

附件 5

中国振动工程学会科学技术奖推荐书

(2021 年度)

一、项目基本情况

项目类别: 基础研究 工程应用 技术发明 序号: 编号:

推荐单位 或推荐专家		振动工程学会转子动力学专业委员会			
项目名称	名称	航空发动机异常振动故障机理、减振优化与故障诊断			
	公布名	航空发动机异常振动故障机理、减振优化与故障诊断			
主要完成人		丁千, 侯磊, 郭虎伦, 李响, 曹树谦			
完成单位		天津大学, 哈尔滨工业大学, 东北大学			
主题词		航空发动机; 异常振动传递; 减振优化; 故障诊断; 寿命预测			
涉密项目是否解密			解密时间		
学科分类 名称	1	一般力学与力学基础		代码	080101
	2			代码	
	3			代码	
所属国民经济行业		铁路、船舶、航空航天和其他运输设备制造业			
所属科学技术领域		自然科学			
任务来源		973 计划、国家自然科学基金			
具体计划、基金的名称和编号: 1. 973 计划课题: 双转子-轴承-机匣系统振动传递与故障溯源(2015CB057400) 2. 国家自然科学基金: 极端服役环境下航空发动机双转子系统瞬态动力学理论与实验(11672201) 3. 国家自然科学基金: 弹性环式挤压油膜阻尼器转子系统动力学与参数优化研究(51575378) 4. 国家自然科学基金: 自带冠叶片碰撞振动的非线性动力学研究(10972154) 5. 国家自然科学基金: 机动飞行环境下转子系统的复杂非线性动力学行为及机理研究(11602070)					
已提交的科技报告编号(仅限工程应用类、技术发明类项目填写):					
授权发明专利(项)		4		授权的其他知识产权(项)	
项目起止时间		起始: 2010 年 1 月 1 日		完成: 2019 年 12 月 31 日	

中国振动工程学会办公室制

三、项目简介

航空发动机振动超标和结构性损伤是影响运行安全的重要因素，据统计，发动机振动故障占总故障的 60%以上。航空发动机通常采用双转子套装结构，内外转子通过中介轴承连接。由于系统结构复杂、承受多种激励和非线性因素等特征，导致发动机振动故障机理与传递规律复杂，加之机匣测点少、故障信号微弱，故障诊断困难。

本项目针对航空发动机转子碰摩、裂纹、中介轴承和挤压油膜阻尼器故障、叶片颤振等典型振动故障，开展故障机理与振动传递研究，提出了挤压油膜阻尼器参数优化设计方法。在此基础上，将深度学习等理论用于弱信号下转子故障诊断与预测，提高故障诊断与预测的准确性。

项目共发表论文 110 余篇，被引次数超过 1800 次。

1. 双转子系统典型故障与振动传递机理

针对航空发动机双转子-轴承-机匣系统，开展整机系统建模降维、非线性振动故障机理、振动传递规律等研究工作。

针对实际航空发动机难以开展振动故障机理研究的问题，提出了工程降维方法，建立了用于开展理论研究、数值计算和仿真分析的不同简化程度的动力学模型，并在真机实验台上进行了验证，实现了模型的真实性和非线性与计算效率之间的有机协调；将谐波平衡法与时域频域变换技术相结合，构建了半解析求解方法，实现了含双频激励复杂非线性振动方程的近似解析求解。工程降维方法使得可通过简化模型对真机开展故障机理研究。

针对发动机在试车及运行中出现的双稳态振动现象，研究由中介轴承、挤压油膜阻尼器等支承载非线性因素引起的双稳态振动机理，应用非线性动力学、热力学等理论，分析主要结构和运行参数的影响规律，揭示了中介轴承接触共振机制，提出中介轴承优化设计准则；针对高压空心转轴裂纹故障对振动响应不敏感、故障识别难度大的问题，建立了空心转轴裂纹故障模型，揭示了故障下的超谐共振机理，并提出利用超谐共振放大作用实现故障早识别的新思路。

