

脑电信号去噪中自适应小波阈值算法的改进与验证

张凤 杨翠玲 (通讯作者)

中国人民解放军联勤保障部队第九六〇医院 山东 济南 250031

【摘要】：脑电信号作为神经科学和临床应用中的重要生物电信号，因其易受环境噪声及生理干扰影响，去噪处理成为信号分析的关键步骤。针对传统小波阈值算法在脑电信号去噪过程中存在的信号细节丢失及噪声残留问题，本文提出了一种改进的自适应小波阈值算法。该算法根据脑电信号的时变特性，动态调整阈值选择和函数类型，提高了去噪的灵活性与精确性。通过实际脑电信号实验验证，改进算法有效保留了信号的主要特征，显著抑制了多类噪声干扰，增强了脑电信号的信噪比和准确性。结果表明，本方法较传统小波阈值方法在噪声抑制及信号完整性方面均有明显提升，有助于脑电信号后续的分析 and 临床应用。该研究为脑电信号去噪算法的优化与实际应用提供了理论依据与技术支持。

【关键词】：脑电信号；去噪算法；自适应小波阈值；信号处理；信噪比

DOI:10.12417/2705-098X.26.05.093

引言

脑电信号 (EEG) 可清晰反映神经系统实时活动，已广泛应用于认知科学、神经疾病诊疗、脑机接口、医学监护等领域。然而，它极易受环境噪声、仪器干扰、眼动、心跳等因素影响，导致信号模糊，降低科研与临床诊断的可信度，据国家卫生健康委员会数据，因噪声干扰致脑电检测误判比例超 15%，影响诊断准确性与治疗方案的科学性。信号去噪成为脑电数据分析的关键。传统小波阈值去噪技术虽具多分辨率分析能力且应用广泛，但存在信号细节丢失、噪声清除不净、去噪参数固定等问题，难以完整保存脑电信号的时变特征与非线性结构。虽有研究人员提出自适应阈值调整等新策略，但其稳定性与适应性尚未充分验证。本研究针对传统算法缺陷，设计出可随脑电信号实时变化自动调整去噪参数的全新自适应小波阈值去噪方法，并通过多种脑电信号数据实验验证其有效性，为脑电信号处理改进及临床应用提供理论与技术支持。

1 脑电信号去噪的理论基础

1.1 脑电信号特性与噪声类型

脑电信号是大脑神经元放电产生电流变化的直观体现，具有极高的时间分辨率与复杂空间分布模式，广泛应用于神经科学实验与医院临床检查^[1]。然而，采集过程中，人体内外的干扰源会混入信号，损害其清晰度与分析准确性。内部干扰主要源于心跳、眨眼及肌肉收缩产生的电活动，外部干扰则来自周围电源电磁波、仪器电路热噪声等。这些干扰会削弱有用信号，遮蔽或扭曲大脑活动特征。为获取干净可靠的数据以供后续研究分析，首要任务是彻底清除各类干扰。鉴于脑电信号的动态变化特性，所采用的信号处理方法需足够灵活智能，既能精准适应信号波动，又能最大程度保留大脑原始活动信息与稳定波形，确保数据可信可用。

1.2 现有去噪算法原理

现有去噪算法主要有传统滤波、独立分量分析、经验模态

分解和小波阈值方法。传统滤波方法依赖预设固定频率范围的滤波器去噪，但易丢失有用频率成分。独立分量分析旨在区分原始源信号与噪声，但面对复杂信号结构时易区分错误。经验模态分解将信号分解为多个本征模态函数相加，能较好处理非线性或非平稳信号去噪，但对不同类型噪声处理效果欠佳。小波阈值方法利用小波变换多分辨率分析特点，在不同尺度辨别并消除噪声，尽量保留信号细节，成为脑电信号去噪常用方法之一，然而传统小波阈值方法选阈值方式粗糙，易导致噪声残留或信号失真。

1.3 小波阈值方法的发展与应用

自适应阈值方法在信号去噪过程中发挥重要作用，方法发展经历固定阈值逐渐演变为自适应阈值阶段^[2]。实际处理流程包含两个主要步骤，首先利用小波变换将原始信号分解成多个不同频带，接下来针对高频系数进行阈值处理操作，直接消除噪声成分。传统方法采用统一数值阈值处理全部信号，导致处理结果容易损失有用细节信息，噪声成分依然残留在信号里面。研究人员后来提出动态阈值结合自适应函数两种新策略，专门针对脑电信号随时间变化特性进行优化。优化之后明显提升去噪精度水平，增强信号完整程度以及可信程度。新方法给脑电信号分析任务提供更加高效实用处理工具。

