

第五屆



西北工業大學  
NORTHWESTERN POLYTECHNICAL UNIVERSITY



蘇州理工大學  
Suzhou University of Science and Technology

全國連接結構動力學學術研討會

# 會議手冊

中國·蘇州·太倉  
2023.7.7-7.10



# 欢迎词

尊敬的各位专家、学者，老师和同学们：

热情欢迎大家齐聚美丽的江南小城苏州太仓，参加第五届全国连接结构动力学学术研讨会。本次会议由中国振动工程学会模态分析与试验专业委员会主办，西北工业大学、西北工业大学太仓长三角研究院承办。

会议将围绕工程装备连接结构动力学领域学术前沿及关键技术问题进行研讨，旨在增进领域内研究人员之间的学术交流与科研合作，推动相关领域深入发展。会议将特邀五位本领域著名学者做大会主旨报告，同时安排九个大会邀请报告，并设置连接界面力学、连接动力学建模与试验、连接结构状态检测与监测等三个专题分会场进行口头报告交流。此外，会议同期举办中国振动工程学会模态分析与试验专业委员会委员代表会议。

本次会议得到了陕西中科启航科技有限公司、苏州瑞弗曼智能科技有限公司、江苏东华测试技术股份有限公司、杭州锐达数字技术有限公司等单位的大力支持，在此表示诚挚的感谢！

衷心期待各位参会代表在会议期间碰撞思想、充分交流和热烈讨论，祝愿全体与会者在会议期间收获满满，生活和工作愉快！

中国振动工程学会模态分析与试验专业委员会

2023年7月，苏州太仓

# 目 录

会议须知 .....	1
组织机构 .....	2
会议概要日程 .....	3
会议酒店介绍 .....	4
接驳安排及路线指南 .....	5
会议报告详细日程 .....	7
(一) 大会主旨报告 .....	7
(二) 大会邀请报告 .....	8
(三) 分会场报告 .....	9
分会场 1——连接界面力学, 二楼天镜厅 .....	9
分会场 2——连接动力学建模与试验, 二楼华发厅 .....	10
分会场 3——连接结构状态检测与监测及其他, 二楼天泉厅 .....	11
大会报告介绍 .....	12
主旨报告(一) .....	12
主旨报告(二) .....	13
主旨报告(三) .....	14
主旨报告(四) .....	15
主旨报告(五) .....	16
邀请报告 .....	17
便签页 .....	24

## 会议须知

尊敬的各位参会专家和学者，欢迎您参加第五届全国连接结构动力学学术研讨会，为确保会议的顺利召开，请您注意以下事项：

- 请参会人员佩戴胸牌进入会场；
- 请参会人员按要求提供会议注册费开票信息，否则发票无法准确、及时送到；
- 请做分会场报告的学者尽量提前将报告 PPT 拷贝到分会场专用电脑并调试；
- 请参会人员按照会议日程出席各项活动，若会议安排出现变动，会务组将提前通知。

会议期间如需帮助，请您与会务组人员进行联系：

会议负责人：                    徐  超 (136-3670-8578)

  郭  宁 (153-8944-0060)

  李东武 (187-9279-3658)

会场联系人：                    鱼则行 (132-7939-6867)

  李鹏飞 (180-9322-6973)

注册及财务联系人：            杨慧毅 (157-0379-5239)

酒店及交运联系人：            许素宇 (177-9583-3421)

祝各位参会专家和学者在太仓参会期间工作愉快！

# 组织机构

**主办单位：** 中国振动工程学会模态分析与试验专业委员会

**承办单位：** 西北工业大学  
西北工业大学太仓长三角研究院

**协办单位：** 中国核学会核工程力学分会  
苏州市航空航天学会  
陕西中科启航科技有限公司  
西安市结构智能感知国际联合研究中心  
智能运维与健康管理的苏州市外籍院士工作站

**支持单位：** 苏州瑞弗曼智能科技有限公司  
江苏东华测试技术股份有限公司  
杭州锐达数字技术有限公司

**大会主席：** 于开平

**学术委员会：**（按姓名笔画排序）

丁千 丁虎 丁晓宇 于开平 万强 马辉 王东 王刚锋 王延庆 王冰 王福瑞  
石玉红 吕中荣 朱旻昊 刘炜 孙军辉 孙秀婷 孙清超 李东升 李玲 李海波  
李琳 李朝峰 杨帆 杨辰 肖世富 吴志刚 宋汉文 张大义 张忠 张忠伟  
张周锁 范雨 范宣华 罗忠 周烁 赵广 赵雪颜 郝志明 费庆国 秦朝焯 徐洋  
徐超 郭宇锋 郭翔鹰 黄行蓉 黄锐 曹军义 梁德利 臧朝平 廖日东

**组织委员会：**

郭宁 李东武 吴佳斌 陈泽晶 朱盈怡 李丹祺 鱼则行 杨慧毅 李鹏飞  
许素宇 田镇熊 孟子然 李世龙 朱军 严寅中 曹善成 杜飞 魏焯亮 朱焱濛  
王远帆 郝林涛 邓宇航

## 会议概要日程

时间		日程安排	地点
7月7日	12:00-22:00	注册、报到	苏州太仓华发铂尔曼酒店大堂
7月8日	08:00-08:20	开幕式	铂尔曼酒店华发厅
	08:20-10:20	主旨报告	铂尔曼酒店华发厅
	10:20-10:40	茶歇	
	10:40-12:00	大会主旨报告	铂尔曼酒店华发厅
	12:00-14:00	午餐、午休	铂尔曼酒店二楼铂宫厅
	14:00-15:40	大会邀请报告	铂尔曼酒店华发厅
	15:40-15:55	茶歇	
	15:55-18:00	大会邀请报告	铂尔曼酒店华发厅
	18:00-20:00	欢迎晚宴	铂尔曼酒店二楼铂宫厅
	20:00-22:00	模态专委会会议	铂尔曼酒店华发厅
7月9日	08:00-09:55	分会场报告	见会议报告详细日程
	09:55-10:10	茶歇	
	10:10-12:15	分会场报告	见会议报告详细日程
	12:15-14:00	午餐、午休	铂尔曼酒店二楼铂宫厅
	14:00-16:30	技术参观	太仓市内，13:50 铂尔曼酒店大堂集合、出发。
	18:00-20:30	晚餐	
7月10日	全天	离会	

