

基于力和角度实时采集的踝泵运动监测系统 设计

周彬¹, 华云松¹, 王伟^{2*}

¹上海理工大学光电信息与计算机工程学院, 上海

²海军军医大学第二附属医院骨科关节病区, 上海

收稿日期: 2025年1月3日; 录用日期: 2025年3月25日; 发布日期: 2025年4月3日

摘要

踝泵运动是一种临床患者进行血栓预防和康复训练的重要手段, 指导患者进行正确的踝泵运动不仅可以大大降低下肢静脉血栓栓塞的发生, 而且可以加快患者康复进程。目前, 实际康复治疗中, 由于缺乏对病人踝泵运动情况的有效监测, 在对康复训练过程和效果无法掌握情况下, 往往无法制定出最佳康复训练计划。因此, 本文设计了一种基于力和角度的踝泵运动实时监测系统, 来解决以上问题。该运动监测系统采用ESP32实时采集压力传感器和姿态传感器的数据, 同时利用无线方式发送到上位机, 在上位机通过对数据的相应处理, 得出踝泵训练过程中足底用力和踝关节角度变化情况。试验结果表明, 该监测系统通过采集力与角度的实时变化, 可以实现踝泵运动的有效监控。

关键词

踝泵运动, 力传感器, MPU6050, 实时监测, 上位机软件

Design of a Real-Time Monitoring System for Ankle Pump Exercise Based on Force and Angle Data Acquisition

Bin Zhou¹, Yunsong Hua¹, Wei Wang^{2*}

¹School of Optical-Electrical and Computer Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai

²Orthopedic Joint Ward, The Second Affiliated Hospital of Naval Medical University, Shanghai

*通讯作者。

文章引用: 周彬, 华云松, 王伟. 基于力和角度实时采集的踝泵运动监测系统设计[J]. 软件工程与应用, 2025, 14(2): 134-142. DOI: 10.12677/sea.2025.142013

Abstract

Ankle pump exercise is an important method for preventing thrombosis and promoting rehabilitation in clinical patients. Guiding patients to perform proper ankle pump exercises can significantly reduce the occurrence of lower limb venous thromboembolism and accelerate the recovery process. However, in current rehabilitation treatments, due to the lack of effective monitoring of patients' ankle pump exercise activities, it is often difficult to develop the optimal rehabilitation plan when the training process and outcomes are not well understood. Therefore, this paper designs a real-time monitoring system for ankle pump exercise based on force and angle, aiming to address the above issues. The system utilizes an ESP32 microcontroller to collect real-time data from pressure sensors and posture sensors. The collected data is wirelessly transmitted to an upper computer, where it is processed to analyze changes in plantar force and ankle joint angles during ankle pump exercises. Experimental results show that this monitoring system effectively monitors ankle pump exercises by capturing the real-time changes in force and angle.

Keywords

Ankle Pump Exercise, Pressure Sensor, MPU6050, Real-Time Monitoring, Upper Computer Software

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

踝泵运动是一种通过屈伸踝关节来增强小腿肌肉活动、促进下肢血液循环，避免血栓的同时恢复关节活动度的一种康复运动。对踝泵运动过程进行实时监控，对于踝关节康复治疗 and 下肢血栓的预防有重要的现实意义[1]-[4]。踝泵运动检测目前常采用手动量角器测量踝泵运动范围[5]、肌电图检测肌肉紧张程度[6]、光学运动捕捉系统测量角度变化[7]等方式进行测量，但上述技术都存在主观因素强、数据采集复杂和检测环境复杂等问题，不适合在日常康复训练中长时间使用。因此，踝泵运动最有效简单的检测方法主要是通过穿戴式传感器获取运动信息。但现有的设计系统仅监测单一数据类型(如力值[8]、力矩[9]和角度[10] [11])，缺乏与康复训练的结合，且对关节运动状态和受力情况的综合分析不足。

