



# 中国科学院流固耦合系统力学 重点实验室

Key Laboratory for Mechanics in Fluid Solid Coupling Systems  
Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences

## 季 报

2017 年第 2 期 (总第 12 期)

---

### 目 录

- LMFS 青年学术论坛之“流固耦合系统力学系列研讨会（三）”召开 ..... 3
- 我室参与申请国家重点专项获得批准并通过实施方案论证 ..... 4
- 页岩气跨尺度运移研究新进展 ..... 5
- 成品油储运相关科研成果纳入《民用运输机场供油工程设计规范，  
MH5008-2017》 ..... 9
- 近自由面非定常空化流动研究进展 ..... 10
- 周济福等参加第 27 届国际海洋与极地工程年会 ..... 11
- 第二届非线性与相干结构国际会议在英国召开 ..... 12
- BIM 领域知名专家魏群教授受邀来我所进行学术交流 ..... 13
- 美国马里兰大学朱伟东教授来访并做学术报告 ..... 13
- 爱尔兰都柏林大学 Miguel Bustamante 副教授来访并做学术报告 ..... 15

➤ 美国辛辛那提大学王光宇博士来访并做学术报告 ..... 15

## LMFS 青年学术论坛之“流固耦合系统力学系列研讨会

### (三) ”召开

LMFS 青年学术论坛之流固耦合系统力学系列研讨会(三)在中科院力学所会议中心 204 召开。研讨会由张旭辉副研究员主持会议,高大鹏助理研究员和程鹏达助理研究员分别作题为“Downhole pressure transient behavior of multi-stage fracturing horizontal wells”和“粘性时变非牛顿流体在裂隙网络中的流动特性研究”的报告。这两个研究工作分别针对页岩气开发和注浆的工程需求,在学科上同属流变学的范畴,揭示流动规律,需要加强流变本构关系的研究。刘曰武研究员和林緬研究员参加研讨会并对青年研究人员的研究工作、研究方向等进行了指导,建议 LMFS 青年研究人员的研究工作要紧紧密结合工程实践,重视基础研究,尤其在报告过程中多提问、多交流、共进步。





## 我室参与申请国家重点专项获得批准并通过实施方案论证

针对“海洋环境安全保障”重点专项 2017 年度项目申报指南，我室流域水环境课题组参与申请国家重点研发计划“海洋工程动力环境精细化预报与安全保障及评估技术研究”项目获得批准。日前，项目已通过“中国 21 世纪议程管理中心”组织的实施方案论证和预算审核。

该项目围绕“21 世纪海上丝绸之路”（简称“海丝”）国家战略，以提升港口航道、海峡桥隧等海洋工程安全保障能力为总目标。通过开展大气海洋耦合机制、同化方法、耦合数值模式研究，发展海洋动力环境数值预报中同化技术及预报解释应用技术，研发海洋动力环境多要素精细化数值预报系统及保障产品。项目的实施将有效解决海洋动力环境预报及海洋工程安全评估关键技术难题，切实提高海洋工程安全保障及评估能力，为“海丝”沿线港口、航道建设提供技术支撑和安全保障。研究成果也将直

接应用于泉州港、港珠澳大桥、马尔代夫大桥、科伦坡港等国内外 4 个“海丝”关键节点。

该项目由南京水利科学研究院（牵头单位）、国家海洋局第一海洋研究所、中科院力学所、中国海洋大学、天津大学、大连理工大学等单位共同承担。项目设 6 个课题，我所是课题 2 “近岸水动力泥沙多因子相互作用机制及演化规律研究”的负责单位，我室周济福研究员为课题负责人，课题 2 旨在发展复杂环境下近岸水动力泥沙多因子耦合理论，并建立波流输沙模型和海工结构局部冲刷模型。