## 会议酒店介绍

**苏州太仓华发铂尔曼酒店：**苏州太仓华发铂尔曼酒店是由华发集团投资建造，委托法国雅高酒店集团管理的高端商务酒店。酒店位于太仓科教新城，地理位置优越，毗邻华发商圈，坐拥天镜湖绝佳视野。交通便利，一小时车程可达上海虹桥机场及虹桥火车站。健身房，水疗中心及室内恒温游泳池一应俱全。

地址：江苏省苏州市太仓市书院路 188 号，联系电话：0512-56698888



苏州太仓华发铂尔曼酒店位置



天镜湖 (0.5km)



张溥故居 (3.5km)



弇山园 (3.5km)



金仓湖 (11km)



浏河古镇 (18km)



沙溪古镇 (19km)

苏州太仓华发铂尔曼酒店周边人文/自然景观

## 接驳安排及路线指南

为方便各位参会人员预定行程和往返场站-太仓会场，会务组安排了上海虹桥至酒店会场的接驳专线，给各位参会专家及学者提供便捷、舒适的出行服务。

具体接驳安排如下：

会议注册、报道接驳		
日期	发车时间	接驳路线
7月7日	<b>13:00</b>	上海虹桥接驳点—太仓华发铂尔曼酒店
7月7日	<b>16:00</b>	上海虹桥接驳点—太仓华发铂尔曼酒店
7月7日	<b>19:00</b>	上海虹桥接驳点—太仓华发铂尔曼酒店
会议离场接驳		
日期	发车时间	接驳路线
7月9日	<b>16:30</b>	太仓华发铂尔曼酒店—上海虹桥场站
7月10日	<b>09:30</b>	太仓华发铂尔曼酒店—上海虹桥场站

接驳集合点：

1号航站楼 1楼会合点

2号航站楼 2楼会合点

在接驳过程中，如您需要帮助，请与我们联系：

孟子然 (179-2218-0326) (1号航站楼志愿者)

李世龙 (177-0296-1411) (2号航站楼、虹桥站志愿者)

田镇熊 (191-1523-3612) (2号航站楼、虹桥站志愿者)

自行前往路线建议:

如您选择自行前往会场，建议路线为:

机场/车站	公交/地铁	出租车
上海虹桥国际机场/虹桥站	虹桥2号航站楼站（地铁10号线）→交通大学站（地铁11号线）→嘉定西站（步行900米）→西门站（嘉定60路）→太仓科教新城客运站（步行400米）→太平新路（太仓118路）→会议酒店（步行50米），全程约2小时40分钟	50公里 约1小时车程 费用约170元
太仓南站	太仓南站→溟华国际大厦书院路（太仓139路）→会议酒店（步行90米），全程约40分钟	5.5公里 约12分钟车程 费用约20元
太仓站	太仓站→交通大厦站（太仓107路）→溟华国际大厦书院路（太仓139路）→会议酒店（步行170米），全程约1小时20分钟	14.5公里 约30分钟车程 费用约45元



主要交通点与会议酒店位置关系图

请您酌情安排好行程，注意行程安全，期待与大家相聚美丽太仓!

# 会议报告详细日程

## (一) 大会主旨报告

7月8日 (二楼华发厅) 08:20 - 12:00			
时间	报告题目	报告人	主持人
8:20-9:00	航天紧固连接技术发展现状与展望	石玉红 研究员 北京宇航系统工程研究所	徐超 西北工业大学
9:00-9:40	TriboMechaDynamics: The Emergence of a New Field at the Confluence of Tribology, Contact Mechanics, and Structural Dynamics	<b>Prof. Matthew Brake</b> 美国莱斯大学	
9:40-10:00	茶 歇		
10:00-10:40	高速飞行器热结构连接	费庆国 教授 东南大学	宋汉文 同济大学
10:40-11:20	非线性能量汇可靠性动力学设计研究	丁虎 研究员 上海大学	
11:20-12:00	航天器典型连接结构模型修正与连接非线性动力学	于开平 教授 哈尔滨工业大学	
12:00-14:00	午餐、午休		

(二) 大会邀请报告

7月8日 (二楼华发厅) 14:00 – 18:00			
时间	报告题目	报告人	主持人
14:00-14:25	航空发动机连接力学状态在位测试与表征	孙清超 教授 大连理工大学	黄锐 南京航空航天大学
14:25-14:50	对于带干摩擦阻尼叶片动力学分析的几点思考	吴亚光 副教授 北京航空航天大学	
14:50-15:15	航空发动机双转子-轴承系统热-固耦合非线性动力学研究	侯磊 教授 哈尔滨工业大学	罗忠 东北大学
15:15-15:40	运载火箭飞行模态辨识技术研究	马志赛 副教授 天津大学	
15:40-15:55	茶 歇		
15:55-16:20	预紧连接界面非线性动力学机理与模型	万强 研究员 中国工程物理研究院	王延庆 东北大学
16:20-16:45	The influence of friction interface geometry on the nonlinear dynamic response of aero-engine structures	袁杰 助理教授 英国南安普顿大学	
16:45-17:10	航天连接结构非线性动力学建模与试验技术	张忠 研究员 北京强度与环境研究所	孙秀婷 同济大学
17:10-17:35	面向空间捕获的仿生黏附功能表面接触动力学研究	李东武 副教授 西北工业大学	
17:35-18:00	基于失效分析的螺栓连接设计	刘建华 副教授 西南交通大学	范宣华 中国工程物理研究院
18:00-19:00	欢迎晚宴		