基于上述情况，本文设计了一种基于力和角度的踝泵康复运动监测系统，包括压力采集单元、惯性测量单元、ESP32-WROOM-32UE 控制核心与上位机软件。

2. 系统总体设计

本文设计了一种基于力和角度数据实时采集的踝泵运动监测系统，旨在提高运动监测的精度和效率。系统主要包括实时数据采集、无线数据传输和数据分析三部分，由左右脚各自独立的两个子系统组成，通过无线通信模块与上位机进行数据交互。其设计框图如图 1 所示。系统由足底压力和角度变化测量模块、控制核心和电源模块组成，结合实时无线数据传输和上位机处理，能够实现力与角度数据的精准同步采集与实时分析。

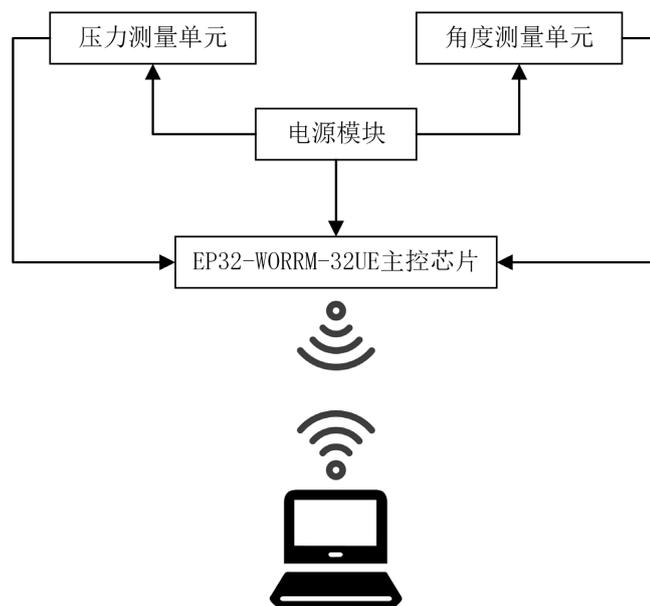


Figure 1. Block diagram of ankle pump motion monitoring subsystem
图 1. 踝泵运动监测子系统框图

3. 硬件部分设计

3.1. 主控与无线模块选择

系统采用 ESP32-WROOM-32UE 作为主控模块，该模块集成高性能 Wi-Fi 通信功能，支持灵活的硬件扩展与多传感器接入，能够满足系统的多样化需求。在无线通信方面，ESP32 通过支持 MIMO 技术和 UDP 协议，实现了高效、稳定的数据传输，尤其适用于医院复杂环境中的实时监测场景，确保数据传输的可靠性和完整性。此外，ESP32 具备低功耗特性，可在长期运行中有效延长设备续航时间，满足动态监测对稳定性和高效性能的要求。通过其强大的硬件性能和高扩展性，ESP32 为系统的实时监测、数据管理和长期应用提供了有力保障。

3.2. 实时压力检测模块设计

该模块选择电阻应变片式压力传感器，用于实时采集运动过程中的足底发力信息。相较于其他压力传感器，该传感器的对称结构设计在动态环境下能有效减少环境因素的干扰，从而确保在多角度受力条件下检测数据的稳定性和一致性。为了满足实时监测的需求，压力检测模块采用 HX711 数模转换芯片进行信号处理。该芯片具备 24 位高分辨率和 80 Hz 采样率，能够精准捕捉足底发力的细微变化，同时保障动态环境下的高频数据采集需求。传感器与数模转换芯片的结合，构建了系统实时、稳定的压力检测基础，为监测数据的准确性和可靠性提供了有力支持。

3.3. 实时姿态检测模块设计

姿态检测模块选用 MPU6050 传感器，凭借其集成的三轴加速度计与陀螺仪，能够高精度测量角度与姿态变化。该传感器内置的数字运动处理器(DMP)采用四元数算法，对加速度与角速度数据进行实时融合处理，有效降低动态环境下的数据噪声与测量误差，从而提升角度测量的稳定性和准确性。在实际应用中，MPU6050 无需依赖磁力计测量角度，即使在存在磁场干扰的康复训练环境中也能稳定工作，保障对患者踝关节运动的精准采样。其高精度的实时姿态数据为系统的动态监测和数据分析提供了可靠支持。

4. 软件设计

4.1. 下位机程序设计

踝泵运动的监测不仅表现出周期性，还具有显著的动态特性。为实时捕捉患者运动中的角度变化与发力信息，同时满足医疗康复设备对便携性与长时间稳定使用的要求，设计了下位机程序框架，如图 2 所示。

