

流固耦合力学专题序

徐万海^{*,1)} 赖 姜[†] 马焯璇^{**}^{*}(天津大学水利工程智能建设与运维全国重点实验室, 天津 300072)[†](电子科技大学航空航天学院, 成都 611731)^{**}(中国科学院力学研究所, 北京 100190)

流固耦合力学是流体力学与固体力学交叉而成的力学分支, 以两相介质之间的相互作用为重要特征, 研究可变形固体在流场作用下的行为及固体变形对流场影响的相互作用. 流固耦合现象存在于海洋工程、航空航天、石油化工、核能工程、土木工程等几乎所有涉及国计民生的重大领域中, 并会诱发结构静发散、载荷重新分布、颤振、极限环振荡及涡激振动等诸多工程问题. 近年来, 复杂工程场景下流固耦合问题的力学作用机理、数值模拟方法、实验观测技术取得了突破性进展, 从而促进了国产航母、深海潜器、“深海一号”能源站、大型客机、超音速飞行器、“华龙一号”核电机组等一大批国之重器的研制, 助力国家“制造强国”战略目标实现.

为了总结和传播流固耦合力学相关的新理论、新方法和新技术, 《力学学报》组织了“流固耦合力学”这一专题, 该专题包含了 1 篇综述论文和 14 篇研究论文, 旨在反映我国科技人员在流固耦合力学问题上的最新研究进展, 以促进学术交流, 供同行学者和技术人员参考.

在可再生能源领域中, 研究人员发现可以利用结构物的流激振动进行潮流能发电. 天津大学徐万海等回顾了关于柱体流激振动能量俘获的研究工作, 全面阐述了多种截面形式的单个柱体、柱群结构流激振动能量俘获理论与技术方面的研究进展. 对于单个柱体流激振动能量俘获, 已基本明确了来流攻角、系统质量比、系统阻尼、系统刚度和雷诺数等条件下柱体的流激振动作用机理和能量俘获能力; 对于柱群的流激振动能量俘获, 各柱体振子之间存在流场干涉, 需合理设计柱体排布形式、柱体间距和系统阻尼等参数, 实现流体能量俘获最大化. 交通运输部天津水运工程科学研究所金瑞佳等对四种不同质量比 D 形截面柱体的流致振动进行了数值模拟, 分别对不同约化速度下的 D 形截面柱体的振幅、频率、平衡位置偏移量、尾涡脱落形态及能量转化效率等进行了对比分析, 成果可为利用涡激振动进行海流能收集的 VIVACE 装置振子选型提供参考.

在海洋资源开发过程中, 海洋管道扮演着“生命线”的角色, 流激振动导致海洋管道存在巨大安全隐患. 数千米深水海域中, 外部海流时空变化难测, 管道内部输运非稳态内流, 结构响应的局部时频特性迥然有别, 管道整体动力学行为呈现多模态、宽频率等非线性特征; 多根海洋管道相互干涉, 增强了流场不稳定性, 诱发结构产出现尾流激振、驰振、颤振等非稳态动力行为. 中国石油大学(华东)刘秀全等建立了深水隔水管-水下井口耦合系统的顺流向和横流向涡激振动预测模型, 将管-土作用的时变非线性土体抗力转化为时变土体等效刚度, 采用 Newmark- β 法与龙格库塔法进行数值求解, 探讨了管-土耦合作用及环境因素对深水隔水管-水下井口系统涡激振动的影响机制. 西南石油大学朱红钧等基于自循环水槽开展了悬链线立管涡激振动

2024-02-27 收稿, 2024-02-28 录用, 2024-02-28 网络版发表.

1) 通讯作者: 徐万海, 教授, 主要研究方向为流激振动及振动控制. E-mail: xuwanhai@tju.edu.cn

引用格式: 徐万海, 赖姜, 马焯璇. 流固耦合力学专题序. 力学学报, 2024, 56(3): 521-523

Xu Wanhai, Lai Jiang, Ma Yexuan. Preface of theme articles on fluid-structure interaction mechanics. *Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, 2024, 56(3): 521-523

实验,立管的长径比为 125,约化速度范围为 4.40~39.33,利用激光位移传感器和高速摄像机分别监测了平台运动和立管振动,从响应频率、振幅和振动形态等方面重点研究了平台运动对立管振动的影响.近期,深海矿产资源开发如火如荼,矿物输送管道的流固耦合问题也得到了广泛关注.哈尔滨工业大学(威海)高云等采用能量法和哈密顿变分原理,建立了固-液两相内流激励下悬臂管道的动力学方程,基于 Galerkin 方法对方程进行离散,根据特征值法和 Newton-Raphson 迭代法对矿物输送管道的稳定性特征进行数值求解.上海交通大学朱宏博等通过 CFD-DEM 方法,对竖直矿物输送管道在强迫振动作用下不同粒径、不同振幅和振动频率以及不同进料浓度的固液两相流的特性开展了系统研究.中国科学院力学研究所周济福等基于颗粒运动方程和软球碰撞模型,对横向振动矿物输送立管中的单颗粒运动特性开展了数值研究,讨论了颗粒与立管碰撞的发生条件,分析了颗粒运动的垂向速度、相对于立管的横向速度随立管振动参数、颗粒与立管内流体密度比等的变化规律.上海交通大学肖盛鹏等针对弯曲管道压降和磨损率,探究了弯曲角度、弯曲半径、输入速度、颗粒直径和颗粒浓度等因素的影响,通过 Pairwise 配对法进行工况组合并进行数值模拟计算,得到大量可用数据,开发了 6 个机器学习模型.

