

中文引用格式:和杰花,王益艳,毛颖,等. 基于生物力学的肌肉骨骼疲劳评估方法[J]. 中国安全科学学报,2025,35(8):263-270.

英文引用格式:HE Jiehua, WANG Yiyang, MAO Ying, et al. Musculoskeletal fatigue assessment method based on biomechanics[J]. China Safety Science Journal, 2025, 35(8):263-270.

基于生物力学的肌肉骨骼疲劳评估方法^{*}

和杰花, 王益艳, 毛颖, 佟瑞鹏^{**} 教授

(中国矿业大学(北京)应急管理与安全工程学院, 北京 100083)

中图分类号: X910

文献标志码: A

DOI: 10.16265/j.cnki.issn1003-3033.2025.08.0401

基金项目: 国家自然科学基金资助(52074302)。

【摘要】 为有效预防作业过程中因疲劳累积引发的工作相关肌肉骨骼疾患(WMSDs), 提出一种融合计算机视觉与生物力学建模的作业疲劳量化评估方法。该方法基于 MMPose 模型提取作业人员的三维姿态数据, 并结合 OpenSim 平台建立个体化肌肉骨骼模型, 实现完整作业周期动作的重建与肌肉负荷模拟。通过计算关键关节的反作用力与肌肉激活水平, 构建关节与肌肉的疲劳指数模型, 系统分析腰椎区域在典型弯腰搬运任务中的疲劳演化过程。结果表明: 在典型弯腰搬运任务中, L5—S1 关节及其相关的多裂肌群呈现出显著的疲劳累积特征, 部分肌群存在左右侧疲劳不对称现象, 深层稳定肌与核心肌群共同参与姿势维持与负荷响应。该方法能够动态追踪作业过程中的疲劳变化, 识别疲劳高风险部位, 适用于动态、高负荷作业场景下的疲劳风险预警。

【关键词】 生物力学; 工作相关肌肉骨骼疾患(WMSDs); 肌肉疲劳; 累积疲劳; OpenSim

Musculoskeletal fatigue assessment method based on biomechanics

HE Jiehua, WANG Yiyang, MAO Ying, TONG Ruipeng

(School of Emergency Management and Safety Engineering, China University of Mining and Technology-Beijing, Beijing 10083, China)

Abstract: To effectively prevent WMSDs caused by cumulative fatigue, this study proposes a fatigue quantification method that integrates computer vision and biomechanical modeling. The method extracts 3D posture data of workers using the MMPose model and builds individualized musculoskeletal models in OpenSim. It reconstructs complete work cycles and simulates muscle loading. By calculating joint reaction forces and muscle activation levels, fatigue indices for joints and muscles are developed. The method is applied to analyze fatigue progression in the lumbar spine during a typical lifting task. Results show that the L5-S1 joint and associated multifidus muscles exhibit significant fatigue accumulation in a typical bending and lifting task. Some muscles show lateral asymmetry in fatigue, and both deep stabilizing and core muscle groups are involved in posture maintenance and load response. The method can dynamically track fatigue changes during work tasks and identify high-risk areas of fatigue, and can be applicable to fatigue risk warning in dynamic, high-load operation scenarios.

* 文章编号: 1003-3033(2025)08-0263-08; 收稿日期: 2025-03-02; 修稿日期: 2025-05-23

** 通信作者: 佟瑞鹏(1977—), 男, 黑龙江穆棱人, 博士, 教授, 主要从事行为安全管理、职业心理健康、环境风险评估等方面的研究。
E-mail: tongrp@cumt.edu.cn。

Keywords: biomechanics; work-related musculoskeletal disorders (WMSDs); muscle fatigue; cumulative fatigue; OpenSim

0 引言

工作相关肌肉骨骼疾患 (Work-related Musculoskeletal Disorders, WMSDs), 又称职业性肌肉骨骼损伤 (Occupational Musculoskeletal Injuries, OMSI), 是指因职业活动引发或加重的肌肉、肌腱、骨骼、软骨等组织的损伤与功能障碍^[1], 是一种普遍存在的健康问题。尤其在体力劳动者中, 重复性动作、长时间静态姿势及高强度体力负荷较为常见, 易导致颈部^[2]、肩部^[3]、四肢^[4]、背部和腰部等部位的损伤^[5]。根据世界卫生组织的数据^[6], WMSDs 占职业病的很大一部分, 导致生产力下降、缺勤率增加和医疗成本上升等问题。国际劳工组织早在 1960 年就已经将 WMSDs 列为职业病^[7]。我国近年来亦高度重视相关防控, 2019 年, 国务院印发《关于实施健康中国行动的意见》, 将肌肉骨骼疾患纳入职业健康保护范围, 2024 年 12 月 11 日由国家卫生健康委、人力资源社会保障部、国家疾控局、全国总工会四部委印发的《职业病分类和目录》(国卫健字发 39 号) 进一步新增“职业性肌肉骨骼疾病”类别。然而, 现有 WMSDs 防控手段中对疲劳这一核心致病因素的量化评估仍较薄弱, 亟需建立一种更为客观、适应性更广的肌肉疲劳评估模型, 以支撑 WMSDs 的风险识别与科学干预。