### (三) 分会场报告

7月9日 (分会场1——连接界面力学, 二楼天镜厅)

负责人: 徐洋、孙军辉

时间	报告题目	报告人	主持人
8:00-8:20	随机粗糙面表面接触的增量模型和实验测量 (特邀报告)	王刚锋	徐洋 郭宇锋
8:20-8:40	低维材料界面摩擦与力学调控 (特邀报告)	郭宇锋	
8:40-8:55	基于图像处理的粗糙表面电接触斑点形貌演化研究	张海波 刘胜利	
8:55-9:10	粗糙界面粘弹性接触增量模型	梁轩铭 丁悦 李成雅 王刚锋	
9:10-9:25	钢丝绳弯曲摩擦疲劳损伤行为研究	王大刚 种海浪	
9:25-9:40	基于热环境摩擦实验台的多种材料摩擦特性参数辨识及分析	王云钊 李朝峰 贾体昌	
9:40-9:55	热环境下改进 LuGre 模型的摩擦接触特性辨识及分析	贾体昌 李朝峰 王云钊 张浩岩	
9:55-10:10	茶 歇		
10:10-10:30	原子级接触、摩擦和磨损的理论计算 (特邀报告)	王杨	孙军辉 王刚锋
10:30-10:45	螺栓连接界面预紧性能退化的迟滞特性研究	袁迪 王东 万强	
10:45-11:00	位错/界面相互作用对黏着磨损的影响	赵凯	
11:00-11:15	基于三维分形理论的结构界面虚拟材料建模方法	杜冰 陆秋海	
11:15-11:30	海洋钻机钢丝绳变载弯曲疲劳损伤行为研究	李陈晨 王大刚	
11:30-11:45	钢丝弯曲摩擦腐蚀疲劳损伤行为研究	王博 王大刚	
11:45-12:00	铺层顺序对螺栓连接复合材料板载荷分配和失效行为的影响	李可昊 刘文光 张功平	
12:00-12:15	半刚性钢梁-柱节点转动行为本构模型	刘潇 郝志明	

7月9日 (分会场2——连接动力学建模与试验, 二楼华发厅)

负责人: 李海波、王东

时间	报告题目	报告人	主持人
8:00-8:20	飞行器结构的非线性动力学试验与模型修正研究 (特邀报告)	王兴	李海波 马辉 秦朝烨
8:20-8:40	非线性系统辨识方法及其在螺栓连接中的应用研究 (特邀报告)	程长明	
8:40-8:55	一般边界条件下螺栓连接多板结构的建模与振动分析	邢武策 王延庆	
8:55-9:10	用于干摩擦系统动力学分析的全三维接触模型的半解析多阶谐波平衡法	孙赫 张大义 吴亚光 沈庆阳 胡殿印	
9:10-9:25	金属橡胶隔振器非线性动力学建模及参数辨识研究	杜奕函 范宣华 王东	
9:25-9:40	机械臂抓取大型柔性结构的动力学建模与实验研究	王堉欣 黄珂 蒋建平 吴志刚 王兴	
9:40-9:55	圆形太阳翼非线性特性识别与建模	张怡佳 吴志强 吴跃民	
9:55-10:10	茶 歇		
10:10-10:25	面向在轨组装的对接机构动力学建模与实验研究	方孟翔 林承荣 蒋建平 吴志刚 王兴	王东 郭翔鹰 张大义
10:25-10:40	超稳激光主动隔振单元	文静 周永康 杨颖 雷澄宇 张弛 杨雨豪 刘磊 李青 李伟	
10:40-10:55	含连接间隙的折叠翼舵的非线性参数辨识方法研究	任彦松 马志赛 丁千	
10:55-11:10	考虑时变压力分布的带缘板阻尼的榫连叶片的建模方法及动力学分析与实验研究	张浩岩 李朝峰 贾体 昌 唐敬虎	
11:10-11:25	折叠翼舵的非线性动力学降阶建模及特性预示	符杰 马志赛 丁千	
11:25-11:40	大型铰接空间桁架结构非线性频域响应分析的等效动力学建模方法	刘福寿 金栋平	
11:40-11:55	螺栓连接转子的试验模型动力学相似设计方法研究	李雷 罗忠 石宝龙 孙凯	
11:55-12:10	考虑连接界面基体沉积的陶瓷基复合材料连接结构动力学建模方法	李志强 张忠 高博 吴振强 李尧	

7月9日 (分会场3——连接结构状态检测与监测及其他, 二楼天泉厅)

负责人: 孙清超、王福瑞

时间	报告题目	报告人	主持人
8:00-8:20	基于波模态转换特性的连接结构健康监测——从力学机理到系统实现 (特邀报告)	范雨, 王文君, 李琳	孙清超 王福瑞 范雨
8:20-8:40	基于压电传感器的连接损伤监测研究进展 (特邀报告)	杜飞	
8:40-8:55	考虑装配工艺的螺栓连接转子系统性能退化研究	石宝龙 罗忠 李雷 罗永恒	
8:55-9:10	栓接结构松动状态检测方法	沈黎 张进华 方斌	
9:10-9:25	双联金属毡卡箍非线性力学参数辨识研究	汪博 徐昆鹏 石岩 徐成 刘怡成 何亮文	
9:25-9:40	弹箭动力学中的非线性因素及其参数识别	刘博 韩敬永 隋鑫 吴志培	
9:40-9:55	含弹性边界的梁结构非线性参数辨识与动态特性分析	姚毅 马志赛 丁千	
9:55-10:10	茶 歇		
10:10-10:25	可折叠复合材料机械铰链连接结构设计及性能调控研究	王冰 赵陈敏 钟舜聪	李玲 杨辰 王冰
10:25-10:40	基于EMD-1DCNN的谐波减速器合格性判定方法研究	张熠鑫 徐洋 解国升	
10:40-10:55	高强钢承压型螺栓连接抗剪性能研究及设计建议	林雪妹 任志浩 钟国辉 何浩祥	
10:55-11:10	变结构空间环状可展结构的设计与分析	李起帆 李博 王三民	
11:10-11:25	LHSG-25 谐波减速器振动噪声分析	解国升 徐洋 张熠鑫	
11:25-11:40	圆形太阳翼模态试验及非线性探究	吴志强 张怡佳 张雨森 郜心茹 吴跃民 吴爽 冯世绪	
11:40-11:55	横向振动条件下螺头螺母约束状态对螺栓松动行为的影响	张功平 刘文光 李可昊	
11:55-12:10	螺栓连接状态全生命周期监测及早期松动预警	秦小舒 姜明顺 贾磊	

