

0801 力学一级学科研究生核心课程指南

力学核心课程编写组名单:

胡海岩(北京理工大学)

杨卫(浙江大学)

郑泉水(清华大学)

亢一澜(天津大学)

王铁军(西安交通大学)

吴林志(哈尔滨工程大学)

王清远(四川大学)

郭旭(大连理工大学)

李玉龙(西北工业大学)

孙茂(北京航空航天大学)

余振苏(北京大学)

洪友士(中国科学院大学)

唐国金(国防科技大学)

冯西桥(清华大学)

力学学科评议组所制定的力学一级学科研究生核心课程共有 10 门。其中,连续介质力学、高等动力学、计算力学、实验力学 4 门课程属于核心基础课,其余 6 门课程属于核心专业课。

对于力学一级学科硕士授权单位,至少应开设上述 4 门核心基础课程中的 2 门课程;并根据所设立的研究方向,开设 2 门以上的核心专业课程。对于力学一级学科博士授权单位,至少应开设上述 4 门核心基础课程中的 3 门课程;并根据所设立的研究方向,开设 3 门以上的核心专业课程。

01 连续介质力学

一、课程概述

本课程介绍连续介质力学的主要研究方法,研究连续介质在外部作用下的变形和运动规律。

本课程在弹性力学或流体力学的基础上,从一个相对统一、更加理性的角度,深入理解连续介质力学的严密理论体系、科学研究方法(如处理多场耦合等方法)及其可扩展性,使研

究生掌握连续介质力学的基本理论和分析方法,认识连续介质在外部作用下的变形和运动的基本规律和机制,为其今后从事力学和工程科学其他领域的研究奠定坚实的学术基础。

本课程的授课时间和课堂讨论时间不少于 60 学时。

二、先修课程

弹性力学或流体力学,微积分,线性代数,常微分方程。

三、课程目标

掌握研究连续介质力学的基本数学工具;掌握连续介质力学的主要研究方法;掌握连续介质运动和变形的规律,对相关问题能够建立力学模型;掌握描述材料的宏观本构关系,并进行相关的定量分析。通过本课程的学习,为从事基于连续介质模型的固体力学的各分支学科(如弹塑性力学、损伤力学、黏弹性理论等)和流体力学各分支学科(如非牛顿流体、多相流体、生物流变理论等)的研究打下基础。

四、适用对象

力学一级学科的博士研究生,固体力学和流体力学二级学科的硕士研究生。

五、授课方式

1. 课堂教学

教师讲授 80% 左右的内容,安排研究生进行 20% 左右内容的自学并开展课堂研讨。讲授基本理论和分析方法时,以板书推导和讲解为主;讲授课程的背景、发展历史和工程案例时,以视频和图片展示为主。

2. 课外训练

通过对研究生布置大作业,培养其抓住问题本质和独立思考的能力,实现研究性学习。针对基础研究或者工程中的实际问题,对研究生展开训练,激发其学习兴趣与探索精神。

六、课程内容

1. 主要内容

(1) 绪论:连续介质力学的发展简史、基本假设、主要内容和方法。

(2) 张量分析基础:矢量、二阶张量及其运算(包括指标记法与求和约定、商法则、张量的特征矢量与特征值、对称和反对称张量、张量的正交分解和极分解),常用的积分定理,张量微积分,张量函数(包括张量函数表示、张量函数导数)。

(3) 连续介质的运动和变形:构形和运动;拉格朗日描述和欧拉描述;变形梯度张量及其极分解;应变的度量、伸长和旋转;速度梯度、伸长率和旋率;环量和涡度;连续方程。

(4) 应力与应变:Cauchy 应力张量;Piola-Kirchhoff 应力张量;平衡方程;应力的坐标变换;正交曲线坐标系中的应力分量;应力边界条件;平面应力状态;主应力;剪应力;应力偏斜张量;客观性;应力的客观导数。

(5) 守恒定律和场方程:质量守恒律、动量平衡律、动量矩平衡律、应力理论、运动方程等,

以及它们的局部化形式(场方程)。

(6) 连续介质热力学:热力学基本定律及其在连续体中的应用;热力学平衡;可逆过程和不可逆过程;不可逆连续介质热力学;内变量理论;热弹性材料。

(7) 本构方程基本理论:本构方程理论的基本原理和假定;本构方程的例子;具有内部约束材料的本构关系;材料对称性原理对本构方程形式的限制(包括各向同性的概念、各向同性张量、各向同性材料和各向同性张量函数);客观性。

(8) 弹塑性:塑性变形;残余应变;屈服准则;后继屈服准则;应力空间和应变空间中的塑性本构关系、Drucker 公设;弹塑性本构关系。

(9) 黏弹性:简单黏弹性模型;典型黏弹性响应;经典线性黏弹性理论;非线性黏弹性理论;动态力学性能。

(10) 流体力学:流体静力学;理想流体定常运动的一般理论;伯努利积分;理想流体的势流、调和函数的性质;Poiseuille 流动;Couette 流动;欧拉方程、斯托克斯方程;圆柱绕流和圆球绕流;刚体在不可压缩理想流体中运动的相关运动学问题。

(11) 专题课程及其讨论:如超弹性本构关系;接触力学;弹塑性有限变形理论;连续介质断裂理论。

2. 课程重点

二阶张量的相关运算(坐标变换、特征矢量、特征值、微积分);常用的积分定理;变形和运动的欧拉描述和拉格朗日描述;应变的度量、伸长和旋转;速度梯度、伸长率;平衡方程;坐标变换下的应力分量;质量守恒律、动量平衡律、动量矩平衡律;连续方程和平衡方程;本构方程理论的基本原理和假定;各向同性材料;各向同性张量;理想流体定常运动的一般理论;伯努利积分;欧拉方程、斯托克斯方程;热力学基本定律及其在连续体中的应用。

3. 课程难点

张量的正交分解、极分解;张量函数的表示;变形梯度张量;客观性、应力的客观导数;具有内部约束材料的本构关系;材料对称性原理对本构方程形式的限制;超弹性本构方程;黏弹性模型;理想流体的势流、调和函数;圆柱绕流和圆球绕流;热力学平衡、可逆过程和不可逆过程。

