

陕西省技术发明奖公示信息

(2025年度)

一、项目基本情况

项目名称	可穿戴下肢运动辅助外骨骼机器人关键技术及应用
主要完成人	朱爱斌、曹广忠、毛涵、宋纪元、张晶、黄苏丹
主要完成单位	西安交通大学、深圳大学

二、提名意见（适用于部门、机构提名）

提 名 者	陕西省教育厅	提名等级	<input type="checkbox"/> 一等奖 <input checked="" type="checkbox"/> 二等奖及以上
<p>提名意见：</p> <p>该项目围绕外骨骼机器人驱动设计、步态相位识别、柔顺人机交互控制等关键技术开展了深入研究，相关研究成果获得了陕西高等学校科学技术研究优秀成果奖一等奖，项目成果已通过贵州开磷集团股份有限公司矿肥公司、江苏纯一新材料有限公司进行了成果应用，获得了显著的经济收益。</p> <p>提名该项目为陕西省技术发明奖二等奖。</p> <p>说明：省科学技术奖一、二等奖项目，实行按等级标准提名、独立评审表决的机制。提名单者应严格依据省科学技术奖的标准条件，说明提名项目的贡献程度及等级建议。“仅提名一等奖”评审落选项目不再降格参评二等奖。提名项目正式提交后，提名等级建议本年度不得变更。</p>			

三、项目简介

外骨骼机器人能够对人体运动进行辅助或者增强助力，在工业、康复、军事等领域具有重要的战略意义和应用价值。外骨骼驱动关节扭矩密度低、步态时相和运动模式识别准确率低、交互控制柔顺性差、控制精度不足是外骨骼机器人研究的重大难题。针对相关问题，本成果项目研究团队先后在国家自然科学基金委深圳联合重点基金项目、陕西省重点研发计划项目的支持下，围绕可穿戴下肢运动辅助外骨骼机器人重要技术问题，在外骨骼机器人设计、步态相位识别、柔顺人机交互控制、精密位置跟踪控制等方面进行了深入研究。主要技术内容如下：

(1) 针对下肢康复助力和重物搬运需求，研究了曲柄滑块串联弹性驱动器和下肢助力外骨骼的驱动原理和本体设计，对人体下肢肌肉骨骼驱动机理和人体行走实验研究，得到了人体在负重移动任务中的关节运动范围和关节力矩，为下肢助力外骨骼的设计提供了指标参数；设计了下肢助力外骨骼的整体方案，所提出的外骨骼有 16 个自由度，总重 9.4kg；针对传统外骨骼的驱动关节重量大、输出扭矩密度低和对人体关节刚度适配性差的问题，提出了一种曲柄滑块串联弹性驱动器，为外骨骼髌膝关节的屈曲/伸展提供动力；开展了串联弹性驱动器的性能表征实验，串联弹性驱动器可以产生 $45\text{N} \cdot \text{m}$ 标准扭矩和 $102\text{N} \cdot \text{m}$ 峰值扭矩，单个关节重量为 1.4kg，实现了 $32.14\text{N} \cdot \text{m/kg}$ 的高扭矩密度输出；串联弹性驱动器具有高反向驱动性能 ($5.05\text{N} \cdot \text{m}$)、合适的刚度 ($253 \sim 443\text{N} \cdot \text{m/rad}$) 和力跟踪带宽 ($12 \sim 17\text{Hz}$)，提高了外骨骼关节的驱动性能。

(2) 针对下肢康复训练和重物搬运过程的人体步态时相识别和人体运动模式识别准确率低、多模态信息融合特征筛选困难的问题，搭建了基于足底压力传感器和惯性传感器的人体运动信息采集硬件系统，提出了双向门控特征融合模块 Bi-GFF，有效地提高了模型对数据的敏感度，实现了足底压力和运动信息的自适应融合；构建了多特征融合双向门控循环神经网络 DFF Bi-GRU，在受试者 0.8m/s、1.2m/s 和 1.5m/s 的行走速度下，连续实时地对步态相位进行检测，准确率分别达到 94.63%、96.65% 和 96.17%，检测速度达到了 100Hz；针对传统模型在过渡阶段对人体运动模式识别准确率差的问题，根据环境、状态和运动模式之间的依赖关系，构建了 7 种运动模式的 12 个节点组成的有向图，在 DFF Bi-GRU 的基础上引入图卷积网络，在全局的运动模式、过渡模式和非过渡模式中的识别准确率分别达到了 97.29%、94.28% 和 99.84%。

