

新型航天器中的力学

哈尔滨工业大学基础学科拔尖人才培养

国际暑期学校实施方案

一、项目简介

项目主题为“新型航天器中的力学”，致力于展示力学在航天器设计、研发与应用过程中的重要支撑作用。在这里，学员不仅可以学到飞行器结构总体设计、动力学与控制、飞行服役所需高性能材料、结构健康监测技术，更可组队在实践环节参与航天器设计研发，亲身体验航天科研魅力，深入理解力学作为工程科学在航天高技术发展中的基础性地位和重大作用。

项目邀请到世界著名研究机构的高水平专家学者及其团队作为教师、讲座嘉宾和实践导师，包括俄罗斯莫斯科大学、萨马拉大学力学和飞行器领域著名专家；中国科学院、哈尔滨工业大学等国内著名院校数学、力学、材料学等航天密切相关领域院士、长江学者、杰青等高水平专家。暑期学校充分发挥俄方基础理论研究优势，中方力学、航天、多学科交叉特色显著，实现强强联合，为学员提供强大的师资和实践资源。

学员在本项目中，不仅可以提高对新型航天器中力学各分支重要作用的认识，领略航天科技中的力学之美；更能与

国际学生荟聚一堂，相互交流学习心得和创新灵感，携手参与航天科研，增进学术友谊，构建起青年学子国际学术共同体。

新型航天器中的力学



二、课程安排

1. 教学内容

“新型航天器中的力学”暑期学校共设置三门 8 学时课程（C1-C3）、12 次前沿讲座（L1-L12），并配备 16 学时以上的课题研究。共计 2 学分。课程均由俄罗斯专家讲授，前沿讲座和课题研究分别由中外专家共同讲授和联合指导。

（1）课程

主讲人	职称 /荣誉称号	单位	题目	学时 编号
В.М.Морозов	教授	莫斯科大学 数学力学系	时变系统稳定性	8 C1
А.В.Самсонов	教授	莫斯科大学 数学力学系	多体系统动力学 与运动稳定性	8 C2
А.П.Алексеев	教授	萨马拉大学 航天学院	飞行器结构设计	8 C3

(2) 前沿讲座

主讲人	职称 /荣誉称号	单位	题目	学时 编号
B.M.Морозов	教授	莫斯科大学 数学力学系	几种周期时变系统的 运动稳定性分析	2 L1
A.B.Самсонов	教授	莫斯科大学 数学力学系	轨道航天器刚柔耦合 系统运动稳定性分析 方法研究	2 L2
A.П.Алексеев	教授	萨马拉大学 航天学院	多场耦合航天器轨道 稳定性分析	2 L3
黄争鸣	教授 长江学者	同济大学	先进复合材料与结构 强度	4 L4,L5
冷劲松	教授 中科院院士	哈尔滨工业大学	智能材料与结构的设 计及其应用	4 L6,L7
崔俊芝	教授 中科院院士	中国科学院	先进计算方法与工程 应用	2 L8
姚小虎	教授 国家杰青	华南理工大学	复合材料冲击破坏力 学	4 L9,L10
卿新林	教授 国家海外高 层次人才计 划入选者	厦门大学	结构健康监测及应用	4 L11,L12

2. 时间安排

7.31		第 1 周 (2022.8.1—8.7)						第 2 周(2022.8.8—8.14)					
		一	二	三	四	五	六	一	二	三	四	五	六
报 到	1-2	L1	L2	C2		研究	参 观	C3		L5	L12	答	展 示
	3-4	L8	L6			研究				L10	研 究	辩	
	5-6	C1		L4	L3	研究		L7	L9	研 究	准 备	改 进	
	7-8			L11	交 流	研究		研究	研究	交 流	答 辩		

3. 课题研究

项目中非常重要的一环是结合围绕主题所设置的课程

和讲座，开展中外学生联合课题研究。项目组预先提供若干航天器基本数据集、结构数字模型和分析计算工具，学员应用所学知识在开放性课题框架中自行选择研究方向，开展创新性研究。