七、考核要求

1. 考核方式

平时作业、大作业、考试等各部分加权合成总成绩。

2. 考核标准

对于平时作业,要求研究生能掌握基本的知识点,熟练运用分析问题的方法;对于大作业,要求其内容和难度可体现对研究生数值计算和分析能力的考核,具有一定的创新性,并最好结合一些实际问题;对于考试,要求内容和难度涵盖本课程的重点内容。

八、编写成员名单

郑泉水(清华大学)、冯西桥(清华大学)、陈常青(清华大学)、赵亚溥(中国科学院大学)、吕存景(清华大学)

02 高等动力学

一、课程概述

本课程介绍经典动力学的主要原理和方法,使研究生在已有的力学基本理论和方法基础上,能进一步深入学习动力学理论,掌握更丰富的动力学研究方法。

本课程将引导研究生掌握分析力学、刚体动力学、运动稳定性、多体系统动力学等方面的基本理论和方法,为研究和解决工程中的动力学问题提供必要的理论和方法。

本课程的授课时间和课堂讨论时间不少于 60 学时。

二、先修课程

理论力学,线性代数,常微分方程。

三、课程目标

了解现代动力学体系,掌握高等动力学的基本理论、建模和分析方法,能对空间一般运动、非完整约束、运动稳定性等问题开展定性和定量分析,能够阅读基于动力学理论框架研究的学术文献,能对机械系统进行动力学建模和分析。

四、适用对象

力学一级学科的硕士研究生和博士研究生。

五、授课方式

1. 课堂教学

可以采用灵活的教学方法,建议教师讲授 70% 左右的内容,安排研究生自学 30% 左右的内容,并可灵活选择案例开展课堂研讨。讲授采用多媒体和板书相结合方式,并可辅以演示教具;理论和概念讲解时,通过对比、反例加强剖析;案例应用讲解时,采用系列问题导向。研讨以研究生为主体,可以采用讲授和研讨等不同形式,教师应注意事前案例引导、事中现场主持和事后点评剖析。

2. 课外训练

安排研究生完成 30~40 道巩固基本概念、掌握主要方法的习题;安排研究生完成 1 个具有理论或应用背景的综合性大作业。

六、课程内容

1. 主要内容

(1) 绪论:动力学问题,动力学的发展历史和分支,动力学的思维方法,高等动力学的课程定位。

(2) 分析力学基础:约束、虚位移原理,动力学普遍方程,拉格朗日方程,循环积分和广义能量积分,拉格朗日方程的应用案例。

(3) 非完整系统动力学:非完整系统的特征,基于变分法求解非完整系统,罗斯方程,阿佩尔方程,凯恩方法,非完整系统应用案例。

(4) 哈密顿方程和哈密顿原理:勒让德变换,哈密顿方程,首次积分,辛变换,哈密顿原理,基于哈密顿原理的近似解法。

(5) 刚体动力学:刚体定点转动的运动学方程和动力学方程,回转体的定点转动,一般刚体的定点转动,重力作用下回转体的定点运动,刚体一般运动微分方程,非惯性系中刚体一般运动微分方程,运载火箭运动建模案例。

(6) 运动稳定性基础:运动稳定性的基本概念,李雅谱诺夫直接方法,线性系统的稳定性。

(7) 多体系统动力学概述:多体系统的坐标描述,多体系统的运动学,多体系统的动力学方程,多体系统动力学解法。

(8) 专题研讨:各学位授权单位可根据学科特色灵活选择。比如,可以选择生活中或者工程中的典型非完整系统问题,如硬币滚动、自行车运动等展开分析、建模和仿真;可以选择生活中或者工程中的典型运动稳定性问题,如导弹寻的控制、转子运动等展开分析、建模和仿真。

2. 课程重点

分析力学、非完整系统动力学、刚体动力学、运动稳定性、多体系统动力学等的概念和方法,包括约束、虚位移原理,拉格朗日方程,阿佩尔方程、凯恩方法,哈密顿方程,哈密顿原理,回转体的定点转动,李雅谱诺夫直接方法,多体系统的运动学和动力学方程等。

3. 课程难点

本课程知识点多,对概念、原理的准确性把握要求高,对数学能力要求也较高。课程中一些理论较为抽象或复杂,比如约束、阿佩尔方程、凯恩方法、勒让德变换、辛变换、刚体定点转动的运动学和动力学方程、运动稳定性、多体系统动力学解法等。

七、考核要求

1. 考核方式

开卷考试、平时成绩及大作业等各部分加权合成总成绩。

2. 考核标准

开卷考试题目应涵盖课程教材各章节,主要考查研究生对概念、方法的理解和计算分析技能;平时成绩应考查研究生的学习态度和研讨表现;大作业应考查研究生对课程知识的综合应用能力。成绩比例建议考试成绩占 60%,平时成绩和大作业占 40%。

八、编写成员名单

李海阳(国防科技大学)、王天舒(清华大学)、戈新生(北京信息科技大学)、罗亚中(国防科技大学)

03 计算力学

一、课程概述

本课程讲授计算固体力学/流体力学的基础知识,包括计算固体力学/流体力学的基础理论、基本算法、离散及求解技术、计算机实现技术等,使研究生系统掌握计算固体力学/流体力学基础理论、数值算法、程序设计,了解相关前沿进展,初步具备应用、发展数值方法解决复杂固体力学/流体力学问题的能力。

各学位授权单位可根据学科特色,选择计算固体力学和计算流体力学中的相关部分进行讲授。本课程的授课时间和课堂讨论时间不少于 60 学时。

二、先修课程

连续介质力学,流体力学,线性代数,数值方法,数学物理方法,张量分析。

三、课程目标

通过对变分原理、加权余量法、弱形式、有限元法、有限差分法等知识点的教学,培养研究生了解固体力学/流体力学问题数值分析方法的构造过程和基本原理,掌握有限元方法(针对固体力学问题)和有限差分法(针对流体力学问题)的基本理论与相关分析单元、计算格式的构造方法。了解典型固体/流体问题的数值分析方法,并通过计算机编程实现具有一定复杂度问题的数值求解,对数值计算结果精度和可靠性进行分析评估。能够阅读计算固体力学/流体力学文献,自学更深入的内容。

