



# 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

2020 年第 1 期 (总第 18 期)

---

### 目 录

行稳致远——高速列车综合性能设计技术及服役可靠性研究.....	2
重型全流量域多相流量计工作进展.....	10
“新型材料粉化技术”知识产权成功转让.....	11
力学所在含填充物的点阵夹层板损伤识别研究中取得进展.....	12
非稳态分散体系的流变学特性研究进展.....	14
非均匀来流条件下喷水推进泵内压力脉动特性.....	16

# 行稳致远——高速列车综合性能设计技术及服役可靠性研究

在过去十年中，中国高速列车迎来了爆炸式的发展。从 CRH380A 系列列车开始，中国高速列车的自主研发踏上了快速路，一系列外观优美、性能良好的高速列车蓬勃涌现，也吸引着越来越多的人选择高铁出行。在乘坐高速列车出行的同时，很多人们也存在一些疑问，比如，高铁为什么可以跑这么快？这么快为什么还这么平稳？长时间运行的列车会不会不安全？今天我们一起，深度剖析高铁设计背后的科学。

## 一 “风驰电掣” 的背后

说起高速列车，我们印象最深的就是它“子弹头”形状的流线型头型(图 1)，与之前方方正正的“绿皮车”有明显的区别。高速列车从最初引进列车的运营速度 200km/h，逐渐提升到 300km/h、350km/h，甚至于正在研发的 400km/h，用风驰电掣形容绝不为过。在这风驰电掣的背后面临的第一个重要问题，就是降低运行空气阻力。但列车运行时的空气阻力很大么，有必要这么重视么？



图 1 高速列车的流线头型

列车运行时受到的空气阻力与速度的平方成正比，因此，“绿皮”列车运行就好比我们在微风中行走，设计人员基本上不用专门去考虑空气阻力的影响。可是，对于时速 200 公里以上的高速列车，空气阻力占列车总阻力的 75% 以上，设计者需要利用空气动力学原理，通过车头流线型、附属设备平顺化等优化设计来尽量减少空气阻力。

降低列车运行时的空气阻力是高速列车气动优化设计时的重要方向，但不是全部。减小高速列车交会压力波和隧道压力波也是设计者十分重视的问题。

列车会车时, 相对运动的列车车头对空气形成挤压, 便会在列车交会内侧的侧壁上产生压力波(图 2)。列车速度越高, 会车产生的压力波也就越大。两列车相向交会运行时产生的会车压力波作用在车体上会对列车侧壁和侧窗强度、列车运行稳定性和旅客乘坐舒适性产生不利影响, 甚至可能产生运行安全问题, 如车体侧窗破碎、车辆蛇形运动、轮缘与道轨因侧向冲击造成磨损等。如今列车的运行速度都在 200km/h 以上甚至是 350km/h, 会车压力波的变化幅值和最大正、负压力极值都会急剧增大, 有可能带来更大的负面效应。在列车气动外形设计方面, 加长列车流线型头部长度的, 采用扁宽型头型, 可以有效减小交会压力波幅值。

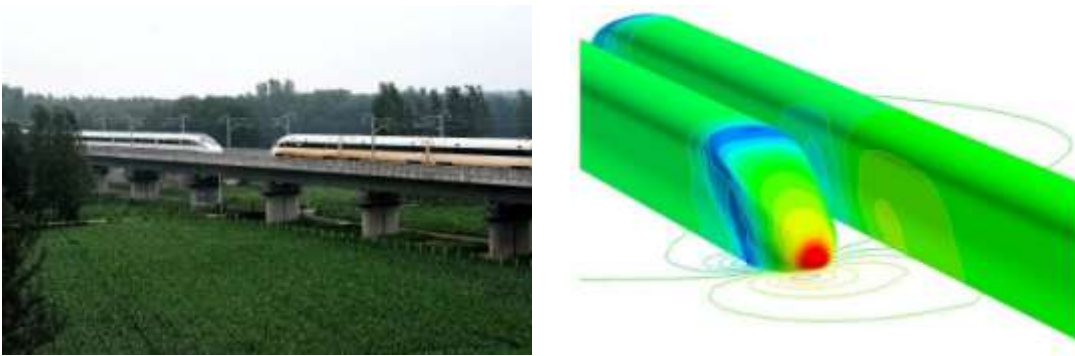


图 2 列车明线交会与会车压力波

高速列车在隧道内运行是最为复杂和恶劣的运行工况。列车隧道工况运行时产生的压力波在隧道内传播时, 会使得列车表面压力在短时间内发生剧烈变化(图 3), 这种剧烈的压力变化不仅考验着列车车体的强度, 还考验着列车的气密性, 如果列车气密性较差, 车外的压力波动会传入车内, 引起车内压力发生突变, 造成乘客耳鸣, 影响乘坐舒适性。一般地, 减小列车最大横截面积与隧道横截面积的比值(阻塞比), 可以有效地减弱隧道压力波的强度, 这也是高速列车一直在追求“苗条”和“瘦身”的原因之一。