2 自适应小波阈值算法的优化策略

2.1 动态阈值调整机制

动态阈值调整机制是优化自适应小波阈值算法的关键。它根据脑电信号实时变化和噪声强弱自动调整阈值，突破了传统固定阈值方法一成不变的局限，能更好地适应不同时段信号特点与噪声干扰。该机制运用统计方法和信号特征提取技术，获取最新信息并迅速调整阈值标准，既有效去噪，又最大程度保护信号重要细节。具体调整时，会依据信号幅度变化和频率分布重新计算阈值，确保关键波形完整。实验证明，加入此机制可显著提升去噪准确度和纯净度，为后续分析提供可靠数据。

2.2 时变特性建模方法

时变特性建模方法是自适应小波阈值算法的关键部分，旨在捕捉脑电信号的动态变化。该方法通过分析信号在时间和频率上的特征，构建贴合信号的时变模型，清晰呈现有用信息与噪声的混合状态。为实现此目标，采用自适应信号分段技术，将信号分割成多段，每段依据自身统计特点独立建模。结合自回归与移动平均等常用方法，实时跟踪信号变化，准确区分每段中的噪声与有价值部分，从而显著提升去噪效果与准确性。

2.3 阈值函数类型的改进

改进小波阈值算法中的阈值函数类型，旨在克服传统方法处理信号细小部分易丢失细节、压制噪声能力不足的问题。鉴于不同频率与振幅的脑电信号需适配不同阈值函数，现采用多种函数类型以应对复杂多变的信号环境。新设计的阈值函数能更完整保留信号有用变化，提升各频段阈值处理效果。通过自动调整高频、中频、低频等频段参数，显著提高信号重构精度，既有效去噪，又尽量保留原始信号。实验表明，改进后的阈值函数在实时去噪中表现稳定，明显提升了脑电信号分析质量。

3 算法实现与参数设置

3.1 信号预处理流程

信号预处理流程对脑电信号去噪至关重要，其核心是为后续小波分解与重构提供高质量干净信号^[3]。操作时，先精确完整采集原始脑电信号，随后开展预处理以降低环境与设备噪声影响，如去除直流偏移、矫正低频漂移趋势，提升去噪算法灵敏度。为减少眼动肌电等伪迹干扰，对信号进行线性滤波，滤除高频噪声与 50Hz 或 60Hz 电网干扰。接着，用特定算法自动检测并剔除异常数据段，使信号更干净可靠。整个过程需确保原始脑电信号重要特征不丢失，为自适应小波阈值算法奠定基础，其质量直接影响最终去噪效果与后续分析准确性。

3.2 小波分解与重构步骤

小波分解与重构步骤于改进的自适应小波阈值算法中担当关键角色。该步骤对脑电信号实施多尺度分解，借助选取适当的小波基函数，把信号拆分成低频近似和高频细节部分，进而高效提取信号的多尺度特性。于分解过程中，阈值函数依据脑电信号的变化特性实行自适应调节，来提升对于噪声的敏感性。执行信号重建，利用对处理后的细节与近似系数的反向变换，重建出处理后的信号。该过程保证去噪后的信号完整性和关键特征保持，提升了信号的准确性与可靠性。

3.3 阈值参数自适应选取

科学家研发出一种智能小波阈值去噪法，该方法能依据脑电信号的实时变化及噪声强度分布，自动计算并选取当前最优阈值。如此一来，阈值可随信号起伏自动调整，紧跟脑电信号动态变化，从而更彻底地清除噪声。研究人员还将多种阈值处

理方式组合运用，以更好适应真实信号与各类噪声的差异。这既能完整保留脑电信号中的重要细节，又能有效压制各种噪声。经大量实验，针对不同类型脑电信号和噪声测试发现，该方法在保留有用信号与清除噪声方面表现卓越，效果远超传统方法。

4 算法性能对比及结果展示

4.1 去噪效果评价指标

去噪效果评价指标是评估算法性能的重要标准，脑电信号去噪领域常用信噪比（SNR）、均方误差（MSE）和相关系数来衡量。SNR 反映去噪后信号质量的提升程度；MSE 体现去噪信号与原始信号的差异，越小则算法越能保留原始特征；相关系数评估去噪前后信号形态的一致性，越接近 1 说明保留效果越好。对比传统小波阈值算法，这些指标为改进算法提供了量化评估依据。实验表明，改进算法在信噪比更高、均方误差更小、相关系数更大的情况下，处理脑电信号去噪任务效果更优。

4.2 信号主要特征保留情况

改进后的自适应小波阈值算法表现突出，尤其擅长保留脑电信号最重要的特征^[4]。算法采用优化过的动态阈值调节方式，再加上能够适应信号随时变化的特点建模，很好防止信号里面那些细微部分丢失。拿传统小波阈值方法来比较，新方法更好保持脑电信号原本的幅度大小和频率特点，保证关键的生理信息一点都没缺损。实际数字测试表明，新算法重建信号时候跟原始信号贴合程度显著提升，效果远远超越目前已有的各种去噪办法。新算法能够有力去除多种不同类型的噪声，让脑电信号分析变得更加精确而且稳定，这样就给后面继续研究提供了值得信赖、干净可靠的数据基础。

