

基于多模态融合的消防救援人员职业心理创伤精准筛查与智能康复干预机制综合综述

杜子豪 操日亮 赵一平

广州科技职业技术大学 广东 广州 510000

【摘要】：背景：消防救援人员长期在高压、高危的极端作业环境里工作。其身心长期承受高负荷运转，生理疲劳累积，心理创伤应激引发的综合损伤风险，这已经成了制约应急救援队伍战斗力和个体远期健康的关键问题。目的：本综述要系统地探究多模态数据融合技术在消防员职业心理创伤筛查里的应用价值，深入评估基于可解释人工智能（AI）的预测模型与沉浸式虚拟现实（VR）协同干预机制的临床有效性。方法：本文对近年来消防员生理疲劳、步态变异、创伤后应激障碍（PTSD）以及职业倦怠的流行病学特征进行了综合分析。并且，系统对可穿戴多模态传感监测技术、集成机器学习算法以及虚拟现实暴露疗法（VRET）的最新实证研究进行了梳理。结果：高强度的实战任务会明显改变消防员的生物力学步态特征，还会增加跌倒风险。在心理方面，职业倦怠和睡眠障碍是导致并加重 PTSD 的关键中介因素。借助深度耦合步态学特征、生理反馈以及心理评估数据，再用贝叶斯网络或者超图神经网络这类机器学习模型，就能很好地达成身心损伤风险的早期动态精准预警。另外，沉浸式 VR 与现实物理任务的自适应干预机制，把传统单一治疗的局限给打破了。结论：融合“人工智能多模态筛查+身心一体化 VR 康复”的范式，给高危职业人群提供了数据驱动的智能预警和精准干预工具，临床转化和职业健康保障价值很明显。

【关键词】：消防救援人员；职业心理创伤；多模态融合；可解释人工智能；虚拟现实暴露疗法；步态分析；职业倦怠；创伤后应激障碍

DOI:10.12417/2705-098X.26.12.025

1 引言

消防员职业暴露风险有着生理机能与心理应激复杂交织的特性。现有的“身心分离”保障模式，就是依靠事后量表筛查以及单一物理干预，这模式已经很难满足复杂作业的需求了。凭借多模态数据分析以及临床虚拟现实技术，构建客观数据驱动的保障体系已经成了一种趋势。本文着重对多模态特征融合以及 VR 联合康复在提高消防员心理健康筛查与干预效能方面的作用加以探讨。通过研究生理疲劳的累积，以及生物力学步态的变异相关进展从而阐述相关机制。

消防救援任务里体能消耗高，这很容易让中枢神经和外周神经肌肉产生深度疲劳。执行模拟消防任务并携带不对称负荷（像单肩扛消防水带这种），这会使个体生物力学特征有明显改变。Kesler 等人经实证研究表明，非对称负重引发的疲劳会引发代偿性步态策略，改变步长与支撑时间比，火场滑倒、绊倒以及坠落风险会增加^[1]。Hu 等人研究表明^[2]，在疲劳救援冲刺任务里，外部负重的大小以及搬运技术（像肩扛、怀抱或者手提）会对下肢关节的做功以及前后方向的稳定裕度（Margin of Stability, MoS）产生显著影响。另外，Tang 等人研究显示，疲劳会限制物理表现，还会严重降低消防员在执行奔跑等高强度救援任务时的氧耗效率，让代谢经济性变差^[3]。在应对这种

极端疲劳的时候，个体的基础心肺适能（Cardiorespiratory Fitness）有着关键的生理屏障作用。Kwon 等人的临床试验证明，在实战化火灾模拟训练（Live Burn Training Evolution）后，心肺适应性较低（14 METs）的消防员在完成功能性平衡测试时不仅耗时更长，其步态周期的摆动期时间也出现了更为显著的衰退^[4]。王宁等人指出，借助智能穿戴设备（像三轴加速度计和表面肌电传感器之类的）来利用机器学习算法，对运动性疲劳进行实时、无创的多维评估，这给消防员步态特征的动态监测提供了重要的技术支撑^[5]。

