

外骨骼机器人在工程机械装配和物流过程应用的可行性研究

陶华云^{1,2} 冯启^{1,2} 雷豹^{1,2}

(1 中联重科股份有限公司 湖南 长沙 410013; 2 国家混凝土机械工程技术研究中心 湖南 长沙 410000)

摘要: 通过开展工业外骨骼机器人在某工程机械产品装配和物流分拣过程中的试用验证, 研究当前外骨骼机器人可穿戴助力技术和设备对工程机械装配和物流分拣工况的适应性, 从功能匹配、助力效果、穿戴舒适性和设备智能化等方面进行对比分析, 发现目前的应用尚存在限制性, 为该类机器人的研发改进和在工程机械行业工厂推广应用提供经验参考。

关键词: 外骨骼机器人; 可穿戴助力设备; 装配; 分拣搬运; 工程机械

0 引言

工程机械产品因其结构复杂、零部件重量较重、规格型号多和生产换型频次高等特点, 对装配和物流作业过程使用助力设备往往存在环境条件、作业空间或作业效率等方面的限制, 使得部分工件的分拣搬运和上机安装无法采用常规的吊装、支撑工装(如助力臂)及抓取机器人等助力装置, 而仍需由人工直接搬运。其中的一些中等重量工件(重量一般在 15 ~ 50kg)已超出国家标准规定的人体搬运重量限值, 不符合人机工程要求, 长时间作业存在职业健康安全隐患, 典型的问题为作业人员易存在不同程度的腰肌劳损。为解决此方面问题, 需要有新型的不损失人工搬运柔性和效率的省力辅助设备或工具来实现作业助力, 如当前正在发展的可穿戴式助力设备等。

外骨骼机器人是目前具备保持人体柔性的相对较成熟主流可穿戴助力设备之一, 其最早应用于医疗行业, 如康复外骨骼机器人等。后分支发展出工业外骨骼机器人, 目前在物流服务和军工行业应用较多和较成熟, 近年也已开始向工业制造业推广, 如汽车装配、工厂仓库分拣等, 但在工程机械行业暂无实际应用案例。

某工程机械产品的销轴和齿轮类工件, 在仓储分拣配送和装配过程即存在上述条件限制问题, 需要人工参与。为提升效率和改善此作业工况, 现引进外骨骼机器人助力设备进行验证, 研究和分析其应用可行性。

1 验证方法

表 1 工业外骨骼机器人试用设备参数

项目	A 设备	B 设备	C 设备
总体结构	一体式	分体式	分体式
载重及助力 /kg	50/30	25/25	50/30
自重 /kg	6	6.5	5
主体材质	工程塑料	工程塑料 + 航空铝合金	航空铝合金
驱动形式	电驱	电驱	电驱
基本配置	骨骼体、固定带、腿部支撑、驱动单元、手部吊带及挂具、电池(外置式)	骨骼体、固定带、腿部支撑、驱动单元、手部吊带及挂具、电池(内置式)	骨骼体、固定带、腿部支撑、驱动单元、手部吊带及挂具、电池(内置式)
操作方式	按钮	按钮 + 遥控钥匙	有线调节器
智能化	PAD 显示屏	/	/

注: 分体式结构即为主体骨架和各部位支撑可进行拆卸和组装

此次选用了在其他行业有较多应用案例的三款国产外骨骼机器人设备, 前期经过调研和工况评估, 均选用类型为有源腰部助力外骨骼机器人, 其基本形式和参数见表 1。

从表 1 可知, 目前工业外骨骼机器人的标准化还比较低, 各厂家结构和配置差异性还比较大。

我们采用多维度矩阵评价模式, 选取了车间现场的销轴搬取上机(约 20 ~ 50kg)和齿轮配送分拣(约 15 ~ 30kg)两个制造场景进行试用验证, 执行“弯腰-搬取-直腰-短距行走-装配/摆放”作业, 并由不同角色人员数名(含实际作业工人、班组长和工艺人员)组成体验小组, 分别从助力效果、穿戴舒适性、操作性等方面评价体验感受和使用接受度。

2 验证情况及结果

2.1 工业外骨骼机器人试用情况

工业外骨骼机器人的试用情况见表 2。工业外骨骼机器人的试用评价认可度对比如图所示。

评价维度	设备A	设备B	设备C
可穿戴性	7	7	7
穿戴舒适性	6	3	1
穿戴助力效果	7	5	2
弯腰-助力效果	6	6	4
直腰-助力效果	5	5	0

试用结果表明, 三款腰部助力外骨骼机器人设备均不能同时较好地满足两种工况的助力需求。具体情况为:

(1) 设备主要在弯、直腰作业过程产生瞬间主动助力, 可减小人员腰部用力。但助力效果有差异, 设备 A 助力较明显, 设备 B、C 不明显;