图 3 列车通过隧道与隧道压力波

在空气中高速前行的列车引起空气流动紊乱，从而产生的气动噪声又是一个影响列车乘坐舒适性的气动问题(图 4)。

高速列车气动噪声能量与列车速度的 6-8 次方成正比，如果把列车速度从 200km/h 提高到 300km/h，气动噪声将提高约 10—14 分贝。根据空气动力学原理，设计人员把流线型车头设计的尖而长，把车辆断面积尽量减小，同时让车体尽量平整光滑不要出现凹凸的部分。为了减小高速列车气动噪声，除车体设计外，还要减小车辆顶部受流系统引起的气动噪声，为此设计人员对受电弓及其周边装置进行优化设计。安装受电弓导流罩、开发低噪声受电弓、采用低噪声绝缘子等来减少车顶受流系统的气动噪声。



图 4 高速列车气动噪声实验

## 二硬币为什么不倒?

前段时间，硬币在“复兴号”上长时间竖立不倒的视频刷爆朋友圈(图 5)，硬币 8 分钟不倒，车厢里玩积木，这样的场景，相信你已经见怪不怪了。但是，老话说的好，吃水不忘挖井人，能在“复兴号”里这么嗨，都是车辆动力学设计的结果。



图 5 行驶列车中的硬币

车辆动力学是研究列车车辆系统运动规律的学科,研究列车在各种运行条件时的运行状态、动力学响应,进而分析列车稳定性、安全性和平稳性。

我们乘坐列车时,会感觉车辆发生横向的一些晃动,这是高速列车在受到扰动情况下,列车会出现的蛇行运动,即车辆横摆和摇头的综合运动。蛇行运动是轮轨列车的一种特有的运动,当列车在平直轨道上低速运行时,蛇行运动的幅度会逐渐减小,存在一个临界车速,即临界速度。当列车超过临界速度之后,蛇行运动振幅不再衰减,意味着车辆失去稳定。临界速度是考察列车安全性的重要指标。

随着车速的增大,一些低速情况下不明显的问题,在高速时变得尤为重要,这里面比较典型的两点是气动载荷以及车轮高速旋转时的陀螺效应。研究表明,5级侧风产生的气动载荷就会使得高速列车的临界速度降低10%-30%;而车轮陀螺效应在一定程度上会改善车轮的稳定性,可以提高列车的临界速度约5-10%。

高速列车的轨道在实际上并不是光顺的,由于长期的运行,钢轨受到磨损,表面会出现不平整,轨道桥也会出现不同程度的沉降,引起轨道的不平顺,高速运行时轮轨的冲击会传递到车辆,引起车辆的振动。列车明线运行时气动载荷十分明显,流场的紊乱会引起气动力的波动,列车交会、过隧道时会产生气动冲击波,这些气动载荷都会引起车辆的振动。

为了保证高速列车的运行安全以及极好的平稳性,离不开动力学的设计与优化。而动力学优化设计的主要对象就是转向架。

转向架是高速动车组的“飞毛腿”。什么是转向架?转向架是一个铁路车辆专用名词,乍一听不好明白,实际上就是一个“小车”。这是一个由两个轮对、一个构架加上一些装置组成的“小车”,大小跟一辆普通轿车差不多,动车组车厢就搁在这种“小车”上,而且可以有一定程度的转动,这种“小车”被称为转向架(图7)。每节车厢下面有两个,因为在车厢下面,我们不容易看到它的“庐山真面目”。转向架就相当于“复兴号”的“腿脚”,在火车身子和火车轮子之间搭起一座和平友谊的桥梁保证“复兴号”的平稳运行,悬挂就相当于

“腿脚”上的关节保证腿脚活动利索、安全舒服。它最核心的作用就俩字——减振。



图 7 转向架图解 (动车转向架)

转向架的一系和二系悬挂是决定车辆稳定性和平稳性的关键, 对高速列车的悬挂参数的优化可以改善列车的动力学性能。抗蛇行减震器和二系横向减震器是影响临界速度的主要参数, 适当增大可以提高临界速度。为了过滤轮轨相互作用产生的高频冲击载荷, 一系悬挂中采用橡胶弹簧和阻尼器, 二系悬挂中采用了空气弹簧和各类阻尼器, 通过弹簧来隔离高频振动, 通过阻尼器来吸收振动能量。

### 三长途跋涉的可能

高速列车日复一日、年复一年的长时间奔跑, 我们不禁有一个疑问: 列车天天这样跑会不会坏掉? 我们需要怎样做才能保证列车活得更长? 这其实就是一个疲劳可靠性的问题。在高铁优美流线型外壳下, 是由成千上万零件组成的一个有机结构体, 结构体中有很很大一部分是高铁的力学承载部件。上面的车体是由外壳和铝合金骨架组成, 保障车体可以承受外部的气动力和车内座位、空调、卫生间、车窗等设备以及乘客的重量载荷。前面说过, 每一个车体下有两个转向架用于连接车体和车轮, 车体和转向架之间通过空气弹簧连接, 可以有效减