# 大会报告介绍

## 主旨报告(一)

### 航天紧固连接技术发展现状与展望

石玉红\*#

北京宇航系统工程研究所

**摘要：**紧固连接结构在航天型号中广泛应用，面临着宽温域、强振动、高冲击、多相容等极端环境，工作中可能发生紧固松动、破坏断裂、连接咬死、腐蚀失效等痛点问题，这其中蕴含着深层次的复杂连接结构动力学行为。为此，亟需开展多向耦合载荷作用下紧固件破坏机理研究、强振动宽温域条件下紧固件松动机理研究等工作，提升和完善紧固连接结构技术指标和试验验证体系，形成紧固系统正向设计方法，推动航天紧固连接结构向智能化调控、轻质化设计、高性能提升、高可靠应用的方向发展。

#### 报告人：石玉红 研究员

中国运载火箭技术研究院总体设计部某专项副总师，研究员，硕士研究生导师，全国紧固件标准化技术委员会委员，通用零部件军用标准化技术委员会委员。长期从事运载火箭结构系统研制，先后突破了载人运载火箭逃逸飞行器结构、大型冯卡门整流罩为代表的一系列重大关键技术，多项技术填补国内空白、达到国际先进。获得国防科学技术一等奖一项、二等奖一项、三等奖二项、军队科技进步奖及各类奖项 30 余项。

## 主旨报告(二)

# **Tribomechadynamics: The Emergence of a New Field at the Confluence of Tribology, Contact Mechanics, and Structural Dynamics**

Matthew Brake<sup>\*#</sup>

Rice University

**Abstract:** Tribomechadynamics is a new field in mechanical engineering that includes tribology (the study of surfaces in relative motion), contact mechanics, and structural dynamics. These three disciplines all study mechanical interfaces, but they have remained separate due to length scale considerations, solution techniques, and response metrics. The new field of Tribomechadynamics was created to bridge the scales from the nano- and micro-structural characterizations of tribology to the macroscale modeling of structural dynamics. The goals of this new field are to predict the degradation of interfaces (solid/solid and solid/fluid) and to improve the design of components to extend life, increase performance and reduce costs. Tribomechadynamics offers the opportunity to improve the efficiency and reduce the costs of machines such as vehicles, engines, and turbines through a better physical understanding of the interfacial dissipation inherent in assembled systems. This talk presents an overview of the nonlinear qualities of jointed structures and the particular modeling approaches that are necessary for predictability. At the conclusion, open areas and challenges for future work are discussed.

### **报告人: Prof. Matthew Brake**

Prof. Brake started at Rice University in 2016 after working at Sandia National Laboratories for nine years. Prior to Sandia, Prof. Brake graduated from Carnegie Mellon University in 2007. Prof. Brake has been elected to several leadership positions, including as the chair of the ASME Research Committee on the Mechanics of Jointed Structures, the chair of the Nonlinear Dynamics Technical Division of SEM, and as the chair of the ASME Technical Committee on Vibration and Sound. He is a recipient of the 2012 Presidential Early Career Award for Scientists and Engineers and he recently won the 2018 C.D. Mote Jr Early Career Award. Much of Prof. Brake's career has focused on developing large scale collaborations and supporting graduate student education. To this end, he founded and directed both the Tribomechadynamics Research Camp (TRC) Summer Program, which rotates between Rice University, Imperial College London, and the University of Stuttgart, and the Nonlinear Mechanics and Dynamics (NOMAD) Institute at Sandia National Laboratories. His primary research interests are in interfacial mechanics, tribology, model reduction theory, uncertainty propagation, and nonlinear dynamics.

## 主旨报告(三)

### 高速飞行器热结构连接

徐培飞 张大海 费庆国\*#

东南大学，机械工程学院，高速飞行器结构与热防护教育部重点实验室

**摘要：**随着高速飞行器朝着更高马赫数、更大飞行空域以及可重复使用的方向发展，飞行包线下的载荷环境变得越来越严酷，给飞行器连接结构与制造带来了极大的挑战。目前，除高温合金之外，纤维增韧的陶瓷基和碳基复合材料也已广范应用于高速飞行器中的热结构部件。本报告从高温合金-复材异种材料连接、全耐高温复合材料连接两方面，对高速飞行器热结构连接中的设计、制造、表征等关键技术进行介绍。最后，考虑未来高速飞行器轻量化的需求，以及可重复使用所带来的更加严酷载荷工况，对未来高速飞行器中的连接结构进行展望。

