

# 心磁图诊断冠状动脉微血管疾病临床应用 专家共识（2025 版）（转载）

中国微循环学会心血管代谢与微循环专业委员会

通信作者：马健, E-mail: mjiyw2009@126.com; 沈成兴, E-mail: shencx@sjtu.edu.cn

**【摘要】** 冠状动脉微血管疾病(CMVD)发病率高,其导致的不良心血管事件不容忽视。如何早期发现和诊断 CMVD,进而减少心血管事件发生至关重要。心磁图(MCG)是一种无创、无辐射的心血管检查技术,凭借自身诸多优势在 CMVD 的诊断和治疗效果评价方面具有广阔的应用前景。国内外将 MCG 应用于 CMVD 临床诊断、疾病分型和预后评估方面的临床研究逐渐增多,尽管部分研究提出利用 MCG 诊断评估 CMVD 的标准以及推荐意见,但缺乏推荐等级和证据水平。因此,利用 MCG 进行 CMVD 的临床诊断亟需系统的解决方案以及夯实的指导意见。另外,在不同医疗机构应用的 MCG,由于技术路线、设备性能以及分析方法等不同,导致 CMVD 诊断标准不统一,对其临床应用推广构成困扰。为总结 MCG 诊断 CMVD 领域的最新进展,规范 MCG 诊断 CMVD 的操作流程,实现 MCG 诊断方案落地于不同层级医疗机构的示范应用,在借鉴国内外最新研究的基础上结合我国具体情况,国内相关领域专家制定了本部 MCG 诊断 CMVD 临床应用专家共识,该共识的发布将进一步推动我国 MCG 诊断 CMVD 的临床研究进展。

**【关键词】** 冠状动脉微血管疾病;心磁图;无创检查;冠状动脉血流储备;主要心血管事件;专家共识

**【文章编号】** 2095-834X(2025)11-30-11

**DOI:** 10.26939/j.cnki.CN11-9353/R.2025.11.003

**本文著录格式:** 中国微循环学会心血管代谢与微循环专业委员会.心磁图诊断冠状动脉微血管疾病临床应用专家共识(2025 版)(转载)[J].当代介入医学电子杂志,2025,2(11):30-40.

## Expert consensus for the clinical application of magnetocardiography diagnosing coronary microvascular disease (2025 Edition) (reprinted)

Chinese Society of Microcirculation: Committee on Cardiovascular Metabolism and Microcirculation

Corresponding authors: Ma Jian, E-mail: mjiyw2009@126.com; Shen Chengxing, E-mail: shencx@sjtu.edu.cn

**【Abstract】** Coronary microvascular disease (CMVD) is highly prevalent and carries significant potential for triggering serious cardiovascular complications, necessitating heightened clinical attention. Early detection and diagnosis of CMVD are critical for preventing these adverse outcomes. Magnetocardiography (MCG), a safe and non-invasive imaging modality, demonstrates considerable potential for diagnosing CMVD and evaluating treatment efficacy, owing to its unique advantages. While an increasing number of global clinical studies are exploring MCG's role in CMVD diagnosis, classification, and prognostic assessment, existing clinical guidelines lack standardized evidence levels and recommendation grades for its application. This underscores an urgent need for a unified, evidence-based framework for MCG-based CMVD diagnosis. A further challenge is the inconsistency in CMVD diagnostic criteria across institutions, stemming from variations in MCG equipment, methodologies, and analytical techniques. To address these critical issues, Chinese experts have formulated a clinical consensus statement on the use of MCG for CMVD diagnosis. Synthesizing the latest research evidence and considering the specific context of China's healthcare system, this consensus aims to standardize MCG protocols, bridge implementation gaps, and accelerate the adoption of MCG across diverse clinical settings. Its publication is

anticipated to significantly advance China's progress in CMVD research and diagnostics.

**【Keywords】** Coronary microvascular disease; Magnetocardiography; Non-invasive test; Coronary flow reserve; Major adverse cardiovascular events; Expert consensus

冠状动脉微血管疾病 (coronary microvascular disease, CMVD) 是缺血性心脏病的重要发病机制之一,近年来,CMVD 得到越来越多的关注和认识,被证实为不良心血管事件的独立预测因素<sup>[1]</sup>。2013 年欧洲心脏病学会 (European Society of Cardiology, ESC) 稳定性冠状动脉疾病治疗指南<sup>[2]</sup>,首次将此疾病列入冠心病的临床类型,并提出了初步的诊断和治疗建议。临床研究显示,在具有心肌缺血症状但冠状动脉造影显示非阻塞性病变的患者中,CMVD 的发生率高至 50%~60% 左右<sup>[3]</sup>,冠状动脉造影正常和非阻塞性冠状动脉病变患者的主要心血管事件 (major adverse cardiovascular events, MACEs) 和全因死亡率显著高于对照人群<sup>[4]</sup>。

众多研究显示<sup>[5-6]</sup>,CMVD 系多因素、多机制相互影响所致,包括微血管病变、血管内皮功能障碍、炎症反应、血液流变性异常等,均参与冠状动脉微循环不同表型病理过程的发生发展,在每种表型中起主导作用的病理机制又有所不同;因此,2023 年《冠状动脉微血管疾病诊断和治疗的专家共识》<sup>[7]</sup>将 CMVD 分为 4 型以指导临床诊断和治疗。由此可见,不同分型的 CMVD 的始发病因、病理生理、治疗效果以及临床预后均有差异。总之,CMVD 的临床分型以及危险分层应纳入到患者风险评估之中,依据患者有无合并动脉粥样硬化、CMVD 的严重程度以及是否合并已知的心血管危险因素等要素进行整体风险评估。

CMVD 诊断要素包含临床症状和辅助性检查两方面,目前的临床检查技术只能通过测定心肌血流量、冠状动脉循环血流和冠状动脉血流储备 (微循环阻力指数等) 等有创/无创性技术来侧面反映冠状动脉微血管功能<sup>[1]</sup>。尽管临床中上述检查手段可以协助 CMVD 诊断,然而检查的有创性、复杂性、经济性等特点也限制其便捷、广泛使用,部分检查还需要患者进行运动、注射药物或对心脏电节律的要求等,致使部分患者不能承受上述检测方法<sup>[8]</sup>。另外,CMVD 的临床诊断流程中对部分患者的评估还要求联合不同的影像学检查<sup>[9]</sup>。因此,临床亟待一种能够兼具无创、安全以及简易等优势的检查手段以便于 CMVD 的早期诊断和临床评估。

心磁图 (magnetocardiography, MCG) 是无创记录和分析心动周期中由电活动所产生的电磁场成份和变化的方法,能够探测和量化心脏微小的磁信号,具有较高的空间敏感性<sup>[10]</sup>。与心电图相比,具有信号高度保真、对局部心肌电流高度敏感等诸多优势<sup>[11]</sup>。目前,

MCG 用于心血管疾病的研究主要集中于冠心病的临床诊断、预后评价以及心律失常的定位诊断等<sup>[12-13]</sup>。

MCG 凭借自身诸多优势在 CMVD 的诊断和治疗效果评价方面具有广阔的应用前景<sup>[13]</sup>。近年,国内外将 MCG 应用于 CMVD 临床诊断、疾病分型和预后评估的研究逐渐增多,尽管部分研究提出利用 MCG 诊断评估 CMVD 的标准以及推荐意见,但缺乏推荐等级和证据水平<sup>[14-15]</sup>。因此,利用 MCG 进行 CMVD 的临床诊断方案尚缺乏夯实的基础工作。

