

目 录

大会报告

非浮力驱动气泡阻力特性的数值研究

Numerical investigation on the drag force of a non-buoyancy driven bubble

张凌新，周泽才，邵雪明

ZHANG Ling-xin, ZHOU Ze-cai, SHAO Xue-ming..... (1)

深水油气钻采井筒多相流动理论前沿问题研究进展

孙宝江、孙小辉、娄文强

SUN Bao-jiang, SUN Xiao-hui, LOU Wen-qiang .. (8)

多孔介质热对流的拉格朗日动力学和传热特性

Lagrangian dynamics and heat transfer in porous media convection

孙超，刘爽，蒋林峰，汪程

SUN Chao, LIU Shuang, JIANG Lin-feng, WANG Cheng..... (15)

海洋圆柱结构流激振动及其抑制研究

Flow-induced vibration and VIV suppression for offshore circular cylinders

王嘉松

WANG Jia-song (22)

基于现有船体的小型智能全电船的设计与实现

Design and Implementation of a small intelligent all-electric ship based on the existing hull

蒋仁炎，俞万能，刘建闽

JIANG Ren-yan, YU Wan-neng, LIU Jian-min..... (33)

复杂边界下水下爆炸的欧拉有限元方法数值模拟

Numerical simulation of underwater explosion under complex boundaries by Eulerian finite element method

唐皓，刘云龙，张阿漫

TANG Hao, LIU Yun-Long, ZHANG A-Man..... (39)

圆柱涡激振动的模型试验和离散涡法开发研究

Model testing of VIV of circular cylinders and development of discrete vortex method

宗智，周力，闫超群

ZONG Zhi, ZHOU Li, YAN Chao-qun..... (53)

湍流噪声的大涡模拟

何国威，王士召，吴霆，周志腾

HE Guo-wei, WANG Shi-zhao, WU Ting, ZHOU Zhi-teng.....	(63)
一种用于流动模拟及建模的机器学习方法	
A NSEINN for solving and discovering the fluid dynamics	
张伟	
ZHANG Wei	(64)

分会场主题报告

基于格子 Boltzmann 方法的气泡群演化研究	
A numerical study on bubble cluster evolution by lattice Boltzmann method	
陈效鹏, 师亚祯, 王体康, 罗凯, 李代金	
CHEN Xiao-peng, SHI Ya-zhen, WANG Ti-kang, LUO Kai, LI Dai-jin	(71)
大跨度悬索桥梁风致振动时域分析方法研究	
Wind induced load effects of long cable-supported bridges using time-domain simulations	
许玉旺, 张萌萌, 付世晓, 任浩杰	
XU Yu-wang, ZHANG Meng-meng, FU Shi-xiao, REN Hao-jie	(77)
混流式水轮机部分负荷工况叶道空化涡不稳定流动特性及抑制措施研究	
Investigation into unsteady flow characteristics and alleviation of inter-blade cavitation vortex in Francis turbine operating at part load condition	
郭鹏程, 孙龙刚	
GUO Peng-cheng, SUN Long-gang	(90)
初始条件对旋转圆柱间隙流动的影响	
Influence of the initial condition on rotating flows between coaxial cylinders	
胡海豹, 文俊, 张文云, 任刘珍	
HU Hai-bao, WEN Jun, ZHANG Wen-yun, REN Liu-zhen....	(99)
水下气泡与浮动的带孔冰板间的流固耦合数值模拟	
Numerical simulation of fluid-solid coupling between the underwater bubble and a floating ice plate with a hole	
倪宝玉, 潘逸涛	
NI Bao-yu, PAN Yi-tao	(106)
西南山区暴雨山洪致灾机理探讨	
Disaster mechanism of flash flood in the Mountains of Southwest China	
王协康, 刘兴年, 杨坡, 许泽星	
WANG Xie-kang, LIU Xing-nian, YANG Po, XU Ze-xing	(112)
Liutex 相似律及 Liutex 动力学	
Liutex similarity and Liutex dynamics in turbulence	
王义乾, LIU Chao-qun	
WANG Yi-qian, LIU Chao-qun.....	(118)

黏性不可压流体中球形气泡振动的分段近似解析解 Piecewise approximate analytical solution for gas-filled spherical bubble in an incompressible viscous fluid	
秦玉鹏, 王振, 邹丽 QIN Yu-peng, WANG Zhen, ZOU Li.....	(123)
管道式气液旋流器分离特性研究 Research on separation characteristics of pipeline gas-liquid cyclone	
刘硕, 张健, 王黎松, 侯林彤, 许晶禹 LIU Shuo, ZHANG Jian, WANG Li-song, HOU Lin-tong, XU Jing-yu	(131)
混流泵瞬态加速流空化的数值模拟与实验研究 Numerical simulation and experimental research on cavitation of accelerating flow in mixed flow pump	
周强, 顾琦, 黄亚冬, 张德胜 ZHOU Qiang, GU Qi, HUANG Ya-dong, ZHANG De-sheng	(138)
船舶快速性数值试验水池参数化建模方法研究 Parametric modelling method of numerical tank for ship resistance and propulsion performance prediction	
刘李为, 张志国, 王清, 张忠彪, 冯大奎 LIU Li-wei, ZHANG Zhi-guo, WANG Shuang, ZHANG zhong-biao, FENG Da-kuai.....	(151)
层析水波理论最新研究进展 Recent progress on the Green-Naghdi water-wave theory	
赵彬彬, 段文洋 ZHAO Bin-bin, DUAN Wen-yang.....	(163)
海底柔性悬跨管的振动响应及管床拍击实验研究 Experimental investigation on vortex-induced vibration and solid-structure impact of near-wall flexible pipeline	
朱红钧, 赵宏磊 ZHU Hong-jun, ZHAO Hong-lei.....	(170)
船舶频域运动计算的区域分割法及其在初步设计中的应用 Domain decomposition method for ship motion and application in initial stage of ship design	
朱仁传, 杨云涛, 黄山, 查乐, 尚凡成 ZHU Ren-chuan, YANG Yun-tao, HUANG Shan, ZHA Le, SHANG Fan-chen.....	(176)

水动力学基础

利用 GREEN-NAGHDI 模型对直墙前立波的数值模拟 Numerical simulation of standing waves in front of a vertical wall using Green-Naghdi model	
苏高飞, 勾莹, 滕斌 SU Gao-Fei, GOU Ying, TENG Bin	(186)

浅水波(Whitham-Broer-Kaup)方程的一些新解 Some new solutions of the Whitham-Broer-Kaup equation 王雅吉, 徐航, 吴瀚杰, 郭维浩, 沈钰修 WANG Ya-ji, XU Hang, WU Han-jie, GUO Wei-hao, SHEN Yu-xiu.....	(196)
基于重正化群方法的涡黏性模型改进 Modification of eddy viscosity model based on renormalization group method 刘正锋, 张隆辉 LIU Zheng-Feng, ZHANG Long-hui.....	(202)
A study of the Acoustic-wave effects inside a single oscillating bubble YU Yi-quan, ZONG Zhi (209)	
剪切稀变流体对绕水翼空化流动特性的影响研究 Study on the influence of shear-thinning fluid on the characteristics of cavitating flow around hydrofoil 王璐, 王顺, 刘平安, 郑智颖 WANG Lu, WANG Shun, LIU Ping-an, ZHENG Zhi-ying.....	(219)
仿生表面结构对水翼水动力特性的影响研究 Study on the effect of bionic surface structure on hydrodynamic properties of hydrofoil 刘洋, 陈帅, 王于, 颜培凯, 于凯 LIU Yang, CHEN Shuai, WANG Yu, YAN Pei-kai, YU Kai	(225)
波浪中带窄缝浮冰水弹性响应的解析研究 Analytical investigation of wave-induced hydroelastic response of ice sheets with a gap 邝庆文, 宁德志, 张崇伟 KUANG Qing-wen, NING De-zhi, ZHANG Chong-wei.....	(232)
水下超疏水表面平板边界层自然转捩位置的数值研究 A Numerical study on the natural transition locations in the flat-plate boundary layers on superhydrophobic surfaces 刘斌, 张永明 LIU Bin, ZHANG Yong-ming.....	(238)
波浪极值分析中的不确定性 Uncertainties in extreme wave analysis 孙泽, 刘小龙, 陈文炜, 蔡志文, 叶永林 SUN Ze, LIU Xiao-long, CHEN Wen-wei, CAI Zhi-wen, YE Yong-lin.....	(246)
基于能量观点的双泡相互作用研究 Interaction during bubble collapse 卞真东, 杜特专 BIAN Zhen-dong, DU Te-zhuan	(256)
两种壁面沟槽类型对 TLV 抑制机理的模拟研究 Numerical study of suppression effect of casing grooves on tip leakage vortex 毕祯, 张凌新, 邵雪明 BI Zhen, ZHANG Ling-xin, SHAO Xue-ming.....	(266)

自由响应双浮体窄缝内流体共振研究

Numerical study on fluid resonance in narrow gap between twin floating barges

李娅杰, 黄亚冬, 龙云

LI Ya-jie, HUANG Ya-dong, LONG Yun (272)

基于仿生端面结构的水翼叶顶泄漏流消涡控制数值研究

Numerical investigations of the vortex suppression in the tip leakage flow of a hydrofoil via bionic geometries

黄亚冬, 张德胜, 李娅杰, 顾发东

HUANG Ya-dong, ZHANG De-sheng, LI Ya-jie, GU Fa-dong..... (279)

关于平板边界层时平均壁面垂向速度壁面律的讨论

Discussion about the law-of-wall for vertical velocity of the flat-plate boundary layer

丁一鸣, 王铎, 曹博超, 徐弘一

DING Yi-ming, WANG Duo, CAO Bo-chao, XU Hong-yi..... (285)

多颗粒在 Giesekus 流体 Poiseuille 流场中的异常迁移

Abnormal migration of multi-particles in the Poiseuille flow of a Giesekus fluid

刘炳瑞, 林建忠

LIU Bing-rui, LIN Jian-zhong..... (290)

布朗凝并中粒子群的动能耗散率

The dissipation rate of kinetic energy for Brownian coagulation

谢明亮

XIE Ming-liang..... (296)

空化对叶顶间隙泄漏流动影响的数值模拟研究

Numerical simulation of the influence of cavitation on tip clearance flow

徐默涵, 程怀玉, 季斌

XU Mo-han, CHENG Huai-yu, JI Bin..... (301)

近壁面空泡与常压气泡的耦合作用研究

On the interaction between a cavitation bubble and a gas bubble near a rigid wall

黄潇, 宋健, 胡海豹, 杜鹏

HUANG Xiao, SONG Jian, HU Hai-bao, DU Peng..... (307)

MCC 内波模型的色散关系研究

Study on dispersion relation of MCC Internal Wave Model

张天钰, 赵彬彬, 王泽航

ZHANG Tian-yu, ZHAO Bin-bin, WANG Ze-hang..... (313)

自由液面对直航潜艇水动力性能影响分析

The numerical investigation on the effect of the freesurface to the submarine in straightahead

李鹏, 王文全, 王超, 韩阳, 郭春雨

LI Peng, WANG Wen-quan, WANG Chao, HAN Yang, GUO Chun-yu..... (319)

柔性板的自推进运动: 前缘的边界条件如何影响自推进性能

Locomotion of a flexible plate: How the boundary condition of the leading edge affects the self-propulsion performance

吴文波

WU Wen-bo..... (327)

层析水波理论核心速度假设的合理性验证研究

- Research on rationality verification of the core velocity assumption in Green-Naghdi theory
李明杰, 赵彬彬, 段文洋
LI Ming-jie, ZHAO Bin-bin, DUAN Wen-yang (334)
- 强非线性波浪的高级别层析水波理论和高阶谱方法数值模拟精度对比研究
A comparative study on simulating precision of the strong nonlinear waves by using the HLIGN equations and the HOS method
郑坤, 赵彬彬, 段文洋
ZHENG Kun, ZHAO Bin-bin, DUAN Wen-yang (340)
- 层析内波理论色散关系研究
Study on dispersion relation of the Green-Naghdi internal-wave theory
王战, 赵彬彬, 段文洋
WANG Zhan, ZHAO Bin-bin, DUAN Wen-yang (347)
- 正弦潜堤的波浪布拉格反射的数值模拟研究
Numerical simulation of wave Bragg reflection of submerged sinusoidal breakwater
张金凤, 季超群, 郑枫, 张庆河
ZHANG Jin-feng, JI Chao-qun, ZHENG Feng, ZHANG Qing-he (353)
- 基于自由面风压扰动方法的强非线性波浪模拟
Strong nonlinear wave simulation based on free surface wind pressure disturbance method
徐杨, 赵彬彬, 段文洋, 梁辉
XU Yang, ZHAO Bin-bin, DUAN Wen-yang, LIANG Hui (359)
- 不同雷诺数下的弦杆绕流流场分析
Analysis of flow field around chord under different Re
林海花, 孙承猛
LIN Hai-hua, SUN Cheng-meng (365)
- 射流空蚀过程噪声频谱特征研究
Acoustic spectrum of erosion process induced by cavitating jet
曹彦涛, 彭晓星, Mohamed Farhat, 颜开
CAO Yan-tao, PENG Xiao-xing, MOHAMED Farhat, YAN Kai (372)
- 三维弹性楔形体在波浪条件下入水砰击的耦合求解
The coupling solution of three dimensional elastic wedge under wave condition
孙哲, 柳光军, 李恒
SUN Zhe, LIU Guang-jun, LI Heng (378)
- 回转体垂直带攻角入水流场演化及载荷特性试验研究
Experiment study on flow field evolution and load characteristics of water entry of are volutionbody with an angel of attack
史崇镔, 孙铁志, 张桂勇, 宗智, 李海涛
SHI Chong-bin, SUN Tie-zhi, ZHANG Gui-yong, ZONG Zhi, LI Hai-tao (386)
- 双圆柱耦合水动力性能分析
Hydrodynamic performance analysis of coupled double cylinders
王于, 韩阳, 刘洋
WANG Yu, HAN Yang, LIU Yang (394)
- 椭圆水翼梢涡空化噪声迟滞现象研究
Experimental study on noise hysteresis of tip vortex cavitation for an elliptical hydrofoil
宋明太, 刘玉文, 徐良浩, 唐登海
SONG Ming-tai, LIU Yu-wen, XU Liang-hao, TANG Deng-hai (400)
- 系泊状态下仿金枪鱼推进水动力与流场研究

Research on hydrodynamics and fluid field of tuna-like propulsion under mooring 苏博越, 高德宝, 白亚强, 翟树成, 张军 SU Bo-yue, GAO De-bao, BAI Ya-qiang, ZHAI Shu-cheng, ZHANG Jun.....	(406)
流动的相似理论	
Similarity theory of flow 周晓泉, 周文桐, 胡新启, 陈日东 ZHOU Xiao-quan, ZHOU Wen-tong, HU Xin-qi	(415)
仿生柔性的流场与阻力的数值研究	
Numerical simulation of drag and flow fields for bionic compliant surface 黄苗苗, 张楠, 卜淑霞, 朱爱军 HUANG Miao-miao, ZHANG Nan, Bu Shu-xia, ZHU Ai-jun.....	(422)
屈服幂律流体中气泡碰并运移特性模拟	
Simulation of bubble collision and migration characteristics in yielding power law fluid 赵欣欣, 闫相桢, 蔡德军, 姜志晨, 尹法领, 张恒通 ZHAO Xin-xin, YAN Xiang-zhen, CAI De-jun, JIANG Zhi-chen, YIN Fa-ling, ZHANG Heng-tong	(428)
通气空泡界面流动特征	
The characteristics and instability of ventilated cavity interface 王志英, 张敏弟, 王国玉, 黄彪, 王展, 王一伟 WANG Zhi-ying, ZHANG Min-di, WANG Guo-yu, Huang Biao, WANG Zhan, WANG Yi-wei	(435)
不同几何形状水下远场噪声分析	
Analysis of underwater far-field noise for different geometries 袁常乐, 万德成 YUAN Chang-le, WAN De-cheng.....	(440)
自由液面与刚性边界之间空泡溃灭特性实验研究	
Numerical solution of hydrodynamic stability equation of unbounded domain flow with coordinate transform 黄国豪, 张敏弟, 韩磊, 黄彪 HUANG Guo-hao, ZHANG Min-di, HAN Lei, HUANG Biao.....	(448)
基于 Stokes 展开的圆柱高阶非线性波浪载荷估算模型	
An approximation model for nonlinear wave induced moment on a vertical surface-piercing column 冯兴亚, 李晔, 刘政良 FENG Xing-ya, LI Ye, LIU Zheng-liang.....	(457)
驱动压强对水下气液两相射流掺混的影响	
Effect of pressure jump on the mix of underwater two-phase gas-liquid jet in cross flow 温明瑾, 刘筠乔, 王本龙 WEN Ming-jin, LIU Yun-qiao, WANG Ben-long.....	(465)
水轮机尾流判别	
Wake identification for tidal turbine 范准, 李山, 魏方以, 李晔 FAN Zhun, LI Shan, LI Ye	(473)

水动力学试验与测试技术

穿浪内倾船型非线性波浪载荷模型试验研究 Model test study on the nonlinear wave load of wave-piercing tumblehome ship 魏跃峰, 刘震, 夏召丹 WEI Yue-feng, LIU Zhen, XIA Zhao-dan.....	(479)
--	-------

冰桨碰撞对螺旋桨水动力性能影响试验研究 Experimental research on the ice-propeller collision effects to hydrodynamic performance of marine propeller	
武珅, 宋明太, 张国平, 范伟 WU Shen, SONG Ming-tai, ZHANG Guo-ping, RUI Wei.....	(488)
基于浮式平台的环境测量技术研究及验证 Research and verification on the technology of environmental measurement on a platform	
陈文伟, 蔡志文, 刘小龙, 孙泽, 张海华, 叶永林 CHEN Wen-wei, CAI Zhi-wen, LIU Xiao-long, SUN Ze, ZHANG Hai-hua, YE Yong-lin	(496)
溃坝波掺气流动特性的实验研究 An experimental study on flow kinematics of dam-break in a tank	
谭挺, 马玉祥, 董国海, 牛旭阳 TAN Ting, MA Yu-xiang, DONG Guo-hai, NIU Xu-yang.....	(502)
基于相位差修正的非线性波边界层壁面切应力模型 A modified bottom shear stress model of nonlinear waves based on phase difference	
谢益芹, 周济福, 王旭 XIE Yi-qin, ZHOU Ji-fu, WANG Xu	(508)
基于机械式自动搅拌的标准悬沙浓度场 测试技术及应用 Testing technology and application of standard suspended sediment concentration field based on Mechanical automatic agitator	
高术仙, 韩鸿胜 GAO Shu-xian, HAN Hong-sheng.....	(514)
基于 Stacking 的船舶阻力快速预报模型研究 Research on ship resistance fast prediction model based on stacking	
付万谦, 李廷秋 FU Wan-qian, LI Ting-qi	(521)
内孤立波对水平方柱与圆柱作用力特性 比较的实验研究 Experimental study on comparison of force on horizontal square cylinder and horizontal circle cylinder exerted by internal solitary wave	
王少东, 魏岗, 杜辉, 王欣隆, 徐俊楠 WANG Shao-dong, WEI Gang, DU Hui, WANG Xin-long, XU Jun-nan	(527)
水下航行体艏部转捩区激励特性试验研究 Experimental study on excitation characteristics of transition zone near the bow of underwater vehicle	
刘进, 吕世金, 高岩 LIU Jin, LYU Shi-jin, GAO Yan	(536)
分层流体中拖曳体内波尾迹水下/水面时空特征试验研究 Experimental study on temporal-spatial characteristics of water surface flow and underwater flow for internal waves generated by towed body in stratified fluid	
高德宝, 张军, 周根水, 苏博越, 姚志崇, 洪方文, 王军, 周志权 GAO De-bao, ZHANG jun, ZHOU Gen-shui, SU Bo-yue, YAO Zhi-chong, HONG Fang-wen, WANG Jun, ZHOU Zhi-quan.....	(543)
高负荷大侧斜螺旋桨推力下降性能试验和数值研究 Numerical and experimental investigations on thrust breakdown of high-skew propellers	
王建强, 万初瑞, 孔为平, 周旻, 丁举 WANG Jian-qiang, WAN Chu-rui, KONG Wei-ping, ZHOU Min, DING Ju.....	(554)

基于 TOMO-PIV 技术的活鱼游动流场试验研究	
Experimental study on three dimensional flow field of a swimming fish based on Tomo-PIV technique	
苏博越, 高德宝, 张军, 王洪平, 魏润杰	
SU Bo-yue, GAO De-bao, ZHANG-Jun, WANG Hong-ping, WEI Run-jie.....	(562)
屈服应力流体中气体悬浮实验研究	
Experimental study on gas suspension in yield stress fluid	
郭兵, 王志远, 潘少伟, 娄文强, 仇志	
GUO Bing, WANG Zhi-yuan, PAN Shao-wei, LOU Wen-qiang,ZHANG Zhi.....	(570)
超临界流体在水平受热通道内的流动不稳定性试验研究	
Experimental investigation of flow instability for supercritical R134aflowin a heated tube	
颜建国, 郭鹏程	
YAN Jian-guo, GUO Peng-cheng	(584)
孤立波作用下临界淹没平板的俯仰力矩变化特征	
Characteristics of pitching moment of critically submerged plate in solitary wave	
杨凯恩, 王千, 刘桦	
YANG Kai-en, WANG Qian, LIU Hua	(590)
串列拍动翼的能量采集性能实验研究和数值模拟	
Experimental and numerical simulation study on the energy harvesting performance of tandem flapping foils	
单磊, 徐文华, 雷洁, 许国冬	
SHAN Lei, XU Wen-hua, LEI Jie, XU Guo-dong.....	(597)
顶浪规则波中标准运动响应试验不确定度分析	
Uncertainty analysis for motion response experiment of standard model in heading regular wave	
湛俊华, 匡晓峰, 张凤伟	
ZHAN Jun-hua, KUANG Xiao-feng, ZHANG Feng-wei.....	(606)
循环水槽中轴流泵试验装置水动力特性数值模拟研究	
Channel and axial flow pump hydrodynamic performance simulation in CLCC environment	
周斌, 樊晓冰, 李亮, 董新国	
ZHOU Bin, FAN Xiao-bin, LI Liang, DONG Xin-guo.....	(616)
湍流边界层对数律区相干结构的 Tomo-TRPIV 实验研究	
Tomo-TRPIV measuremental investigation of coherent structure in logarithmic sublayer of turbulent boundary layer	
王鑫蔚, 姜楠	
WANG Xin-wei, JIANG Nan.....	(625)
串列双圆柱流激振动响应的风洞实验研究	
Flow-induced vibration of two cylinders in tandem arrangement using wind tunnel experiment	
胡中明 王嘉松 孙远坤	
HU Zhong-ming, WANG Jia-song, SUN Yuan-kun.....	(634)

计算流体力学

船后多推进器布局及干扰数值仿真研究

- The numerical simulation of the distribution and interference between multi-thrusters after the ship hull
翟树成, 马艳, 刘登成, 洪方文
Zhai Shu-cheng, MA Yan, LIU Deng-cheng, HONG Fang-wen (641)
- 短峰不规则波的 CFD 数值模拟方法研究
Research on CFD numerical method for short-crested irregular wave simulation
焦甲龙, 黄松兴, 陈超核
JIAO Jia-long, HUANG Song-xing, CHEN Chao-he (648)
- 短峰不规则波中船舶耐波性 CFD 模拟研究
CFD simulation of sea keeping performance of ship in short-crest irregular waves
黄松兴, 焦甲龙, 陈超核
HUANG Song-xing, JIAO Jia-long, CHEN Chao-he (654)
- 弹性冰群与波浪相互作用的数值模拟
Numerical simulation of water waves interacting with elastic ice floes
张崇伟, 庄乾泽, HUANG Luo-feng, 宁德志
ZHANG Chong-wei, ZHUANG Qian-ze, HUANG Luo-feng, NING De-zhi (661)
- 基于直角网格的多相流模型模拟楔形体由自由入水
Numerical solution of hydrodynamic stability equation of unbounded domain flow with coordinate transform
辛建建, 石伏龙
XIN Jian-jian, SHI Fu-long (667)
- 基于动力波法的洪水演进过程数值模型
Numerical model for flood evolution process based on dynamic wave method
汪煜, 侯精明, 张兆安, 马利平, 王俊珲
WANG Yu, HOU Jing-ming, ZHANG Zhao-an, MA Li-ping, WANG Jun-hui (675)
- 基于时域混合源的船舶运动与载荷预报研究
Research on prediction method of ship motion and load based on time domain hybrid source
唐浩云, 张显库, 田佰军, 任慧龙
TANG Hao-yun, ZHANG Xian-ku, TIAN Bai-jun, REN Hui-long (681)
- 基于 VOF 的相界面导热系数加权格式研究
An investigation on the weighting scheme of heat conductivity at two-phase interface based on VOF
韩盼盼, 陈科, 尤云祥
HAN Pan-pan, CHEN Ke, YOU Yun-xiang (689)
- 基于神经网络的散货船阻力预报方法研究
The research of resistance prediction for bulk carrier based on neural network
闫岱峻, 刘伟, 于圣炜, 赵旭
YAN Dai-jun, LIU Wei, YU Sheng-wei, ZHAO Xu (698)
- 采用数值计算方法获得 KVLCC2 形状因子 (1+k) 的探讨
Discussion on obtaining form factor (1+k) of KVLCC2 by numerical method
高旋, 高玉玲, 董国祥
GAO Xuan, GAO Yu-ling, DONG Guo-xiang (707)

基于非惯性系螺旋桨敞水自研求解器开发研究

Research on self-developed solver for open-water performance of propeller by using non-inertial reference frames method

金奕星, 吴乘胜, 王建春, 王星

JIN Yi-xing, WU Cheng-sheng, WANG Jian-chun, WANG Xing.....(716)

基于 STAR-CCM+软件的水下潜器变攻角计算策略研究

Numerical investigation on computation strategy for the altering attack angle of UUV using Star-ccm Software

李永成, 徐令令, 肖冬林

LI Yong-cheng, XU Ling-ling, XIAO Dong-lin(723)

基于 DCNM 亚格子模型的水翼空化流动与湍动能输运机制研究

Numerical investigation of cloud cavitation and turbulent kinetic energy transport mechanism with DCNM model

王紫阳, 黄先北, 程怀玉, 季斌

WANG Zi-yang, HUANG Xian-bei, CHENG Huai-yu, JI Bin.....(729)

基于格子波尔兹曼方法的网衣水动力计算

Numerical simulation of fishing net under current using Lattice Boltzmann method

张弛, 苗玉基, 刘胜, 程小明, 许心愿

ZHANG Chi, MIAO Yu-ji, LIU Sheng, CHENG Xiao-ming, XU Xin-yuan.....(735)

不同迎流攻角下正多边形柱流致振动特性

Numerical simulations of flow-induced vibrations of a polygonal prism with different angles of attack

卫昱含, 及春宁, 陈威霖

WEI Yu-han, JI Chun-ning, CHEN Wei-lin(745)

一种基于紧支径向基函数重构的半拉格朗日水平集界面捕捉方法

A fast semi-Lagrangian level set method based on CSRBF for moving interface of incompressible flows

谢玉林, 赵西增, 胡子俊

XIE Yu-lin, ZHAO Xi-Zeng, HU Zi-jun(756)

孤立波与密排桩防波堤相互作用的数值模拟研究

Numerical study on interactions between solitary wave and pile breakwater

殷铭简, 赵西增, 王红伟

YIN Ming-jian, ZHAO Xi-zeng, WANG Hong-Wei(763)

基于气泡物理规律的航行体水动力深度学习预测方法

Deep learning prediction method for hydrodynamics of underwater vehicle based on bubble physics

岳杰顺, 王静竹, 叶舒然, 王一伟

YUE Jie-shun, WANG Jing-zhu, YE Shu-ran, WANG Yi-wei(769)

水下航行器水动力学性能及噪声特性的数值模拟研究

The numerical simulation of hydrodynamic performance and acoustic characteristics of an underwater vehicle

詹志文, 张凌新, 邓见, 邵雪明

ZHAN Zhi-wen, ZHANG Ling-xin, DENG Jian, SHAO Xue-ming.....(778)

滤波器模型对不规则海浪的模拟研究

Simulation of irregular sea waves by filter model

乔倩, 范菊 QIAO Qian, FAN Ju.....	(784)
一种基于长短期记忆网络的波高预测模型 A wave height prediction model based on long short-term memory network	
施少鹏, 刘曾 SHI Shao-peng, LIU Zeng.....	(791)
基于卷积神经网络的空化水翼表面的压力预测 Pressure prediction of cavitating hydrofoil surface based on convolution neural network	
王畅, 叶舒然, 张珍, 王一伟 WANG Chang, YE Shu-ran, ZHANG Zhen, WANG Yi-wei.....	(796)
表面波和内波的 FLUENT 软件和层析水波理论数值模拟精度对比研究 The accuracy comparison of FLUENT and Green-Naghdi water-wave theory on the numerical simulations of surface wave and solitary wave	
莫唐健, 赵彬彬, 段文洋 MO Tang-jian, ZHAO Bin-bin, DUAN Wen-yang.....	(808)
基于浸没边界法的并列三球形颗粒自由沉降研究 Study on free settlement of three side-by-side spherical particles using immersed boundary method	
陆程, 及春宁 LU Cheng, JI Chun-ning	(814)
基于高斯过程回归的机器学习方法在圆柱流致振动数值模拟中的应用 Application of Gaussian process regression based machine learning method in numercialstudy of flow-induced vibration of cylinder	
卫昱含, 及春宁 WEI Yu-han, JI Chun-ning.....	(825)
绕弹性水翼非定常空化流动模态分析 Modal analysis of unsteady sheet/cloud cavitation dynamics around a flexible hydrofoil	
刘韵晴, 吴钦, 黄彪, 王国玉 LIU Yun-qing, WU Qin, HUANG Biao, WANG Guo-yu.....	(837)
NARMAX 模型在海上浮式风机风载荷预测的研究 Research on NARMAX model in wind load prediction of offshore floating wind turbine	
王立志, 范菊 WANG Li-zhi, FAN Ju.....	(845)
基于多域边界元法的船舶非线性兴波阻力计算 Nonlinear calculation of ship wave problem by multi-domain BEM	
顾晓帆, 朱仁传, 查乐 GU Xiao-fan, ZHU Ren-chuan, ZHA Le.....	(858)
气泡卷入旋涡流场的拖曳力系数分析 Drag coefficient of a bubble entrained into vortex flow field	
蔡羸, 刘筠乔, 王本龙	

CAI Ying, LIU Yun-qiao, WANG Ben-long	(866)
船型优化中不同近似模型精度分析	
The precision analysis of different surrogate models in shape optimization	
刘志强, 刘鑫旺, 万德成	
LIU Zhi-qiang, LIU Xin-wang, WAN De-cheng	(872)
船用柴油机电控喷油器球阀及球阀座空化效应数值模拟研究	
Numerical investigation on the cavitation of injector ball valve and valve seat of ship diesel engine	
曹留帅, 刘振明, 万德成	
CAO Liu-shuai, LIU Zhen-ming, WAN De-cheng	(891)
二维海冰与斜面相互作用的离散单元模拟	
Simulation of the Interaction between Two-dimensional Sea Ice and Inclined Plane with Discrete Element Method	
卢泽宇, 谢丰泽, 万德成	
LU Ze-yu, XIE Feng-ze, WAN De-cheng.....	(900)
不同网格加密方式模拟 NACA0012 水翼空化流动	
Numerical simulation of cavitation around NACA0012 hydrofoil based on different mesh encryption methods	
杨玉肖, 赵曼晨, 万德成	
YANG Yu-xiao, ZHAO Min-sheng, WAN De-cheng.....	(913)
基于 Curle 积分计算椭球体水下远场噪声	
Calculation of underwater far-field noise of ellipsoid based on Curle integral theorem	
于连杰, 万德成	
YU Lian-jie, WAN De-cheng.....	(922)
船型优化中降阶模型与近似模型结合的流场学习与预报方法	
Flow-field learning and prediction method combined with reduced order model and surrogate model in hull form optimization	
刘鑫旺, 万德成	
LIU Xin-wang, WAN De-cheng	(933)
基于两种不同近似模型的 DTMB 5415 总阻力船型优化	
Ship total resistance optimization of DTMB 5415 based on neural network and Kriging model	
张牧, 王建华, 万德成	
ZHANG Mu, WANG Jian-hua, WAN De-cheng	(947)
GPU 加速的 SPH 三维两相圆球入水数值模拟研究	
Numerical study of water entry of spheres using a GPU accelerated three dimensional two phase SPH method	
赵振希, 宫兆新, 刘桦	
ZHAO Zhen-xi, GONG Zhao-xin, LIU Hua.....	(957)
实尺度 KCS 自航性能 URANS 仿真	
Unsteady viscous CFD simulations of full-scale Kcs Self-propulsion	

- 余嘉威, 周宇杰, 何涛, 张志国, 冯大奎
YU Jia-wei, ZHOU Yu-jie, HE Tao, ZHANG Zhi-guo, FENG Da-kui (963)
CFD 方法在螺旋桨激振力计算中的应用
Application of CFD method in the calculation of propeller excitation force
石珣, 周耀华, 周亚军, 秦江璇
SHI Xun, ZHOU Yao-hua, ZHOU Ya-jun, QIN Jiang-xuan (973)
光滑粒子流体动力学方法在高压气泡动力学问题中的应用研究
Application of smooth particle hydrodynamics method to high pressure bubble dynamics
孙鹏楠, 明付仁, 李明康, 邓锐, 张阿漫
SUN Peng-nan, MING Fu-ren, LI Ming-kang, DENG Rui, ZHANG A-man (985)
基于流固耦合 SPH 方法的箱梁涡激振动数值模拟研究
Numerical Investigation on the vortex induced vibration of a rectangular body based on an FSI-SPH model
孙鹏楠, 吴铁成, 邓锐, 吕鸿冠
SUN Peng-nan, Wu Tie-cheng, DENG Rui, LYU Hong-guan (991)
考虑延迟反馈控制效应的格子流体力学模型
A lattice hydrodynamic model considering the effect of delay feedback control
岑炳玲, 薛郁, 王雪, 乔延峰, 王艺
CEN Bing-ling, XUE Yu, WANG Xue, QIAO Yan-feng, WANG Yi (997)
基于 PINN 神经网络算法的低雷诺数下槽道流模拟方法
A turbulent channel flow modeling method based on the physical informed neural network for low Reynolds number
侯龙锋, 朱兵, 张伟
HOU Long-feng, ZHU Bing, ZHANG Wei (1003)
基于 SVM 和动态样本的商船快速性预报
Powering performance prediction of merchant ships based on Support Vector Machine and dynamic samples
刘子祥, 杨磊, 赵峰
LIU Zi-xiang, YANG Lei, ZHAO Feng (1011)
基于机器学习的湍流涡激运动
Vortex induced vibration study in turbulent flows based on machine learning method
柏晓东, 张伟
BAI Xiao-dong, ZHANG Wei (1019)

工业流体力学

- 非均匀伴流条件下非对称前置定子泵喷推进器水动力性能研究
Research on hydrodynamic performance of asymmetric front-stator pump-jet propulsion under non-uniform wake condition

