

基于肌电反馈的肌肉电刺激系统设计与实现

闪博

上海体育大学 运动健康学院

DOI:10.12238/bmtr.v7i2.13366

[摘要] 肌肉电刺激技术在康复医学和运动科学领域应用广泛,实现个性化电刺激成为研究重点。本研究设计并实现了一种基于肌电反馈的肌肉电刺激系统。该系统以树莓派为主控制器,集成肌电信号采集、电刺激模块及模糊控制算法。通过肌电传感器采集表面肌电信号,经预处理后计算样本熵量化肌肉疲劳度,再运用模糊控制算法,根据疲劳度动态调节电刺激的频率和强度,实现个性化的肌肉康复与训练。实验显示,该系统可有效识别肌肉疲劳状态,实时调整电刺激参数,显著提升了肌肉电刺激的精准性和个性化程度。此研究为智能康复设备和运动训练系统提供创新方案,应用前景广阔。

[关键词] 肌肉电刺激; 表面肌电信号; 疲劳监测; 树莓派; 个性化康复

中图分类号: R322.7+4 **文献标识码:** A

Design and implementation of a muscle electrical stimulation system based on EMG feedback

Bo Shan

School of Sports and Health, Shanghai Sports University

[Abstract] Muscle electrical stimulation technology is widely used in the field of rehabilitation medicine and exercise science, and realizing personalized electrical stimulation has become the focus of research. In this study, a muscle electrical stimulation system based on EMG feedback was designed and implemented. The system uses Raspberry PI as the main controller and integrates EMG signal acquisition, electrical stimulation module and fuzzy control algorithm. Surface EMG signals are collected by the EMG sensor, and the sample entropy is calculated after pretreatment to quantify the muscle fatigue degree. Then, the fuzzy control algorithm is used to dynamically adjust the frequency and intensity of the electrical stimulation according to the fatigue degree, so as to realize personalized muscle rehabilitation and training. The experiment shows that the system can effectively identify the muscle fatigue state, adjust the electrical stimulation parameters in real time, and significantly improve the accuracy and personalization of the muscle electrical stimulation. This research provides innovative solutions for intelligent rehabilitation equipment and sports training system, and has broad application prospects.

[Key words] muscle electrical stimulation; surface EMG signal; fatigue monitoring; Raspberry PI; personalized rehabilitation

引言

随着全球人口老龄化,以及环境和生活方式等因素的影响,神经系统疾病的发病率显著上升。全球疾病负担研究数据显示,至2021年全球已有34亿人受到神经系统疾病的影响,造成的4.43亿健康寿命损失年,已成为全球疾病负担的首要原因^[1]。神经系统疾病常伴随运动功能障碍,严重影响患者的生活质量。运动功能障碍通常由神经、肌肉或骨骼系统的损伤引起,表现为动作迟缓、肢体瘫痪、运动不协调等,严重时可能导致完全丧失运动功能^[2-4]。肌肉电刺激(Electrical Muscle Stimulation, EMS)作为一种非侵入性治疗方法,因其在预防肌肉萎缩、增强肌肉力量及恢复运动功能方面的显著疗效,已广泛应用于运动功能障

碍的康复治疗中^[5]。

传统EMS多采用开环被动刺激模式,参数优化不明确,易导致肌肉疲劳,甚至二次损伤^[6]。生物反馈电刺激将生物反馈疗法与EMS结合,将生理信号作为反馈量,调节EMS参数^[7]。其中,以表面肌电信号(Surface Electromyographic Signal, sEMG)为反馈量,调节刺激参数的应用策略最为广泛。sEMG是肌肉活动过程中,由支配肌肉的神经电信号传导至皮肤表面产生的电生理信号,能够有效反映肌肉的运动状态^[8]。肌电反馈型电刺激主要有三种类型,第一种是人工调节型,根据sEMG特征值进行手动调节,参数调节不精确;第二种是阈值触发型,当sEMG信号达到设定阈值时触发刺激,人体容易适应节律导致肌肉疲劳;第三种是动态

跟随型,可以实时根据sEMG调整刺激强度,但反馈参数比较单一,无法全面反映复杂的肌肉活动状态,且缺乏疲劳检测^[9]。因此,本研究旨在通过多维度的sEMG特征分析,建立肌肉电刺激参数与肌肉状态之间的动态映射关系,并设计一种自适应调节的EMG闭环刺激策略,以提高肌肉电刺激系统的个性化和智能化水平。