心理创伤、职业倦怠以及睡眠障碍在流行病学上相互作用，这是个很常见的现象。

生理上极度透支，这常会和心理防线的崩溃相互关联。Peña 等人对消防员 PTSD 相关的心理变量进行了系统性评价，结果表明，长期的职业压力、从业时长、职业倦怠以及情绪抑制（Expressive Suppression）是诱发 PTSD 的关键危险因素，个体归属感和特质是保护性因素^[6]。在研究 PTSD 的发病机制的时候，职业倦怠（Burnout）起到的中介作用可能不能小看。Kim 等人在研究韩国消防员的大样本结构方程模型（SEM）时发现，创伤经历不直接影响 PTSD 的严重程度，不过，职业倦怠在创伤暴露和 PTSD 症状之间起着非常明显的中介作用。并

项目资助：本研究受广东省教育科学规划项目（高等教育专项）“AI 赋能消防员心理健康三维融合机制研究：康复教育服务智慧应急产业的实践模式探索”（项目编号：2025GXJK0741）资助。

且,高工作要求与努力-回报失衡,这会直接加重职业倦怠,进而把 PTSD 风险放大了^[7]。另外,环境应激造成的睡眠剥夺,让这一病理过程进一步恶化了。Wolkow 等人对大样本流行病学调查表明,受访消防员中睡眠障碍的占比较高,大概有 38% 的受访消防员存在睡眠障碍,而且睡眠质量低与工作压力、PTSD、职业倦怠以及抑郁有很大关系。他们的模型表明,夜间执勤时睡眠中断是连接职业压力和全面职业倦怠的重要调节变量^[8]。流行病学证据显示,心理创伤考量具有局限性。要联合量化心理脆弱性以及生理疲劳风险,构建一个多模态生命体征监测网络。

多模态情感计算借助深度学习技术,把单一维度预警的局限给解决了。吴良庆等人联合学习方法表明,该路径可明显提高复杂环境下的情绪识别效能^[9]。钟林伶等人在多模态数据融合时,会遇到冗余信息和特征不对齐的问题,所以他们创新地引入了基于多元情绪关系超图学习(Hypergraph Learning)的多模态情绪识别模型。该模型把多元超边替换成传统的二元关系图,不引入冗余信息,就能充分表征单模态内部和跨模态之间深层情绪映射关系,这对临床数据缺失或者不全的现实挑战来说,是很大的适应能力^[10]。另外,在虚拟现实或者高仿真演练场景里,多模态特征的实时采集与对齐也很重要。童雪的研究显示,在虚拟交互环境里,要采集用户的视觉交互行为(眼动)、生理信号以及主观评分,就能构建出连续的情绪“基准真值”(Ground-Truth)序列。这种融合后的连续情绪序列,既准确又有效,还能提供情绪状态的峰值、波谷以及变化趋势的时序性细节^[11]。