(2) 设备在直腰后搬运和装配作业过程不能主动助力, 主要通过使用手部辅助机构进行被动助力, 且效果差异较大。设备 A

表 2 工业外骨骼机器人试用情况表

项目	A 设备	B 设备	C 设备
助力性能	(1) 弯直腰时腰部瞬时助力体感性较好；(2) 手部助力采用直接吊带结构，无缓冲，约束性大，体感性不佳，搬运过程助力效果不明显	(1) 弯直腰时腰部瞬时助力体感性较弱；(2) 手部助力采用悬杆 + 吊带结构，有缓冲，约束性较小，助力范围较大（直腰过程也有），体感性较好	(1) 弯直腰时腰部瞬时助力体感性较弱；(2) 手部助力采用吊带 + 手套结构，无缓冲，约束性一般，搬运助力有一定效果，但肩部承力大
穿戴舒适性	(1) 穿戴有负重感；(2) 背部与身体有间隙，且有吹风，透气性好	(1) 穿戴负重感稍强；(2) 背部与身体紧贴，透气性差	(1) 穿戴负重感小；(2) 背部和腿部接触处有摩擦和压迫不适感
操作性	启动 / 停止有按钮，有工作灯指示；电池快速插接更换	启动 / 停止使用遥控钥匙，靠听声音，无显示；电池盒锁扣式安装，快速更换	启动 / 停止有按钮或遥控操作，无显示；内置式、插接电源
功能先进性	配 PAD 显示屏，可输出助力值，但无实时负载力数据	无屏显，无数据显示和输出	无屏显，无数据显示和输出
外观结构	(1) 一体化结构，结构简单零件少，穿戴较方便；(2) 不可拆卸，运输箱体积大	(1) 分体式设计，结构复杂零件多，首次穿戴费时；(2) 可拆卸，运输箱体积稍小	(1) 分体式设计，结构较简单，穿戴较方便；(2) 可拆卸，旅行袋包装，携带方便

的辅助吊带形式助力不明显，设备 B 的柔性吊杆形式有较好效果，设备 C 的吊带及手套形式有一定效果，但人员肩部不适感明显；

(3) 设备手部助力的终端挂具需依据工件定制开发才能较好提升助力效果，但挂具设计通用性难度大，多类型更换会增加使用复杂度；

(4) 设备 B、C 的操控方式过于简单、信号不直观，受环境噪声影响较大，环境适应性稍差；

(5) 设备无受力监控及显示模块，助力效果无法数据化和直接在现场输出评价；

(6) 设备 B、C 的穿戴舒适性较弱，设备 C 使用过程中背部与腿部接触部位均有明显摩擦或压迫不适感；

(7) 一线作业人员体验后认为设备对人员腰部应可起到保护作用，对高频次分拣有一定效果，能

够改善腰肌劳损的问题。只是短期使用无法体现，需长期使用后评估效果。

3 结语

通过试用验证，目前腰部助力工业外骨骼机器人设备具有灵活、柔性的优势，对弯腰搬运动作有一定助力效果，长期使用应对腰部受力保护有效，但目前在工程机械行业的应用尚不成熟，主要存在的问题为：

(1) 外骨骼机器人不能同时满足弯腰和直立两种姿态下的助力，腰部助力设备主要在于弯腰过程的瞬时助力，在弯腰完成转换为直立搬运姿态时，则助力效果不明显。而大部分人工搬运作业的工况都是两种姿态结合的，但目前设备厂家反馈两种姿态只能分别提供设备满足，暂无较好的集成解决方案。这方面的功能是需要去研究开发的；

(2) 当前设备为主动式助力，设备原理和输出频率较高且为定值，不适合工程机械行业低频次和复合姿态工况使用；

(3) 当前工业外骨骼机器人在智能化方面功能还不够完善，如无对人体搬运重量及受力变化的实时监测、人体搬运过程心率及耗氧量方面的实时监测功能等，这样使用者对于设备的助力效果和好坏无法直接和客观评价，短期

接受度则难以提升，不利于设备应用的快速推广；

(4) 外骨骼机器人作为可穿戴设备，与人体直接接触，穿戴舒适性很重要。但从体验结果看，设备的自重、结构柔性（与人体差异匹配性及可调节性）、与人体动作协同性和环境适应性均有待提升。特别是热天的使用，需提高材料或结构的透气性、散热性，还可考虑配置主动降温功能，如背部送风等；

(5) 当前工业外骨骼机器人标准化程度较低，各厂家技术发展不一，技术迭代和产品更新换代快，且缺少权威、完整的评价标准和体系，使得使用者在选型、保值方面存在担忧，延迟实际推广应用的行为；

(6) 当前工业外骨骼机器人厂家对工程机械行业的应用需求工况不熟悉，缺少基础数据的积累，故造成非标定制开发模式的周期较长，增加了使用者的资金风险，导致使用者合作意愿较低。

综上，工业外骨骼机器人在工程机械装配和物流行业的应用推广，还需要设备厂家和需求方更多的双向研究和共同协作来实现。

参考文献：

[1] 刘彬,尹鹏.可穿戴式腰部助力移栽装置的设计[J].机电工程技术,2019,48,(增刊 S1):7-8.
[2] 田大肥,王哲.工业装配外骨骼的发展现状[J].工艺与装备,2020(01):155-156.
[3] 戴宗妙,都军民.外骨骼机器人研究现状及面临的问题[J].现代制造工程,2019(03):154-161.

作者简介：陶华云（1981-），男，工程师，学士，研究方向：机械装配工艺及智能制造。