

# 航空航天结构力学及控制

## 全国重点实验室研究方向及优先研究课题指南

航空航天装备关系到国家安全与国民经济发展，正是国外长期封锁的“卡脖子”技术领域，因此发展先进航空航天飞行器对国家具有重大战略意义。结构是机体和气动的关键载体，没有先进结构，就难有高性能航空航天飞行器。

本实验室定位于航空航天飞行器结构力学及控制基础理论与前沿技术研究，重点解决先进飞行器研制与发展所急需攻克的四大方向重大共性科技问题，包括：轻质结构高可靠性设计技术、结构动力学设计与控制技术、热结构与热环境调控技术、材料结构设计精确制造一体化调控技术以及相关交叉前沿问题。

### 1. 轻质结构耐久性和可靠性设计方向

面向各类先进飞行器及新一代飞行器结构的先进性、耐久性和可靠性发展需求，本研究方向将重点发展宏-微-纳轻质结构强度与破坏机制的多尺度理论，高可靠性、轻质智能结构设计方法，轻质结构耐久性和可靠性的智能评价及预测方法，建立飞行器全寿命安全评价及预测体系，发展力学与物理、化学、信息、人工智能等学科交叉的前沿研究理论与方法，以满足各类先进飞行器结构轻量化及可靠性提升重大需求。优先研究课题包括：

#### 1.1 轻质结构的力学行为及其强度理论

研究轻质材料结构的力学特性、破坏行为、宏-细-微观本构关系、

失效模式与强度理论、损伤微观机理及其演化、破坏准则等，探索轻质材料结构的失效机理，发展多尺度失效理论，建立强度失效准则。

## **1.2 功能材料结构的力学行为**

发展研究各类功能材料力学行为和功能性的计算方法及标准加载环境下的材料试验技术，包括微纳米材料、压电材料及其他功能材料；开展功能材料和器件在力、电、磁等外场作用下力学行为与功能调控的理论预测，以及材料结构力-电-磁耦合行为的实验研究；研究先进功能材料结构在高温、极寒、原子氧腐蚀等极端环境下的力学行为和功能性；研究固-液界面体系的物理力学行为及其在能量收集、传感、温控、防除冰等方面的应用，研究水伏智能器件系统等。

## **1.3 轻质结构耐久性设计理论与评价方法**

研究典型轻质结构在服役环境下的安全性与耐久性，建立基于大数据和机器学习的短时实验/模拟数据与长效服役性能之间的映射关系，实现对轻质结构耐久性的精准预测与高效设计；发展航空航天器关键结构在全寿命周期内的复杂载荷辨识方法，研究三维疲劳断裂统一理论，融合耐久性与损伤容限设计。

## **1.4 轻质多功能智能结构设计理论及评价方法**

面向轻质多功能智能结构设计，研究智能结构传感器、驱动器功能材料与器件、表征及性能测试及水伏智能系统的制备，智能结构健康监测与预测方法，变体及自适应智能结构设计方法，振动噪声主动控制智能结构，典型航空航天轻质多功能智能结构的功能验证方法等。

## 1.5 飞行器全寿命周期安全保障设计

研究面向工程应用的新型微纳器件原理、制备及测试评价方法，建立全寿命周期关键结构状态及损伤的在线智能监测方法及基于数据驱动的定量化评估机制；发展结构数字化设计方法，建立新型航空航天材料失效及损伤扩展数据库和数字融通方法。

## 2. 轻质结构动力学设计与控制

针对柔性轻质结构动力学设计及控制难题，面向新一代飞行器、新一代超大型空间结构的需求，开展极端条件下先进飞行器系统和超大型空间结构设计与运行服役阶段的动力学建模、分析、计算、实验等方法研究，发展非线性系统动力学和闭环系统控制基本理论，突破高精度、高效率、高可靠、轻量化、智能化的精密驱动关键技术，满足国家重大工程对轻质结构动力学设计的迫切需求。优先研究课题包括：

