

# 消防救援外骨骼助力装备发展与应用研究

张小飞<sup>1</sup> 李渊<sup>2\*</sup> 于晟伟<sup>2\*</sup>

(1.江苏省南通市如东县消防救援大队, 江苏 南通 226400, 2.中国消防救援学院, 北京 102202)

**摘 要:** 国际随着我国应急救援体系向“全灾种、大应急”转型升级, 消防员面临的救援场景日益复杂, 单兵负荷持续增加, 职业损伤风险居高不下。外骨骼助力装备作为一种融合机械工程、材料科学、生物力学等多学科技术的人机协同系统, 通过结构支撑与动力辅助, 可有效缓解消防员的体力负荷、提升作业效率并降低运动损伤风险。本文系统梳理外骨骼助力装备的分类体系与技术特征, 重点分析其在消防救援中的负重搬运、破拆作业、水枪操作等典型场景的应用现状, 探讨当前存在的能源供给、人机协同、环境适应性等瓶颈问题, 并结合智能材料、柔性传感、人机共融等前沿技术, 展望其在未来消防救援体系中的发展趋势与应用前景, 以期为我国消防救援装备的智能化发展提供理论参考与实践指引。

**关键词:** 消防救援; 外骨骼; 助力装备; 人机协同; 职业防护

**基金项目:** 中国消防救援学院 2025 年科研预研项目(XFKYY202513)

DOI: doi.org/10.70693/rwsk.v2i1.180

## 一、概述

消防救援作为社会应急体系的核心构成, 常需在高温、浓烟、坍塌等极端环境下开展高强度作业。据相关统计, 消防员单兵防护装备与救援工具的总负荷常超过 30kg<sup>[1]</sup>, 且随着任务复杂化, 负荷呈持续增加趋势。长期负重作业易引发肌肉骨骼疾患, 突出表现为腰背劳损、膝关节损伤等职业性疾病<sup>[2]</sup>。这不仅削弱了队伍持续作战能力, 也直接影响到救援效率与人员安全。因此, 如何通过技术手段减轻消防员生理负荷、提升单兵机动性与作业耐力, 已成为消防科技创新的重要课题。

外骨骼助力装备源于军事与康复领域, 是一种可穿戴的机电一体化辅助系统。其通过机械结构传递或驱动装置输出助力, 增强穿戴者的力量、耐力与负重能力。早期外骨骼研究以军事应用为主导, 如美国伯克利仿生科技公司开发的 HULC (Human Universal Load Carrier) 系统, 可实现士兵负重 90 kg 条件下的长途行军<sup>[3]</sup>。随着技术进步与成本下降, 外骨骼逐渐向工业、医疗、民用等领域拓展。在工业场景中, 上肢外骨骼已用于汽车装配线, 降低工人肩肘关节负<sup>[4]</sup>; 在康复医疗领域, 日本 HAL-5 系统通过肌电信号感知实现瘫痪患者的步态重建<sup>[5]</sup>。近年来, 消防救援作为高风险、高负荷的特殊场景, 逐渐成为外骨骼技术落地的重要方向, 国内外研究机构相继推出针对消防作业的专用外骨骼原型系统。

尽管外骨骼技术在多个领域取得进展, 但其在消防救援中的应用仍面临诸多挑战。一方面, 火场环境具有高温、高湿、复杂障碍等特点, 对装备的耐候性、灵活性与可靠性提出极高要求; 另一方面, 消防作业动作多样且非结构化, 如攀爬、破拆、拖拽等, 要求外骨骼具备良好的人机协同性与场景适应能力。未来消防救援外骨骼的发展, 将趋向于轻量化、智能化、高可靠三个维度: 通过复合材料与拓扑优化实现结构减重; 集成生物信号感知与自适应控制算法提升人机融合度; 发展高能量密度电源与多模驱动技术以保障长时间作业需求。此外, 外骨骼与消防防护服、通信设备、环境感知模块的系统集成, 也将成为构建“智能单兵作战系统”的关键路径。

## 二、分类与特点

**作者简介:** 张小飞 (1979-), 男, 研究方向为消防救援、救援装备;

李 渊 (1996-), 男, 讲师, 研究方向为运动训练、消防训练;

于晟伟 (1995-), 男, 博士, 讲师, 研究方向为偏微分方程、复杂网络、人工智能、高等数学教育。

**通讯作者:** 李渊, 于晟伟

外骨骼助力装备可按结构设计、驱动原理、功能应用等多种维度进行分类。如图 1 所示,按结构可分为上肢外骨骼、髋关节、下肢外骨骼与全身外骨骼;按驱动方式则主要分为无源(被动式)与有源(主动式)两大类;按功能则涵盖负重助力、运动辅助、康复训练等不同应用导向。在消防救援场景中,以上肢与下肢外骨骼最为常见,分别用于缓解手臂持械负荷与增强下肢搬运能力。