下位机开始运行时，首先完成各模块初始化后进入低功耗休眠模式，仅监测震动传感器信号。一旦检测到运动，系统立即唤醒并开始实时采集角度与压力数据。同时，程序对供电电压进行实时监控，当电压低于 3.1 V 时触发报警，确保设备运行的稳定性与安全性。针对压力传感器 24 位高分辨率、易受干扰的特点，程序采用中值滤波与平均滤波相结合的混合处理方法。该方法能够有效抑制突发性噪声干扰，同时在长时间监测中保持数据的平稳性与精度，确保系统在复杂动态环境下的高可靠性与实时性能。

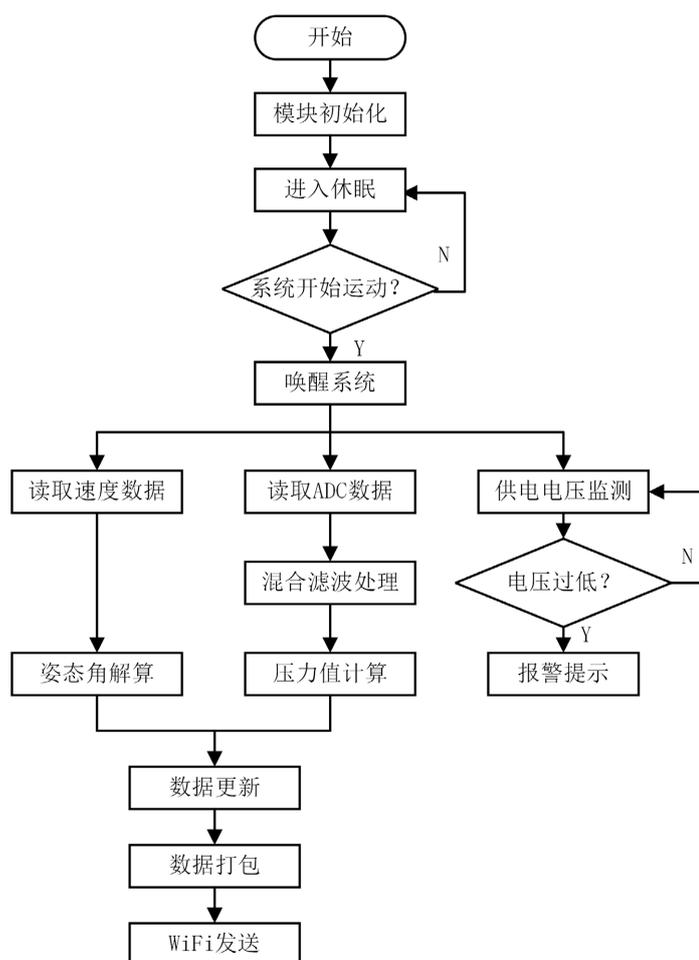


Figure 2. Lower computer program flowchart
图 2. 下位机程序流程图

4.2. 上位机设计

本研究中，上位机监护系统采用跨平台 C++ 应用程序开发框架 QT，在 Windows 平台上运行，实现了实时监视、数据分析等功能。系统实时接收传感器采集的角度与压力数据，通过数据分析监测踝泵运

动效果，并结合患者和医生信息进行有效管理。其工作流程如图3所示。

参考丁缪森等对踝泵运动的研究可知，在踝关节跖屈 $40^{\circ}\sim 50^{\circ}$ 范围内持续运动训练效果最佳[12]。因此，本系统将该角度范围设为关键阈值，用于判断运动是否符合标准。然而，目前针对踝泵运动中足底发力情况的研究尚不明确。为此，本研究在标记角度误差值的基础上，进一步融合角度与压力数据，对足底发力情况进行综合分析，从而实现运动效果的全面监测。

为了更加精确地评估踝泵运动的训练效果，本研究提出了一种基于滑动窗口的融合分析方法。系统设置每2秒为一个滑动窗口，采集该时间窗口内的压力与角度数据，通过分析数据波动评估其协调性。同时，实时调整压力和角度数据的权重，生成特征曲线供后续深入分析。该方法能够有效提供更加细致的定量分析，进一步提升对踝泵运动效果的评估准确性，为后续康复训练优化提供了重要支持。