(3) 针对外骨骼康复和搬运助力过程中人体和外骨骼交互的柔顺性不足的问题，提出了分时相控制策略框架，在步态摆动相阶段将目标人机交互力矩设置为零，以透明模式实现外骨骼对人体的柔顺跟随，在步态支撑相阶段根据不同的负载条件规划外骨骼的髌膝关节力矩，以人机协同负载的模式减小人体所承担的负重；针对固定参数的导纳控制器造成外骨骼人机柔顺交互性差的问题，提出了自适应滑模变导纳控制算法，根据人体运动意愿主动调节自适应控制参数，引入了自适应神经滑模控制器，降低了自适应滑模变导纳力控制器的参考轨迹跟踪误差；在关节驱动模型测试中，轨迹跟踪最大误差为 2.52° ，人机最大交互力矩为 $0.467\text{N} \cdot \text{m}$ ；针对不同负载条件下外骨骼助力关节力矩难以预测的问题，引入了动态运动基元，提出了基于负载条件的关节

力矩的分段学习方法，实现了对不同负重条件下的支撑相关节力矩的精准预测，所预测的髋、膝关节力矩与实际之间的均方根误差分别小于 $0.06\text{N} \cdot \text{m}$ 和 $0.11\text{N} \cdot \text{m}$ ，决定系数 R^2 分别大于 0.96 和 0.88。

(4) 针对下肢外骨骼关节电机精密位置跟踪中存在的控制精度和鲁棒性不足的问题，提出了一种 min-max 鲁棒预测位置控制方法，建立了具有参数不确定性的电机增广误差模型，构建了考虑模型参数不确定约束、渐进稳定性约束以及控制输入饱和约束的电机 min-max 鲁棒预测位置控制模型；提出了基于线性矩阵不等式技术和嵌套渐进稳定椭圆不变集的离线控制算法，获得了电机显式线性状态反馈控制律，突破了参数不确定性、渐进稳定性、控制输入饱和等约束下电机鲁棒高精度轨迹跟踪运动控制难题；在干扰情况下，所提出的控制方法能够实现鲁棒精密位置跟踪，稳态位置误差在 100mm 行程范围内保持在 $\pm 20.68\mu\text{m}$ 以内，有效提高了外骨骼机器人关节电机的抗干扰能力，减小了稳态位置误差。

在国家自然科学基金委深圳联合重点基金项目“可穿戴下肢康复运动辅助外骨骼机器人关键技术研究”和陕西省重点研发计划项目“重物搬运外骨骼机器人”支持下，本项目的深入研究与成功实现，丰富了外骨骼机器人的仿生设计和交互控制方法，推进了我国这一技术领域向前发展。本项目成果已公开发表在中科院一区 TOP 期刊 IEEE/ASME Transactions on Mechatronics、IEEE Transactions on Industrial Electronics 和二区 TOP 期刊 IEEE Robotics and Automation Letters 上。

本项目的成果在工业助力领域、医疗康复领域有广阔的应用前景，已通过合作单位贵州开磷集团股份有限公司矿肥公司、江苏纯一新材料有限公司进行了成果应用，有效降低了职业性肌肉骨骼疾患的产生，降低了劳动强度并提高了生产效率。据不完全统计，本项目研究成果应用于贵州开磷集团股份有限公司矿肥公司、江苏纯一新材料有限公司的直接经济效益已达到 1100 万元，经济收益显著。通过不断总结应用成果，完善技术，成熟系统，使其逐步在制造业、矿产业、医疗康复、军事装备等众多领域推广应用，得到国内、国际同行的高度重视和认可，取得更大的经济效益和重大的社会效益。