四、适用对象

力学一级学科的博士研究生,固体力学/工程力学/流体力学二级学科的硕士研究生。

五、授课方式

1. 课堂教学

教师讲授 80% 左右的内容,安排研究生自学 20% 左右的内容并开展课堂研讨。

2. 课外训练

安排研究生完成 8~10 道巩固基本概念、掌握主要方法、引发继续思考的习题;安排研究生完成 5 道以上需要编程计算的习题;完成 1 个综合性大作业,通过计算机编程数值求解具有一定理论或者应用背景的二维或三维固体/流体力学问题。

六、课程内容

(一) 计算固体力学

1. 主要内容

(1) 基础知识:泛函的基本概念、驻值条件;固体力学变分原理(最小势能原理、最小余能原理、两类及三类变量广义变分原理等);线弹性小变形问题平衡方程弱形式、虚功原理;加权余量法的一般框架。

(2) 有限元方法基础:位移形函数概念、单元/总体刚度阵的形成、位移型有限元列式的构造(平面问题、空间问题、轴对称问题);边界条件的处理、数值积分方法(高斯点、积分阶次选择与积分精度的关系);等参单元的构造;保证收敛的措施及分片试验等。

(3) 板、壳问题有限元分析:基于 Kirchhoff 假设的协调薄板单元构造、基于离散 Kirchhoff 假设的板单元构造、考虑剪切变形的 Mindlin 中厚板单元构造;位移型薄壳单元的构造;板壳单元与实体单元组合结构分析。

(4) 热传导问题有限元方法:热传导问题的变分原理与弱形式;稳态热传导问题的有限元法列式;瞬态热传导问题的有限元法列式;热应力的计算方法。

(5) 动力学问题有限元方法:动力学问题的弱形式;质量矩阵、阻尼矩阵的形成;结构固有频率的求解算法;动力学响应的振型叠加法;动力学响应的直接积分算法,精细积分算法;大型特征值问题求解算法;结构动力学分析问题的模态组合法。

(6) 非线性固体力学问题有限元方法:小变形下弹塑性有限元分析、一致性切线刚度阵、应力返回映射算法;有限变形问题分析的 Total Lagrangian 和 Updated Lagrangian 有限元列式(参考初始构型);非线性方程组求解的 Newton-Raphson 方法、修正的 Newton-Raphson 方法、弧长法等。

(7) 结构优化设计基础:结构优化的基本概念;结构优化列式及最优性条件;灵敏度分析的基本方法;桁架结构应力、位移等约束下的尺寸、形状、拓扑优化及数值方法。

(8) 计算固体力学专题:由于计算固体力学覆盖面非常宽,各学位授权单位可根据学科特色选讲若干专题,以下专题内容可供参考:

- ① 非位移型有限元列式及构造(包括应力元、杂交元、混合元、非协调元、拟协调元等);
- ② 有限变形下弹塑性数值分析;
- ③ 自由边界问题(如相变、裂纹扩展)数值分析;
- ④ 接触、冲击问题数值分析;
- ⑤ 损伤和变形局部化数值分析;
- ⑥ 连续体结构拓扑优化;
- ⑦ 非匀质结构分析的数值均匀化方法;
- ⑧ 固体力学分岔问题的数值方法;
- ⑨ 高等有限元理论(包括收敛性分析、避免剪切/薄膜/体积自锁的方法、多场变量一致性插值模式、前/后验误差估计、外推及自适应方法等);
- ⑩ 非有限元以及有限元扩展类数值方法(如边界元法、半解析法、无网格法、扩展有限元、等几何有限元方法等);
- ⑪ 固体多尺度计算力学;
- ⑫ 流固耦合问题的数值方法。

2. 课程重点

各类问题弱形式控制方程的推导,各类有限单元的构造方法,组合结构的有限元分析方法,

非线性方程组的数值求解方法,时程积分格式的误差分析,数值计算结果精度和可靠性评估方法,提高有限单元鲁棒性的数值处理方法。

3. 课程难点

有限元的误差分析理论,基于多变量变分原理的有限单元构造,有限变形下 Total Lagrangian 和 Updated Lagrangian 列式及相应的有限元离散,本构方程积分,含有材料/几何不稳定性的固体力学问题的数值分析方法。

(二) 计算流体力学

1. 主要内容

(1) 有限差分方法基础:有限差分方法的概念及构造;差分格式的精度、相容性分析;发展型方程差分格式的稳定性及收敛性概念及分析方法;抛物、双曲、椭圆形模型方程的典型格式、边界条件处理等。

(2) 有限体积方法基础:有限体积方法的概念及构造;有限体积方法的步骤、算法及性质;发展方程的全离散及半离散有限体积格式;有限体积格式的精度及稳定性分析等。

(3) 网格生成技术概述:不同数值方法对网格的需求;结构网格和非结构网格的类型;贴体结构网格的简单生成方法、度量系数计算;流体力学方程在贴体网格中的形式、几何守恒律的概念。

(4) 可压缩流动的数值模拟方法:可压缩流动基本方程, Euler 方程的特征性质, 广义解、间断关系、熵条件的概念,激波捕捉的基本理论;一维及多维 Euler 方程的中心型和迎风型差分格式;一维及多维 Euler 方程的有限体积格式,通量分裂及黎曼求解器;TVD 格式;可压缩 Navier-Stokes 方程的求解方法;可压缩流动的边界处理、时间步长确定、时间推进方法。

(5) 不可压缩流动的数值模拟方法:不可压缩流动基本方程及其性质;求解不可压缩流动的涡量-流函数方法、SIMPLE 方法;交错网格和非交错网格(同位网格)上的数值方法,动量内插技术。

(6) 计算流体力学专题:由于计算流体力学覆盖面非常宽,各学位授权单位可根据学科特色设置若干选讲专题,以下专题内容可供参考:

① 结构网格高精度格式和高精度、高分辨率激波捕捉方法(可包括 WENO、DRP、紧致格式等);

② 非结构网格数值计算方法(有限体积法、间断伽辽金方法等);

③ 大规模并行计算技术;

④ 离散方程的加速收敛方法(多重网格技术等);

⑤ 湍流模拟(RANS、LES)的模型及数值方法;

⑥ 自由面问题的数值计算方法;

⑦ 多相流动的数值模拟方法;