为及时总结 MCG 诊断评估 CMVD 领域中的近期进展,规范 MCG 诊断评估 CMVD 的方法和流程,凝练该领域中存在的科学问题,提出我国今后的 MCG 研究工作方向,2024 年 9 月中国微循环学会心血管代谢专委会决定对 MCG 诊断 CMVD 中国专家共识进行总结撰写,并采用以下的质控方案:(1)成立由学组提名的共识修订委员会和共识起草专家组;(2)由起草专家组提出并由共识修订委员会审定文献检索词;(3)全面检索了国内外学术期刊上发表的有关 MCG 诊断评估 CMVD 的文献;(4)根据共识修订委员会设定的标准,删除低质量、重复性和小样本的文献并进行文献分类;(5)起草专家组分组对分类文献进行研究并根据检索结果拟定撰写提纲,提交共识修订委员会审定;(6)共识修订委员会和起草专家组多次举行会议,审定 MCG 诊断 CMVD 共识初稿和修改稿,最终形成本文定稿。

## 1 MCG 诊断 CMVD 技术概况

**1.1 MCG 基本原理** 心脏电机械偶联的核心是心脏机械收缩前心肌先产生电激动。在这一过程中,心脏复杂的电流网络会在其周围产生微弱的磁场,其强度通常在皮特斯拉 (picotesla, pT) 量级,仅为地球磁场的百万分之一<sup>[16]</sup>。根据 Biot-Savart 定律,电流元产生的磁感应强度与其大小成正比,因此通过检测心脏周围的磁场分布,可以逆向推导电流元的强度和方向,并结合右手螺旋定则解析电生理传导路径<sup>[17]</sup>。

与心电图 (electrocardiography, ECG) 不同,MCG 能够更精细地反映心脏电活动的空间信息<sup>[18]</sup>。ECG 记录的是心电图综合向量,而 MCG 通过绘制等磁图,可在同一时间点重建多个电流元,从而揭示心肌细胞的多极子电活动。此外,MCG 还能检测环状电流产生的磁场,弥补了 ECG 对环状电流不敏感的局限性,因此在电生理信息获取方面具有显著优势<sup>[19]</sup>。

然而,心脏磁场的微弱性对检测技术提出极高要求。目前,超导量子干涉仪(superconducting quantum interference device, SQUID)是MCG的主流传感器,但其依赖液氮冷却,成本高昂且操作复杂<sup>[20]</sup>。近年来,非低温磁传感器如光泵磁力计(optical pumping magnetometer, OPM)<sup>[21]</sup>和基于无自旋交换弛豫(spin exchange relaxation free, SERF)的原子磁力计展现更多优势<sup>[22]</sup>(表1)。

表1 两种不同MCG技术的特点对比

项目	SQUID	OPM
技术原理	约瑟夫森结线圈通过的磁通量	利用光、磁与原子相互作用
典型灵敏度	3~5 fT/NHz	10~50 fT/NHz
工作温度	4.2 k	室温下
测量带宽	10 kHz	100 Hz
测量磁场量	矢量	矢量
探测器结构	磁强计、梯度计	磁强计为主
工作磁场条件	DC<50 μT	DC<100 nT, AC<±5 nT
磁屏蔽要求	无~中等	高

注:SQUID:超导量子干涉仪;OPM:光泵磁力计;DC:直流磁场;AC:交流磁场。

**1.2 MCG技术介绍** 心脏磁场的微弱性对检测技术提出极高要求,MCG的检测技术根据传感器类型可分为电磁感应式心磁检测、磁阻式心磁检测、基于SQUID技术的心磁检测、基于SERF原理的心磁检测。目前上市的心磁信号采集设备主要基于SQUID和SERF这两项技术,SQUID是MCG的主流传感器(图1),但其依赖液氮冷却,成本高昂且操作复杂<sup>[20]</sup>。然而,随着非低温磁传感器如OPM和SERF原子磁力计的研发应用<sup>[21-22]</sup>,其表现出更佳的替代潜力,不仅成本更低、易于使用,还为可穿戴MCG设备的研发提供可能<sup>[23-24]</sup>。

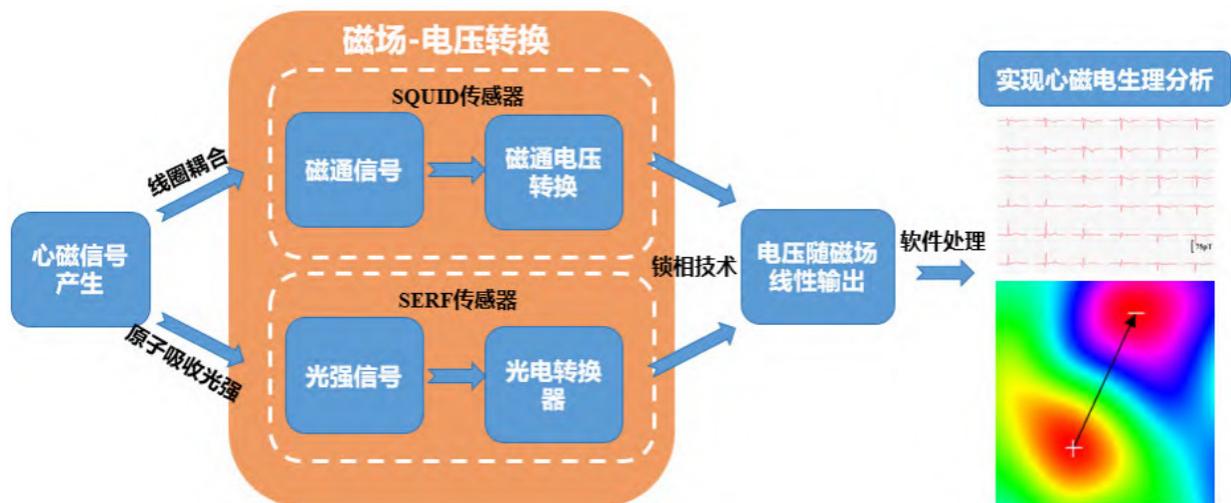
基于SQUID的MCG检测,其器件结构通常由包含一个或两个约瑟夫森结的超导环路构成。一般称前者为射频SQUID,后者为直流SQUID。当穿过SQUID

环路的磁通发生变化时,SQUID器件的电感(射频SQUID)或临界电流(直流SQUID)会发生相应的变化,因此可以用射频和直流方法分别来探测外界磁通变化的影响。利用磁通耦合器,任何可以转化为穿过SQUID环路的磁通都可以利用SQUID传感器转化为电信号进行测量<sup>[25]</sup>。

基于SERF原子磁强计的MCG检测,主要利用光、磁与原子相互作用,检测原子基态的塞曼分裂大小<sup>[22]</sup>。单光束的SERF磁强计中,圆偏振的驱动光(泵浦光)不仅用于使原子获得极化度,还用于原子对驱动光吸收的探测。由于在零磁场下,原子对驱动光的吸收会减小,因此通过探测驱动光的光强会得到一个零场共振信号,经过锁相放大在零场附近可以得到电信号随待测磁场变化近似线性的曲线,即可获得磁场信息。

