

# 未来单兵作战智能外骨骼技术体系与能力边界

周琛知

中国广电湖南网络股份有限公司, 中国·湖南 长沙 410003

**摘要:** 智能外骨骼作为增强单兵作战能力的关键装备, 其技术体系构建与能力边界界定对未来战场具有重要意义, 通过对作战需求与技术体系架构, 性能约束机理和能力边界模型的系统分析建立了涵盖需求牵引与体系设计, 约束识别和边界评估的完整分析框架, 研究表明智能外骨骼技术体系应以作战任务为导向, 整合动力驱动与感知控制及能源管理等核心模块, 其能力边界受到功率密度与响应延迟及系统质量等物理约束和人体生理耐受等生物约束的双重限制, 定量分析表明载荷增强与机动速度和续航时间三者之间存在权衡关系, 为装备设计提供理论依据。

**关键词:** 智能外骨骼; 单兵作战; 技术体系; 能力边界; 性能约束

## The Future of Intelligent Exoskeleton Technology System and Capability Boundary for Individual Combat

Zhou Chenzhi

China Radio and Television Hunan Network Co., Ltd., China Hunan Changsha 410003

**Abstract:** As a key equipment to enhance individual combat capabilities, the construction of the intelligent exoskeleton technology system and the definition of its capability boundaries are of great significance for future battlefields. Through a systematic analysis of combat requirements, technical system architecture, performance constraint mechanisms, and capability boundary models, a complete analytical framework covering demand-driven, system design, constraint identification, and boundary evaluation has been established. Research shows that the intelligent exoskeleton technology system should be oriented to combat tasks, integrating core modules such as power drive, perception and control, and energy management. Its capability boundaries are subject to the dual constraints of physical factors (e.g., power density, response delay, and system mass) and biological constraints such as human physiological tolerance. Quantitative analysis indicates that there is a trade-off relationship among load enhancement, maneuverability speed, and endurance time, providing a theoretical basis for equipment design.

**Keywords:** Intelligent exoskeleton; Individual combat; Technical system; Capability boundaries; Performance constraint

## 0 引言

未来战场呈现高强度与多样化及持续化特征, 对单兵机动能力与负重能力和作战耐力提出了更高要求, 智能外骨骼通过机械动力系统与人体运动系统的深度融合, 能够显著提升单兵综合作战效能, 成为各军事强国竞相发展的重点装备。同时受限于材料性能, 能源技术和控制算法等因素, 智能外骨骼的能力提升存在明确的物理边界和生理边界, 系统研究面向未来单兵作战的智能外骨骼技术体系构建方法和能力边界评估模型, 对指导装备研制及优化性能指标和制定作战运用原则具有重要价值。

## 1 未来单兵作战需求分析

### 1.1 重装备携行需求

新域新质力量建设背景下, 单兵需携带精确制导武器与反无人机系统等重型装备, 总质量远超传统负荷标准, 智能外骨骼通过机械结构直接承载装备重量并传递至地面, 可在不增加人体生理负担的前提下实现携行能力倍增, 对小组协同与武装渗透任务至关重要。针对装备动态平衡难

题系统需通过主动控制算法实时调整关节力矩, 抑制转向与加速时的惯性力扰动维持重心稳定, 此外外骨骼应支持装备快速装卸与位置调整, 满足反恐捕歼等任务中动态变化的需求。

### 1.2 持续作战耐力需求

未来作战高强度及持续化特征明显, 单兵可能需在 72 小时以上保持战备状态对体能与装备续航构成严峻考验, 智能外骨骼通过降低人体代谢能耗延缓肌肉疲劳, 可使作战耐力提升 60% 以上为长途渗透持久侦察任务提供支撑。能源供给是核心瓶颈现有锂电池技术下连续工作时间通常不超过 8 小时, 需在任务规划中合理设置补给点并把握电池更换时机, 同时探索能量回收技术延长续航, 此外外骨骼需具备组网通信功能, 实时上报单兵状态数据支撑指挥系统动态分配任务维持小组长时间协同作战效能<sup>[1]</sup>。

