

2026 年度陕西高等学校科学技术研究

优秀成果公示信息

一、成果名称:

面向复杂工况的高速柔性转子动力学特性分析方法

二、主要完成单位:

西北工业大学、中国航发湖南动力机械研究所、东北大学

三、主要完成人:

杨永锋、邓旺群、傅超、蓝春波、贾泽宇、张显涛、秦卫阳、赵仕博、马辉

四、成果简介:

现代航空发动机需要在高温、高压、高转速及交变负荷等极端恶劣的工况下长时间可靠运行,并需满足推力大、油耗低、重量轻、寿命长、排污少、可靠性高以及研制和维护成本低等众多互相矛盾而又十分苛刻的要求,使得结构动力学问题一直是关键技术难点之一。转子作为航空发动机的核心旋转部件,其过大的振动会导致轴承负荷增大、

发动机异常工作以至损坏等问题，影响发动机的寿命和可靠性，严重时甚至会诱发飞行事故。在某种意义上，**转子动力学问题的解决与否，已经成为决定发动机总体设计方案能否实现、研制能否成功的关键因素之一。**

在国家自然科学基金等项目的资助下，团队围绕复杂工况下转子的动力学特性，开展了不确定性动力学响应、现场瞬态动平衡、信号处理方法等方面的研究，支撑了某型涡轴发动机的设计和试验，为提升我国航空发动机的运行可靠性、突破转子振动控制关键技术瓶颈提供了技术支撑，重要科学发现如下：

1. 建立了量化不确定性因素的椭球凸集模型，解决了不确定性动力学计算的精度低和数值稳定性差的难题

实际工程中，结构、装配等非设计因素经常导致转子的动态特性偏离设计值，进而产生不确定性，上述问题对于高速柔性转子的影响较普通机械更为突出。

针对含区间不确定性的变速转子瞬态动力学分析方法，采用多维椭球凸集模型的蒙特卡洛法和切比雪夫区间法开展了不确定性动力学分析。结果表明：不确定性参数对转子瞬态振动响应具有显著影响，共振区附近的振动响应呈现明显的区间特性。与蒙特卡洛法相比，切比雪夫区间法在保证相近计算精度的前提下具有更高的计算效率。

提出了一种区间精细积分法，解决了不确定性瞬态动力学分析中易出现的数值发散难题。该方法综合了精细积分法的高稳定性与高精度优势，以及 Chebyshev 包含函数法的非嵌入式、数值化运算特性，且无需导数信息，从

而避免了每一步积分中的符号运算，提高了计算效率。与扫描法的计算结果对比表明，所提出的区间精细积分法具有较高的计算精度和数值稳定性。在分析过程中，还观察到由不确定性传播引起的“频移”和“共振区扩展”等现象，并对其形成机理进行了解释。

2. 提出了仅需一次加速过程的旋转机械瞬态响应即可开展动平衡的方法，适用于现场平衡

申请人提出了只需加速起车过程的瞬态响应即可开展转子平衡的无试重瞬态高速动平衡方法。该方法无须在转子上设计专门的加试重环节和结构，适用于航空发动机的现场动平衡。

基于动态载荷识别技术，提出了一种转子系统不平衡参数辨识方法。该方法实测的转子加速瞬态响应信息为输入，结合转子固有模态信息进行不平衡识别，具有无试重、瞬态等特点，适用于航空发动机现场动平衡。通过某转子的全转速无试重瞬态动平衡试验，分析了转子自身结构参数及外部噪声对平衡效果的影响。

基于深度学习的多头注意力机制与特征加权融合方法，构建了多传感器特征融合的不平衡参数识别模型，可实现不平衡参数的识别并具有良好的泛化能力。通过开展多盘转子系统不平衡响应规律的验证实验，发现了转子系统运行过程中高阶转速区域存在反向涡动现象以及由此引发的“伪共振”现象，多传感器特征融合法能够在无试重条件下高效完成动平衡。