少由于轮轨作用产生的振动和噪声传到车内。高速列车力学承载部件受到的主要载荷来源有三个方面的：结构本身及设备重量的惯性载荷、列车高速运行时的气动载荷、以及轮轨相互作用产生的激扰载荷(图 8)。

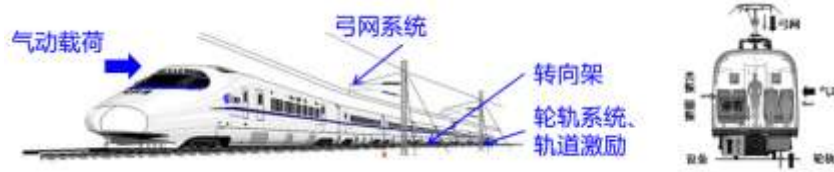


图 8 列车运行时的主要载荷来源

高速列车在行驶过程中，一些承载构件，比如高铁的轮轴、转向架等，需要承受周期性或变化的载荷作用。时间久了，就可能发生破坏(图 9)。因此，需要对这些承载构件进行可靠性研究。由于实际构件比较大，比如车轴，有 2 m 多长，直径约 900mm。直接采用车轴进行实验和研究比较费时间，而且费用也很高。因此，通常需要借助一些小尺度的样品（比如直径几毫米或十几毫米）的实验结果，再结合台架实验来研究实际构件的可靠性。



图 9 德国高铁车轴断裂照片 (Zerbst et al., 2013)

在对高铁承载部件进行可靠性分析和优化时，不仅需要对其局部结构进行力学响应分析，也需要从整体层面进行考虑。例如，高铁转向架结构作为连接车体和车轮的关键承载部件，其载荷分布十分复杂。为从系统层面研究以上三种主要载荷对转向架可靠性的影响，可以建立包含车体、转向架、轮对以及相关连接件的整车有限元模型，将试验测量或者气动计算等得到的载荷数据施加于

模型之上, 并展开计算分析, 再将整体计算得到的边界载荷用于转向架的局部结构分析(图 10)。通过数值模拟, 我们可以得到不同的载荷分量对结构可靠性的影响, 从而指导转向架结构的改进。研究表明, 由于车重引起的惯性载荷是结构受力的主要来源, 但气动载荷以及轮轨激扰引起的循环载荷是结构疲劳载荷的主要构成部分。

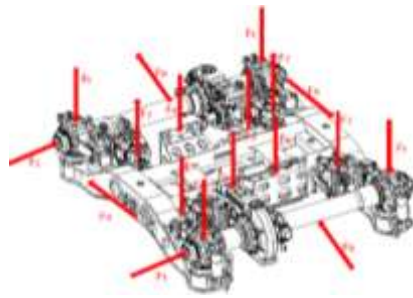


图 10 某型列车转向架结构载荷分布图

那么, 是什么样的能量供给模式, 为高速列车的高速、长途跋涉提供了可能? 高速列车采用电力牵引, 安装于列车顶部的受电弓与架设于铁轨上方的接触网接触, 将电能传导到车轴驱动电机, 为列车提供动力能源, 这一过程称为受流(图 11)。持续稳定的受流是列车长时间可靠运行的保障, 京沪高铁通车初期, 三天内 4 起事故有 3 起是弓网故障导致。



图 11 高速列车弓网

受电弓是一个铰接式机械构件, 靠自身结构保持与接触线的接触, 在运行中的振动易受其他因素影响, 接触网作为大跨度柔索系统, 属于低频柔性小阻尼结构, 对风载荷敏感, 易在受电弓上方产生快速纵向波动和横向摆动、碰撞冲击受电弓。当列车高速运行时, 产生的强气流加上环境风, 与弓网系统相互剧烈作用, 甚至产生显著的风致振动效应, 尤其在列车交会、隧道通过、强横风



等工况下, 振动效应更加明显。随着列车速度的提高, 弓网之间会产生较高频率、较大幅度的振动和异常碰撞冲击等, 导致焊缝开裂、疲劳裂纹产生, 弓网离线引起电弧, 烧蚀接触表面, 使列车受流质量变差, 影响列车的牵引供电性能, 已成为制约我国高速铁路发展的“瓶颈”之一。因而, 在考虑接触网不平顺和弹性波传播, 车体姿态改变, 轨道不平顺等因素对弓网系统振动影响的基础上, 开展弓网系统流固耦合分析, 研究气动荷载的时域和频域特性、结构振动特性、流场模态与结构模态、流场频率与结构振动/固有频率之间的耦合关系及演化规律等, 揭示弓网涡激振动机理, 为外形优化、主动控制和弓网结构参数优化等提供数据和技术支撑, 从根源上提高受流质量, 确保列车可靠平稳受流, 减少维修费用。