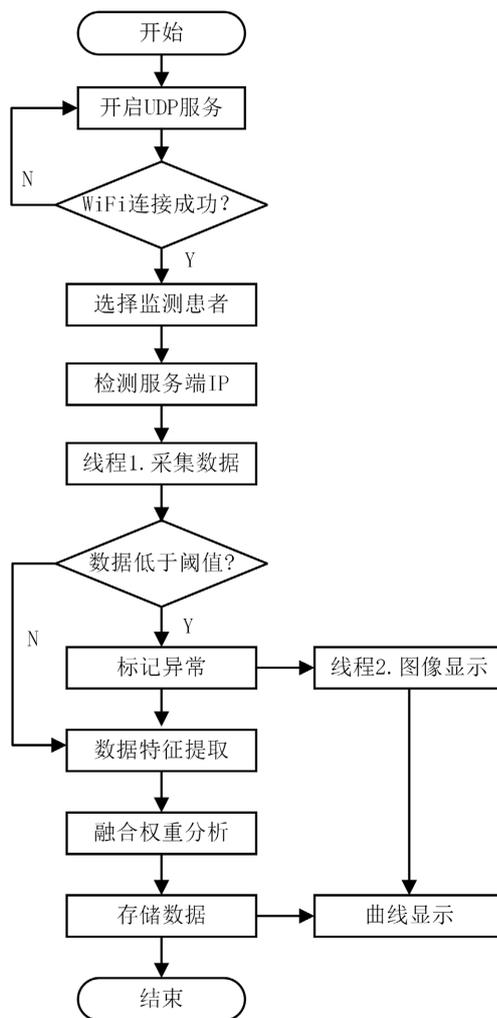


Figure 3. Upper computer program flowchart

图3. 上位机程序流程图

5. 实验结果

5.1. 压力传感器准确性测试

为了确定传感器在不同重量条件下的电压变化规律，如图4所示，使用了五个不同质量的砝码：100

克、200 克、300 克、400 克和 500 克。每个砝码进行了十次实验，并将实验数据进行拟合分析，灵敏度的波动范围在 $\pm 1\%$ 以内，可以得出该压力传感器线性度 $R^2 = 0.9985$ 。说明传感器输出具有良好的的一致性和稳定性，采集数据可靠。

