

## 附件 3

自然科学奖推荐号：2024-120-2047

<b>项目名称</b>	液压足式机器人腿部柔顺构建机理及控制方法
<b>提名单位</b>	河北省教育厅
<b>项目简介</b>	<p>液压足式机器人具有足式机器人和液压驱动的双重优势，在运输、救援等军民领域具有广泛的应用前景。近年来，以美国 Boston Dynamics 和意大利 iit 为代表的国外机构相继发布了多款高性能液压足式机器人。而国内目前在机械结构设计与制造、液压系统设计与制造、顶层逻辑与腿部柔顺控制等方面与国际先进水平相比仍有上升空间。腿部柔顺控制是保证该类机器人稳定运动和缓解冲击的必备重要控制方法，本项目完成人自 2011 年开始研发，在多项国家级和省部级科技和人才项目等资助下，针对该类机器人腿部液压驱动系统的柔顺控制问题，凝练了以下三项科学发现：</p> <p>发现点 1：液压驱动系统柔顺控制动态柔顺性分析方法。揭示了液压驱动系统基于位置及力的柔顺控制内外环动态柔顺性控制机理，得到了液压驱动单元柔顺控制内外环各部分动态柔顺性串并联构建形式，并结合机械结构运动学、静力学和动力学，将动态柔顺性控制原理应用到腿部液压驱动系统中，明晰了两种传统柔顺控制对性能提升的机理瓶颈所在。</p> <p>发现点 2：液压关节底层高性能伺服位置及力复合控制。解决了影响柔顺控制精度和快速性的底层液压伺服控制问题，发现了基于参数敏感度和系统辨识相结合的液压伺服机理建模方式，并基于此，提出了一种可有效提升系统控制精度及典型周期性步态下控制性能的多算法融合位置控制方法、一种更适用于负载大范围变化、正反参数不对称和强迫流量干扰情况下的多算法融合力控制方法。</p> <p>发现点 3：足式机器人腿部柔顺参数适配及新构型原理。发现了一种机器人腿部液压驱动系统柔顺新构型控制原理，该新构型考虑不同关节柔顺控制性能对足端柔顺控制性能的影响程度，并结合不同方法在性能上的优劣势，在腿部各关节中优选不同内环控制方式，大幅提升了柔顺控制的精度和响应速度。</p> <p>近五年，项目完成人发表学术论文 30 余篇，项目成果授权发明专利 12 项、转化 6 项，应用于多家企业、研究机构、高校的机器人或液压单腿控制中，创造直接或间接经济效益超亿元。</p>

### 代表性论文专著目录

1. Kai-xian Ba, Yan-he Song, Ya-peng Shi, Chun-yu Wang, **Guo-liang Ma**, Yuan Wang, **Bin Yu\***, **Li-peng Yuan**. A novel one-dimensional force sensor calibration method to improve the contact force solution accuracy for legged robot. Mechanism and Machine Theory, 2022, 169: 104685.
2. Kai-xian Ba, Yan-he Song, **Bin Yu\***, Chun-yu Wang, Hua-shun Li, Jun-xiao Zhang, **Guo-liang Ma**. Kinematics correction algorithm for the LHDS of a legged robot with semi-cylindrical foot end based on V-DOF. Mechanical Systems and Signal Processing, 2022, 167(B): 108566.
3. **Qixin Zhu**, Dunhao Huang, **Bin Yu**, Kaixian Ba\*, Xiangdong Kong, Shoukun Wang. An improved method combined SMC and MLESO for impedance control of legged robots' electro-hydraulic servo system. ISA Transactions, 2022, 130: 598-609.
4. Kai-xian Ba, **Bin Yu**, Zheng-jie Gao, **Qi-xin Zhu**, **Guo-liang Ma**, Xiang-dong Kong\*. An improved force-based impedance control method for the HDU of legged robots[J]. ISA Transactions, 2019, 84: 187-205.
5. 巴凯先, 孔祥东, **朱琦歆**, 李春贺, 赵华龙, **俞滨\***. 液压驱动单元基于位置/力的阻抗控制与实验研究[J]. 机械工程学报, 2017, 53: 172-186.