#### 报告人：费庆国 教授

费庆国，男，工学博士，国家杰出青年科学基金获得者，东南大学首席教授、江苏省特聘教授。现任东南大学发展规划与学科建设处处长，兼任高速飞行器结构与热防护教育部重点实验室主任、江苏省空天机械装备工程研究中心主任、东南大学空天机械动力学研究所所长。担任中国振动工程学会理事、中国力学学会教育工作委员会委员、江苏省振动工程学会理事长，以及《振动工程学报》、《振动、测试与诊断》等学术期刊编委。在航空学报、宇航学报、AIAA、ASME 等国内外期刊发表论文 200 余篇，授权发明专利 70 余项，软件著作权 20 余项。

。

## 主旨报告(四)

### 非线性能量汇可靠性动力学设计研究

丁虎<sup>\*#</sup>

上海大学

**摘要:** 非线性能量汇是没有线性刚度的强非线性吸振器, 因其能够自适应地捕获宽频带内的任意频率的共振、靶向转移主系统的振动能量, 而且同时具备不新增、不改变主系统的共振频率等卓越性能, 因而备受关注。将简介非线性能量汇的动力学特征, 并围绕着应用推广中需要解决的可靠性设计中的动力学问题, 展开的部分非线性能量汇的动力学研究工作。

#### 报告人: 丁虎 教授

丁虎, 上海大学力学工程科学学院研究员、博导。曾任加拿大多伦多大学机械工程系的访问教授、美国杜克大学机械与材料科学系的访问学者。主持完成国家自然科学基金优秀青年项目、主持国家自然科学基金杰出青年项目及上海市创新重大项目的研究, 获中国力学学会徐芝纶优秀力学教师奖, 参与获得国家自然科学二等奖、教育部自然科学二等奖等, 入选爱思唯尔中国高被引学者。主要研究兴趣包括: 揭示弹性结构的非线性振动特征及影响, 以及基于非线性动力学设计的振动能调控与振动控制研究

## 主旨报告(五)

### 航天器典型连接结构模型修正与连接非线性动力学

于开平\*#

哈尔滨工业大学，航天学院

**摘要：**航天器仪器设备与支架、支架与舱段，夹芯承力结构的蒙皮与芯层，防隔热或防隔热承力一体化的复合材料结构，多环节连接的折叠舵系统等典型连接的存在，为结构动力学精确建模带来重要影响，尤其是在高超声速飞行器强烈气动加热环境下，连接结构的刚度的准确重构一直是航天器结构动力学动力学精确建模重点关注的问题。此外，舵面常常被用作飞行器姿态控制系统的执行机构，由于发射筒的空间限制，有些飞行器的舵面还设计成可折叠的，出筒后展开，这种控制执行机构就存在舵面与舵机、折叠部位等多环节连接的间隙、接触非线性，对舵系统动力学特性有不可忽视的影响。在国家自然科学基金、国家重大科技工程及航天工业部门横向合作等项目资助下，作者团队重点关注了这两方面问题的研究，本报告也主要介绍了近年来在航天器典型连接结构模型修正方法以及舵系统多环节连接非线性结构动力学特性研究方面取得的成果。

#### 报告人：于开平 教授

于开平，哈尔滨工业大学航天学院教授、博士生导师，力学学科主要研究团队“结构动力学”负责人。入选教育部“新世纪优秀人才”计划。国家重大科技工程论证专家、项目责任专家，航天工业部门重点实验室客座教授、外聘专家。主持国家自然科学基金、国家部委重点基础研究、国家重大科技工程等国家级课题十几项，发表学术论文 260 余篇。主编重点图书或规划教材 3 本，获国家二等奖 1 项、省一等奖 2 项。目前任中国振动工程学会党委委员、常务理事、模态分析与试验专委会主任。中国力学学会动力学与控制专委会委员。

## 邀请报告

### 航空发动机连接力学状态在位测试与表征

孙清超<sup>\*#</sup>, 袁博, 穆晓凯

大连理工大学, 机械工程学院, 大连, 116024

**摘要:** 连接为航空发动机转子结构的薄弱环节, 其力学状态精确调控日益成为航发装配技术的焦点, 而我国面临转子连接力学状态无法在位精确检测的难题, 精量化装配难以有效实施。针对极端热/力工况下检测易产生多余物、标定数据缺失条件下连接刚度难以检测等问题, 项目组突破了结构-测试弱耦合下的预紧力精确检测、非均衡界面连接刚度在位检测、深腔转子结构连接状态自动化测试、转子非线性连接力学状态关联表征等关键技术, 研制了航空发动机转子连接力学状态自动化在位测试系统, 支撑实现航空发动机装配工艺精量化调控。

**报告人:** 孙清超, 大连理工大学教授、博士生导师, 数字化设计与智能装备技术辽宁省重点实验室常务副主任、辽宁黄海实验室基础件平台负责人。长期从事高性能连接/装配技术研究, 作为负责人承担了国家自然科学基金重点类项目、重点研发计划课题、中央高校团队领军人才项目等科研项目 20 余项, 发表 SCI、EI 刊源论文 70 余篇, 获国家/国际发明专利 50 余项。研究成果在航空发动机、航天装备、大科学仪器、精密仪表等领域得到应用, 获机械工业技术发明一等奖 1 项、航天科技集团进步一等奖 1 项等。

### 对于带干摩擦阻尼叶片动力学分析的几点思考

吴亚光<sup>1,2#</sup> 范雨<sup>3,4\*</sup> 张大义<sup>3,4</sup> 李琳<sup>3,4</sup>

1. 北京航空航天大学, 中法工程师学院/国际通用工程学院
2. 北京航空航天大学, 航空发动机研究院
3. 北京航空航天大学, 能源与动力工程学院
4. 航空发动机结构强度北京市重点实验室

**摘要:** 带干摩擦阻尼叶片的振动属于含局部强非线性结构的动力学问题, 摩擦面上非均匀的阻滞-滑移-分离接触行为显著增加了动力学分析的复杂性。建立兼顾精度与效率的带干摩擦阻尼叶片动力学分析方法有赖于两项关键技术的突破, 一是准确描述摩擦界面的非线性本构关系, 二是高效求解非线性结构动力学方程。北航课题组经过十余年的积累, 在上述两方面的研究中获得了一些经验, 形成了一些新观点。摩擦界面层面: (1) 采用分布式全三维接触模型描述叶