近年的研究发现, 与工作相关或职业性的腰背痛已成为最普遍的 WMSDs 之一^[8]。调查结果显示, 每年有 5% 的工人因腰痛而缺勤一天^[9]。因此, 当前有学者提出预测患腰背痛风险的针对性方法^[10], 从而降低患病率。其中, 通过科学工具来评估腰部肌肉的疲劳状况是重要手段之一^[11]。疲劳是一种复杂的生理现象, 受工作量、环境条件和恢复机会等多种因素影响。如果肌肉长时间累积疲劳而得不到充分休息, 会引起肌肉劳损、关节压力, 并最终导致 WMSDs^[12]。因此, 通过评估肌肉的疲劳状况, 可预测肌肉骨骼疾患的风险, 通过及时采取相应的措施来预防肌肉骨骼疾患, 还可为工作场所采取主动措施降低 WMSDs 的发病率提供指导。在进行肌肉疲劳评估时, 常依赖于作业人员的疲劳状况自我报告^[13], 或心率和表面肌电传感器方法评估疲劳状况^[14]。其中, 自我报告方法无法持续地实时监测疲劳状况, 而且由于其主观性较大, 无法客观地评价

作业人员的疲劳状况, 影响疲劳评估结果的可靠性。传感器方法则受限于成本高、佩戴不适和干扰实际工作等问题, 无法广泛应用于作业人员的疲劳状况评估。

鉴于此, 笔者拟提出一种融合计算机视觉与生物力学建模的作业疲劳量化评估方法, 基于 MMPose 模型提取作业人员的三维姿态数据, 并结合 OpenSim 建立个体化肌肉骨骼疲劳模型, 重建完整作业周期动作并模拟肌肉负荷动态变化。在此基础上, 构建关节与肌肉的疲劳指数, 系统分析腰椎区域在典型弯腰搬运任务中的疲劳状态。通过定量识别高风险关节与肌群, 实现作业疲劳状态的动态监测与 WMSDs 风险的早期预警。

1 肌肉骨骼疲劳评估方法

1.1 疲劳的评估方法分析

目前, 常用的疲劳评估方法包括问卷调查方法、穿戴式生理传感器及基于生物力学的评估方法。

1) 问卷调查方法。常见方法包括用力感知量表 (Borg Category-Ratio 10 Scale, Borg CR-10) 及 Smets 开发的多维度疲劳量表 (Multidimensional Fatigue Inventory-20, MFI-20)。这些量表往往依赖于受调查者的主观疲劳感受, 而且无法实时监测生理指标。因此, 这种方法的适用领域较为受限, 结果的可靠性不高。

2) 基于传感器的方法。传感器监测方法通过记录心率、肌力、表面肌电信号及脑电信号等生理指标进行疲劳评估。如研究通过最大耐受时间、最大自主收缩评估疲劳状态。但传感器方法存在成本高、佩戴不适及干扰实际工作的缺陷。

3) 基于生物力学的方法。一些人体工程学量表考量姿势和施加的力来评估身体疲劳, 如快速上肢评估、快速全身评估和工作姿势分析系统方法。给定施加的力和姿势后, 生物力学建模方法根据关节或扭矩等来测量物理疲劳。当前主流的几种基于生物力学计算物理疲劳的评估工具, 包括 Jack、Opensim、3D 静态姿势评估程序 (3D Static Strength Prediction Program, 3DSSPP) 和 AnyBody 建模系统等, 能够在虚拟环境中重建人体骨骼和肌肉的三维结构, 模拟作业过程中人体姿态和肌肉负荷的动态变化。

生物力学建模方法相较于传统的问卷调查和传感器检测手段,在动态过程模拟、个体化评估和无干扰监测方面具有显著优势。然而,许多常见的建模软件,如 Jack、Delmia 和 3DSSPP 通常基于简化的人体模型进行分析,虽然可估算关节负荷,并通过集成经验性疲劳模型近似评估肌肉负担,但难以实现对肌肉路径、肌腱特性及收缩动力学过程的高精度建模。此外,此类工具通常通过多个静态姿势组合来模拟工作任务,难以全面考虑外部负荷变化、动作持续时间及姿势频率等动态历史信息,因此,更适用于简单、重复作业的疲劳分析,对于连续动态任务的肌肉疲劳建模存在一定局限性。