⑧ 化学反应流动及燃烧的数值模拟。

2. 课程重点

差分格式的基本性质及其在数值模拟中的意义,求解流体力学方程的迎风格式和通量分裂方法,激波捕捉方法和抑制间断附近数值振荡的数值方法(TVD 格式),求解不可压缩流动的 SIMPLE 方法,时间步长确定方法,边界条件的数值处理方法。

3. 课程难点

差分格式的性质分析,模拟含间断流动的理论和方法,TVD 格式,边界条件的处理方法,不可压缩流动的压力-速度耦合问题及压力场数值振荡的抑制方法。

七、考核要求

1. 考核方式

开卷考试或独立完成大作业。

2. 考核标准

对于开卷考试,其内容和难度应保证能够考核研究生掌握本课程重点内容的程度及分析、解决问题的能力。对于大作业,其内容和难度应保证能够考核研究生已掌握所学数值计算方法的程度及相关程序的实现能力,且能够反映出研究生对数值计算结果进行分析、评价及提出进一步改进计算精度的方案的能力。

八、编写成员名单

郭旭(大连理工大学)、任玉新(清华大学)

04 实验力学

一、课程概述

本课程主要介绍力学学科实验测试方法与技术、测量理论及其发展,引导研究生在先修课程的基础上,学习力学实验知识与测试方法。本课程提供包含基础与较高层次的实验力学教学内容,通过学习和实践使研究生掌握若干实验方法和仪器操作,为从事力学研究奠定实验基础。各学位授权单位可根据学科特色对课程进行选择,本课程的授课时间不少于 60 学时。

二、先修课程

大学物理,理论力学,材料力学,流体力学,基础力学实验。

三、课程目标

通过学习了解实验力学各类测试技术体系,掌握若干重要的力学测试方法与测试理论。通过课程学习与实验实践,使研究生具备力学实验操作与数据处理的能力,能够对实验观测到的基本现象以及内在规律进行分析;具备一定的实验设计能力与自学能力,可针对力学问题进行实验方案设计,并通过阅读实验力学及相关领域的文献,学习其他的或更为深入的实验测量技术。

四、适用对象

力学一级学科博士研究生,固体力学/流体力学/工程力学等专业的硕士研究生。

五、教学方式

采用课堂教学、实验实践、专题实验三种方式。其中,课堂教学由教师讲授实验方法、技术、基本理论以及典型应用。实验实践包括演示实验与研究生动手实验两种方式。各学科授权单位可根据学科特色、研究生先修课程基础等选择性安排,部分专题实验可作为提高内容。

六、课程内容

1. 主要内容

(1) 基础知识:相似性,模型实验,误差分析,量纲分析与 π 定理,数据分析,实验建模,力学测量技术分类与应用概述。

(2) 电测与传感器:电测原理,静态与动态应变测量,仪器使用与影响因素修正;应变式传感器设计,致动器技术;材料力学参数测量实验。

(3) 固体力学光测与数字图像:光弹性法,云纹技术,全息干涉法,散斑技术,焦散线法,数字全息技术,数字图像相关(DIC)技术。

(4) 流体力学测量:压力测量,升阻力测量,温度测量,流量测量,速度测量(毕托管测速、热线测速、激光多普勒测速、粒子图像测速)。

(5) 流场显示实验:水流显示技术(氢气泡法、染色线法、激光诱导荧光),气流显示技术(烟线法、壁面油流、蒸气屏法)。

(6) 计算机辅助实验分析与数据处理:条纹图像处理基础,频域分析,小波分析,希尔伯特-黄变换,滤波与识别,数字图像处理基础,数据分析与力学参数反演分析方法。

(7) 流体力学专题实验:二维机翼压力分布测量,自由射流流速分布测量,圆柱尾流流速分布测量,湍流边界层流速分布测量,流场中涡量测量及涡的辨识等。

(8) 疲劳与断裂力学专题实验:材料疲劳的S-N曲线测量,疲劳试件表面观测与变形场测量,裂纹区域变形场测量,断裂参数测量(应力强度因子SIF、张开位移COD、J积分)。

(9) 无损检测与残余应力测量专题实验:无损检测技术与实验(超声与声发射检测、射线检测、涡流与磁检测),残余应力检测技术与实验(钻孔法、超声法、光测法、光谱法、X射线法)。

(10) 特殊条件下检测技术与专题实验:极端与复杂环境下(瞬态、高速、高温、腐蚀)材料力学性能实验,生物与仿生材料力学实验,纳米压痕力学试验,微纳米力学实验,流固耦合力学实验。

2. 课程重点

电测技术应用,固体表面变形场测量技术,流场测速与成像技术,数据处理与分析方法。

3. 课程难点

实验数据合理性分析与准确表征,误差与误差原因分析,综合性实验方案设计。

4. 实验要求

教师在实验课前制定实验指导或给出参考文献,研究生需在实验前认真预习。除了演示性

实验外,研究生应动手实验并完成实验数据处理与分析,撰写书面实验报告。

七、考核要求

1. 考核方式

理论部分闭卷考试、实验实践操作、实验与专题实验报告三者相结合。

2. 考核标准

理论部分闭卷考试内容和难度应能考核研究生对实验力学基本概念、原理、方法的掌握程度;实验实践操作的内容和难度应能考核研究生综合运用实验力学基本理论和方法,设计实验方案并具体实现的能力;实验与专题实验报告的内容和难度应能考核研究生对实验结果合理性分析、误差分析及结果表达的能力。

八、编写成员名单

亢一澜(天津大学)、王清远(成都大学)、王晋军(北京航空航天大学)、姜楠(天津大学)、李喜德(清华大学)、马少鹏(上海交通大学)

05 非线性动力学

一、课程概述

本课程介绍非线性系统动力学的主要研究方法,以及通过这些方法发现的非线性动力学现象及其内在规律。

本课程将引导研究生在了解高等动力学、连续介质力学等基础课程所涉及的非线性问题基础上,掌握分析非线性动力学问题的主要方法,建立对常见非线性动力学现象及其内在规律的认识,为阅读非线性动力学领域的文献和从事相关研究奠定学术基础。

本课程的授课时间和课堂讨论时间不少于60学时。

二、先修课程

常微分方程,线性代数,振动力学,高等动力学。

三、课程目标

了解力学系统的非线性因素和由此产生的非线性动力学现象,掌握分析非线性系统动力学的主要解析方法和数值方法,能对较为简单的非线性系统平衡点和周期运动进行稳定性和分岔分析,能对系统动力学数值计算中出现的复杂非线性现象进行分析和解释。