所“十三五”重点培育方向“高速列车综合性能设计技术及服役可靠性研究”项目研究团队, 前期主要针对“和谐号”和“复兴号”开展气动定型设计, 参与的“京沪高速铁路”项目2015年获国家科技进步特等奖, 主持的“高速列车气动优化设计及评估技术”项目2016年获力学学会科技进步一等奖。近年来, 在气动方面, 完成了京雄、国际互联互通(时速400公里)和京沪双层等高速列车气动设计和动模型实验技术。在高速列车服役可靠性方面, 以高速列车荷载分量贡献为出发点, 基于系统力学原理, 在国际上率先开展高速列车长时间服役系统可靠性评估方法和软件分析平台研究; 发展了从材料疲劳到结构件疲劳性能的预测方法, 成功应用于我国多种高铁车轴的疲劳寿命预测; 建立了高速受电弓归算参数数据库, 为在研高速受电弓性能评估和结构优化提供了设计参数; 2018年获力学学会自然科技二等奖。在平台研制方面, 完成了实验速度600km/h动模型改造、横风装置、受电弓6自由度振动等平台的方案设计, 正在加工制造, 必将为高速列车和高速磁浮列车研制、高速弓网关系研究提供了必备的实验手段。力学所已从高速列车空气动力学研究拓展到车辆动力学、冲击动力学、疲劳寿命可靠性等方面, 成为了我国轨道交通关键力学问题研究不可或缺的一支研究队伍。

(LMFS 流固耦合与数值计算课题组供稿)

## 重型全流量域多相流量计工作进展

在中国海洋石油总公司的十三五重大科技项目“海相砂岩油田“双特高”开发后期提高采收率技术”项目及 B 类先导专项“超常环境下系统力学问题与验证”支持下，于 2019 年末完成一次建模后，与海油方面进行会议沟通，根据会议纪要内容，为进一步适应平台使用条件，在二次建模中提高了设备撬装集成度，在处理流量不变的情况下，将多相流量计占地尺寸缩减了 64%，减小至  $2.25\text{m}^2$ 。

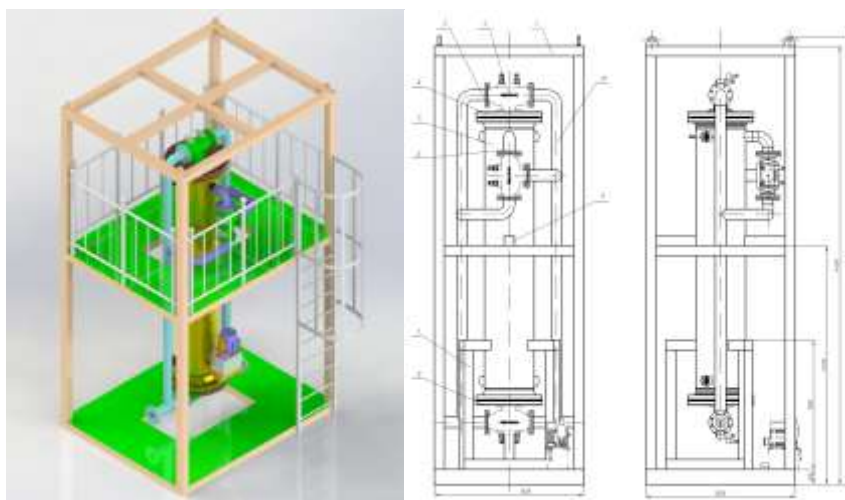


图 1.两次设计占地对比

目前重型全流量域多相流量计已经进入加工周期，主要部件加工进展按照计划进度进行，主要仪表已采购完成，计划于 6 月份完成总装，七月中旬向海油交付。



图 2. 从左至右分别是：加工中的计量管主体，电控液压三通阀主体，仪器整体撬架

(LMFS 多相流体力学课题组供稿)

## “新型材料粉化技术”知识产权成功转让

“基于液态  $\text{CO}_2$  卸荷的材料粉化技术”（简称新型材料粉化技术）是一种绿色、高效、节能的材料粉化技术。该技术通过高压液态  $\text{CO}_2$  渗透矿石后瞬间卸压形成的高压力梯度，将矿石直接粉化为微米级矿粉。广泛适用于煤、金属和非金属矿石粉化。该技术突破了传统机械能压缩破（粉）碎矿石的作用机理，充分利用天然矿石材料的低抗拉强度特性，用液态  $\text{CO}_2$  的相变能，取代传统矿石压缩破（粉）碎的机械能，将传统方法中克服矿石抗压强度转化为克服其抗拉强度，提高矿石破（粉）碎能量利用率，大幅度降低矿石破（粉）碎单位能耗。

新型矿石粉化工艺的特点：（1）短流程，只需矿石入仓-注入  $\text{CO}_2$ -加压-卸荷几个工序，矿石直接粉化为微米级矿粉；（2）能耗少，矿石的抗拉强度是其剪切强度的 10% 左右，通过克服矿石抗拉强度粉化矿石，将大幅度降低能耗；（3）成本低，是现有球磨工艺的 50%；（4）纯物理分离，不改变矿石物理特性。