四、客观评价

(1) 与国内外相关技术的研究现状与水平比较

国内外下肢外骨骼的驱动技术常用传统电机驱动、柔顺驱动等方法，但存在驱动器重量大、扭矩密度低等问题。针对这些问题，本成果提出基于曲柄滑块串联弹性驱动器的创新技术，解决了传统驱动器重量大、低扭矩密度的问题，通过优化设计和材料选择，提高了驱动性能和人体关节适配性。国内外常用固定参数导纳控制，但在动态环境下存在交互力不稳定问题。为此，本成果提出自适应滑模变导纳控制算法，通过实时调整参数，提升了柔顺性和交互稳定性，特别在动态环境下表现优异。多模态信息融合方面，传统方法使用足底压力传感器和惯性传感器，但在精度和实时性上不足。本成果提出多特征融合双向门控循环神经网络，能够准确实时识别步态时相，解决了特征筛选和自适应融合问题。针对外骨骼电机控制中的精度和鲁棒性问题，本成果提出 min-max 鲁棒预测控制方法，结合电机状态空间模型和参考轨迹模型，提高了在复杂环境下的控制精度。

(2) 国家相关部门正式作出的技术检测报告、验收意见、鉴定结论

支持本项目研究的国家自然科学基金委深圳联合重点基金项目“可穿戴下肢康复运动辅助外骨骼机器人关键技术研究”和陕西省重点研发计划项目“重物搬运外骨骼机器人”已圆满完成项目的目标和任务，各项任务和技术指标均达到了预期要求。主要验收意见、鉴定结论摘录如下：

1) 国家自然科学基金项目：（可穿戴下肢康复运动辅助外骨骼机器人关键技术研究），批准号：（U1813212）按有关规定已审核完毕，准予结题。

2) 陕西省重点研发计划项目“重物搬运外骨骼机器人（2021GXLH-Z-044）”项目资料齐全，符合验收要求。项目针对可穿戴重物搬运外骨骼机器人助力人体动力学、构型设计方法及人机耦合运动控制等难点，提出了重物搬运外骨骼机器人刚柔耦合构型设计方案和人-机多功能自转换柔性控制策略，开发了原理样机并进行了初步功能及性能试验，孵化了科技型企业 1 家，达到任务书要求指标，具有较好的社会效益和经济效益。

(3) 国内外重要科技奖励

本项目中的成果“多关节外骨骼助力物资搬运装置设计”获得中国国际“互联网+”大学生创新创业大赛陕西赛区金奖，“膝骨性关节炎加速康复外骨骼机器人”获得陕西省第八届研究生创新成果展高质量 A 类成果，“柔顺性重物搬运助力外骨骼机器人”获得陕西省科技工作者创新创业大赛二等奖，“智膝助行——膝骨关节智能康复外骨骼机器人”获得中国国际大学生创新大赛陕西赛区银奖。

(4) 国内外同行在重要学术刊物、学术专著和重要国际学术会议公开发表的学术性评价意见

本项目成果在中科院一区 TOP 期刊 IEEE/ASME Transactions on Mechatronics、IEEE Transactions on Industrial Electronics 上发表的论文获得了新西兰皇家科学院、工程院两院院士、英国机械工程院院士谢胜泉教授、教育部高层册人才计划获得者宋锐教授、国家杰出青年科学基金

获得者兰旭光教授、教育部“新世纪优秀人才支持计划”入选者李鹤教授、IEEE 机器人与自动化学会柔性制造协同自动化技术委员会（CAFM）通讯联合主席杨晨光教授等国内外知名学者的引用和正面评价，部分学术性评价意见摘录如下：

1) 论文 Novel Design and Control of a Crank-Slider Series Elastic Actuated Knee Exoskeleton for Compliant Human – Robot Interaction（他引次数 19）

