

中国复合材料学会科学技术奖提名书

一、基本情况

提名者	杨胜春、郑锡涛、姚学锋			
成果名称	热振环境下碳纤维/树脂复合材料板壳结构非线性动力学分析、试验技术及减振应用			
主要完成人	李晖、秦朝烨、周晋、王海军、李凯翔、孙伟、张飞、张海洋、许卓、刘云飞			
主要完成单位	东北大学、清华大学、西安交通大学、中航试金石检测科技（无锡）有限公司、中国飞机强度研究所、中国航发沈阳发动机研究所、东北电力大学			
学科分类名称	1	非线性振动力学	代码	130.2020
	2	振动控制理论	代码	130.2050
	3	航空、航天复合材料	代码	590.4030
所属国民经济行业	制造业			
任务来源	国家计划，基金资助，企业			
<p>具体计划、基金的名称和编号：</p> <p>(1) 国家安全重大基础研究：XXX 转子叶片气固耦合振动失效基础研究，编号：613140；</p> <p>(2) 国家自然科学基金：航空发动机中纤维增强型复合薄壁构件的非线性振动特性研究，编号：51505070；</p> <p>(3) 国家自然科学基金：基于阻尼涂层的整体叶盘主动失谐设计及减振研究，编号：51775092；</p> <p>(4) 装备预研重点实验室基金项目：CNTC-MMC-CMCFELs 新型材料的减振降噪吸波机理与应用研究，编号：6142905192512；</p> <p>(5) 横向委托：复合材料机匣包容能力解析方法研究，编号：JC36021050018；</p> <p>(6) 中央高校基本科研业务费国防引导项目：航空发动机中纤维增强复合薄壁构件热-气-固耦合振动试验方法研究，编号：N160313002；</p> <p>(7) 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目：纤维增强复合薄壁构件的阻尼减振机理与测试方法研究，编号：N150304011；</p> <p>(8) 中国博士后科学基金面上项目：基于表征测试的纤维增强复合薄壁构件非线性振动研究，编号：2015M580229；</p> <p>(9) 中央高校基本科研业务费国防重大项目：基于防护涂层的纤维增强复材薄壁结构高温抗振耐冲击机理研究，编号：N2103026。</p>				
授权发明专利（项）	33	授权的其他知识产权（项）	20	
项目起止时间	2010 年 7 月 1 日 —— 2020 年 12 月 31 日			

二、项目简介

面向我国军用航空发动机、飞行器、载人航天空间站等重大装备对热振环境下先进复合材料结构轻量化设计、高精度试验、振动抑制及高可靠性服役的迫切需求，项目自 2010 年起，在国家安全重大基础研究项目、国家自然科学基金项目等项目的支持下，以航空发动机碳纤维/树脂复合材料叶片、机匣以及空间站科学实验柜壁板、飞行器壁板等为研究对象，开展了航空航天领域多种纤维/树脂构成的复合材料板壳结构的非线性热振问题研究，突破了热振环境下上述新材料结构关键动力学参数预测、性能测试及振动抑制方面的技术瓶颈，主要发明点如下：

1. **发明了热振环境下碳纤维/树脂复合材料板壳结构非线性动力学分析方法。**创建了基础振动激励、高强声波激励、气动载荷激励下具有振幅和温度依赖特征的复材板壳结构的非线性动力学模型，提出了各向异性复材结构非线性固有频率、阻尼比、振动响应等参数的高精度预测方法，避免了传统线性等效建模及求解误差过大的问题。例如，对 20-150℃ 范围内 CF120 碳纤维/树脂薄板的第三阶固有频率、基础激励共振响应及模态阻尼比的最大预测误差分别不超过 0.8%，8.3%和 4.3%，而线性预测方法的误差达到了 5.8%，27.6%和 28.2%。揭示了环境温度、纤维铺设角度、层合方式、外激励幅度和频率、弹支或固定约束边界条件的变化等对非线性振动的影响机制。

2. **发明了热振环境下碳纤维/树脂复材板壳结构非线性动力学参数的高精度试验技术与装置。**发明了适合薄壁板壳结构高精度振动激励的多款激励器，克服了此类结构具有复杂局部振型、密集模态、易受传感器附加质量影响的测试难题。针对热振环境下复材板壳结构会随着环境温度、外激励幅度变化而存在阻尼与频率参数改变的特殊非线性机制，发明了有效获取具有振幅或温度依赖性的复材板壳结构非线性振动的测试新方法，克服了传统线性振动测试法出现的大偏差甚至无法测量的缺点，为碳纤维/树脂复合材料板壳结构动强度测试评估与减振性能试验提供了有效的技术解决方法。针对我国对于各向异性复材结构缺乏高精度材料力学参数辨识方法及装置的问题，研制了基于激光无损扫描的碳纤维增强复合材料参数测试仪，实现了常温与热环境下碳纤维/树脂材料沿不同纤维方向的杨氏模量、剪切模量、损耗因子的准确辨识(如辨识获得了 100℃ 下 TC500 碳纤维/树脂的纤维纵向、横向和剪切方向损耗因子分别为 0.036、0.040、0.022)。发明了高温、湿热、振动等多因素环境耦合作用下复材力学性能退化测试仪器，为新型复材长时间服役后性能劣化评价和损伤检测提供了技术储备，填补了国内空白。

3. **发明了热振环境下基于先进阻尼涂层的复材板壳结构非线性振动抑制技术。**筛选出 NiCoCrAlY+YSZ 等高性能金属、陶瓷混合材料作为硬质阻尼涂层，提出了基于异氰酸酯组分、合成树脂等原料组成的耐高温聚脲软质阻尼涂层，掌握了在金属或复材板壳结构上涂覆具有耐磨、防腐和高阻尼性能的软、硬质涂层的关键工艺；创建了常温与热环境下涂覆软、硬质阻尼涂层的板壳结构非线性动力学模型和阻尼优化设计模型，提出了涂覆阻尼涂层的最佳方案，有效抑制了复材板壳结构在热环境下的非线性振动响应。利用阻尼涂层技术，解决了长期困扰某型航空发动机叶片高阶模态振动掉角故障的难题，实现了叶片、叶盘等薄壁结构危险模态对应的振动响应下降 15-30%，振动应力降低 15-20%。

基于以上理论创新和技术发明，本项目共授权发明专利 33 项、实现专利转让 2 项、软件著作权 20 项，在国内外学术杂志和国际会议发表学术论文 75 篇（其中 SCI 检索 47 篇，他引 1200 余次，EI 检索论文 28 篇），出版学术专著 2 部。该项目通过中科合创（北京）科技成果评价中心组织的科技鉴定，专家组评价为“**该项目取得的研究成果整体达到国际先进水平**”。相关技术发明成果应用于中国航发沈阳发动机所、中国航发黎明公司、中国飞机强度研究所、中科院沈阳自动化研究所等单位多个型号的航空发动机复材叶片、外涵机匣以及空间站科学实验柜复材壁板、飞行器壁板等结构/部件动强度试验、性能测试与减振处理等方面，项目成果还在我国军工及多家高科技民营企业得到了推广应用，取得了良好的社会与经济效益。