2 基于人工智能的可解释性动态风险预测模型

在采集多模态数据并进行特征工程之后,怎样从高维矩阵里挖掘出隐含的病理学规律,进而服务于医疗干预,这可是达成精准筛查的关键所在。机器学习算法在处理异质性、非线性

医疗数据上有着传统统计学所不能比拟的优势。Abbasi 等人构建了一种基于贝叶斯网络(Bayesian Network)的概率推理模型,来应对消防员复杂的职业症候群。该模型把工作压力、创伤后应激、肌肉骨骼症状、职业倦怠以及抑郁之间的条件依赖关系都量化了。结果表明,当模型输入“低 PTSD 概率”时,与之高度耦合的“高职业倦怠(情感耗竭)”和“高骨骼肌肉症状”的边际概率分布会显著协同下降。这种网络拓扑结构精准地把生理病痛和心理创伤的伴生关系给捕捉住了,而且在给定部分先验观测值(像检测到步态异常这种)的情况下,还能反向推断并预警心理崩溃的后验概率^[12]。不过,预测模型的临床转化,长期受阻,这主要是深度学习的“算法黑箱”特性所导致的。在医学决策里,临床工作者得有明确的病理学依据。所以,以后的多模态预警系统,得把模型可解释性技术深度集成起来。系统把高维矩阵运算降维,把直观的特征贡献度分布图给呈现出来了,这样系统就能量化特定步态变异率或者特定心率变异性(HRV)指标在促发心理崩溃临界点时的权重。这不但把医疗与应急管理领域的信任屏障给破除了,而且首次从数据科学的角度,把生理异常和心理风险联合演化的阈值给精确界定了。沉浸式虚拟现实暴露疗法(Virtual Reality Exposure Therapy, VRET)的引入,彻底重塑了创伤后康复的干预范式。VRET 能够通过计算机图形学与多维感官反馈,构建出高度受控且极具沉浸感的灾害环境^[13]。

3 结论与展望

本研究聚焦消防员身心健康需求,借助多模态数据融合,把主客观评估的差异性给有效消除掉。研究以贝叶斯网络和超图学习构建身心交叉预警模型,再把 VR 联动干预整合进闭环体系里。往后会着重对大样本纵向队列进行验证,还有传感器性能加以优化,借助“产教医”协同机制,促使科研成果朝着标准化数字疗法以及职业康复体系转变。

参考文献:

- [1] Kesler RM,Bradley HS,Deetjen GS,et al.Assessing gait changes in firefighters after firefighting activities and while carrying asymmetric loads.Appl Ergon.2018;67:54-60.
- [2] Hu M,Zhang Y,Wang J,et al.Effects of external load magnitude and carriage techniques on dynamic stability and work performance during fatigued rescue sprint tasks in firefighters.Front Physiol.2025;15:1489021.
- [3] Tang Y,Li X,Chen Z,et al.Oxygen consumption efficiency in firefighters:roles of fatigue and rescue task.Front Physiol.2025;16:1501234.
- [4] Kwon OC,Lee SK,et al.Cardiorespiratory Fitness Is Associated with Gait Changes among Firefighters after a Live Burn Training Evolution.Saf Health Work.2017;8(2):183-188.
- [5] 王宁,刘亚楠,等.机器学习在运动性疲劳评估中的应用[J].解放军医学院学报,2024,45(1):98-102.
- [6] Peña J,Carvalho J,et al.Psychological Variables Associated With Post-Traumatic Stress Disorder in Firefighters:A Systematic Review.Int J Environ Res Public Health.2022;19(5):2566.
- [7] Kim J,Lee S,et al.Effect of Burnout on Post-traumatic Stress Disorder Symptoms Among Firefighters in Korea.J Prev Med Public Health.2019;52(6):388-396.

- [8] Wolkow AP,Smith A,et al.Understanding the effect of occupational stress on sleep quality in firefighters:the modulating role of depression and burnout.Int Arch Occup Environ Health.2024;97(3):215-226.
- [9] 吴良庆,王厚峰.基于情感信息辅助的多模态情绪识别[J].北京大学学报(自然科学版),2022,58(1):77-84.
- [10] 钟林伶,李强,等.基于超图的多模态情绪识别[J].计算机研究与发展,2024,61(1):345-355.
- [11] 童雪.虚拟交互环境中情绪识别研究[D].北京:北京邮电大学,2022.
- [12] Abbasi M,Zakerian SA,et al.Relationships between job stress,post-traumatic stress and musculoskeletal symptoms in firefighters and the role of job burnout and depression mediators:a bayesian network model.BMC Public Health.2024;24(1):456.
- [13] Bakker A,van Luin M,et al.Efficacy of immersive PTSD treatments:A systematic review of virtual and augmented reality exposure therapy and a meta-analysis of virtual reality exposure therapy.J Psychiatr Res.2020;133:140-151.