四、适用对象

力学一级学科的博士研究生,动力学与控制二级学科的硕士研究生。

五、授课方式

1. 课堂教学

教师讲授 70% 左右的内容,安排研究生自学 30% 左右的内容并开展课堂研讨。讲授基本理论和分析方法时,以板书推导和讲解为主;讲授课程背景、发展历史和各种非线性现象(如自激振动、动态分岔、混沌运动等)时,以视频和图片展示为主。

2. 课外训练

安排研究生完成 20 道左右巩固基本概念、掌握主要方法、引发继续思考的习题;安排研究生用 Maple/MATLAB 软件进行理论推导/数值计算;完成 1 个具有应用背景的综合性大作业。

六、课程内容

1. 主要内容

(1) 非线性动力系统的概念与建模:系统非线性及其分类,基于理论力学、分析力学、材料力学、弹性力学的建模方法,基于模型辨识、参数估计的实验建模方法。

(2) 解析分析方法:平衡点的稳定性分析,保守系统的分析,非保守系统的分析;直接摄动法, Lindstedt-Poincaré 摄动法,平均法,多尺度法, Garlerkin 法,谐波平衡法,增量谐波平衡法。

(3) 数值分析方法:瞬态运动(单步法、多步法)计算,稳态运动计算(平衡点、周期运动),局部分岔计算(分岔点确定、参数延续算法),全局特性计算(胞映射、不变流形计算),混沌的统计分析(Lyapunov 指数、分形与分数维),基于实验数据的非线性动力学建模。

(4) 单自由度系统振动:Duffing 系统的自由振动,Duffing 系统在简谐激励下的主共振、亚谐共振、超谐共振、组合共振, van der Pol 系统的自激振动、van der Pol 系统在简谐激励下的振动,线性时变系统的参激振动,非线性时变系统的参激振动。

(5) 多自由度系统振动:平方非线性系统的内共振,陀螺力对内共振的影响,平方非线性系统在简谐激励下的振动,时变系统的参激振动,连续系统振动的离散分析和直接分析。

(6) 运动稳定性与分岔:包括自治系统平衡点的稳定性分析(Lyapunov 方法、Hurwitz 方法),非自治系统平衡点的稳定性,自治系统向量场在平衡点处的规范型,周期运动的稳定性,平衡点的静态分岔,平衡点的动态分岔(Hopf 分岔及其类型),周期运动的分岔(鞍结分岔、倍周期分岔、Naimark-Sacker)。

(7) 混沌运动及其控制:混沌现象及其基本特征,离散动力系统(一维映射、高维映射)的混沌,连续动力系统的混沌,保守系统的混沌, Melnikov 方法,混沌控制方法。

(8) 课程总结:非线性动力学的发展历史,主要研究方法的思路,重要科学发现的启示,值得研究的若干问题等。

2. 课程重点

非线性系统平衡点的稳定性与分岔、周期振动的稳定性与分岔,混沌运动及其控制,非线性系统的解析分析方法和数值分析方法。

3. 课程难点

非线性系统的稳定性,系统向量场在平衡点处的规范型,系统平衡点的动态分岔,系统周期运动的分岔, Melnikov 方法。

七、考核要求

1. 考核方式

开卷考试或独立完成大作业。

2. 考核标准

对于开卷考试,其内容和难度应证实研究生已掌握本课程的重点内容,能用解析方法分析较为简单的非线性动力学问题;对于完成大作业,其内容和难度还应证实研究生已掌握数值计算方法,并具有分析数值计算结果的能力。

八、编写成员名单

胡海岩(北京理工大学)、陈立群(上海大学)、金栋平(南京航空航天大学)

06 高等流体力学

一、课程概述

本课程介绍较高层次的流体力学基础理论知识,侧重于解析方法的学习和建立对典型流体力学现象及其内在规律的认识,同时对研究生进行相应的技能训练,为研究生从事流体力学各个方向的研究工作奠定学术基础。

本课程的授课时间不少于 60 学时,除此之外可另安排一定时间进行课堂讨论。

二、先修课程

复变函数,数理方程,理论力学,流体力学或空气动力学。

三、课程目标

掌握流体动力学的主要解析方法,了解典型精确解并深刻理解这些理论结果所代表的流动现象。

四、适用对象

力学一级学科的博士研究生,流体力学二级学科的硕士研究生。

五、授课方式

1. 课堂教学

教师讲授 70% 左右的内容,安排研究生自学 30% 左右的内容并开展课堂研讨。

2. 课外训练

安排研究生完成 20 道左右的习题,以巩固基本概念、掌握主要方法,并引发研究生深入思考和进一步阅读的兴趣。

六、课程内容

(1) 流体力学基本方程:积分和微分形式的基本方程推导,包括方程中各项的物理意义及方程的主控参数等;由基本方程导出的动能方程和熵的方程。

(2) 理想不可压缩流体无旋运动:势流的一般特性;平面流动的复位势理论;非定常运动物体的无环量绕流(附加质量);薄翼非定常运动理论。

(3) 流体中的波:声波(平面、球面波,点源);水波(深水波、浅水波、涟漪);重力内波。

(4) 涡动力学:涡量动力学方程及物理意义;Kelvin 定理和无粘流中涡旋动力学特性;典型涡旋的解析解(点涡、Rankine 涡、兰姆涡对、Oseen 涡、Taylor 涡、Burgers 涡、Sullivan 涡、Hill 球涡、Batchelor 尾涡);涡旋运动学特性、给定涡旋场及散场时的速度场;特殊涡旋场(线涡、面涡)的速度场。

(5) 气体动力学:双曲型方程的特征理论;一维非定常流动及激波的形成;二维定常超音速流动(平面、轴对称流动);激波(激波条件和特性、弱/强激波近似);与激波相关的不连续面(接触面、爆轰波)。

(6) 流体力学中的奇异理论(选讲):奇异摄动法;薄翼问题;高雷诺数黏性流动(平板一阶、二阶边界层);低雷诺数黏性流动(球和圆柱绕流的 Stokes 近似、Oseen 近似)。