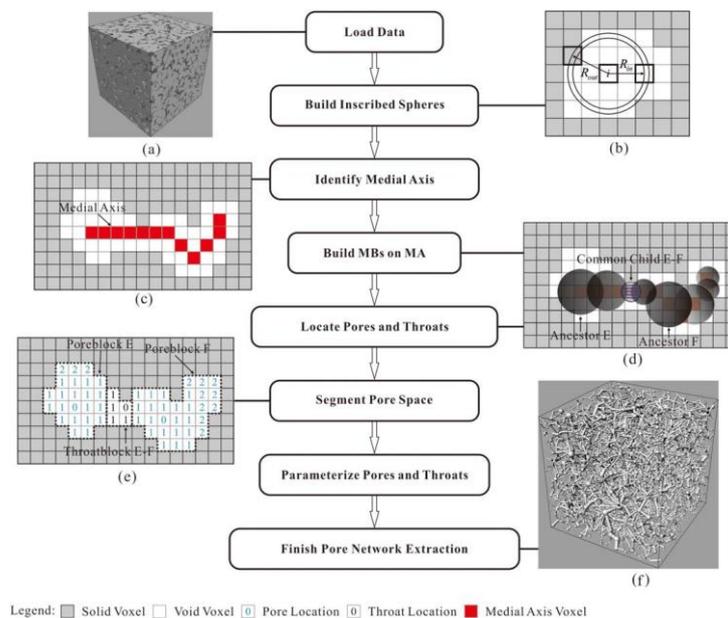
该项目 2017 年 7 月启动，为期 3.5 年，项目批复总经费 2819 万元，其中课题 2 总经费 386 万元。该项目的实施将有助于 LMFS 深化在泥沙运动等环境流体力学流域的研究，同时将巩固我们与国内学术同行之间的既有友好协作关系。

## 页岩气跨尺度运移研究新进展

随着常规油气产量增长乏力，非常规油气已成为我国重要的油气战略接替领域。其中勘探开发页岩气已成为重中之重。目前除美国之外，世界上其他国家的页岩气勘探开发进展都比较缓慢，特别是我们国家，相当一部分页岩气田都存在预测储量和实际产量不符，现有理论无法解释的难题。究其原因，一是页岩气富集方式差异大，不能完全照搬已有的理论和方法；二是对页岩气的输运机理认识不足。页岩气具有低孔、低渗、源储一体的特点。其中有机质（干酪根）中的纳米级孔隙构成的复杂网络使得页岩气的储集和输运完全不同于常规天然气，因此揭示页岩气的跨尺度运移规律，特别是涉及到微尺度的非达西效应，成为当务之急。

当前有三种页岩气微尺度流动模型——毛管束模型、基于砂岩的缩比等价模型和 LBM, 然而这三种模型存在着孔隙结构过于简化和计算效率低、尺度扩展难的问题。对此中国科学院力学研究所海洋环境与工程课题组的研究人员提出了从页岩微观结构出发, 基于孔隙网络模型展开研究, 最终形成了从错综复杂的孔隙网络, 到建立有机质孔隙网络的等价模型, 再到有机质和无机质耦合渗流模型的研究路线, 实现了从纳米喉道到微米岩块的升尺度。

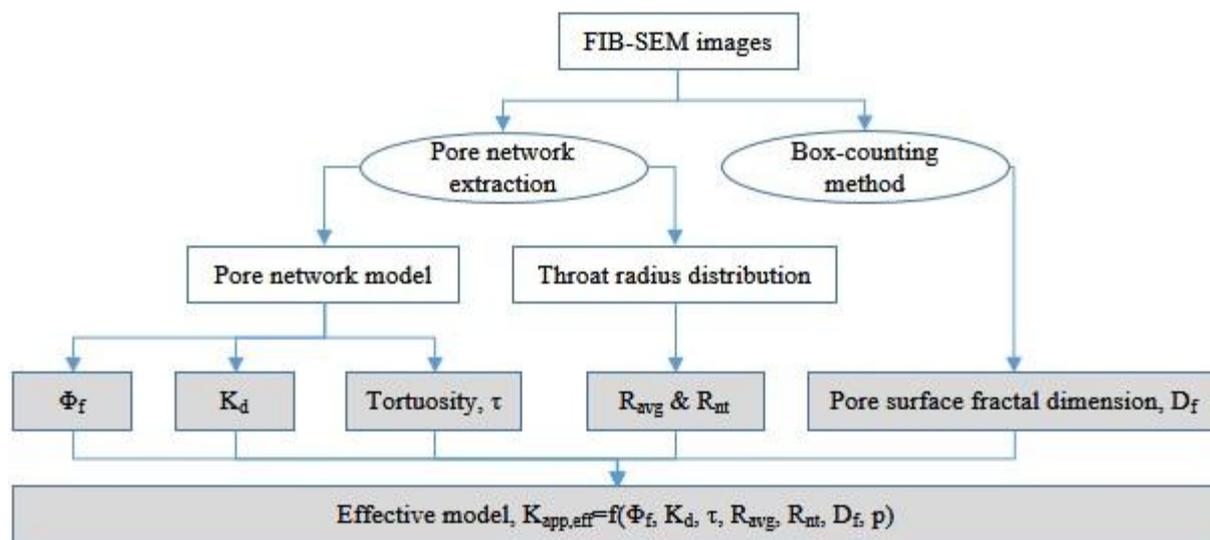
首先, 课题组通过大量的岩石样品测试计算发现, 以往针对均匀多孔介质的孔隙网络抽提算法并不适用于强非均质的页岩。他们提出了基于 FIB-SEM 数据抽提有机质孔隙网络算法—AB 算法。该算法综合了中轴法和大球法的优点, 能够很好地表征页岩的非均质性, 在多相流计算上也有更高的精度。