冠摩擦面的界面力学本构是必要的,采用准三维接触模型会造成接触状态的误判,对界面等效刚度和阻尼的预测精度均会造成不可忽略的负面影响;(2)开展界面摩擦试验是校核界面接触模型参数的重要手段,试验时应准确再现服役条件的正压力载荷,相对位移与振动频率对接触参数的影响不大。结构动力学层面:(3)分析带缘板阻尼高压涡轮叶片的动力学特性时,纳入摩擦热是必要的,摩擦热传导可视为稳态传热过程,可造成界面升温超 400 度,在设计时应予以考虑,避免摩擦界面烧蚀、粘接,引起阻尼器性能衰减或失效;(4)采用多阶谐波平衡法分析带缘板阻尼涡轮叶片或带阻尼环叶盘等多体欠约束问题时,推荐采用动静解耦或刚体模态消除法,可解决因动态刚度矩阵不可逆而引入“接地弹簧”所导致的系统刚度失真问题,上述技术细节在文献中通常被回避;(5)解析雅可比矩阵与变量尺度缩放技术是提升基于多阶谐波平衡法的非线性模态与稳态响应求解稳定性的关键,非线性模态的计算对初值极其敏感,需进一步深入研究模态簇初值的选取方法。

**报告人:** 吴亚光, 博士, 现任北京航空航天大学中法通学院副教授, 航空发动机研究院中法联合科教中心副主任。研究方向为: 1. 非线性振动控制理论与方法; 2. 适用于航空发动机结构的干摩擦阻尼技术; 3. 压电智能结构及其动力学。具体应用方向为航空发动机叶片、叶盘、机匣、转子等典型结构的振动特性分析、振动/噪声抑制。以第一或通讯作者发表 SCI、EI 论文 20 余篇, 其中 SCI 论文 10 余篇, 包括 *Nonlinear Dynamics*、*Computers & Structures*、*Journal of Sound and Vibration*、*Mechanical System and Signal Processing*、*Chinese Journal of Aeronautics*、*Journal of Engineering for Gas Turbines & Power* 等领域内知名期刊。在 ASME-GT、ASME-SMASIS 等重要国际会议的分会场宣讲学术工作 10 余次。主持“两机”专项子课题、博士后科学基金、企业横向项目共 6 项。曾获北航优秀博士学位论文(2021)、中国航空学会学术会议优秀论文(2020)等奖项。担任了 *Journal of Vibration and Acoustics*、*Experimental Mechanics*、*Structures*、*Structural Engineering and Mechanics*、*ASCE-ASME Journal of Risk and Uncertainty in Engineering Systems* 等 SCI 期刊以及 ASME-GT 会议的审稿人。

## 航空发动机双转子-轴承系统热-固耦合非线性动力学研究

侯磊\*, 昌泽元, 陈予恕

哈尔滨工业大学, 航天学院, 哈尔滨, 150001

**摘要:** 本文研究了含有两对深沟球轴承和圆柱滚子轴承的双转子系统非线性动力学与热力学耦合特性。考虑轴承安装状态随温度变化以及轴承摩擦产热随动载荷变化, 基于有限元法和热节

点网络法建立系统的热-固耦合非线性动力学模型。采用改进的增量谐波平衡法同时求解系统运动方程和热传导方程，实现热平衡状态下系统双向耦合稳态特性的高效计算。通过分析系统各节点幅频响应和温度变化中出现的振动跳跃、共振滞后等非线性现象，与单转子-轴承系统的双向耦合特性对比分析，进一步研究了含有多轴承非线性因素的转子系统振动特性和温度特性间的相互作用，预期成果能够为航空发动机转子-轴承系统的非线性动力学和热力学优化设计提供理论支持。

**报告人：**侯磊，哈尔滨工业大学航天学院教授，飞行器动力学与控制研究所所长助理，中国振动工程学会非线性振动专业委员会委员，中国工程师联合体文化与伦理委员会委员，黑龙江省青年科技工作者制造与工程科学专业委员会秘书长，*Chinese Journal of Aeronautics*、*Journal of Dynamics, Monitoring and Diagnostics*、《航空学报》《动力学与控制学报》《力学与实践》《应用力学学报》青年编委，*Mathematical Problems in Engineering* 编委，*Nature Communications* 等 74 个 SCI 期刊审稿人。2005 年至 2015 年就读于哈尔滨工业大学，博士毕业后留校工作，2017 年获得首届“中国力学优秀博士学位论文”奖，2017 年和 2020 年两次入选“哈尔滨工业大学青年拔尖人才选聘计划”，破格晋升为副教授和教授。从事航空发动机转子系统非线性动力学及振动控制研究，主持国家科技重大专项专题任务、国家自然科学基金面上项目、青年基金、黑龙江省优秀青年科学基金等，发表期刊论文 88 篇，其中 SCI 检索 59 篇，授权国家发明专利 4 项，登记软件著作权 3 项，获黑龙江省科技进步二等奖 1 项。部分研究成果应用到实际工程中，产生经济效益超过 1.2 亿元。

## 运载火箭飞行模态辨识技术研究

马志赛<sup>1,2#</sup>，丁千<sup>1,2\*</sup>，祁峰<sup>3</sup>，姜人伟<sup>3</sup>

1. 天津大学，机械工程学院，天津，300350
2. 天津市非线性动力学与控制重点实验室，天津，300350
3. 北京宇航系统工程研究所，北京，100076

**摘要：**随着运载火箭重量、推力和长细比的进一步增大，其振动特性变得愈加复杂，固有频率呈现出低且密集的特点，结构系统与控制、气动、动力等分系统之间的耦合问题日渐突出。例如，燃料快速消耗和级间分离会导致飞行状态下的运载火箭表现出显著时变特征，能否准确获取其时变飞行模态对姿控系统、动载荷设计、天地差异研究和系统优化设计等都具有重要意义。因此，针对运载火箭飞行遥测数据的噪声环境复杂、激励信号未知等问题，提出基于时