(1)课题名称：复合材料空天飞行器结构与安全评价系统方案设计

(2)题目来源：未来空天飞行器作为先进技术平台，要求其具有轻质量、高强度、功能/结构一体化、可多次往返重复使用等特点，其结构与安全评价系统设计是飞行器功能保障的关键。

复合材料（例如碳纤维增强复合材料）在单位质量条件下往往具有更高的刚度（抗变形）和更高的强度（抗破坏）。同时，由于复合材料具有可设计性，可以根据实际需要进行性能和功能设计（包括刚度、强度、耐高温性能、抗冲击性能、抗疲劳性能、智能调控性能等）。因此，复合材料空天飞行器结构及其安全评价系统的研究具有重大应用背景。复合材料空天飞行器结构与安全评价系统设计需要结合结构刚度、强度和服役环境（例如与大气摩擦生热、振动、空间物体冲击等）等方面的要求进行综合考虑，既要提前对结构的基本刚度、破坏强度、振动特性和基本功能进行预设计，同时也要对飞行器在服役过程中由于受振动、高温、太空垃圾冲击等载荷环境作用产生的力学响应及时进行监测并反馈至地面，并基于反馈信息结合动力学、固体力学、计算力

学、健康监测等方面技术、对复合材料飞行器结构进行多维度的评估并及时进行处置，才能保障其功能和安全。

根据飞行器主要涉及的不同学科领域，设置 4 个方面研究课题：

[1]飞行器结构总体设计；

[2]结构动力学与控制；

[3]强度与寿命计算；

[4]飞行器结构健康监测。

(3)分组方案：根据报名情况，预期组队不少于 6 队。学员每 7-10 人编成一队，队内应包括力学多个二级学科领域有专长的同学（如流体力学、固体力学、动力学与控制、计算力学等）。在研究课题上采取自由选题模式。每队配备与所选方向相关的 3 位指导教师，一位为国际高水平专家，一位为哈工大校内高水平研究团队成员，联合作技术方向指导；一位为哈工大青年指导教师，负责细节指导。

(4)研究方式：每组队员可以参考国内外公开报道的先进空天飞行器（例如美国的 X37B 飞行器）结构或自行提出复合材料空天飞行器结构模型，选择 4 个方面研究课题中的 1 个或几个，利用理论和数值模拟手段开展复合材料空天飞行器结构及安全评价系统设计。各组成员根据已有认知和资料查询尽可能深入地从若干方面研究结构应如何设计才能在多种载荷环境下的动力学与控制、结构强度、材料配置和健康监测系统设计等方面满足功能需求。各组成员要尽可能利

用所掌握的知识进行方案设计工作，对于成员现有能力不能直接开展理论求解或数值计算的工作，要想办法从逻辑框架上给出尽可能细致科学的设计路线。整体设计方案要尽可能体现创新性、可行性、系统性、前瞻性。

(5)指导教师情况介绍：校内指导教师主要来自航天学院力学学科的三个二级学科固体力学、工程力学、动力学与控制；航空宇航科学与技术学科提供必要的支持。校内青年指导教师由相关学科高水平研究团队中的青年专家组成，具有很强的手把手指导能力。校外指导教师包括聘请的国内外专家。

4.其他

(1)竞赛

根据各组的设计和计算结果，制作 PPT，进行 20 分钟 ppt 讲解演示，校内外评委专家不少于 9 人。评审后分出等级，最优秀的 1-2 队，根据专家反馈进行改进在学校内进行展示。