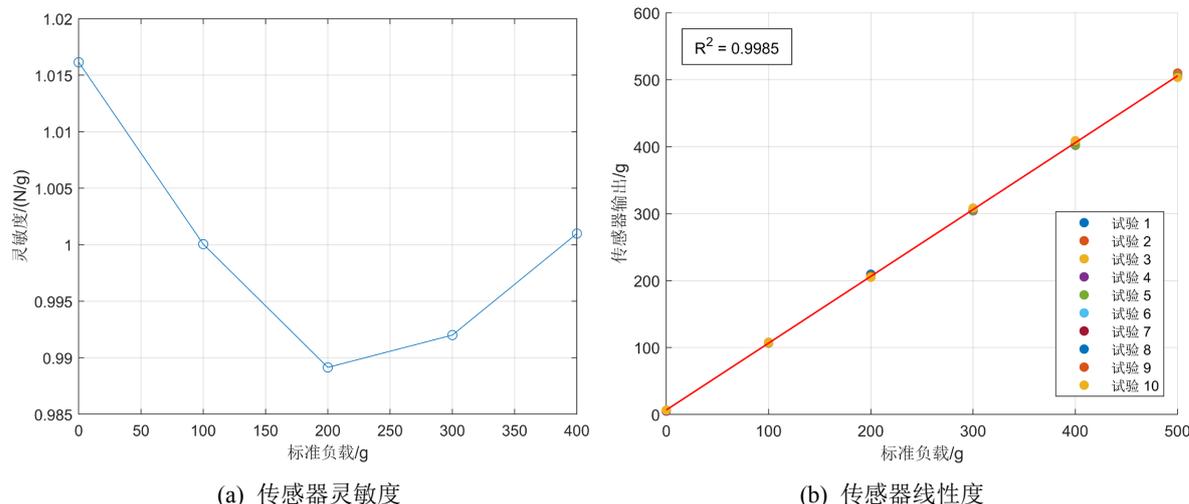


Figure 4. Performance analysis of pressure sensor

图 4. 压力传感器性能分析图

为了评估压力数据检测的精度及长期工作状态下的稳定性，本文对完成标定后的压力传感器不同负载下传感器的力值数据进行了十次重复采集分析，并将测量结果与标准值进行误差分析。标定实验的误差曲线如图 5 所示，其中展示了不同实际压力下的平均相对误差、平均误差和均方误差。在踝泵运动过程中，系统的最大平均误差、平均相对误差及均方误差分别为 0.073 N、6.4%和 5.4×10^{-3} N；最小平均误差、平均相对误差及均方误差分别为 0.045 N、0.6%和 2.1×10^{-3} N。该结果表明传感器经过标定后具有较小的测量误差，精度与可靠性均达到较高水平。综上所述，系统的压力采集单元能够准确有效监测踝泵运动中足底发力的力值。

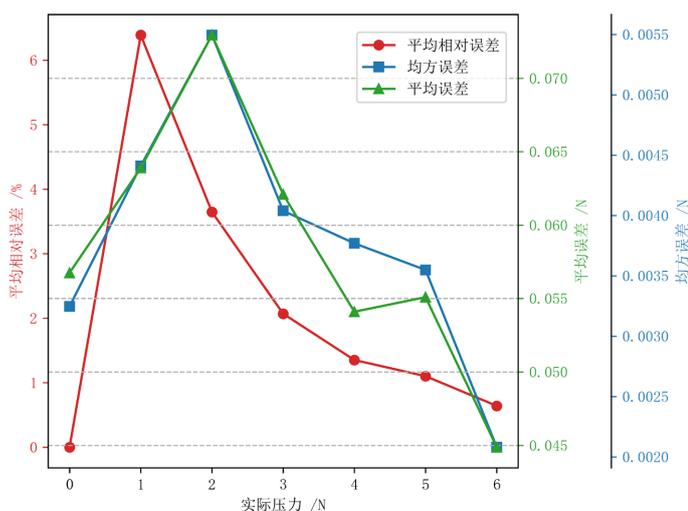


Figure 5. Analysis of force value error

图 5. 力值误差分析图

5.2. MPU6050 准确性测试

为了验证姿态传感器在长时间旋转工作下采集数据回零状态下的稳定性,将 MPU6050 传感器放置在垂直于 z 轴的平面上,进行十次重复旋转实验,每次旋转后返回至初始位置,评估其进行多次归为测量中的误差数据。实验结果如图 6 所示,平方绝对值误差为 0.1398~0.4052,偏差均匀可控,每组均方根误差最高不超过 0.5,整体测量误差较小,满足实际监测需要。决定系数为 0.9951,测量信号和角度之间线性度强,在测量范围内能够稳定准确地反映关节角度的变化。

