少组织损伤,同时可获得与传统消融策略相同的成功率。Atienza等^[6]发现ECGI可标测到房颤时心房内的转子,指导消融,提高持续性房颤消融成功率,减少对于左心房不必要的消融。Knecht等^[7]报道了一个新近临床研究,该研究纳入

8个欧美中心（这些中心之前均无EcVue™系统使用经验）共计118例持续性房颤患者，消融前ECGI标测房颤驱动子，采用标准统一的消融流程：第一步消融驱动子，第二步肺静脉隔离，第三步若前两步消融未终止房颤，消融左心房顶部线和二尖瓣峡部线，并达到线性阻滞，如果房颤仍持续则电复律。结果发现ECGI标测到平均每个患者有4.9个驱动子，53%驱动子位于左心房，27%位于右心房，20%位于心房前间隔，总共118例患者中75例消融驱动子后房颤终止，8个中心的急性房颤终止率无差别，另有10例患者通过肺静脉隔离和线性消融终止房颤，终止率为72%，随访1年78%患者不需使用抗心律失常药物，77%患者无房颤复发。该研究显示ECGI标测可发现对于持续性房颤维持具有关键作用的心房驱动子，消融驱动子可减少1年房颤复发率，在无任何ECGI系统使用经验的心脏中心可获得良好的治疗效果。

最近，Sohns等^[8]报道另一个无创心电图标测系统——无创心内膜心外膜电生理系统（non-invasive epicardial and endocardial electrophysiology system, NEEES），该系统可对心内膜和心外膜进行电标测，并且可与心脏磁共振钆延迟增强扫描图形和有创电生理标测图形进行融合。通过该方法作者发现，转子多位于正常组织和瘢痕交界处，对于理解房颤发生机制和指导消融有帮助。总之，ECGI心脏无创标测系统为房颤的机制研究尤其是驱动子理论及导管消融治疗提供了一个新的视角。

2.2 房性心动过速

ECGI对于房性心动过速（房速）电生理机制能做出精确的诊断，特别是局灶性房速。房颤患者行环肺静脉消融术后出现房速比较常见，左心房异常基质的存在使标测和再次消融较为困难。研究显示与有创的心脏电生理检查相比，ECGI诊断成功率为92%，无论之前是否接受过导管消融，对于局灶性房速诊断成功率为100%^[5]。该技术的局限性是对房间隔区域的标测，其原因在于房间隔并非是心脏表面结构，因而ECGI不能标测到其电位变化。

2.3 室性心律失常

室性心律失常的准确定位对于导管消融是否成功至关重要，ECGI标测较常规12导联心电图定位更加准确。Erkapic等^[9]应用最新的ECGI标测系统EcVue™与常规12导联心电图进行比较，发现EcVue™对于室性期前收缩起源的心腔和亚部位的准确率为95.2%，常规12导联心电图准确率为76.2%，并且EcVue™组消融成功率高于常规心电图组，所用的X线照射也少于常规心电图组，但EcVue™组需做CT扫描，实际X线曝光量多于常

规心电图组。Wissner等^[10]应用NEEES系统对20例室性期前收缩或室性心动过速患者进行心内膜和心外膜标测，并与有创电生理标测结果比对，发现共21例室性期前收缩或室性心动过速患者中NEEES可准确定位20个室性心律失常起源的心腔，其中正确定位18个起源位点，20例患者中19例导管消融成功，1例患者外科开胸消融成功，随访6个月，20例患者中有1例患者复发心律失常，需口服抗心律失常药物，该研究证实NEEES系统可通过其独特的心内膜标测算法准确定位室性心律失常起源位点，对提高消融成功率和减少消融时间意义重大，并且该系统可兼容磁共振影像数据，可减少患者接受X线照射。

2.4 预激综合征

ECGI标测系统可提高旁道消融成功率，特别是对于多旁道和心外膜旁道识别与消融有帮助。Ghosh等^[11]研究了14例预激综合征儿童，术前1 d行ECGI标测，有创电生理检查结果与ECGI标测结果一致，且所有患者均在1 h内完成消融。这位学者也研究了器质性心脏病患者中ECGI对于旁道标测的指导作用，在肥厚型心肌病病例中，他应用ECGI标测发现了罕见的希氏束旁道，虽然未能诱发房室折返性心动过速，在Ebstein病例中，他应用ECGI精确地标测三尖瓣环处旁道位置，指导成功消融旁道^[12-13]。Hocini等^[14-15]利用ECGI成功标测到一些特殊旁道，比如在1例青少年女性患者反复发生心率极快的心动过速，多次消融失败，ECGI标测到旁道位于右心耳憩室并成功消融，另有1例疑难病例为体表心电图提示为右前间隔显性旁道，ECGI标测提示旁道位于右冠窦与无冠窦连接处下方，快速标测到理想靶点及成功消融。