### 2.1 极端条件下结构动力学与控制

开展极端条件下先进飞行器系统和结构的动力学与控制研究，发展极端服役环境下高精度多物理场耦合动力学建模分析、响应预测与智能控制方法；发展飞行器非线性气动伺服弹性力学、复杂结构的动力学反问题求解和参数识别方法、复杂系统耦合下飞行器起降动力学与控制、高可靠运动机构设计等关键技术。

### 2.2 轻质柔性结构动力学设计与分析

面向未来发展柔性空间装备和设施的战略需求，针对超大型复杂

空间结构展开、组装和释放等过程的强非线性、高维度、变拓扑特点，开展超大型空间结构搭建过程与运行服役阶段的动力学建模、航天器集群编队飞行动力学与控制、空间绳系系统动力学与控制等方面的理论与实验研究；研究刚柔结合体系的力学控制及相关前沿科学问题等。

### **2.3 面向复杂结构的精密驱动与控制**

围绕航空航天装备对高性能、轻量化精密驱动技术的迫切需求，针对航空航天领域面临的特殊应用环境和高动态工况等实际问题，开展高精度、高效率、高可靠、轻量化、智能化的功能材料与精密驱动关键技术研究；以压电驱动为主要手段，进行功能-结构融合设计，实现空天轻质结构作动及动态调控，形成材料-结构-器件-系统的轻量、高效一体化设计方法。

### **2.4 非线性系统动力学与控制**

面向航空航天等领域的动力学和控制的基本理论问题，开展高维非线性系统的全局分岔和混沌动力学、时滞系统和分数阶系统动力学、微纳系统动力学、非线性随机动力学以及超材料波动力学等领域新理论、新方法、新应用的研究，为解决航空航天结构动力学与控制领域的卡点问题提供理论指导。

### **2.5 闭环系统模型辨识、分析与控制**

面向航空航天装备高精度快响应控制需求，针对复杂结构控制的强耦合、多振动模态、多源不确定性等难点，开展先进结构和系统的振动控制问题研究，发展基于现代智能技术的结构系统振动和运动控

制理论和方法；开展健康、退化、故障等多种工况下的控制系统不确定性分析，闭环模型辨识以及自适应控制新方法研究，解决结构与环境突变下的稳定控制难题。

### **3. 航空航天热结构与热环境**

面向未来军、民用航空发动机和先进空天动力、可重复使用飞行器等发展的迫切需要，本方向重点突破极端条件下结构流场的组织、调控与实验测试技术，超高温、强瞬变载荷环境下热结构设计及评定方法，发动机先进热管理及绿色航空动力技术，航空航天发动机燃烧组织技术及航空航天热结构与热环境的感知、监测与控制技术，掌握航空航天典型热结构的气动-热力-结构一体化设计等关键技术，发展多功能新型航空航天结构前沿技术等。优先研究课题包括：

#### **3.1 极端条件下结构流场的组织、调控与实验测试技术**

面向未来先进发动机、高超声速飞行器、宽速域组合循环发动机、空天往返飞行器等的迫切需求，开展高效、低阻的流场组织与调控方法，以及复杂流场的先进测量技术研究，为航空航天典型热结构提供“友好”的工作环境和条件，最终实现航空航天典型热结构的气动-热力-结构一体化设计。

#### **3.2 超高温、强瞬变载荷环境下热结构设计及评定**

面向高温合金、陶瓷基复合材料、碳/碳复合材料等高热结构，研究超高温、强瞬变等极端环境高温材料结构的变形与失效行为、热结构设计与评定技术，建立高热结构强度与寿命试验评定方法、跨时

间尺度的力-固-热耦合分析方法以及动力学响应分析和振动控制方法，掌握高温、高压、高转速、大畸变、强瞬变情况下高可靠性和长寿命轻质热结构设计技术。

### **3.3 发动机先进热管理及绿色航空动力技术**

针对航空航天典型热结构所处的力-热-声-振多场耦合使用环境，构建分布式热沉梯级利用与高效热管理理论和方法，发展复合材料编织、热障涂层的气膜/发汗/微小通道等先进冷却结构与技术，形成高效的主、被动热防护方法；探索节能减排背景下绿色航空动力的技术发展路径，掌握关键技术及其解决方法。