Flowchart of AB algorithm

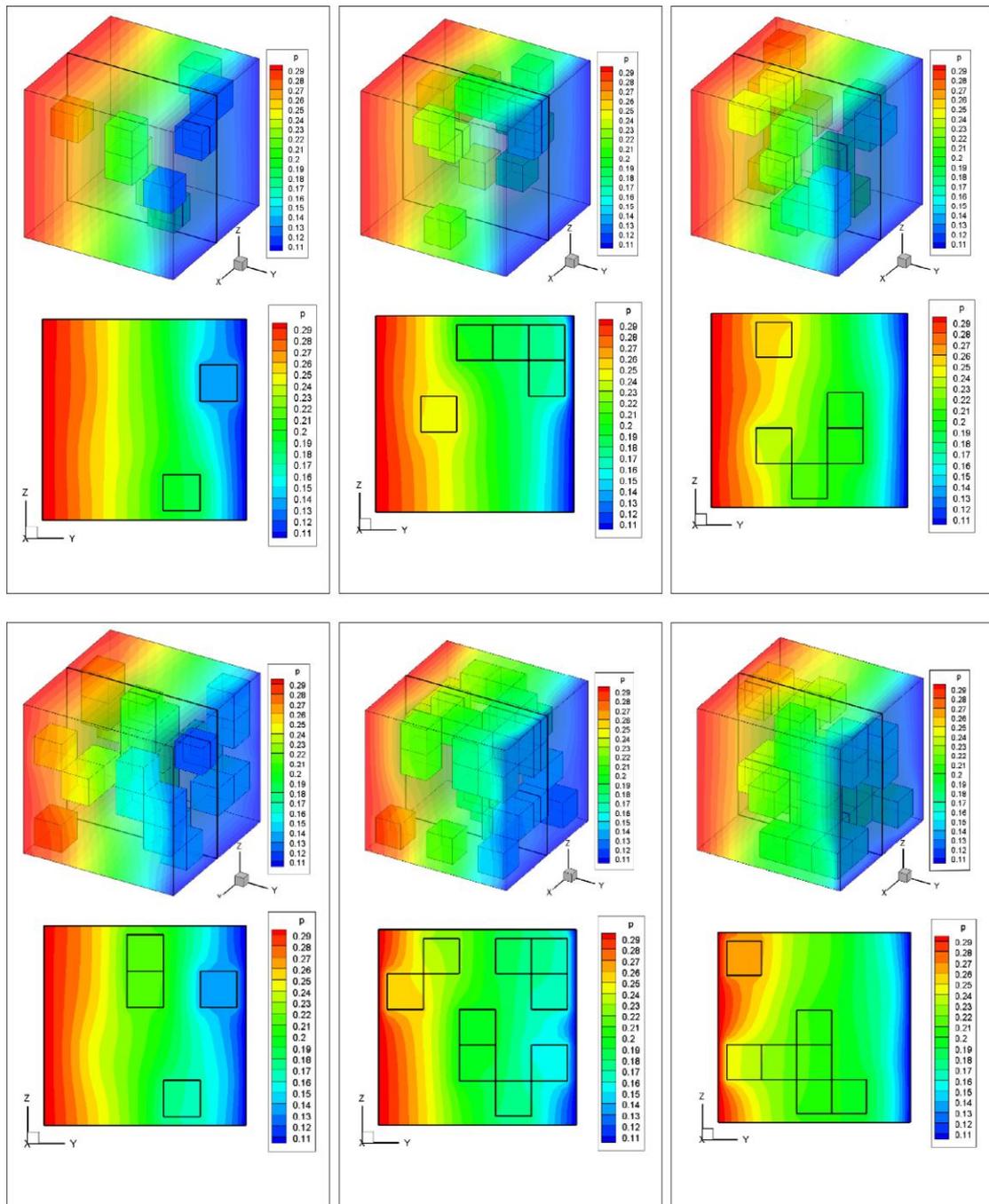
在此基础上, 课题组建立了有机质孔隙网络簇内页岩气流动的等价模型。提出并定义了孔隙特征参数 (流动喉道孔隙度、迂曲度、平均孔隙半径和孔隙表面分形维数等) 表征复杂的页岩有机质孔隙空间, 明确了孔隙