2.5 心律失常的快速标测

ECGI可提高有创电生理标测速度。欧洲一项多中心前瞻性研究^[16]纳入33例患者，包括症状性室性期前收缩（24例）、局灶性房速（2例）和显性旁道（7例）。ECGI标测后，有创标测导管再进行复核，研究参数包括：消融成功率、消融时间、X线曝光时间和24个月复发率。33例患者中32例消融成功，随访24.7个月，结果提示，31例患者无心律失常复发，1例右侧旁道患者术后1个月接受了第二次消融，1例患者室性期前收缩复发，累计辐射量（包括CT和X线透射）平均7.57 mSv。研究显示ECGI能帮助心脏电生理医师快速定位局灶性心律失常的起源点，并缩短心腔内标测时间，准确地指导消融导管到达心律失常起源点，获得97%的消融成功率。

2.6 指导心脏再同步化治疗优化

心脏再同步化治疗（cardiac resynchronization

therapy, CRT) 是治疗心力衰竭合并完全性左束支传导阻滞的有效方法, 其主要治疗机制是改善心脏电同步性, 但研究发现即使符合 CRT 适应证的人群中仍有约 30% 患者对 CRT 治疗无反应, 学者们尝试过多种方法来优化参数提高电学同步性, 但效果不佳。近来, 学者尝试通过 ECGI 来指导 CRT 优化。Sieniewicz 等^[17]报道 5 例心力衰竭患者经过最优药物治疗并符合欧洲心脏病学会和美国心律协会相关指南制定 CRT 适应证。方法: 术前患者均接受心脏磁共振成像, 之后接受圣犹达四级多位点起搏 (MPP) CRT 植入, 在窦性心律下或右心室起搏下行 ECGI 激动标测, 确定左心室最延迟激动部位, 再用超声心动图优化程控 CRT, 再次进行 ECGI 激动标测, 对 MPP 设置进行程控, 达到最优心室同步。观察指标包括: 整个心室同步性、双心室总激动时间、左心室激动时间和左心室激动离散度。结果: 心外膜电压标测发现有 3 例患者存在心室瘢痕, 与心脏磁共振发现瘢痕一致, 瘢痕位于侧壁或心尖部。ECGI 标测发现一些细微的心室电激动异常, 在常规的 AV 和 VV 间期优化的基础上, 应用 MPP 不同设置进一步提高了心室同步性指标, 比如长距离双极起搏与局部双极起搏的结合等显著缩短了左心室激动时间, 该研究证实通过常规优化 MPP 设置不能改善心脏同步性时, ECGI 可指导 MPP 设置, 尽可能将起搏位点避开瘢痕区, 提高心室同步性。Helder 等^[18]对于心力衰竭合并完全性左束支传导阻滞患者接受心脏 CRT 后应用 ECGI 评价电重构对于心室收缩功能的影响, 结果发现植入 CRT 即刻和 6 个月后左心室容积收缩时间显著降低。

3 ECGI 的未来展望

ECGI 经历了 20 余年发展, 终于在 2017 年商品化系统 EcVueTM 通过美国 FDA 审批, 投入临床应用, 但国内尚不能使用。然而, ECGI 系统仍有一些问题需学者们进一步研究, 如一些临床变量是否对 ECGI 标测结果存在影响, 如心率、心脏大小和心壁厚度等; 未充分与皮肤贴合的电极是否造成标测不完整, 影响结果准确性等。即便存在不足, 无创与高密度标测是未来心律失常诊疗的研究热点, 相信未来无创 ECGI 指导下的导管消融能减少消融损伤范围, 降低 X 线曝光量和减少消融时间。

参 考 文 献

[1] Ramanathan C, Ghanem RN, Jia P, et al. Noninvasive cardiac electrocardiographic imaging for cardiac electrophysiology and arrhythmia[J]. *Nat Med*, 2004, 10(4): 422-428.