(7) 流动稳定性和湍流(选讲):流动的不稳定性;湍流的统计描述;湍流运动的标度分析;边界层湍流的平均运动;湍流模型。

(8) 课程总结:流体力学大事记;流体力学主要研究方法;流体力学中的佯谬;流体力学的特殊困难。

七、考核要求

1. 考核方式

开卷考试。

2. 考核标准

考试内容和难度应证实研究生已掌握本课程的重点内容,能用解析方法分析典型的流动问题。

八、编写成员名单

孙茂(北京航空航天大学)、余振苏(北京大学)

07 高等固体力学

一、课程概述

本课程主要讲授固体力学的基本概念、原理、方法和相关研究分支专题,为研究生从事固体力学及相关交叉学科的研究与应用奠定理论和方法基础。

课程内容主要包括:线弹性理论、弹性大变形理论、黏弹性理论、塑性理论、断裂理论、振动理论等,同时包括固体力学问题的分析方法、边值问题和初值问题的基本解方法等。

本课程的授课时间不少于 60 学时。具体授课内容可根据实际情况从上述内容中选取,如本科期间已开设弹性力学、振动力学、塑性力学、断裂力学等课程,研究生授课相关内容可适当压缩或删减。

二、先修课程

理论力学,材料力学,高等数学,张量分析。

三、课程目标

掌握固体变形与应力的基本描述方法、本构关系、屈服判据等基本理论,掌握弹性和塑性问题的基本提法、解析和数值解法。掌握固体的非线性弹性理论,包括橡胶大变形理论、黏弹性变形理论等;掌握固体的断裂理论、振动理论及其分析方法。

四、适用对象

力学一级学科的博士研究生,固体力学二级学科的硕士研究生。

五、授课方式

1. 课堂教学

教师讲授 70%左右的内容,安排研究生自学 30%左右的内容并开展课堂研讨。授课时应注重讲解基本概念、基本理论、分析方法及其背景,重要的应用实例,最新研究进展,以及未来的发展方向及可能的应用领域。

2. 课外训练

应完成若干习题,以巩固基本概念、掌握主要方法、引发继续思考;完成专题研究的大作业,以综合运用相关理论和分析方法;运用商用软件开展理论推导、数值计算等。

六、课程内容

1. 主要内容

(1) 应力张量和应变分析:连续介质理论的基本假设;应力定义,应力状态(平面应力、主应力、剪应力、等效应力等);应变定义,变形状态,变形协调,小变形、有限变形、旋转等。

(2) 线弹性理论:本构关系,边值问题与初值问题的控制方程;圣维南原理,Airy 应力函数,平面应力问题,平面应变问题,轴对称问题,Lame 问题,弹性波问题,热应力问题;最小势能原理,虚功原理。

(3) 弹性大变形理论(橡胶弹性理论):弹性理论的热力学表述,自由能函数,大变形应力应变关系,自由链模型,八链网络模型,大变形边值问题的求解,大变形稳定性理论。

(4) 黏弹性理论:牛顿剪切定律,Arrhenius 方程,蠕变,松弛,线性黏弹性模型,Boltzmann 叠加原理,循环实验,复刚度,率相关。

(5) 塑性理论:塑性变形特征与机理,变形强化,变形软化,棘轮效应,理想弹塑性模型,刚塑性模型,屈服准则,塑性流动法则,滑移线场分析,颈缩分析等。

(6) 断裂理论:裂纹,能量断裂理论(包括裂尖能量释放率等),线弹性断裂理论(包括裂尖场、应力强度因子及其判据等),弹塑性断裂理论(包括裂尖张开位移及其判据、J 积分及其判据等),复合型断裂,环境断裂,动态断裂,疲劳及疲劳裂纹扩展率等。

(7) 振动理论:离散系统振动分析方法,连续系统振动分析方法,动力学系统特征值与响应的数值求解方法,随机振动分析基本理论,模态辨识基本理论,模态综合基本理论,非线性振动的定性分析方法,非线性振动的近似解析方法,分岔理论基础,混沌振动等。

(8) 课程总结:固体力学的发展历史,主要研究方法的思路,重要科学发现的启示,值得研究的若干问题,交叉学科等。

2. 课程重点

固体变形与应力的基本描述方法,本构关系,边值问题和初值问题的提法,典型问题的求解方法,最小势能原理,屈服准则及断裂准则等。

3. 课程难点

连续介质中的应力和应变的张量表述,弹塑性边值问题的求解方法,大变形条件下的稳定性,断裂机理。

七、考核要求

1. 考核方式

闭卷考试、开卷考试、专题研究大作业三种方式选择一种或三种相结合。

2. 考核标准

考试内容和难度应能考核研究生对固体力学基本概念、理论、方法及本课程重点内容的掌握程度,以及分析问题的能力;专题研究大作业应能考核研究生综合运用固体力学基本理论和方法,解决问题的能力,对研究结果的分析和运用能力等。

八、编写成员名单

王铁军(西安交通大学)、李玉龙(西北工业大学)、洪友士(中国科学院大学)

08 工程力学

一、课程概述

本课程主要介绍板壳及复合材料结构的弯曲变形特性、振动特性及屈曲特性等,使研究生掌握上述三类力学问题的主要求解方法,加深对板壳及复合材料结构弯曲、振动和屈曲现象及其内在规律的认识,为进一步从事板壳及复合材料结构领域的相关研究奠定学术基础。各学位授权单位可根据学科特色,确定硕士研究生和博士研究生学习内容。

本课程的授课时间和课堂讨论时间不少于 60 学时。

二、先修课程

弹性力学,微积分,偏微分方程,线性代数,微分几何。

三、课程目标

了解板壳及复合材料结构的弯曲变形、振动和屈曲现象,掌握板壳及复合材料结构分析的主要方法,能对典型边界条件下板壳及复合材料结构的弯曲、振动和屈曲问题进行分析,能对相应的计算结果进行分析和解释。

四、适用对象

力学一级学科的硕士研究生和博士研究生。

五、授课方式

1. 课堂教学

教师讲授 70% 左右的内容,安排研究生自学 30% 左右的内容并开展课堂研讨。讲授基本理论和分析方法时,以板书推导和讲解为主;讲授课程背景、发展历史和结构变形、振动、屈曲现象时,以视频和图片展示为主。