在航空航天工程中,飞行器的气动弹性振动问题就是典型的流固耦合力学问题.北京航空航天大学黄广靖等针对 NACA0012 翼型大幅俯仰运动气动力预测问题,发展了由嵌入门限循环单元或长短时记忆神经网络单元的分支网络和主干网络组成的深度算子神经网络结构,通过给定大幅俯仰运动下的动态失速 CFD 气动力数据,对深度算子神经网络参数进行训练,建立了高精度动态失速气动力的数据驱动模型.将数据驱动模型与结构动力学方程耦合,采用数值积分方法预测了失速颤振的失稳分岔速度和不同速度下的极限环振荡特性.压气机转子叶片非同步振动是近年来发现的一类新的气动弹性问题,表现为叶片振动频率与转频不同步且具有锁频现象,严重影响航空发动机的可靠性和运行安全.上海交通大学陈勇等基于时间推进的方法,建立了多级压气机转子叶片全环的双向流固耦合模型,数值研究了刚性叶片与非同步振动柔性叶片的非定常流场、气流激励频率和结构响应特征,揭示了压气机转子叶片非同步振动的流固耦合机制.

在核能工程领域中,高速离心机是关键技术装备,广泛应用于提纯放射性乏燃料,对于提高乏燃料利用率、降低核废料污染以及保障核电可持续发展具有重大战略意义.在一定条件下当充液转子发生扰动时,腔内旋转液体被激起扰动运动,二者发生耦合,诱发转子自激失稳.北京化工大学王维民等探究了充液离心机转子的流固耦合机理及减振措施,推导了扰动形式的纳维-斯托克斯方程,得到了壁面处的流体压强与流体剪切力,将液体等效主刚度系数及交叉刚度系数与转子动力学方程耦合,采用状态空间法降阶求解动力学方程的阻尼衰减指数和涡动频率.研究发现充液转子的稳定性是转子系统的阻尼、刚度、充液比和流体黏性等多参数作用的结果.流激振动是造成燃料棒包壳微动磨损最主要的原因之一,在核能工程中需时刻注意.中山大学姜乃斌等基于 ANSYS-APDL 建立了带格架的 EPR 燃料棒的多跨连续筒支梁模型,系统地研究了格架失效对 EPR 燃料棒频率、模态的影响,基于全阶模型的样本数据形成快照(snapshots)矩阵,利用本征正交分解方法搭建了降阶模型,对模态、湍流响应快速重构.

在土木工程领域中,如大跨度桥梁结构的缆索系统等圆柱结构在风载荷作用下,多圆柱结构之间会发生复杂的耦合干涉作用,产生比单圆柱结构更为复杂的流激振动响应,如下游圆柱所诱发的尾流激振,尾流驰振等.上海交通大学王嘉松等通过风洞实验,研究了正方形布置四圆柱的流激振动.基于对振动幅值、涡脱频率、振动频率等分析讨论,充分认识了大质量比条件下正方形布置四圆柱的干涉特性.饱和黏土地基的固结沉降是影响土木工程建设和结构安全服役的重要问题.兰州交通大学王立安等探索了载荷变化和土骨架流变耦合作用下饱和黏土地基的固结特性,基于 Biot 多孔介质理论,利用分数阶 Kelvin 模型描述土骨架流变效应,构建了时变载荷作用下饱和黏土地基的三维轴对称固结模型,采用 Hankel-Laplace 联合变换和张量运算推导了控制方程的变换域解析解,利用数值反演得出了时空域解.分析了三种时变载荷作用下饱和黏土地基的流变固结行为和参数影响规律.

在医药工程领域中,特别地对于输送药物的新型医疗器械来说,将流体器械设计成管状结构是一种潜在

方案. 磁调控下的微创手术、药物输送等所采用的硬磁软材料管道, 其两端边界条件比较复杂, 可能是时变的, 故不可简单地视为悬臂边界条件, 因此, 深入探讨两端支撑条件下输流管道的磁调控原理具有重要意义. 华中科技大学王琳等基于 Hamilton 原理, 建立了磁调控下硬磁软材料输流管道的动力学模型, 推导了铰支-可滑动铰支边界条件下输流管道的控制方程. 在 Galerkin 方法离散的基础上, 对输流管系统进行了稳定性分析. 建立的硬磁软材料输流管的非线性模型为预测软材料输流管的动力学行为提供了理论基础, 也为输流管的磁调控提供了思路.

综上所述, 尽管流固耦合力学问题经过数十年的发展已经相对完善, 但要真正解决流固耦合问题必须结合流体力学与固体结构分析中的各种方法与手段. 急需我国力学科研工作者不断地深入到各个应用领域中, 持续投入并开展创新性的基础理论与关键技术突破, 将流固耦合力学研究提升到更高的水平. 特此感谢《力学学报》编辑部对流固耦合力学问题的关注以及对本专题的支持! 也特别感谢所有论文作者以及审稿专家对本专题出版的重要贡献和大力支持!

doi: [10.6052/0459-1879-24-090](https://doi.org/10.6052/0459-1879-24-090)