## 2 智能外骨骼技术体系构建

### 2.1 体系架构设计原则

智能外骨骼技术体系架构设计遵循任务导向与模块化

及人机融合三大核心原则，确保系统满足实战需求且具备工程可实现性，任务导向原则要求以作战需求为牵引，明确功能定位与性能边界避免盲目追求技术先进导致成本失控，通过需求分解将宏观作战能力转化为具体技术指标与设计约束。模块化原则将复杂系统拆解为独立子模块，通过标准化接口实现连接与交互，降低开发复杂度提升可维护性与可扩展性，支持功能模块灵活配置升级，人机融合原则强调机械系统与人体运动系统深度耦合，充分考量人体解剖学特征与运动力学规律确保结构匹配度高与运动轨迹协调，辅助力矩贴合肌肉发力模式最大化增强效果（见表1）。

表1 智能外骨骼技术体系架构层次

层次	关键技术	性能指标
感知层	惯性测量, 肌电采集	响应时间<10ms
决策层	深度学习, 模式匹配	识别准确率>95%
执行层	伺服电机, 液压驱动	功率密度>200W/kg
能源层	锂电池组, 能量回收	续航时间>8h

### 2.2 核心功能模块组成

智能外骨骼技术体系由动力驱动 - 感知反馈 - 控制决策 - 能源管理四大核心模块协同构成，动力驱动模块作为执行机构含髌，膝，踝关节驱动器，感知反馈模块通过多源传感器采集人体运动与环境数据包括惯性测量单元与肌电传感器等，借助多传感器信息融合技术提升状态估计精度与系统鲁棒性，控制决策模块是智能核心采用分层架构，高层识别行走与跑步等运动模式，中层生成关节轨迹与力矩曲线，底层执行控制并处理动态响应，深度学习算法助力复杂运动状态准确分类。能源管理模块以锂电池组为核心，电池管理系统监测电压电流与温度，能量回收技术可延长续航15%-20%并根据任务阶段与剩余电量动态分配功率。

### 2.3 模块间耦合关系

智能外骨骼各功能模块存在复杂的物理耦合与信息耦合是系统协同工作的基础与性能优化的难点，物理耦合体现在机械结构与能量传递上，驱动模块输出力矩通过传动机构作用于框架，框架变形与惯性力反作用于驱动器需通过有限元仿真优化结构设计，能源模块为各模块供电需应对瞬时大电流冲击，信息耦合贯穿传感 - 控制 - 执行闭环，感知数据需经同步与变换才能被控制模块利用，需采用高性能处理器优化算法满足10毫秒级控制周期要求，控制指令传递至驱动模块存在延迟与误差，需引入延迟补偿与鲁棒控制方法提升响应品质。此外模块间耦合涉及故障传播，需通

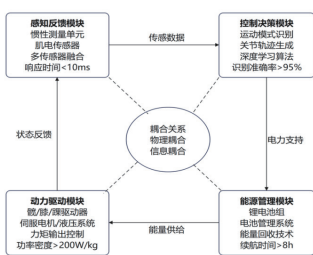


图1 智能外骨骼技术体系核心模块及耦合关系

过冗余配置与故障隔离策略提升可靠性，关键传感器双备份或三备份，控制系统具备故障检测与重构能力确保战场环境下的生存能力与任务完成率（见图1）。

## 3 能力边界约束机理

### 3.1 动力系统物理约束

动力系统输出能力受驱动器功率密度，传动效率与散热条件等物理因素制约，决定了外骨骼载荷增强与机动性能的上限。现有伺服电机功率密度多在150-200W/kg，液压驱动器虽可达300W/kg以上但需配套液压泵与储能器，导致整机功率密度难以突破200W/kg，直接限制辅助力矩幅值与持续输出时间。传动机构存在能量损耗，高功率密度驱动器散热压力突出，电机与液压元件工作时产生大量热量，自然冷却难以满足需求强制冷却系统又会增加结构复杂度与能耗，在紧凑型设计中散热空间受限成为关键瓶颈，此外驱动器存在动态响应延迟与电机转子惯量及液压系统油液可压缩性等因素导致力矩输出滞后，需权衡功率密度与响应速度确保人机运动协调安全<sup>[2]</sup>。