(2)学生活动

暑校期间组织 2 次学生冷餐会交流活动。另外，用周末或课余在哈尔滨工业大学校内组织参观航天馆、校史馆、校内游览等活动；市内组织太阳岛游览。

三、课程与讲座及补充信息

(一) 课程与讲座详细信息

俄方专家课程与前沿讲座（一体化）

1.课程名称：时变系统稳定性

讲座名称：几种周期时变系统的运动稳定性分析

简介：时变系统是指系统中一或一个以上的参数值随时间而变化，从而整个特性也随时间而变化的系统。线性时变系统即同时满足线性系统和时变系统特征的系统，它满足系统叠加性与均匀性的特点，线性定常系统稳定的充要条件是其系统矩阵 A 的特征值全部位于左半平面。对于时变系统而言，由于状态转移矩阵 $\phi(t, t_0)$ 的特性一般不能由系统矩阵 $A(t)$ 的特征值来表征，确定时变系统的稳定性是十分困难的。本课程对时变周期系统进行了探索性研究，在保持其稳定性不变的条件下，可将其变换成具有定常系统矩阵的系统。

主讲人：B.M.M o p o з o B 教授，莫斯科大学数学力学系应用力学与控制教研室，动力学系统控制与估计理论学科带头人，研究领域为多体系统动力学与运动稳定性；动力系统导航与控制。

2.课程名称：多体系统动力学与运动稳定性

讲座名称：轨道航天器刚柔耦合系统运动稳定性分析方法研究

简介：多体系统动力学是研究多体系统运动规律的科学。多体系统动力学包括多刚体系统动力学和多柔体系统动力学。运动稳定性是指物体或系统在外干扰的作用下偏离其运动后返回该运动的性质。对任何运动，外干扰都是经常存在的，因此可以说，物体或系统的某一运动的稳定性就是它

的存在性，只有稳定的运动才能存在。在工程技术上，要使设计对象的某些运动能够实现，那些运动必须是稳定的。本课程针对几种典型多体系统进行动力学建模和运动稳定性分析。

主讲人：А.В.С а м с о н о в教授，莫斯科大学数学力学系理论力学教研室。俄罗斯联邦教育和科学部理论与应用力学全国委员会和理论力学科学与方法委员会成员，莫斯科国立大学力学院学术委员会成员，莫斯科大学学位委员会成员。研究方向：运动稳定性；时变系统动力学与控制。

3.课程名称：航天器动力学

讲座名称：多场耦合航天器轨道稳定性分析

简介：本课程运用工程力学的基本理论和方法，建立航天器典型动力学问题的一般理论模型和工程实用简化模型。考虑充液柔性非线性系统在复杂空间环境下的动力学建模与运动分析。

主讲人：А.П.А л е к с е е в教授，萨马拉大学国立航空航天大学航天学院副院长。主要研究方向包括重力场中航天器飞行动力学、多场耦合作用下航天器轨道动力学与运动控制。

中方专家前沿讲座

1.讲座名称：先进复合材料及结构的强度与安全评价

简介：主要介绍纤维增强复合材料与结构强度理论思想及强度评价方法，为学生了解先进复合材料结构的安全设计

与评价方法提供较系统地讲解。

主讲人：黄争鸣，教授，同济大学航空航天与力学学院。
《Journal of Composite Materials》《Composites, Part A: Applied Science & Manufacturing》《Composites Science and Technology》等国际知名杂志的评审。研究方向包括：复合材料力学、计算结构力学、流与结构的相互作用、生物材料与纳米纤维材料中的力学问题。

2.讲座名称：智能材料与结构的设计及其应用

简介：主要介绍智能材料与结构的研究背景、现状和前沿成果，结合重大应用需求讲解智能材料与结构的典型制备过程、设计方法及其应用，引导学生初步了解和掌握智能材料与结构的创新成果和创新思想。

主讲人：冷劲松，教授，哈尔滨工业大学航天学院，中国科学院院士。国际复合材料委员会副主席，中国复合材料学会副理事长，中国航空学会副理事长，中国力学学会物理专业委员会副主任，《哈尔滨工业大学学报》主编，《复合材料学报》副主编，《International Journal of Smart and Nano Materials》主编，《Journal of Intelligent Material Systems and Structures》副主编。