变自回归滑动平均模型的仅输出辨识理论与方法，在激励信号未知的情况下，仅利用响应信号辨识运载火箭的飞行模态。基于不同型号运载火箭的飞行遥测数据，开展辨识方法的工程化应用研究，结果表明，所提方法能够准确快速辨识出运载火箭不同阶段（如发射准备阶段、一级飞行阶段、二级飞行阶段等）的时变模态参数，与前期有限元分析或地面振动试验的预示规律相互吻合，验证了相关运载火箭飞行模态辨识技术有效可行。

**报告人：**马志赛，天津大学副教授，博士生导师，天津市青年人才托举工程入选者，中国振动工程学会模态分析与试验专委会委员，天津市机械工程学会理事，天津市智能科学与技术研究会理事，《应用力学学报》青年编委。主要从事航空航天时变模态参数辨识、间隙非线性参数辨识、连接结构数据驱动建模与特性预示等结构动力学反问题的理论与工程应用。主持国家自然科学基金（面上、青年项目）、天津市自然科学基金、航空科学基金、博士后科学基金以及航空航天科研项目 10 余项，参与国家自然科学基金重点项目、省部级重点项目、行业重大合作项目等多项。以第一/通讯作者在 MSSP、ND、JSV、IJMS、机械工程学报、振动工程学报等国内外主流期刊发表 SCI/EI 学术论文 40 余篇，以第二作者出版学术专著《运行时变结构模态参数辨识理论与方法》，申请/授权国家专利 10 余项。

## 预紧连接界面非线性动力学机理与模型

万强\*\*

中国工程物理研究院，四川绵阳

**摘要：**连接界面的力学行为具有非线性、多尺度和不确定性等特征，且与装备的多物理场服役环境交叉耦合，造成了对装备结构动力学行为准确预测、评估、设计和调控的巨大挑战。本报告主要介绍三方面工作（1）厘清连接界面黏附和摩擦行为的微观接触机理。（2）提出连接界面黏滑行为的宏观非线性动力学建模理论。（3）提出复杂连接结构的高效非线性动力学求解方法。

**报告人：**万强，中国工程物理研究院总体工程研究研究员，博士生导师。2006 年获西安交通大学固体力学博士学位。承担完成多个武器型号研制。发表论文 120 余篇。获省部级一等奖 1 项，二等奖 4 项。获中国科协求是杰出实用工程奖。获中物院邓稼先青年科技奖。四川省第十四届青年科技奖。获四川省首届“青城计划科技菁英”资助。四川省学术技术带头人。中国核学会核工程力学分会理事长。中国工程物理研究院青年科协理事长。中国工程物理研究院数理学科副主任委员。四川省青年科技联合会副主席。《现代应用物理》编委，《计算力学》，《工程力学》通讯评委，重庆大学，西北工业大学，华东理工大学客座教授。

# The influence of friction interface geometry on the nonlinear dynamic response of aero-engine structures

袁杰<sup>\*#</sup>

南安普顿大学

**Abstract:** Friction interfaces are unavoidable components of large engineering assemblies since they enable complex designs, ensure alignment, and enable the transfer of mechanical loads between the components. Unfortunately, they are also a major source of nonlinearities and uncertainty in the static and dynamic response of the assembly, due to the complex frictional physics occurring at the interface. One major contributor to the nonlinear dynamic behavior of the interface is the mesoscale geometry of a friction interface. Currently, the effects of the interface geometry on the nonlinear dynamic response is often ignored in the analysis due to the high computational cost of discretizing the interface to such fine levels for classical finite element analysis. In this paper, the influence of mesoscale frictional interface geometries on the nonlinear dynamic response is investigated through an efficient multi-scale modeling framework based on the boundary element method. A highly integrated refined contact analysis, static analysis, and nonlinear modal analysis approach are presented to solve a multi-scale problem where mesoscale frictional interfaces are embedded into the macroscale finite element model. The efficiency of the framework is demonstrated and validated against an existing dovetail dogbone test rig. Finally, the effects of different mesoscale interface geometries such as surface waviness and edge radius, are numerically investigated, further highlighting the influence of mesoscale interface geometries on the nonlinear dynamics of jointed structures and opening a new research direction for the design of friction interfaces in friction involved mechanical systems.

**报告人:** 袁杰, 英国布里斯托大学航空工程博士毕业, 现任英国南安普顿大学助理教授, 英国皇家工程院研究员(Royal Academic of Engineering Research Fellow), 英国工程特许工程师(Chartered Engineer)。2017 到 2020 期间, 担任英国帝国理工大学劳斯莱斯研究中心博士后研究员, 2015 到 2017 年间, 担任英国空客未来项目飞行器研发工程师。主要从事飞机发动机关键零部件的非线性动力学分析与测试, 开发大型连接件和失调系统的动力学预测方法, 包括模型缩减技术, 非线性模态分析和摩擦引起的稳态分析, 开发非线性模态测试方法, 同时设计和优化用于减小涡轮振动的基于干摩擦的阻尼器, 并且进行由于界面不确定性引起的量化分析, 以保证发动机动力系统的可靠性和持久性。作为负责人主持多项英国皇家协会和 EPSRC 项目,