特征参数对气体流动影响的敏感程度。通过对四川龙马溪组和美国鹰滩页岩样品的三维 FIB-SEM 成像数据展开计算, 优选出最佳的等价模型参数方案。该模型的特点是: 参数定义和计算方法明确, 并且在计算精度和避免多解性上都取得了突破, 可更为准确、高效地表征页岩气在微纳孔隙簇中的流动。



Process flow chart for developing an effective model from the pore scale to the cluster scale

进一步地, 针对如何描述页岩气从错综复杂的纳米级孔喉到无机基质中输运这一难题, 课题组对微尺度页岩岩块提出建立有机质和无机质耦合的多尺度概念模型。他们将页岩抽象成无机质嵌套着若干有机质块体; 有机质可视为拥有纳米级孔喉的孔隙网络, 气体输运呈现努森流、滑移流等非达西效应, 用孔隙网络模型 (PNM) 模拟; 而无机质看作是各向同性的多孔介质, 并且假设气体输运满足达西定律, 用有限体积 (FVM) 模拟; 在交界面上采用 Mortar 耦合。课题组进而将这一概念模型用于分析四川盆地龙马溪组页岩, 并提出了处理真实页岩的计算方案。结果表明, 页岩表观渗透率对 TOC 和孔径分布都很敏感, 但对于酪根分布不敏感。这些认识为下一步的尺度再升级奠定了基础。



Contour plots of pressure for the six cases with TOC varies from 3.08% to 10.78%

简而言之，以上研究工作的意义就在于真正地将微观和宏观关联起来，而不是简单地在输运方程上加一个吸附、解吸项。这些研究成果已发表于 *Fuel*, *Transp. Porous Med.* 和 *Water Resour. Res.* 等国际期刊上。研究工作获得了中科院先导 B 页岩气专项、国家自然科学基金和国家重点基础研究发展计划 (973) 致密油项目的支持。

# 成品油储运相关科研成果纳入《民用运输机场供油工程设计规范, MH5008-2017》

我国民用机场供油工程技术研究起步较晚,已有的技术标准大都借鉴于原油的储存和管道运输,并没有针对航空煤油的特性及机坪埋地管线的技术要求开展系统性的研究,导致机场供油工程的工作效率较低、能耗过大。另一方面,伴随民用航空运输需求的快速增长,以及机场供油工程设备应用中出现的问题,给机场供油工程的建设带来极大的挑战,例如:供油管道的设计和施工、航油储罐基础的结构形式、阀门井的防水密封技术等。因此,为解决已有机场供油工程中出现的问题,并提高机场供油工程的工作效率,以此来满足航空运输快速发展的需求,机场供油工程中的相关技术需要进行针对性的革新。

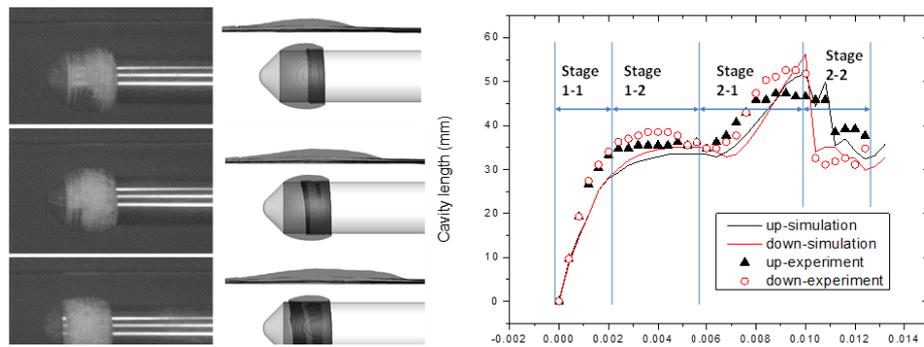
受中国航空油料有限责任公司委托,力学研究所许晶禹研究员和张健助理研究员共同承担并完成了《机坪垂直管道应力分析及三通选型选择》、《航油储罐地基渗漏分析和防水技术方案研究》、《机坪埋地管线穿越阀门井的新型防水密封形式和结构设计》等课题。研究中分别对机坪埋地管道的力学性能和三通结构的形式、储罐基础的防水结构和稳定性、阀门井井壁的防水密封形式和力学性能等开展相应的研究工作,得到了一系列的理论和工程应用成果,部分成果已被纳入《民用运输机场供油工程设计规范》(MH5008-2017),主要包括:(1)得到了机坪埋地管线在道面位移载荷条件下的应力分布和形变等力学性能,并结合常用三通结构的施工形式:直接开孔焊接、带补强板焊接、带支管台焊接、冲压成型等,形成了机坪埋地管线中三通的选型选择表(9.1.5; 9.1.6; 9.1.9);(2)给出了航油储罐建设在各种环境条件下,储罐基础的结构设计、防水和防腐处理工