相较之下,OpenSim 建模方法支持完整的肌骨系统构建,包括肌肉路径、肌腱力学特性及肌肉收缩动力学建模;可导入动态事件序列数据进行动作还原,并支持肌肉激活水平、关节负荷及能量消耗等多维指标的计算。若结合现有肌肉疲劳模型,OpenSim 可深入分析连续动态任务中负荷分布与疲劳发展过程,适用于复杂工况下的人体运动机制研究。

1.2 OpenSim 建模与仿真流程

OpenSim 是一个开源的生物力学建模和模拟平台,广泛应用于人体运动学和动力学研究。其核心优势在于能够模拟人体的肌肉骨骼结构,并评估任务过程中关节和肌肉的负荷及疲劳状态。

OpenSim 模拟过程如图 1 所示。首先,获取作业人员的实时工作图像,并基于 MMPose^[15] 视觉模型处理该图像,提取作业人员的工作姿势,并提取 3D 人体运动数据,保存为 C3D 文件;然后,由运动学和动力学分析器 (Motion Kinematic & Kinetic Analyzer, MOKKA) 打开并转换为 trc 格式;最后,使用 OpenSim 建立肌肉骨骼模型,并计算完整作业周期中关节和肌肉的累积疲劳指数。

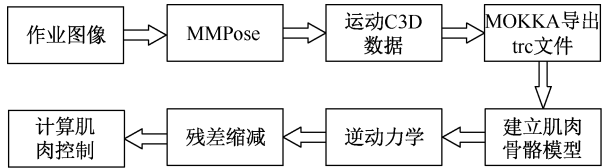


图 1 OpenSim 模拟过程

Fig. 1 Simulation process using OpenSim

OpenSim 的整个模拟过程主要包括 4 个阶段:①模型缩放。根据一个人的身高、体重和肌肉特征,调整通用模型,建立符合作业人员生理指标的肌肉骨骼模型。②逆动力学。找出作业过程中模型关节的角度,使得模型能够尽可能地模仿实际的运动。

这个过程不需要考虑肌肉的力量,只需要考虑运动本身。③残差缩减。通过不断微调模型,使得模型的运动与实际运动更加接近,确保模型的运动与实际运动之间的差异尽可能小。④肌肉计算控制。涉及肌肉的活动和力量的计算,计算肌肉的活动,使得模型能够模拟出实际的运动。

2 关节与肌肉的疲劳分析方法

2.1 三维动作数据提取

三维动作数据的实时提取对于作业疲劳的评估至关重要。当前动作数据获取的方法主要包括动作捕捉系统和基于视觉的姿势估计方法。

传统的动作捕捉系统 (如光学动作捕捉系统、惯性传感器系统)^[16-17] 主要通过人体表面粘贴传感器单元来测量人体关节的空间位置与运动轨迹,但这种方法存在成本较高、环境要求严格等问题,不适用于真实工业环境的大规模应用场景。

基于视觉的姿势估计方法有非接触性、成本低、易于实施等优点。当前存在很多基于视觉的工作姿势估计模型,如 D3DP^[18]、DiffPose^[19] 等基于姿势估计的准确性和推理速度,采用 MMPose 模型^[15],相比较于其他模型,该模型能够快速地估计作业人员关节的 3D 坐标,且准确率最高。

基于 MMPose 的检测结果,结合人体生物力学模型在 OpenSim 中重建完整的三维作业动作。为此,输入数据采用关节位移、姿态序列以及外部负载路径,经过逆动力学处理,从而获得全身各主要关节的动态响应与负载轨迹。在此基础上,利用静态优化 (Static Optimization, SO) 模块求解肌肉力输出,使得肌肉层级的动态参与度得以量化。最终的三维作业动作如图 2 所示。其不仅真实还原弯腰作业类任务中人体的姿态变化过程,还能在模型层面联动计算关节负载与肌肉激活,为疲劳模型提供高精度的输入基础。

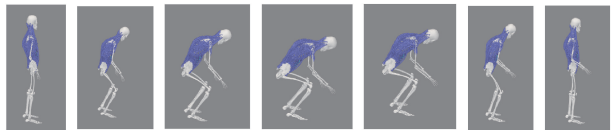


图 2 作业任务期间的运动过程

Fig. 2 Motion process during the task

2.2 关节疲劳的计算评估

人体生物力学结构复杂,骨骼、关节、肌腱和肌肉的应力应变关系也随作用力而变化。基于生物力学方法,采用力平衡方程和力矩平衡方程求解关节

力矩,获取关节的疲劳状态。根据 MA Liang 等^[20]开发的力-负荷疲劳模型:

$$\frac{dF(t)}{dt} = \frac{\Gamma_m}{\Gamma_c(t)} \frac{\Gamma(t)}{\Gamma_c(t)} \quad (1)$$