核心参与并顺利完成由英国 EPSRC, ATI, Innovate UK, Airbus 和 Rolls Royce 等资助的 5 个重点航空研发项目, 总资助资金 3 百多万英镑。至今以第一或通讯作者发表 25 篇振动领域顶级杂志期刊, 5 次国际受邀报告, 同时 2021 研究工作获得 IMAC 国际会议最佳论文, 2019 评选为英国皇家航空学会会员, 2016 入选布里斯托大学荣誉研究员, 2017 授予克莱菲尔德大学访问研究员, 2012 获得劳斯莱斯公司博士奖学金, 2021 被选为国际结构连接协会委员会成员, 负责组织连接结构国际会议和讲座。

## 航天连接结构非线性动力学建模与试验技术

张忠<sup>#</sup>, 高博, 郭静, 杨执钧, 王奔

北京强度环境研究所, 可靠性与环境工程技术重点实验室

**摘要:** 连接结构是航天飞行器中的一种非常重要的结构形式, 其带来的非线性问题目前也越来越突出。在工程应用中, 连接结构的等效线性化处理这种传统建模方法已无法解释一些现象和机理。从典型航天飞行器结构在试验中的非线性现象出发, 介绍连接结构非线性动力学建模的工程处理方法, 包括基于先进时频转换的非线性辨识方法、基于变形/载荷关系的非线性连接本构拟合方法等。最后, 根据目前的技术需求, 对连接结构非线性动力学的建模、辨识和试验方法等进行了展望。

**报告人:** 张忠, 博士, 研究员, 北京强度环境研究所高级专家, 中国运载火箭技术研究院青年拔尖人才, 院科技委气动水动专业组、强度环境可靠性专业组成员, 中国振动工程学会模态专委会委员。主要从事航天结构动力学、力学环境预示与控制、多物理场耦合分析等研究工作, 曾承担 173、973、基础科研、装备预先研究等十余项重大重点课题的研究工作, 参与完成了 CZ-5 等多个航天型号的研制与故障分析研究工作, 共发表论文 50 余篇, 授权专利 40 余项, 合著专著 2 部。

## 面向空间捕获的仿生黏附功能表面接触动力学研究

李东武<sup>1#\*</sup>, 李若章<sup>2</sup>, 张文明<sup>2</sup>

1. 西北工业大学, 航天学院, 西安, 710072

2. 上海交通大学, 机械与动力工程学院, 上海, 200240

**摘要:** 基于仿生干黏附功能表面材料的空间对接捕获是空间目标捕获的新方案, 空间微重力环境下末端附有干黏附材料的空间目标捕获机构在执行任务时, 极易因表面黏附力不足以抵抗碰

撞载荷而发生反弹，甚至会造成主体飞行器失控，因此亟需研究动态载荷下仿生黏附材料力学行为表征与黏附接触动力学问题。本报告主要介绍黏附材料多尺度接触动力学建模方法，分析初始接触速度、材料性能等对表面黏附特性的影响，通过接触动力学测试验证模型准确性，并揭示了黏附率相关效应及材料粘弹性变形对系统接触动力学特性的影响规律。此外，考虑了基底粗糙度诱导的黏附迟滞与率相关黏附非线性的综合表征方法，分析了表面粗糙度、加载速率、及粘弹性材料常数对黏附强度和韧度的影响。

**报告人：**李东武，西北工业大学航天学院副教授，主要从事空间黏附捕获系统接触动力学；仿生干黏附材料结构设计、力学分析与应用开发；以及连接结构动力学、接触力学等方面的研究工作。主持国家自然科学基金青年项目、博士后科学基金、以及航天院所科研项目等；参与国家自然科学基金重点项目、国防核科学挑战计划、基础加强等重大项目。在 JMPS、MSSP、IJMS、TI 等国内外重要学术期刊发表论文 20 余篇，被引 200 余次。曾获陕西高等学校科学技术二等奖、上海市“超级博士后”激励计划、上海交通大学“砺远博士后”激励计划等荣誉。

## 基于失效分析的螺栓连接设计

刘建华<sup>1#</sup>，朱旻昊<sup>2\*</sup>

1. 西南交通大学，材料科学与工程学院

2. 西南交通大学，机械工程学院

**摘要：**紧固件作为机械设备重要的连接部件，其性能退化制约了机械装备向高安全、高可靠、长寿命方向发展。本报告介绍从失效分析的角度对紧固连接系统开展逆向设计，分析螺纹表面的磨损机制、连接结构的失效行为及防护方法；介绍高精度、高效率的螺纹连接建模软件，并以扭转载荷下螺栓连接结构的松动行为为例，分析界面摩擦系数和微动磨损对连接结构松动行为的影响规律；基于紧固连接系统全生命周期，从结构设计、界面控制、装配质量控制等提出相应的解决方案。

**报告人：**刘建华，副教授，西南交通大学材料服役安全工程系主任。主要从事航空航天、风电核电、武器装备等领域关键紧固连接失效机理及防护方法的相关研究工作，研发了广普适、高精度、高效率的螺纹连接建模软件；设计了基于 VDI2230 的螺栓连接设计可视化软件。目前以第一作者或通讯作者在 International Journal of Fatigue, Tribology International, Wear, Engineering Failure Analysis 等期刊发表学术论文 40 余篇，授权国家发明专利 10 余项，软件著作权 9 项。主持国家自然科学基金项目、国家重点研发计划项目课题、四川省科技厅重点研发计划项目和校企合作项目近 20 项。









[内部资料注意保存]

主办单位：中国振动工程学会模态分析与试验专业委员会  
承办单位：西北工业大学 西北工业大学太仓长三角研究院  
协办单位：中国核学会核工程力学分会  
苏州市航空航天学会  
陕西中科启航科技有限公司  
西安市结构智能感知国际联合研究中心  
智能运维与健康管理的苏州市外籍院士工作站  
支持单位：苏州瑞弗曼智能科技有限公司  
江苏东华测试技术股份有限公司  
杭州锐达数字技术有限公司