### **3.4 航空航天发动机燃烧组织技术**

面向未来先进发动机、宽速域组合循环发动机等，发展复杂模态下的热声耦合燃烧组织方式及其高温环境下的动态热结构多场耦合机制，形成气/液/固耦合的先进燃烧环境的气动-热力-结构一体化设计方法。

### **3.5 航空航天热结构与热环境的感知、监测与控制技术**

针对航空航天典型热结构所处的力-热-声-振多场耦合使用环境，研制基于具有传感、驱动、高效能量转换、主动变形等智能特性的功能材料及器件，掌握飞行器及其发动机内外复杂气热环境下的特种测试和多物理场智能感知及监测诊断方法；解决多场/多介质/多尺度的飞行器和发动机高温热结构智能调控与智能容错问题。

## **4. 材料结构一体化精确制造及调控方向**

针对材料结构一体化精确制造及调控难题，面向先进飞行器结构形性协调高精度制造及制造-服役一体化性能调控需求，研究材料-结构一体化、数字化精确制造方法，复杂结构数字化设计-成形工艺-制造质量一体化模型建立方法，制造过程智能检测、监测技术和形性调控一体化技术，制造-服役一体化智能监测及评价、基于数字孪生技术的制造-服役性能调控方法，研制大型轻质结构数字化精确制造装备，实现新一代航空航天装备数字化精确制造一体化调控。优先研究课题包括：

### **4.1 先进复合材料三维织造数字化成形方法**

研究大型复杂复合材料构件数字化成形方法，建立服役性能约束下结构微观材料、细观胞元和宏观性能一体化设计与优化模型，探索材料特征、结构方式、工艺种类等与整体性能、功能的内禀关系，研究多工艺复合精确制造方法，建立多材料、多工艺耦合作用下结构成形效率与制造质量映射模型，实现先进复合材料三维织造数字化成形。

### **4.2 纤维复合材料增材制造成形技术**

研究大型复杂复合材料构件设计制造一体化增材制造技术，探明复合材料多物理场下纤维形态演变规律及影响、复合材料丝束的微观结构控制及成形工艺、多物理场耦合作用下增材制造成形机理及工艺、复合材料构件多尺度设计方法及增材制造智能成形装备等内容，解决层间强度差、成形精度低等“卡脖子”问题，实现复杂结构复材构件的

智能化高精高效一体化成形。

### **4.3 制造质量评价方法与工艺智能调控技术**

研究大型复杂复合材料构件多参量跨尺度特征精确检测与质量评价方法，探明工艺参数与质量特性的非线性时变映射机制，建立复材构件制造过程数据与先验知识融合的产品质量预测模型，研究基于误差源分析的质量传播模型与工艺动态重构方法，研发面向柔性制造全过程的孪生系统，实现数据驱动的复材构件成形质量主动精准控制与形性调控一体化技术。

### **4.4 制造-服役一体化智能监测及评价**

探索面向制造-服役一体化智能监测的功能材料、微小型、柔性可变形、多参量监测器件新效应和新机理，研究基于微加工、喷印、转印、打印等新方法的智能监测网络构建方法，探索制造过程参数及残余应力、制造变形、初始缺陷等制造质量的智能在线监测及定量评估方法，研究制造后服役阶段初始质量或缺陷的演化过程跟踪监测评估方法，发展全寿命周期关键结构状态及损伤的在线智能监测方法，建立基于数据驱动的结构定量化评估机制。

### **4.5 基于数字孪生技术的制造-服役性能调控方法**

研究先进结构制造-服役中的跨尺度性能状态虚拟仿真方法，面向制造-服役数字孪生系统的建立，研究数据积累机制及数字孪生数据库建立方法，建立物理实体-数字孪生体交互演化机制，研究制造-服役结构性能调控数字孪生集成平台建立及验证方法，实现制造-服



役一体化性能调控。

航空航天结构力学及控制全国重点实验室

2023 版