引用 1：新西兰皇家科学院、工程院两院院士、英国机械工程院院士、英国利兹大学终身讲席教授谢胜泉教授在机电一体化领域 TOP 期刊 IEEE/ASME Transactions on Mechatronics 3110 - 3119 2023 中正面引用与评价了本项目所提出的方法：“Exoskeleton robots have been developed to assist rehabilitation training in recent years [1], [2], [3], [4].”。

引用 2：2021-2035 国家中长期科技发展规划专家组成员，科技部“十四五”智能机器人重点专项专家组副组长，国家公共服务机器人标准工作委员会委员，全国特种作业机器人标准化工作组特邀委员，中国人工智能学会智能产品与产业委员会工委委员，山东大学宋锐教授在工业电子工程领域 TOP 期刊 IEEE Transactions on Industrial Electronics 16625-16634 2024 中正面引用与评价了本项目所提出的方法：“To boost robustness against unknown uncertainties or disturbances of the system, the sliding mode control (SMC) approach has also attracted increasing attention [16], [17], [18], [19].”。

引用 3：IEEE 机器人与自动化学会柔性制造协同自动化技术委员会(CAFM)的通讯联合主席，2012 年 IEEE Transactions on Robotics 最佳论文奖获得者，西英格兰大学杨晨光教授在工业电子工程领域 TOP 期刊 IEEE Transactions on Industrial Electronics 16338-16347 2024 中正面引用与评价了本项目所提出的方法：“Such as surface treatment of thin-walled parts [5], [6], medical rehabilitation [7], [8], [9], and physical human – robot interaction (pHRI) [10], [11].”。

引用 4：外骨骼“人在环中”控制方法提出者，南开大学张娟娟教授在机器人与自动化领域 TOP 期刊 IEEE Robotics and Automation Letters 8491-8498, 2024 中正面引用与评价了本项目所提出的方法：“To reduce human-robot joint misalignment, researchers designed numerous knee exoskeletons with self-aligning mechanisms [10], [11], [12], [13].”。

2) 论文 Robust Precision Position Tracking of Planar Motors Using Min-Max Model Predictive Control（他引次数 10）

引用 1：国家杰出青年科学基金获得者、国务院学位委员会学科评议组成员、中国自动化学会共融机器人专委会主任委员、西安交通大学兰旭光教授在计算机科学领域国际 TOP 学术期刊 Neurocomputing 587: 127631, 2024 中正面评价并强调了本项目所提出的 min-max 鲁棒预测位置控制方法在处理实际系统不确定性问题时所面临的挑战及其重要性：“The appropriate utility function is designed based on the supremum of the uncertainty in most researches. However, in practical applications, obtaining the supremum of the uncertainty is a more difficult task [22, 23].”。

五、应用情况和效益

1. 应用情况（限 3 页）

本项目开发的可穿戴下肢运动辅助外骨骼机器人技术，已在贵州开磷集团股份有限公司矿肥公司得到应用。该公司是我国重要的磷肥生产和化工产品研发基地，长期承担矿肥及相关产业的生产任务。矿肥生产作业环境复杂，劳动强度大，工人在长时间的搬运、搬抬和蹲站作业中极易产生腰部及下肢疲劳，导致职业性肌肉骨骼疾患频发，生产效率与作业安全受到严重制约。本项目的外骨骼技术在该企业得到应用后，能够有效增强工人在矿肥生产环节的搬运与支撑能力，减轻作业过程中腰部和下肢肌群的负担，降低了工伤和疲劳带来的风险，改善了作业环境下的人体工效条件。同时，外骨骼的应用提升了工人在连续作业中的稳定性和耐力，显著提高了生产效率，减少了因人力因素带来的生产事故，推动了矿肥生产的安全化、智能化发展，取得了显著的经济与社会效益。