- 彭黄华, 孙瑜
PENG Huang-hua, SUN Yu (1026)
考虑多工况的海水淡化能量回收透平水力模型优化设计
Numerical study on the design of energy recovery turbine for desalination by reducing flow method
祁炳, 张德胜, 赵睿杰, 李岩, 施卫东
QI Bing, ZHANG De-sheng, ZHAO Rui-jie, LI Yan, SHI Wei-dong (1037)
不同攻角梯形振子流致振动响应数值研究
Numerical investigation of flow-induced vibration of trapezoidal oscillators at different attack angles
唐涛, 朱红钧
TANG Tao, ZHU Hong-jun (1045)
管道式气液旋流器流场特性研究
Study on the flow characteristics of vane-type gas-liquid cyclone separator
董志, 史仕英, 孙峰, 薛世峰, 许晶禹, 吴应湘
DONG Zhi, SHI Shi-ying, SUN Feng, XUE Shi-feng, XU Jing-yu, WU Ying-xiang (1051)
水轮机内空化泡与泥沙颗粒之间相互作用的数值模拟研究
Numerical simulation of the interaction between cavitation bubbles and sediment particles in the
hydroturbine
曾卿丰, 何志博, 郑智颖, 王璐
ZENG Qing-feng, HE Zhi-bo, ZHENG Zhi-ying, WANG Lu (1057)
低旋流燃烧器冷态流场的数值模拟研究
Numerical simulation of cold flow field in low swirl burner
刘磊, 张冠敏, 田茂诚, 于耀
LIU Lei, ZHANG Guan-min, TIAN Mao-cheng, YU Yao (1066)
混合室几何形状对蒸汽喷射器性能影响的数值模拟
Numerical simulation of the influence of mixing chamber geometry on steam ejector performance
于耀, 田茂诚, 张冠敏, 刘磊
YU Yao, TIAN Mao-cheng, ZHANG Guan-min, LIU Lei (1072)
混合型气升-喷射泵中喷射部件对气升系统的影响
Influence of injection components in hybrid airlift-jet pump on airlift system
林子液, 陈圣涛
LIN Zi-ye, CHEN Sheng-tao (1078)
油水两相自由表面漩涡的数值模拟
Numerical simulation of oilwater two-phase flow free surface vortex
杨猛, 刘硕, 徐万海, 许晶禹
YANG Meng, LIU Shuo, XU Wan-hai, XU Jing-yu (1084)
T型分岔管道内气液两相的流动规律和分离特性
Investigation on the gas-liquid two-phase separation phenomenon in the T-junction
吴奇霖, 张健, 刘硕, 侯林彤, 王黎松, 许晶禹
WU Qi-ling, ZAHNG Jian, LIU Shuo, HOU Lin-tong, WANG Li-song, XU Jing-yu (1090)
导流式脱气设备分离特性测试
Testing on the separation performance of a swirling degassing separator
刘硕, 张健, 王黎松, 侯林彤, 许晶禹
LIU Shuo, ZHANG Jian, WANG Li-song, HOU Lin-tong, XU Jing-yu (1097)

赫歇尔-伯克利流体气液分层管流持液率特性研究

Evaluation of the liquid holdup in a stratified gas-liquid inclined pipeline according to the Herschel-Bulkley fluid model

侯林彤, 刘硕, 张健, 王黎松, 许晶禹

HOU Lin-tong, LIU Shuo, ZAHNG Jian, WANG Li-song, XU Jing-yu..... (1103)

气-液两相垂直管流中液膜反转的数值模拟

The Numerical simulation of liquid film reversal in gas-liquid two phase vertical pipe flow

王黎松, 张健, 刘硕, 侯林彤, 许晶禹

WANG Li-song, ZHANG Jian, LIU Shuo, HOU Lin-tong, XU Jing-yu..... (1111)

潮流能水轮机导流增效装置模拟研究

Numerical simulation of tidal current turbine and efficiency enhancement device

李卓越, 杜鹏, 黄潇, 胡海豹

LI Zhuo-yue, DU Peng, HUANG Xiao, HU Hai-bao (1117)

半浸桨二维杯型切面入水现象的数值分析

Numerical analysis of the water entry of the two-dimensional cup section of surface piercing propeller

常晟铭, 丁恩宝, 王超

CHANG Sheng-ming, DING En-bao, WANG Chao (1123)

致密油藏中各类油井的产能公式分析

Productivity formula analysis of various oil wells in tight reservoir

蒋晶晶, 宋付权, 肖佳佳

JIANG Jing-jing, SONG Fu-quan, XIAO Jia-jia (1135)

多级离心泵小流量工况的试验与数值研究

Experimental and Numerical simulation study of multistage centrifugal pump under low flow conditions

李晨昊, 罗兴锜, 冯建军, 朱国俊, 陈森林, 张乐福

LI Chen-hao, LUO Xing-qi, FENG Jian-jun, ZHU Guo-jun, CHEN Sen-lin, ZHANG Le-fu (1145)

致密油藏多层缝网压裂直井不稳定压力动态分析

Pressure transient analysis in multiple-fractured vertical well in tight oil reservoirs

代立, 尹洪军, 袁鸿飞, 孟凡嵩

DAI Li, YIN Hong-jun, YUAN Hong-fei, MENG Fan-song..... (1154)

航行姿态对两栖车阻力性能影响分析

Research on influence of navigation posture on resistance performance of amphibious vehicle

王志鹏, 倪阳, 邱耿耀, 闫岱峻

WANG Zhi-peng, NI Yang, QIU Geng-yao, YAN Dai-jun..... (1163)

旁通清管器清管过程流场特性数值模拟分析

Numerical simulation analysis of flow field characteristics in the pigging process of bypass pig

张一博, 陈圣涛

ZHANG Yi-bo, CHEN Sheng-tao..... (1170)

气泡直径对两相液力透平流场及性能的影响

Influence of bubble diameter on flow field and performance of a two-phase hydraulic turbine

孙帅辉, 郭鹏程, 董勇, 朱景源

SUN Shuai-hui, GUO Peng-cheng, DONG Yong, ZHU Jing-yuan..... (1176)

考虑裂缝粗糙度的裂缝性地层堵漏分析

- Analysis of lost circulation in fractured formation considering fracture roughness
都凯, 王志远, 孙宝江, 陈旺, 张立松
DU Kai, WANG Zhi-yuan, SUN Bao-jing, CHEN Wang, ZHANG Li-song (1183)
水平井 CO₂自循环开采地热方法研究
- Study on geothermal exploitation via CO₂ self-circulation in a horizontal well
黄达, 孙宝江, 王志远, 廖友强
HUANG Da, SUN Bao-jiang, WANG Zhi-yuan, LIAO You-qiang (1194)
致密油藏非线性渗流模型的实验研究
- Experimental Analysis on nonlinear seepage model of tight reservoirs
肖佳佳, 宋付权, 蒋晶晶, 屠慧义
XIAO Jia-jia, SONG Fu-quan, JIANG Jing-jing, TU Hui-yi (1204)
考虑水泥水化的固井井筒温度压力耦合计算模型
- Wellbore temperature and pressure coupling calculation model considering cement hydration during cementing process
郝峰, 孙宝江, 王雪瑞
HAO Feng, SUN Bao-jiang, WANG Xue-rui (1213)
深水气井放喷阶段水合物防治研究
- Study on hydrate prevention and control in blowout test stage of deepwater gas well
姚旺, 高永海, 孙宝江, 高冬至, 于鑫, 王延龙
YAO Wang, GAO Yong-hai, SUN Bao-jiang, GAO Dong-zhi, YU Xin, WANG Yan-long (1221)
天然气水合物地层钻井过程中多物理场耦合模拟研究
- Study on coupling simulation of multiple physical fields in drilling gas hydrate formation
周博宇, 郭怡辉, 廖友强, 孙宝江
ZHOU Bo-yu, GUO Yi-hui, LIAO You-qiang, SUN Bao-jiang (1228)
固体颗粒物粒度分布对磨蚀的影响研究
- Effect of solid particle size distribution on cavitation erosion
夏定康, 苏昆鹏, 吴建华, 丁志屿
XIA Ding-kang, SU Kun-peng, WU Jian-hua, DING Zhi-yu (1239)
深水高压气井井下节流技术预防水合物分析
- Analysis of preventing hydrate using downhole throttling valves technology in deepwater high-pressure gas well
周有为, 商海光, 赵宇昊, 姜志晨, 苏愈发, 高永海
ZHOU You-wei, SHANG Hai-guang, ZHAO Yu-hao, JIANG Zhi-chen, SU Yu-fa, GAO Yong-hai (1245)
大气边界层入流下错列排布三风机气动性能数值模拟
- Numerical simulation of aerodynamic performance of three wind turbines with staggered strategies under atmospheric boundary layer flow
白鹤鸣, 万德成, 王尼娜, 赵生校
BAI He-ming, WAN De-cheng, WANG Ni-na, ZHAO Sheng-xiao (1253)
绕回转体通气空泡尾部泄气机理及其内部流动特性研究
- Study on the mechanism of gas-leakage and internal flow characteristics of ventilated cavitating flows
吕亚飞, 黄彪, 刘涛涛, 段忠平, 王国玉

LYU Ya-fei, HUANG Biao, LIU Tao-tao, DUAN Zhong-ping, WANG Guo-yu.....	(1271)
基于三相交通流 Kerner-Klenov-Wolf 模型的油耗研究	
Study on fuel consumption in the Kerner-Klenov-Wolf cellular automaton three-phase traffic flow model	
王雪, 薛郁, 岑炳玲, 王艺, 乔延峰	
WANG Xue, XUE Yu, CEN Bing-ling, WANG Yi, QIAO Yan-feng.....	(1282)
基于优化速度模型的上匝道对交通拥堵的影响	
Exploring the impact of on-ramp on traffic congestion	
王艺, 王雪, 岑炳玲, 乔延峰, 薛郁	
WANG Yi, WANG Xue, CEN Bing-ling, QIAO Yan-feng, XUE Yu	(1288)
延缓启动效应对交通流颗粒物排放的影响	
The impact of slow-to-start rule effect on particulate matter emission in traffic flow	
乔延峰, 王雪, 岑炳玲, 王艺, 薛郁	
QIAO Yan-feng, WANG Xue, CEN Bing-ling, WANG Yi, XUE Yu	(1294)
基于 DEM-CFD 的旋流式多叶片泵固液两相内流特性研究	
Study on the characteristics of solid-liquid internal flow in vortex multi-blade pump based on DEM-CFD	
高雄发, 赵婷, 施卫东, 张德胜, 施亚	
GAO Xiong-fa, ZHAO Ting, SHI Wei-dong, ZHANG De-sheng, SHI Ya.....	(1301)
高密度澄清池絮凝区构造水力优化数值模拟	
Numerical simulation of structural hydraulic optimization in flocculation area of high density clarifier	
牛聪慧, 王军	
NIU Cong-hui, WANG Jun.....	(1308)
EGSB 反应器水力优化数值模拟研究	
Numerical simulation of hydraulic Optimization in EGSB reactor	
吴泓磊, 王军	
WU Hong-lei , WANG Jun.....	(1317)

船舶与海洋工程水力学

螺旋桨抽吸作用下自由液面碎冰运动模拟及流场分析	
Simulation of trash ice motion the free surface and analysis of the flow field under the suction action of the propeller	
李亮, 武珅, 刘登成, 辛公正	
LI Liang, WU Shen, LIU Deng-cheng, XIN Gong-zheng	(1328)
导管上方平板对导管螺旋桨的水动力影响计算分析	
Calculation and analysis of the influence of the plate above the duct on the hydrodynamic performance of the duct propeller	
周剑, 王伟	
ZHOU Jian, WANG Wei	(1336)
畸形波作用下Spar型海上浮式风力机瞬态响应数值预报	
Numerical prediction on the transient response of a Spar-type floating offshore wind turbine in freak	

waves

曲晓奇, 李焱, 刘利琴, 尹天畅, 唐友刚, 谢芃

QU Xiao-qi, LI Yan, LIU Li-qin, YIN Tian-chang, TANG You-gang, XIE Peng..... (1343)

水深对螺旋桨水动力性能影响研究

Research on the influence of water depth on propeller hydrodynamic performance

罗晓园, 王建政, 吴泽奇, 张方华

LUO Xiao-yuan, WANG Jian-zheng, WU Ze-qi, ZHANG Fang-hua..... (1349)

基于非线性回归分析的船舶螺旋桨空泡脉动压力预报

Empirical prediction of full scale propeller induced pressure fluctuation based on non-linear regression analysis

薛庆雨, 顾湘男, 周斌, 武坤

XUE Qing-yu, GU Xiang-nan, ZHOU Bin, WU Shen..... (1356)

基于理论方法和CFD方法的螺旋桨水动力性能分析

Propeller hydrodynamic performance analysis based on theoretical method and CFD method

王建政, 罗晓园, 刘亮清, 张方华

WANG Jian-zheng, LUO Xiao-yuan, LIU Liang-qing, ZHANG Fang-hua..... (1366)

浅水中船舶频域水动力系数计算与分析

Calculation and analysis of frequency domain hydrodynamic coefficient for a ship in shallow water

张隆辉, 刘正锋, 彭秀艳, 魏纳新, 匡晓峰

ZHANG Long-hui, LIU Zheng-feng, PENG Xiu-yan, WEI Na-xin, KUANG Xiao-feng (1374)

深海耦合环境条件下 FPSO 的运动性能分析

Motion performance analysis of FPSO in deep sea coupled environment

牛贵超

NIU Gui-chao (1380)

桨舵组合单元推力建模研究

Research on thrust modeling of propeller - rudder combination unit

刘正锋, 张隆辉, 魏纳新

LIU Zheng-feng, ZHANG Long-hui, WEI Na-xin..... (1388)

含跃层的分层流中运动椭球尾流场数值模拟

Numerical simulation of wake field on moving ellipsoid in stratified fluid with a pycnocline

胡开业, 潘黎明, 于祥, 杨哲超, 石林飞

HU Kai-ye, PAN Li-ming, YU Xiang, YANG Zhe-chao, SHI Lin-fei..... (1394)

计及浅水及岸壁效应的船舶尾流场偏移特性数值分析

Numerical analysis of deviation characteristics of ship wake field with shallow water and bank effects

杨春, 冀楠, 万德成

YANG Chun, JI Nan, WAN De-cheng..... (1404)

含不同速度和密度内流立管横向涡激振动特性研究

Cross-flow vortex-induced vibration of a fluid-conveying riser with various internal flow velocities and densities

段金龙, 周济福, 王旭, 陈科

DUAN Jin-long, ZHOU Ji-fu, WANG Xu, CHEN Ke. (1415)

内外流作用下悬链线立管动力响应分析

Dynamic response analysis of the catenary riser due to internal flow and ocean current

邹艳荣, 周济福, 王旭

KUAI Yan-rong, ZHOU Ji-fu, WANG Xu (1426)

- 基于 FINE/Marine 软件的 Ka4-70 导管螺旋桨的水动力数值仿真
Numerical simulation of hydrodynamics of Ka4-70 propeller in 19A duct based on FINE/Marine
贾力平, 隋俊友
JIA Li-ping, SUI Jun-you (1434)
- 首升力体三体船高速顶浪中运动响应数值计算研究
Numerical simulation of motion response of high speed trimaran with bow-lifting-body in regular heading wave
魏泽, 邱耿耀, 王习建, 刘伟
WEI Ze, QIU Gen-yao, WANG Xi-jian, LIU Wei (1441)
- 船-桨-舵结合下的舵两侧载荷偏移现象分析
Analysis of load dislocation near the rudder under hull-propeller-rudder interaction
张维鹏, 胡健, 陈崇格
ZHANG Wei-peng, HU Jian, CEHN Chong-ge (1448)
- 船舶在方形波浪中航行非线性特性研究
Study on nonlinear properties of ship motion in cross wave
曾柯, 顾民, 王习建, 鲁江
ZENG Ke, GU Min, WANG Xi-jian, LU Jiang (1454)
- 海洋平台与大尺度浮冰层耦合水动力特性研究
Coupled wave interactions of a platform with a large scale floating ice sheet
李志富, 石玉云
LI Zhi-fu, SHI Yu-yun (1464)
- 基于 CFD 不同月池形态船体静水阻力分析
CFD based calm water resistance prediction for different moonpools
赵鑫, 孙树政, 任慧龙
ZHAO Xin, SUN Shu-zheng, REN Hui-long (1470)
- 跨域无人平台水面垂直起飞运动/动力特性数值模拟
Numerical simulation of kinematic and dynamic characteristic of vertical take-off over water for aerial-aquatic unmanned vehicle
周剑, 刘亚非, 张军, 郑巢生
ZHOU Jian, LIU Ya-fei, ZHANG Jun, ZHENG Chao-sheng (1477)
- 基于强制横摇机构的随浪中船舶复原力曲线测试方法研究
Restoring curve measurement of a ship in following waves based on forced roll mechanism
封培元, 王大健, 王志南, 卫燕清
FENG Pei-yuan, WANG Da-jian, WANG Zhi-nan, WEI Yan-qing (1484)
- 叶环驱动导管螺旋桨的叶梢流动分析
Tip flow analysis of the RIM-driven ducted propeller
梅蕾, 周军伟, 杨蕾, 倪豪良
MEI Lei, ZHOU Jun-wei, YANF Lei, NI Hao-liang (1494)
- 船舶操纵性能衡准及应对措施
Ship maneuverability criteria and improvement measures
刘小健, 王大健, 王志南, 杨素军, 范余明
LIU Xiao-jian, WANG Da-jian, WANG Zhi-nan, YANG Su-jun, FAN She-ming (1500)
- 月池形状及尺寸对钻井船运动性能及稳定性影响的数值模拟研究
Numerical study on the influence of the shape and size of moonpools on the motion performance and stability of a drillship

- 刘震, 何进辉, 孟阳, 张海彬, 范余明, 李昂振, 魏跃峰
LIU Zhen, HE Jin-hui, MENG Yang, ZHANG Hai-bin, FAN She-ming, LI Ang-zhen, WEI Yue-feng (1507)
基于流体分析下某船船坞内冷却系统研究
Research on cooling water system for a certain vessel based on hydro mechanical analysis in the dock
- 杨勇, 陆响晖, 甘霏斐
YANG Yong, LU Xiang-hui, GAN Fei-fei (1518)
基于格子玻尔兹曼方法的二维柔性梁流固耦合运动的研究
Numerical study on the two dimensional fluid-solid interaction of a flexible beam with the Lattice Boltzmann method
- 杨旖旎, 刘明
YANG Yi-ni, LIU Ming (1525)
某水面船舶涡流发生器设计及流场数值计算验证
Vortex generator design and wake numerical verification for a certain surface ship
- 舒礼伟, 李亮
SHU Li-wei, LI Liang (1537)
基于 CFD 方法的某喷水推进船舶航向稳定性研究
CFD based study on the inherent dynamic stability of a water-jet ship
- 张晨亮, 刘小健, 王金宝, 万德成
ZHANG Chen-liang, LIU Xiao-jian, WANG Jin-bao, WAN De-cheng (1546)
船体时域绕射问题的非脉冲方法研究
None-Impulse Method on the diffraction problem of the sailing ship
- 王思雨, 王琦彬, 丁军, 倪歆韵
WANG Si-yu, WANG Qi-bin, DING Jun, NI Xin-yun (1553)
基于 CFD 方法的某深潜器阻力性能分析
Study on resistance performance of a submersible based on CFD method
- 李德军, 彭超, 张伟, 沈丹, 胡中惠, 刘超, 李邦鹏, 张家锐
LI De-jun, PENG Chao, ZHANG Wei, SHEN Dan, HU Zhong-hui, LIUChao, LI Bang-peng,
ZHANG Jia-rui (1560)
襟翼对摆线推进器水动力性能的影响
Influence of flap on hydrodynamic performance of cycloidal propeller
- 孙哲, 李恒, 柳光军
SUN Zhe, LI Heng, LIU Guang-jun (1566)
不同径长比下串列管道双车车间轴向流速特性研究
Research on axial velocity characteristics of tandem two-pipe vehicle spacing with different diameter to length ratios
- 贾晓萌, 孙西欢, 李永业
JIA Xiao-meng, SUN Xi-huan, LI Yong-ye (1574)
倒车状况下船舶螺旋桨荷载数值研究
Numerical study on propeller load under reversed propulsion condition
- 樊翔, 汤瑾璟, 高文, 房新楠, 顾一清
FAN Xiang, TANG Jin-jing, GAO Wen, FANG Xin-nan, GU Yi-qing (1581)
附体对宽浅吃水双尾鳍船型伴流均匀度的影响分析研究
Analysis and research on the influence of appendages on the uniformity of wake field of twin-skege type ship with large breadth and shallow draught

- 潘露峰, 牟立伟, 周华伟, 毛献群
PAN Lu-feng, MOU Li-wei, ZHOU Hua-wei, MAO Xian-qun (1589)
大型多连通域平台水动力分析
Hydrodynamic analysis of large multi communicating domain platform
俞俊, 程小明, 丁军, 刘小龙, 倪歆韵
YU Jun, CHENG Xiao-ming, DING Jun, LIU Xiao-long, NI Xin-yun (1595)
沉船油舱固状原油加热过程传热分析
Heat transfer analysis of solid crude oil in sunken oil tank during heating process
杨帅, 吴文锋, 孙帆, 王硕秀, 刘佳
YANG Shuai, WU Wen-feng, SUN Fan, WANG Xu-xiu, LIU Jia (1603)
油船油品蒸汽与微波复合加热下功率分配对传热效率的影响分析
Analysis of the influence of power distribution on heat transfer efficiency under the combined heating of oil vapor and microwave
孙帆, 吴文锋, 卢金树, 张家阔, 刘佳
SUN Fan, WU Wen-feng, LU Jin-shu, ZHANG Jia-kuo, LIU Jia (1610)
单储罐在罐群所处位置对 VOCs 泄漏扩散的影响研究
Study on the influence of single storage tank location on VOCs leakage and diffusion
王硕秀, 吴文锋, 杨帅, 孙帆, 刘佳
WANG Xu-xiu, WU Wen-feng, YANG Shuai , SUN Fan¹, LIU Jia (1617)
液舱中垂直隔板开孔制荡效果数值研究
Numerical study on the sloshing effect of vertical partition opening in tank
涂娇阳, 吴文锋, 颜长文, 王硕秀, 滕瑀
TU Jiao-yang, WU Wen-feng, ZHEN Chang-wen, WANG Xu-xiu, YU Teng (1624)
物探船拖缆阻力估算方法研究
Estimation method research on the towing cable resistance of seismic survey vessel
王迎晖, 田于达, 李志雨
WANG Ying-hui, TIAN Yu-kui, LI Zhi-yu (1631)
基于 CFD 技术船体尺度对操纵运动的影响研究
Study the influence of ship size on maneuvering motion based on CFD
师超, 韩阳, 邱耿耀
SHI Chao, HAN Yang, QIU Geng-yao (1640)
船用风力助推转子设计与实船应用研究
Research on design of ship wind assisted rotor and its application
王艳霞, 刘希洋, 徐杰, 陈京普, 李百齐
WANG Yan-xia, LIU Xi-yang, XU Jie, CHEN Jing-pu, LI Bai-qi (1648)
多连通域复杂构型浮体水弹性响应研究
Study on the hydroelastic response of a Multi-connected domain floating body
王琦彬, 丁军, 陈彧超, 俞俊, 吴有生, 何春荣
WANG Qi-bin, DING Jun, CHEN Yu-chao, YU Jun, WU You-sheng, HE Chun-rong (1657)
三维时域非线性水弹性力学分析方法
A 3D hydroelastic analysis method for ships in time-domain
王琦彬, 王思雨, 刘日明, 倪歆韵, 丁军, 何春荣
WANG Qi-bin, WANG Si-yu, LIU Ri-ming, NI Xin-yun, DING Jun, HE Chun-rong (1664)
底部破损船舶时域运动预报方法研究
Study on the time domain prediction method of the bottom damaged ship
卜淑霞, 邱耿耀, 闫岱峻, 黄苗苗, 顾民
BU Shu-xia, QIU Geng-yao, YAN Dai-jun, HUANG Miao-miao, GU Min (1672)

- 基于CFD—DEM耦合模型的粗糙裂缝中支撑剂运移规律研究
Research on proppant migration in rough fractures based on CFD-DEM coupling model
张超, 王志远, 都凯
ZHANG Chao, WANG Zhi-yuan, DU Kai.....(1680)
- 重型破冰船敞水域多工况阻力性能数值研究
Numerical investigations on resistance of a heavy icebreaker with multi-conditions in open water
孔为平, 罗会武, 王建强, 周旻, 丁举
KONG Wei-ping, LUO Hui-wu, WANG Jian-qiang, ZHOU Min, DING Ju.....(1694)
- 拖曳系统母船在风浪条件下综合增阻研究
Research on comprehensive resistance increase of towing system mother ship in wind and waves
郭翔宇, 梁家健
GUO Xiang-yu, LIANG Jia-jian...(1703)
- 多模块浮式平台铰接式连接器载荷研究
Research on the load of multi-module floating platform's hinge connector
陈彧超, 王琦彬, 汤明刚, 程小明
CHEN Yu-chao, WANG Qi-bin, TANG Ming-gang, CHENG Xiao-ming.....(1707)
- 深海采矿船减摇水舱减摇效果评估
Evaluation of anti rolling effect of anti rolling tank of deep sea mining ship
马亚州, 崇皓, 张晓莹, 高森林, 毛富丰
MA Ya-zhou, HU Zhe, ZHANG Xiao-ying, GAO Sen-lin, MAO Fu-feng(1714)
- 船体剖面水动力系数的机器学习与预报
Machine learning for Hydrodynamic coefficient of ship sections and prediction
孔繁钰, 朱仁传
KONG Fan-yu, ZHU Ren-chuan.....(1725)
- 滑行艇压力分布的数学模型及参数影响研究
The mathematical model of pressure distribution on planing hull and study of effects of parameters
王慧, 朱仁传, 查乐, 黄山
WANG Hui, ZHU Ren-chuan, ZHA Le, HUANG Shan(1732)
- 重大件货物海上运输的惯性力理论与规范计算比较分析
Comparative analysis of theoretical and empirical inertial forces of heavy and large cargo units in ocean transportation
杨红莹, 朱仁传, 杨云涛
YANG Hong-ying, ZHU Ren-chuan, YANG Yun-tao.....(1739)
- X舵操纵的水下航行器水动力性能分析
The analysis of hydrodynamic performance for an underwater vehicle equipped with X-shaped rudder
王广航, 吴虹明, 王文晋, 徐国华, 王一伟
WANG Guang-hang, WU Hong-ming, WANG Wen-jin, XU Guo-hua, WANG Yi-wei ..(1746)
- 基于频域混合格林函数法的豪华邮轮耐波性能短期预报
Short-term seakeeping performance prediction of a luxury cruise ship in waves based on 3D frequency domain hybrid HOBEM
徐德康, 朱仁传, 杨云涛
XU De-kang, ZHU Ren-chuan, YANG Yun-tao ..(1757)
- 海上风机高桩承台结构波浪冲击载荷实验研究
Laboratory experiment on wave impact load on high-rise pile cap structures for offshore wind turbines
魏明珠, 周济福, 王旭

WEI Ming-zhu, ZHOU Ji-fu, WANG Xu	(1763)
基于时域混杂法的波浪上船舶沉浮作业模拟	
Numerical simulation of submersible ship motions on waves based on time-domain hybrid method	
李超凡, 朱仁传, 周文俊	
LI Chao-fan, ZHU Ren-chuan, ZHOU Wen-jun	(1770)
基于高阶谱方法的气垫船移动兴波模拟与阻力计算	
Wave making simulation and resistance calculation of an air cushion vehicle based on high-order spectrum method	
石凯元, 朱仁传, 顾孟潇, 高嵩	
SHI Kai-yuan, ZHU Ren-chuan, GU Meng-xiao, GAO Song	(1777)
浮式风机平台与多波浪能浮子混合系统的运动响应和发电性能研究	
Motion response and power generation performance of a hybrid system combining floating wind platform and multiple heaving wave energy converters	
周斌珍, 王珂, 胡俭俭, 孙科, 崔琳	
ZHOU Bin-zhen, WANG Yu, HU Jian-jian, SUN Ke, CUI Lin	(1783)
随机斜浪中船舶横摇-纵摇-升沉耦合运动响应解析方法研究	
Research on analytical method of ship roll-pitch-heave coupling motion response in random oblique waves	
刘亚柳, 刘利琴, 黄郑鑫	
LIU Ya-liu, LIU Li-qin, HUANG Zheng-xin	(1789)
船舶尾流场三维空间分布特性数值与试验研究	
Numerical and experimental study on 3D spatial distribution characteristics of ship wake flow	
吴铁成, 骆婉珍, 邓锐, 孙鹏楠, 郭春雨	
WU Tie-cheng, LUO Wan-zhen, DENG Rui, SUN Peng-nan, GUO Chun-yu.....	(1798)
海底多跨管道涡激振动疲劳特性分析	
Analysis of vortex-induced vibration fatigue characteristics of multi-span submarine pipelines	
徐万海, 贾昆, 李宇寒	
XU Wan-hai, JIA Kun, LI Yu-han	(1804)
海洋立管涡激振动抑制方法对比研究	
A comparative study of vortex induced vibration suppression methods for marine risers	
马烨璇, 徐万海, 吴昊恺, 王琦程	
MA Ye-xuan, XU Wan-Hai, WANG Qi-cheng, WU Hao-kai.....	(1811)
规则波下海洋平台气隙响应数值分析	
Numerical simulation of air gap response of offshore platform under regular wave	
杨晓彤, 万德成	
YANG Xiao-tong, WAN De-cheng	(1818)
基于尾流叠加模型的风电场数值模拟	
Numerical solution of wind farm wake based on wake interaction model	
郑建才, 万德成, 王尼娜, 赵生校	
ZHENG Jian-cai, WAN De-cheng, WANG Ni-na, ZHAO Sheng-xiao.....	(1825)
基于黏流对三体船主体与片体间兴波干扰对其阻力的影响分析	
Study on the effect of wave making interference between the hulls on the resistance of a trimaran base on viscous flow	
李乐宇, 刘鑫旺, 万德成	
LI Le-yu, LIU Xin-wang, WAN De-cheng....	(1840)

连续密度分层流中潜艇近水面航行时复杂流场数值模拟

Numerical simulation of complex flow field of submarine sailing near water surface in linearly stratified fluid

黄凤来, 曹留帅, 万德成

HUANG Feng-lai, CAO Liu-shuai, WAN De-cheng..... (1849)

含内流流动细长柔性立管涡激振动的模拟

The numerical simulation of Vortex-induced vibration of slender flexible riser with internal flow

李敏, 邓迪, 万德成

LI Min, DENG Di, WAN De-cheng..... (1863)

数值分析船舶纵倾对船舶兴波破碎形态的影响

Numerical study of trim effects on ship breaking waves

王建华, 万德成

WANG Jian-Hua, WAN De-Cheng..... (1876)

CFD 方法模拟高航速 DTMB 船模艏波破碎

CFD simulation of bow wave breaking of high speed DTMB ship model

吴定坤, 王建华, 万德成

WU Ding-kun, WANG Jian-hua, WAN De-cheng..... (1883)

KCS 船模艏波破碎过程的精细化数值模拟

Refined Numerical simulation of bow wave breaking process of KCS ship model

谢路毅, 万德成

XIE Lu-yi, WAN De-cheng..... (1895)

非均匀流场中螺旋桨空化的数值模拟

Numerical simulation of propeller cavitation in non-uniform flow field

赵曼晟, 万德成

ZHAO Min-sheng, WAN De-cheng (1903)

基于 MPS-FEM 方法研究波浪对悬空桥梁结构的砰击作用

Interaction between regular wave and flexible suspension bridge by MPS-FEM method

张冠宇, 万德成

ZHANG Guan-yu, WAN De-cheng (1912)

基于体积力方法的实尺度 JBC 的数值仿真

Numerical simulation of full scale self-propulsion using body force method for Japan bulk carrier

姜凯军, 王爽, 叶斌, 张志国, 冯大奎

JIANG Kai-jun, WANG Shuang, YE Bin, ZHANG Zhi-guo, FENG Da-kui..... (1926)

基于 CFD 的迎浪条件下船舶参数横摇数值预报方法评估

An assessment of prediction of parametric rolling of ONRT model in regular head waves

刘李为, 陈美霞, 王爽, 何涛, 张志国, 王先洲

LIU Li-wei, CHEN Mei-xia, WANG Shuang, HE Tao, ZHANG Zhi-guo, WANG Xian-zhou (1939)

Research on aerodynamic and wind-induced vibration characteristics of truck skirt based on fluid-solid coupling

- WANG Ze-wei, HU Xing-jun, LUO Yu-fei, WANG Jing-yu, ZHANG Jing-yin..... (1951)
全海深载人潜水器水面回收方案数值仿真研究
- Numerical study for water surface recovery of full ocean depth submersible
张凤伟, 湛俊华, 匡晓峰, 潘子英, 刘帅
- ZHANG Feng-wei, ZHAN Jun-hua, KUANG Xiao-feng, PAN Zi-ying, LIU Shuai (1958)
半潜平台波浪砰击数值计算方法研究
- The numerical analysis of the wave slamming load on semi submersible platform
方田, 范亚丽, 匡晓峰
- FANG Tian, FAN Ya-li , KUANG Xiao-feng (1966)
半潜式支持平台运动性能研究
- Study on the motion performance of a semi-submersible support platform
范亚丽, 匡晓峰, 赵战华, 柏洪涛
- FAN Ya-li, KUANG Xiao-feng, ZHAO Zhan-hua , BO Hong-tao..... (1972)
平板多孔气液两相横射流流场特性研究
- Study on the flow field characteristics of multiple jets under the flat surface
郑亚男, 王国玉, 吕亚飞, 刘涛涛, 黄彪
- ZHENG Ya-nan, WANG Guo-yu, L YU Ya-fei, LIU Tao-tao, HUANG Biao..... (1982)
基于浮体三维水弹性的系泊模块开发及应用
- Development and application of mooring module based on 3D Hydroelasticity of floating body
倪歆韵, 李敏, 丁军, 程小明, 王墨伟, 任忠保
- NI Xin-yun, LI Min, DING Jun, CHENG Xiao-ming, WANG Mo-wei, REN Zhong-bao (1990)
分层环境中水下航行体横截面尾流场数值模拟研究
- Numerical simulation of the cross-section wake by a moving body in stratified fluids
周根水, 洪方文, 张军, 高德宝, 姚志崇
- ZHOU Gen-shui, HONG Fang-wen, ZHANG-Jun, GAO De-bao, YAO Zhi-chong..... (1999)
循环神经网络方法预报船舶操纵运动研究
- Prediction of ship manoeuvring motion with recursive neural networks
郝立柱, 韩阳, 潘子英
- HAO Li-zhu, HAN Yang, PAN Zi-ying..... (2009)
波浪中多浮体系统耦合运动特性研究
- Study on motion characteristics of the multiple floating system in waves
匡晓峰, 方田
- KUANG Xiao-feng, FANG Tian..... (2022)
基于 CFD 的船体纵倾对航向稳定性的影响研究
- CFD-based study of the effects of ship trim on the directional stability
宋深科, 邹早建, 邹璐
- SONG Shen-ke, ZOU Zao-jian, ZOU Lu..... (2033)

