体表胎心电信号提取技术的研究进展及展望

刘锦群 刘雪敬 陈德伟
深圳市理邦精密仪器股份有限公司 广东 深圳 518000

摘 要 胎儿心电图（fECG）是围产期胎儿心率监护和动态心电监测的关键手段，能有效评估胎儿健康状况。然而，经孕妇腹壁采集的体表胎心电信号极其微弱，且易受母体心电及多种噪声干扰，导致其无创提取面临巨大挑战。目前临床多依赖破水后侵入性头皮电极获取信号，限制了fECG的广泛应用。本文系统综述体表胎心电信号提取技术的研究进展，重点从采集系统（电极布局、导联方式）和识别算法（传统信号处理与智能算法）两个维度进行剖析。分析表明，结合多导联系统与智能算法能有效提升信号质量，但电极部署缺乏标准化、算法依赖高质量数据集等仍是当前主要技术瓶颈。文章最终指出，融合柔性电子技术、多模态数据与人工智能的穿戴式多模态智能监测系统是未来实现胎儿健康精准评估的必然趋势，而信息化技术的深度融合也将推动胎心电监测向智能化、远程化和个性化方向发展。

关键词 体表胎心电；胎心电提取；多源异构；可穿戴设备；信息化处理

Research Progress and Prospects of Fetal Electrocardiogram Extraction Techniques from Abdominal Signals

Liu Jin-qun, Liu Xue-jing, Chen De-wei
Edan Instruments,Inc, Shenzhen 518000, Guangdong Province, China

Abstract: Fetal electrocardiogram (fECG) is a crucial method for monitoring fetal heart rate and dynamic cardiac activity during the perinatal period, effectively assessing fetal health status. However, fECG signals acquired non-invasively from the maternal abdominal surface are extremely weak and susceptible to interference from maternal ECG and various noises, posing significant challenges for extraction. Currently, clinical practice largely relies on invasive scalp electrodes after membrane rupture, limiting the widespread application of fECG. This paper systematically reviews the research progress in techniques for extracting fetal ECG from abdominal signals, focusing on two key dimensions: acquisition systems (electrode layout and lead configuration) and recognition algorithms (traditional signal processing and intelligent algorithms). The analysis indicates that combining multi-lead systems with intelligent algorithms can effectively improve signal quality. However, the lack of standardization in electrode deployment and the dependence of algorithms on high-quality datasets remain major technical bottlenecks. The paper concludes that wearable, multimodal intelligent monitoring systems integrating flexible electronics, multimodal data, and artificial intelligence represent the inevitable trend for achieving precise fetal health assessment in the future. Furthermore, the deep integration of informatization technologies will promote the development of fetal ECG monitoring toward intelligence, remote capability, and personalization.

Key words Fetal Electrocardiography (fECG); Fetal ECG Extraction; Multi-source Heterogeneity; Wearable Devices; Information Processing

胎儿健康监护对评估胎儿自主神经发育、宫内生长状况以及缺氧、窘迫等异常至关重要，是降低围产期死亡率和实现优生优育的关键。基于孕妇腹壁体表获取的胎心电图（fECG），因其无创、无辐射、可连续监护等优势，日益受到重视。研究表明，多电极采集方式对孕妇体型和体位改变敏感度较低，其在信号准确性和可靠性方面甚至优于超声多普勒技术[1]。

fECG不仅能提供胎心率信息用于CTG分析，其波形中的P-QRS-T等细节，更是评估胎儿心脏功能及自主神经系统发育状况的重要依据。随着可穿戴设备技术的发展，无创胎心电监测的应用前景愈发广阔[2-3]。然而，体表fECG信号强度通常仅为母体心电信号的1/10至1/50，且叠加于母体心电之上，易受肌电、工频等噪声干扰，提取难度大。此外，采集系统设计和识别算法性

[基金项目] 深圳市科技创新局国际合作研究项目，项目名称：基于母胎体表电生理的CTG智能分析产品研发与临床应用研究，项目编号：GJHZ20240218114608015。

能直接影响fECG波形分析的准确性和临床使用的安全性。因此fECG信号提取一直是医学信号处理领域的热点与难点。

本文系统梳理体表胎心电信号提取的研究现状，重点从采集系统和识别算法两方面剖析当前技术瓶颈，并探讨信息化技术在提升胎心电监测效能方面的作用与未来发展趋势。

1 体表胎心电采集系统研究

高质量的胎心电采集系统需确保信号幅值大和稳定性高，除要求硬件设备具备低噪声、高共模抑制比等特性外，电极系统的合理布局也至关重要。目前采集系统主要有单导联和多导联两类。单导联方式操作简便、传感器数量少，但所获信号信噪比低，母胎成分与噪声混杂，提取精度有限。多导联方式通过在母体腹部布置多个电极（通常为4～16个），同时采集多路信号，提供更丰富的信息，有利于后续信号分离。例如，法国格勒诺布尔大学Sameni等人基于心脏电偶极子模型建立了多通道ECG仿真模型，为多胎等复杂情况的算法研究提供了基础。