图 1 外骨骼助力装备按结构分类

无源外骨骼不依赖外部能源,通过机械结构(如弹簧、棘轮、连杆)实现人体运动能量的储存与释放,具有结构简单、质量轻、可靠性高的特点。例如,如图 2 所示,湖北工业大学团队研发的无动力髋关节助力外骨骼,通过三维铰接机构与扭力弹簧实现搬运作业中的腰部助力<sup>[6]</sup>;重庆牛迪科技公司推出的“普力(PULLE)”下肢外骨骼,采用偏心轮与高分子材料实现站立时 50%的负荷转移,整机质量仅 4.5 kg<sup>[7]</sup>。这类装备虽助力效果有限,但在断电、高温等恶劣环境下表现出良好的环境鲁棒性,适用于消防员长时间穿戴与基础负荷缓解。

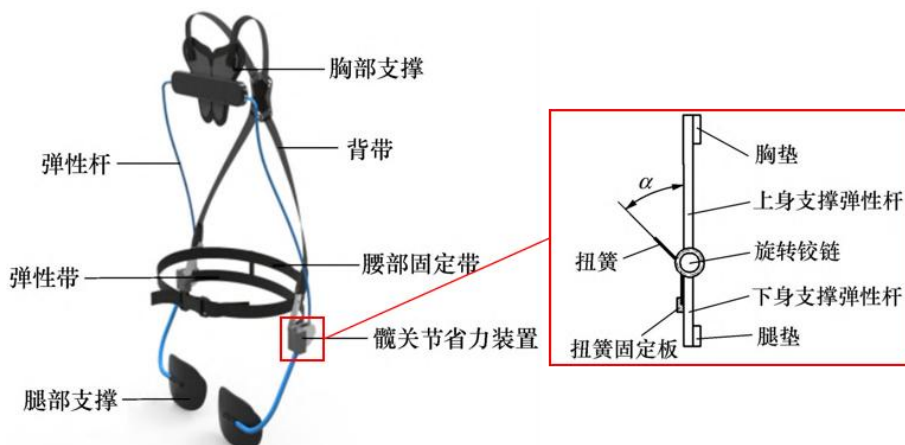


图 2 无动力髋关节助力外骨骼及其省力关节结构示意图

有源外骨骼则依赖电机、液压或气压驱动,通过传感器实时感知人体运动意图,并提供主动助力。其助力效果显著,可控性强,但结构复杂、质量大、依赖持续能源供给。法国 RB3D 公司开发的 HERCULE 外骨骼采用液压驱动与运动感知技术,可承载 100 kg 以上负荷,适用于消防员重装备搬运<sup>[8]</sup>。中国科学院研制的 EXOP-1 下肢外骨骼则集成 22 个传感器与 6 个驱动器,虽自重达 20 kg,但可提供 70 kg 的负重助力<sup>[9]</sup>。值得指出的是,现有有源外骨骼在火场高温环境下电池安全性与驱动系统可靠性仍待进一步验证,其实际应用尚处样机测试阶段。

### 三、在消防救援中的应用

消防救援外骨骼主要应用于高层建筑负重救援、破拆作业、训练评估、水枪辅助支撑三大场景,旨在通过外力辅助降低消防员关键肌群与关节的负荷强度,提升作业持久力与操作精度。

在负重救援场景中,消防员常需搬运呼吸器、液压破拆工具、救援担架等重型装备。下肢外骨骼通过将负载传递至地面,有效缓解腰背与膝关节压力。王正斌<sup>[10]</sup>设计的消防下肢外骨骼采用拓扑优化与 7075 铝合金框架,在实现 19.6%轻量化的同时,满足 1700 N 载荷下的强度要求;其 ADAMS 仿真显示,穿戴后髋关节力矩显著降低,步态协同性良好。此类装备尤其适用于地震、山岳等车辆无法抵达的救援现场,可增强单兵物资输送能力。