海岸环境与水利水电和河流动力学

人工神经网络在潮汐预报中的应用

Application of artificial neural network in tide forecast

白龙虎, 徐航, 李忆菲, 朱佳伟, 林陈昊, 叶明杰

BAI Long-hu, XU Hang, LI Yi-fei, ZHU Jia-wei, LIN Chen-hao, YE Ming-jie..... (2039)

孤立波直墙反射的数值模拟

Numerical simulation of solitary wave reflection at a vertical wall

邹丽, 李永刚, 胡英杰, 王振, 于宗冰

ZOU Li, LI Yong-gang, HU Ying-jie, WANG Zhen, YU Zong-bing..... (2045)

海底射流冲刷沙丘数值模拟

Numerical simulation of seabed jet scouring sand dunes

邹丽, 岳彩星, 孙哲, 王子维, 徐伟桐

ZOU Li, YUE Cai-xing, SUN Zhe, WANG Zi-wei, XU Wei-tong..... (2052)

岛礁海域波浪环境轮廓法的应用研究

Study on the application of wave environment contour method in the sea area near islands and reefs

刘小龙, 孙泽, 蔡志文, 陈文炜, 丁军, 叶永林

LIU Xiao-long, SUN Ze, CAI Zhi-wen, CHEN Wen-wei, DING Jun, YE Yong-lin..... (2060)

北黄海筏式养殖海域潮流特征的数值模拟与分析

Numerical simulation and analysis of tidal current characteristics in raft culture area of North Yellow Sea

许慧, 康亚茹, 张明亮

XU Hui, KANG Ya-ru, ZHANG Ming-liang..... (2069)

沉水及悬浮植被作用下植被区三维水动力的精细化数值模拟

Fine numerical simulation of three-dimensional hydrodynamics in vegetation area under submerged and floating vegetation

杨颖宜, 马永顺, 詹泽荣, 房树林, 张明亮

YANG Ying-yi, MA Yong-shun, ZHAN Ze-rong, FANG Shu-Lin, ZHANG Ming-Liang (2076)

上游堰坡对淹没式矮堰浑水冲刷深度振荡频率的影响研究

Impacts of upstream weir slope on fluctuating frequency of live bed scour depth around submerged weirs

马立, 王路, 聂锐华, 马旭东, 刘兴年

MA Li, WANG Lu, NIE Rui-hua, MA Xu-dong, LIU Xing-nian (2083)

有植被河道沿程流速横向分布计算模型

An analytical model for the distribution of transverse velocity along the open channel with a model vegetation patch

严春浩, 单钰淇, 刘超, 刘兴年

YAN Chun-hao, SHAN Yu-qi, LIU Chao, LIU Xing-nian..... (2090)

流量变化条件下宽级配河床推移质输沙率试验研究

Experimental study on bed-load transport rate of bed material with wide size-distribution under

discharges variation

王奇, 单钰淇, 刘超, 刘兴年

WANG Qi, SHAN Yu-qi, LIU Chao, LIU Xing-nian..... (2098)

规则波环境中网衣水动力特性研究

Research of hydrodynamic properties on the net structure under regular wave

苗玉基, 丁军, 田超, 郭晓宇

MIAO Yu-ji, DING Jun, TIAN Chao, GUO Xiao-yu..... (2105)

汶川震后“8.20”暴雨山洪灾害特征分析

Analysis on the characteristics of "8.20" rainstorm flash flood disaster after Wenchuan earthquake

邓志远, 王以達, 闫旭峰, 王协康

DENG Zhi-yuan, WANG Yi-kui, YAN Xu-feng, WANG Xie-kang..... (2112)

土壤含水量变化下白沙河流域山洪灾害预警分析

Study on early warning of flash flood disaster in Baisha River Small Watershed under the change of soil moisture

晋恩泽, 叶晨, 孙桐, 王协康

JIN En-ze, YE Chen, SUN Tong, WANG Xie-kang..... (2118)

岷江支流白沙河流域暴雨洪水模拟研究

Simulation study on storm flood process in Baisha River Basin, a Tributary of Minjiang River

张桎豪, 许泽星, 程凯, 王协康

ZHANG Zhi-hao, XU Ze-xing, CHENG Kai, WANG Xie-kang (2124)

汶川县簇头沟流域“7.10”山洪灾害预警方法可靠性分析

Reliability analysis of early warning method for “7.10” flash flood disaster in Cutou basin of Wenchuan County

杨坡, 叶晨, 孙桐, 罗铭, 王协康

YANG Po, YE Chen, SUN Tong, LUO Ming, WANG Xie-kang (2130)

流溪河模型在岔巴沟流域供水模拟中的应用

Simulation of flood based on Liuxihe Model in Chabagou Basin

余海逖, 李兢, 周湘航, 王协康

YU Hai-ti, LI Jing, ZHOU Xiang-hang, WANG Xie-kang (2136)

限制航道内船过桥墩的定常与非定常水动力特性研究

Steady and unsteady hydrodynamic characteristics of inland vessel crossing bridge piers in restricted waterway

杜鹏, 胡海豹, 黄潇

DU Peng, HU Hai-bao, HUANG Xiao (2142)

含刚性挺水植物群落水流的大涡模拟

Largeeddy simulation of flow through rigid emergent vegetation

李晗孜, 毛劲乔, 龚铁青, 戴杰

LI Han-mei, MAO Jing-qiao, GONG Yi-qing, DAI Jie..... (2148)

重力对桥墩绕流流场精度影响的数值模拟研究

Numerical simulation of the influence of gravity on the precision of the flow field around the pier

戴杰, 毛劲乔, 龚铁青, 李晗孜

DAI Jie, MAO Jing-qiao, GONG Yi-qing, LI Han-mei..... (2155)

中国南海沿岸概率海啸风险评估

Probabilistic tsunami hazard assessment and application to southern coastal areas in China

赵广生, 张晓萱, 牛小静

ZHAO Guang-sheng, ZHANG Xiao-xuan, NIU Xiao-jing	(2162)
南海岛礁海域风浪流环境数据管理及应用	
Mangagement and application of enviromental data of winds, waves and currents near islands and reefs in the South China Sea	
张燕, 刘小龙, 张昕, 韩璐阳	
ZHANG Yan, LIU Xiao-long, ZHANG Xin, HAN Lu-yang	(2170)
岛屿地形对海啸长波能量俘获的数值模拟	
Numerical study on long waves trapped by a circular island	
高星宇, 牛小静	
GAO Xing-yu, NIU Xiao-jing.....	(2178)
堰塞坝人工泄槽冲蚀研究	
Study on breaching of landslide dam with artificial open chutes	
刘进, 马飞, 韩建军, 刘雨轩, 吴建华	
LIU Jin, MA Fei, HAN Jian-jun, LIU Yu-xuan, WU Jian-hua.....	(2186)
波浪中内倾船纵向运动及阻力增值的数值分析	
Numerical study on the response of nonlinear motion of tumblehome ship in waves	
张杰杰, 黄江浩, 姚朝帮, 冯大奎	
ZHANG Jie-jie, YAO Chao-bang, FENG Da-Kui, ZHANG Zhi-guo.....	(2192)
基于改进循环神经网络的污水处理厂出水总氮预测方法	
Prediction method of effluent TN in wastewater treatment plants based on improved Recurrent neural network	
廉勍, 尹海龙	
LIAN Qing, YIN Hai-long.....	(2203)
港内波浪对地震响应的数值模拟研究	
Numerical study of seismic response of wave motion within a harbor	
郑振钧, 马小舟, 董雨进, 马玉祥, 董国海	
ZHENG Zhen-jun, MA Xiao-zhou, DONG Yu-jing, MA Yu-xiang, DONG Guo-ha.....	(2211)

非浮力驱动气泡阻力特性的数值研究

张凌新，周泽才，邵雪明

(浙江大学工程力学系，杭州，310027，Email:mecsxm@zju.edu.cn)

摘要：本研究发展了一种基于动态定位体积力 (DPBF) 的气泡流动模拟方法，以在大参数区间内系统研究非浮力驱动气泡的阻力特性，该方法被证明具有良好的控制效果与计算精度。基于该方法，在 $1 \leq Re \leq 500$, $0.2 \leq We \leq 20$ 的区间内，对纯净液体中的气泡流动进行了 99 个算例的直接数值模拟 (DNS)。结果表明，由于气—液边界存在速度滑移，气泡流动特征与无滑移边界的球体绕流存在显著不同。计算得到了气泡阻力系数，考察了 Re 数和 We 数的阻力相关性，提出了新的气泡阻力封闭关系式，该关系式同时考虑了 Re 数、 We 数的影响，比已有的关系式适用范围更广。

关键字：气—液两相流；气泡；直接数值模拟；阻力

1 引言

气—液两相流，在自然界广泛存在，在工程上也有广泛应用。在不同的计算尺度上，气液两相流所采用的数值模拟方法主要有 3 种，分别为 DNS，Euler-Lagrange (E-L)，Euler-Euler (E-E)。受制于目前的计算水平，DNS 虽然能够最大程度的模拟两相流动细节，但对于规模较大的气泡流仍然难以实施。相比而言，E-L 和 E-E 框架下的数值模拟，在工程上应用更加广泛。无论 E-L 方法还是 E-E 方法，除了湍流模型外，两相各自的控制方程还需要引入相间力，包括阻力、升力、壁面润滑力、虚拟质量力等¹。气泡流动的阻力闭合模型，是影响数值模拟准确性的重要因素。

对于静水上浮的气泡，Moore²、Mei 等³、Tomiyama 等⁴提出了一系列仅考虑 Re 数的阻力模型。另外，Grace 等⁵、Ishii 和 Zuber⁶、Dijkhuizen 等⁷在阻力模型中引入了 Eo 数和 Mo 数，以刻画气泡变形对气泡阻力系数的影响。然而，对于非浮力驱动的气泡流，例如云空化中的泡群输运过程，气泡滑移运动的驱动力主要来源于流动液体对于气泡的表面力。在流动的时间尺度足够小时，重力引起的气泡运动甚至可以忽略。因此，以往所提出的包含 Eo 数和 Mo 数的阻力闭合实际上不再可行。仅单独考虑 Re 数的关系式

基金项目：国家自然科学基金重点项目（No.91852204）

通信作者：邵雪明，Email：mecsxm@zju.edu.cn

仍然是可用的，但却忽略了表面张力的影响。

本文将对大参数范围内的气泡流动进行直接数值模拟（DNS），并基于 DNS 的数据结果，系统考察 Re 数、 We 数的阻力相关性，建立适用于非浮力驱动气泡流的阻力封闭关系式。

2 计算方法及验证

气泡在表面力驱动下在液体中运动，与液体之间存在一定的滑移速度。将参考系固定在气泡体心，即液体相对气泡具有滑移速度，进而发展了一种施加动态定位体积力（DPBF）的固定气泡流计算方法。该方法可在大参数区间内系统地研究气泡流动特性。提出了体积力控制模型的通用形式，如下所示：

$$F_{DP,i}^{j+1} = F_{DP,i}^j + c_{11}d_{b,i}^j + c_{12}d_{b,i}^j |d_{b,i}^j| + c_{21}d_{b,i}^{(1)j} + c_{22}d_{b,i}^{(1)j} |d_{b,i}^{(1)j}| + c_{31}d_{b,i}^{(2)j} + c_{32}d_{b,i}^{(2)j} |d_{b,i}^{(2)j}| + \dots \quad (1)$$

式中， $F_{DP,i}^j$ ， $d_{b,i}^j$ 为气泡在 j 时间步动态体积力和位移的 i 分量，上标(1)、(2)分别表示第一、二阶时间导数， $c_{11}, c_{12}, c_{21}, c_{22}, c_{31}, c_{32}$ 为控制参数。

一系列数值测试的结果表明，式（1）只需要保留到一阶时间导数项就可以满足数值计算的控制要求。在此基础上，整定了控制参数： $c_{11}=100, c_{12}=50, c_{21}=5, c_{22}=250$ 。对气泡进行动态定位的体积力施加在动量方程上：

$$\frac{\partial(\rho\mathbf{u})}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho\mathbf{u}\mathbf{u}) = -\nabla p_{rbf} - (\mathbf{F}_{DP} \cdot \mathbf{h}) \nabla \rho + \nabla \cdot \boldsymbol{\tau} + \mathbf{F}_e \quad (2)$$

基于 VOF 捕捉两相界面，有限体积法离散求解控制方程，对气泡流动进行直接数值模拟。图 1 为 $Re=200, We=4$ 时，一个受控气泡在均匀来流中不同时刻的形态变化。图 2 给出了体积力、气泡位移、气泡速度的输出情况。可以看到体积力的输出最终达到一个稳定状态，气泡位移和速度均收敛于 0。这表明气泡稳定地控制在了目标位置上，控制效果可以满足计算要求。由输出的体积力进行时间平均后，采用下式计算气泡的阻力系数：

$$C_d = \frac{4\langle F_{DP,z} \rangle d_e}{3U_{slip}^2} \quad (3)$$

在不同的 Re 数时，将本研究计算的气泡阻力系数与文献 8 结果进行对比（图 3）。可以看到两者相互印证，误差在可接受范围内。本研究计算方法的准确性得到验证。

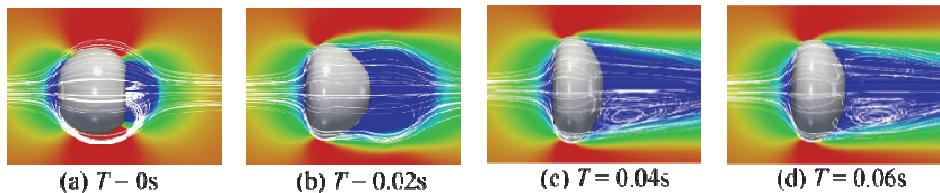
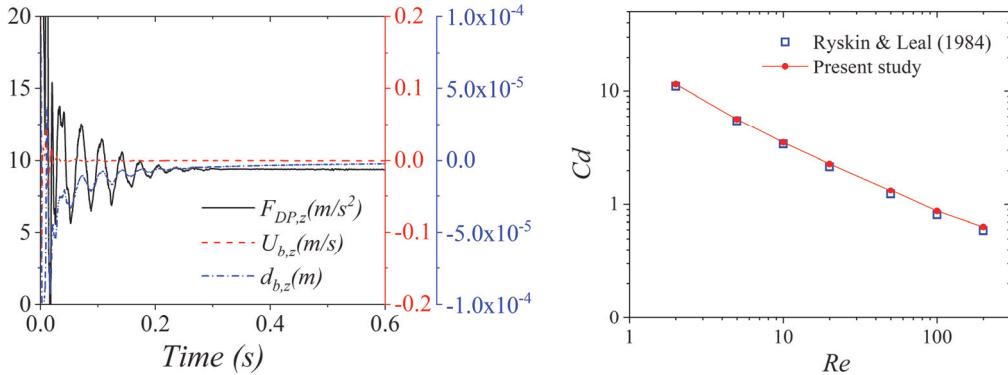
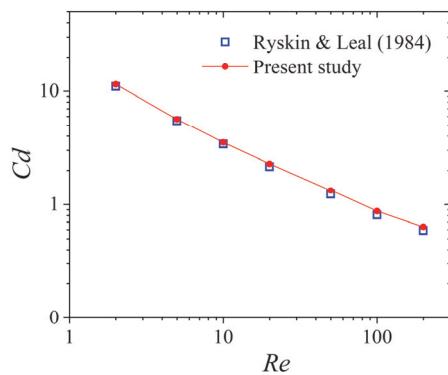


图 1 不同时刻受控气泡的形态变化与流场 ($Re, We = (200, 4)$)

图 2 各物理量的计算输出情况 ($Re, We = (200, 4)$)图 3 阻力系数对比验证 ($We=4$)

3 结果及讨论

在 $1 \leq Re \leq 500$, $0.2 \leq We \leq 20$ 的参数区间内, 对纯净液体中的气泡流动进行了直接数值模拟。算例总数为 99 个, 计算参数设置如表 1 所示。给定滑移速度与气泡直径后, 分别通过改变液体粘性系数和表面张力系数来独立调节 Re 数和 We 数。

表 1 计算参数设置

参数	数值
气泡等效直径 d_e (m)	0.002
滑移速度 U_{slip} (m/s)	0.2
Re 数	1, 2, 5, 10, 20, 50, 100, 200, 500
We 数	0.2, 0.5, 1, 2, 4, 6, 8, 10, 12, 16, 20

图 4 给出了在 We 数为 2 时, 不同雷诺数的气泡流动速度分布。可以看到, Re 数为 1 时, 气泡尾部的高压区使气泡表面出现局部凹陷。在雷诺数升高后凹陷消失, 气泡发生由球形向椭球形的轻微变形。 Re 数较大时, 气泡具有更大的尾流尺度。这表明, Re 数较大时, 相对液体运动的气泡尾流速度衰减更慢。由于气液边界存在滑移, 气泡流动与无滑移边界的球体绕流存在显著差异。气泡尾部流动分离被明显延后, 尾流低速区更加狭小, 流动不易失稳。实际上, 在 Re 数增加至 500 时, 尾流发生分离, 但流动仍然稳定。图 5 给出了在 Re 数为 20 时, 不同 We 数的气泡流动速度分布。 We 数从 0.5 增加至 10, 气泡依次经历了从球形到椭球形再到碟形的形状变化。显然, We 数越大, 气泡形状变得更加扁平, 使得气

泡迎流面积增大，这将使气泡所受阻力增大。

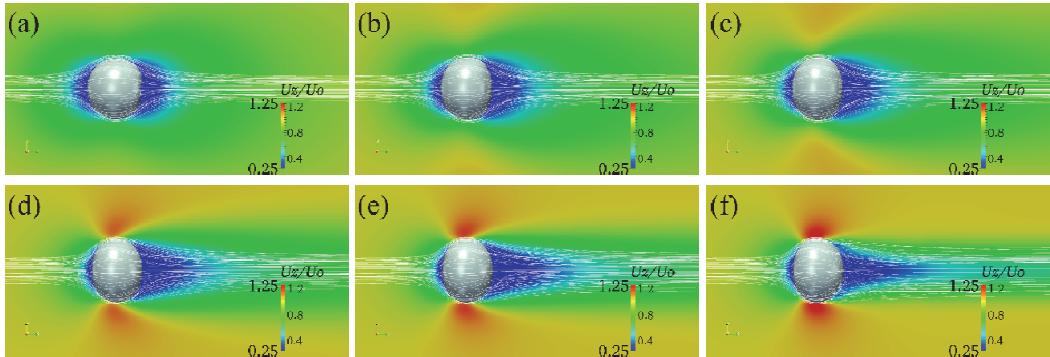


图 4 $We=2$ 时不同 Re 数的气泡流动速度场

(a) $Re=1$, (b) $Re=5$, (c) $Re=10$, (d) $Re=50$, (e) $Re=100$, (f) $Re=500$ 。 U_z 为流向速度, U_0 为入口速度

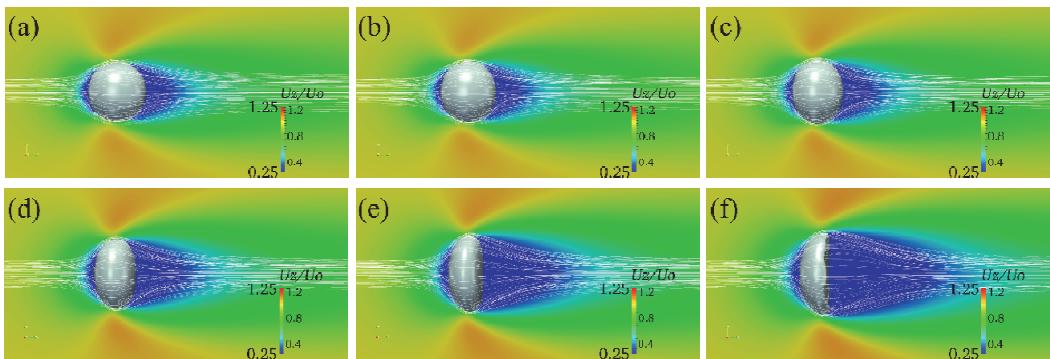


图 5 $Re=20$ 时不同 We 数的气泡流动速度场

。 (a) $We=0.5$, (b) $We=1$, (c) $We=2$, (d) $We=4$, (e) $We=6$, (f) $We=10$ 。

图 6 给出了由 DNS 计算的所有气泡阻力系数结果。在不同 We 数时, 气泡阻力系数随 Re 数的变化遵循相同的趋势。在本文研究的参数范围内, Re 数与气泡阻力系数呈负相关, We 数与气泡的阻力系数呈正相关。随 Re 数增大, We 数对阻力系数的影响也变大。在 Re 数为 1 时, 球形气泡的阻力系数的结果近似于解析解 $C_d = 16/Re$ 。

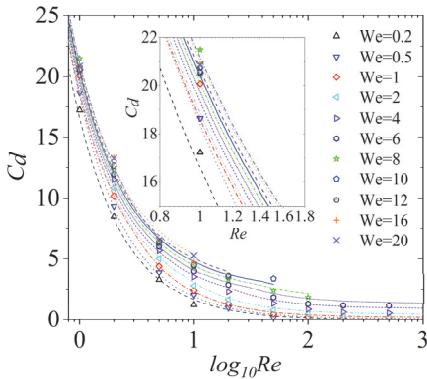


图 6 气泡阻力系数分布

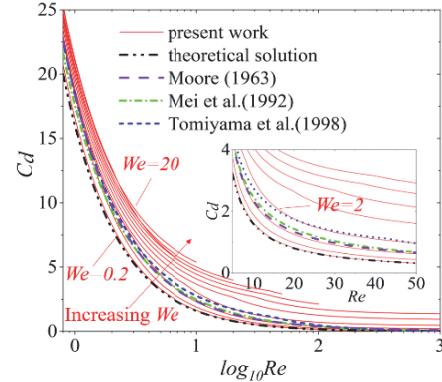


图 7 不同气泡阻力闭合模型的对比

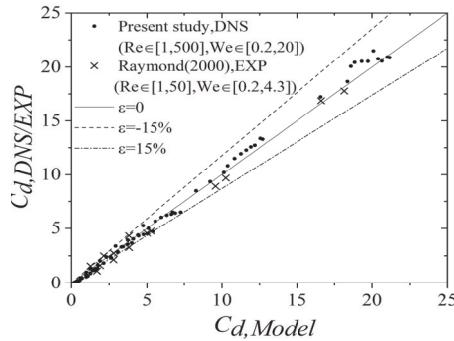


图 8 模型预测值与本研究 DNS、文献实验结果的对比。 $C_{d,Model}$ 为模型计算值， $C_{d,DNS/EXP}$ 为本文 DNS 结果与文献实验结果， $\epsilon = (C_{d,Model} - C_{d,DNS/EXP}) / C_{d,DNS/EXP}$

在仅考虑 Re 数的单气泡阻力关系式中，比较常用的由 Moore²、Mei³、Tomiyama⁴ 等人提出。基于 Tomiyama 等人⁴提出的阻力模型，采用如下封闭形式来计入 We 数的影响：

$$C_d(Re, We) = f_1(We) + \min\left(\frac{16}{Re}(1 + 0.15Re^{0.687}), \frac{f_2(We)}{Re}\right) \quad (4)$$

拟合所有 DNS 的数据结果，得到了式(4)中 $f_1(We)$ 和 $f_2(We)$ 的关系式，如式(5)所示。式(4)和式(5)构成了单个气泡在纯净液体中滑移的阻力闭合模型，其适用范围为 $(Re, We) = [1,500] \times [0.2, 20]$ 。

$$f_1(We) = -\frac{13}{200} + \frac{9}{33}We - \frac{13}{2000}We^2, \quad f_2(We) = \frac{77}{5} + \frac{59}{10}We - \frac{7}{25}We^2 \quad (5)$$

图 7 给出了该模型与 Moore²、Mei 等³、Tomiyama 等⁴提出的模型以及气泡阻力系数解析解(仅在 $Re \leq 1$ 有效)之间的对比。三者中 Tomiyama 等⁴提出的模型更大，而其他两者的模型结果比较接近。这 3 个模型仅在接近于球形泡的较低 We 数下 ($We \leq 2$) 适用。对

于高 We 数，气泡变形较大，使用这三个模型会引入较大的误差。引入 We 数后，本文提出的单泡阻力闭合模型能够很好的覆盖这三个模型。图 8 给出了闭合模型的预测值与本文直接数值模拟结果、Raymond 等 9 实验结果的对比。相对来说，较大的阻力系数值匹配更好。总体而言，在本研究研究的范围内，式（4）和式（5）组成的模型计算值与 DNS、实验结果匹配较好，总体误差基本控制在 15% 以内。

4 结论

本研究发展了一种施加动态定位体积力的固定气泡计算方法，提出了体积力控制模型并整定了其参数。基于该方法，通过直接数值模拟，计算了非浮力驱动气泡的阻力。在 $1 \leq Re \leq 500$, $0.2 \leq We \leq 20$ 的参数区间内， Re 数与阻力系数呈负相关， We 数与阻力系数呈正相关。在不同 We 数时，气泡阻力系数随 Re 数的变化遵循相同的趋势。随 Re 数增大， We 数对阻力系数的影响也变大。基于 DNS 的计算结果，建立了一个新的单气泡阻力闭合关系式。该关系式同时引入了 Re 数和 We 数的影响，可作为非浮力驱动气泡流的阻力封闭基准模型。

参考文献

- 1 Deen N G, van SintAnnaland M, Kuipers J A M. Multi-scale modeling of dispersed gas–liquid two-phase flow[J]. Chemical engineering science, 2004, 59(8-9): 1853-1861.
- 2 Moore D W. The boundary layer on a spherical gas bubble[J]. Journal of Fluid Mechanics, 1963, 16(2): 161-176.
- 3 Mei, Renwei, James F. Klausner, and Christopher J. Lawrence. A note on the history force on a spherical bubble at finite Reynolds number[J]. Physics of fluids 6.1 (1994): 418-420.
- 4 Tomiyama A, Kataoka I, Zun I, et al. Drag coefficients of single bubbles under normal and micro gravity conditions[J]. JSME International Journal Series B Fluids and Thermal Engineering, 1998, 41(2): 472-479.
- 5 Grace J. Shapes and velocities of bubbles rising in infinite liquid[J]. Transactions of the Institution of Chemical Engineers, 1973, 51: 116-12
- 6 Ishii, Mamoru, and Novak Zuber. Drag coefficient and relative velocity in bubbly, droplet or particulate flows[J]. AIChE Journal 25.5 (1979): 843-855.
- 7 Dijkhuizen W, Roghair I, Annaland M V S, et al. DNS of gas bubbles behaviour using an improved 3D front tracking model—Drag force on isolated bubbles and comparison with experiments[J]. Chemical Engineering Science, 2010, 65(4): 1415-1426.
- 8 Ryskin G, Leal L G. Numerical solution of free-boundary problems in fluid mechanics. Part 1. The finite-difference technique[J]. Journal of Fluid Mechanics, 1984, 148: 1-17.
- 9 Raymond F, Rosant J M. A numerical and experimental study of the terminal velocity and shape of bubbles

in viscous liquids[J]. Chemical Engineering Science, 2000, 55(5): 943-955.

Numerical investigation on the drag force of a non-buoyancy driven bubble

ZHANG Ling-xin, ZHOU Ze-cai, SHAO Xue-ming

(Department of Engineering Mechanics, Zhejiang University, Hangzhou, 310027. Email:mecsxm@zju.edu.cn)

Abstract: A dynamic-positioning body force (DPBF) method is developed to systematically investigate the drag force of a non-buoyancy driven bubble in a wide parameter range. It is proved that this numerical method has a good control performance and computation accuracy. Based on this method, 99 direct numerical simulation (DNS) cases on a slipping bubble are carried out. The results show that the flow characteristics of a bubble is significantly different from a sphere with a slip boundary due to the slip gas-liquid boundary. Based on the DNS data, bubble drag coefficients are calculated, and the drag correlations of Re and We are investigated. A new drag closure empirical relation is proposed considering both Re and We, which has a wider application range than previous relations.

Key words: Gas-liquid flow; Bubble; Direct numerical simulation; Drag force

深水油气钻采井筒多相流动理论前沿问题 研究进展

孙宝江、孙小辉、娄文强

(中国石油大学(华东) 石油工程学院, 266580, Email: sunbj1128@126.com)

1 引言

目前我国能源形势日趋严峻, 陆地和浅海油气产能有限, 2019 年石油对外依存度突破 72%, 天然气对外依存度突破 45%, 为解决油气供应保障问题, 加大深水油气田的勘探开发势在必行。井筒多相流动贯穿于钻完井的整个过程, 在陆地和浅水钻井中, 在气体侵入井筒条件下, 通常采用气液两相流动理论进行描述, 为钻井和压井的水力参数设计、井壁稳定分析等提供理论依据, 有效保障了钻完井作业的安全高效。

但是由于海洋和地质环境的复杂性, 深水油气钻采面临诸多挑战, 一方面, 同陆地和浅水相比, 深水地层欠压实, 钻井液安全密度窗口窄, 对井筒多相流动理论的准确度和多相流动压力控制精度提出了很高的要求, 常用理论模型暴露出很多问题, 制约着工程技术的发展。深水井筒多相流动理论的完善需要突破几个前沿热点问题, 主要包括: 井筒内大温差交变环境下的水合物生成和分解、井底高温高压环境下的酸性气体超临界相态变化、多组分气体在钻井液中的溶解和析出、油基钻井液体系内的复杂多相流型转化机制、以及深水井筒压力的精确预测与控制。本文从深水井筒多相流动计算的角度阐述了上述前沿问题的发展现状和趋势, 为我国深水钻完井工程基础理论的发展提供指导和帮助。

2 井筒天然气水合物相变

2.1 井筒天然气水合物相变的研究进展

深水钻井条件下海水段环境温度随着水深逐渐减小。泥线附近存在低温区域 (1500 m 水深处可低至 2-4°C), 气体与水会生成固态水合物, 运移离开相变敏感区域后, 水合物又重新分解。1 立方米的水合物可在常温下释放 164 立方米的气体, 水合物相变过程中伴随

的气态和固态转化，致使多相流型转化机制与流动规律复杂。

多相流动体系下水合物热力学相平衡和相变动力学的精确表征，是发展含水合物相变的井筒多相流动理论的基础。目前国内外针对水合物相变问题的研究，主要是基于反应釜中静止或搅拌条件下水合物生成分解实验，进行规律认识和模型建立，分析本征动力学、传质、传热等不同因素对水合物相变速率的影响。针对流动条件下的水合物相变问题研究，主要是聚焦于油气输送管道中的原油主导体系以及无自由水的气体流动体系。针对深水钻井以及气井测试等工况，国内外的研究主要通过结合水合物的热力学相平衡条件和井筒内的温度场、压力场分布，分析井筒内的水合物相稳定区域，制定水合物抑制剂注入方案。

虽然目前关于水合物相平衡条件以及气液界面相对单一的流动体系中的水合物相变速率预测，已经开展了大量的研究工作。但是在钻进、停钻、起下钻、压井、采气等不同工况下，天然气水合物钻采井筒多相流动体系中气-液-固相界面复杂、形态多变、传质传热规律认识不清，现有模型难以准确描述井筒内水合物生成与分解动力学特征，同时水合物相变对井筒内的流体流变性以及流型转化都会产生重要的影响，需要深入开展研究。

2.2 井筒天然气水合物相变拟解决的关键问题及发展趋势

(1) 复杂钻井液体系下水合物相平衡条件

水合物相平衡是混合流体体系吉布斯自由能趋于最小的状态，需要基于不同组分的化学势相等进行判断。深水钻井井筒内可能存在水、油、多组分气体、盐、聚合物、岩屑等复杂流动组分，在溶液相中存在复杂的组分间相互作用。现有研究表明，不同溶质包括气体组分、盐、油的类型和含量都会显著影响水的活度，改变井筒内的水合物相稳定区域，需要建立复杂钻井液体系下水合物相平衡条件的精确预测方法。

(2) 复杂多相流动界面条件下水合物生成动力学的精确表征

井筒内可能会存在泡状流、搅拌流、段塞流和环雾流等多种流型，气液相界面的演化非常复杂，水合物相变速率同时受到气液相主体浓度变化、换热速率以及其他多种因素的影响。复杂流动界面条件下水合物生成和分解速率的精确表征，需要研究不同流型条件下气-液-固相界面分布形态，分析相变过程相界面主/客体组分浓度、热焓等参数变化特征，建立不同流型中气-液-固相界面传质传热模型。

(3) 含水合物相变的井筒多相流动模型

水合物生成的气体来源可能为储层分解气、伴生游离气、岩屑气等。需要开展天然气水合物钻采井筒多相流动模拟实验，研究不同气侵工况条件下井筒内的水合物含量和相变速率，分析其对流体流变性变化和多相流流型转化的影响特征。然后针对天然气水合物钻采井筒内天然气、水、水合物、钻井液、岩屑等多组分流动特点，构建考虑水合物相变的井筒多相流动控制方程组，包括连续性方程、动量方程及能量方程；建立适用于复杂结构井的气-液-固分布特征、相间滑脱、摩阻损失等辅助方程，构建考虑水合物相变的井筒气-液-固变质量非稳态多相流动模型。

3 井筒酸性气体超临界相变

3.1 井筒酸性气体超临界相变的研究进展

深水钻井地层温度随深度逐渐增加，井底处为高温高压状态，地层中的气体侵入井筒后一般处于超临界状态。气藏流体的主要成分一般为甲烷 (CH_4)，但由于烃源岩热演化、原油生物降解、岩浆活动等多种因素所致，地层气体中通常含有一定量的酸性气体组分，包括二氧化碳 (CO_2) 和硫化氢 (H_2S)。在我国海洋油气区块（如渤海湾盆地以及南海珠江口盆地流花地区）的勘探或钻采作业中，均有报道发现酸性气体储层，其中莺歌海盆地和琼东南盆地中的天然气取样分析发现，有的样品中 CO_2 的含量可达 90% 以上。在井筒内向上运移过程中，气体由超临界相会逐渐转化为气相，影响井筒内的流型转化和压力分布特性。

目前国内外学者主要针对酸性气体超临界相的研究主要聚焦于其物性和相态变化。与常见的烃类气体组分相比， CO_2 和 H_2S 含有较强的极性键，构成非理想的混合体系，其热物性的准确计算更加困难。现有研究发现，酸性气体处于超临界相状态下，密度大、趋近于液体，粘度低、趋近于气体，并且在水中具有很高的溶解性。

尽管人们对静态条件下的超临界相平衡特性有了充分的认识，但是在井筒动态多相流动体系下，超临界相的存在会导致井筒内的流型转化更加复杂，已经开展的实验认识表明，深水井筒内可能会出现超临界-液流、液-液流以及传统气液两相流等复杂流型，因此需要深入研究含酸性气体超临界相-液相-气相复杂相变条件下的井筒流型转化判据和摩阻压降变化。

3.2 井筒酸性气体超临界相变拟解决的关键问题及发展趋势

（1）超临界流体的相态预测和物性计算方法

纯气体的气液相分界线仅与气体类型有关，并且临界点温度和压力值为常数。但是对于酸性天然气，其气相、液相以及超临界相的变化均与流体组成相关，需要建立严格的多组分流体相平衡模型，实现对井筒内流体相态的精准识别。此外，酸性气体物性通常采用状态方程进行计算，虽然大多数温压范围内都能实现较高的计算精度，但是临界点附近的超临界区域物性参数变化非常剧烈，会对井筒多相流动过程施加非常大的扰动。因此需要建立并完善超临界流体的相态预测和物性计算方法。