针对发动机故障振动传递路径复杂，采用调幅调频函数表征支承路径和碰摩路径对振动传递的影响，引入振动传递率、振动敏感度、测振综合能力等振动传递评价指标，在时域、频域内描述机匣测点的测振能力，提出航空发动机机匣测点选取方法；建立双转子中介轴承非线性支承力和损伤故障的力学模型，分析了中介轴承滚动体、内圈、外圈的故障振动在双转子-轴承-机匣系统中的传递规律。

在本领域顶级期刊发表论文 50 余篇，被引 700 余次。

2. 发动机典型部件减振设计与参数优化

针对挤压油膜阻尼器，开展结构参数优化设计与转子系统振动抑制研究；针对复合材料风扇叶片，开展叶片颤振响应抑制研究。

围绕挤压油膜阻尼器转子动力学特性和参数优化设计中的关键问题，研究考虑油膜两相流、流体惯性、周向弹性环的流固耦合动力学建模和快速计算流程；揭示阻尼器刚度、阻尼和非线性程度的形成机理，以及重要结构和机动工况等参数的影响规律；采用基于胞映射技术的混合算法，开展提高转子减振性能的关键参数优化设计研究。针对影响 SFD 的不利因素开展动力学准确建模、动特性全面揭示和结构参数优化设计研究并得到实验验证，有助于提高我国航空发动机高性能减振的自主研发能力。形成的快速计算方法受到航空设计部门重视，将为设计软件国产化做出积极贡献。

针对发动机风扇叶片颤振抑制问题，考虑石墨烯对复合材料的增强效应，采用无网格 IMLS-Ritz 方法建立了石墨烯增强复合材料叶片的振动方程及非线性大变形弯曲方程，揭示了石墨烯含量、分布方式、石墨烯几何尺寸等参数对复合材料叶片模态特性及非线性弯曲特性的影响；采用适当的气动力模型建立了超音速和亚音速流中叶片的气动弹性模型，揭示了结构参数对叶片颤振临界条件及气动弹性响应的影响。针对叶片气动弹性响应具有宽频特点，采用非线性减振器很好的降低了叶片的颤振临界条件和气动弹性响应幅值。

在本领域完成高水平论文 20 余篇，被引 200 余次，获得授权专利 4 项。

3. 基于深度学习的转子故障诊断与预测

开展转子系统故障诊断与健康状态预测研究，提出一系列创新的深度神经网络模型，实现了对转子系统及其部件准确、自动的故障诊断与预测。

在故障诊断方面，建立了深度残差网络模型，实现了训练效率与诊断准确性的提升；针对设备工况变化、环境噪声影响等问题，提出了深度领域自适应方法，实现跨领域的准确诊断；在难以获取有效数据情况下，提出深度伪数据生成方法辅助建立模型；同时揭示了深度神经网络模型与传统故障诊断知识的关联，增强了“黑箱”模型可解释性。

在状态预测方面，本项目系统性地提出了基于深度卷积神经网络的剩余有效寿命预测方法，刷新了公开数据集中的预测准确率，此项工作得到普遍关注（至今得到 305 次 SCI 引用，并连续入选 ESI 高被引论文），引领了基于深度神经网络的系统预测方法的发展；针对深度神经网络易过拟合、无法高效提取有用特征等问题，本项目提出多尺度特征提取策略实现信息融合与预测准确性的提升。

研究成果整体上提升了故障识别准确性，强化了数据驱动模型在多工况场景下的普适性，克服了数据缺乏的限制，提高了对黑箱模型的理解和实际应用的有效性，并显著增强了健康预测准确性，推动了转子系统服役监测的智能化发展。

在本领域共发表 30 余篇高水平论文（6 篇 ESI 高被引论文及 2 篇 ESI 热点论文），被引 900 余次。