2019 年 5 月, 新型材料粉化技术 (共 7 项专利打包), 委托中国科学院知识产权运营管理中心拍卖并转让给中科前衍 (深圳) 工程科学发展有限公司, 转让额为 800 万元 (捌佰万元整)

该专利包是中国科学院知识产权运营管理中心组织全院专利拍卖工作以来, 截至目前成交额度最高的。

(LMFS 工程地质力学及应用课题组供稿)

## 力学所在含填充物的点阵夹层板损伤识别研究中取得进展

点阵夹层板具备轻质、高强、隔热、隔震、屏蔽辐射等多功能性的特点, 在航天热防护等领域中有着广阔的应用前景。在夹层板内部填充轻质隔热材料, 可以更高效率地提升其在极端热力环境下的服役性能。在制备和服役过程中, 有可能产生内部的损伤与缺陷, 如节点与面板虚焊、夹芯桁架断裂、胞元的缺失等。这些损伤会引起点阵夹层板的力学性能变化: 降低结构的强度与刚度, 形成局部薄弱部位; 改变结构的固有频率等动力学特性, 引发结构共振; 降低结构临界屈曲温度, 增加屈曲失效的风险。因此, 对内部损伤进行早期识别, 对于避免灾难性事故具有重要意义。相较于无填充的点阵夹层板, 填充物一方面改变了结构特性, 另一方面进一步掩盖内部损伤, 给结构损伤识别带来新的问题。

中国科学院力学研究所热结构耦合力学课题组针对含填充物的点阵夹层板内部损伤识别问题, 提出一种基于结构动力学和 Teager 能量算子的损伤识别方法。为了综合考虑不同损伤对于结构低阶模态和高阶模态的影响, 在损伤敏感标识量中引入权重系数  $r$ 。通过数值计算和实验研究, 系统地讨论了该方法对于含填充点阵夹层板损伤识别的有效性和可靠性。通过获取面板上的响应信息, 该方法可以有效地识别结构内部的 1/4 胞元、1/2 胞元、单胞元及更大程度的胞元缺失损伤。同时, 针对存在多处、不同程度损伤的结构, 该方法也取得了很好的识别效果。

通过研究发现, 填充物的物性参数会对识别方法的有效性产生显著影响。随着填充物模量的增大, 结构内部的损伤特征趋于被掩盖。通过定义临界识别参数, 针对不同损伤特征, 可以获得损伤识别方法的适用区间及失效时的填充物临界值。

该研究以 *Damage identification of low-density material filled sandwich panels with truss core based on dynamic properties* 为题, 发表在国际著名的结构健康监测期刊 *Structural Health Monitoring: an international journal* (2019, 18(5-6): 1711-1721.) 上。力学所助理研究员路玲玲作为论文通讯作者, 硕士生乐杰为第一作者。该工作得到国家自然科学基金委青年项目、面上项目等的资助。