本项目开发的可穿戴下肢运动辅助外骨骼机器人技术，也在江苏纯一新材料有限公司得到应用。该公司是国内食品包装行业的骨干企业，拥有完善的产品研发、生产与加工体系，承担着大量一次性餐具、托盒和保鲜膜等产品的生产任务。食品包装生产加工环节劳动强度高，岗位工人普遍存在下肢负荷过重、易疲劳等问题，直接影响生产效率和产品质量。本项目的外骨骼技术应用于该企业的生产线后，能够辅助工人完成长时间的站立、搬运和重复性动作操作，有效降低下肢肌肉疲劳，减轻劳动强度，提升作业舒适性。外骨骼的引入不仅提高了工人操作的稳定性和安全性，还改善了生产线整体的人机工程环境，促进了生产流程的持续稳定运行。该技术的应用，推动了企业劳动生产率的提升，带来了显著的经济和社会效益，并为制造业在智能化、绿色化方向上的发展提供了有力支撑。

主要应用单位情况表					
序号	单位名称	应用的技术	应用对象及规模	应用起止时间	单位联系人/电话
1	贵州开磷集团股份有限公司矿肥公司	可穿戴下肢运动辅助外骨骼机器人关键技术及应用	磷肥生产装置	2021.01.01-2023.12.31	聂运梅
2	江苏纯一新材料有限公司	可穿戴下肢运动辅助外骨骼机器人关键技术及应用	一次性包装容器生产线	2021.01.10-2023.12.31	林作正

2. 经济效益和社会效益（限 3 页）

本项目开发的可穿戴下肢运动辅助外骨骼机器人技术，已应用于贵州开磷集团股份有限公司矿肥公司。贵州开磷集团股份有限公司矿肥公司是国家第二个五年计划期间建设的全国三大磷矿石生产基地之一，是一家专注于有机肥及磷化工产品的研发、生产及销售的磷肥生产商，产品主要包括复合肥料、磷肥、水溶肥、硫镁态等，同时面向用户提供肥料配比、农技指导、产品配送等服务。本项目开发的可穿戴下肢运动辅助外骨骼机器人已经在贵州开磷集团股份有限公司矿肥公司磷矿石、磷酸一铵等产品生产过程中应用，产生了显著的经济效益和社会效益。据不完全统计，直接经济效益已达 500 万元左右。同时可穿戴下肢运动辅助外骨骼机器人能够强化人的腰部搬运和腿部蹲站的生产现场作业能力，减少腰部和腿部的肌肉疲劳，避免职业性肌肉骨骼疾患的产生，有效降低了工人的劳动强度，提高了生产效率，产生的间接经济效益近 1000 万元。

本项目开发的可穿戴下肢运动辅助外骨骼机器人技术，已应用于江苏统一新材料有限公司。江苏统一新材料有限公司于 2017 年 6 月通过 QS 认证并正式投产，是国内塑料食品包装行业领军企业和国家级高新技术企业，主营一次性餐具、蔬果托盒、冷冻行业托盒、保鲜膜等产品，采用先进的五层共挤生产流水线、多工位全自动成型机，吸塑类产品年产量达 12000 吨，保鲜膜年产量 7200 吨。本项目研发的可穿戴下肢运动辅助外骨骼机器人已经在我公司多个食品包装产品的生产加工过程中应用，产生了显著的经济效益和社会效益。据不完全统计，本单位直接经济效益已达到 600 万元，同时可穿戴下肢运动辅助外骨骼机器人能够辅助人工进行生产作业，有效减轻了作业人员的下肢肌肉疲劳，降低了劳动强度，提高了生产效率，产生的间接经济效益近 1100 万元。