（2）全流型域的超临界流体体积分数和摩阻压耗计算方法

与常规气液多相流动相比，由于酸性气体相变，井筒内可能出现超临界-液流和液-液流。流型的复杂变化不仅为流型转化判据的建立带来困难，还会导致井筒内不同流型边界处出现不收敛的问题。因此，需要建立适用于全流型域的气体体积分数和摩阻系数计算方法，为准确刻画井筒内酸性气体超临界相变导致的复杂流动提供理论支撑。

4 高温高压下的流体溶解与析出

4.1 高温高压井筒内流体溶解与析出研究进展

对于水基钻井液,酸性气体在其中具有很高的溶解度,而在油基钻井液中不同气体的溶解度更高。深水钻井过程中井底高温高压条件为地层中气体向钻井液中溶解提供了有利的条件。溶解在钻井液中的气体由井底向井口运移时,将经历大温差、高压差的环境变化,溶解度急剧降低,溶解气大量脱溶析出,体积急剧膨胀,引发严重的井喷。深水钻井过程中,流体的溶解析出导致气侵具有隐蔽性,井筒多相流动规律的复杂性大大增加。

深水井筒多相流动体系下地层流体在钻井液中溶解度的准确描述,是深水钻井过程中井筒压力精细控制的基础,是井筒安全性的保障。目前国内外钻井液中气体的溶解析出问题,分别基于油基钻井液和水基钻井液体系中甲烷溶解度实验、酸性气体溶解度实验开展溶解规律分析,分别建立溶解度模型。针对深水钻井过程中钻井液气体溶解度计算问题,多采用经验模型,近似认为其等于各个纯气体组分在不同单一相态中的溶解度的体积加权平均值,并通过加权平均模型建立了井筒多相流动理论模型。

目前国内外针对单相气体在单一相态中的溶解机理开展了大量的研究工作,但由于钻井过程中的地层流体组分复杂,多组分气体在钻井液中的溶解过程存在相互影响,不同气体组分、不同气体组分比例条件下的溶解机制研究相对薄弱,溶解机理尚不清晰,利用加权平均的假设模式存在计算误差,不能对井筒压力进行精细描述。实际钻井过程中钻井液体系复杂,针对不同地层类型钻进时钻井液添加剂种类多变,添加剂成分以及含量对地层气体的溶解度存在影响,目前对复杂钻井液体系下的气体溶解机理认识仍不明确。同时现有针对钻井液中溶解度的温压实验范围有限,依据实验数据得到的经验模型对实际钻井工况下的高温高压条件下溶解度预测不准,需要针对钻井液体系中的气体溶解度开展深入研究。

4.2 高温高压下的流体溶解与析出拟解决的问题及发展方向

(1) 多组分气体在钻井液中溶解规律及溶解度预测模型

多组分的地层流体在钻井液中溶解时存在相间的相互作用,组分间的相互作用使钻井液中气体溶解规律发生改变,井筒流动规律的复杂性增加。开展不同气体组分在钻井液中的溶解度实验,分析气体组分之间相互影响规律。精确预测深水钻井过程中地层流体在钻井液中的溶解度,需要开展多组分气体多相平衡理论研究,构建不同气体组分体系在钻井液中的溶解度预测模型。

(2) 复杂钻井液体系条件下气体溶解度预测模型

钻井液作为一种复杂溶液体系,其中的盐类、聚合物添加剂对气体在钻井液中的溶解相平衡产生重要影响,开展高温高压条件下不同添加剂体系下气体的溶解度实验,分析不同添加剂对气体溶解度的影响规律,建立不同添加剂体系中的气体溶解度预测模型。开展

多添加剂钻井液体系条件下的气体溶解度实验，分析添加剂类型、添加剂含量对气体溶解度的影响规律，建立适用于多添加剂钻井液体系的气体溶解度预测模型。

5 深水井筒油基钻井液体系流型转化机制

5.1 井筒多相流流型转化机制研究进展

当地层流体特别是气体侵入井筒后，由于沿井深方向大幅度的温压场变化，多组分流体在井筒内呈现多种流动状态。不同流型的相间相互作用机制差异大，复杂多变的多相流动特征导致溢流评价困难，井筒压力变化难以精确预测。

自上世纪 50 年代至今，国内外学者针对管道/井筒内气液两相流动过程已开展了大量的实验及理论研究。研究主要针对空气-水或空气-低粘牛顿流体中的流型转化机制、气液分布规律、流动压力计算开展，并且已建立了相对完善的理论体系。以往钻井过程中多采用弱非牛顿特性的水基钻井液体系进行钻进，牛顿流体中的多相流动理论适用性高，促进了陆地及浅水油气钻采过程中的多相流动压力计算以及钻完井参数设计。

随着油气开采向深水领域的不断拓展，钻井工况逐步苛刻化，钻井液体系逐步复杂化，油基钻井液以优越的性能逐步成为主流钻井液体系。油基钻井液具有较强的非牛顿特性，并导致气液相间动力学特征发生改变，导致流型转化边界、气液分布规律以及压力损失规律发生改变。目前国内外针对油基钻井液钻井条件下的井筒压力预测仍然沿用牛顿流体中的多相流动理论，该理论模型对气液两相间的相互作用都做了一定的简化假设，不能准确描述油基钻井液两相流动过程中的质量和动量交换、能量损失过程，导致油基钻井液体系下的井筒压力预测不精确，影响钻井溢流事故分析以及压井处理效率。目前针对油基钻井液多相流动过程中的流型转化边界、气液分布规律、压力损失规律的研究薄弱，多相流动理论的发展落后于钻井井筒压力精细控制技术的需求。

5.2 流型转化机制研究拟解决的关键问题及发展方向

(1) 油基钻井液体系流型转化判据

油基钻井液体系具有较强的非牛顿流动特征，随着气液两相流速的变化其粘度也会发生变化，不同流型下气液间应力特征、气泡聚并破裂条件、气相滑脱速度等都与水、低粘度油等牛顿流体中气液两相流动规律不同，泡状流-段塞流、段塞流-环雾流等流型间转化边界也将发生改变。揭示钻井井筒中油基钻井液气液两相流动流型转化机制，建立考虑油基钻井液非牛顿流体特性的气液两相流型转化判据是建立井筒两相流动模型的基础。开展油基钻井液体系下的多相流动实验，研究不同气液相表观速度下的空隙率波及截面气液相分布特征，建立适用于油基钻井液的流型转化判据。

(2) 油基钻井液体系井筒多相流压力计算方法

油基钻井液体系的非牛顿特性致使气液两相的滑脱速度以及相间相互作用机制区别于

牛顿流体。基于油基钻井液气液两相流动实验分析，提出适用于油基钻井液体系中气体滑脱速度计算方法。结合气液两相滑脱效应，建立考虑气液相间的相互作用及油基钻井液非牛顿特性的综合摩阻计算模型。油基钻井液中不同流型条件下气体分布特征与牛顿流体中的差异较大，针对油基钻井液中特定流型提出不同气液速度下的空隙率的计算方法。综合考虑油基钻井液的气液分布特征、相间滑脱效应、摩阻损失等计算方法，构建适用于油基钻井液体系的井筒多相流压力计算方法。

6 深水井筒压力预测与控制

深水地层的上覆岩层压力部分被海水替代，造成地层欠压实，破裂压力低、安全密度窗口窄，对井筒流动压力预测和控制精度提出了更高的要求。但是在复杂海水环境和地质条件的双重影响下，井筒内流体组分多变，存在多种相态和流型，多相流动规律复杂、井筒压力预测难度大。

在前文的研究基础上，针对深水油气钻采井筒多相流动理论的几个前沿问题进行了分析，包括：井筒内天然气水合物相变、酸性气体超临界相变、高温高压条件下的流体溶解与析出和油基钻井液复杂流型转化。结合这些关键问题的下一步发展趋势进行了持续攻关，构建了深水井筒超临界-气-液-水合物四相流动模型，提出了深水井筒多相流动压力精确预测方法。

$$\begin{aligned}
 & \text{1. 超临界相连续性方程: } \frac{\partial}{\partial t} (A\rho_{sc} f_{sc,i}(P, T, M_{sc,i}, S_{sc,i})) + \frac{\partial}{\partial s} (A\rho_{sc} v_{sc,i} E_{sc,i}) = q_{sc,i} - q_{sc,e} \\
 & \text{2. 气相连续性方程: } \frac{\partial}{\partial t} (AE_g \rho_g + \frac{R_g \rho_g A E_g}{B_g}) + \frac{\partial}{\partial s} (AE_g \rho_g v_g + A \frac{R_g \rho_g E_g v_g}{B_g}) = q_g - q_{g,e} \\
 & \text{3. 液相连续性方程: } \left\{ \begin{array}{l} \text{钻井液: } \frac{\partial}{\partial t} (A\rho_w E_w) + \frac{\partial}{\partial s} (A\rho_w v_w E_w) = -(1-x_g) r_g - q_{sc} \\ \text{产出油: } \frac{\partial}{\partial t} (AE_o \rho_o - \frac{R_o \rho_o A E_o}{B_o}) + \frac{\partial}{\partial s} (AE_o \rho_o v_o - A \frac{R_o \rho_o E_o v_o}{B_o}) = q_o \\ \text{产出水: } \frac{\partial}{\partial t} (AE_w \rho_w) + \frac{\partial}{\partial s} (AE_w \rho_w v_w) = q_w \end{array} \right. \\
 & \text{4. 固相连续性方程: } \left\{ \begin{array}{l} \text{岩屑相: } \frac{\partial}{\partial t} (AE_r \rho_r) + \frac{\partial}{\partial s} (AE_r \rho_r v_r) = q_r \\ \text{水合物: } \frac{\partial}{\partial t} (A\rho_h E_h) + \frac{\partial}{\partial s} (A\rho_h E_h v_h) = r_h \end{array} \right.
 \end{aligned}$$

图 1 深水井筒超临界-气-液-水合物四相流模型（以连续性方程为例）

通过与室内实验数据和实测井数据对比，结果表明新模型井筒压力预测精度由传统模型的 30% 减小至 8%，实现了深水油气钻探井筒多相流压力的精确预测。利用建立的模型进行计算分析发现，由于水合物、超临界相变、酸性气体溶解析出等复杂因素，深水钻井气侵具有早期隐蔽性和后期突发性。与陆地和浅水钻井相比，深水溢流监测和井筒压力的

难度更大。

基于建立的深水井筒四相流模型和井筒压力精细预测方法,开发了 Sun Drilling 软件平台(如图 2 所示),实现了深水钻井、压井、测试、固井等不同工况下的水力参数优化和井筒压力精确预测,为深水油气开发提供了强有力的技术支撑。

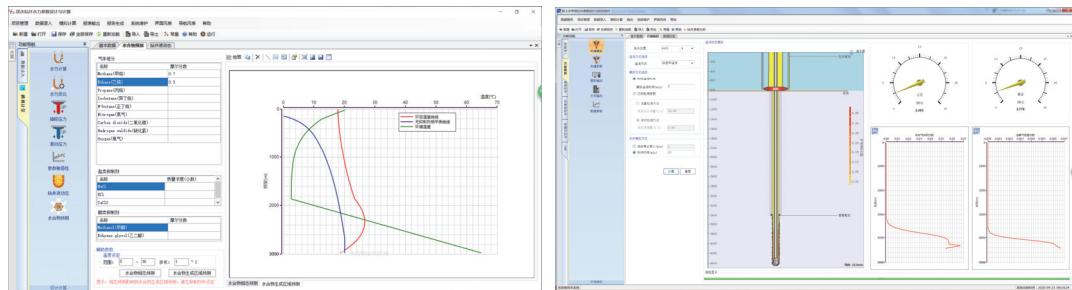


图 2 深水钻井和压井水力参数优化软件

多孔介质热对流的拉格朗日动力学 和传热特性

孙超^{1,2}, 刘爽¹, 蒋林峰¹, 汪程¹

(1 清华大学 燃烧能源中心和能源与动力工程系, 北京, 100084;

2 清华大学 航天航空学院, 北京, 100084, Email:chaosun@tsinghua.edu.cn)

摘要: 本文基于孔隙尺度模型对随机多孔介质中的 Rayleigh-Bénard 对流进行了数值模拟研究, 重点关注不同孔隙度 ϕ 下流体质点的拉格朗日动力学和传热特性。由于多孔介质和流动相干结构的相互作用, 流场呈现出高度的不均匀性, 包含高速的对流通道和低速的停滞区域。孔隙结构引起的流场变化会显著影响流体质点的运动特征。通过分析流体质点沿其轨迹的运动过程, 发现随着 ϕ 的减小, 流体质点在长时间里表现出反常输运的特征, 这源于流动拉格朗日速度的长时关联性。随着孔隙度的降低, 垂直方向速度和温度脉动的互相关性增强, 这揭示了在多孔介质对流中增强传热的一种机制。

关键词: 多孔介质; 热对流; 拉格朗日动力学; 传热

1 引言

多孔介质流动中的输运和混合过程在自然环境和工业应用中广泛存在, 例如采油过程、地下水污染物的输运以及生物系统中的输运^[1-3]; 而流体质点的动力学行为往往能够反映出流场的特性^[4-6], 因此理解复杂多孔介质流动中流体质点的动力学具有重要的理论意义和应用价值。

压力驱动多孔介质流动在达西状态下的输运和混合过程已得到广泛的研究, 并取得了重要进展。已有研究表明输运过程由孔隙中速度的概率密度函数决定, 特别的, 低速区间的概率分布对多孔介质流动的反常输运起着关键作用^[7]。Souzy 等对三维多孔介质中示踪粒子的运动行为开展了实验研究, 发现从弹道输运区间 (ballistic regime) 到中间反常输运区间的转变, 最终向扩散区间的过渡由最小速度决定^[8]。此外, 已有学者针对复杂物理效应对多孔介质流动输运和混合过程的影响开展研究, 例如考虑流动的惯性效应^[9]。目前关于浮力驱动多孔介质对流的相关研究还较少, 由于它与自然和工业中的许多过程有关, 例如地热能回收和二氧化碳的地质封存^[10], 因此本文对这一过程开展研究。

2 物理模型

我们考虑二维方腔中的 Rayleigh-Bénard (RB) 对流，孔隙结构由方腔中随机分布的直径为 D 的圆形障碍物构成。孔隙中的流体流动由 Oberbeck-Boussinesq 近似下的 Navier-Stokes 方程描述。系统的无量纲参数包括瑞利数 Ra 和普朗特数 Pr ，孔隙结构由无量纲参数孔隙度 ϕ 刻画，表示流体的体积分数。在没有孔隙结构的经典 RB 对流中 $\phi=1$ 。方腔边界和流体-固体界面满足无滑移和无穿透条件。水平顶板和底板恒温，侧壁绝热。假设流体和固体具有相同的传热性质。我们采用时空二阶精度的有限差分法求解控制方程，通过浸没边界法施加流体-固体界面的速度边界条件，通过在全场求解温度方程来考虑流体和固体之间的共轭传热。关于物理模型和数值方法的更多细节请读者参考[11]。在直接数值模拟中，基于拉格朗日跟踪算法，共跟踪了 20 万个流体质点的运动。固定 $\text{Ra}=10^9$, $\text{Pr}=4.3$, $D=0.02$ ，考察不同孔隙度 ϕ 下流体质点的运动规律和传热特性。

3 流动结构

图 1 显示了不同孔隙度 ϕ 下温度 T 和速度幅值 v 的瞬时分布，以及流体质点的典型轨迹。在 $\phi=1$ 的经典 RB 对流中，流场包含一个充分发展的大尺度环流和两个角涡，流体质点围绕这些结构进行规则的、周期性的运动，如图 1(i) 所示。障碍物的存在会显著改变流动结构和质点的运动。随着 ϕ 减小，多孔介质会增加流动阻力，使得对流强度减弱，并且体区的温度混合效率降低，如图 1 中温度和速度幅值分布所示。当系统包含少量障碍物时，流动结构变得不规则，相应的流体质点的运动变得更加无序，如图 1(j) 所示。由于多孔介质与相干结构的相互作用，流场具有显著的非均匀性，并随空间和时间变化。有趣的是，对于较小的孔隙度 ϕ ，流动由大尺度羽流主导，孔隙中出现了流动较强的对流通道，这与羽流的运动密切相关；由于障碍物的阻碍，流场中也出现了低速区域，如图 1(g,h) 所示。沿着对流通道，可以观察到流体质点的长程输运，同时流体质点也可能在相当长的时间内“陷入”在低速区域内。

在多孔介质热对流的非均匀流场中，流体质点的运动高度无序。为了量化流体质点的运动，我们在图 2(a) 中给出了不同孔隙度 ϕ 时归一化速度 v/σ_v 的概率密度函数 $P(v/\sigma_v)$ ，其中 σ_v 是 v 的标准差。随着 ϕ 的减小， $P(v/\sigma_v)$ 的形状发生显著改变，尤其是低速区间的概率密度显著增大。图 2(a) 的插图显示了不同 ϕ 时流体质点归一化速度 v/σ_v 的时间序列。结果表明，对于较小的 ϕ 值，由于对流通道和低速区域的出现，速度的时间序列表现出强烈的间歇性，在流体质点的高速运动过程中会出现长时间的低速区间。

为了进一步量化流体输运特性，图 2(b) 给出了不同 ϕ 时流体质点速度的时间自相关函数

$C_v(t) = \langle [v_0 - \langle v_0 \rangle][v_t - \langle v_t \rangle] \rangle / \sigma_v^2$, 其中 v_t 表示t时刻的质点速度。 C_v 随着t减小, 反映了质点运动与初始条件的相关性减弱。与较大孔隙度时相比, 小孔隙度时 C_v 衰减更慢, 并且在给定时刻下随着 ϕ 的减小, 自相关性会增强。我们注意到, 随着 ϕ 减小, 除了衰减率发生了定量改变, C_v 的衰减形式也发生了变化。对于较大的 ϕ 值, C_v 呈指数衰减, 即 $\ln(C_v) \sim t$, 如图2(b)所示。对于两个更小的 ϕ 值, $C_v(t)$ 的衰减形式类似, 都近似遵循 $\ln(C_v) \sim \sqrt{t}$ 的拉伸指数形式, 表明当 ϕ 足够小时, 速度自相关函数的改变是由拉格朗日输运特征时间尺度的变化主导。在小孔隙度时, 拉伸指数形式的松弛特性归因于系统包含一系列的具有广泛衰减率范围的指数衰减过程^[12]。

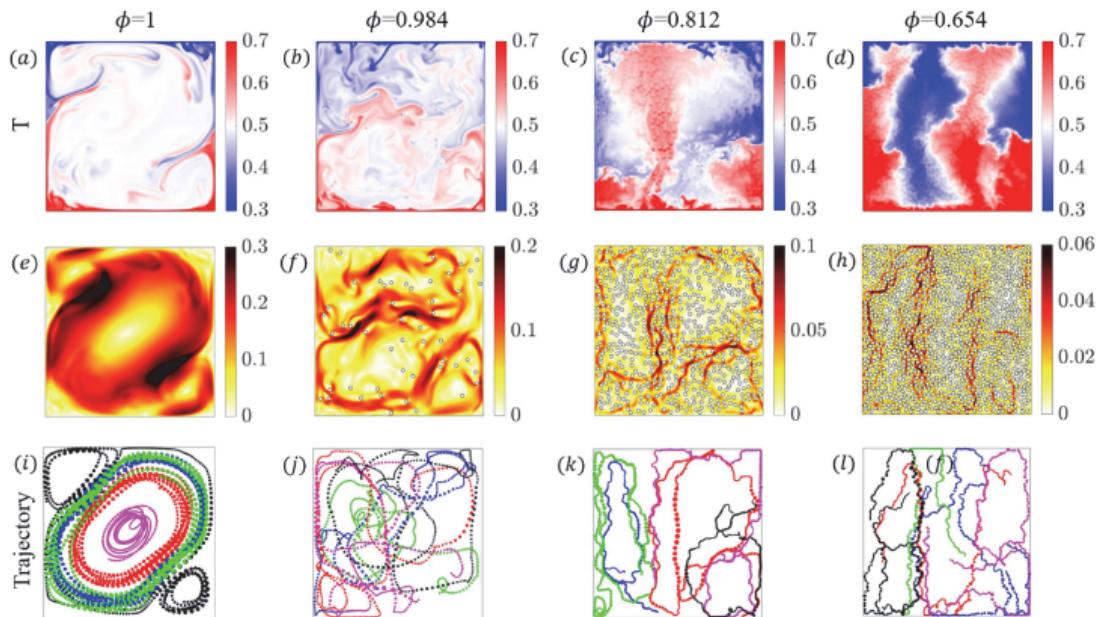


图1 不同孔隙度 ϕ 下(a-d)温度和(e-h)速度幅值的瞬时分布, 以及(i-l)流体质点的典型运动轨迹。

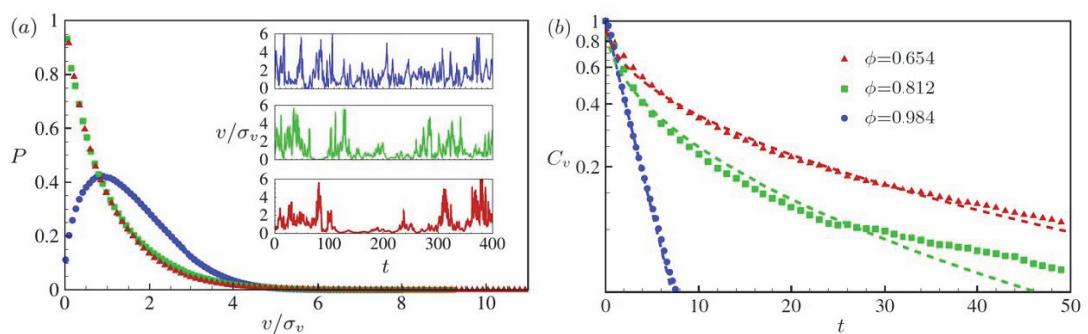


图2 不同孔隙度 ϕ 下的(a)归一化速度的概率密度函数 $P(v/\sigma_v)$ 和(b)流体质点速度的自相关函数 $C_v(t)$, 其中 σ_v 为速度 v 的标准差。(a)中的插图显示了不同 ϕ 下 v/σ_v 的时间序列, 从上到下 ϕ 依次为 0.984, 0.812, 0.654。

4 流体质点的输运特性

我们通过量化流体质点沿轨迹的位移 $s(t) \equiv \int_0^t v(\tau)d\tau$ 来研究其输运特性。流体质点集合的输运过程表现出强烈的脉动，而系综平均后的位移 $\langle s \rangle$ 随时间的增长率即为平均速度 $\langle v \rangle$ ，即 $\langle s \rangle = \langle v \rangle \cdot t$ ，其中 $\langle \cdot \rangle$ 表示对颗粒的系综平均。图 3 显示了流体质点的位移方差 $\sigma_s^2 = \langle (s - \langle s \rangle)^2 \rangle$ 随时间的演化， σ_s^2 用于表征位移分布的宽度。结果表明，在 t 较小时， σ_s^2 的增长满足弹道标度律，即 $\sigma_s^2 \sim t^2$ 。对不同孔隙度 ϕ ，这种弹道形式的增长具有鲁棒性，且比例常数随 ϕ 减小。弹道输运区间是各类输运过程的一个普遍现象^[13-16]，源于在短时间内拉格朗日速度具有强自相关性。

图 3 也表明，在 t 较大时 σ_s^2 会逐渐偏离弹道标度行为，而表现出亚弹道的标度律，即 $\sigma_s^2 \sim t^\gamma$ ，其中有效标度指数 $\gamma < 2$ 。在 t 较大时出现这种输运特性的转变表明，流体质点的运动变得与初始条件无关^[15]。当系统包含少量障碍物时，流体质点在无规则流场中运动，会很快失去与初始条件的关联性，导致弹道区间很快结束，在这之后，流体质点近似表现出扩散输运的标度律： $\sigma_s^2 \sim t$ ，如图 3 中 $\phi=0.984$ 的情形。当 ϕ 进一步减小时， σ_s^2 在较长时间里明显偏离扩散输运标度律，有效标度指数为 $1 < \gamma < 2$ 。在多孔介质中流体质点的这种反常输运行为与质点速度在低速区间的概率密度增加有关^[7,8]。非扩散输运的现象广泛存在于各种多孔介质和非多孔介质体系中^[13-16]。

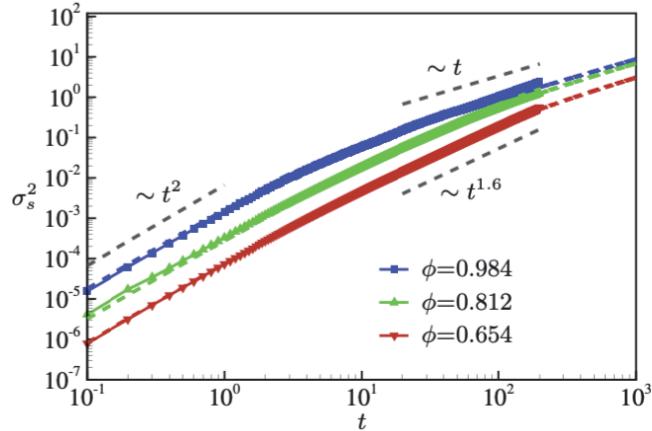


图 3 不同孔隙度 ϕ 下由数值模拟(符号加实线)和(1)式(虚线)得到的流体质点沿运动轨迹的位移方差 $\sigma_s^2(t)$ 。

受到将输运系数与时间自相关函数相关联的 Green-Kubo 公式^[17]的启发，流体质点的输运性质也可以与质点速度 v 的时间自相关函数 C_v 联系起来。考虑到 $\langle s \rangle = \langle v \rangle \cdot t$ ， σ_s^2 和 C_v 满足关系：

$$\sigma_s^2 = \left\langle (s - \langle s \rangle)^2 \right\rangle = \left\langle \left(\int_0^t dt' [v(t') - \langle v \rangle] \right)^2 \right\rangle = 2\sigma_v^2 \int_0^t dt' (t-t') C_v(t') \quad (1)$$

这里我们考虑两个理想的自相关函数形式: $C_{v,1}(t) = e^{-at}$ 和 $C_{v,2}(t) = e^{-b\sqrt{t}}$ 。 $C_{v,1}$ 和 $C_{v,2}$ 为指数和拉伸指类型函数, 分别与多孔介质中流体质点在较大和较小孔隙度时的自相关函数类似, 如图 2(b)所示。基于式(1)积分可得:

$$\begin{cases} \sigma_{s,1}^2(t) = \frac{2\sigma_v^2}{a^2} (at - 1 + e^{-at}), \\ \sigma_{s,2}^2(t) = \frac{4\sigma_v^2}{b^4} \left[b^2 t - 6 + 2e^{-b\sqrt{t}} (b^2 t + 3b\sqrt{t} + 3) \right] \end{cases} \quad (2)$$

式(2)表明, 对于两种形式的速度自相关函数, 流体质点在长时间极限下都会达到扩散输运区间。通过式(2)在 $t=0$ 时刻的级数展开可知, 在初始阶段流体质点处于弹道输运区间。当速度的时间自相关函数呈指数形式时, 流体质点将在 $t \gg 1/a \sim O(1)$ 后表现出扩散输运特性, 而当自相关函数 C_v 为拉伸指指数形式时, 即 $C_v = e^{-b\sqrt{t}}$, 式(2)中与 $e^{-b\sqrt{t}}$ 相关的项会阻碍扩散输运特性的出现, 导致即便 $t \gg 1$ 质点也可能表现出反常输运的特性。 $\sigma_{s,2}^2$ 达到扩散输运区间的条件为 $t \gg 1/b^2$ 。式(2)式描述的 σ_s^2 的变化与模拟结果相符(图 3)。从图 3 可以看到, 式(2)与模拟结果存在一些偏差, 这是由于流体质点的速度自相关函数与理想的指数或拉伸指指数形式存在如图 2 所示的偏差。尽管有偏差, 基于对速度自相关函数的简单假设和式(1)仍然可以合理预测 σ_s^2 的整体变化趋势。上述分析表明, 小孔隙度时流体质点的反常输运特性源于质点速度的长时关联性。当 t 足够大时, 与 t 成比例的项将占主导, 进而呈现出扩散输运特性^[8]。考虑到随着孔隙度减小, 速度自相关函数的衰减率会进一步减小。因此, 当孔隙度足够小时, 与质点输运的特征时间相比, 反常输运行为可能会持续更长时间, 使得反常输运过程存在于实际的多孔介质系统中。

5 传热特性

现在我们关注流体质点的传热特性。图 4 给出了体区中流体质点垂直方向速度 w 和温度 T 的互相关函数 $C_{w,T}$ 随孔隙度 ϕ 的变化。结果表明, 随着 ϕ 减少, $C_{w,T}$ 显著增大。在经典 RB 对流中 $C_{w,T}$ 值较小, 这是由于温度在体区分布得比较均匀, $T \approx T_m$, 其中 T_m 为上下板温度的算术平均。在 ϕ 较小时 $C_{w,T}$ 值较大, 说明在多孔介质热对流中速度分布与羽流的运动密切相关, 孔隙结构与羽流的相互作用导致了非均匀的速度场。 $C_{w,T}$ 的增加也揭示了孔隙结构能够增强系统传热的一种机制^[11]。图 4 的插图显示了不同 ϕ 时垂直方向热通量 $w \cdot \delta T$ 以及流体质点垂直方向速度 w 的时间序列, 其中 $\delta T = T - T_m$ 。在经典的 RB 对流中, 高速运动的流体质点可能会在较长时间内对垂直方向的对流传热没有贡献, 这是由于中心体区的温度充分混合, 温度脉动 δT 较小; 而在小孔隙度 ϕ 时, 垂直方向传热低的主要原因是流体速

度较小，再次说明垂直速度与温度脉动之间存在强关联性。由于温度与垂直速度关联性的增强，在多孔介质中出现逆向拉格朗日传热（即 $w \cdot \delta T < 0$ ）的概率低于经典的 RB 对流系统。

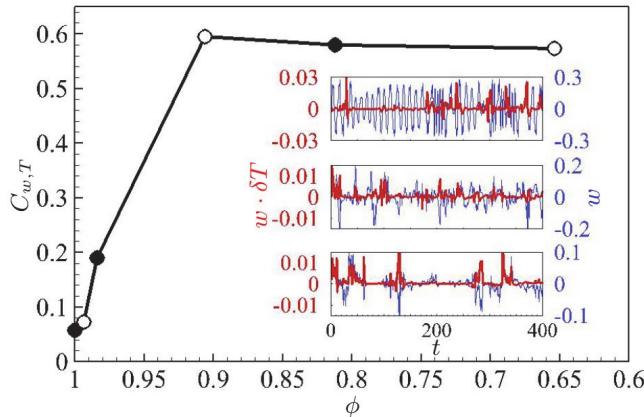


图 4 流体质点在体区时 ($[x,z] \in [0.2,0.8] \times [0.2,0.8]$) 垂直方向速度 w 和温度 T 的互相关函数 $C_{w,T}$ 随孔隙度 ϕ 的变化。插图显示了不同 ϕ 下 $w \cdot \delta T$ (粗实线) 和 w (细实线) 的时间序列, 从上到下 ϕ 依次为 $\phi=1, 0.984$ 和 0.812 。

参考文献

- 1 Manke I, Hartnig C, Grünerbel M, Lehnert W, Kardjilov N, Haibel A, Hilger A, Banhart J, Riesemeier H. Appl.Phys. Lett., 2007, 90: 174105.
- 2 Seymour J D, Gage J P, Codd S L, Gerlach R. Phys. Rev. Lett. 2004, 93: 198103.
- 3 Cushman J H, Tartakovsky DM. The handbook of groundwater engineering. CRC Press, 2016.
- 4 Toschi F, Bodenschatz E. Annu. Rev. Fluid Mech., 2009, 41: 375-404.
- 5 Calzavarini E, Jiang Linfeng, Sun Chao. Phys. Fluids, 2020, 32: 023305.
- 6 Mathai V, Lohse D, Sun Chao. Annu. Rev. Condens. Matter Phys., 2020, 11: 529-559.
- 7 Berkowitz B, Cortis A, Dentz M, Scher H. Rev. Geophys., 2006, 44.
- 8 Souzy M, Lhuissier H, Meheust Y, Le Borgne T, Metzger B. J. Fluid Mech., 2020, 891: A16.
- 9 Nissan A, Berkowitz B. Phys. Rev. Lett., 2018, 120: 054504.
- 10 Huppert HE, Neufeld J A. Annu. Rev. Fluid Mech., 2014, 46: 255-272.
- 11 Liu S., Jiang L., Chong KL, Zhu X., Wan Z., Verzicco, R., Stevens RJAM, Lohse D, Sun C. J. Fluid Mech., 2020, 895: A18.
- 12 Klages R, Radons G, Sokolov IM. Anomalous transport: foundations and applications. John Wiley & Sons, 2008.

- 13 Richardson L F. Proc. R. Soc. Lond. A, 1926, 110: 709-737.
- 14 Batchelor G K.Q.J.Roy.Meteor.Soc., 1950,76:133-146.
- 15 Bourgoin M. J. Fluid Mech., 2015, 772: 678-704.
- 16 Mathai V,Huisman S G,Sun C,Lohse D,BourgoinM,Phys.Rev.Lett., 2018,121:054501.
- 17 Kubo R, Toda M, Hashitsume N. Statistical physics II: nonequilibrium statistical mechanics.Springer Science & Business Media, 2012.

Lagrangian dynamics and heat transfer in porous media convection

SUN Chao^{1,2}, LIU Shuang¹,JIANG Lin-feng¹, WANG Cheng¹

(¹Center for Combustion Energy, Key Laboratory for Thermal Science and Power Engineering of Ministry of Education, International Joint Laboratory on Low Carbon Clean Energy Innovation, Department of Energy and Power Engineering, Tsinghua University, Beijing, 100084.

²Department of Engineering Mechanics, School of Aerospace Engineering, Tsinghua University, Beijing, 100084. Email: chaosun@tsinghua.edu.cn)

Abstract: We report a numerical study of Rayleigh-Bénard convection through random porous media using pore-scale modelling, focusing on the Lagrangian dynamics of fluid particles and heat transfer for varied porosities ϕ . Due to the interaction between the porous medium and the coherent flow structures, the flow is found to be highly heterogeneous, consisting of convection channels with strong flow strength and stagnant regions with low velocities. The modifications of flow field due to porous structure have a significant influence on the dynamics of fluid particles. Evaluation of the particle displacement along the trajectory reveals the emergence of anomalous transport for long times as ϕ is decreased, which is associated with the long-time correlation of Lagrangian velocity of the fluid. As porosity is decreased, the cross-correlation between the vertical velocity and temperature fluctuation is enhanced, which reveals a mechanism to enhance the heat transfer in porous media convection.

Key words: Porous media; Thermal convection; Lagrangian dynamics; Heat transfer.