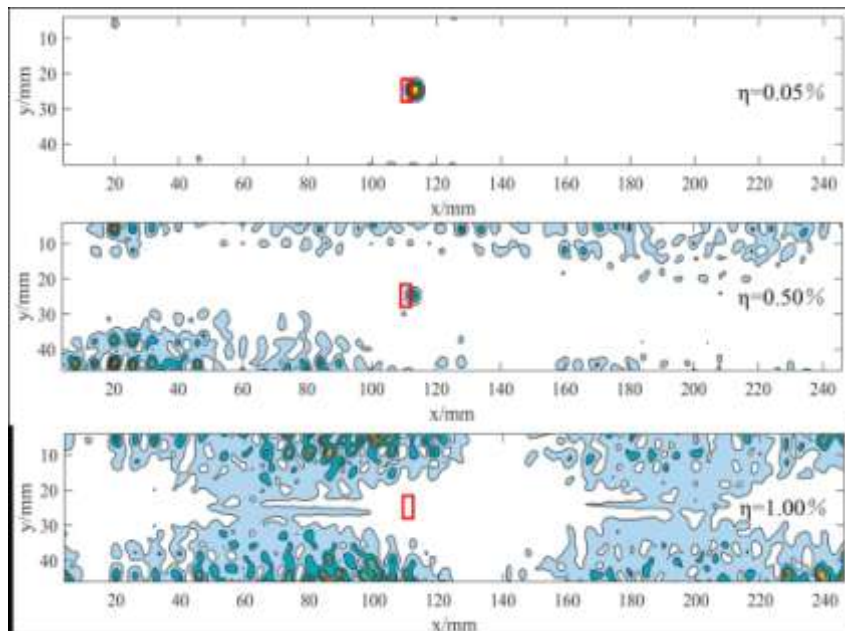


图 1. 1/2 胞元缺失随着填充物物性参数变化的识别效果

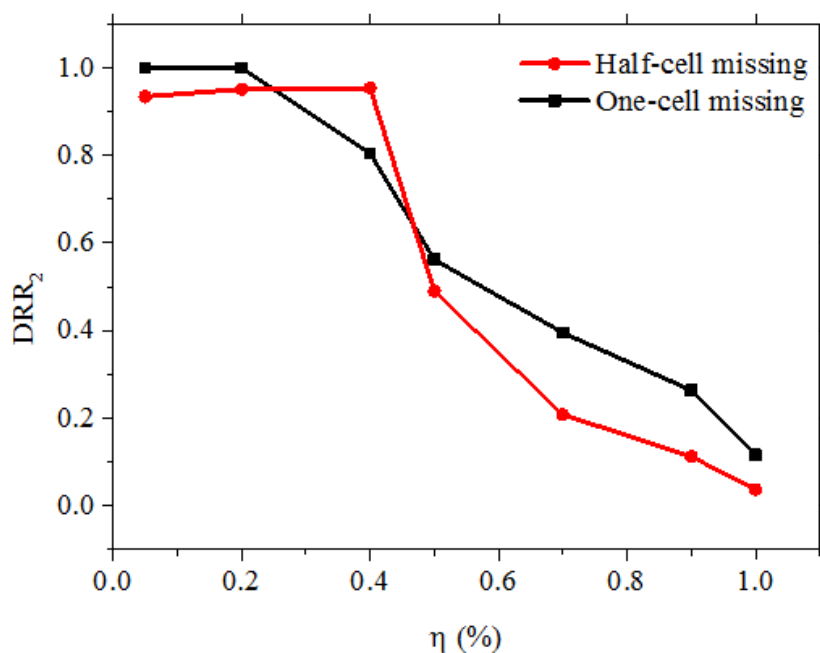


图 2. 识别方法有效性的临界参数曲线

(LMFS 热结构耦合课题组供稿)

## 非稳态分散体系的流变学特性研究进展

一种物质或者几种物质高度分散到另一种物质中所形成的体系叫做分散体系,分为稳态和非稳态两种状态。原油开采中,由于伴生水的存在,以及流动剪切和掺混的作用,油-水两相常以分散体系的状态存在,且由于分散相粒径较大,大都呈现为非稳定的状态。多相流理论中,针对上述分散体系可采用均相流模型对其流动中的压降等参数进行计算分析,而分散体系对应的表观黏度、本构关系等是必不可少的物性参数,同时,非稳态分散体系的流变学特性与胶体、分子等稳定分散体系区别明显,均呈现为非牛顿流体的特性。

近期,针对上述提到的油-水两相非稳态分散体系的表观黏度、线性黏弹性等流变学特性开展系统的理论和实验测试工作,通过非稳态分散体系稳定性和流变学特性的在线测量,给出了分散相颗粒的粒径、相含率、温度和剪切速率等因素对原油-水非稳态分散体系流变性特性的影响规律和微观机理。研究表明,原油-水非稳态体系的损耗模量  $G''$  随体积含油率的增加表现为先增加后减小的

趋势, 在连续相相转化点处达到峰值, 而储能模量  $G'$  受体积含油率影响较小 (图 1); 由黏性为主导到弹性为主导转变对应的临界剪切频率  $f$ , 随着分散相中值粒径的增大而减小, 即分散相粒径越大, 原油-水非稳态分散体系会更快的转向以弹性为主导的黏弹性特性 (图 1); 采用量纲分析的方法, 给出了油水非稳态分散体系表观黏度的计算模型, 首次综合考虑了分散相粒径以及剪切作用的影响, 通过文献中数据验证其具有较高的预测精度 (图 2)。

$$\eta_r = \exp\left(\frac{2.5\phi_d}{1 - k_\varepsilon\phi_d}\right) * \left(\frac{\eta_d}{\eta_c}\right)^h$$

$$\eta_r = (1 - k'_\varepsilon\phi_d)^{-2.5} * \left(\frac{\eta_d}{\eta_c}\right)^h$$