六、主要知识产权证明目录（限 10 条）

序号	知识产权类别	知识产权具体名称	国家（地区）	授权号	授权日期	证书编号	权利人	发明人
1	发明专利	一种可穿戴式变刚度绳驱动系统	中国	ZL 2022 1 0452191.X	2023-10-03	6376092	西安交通大学	朱爱斌、屠尧、宋纪元、毛涵
2	发明专利	一种变阻尼柔顺驱动的外骨骼关节	中国	ZL 2021 1 1349905.6	2023-07-14	6136144	西安交通大学	朱爱斌、邹佳峻、宋纪元
3	发明专利	一种变位移式磁流体可变阻尼旋转关节	中国	ZL 2022 1 0452193.9	2024-08-16	7291989	西安交通大学	朱爱斌、宋纪元、毛涵、屠尧
4	发明专利	一种膝关节外骨骼康复训练轮椅	中国	ZL 2021 1 0700774.5	2022-10-25	5537961	西安交通大学、西安市红会医院	朱爱斌、张晶、宋纪元、许鹏、候卫坤、姚丹丹、段琛
5	发明专利	步态相位的划分方法、装置、存储介质及系统	中国	ZL 2021 1 0826713.3	2021-07-21	6193339	深圳大学	曹广忠、张跃鹏、凌梓钦
6	论文	Novel Design and Control of a Crank-Slider Series Elastic Actuated Knee Exoskeleton for Compliant Human - Robot Interaction	美国	2022, 28(1): 531-542.	2022-09-22	IEEE/A SME Transactions on Mechatronics	西安交通大学	Jiyuan Song, Aibin Zhu, YaoTu, Xiaodong Zhang, Guang Zhong Cao
7	论文	Robust Precision Position Tracking of Planar Motors Using Min-Max Model Predictive Control	美国	2021, 69(12): 13265-13276.	2021-12-07	IEEE Transactions on Industrial Electronics	深圳大学	Su-Dan Huang, Kai-Yu Peng, Guang-Zhong Cao, Chao Wu, Junqi Xu, Jiangbiao He
8	论文	Novel Lightweight Lower Limb Exoskeleton Design for Single-Motor Sequential Assistance	美国	2024, 9(3): 2391-2398	2024-01-16	IEEE Robotics and Automation	西安交通大学	Xinyu Wu, Aibin Zhu, Diyang

		of Knee & Ankle Joints in Real World				Letters		Dang, Lei Shi
9	论文	Novel Lightweight Lower Limb Exoskeleton Design for Single-Motor Sequential Assistance of Knee & Ankle Joints in Real World	美国	2024, 32: 43-52.	2023-12-01	IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering	西安交通大学	Jiyuan Song, Aibin Zhu, Yao Tu, Chunli Zheng, Guangzhong Cao
10	论文	A Domain Adaptive Convolutional Neural Network for sEMG-Based Gait Phase Recognition Against to Speed Changes	美国	2022, 23(3): 2565-2576.	2022-12-15	IEEE Sensors Journal	深圳大学	Zi-Qin Ling, Jiang-Cheng Chen, Guang-Zhong Cao, Yue-Peng Zhang, Ling-Li Long Li, Wen-Xin Xu, Sheng-Bin Cao

七、主要完成人情况表

姓 名	朱爱斌	排 名	1
行政职务	陕西省智能机器人重点实验室副主任		
技术职称	教授		
工作单位	西安交通大学		
完成单位	西安交通大学		
对本项目主要学术贡献： 是本项目的总负责人，负责本项目的组织实施，包括学术思路、技术路线的制定等。进行了基于曲柄滑块串联弹性驱动器的下肢外骨骼驱动技术、多特征融合的双向门控循环神经网络人体运动意图感知技术研究，发明了一种可穿戴式变刚度绳驱动系统、一种变阻尼柔顺驱动的外骨骼关节、一种变位移式磁流体可变阻尼旋转关节。			

姓 名	曹广忠	排 名	2
行政职务	广东省电磁控制与智能机器人重点实验室主任		
技术职称	教授		
工作单位	深圳大学		
完成单位	深圳大学		
对本项目主要学术贡献： 围绕基于自适应滑模变导纳的下肢外骨骼机器人人机交互控制技术和针对下肢外骨骼机器人关节电机的 min-max 鲁棒预测位置控制技术展开了深入研究，提出了自适应滑模变导纳控制算法和鲁棒预测位置控制新方法，解决了外骨骼机器人关节电机高性能运动控制问题。			