自主设计、研发了一套无试重瞬态高速动平衡系统，并在某型涡轴发动机的设计和试验中开展了初步应用。试验结果表明：该系统能够在不添加试重的情况下完成涡轴发动机动力涡轮转子的高速动平衡，具有较高的平衡效率和工程适用性。

3. 提出了转子非线性、非平稳振动信号的长时高精度预测和去噪方法，基于结构动态特性相关性准则设计了转子的动力学特性天地一致性试验方案

航空发动机因强喷气噪声导致声振耦合，其转子振动表现形式就是一个由多个振源共同激励的复杂机械振动信号，频谱具有典型非线性信号的连续谱特征。此外，试验环境和工作环境差异性大，响应的非线性、非平稳特性导致状态预测困难，天地一致性一直是此领域的关键科学问题。

非线性信号的预测误差随着时间呈指数增大，其最大可预测时间理论上为最大 Lyapunov 指数的倒数。团队结合经验模态分解，突破了 Lyapunov 指数意义上的最大可预测时间，实现了非线性、非平稳振动信号的长时高精度预测和去噪。针对结构的动态特性试验和实际工作环境的差异性大，空间的振动特性难以获取等难题，通过对比同一转子的不同模型、不同约束、不同状态的动力学响应，发现了结构在不同工作环境同阶模态振动的相关性规律，采用地面试验数据估算出转子工作环境的动力学响应。

上述工作对于提高转子的动力学性能、合理安排大修时间和预测剩余寿命都具有重要的工程意义，并可为航空发动机的动力学天地一致性试验提供方案。相关成果应用于中国航发湖南动力机械研究所 WZ-**发动机的研制中，缩短了转子的试验周期并节省了试验费用。受国防科技图书出版基金资助，在国防工业出版社出版专著《经验模态分解在振动分析中的应用》，此专著在中国图书统计引证分析数据库 2013-2016 年间收录的力学学科 2569 本著作中，被引次数排名第 15。在力学、机械领域重要学术期刊上共发表 SCI 论文 72 篇，其中 ESI 高被引论文 4 篇，SCI 他引 1000 余次；代表性他引作者包括美国科学院 Dowell 院士，加拿大工程院 Chen Zengtao 院士、Gulliver T Aaron 院士、Sun Qiao 院士，欧洲科学院 Rabczuk Timon 院士，IFTToMM 国际转子动力学技术委员会主席 Cavalca Katia Lucchesi 教授，ASME Life Fellow Nataraj C 教授，十多位中国科学院与中国工程院院士。

五、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	基于柔性转子加速响应信息的无试重瞬态高速动平衡方法	中国	ZL201910956055.2	2021-04-20	4371287	西北工业大学	赵仕博, 任兴民, 邓旺群, 李利辉, 夏冶宝

承诺：上述知识产权未曾在已获或正在申报国家级、省（部）级和厅局（地市）级奖励项目中作为支撑材料出现。用于推荐陕西高校科学技术研究优秀成果的情况，已征得未列入成果主要完成人和主要完成单位的权利人（专利指发明人）的同意。

六、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	参与者(成果完成人)	知识产权是否归国内所有
1	经验模态分解在振动分析中的应用	国防工业出版社	2013-11-01	2013年	杨永锋, 吴亚锋	杨永锋	杨永锋	杨永锋, 吴亚锋	233	中国图书引证统计分析数据库	杨永锋	是
2	高速转子动平衡技术	科学出版社	2017-03-01	2017年	邓旺群, 任兴民	邓旺群	邓旺群	邓旺群, 任兴民	8	中国图书引证统计分析数据库	邓旺群	是
3	A state-of-the-art review on uncertainty analysis of rotor systems	Mechanical Systems and Signal Processing	2023-01-15	2023年 183卷 109619	Fu Chao, Sinou Jean-Jacques, Zhu Weidong, Lu Kuan, Yang Yongfeng	Yang Yongfeng	Fu Chao	傅超, 路宽, 杨永锋	105	Web of Science	傅超, 杨永锋	是
4	Enhancing ability of harvesting energy from random vibration by decreasing the potential barrier of bistable harvester	Mechanical Systems and Signal Processing	2017-02-15	2017年85卷 71-81	Lan Chunbo, Qin Weiyang	Qin Weiyang	Lan Chunbo	蓝春波, 秦卫阳	154	Web of Science	蓝春波, 秦卫阳	是
5	A novel diagnosis indicator for rub-impact of rotor system via energy method	Mechanical Systems and Signal Processing	2023-02-15	2023年 185卷 109825	Zhang Xiantao, Yang Yongfeng, Ma Hui, Shi Mingming, Wang Ping	Yang Yongfeng, Ma Hui	Zhang Xiantao	张显涛, 杨永锋, 马辉, 史明明, 王平	46	Web of Science	张显涛, 杨永锋, 马辉	是