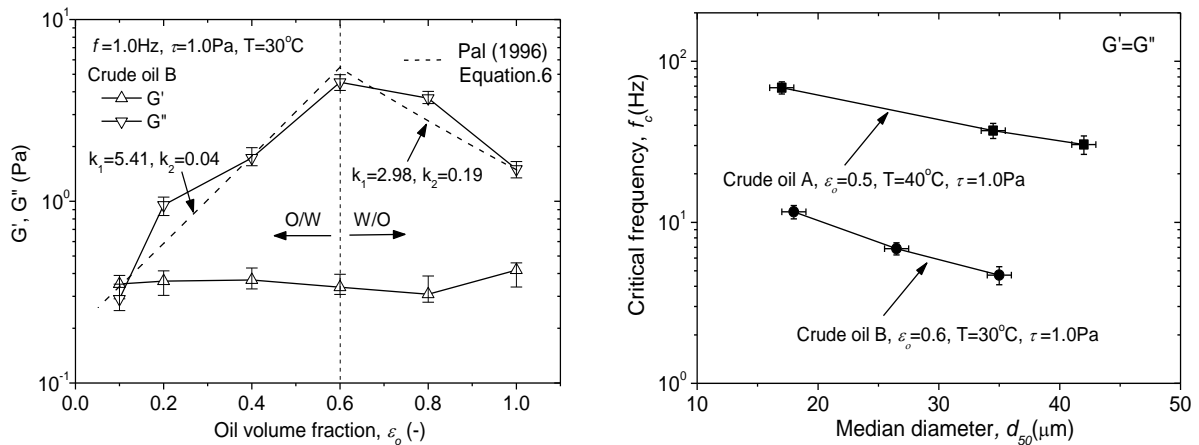


图 1.原油-水非稳态分散体系的线性黏弹性特征

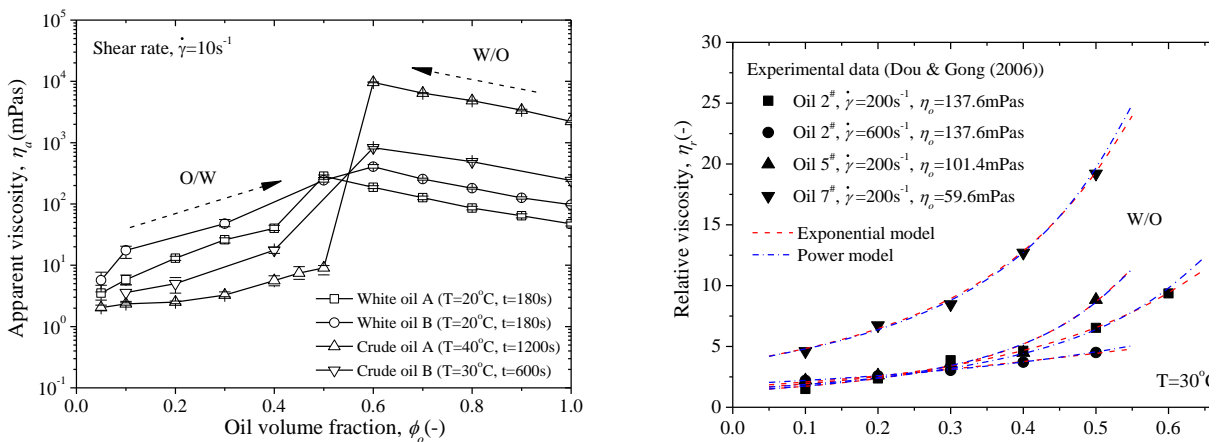


图 2.油-水非稳态分散体系的表现黏度变化规律及预测模型

该进展已成功应用于油水混输系统和管道式分离装置的设计, 实现了流程中压降等参数的精确计算, 相关理论成果发表在石油工程和分散科学领域内的主流期刊 (Zhang J., Xu J.Y., J. Dispersion Sci. Tech., 2019, 40(11): 1645-1656; Feng X.X., Zhang J., Zhang D., Xu J.Y., J. Petroleum Sci. Eng., 2019, 176: 141-149; Zhang J., Chen X.P., Xu J.Y., J. Petroleum Sci. Eng., 2019, 182: 106299)。上述工作得到了国家自然科学基金 (11972039/51509235)、LMFS 实验室青年基金、中科院战略先导专项 B 类 (XDB22030100) 和中海油企业委托项目等支持。

(LMFS 多相流体力学课题组供稿)

## 非均匀来流条件下喷水推进泵内压力脉动特性

喷水推进是一种特殊的船舶推进方式, 它利用推进泵喷出水流的反作用力来推动船舶前进, 并通过改变喷流方向来实现船舶操纵, 如图 1。与传统的螺旋桨推进相比, 喷水推进具有机动性和操纵性好、吃水浅、水声信号小、高航速时效率高、抗空化能力强等特点, 在高性能民用船舶、军用舰船以及两栖装甲车辆等方面有广阔的应用前景。喷水推进技术已被列为《中国制造 2025》“海洋工程装备及高技术船舶”领域未来发展的重点内容之一。

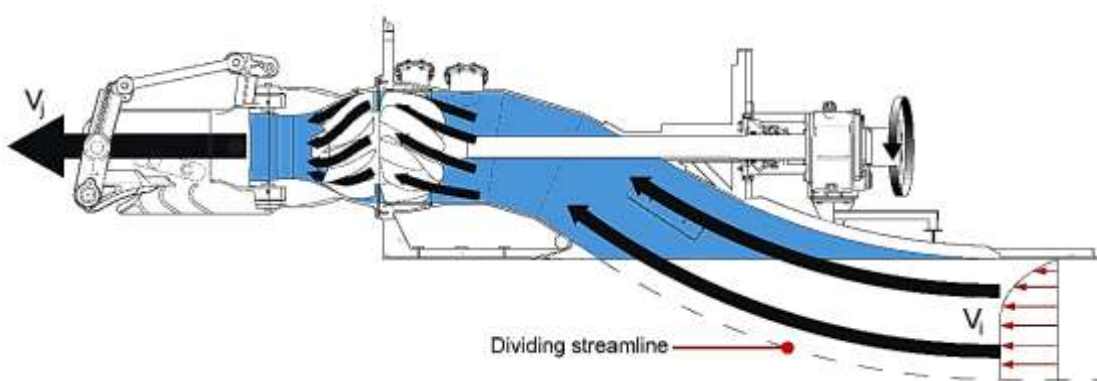


图 1 喷水推进装置的示意图

稳定性是推进泵性能的重要评价指标之一。推进泵在非均匀来流条件下运行, 不可避免地产生随时间变化的压力脉动, 并伴随着噪声, 有时甚至会引起管道系统的共振, 影响到系统的安全稳定运行。此外, 压力脉动诱发的振动将