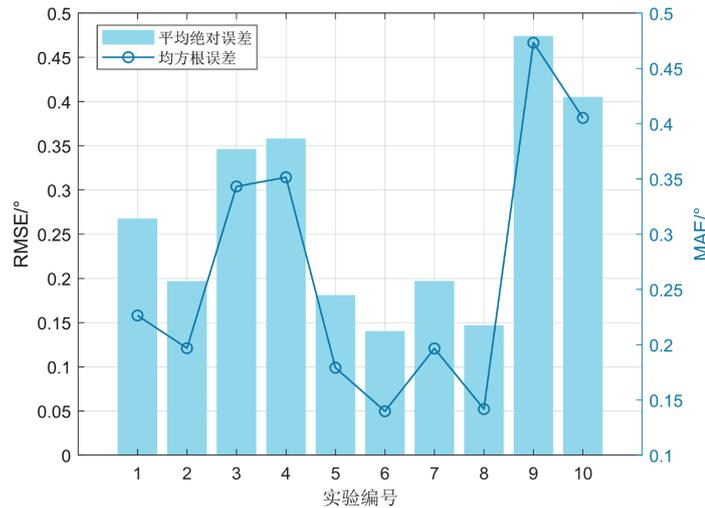


Figure 6. Zero return angle error diagram
图 6. 回零角度误差图

为了进一步验证系统采集角度数据的准确性,将 MPU6050 测量数据与数显倾角仪的测量数据进行对比。测试首先将 MPU6050 和数显倾角仪分别安装在踝泵运动训练设备的踏板上,以踏板初始位置角度为零度,随后以 10 度为增量旋转踏板进行角度测量。其数据情况如图 7 所示。两种设备测量误差在 $\pm 0.5^\circ$ 之内波动,说明 MPU6050 采集到的数据比较准确可靠,能够满足医疗上对关节角度变化的监测。

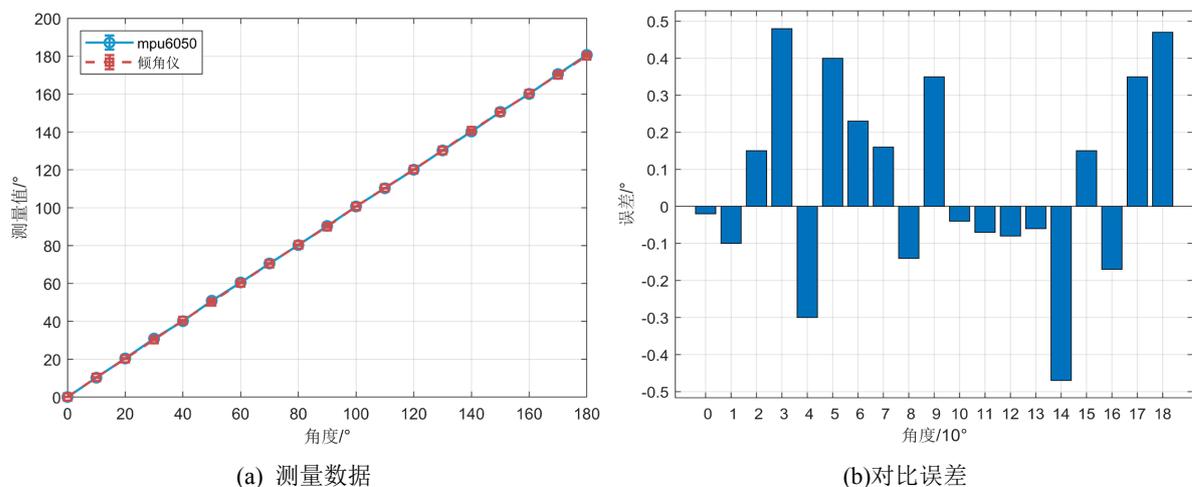


Figure 7. Comparison between MPU6050 and inclinometer data
图 7. MPU6050 与倾角仪数据对比图

5.3. 系统动态性能测试

图 8 分别是测试者踝关节功能正常和异常状态下进行踝泵运动的数据波形图。由图可知,当踝关节灵活度正常时,踝泵运动周期约为 2.5 秒,跖屈时踝关节角度为 140° 左右、足底最大压力为 60 N,波形较为规律周期期间差异不大。当测试者踝关节灵活度较差时、且进行康复运动有明显疼痛时,踝泵运动周期约为 4 秒,跖屈时踝关节变化角度无法稳定保证在 40° 到 50° ,足底最大压力为 48.19 N,且足底发力的力值在运动过程中持续降低,单个周期内数据波动较大。初步分析为患者在训练过程中因踝关节灵活度降低而无法保证踝泵运动的持续标准训练。综合上述实验数据,可以验证该系统能够准确监测踝泵运动中的关节角度和足底发力变化。