式中: $F(t)$ 为疲劳指数; Γ_m 为关节的力矩最大承载能力; $\Gamma_c(t)$ 为关节力矩当前承载能力; $\Gamma(t)$ 为关节力矩; t 为当前时间。

根据式(1)可知:疲劳的发展与持续时间和重复性有关,同时取决于2个关键因素:外部负荷的强度以及个体自身肌肉承载能力的大小。其中,外部负荷越大,疲劳累积的速度越快;而个体的肌肉力量储备越高,疲劳发展则越慢。式(1)中涉及的比值

$\frac{\Gamma_m}{\Gamma_c(t)}$ 体现了个体当前的相对关节负荷承载能力

(受年龄、性别等个体特征影响),而 $\frac{\Gamma(t)}{\Gamma_c(t)}$ 表示实时相对关节负荷水平,同样与个体差异相关。

在式(1)中最大承载能力 Γ_m 的数据源于 SHAUNAK^[21] 及 MELDRUM^[22] 等的研究成果。实时关节力矩 $\Gamma(t)$ 的值由具体生物力学计算得出。同时,实际工作过程中关节的力矩承载能力 $\Gamma_c(t)$ 会随着持续负荷而逐渐降低,这一降低趋势受到历史负荷状况的直接影响。为更好地量化此变化过程,采用肌肉运动单元理论,进一步模拟分析关节负荷历史和最大承载能力之间的关系。

具体而言,肌肉运动单元理论认为,肌肉产生的力矩依赖于运动神经元对运动单元的激活情况^[23]。人体内部运动单元初始具有较高的力量输出能力,但容易疲劳,力量迅速衰减;另一部分运动单元初始力量输出较低,但耐力较强,疲劳过程较慢。在外部负荷作用下,高力量单元首先被调动使用,当其能力减弱后,再逐渐激活耐力型单元。因此,在较大的外部负荷作用下,肌肉整体的力量输出会快速下降。此外,随着任务持续时间的增加,这2类运动单元共同作用下的整体肌肉力量衰减速度会逐渐趋缓。

关节在持续负荷作用下会逐渐积累疲劳,这种疲劳累积过程由下式进行描述:

$$\frac{d\Gamma_c(t)}{dt} = -k \frac{\Gamma_c(t)}{\Gamma_m} \Gamma(t) \quad (2)$$

式中 k 为常数,通常取值 1 min^{-1} 。

对式(2)进行积分,获得实时关节承载能力 $\Gamma_c(t)$ 的表达式,如下式:

$$\Gamma_c(t) = \Gamma_c(t_0) \exp\left(-\frac{k}{\Gamma_m} \int_{t_0}^t \Gamma(u) du\right) \quad (3)$$

基于上述实时关节承载能力 $\Gamma_c(t)$,可进一步计算关节疲劳指数 $F(t)$ 。

2.3 基于 OpenSim 的肌肉疲劳分析

由于人体的肌肉数量众多,为便于分析肌肉疲劳,通过生物学和力学建立肌肉骨骼模型是一种可靠的手段,可有效分析作业过程中各个肌肉的激活状态,进而评估肌肉的疲劳状态。

在 OpenSim 平台基础上开发一套肌肉疲劳评估方法,基于肌肉力输出与激活数据计算各肌肉的累积疲劳指数。疲劳模型采用基于负载累积的指数衰减机制,用以描述肌肉在单次任务过程中持续激活导致的疲劳累积效应。模型仅考虑疲劳增长的单向过程,在模型中未考虑肌肉在任务间的恢复过程,适用于短时或单次作业任务情境。

通过 SO 模块获取任务过程中各肌肉的力输出与激活水平,在每一时刻 t ,每块肌肉的瞬时疲劳速率为:

$$\frac{dF_i(t)}{dt} = \alpha \cdot a_i(t) \quad (4)$$

式中: $F_i(t)$ 为第 i 块肌肉的疲劳指数; $a_i(t)$ 为激活值; α 为疲劳累积系数。

α 的作用通过每块肌肉自身在各时刻的激活水平 $a_i(t)$ 表达,其数值本身被统一设定为常数,以避免对肌肉间差异的额外加权。换言之,肌肉疲劳积累完全由 SO 模块输出的 $a_i(t)$ 决定, α 起到标准化速率的作用。在数值实现上,肌肉疲劳指数采用离散积分法进行计算:

$$F_i(t_n) = F_i(t_{n-1}) + \alpha \cdot a_i(t_{n-1}) \cdot \Delta t \quad (5)$$

式中: $F_i(t_n)$ 为第 i 块肌肉在时间步 t_n 时的累积疲劳指数; $a_i(t_{n-1})$ 为第 i 块肌肉在 t_{n-1} 时刻的激活水平; n 为时间步编号; Δt 为时间步长,即每帧数据的时间间隔。

