

公示信息

成果名称：复杂环境中时滞系统随机动力学与控制研究

完成单位：西北工业大学，长安大学，西安邮电大学，陕西师范大学

完成人：孙中奎，徐伟，樊泽明，赵楠楠，白学利，刘圆圆，刘姝彤

成果简介：

本项目是基础研究，属力学、数学、机械、控制等交叉学科领域。

伴随着人类太空探索的不断深入，以“祝融号”火星车等自移动机器人为代表的国家装备在深空探测领域得到了广泛应用，为载人航天、火星探测等航天任务提供了重要支撑。但是，外太空强辐射、大温差等极端作业环境导致的运动不确定性，地空通讯时延带来的远距离测控难题，已经成为制约新一代机器人研制的关键因素。因此，对真实复杂结构系统进行动力学建模、分析与控制一直是国际理论与应用力学领域的研究前沿。有鉴于此，本项目聚焦时滞动力学与控制这一基础科学问题，在国家自然科学基金项目、国家重点科技创新项目、中航工业委托项目地持续资助下，针对时滞动力学理论与方法匮乏、动力学规律复杂、经典控制律失效等困难与挑战，建立了以自移动机器人为代表的时滞动力学模型，发展了时滞动力学理论与方法，阐明了时滞动力学规律，提出了有效的动力学控制策略，为新一代机器人研制提供理论依据和技术支撑。主要科学发现点有：

科学发现点一：深入研究了经典时滞系统随机动力学与控制问题，发展了随机动力学分析新方法，提出了随机极值分岔新概念，实现了时滞系统未知参数和复杂动力学的准确辨识。

针对动力学响应非马尔科夫性、相空间结构极端复杂性等特征带来的经典时滞系统研究方法匮乏、随机跃迁缺少理论支持的挑战，定义了时滞系统统计复杂度，建立了时滞主方程模型，提出了动力学辨识新方法，发展了数据驱动的动力学辨识方法；提出了随机极值分岔新概念，给出了随机极值分岔判别准则，突破经典共振条件限制发现了随机共振和相干共振现象，基于数据驱动解决了未知参数与复杂动力学的准确辨识问题。

科学发现点二：深入研究了时滞网络系统时空动力学与控制问题，阐明了噪声和时滞的影响机理，提出了时空动力学控制新策略，揭示了介观尺度上随机动力学的时空有序规律，解决了复杂环境协同控制难题。

针对时滞网络系统中大扰动、自相关、高维度带来的时空动力学分析难题及有效控制挑战，创造性提出了具有普适性的Lyapunov泛函构造方法，形成了全抛物耦合趋化竞争模型全局动力学研究新思路，阐明了噪声和时滞影响机理，揭示了介观尺度上随机动力学的时空有序与无序规律，提出了随机相位控制策略及基于限制反馈因子的振动控制策略，成功利用白噪声实现对不稳定轨道有效控制，

推动了数据驱动的时滞网络系统动力学与控制研究进展。

科学发现点三：系统研究了自移动机器人动力学建模与行走控制问题，建立了被动双足机器人时滞动力学模型，改进了两轮式自平衡机器人动力学模型，提出了行走控制策略，实现了自移动机器人精确运动控制。

针对经典双足机器人全驱动控制过程中行走速度迟缓、步态不自然、能量消耗过大等缺点，建立了被动双足机器人时滞动力学模型，提出了基于RBF神经网络的行走控制策略，实现被动双足机器人快速稳定长时行走；改进了两轮式自平衡机器人动力学模型，实现对两轮式自平衡机器人更加精确的运动控制。

本项目在 Physical Review E、Physica D、Nonlinear Dynamics、Chaos、Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation、Indiana University Mathematics Journal、Applied Mathematical Modelling、Applied Mathematics and Mechanics (English Edition)、中国科学等国内外重要学术期刊上共发表 SCI 论文 66 篇；受邀在动力学与控制学报撰写“时滞系统非线性动力学研究进展”综述文章。其中，八篇代表作被 SCI 他引 358 次；发表在 Indiana University Mathematics Journal (2016, 65: 553-583) 的论文，被 SCI 他引 232 次，连续 8 次入选 ESI 高被引论文榜单。本项目研究成果被美国圣塔菲研究所、英国牛津大学、俄罗斯科学院、日本东京大学等国内外 228 所权威科研机构学者正面引用并高度评价：中国科学院院士朱位秋教授将本项目的研究成果作为时滞导致控制系统产生复杂动力学和糟糕性能的唯一引证，评价为“一直备受关注 (keeping attraction)”“取得了许多令人满意的研究成果 (promising results)”；中国科学院院士胡海岩教授多次评述本项目关于时滞系统动力学与控制方面的研究工作，评价为“对时滞动力系统开展了持续多年的系统研究，形成了各自的研究特色，获得了许多研究进展”；美国科学院院士、引文桂冠奖获得者、非线性动力学先驱 E. Ott 教授高度评价了本项目关于机器学习预测振动抑制方面的研究工作“利用机器学习解决 (address) 非平稳动力系统的统计特性变化的问题 (包括预测临界点)”；欧洲科学院院士、Chaos 主编 J. Kurths 教授多次评述本项目的研究工作，特别是在顶级综述期刊论文 (Physics Reports (IF: 30, 2021) 中正面引用并高度评价了本项目发表的 5 篇论文“发现了 (been found) 分数阶导数有助于 (耦合振子系统) 发生振动转迁”“证实 (confirmed) 了平均场反馈技术的有效性和通用性”。此外，本项目研究成果还得到美国工程院院士、美国艺术与科学院院士、International Journal of Nonlinear Mechanics 主编 P.D. Spanos 教授，俄罗斯科学院院士 N.V. Kuznetsov 教授，欧洲科学院院士、西班牙皇家科学院院士 M.A.F. Sanjuan 教授，欧洲科学院院士、Chaos, Solitons & Fractals 主编 S. Boccaletti 教授，西班牙皇家科学院院士、Qualitative Theory of Dynamical Systems 主编，J. Llibre 教授等知名学者的正面引用和积极评价。