然而，电极数量增加会降低孕妇舒适度与临床操作便捷性。因此，在确保信号质量的前提下优化电极数量和布局，是实现可穿戴胎监设备的核心挑战。孕早期孕妇腹部可视为均匀分布的导体，可从多处获取强度相近的胎心电波，但随着孕周增加，胎脂增厚和胎儿生长等因素改变信号传播路径，导致从不同位置采集到的信号差异显著。

针对上述问题，埃因霍温理工大学Rooijakkers等人系统研究了电极放置距离及角度对不同孕期信号质量的影响。塞格德大学Peterfi等人发现，当活动电极方向与胎儿躯干轴向垂直时能捕获到最大胎儿R波。都柏林大学Keenan等人则强调，最佳电极位置取决于胎儿心脏位置和心电轴方向。

理想的电极布局应参考胎儿心脏位置，将测量电极置于其两侧并与心电轴方向对齐，同时在水平与垂直方向合理分布电极，以兼顾信号强度、信噪比和孕妇舒适度，为多通道信号融合分析奠定基础。而信息化技术在采集系统的优化中也将发挥非常重要的作用，例如，基于物联网的智能采集设备可实时监测电极接触状态与信号质量，并通过无线传输技术将数据发送至云端或本地处理单元，实现数据的连续采集与远程监控。未来，基于大数据分析的电极布局优化算法有望通过分析多中心数据，为不同孕期、不同体型的孕妇提供个性化的电极布置方案。

2 体表胎心电提取算法研究

2.1 传统胎心电识别算法

传统算法主要基于信号本身的数学特性或统计特性进行分离。①差分阈值法（DTA）：以Pan&Tompkins算法为代表，基于QRS波群的斜率变化进行检测，速度快但易受噪声和T波干扰，漏检率较高。②小波变换（WT）：利用不同时间尺度下母胎心电、噪声信号的特征差异，有效抑制噪声，提取高精度信号，但相比DTA，抗高频噪声干扰能力更优但计算量较大。③经验模态分解（EMD）：自适应地将非平稳信号分解为多个本征模函数，通过剔除母体成分相关的模态来增强fECG。哈尔滨工业大学张森等人结合EMD和准周期成分提取方法[4]，有效重构了fECG，显示了其良好的自适应性和融合能力。④盲源分离：如ICA和PCA，假设多通道信号是若干独立源的线性混合，通过数学变换实现分离，常与其他算法结合实现母胎信号分离。

2.2 胎心电智能识别算法

近年来，机器学习和深度学习的应用显著提升了胎心电检测的精度与鲁棒性[5]。

支持向量机（SVM/LS-SVM）：西蒙玻利瓦尔大学Delgado等人结合WT法与SVM进行胎儿QRS波定位，识别率为89.59%。杭州电子科技大学张扬对fECG提取特征参数后采用LS-SVM降低计算复杂性。此类方法在小样本下表现稳定，解释性强，适用于特征明显、数据量有限的离线分析，但依赖特征工程，对大规模数据集效率较低。

随机森林（RF）：杭州电子科技大学钟伟等人提出基于前缀树决策框架的RF算法，实现从混合信号中直接检测fECG。密苏里大学Nagendra等人的对比研究表明，SVM和RF在预测胎儿状态的准确率均超过96%。RF能处理高维特征，抗过拟合能力强，适用于多通道、多特征的QRS波群分类，但模型训练和预测的耗时长。

深度学习：神经网络是最早的深度学习方法，其中卷积神经网络（CNN）能自动特征学习，对波形形态变化鲁棒性强。光云大学Lee等人采用CNN直接从混合信号中检出胎儿QRS波。伊诺努大学Comert等人引入迁移学习，并结合CNN对fECG进行检测，缩短训练时间，提升模型泛化能力。杭州电子科技大学叶明珠等人将迁移算法与SVM结合[6]，在fECG异常检测准确度为97.9%。深度学习虽性能卓越，但对数据量与算力要求较高。

智能识别算法各具优势，未来趋势将是根据实时性、数据量等具体需求，融合多种算法以实现性能与可靠性的平衡。信息化技术在此过程中也将发挥关键作用，例如，云计算平台可提供强大的算力支持，满足深度学习模型训练与推理的需求；边缘计算则可在本地设备上实现实时信号处理，降低数据传输延迟；自动化机器学习技术有望进一步降低算法开发门槛，提