[2] Rudy Y, Burnes JE. Noninvasive electrocardiographic imaging[J]. *Ann*

Noninvasive Electrocardiol, 1999, 4(3): 340-359.

[3] Oster HS, Taccardi B, Lux RL, et al. Noninvasive electrocardiographic imaging: reconstruction of epicardial potentials, electrograms and isochrones and localization of single and multiple electrocardiac events[J]. *Circulation*, 1997, 96(3): 1012-1024.

[4] Strik M, Ploux S, Jankelson L, et al. Non-invasive cardiac mapping for non-response in cardiac resynchronization therapy[J]. *Ann Med*, 2019, 51(2): 109-117.

[5] Dubois R, Shah AJ, Hocini M, et al. Non-invasive cardiac mapping in clinical practice: application to the ablation of cardiac arrhythmias[J]. *J Electrocardiol*, 2015, 48(6): 966-974.

[6] Atienza F, Climent AM, Guillem MS, et al. Frontiers in non-invasive cardiac mapping: rotors in atrial fibrillation-body surface frequency-phase mapping[J]. *Card Electrophysiol Clin*, 2015, 7(1): 59-69.

[7] Knecht S, Sohal M, Deisenhofer L, et al. Multicenter evaluation of non-invasive biatrial mapping for persistent atrial fibrillation ablation: the AFACART study[J]. *Europace*, 2017, 19(8): 1302-1309.

[8] Sohns C, Metzner A, Chmelevsky M, et al. A new algorithm to visualize the individual relationship between electrical rotors from non-invasive panoramic mapping and atrial fibrosis to guide ablation of persistent atrial fibrillation[J]. *Clin Res Cardiol*, 2018, 107(5): 444-446.

[9] Erkapic D, Greiss H, Pajitnev D, et al. Clinical impact of a novel three-dimensional electrocardiographic imaging for non-invasive mapping of ventricular arrhythmias—A prospective randomized trial[J]. *Europace*, 2015, 17(4): 591-597.

[10] Wissner E, Revishvili A, Metzner A, et al. Non-invasive epicardial and endocardial mapping of premature ventricular contractions[J]. *Europace*, 2016, 19(5): 843-849.

[11] Ghosh S, Avari JN, Rhee EK, et al. Noninvasive electrocardiographic imaging (ECGI) of a univentricular heart with Wolf-Parkinson-White syndrome[J]. *J Heart Rhythm*, 2008, 5(4): 605-608.

[12] Ghosh S, Avari JN, Rhee EK, et al. Hypertrophic cardiomyopathy with preexcitation: insights from noninvasive electrocardiographic imaging (ECGI) and catheter mapping[J]. *J Cardiovasc Electrophysiol*, 2008, 19(11): 1215-1217.

[13] Ghosh S, Avari JN, Rhee EK, et al. Noninvasive electrocardiographic imaging (ECGI) of epicardial activation before and after ablation of the accessory pathway in a patient with Ebstein anomaly[J]. *Heart Rhythm*, 2008, 5(6): 857-860.

[14] Hocini M, Shah AJ, Cochet H, et al. Noninvasive electrocardiographic mapping facilitates previously failed ablation of right appendage diverticulum associated life-threatening accessory pathway[J]. *J Cardiovasc Electrophysiol*, 2013, 24(5): 583-585.

[15] Hocini M, Shah AJ, Cochet H, et al. Noninvasive 3D mapping system guided ablation of anteroseptal pathway below the aortic cusp[J]. *Heart Rhythm*, 2013, 10(1): 139-141.

[16] Hocini M, Shah AJ, Neumann T, et al. Focal arrhythmia ablation determined by high resolution noninvasive maps: multicenter feasibility study[J]. *J Cardiovasc Electrophysiol*, 2015, 26(7): 754-760.

[17] Sieniewicz BJ, Jackson T, Claridge S, et al. Optimization of CRT programming using non-invasive electrocardiographic imaging to assess the acute electrical effects of multipoint pacing[J]. *J Arrhythm*, 2019, 35(2): 267-275.

[18] Helder P, Tom AJ, Simon C, et al. Evidence of reverse electrical remodelling by noninvasive electrocardiographic imaging to assess acute and chronic changes in bulk ventricular activation following cardiac resynchronization therapy[J]. *J Electrocardiol*, 2020, 58(1-2): 96-102.

收稿日期: 2020-02-24