### 主要完成人情况表（排名、姓名、技术职称、工作单位、对本项目技术创造性贡献、曾获奖励情况）

排名	姓名	工作单位	完成单位	贡献	曾获奖励情况
1	俞 滨	燕山大学	燕山大学	俞滨作为本项目第一完成人,发现了基于参数敏感度和系统辨识相结合的液压伺服机理建模方式,提出了一种可有效提升系统控制精度及典型周期性步态下控制性能的多算法融合位置控制方法、一种更适用于负载大范围变化、正反参数不对称和强迫流量干扰情况下的多算法融合力控制方法。是本项目第一、二、五代表性论文的通讯作者,第三、四篇代表性论文的主要作者,对本项目发现点二做出突出贡献,并作为核心成员参与发现点一和三的研究工作。	2016 年度河北省科技进步一等奖(2/10)
2	袁立鹏	哈尔滨工业大学	哈尔滨工业大学	袁立鹏作为本项目第二完成人,主要参与了项目总体方案研究和实施计划的制定,并进行了发现点三液压驱动系统柔顺控制动态柔顺性分析方法中的相关研究工作。此外,也参与了发现点一液压驱动系统柔顺控制动态柔顺性分析方法、发现点二液压关节底层高性能伺服位置及力复合	2021 年人社部海外人才重点支持计划

				控制中的位置及力控制底层数学建模。是本项目第一篇代表性论文的主要作者。	
3	马国梁	燕山大学	燕山大学	马国梁作为第三完成人主要参与了发现点三足式机器人腿部柔顺参数适配及新构型原理中的相关研究工作，参与提出融合仿生神经元原理的间接自适应环境参数辨识方法、多关节基于仿生中性点、刚度、阻尼参数相融合的柔顺参数适配机理。此外，与本项目其他完成人在前期进行多次项目合作，是本项目第一、二、四篇代表性论文的主要作者，也作为核心成员参与了发现点一的研究工作。	第五届中国国际互联网+创新创业大赛国家铜奖
4	朱琦歆	浙江大学	浙江大学	朱琦歆作为本项目第四完成人，得出了液压驱动单元柔顺控制内外环各部分动态柔顺性串并联构建形式，明晰了两种传统柔顺控制在性能提升的机理瓶颈。是本项目第三、四、五代表性论文的作者之一，对本项目发现点一做出突出贡献，并作为核心成员参与发现点二和三的研究工作。	第六届中国国际互联网+创新创业大赛国家铜奖

### 完成人合作关系说明

项目第二完成人袁立鹏是本人(第一完成人俞滨)的项目合作伙伴，第三完成人马国梁是本人的同课题组成员，第四完成人朱琦歆是本人的博士研究生、现为项目合作伙伴。

哈尔滨工业大学袁立鹏自 2017 年参与项目研究，与本人共同完成项目总体方案研究和实施计划的制定，主要进行了发现点三液压驱动系统柔顺控制动态柔顺性分析方法的相关研究工作，解决了复杂环境下外环柔顺参数如何最优适配、传统外环柔顺控制无法兼顾稳快准等难题，并参与了液压驱动系统柔顺控制动态柔顺性分析方法、液压关节底层高性能伺服位置及力复合控制的研究工作。对发现点一、二、三均做出了突出贡献。

燕山大学马国梁 2017 年师从燕山大学孔祥东教授攻读硕士，2020 年进入吉林大学韩志武所在科研团队攻读博士；2023 年博士毕业回到燕山大学孔祥东教授团队担任讲师，继续足式机器人柔顺控制方面的相关研究工作。参与本人或其他完成人主持液压足式机器人方面的纵向项目 6 项，横向项目 5 项，共同发表论文 15 篇，授权发明专利 8 项，参与本项目发现点三的研究内容并提出融合仿生神经元原理的间接自适应环境参数辨识方法，多关节基于仿生中性点、刚度、阻尼参数相融合的柔顺参数适配机理。

浙江大学朱琦歆作为本团队培养的博士，于2022年6月毕业后在浙江大学攻读博士后。自2015年进入团队起，参与足式机器人液压驱动系统设计及控制的相关研究工作，参与本人或其他完成人主持液压足式机器人方面的纵向项目7项，横向项目6项，共同发表论文9篇，授权发明专利2项，参与本项目发现点一和二并研发攻克了液压驱动系统柔顺控制动态柔顺性分析方法。

**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	合作时间	合作成果	备注
1	论文合著	马国梁/5 俞滨/7(通讯作者) 袁立鹏/8	2022年起	A novel one-dimensional force sensor calibration method to improve the contact force solution accuracy for legged robot	Mechanism and Machine Theory
2	论文合著	俞滨/3(通讯作者) 马国梁/7	2022年起	Kinematics correction algorithm for the LHDS of a legged robot with semi-cylindrical foot end based on V-DOF. Mechanical Systems and Signal Processing	Mechanical Systems and Signal Processing
3	论文合著	朱琦歆/1 俞滨/3	2022年起	An improved method combined SMC and MLESO for impedance control of legged robots' electro-hydraulic servo system. ISA Transactions	ISA Transactions
4	论文合著	俞滨/2 朱琦歆/4 马国梁/5	2019年起	An improved force-based impedance control method for the HDU of legged robot	ISA Transactions
5	论文合著	朱琦歆/3 俞滨/6(通讯作者)	2017年起	液压驱动单元基于位置/力的阻抗控制与实验研究	机械工程学报

注：所填报内容必须与推荐书中提交的完全一致，否则责任自负，可自行调整行间距。