**公示信息**

成果名称：水下航行器机械传动与驱动系统动力学行为建模与优化设计方法

完成单位：西北工业大学、西安工业大学

完成人：刘静、陈东阳、张新虎、宋晓华

成果简介：

该项目属于船舶与海洋工程水下航行器减振降噪与结构优化设计技术领域，为保障水下航行器安静化与轻量化设计提供基础理论与方法支撑。

机械传动与驱动系统是水下航行器推进与驱动装置的核心基础部件，其服役性能直接决定整机运行可靠性和声隐身性能。目前，**动力学行为演化规律与传递机制不清是造成水下航行器推进与驱动系统低频振动噪声难以抑制**的关键性科学问题。本项目在国家自然科学基金、国防基础科研等项目支持下，围绕水下水下航行器推进与驱动系统动力学行为的演变机理、准确预测方法以及结构优化设计等技术挑战，凝练出关键科学问题：内部冲击特征表征、流固耦合的动力学行为演变规律、动载与声振特性水下传递规律，开展了系统性的研究工作，**建立了水下航行器机械传动与驱动系统减振降噪设计理论与方法，**主要科学发现点如下：

**（1）建立了水下航行器机械传动与驱动系统转子动力学模型，揭示了机械传动与驱动系统转子时变激励机制；提出了机械传动与驱动系统转子冲击特征计算方法，实现了水下航行器机械驱动系统转子内部冲击力精确预估与优化。**

提出了转子系统润滑和制造误差耦合激励计算方法，建立了考虑润滑与制造误差的机械驱动系统转子动力学模型，克服了传统模型不能描述润滑、制造误差以及元件早期缺陷耦合激励诱发的水下航行器机械传动与驱动系统转子动力学行为演变的缺点，揭示了水下航行器机械传动与驱动系统转子内部时变激励机制；提出了机械传动与驱动系统转子内部冲击特征计算方法，实现了水下航行器机械传动与驱动系统转子内部冲击力精确预估与优化，应用于重庆齿轮箱有限责任公司（中国船舶集团第468厂）“转子系统动载优化及振动噪声抑制方法”项目，使某大型水下航行器齿轮传动系统振动噪声水平降低约35%。被国际同行评价为：“一种新的建模方法”、“能够精确地模拟噪声特性”、“一项杰出的工作（remarkable works）”。

**（2）建立了水下航行器机械驱动系统非线性流固耦合动力学模型，揭示了机械驱动系统非线性弱颤振诱发机制。提出了部件磨损、复合误差激励的水下航行器机械驱动系统非线性动态响应计算与优化方法，实现了水下航行器机械驱动系统全局和部件非线性动态响应的准确预估与高效优化。**

提出了考虑部件磨损、复合误差激励的水下航行器机械驱动系统非线性多体动力学优化方法，建立了部件磨损、复合制造误差动力学模型，揭示了水下航行器机械驱动系统部件磨损、复合制造误差时变激振机制，实现了部件磨损、复合误差激励下水下航行器机械驱动系统全局和故障区域部件非线性动态响应的准确预估和优化，推进解决了我国某型号潜艇异常振动噪声诱发机理与预测难题。研究成果自2019年4月起应用于中国舰船研究设计中心（中国船舶集团第701所）“水下航行器低噪声机械驱动系统设计理论与预测方法”项目，提供了某水下航行器机械驱动系统动力学设计方法，解决了弱颤振诱发机理难题，振动噪声水平降低约30%。被国际同行评价为：“一种多体动力学快速建模与仿真新方法”、“能够精确地模拟流固耦合振动响应”、“提出了非线性能量阱抑制涡激振动措施”。

**（3）建立了水下航行器机械传动与驱动系统支撑壳体动态载荷计算模型，揭示了动态激励下支撑壳体弹塑性变形演化规律；提出了交变压力下支撑壳体动载与声振特性预测方法，实现了水下航行器机械传动与驱动系统支撑壳体声振特性准确预估及结构优化设计。**

提出了考虑振动隔振器阻尼和壳体振动频率耦合的航行器驱动系统振动传递规律，建立了水下航行器机械传动与驱动系统支撑壳体动态载荷计算模型，分析了在动态激励下水下航行器动力段壳体结构塑性变形发生的条件和塑性变形的演化和发展，揭示了动态激励下驱动器支撑壳体弹塑性变形演化规律；提出了交变压力下支撑壳体动载与声振特性预测方法，实现了水下航行器机械传动与驱动系统支撑壳体声振特性准确预估及结构优化设计。应用于西安近代化学研究所（中国兵器工业集团公司第204研究所）“×××壳体结构设计与优化”项目，使某水下航行器最大振级下降15dB，最大声压级下降了约5dB，同时总体重量下降26%。被国际同行评价为：“提出了一种航行器驱动装置支撑壳体动态载荷计算的新方法”、“能够准确预测航行器驱动系统支撑壳体结构声振特性”。

围绕以上创新工作发表SCI论文47篇，出版学术专著3部，授权12项国家发明专利，授权10项软件著作权，形成了广泛的学术影响力。8篇代表性发表在《Journal of Sound and Vibration》（JSV）、《Mechanism and Machine Theory》（MMT）、《Journal of Vibration and Control》（JVC）、《Ocean Engineering》（OE）等本领域国外权威期刊上。其中，1篇入选ESI热点论文（前0.1%），1篇入选ESI高被引论文（前1%）。8篇代表性论文被来自38个国家/地区377个科研机构的1546名学者在132种出版物上引用，Web of Science (WOS)他引共计309次，篇均WOS他引38次，被5名院士、ASME等国际权威学会5位Fellow在内的国际同行引用和正面评价。