**1.3 MCG诊断CMVD的效能** 因现有的影像学技术无法观察到冠状动脉微血管的形态学改变,临床上常通过检测冠状动脉血流储备(coronary flow reserve, CFR)作为评估CMVD的诊断技术。可用于检测CFR的技术有心肌声学造影、正电子发射断层成像、心脏磁共振成像、冠状动脉内温度稀释法及冠状动脉内多普勒流速法等。但以上检查技术因有创、价格昂贵等各种原因,实际临床应用使用率低<sup>[26]</sup>。MCG作为一种灵敏、无创、无辐射、无接触的检查手段,已被证实可应用于临床诊断和评估CMVD<sup>[14-15]</sup>。

Quesada等<sup>[27]</sup>以CFR(CFR≤2.0为界值)为金标准分析,MCG筛查出怀疑缺血伴非阻塞性冠状动脉疾病(ischemia with non-obstructive coronary arteries, INOCA)中CMVD的敏感度为100%、特异度为93.3%,准确率为94.8%;在其另一项INOCA研究中<sup>[28]</sup>,以多普勒导丝法CFR<2.0或者温度稀释法CFR<2.5为金标准,MCG诊断CMVD准确率为71%,敏感度71%,特



注:MCG:心磁图;SQUID:超导量子干涉仪;SERF:基于无自旋交换弛豫。

图1 基于SQUID传感器和SERF传感器的心磁信号采集

异度 70%；而 Ashokprabhu 等<sup>[29]</sup>证实 36 通道 MCG 与多普勒 CFR 具有更高的一致性，在心绞痛伴非阻塞性冠状动脉疾病 (angina with non-obstructive coronary arteries, ANOCA) 的对比研究中，以冠状动脉内多普勒或温度稀释法 CFR < 2.0 为金标准，多普勒 CFR 亚组中 MCG 诊断 ANOCA 的 ROC 曲线下面积 (AUC) 为 0.76，敏感度 75%，特异度 77%。国内学者利用 MCG 诊断非阻塞性冠状动脉心肌梗死 (myocardial infarction with non-obstructive coronary arteries, MINOCA) 患者的研究中<sup>[30]</sup>，发现此类患者的 MCG 参数如磁场角度、电流角度、磁极形态等有特征性变化。上述临床研究表明，MCG 应用于诊断 CMVD 一定程度上可减少侵入性的冠状动脉微血管功能检查。

**1.4 MCG 诊断 CMVD 的检查适应证** MCG 在临床诊断 CMVD 中的应用仍处于早期阶段，总结近期系列研究显示，MCG 在 CMVD 中的潜在适应证主要集中在症状与造影结果不匹配、冠状动脉微血管性心绞痛诊断及负荷试验辅助领域，但其临床推广仍需进一步验证。以下是 MCG 检查 CMVD 的可能适应证及相关考虑，目前建议临床选择性应用，并与其他经典检查手段互补。

**1.4.1 疑似 CMVD 患者 适应证：**对于有典型心绞痛症状 (如胸闷胸痛、运动后心前区不适等) 但冠状动脉检查显示无显著狭窄的患者，MCG 可能帮助检测 CMVD 引起的局部心肌缺血或复极异常。

**研究依据：**MCG 可捕捉心肌细胞复极过程中的磁场变化，敏感度优于传统 ECG，尤其在冠状动脉微血管痉挛或灌注异常时<sup>[31]</sup>。

**1.4.2 负荷试验中的辅助诊断 适应证：**在药物 (如腺苷、多巴酚丁胺) 或运动负荷试验中联合 MCG，提高 CMVD 的检出率。

**研究依据：**负荷状态下冠状动脉微血管灌注异常更为显著，负荷前后 MCG 的动态变化可提供心肌缺血证据<sup>[32-33]</sup>。

**1.4.3 排除其他引起心肌灌注异常的疾病，如心肌疾病等 适应证：**MCG 可用于评估心肌炎、心肌病的冠状动脉微循环灌注情况评估，适用于评估心肌炎活动性及预后、预测心肌病进展等。

**研究依据：**心肌炎 MCG 表现为复极离散度增加，肥厚心肌病导致电流传导延迟，应激性心肌病可能显

示出整个 T 波期间的反向电流，上述疾病中 MCG 对心室复极异质性的检测优于 ECG<sup>[34-36]</sup>。

**1.4.4 CMVD 治疗效果的随访评估 适应证：**对 CMVD 患者进行药物治疗 (如钙通道阻滞剂、硝酸酯类) 后，MCG 可用于评估疗效或病情进展。

**研究依据：**心脏磁信号的改善早于症状或 ECG 变化，特别是结合机器学习后更为有效<sup>[37]</sup>。

**1.4.5 高风险人群筛查 适应证：**糖尿病、高血压等 CMVD 高风险患者，MCG 可作为早期筛查评估工具。

**研究依据：**MCG 可发现亚临床心肌电磁活动异常，提示冠状动脉微血管功能受损<sup>[38]</sup>。

## 2 MCG 的数据采集和分析

**2.1 MCG 数据采集流程** 由于心磁信号十分微弱，极易受到周围电磁环境干扰和传感器元件性能影响，进行 MCG 检查前应排查所有可能造成影响检查结果的磁性物品，从而保证心磁信号质量及结果可靠性。

检查前应先移除受检者身上所有电子设备及金属物品，如手机、眼镜、金属首饰、口罩等；体内或体表有金属植入物的患者则可能无法进行 MCG 检查，包括但不限于假牙、心脏起搏器、钢板、节育环等。

通常 MCG 的检查时间约为 5~10 min，受检者在平卧位下进行整个心前区的磁场信号采集，一般探测传感器需置于胸廓上方约 1 cm 处。

采集 MCG 时，需要实时关注心磁信号质量，正常心磁波形应该呈现类似 ECG 的稳定性周期性波形，保证至少连续 30 s 的有效信号才能进行可靠的信号处理，否则建议在排查问题后重新采集。具体的异常通常包括：(1) 部分波形形态异常；(2) 整体波形形态异常；(3) 波形振幅异常。

MCG 像质量评价主要基于蝴蝶图和等磁图，评估内容包括波形形态、基线噪声、R 波峰图像和 T 波峰图像。图像评价主要分为 4 级，1 级图像为优，波形光滑，基线稳定、峰值时刻等磁图居中；2 级图像为良，波形光滑，基线相对稳定、峰值时刻等磁图基本居中；3 级图像为合格，波形相对光滑，基线相对稳定、伴或不伴峰值时刻等磁图轻度偏移；4 级图像为不合格，波形混杂噪声，基线不稳定、伴或不伴峰值时刻等磁图严重偏移。