造成口环、轴封和叶片的严重磨损，进而降低推进效率，缩短产品的使用寿命。因此，研究推进泵内压力脉动特性对于船舶安全稳定运行具有重要的意义。

由于推进泵配有前置进水流道，这必将造成推进泵来流的非均匀性，这是船用泵与常规陆用泵的重要区别。因此，冲击与耦合效应课题组研究了非均匀来流对推进泵能量特性和压力脉动特性的影响，如图 2 所示。研究结果表明非均匀来流会使推进泵的扬程和效率降低，并造成外特性剧烈波动；基于非定常的能量损失分析，非均匀来流会在进水流道和导叶内产生很大的能量损失，并在导叶后缘出现明显的流动分离。

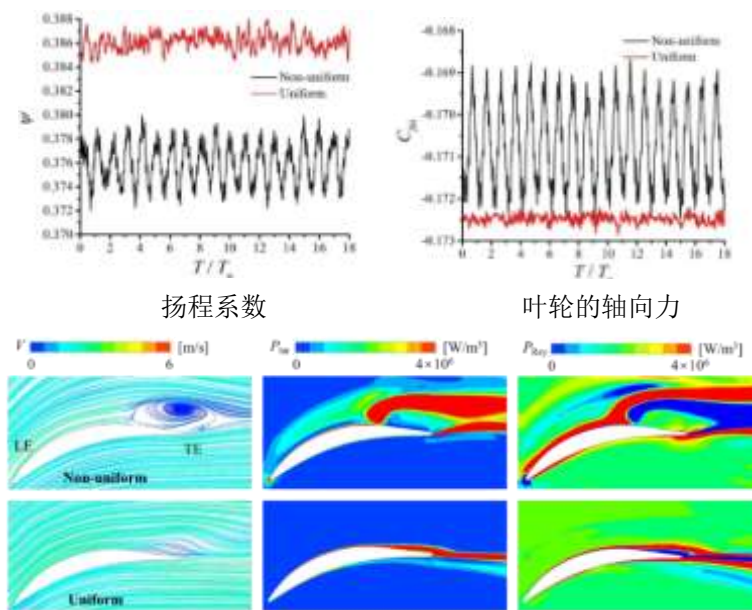


图 2 非均匀来流对推进泵外特性和压力脉动的影响

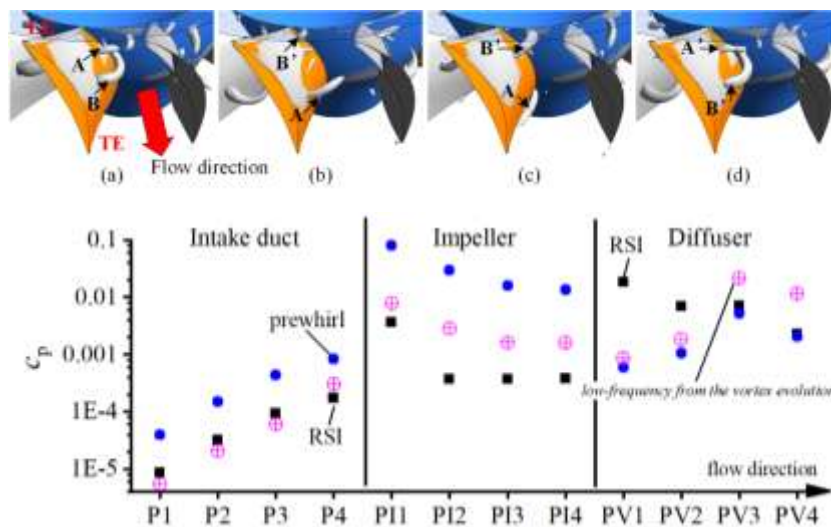


图 3 不同航速下推进泵内压力脉动传播特性

此外,课题组针对不同航速下推进泵内压力脉动传播特性做了初步研究,如图 3 所示。在不同航速下,进水流道和导叶内压力脉动存在两个主要频率分量:高频分量,主要是由于叶轮在旋转过程中切割定子后形成,其值为叶轮的旋转频率 ( $f_n$ ) 乘以叶片数;低频分量,主要是由导叶内尾迹涡的非定常演化所致。值得注意的是,在航速为 45 节时,叶轮进口处流体在旋转效应和非均匀来流的耦合作用下,呈现出周向运动,其主频为叶轮转动频率。相关研究工作发表在 *Ocean Engineering* [2020, 203:107218]、*Renewable Energy* [2020, 153: 1042]。

(LMFS 冲击与耦合效应课题组供稿)