肌肉疲劳分析过程遵循以下步骤:①导入经过缩放和逆运动学处理的人体模型与姿态数据;②执行静态优化获得肌肉激活和输出力;③基于每块肌肉的激活值逐步积分计算其疲劳变化轨迹;④提取最终时刻的累积疲劳指数进行排序与可视化分析。该方法能有效识别高负荷参与肌群,为姿势优化、动作设计与个体疲劳干预提供数据支撑。

3 典型搬运任务设计与验证

3.1 任务设置与人体模型

为验证所提出的疲劳评估方法在实际作业任务中的应用效果,选取典型的弯腰搬运任务作为试验

对象。该任务在工业生产、物流搬运、仓储整理等场景中具有广泛代表性,作业过程中腰背部承受较大完全负荷,容易引发疲劳和损伤,尤其在长时间搬运条件下更易导致腰部区域的 WMSDs。

试验模拟的动作流程包括:站立准备→弯腰取物→起身搬运→原地站立,共同构成完整的搬运周期。该周期通过连续视频拍摄并采用 MMPose 进行三维动作还原。所有动作序列被划分为若干离散帧,以保证足够的时间精度与建模输入的连续性。

在建模阶段,采用 OpenSim 平台中的全身肌肉骨骼模型作为基础结构,并通过缩放模块调整个体身高、体重、性别等参数,构建具备个体特征的人体模型。所用模型具有以下 2 方面的关键特性:①脊柱区域精细分节。模型对脊柱从胸椎(T1—T12)、腰椎(L1—L5)至骶椎(S1)均设有独立节点,可反映不同节段间的负荷变化与角度变换,适用于腰背区域疲劳分析;②深层肌群建模完整。包含多裂肌、竖脊肌、腹直肌、腰方肌等多个深层核心稳定肌群,支持对肌肉激活与疲劳水平的逐块计算与动态追踪,有助于识别动作执行中对不同肌群的依赖程度及疲劳积累路径。采用的 OpenSim 人体模型具备详细的脊柱分节和肌肉解剖信息,尤其对腰背部深层肌群具有良好分辨力,使其适用于腰部疲劳与关节负荷研究。

任务周期内模拟现实工况中姿势控制策略,通过逆动力学分析获得关节反作用力,再由静态优化模块推导肌肉力学行为,进而嵌入疲劳模型计算累积关节疲劳指数和累积肌肉疲劳指数。

3.2 关节疲劳分析结果

划分腰部的各个主要关节,关节的名称及对应位置见表 1。

表 1 腰部主要关节名称及位置

Table 1 Names and positions of major lumbar joints		
名称	关节	具体位置
腰椎 L	L1—L5	位于腰部,连接胸椎与骶椎,共 5 节椎体(从上往下,L1—L5),每 2 节椎体之间形成关节
胸椎 T	T1—T12	位于胸部,连接颈椎与腰椎,共 12 节椎体(从上往下 T1—T12),每两节椎体之间形成关节
骶椎 S	S1	脊柱及骨盆的枢纽,通过骶髂关节将脊柱负荷分散至下肢

在分析关节疲劳时,基于逆动力学分析得到各关键关节在弯腰任务中的受力情况,通过疲劳模型计算其累积疲劳指数。分析结果显示,腰椎区域,尤

其是 L5—S1 关节的疲劳指数显著高于其他关节,表明其在整个搬运过程中承载着持续的高负荷,分析结果如图 3 所示。此外,T12—L1 和 T10—T12 等胸腰交界区域的疲劳指数也处于较高水平,这些区域是动力链中稳定与过渡的关键节点。