海洋圆柱结构流激振动及其抑制研究

王嘉松

(上海交通大学 船建学院工程力学系, 上海, 200240, Email: jswang@sjtu.edu.cn)

摘要: 海洋工程圆柱结构的涡激振动 (VIV) 过去几十年来作为流固耦合(FSI)研究的核心问题一直受到学界和业界的广泛关注。近 10 多年来, 多管的尾激振动 (WIV) 和附加抑制装置的驰振(Galloping)问题备受瞩目, 这些与流动涡泄机制直接或间接相关的振动统称为流激振动 (FIV)。无论是狭义的涡激振动还是广义的流激振动, 它们都可能引发结构的安全问题。为了消除或削弱这种振动疲劳破坏或直接损坏的几率, 人们提出了各种振动抑制方法与装置, 研究发现部分装置可能存在新的甚至更严重的安全隐患。对 FIV 发生机理及控制研究仍然是学术界和工业界具有极大挑战的难题。本研究简述近 10 年来课题组针对流激振动及其抑制问题的研究进展: 从大长径比单管 VIV, 到多管的 WIV 或 WIG 效应, 从模型尺度到实尺度; 从 VIV 抑制研究过程中发现 Galloping 现象, 体现了不同振动响应单独或耦合发生的机制。

关键词: 流激振动; 涡激振动; 尾激振动; 驰振; 抑制; 钻井隔水管

1 引言

2020 年 5 月 5 日, 广东虎门大桥发生的流激振动 (Flow-induced Vibration, FIV) 事件使大众对 FIV 的关注度急剧上升, 也让人马上联想起震惊世界的 1940 年塔科马大桥的垮塌事件。实际上, 2010 年 5 月 19 日, 俄罗斯伏尔加大桥也发生过类似的振动现象。在海洋工程领域, 国内外也发生过若干起与 FIV 相关的安全事故。众所周知, 钝体绕流会产生卡门涡街, 其泄涡频率与结构固有频率接近时容易发生涡激振动(Vortex-induced vibration, VIV)。这可能诱发结构疲劳破坏, 导致安全事故。为了减弱甚至消除 VIV, 人们发明了多种抑制装置, 在海洋实际工程中有着广泛的应用。近 10 来年的研究发现, 某些条件下, 在圆柱结构附加整流罩或分离盘等结构有很好的 VIV 抑制作用; 然而, 在另一些条件下, 可能发生比 VIV 振幅更大, 类似土木桥梁领域方柱结构的驰振 (Galloping) 现象^[1], 这种驰振会加强振动, 加剧破坏。因此, 需要深入研究和认识这些抑制装置的作用机理, 探讨新的 FIV 抑制装置。与此同时, 实际工程中存在大量的近距离多柱体系统, 如 TLP/Spar 平台的立管系统, 存在水动力干涉及涡激振动干涉效应, 使其振动响应机制与单柱的 VIV

有着本质的不同，且更为复杂。结合本课题组 10 年来的研究，介绍从模型圆柱涡激振动到实尺度深水钻井隔水管 VIV、多管 FIV 干涉引起的 WIV（wake-induced vibration）或 WIG(wake-induced galloping)、VIV 抑制及驰振等问题的研究，体现了多种振动机制，如涡振、尾流干涉、驰振以及多种响应耦合，重点从案例出发来进行介绍和总结。关于数值模拟方法，限于篇幅，这里不做介绍，可参考文献[2-5]。

2 单管 VIV

2.1 模型尺度柔性立管涡激振动

经典案例是 ExxonMobil 公司利用挪威 Marintek 水池所进行的实验^[6]：立管长 9.63m，直径 0.02m，顶张力 817N。采用基于高分辨率 TVD 格式为基础的自主 FSI 求解器(TVD-EVVT-FVM-FSI)对来流速度为 0.42m/s 和 0.84m/s 情况进行了数值模拟。图 1 是 0.42m/s 时，不同网格条件下我们的结果与他人的计算及实验的对比，表明结果与实验吻合良好。图 2 是 0.42m/s 和 0.84m/s 下的 VIV 时空云图及振型包络线，分别反映 2 阶和 4 阶振动模态^[7]。

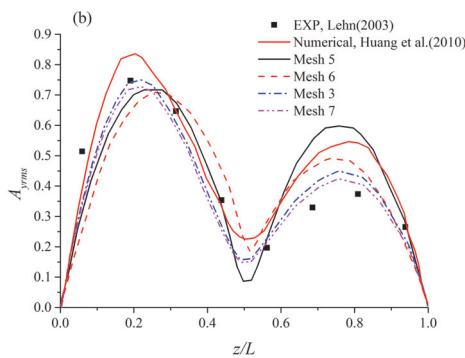


图 1 位移均方根与实验的对比(0.42m/s)^[7]

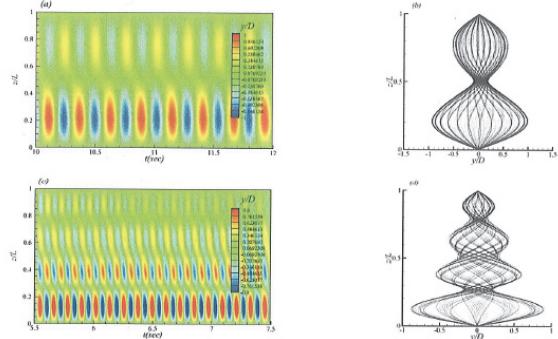


图 2 位移时间序列及包络线(0.42m/s 和 0.84m/s)^[7]

2.2 实尺度钻井隔水管涡激振动

钻井隔水管又叫钻井立管，是广义立管的一种。深水钻井隔水管受到的外载复杂，包括重力、浮力、张力、内压力、绕流流体力、惯性力和附加质量力等。风浪引起平台的运动对隔水管动力学响应有耦合作用，在洋流作用下，由于泄涡引起流体力的变化产生流固耦合 VIV，这使得针对柔性隔水管开展 VIV 数值模拟面临巨大的挑战。从应用现状来看，隔水管 VIV 问题依赖于经验模型软件，或基于小尺度短圆柱 VIV 分析。实际上，由于尺度效应影响，直接将圆柱 VIV 研究成果推广到实尺度隔水管是否合适值得商榷。1000m 钻井隔水管长径比可达 2000~5000，即使不考虑附属管线等复杂结构及其组合，本身也是三维

问题，针对深水隔水管的VIV问题在国内外鲜有报道。要准确可靠地分析隔水管的VIV特性，需要建立准确可靠的理论模型、数值模拟方法，涉及物理问题的准确描述、各种条件的可靠设置、并行计算的高效设计、大变形问题的恰当处理等^[8]。

影响隔水管VIV的因素可归结为雷诺数、流向、沿水深的流速梯度、管内流体、结构质量、阻尼、顶部张力、附属管线等。这里给出两种典型工况或条件下的隔水管VIV响应和流场特性。所涉及的基本参数包括：隔水管外径 $D_o=0.5334\text{m}$ ，内径 $D_i=0.4826\text{m}$ ，密度 $\rho_s=7850 \text{ kg/m}^3$ ，单位长度隔水管质量 318.05kg/m 。

2.2.1 梯度流和均匀流作用下的隔水管 VIV^[9]

隔水管长 342.9m ，长径比 643 ，均匀流时速度 0.8 m/s ，雷诺数为 4.1×10^5 ，而梯度流速度从 $0.1 \sim 1.5 \text{ m/s}$ 线性变化，最大雷诺数为 7.7×10^5 ，除隔水管底端附近外，流动处于典型的临界流动区域。

图3显示隔水管VIV的过程及在不同流动截面 $z/L=0.1, 0.3, 0.5, 0.7, 0.9$ 上涡的泄放。隔水管变形小时大部分涡泄模式为2S模式，但随着隔水管变形的增大，也出现了2P、2C模式。对于均匀流隔水管的最大挠度发生在其中间截面，而对于梯度流其最大挠度发生在略高一点的位置（图4）。两种流动剖面下隔水管的最大挠度基本相同，这是因为梯度流的平均速度正好等于均匀流的速度，而拖曳力与速度平方成正比。所以对于梯度流来说，隔水管的最大挠度基本取决于它的平均速度。对于隔水管横流向振动的均方根位移分布，可以看出，两种流动状态下隔水管都在 $z/L=0.2, 0.5, 0.8$ 截面上挠度出现波峰，只是均匀流下隔水管的峰值比剪切梯度流下要小，尤其是中间截面 $z/L=0.5$ 上均匀流下的均方根值比剪切流下的值小了近 50% ，并且剪切流中3个截面上的均方根值比较接近，而均匀流中则是呈现出两端高中间低的情况。

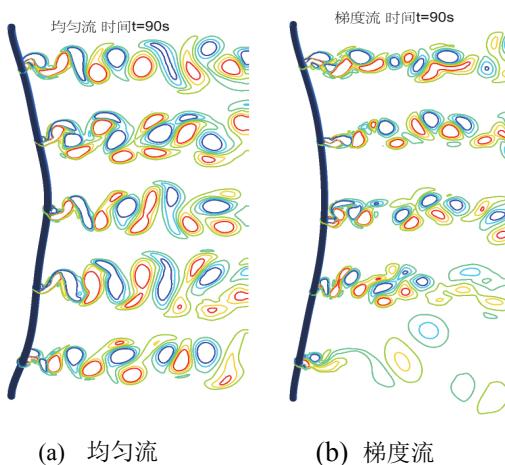


图3 涡泄模式及隔水管的响应历程^[9]

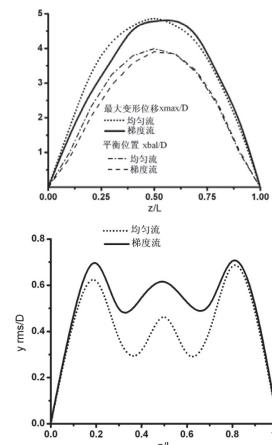


图4 不同入流剖面隔水管位移图^[9]
(上：顺流向位移和平衡位置，下：横流向均方根位移)

2.2.2 不同洋流速度下隔水管的 VIV 特性^[10]

针对长 502.92 m、长径比 943 的隔水管分别在均匀流 $V=0.1 \text{ m/s}$ 、 0.5 m/s 和 0.8 m/s 下的 VIV 特性进行了模拟分析。

图 5 表示两种洋流（左图对应 $V=0.5 \text{ m/s}$ ，右图对应 $V=0.8 \text{ m/s}$ ）下隔水管振动的时间历程以及涡泄模式，分别表示在 $t=60 \text{ s}$ 时隔水管的变形以及隔水管在 $z/L=0.1, 0.3, 0.5, 0.7$ 和 0.9 截面上对应的涡泄模式。从图 6 中可以看到，隔水管的弯曲变形主要是由阻力决定的，也就是在顺流向隔水管会有更明显的变形，而升力引起的横向振动能量要比阻力引起的流向振动大很多，所以在横流向隔水管会有更明显的周期性振动。同时，隔水管的振动曲线体现了多阶模态。涡泄模式随着隔水管的变形趋于复杂，出现了 $2P$ 、 $P+S$ 、 $2C$ 等模式，且同一时间沿轴向不同截面上的涡泄模式也互不相同，但是各截面上涡的泄放也不是独立的，而是相互影响的。

图 6 表示隔水管整体的变形情况以及振动特性。随着洋流速度的增加，振动的模态数越高，且振幅值一般也越大（低速时模态阶数少，振幅可能更大）；顺流向和横流向的模态阶数， $V=0.1 \text{ m/s}$ 表现为 1 阶和 2 阶模态， $V=0.5 \text{ m/s}$ 下表现出 3 阶和 5 阶模态，而 $V=0.8 \text{ m/s}$ 时顺流向为 7 阶，但横流向的振动则表现得很不规律，不能直观地看出有几阶模态；更重要的发现在于，顺流向的振动并不比横流向的振动小，说明顺流向的振动是完全不能忽略的，这与传统的认知完全不一样，特别是对于这种大长径比的实尺度隔水管。

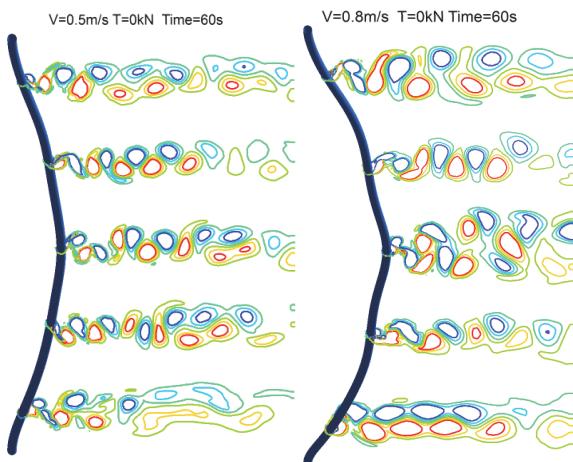


图5 不同洋流速度隔水管的振动及涡泄模式^[9]

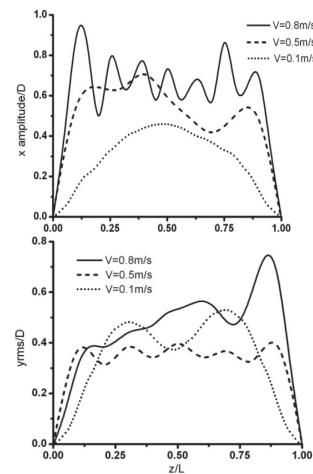


图6 不同来流速度下隔水管的振幅
(上-顺流向, 下-横流向^[9])

3 双管 WIV 及 WIG

3.1 模型尺度串列双柔性立管 WIV

实验模型参考 Huera-Huarte 和 Bearman 串列双柔性立管水槽实验^[11]。双管外径 0.016m，长度 1.5m，水下 0.585m，长径比 36，间距 3D，顶部张力 110N。采用改进的离散涡方法为基础的 CFD 方法结合切片法获得的流固耦合求解器（DVM-FR-VIV）进行数值模拟。图 7 对比了下游圆柱响应幅值的试验和数值结果，并给出了立管中间位置的振动频率。从对比结果来看，无论是幅值还是频率（此处未给出）都很接近，数值和试验结果吻合良好^[12]。

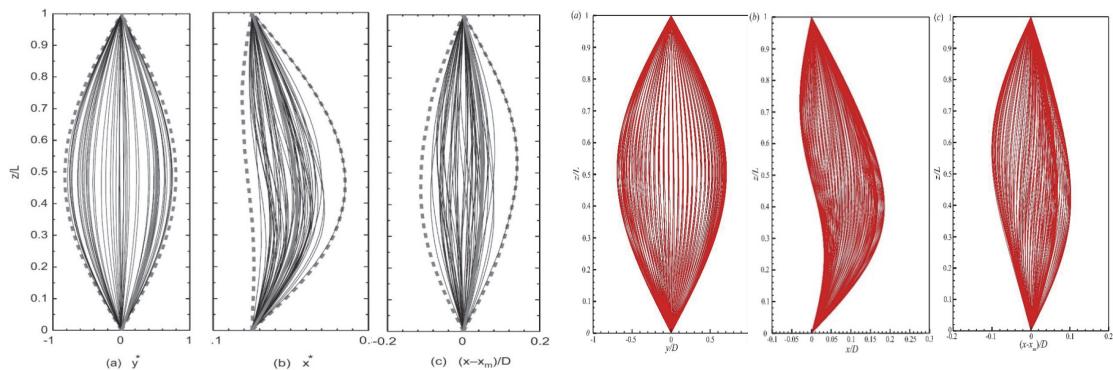


图7 串列双管间距3D针对包络线（左-实验结果^[11]；右-数值模拟结果^[12]）

3.2 实尺度串列双柔性立管 WIV

基于验证后的 DVM-FR-VIV 数值模型，对实尺度 TLP 钻井立管涡激振动进行了数值模拟和干涉分析。计算中所考虑的 TLP 钻井立管全长 273m，外径 0.273m（长径比为 1000），顶部施加 2.2 倍湿重的张力，考虑 0.4m/s 的均匀流速（雷诺数为 109000）；分别考虑串列和并列的双管，间距为 4D 时涡激振动如图 8 所示，反映了涡的不同模式和振动的行波响应特征。

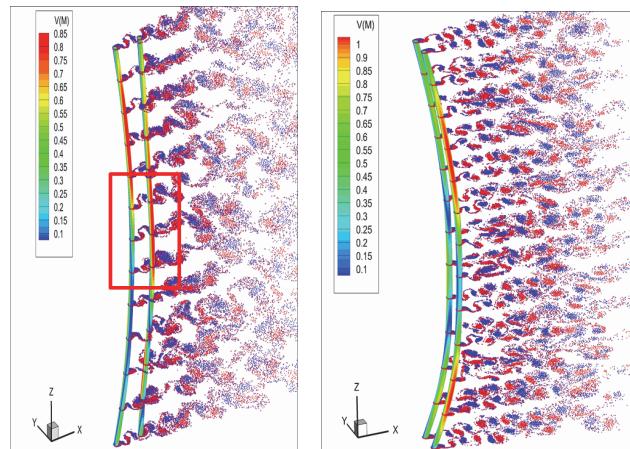


图8 不同布置方式下的VIV干涉（左：串列，右：并列）

3.3 模型尺度串列双管 WIG

为了研究串列双管尾流诱发振动机制，风洞实验考察了上游管和下游管对关注管影响的情形。图9是间距3D的串列双管中下游管振动响应幅值的风洞实验结果，均发现了WIG现象，但上游管的支撑方式（固定或自由）影响小，而质量阻尼比影响大，质量阻尼比大，则振动幅值减小，且均为VIV和WIG分离式振动模式^[13]。图10总结了风洞实验中在不同间距时发现的3种模式：纯VIV、VIV与驰振耦合及VIV与驰振分离^[13]。

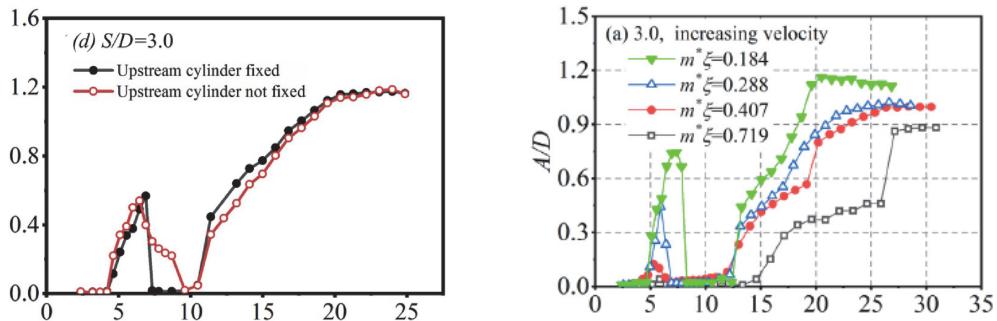


图9 串列双管后管的振动（左:前管不同支撑方式；右:前管固定，但质量阻尼比不同）^[13]

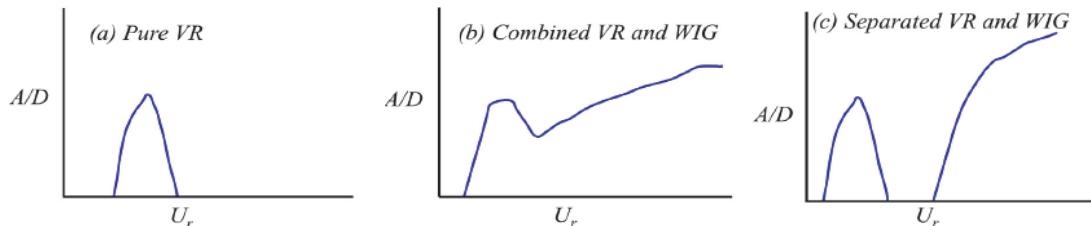


图10 不同间距下的3种振动模式^[13]

4 涡激振动抑制及驰振

在 FIV 的作用下，细长海洋结构物发生周期性振动，这会导致静载荷的增加和严重的疲劳破坏，通过在柱体上适当地附加抑振装置可以抑制这种振动。国内外提出和开发了多种多样的抑制装置，如螺旋、整流罩、单分离盘、双分离盘、轴向控制杆、表面突起、波浪壁等。我们收集了国内外数据，3 种最常用的抑振装置：螺旋列板(helical strake)、整流罩(fairing)和分离盘(splitter plate)的抑制效果做了归纳 (图 11)，结果表明各有优缺点，有的振幅抑制佳，却加大了曳力，如螺旋列板；有的曳力和振幅都小，但有时可能导致新的负面影响，产生不希望看到的驰振，如整流罩与分离盘^[1]。

我们早期提出了仿鱼尾型整流罩来控制流动和涡激振动，并获得授权国家发明专利（2013），通过风洞流动控制实验表明，阻力可以降低20%以上；自由振动实验表明，鱼身的形状角对振动响应的影响很小；振动响应随着附加鱼尾长度的增大而逐渐减小，在1.0倍直径时，整个结构基本静止，涡激振动被完全抑制，抑制效率达到97%（图11）^[14]。

值得一提的是，作为钻井隔水管裸单根，在隔水管主管外布置多根附属管（节流、压井、液压、钻井液增压和化学注入管线等），组成一粗多细的管束，我们的研究发现^[15-16]，主管和各附属管的剪切层相互作用以及各漩涡融合破坏而不能形成有效的漩涡对，耗散了外绕流场的湍动能。除个别情况外，静止主管升阻力系数显著降低，对流激振动的抑制作用也非常明显（图13），因此如何综合考虑隔水管系统的功能和涡激振动抑制需求来优化布局隔水管浮力块和裸单根，有助于海洋油气钻井工程结构的科学设计，确保安全。

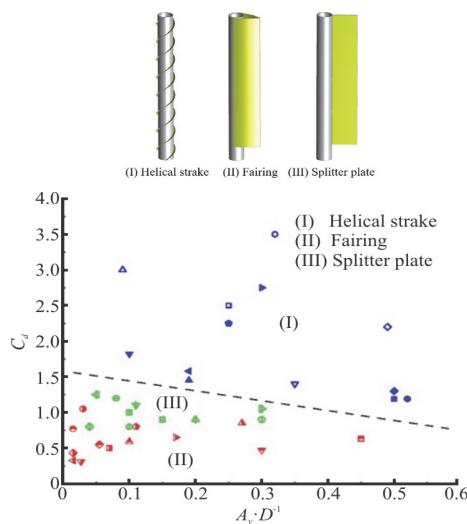


图11 常见VIV抑制装置的效果^[1]

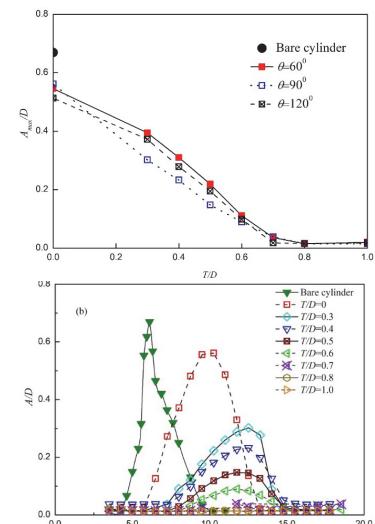


图12 圆柱附加仿鱼尾结构幅值响应
(上：鱼身影响；下：鱼尾影响)^[14]

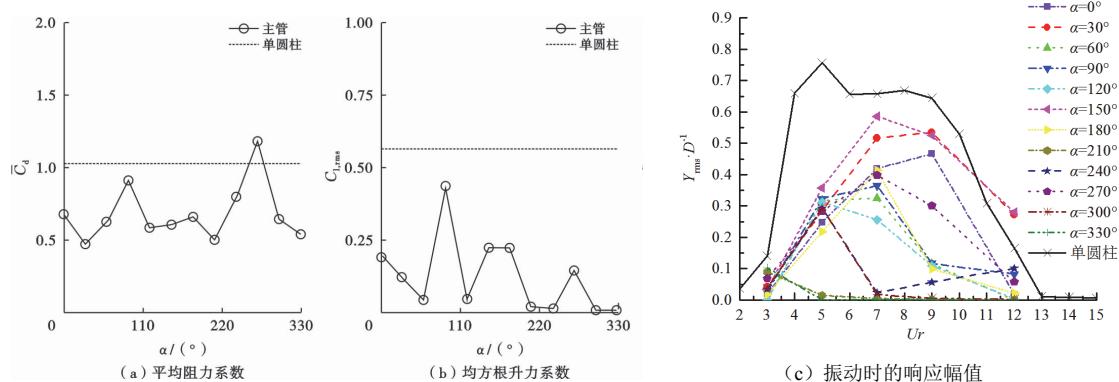
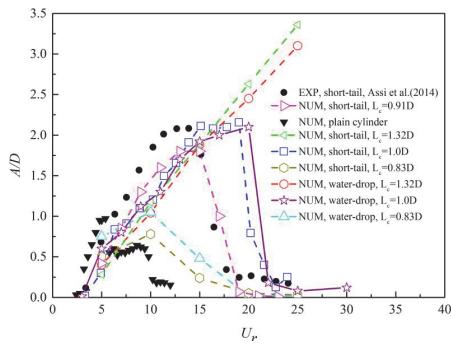
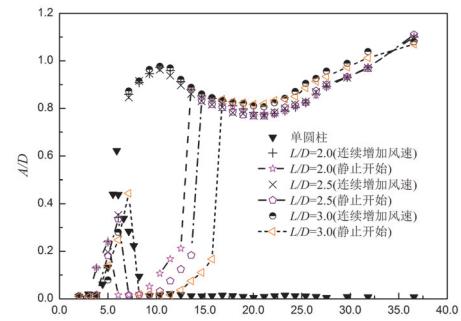


图 13 钻井隔水管主管绕流升阻力系数及振动时的响应幅值^[15-16]

尽管附属抑振装置的方法在工程领域得到了较广的实际应用，但是近 10 年的研究发现，在某些情况下附属抑振装置可能会导致驰振，反而增大振幅。无论是与固有频率的关系，还是振动幅值的大小，这种驰振与 VIV 有着本质的不同，它可能是锁频（空气中），也可能低频（水中），可能是自激的（大约化速度启动），也可能是他激的（与 VIV 耦合），等等，这些机制有待深入研究。

图14是数值模拟复现实验中发现的附加刚性整流罩的驰振，同时也指出其他整流罩也有类似的驰振现象^[17-18]。图15是风洞实验发现附加分隔式分离盘在两种来流条件下的机制：“连续增加风速”时，涡激振动引发更强的驰振；“从静止开始”时，第一种分支类似于涡激振动但振动很弱，并很快停止振动；待加大约化速度后，出现第二种分支，振动迅速再启动且迅速增强为驰振响应^[19]。

图14 附加整流罩的驰振^[17-18]图15 附加分离盘的驰振^[19]

6 结语

海洋工程结构的流激振动，包括VIV、WIV、Galloping等现象。传统上，人们讨论更多的是VIV，实际上它常常是针对单管流激振动的称谓，多管干涉条件下的下游管流激振动一般叫WIV，有的文献把这种振动由于产生Galloping这样的强振称为WIG；一般单圆柱是对称结构，不会发生Galloping，一旦在单圆柱上加上附属结构，破坏了结构的对称性，可能发生不同于VIV的不稳定性Galloping，这种Galloping不完全等同于土木桥梁气动影响产生的Galloping，用“Galloping-like（类驰振）”这一提法可能更合适，但为了简洁，本文仍然称Galloping。不管怎样，附加抑制结构时可能存在Galloping问题，需要我们更多关注和深入研究。对于传统抑制装置，过去认为它们具有很好的涡激振动抑制作用，这要看所处的条件，需要具体问题具体分析。我们指出，立管附加分离盘、整流罩这样的结构，在某些条件下可能引发驰振，在实际使用过程中，需要仔细根据海况和实际条件进行设计和运行控制。

实尺度高雷诺数大长径比立管及丛式立管在深水条件下的动力学响应及其控制存在巨

大的挑战，融合了复杂的强非线性、刚柔耦合、流固耦合、多尺度、多自由度、甚至多体水动力及振动干涉。无论是理论建模、数值模拟还是实验手段，都需要我们继续深入研究。作者研究团队多年来在这几个方面做了一些探索，获得了基础性研究和应用研究的一些新认识。同时利用高精度数值模拟方法获得了计算大量案例后总结出的流体力数据，同时考虑了横流向和顺流向的耦合作用，从而建立了流体力数据库，开发了涡激振动工程分析软件(DAVIV1.0-3.0)，以及工信部“数值水池”创新专项的快速VIV分析软件(viv-FAST-SJTU V1.0，限于篇幅，这些软件在文中未做介绍）。我们认为，立管涡激振动及其控制仍然是流固耦合(FSI)研究的核心问题，也存在丰富的流体、结构、以及二者耦合的动力学行为和发生机制，在高精度高效模拟方法、实尺度高雷诺数问题数值计算、先进实验技术及应用研究、海洋管线科学设计与安全使用，以及深度学习、人工智能在FIV研究中的应用等多方面期待取得更多更深入的理论、技术与应用成果。

流激振动问题的研究成果非常丰富，限于篇幅，本研究并未给出更多的国内外研究及相关文献，有兴趣的读者可参阅有关综述及各种研究论文。

参考文献

- 1 Wang JS, Fan DX, Lin K. A review on flow-induced vibration of offshore circular cylinders. *J Hydrodyn.*, 2020, 32(3): 415-440.
- 2 Wang JS. Flow around a circular cylinder using a finite-volume TVD scheme based on a vector transformation approach. *J Hydrodyn.*, 2010, 22(2): 221-228.
- 3 Wang JS, Zheng HX, Tian ZX. Numerical simulation with a TVD - FVM method for circular cylinder wake control by a fairing. *J Fluid Struct.*, 2015, 57: 15-31.
- 4 Zheng HX, Wang JS. Efficient three-dimensional high-resolution simulations of flow fields around cylinders. *Journal of Ocean Eng. and Sci.*, 2018, 3: 205–217.
- 5 Lin K, Wang JS. Numerical simulation of vortex-induced vibration of long flexible risers using a SDVM-FEM coupled method. *Ocean Eng.*, 2019, 172: 468-486.
- 6 Lehn E. VIV suppression tests on high L/D flexible cylinders. Norwegian Marine Technology Research Institute, Trondheim, Norway, 2003.
- 7 Zheng HX, Wang JS. A numerical study on the VIV for a long flexible cylinder. 8th International Conference on Hydroelasticity in marine Technology, 2018, Seoul, Korea, Sep. 10-12: 211-218.
- 8 王嘉松, 蒋世全, 许亮斌. 深水钻井隔水管涡激振动特性的数值模拟研究. *石油钻采工艺*, 2015, 37(1): 30-35.
- 9 Wang JS, Zhan LL, Jiang SQ, et al. Numerical simulation of VIV for a marine riser in uniform and linearly sheared currents. The 23rd International Offshore (Ocean) and Polar Engineering Conference, Anchorage, 2013, Alaska, USA, June 30–July 5: 501-507.

- 10 Wang JS, Zhan LL, Wang CG, et al. Three-dimensional numerical simulation of vortex induced vibration for a 500-m-long marine riser. Proceedings of the 22nd International Offshore (Ocean) and Polar Engineering Conference Rhodes, 2012, Greece, June 17–22: 551-558.
- 11 Huera-Huarte, FJ, and Bearman, PW. Wake and vortex-induced vibrations of a tandem arrangement of two flexible circular cylinders with near wake interference, J. Fluid Struct, 2011, 27: 193-211.
- 12 Lin K, Wang JS, Zhou JL, et al. Vortex-induced vibrations of two flexible cylinders in tandem arrangement with discrete vortex method. Proceedings of the Twenty-eighth International Offshore (Ocean) and Polar Engineering Conference, 2018, Sapporo, Japan, June 10-15: 932-938.
- 13 Hu ZM, Wang JS, Sun YK. Flow-induced vibration of one-fixed-one-free tandem arrangement cylinders with different mass-damping ratios using wind tunnel experiment. J. Fluid Struct., 2020, 96: 103019.
- 14 梁盛平, 王嘉松. 仿鱼尾结构抑制圆柱涡激振动风洞实验研究. 第十八届中国海洋(岸)工程学术讨论会论文集. 2017: 237-239.
- 15 Wu WB, Wang JS, Jiang SQ, et al. Flow and flow control modeling for a drilling riser system with auxiliary lines. Ocean Eng., 2016, 123: 204-222.
- 16 Kong TT, Wang JS, Wu WB, et al. Two-dimensional numerical simulation of VIV for an actual drilling riser system considering auxiliary lines. Journal of Vibration and Shock (in Chinese, accepted).
- 17 Zheng HX, Wang JS. Galloping oscillation of a circular cylinder firmly combined with different shaped fairing devices. J. Fluid Struct., 2018, 77: 182–195.
- 18 Zheng HX, Wang JS. Numerical study of galloping oscillation of a two-dimensional circular cylinder attached with fixed fairing device. Ocean Eng., 2017, 130: 274–283.
- 19 Liang SP, Wang JS, Hu ZM. VIV and galloping response of a circular cylinder with rigid detached splitter. Ocean Eng., 2018, 174: 176-186.

Flow-induced vibration and VIV suppression for offshore circular cylinders

WANG Jia-song

(School of Naval Architecture, Ocean and Civil Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240.

Email: jswang@sjtu.edu.cn)

Abstract: As a key problem of fluid-structure interaction (FSI) research, vortex-induced vibrations (VIVs) of offshore circular cylinders have been paid great attentions by research scientists and offshore engineers in the past several decades. In the recent ten years, wake-induced vibration (WIV) for multiple cylinders and galloping for VIV suppression attachments are attracting a growing research interest. All these vibration phenomena relative to the vortex shedding are collectively called flow-induced vibration (FIV). It may give rise to the

structure safety problems. Many devices were proposed to reduce or suppress these vibration responses. However, the response and control mechanism taking place in the ocean current environment is still a challenge problem for the scientists and engineers. In this paper, we sketched some results and discussions on the FIV of offshore circular cylinders based on the investigations in recent 10 years of our group, including from large length to diameter ratio of isolated flexible cylinder to the interference of multiple cylinders concerning WIV or WIG (wake-induced galloping) from experimental model to real size of drilling risers, and VIV suppression and unwanted galloping for cylinder of attachments with wind tunnel experiments and numerical simulations. Some key scientific problems of vortex resonance, WIV or WIG, galloping and the responses of them excited independently or combinedly with two or more are reflexed.