图3 消防下肢外骨骼助力方式、结构及其设计渲染图

传统破拆工具操作空间受限,且长时间维持弯腰、跪姿等非标准姿势易导致腰部损伤。浙江消防总队与浙江大学合作开发的可折叠上肢外骨骼,采用铰链式连杆结构,可在宽度不足80cm的空间内展开作业<sup>[1]</sup>。该装备肩关节设计具有5个自由度,肘关节采用可变传动比机构,在狭小空间内仍能提供最大 $180\text{N}\cdot\text{m}$ 的输出扭矩。实验数据显示,在模拟坍塌救援任务中,穿戴外骨骼的消防员完成混凝土板破拆任务的时间缩短约25%,腰部竖脊肌的表面肌电信号幅值降低约35%。但研究也指出,当前系统的力反馈精度在高温环境下会下降约18%,这暴露出传感器耐候性的技术瓶颈。

破拆作业依赖于上肢爆发力与持续施力能力,易导致肩肘关节疲劳甚至损伤。上肢外骨骼通过机械臂增强力矩输出,使消防员可更轻松操作液压剪、扩张器等工具。李艳志等<sup>[12]</sup>针对消防水枪后坐力问题研发的上肢外骨骼,采用碳纤维支撑板与尼龙背心结构,AnyBody生物力学仿真显示,穿戴后肩部三角肌激活度下降约19.36%,且双侧肌肉负荷趋于均衡。该研究表明,外骨骼不仅可降低肌电活动水平,还能改善单侧施力导致的姿态代偿问题。

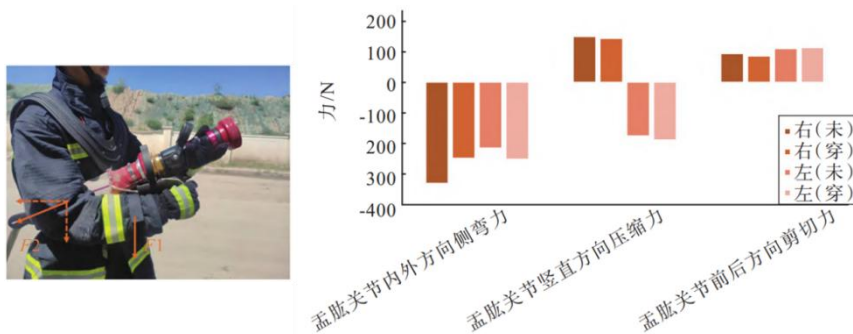


图4 未穿与穿戴消防外骨骼时工作状态下的肩关节反作用力

水枪辅助支撑是灭火战斗中的典型负荷场景。消防水枪在高压射水时产生持续后坐力(通常超过250N),长时间把持易导致上肢疲劳。李艳志等<sup>[13]</sup>设计的消防水枪外骨骼通过L形合金支架与背部承载结构,将水枪重力与后坐力分散至躯干,ABAQUS应力分析表明其最大形变仅 $4.835 \times 10^{-3}\text{mm}$ ,具备良好的结构可靠性。实际测试中,消防员反馈穿戴前后臂负荷明显减轻,且双侧肩部受力更均衡。这为长时间持枪灭火提供了可行的技术解决方案。

在化工火灾、核生化事故等特殊救援场景中,消防员需穿戴重型防护服,活动能力严重受限。南京消防科研所研制的耐腐蚀外骨骼框架,采用钛合金表面等离子喷涂陶瓷涂层,可在腐蚀性环境中连续工作4小时以上<sup>[14]</sup>。该设计的一个关键突破是无润滑轴承系统,所有转动副均采用自润滑复合材料,避免了传统润滑油在高温下挥发或凝固的问题。

总体而言,外骨骼在消防救援中的应用已从概念探索走向原型验证,在降低生理负荷、改善作业姿态方面展现出积极效果。然而,现有系统多针对单一场景设计,缺乏多任务适应性,且在实际火场环境中的耐久性与可靠性仍有待大规模实战检验。

#### 四、应用不足与展望

尽管外骨骼助力装备在消防救援中展现出潜在价值,但其实际推广仍面临三方面突出瓶颈:一是能源与动力系统制约,有源外骨骼依赖电池或液压动力,存在续航短、高温安全性差等问题,而无源外骨骼助力效果有限;二是人机协同性能不足,现有系统多基于预设步态或固定轨迹,难以适应消防员跨越、蹲伏、攀爬等非结构化动作,易产生运动干涉;三是环境适应性与穿戴舒适性欠缺,外骨骼在高温、潮湿、多尘环境中易出现故障,且刚