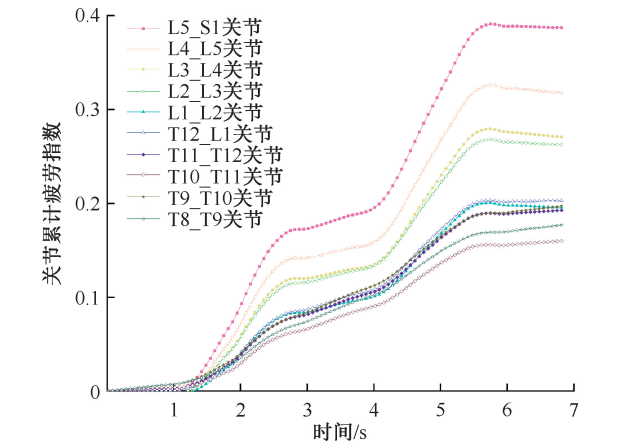


图 3 关节累积疲劳分析结果

Fig. 3 Cumulative joint fatigue analysis results

从时间演化角度来看,L5—S1 关节的疲劳指数呈持续上升趋势,缺乏明显恢复期,说明其在任务中未能获得足够的缓冲与休息,这与腰椎损伤高发部位高度重合。因此,在针对腰椎相关疾病的预防中,应重点关注 L5—S1 区域的疲劳积累情况,同时,优化弯腰动作的姿态控制和节奏安排,以延缓该区域关节与肌群的疲劳进展。

3.3 肌肉疲劳分析结果

基于 OpenSim 平台对分析弯腰任务过程中作业人员的腰背部肌肉疲劳,构建肌肉骨骼模型,涵盖腹直肌、腹外斜肌、腹内斜肌、腹横肌、背阔肌、竖脊肌、横突棘肌、腰大肌和腰方肌等 9 个主要肌群。这 9 个主要肌群(表 2)在躯干稳定与任务执行中发挥关键作用。

表 2 腰部主要肌肉名称及作用

Table 2 Names and functions of major lumbar muscles			
肌群	中文全称	英文全称	主要作用
核心肌群	腹直肌	Rectus Abdominus	辅助躯干侧屈
	腹外斜肌	External Oblique	躯干对侧旋转与侧屈;辅助前屈和核心稳定
	腹内斜肌	Internal Oblique	躯干同侧旋转与侧屈;稳定脊柱
	腹横肌	Transversus Abdominis	深层核心稳定,减少腰椎负荷

续表 2

肌群	中文全称	英文全称	主要作用
背部肌群	背阔肌	Latissimus Dorsi	辅助躯干侧屈;上肢内收、后伸
	竖脊肌	SacroSpinalis	脊柱后伸;维持站立平衡
稳定肌群	横突棘肌	Transversospinalis	脊柱节段稳定;深层肌群,含多裂肌、半棘肌等
腰髋连接肌群	腰大肌	Psoas_major	维持腰椎前突
	腰方肌	Quadratus Lumborum	躯干侧屈

关节疲劳分析结果表明:L5—S1 关节的疲劳指数最高,是腰背痛风险最高的区域。进一步基于肌肉力数据计算肌肉的累积疲劳指数,分析与 L5—S1 关节稳定性密切相关的横突棘肌群中的多裂肌群以及腹直肌。

疲劳指数结果如图 4 所示。横突棘肌群中的深层肌肉,多裂肌(如 multifidus_L1_T11、multifidus_L2_T12_L 等)的累积疲劳指数普遍高于其他肌肉,其中,多个肌肉的指数超过 0.9(高疲劳阈值),说明在弯腰任务中该肌群长期处于高负荷状态。腹直肌、髂肋肌、横突棘肌等肌肉也展现出较高疲劳值,尤其是右侧肌群的疲劳值普遍高于左侧,反映出其在动作稳定和负重中的参与度。

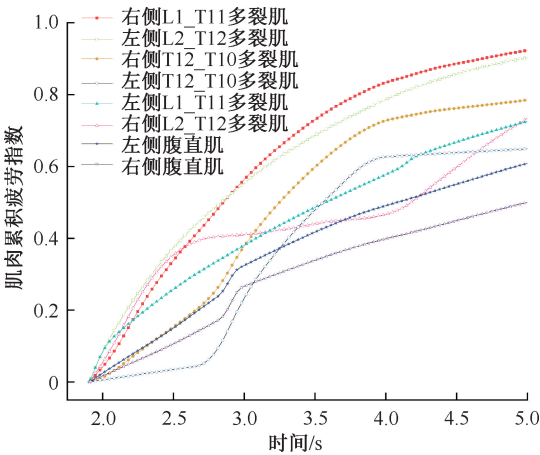


图 4 肌肉累积疲劳指数

Fig. 4 Cumulative muscle fatigue index

结果表明:在连续、重复的弯腰任务中,深层稳定肌群(如多裂肌)与表层核心肌群(如腹直肌)共同参与腰椎稳定与负荷转移,且易产生疲劳,在工作设计时应加以关注。

4 讨论

1) 关节疲劳趋势分析。关节疲劳指数的整体排序显示,腰椎下段(特别是 L5—S1 关节)的疲劳程度最为显著,其疲劳指数在所有关节中排名第 1,提示其在搬运任务中承受了最大稳定负荷。此外,其他 T12—L1、T10—T12 等胸腰交界区域的关节也表现出较高的疲劳指数,表明这一过渡区域在动作过程中起到支撑和缓冲的关键作用。这些结果与先前研究^[9]指出的腰背部常见损伤区域高度一致,说明关节疲劳评估可为脊柱相关疾病的风险识别提供重要依据。