姓 名	毛涵	排 名	3
行政职务	无		
技术职称	无		
工作单位	西安交通大学		

完成单位	西安交通大学
<p>对本项目主要学术贡献：</p> <p>主要完成基于自适应滑模变导纳的下肢外骨骼机器人人机交互控制技术研究，针对不同负载条件下外骨骼助力关节力矩难以预测的问题，提出了基于负载条件的动态运动基元的关节力矩的分段学习方法，实现了不同负载条件下支撑相的髌、膝关节力矩精确预测。</p>	

姓 名	宋纪元	排 名	4
行政职务	无		
技术职称	无		
工作单位	西安交通大学		
完成单位	西安交通大学		
对本项目主要学术贡献： 主要完成基于曲柄滑块串联弹性驱动器的下肢外骨骼驱动技术研究，针对传统外骨骼的驱动关节的重量大、输出扭矩密度低和对人体关节刚度适配性差的问题，提出了一种曲柄滑块运动机构的新型串联弹性驱动器，提高了外骨骼驱动关节的扭矩密度。			

姓 名	张晶	排 名	5
行政职务	无		
技术职称	无		
工作单位	西安交通大学		
完成单位	西安交通大学		
对本项目主要学术贡献： 主要完成基于自适应滑模变导纳的下肢外骨骼机器人人机交互控制技术研究，针对固定参数的导纳控制器易造成外骨骼人机柔顺交互性差的问题，提出了自适应滑模变导纳控制算法，实现了自适应控制参数根据人体运动意愿主动调节。			

姓 名	黄苏丹	排 名	6
行政职务	无		
技术职称	副教授		
工作单位	深圳大学		
完成单位	深圳大学		
对本项目主要学术贡献： 主要完成针对下肢外骨骼机器人关节电机的 min-max 鲁棒预测位置控制技术研究，针对外骨骼机器人关节电机高性能运动控制问题，建立了基于嵌套椭圆不变集的电机 min-max 鲁棒模型预测位置控制理论及其精确求解算法，攻克了高稳定、强鲁棒、控制输入饱和和约束等指标下电机的高精度位置控制难题。			

八、主要完成单位情况表

单位名称	西安交通大学
<p>对本项目主要学术贡献：</p> <p>本项目所有研究成果全部依托西安交通大学完成，主要学术贡献包括：1) 基于曲柄滑块串联弹性驱动器的下肢外骨骼驱动技术，2) 多特征融合的双向门控循环神经网络人体运动意图感知技术，3) 基于自适应滑模变导纳的下肢外骨骼机器人人机交互控制技术。具有独立的知识产权。</p>	

单位名称	深圳大学
<p>对本项目主要学术贡献：</p> <p>本项目部分研究成果同时依托深圳大学完成，主要学术贡献包括：1) 基于自适应滑模变导纳的下肢外骨骼机器人人机交互控制技术，2) 针对下肢外骨骼机器人关节电机的 min-max 鲁棒预测位置控制技术。具有独立的知识产权。</p>	

完成人合作关系说明

- 1、完成人朱爱斌、曹广忠、毛涵、宋纪元、黄苏丹共同获得了陕西高等学校科学技术研究优秀成果奖一等奖。
- 2、完成人朱爱斌、张晶共同发明了一种膝关节外骨骼康复训练轮椅。

完成人合作关系情况汇总表

序号	合作方式	合作者/ 项目排名	合作起始时间	合作完成时间	合作成果	证明材料
1	共同 获奖	朱爱斌 (1)、曹广 忠(2)、毛 涵(4)、宋 纪元(5)、 黄苏丹 (6)	2018.06.01	2025.07.01	陕西高等学 校科学技术 研究优秀成 果奖一等奖	获奖证书
2	共同 知识 产权	朱爱斌 (1)、张晶 (2)	2020.06.01	2025.07.01	一种膝关节 外骨骼康复 训练轮椅	专利证书
3						
4						
5						
不 限 条 目						