艺等, 并通过整体性的分析, 给出了航油储罐基础的工程化设计施工规范和标准 (7.5; 10.1.8; 10.1.9); (3) 提出了新型的环形波纹隔板防水密封结构, 具有结构简单、可靠性强、施工方便等优势, 可应用于阀门井井壁管线穿越部位, 解决了阀门井井壁渗水的问题, 并对该结构的力学性能进行分析, 形成了结构参数选型表, 满足工程化应用的要求 (16.2.5)。

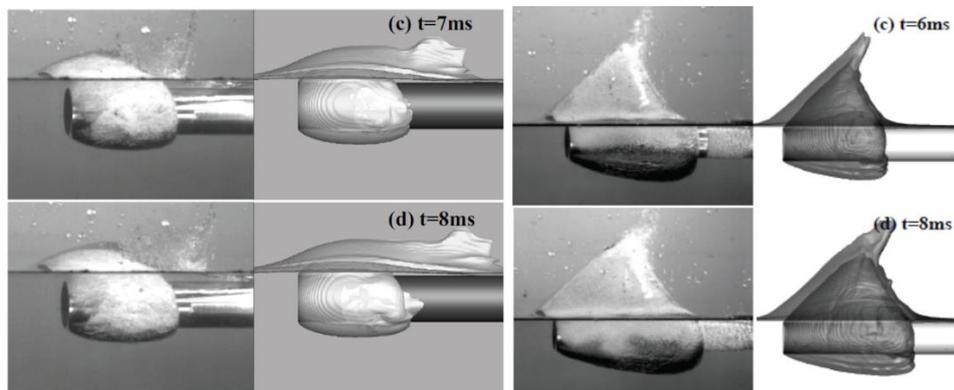
## 近自由面非定常空化流动研究进展

高性能水面航行器等是我国维护海洋权益的重要工具。近自由面非定常空化流动常伴随着脱落失稳、溃灭、空蚀等不稳定现象, 能够形成评估结构安全的控制载荷, 是航行器设计与性能优化的关键。

针对近自由面空化流动这一多相多界面含相变的流体力学前沿问题, 冲击与耦合效应课题组研究团队开展了绕回转体、水翼等典型结构流动的实验与数值模拟工作, 获得了自由面附近空泡非对称脱落与溃灭等主要特征, 揭示了自由面与非稳态空泡的耦合影响机制 (如图 1)。进一步, 发现了贴近自由表面时, 自由面与空泡间薄水层发生 Taylor 失稳能够诱导气体侵入, 从而形成稳定的通气局部空泡与通气超空泡 (如图 2), 可望实现稳定流动和减阻, 为未来近水面超高速航行体研制与发展提供了新的思路。相关结果已发表于 *Phys. Rev. Fluids*, *Int. J. Multiph. Flow*, *J. Fluids Eng.* 等期刊上。



近自由面云状空泡数值模拟结果与验证



近自由面通气局部空泡 (左) 与超空泡 (右)

## 周济福等参加第 27 届国际海洋与极地工程年会

2017 年 6 月 25-30 日, 第 27 届国际海洋与极地工程年会 (27th International Society of Offshore and Polar Engineering Conference) 在美国加州旧金山召开。此届年会共收到 50 多个国家 1340 篇论文, 共组织 11 场主题会议和 154 场专题讨论会, 涵盖水下系统、海啸与安全、极地科技、新能源与环境、高性能材料等十余个议题。