Key words: Fluid-structure interaction (FSI); Vortex induced vibration (VIV), Wake-induced vibration (WIV), Flow-induced vibration (FIV), Galloping; VIV suppression; Drilling riser

基于现有船体的小型智能全电船的设计与实现

蒋仁炎，俞万能，刘建闽

(集美大学轮机工程学院，厦门，361021，Email: wnyu2007@jmu.edu.cn)

摘要：针对目前近海小型船舶用船成本高、自动化程度低、劳动强度大等问题，采用先进的电力推进技术和智能控制技术研发智能全电船科研平台。通过建立现有船型的模型，分析阻力关系，设计基于锂电池组的双电力推进系统；采用激光雷达、毫米波雷达等构建船舶运动智能控制系统。实船海上试验结果表明，全电船环保性能和操作性能好，可为智能船舶关键技术的研发提供良好实验条件。

关键词：船体模型；推进系统；智能控制；操作性能

1 引言

能源的持续供应是人类赖以生存和发展必不可缺的条件，然而能源却在急速消耗，能源问题已经逐渐变成全球性问题，节能减排迫在眉睫。据相关专家预测，石油资源将在本世纪中叶（2050年左右）开采殆尽^[1-3]。同时，化石燃料的燃烧造成的环境污染也越来越严重。这些问题在航运业更为突出，航运业的节能减排技术已经引起了国际社会的高度重视。所以，出于应对运营成本增长、船舶操纵复杂化以及环保法规日趋严格的需求，船舶绿色智能化已成为船舶业发展趋势以及研究热点^[4-6]。智能全电船无噪声、无污染、高效率的优点更加符合节能减排的迫切要求，特别适合于近海、内河湖泊等小型船舶中应用^[7-10]。

因此，本文针对近海小型全电船，采用统计实船和模型资料估算法中 Wyman 方法计算样船航行状态的阻力性能的基础下，设计以锂电池组为电源船舶供电系统、以电动挂机和液压舵机的推进系统，以 PLC 为核心控制器的能量管理系统。开发各系统并搭建样船并进行性能测试，为全电船的水动力性能研究和船体优化设计奠定实验基础。

2 样船船体建模及分析

全电船的船体采用现有旧船体，如图 1 所示。由于没有设计图纸，采用仪器进行船体外形的三维扫描取样，并利用 Maxsurf 软件 Modeler 模块，应用 NURBS（非均匀有理 B 样

条曲面)方法建立船体的三维模型模,如图 2 所示。该船的型线图如下,其中图 3 为横剖面型线,4 为半宽水线面型线。根据实测数据吃水高度为 0.26m,采用统计实船和模型资料估算法中 Wyman 方法进行航行状态的阻力性能计算,速度与所需功率的关系曲线如图 5 所示。



图 1 实船船体

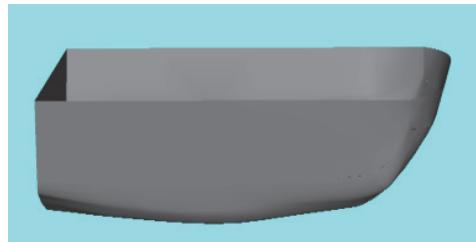


图 2 船体三维图

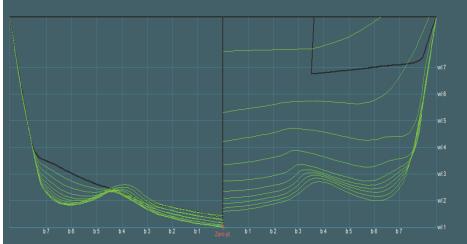


图 3 横剖面型线图

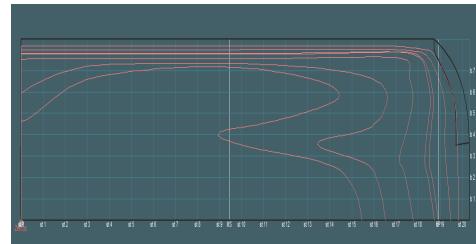


图 4 半宽水线面型线图

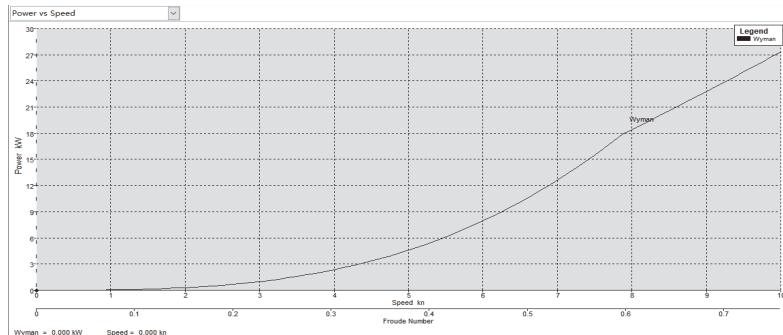


图 5 阻力与功率关系图

3 电动力系统设计

根据船舶舱容以及 7 节船速要求,本船采用锂电池组作为全船的电源并构成船舶电压为 73.6V 的直流电网,依据图 5 的曲线采用单个为 6kw 的双螺旋桨推进系统和电动液压舵机,采用 PLC 作为全电船的控制器,控制船舶螺旋桨的转速和舵机的转角。全电船的动力

总成系统框图如图 6 所示。

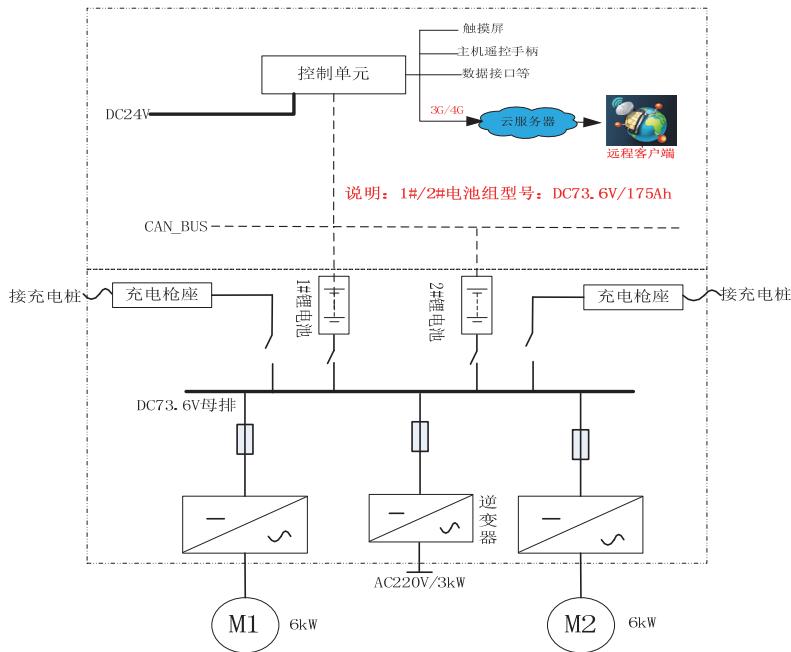


图 6 全电船的动力总成系统框图

4、智能控制系统的设计

本船智能控制系统参考现有汽车研发的自动驾驶系统，船舶运动信息采集传感器主要有 1 个激光雷达、4 个毫米波雷达、2 个前视相机、1 个环视相机、8 个水面超声波雷达、1 个海底地貌超声波雷达和 1 个惯导系统。采用三块 TX2 核心板通讯板，分析处理三维空间地图与由各类传感器提供的周边物体在三个方向上的距离、速度、加速度、角速度，以及结合 GPS 地图计算出自身的位臵与运行状态等综合信息。远程监控系统控制单元采集设备的重要参数，然后发送给 DTU 设备，而 DTU 设备实时地把数据通过 4G 网络传输到远程服务器，最终手机客户端或者电脑终端就可以读取服务器的数据并实时显示出来。图 7 是系统组成框图。图 8 传感器布置图。

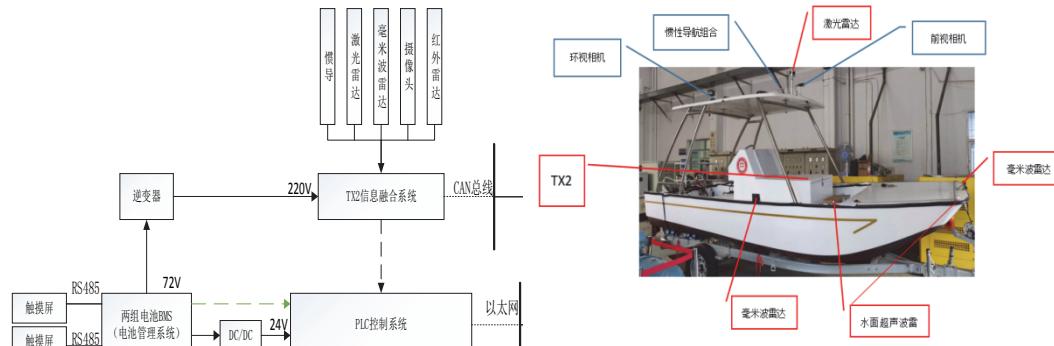


图 7 智能控制系统组成框图

图 8 传感器布置图

5、样船实验与数据分析

测量所设计全电船船速、转向、续航能力等方面的性能情况，改善船舶建模精度，为全电船的水动力学研究和优化船机桨匹配提供实验数据，样船在福建厦门翔安某水域先后进行了多次航行测试。

5.1 速度性能测试

为验证航速和航向的操作性以及是否达到预期的要求，小型全电船将航速分为 DS 档（微速）、S 档（慢速）、H 档（半速）、F 档（全速）四个档位，计算出从静止直接到不同档位的加速时间。具体如下表 1。

表 1 样船速度测试情况

档位	船速 (km/h)	船速加速时 间 (s)		转速稳定时 间 (s)	电机转速 (r/min)
		DS	S		
DS	3.6	7	2	500	
S	5.2	9	2.5	700	
H	6.35	16	3.5	980	
F	9.8	20	4.5	1400	

5.2 转向性能测试

同时，为了全电船运动控制的灵敏性和准确性，本文分别对不同航速、满舵角度（正负35度）下的巡回半径进行了测试。根据测试数据，采用MATLAB对数据进行了拟合，得出船舶在不同航速、满舵角度（正负35）下的回转半径。具体测试结果如表2所示。

表 2 样船转向性能测试情况

电机转速 (r/min)	左满舵半径/m (+35 度)	右满舵半径/m (-35 度)
345	5	9.5
650	6.9	12
1010	7.5	13
1460	8.5	14

根据以上测试数据分析，该智能全电船的设计存在较多问题，可以进一步在水动力学方面进行研究，实现全电船的性能优化。

6、结论

本文所研发智能全电船科研平台，为建立较高精度的全电船水动力模型、运动动态模型、适用于近海复杂海况情况下多信息融合的船舶航行状态感知算法、船舶动态避障算法等科学问题研究提供实验基础，为近海新一代小型绿色智能船舶相关关键技术的研发提供研发平台。

参考文献

- 1 韩烨. 新能源在船舶中的应用研究[D]. 哈尔滨工程大学, 2012.
- 2 李炯,刘彦呈,张洁喜,余宏平,肖德健.开关电源在现代船舶上的应用分析[J].造船技术,2013(03):34-37+52.
- 3 严新平.新能源在船舶上的应用进展及展望[J].船海工程,2010,39(06):111-115+120.
- 4 乔鸣忠,于飞,张晓锋. 船舶电力推进技术[M]. 2013.171-180.
- 5 Lateb R , Takorabet N , Meibody-Tabar F , et al. [IEEE Fourtieth IAS Annual Meeting. Conference Record of the 2005 Industry Applications Conference, 2005. - Hong Kong, China (2-6 Oct. 2005)] Fourtieth IAS Annual Meeting. Conference Record of the 2005 Industry Applications Conference, 2005. - Performances comparison of induction motors and surface mounted PM motor for POD marine propulsion[C]// Industry Applications Conference. IEEE, 2005:1342-1349.
- 6 Pizzo A D, Polito R M, Rizzo R, et al. Design criteria of on-board propulsion for hybrid electric boats[C]// XIX International Conference on Electrical Machines. 2010.

- 7 Freire T , Sousa D M , Branco P J C . Modeling the electric chain of an electric boat.[C]// Eurocon-international Conference on Computer As A Tool. IEEE, 2011.
- 8 童佳俊. 岛际小型电动船舶的锂电池管理系统研究与设计[D].
- 9 朱永怀,俞万能,孟飞.纯电动游览船锂电池组的控制策略[J].船舶工程, 2019,41 (04): 70-76.
- 10 Arulmozhiyal R . Design and implementation of fuzzy PID controller for BLDC motor using FPGA[C]// IEEE International Conference on Power Electronics. IEEE, 2012.

Design and Implementation of a small intelligent all-electric ship based on the existing hull

JIANG Ren-yan, YU Wan-neng, LIU Jian-min

(School of marine engineering, Jimei university,Xiamen,361021,Email: wnyu2007@jmu.edu.cn)

Abstract: Aiming at the problems of high cost, low automation and high labor intensity for small offshore ships, the intelligent all-electric ship research platform is developed by using advanced electric propulsion technology and intelligent control technology. Through the establishment of the existing ship model, the resistance relationship is analyzed, and the dual electric propulsion system based on lithium battery is designed.The intelligent ship motion control system is constructed by laser radar and millimeter wave radar. According to sea trial on a test ship,the experimental results show that the all-electric ship has good environmental performance and operational performance, which can provide good experimental conditions for the research and development of key technologies of intelligent ships.

Key words: Hull model; propulsion system; intelligent control ; operating performance

复杂边界下水下爆炸的欧拉有限元方法数值模拟

唐皓，刘云龙，张阿漫

(哈尔滨工程大学船舶工程学院，哈尔滨，150001，Email:tang_hao@hrbeu.edu.cn)

摘要：首先本文基于欧拉有限元方法建立了复杂边界下的水下爆炸数值计算模型，然后通过计算自由场中的水下爆炸问题并将计算结果和 Geers-Hunter 模型的计算结果对比验证了数值计算模型的正确性。之后探究了自由面距离参数、刚性壁面距离参数和浮力参数对爆炸气泡动态过程的影响。本文发现随着气泡和自由液面距离的增加，水冢的高度和增长速度会越来越小，在一定范围内射流的速度也会增大但是射流宽度会减小，射流载荷峰值由于射流宽度较大的射流击穿气泡后分裂出的小气泡垫释放压力会出现先增大后减小的现象，而气泡脉动载荷则会一直增大。冲击波载荷和射流载荷都会随着刚性壁面距离参数的增大而减小，但是水冢高度和增长速度随壁面距离参数并没有明显的变化，而且只有当壁面距离参数小于 1.5 时，壁面才会对爆炸气泡有明显的影响。随着浮力参数的增大，气泡会越来越向下突出并且射流的抨击载荷也会变大。

关键词：水下爆炸；气泡动力学；欧拉有限元方法；复杂边界

引言

随着鱼雷等水下武器的发展和进步，提升舰艇防护的需求也越来越迫切，关于水下爆炸的研究也越来越深入和具体^[1-4]。一方面，关于水下爆炸的研究可以让水下武器发挥其最大的毁伤作用。另一方面，通过探究水下爆炸的毁伤机理也可以为舰艇的防护设计提供参考。水下爆炸问题是船舶与海洋工程领域的一个重要研究方向，关于水下爆炸的研究对舰艇生命力和海防具有重要意义。

水下爆炸通常被分为冲击波和气泡两个阶段^[5]，冲击波阶段对舰艇产生影响的是冲击波载荷，而气泡阶段的载荷则是射流载荷和气泡脉动载荷^[6]。这几种载荷都会对舰艇结构造成毁伤，不同研究学者也针对不同问题展开了详细的研究。关于气泡在不同边界的研究，Plesset 等和 Lenoir 等很早就发现气泡在浮力或周围边界的影响下会产生射流^[7, 8]，Klaseb

基金项目：国家自然科学基金（No. 51879050）；国家博士后科学基金（No. 2016M600244, No. 2018T110271）

等探究了浮动结构附近脉动气泡的动态特性^[1], Dadvand 等^[9]分析了电火花气泡在圆形孔附近的动态特性, Karri 研究了带孔板附近电火花气泡的射流和喷雾^[10]。我国的科研学者也在气泡和不同边界的相互作用方面做出了很多卓越的贡献, 方斌等利用有限元程序探究了不同边界条件下水下爆炸气泡的动态过程^[11], 王诗平等对气泡和双面浸水的不完整平板的相互作用进行了研究^[12], 崔璞等^[13]通过实验对气泡和具有破口的圆形舭部的耦合进行了分析, 牟金磊等分析了边界条件和水下爆炸气泡运动的关系^[14], 刘云龙等对气泡在背空船底板的动态特性进行了探究^[15], 刘念念等研究了有限水域的破口问题^[16], 常青等考虑了材料种类的影响进行了不同材料边界附近气泡运动特性的研究^[17], 贺铭等分析了近场水下爆炸气泡与双层破口之间的相互作用^[18]。但是以上研究大部分关注的只是气泡阶段, 并没有连续的探究水下爆炸的过程, 而且考虑边界的影响时大都考虑单一边界。当水下爆炸发生在浅水区时, 自由液面和水底会同时对冲击波和气泡产生影响^[19]。不同地方的水底环境能简化成的边界条件会不一样, 当水底布满岩石时可以近似看成刚性壁面。另外一种情况是在近水面航行的潜艇受到浅水水下武器攻击时, 爆炸发生在潜艇和自由面之间, 当炸药当量较小时, 潜艇壳体也可以近似看成壁面。这两种问题都可以简化为复杂边界下的水下爆炸问题。关于水下爆炸的数值研究方法也有很多, 比如边界积分方法^[20], 有限体积方法^[21]和欧拉有限元方法^[22]。其中田昭丽等利用欧拉有限元方法较为系统地探究了水下爆炸在刚性壁面处附近的连续过程^[6], 并取得了很好的计算效果。

本文基于欧拉有限元方法对自由面和刚性壁面之间复杂边界下近场水下爆炸问题进行了研究。文章的第一部分详细地介绍了欧拉有限元的相关理论以及相关变量的无量纲化。在文章的第二部分, 首先对建立的数值计算模型进行了验证, 然后对自由液面距离参数、刚性壁面距离参数和浮力参数对水下爆炸的影响展开了详细的分析。文章的第三部分对本文得到的相关结论进行了总结。

1 理论和数值模型

1.1 欧拉有限元方法

本文建立的数值模型如图 1 所示, 柱坐标系的原点在下方壁面中心处, z 轴的方向和重力方向相反, 爆炸中心和自由液面的距离为 z_f , 气泡和位于下方的刚性壁面的距离为 z_w 。为了减少边界的影响, 本文采用无反射边界^[22]进行计算。

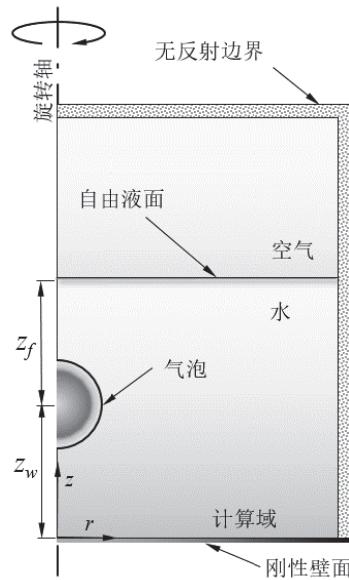


图 1 本文问题数值模型示意图

欧拉有限元方法在解决瞬态大变形问题时具有很大的优势^[23, 24]。本文计算的问题实际上是一个轴对称的问题，如果用三维模型计算时间会很长，因此本文采用轴对称模型进行计算。数值计算模型中每个单元的控制方程可由如下方程表示，

$$\begin{cases} \frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{u}) = 0, \\ \frac{\partial \rho \mathbf{u}}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{u} \otimes \mathbf{u}) + \nabla p = \rho \mathbf{g}, \\ \frac{\partial \rho e_{in}}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho e_{in} \mathbf{u}) + p \nabla \cdot \mathbf{u} = 0, \end{cases} \quad (1)$$

这三个方程分别代表质量、动量以及能量守恒方程。式中 ρ 代表密度， $\mathbf{u} = (u_r, u_z)$ 表示速度的矢量， e_{in} 代表单位质量对应的内能， \mathbf{g} 代表重力加速度。应用算子分离方法，可以将求解过程分成拉格朗日步和欧拉步。

在拉格朗日步，网格随着流体运动。算子分离后的动量方程可以用下式表示，

$$\frac{d\rho \mathbf{u}}{dt} + \nabla p = \rho \mathbf{g}, \quad (2)$$

式(2)没有对流项，是基于拉格朗日观点的，等式两边同时乘权函数 ϕ 并且在控制体积 V 内积分变成

$$\iiint_V \left(\frac{d\rho \mathbf{u}}{dt} + \nabla p \right) \phi dV = \iiint_V \rho \mathbf{g} \phi dV. \quad (3)$$

利用高斯格林公式在柱坐标系下对动量方程进行积分变换可得

$$\iint_{\Omega} r(\rho \dot{u}\phi - p \nabla \phi) d\Omega = - \int_{\Gamma} r p \hat{n} \phi d\Gamma + \iint_{\Omega} p \nabla r \phi d\Omega + \iint_{\Omega} r \rho g \phi d\Omega, \quad (4)$$

其中 Ω 是离散之后的二维计算区域, Γ 是这个计算域的边界, \hat{n} 是边界的法向量。如果用单元形函数 Φ 当作形函数, 式 (4) 可以写成

$$\iint_{\Omega} r \rho \Phi_M \Phi_N d\Omega \dot{u}^N = - \iint_{\Omega} r \Phi_M \Phi_N \frac{d\rho}{dt} d\Omega u^N - \int_{\Gamma} r p \hat{n} \Phi_M d\Gamma + \iint_{\Omega} r (\rho g \Phi_M + p \nabla \Phi_M) d\Omega, \quad (5)$$

其中上角标代表节点编号, Φ_M 代表在 M 点的形函数, Φ_N 代表在 N 点的形函数。在节点加速度 \ddot{u} 被求解出来后, 节点速度和位移也能通过二阶中心差分方法求解, 具体过程如下,

$$u^{n+1/2} = u^{n-1/2} + \Delta t \dot{u}^n, \quad (6)$$

$$x^{n+1} = x^n + \Delta t u^n, \quad (7)$$

其中上角标是时间步的编号, Δt 是时间步长, 之后流体的密度和能量通过下式求解,

$$\frac{d\rho}{dt} + \rho(\nabla \cdot u) = 0, \quad (8)$$

以及

$$\frac{d\rho e_{in}}{dt} + (p + \rho e_{in}) \nabla \cdot u = 0. \quad (9)$$

在欧拉计算步, 通过 VOF 方法^[25]和单调迎风输运格式 (MUSCL)^[26]确定流体单元之间的输运量, 完成各物理量的更新。

1.2 状态方程

在数值模型的计算过程中, 压力的更新是由状态方程计算出的。水和空气的状态方程选用 Tammann 方程^[27],

$$p = \rho e_{in} (\gamma - 1) - \gamma P_w, \quad (10)$$

其中 P_w 是参考压力, e_{in} 表示单元流体能量, γ 是绝热率。

爆炸产物状态方程采用 JWL 方程^[28],

$$p = \omega \rho e_{in} + A(1 - \frac{\omega \rho}{R_1 \rho_0}) \exp(-\frac{\rho_0}{\rho} R_1) + B(1 - \frac{\omega \rho}{R_2 \rho_0}) \exp(-\frac{\rho_0}{\rho} R_2), \quad (11)$$

本文探究复杂边界下的水下爆炸问题时采用的是 TNT 炸药, 其中 $e_{in0} = 4.29 \text{ MJ}$, $A = 371.2 \text{ GPa}$, $B = 3.231 \text{ GPa}$, $R_1 = 4.15$ 和 $R_2 = 0.95$ 以及 $\omega = 0.3$ 。 $\rho_0 = 1630 \text{ Kg/m}^3$ 是炸药的密度, ρ 是爆炸之后炸药产物密度。

1.3 无量纲化

为了减小尺度带来的影响, 得出更普遍的规律, 本文将相关变量无量纲化, 长度和压力分别取 R_m 和 P_∞ 作为无量纲因子, 其中气泡最大半径为^[29, 30] $R_m = 3.38 \left(\frac{W}{H + h_{atm}} \right)^{1/3}$, H 是

炸药水深， h_{atm} 是大气压对应的水柱高度，通常取 10， P_∞ 为无穷远处的压力。时间 t 和速度 v 的无量纲因子分别为 $R_m \sqrt{\rho_1 / p_\infty}$ 和 $\sqrt{p_\infty / \rho_1}$ ， ρ_1 为水的密度。本文用到的自由面距离参数 $\gamma_f = z_f / R_m$ ， γ_f 用来衡量气泡和自由液面之间的距离， γ_f 越大自由液面距离气泡越远。刚性壁面距离参数 $\gamma_w = z_w / R_m$ ， γ_w 用来衡量气泡和刚性壁面之间的距离， γ_w 越大刚性壁面距离气泡越远。浮力参数 $\delta = \sqrt{\rho g R_m / P_\infty}$ 用来衡量浮力效应，浮力参数为 0 代表没有浮力作用。最后，当符号有上标'时表示无量纲的参数。

2 结果讨论

2.1 数值模型的验证

本文采用 Geers-Hunter 模型^[31, 32]验证数值模型的正确性，Geers-Hunter 模型是基于声学假设的一维双渐近方法，不仅将气泡内部气体的可波动性加入到模型中，而且还考虑了气泡由于浮力作用产生的迁移，模型还利用了水下爆炸实验数据进行校正，因此在解决水下爆炸问题时被广泛使用^[33]。计算算例是自由场中 210kgTNT 炸药在 50m 水深处爆炸，压力测点设置在距离爆心 20m 处。计算域的大小为 20m×40m，网格数是 320000，程序是在一台配置 Core i7-9700 (3.00GHz) 处理器和 16GB 内存的计算机上运行的。程序中采用 OpenMP 缩短计算时间，计算时长约为 100 分钟。

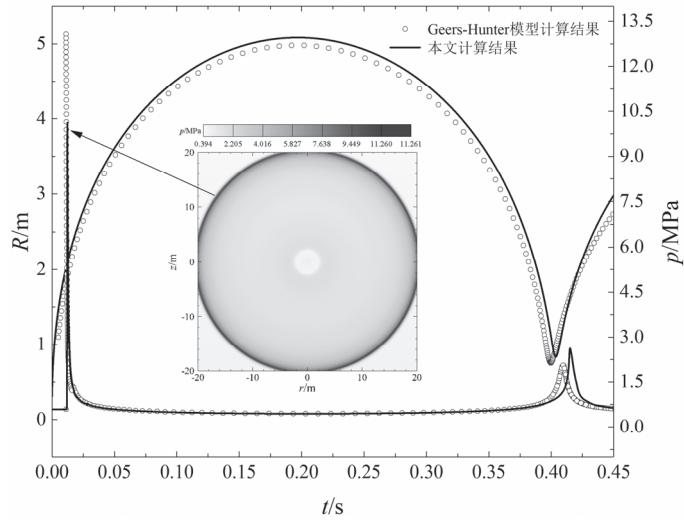


图 2 本文 EFEM 模型和 Geers-Hunter 模型计算的等效半径变化曲线和压力变化曲线对比

通过对比可以发现，EFEM 数值计算模型计算出的结果和 Geers-Hunter 模型的计算结果相比，气泡的等效半径变化曲线基本一致，但是压力峰值差距略大，这主要是因为 Geers-Hunter 模型假定水中声速是一个定值。总体来说，EFEM 数值计算模型的计算结果和 Geers-Hunter 模型的计算结果吻合程度较高，EFEM 数值计算模型的正确性得到验证。

2.2 自由液面距离参数 γ_f 的影响

本小节分析的是自由液面对水下爆炸的影响，为了避免浮力的影响，将浮力参数 δ 设置为 0。刚性壁面距离参数 γ_w 始终为 1.0。自由液面距离参数 γ_f 一共选取 5 组，分别是 0.6, 0.9, 1.5, 2.4 和 3.6。图 3 为 $\gamma_f = 0.6$ 时不同时刻气泡的轮廓图和流场压力图。

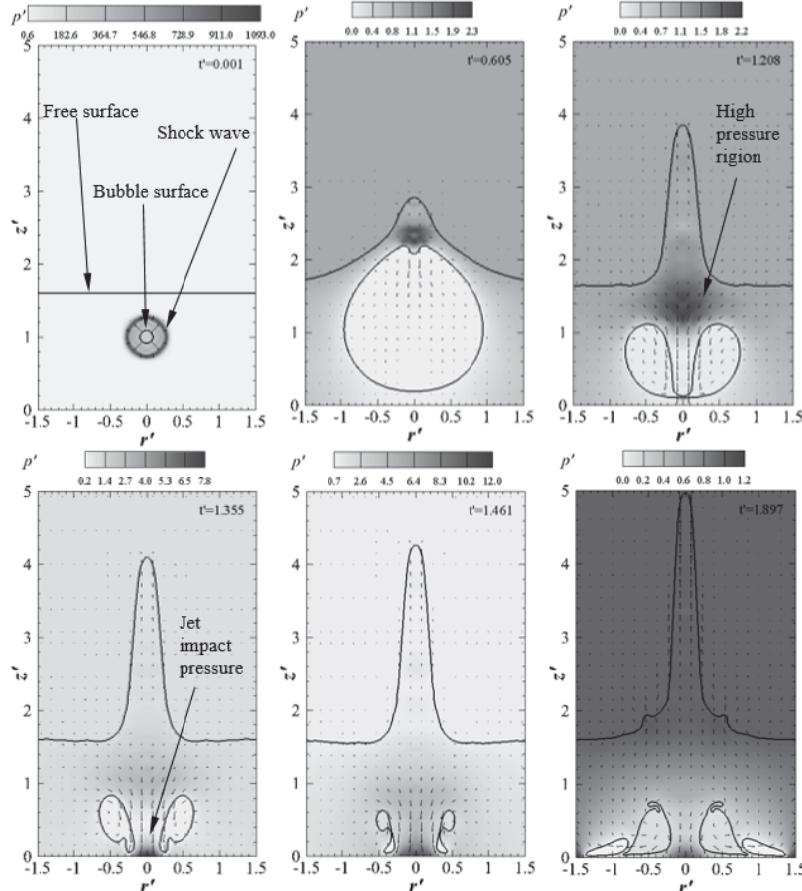


图 3 $\gamma_f = 0.6$ 时气泡和自由液面轮廓图及流场压力分布图（箭头代表速度矢量）

在图 3 中，当 $t' = 0.001$ 时可以看到冲击波阶段流场的压力分布特点，冲击波在压力场中会表现为一个非常锐利的压力前沿。在气泡膨胀阶段，水面会产生凸起，气泡和自由面相互作用产生一个高压区，气泡和水冢在高压区的作用下分别产生向下的射流并且更高的水冢^[34]。射流击穿气泡后对壁面产生射流冲击载荷，紧接着气泡脉动载荷也会释放到压力场。在气泡第二次膨胀时，水冢下部会形成一个“裙”。以上就是自由面和壁面之间水下爆炸的一些基本现象。

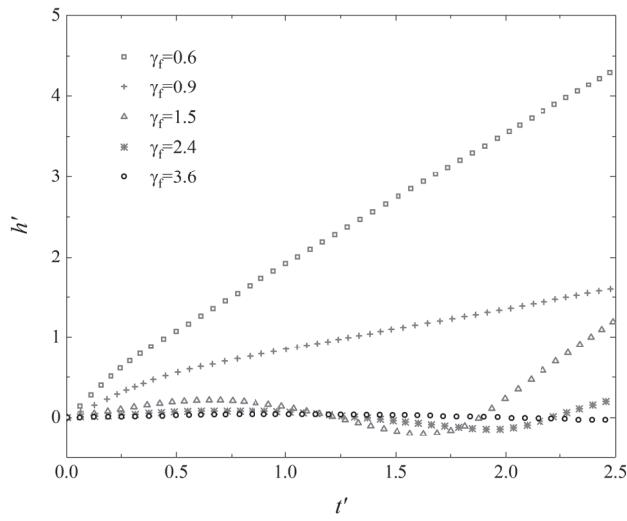


图 4 不同自由液面距离参数下水冢高度变化曲线

气泡和自由面之间的相互作用很大程度上是体现在水冢上，因此本文分析对比了不同自由液面参数下水冢高度的变化。如图 4 所示，当 γ_f 较小时，气泡离自由面很近，水冢的高度增长很快。但是 γ_f 的值再继续减小时，气泡在膨胀的过程中会将自由面破开。当 γ_f 的值增大时，水冢高度的增长速度会降下来，当 γ_f 足够大时水冢高度会趋近于 0。事实上，水冢的高度也是有近似于气泡脉动的规律的，但是相对气泡的脉动周期通常会更长^[35]。

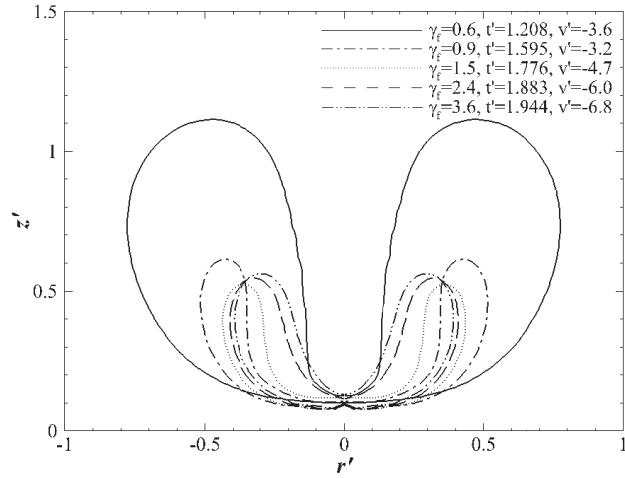


图 5 不同自由液面距离参数下射流击穿气泡时气泡轮廓图

当爆炸气泡和自由液面距离很近时，自由液面对气泡的影响会很大，如图 5 所示，气泡出现射流的时间要比其他参数下更早且更早击穿气泡。当 $\gamma_f=0.6$ 时水冢的速度明显高于其他 γ_f 值，水冢从气泡间接得到的能量最多，所以会造成气泡过早的坍缩。但当 γ_f 从 0.9 增加到 3.6 时气泡射流则会呈现明显的规律性，随着 γ_f 值得增大，射流击穿气泡的时间也

越来越晚，射流的速度会越来越大，但是射流的宽度会变小。

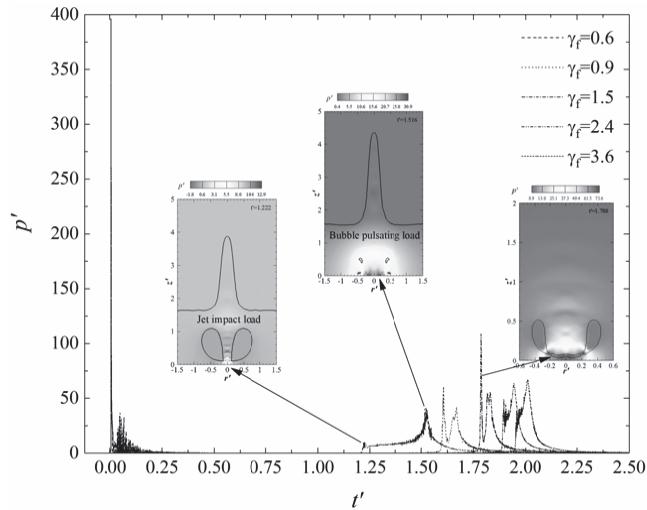


图 6 不同自由液面距离参数下壁面中心压力的变化

如图 6 所示，在冲击波阶段，不同 γ_f 值下冲击波的峰值差距并不明显。在冲击波峰值过后会出现一段时间压力曲线的剧烈波动，产生这种剧烈波动的原因主要是冲击波在自由液面和刚性壁面之间的不断反射叠加。相对于冲击波阶段的差异，不同 γ_f 值下气泡阶段的差异会更加明显。从图 6 中能明显的看出气泡阶段的载荷作用时间明显比冲击波阶段更持久，并且当 γ_f 值较小时这种持久性会更显著。气泡阶段的载荷总体上会出现射流载荷产生的峰值和气泡脉动载荷的峰值两个峰值^[34]。这两个峰值随 γ_f 的变化规律是不同的，射流载荷的峰值随着 γ_f 的增大也会增大，但当 $\gamma_f=1.5$ 时会出现最大值，之后射流载荷开始随着 γ_f 的增大而减小，而气泡脉动载荷的峰值则会一直随着 γ_f 的增大而增大。事实上，气泡的射流载荷峰值总体上也是随着 γ_f 的增大而增大的，但是当 $\gamma_f=0.9$ 和 $\gamma_f=1.5$ 时气泡射流较宽，击穿气泡时会撕裂气泡，射流前段会产生一个小气泡垫（图 6 中右侧小图），小气泡垫在壁面附近也会释放压力并与射流载荷叠加造成射流载荷的峰值变大。结合图 4 不难发现，气泡的能量通过压力场一部分会转化成水冢的动能，由于水冢的存在，自由面会有对气泡能量的卸载作用，这也是气泡的脉动载荷峰值会随着 γ_f 的增大而减小的原因。