### 3.2 能源供给时间约束

能源续航是智能外骨骼实战化的核心瓶颈，电池能量密度，功率特性与环境适应性共同决定作战时长与任务半径，满足8小时以上续航需携带10-15公斤电池组，显著占用系统负载份额，电池放电功率随电量衰减剩余20%以下时难以支撑高功率脉冲输出，实际可用电量仅为标称容量的70%-80%需预留安全裕度避免任务关键时刻掉电。环境温度对电池性能影响显著，零下20摄氏度时可用容量减少50%以上高温则加速老化，极端气候下需额外采取保温或散热措施，能量回收技术仅能在关节负功率阶段起效，回收电量占比不超总消耗的15%且存在转换损耗，无法依赖其弥补电池容量不足，野外环境下快实用受限模块化电池设计更为可行，需实现接口标准化与更换简便化确保单兵5分钟内完成电池更换恢复战力<sup>[3,4]</sup>。

### 3.3 人体生理耐受约束

人体作为智能外骨骼的控制主体与能量输入源，生理耐受性构成其能力提升的生物学边界，长时间佩戴外骨骼易产生局部压力集中，接触部位承受的设备质量与惯性力若超过毛细血管压强阈值，会阻断血液循环引发组织缺血与神经压迫甚至导致压疮，需遵循人体工程学原则优化接触面设计增大接触面积，采用柔性材料预留肢体活动间隙避免摩擦损伤，外骨骼关节转动范围需与人体生理极限匹配，运动轨迹需贴合自然步态避免超过约束导致关节扭伤或引发人体代偿性调整，否则会增加额外能耗削弱辅助效果<sup>[5]</sup>。代谢能耗是核心生理负荷指标，不当辅助策略可能干扰自然运动模式，激活更多协同肌群反而增加功耗，控制算法需以最小化代谢消耗为目标，优化辅助时机与力矩幅值，此外需控制中心血管系统负荷避免心率持续超过最大心

率的 85%，同时通过透气材料与开放式结构或主动冷却系统缓解热应激保障长时间作战中的生理安全<sup>[6]</sup>。

## 4 能力边界定量评估

### 4.1 载荷 – 速度性能边界

载荷增强能力与机动速度是智能外骨骼核心性能指标，二者受驱动系统功率限制与人体生理耐受度制约存在显著制约关系，载荷增强倍数当前普遍在 3-5 倍即无辅助负重 20 公斤时，外骨骼可支撑携带 60-100 公斤装备核心是通过外骨骼承担大部分垂直负载传递至地面，但水平方向惯性力仍需人体控制导致载荷增大会降低机动灵活性与动作协调性，机动速度与载荷质量呈反比，当载荷从 30 公斤增至 80 公斤时，平均行进速度从 5 公里 / 小时降至 3.5 公里 / 小时下降幅度达 30%，在快速机动与紧急规避等战术动作中影响更为突出。性能边界曲线需通过实验测试绘制采用指数衰减或双曲线函数建立载荷 – 速度映射模型，参数反映技术特性与人体适应能力，地形条件对边界曲线影响显著，10 度坡面速度约为平地的 70%20 度坡面降至 50% 以下，这些定量数据可为任务规划提供支撑，通过技术改进提升驱动器功率密度与控制算法性能可进一步拓展这一性能边界<sup>[7,8]</sup>。

### 4.2 续航 – 功率耦合边界

续航时间与系统功率输出强耦合，二者乘积受电池能量总量约束，构成外骨骼作战能力的时间边界，系统功耗中驱动功率占比超 80%，平地匀速行走功耗 200-300 瓦，上坡与跑步或重载时升至 500-800 瓦，跳跃等动作瞬时峰值功率超 1000 瓦，对电源动态响应与峰值输出能力要求严苛，假设备有 10 公斤能量密度 200Wh/kg 的锂电池总能量 2000Wh，扣除放电深度限制与转换损耗，实际可用能量约 1400Wh，200 瓦平均功耗下理论续航 7 小时，实际因功率波动仅能达到 5-6 小时，通过能量守恒原则可建立约束方程，量化给定功率需求下的最大续航或规定时长内的平均功率上限为任务规划提供量化工具。能量管理策略是拓展边界的关键需通过智能算法动态调整工作模式，低威胁阶段节能高威胁阶段高性能输出，预测性能量管理基于任务信息规划功率预算，机器学习算法优化功耗模式平衡性能与续航矛盾<sup>[9]</sup>。