1 肌电反馈型肌肉电刺激系统设计

本系统硬件部分功能是在采集人体表面肌电信号并输出电刺激信号,硬件部分由四个主要模块组成:电源模块、肌电采集模块、肌肉电刺激模块、树莓派主控模块。系统框图如图1所示。树莓派单片机作为核心控制模块,负责数据处理与控制。肌电采集模块实时获取sEMG信号,并通过AD7606模数转换器将模拟信号转化为数字信号。电刺激信号通过肌肉电刺激模块输出,精确刺激目标肌肉群。此外,系统配备的人机交互界面可让用户实时调整电刺激参数并控制治疗过程。各模块通过SPI协议进行高效的数据通信,电源管理模块为系统的稳定运行提供电源支持。模块化设计使得系统具备高度的灵活性和可扩展性,便于根据不同需求进行优化和升级。

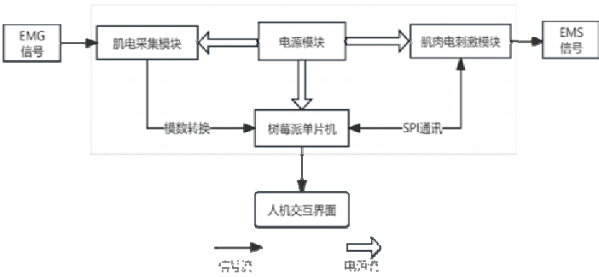


图1 肌电反馈型肌肉电刺激系统总体框图

本系统肌电采集模块采用EPC001G100,系统噪声1 μ V,分辨率2 μ V,能够准确捕捉微弱的肌电信号。模组通频带范围为10Hz至500Hz,有效滤除低频噪声及工频干扰。内置50Hz陷波滤波器进一步增强了信号的稳定性和可靠性^[10]。肌电采集模块输出经过模数转换,通过SPI接口与主控制器进行数据传输,采集结果可通过上位机显示和记录。肌肉电刺激模块的核心控制单元是EE9002,负责生成脉宽调制(PWM)信号,通过驱动功率放大器,调节电压输出大小,确保刺激信号的稳定性。刺激输出电路由升压电路、控制和输出电路组成。

2 肌电反馈刺激策略

对于系统采集到的原始肌电信号,首先用10Hz~500Hz带通滤波,去除低频漂移和高频噪声,再利用50Hz陷波滤波器消除工频干扰。预处理后的肌电数据以3秒为一个周期,采集目标肌群sEMG并提取特征。本系统选择肌电均方根振幅(Root Mean Square, RMS)及结合非线性特征参数样本熵的特征Q值来作为反馈量。RMS值体现肌电信号幅度的变化特征,可以反映神经肌肉放电的有效值,间接反映肌肉力量^[11]。特征值Q是肌电样本熵值与积分肌电的比值,可以反映出肌肉疲劳程度^[12]。一般认为,特

征值Q低于50%初始值,RMS值低于60%初始值,则表明刺激部位肌肉疲劳,需要降低刺激强度和频率。通过对特征值的分类,判断出当前肌肉状态,从而作为反馈量调节肌肉电刺激输出参数。

3 系统功能验证

为了验证系统功能是否达到设计要求,用示波器对电刺激模块的输出参数进行了测试。将一千欧姆电阻模拟人体皮肤阻抗,接在电刺激模块输出端。示波器对输出波形进行了测试,电刺激模块共有3种不同输出频率,6档不同的输出强度。系统参数表如表1所示。

表1 电刺激模块输出参数表

强度 频率	1 级	2 级	3 级	4 级	5 级	6 级
8Hz	13.6	20.4	25.7	31.8	35.6	41.6
20Hz	13.6	19.7	24.2	29.5	29.5	34.1
50Hz	12.1	18.2	22.7	27.3	30.3	32.6

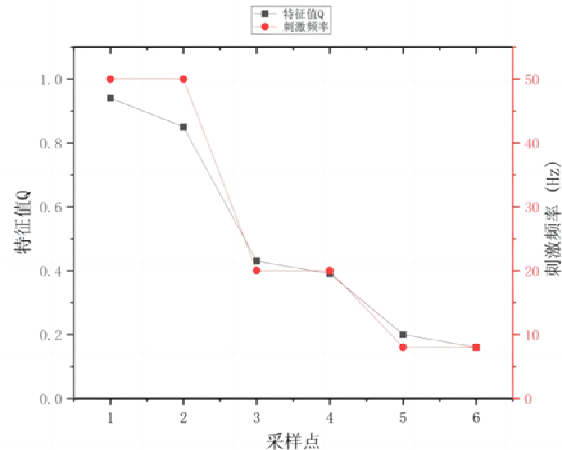
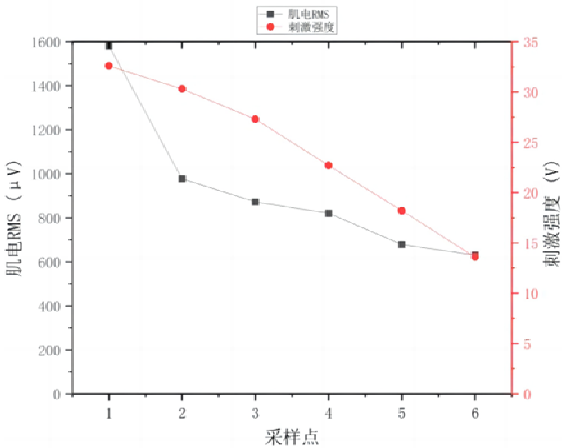