2. 课外训练

安排研究生完成 20~30 道巩固基本概念、掌握求解方法、引发继续思考的习题;完成 1~2 个结合不同工程领域的专题性或研讨式大作业。

六、课程内容

1. 主要内容

(1) 板理论:薄板弯曲的基本假设、基本方程、边界条件等;薄板弯曲的主要求解方法:里兹法、伽辽金法、摄动法等;厚板弯曲理论,瑞斯纳理论,符拉索夫理论等。

(2) 壳体理论:薄壳弯曲的基本假定、基本方程、典型的薄壳问题;圆柱壳体弯曲的一般理论、简化方程及其适用范围;扁壳大挠度问题的基本方程、典型的扁壳问题等;板壳力学分析的

新体系。

(3) 板壳稳定性:板壳稳定性的基本概念,静力平衡法,能量法,加筋板的稳定性,薄板的后屈曲等;圆柱壳的稳定性,扁壳的稳定性。

(4) 板壳振动:薄板横向自由振动方程,典型薄板自由振动问题;圆柱薄壳自由振动方程,典型圆柱薄壳的自由振动问题。

(5) 复合材料层板的弯曲、屈曲和振动:各向异性材料的本构关系,经典层合板理论,层合板的弯曲、屈曲与振动的基本方程,特殊层合板的弯曲问题,层合板的屈曲,层合板的振动,层合板的横向剪切效应。

(6) 夹芯结构及多功能结构:夹芯结构概述,夹芯结构的高阶剪切变形理论,夹芯梁、板、壳的弯曲、屈曲和振动;多功能结构概述,承载-隔热结构,承载-热控结构,承载-减振结构,承载-吸波结构等。

(7) 爆炸与冲击:气体动力学与冲击波,爆炸动力学问题,固体中的应力波,侵彻与穿甲力学问题,爆炸与冲击问题的数值模拟和动加载实验与技术。

(8) 岩土力学:渗流理论,固结理论,土体强度,土动力学,土体本构理论;岩体工程地质力学,岩石连续介质力学,岩体结构力学等。

(9) 课程总结:板壳及复合材料结构理论的发展历史,主要研究方法的思路,重要科学发现的启示,板壳力学分析的新体系,值得研究的若干问题等。

2. 课程重点

典型边界条件下板壳结构弯曲、振动和屈曲问题的求解方法,厚板厚壳的弯曲变形,正交各向异性板壳的弯曲、振动和屈曲问题,复合材料结构及夹芯结构的弯曲、振动和屈曲问题。

3. 课程难点

薄壁板壳的大挠度变形问题,(中)厚度板壳的弯曲变形问题,正交各向异性板壳的稳定性问题,薄壁板壳的后屈曲问题及夹芯结构的高阶剪切变形理论。

七、考核要求

1. 考核方式

开卷考试或独立完成大作业。

2. 考核标准

对于开卷考试,其内容和难度应证实研究生已掌握本课程的重点内容,能用解析方法分析较为简单的结构弯曲、屈曲和振动问题;对于完成大作业,其内容和难度还应证实研究生已掌握数值计算方法,并具有分析数值计算结果的能力。

八、编写成员名单

吴林志(哈尔滨工业大学)、王清远(成都大学)

09 生物力学

一、课程概述

本课程介绍与生物学和医学有关的力学问题及其研究方法,并通过这些方法揭示生物学过程中的力学规律,为医学与生命科学提供理论基础。

本课程的任务是向研究生讲授生物力学研究的基本理论、研究手段和技术方法。通过对一些典型生物力学问题的分析与讲解,让研究生掌握生物力学研究的一些基本理论、分析方法和实验技术,认识生命现象中的力学基本规律和机理,使研究生能应用力学原理和方法研究生物学过程中的现象与问题,并为临床医学和生命科学服务。

本课程的授课时间和课堂讨论时间不少于 60 学时。

二、先修课程

理论力学,材料力学,连续介质力学,大学化学,细胞生物学,生理学。

三、课程目标

提升研究生对生命系统的基本认识,掌握生物力学基础理论、重要研究方法和实验手段,能对典型生物力学问题进行力学建模,并通过理论、数值、实验等方法开展研究,使研究生能够对不同尺度的生命现象进行力学定量分析,对生命科学和医学中的力学问题能够分析和解释。

四、适用对象

力学一级学科与生物医学工程的博士研究生,生物力学二级学科的硕士研究生。

五、授课方式

1. 课堂教学

教师讲授 70%~80% 的内容,研究生进行 20%~30% 的实验并开展课堂研讨。教师讲授基本理论和分析方法时,以板书推导和讲解为主,以幻灯片、视频、图片与模具展示为辅。

2. 课外训练

安排研究生对组织、细胞、器官等不同尺度生命体进行力学实验,完成小课题,使其掌握主要力学建模与分析方法、实验技能,进而提升认知水平与科研能力;安排研究生对与疾病相关的若干力学问题进行实验与力学研究;完成一个具有应用背景的综合性大作业。

六、课程内容

1. 主要内容

(1) 生物力学的基本概念与理论:应力、应变与位移的基本概念,变形体基本方程与基本求解方法;固体材料的弹性、黏弹性与黏塑性本构模型;生物组织的应力-生长理论,软组织和器

官的重塑;力学-生物学-化学耦合,细胞的重建与分子的变构;流体运动的雷诺数,质量和动量守恒方程,纳维-斯托克斯(Navier-Stokes)方程。

(2) 肌骨系统力学:重点是软组织力学和硬组织力学,主要包括软组织在单向载荷和循环载荷下的力学行为,软组织的二维和三维弹性与黏弹性本构关系;血管壁的构造以及动脉、静脉和微血管的力学性质;骨骼肌的微结构和收缩机理,心肌的力学性质与 Hill 模型,肌肉力学的三元素模型;肺组织的几何模型与本构关系,肺泡壁和肺实质的结构和本构关系;骨的多级结构、准静态和动态力学性能、结构-功能适应性理论、骨损伤与重建;关节软骨的黏弹性与润滑性机理;组织/器官的应力-生长关系。

(3) 循环系统力学:重点是血液与体液力学及其与管道组织的耦合,主要包括血液的组成与黏性本构关系,Fahraeus-Lindqvist 效应,血液和体液力学与流变学;红细胞的几何形状与变形特征,红细胞的聚集与沉降;毛细血管内红细胞的运动与变形行为;白细胞、血小板的活性和流变行为;血管力学与流固耦合;血管的应力-生长关系。