流固耦合系统力学重点实验室的周济福研究员、王旭助理研究员参加了此次会议, 分别做了题为《Numerical study on wave loads of the high-rise pile cap foundation of offshore wind turbines in East China Sea》和《Modelling wave trains from internal solitary waves in South China Sea》的分会报告, 各

自介绍了力学所在“海上风机基础水动力载荷计算”、“南海内孤立波传播演化”方面取得的最新成果，周济福研究员特别介绍一种能够减少波浪抨击的风机基础结构型式，引起了许多与会学者的浓厚兴趣和热烈讨论。

下一届国际海洋与极地工程年会定于 2018 年 6 月在日本札幌召开。

## 第二届非线性与相干结构国际会议在英国召开

第二届非线性与相干结构国际会议 (2<sup>nd</sup> IMA Conference on Nonlinearity and Coherent Structures) 于 2017 年 6 月 19 日至 6 月 21 日在英国诺维奇东安格利亚大学 (East Anglia University, Norwich) 召开。来自不同国家和地区的近 100 名代表参加了本次会议。第一届非线性与相干结构国际会议于 2011 年 7 月 6 日至 7 月 8 日在英国雷丁大学 (University of Reading) 召开。

我室王展研究员受组委会邀请赴会，做了题为《Stability and dynamics of two-dimensional capillary-gravity solitary waves》的学术报告。报告内容集中展示了非线性重力毛细波在稳定性和动力学研究上的最新进展，以及这些结果与非线性光学和高速列车铁轨运力学之间的深刻联系。王展研究员还受邀组织和主持了 21 日上午的报告。

在为期 3 天的会议中，共安排了 6 个大会报告，33 个邀请报告，报告内容反映了非线性水波数值方法、流体稳定性、布朗运动、波涡相互作用与波流相互作用、电/磁流体力学、流体界面动力学、大气地球物理流体力学、非线性波形及分岔机理等方面的最新国际进展。

## BIM 领域知名专家魏群教授受邀来我所进行学术交流

6 月 14 日, 地质体力学及应用课题组邀请华北水利水电大学魏群教授来力学所做了关于“数字图形介质理论及数值模拟与 BIM 结合的发展趋势”的研究报告, 魏群教授全面介绍了 BIM 的理论体系、基本构成、国际标准及国内的发展现状, 并详细介绍了他所带领的团队在钢结构 BIM 体系构建、大型桥梁工程 BIM 体系构建等方面的研究成果。会后, 力学所团队与魏群教授带领的团队进行了深入交流, 双方探讨了将数值模拟融入 BIM 体系的重要性及实现方式。

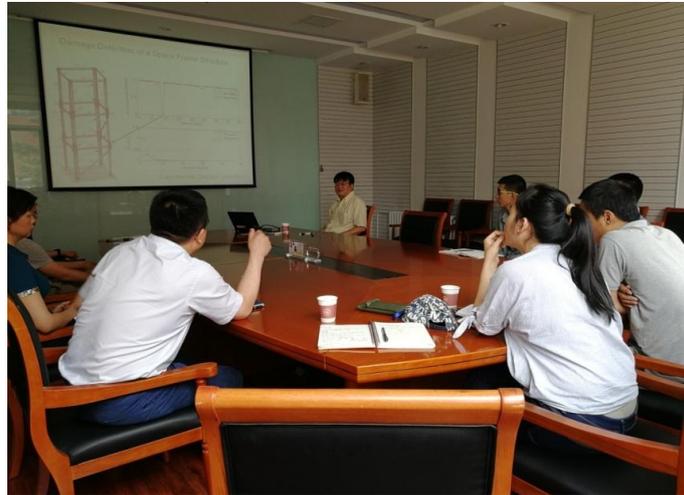
## 美国马里兰大学朱伟东教授来访并做学术报告

2017 年 5 月 31 日, 受中国科学院流固耦合系统力学重点实验室(LMFS) 宋宏伟研究员的邀请, 朱伟东教授在力学所会议中心 207 室进行学术会议, 做了题为“Recent advances in dynamic system research”的学术报告。