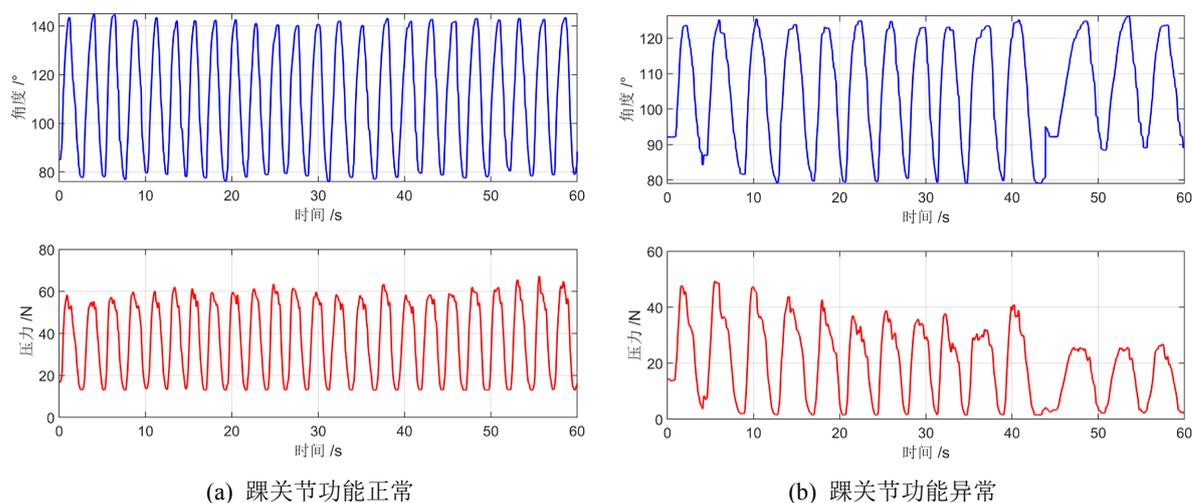


Figure 8. Waveform of ankle pump exercise data

图 8. 踝泵运动数据波形图

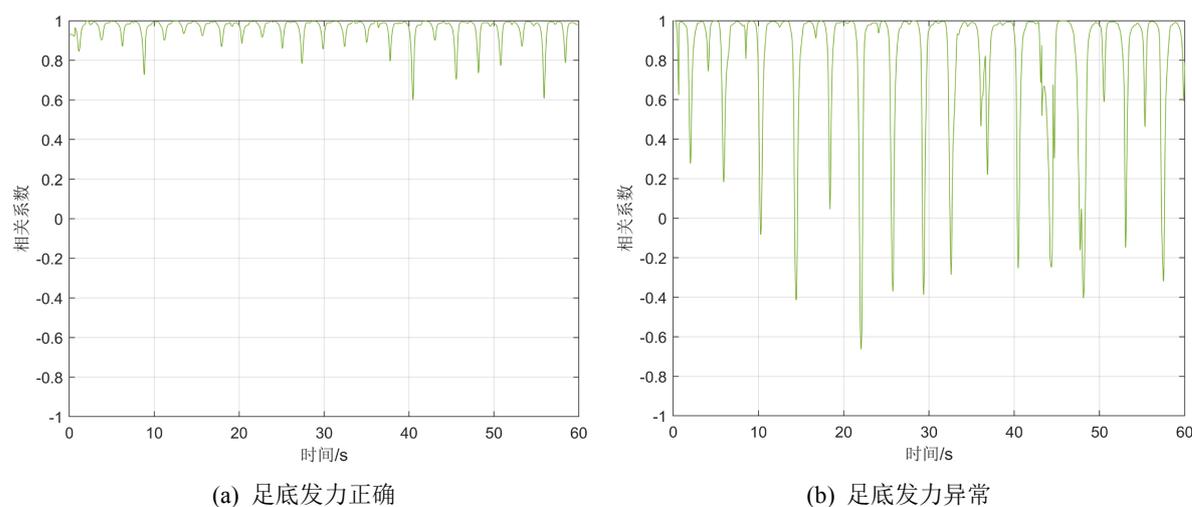


Figure 9. Analysis of ankle pump exercise data

图 9. 踝泵运动数据分析图

5.4. 运动协调分析

对采集到的角度和压力数据进行融合分析后,结果如图 9 所示。进行踝泵运动正确时,足底跖屈肌

群能够充分发力, 压力和角度数据呈高相关性, 相关系数稳定波动在 0.6~1, 说明标准踝泵运动下足底跖屈肌群力量输出和踝关节运动的有效控制过程。而踝关节功能异常或运动不标准时, 由于患者足底跖屈肌群无法充分发力, 可能会出现患者通过其他肌群代偿发力完成跖屈和背屈运动, 其足底发力和踝关节角度信号的相关系数波动浮动异常且整体明显下降。因此, 通过分析足底发力和踝关节角度的动态相关性, 可以评估患者踝泵运动的发力质量, 方便医生更加充分了解患者的踝泵运动情况。