(4) 细胞-分子力学:细胞的基本结构与力学模型;细胞力学的主要研究方法与实验技术;亚细胞组元,细胞器力学,细胞骨架力学;细胞黏附,细胞的运动与迁移,细胞的内力产生机制以及对外力的响应机制;单分子力学的理论模型、模拟方法与实验技术;DNA 力学,蛋白质的力学性质、理论模型与实验方法;细胞与分子尺度的力学-生物学-化学耦合。

(5) 生物材料力学:天然生物材料的多级结构、组成成分、力学性能与本构模型;表面性质;强韧化机制;力学性能的实验表征方法;仿生学。

(6) 运动生物力学:人体动力学模型与分析方法,运动动作分析,跳跃等运动模式的力学分析;人体运动中的流体力学问题。

(7) 生物力学专题:如组织与细胞的力研究生物学;眼生物力学;呼吸力学;关节与软骨生物力学;耳鼻喉生物力学;干细胞生物力学;医学临床和康复工程中的生物力学问题;植物生物力学;微生物力学。

(8) 课程总结:生物力学的发展历史与科学思想,主要研究方法思路,重要科学发现的启示,生物力学学科展望等。

2. 课程重点

生物组织与细胞的结构、力学模型与实验方法;变形体基本方程与基本求解方法;生物组织的应力-生长理论、结构-功能适应性原理;力学环境对细胞生长、分裂、分化等的影响规律;血管的力学性质与本构模型;骨骼肌的微结构和 Hill 模型,心肌和心肌细胞的力学性质;骨的力学性能、结构-功能适应性理论、骨损伤与重建;人体运动的功能及其转化;细胞-分子的力学-生物学-化学耦合;细胞的力学模型和实验测试方法;亚细胞与分子力学主要研究方法、理论与实验方法。

3. 课程难点

组织与细胞的力学建模与实验方法;软组织和黏性流体的本构理论;细胞的连续介质模型与微观结构模型;亚细胞与生物大分子的力学模型与实验方法;在体和离体情况下生物组织力学性能的测量;生物组织的多相、非均匀性、各向异性等的理论模型与实验测量;骨、肌肉等的受力研究生物学;血液在不同尺度血管里的流变特性。

七、考核要求

1. 考核方式

开卷考试或独立完成大作业。

2. 考核标准

对于开卷考试,其内容和难度应证实研究生已掌握本课程的重点内容,包括在不同尺度上生命科学与临床医学中的生物力学建模与实验方法。对于大作业,其内容和难度还应证实研究生能够应用生物力学手段分析生物医学工程和生命科学中的提出问题并解决问题的能力,证实研究生独立从事科研相关工作的能力。

八、编写成员名单

冯西桥(清华大学)

10 数学建模

一、课程概述

本课程从“连续性原理、不变性原理和相似性原理”出发,概括介绍力学研究中的数学原理和数学建模的主要思路和方法。

本课程引导研究生在了解连续介质力学的基础上掌握数学建模的主要方法,尤其是对如何从力学的计算和实验研究的数据中寻找普适规律展开讨论,通过灵活运用量纲分析、扰动分析、统计分析等对力学问题进行定量建模,从而建立对常见微分方程、统计规律、相似规律的认识,为阅读力学的理论研究文献和从事力学的理论研究奠定学术基础。

本课程的授课时间和课堂讨论时间不少于 48 学时。

二、先修课程

常微分方程,线性代数,偏微分方程,连续介质力学。

三、课程目标

了解数学建模的三大原理(相似性原理、不变性原理和连续性原理),了解微分方程、统计分析和量纲分析这三大类力学建模的数学工具,能够对较为简单的力学系统开展建模、分析和解释。

四、适用对象

力学一级学科的博士研究生,流体力学二级学科的硕士研究生。

五、授课方式

1. 课堂教学

教师讲授 60% 左右的内容,研究生自学参考书中 40% 左右的内容,并通过充分的课堂研讨来探索如何读数学参考书。讲授基本理论和分析方法时,以板书推导和讲解为主;交流自学内容时,以幻灯片展示为主。

2. 课外训练

研究生完成 15 道左右巩固基本概念、掌握主要方法、引发继续思考的习题,以及一部分思考题;用 MATLAB 软件进行 1 个具有应用背景的计算;完成 1 篇大作业,阐述对数学原理和数学建模过程的理解。

六、课程内容

1. 主要内容

(1) 数学建模的三大原理:相似性原理、不变性原理和连续性原理;综合讨论什么是应用数学;应用数学所涉及的概念和相关研究领域概述。

(2) 相似性原理:量纲分析方法及扩展的量纲分析方法,李群相似性分析方法,应用实例。

(3) 连续性原理:扰动和近似方法概述;正则扰动方法;奇异扰动方法;多重尺度分析方法,包括湍流边界层问题及生理动力学模型等。

(4) 不变性原理:守恒律;边界约束条件;典型的数学物理方程的推导。

(5) 系统优化中的数学问题:变分法;线性与非线性规划。

(6) 随机运动的数学建模:对随机过程的数学描述;统计分析,不确定性分析。

(7) 应用数学的软件工具:MATLAB 的运用。

(8) 课程总结:应用数学的当代发展历史和趋势,重要科学发现的启示,值得研究的若干问题等。

2. 课程重点

获得对力学过程的定量研究中的数学感觉,把握三大原理,从而认识方程、扰动展开、相似性分析之间的关联,把握连续性的微分方程和随机性的统计研究,熟悉 MATLAB 等数学工具。

3. 课程难点

把授课教师在数学建模方面依靠长期经验积累而形成的直觉传递给研究生,从具体的讨论材料扩展到对数学的一般性认识。

七、考核要求

1. 考核方式

针对具体数学问题的半开卷的期末考试,辅以阅读报告和大作业。

2. 考核标准

对于半开卷的期末考试,其内容和难度应证实研究生已掌握基本的数学分析工具(近似分析和扰动分析);阅读报告应反映研究生的自学能力;期末大作业应反映研究生对于数学建模的全面理解,并具有运用 MATLAB 工具进行数学分析的能力。

八、编写成员名单

余振苏(北京大学)