升模型优化效率。

2.3 多通道融合分析

多通道融合技术通过联合多个导联的信息或结合多种检测方法，提高检测灵敏度与准确性。

重庆大学团队在多通道融合技术做了大量研究[7]：叶昌荣从多源传感器决策级信息融合角度出发[8]，提出基于分解和重构的多通道融合估计方法；韩亮等人结合多路支持向量回归机与时频盲源分离[9]，有效抑制母体ECG，得到fECG的最优估计，取得了在可视化和信噪比指标上均优于传统方法的效果。此外，谢里夫理工大学Ghaffari等人基于噪声分布和胎儿R波波峰可见度对信道进行智能评分和最佳信道筛选，提高胎心率提取效率。

然而，当噪声干扰严重时，融合决策效果仍可能不理想，信息技术可为多通道融合提供新的解决方案。基于分布式计算框架的多通道数据并行处理技术可显著提升融合算法的执行效率；数据挖掘方法能够从海量多通道数据中发现潜在规律，优化融合策略；多模态学习技术则可将胎心电信号与心音、宫缩压等其他生理信号相结合，构建更全面的胎儿健康评估模型。未来，随着多中心、大样本数据的积累，基于联邦学习的跨机构协作模型训练有望在保护数据隐私的前提下，进一步提升融合算法的泛化能力与可靠性。

3 挑战及展望

虽然胎心电技术已取得长足进展，但仍面临以下挑战与发展机遇：①当前设备存在笨重、电极部署不统一等问题。借助柔性电子与纳米材料，可开发轻便舒适的可穿戴设备，结合5G/6G通信与区块链技术，实现数据安全、实时的远程监测。数字孪生技术可为个性化监测提供虚拟模型支持[10-11]。②需融合传统与智能算法，提升信号提取效率。目前缺乏高质量母胎心电数据库，亟须建立标准数据库。通过云存储、数据湖及智能化标注工具，可实现多源数据的规范管理与高效利用。③多模态智能评估系统构建：应整合心电、影像学、遗传基因等多源信息，利用AI技术建立多模态胎儿健康智能评估系统。基于多模态融合的智能评估模型可综合考虑多种生理参数，提升评估准确性；可解释AI技术可增强模型决策的透明度，提升临床可信度；实时预警系统可根据监测数据动态调整风险评估结果，为临床干预提供及时参考。

4 结束语

体表胎心电信号提取技术正朝着高精度、智能化与可穿戴化方向快速发展。通过创新性开发可穿戴式采集系统、建立标准数据库、优化多模态融合算法，fECG技术有望为围产期胎儿健康监护及智能评估提供更可靠的技术支持。信息化技术的深度融合将进一步推动胎心电监测向智能化、远程化和个性化方向发展，具体体现在：基于物联网的智能采集系统实现数据实时获取与远程监控；云计算与边缘计算提供强大算力支持；人工智能算法实现信号智能处理与风险评估；区块链与联邦学习确保数据安全与跨机构协作。未来，随着技术的不断成熟与临床应用的深入，fECG监测有望在围产期保健中发挥更重要的作用，为提升母婴健康水平提供有力技术支持。

参考文献

[1]许琦,蒋优优,刘国莉.胎儿心电监测的研究与临床实践应用[J].中国妇产科临床杂志,2025,26(3):193-195.

[2]岳永飞,陈晓慧,王蕊.穿戴式胎儿心电监护仪在非产时的应用价值[J].中国医药科学,2022,12(7):113-115,149

[3]吴军.胎心电监测国内外现状研究综述[J].中国医疗设备,2017,32(7):106-109

[4]张淼,魏国.多通道胎儿心电提取的经验模态分解和准周期成分提取方法[J].工程科学与技术,2020,52(6):223-233.

[5]郝婧宇.胎儿心电信号检测算法的研究进展[J].医疗卫生装备,2021,42(6):90-96,102.

[6]叶明珠,赵治栋.基于迁移学习和支持向量机的胎心率分类方法[J].杭州电子科技大学学报(自然科学版),2020,40(3):14-18,43.

[7]李勇明.面向孕妇远程监护的智能信息处理方法研究进展综述[J].生物医学工程学杂志,2020,37(5):910-917.

[8]叶昌荣.微伏级T波交替多通道融合检测与估计研究[D].重庆:重庆大学,2018.

[9]韩亮,蒲秀娟,刘茜.结合多路v-SVR与TFBSS的胎儿心电信号提取[J].仪器仪表学报,2015,36(6):1381-1387.

[10]周金利.织物基可穿戴心电电极的研究进展[J].现代纺织技术,2025,33(4):92-104.

[11]郑莉君.医疗信息化通信中的数据安全与隐私保护研究[J].中国宽带,2025,21(12):94-96.

（本文编辑 王 冬）