主要知识产权（标准、规范）目录

序号	知识产权类别	知识产权名称	国家（地区）	授权号（批准号）	授权日期	证书编号	权利人	发明人
1	发明专利	一种基于互联网的 液压回路综合实验 台	中国	CN109192046B (ZL201811 140639.4)	2021 年 1 月 22 日	4213164	西北工业大学	樊泽明，任静
2	发明专利	水泥振动机器人	中国	CN113445754B (ZL202110 180308.9)	2022 年 9 月 9 日	5442224	南京玖玖教育 科技有限公司	樊泽明、贺旭

代表性论文专著目录

序号	论文专著名称	刊名	发表时间	年卷页码 (xx 年 xx 卷 xx 页)	作者	通讯作者 (含 共同作者)	第一作者 (含 共同作者)	国内作者 (中文名)	他引 总次数	检索 数据库	参与人 (成 果完成人)	知识产权 是否归国内所有
1	Explosive death of conjugate coupled Van der Pol oscillators on networks	Physical Review E	2018-06-06	2018 年 97 卷 06220 3 页	赵楠楠, 孙中奎, 杨晓丽, 徐伟	孙中奎	赵楠楠	赵楠楠, 孙中奎, 杨晓丽, 徐伟	26	SCI	赵楠楠, 孙中奎, 徐伟	是
2	Modulating resonance behaviors by noise recycling in bistable systems with time delay	Chaos	2014-06-06	2014 年 24 卷 023126 页	孙中奎, 杨晓丽, 肖玉柱, 徐伟	孙中奎	孙中奎	孙中奎, 杨晓丽, 肖玉柱, 徐伟	12	SCI	孙中奎, 徐伟	是
3	Dynamical robustness and firing modes in multilayer memristive neural networks of nonidentical neurons	Applied Mathematics and Computation	2021-05-13	2021 年 409 卷 126384 页	刘圆圆, 孙中奎, 杨晓丽, 徐伟	孙中奎	刘圆圆	刘圆圆, 孙中奎, 杨晓丽, 徐伟	8	SCI	刘圆圆, 孙中奎, 徐伟	是
4	Characterizing stochastic resonance in coupled bistable system with Poisson white noises via	Nonlinear Dynamics	2017-01-04	2017 年 88 卷 1163–	何美娟, 孙中奎, 徐伟, 贾万涛	徐伟	何美娟	何美娟, 孙中奎, 徐伟, 贾万涛	24	SCI	孙中奎, 徐伟	是

	statistical complexity measures			1171 页								
5	Dynamical complexity and stochastic resonance in a bistable system with time delay	Nonlinear Dynamics	2014-11-06	2015 年 79 卷 1787–1795 页	何美娟, 徐伟, 孙中奎	徐伟	何美娟	何美娟, 徐伟, 孙中奎	28	SCI	孙中奎, 徐伟	是
6	Equilibration in a fully parabolic two-species chemotaxis system with competitive kinetics	Indiana University Mathematics Journal	2016-01-01	2016 年 65 卷 553-583 页	白学利, Winkler M	白学利	白学利	白学利	232	SCI	白学利	是
7	Explosive and semi-explosive death in coupled oscillators	Chaos, Solitons and Fractals	2022-02-01	2021 年 142 卷 110514 页	孙中奎, 刘姝彤, 赵楠楠	孙中奎	孙中奎	孙中奎, 刘姝彤, 赵楠楠	7	SCI	孙中奎, 刘姝彤, 赵楠楠	是
8	Fatigue life estimation for simply-supported pipeline of robots under hybrid excitation	International Journal of Fatigue	2018-03-01	2018 年 108 卷 127-139 页	樊泽明, 余孝军, 张强, 何思凡, 陈赣苏, 杜俊业, 文亦斐	樊泽明	樊泽明	樊泽明, 余孝军, 张强, 何思凡, 陈赣苏, 杜俊业, 文亦斐	6	SCI	樊泽明	是

完成人合作关系情况汇总表

序号	合作方式	合作联系人及排名	合作时间	合作成果	证明材料
1	论文合著	徐 伟, 2	2014	Modulating resonance behaviors by noise recycling in bistable systems with time delay	孙中奎徐伟合作证明
2	共同研讨	樊泽明, 3	2016	共同开展自移动机器人讨论、研制、形成样机	孙中奎樊泽明合作证明
3	论文合著	赵楠楠, 4	2018	Explosive death of conjugate coupled Van der Pol oscillators on networks	孙中奎赵楠楠合作证明
4	共同研讨	白学利, 5	2015	共同开展全抛物耦合趋化竞争模型全局动力学研讨	孙中奎白学利合作证明
5	论文合著	刘圆圆, 6	2021	Dynamical robustness and firing modes in multilayer memristive neural networks	孙中奎刘圆圆合作证明

				of nonidentical neurons	
6	论文合著	刘姝彤, 7	2022	Explosive and semi-explosive death in coupled oscillators	孙中奎刘姝彤合作证明