表 2 利用 MCG 评估冠状动脉微血管功能的临床研究

临床研究	MCG 参数	阳性人群	对照人群	诊断效能
Quesada 等 <sup>[27]</sup>	相对磁场强度	CFR ≤ 2	CFR > 2 无症状健康者	准确 = 94.8% 敏感度 = 100% 特异 = 93.3%
Quesada 等 <sup>[28]</sup>	磁极形态	多普勒 CFR < 2 或温度热稀释法 CFR < 2.5	多普勒 CFR ≥ 2 或温度热稀释法 CFR ≥ 2.5	准确度 = 71% 敏感度 = 71% 特异度 = 70%
Ashokprabhu 等 <sup>[29]</sup>	ST 段磁极形态；RT 角度；T 波动态变化	多普勒或温度热稀释法 CFR < 2	多普勒或温度热稀释法 CFR ≥ 2	AUC = 0.76 敏感度 = 75% 特异度 = 77%
郭宜竟等 <sup>[30]</sup>	磁场角度；电流角度；磁极形态	UK	UK	UK

注：MCG：心磁图；CFR：冠状动脉血流储备；UK：不详。

**2.2 MCG 数据分析流程** 完成检查后即可通过软件进行图像分析, MCG 分析与解读的基本流程包括确认患者信息、MCG 像解读、定量参数分析、出具检查报告等过程。

**2.2.1 确认患者信息** 解读 MCG 前应先明确受检患者的信息, 包括患者基本信息、临床情况(如当前临床诊断、危险因素与合并症等)、检查目的、检查时患者状态(如是否进行负荷试验)、检查时间等。

**2.2.2 MCG 图像解读** 解读人员应先观察“蝴蝶图”(图 2), 明确患者的波形特征, 然后依次选取感兴趣的波段进行进一步分析(应当至少包括 QRS 波段与 T 波段)。对于选定的波段, 应全面分析等磁图、伪电流密度图等图像的动态变化过程以及关键时刻点的表现, 记录所发现的异常图像表现, 综合评估患者是否有 CMVD 引起的心脏电活动改变。

“蝴蝶图”指在一个心动周期内, 将所有传感器测得的磁场强度随时间变化的波形曲线绘制在一张图中得到的波谱图, 因形似蝴蝶而得名。遵循与 ECG 相似的命名规则, 同样将这些波命名为“P 波”、“QRS 复合波”、“T 波”等。

对于每一个选定的时刻, 可以绘制磁场强度在胸前区二维平面上的等高线图, 即为等磁图(Isocontour Map, 图 3 左)。如图所示, 左下的正磁极呈红色, 代表磁感线由外向内穿入平面, 中心点是磁场强度最大正值处; 右上的负磁极呈蓝色, 代表磁感线由内向外穿出平面, 中心点是磁场强度最大负值处。从正磁极中心指向负磁极中心的连线即为磁场向量(图示白色箭头), 磁场角度指磁场向量与水平轴的夹角, 我们规定其范围为  $-180^{\circ} \sim +180^{\circ}$ , 测量方法参见图示直角坐标系。

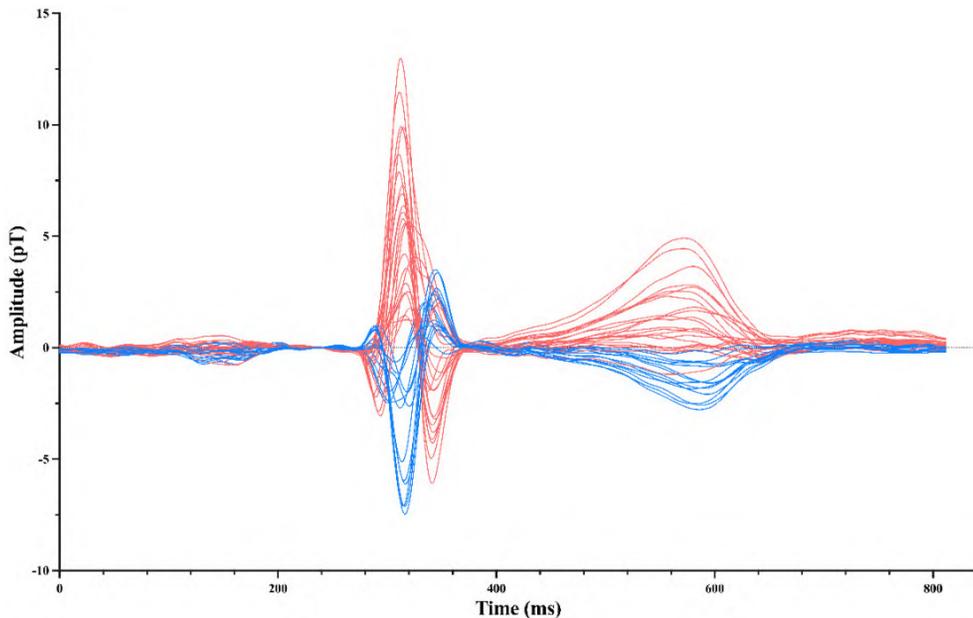
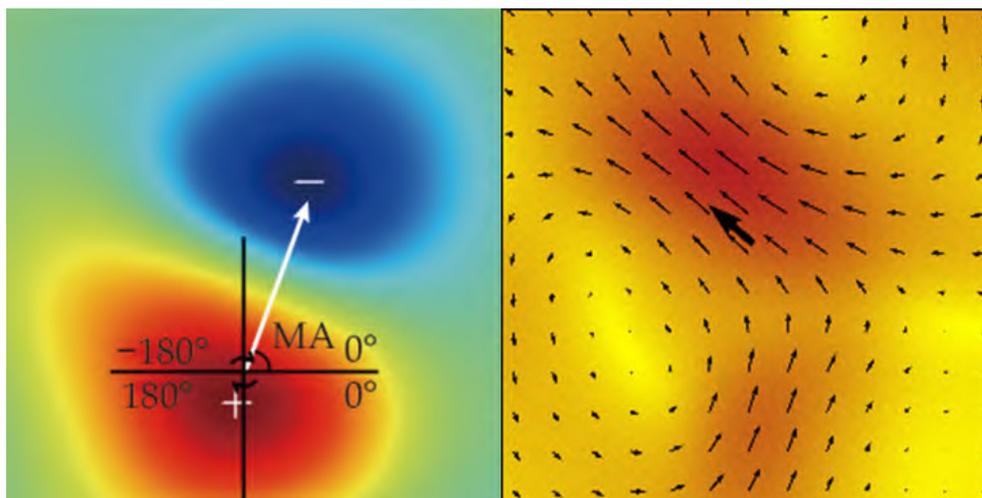


图 2 “蝴蝶图”示例



注: 左图为等磁图, 红色部分是正磁极, 蓝色部分是负磁极, 白色箭头为磁场向量; 右图为伪电流密度图, 黑色箭头代表电流, 最大的黑色箭头为主电流。

图 3 等磁图与伪电流密度图

伪电流密度图(pseudo-current density map, 图 3 右)是基于电磁场原理和数学模型,由磁场分布反推出的电流密度在心脏中的分布情况,可以与等磁图互相补充,反映该时刻心脏的电活动情况。如图所示,箭头的大小和方向分别反映该位置电流的强度和方向,深红色区域代表电流密度最大的区域,其中最大的箭头被称为主电流。