### 4.3 质量 – 灵活性权衡边界

系统质量与运动灵活性存在本质矛盾，二者的最优平衡是外骨骼设计的核心挑战，系统质量由框架与驱动器及电池等部件构成，框架采用高强度铝合金或碳纤维复合材料，在保证刚度强度的前提下轻量化，但碳纤维成本高且抗冲击性差，需综合权衡性能与成本及可靠性，驱动器质量与输出功率成正比需优先保障近端大关节功率配置，合理分配远端小关节驱动能力优化系统动力学特性，运动灵活性涵盖加速 – 转向 – 姿态调整等维度，质量增加会降低

推重比与转向敏捷性延长加速时间增大转动惯量，在战术场景中可能错失时机或增加受伤风险需将电池与驱动器等重部件布置在靠近人体质心位置。通过多目标优化方法求解帕累托最优解集可确定质量 – 灵活性权衡边界，解集上的方案呈现不同权衡比例，可根据任务优先级选择 – 侦察狙击任务优先轻量化高灵活性方案，重装备携行任务可接受大质量强承载方案通过模块化配置适配多种作战需求<sup>[10]</sup>。

## 5 结语

智能外骨骼技术体系构建与能力边界研究是指导装备发展的理论基础，通过对未来单兵作战需求的系统分析明确了智能外骨骼在复杂地形机动，重装备携行和持续作战等方面的核心功能定位。技术体系构建遵循模块化与集成化原则，实现了动力驱动与感知控制和能源管理等功能模块的有机协同，定量评估表明载荷增强与机动速度，续航时间与输出功率，系统质量与运动灵活性之间存在此消彼长的权衡关系，这些边界条件决定了智能外骨骼的实际作战效能，未来应聚焦高功率密度驱动技术与高能量密度电池及智能自适应控制算法等关键技术突破，逐步拓展能力边界推动智能外骨骼向实战化方向发展。

### 参考文献：

- [1] 王新, 顾伟. 单兵功法在军事训练防治中的作用、地位与展望[J]. 海军军医大学学报[1]2026,47(01):126-131.
  - [2] 邱婧, 李嘉, 秦维聃等. 外军单兵装备技术的研究进展与发展趋势[J]. 中国个体防护装备, 2025,(05):11-15.
  - [3] 单兵外骨骼! 让“未来战士”拥有钢筋铁骨? [J]. 华东科技, 2025,(09):28-29.
  - [4] 崔文秀, 马占书, 王琦等. 无线通信单兵装备在复杂战场环境中的应用与未来展望[J]. 长江信息通信, 2025, 38(08):79-81.
  - [5] 颜翔宇, 周利坤, 司玉昌等. 军用动力外骨骼的发展现状及关键技术综述[J]. 兵工自动化, 2022,41(10):14-20.
  - [6] 邱婧, 李嘉, 秦维聃等. 外军单兵装备技术的研究进展与发展趋势[J]. 中国个体防护装备, 2025,(05):11-15.
  - [7] 李奕龙, 韩科, 王海卫. 狭小空间内单兵外骨骼技术[J]. 中国军转民, 2024,(21):30-31.
  - [8] 张凡煦. 被动式下肢外骨骼运动辅具设计研究[D]. 江南大学, 2023.DOI:10.27169/d.cnki.gwqgu.2023.000966.
  - [9] 颜翔宇, 周利坤, 司玉昌等. 军用动力外骨骼的发展现状及关键技术综述[J]. 兵工自动化, 2022,41(10):14-20.
  - [10] 王名祺, 干静, 曾博等. 特殊领域作战外骨骼机器人的功能展示视频制作[J]. 机械, 2021,48(01):61-66+74.
- 作者简介: 周琛知 (1974.08.20), 男, 汉族, 湖南省长沙市, 硕士, 中级工程师, 研究方向: 电子计算机。