2) 疲劳分布与功能关联。根据疲劳分布,深层小肌肉(如横突棘肌、多裂肌)承担持续性的姿势控制,虽然力量输出有限,但其疲劳累积更容易被忽视。这一结果与相关研究一致^[24],说明即使表面运动看似缓慢或轻微,但内部稳定结构长期激活会带来高疲劳风险。此外,表层肌肉如腹直肌、腹外斜肌虽力量更强,但在动态负载中主要承担驱动和协同作用,其疲劳表现与动作结构关系更密切。

3) 动作对称性与测差。研究发现,多个对应右侧肌肉的疲劳指数显著高于左侧,可能源自搬运任务中的非对称动作模式,如搬运重量集中于一侧。这种非对称性用力不仅会造成局部疲劳积累失衡,也可能诱发慢性损伤或姿势代偿行为。在实际作业流程中,应通过姿势指导、工器具设计或轮换作业等方式减缓侧差疲劳。

4) 模型优势与适用性。采用基于 OpenSim 建模的肌肉疲劳量化方法,相较于传统的机电或问卷方式,具备客观、动态、无干扰的优势,特别适合应用于复杂多姿态、高频次作业场景的疲劳分析。该模型能够考虑肌肉激活历史、力学响应与个体差异,是对现有疲劳评估工具的重要补充。

5 结论

1) 从作业疲劳角度出发,构建一种基于姿态估计与肌骨建模的作业疲劳量化方法,有效实现对作业疲劳风险的定量分析,为 WMSDs 的早期识别与干预提供理论依据和技术方法。

2) 结合 MMPose 模型与 OpenSim 平台,开发融合三维动作重建、关节负荷与肌肉疲劳计算的综合评估流程,能够精准识别高疲劳风险的关节与肌群,尤其揭示了 L5—S1 关节与多裂肌在弯腰任务中的疲劳易感性。

3) 疲劳模型在动作连续性与肌群参与度方面表现出较强的适应性和泛化能力,克服了传统肌电或问卷方法的局限,适用于动态、高负荷作业场景下的疲劳风险预警。

4) 当前模型尚未考虑疲劳恢复机制,未来研究可在多任务交替场景下引入恢复动态,以提升模型在长期作业工况中的预测与优化能力。

参 考 文 献

- [1] GREGGI C, VISCONTI V V, ALBANESE M, et al. Work-related musculoskeletal disorders: a systematic review and meta-analysis[J]. *Journal of Clinical Medicine*, 2024, 13(13): DOI:10.3390/jcm13133964.
- [2] LIU Fei, DUAN Yongxian, WANG Zhongxu, et al. Mixed adverse ergonomic factors exposure in relation to work-related musculoskeletal disorders: a multicenter cross-sectional study of Chinese medical personnel[J]. *Scientific Reports*, 2025, 15(1): 1-12.
- [3] ANDERSON S P, OAKMAN J. Allied health professionals and work-related musculoskeletal disorders: a systematic review[J]. *Safety and Health at Work*, 2016, 7(4):259-267.
- [4] DONG Yidan, JIANG Ping, JIN Xu, et al. Association between long-term static postures exposure and musculoskeletal disorders among university employees: a viewpoint of inflammatory pathways[J]. *Frontiers in Public Health*, 2022, 10: DOI:10.3389/fpubh.2022.1055374.
- [5] DIDAR H M, AFZAL A, HASSAN A I M, et al. Prevalence of work related musculoskeletal disorders (WMSDs) and ergonomic risk assessment among readymade garment workers of Bangladesh: a cross sectional study[J]. *Plos One*, 2018, 13(7): DOI:10.1371/journal.pone.0200122.
- [6] CIEZA A, CAUSEY K, KAMENOV K, et al. Global estimates of the need for rehabilitation based on the Global Burden of Disease Study 2019: a systematic analysis for the Global Burden of Disease Study 2019 [J]. *The Lancet*, 2020, 396: 2 006-2 017.
- [7] COLOSIO C, NIU S, VAN DER LAAN G. The new ilo list of occupational diseases: guidance notes on diagnostic criteria for occupational diseases included in the ilo list[J]. *Occupational Environment Medicine*, 2018, 75(S2): DOI: 10.1136/oemed-2018-ICOHabstracts.650.
- [8] GOVINDU N K, BABSKI-REEVES K. Effects of personal, psychosocial and occupational factors on low back pain severity in workers[J]. *International Journal of Industrial Ergonomics*, 2014, 44(2):335-341.
- [9] KATZ J N. Lumbar disc disorders and low-back pain: socioeconomic factors and consequences[J]. *The Journal of Bone & Joint Surgery*, 2006, 88(1/2): 21-24.
- [10] 马阳光,施翌,贾明盛,等. 陆军部队官兵腰痛的风险预测模型研究[J]. *解放军医学院学报*, 2024, 45(10): 1 033-1 039,1 047.
MA Yangguang, SHI Yi, JIA Mingsheng, et al. Risk prediction model for low back pain among military personnel in army troops[J]. *Journal of the PLA Medical College*, 2024,45(10):1 033-1 039,1 047.
- [11] 田水承,陈盈,邹元. 手工搬运作业下矿工腰部肌肉疲劳分析[J]. *矿业安全与环保*,2021,48(5):122-126.
TIAN Shuicheng, CHEN Ying, ZOU Yuan. Analysis on muscle fatigue of coal miners' waist in manual handling work[J]. *Mining Safety & Environment Protection*, 2021,48(5):122-126.
- [12] VEERASAMMY S, DAVIDSON J B, FISCHER S L. Multi-task exposure assessment to infer musculoskeletal disorder risk: a scoping review of injury causation theories and tools available to assess exposures[J]. *Applied Ergonomics*, 2022,102: DOI:10.1016/j.apergo.2022.103766.
- [13] 何敬和,姚丽,常震. 应急救援人员体能训练后消除肌肉疲劳的对策分析[J]. *中国急救复苏与灾害医学杂志*, 2011,6(1):28-29,65.