对于选定的波段,可连续分析等磁图与伪电流密度图的动态变化过程,QRS 波段反映心室除极的电生理过程,T 波段反映心室复极的电生理过程。通常情况下,在除极期心磁向量(magnetocardiographic vector)会跟随心肌除极顺序呈现有规律的转动,在复极期心磁向量则保持相对稳定不变。典型的正常人群等磁图呈现为两个近似圆形的、对称的磁极,异常的磁场分布常表现为磁场角度和磁极形态的改变,与 CMVD 引起的心肌缺血或损伤型表现高度相关。

**2.2.3 定量参数分析** 解读人员应对重要的 MCG 参数进行测量与定量分析,依据定量分析结果给出患者的诊断建议与风险评估。本共识提出对 CMVD 的临床诊断具有较高价值的参数如下:(1)从“蝴蝶图”中测量 QRS 波的振幅和持续时间、ST 段信号偏移、QT 间期等相关参数;(2)从等磁图中测量 T 波的磁场极值比、磁场角度、磁极离散度等参数;(3)从伪电流密度图中测量主电流角度等参数。

### 3 MCG 诊断 CMVD 的推荐标准

MCG 检查在诊断 CMVD 方面具有独特优势,为能够进行定性、定位以及定量评估,在分析 MCG 各项参数时需要从多角度进行综合考虑。Quesada 等<sup>[27]</sup>以 CFR<2.0 为参考标准,研究 MCG 用于诊断 INOCA,使用 4 项 MCG 特征包括:RT 夹角、ST 段单极磁场模式、ST 段动态改变、ST 段抬高,使用单个特征异常时具有高敏感度(92%),使用 3 个或 4 个特征异常时具有高特异度(83% 和 98%);Hänninen 等<sup>[39]</sup>研究发现 MCG

的多种 ST 段和 T 波参数可用于检测心肌缺血,包括 T 波峰和 ST 段的振幅和磁场角度、ST 段斜率、ST-T 段积分等,分析这些参数的最佳心磁探测位置在腹部上方;Morguet 等<sup>[40]</sup>通过 MCG 参数评估局部心肌活力,最佳的 3 个参数为 R 波最大振幅、T 波最大振幅、T 波最小振幅,该结果与超声心动图、SPECT、PET 对心肌疤痕节段的综合评估结果相一致;Ramesh 等<sup>[41]</sup>用 MCG 评估静息 ECG 正常的胸痛患者的心肌缺血情况,81.8% 的运动负荷试验阳性患者在 MCG 中出现 T 波峰磁场角度异常或非偶极分布模式( $P<0.001$ );Park 等<sup>[42]</sup>提出 4 项 MCG 参数对心肌缺血患者具有很高的诊断价值,包括 T 波峰的 1/3 至 T 波峰之间的主矢量角度、30 ms 内矢量角度变化、30 ms 内磁极距离变化、30 ms 内磁极强度比变化,且其阴性预测值要远优于 ECG (96.2% 比 53.4%);Wessel 等<sup>[43]</sup>在胸痛患者的随访(中位随访时间 6.5 年)中发现,MCG 参数中 QTc 间期延长对预测患者的心源性死亡具有显著价值( $P<0.05$ ),低复极储备和 QTc 延长患者的心源性死亡风险高出 9 倍以上( $P<0.001$ );Smith 等<sup>[44]</sup>比较 MCG 和 ECG 对心室复极离散度的测量,发现 MCG 测得的 QT 离散度明显>ECG 结果( $P<0.00001$ ),对具有心脏疾病患者的识别能力也明显优于 ECG ( $P<0.017$ )。经查阅文献,专家共识小组推荐以下 MCG 参数作为诊断 CMVD 的特征性指标,见表 3。

MCG 通过多参数组合分析,能够为 CMVD 的严重程度评估提供重要依据(图 4)。本共识提出的 MCG 特征性参数组合,旨在为临床实践提供参考,推动 MCG 在 CMVD 诊断和治疗中的规范应用。

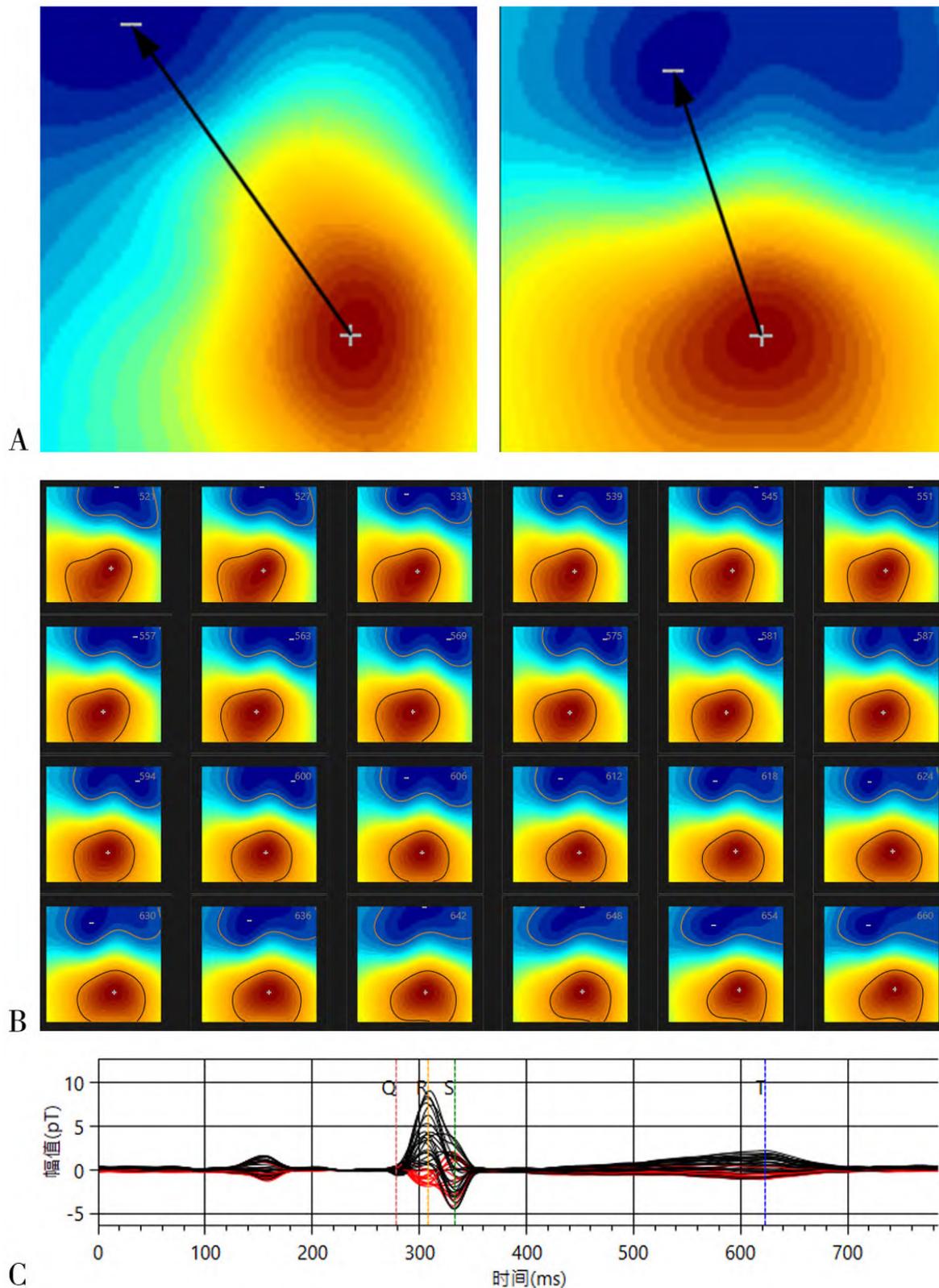
### 4 小结

MCG 技术作为近年来心血管疾病诊疗领域的新兴技术,其临床价值正随着循证医学证据的积累而日益凸显。本共识基于国内外最新研究进展和专家组的实践经验,系统梳理 MCG 在技术原理、临床应用、诊