6	Steady-state response analysis of cracked rotors with uncertain-but-bounded parameters using a polynomial surrogate method	Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation	2019-03-01	2019年68卷 240-256	Fu Chao, Ren Xingmin, Yang Yongfeng, Lukuan, Qin Weiyang	Yang Yongfeng	Fu Chao	傅超, 任兴民, 杨永锋, 路宽, 秦卫阳	28	Web of Science	傅超, 杨永锋, 秦卫阳	是
7	Dynamic analysis of Jeffcott rotor under uncertainty based on Chebyshev convex method	Mechanical Systems and Signal Processing	2022-03-15	2022年167卷 108603	Jia Zeyu, Yang Yongfeng, Zheng Qingyang, Deng Wangqun	Yang Yongfeng, Deng Wangqun	Jia Zeyu	贾泽宇, 杨永锋, 郑晴阳, 邓旺群	24	Web of Science	贾泽宇, 杨永锋, 邓旺群	是
8	A novel transient balancing technology of the rotor system based on multi modal analysis and feature points selection	Journal of Sound and Vibration	2021-07-01	2021年510卷 116321	Zhao Shibo, Ren Xingmin, Deng Wangqun, Lu Kuan, Yang Yongfeng, Li Lihui, Fu Chao	Yang Yongfeng	Zhao Shibo	赵仕博, 任兴民, 邓旺群, 路宽, 杨永锋, 李利辉, 傅超	22	Web of Science	赵仕博, 邓旺群, 杨永锋, 傅超	是

承诺: 该表所列论文专著的知识产权归国内所有且无争议, 未曾在已获或正在申报国家级、省(部)级和厅局(地市)级奖励项目中作为支撑材料出现。用于推荐陕西高校科学技术研究优秀成果的情况, 已征得未列入成果主要完成人和主要完成单位的作者的同意, 其中, 未列入成果主要完成人的第一作者、通讯作者(含共同第一作者、共同通讯作者)已出具知情同意书面签字意见。因未如实告知上述情况而引起争议, 且不能提供相应存档备查的证件, 本人愿意承担相应责任, 并接受处理。

七、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
1	论文合作者/ 项目资助方	邓旺群 2/9	2013-2024	代表性论文专著 2、7、8 的作者
2	论文合作者/ 协助指导的博士生	傅超 3/9	2013-2024	代表性论文专著 3、6、8 的作者
3	项目团队成员/ 协助指导的博士生	蓝春波 4/9	2015-2019	代表性论文专著 4 的作者
4	论文合作者/ 指导的硕士生	贾泽宇 5/9	2019-2022	代表性论文专著 7 的作者
5	论文合作者/ 指导的博士生	张显涛 6/9	2020-2024	代表性论文专著 5 的作者
6	论文合作者/ 项目团队成员	秦卫阳 7/9	2013-2024	代表性论文专著 4、6 的作者

7	论文合作者/ 协助指导的博士生	赵仕博 8/9	2017-2023	代表性论文专著 8 的作者、主要知识产权 1 的 发明人
8	论文合作者	马辉 9/9	2023	代表性论文专著 5 的作者

承诺：本人作为第一完成人，对本成果完成人合作关系及上述内容的真实性负责，特此声明。