2.3 刚性壁面距离参数 γ_w 的影响

本小节分析的是刚性壁面对水下爆炸的影响，为了避免浮力的影响，将浮力参数 δ 设置为 0。自由液面距离参数 γ_f 始终为 1.0，刚性壁面距离参数 γ_w 一共选取 5 组，分别是 0.6, 0.9, 1.5, 2.4 和 3.6。

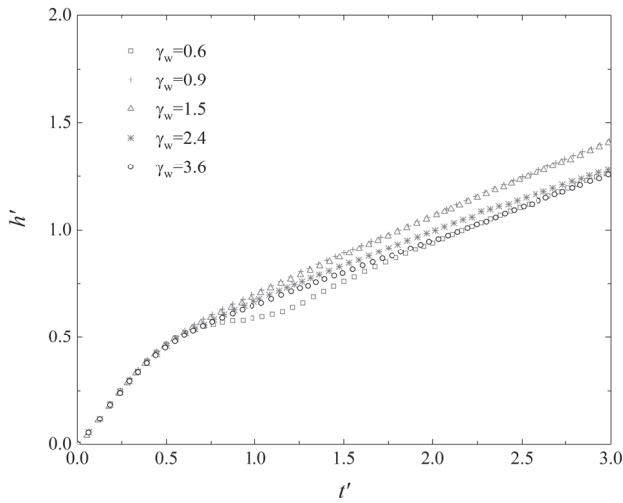


图 7 不同刚性壁面距离参数下水冢高度变化曲线

相对于自由液面距离参数的影响，刚性壁面距离参数的影响就不那么明显。首先是对水冢的影响不明显。在 $t'=0.5$ 之前水冢的高度变化几乎不随 γ_w 改变。即使在 $t'=0.5$ 之后不同 γ_w 值的水冢高度出现了差异，这种差异也是很小的。自由液面距离参数的改变对水下爆炸气泡的影响很大一部分体现在水冢上，而刚性壁面距离参数的改变没有对水冢产生很大影响也从侧面说明了刚性壁面和自由液面对水下爆炸气泡影响机制的不同。刚性壁面对爆炸气泡的吸引作用随着 γ_w 的减小而越来越强烈，爆炸气泡会贴附在刚性壁面上脉动和产生射流。

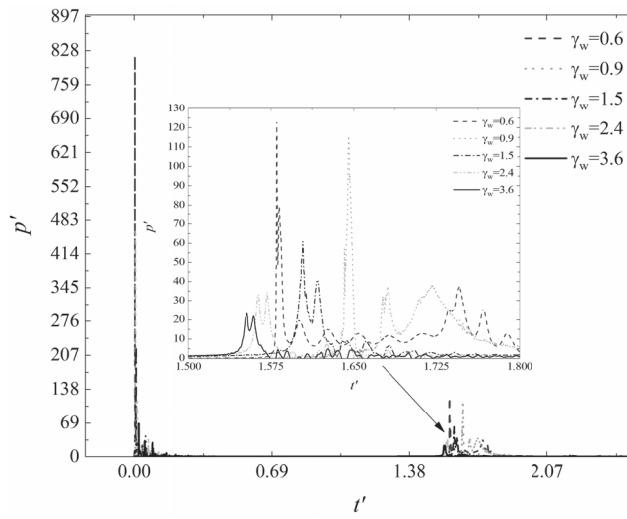


图 8 不同刚性壁面距离参数下壁面中心压力的变化

如图 8 所示，冲击波压力的峰值是随着 γ_w 的增大而减小的，这是因为随着 γ_w 的增大壁面距离爆心越来越远，随着传播距离的增加冲击波的压力载荷也会有衰减。当 $\gamma_w=0.6$ 时射

流载荷约为 120，射流载荷峰值是所有 γ_w 值中最大的，这与 2.2 中 $\gamma_f=1.5$ 时的射流载荷峰值是相当的。换句话说，爆炸气泡对壁面的射流载荷即使在离壁面相对远一点的位置，也可以通过调节自由液面的距离达到和离壁面较近的工况相同的射流载荷，看似有“弹性”的自由液面对射流载荷的影响相对刚性的壁面也是十分显著的。

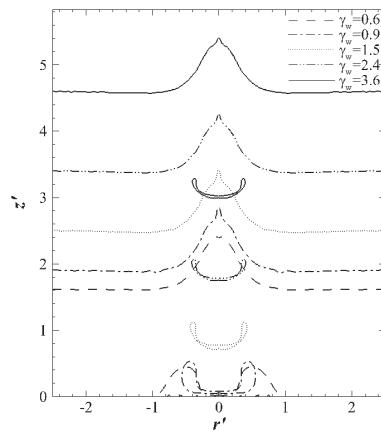


图 9 不同自由液面距离参数下射流击穿气泡时气泡和自由液面轮廓图

如图 9 所示，通过在射流击穿气泡时不同 γ_w 值时气泡和自由液面轮廓的对比，能够很直观的看出刚性壁面只有在 $\gamma_w < 1.5$ 时才会对爆炸气泡的形态有明显的影响。随着 γ_w 的减小，也就是爆炸气泡离壁面越来越近，气泡贴附在壁面上的趋势越来越明显。而当 $\gamma_w > 1.5$ 时，气泡在被射流击穿时的形态以及自由液面的形态几乎没有明显的区别。

2.4 浮力参数 δ 的影响

在实际的水下爆炸问题中，因为气泡的尺度较大，相对来说浮力的作用也会很明显^[36-37]，因此本节着重讨论浮力参数的影响。通过改变炸药当量 W 和爆心的深度 H 来改变 δ 的值，表 1 是不同炸药当量的相关参数值。利用数值计算模型本节计算了浮力参数为 0.34, 0.47 和 0.64 三个工况，最后选取了典型时刻的计算结果进行对比。

表 1 不同浮力参数下的参数值

W/Kg	H/m	γ_f	γ_w	R_m/m	δ
0.5	0.61	0.5	1.0	1.22	0.34
5	1.29	0.5	1.0	2.58	0.47
50	2.67	0.5	1.0	5.34	0.64

选取对比的第一个特征时刻是射流击穿气泡的时刻，如图 10 所示。在水冢和射流生成时，自由液面和气泡之间会有一个高压区，随着浮力参数的增大，这个高压区的幅值和射流的宽度并没有明显的变化规律，但是水冢的无量纲高度随着浮力参数的增大而减小。另一个值得注意的地方是气泡的形态变化，随着浮力参数的增大，浮力的作用效果越来越明显，气泡越来越向下突出并且气泡的体积也相对小一些。相对于气泡的整个脉动周期，大的浮力参数会使气泡更早的产生射流并且射流也会更早的击穿气泡。

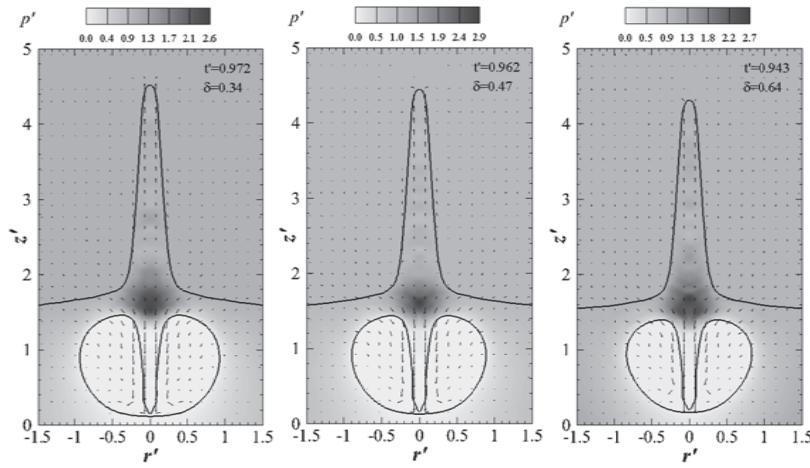


图 10 不同浮力参数下射流击穿气泡时气泡和自由液面轮廓图及流场压力分布图（箭头代表速度矢量）

另一个特征时刻是射流抨击壁面之后，如图 11 所示。水冢的无量纲高度随浮力参数的变化趋势与射流击穿时刻是相同的，在大浮力参数下会相对小一些。射流在击穿气泡之后会作用在下方刚性壁面上，通过图 11 上方的图例不难看出当浮力参数增大时，射流对刚性壁面的抨击载荷也会变大，这主要是因为本节主要通过调节炸药当量来改变浮力参数的大小，改变爆心的深度主要还是控制自由液面的距离参数不变，因此当浮力参数较大意味着炸药当量也更大，气泡的动态过程也更剧烈。

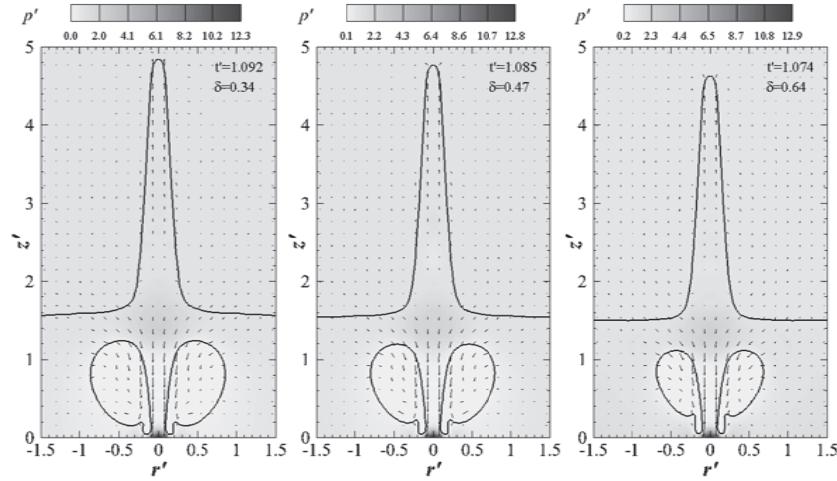


图 11 不同浮力参数下射流抨击后气泡和自由液面轮廓图及流场压力分布图（箭头代表速度矢量）

3 结论

本文基于欧拉有限元方法对自由面和刚性壁面之间水下爆炸问题进行了研究，对不同

自由液面距离参数和刚性壁面距离参数的水下爆炸载荷演化进行了详细的对比和分析，并得到以下结论。自由液面距离参数的影响主要体现在水冢、气泡阶段载荷以及射流三个方面。水冢的高度以及增长速度在一定范围内会随着 γ_f 的增大而减小。射流的速度大体上会随着 γ_f 的增大而增大，但是射流的宽度会随着 γ_f 的增大而减小。射流载荷的峰值随着 γ_f 的增大会出现一个先增大后减小的趋势，射流载荷的这种趋势主要和射流宽度较大时射流击穿气泡后撕裂的小气泡垫释放的压力与射流载荷叠加有关。气泡脉动载荷的峰值则是随着 γ_f 的增大而增大，这主要和气泡的能量间接转化为水冢的动能有关。刚性壁面距离参数相对于自由面距离参数对气泡动态过程的影响有明显的差异。水冢的高度及增长速度随着 γ_w 并没有明显的变化。冲击波载荷的峰值会随着 γ_w 的增大而减小，这主要是因为载荷的传播会随着距离的增大而衰减，气泡射流载荷的峰值也会随着 γ_w 的增大而减小。只有当 $\gamma_w < 1.5$ 时刚性壁面才会明显影响到爆炸气泡，随着 γ_w 的减小爆炸气泡贴附在刚性壁面的趋势越来越明显。随着浮力参数的增大，气泡会越来越向下突出并且射流的抨击载荷也会变大。

参考文献

- 1 KLASEBOER E, KHOO B, HUNG K. Dynamics of an oscillating bubble near a floating structure [J]. Journal of Fluids and Structures, 2005, 21(4): 395-412.
- 2 WANG S P, ZHANG A M, LIU Y L, et al. Bubble dynamics and its applications [J]. Journal of Hydrodynamics, 2018, 30(6): 975-991.
- 3 金键, 朱锡, 侯海量, 等. 水下爆炸载荷下舰船响应与毁伤研究综述 [J]. 水下无人系统学报, 2017(6).
- 4 张阿漫, 王诗平, 彭玉祥, 等. 水下爆炸与舰船毁伤研究进展 [J]. 中国舰船研究, 2019, 14(3): 1-13.
- 5 陈学兵, 李玉节. 圆柱壳在水下爆炸气泡作用下的动态塑性响应研究 [J]. 船舶力学, 2010, 014(008): 922-929.
- 6 TIAN Z, LIU Y, ZHANG A, et al. Jet development and impact load of underwater explosion bubble on solid wall [J]. Applied Ocean Research, 2020, 95(102013).
- 7 LENOIR M. Numerical calculation of the collapse of a cavitation bubble near a wall or a free surface [J]. Journal De Mecanique, 1976, 15(4): 687-703.
- 8 PLESSSET M S, CHAPMAN R B. Collapse of an initially spherical vapour cavity in the neighbourhood of a solid boundary [J]. Journal of Fluid Mechanics, 1971, 47(02): 283-290.
- 9 DADVAND A, DAWOODIAN M, KHOO B C, et al. Spark-generated bubble collapse near or inside a circular aperture and the ensuing vortex ring and droplet formation [J]. Acta Mechanica Sinica, 2013, 29(5): 657-666.
- 10 KARRI B, OHL S, KLASEBOER E, et al. Jets and sprays arising from a spark-induced oscillating bubble near a plate with a hole [J]. Physical Review E, 2012, 86(3): 036309.
- 11 方斌, 朱锡. 不同边界条件下水下爆炸气泡的数值模拟 [J]. 海军工程大学学报, 2008, (2): 89-94+116.
- 12 王诗平, 张阿漫, 刘云龙, 等. 圆形破口附近气泡动态特性实验研究 [J]. 物理学报, 2013(6): 064703.
- 13 CUI P, ZHANG A M, WANG S P, et al. Experimental investigation of bubble dynamics near the bilge with a

- circular opening [J]. Applied Ocean Research, 2013, 41(65–75).
- 14 卞金磊, 朱石坚, 刁爱民, 等. 边界条件对水下爆炸气泡运动特性的影响分析 [J]. 振动与冲击, 2014, 33(13): 92-97.
- 15 LIU Y, WANG S, ZHANG A. Interaction between bubble and air-backed plate with circular hole [J]. Physics of Fluids, 2016, 28(6): 062105.
- 16 LIU N, WU W, ZHANG A, et al. Experimental and numerical investigation on bubble dynamics near a free surface and a circular opening of plate [J]. Physics of Fluids, 2017, 29(10): 107102.
- 17 常青, 张敏弟, 黄国豪, 等. 不同材料边界附近气泡运动特性对比试验研究; proceedings of the 中国力学大会论文集(CCTAM 2019), F, 2019 [C].
- 18 贺铭, 张阿漫, 刘云龙. 近场水下爆炸气泡与双层破口结构的相互作用 [J]. 爆炸与冲击, 2020, 1-12.
- 19 叶曦, 初文华, 陈林, 等. 近自由液面气泡与冲击波的相互作用 [J]. 中国舰船研究, 2017, 012(005): 90-96.
- 20 ZHANG A, LIU Y L. Improved three-dimensional bubble dynamics model based on boundary element method [J]. Journal of Computational Physics, 2015, 294(208-223).
- 21 LI T, WANG S, LI S, et al. Numerical investigation of an underwater explosion bubble based on FVM and VOF [J]. Applied Ocean Research, 2018, 74(49-58).
- 22 LIU Y, ZHANG A-M, TIAN Z, et al. Investigation of free-field underwater explosion with Eulerian finite element method [J]. Ocean Engineering, 2018, 166(182-190).
- 23 BENSON D J. Computational methods in Lagrangian and Eulerian hydrocodes [J]. Computer methods in Applied mechanics and Engineering, 1992, 99(2-3): 235-394.
- 24 BENSON D J, OKAZAWA S. Contact in a multi-material Eulerian finite element formulation [J]. Computer methods in applied mechanics and engineering, 2004, 193(39-41): 4277-4298.
- 25 HIRT C W, NICHOLS B D. Volume of Fluid (VOF) Method for the Dynamics of Free Boundaries [J]. Journal of Computational Physics, 1981, 39(1): 201-225.
- 26 VAN LEER B. Towards the ultimate conservative difference scheme. IV. A new approach to numerical convection [J]. Journal of computational physics, 1977, 23(3): 276-299.
- 27 IVINGS M J, CAUSON D M, TORO E F. On Riemann solvers for compressible liquids [J]. International Journal for Numerical Methods in Fluids, 1998, 28(3): 395-418.
- 28 QIU J, LIU T, KHOO B C. Simulations of compressible two-medium flow by Runge-Kutta discontinuous Galerkin methods with ghost fluid method [J]. Communications in Computational Physics, 2008, 3(3): 479-504.
- 29 KLASEBOER E, HUNG K, WANG C, et al. Experimental and numerical investigation of the dynamics of an underwater explosion bubble near a resilient/rigid structure [J]. Journal of Fluid Mechanics, 2005, 537(387).
- 30 RUNGSIYAPHORN RAT S, KLASEBOER E, KHOO B C, et al. The merging of two gaseous bubbles with an application to underwater explosions [J]. Computers & Fluids, 2003, 32(8): 1049-1074.

- 31 GEERS T L, HUNTER K S. An integrated wave-effects model for an underwater explosion bubble [J]. Journal of the Acoustical Society of America, 2002, 111(4): 1584-1601.
- 32 GEERS T L, PARK C K. Optimization of the G&H bubble model [J]. Shock & Vibration, 2005, 12(1): 3-8.
- 33 刘云龙. 改进的气泡动力学模型在舰船抗冲击中的应用 [D]; 哈尔滨工程大学, 2014.
- 34 李帅. 水下爆炸气泡射流载荷特性研究 [D]; 哈尔滨工程大学, 2017.
- 35 HE M, ZHANG A, LIU Y. Prolonged simulation of near-free surface underwater explosion based on Eulerian finite element method [J]. Theoretical and Applied Mechanics Letters, 2020, 10(1): 16-22.
- 36 谭皓洋. 基于 CEL 方法的舰船近场水下爆炸全过程数值模拟研究 [M]; 哈尔滨工程大学, 2017.
- 37 崔杰. 近场水下爆炸气泡载荷及对结构毁伤试验研究 [D]; 哈尔滨工程大学, 2013.

Numerical simulation of underwater explosion under complex boundaries by Eulerian finite element method

TANG Hao, LIU Yun-Long, ZHANG A-Man

(College of Shipbuilding Engineering, Harbin Engineering University, Harbin, 150001.

Email: tang_hao@hrbeu.edu.cn)

Abstract: First, this paper establishes a numerical calculation model of underwater explosion under complex boundaries based on Eulerian finite element method. Then the numerical calculation model is validated by calculating underwater explosions in free field and comparing the calculation results with the Geers-Hunter model. Then, the influence of the free surface distance parameter, the rigid wall distance parameter and the buoyancy parameter on the dynamic process of the explosion bubble are explored. The results show that as the free surface distance parameter increases, the height and growth rate of the water hump will become smaller and smaller. In a certain range, the jet velocity will increase but the jet width will decrease. The peak jet load will increase first and then decrease due to the release pressure of the small bubble cushion split after the jet with a larger jet width penetrates the bubble, while the bubble pulse load will keep increasing. The shock wave load and jet load will decrease with the increase of the rigid wall distance parameter. However, the height and growth rate of the water hump do not change significantly with the wall distance parameter. Only when the wall distance parameter is less than 1.5, the wall will have a significant impact on the explosion bubble. With the increase of the buoyancy parameter, the bubble will protrude downward and the impact load of the jet will also increase.

Key words: underwater explosion; Bubble dynamics; Eulerian finite element method; complex boundaries.

圆柱涡激振动的模型试验和离散涡法开发研究

宗智，周力，闫超群

(大连理工大学 船舶工程学院，大连，116024, Email: zongzhi@dlut.edu.cn)

摘要：涡激振动是工程中常出现的现象，有时会造成结构的严重的损伤。最近发生的虎门大桥异常抖动，初步诊断为涡激振动造成的。本文介绍在涡激振动数值方法和试验中的一些进展。首先介绍了涡激振动实验装置。进而进行了单圆柱管在空气中的涡激振动实验，得到了圆柱管的振幅响应与约化速度的关系曲线，获得了不同质量比以及不同弹簧刚度对圆柱管涡激振动的影响。有趣的是，随着风速的提高，试验中观察到了不同模态的响应。其次，介绍了基于离散涡法的涡激振动数值方法。通过研究发现，传统的离散涡方法，在边界处理上存在严重缺陷，造成数值结果的不稳定和计算精度大幅度下降。据此，我们提出了新的边界条件处理方法，既满足物面不可穿越条件，又满足瞬时环量守恒，获得了非常令人满意的数值结果；不但精度大幅度提高数倍，而且数值稳定性也显著改善。用改进的离散涡法计算流体运动和载荷，用有限体积法计算结构动力响应，建立和开发了立管涡激振动的数值方法，获得了令人满意的数值结果。

关键词： 涡激振动；离散涡法；瞬时涡量守恒；自锁；流固耦合

1 引言

2020年5月5日下午14:30—17:00，虎门大桥悬索桥面发生异常抖动。随后专家初步判断是水马引起的涡激振动造成的振动。去掉水马后，18:00后又发生振动，但幅值小多了^[1]。

20世纪40年代，塔克玛大桥在大风中振动垮塌，第一次引起了人们对涡激振动的注意^[2]。涡激振动已成为悬索大桥设计中必须考虑的设计载荷。

流体中细长柔软柱体的尾流会产生周期交替的尾涡（卡门涡街），在垂直来流方向产生周期升力，造成柱体上下往复的振动，称为涡激振动^[3]。涡激振动也是海洋立管最重要的危险载荷。一旦发生，可能发生立管的破损和断裂，造成严重的经济损失和海洋污染^[3]。

涡激振动是高雷诺数下非线性流固耦合现象，数值计算具有很大的挑战。不同的数值方法，给出差距较大的预报结果。涡激振动的数值方法研究，有助于理解高雷诺数的流动，

工程结构安全设计不可或缺的工具。

2 试验研究

本试验的目的是为涡激振动计算方法提供验证。

2.1 试验设置

铝合金框架高 700mm，宽 600mm（图 1）。用四根弹性系数相同的弹簧将 PVC 圆柱约束在铝合金框架上。由变频器控制的风机提供来流。流体流速可以从 0m/s 连续调速为到 5m/s。风机前置一导流板，使流体能均匀流过圆柱管。风速仪的测量范围为 0~20m/s，精度为 0.001m/s。加速度传感器固定在圆柱管的中心位置，以收集包括振幅和频率在内的振动信号。表 1 给出了实验装置的各项参数。

表 1 试验参数

圆柱直径 D (mm)	50
圆柱长度 L (mm)	500
弹簧系数 K (N/m)	31.36~83.5
质量比 m^*	110.6~142.2
风速 U (m/s)	1.0~5.0
雷诺数 Re	3000~15000

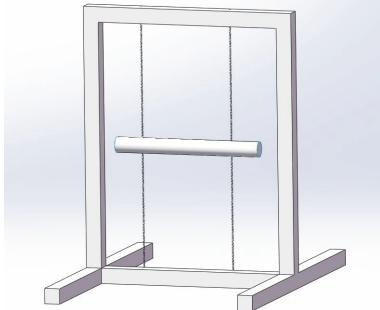


图 1 圆柱的试验布置示意图

2.2 试验结果与讨论

弹簧系数一定 ($K=85.5$)，单圆柱振动幅值比和约化速度的关系在图 2 (左) 给出。曲线的横轴为约化速度 ($U_r=U/f_n D$)，纵轴为圆柱振幅与圆柱直径的比值。图中给出三组结果，分别对应三组质量比 ($m^*=110.6$, $m^*=126$ 和 $m^*=142.2$)。质量比一定 ($m^*=110.6$)，弹簧系数分别为 $K=85.25$, $K=62.72$ 和 $K=31.36$ 时的试验结果在图 2 (右) 中给出。

单圆柱在两端用弹簧约束。圆柱有两个振动模态：升沉和纵摇。约化速度较小时，只有升沉（图 3 中 $U_r < 7$ ）；约化速度变大后，除了升沉，也出现了纵摇（图 3 中 $7.2 < U_r < 8.5$ ）。圆柱出现了两个模态的振动响应。图 3 (右) 给出了圆柱振动频率与固有频率比值。随约化速度的变化曲线。可以发现在圆柱出现纵摇振动时，圆柱的振动频率增大，频率比由 1.0 增大到了 1.4，明显看到了两个频率。

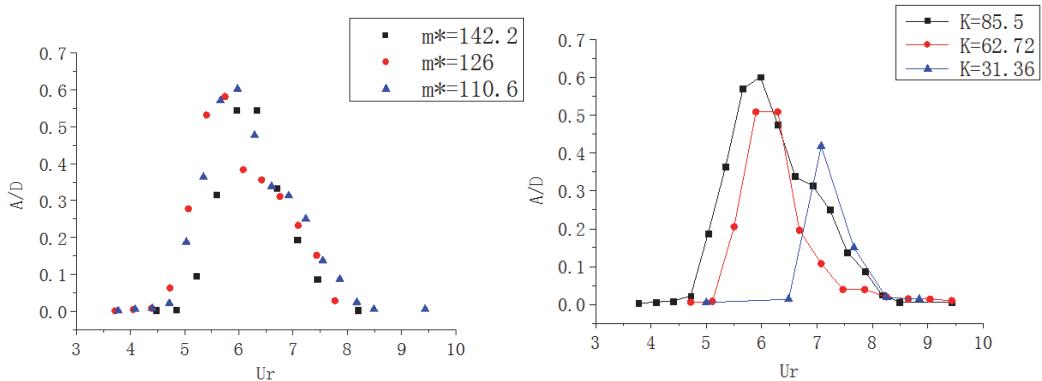


图2 不同质量比的圆柱振幅比与约化速度关系(左)和不同弹簧刚度的圆柱的振幅比和约化速度关系(右)

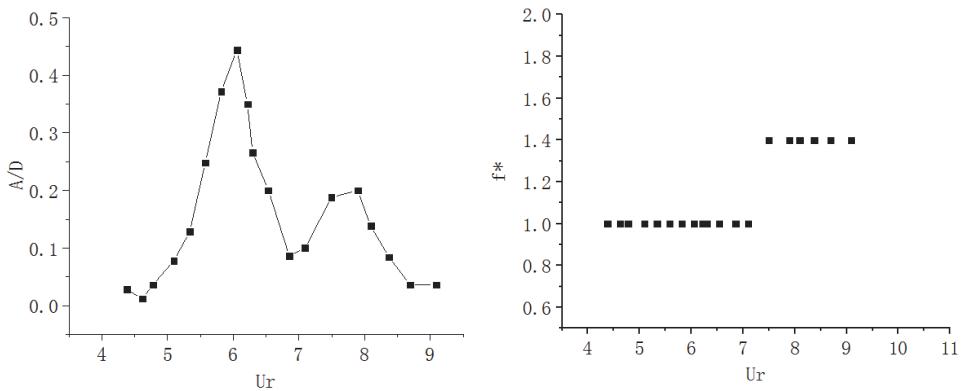


图3 圆柱端点的振动响应(左)和频率比(左)

还进行了两个串联的圆柱的试验，以研究上游圆柱对下游圆柱的影响。试验中两个圆柱管的间距分别是 $4D$, $5D$, $7D$, $10D$ 。上游圆柱的尾流大大改变了下游圆柱管的锁定范围。和单圆柱比较（峰值 $Ur=6$ ），下游圆柱的自锁区间大约在约化速度 $Ur = 7$ 时达到峰值，自锁定区间显著增加，特别地，下游圆柱管的振动区间在 $s=4D$ 时增加到约化速度 $6 < Ur < 11$ 的范围，这表明上游圆柱管的存在对于这样的距离对下游圆柱管的振动影响最大。

3 瞬时涡量守恒离散涡法^[5]

涡激振动计算的挑战在于，流动是高雷诺数的。湍流和涡发放造成了计算困难。离散涡法将流体离散成涡元粒子（有限大小的点涡），可以显著提高捕捉旋涡的能力^[5]。

黏性流体的流动满足 Navier-Stokes 方程

$$\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + \mathbf{u} \cdot \nabla \mathbf{u} = -\frac{1}{\rho} \nabla p + \nu \nabla^2 \mathbf{u} \quad (1)$$

其中 \mathbf{u} 是速度矢量, p 为压强, ρ 为流体密度, ν 为流体的运动黏性系数。定义涡量 $\boldsymbol{\omega} = \nabla \times \mathbf{u}$, N-S 方程得到

$$\frac{D\boldsymbol{\omega}}{Dt} = \frac{\partial \boldsymbol{\omega}}{\partial t} + \mathbf{u} \cdot \nabla \boldsymbol{\omega} = \nu \nabla^2 \boldsymbol{\omega} \quad (2)$$

采用算子分裂法, 涡量方程 (2) 可以分成两个方程

(1) 对流部分:

$$\frac{d\boldsymbol{\omega}}{dt} = \frac{\partial \boldsymbol{\omega}}{\partial t} + \mathbf{u} \cdot \nabla \boldsymbol{\omega} = 0 \quad (3)$$

这个方程表明, 跟随质点的涡量不随时间变化。于是, 流场可以用大量的点涡来代替, 每个涡的涡量不变, 图 4 (左)。每个涡在流场中它的解由 Biot-Savart 定律给出

$$\mathbf{u}(\mathbf{r}, t) = -\frac{1}{4\pi} \iiint \frac{(\mathbf{r} - \mathbf{r}') \times \boldsymbol{\omega}(\mathbf{r}', t)}{|\mathbf{r} - \mathbf{r}'|^3} dV(\mathbf{r}') + \mathbf{u}_\infty \quad (4)$$

式中 \mathbf{r} , \mathbf{r}' 表示矢径, \mathbf{u}_∞ 代表无穷远处的速度。

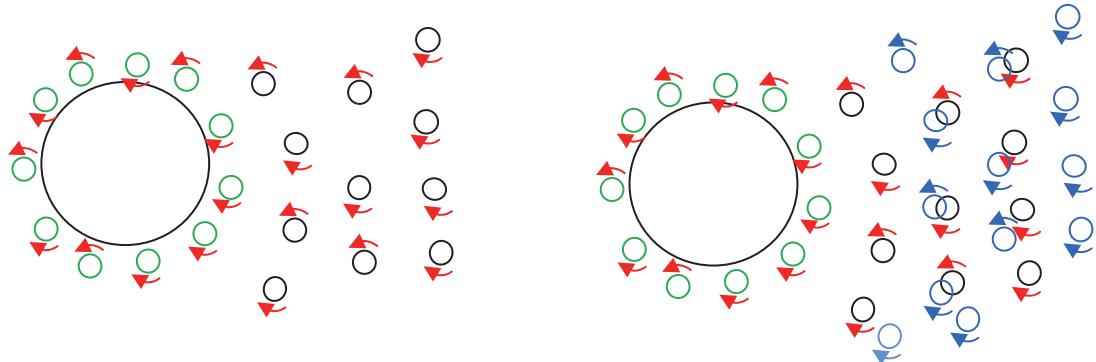


图 4 流场用大量的点涡来代替 (左), 黏性的作用是让每个点涡发生随机游走 (右) 黑色是原粒子所在位置, 蓝色是随机游走后的位置

(2) 黏性扩散部分:

$$\frac{\partial \boldsymbol{\omega}}{\partial t} = \nu \nabla^2 \boldsymbol{\omega} \quad (5)$$

这是一个扩散方程，它的解等效于一个点涡发生随机游走。在二维空间，在时间内每个涡元的随机走步为

$$\begin{aligned}\Delta x &= \sqrt{8Re^{-1}\Delta t \ln(1/P) \cos(2\pi Q)} \\ \Delta y &= \sqrt{8Re^{-1}\Delta t \ln(1/P) \sin(2\pi Q)}\end{aligned}\quad (6)$$

其中 Re 是雷诺数。 P 和 Q 是 $(0, 1)$ 之间的均匀随机数。由此求出涡的对流位移和扩散位移为（见图 5（右））

$$\begin{aligned}x_i(t+\Delta t) &= x_i(t) + [1.5u_i(t) - 0.5u_i(t-\Delta t)]\Delta t + \Delta x_i \\ y_i(t+\Delta t) &= y_i(t) + [1.5v_i(t) - 0.5v_i(t-\Delta t)]\Delta t + \Delta y_i.\end{aligned}\quad (7)$$

在二维空间够，为了满足物面条件，采用流函数的方法。流体不可压缩，满足方程

$$\nabla \cdot \mathbf{u} = 0 \quad (8)$$

于是，存在流函数 $\mathbf{u} = \left(\frac{\partial \psi}{\partial y}, -\frac{\partial \psi}{\partial x} \right)$ ，满足

$$\nabla^2 \psi = -\omega \quad (9)$$

第 K 个涡的流函数

$$\psi_k = u_\infty y_k - \frac{1}{4\pi} \sum_{i=1}^N \Gamma_i \ln[(x_k - x_i)^2 + (y_k - y_i)^2 + \sigma_i^2] - \frac{1}{4\pi} \sum_{j=1}^M \Gamma_j \ln[(x_k - x_j)^2 + (y_k - y_j)^2 + \sigma_j^2], \quad (10)$$

其中 M 和 N 分别是新生涡和尾流中的涡 (x_i, y_i) 、 (x_j, y_j) 和 (x_k, y_k) 分别是新生涡的位置和尾流中的涡的位置以及控制点的位置。

圆柱表面的涡元粒子满足物面不可穿透条件

$$\psi_{k+1} - \psi_k = 0 \quad (11)$$

相邻的控制点的流函数满足等式 (11)，根据圆柱表面的控制点的分布，有 M 有未知数同时有 M 方程，同时为了满足涡量守恒，即所有的涡元的涡量必须守恒，由此建立一个新的方程，由此可到一个 M 个未知数 $M+1$ 个方程的代数线性方程组

$$\mathbf{A} \Gamma(t) \equiv \mathbf{B}(t) \quad (12)$$

矩阵 \mathbf{A} 由控制点和分布在圆柱表面的点涡的位置决定，由此在整个长时间的计算中矩阵中的数值都不变

$$\mathbf{A} \equiv [a_{ki}], \quad a_{ki} = \frac{1}{4\pi} \ln \frac{(x_{k+1} - x_i)^2 + (y_{k+1} - y_i)^2 + \sigma_i^2}{(x_k - x_i)^2 + (y_k - y_i)^2 + \sigma_i^2}, \quad (13)$$