表 3 MCG 诊断 CMVD 的特征性参数

MCG 指标	异常标准	临床意义
QRS 波振幅和持续时间异常 <sup>[40,45-46]</sup>	• QRS 波振幅较正常值降低 >20% • QRS 波持续时间较正常值延长 >10%	提示心室除极过程异常,与 CMVD 导致的心室心肌功能改变有关。
T 波磁场极值比异常或呈单极分布 <sup>[47]</sup>	• T 波磁场极值比较正常值升高或降低 >30% • 磁场出现单极分布(只有负磁极或只有正磁极)	提示心室整体复极过程异常,常与显著冠状动脉微血管功能异常或代谢紊乱相关。
T 波磁极形态离散 <sup>[48-49]</sup>	• T 波出现多磁极表现(即正、负磁极不止一个) • T 波磁极离散度较正常值升高 >30%	提示局部心肌代谢或血流异常,可用于 CMVD 的定位诊断。
T 波磁场角度异常或不稳定 <sup>[29,41,50-51]</sup>	• T 波磁场角度偏离正常范围 >10° • T 波主电流角度偏离正常范围 >10° • T 波磁场角度变化 >30°	可反映心肌血流灌注不足引起的电活动紊乱,对 CMVD 的鉴别诊断具有重要价值。
ST 段信号偏移 <sup>[29,52]</sup>	• 相邻三个通道出现 ST 段信号偏移 >0.3 pT	提示心肌缺血或损伤,是 CMVD 的重要电生理表现。
QT 间期延长或离散度增加 <sup>[43,53-54]</sup>	• QT 间期(或 QTc 间期)较正常值延长 >10% • QT 间期离散度(QTd)较正常值增加 >10%	反映心肌细胞电活动的异质性改变,提示冠脉微循环阻力异常。

注:MCG:心磁图;CMVD:冠状动脉微血管疾病。



注：A：左为CMVD患者R波峰磁场图，右为该患者T波峰磁场图；T波峰时磁场呈非偶极分布，负磁极形态离散，磁场角度偏离正常范围（ $-108^\circ$ ），R-T磁场角度夹角增大（ $43^\circ$ ）；B：T波段内磁场图的动态展示，T波磁场角度动态改变增大（ $50^\circ$ ）；C：该患者的蝴蝶图，其QTc间期延长（480 ms）。

图4 典型的CMVD患者心磁图像示例

断标准等关键环节的核心要点，旨在为临床实践提供科学规范的指导依据。我们看到，MCG凭借其非侵入性、零辐射暴露和高时空分辨率的技术优势，其能够捕捉传统ECG难以识别的微弱磁场信号变化，为心肌缺

血、心律失常等病理状态的机制研究开辟新视角，尤其在CMVD的早期筛查、精准分型和疗效监测中展现出独特潜力。然而必须认识到，当前MCG的临床应用仍面临若干挑战。在基础研究层面，CMVD的复杂病理

生理机制与 MCG 特征参数的关联性仍需建立更完善的生物物理学模型;在技术标准层面,MCG 厂商设备参数差异、检测环境电磁干扰控制等质量控制问题需要统一规范;在临床转化层面,亟需开展多中心大样本研究以建立针对不同人群的诊断阈值和评估体系。我们特别建议后续研究应重点关注以下方向:(1)建立 MCG 特征参数与 CMVD 的分子机制关联;(2)开发人工智能辅助的 MCG 动态分析算法;(3)探索 MCG 在心脏性猝死风险评估中的预测价值。

本共识的发布是 MCG 技术发展过程中的一个阶段性里程碑。我们期待通过建立“临床-工程-科研”跨学科协作平台,加速推进以下工作:制定国际认可的 MCG 操作规范白皮书、建设标准化的 MCG 数据库共享平台、开展覆盖不同地域和人种的验证性临床研究;同时呼吁医疗机构将 MCG 技术培训纳入继续教育体系,鼓励开展医工交叉人才培养项目。

表 4 MCG 诊断 CMVD 严重程度的特征性参数组合

严重程度	特征性参数组合	临床意义
轻度 (I 级)	- QRS 波振幅和持续时间异常 - QT 间期延长或离散度增加	提示早期微血管功能障碍,心电图活动出现轻微异常,临床症状可能较轻
中度 (II 级)	- QRS 波振幅和持续时间异常 - QT 间期延长或离散度增加 - T 波磁极形态离散 - T 波磁场极值比异常	提示微血管功能障碍加重,心肌缺血和电活动异质性改变明显,临床症状较为典型。
重度 (III 级)	- QRS 波振幅和持续时间异常 - QT 间期延长或离散度增加 - T 波磁极形态离散 - T 波磁场极值比异常 - T 波磁场角度异常或不稳定	提示微血管功能障碍严重,心肌能量代谢异常,临床症状显著,可能伴有心功能下降
极重度 (IV 级)	- QRS 波形异常 - QT 间期延长或离散度增加 - T 波磁极形态离散 - T 波磁场角度异常或不稳定 - ST 段信号偏移 - T 波磁场极值比异常或呈单极分布	提示微血管功能严重受损,局部心肌代谢或血流异常显著,电活动传导异常,临床症状严重

注:MCG:心磁图;CMVD:冠状动脉微血管疾病。

随着量子传感技术的突破和便携式 MCG 设备的研发,该项技术有望向基层医疗机构下沉,最终实现利用 MCG 进行心血管疾病的广谱筛查和精准防控。让我们携手共进,通过持续的技术创新和严谨的临床验证,使 MCG 技术真正成为心血管疾病诊疗体系中的重要支柱,为提升全民心血管健康水平做出实质性贡献。

**利益冲突** 所有作者均声明不存在利益冲突

#### 指导专家组成员:

葛均波(复旦大学附属中山医院)  
房建成(北京航空航天大学)  
谢晓明(中国科学院上海微系统与信息技术研究所)

刘乃丰(东南大学附属中大医院)  
陈韵岱(中国人民解放军总医院)  
徐亚伟(上海市公共卫生临床中心)  
沈成兴(上海交通大学医学院附属第六人民医院)