HE Jinghe, YAO Li, CHANG Zhen. Study of revitalization on the post training muscle fatigue of rescue professional[J]. China Journal of Emergency Resuscitation and Disaster Medicine, 2011, 6(1): 28-29, 65.

[14] 王越,张麟. 矿工肌肉疲劳状况及事故预防研究[J]. 中国安全科学学报, 2021, 31(3): 191-196.
WANG Yue, ZHANG Lin. Research on muscle fatigue and accident prevention in coal miners[J]. China Safety Science Journal, 2021, 31(3): 191-196.

[15] ZHU Wentao, MA Xiaoxuan, LIU Zhaoyang, et al. Motionbert: a unified perspective on learning human motion representations[C]. Proceedings of the IEEE/CVF International Conference on Computer Vision, 2023: 15 085-15 099.

[16] MAMAN Z S, CHEN Y J, BAGHDADI A, et al. A data analytic framework for physical fatigue management using wearable sensors[J]. Expert Systems with Applications, 2020, 155: DOI:10. 1016/j. eswa. 2020. 113405.

[17] OTÁLORA S, SEGATTO M E V, MONTEIRO M E, et al. Data-driven approach for upper limb fatigue estimation based on wearable sensors[J]. Sensors, 2023, 23(22): DOI:10. 3390/s23229291.

[18] SHAN Wenkang, LIU Zhenhua, ZHANG Xinfeng, et al. Diffusion-based 3d human pose estimation with multi-hypothesis aggregation[C]. Proceedings of the IEEE/CVF International Conference on Computer Vision, 2023: 14 761-14 771.

[19] GONG J, FOO L G, FAN Z, et al. DiffPose: toward more reliable 3D pose estimation[C]. Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, 2023: 13 041-13 051.

[20] MA Liang, ZHANG Wei, WU Su, et al. A new simple local muscle recovery model and its theoretical and experimental validation[J]. International Journal of Occupational Safety and Ergonomics, 2015, 21(1): 86-93.

[21] SHAUNAK S, ANG L, COLSTON K, et al. Muscle strength in healthy white and Asian subjects: the relationship of quadriceps maximum voluntary contraction to age, sex, body build and vitamin D[J]. Clinical Science, 1987, 73(5): 541-546.

[22] MELDRUM D, CAHALANE E, CONROY R, et al. Maximum voluntary isometric contraction: reference values and clinical application[J]. Amyotrophic Lateral Sclerosis, 2007, 8(1): 47-55.

[23] YU Yantao, LI Heng, YANG Xincong, et al. An automatic and non-invasive physical fatigue assessment method for construction workers[J]. Automation in Construction, 2019, 103: 1-12.

[24] WANG Kun, DENG Zhen, CHEN Xinpeng, et al. The role of multifidus in the biomechanics of lumbar spine: a musculoskeletal modeling study[J]. Bioengineering (Basel), 2023, 10(1): 67-79.

作者简介： 和杰花 （1998—）,女,云南丽江人,博士研究生,主要研究方向为职业健康、工作相关肌肉骨骼疾患风险等。E-mail: hejiehua0324@163.com。