矩阵 $\mathbf{B}(t)$ 有尾流的位置、势流和控制点位置决定，其形式为

$$\mathbf{B}(t) \equiv [b_k], \quad b_k = u(y_{k+1} - y_k) - \frac{1}{4\pi} \sum_{i=1}^M \Gamma_i \ln \frac{(x_{k+1} - x_i)^2 + (y_{k+1} - y_i)^2 + \sigma_i^2}{(x_k - x_i)^2 + (y_k - y_i)^2 + \sigma_i^2}$$

$$-\frac{1}{4\pi} \sum_{j=1}^N \Gamma_j \ln \frac{(x_{k+1}-x_j)^2 + (y_{k+1}-y_j)^2 + \sigma_j^2}{(x_k-x_j)^2 + (y_k-y_j)^2 + \sigma_j^2}, \quad (14)$$

通过高斯消去法求解 可获得新生涡的涡量。

升力阻力系数通过下面的方程获得

$$c_d = \sum_{j=1}^{M+N} \Gamma_j \left[\frac{u_j \sin(2\theta_j) - v_j \cos(2\theta_j)}{r_j^2} \right], \quad c_l = - \sum_{j=1}^{M+N} \Gamma_j \left[\frac{v_j \sin(2\theta_j) - u_j \cos(2\theta_j)}{r_j^2} \right] \quad (15)$$

在数值计算过程，由于数值误差的积累，有的点涡会进入柱体内部。传统的方法简单把进入主体内部的例子拿到物面上，这实际破坏了物面条件，造成了更大的数值误差。我们发现，不能简单将进入物体内部的涡元粒子拿到物面上，而是镜像地放到流体中。根据圆周定律，这样做的结果是保证物面条件不被破坏（图 5）。另外这样做的好处是保证涡量瞬时守恒，故称瞬时涡量守恒离散涡法。

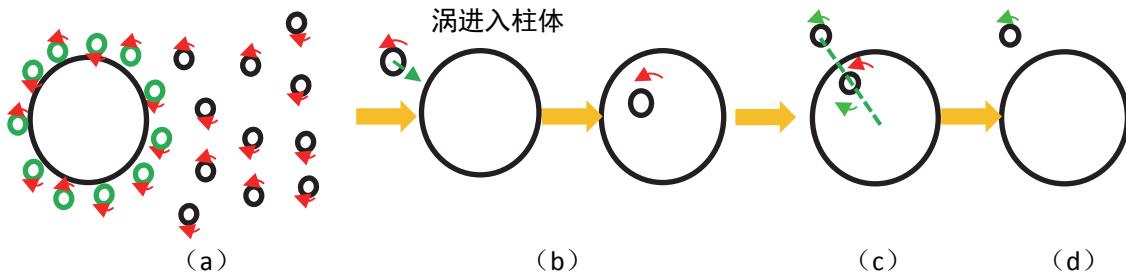


图 5 进入物体内部的涡元粒子不能简单地拿到物面，为了保证物面条件，涡粒子的处理方法是：(a) 流场近似成涡粒子群；(b) 某涡粒子进入物体；(c) 物体内部的涡粒子处加一个反向涡，使得物体内部的涡量守恒；同时把该涡粒子镜像映射到流场中；(d) 最终状态是流场镜像点多出了一个涡粒子，内部的涡量为 0，总的涡量守恒

根据上述方法计算经典的圆柱绕流问题（图 6）。和试验照片吻合良好。

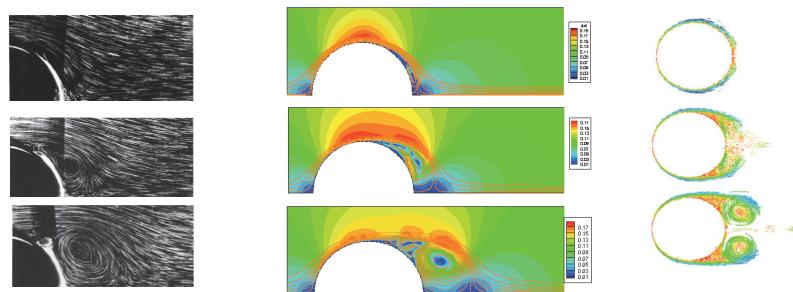


图 6 雷诺数=9500, 点涡数=128, 时间步长 0.05 (上述云图是 3 个时刻: 1.6s、2.8s 和 4s)

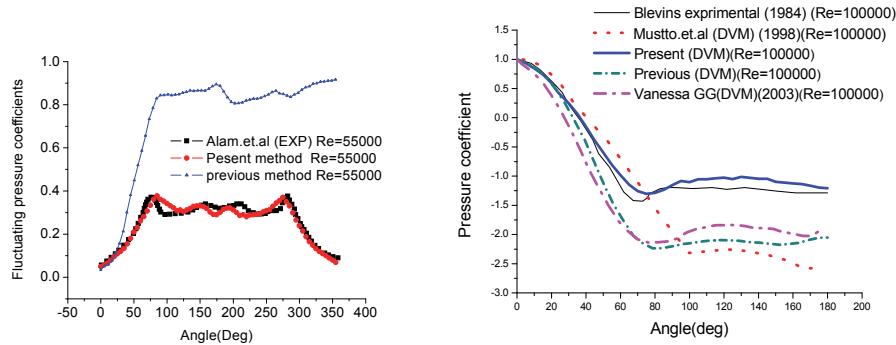


图 7 $Re=55000$ 时压力系数 (左) 和 $Re=100000$ 时压力系数 (右) 的对比

同一个试验，进行了压力系数对比（图 7）。图 7（左）是 $Re=55000$ 的结果^[6]；图 7（右）是 $Re=10^5$ 的结果^[6]。传统的离散涡法，由于未对正确进入柱体的涡粒子进行处理，造成压力系数沿圆周的分布和试验结果相差很大。图中可见本文的计算结果和试验吻痕非常好，证明了边界涡粒子的处理非常重要。

4 切片离散涡法计算立管涡激振动

立管是深水工程最重要的构件之一。在海流作用下，也可能发生涡激振动。将立管简化成挠性结构。立管一般很长（数百至 3000m）但截面积很小（直径米基），可以简化水力计算限制在垂直立管的水平面内（切片），见图 8。在每个切片内，流体流过柱体，会发生涡发放。这是一个二维问题，可以采用第 3 节的方法计算。

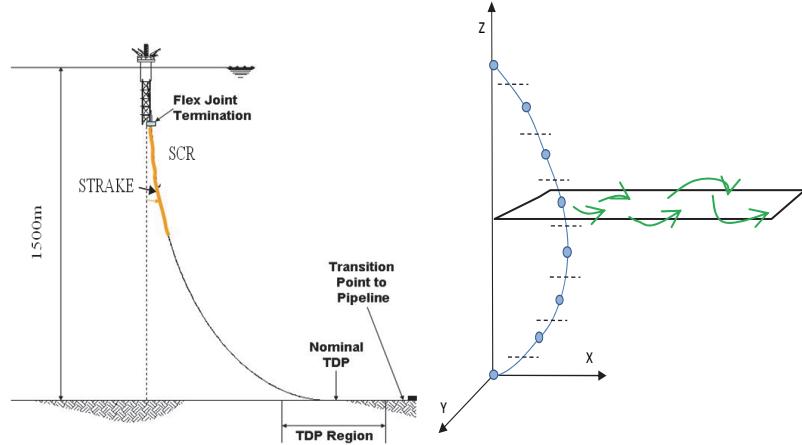


图 8 SCR(钢制悬链线) 的柔性立管 (左) 以及离散模型 (右) (在右图显示某个切片)

由于立管的振动是一个非线性过程，其阻尼和刚度与瞬时位移是耦合的。所以求解时把荷载作用的时间区间划分为多个短的时段，再对各个短的时段按照线性系统进行动力分析。该线性系统的特性为在时段开始时给定的动力参数的特性，当时段结束时其特性也要按照当时系统的变形及应力状态的改变来进行修正。于是，立管涡激振动分析就成了一系列依次变化的线性系统的分析。每当经历一个时段之后，立管的动力参数和外力就会产生一个增量，以保持系统的平衡状态以及变形协调关系^[7]。

当系统经过时段时，它的惯性力、阻尼力、恢复力以及外力在时刻达到新的平衡。时刻的平衡方程与时刻的平衡方程之差，称为增量的平衡方程，它同样反映时刻系统的平衡关系。于是，求解立管振动的关键步骤是

(1) 形成瞬时时刻立管的切线刚度阵 $[K(t_i)]$ 和有效动力刚度矩阵

$$(2) \quad [\tilde{K}(t_i)] = [K(t_i)] + \frac{6}{\Delta t^2} [M] + \frac{3}{\Delta t} [C]$$

(3) 时间增量 $t_{i+1} = t_i + \Delta t$ 时各个切片的涡激外载荷（第 3 节）以及该时刻的有效荷载增量 $[\Delta \tilde{F}(t)]$

(4) 计算 t_{i+1} 时刻的位移，速度和加速度，循环计算

5 数值计算结果

5.1 单自由度

使用切片离散涡法计算了单自由度圆柱的涡激振动，结果在图 9 中给出。该方法成功地预报了自锁，获得了超越传统方法的好结果。

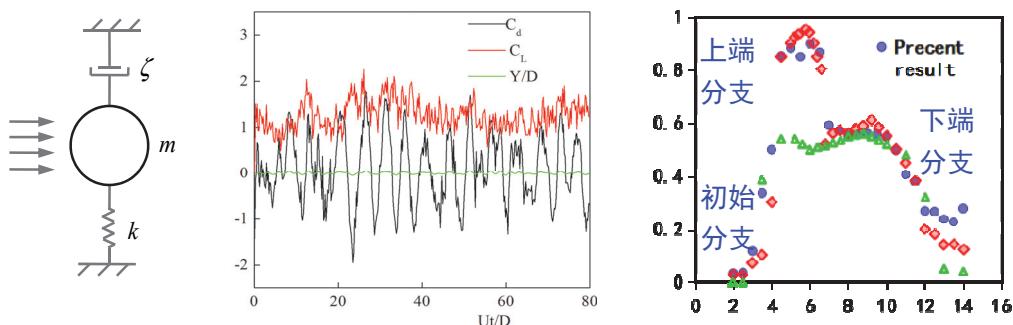


图 9 单自由度涡激振动问题由弹簧、阻尼器、质量块以及均匀来流组成（左），升力系数、阻力系数和位移时变曲线分别由红线、黑线和绿线表示（中），振幅比和约化速度（右）显示该方法准确地计算自锁和分支

5.2 立管算例

考虑某立管，参数如表 2 所示。来流速度为 0.6 米/秒时各个切片的涡发放如图 12（左）所示。立管的响应以二阶模态为主（中）。升力曲线和位移的时程曲线如图 12（右）所示。

表 2 立管的参数

立管总长	120m	运动粘性系数	$10^{-6} \text{m}^2/\text{s}$
水下长度	100m	材料弹性模量	$2.1 \times 10^{11} \text{N/m}^2$
立管外径	0.25m	内部液体密度	800kg/m^3
立管内径	0.2116m	海水密度	1025kg/m^3
顶端张力	200kN	立管材料密度	7700kg/m^3

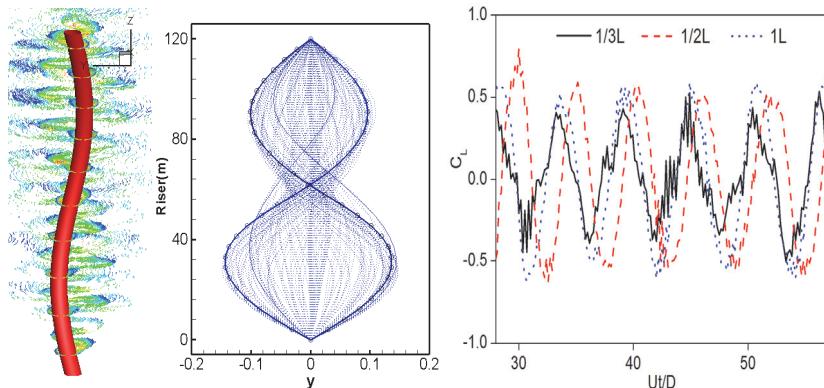


图 11 0.6m/s 均匀来流立管尾涡（左）、立管振动响应（中）和升力系数与位移时程曲线（右）

图 11 展示来流从 1.0~1.6 下 1/3L 处立管的升力和阻力，由于从来流的振型可知，在这些来流下，立管的整形是二阶振型，从而可知 1/2L 处的振幅最小。

我们也进行了串联立管的研究开发（图 12），篇幅限制，不赘述。

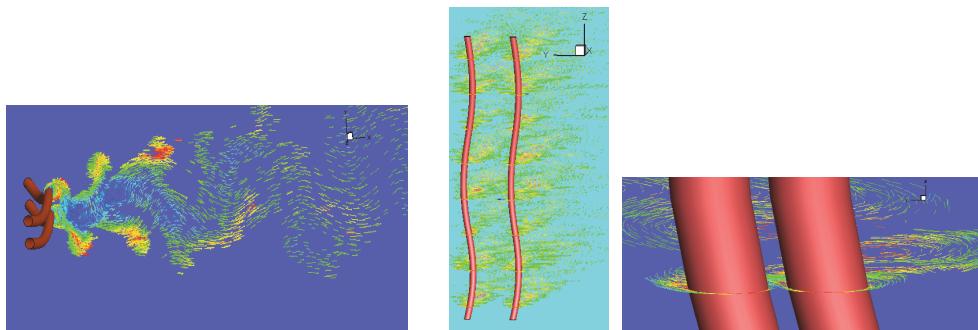


图 12 串联立管的涡激振动

参考文献

- 1 张莉莉。虎门大桥异常抖动：受主桥风速大影响，产生涡振。人民日报海外版. 2020年5月5日.
- 2 彭莎.不止虎门大桥，这些桥梁也发生过异常抖动.封面新闻 2020年5月6日。
- 3 Sarpkaya T. A critical review of the intrinsic nature of vortex-induced vibrations. J. Fluid Struct, 2004, 19:389-447.
- 4 Kamemoto K. On contribution of advanced vortex element methods toward virtual reality of unsteady vertical flows in the new generation of CFD . ABCM, 2004, XXVI (4): 368-378.
- 5 Pang J H, Zong Z, Zou L, Wang Z. Numerical simulation of the flow around two side-by-side circular cylinders by IVCBC vortex method. Ocean Engineering, 2016,119: 86 - 100.
- 6 Alam MM, Moriya M & Sakamoto H, Aerodynamic characteristics of two side-by-side circular cylinders and application of wavelet analysis on the switching phenomenon. J. Fluid Struct, 2003,18 (3), 325-346.
- 7 张增当.悬索非线性振动的有限体积法分析.浙江大学， 2004.

Model testing of VIV of circular cylinders and development of discrete vortex method

ZONG Zhi, ZHOU Li, YAN Chao-qun

(School of Naval Architecture,Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

Email: zongzhi@dlut.edu.cn)

Abstract: Vortex-Induced-Vibration(VIV) is frequently encountered in engineering, resulting in severe structural damages in unfavored cases. It is claimed that the recent unusual vibration of Humen bridge is caused by VIV. In this paper we report our recent work in VIV, both experimentally and numerically. Experimental setup is introduced, followed by presentation of experimental results of single cylinder in air. What is interesting is that different modes have been observed in the experiments. Development of Stripwise Discrete Vortex Method is introduced. What is interesting is that a slight improvement in treating those vortex particles entering body due to numerical errors leads to surprisingly good results. Combining with Finite Volume Method, we develop Stripwise Discrete Vortex Method for marine risers to predict dynamic responses.

Key words: VIV (Vortex-Induced-Vibration); Instantaneous Conservation of vortex; lock-in; discrete vortex method; Fluid-structure coupling.

湍流噪声的大涡模拟

何国威，王士召，吴霆，周志腾

中国科学院力学研究所 非线性力学国家重点实验室
中国科学院大学 工程科学学院

湍流噪声不仅是湍流理论研究的重要问题，也是高速航行器的卡脖子问题。著名的流体力学家 Lighthill 开创了湍流噪声的研究：把湍流噪声分为湍流声源与噪声传播的耦合过程，从而远场噪声的频率谱取决于湍流的频率波数能量谱，或简称为时空能谱。但是，如何从湍流的时空能谱确定湍流声源并计算远场噪声谱，仍然是一个具有挑战性的问题。本次报告将围绕该问题介绍我们近来的两个工作：(1) 发展时间精准的大涡模拟方法，计算高速航行器标模的湍流噪声。针对标模壁面的复杂几何构形，我们采用了壁面模化的大涡模拟计算湍流声源，并采用带有固壁的 Lighthill 理论——Curle 积分计算远场的噪声，由此得到噪声频率谱的高低频段具有不同的标度指数，并且具有指向性特点，同时湍流声源具有偶极子特征；(2) 发展了时空能谱的动态自回归模型。该模型不仅包含了 Taylor 模型的对流机制，并且引入二阶自回归力表征 Kraichnan 的随机下扫机制，从而预测了湍流的时空能谱。动态自回归模型可以与壁模型结合重构壁湍流的近壁流动，使得到的流场具有给定的时空能谱，并且可以用来识别湍流噪声的声源结构。最后，我们将讨论高速航行器湍流噪声全尺寸数值模拟的最新进度和存在的问题。

参考文献

1. Guowei He, Guodong Jin and Yue Yang, Space-time correlations and dynamic coupling in turbulent flows, Annu. Rev. Fluid Mech., 2017: 49, 51–70.
2. Ting Wu and Guowei He, Local modulated wave model for the reconstruction of space-time energy spectra in turbulent flows, J. Fluid Mech., 2020: 886, A11.
3. Shizhao Wang, Beiji Shi, Yuhang Li, et al. A large eddy simulation of flows around an underwater vehicle model using an immersed boundary method, Theor. & Appl. Mech. Lett., 6 (6):302-305.

一种用于流动模拟及建模的机器学习方法

张伟

(中国船舶与海洋工程设计研究院, 喷水推进技术重点实验室, 上海, 201100, Email:
waynezw0618@163.com)

摘要: 介绍了一种用于流场识别与仿真的机器学习方法—Navier-Stokes Equation Informed Neural Network (NSEINN)。该方法是一种基于物理信息神经元网络 (Physics Informed Neural Network) 的机器学习方法。区别于直接利用流场数据, 通过训练形成神经元网络模型, NSEINN 将对流动认知的知识形式—物理问题的数学模型 Navier-Stokes 方程与深度神经元网络相结合, 形成以 Navier-Stokes 方程为约束的深度神经元网络。分别介绍了基于 NSEINN 的流场仿真、识别与反演初步研究, 可以为进一步开展流动智能测试提供新的技术手段。

关键词: 深度神经元网络; 物理驱动; 机器学习

1 引言

机器学习技术早在几十年前就被引入流体力学的研究。近年来, 随着计算能力的激增, 大规模计算的普及, 开源软件技术以及新实验技术的涌现, 机器学习为复杂流动的建模提供了新的可能。

机器学习主要通过信息处理的算法用于流动建模, 流动控制及优化。并分为三类, 分别是监督学习、半监督学习以及无监督学习。比如深度强化学习用于流动控制研究鱼群流动的水动力学问题, 流动减阻问题; 聚类是区别于分类的无监督方法, 可在无法预先知道正确答案的情况下可以发现数据中的隐藏结构, 找到自然分组。而本质上 DMD 也是一种无监督的机器学习技术。Brunton 在《流体力学年鉴》对机器学习有过详细的综述。

其中在流动建模方面机器学习得到了大量的应用^[1]。比如 Tracey 等^[2]利用核回归的方式为雷诺应力各向异性张量的特征值建立了模型。作者又尝试训练了一个单层神经元网络, 为 RANS 方法中的 Spalart-Allmaras 模型重建了源项^[3]。Zhang 等^[4]用神经元网络为湍流模型中湍动能生成项建立一个修正因子, 以影响雷诺应力的计算。Ling 等^[5]在《流体力学》杂志发表文章报道了他们使用简单湍流流动的 DNS 结果训练了一个 10 层的神经元网络, 并在此基础上建立了雷诺应力的数学模型, 数值实验表明使用该模型可以改进对波纹板表面湍流流动的预测。Wetheritt^[6]使用基因表达式编码算法也建立了一个雷诺应力的数学模型,

新模型可以更准确地预测湍流分离流现象。作者也曾尝试使用该方法为计入系统旋转对湍流流动的影响建立湍流模型。

尽管机器学习技术在流体力学的应用中获取了许多的成果。但是机器学习并不能完全作为黑箱使用，Brunton 在其文中指出如何在流体力学领域应用机器学习技术仍是开放和挑战性。基于物理认知的神经元网络 (physics-informedneuralnetwork) 就是通过将机器学习的神经元网络算法与物理知识相结的一种机器学习方法，并逐渐成为利用机器学习开展流体力学研究的新方法，比如 Xiao 就基于对湍流的物理认知用于 RANS 建模，而 Brown 的 Raissi 博士则发展出一套基于物理认知神经元网络的框架，可以通过数据准确地建立 Burges 方程、kdv 方程以及薛定谔方程。对流动问题的应用研究表明，该方法可以准确地从流场数据中建立 N-S 方程，以及流动中被动标量的输运方程。而另一方面 PINN 还可以利用试验数据开展流动建模与流场识别等相关研究。然而至今未见基于流场数据的流场识别与流场仿真工作，为此我们开展了基于 Naiver-Stokes 方程的 NSEINN 研究探索，为利用 PINN 方法进行流动模拟，乃至进一步智能测试进行了初步尝试。

2 模型

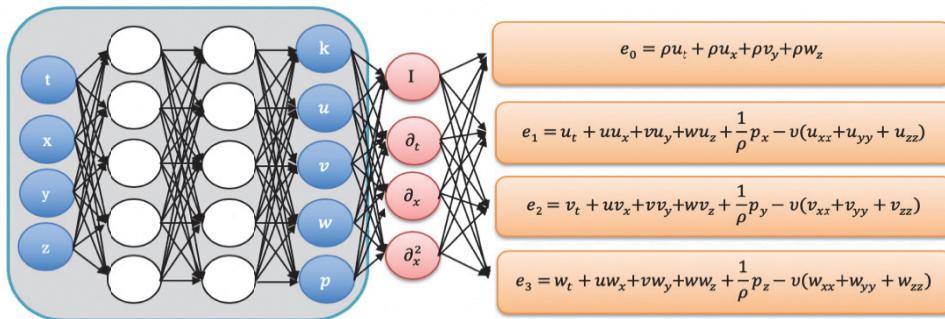


图 1 NSEINN

NSEINN 结构如图 1 所示，该神经元网络系统由常规的神经元网络与 Naiver-Stokes 方程两个部分组成，其中常规的神经元网络是以 Naiver-Stokes 方程的自变量时间 t 与空间 x, y, z 为输入，流场信息含速度 u, v, w 以及压力 p 为输出的多层深度神经元网络系统。输出的流场信息通过 tensorflow 中的自动微分方法连接 NSE 网络，构成 NSEINN。

NSEINN 的损失函数分别有神经元网络部分的损失函数和 Naiver-Stokes 方程的损失函数组成，由于本文所涉及的是二维的仿真和流场识别，因此损失函数定义如下：

$$\text{Loss} = \text{Loss}_{NN} + \text{Loss}_{NS}$$

$$\text{Loss}_{NN} = \sum |u - u_0|^2 + |v - v_0|^2$$

$$\text{Loss}_{NS} = \sum_{i=0}^n |e_i|^2$$

当利用 NSEINN 进行流场仿真时, u_0 , v_0 , p_0 分别是边界上的值, 当利用 NSEINN 进行流场识别时, 则是已知的流场信息。此外, 由于 NSEINN 的设计多个损失函数的优化, 因此收敛性较难, 为此, 本研究中采用了文献中使用一种改进了的全联接的网络结构, 以提高网络的收敛性。

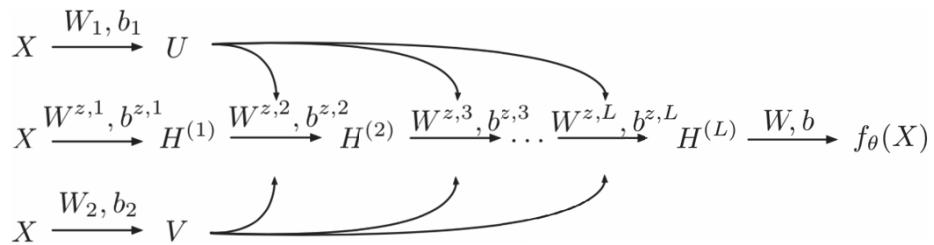


图 2 一种改进的全联接结构用于 NSEINN 的训练

本文中当时空流场信息缺失时, 利用 NSEINN 获取流场, 称之为基于 NSEINN 的流场仿真; 当部分流场信息缺失, 通过剩余流场信息重构所需区域信息, 则称之为反演; 当知道某些流场信息, 如速度, 而压力未知时通过 NESINN 得到未知信息, 则称之为重构。

3 结果与讨论

3.1 顶盖方腔驱动的流的仿真

顶盖方腔驱动流是一种典型的有涡结构的流动, 常被用于 CFD 程序的效验。本研究首先以 $Re=100$ 的顶盖方腔驱动流为例, 使用 NSEINN 对该流动进行了仿真研究。在该研究中以速度值边界条件作为 Loss_{NN} 的约束, 未计入压力的影响, 并在计算区域内采用拉丁超立方进行随机采样, 获取满足 Loss_{NS} 的样本点, 如图 3 所示。通过训练 NSEINN, 我们可以得到空间流场, 包括速度压力, 其结果与常规 CFD 计算的结果非常吻合。

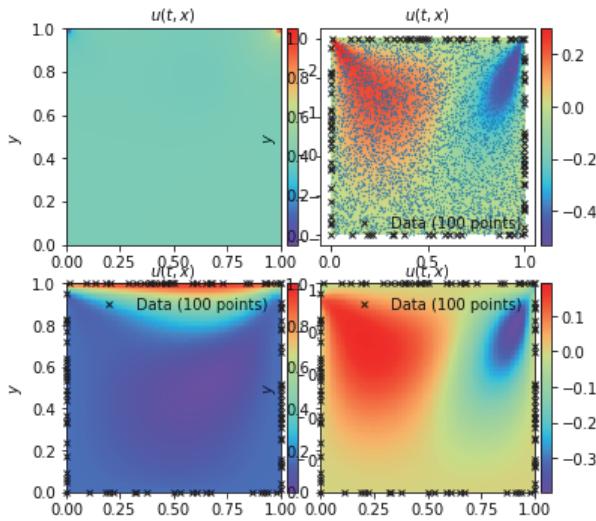


图 3 基于 NSEINN 的顶盖方腔驱动流仿真

此外，图 4 给出了使用改进的全联接结构的网络结构训练时候的损失函数收敛曲线，可以看到使用这种网络方式，我们可以得让速度以及 Navier-stokes 方程同步收敛。其中压力在该问题中是 0 梯度边界条件，且没有施加参考值，因此损失函数较大，但如图 3 所示压力场形态与实际相符，差异在于参考值，这使得偏差较大。

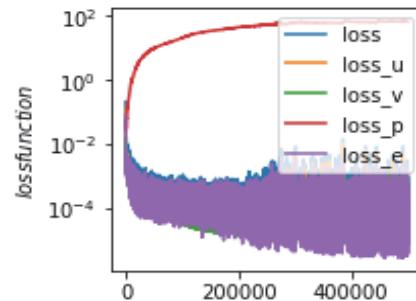


图 4 基于 NSEINN 的顶盖方腔驱动流训练的损失函数迭代曲线

3.2 多孔介质区域的反演

此外，本研究中还以多孔介质问题为例，使用 NSINN 尝试寻找多孔介质的区域及其空隙率常数，在该问题中，首先使用 CFD 软件对一个多孔介质问题进行了数值模拟，在数值模拟中，我们选取了 $[-0.5, -0.5] - [0.5, 0.5]$ 一个正方形区域为多孔介质区域，在该区域中，使用达西模型，利用开源 CFD 软件 OpenFOAM 获取了 2 维的瞬态流场。在利用 NSINN 进行流场反演时，以不包含 $[-1, -1] - [1, 1]$ 的其他流场区域为采样空间，使用拉丁超立方方式获取了流场中的速度值用于训练 NSINN。计算结果显示，NSEINN 不仅可以反演瞬态速度和压力场，还可以获取多孔介质的区域，并且孔隙率数据与原始数据量级吻合。

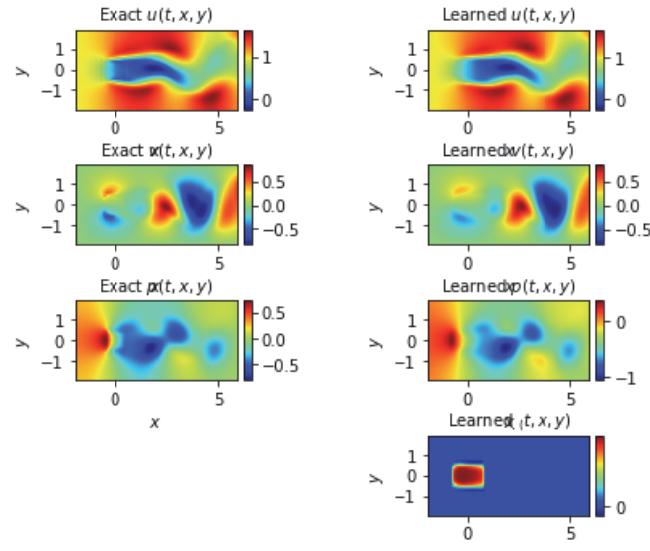


图 5 基于 NSEINN 的多孔介质区域识别

3.3 湍流后台街流动的重构

通过多孔介质区域识别的研究发现，采用 NSEINN 还可以用于流场缺失信息的识别，如多孔介质问题中的多孔介质区域和空隙率，而实验系统中常获取的是某种意义平均的湍流流场，如系宗平均的流场，甚至有时我们无法获取流场全部信息，只有部分流场可以获取，为此，我们以湍流后台街流动为例，使用 CFD 获取了雷诺平均意义的速度场，并选取了流场中的局部区域，以该区域或该区域以外的区域为采样区域，分别训练了 NSEINN，结果如图 6，结果显示，使用 NSEINN 可以较好的获取流场。

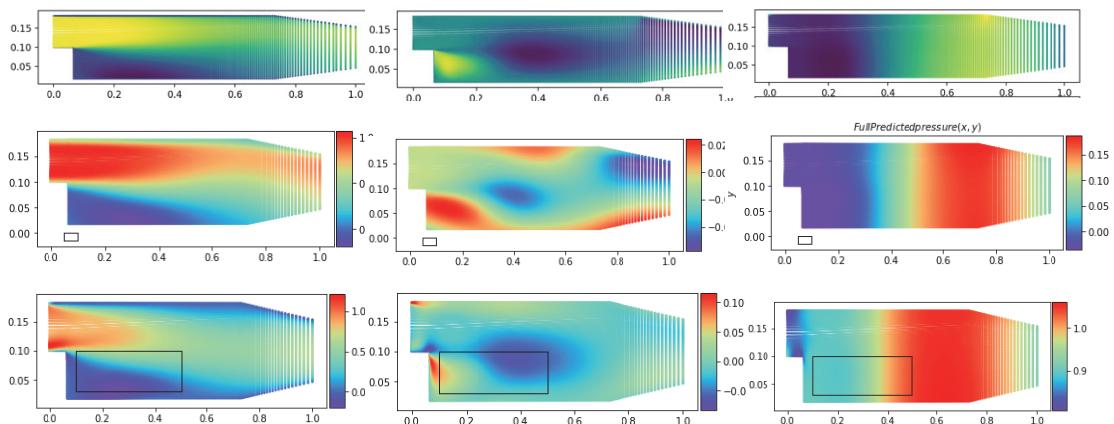


图 6 湍流后台街流动的识别

第一行为 CFD 得到的雷诺平均流场，其中速度用于训练网络，第二行是采用矩形区域外流场进行训练时得到的速度、压力场，第三行是使用矩形区域内流场进行训练的结果

可以看到尽管比之 CFD, NSEINN 没有使用湍流模型, 但仍然可以利用部分的流场信息开展的流场的重构, 并且通过速度场直接重构出压力场, 且结果与原始数据较为接近。而实验中我们常常仅能获取局部的流场信息, 如 PIV 大多是获取局部的系宗或时间平均的速度场, 那么 NSEINN 就为利用 PIV 所获取的这些信息重构流场中其余区域的速度, 乃至压力提供了一种新的技术途径。

参考文献

- 1 Brunton, S., Noack, B. R., Koumoutsakos, et al. Learning for Fluid Mechanics[J]. annual review, 2018,52:477-508.
- 2 Tracey, B., Duraisamy, K , Alonso, J. J. application of supervised learning to quantify uncertainties in turbulence and combustion modeling. AIAA Aerospace sciences meeting 2013-0259
- 3 Tracey, B., Duraisamy, K , Alonso, J. J. machine learning strategy to assist turbulence model development. AIAA aerospace sciences meeting, 2015:1287.
- 4 Zhang, Z. J. , Duraisamy, K. Machine learning methods for data-driven turbulence modeling. AIAA computational fluid dynamics conf. 2015:2460.
- 5 J. Lin, A. Kurzawaski, J. Templton. Reynolds average turbulence modeling using deep neural networks with embedded invariance[J] Journal of fluid mechanics, 2016,807:155-166.
- 6 J. Weatheritt, R. Sandberg. A noval evoluationary algorithm applied to algebraic modifications of the RANS stress-strain relationship[J], Journal of computational physics, 2016.
- 7 Xiao H., Wu J.L., Wang J. X, et al. Lumley J. L., Quantifying and reducing model-form uncertainties in Reynolds averaged Navier-Stokes simulation: A data-driven physics informed Bayesesian approach[J]. Journal of Computational Physics, 2019, 31(1): 58-65.
- 8 Raisse, M., Yazdani, A., Karniadakis G.E. Hidden fluid mechnics: Learning veclocity and pressure fields from flow visulaizations[R]. Science, 2020,10.1126/science.aaw4741
- 9 Raisse, M., Wang Z.,Karniadakis G.E., et al. Deep learning of vortex-induced vibrations[J], J. Fluid Mech., 2019,861:119-137.
- 10 Raisse., M., Perdikaris, P.,Karniadakis G.E. Physics-informed neutral networks: A deep learning framework for solving forwars and inverse problems involving nonlinear partial differential equations[J]. Journal of Computational physics,2019,378: 686-707.
- 11 Raisse., M. Deep hidden physics models: deep learning of nonlinear partial differential equations[J]. J. of Machine learning research, 2018,19:1-24.

A NSEINN for solving and discovering the fluid dynamics

ZHANG Wei

(Marine design and research institute of China, Shanghai, 200011. Email:waynezw0618@163.com)

Abstract : We introduced a Navier-Stokes Equation informed neutral network for solving and discovering the fluid dynamics. The NSEINN is based on the so called physics informed neutral network(PINN)。Different with physics uninformed neutral network, NSEINN uses Navier-Stokes as a constrain for the neutral network. Here in this paper, the NSEINN is adopted for flow simulation, discovering and reconstruction. with these applications we think a NSEINN can be a good option for testing in the real world industry flow measurement work, where pressure or some of the area of flow dynamics are different to measure.

Key words : Deep neutral network , physics informed neutral network , machine learning