#### 核心专家组成员(按姓氏笔画顺序):

于波(哈尔滨医科大学附属第二医院)  
王焱(厦门大学附属心血管病医院)  
车文良(同济大学附属第十人民医院)  
刘巍(首都医科大学附属北京积水潭医院)  
宋现涛(首都医科大学附属北京安贞医院)  
陈玉国(山东大学附属齐鲁医院)  
周亚峰(苏州大学附属独墅湖医院)  
林先和(安徽医科大学第一附属医院)  
林逸贤(香港亚洲心脏病中心)  
罗建方(广东省人民医院南海医院)  
姜小飞(珠海市人民医院)  
袁祖贻(西安交通大学第一附属医院)  
钱菊英(复旦大学附属中山医院)  
窦克非(中国医学科学院阜外医院)  
赖珩莉(江西省人民医院)  
曾和松(华中科技大学同济医学院附属同济医院)

#### 专家组成员(按姓氏笔画顺序):

于汇民(广东省人民医院南海医院)  
王东(滨州医学院附属医院)  
王钵(同济大学附属第十人民医院)  
王玺(中国人民解放军总医院)  
马嘉琪(复旦大学附属中山医院)  
邢磊(哈尔滨医科大学附属第二医院)  
刘亮(上海交通大学医学院附属第六人民医院)  
朱红玲(华中科技大学同济医学院附属同济医院)  
郭宜竞(上海交通大学医学院附属第六人民医院)  
李海玲(同济大学附属第十人民医院)  
李晨光(复旦大学附属中山医院)  
李红旗(中国科学技术大学附属第一医院)  
何文飞(广东省人民医院南海医院)  
沈虹(上海交通大学医学院附属第六人民医院)  
张宇杰(上海交通大学医学院附属第六人民医院)  
陈茂(四川大学华西医院)  
陈章炜(复旦大学附属中山医院)  
钟志雄(梅州市人民医院)  
钟炜(梅州市人民医院)  
侯爱洁(辽宁省人民医院)  
洪芳德(安徽医科大学第一附属医院)  
胡奉环(深圳阜外医院)  
梁健球(佛山市第二人民医院)

崔建国(滨州医学院附属医院)  
臧嘉斌(上海交通大学医学院附属第六人民医院)  
蔡新勇(江西省人民医院)  
薛 强(昆明医科大学附属延安医院)

## 参考文献

- [ 1 ] Camici PG, D'Amati G, Rimoldi O. Coronary microvascular dysfunction: mechanisms and functional assessment[J]. *J Clin Med*, 2020, 9(9): 2880.
- [ 2 ] Task Force Members, Montalescot G, Sechtem O, et al. 2013 ESC guidelines on the management of stable coronary artery disease[J]. *Eur Heart J*, 2013, 34(38): 2949–3003.
- [ 3 ] Sara JD, Widmer RJ, Matsuzawa Y, et al. Prevalence of coronary microvascular dysfunction among patients with chest pain and nonobstructive coronary artery disease[J]. *JACC Cardiovasc Interv*, 2015, 8(11): 1445–1453.
- [ 4 ] Jespersen L, Hvelplund A, Abildstrom SZ, et al. Stable angina pectoris with no obstructive coronary artery disease is associated with increased risks of major adverse cardiovascular events[J]. *Eur Heart J*, 2012, 33(6): 734–744.
- [ 5 ] Ong P, Camici PG, Beltrame JF, et al. International standardization of diagnostic criteria for microvascular angina[J]. *Int J Cardiol*, 2018, 250: 16–20.
- [ 6 ] Lerman A, Zeiher AM. Endothelial function: cardiac events[J]. *Circulation*, 111(3), 363–368.
- [ 7 ] 中华医学会心血管病学分会. 冠状动脉微血管疾病诊断和治疗中国专家共识(2023 版)[J]. *中华心血管病杂志*, 2024, 52(5): 460–492.
- [ 8 ] Taqueti VR, Di Carli MF. Coronary microvascular disease pathogenic mechanisms and therapeutic options: JACC state-of-the-art review[J]. *J Am Coll Cardiol*, 2018, 72(21): 2625–2641.
- [ 9 ] Knuuti J, Wijns W, Saraste A, et al. 2019 ESC Guidelines for the diagnosis and management of chronic coronary syndromes[J]. *Eur Heart J*, 41(3): 407–477.
- [ 10 ] Fenici R, Brisinda D. Magnetocardiography provides noninvasive three-dimensional electroanatomical imaging of cardiac electrophysiology[J]. *Int J Cardiovasc Imaging*, 2006, 22(3–4): 595–597.
- [ 11 ] Park JW, Hill PM, Chung N, et al. Magnetocardiography predicts coronary artery disease in patients with acute chest pain[J]. *Ann Noninvasive Electrocardiol*, 2005, (3): 312–323.
- [ 12 ] Fenici R, Brisinda D, Meloni AM. Clinical applications of magnetocardiography[J]. *Expert Rev Mol Diagn*, 2005, 5(3): 291–313.
- [ 13 ] Aita S, Ogata K, Yoshida K, et al. Noninvasive mapping of premature ventricular contractions by merging magnetocardiography and computed tomography[J]. *JACC Clin Electrophysiol*, 2019, 5(10): 1144–1157.
- [ 14 ] 李冰冰, 吴建军, 邢磊, 等. 心磁图仪在冠状动脉微血管疾病的应用进展[J]. *心血管病学进展*, 2024, (5): 392.
- [ 15 ] 中国医药信息学心功能学术委员会. 心磁图心肌缺血临床诊断专家共识[J]. *中国循证心血管医学杂志*, 2024, 16(6): 641–646.
- [ 16 ] David C, Edgar AE, James EZ. Magnetocardiograms taken inside a shielded room with a superconducting point-contact magnetometer[J]. *Appl Phys Lett*, 16(7): 278–280.
- [ 17 ] Agarwal R, Saini A, Alyousef T. Magnetocardiography for the diagnosis of coronary artery disease: a systematic review and meta-analysis[J]. *Ann Noninvasive Electrocardiol*, 2012, 17(4): 291–298.
- [ 18 ] Sarvas J. Basic mathematical and electromagnetic concepts of the biomagnetic inverse problem[J]. *Phys Med Biol*, 1987, (1): 11–22.
- [ 19 ] Bradley J. The magnetocardiogram[J]. *Biophys Rev(Melville)*, 2024, 5(2): 021305.
- [ 20 ] Isabella T, Silvia C, Cosimo DG, et al. Magnetocardiography: current status and perspectives. Part I: physical principles and instrumentation[J]. *Ital Heart J*, 2002, 3(2): 75–85.
- [ 21 ] Borna A, Carter TR, Colombo AP, et al. Non-invasive functional brain-imaging with an OPM-based magnetoencephalography system[J]. *PLoS One*, 2020, 15(1): e0227684.
- [ 22 ] Kominis IK, Kornack TW, Allred JC. A subfemtotesla multichannel atomic magnetometer[J]. *Nature*, 2003, 422(6932): 596–599.
- [ 23 ] Griffith WC, Knappe S, Kitching J. Femtotesla atomic magnetometry in a microfabricated vapor cell[J]. *Opt Express*, 2010, 18(26): 27167–27172.
- [ 24 ] Boto E, Holmes N, Leggett J, et al. Moving magnetoencephalography towards real-world applications with a wearable system[J]. *Nature*, 2018, 555(7698): 657–661.
- [ 25 ] Reichenberger H, Schneider S, Moshage W. Biomagnetic multichannel systems. Principles and application in cardiology[J]. *Clin Physiol*, 1992,