3.讲座名称：先进计算方法与工程应用

简介：以先进结构的设计与安全评价为背景，介绍先进结构中的典型计算力学与仿真问题，使学生了解计算力学与仿真的典型方法与应用实例，并能够初步具备利用计算力学

思想开展工程应用的思维和能力。

主讲人：崔俊芝，计算数学、计算力学与软件工程专家，中国科学院数学与系统科学研究院研究员，中国工程院院士。国际计算力学会会员，中国计算力学会副理事长，理事，*Acta Mech*、力学学报等刊物常务编委会编委，数值计算与计算及应用、计算数学、JCM 等刊物编委，副主编，计算力学、计算及应用与软件等刊物编委。

4.讲座名称：复合材料冲击破坏力学

简介：介绍先进复合材料及其结构的冲击破坏力学研究，使学生了解复合材料结构受冲击破坏的现象、机理和分析方法，使学生初步了解先进材料与结构的冲击分析方法和研究思想。

主讲人：姚小虎，教授，华南理工大学土木与交通学院，国家杰出青年科学基金获得者。研究方向：微纳米与复合材料力学、冲击动力学、航空航天结构动力学。

5.讲座名称：结构健康监测技术及应用

简介：介绍先进结构在各种载荷环境下的结构健康监测原理、方法及典型技术，使学生初步了解健康监测的思想、技术成果及应用情况，初步具备根据实际需要选择健康监测方法的能力。

主讲人：卿新林，教授，厦门大学航空航天学院副院长，国家海外高层次人才计划入选者。教育部高等学校仪器类专业教学指导委员会委员，*Structural Health Monitoring* 国际期

刊副主编，中国复合材料学会通讯理事。

（二）补充信息

莫斯科大学、哈尔滨工业大学力学学科简介

（i）莫斯科国立罗蒙诺索夫大学（莫斯科国立大学，简称莫斯科大学或莫大）成立于1755年1月25日，是俄罗斯最大的教学、科研、文化中心。大学成立至今已有280多年的历史，根据QS2021世界大学排行榜的排名，莫斯科国立大学2020年世界排名74位。莫斯科国立大学是俄罗斯联邦规模最大、历史最悠久的综合性高等院校，全俄学术中心，同时是欧洲顶尖、世界著名的高等学府之一，国际公立大学论坛成员。截止2018年12月，莫斯科大学共有13人获得诺贝尔奖（9名毕业生和4名教授），6名毕业生获得菲尔兹奖。莫斯科大学力学数学系是莫斯科大学实力雄厚的一个科系，拥有雄厚的师资力量和研究基础，该系目前有教师350人左右，其中包括俄罗斯科学院院士28人。力学部共有13个教研室，涵盖了现代力学学科的几乎所有研究方向。其培养体系、课程设置、专业教材、实践竞赛方面均展示了扎实的数理力学理论研究基础。

（ii）哈尔滨工业大学力学学科为国家“双一流”建设学科和国家重点一级学科，2012年全国第三轮学科评估（力学）全国位列第一（与清华北大并列），2017年全国第四轮学科评估（力学）位列A类。力学学科将细观力学理论推广到复合材料领域，发展了复合材料细观力学。提出航天航空

结构的轻量化、热防护、功能化与智能化等新需求新方向，形成了结构/功能/智能材料多场耦合理论和超轻多功能结构设计等学科交叉的热点与前沿方向，取得多项国际上有影响力的研究成果。学科以国家重大需求为牵引，不断强化基础和应用研究，极端环境材料与结构的力学行为和新型复合材料与结构轻量化两个学科方向进入世界一流前列。2021年学科力学拔尖学生培养基地入选国家基础学科拔尖学生培养计划 2.0 基地，工程力学专业纳入强基计划。