基于提出的转子系统动力学建模与振动特征分析方法，推进解决了某型高速热动力水下航行器齿轮转子系统振动抑制、某水下滑翔机低振动噪声设计（使其振动幅值降低约30%）、某大型无人水下航行器减振降噪设计、某大型常规水下航行器等4个国防单位的5个型号水下装备研制中，极大地促进了船舶与海洋工程、声学、动力学等多学科发展和技术进步。软件著作权（高速刚性转子动力学分析软件）采用许可方式在中国航天科工集团北京机械动力研究所实现成果转化75万元，并应用于某-12发动机5种轴承和某-17发动机2种轴承的动态特性分析，有力支撑了型号任务的研发。

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 | 行星轴承碰撞测试系统 | 中国 | ZL 202110691763.5 | 2021-06-22 | 6000077 | 西安工业大学 | 宋晓华;刘静;李鑫斌;丁士钊;师志峰 |
| 2 | 发明专利 | 基于多体系统传递矩阵法的舵面系统非线性颤振模型建模方法 | 中国 | ZL201911155418.9 | 2020-10-16 | 4030841 | 扬州大学 | 陈东阳;顾超杰;孙振业;曹九发;李迺璐;朱卫军;杨华;庄舒青;刘锟 |

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 | A combined acoustic and dynamic model of a defective ball bearing | Journal of Sound and Vibration | 2021-06-09 | 2021年501卷 | Jing Liu, Yanjun Xu, Guag Pan | Guang Pan | Jing Liu | 刘静;许亚军;潘光 | 75 | SCI | 刘静;许亚军;潘光 | 是 |
| 2 | A new dynamic model for vibration analysis of a ball bearing due to a localized surface defect considering edge topographies | Nonlinear Dynamics | 2015-01-01 | 2015年79卷1329-131页 | Jing Liu, Yimin Shao | Yimin Shao | Yimin Shao | 刘静; 邵毅敏 | 49 | SCI | 刘静; 邵毅敏 | 是 |
| 3 | Prediction of the upheaval buckling critical force for imperfect submarine pipelines | Ocean Engineering | 2015-11-15 | 2015年109卷330-343页 | Xinhu Zhang, Menglan Duan | Xinhu Zhang | Xinhu Zhang | 张新虎; 段梦兰 | 43 | SCI | 张新虎; 段梦兰 | 是 |
| 4 | An innovative dynamic model for vibration analysis of a flexible roller bearing | Mechanism and Machine Theory | 2019-06-09 | 2019年135卷27-39页 | Jing Liu, Changke Tang, Yimin Shao | Jing Liu | Jing Liu | 刘静; 唐昌柯;邵毅敏 | 39 | SCI | 刘静; 唐昌柯;邵毅敏 | 是 |
| 5 | Numerical study of flow-induced vibrations of cylinders under the action of non-linear energy sinks (NES) | Nonlinear Dynamics | 2018-06-07 | 2018年94卷925-957页 | Chen Dongyang, Laith K. Abbas, Wang Guoping, Rui Xiaoting, Pier Marzocca | Laith K. Abbas | Chen Dongyang | 陈东阳; 芮筱亭; 王国平 | 33 | SCI | 陈东阳; 芮筱亭; 王国平 | 是 |
| 6 | Dynamic modeling and simulation of a flexible-rotor ball bearing system | Journal of Vibration and Control | 2021-07-28 | 2021年28卷3495-3509页 | Jing Liu, Changke Tang, Guang Pan | Jing Liu | Jing Liu | 刘静;唐昌柯;潘光 | 30 | SCI | 刘静;唐昌柯;潘光 | 是 |
| 7 | An unified formula for the critical force of lateral buckling of imperfect submarine pipelines | Ocean Engineering | 2018-10-15 | 2018年166卷342-335页 | Xinhu Zhang, C. Guedes Soares, Chen An, Menglan Duan | C. Guedes Soares | Xinhu Zhang | 张新虎; 安晨;段梦兰 | 27 | SCI | 张新虎; 安晨;段梦兰 | 是 |
| 8 | Dynamic modeling of sail mounted hydroplanes system- Part I: Modal characteristics from a transfer matrix method | Ocean Engineering | 2014-02-17 | 2014年2014卷 | Dongyang Chen, Laith K. Abbas，Xiaoting Rui, Xiao Qing, Pier Marzocca | Laith K. Abbas | Dongyang Chen  | 陈东阳; 芮筱亭 | 13 | SCI | 陈东阳; 芮筱亭 | 是 |

**完成人合作关系情况汇总表**

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 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 | 工程应用 | 刘静（排1）/陈东阳（排2） | 2020年5月至今 | ××快速扶持项目，××振动传递机理；某水下航行器减振降噪设计 | 支撑项目证明材料以及工程应用证明 |
| 2 | 工程应用 | 刘静（排1）/陈东阳（排2）/张新虎（排3） | 2020年5月至今 | 某水下航行器减振降噪设计 | 工程应用证明 |
| 3 | 知识产权 | 刘静（排1）/宋晓华（排4） | 2021年3月至今 | 行星轴承碰撞测试系统 | 发明专利 |
|  |  |  |  |  |  |
|  |  |  |  |  |  |
|  |  |  |  |  |  |
|  |  |  |  |  |  |
|  |  |  |  |  |  |
|  |  |  |  |  |  |