性结构长期穿戴易导致局部压迫与皮肤损伤。

消防救援外骨骼将朝轻量化集成、智能自适应与多场景通用三个方向深化发展。一方面,随着碳纤维复合材料、柔性驱动技术(如气动人工肌肉)的成熟,外骨骼在重量、舒适性与环境适应性上将有显著提升;另一方面,基于肌电、惯性等多模态传感的人机交互算法,可实现更自然、更精准的运动意图识别与助力控制。此外,模块化设计将使同一外骨骼平台能够通过快速更换组件,适配负重、破拆、射水等不同任务需求。长远来看,外骨骼将与智能头盔、生命体征监测、环境感知终端深度融合,构成消防员“数字孪生”作战系统,实现体能增强、状态监控与指挥调度的全方位提升,从而推动消防救援向更安全、更高效、更智能的方向演进。

参考文献:

- [1] 陈昱兴, 刘鸣, 王博崇, 等. 智能消防外骨骼的材料研究[J]. 今日消防, 2021, 6(6): 34-35.
- [2] 焦爱红, 蔡创生. 消防员常训科目训练致伤分析[J]. 消防科学与技术, 2015, 34(3): 379-383.
- [3] Robert B. Robotic exoskeletons: a review of recent progress [J]. Industrial Robot, 2015, 42(1): 5-10.
- [4] Spada S, Ghibaud L, Gilotta S, et al. Investigation into the Applicability of a Passive Upper-limb Exoskeleton in Automotive Industry[J]. Procedia Manufacturing, 2017, 11: 1255-1262.
- [5] Sankai Y. Leading Edge of Cybernetics: Robot Suit HAL [C]// SICE-ICASE International Joint Conference, 2006: 225-229.
- [6] 王艺澜, 涂细凯, 徐一鸣, 等. 一种无源髋关节助力外骨骼设计与人机工程研究[J]. 机械科学与技术, 2022, 41: 43-48.
- [7] 李强, 周加永, 赵文彬, 等. 无源被动外骨骼系统研究现状与关键技术分析[J]. 机床与液压, 2021, 49(5): 156-161.
- [8] 周加永, 莫新民, 张昂, 等. 外骨骼助力机器人研究现状与关键技术分析[J]. 兵器装备工程学报, 2016, 37(10): 99-104.
- [9] 中科院研制意念控制外骨骼: 可一拳打穿墙体[J]. 黑龙江科技信息, 2014(20): 22-25.
- [10] 王正斌. 消防下肢外骨骼设计与优化[D]. 天津科技大学, 2024.
- [11] 陈涛, 王勇, 刘洋. 狭小空间救援上肢外骨骼机构设计与实验研究[J]. 机械工程学报, 2023, 59(11): 205-213.
- [12] 李艳志, 王建敏, 庄延杰, 等. 消防水枪外骨骼的生物力学分析[J]. 消防科学与技术, 2023, 42(6): 799-803.
- [13] 李艳志, 白小龙, 王建敏. 消防水枪辅助支撑外骨骼的设计与可靠性分析[J]. 消防科学与技术, 2024, 43(10): 1459-1464.
- [14] 王建国, 孙磊, 陈旭. 耐腐蚀消防外骨骼设计与环境适应性研究[J]. 材料科学与工艺, 2022, 30(3): 88-95.

## Research on the Development and Application of Exoskeleton Assisted Equipment for Fire Rescue

Zhang Xiaofei<sup>1</sup>, Li Yuan<sup>2\*</sup>, Yu Chengwei<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup> Rudong County Fire and Rescue Brigade, Jiangsu, Nantong 226400, China

<sup>2</sup> China Fire and Rescue Institute, Beijing 102202, China

**Abstract:** With the transformation and upgrading of China's emergency rescue system towards "comprehensive disaster response and major emergency management," firefighters are increasingly facing complex rescue scenarios, with continuous increases in individual loads and persistently high risks of occupational injuries. As a human-machine collaborative system integrating multidisciplinary technologies such as mechanical engineering, materials science, and biomechanics, exoskeleton assistive equipment can effectively alleviate firefighters' physical burdens, enhance operational efficiency, and reduce the risk of musculoskeletal injuries through structural support and power assistance. This paper systematically reviews the classification systems and technical features of exoskeleton assistive equipment, with a focus on analyzing their application status in typical fire rescue scenarios such as load carrying, breaching operations, and water hose handling. It explores existing bottlenecks in energy supply, human-machine collaboration, and environmental adaptability, while incorporating cutting-edge technologies such as smart materials, flexible sensing, and human-machine integration to envision their development trends and application prospects in future fire rescue systems. The aim is to provide theoretical reference and practical guidance for the intelligent development of fire rescue equipment in China.

**Keywords:** National Fire and Rescue; Exoskeleton; Assistive Equipment; Human-Machine Collaboration; Occupational Protection