

项目公示信息

一、成果名称：空间模块化多环机构操作臂系统创新设计与分析方法研究

二、完成单位：中国人民解放军火箭军工程大学，哈尔滨工业大学

三、完成人：李传扬，肖 洪，闫辉垠，胡昌华，郭宏伟，唐德威，秦忠宝，王鑫峰

四、成果简介：随着我国载人飞船、空间站、月球和火星探测、对地观测、空间科学研究等重大航天工程的陆续启动与实施，对可实现空间大范围在轨操控任务的宇航空间机构的需求越来越迫切，在这方面欧美等航天大国已有相关研究计划，而我国才刚刚起步，亟待开展前瞻性和创新性科学研究。未来航天任务的开展，如太空垃圾的回收、失控卫星的轨道修正与维护、实施空间攻防等，需要宇航机构必须具备开展大范围空间作业的能力。传统的关节式空间机械臂灵活性差，对接触操作条件要求较高，容易产生碰撞等安全性问题，在空间操作中需要实现对目标和机械臂精确的运动规划和控制，对空间非合作目标难以实现操作；其次，随着空间机械臂大型化，其系统刚度显著降低，影响作业精度，易发生长时间颤振。因此，研究一种大尺度、多自由度、高刚度、可折叠的空间模块化多环机构操作臂系统成为极具挑战性的关键难题和亟待解决的工程问题。

为此，项目组在 3 项国家自然科学基金项目、1 项陕西省自然科学基金基础研究计划项目、1 项中国博士后科学基金面上项目的持续支持下，围绕宇航机构必须具备开展大范围空间作业能力的重大现实新需求，凝练出“空间模块化多环机构操作臂系统创新设计与分析方法”这一关键科学问题，针对空间桁架式机械臂系统新构型、新设计、新控制等关键环节，从空间多环耦合机构复杂构型创新设计分析、复合铰链及结构创新设计、空间应用背景下的多驱动模式优化设计及动力学模型构建等三个层面开展深入研究，取得了系统性创新成果，主要发现点为：

(1) 针对空间多环耦合机构耦合支链构型复杂，解耦困难，项目组受生物学理论启发，基于旋量代数的数学基础，提出了裂胞自由度及奇异分析法，用于多环耦合机构自由度分析和构型奇异分析，这两种方法的基本策略均是将复杂的多环耦合机构的构型分析通过裂胞过程等效转化为并联支链之间的约束分析、支链构型分析以及更为简单的并联机构构型分析。

(2) 现有机构构型难以实现宇航空间机构开展大范围空间作业的现实困境，项目组提出了一种 $3-R(SRS)RP$ 多环机构新构型，相比同等功能并联机构，具有更大的刚度质量比、更好的奇异规避性以及更多的驱动模式选择策略，加拿大工程院院士、麦吉尔大学退休名誉教授 Jorge Angeles 以及中国

工程院院士邓宗全均认为这是一种面向空间应用的新型机构构型；为实现新机构构型的结构设计，提出一种新型球副机构，可实现多球副复合，实现了 SRS 复合铰链的创新设计，基于新机构构型和新球副机构，构建了模块化多环机构操作臂系统，具有大尺度、多自由度、高刚度、可折叠的特点，具备空间在轨操控所需功能，受该新型球副机构启发，南京航空航天大学、燕山大学、东北大学先后完成了对目标机构的结构设计。

(3) 考虑空间环境的特殊性，空间模块化多环机构操作臂的驱动系统需保证满足在轨操作任务的前提下，实现最大程度的简化，最优配置系统驱动器的数量和位置。为解决这一难题，项目组首次定义了空间多环机构的驱动模式及表述方式，制定了驱动模式评价准则，并继而提出了空间多环机构驱动模式优化方法，该优化方法的关键是建立不同驱动模式衡量标准，用于分析空间多环机构的驱动模式，实现了系统驱动模式的优化配置，提高了驱动系统优化设计效率，国内知名学者高峰教授、李兵教授评论称这是一种非常有效的方法；同时针对多驱动模式所引发的动力学模型构建不确定性，提出了一种模块化操作臂的动力学分析方法，实现了对该类操作臂机构系统动力学模型的统一。

围绕本项目研究成果，项目组获授权国家发明专利 1 项，相关技术已成功应用于燕山大学机械工

程学院机器人装备与智能柔性系统科研团队新型模块化机械设备创新设计与分析，具有明显的理论与技术支撑作用，解决了具有多驱动模式的模块化桁架式机构-结构系统动力学问题，提高了分析效率。本项目完成人中，1人为国家杰出青年基金获得者，2人获长江学者特聘教授，1人获军队“卓青”，1人入选陕西省三秦英才引进计划青年项目。

五、完成人合作关系情况:

序号	合作方式	合作关系人及排名	合作时间	合作成果	证明材料
1	论文合著	李传扬, 1; 郭宏伟, 2; 唐德威, 3	201907	Cell division method for mobility analysis of multi-loop mechanisms	代表性论著 1
2	论文合著	李传扬, 1; 郭宏伟, 2; 唐德威, 3; 闫辉垠, 4	201910	A 3-R(SRS)RP multi-loop mechanism for space manipulation: design, kinematics, singularity, and workspace	代表性论著 2
3	论文合著	李传扬, 1; 郭宏伟, 3; 闫辉垠, 4; 唐德威, 5	202105	Mobility and singularity analyses of a symmetric multi-loop mechanism for space applications	代表性论著 3
4	论文合著	李传扬, 1; 唐德威, 2; 闫辉垠, 3; 郭宏伟, 4	202105	一种新型球副机构的设计及分析	代表性论著 4
5	论文合著	闫辉垠, 1; 李传扬, 2; 郭宏伟, 3; 唐德威, 6	202103	面向空间应用的 3-R(SRS)RP 多环机构操作臂结构设计及逆运动学分析	代表性论著 5
6	论文合著	李传扬, 1; 郭宏伟, 3; 唐德威, 4; 秦忠宝, 6; 肖洪, 7	202210	On the actuation modes of a multiloop mechanism for space applications	代表性论著 6
7	论文合著	李传扬, 1; 胡昌华, 2; 秦忠宝, 4; 王鑫峰, 6; 肖洪, 7	202306	Dynamics of a modular manipulator with multiple actuation modes for space applications	代表性论著 7
8	论文合著	肖洪, 1; 郭宏伟, 4	202305	Shape Memory Polymer Composite Booms with Applications in Reel-Type Solar Arrays	代表性论著 8
9	共同知识产权	李传扬, 1; 胡昌华, 2; 秦忠宝, 3; 王鑫峰, 4	202303	一种面向具备多驱动模式的模块化操作臂动力学建模方法	主要知识产权 1
10	共同知识产权	秦忠宝, 2	202204	一种 F-P 干涉型温度应变双参量传感器	主要知识产权 2

六、代表性论文专著目录:

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	Cell division method for mobility analysis of multi-loop mechanisms	Mechanism and Machine Theory	201907	2019, 141: 67-94	Chuanyang Li, Hongwei Guo, Dewei Tang, Rongqiang Liu, Zongquan Deng, Xiaoke Song, Sahad Imtiaz Zahin	郭宏伟, 唐德威	李传扬	李传扬, 郭宏伟, 唐德威, 刘荣强, 邓宗全, 宋小科	4	Web of Science	李传扬, 郭宏伟, 唐德威	是
2	A 3-R(SRS)RP multi-loop mechanism for space manipulation: design, kinematics, singularity, and workspace	Transactions of the ASME-Journal of Mechanisms and Robotics	201910	2020, 12 (1): 011001-1-011001-17	Chuanyang Li, Hongwei Guo, Dewei Tang, Huiyin Yan, Rongqiang Liu, Zongquan Deng	郭宏伟, 唐德威	李传扬	李传扬, 郭宏伟, 唐德威, 闫辉垠, 刘荣强, 邓宗全	0	Web of Science	李传扬, 郭宏伟, 唐德威, 闫辉垠	是
3	Mobility and singularity analyses	Proceedings of the iMeche,	202105	2021, 235(22):	Chuanyang Li, Jorge Angeles,	郭宏伟, 唐德威	李传扬	李传扬, 郭宏伟,	6	Web of Science	李传扬, 郭宏伟,	是

	of a symmetric multi-loop mechanism for space applications	Part C: Journal of Mechanical Engineering Science		6205-6218	Hongwei Guo, Huiyin Yan, Dewei Tang, Rongqiang Liu, Zongquan Deng			闫辉垠, 唐德威, 刘荣强, 邓宗全			闫辉垠, 唐德威	
4	一种新型球副机构的设计及分析	宇航学报	202105	2021, 42(5): 562-571	李传扬, 唐德威, 闫辉垠, 郭宏伟, 刘荣强, 李兵	郭宏伟	李传扬	李传扬, 唐德威, 闫辉垠, 郭宏伟, 刘荣强, 李兵	3	中国知网	李传扬, 唐德威, 闫辉垠, 郭宏伟	是
5	面向空间应用的3-R(SRS)RP多环机构操作臂结构设计及逆运动学分析	机械工程学报	202103	2021, 57(7): 1-9	闫辉垠, 李传扬, 郭宏伟, 郭文尚, 刘荣强, 唐德威, 李兵	李传扬, 郭宏伟	闫辉垠	闫辉垠, 李传扬, 郭宏伟, 郭文尚, 刘荣强, 唐德威, 李兵	8	中国知网	闫辉垠, 李传扬, 郭宏伟, 唐德威	是
6	On the actuation modes of a multiloop mechanism for space applications	IEEE-ASME Transactions on Mechatronics	202210	2022, 27(5): 2818-2828	Chuanyang Li, Jorge Angeles, Hongwei Guo, Dewei Tang, Rongqiang Liu, Zhongbao Qin, Hong Xiao	郭宏伟, 唐德威	李传扬	李传扬, 郭宏伟, 唐德威, 刘荣强, 秦忠宝, 肖洪	4	Web of Science	李传扬, 郭宏伟, 唐德威, 秦忠宝, 肖洪	是
7	Dynamics of a modular manipulator	Mechanism and Machine	202306	2023, 189:	Chuanyang Li, Changhua Hu,	李传扬, 肖洪	李传扬	李传扬, 胡昌华,	0	Web of Science	李传扬, 胡昌华,	是

	with multiple actuation modes for space applications	Theory		105408	Jorge Angeles, Zhongbao Qin, Huixiang Xie, Xinfeng Wang, Hong Xiao			秦忠宝, 谢惠祥, 王鑫峰, 肖洪			秦忠宝, 王鑫峰, 肖洪	
8	Shape Memory Polymer Composite Booms with Applications in Reel-Type Solar Arrays	Chinese Journal of Mechanical Engineering	202305	2023, 36: 1-13	Xiao, Hong; Wu, Sijie; Xie, Dongdong; Guo, Hongwei; Ma, Li; Wei, Yuxuan; Liu, Rongqian	肖洪	肖洪	肖洪, 吴思杰, 谢冬冬, 郭宏伟, 马丽, 魏宇轩, 刘荣强	4	Web of Science	肖洪, 郭宏伟	是