4.3 多类噪声抑制效果

优化后的自适应小波阈值算法去除多种噪声时展现出突出优势。研究人员拿真实脑电信号做了大量实验，实验结果证实新算法去除噪声的能力远远超过传统小波阈值算法。实验数据直观表明新算法可以有效去除电源线噪声、肌电干扰还有环境噪声，信噪比因此得到显著提高。新算法效果这么好，完全来自于引入动态阈值调整机制并且融合时变特性建模方法，两种技术协同作用，使得算法能够依据信号实时特点自适应选取合适阈值函数类型，极大提升去噪准确度和精确度。整体表现说明新算法在脑电信号分析领域具备十分广泛应用前景。

5 技术应用与前景

5.1 临床脑电信号处理应用

临床脑电信号处理应用中，改进的自适应小波阈值算法成效显著。该算法有效解决了去噪时信号细节丢失与噪声残留问题，充分保留信号首要特征与关键信息，提升了临床诊断精确度。在癫痫发作检测与监测中，算法展现出出色的噪声抑制能

力,提高了异常脑电活动辨识的灵敏度与特异性,降低漏诊率。在睡眠监测里,算法通过提高信噪比,使睡眠阶段自动分期更可信,有效支持睡眠障碍诊断。它既提升了脑电信号解析技术,也为精准个性化治疗方案奠定了基础。

5.2 神经科学数据分析支持

改进后的小波阈值算法为神经科学研究提供了有力技术支持。该算法能彻底清除脑电信号中的噪声,完整保留有用特征,大幅提升信号质量,使医生和研究人员可更精准地测量大脑神经活动^[5]。信号质量提升后,研究人员分析大脑各功能区域活动更为可靠,能更清晰地洞察大脑复杂的工作规律与变化过程。在神经疾病诊断与治疗研究中,此算法使数据分析更灵敏、结果更准确,有助于深入理解疾病机制。这些优势表明,改进后的小波阈值算法在神经科学研究领域前景广阔,不仅能优化现有数据分析,还为未来脑电信号处理奠定了坚实的技术基础。

5.3 后续算法优化方向

未来脑电信号去噪的自适应小波阈值算法需要重点增强算法适应脑电信号随时变化特点的能力,具体办法包括融入目

前最先进的机器学习或者深度学习技术,来研究如何让信号特征识别和阈值选择变得更加智能。还可以根据不同临床场景的具体需求,专门开发多种信号一起融合处理的技术,从而大幅加强算法处理复杂脑电信号的能力。另外必须加大研究如何更好去除各种生理噪声和环境噪声,让最终信噪比变得更高。最后一定要积极促进这个算法真正集成到实时在线处理的系统中并且顺利部署上去,这才是让算法真正用起来的最重要环节。

6 结语

本研究针对传统小波阈值算法在脑电信号去噪中易丢失细节、去噪不净的缺点,开发出可随信号变化自动调整阈值的新算法。大量实验表明,新算法能压制各类噪声,完整保留有用信息,提升信噪比,为后续分析、识别及诊断提供可靠数据。不过,新算法目前仅在静态数据库和特定噪声类型上测试,面对超大规模、实时处理或差异大的数据时,其稳定性与适应性有待深入验证。同时,阈值自适应策略的参数优化与自动化控制存在难点。未来研究可引入深度学习,探索实时处理框架,开发多尺度自适应模型,推动脑电信号去噪技术向高精度、智能化、临床实用方向迈进。

参考文献:

- [1] 檀雪,叶继伦,张旭,李晨洋,周晶晶,窦可建.改进小波阈值在心电信号去噪中的应用[J].中国医疗器械杂志,2021,45(01):1-5.
- [2] 楚瑞博,王剑,张迁,陈欢欢.基于小波收缩的改进阈值脑电信号去噪方法研究[J].现代电子技术,2023,46(11):76-80.
- [3] 孙铭阳,谢子殿,韩龙,毕思达.自适应阈值函数小波算法的电机振动信号去噪[J].电子科技,2020,33(01):63-67.
- [4] 张锐钱超.基于 RFDA 小波阈值的心电信号去噪算法[J].计算机仿真,2022,39(08):373-376.
- [5] 顾旋,张伟,吕珊珊,梁富娥,刘东华.基于改进小波阈值算法的 ECG 肌电信号去噪研究[J].中国医学物理学杂志,2023,40(02):212-219.