- 12(3): 325–333.
- [ 26 ] Camici PG, D'Amati G, Rimoldi O. Coronary microvascular dysfunction: Mechanisms and functional assessment[J]. *Nat Rev Cardiol*, 2015, 12(1): 48–62.
- [ 27 ] Quesada O, Pico M, Palmer C, et al. Magnetocardiography as a noninvasive diagnostic strategy for suspected coronary microvascular dysfunction[J]. *Eur Heart J*, 2022, 43(2), ehac544. 1188.
- [ 28 ] Quesada O, Ziada L, Cho L, et al. Diagnosis of coronary microvascular dysfunction using magnetocardiography [J]. *Eur Heart J*, 2023, 44(Supplement\_2), ehad655. 1258.
- [ 29 ] Ashokprabhu N, Ziada K, Daher E, et al. Evaluation of coronary microvascular dysfunction using magnetocardiography: a new application to an old technology[J]. *Am Heart J Plus*, 2024, 44: 100424.
- [ 30 ] 郭宜竞, 沈虹, 马健, 等. 冠状动脉非阻塞性心肌梗死的心磁图特征初探[J]. *中华全科医师杂志*, 2024, 23(3): 290–294.
- [ 31 ] Sorbo AR, Lombardi G, Brocca LL, et al. Unshielded magnetocardiography: repeatability and reproducibility of automatically estimated ventricular repolarization parameters in 204 healthy subjects[J]. *Ann Noninvasive Electrocardiol*, 2018, 23(3): e12526.
- [ 32 ] Her AY, Dischl D, Kim YH, et al. Magnetocardiography for the detection of myocardial ischemia[J]. *Front Cardiovasc Med*, 2023, 10: 1242215.
- [ 33 ] Dischl D, Kranz DD, Bannasch S, et al. Magnetoionography enhances diagnostic accuracy of magnetocardiography in coronary artery disease[J]. *Sci Rep*, 2025, 15(1): 31289.
- [ 34 ] Brala D, Thevathasan T, Grahl S, et al. Application of magnetocardiography to screen for inflammatory cardiomyopathy and monitor treatment response[J]. *J Am Heart Assoc*, 2023, 12(4): e027619.
- [ 35 ] Chen X, Li L, Xu XH, et al. New clinical application of magnetocardiography: diagnosis of left ventricular hypertrophy[J]. *Front Cardiovasc Med*, 2025, 12: 1577662.
- [ 36 ] Hunter D, Sularz A, Adi MZ, et al. Magnetocardiography in diagnosis of stress-induced cardiomyopathy[J]. *JACC Case Rep*, 2025, 30(18): 104037.
- [ 37 ] Tantimongcolwat T, Naenna T, Isarankura-Na-Ayudhya C, et al. Identification of ischemic heart disease via machine learning analysis on magnetocardiograms[J]. *Comput Biol Med*, 2008, 38(7): 817–825.
- [ 38 ] Chang YC, Wu CC, Lin CH, et al. Early myocardial repolarization heterogeneity is detected by magnetocardiography in diabetic patients with cardiovascular risk factors[J]. *PLoS One*, 2015, 10(7): e0133192.
- [ 39 ] Hänninen H, Takala P, Korhonen P, et al. Features of ST segment and T-wave in exercise-induced myocardial ischemia evaluated with multichannel magnetocardiography[J]. *Ann Med*, 2002, 34(2): 120–129.
- [ 40 ] Morguet AJ, Behrens S, Kosch O, et al. Myocardial viability evaluation using magnetocardiography in patients with coronary artery disease[J]. *Coron Artery Dis*, 2004, 15(3): 155–162.
- [ 41 ] Ramesh R, Senthilnathan S, Satheesh S, et al. Magnetocardiography for identification of coronary ischemia in patients with chest pain and normal resting 12-lead electrocardiogram[J]. *Ann Noninvasive Electrocardiol*, 2020, 25(3): e12715.
- [ 42 ] Park JW, Jung F. Qualitative and quantitative description of myocardial ischemia by means of magnetocardiography[J]. *Biomed Tech(Berl)*, 2004, 49(10): 267–273.
- [ 43 ] Wessel N, Kim JS, Joung BY, et al. Magnetocardiography at rest predicts cardiac death in patients with acute chest pain[J]. *Front Cardiovasc Med*, 2023, 10: 1258890.
- [ 44 ] Smith F, Langley P, Van Leeuwen P, et al. Comparison of magnetocardiography and electrocardiography: a study of automatic measurement of dispersion of ventricular repolarization[J]. *Europace*, 2006, 8(10): 887–893.
- [ 45 ] Iwakami N, Aiba T, Kamakura S, et al. Identification of malignant early repolarization pattern by late QRS activity in high-resolution magnetocardiography [J]. *Ann Noninvasive Electrocardiol*, 2020, 25(4): e12741.
- [ 46 ] Beadle R, Mc Donnell D, Ghasemi-Roudsari S, et al. Assessing heart disease using a novel magnetocardiography device[J]. *Biomed Phys Eng Express*, 2021, 7(2): 1976–2057.
- [ 47 ] Li Y, Che Z, Quan W, et al. Diagnostic outcomes of magnetocardiography in patients with coronary artery disease[J]. *Int J Clin Exp Med*, 2015, 8(2): 2441–2446.
- [ 48 ] Shin ES, Lam YY, Her AY, et al. Incremental diagnostic value of combined quantitative and qualitative parameters of magnetocardiography to detect coronary artery disease[J]. *Int J Cardiol*, 2017,

- 228: 948–952.
- [ 49 ] Bang WD, Kim K, Lee YH, et al. Repolarization heterogeneity of magnetocardiography predicts long-term prognosis in patients with acute myocardial infarction[J]. *Yonsei Med J*, 2016, 57(6): 1339–1346.
- [ 50 ] Kwon H, Kim K, Lee YH, et al. Non-invasive magnetocardiography for the early diagnosis of coronary artery disease in patients presenting with acute chest pain[J]. *Circ J*, 2010, 74(7): 1424–1430.
- [ 51 ] Huang X, Chen P, Tang F, et al. Detection of coronary artery disease in patients with chest pain: a machine learning model based on magnetocardiography parameters [J]. *Clin Hemorheol Microcirc*, 2021, 78(3): 227–236.
- [ 52 ] Shin ES, Chung JH, Park SG, et al. Comparison of exercise electrocardiography and magnetocardiography for detection of coronary artery disease using ST-segment fluctuation score[J]. *Clin Hemorheol Microcirc*, 2019, 73(2): 283–291.
- [ 53 ] Wu YW, Lin LC, Tseng WK, et al. QTc Heterogeneity in rest magnetocardiography is sensitive to detect coronary artery disease: in comparison with stress myocardial perfusion imaging[J]. *Acta Cardiol Sin*, 2014, 30(5): 445–454.
- [ 54 ] Chang YC, Wu CC, Lin CH, et al. Early myocardial repolarization heterogeneity is detected by magnetocardiography in diabetic patients with cardiovascular risk factors[J]. *PLoS One*, 2015, 10(7): e0133192.
- (原文转载于《中国心血管病研究》2025 年 10 月第 23 卷第 10 期)