朱伟东教授现任美国马里兰大学巴尔的摩分校机械工程系教授, 创建并主管动力系统与振动实验室和激光振动测量技术实验室。1986 年获上海交通大学机械工程和计算学科学双学科学士学位, 1988 年获亚利桑那州立大学机械工程硕士学位, 1994 年获加利福尼亚州立大学伯克利分校博士学位。2004 年获美国国家科学基金会 Career 奖, 2007 年获美国无损测试学会 Fellowship 奖, 2008 年获中国教育部力学类长江学者奖励, 2009 年获 Daily Record 的马里兰年度创新人奖, 2012 年获中国国家千人计划奖励。现任美国机械工程学会(ASME)会士, 2007-2014 期间任 ASME Journal of Vibration and Acoustics 副主编。研究领域涉及动力学、振动、控制、应用力学、结构

健康监测、风能，以及相关理论发展、数值仿真、实验验证和工业应用，发表 SCI 学术论文 100 余篇。

朱教授在报告中介绍分布式结构系统的动力学与稳定性、基于动力学的结构损伤检测、无极变速器等领域的最新研究进展，包括考虑时变长度和(或)速度的运动物体动响应与稳定性问题。应用于一般非线性动力系统的增量谐波平衡方法；针对考虑弯曲刚度末端自由的松弛系绳提出一种新的非线性模型；针对基于模型的结构损伤检测问题，介绍了含损伤精确结构建模方法以及一种识别结构损伤位置和程度的鲁棒性方法；提出了基于激光扫描振动测量技术的损伤检测方法；介绍了新型无级变速器设计分析及控制问题。相关验证性实验结果也有所提及。在报告中介绍了光滑粒子流体动力学 (SPH) 学术交流会议由宋宏伟研究员主持，十余名师生参加了会议。报告内容精彩，引发了参会师生关于报告主题及相关热点问题的热烈学术讨论。



## 爱尔兰都柏林大学 Miguel Bustamante 副教授来访并做学术报告

2017 年 3 月 19 日至 3 月 26 日, 受中国科学院流固耦合系统力学重点实验室 (LMFS) 的邀请, 爱尔兰都柏林大学 Miguel Bustamante 博士访问力学研究所, 与相关课题组开展有关自然流动中的“波-波”相互作用的合作研究。3 月 23 日 Bustamante 博士在力学所会议中心 203 室进行学术交流会议, 做了题为“A typical late-time singular regimes accurately diagnosed in stagnation-point-type helical solutions of 3D Euler flows”的学术报告。

Miguel Bustamante 副教授于智利大学物理系获得本科与博士学位。其后在巴黎高等师范学校 (2004-2006) 及英国华威大学 (2006-2009) 从事博士后工作。目前 Miguel Bustamante 博士受聘于都柏林大学数学与统计学院担任副教授。其研究工作包括: 湍流、流体及其它一般非线性系统的极端事件与有限时间奇点、波动系统的能量传递机制等。

Bustamante 博士在报告中介绍了不可压缩三维 Euler 方程中奇点计算的新进展, 利用 Beale-Kato-Majda 定理, 对于具有无限能量的螺旋解的有限时间爆破提出一种具有极高精度的求解方法。学术交流会议由王展研究员主持, 十余名师生参加了会议。报告内容精彩, 引发了参会师生关于报告主题及相关热点问题的热烈学术讨论

## 美国辛辛那提大学王光宇博士来访并做学术报告

2017 年 6 月 2 日, 受中国科学院流固耦合系统力学重点实验室 (LMFS) 的邀请, 王光宇博士在力学所会议中心 204 室进行学术交流会议, 做了题

为“A Smoothed Particle Hydrodynamics Method and Its Applications in the Simulation of Energetic Materials”的学术报告。

王光宇博士于中南大学机械工程系获得学士和硕士学位。其后在美国辛辛那提大学获得了博士学位。在博士研究期间,王光宇博士通过分子动力学模拟研究了含能材料在微观尺度下的爆炸,并通过光滑粒子流体动力学 (SPH) 方法研究了含能材料在宏观尺度下的爆炸。此外,王光宇博士正致力于 Godunov SPH 的研究,并将其应用于高爆炸药的研究中。

王光宇博士在报告中介绍了光滑粒子流体动力学 (SPH) 方法及其在含能材料模拟中的应用,定量研究了各种因素,包括人工粘性、颗粒密度等因素对 SPH 模拟的影响;并介绍了一种更先进的 SPH 方法,Godunov SPH。学术交流会议由宋宏伟研究员主持,十余名师生参加了会议。报告内容精彩,引发了参会师生关于报告主题及相关热点问题的热烈学术讨论。