图2 刺激强度及频率随肌电特征值变化

为了对系统肌电反馈功能进行测试,对一名成年健康受试者进行实验,刺激部位为上臂肱二头肌。首先采集刺激部位最大自主收缩(MVC)状态下的表面肌电信号为1670 μ V。随后分别不同程度发力,测试电刺激参数的动态跟随变化,记录刺激频率与

强度大小。电刺激频率与强度随表面肌电RMS值与Q值变化如图2所示。

图2展示了刺激强度随着肌电 RMS值以及刺激频率随特征值Q的变化关系。可见随着RMS值下降,刺激强度也呈下降趋势。随着肌肉疲劳,特征值Q逐渐下降,刺激频率也随之降低。当频率和强度都达到最小值时系统停止刺激输出。这表明肌肉电刺激模块能够依据肌电 RMS 和特征值Q的动态变化,相应地调整刺激强度和频率,避免肌肉疲劳,实现根据肌电信号动态调控刺激参数的设计目标。

4 结论

本研究成功设计并实现了基于肌电反馈的肌肉电刺激系统。硬件采用模块化设计,各模块协同运作,肌电采集模块精准采集信号,肌肉电刺激模块稳定输出刺激信号,树莓派主控模块负责处理与控制,人机交互界面便于操作。软件通过特定策略判断肌肉状态并调整刺激参数。功能验证实验中,示波器测试显示电刺激模块输出稳定,符合设计要求。人体实验表明,系统能依肌电变化实时调整刺激强度和频率,有效识别肌肉疲劳,大幅提升肌肉电刺激精准度与个性化水平。该系统在肌肉康复领域应用潜力大,未来有望广泛应用于临床康复和运动科学研究,助力患者恢复运动功能、提高生活质量,推动相关领域技术进步。

[参考文献]

[1]STEINMETZ J D, SEEHER K M, SCHIESS N,et al. Global, regional,and national burden of disorders affecting the nervous system,1990–2021:a systematic analysis for the Global Burden of Disease Study 2021[J]. The Lancet Neurology, 2024, 23(4):344–381.

[2]李建平,陈生弟,王刚.功能性神经系统疾病150年[J].中国现代神经疾病杂志,2023,23(1):58–61.

[3]Stroke prevalence, mortality and disability-adjusted life years in adults aged 20–64 years in 1990–2013: data from the Global Burden of Disease 2013 Study、EB].[2024].

[4]李欣然,李瑞青.神经肌肉电刺激在脑卒中后运动障碍中的研究进展[J].中山大学学报,2024,45(2):180–189.

[5]马丹丹,李世云,祖晓珊,等.神经肌肉电刺激在老年人下肢肌力改善中的应用研究进展[J].河南医学研究,2021,30(34):6525–6528.

[6]王新宇.基于肌电反馈的功能性电刺激调控策略研究[D].燕山大学,2024.

[7]王庭槐.生物反馈及其机理进展[J].医学信息,2002(10):610–614.

[8]葛志鹏.便携式生物反馈电刺激仪控制系统的研究[D].大连理工大学,2022.

[9]陈小月,郭旭东,郝又国.参数自适应调节的肌电反馈式电刺激仪的设计[J].上海理工大学学报,2023,45(4):371–378.

[10]谭文波.基于表面肌电的肌电生物反馈训练与治疗系统设计[D].华南理工大学,2020.

[11]LIN M, HUANG J, FU J, et al. A VR-Based Motor Imagery Training System With EMG-Based Real-Time Feedback for Post-Stroke Rehabilitation[J]. IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering,2023,31:1–10.

[12]王琳,张陈,王宏,等.基于生物力学分析Q值对颈肌疲劳的反映效果[J].仪器仪表学报,2017.

作者简介:

闪博(1998—),男,回族,河北张家口人,在读硕士研究生,从事智能医学工程研究。