6. 结论

本文设计了一种基于力和角度的踝泵运动实时监测系统, 有效解决了病人在踝泵运动过程中无法实时监测运动效果的问题。系统通过同步采集压力和角度数据, 并结合无线传输技术, 确保了数据传输的高效性与准确性。在数据分析方面, 本研究创新性地提出特征提取与融合分析方法, 实现了对踝关节运动状态的全面监测及关键运动特征的精准提取。该系统不仅为踝泵运动的健康评估提供了可靠的数据支持, 还为个性化康复训练计划的制定提供了科学依据, 具有重要的临床应用价值。

参考文献

- [1] 孙艳, 毛菊花, 李小雪, 等. 踝泵运动器对预防 DVT 促进下肢静脉回流的影响——评《运动医学手术技术: 足与踝》[J]. 中国实验方剂学杂志, 2023, 29(19): 266.
- [2] 李丽娟, 董晓莺, 陈清丽, 等. 踝泵运动对预防髋部骨折术后下肢血栓形成的效果[J]. 实用骨科杂志, 2011, 17(5): 478-480.
- [3] 潘麒羽, 刘尚芹. 踝泵运动护理对剖宫产患者术后下肢深静脉血栓形成的预防作用[J]. 实用临床医药杂志, 2014, 18(24): 213-214.
- [4] 耿艳莉, 龚云. 早期踝泵运动预防 TURP 术后下肢深静脉血栓形成[J]. 护理学杂志, 2014, 29(14): 34-35.
- [5] 于秀丽, 朴丽, 丛云凤, 等. 量化踝泵运动降低妇科肿瘤患者术后下肢静脉血栓发生的临床研究[J]. 护理实践与研究, 2016, 13(13): 120-121.
- [6] Zhang, L., Zhu, X., Gutierrez-Farewik, E.M. and Wang, R. (2022) Ankle Joint Torque Prediction Using an NMS Solver Informed-Ann Model and Transfer Learning. *IEEE Journal of Biomedical and Health Informatics*, **26**, 5895-5906. <https://doi.org/10.1109/jbhi.2022.3207313>
- [7] Suzuki, K., Okamoto, S., Akiyama, Y., Shiraiishi, Y., Yamada, N. and Yamada, Y. (2021) Alignment of Anatomical Flexion Axis When Using One-Degree-of-Freedom Ankle Stretching Exerciser. 2021 *IEEE 3rd Global Conference on Life Sciences and Technologies (Life Tech)*, Nara, 9-11 March 2021, 61-63. <https://doi.org/10.1109/lifetech52111.2021.9391954>
- [8] Xu, C., Zhou, Y., Ji, J. and Wei, C. (2023) An Ankle Joint Flexion and Extension Movement-Monitoring Device Based on Pressure Sensors. *Micromachines*, **14**, Article 2141. <https://doi.org/10.3390/mi14122141>
- [9] 段学习, 王蕴岭, 汪琦. 基于 MSP430 的踝关节康复受力监测系统[J]. 控制工程, 2010, 17(S3): 166-168+172.
- [10] Banky, M., Williams, G., Davey, R. and Tirosh, O. (2022) Inertia Sensors for Measuring Spasticity of the Ankle Plantar-flexors Using the Modified Tardieu Scale—A Proof of Concept Study. *Sensors*, **22**, Article 5151. <https://doi.org/10.3390/s22145151>
- [11] Dao, D.M., Phuoc, P.D. and Tuy, T.X. (2022) Research Control for Ankle Joint Rehabilitation Device. *Journal of Mechanical Engineering and Sciences*, **16**, 8743-8753. <https://doi.org/10.15282/jmes.16.1.2022.08.0691>
- [12] 丁缪辰, 吴怡雯, 郑雨雯. 踝泵运动预防老年患者下肢深静脉血栓形成的研究进展[J]. 中国疗养医学, 2024, 33(11): 87-90.