DOI: 10.16076/j.cnki.cjhd.2018.06.004

不同质量比多柱式平台涡激运动特性数值研究*

王秋雯, 赵伟文, 万德成

(上海交通大学 船舶海洋与建筑工程学院 海洋工程国家重点实验室 高新船舶与深海开发装备协同创新中心,上海 200240, E-mail: dcwan@sjtu.edu.cn)

摘 要: 浮式海洋平台在一定的海流条件下, 立柱两侧会发生旋涡脱落, 进而产生涡激运动。涡激运动会对立管及 系泊系统造成疲劳损伤, 影响平台的正常工作和使用寿命。因此研究浮式平台的涡激运动具有重要意义。涡激运动是一 种复杂的物理现象, 其中质量比是影响涡激运动特性的重要参数。该文基于自主研发的船舶与海洋工程 CFD 求解器 naoe-FOAM-SJTU, 采用基于剪切应力运输(shear stress transport, SST)的延迟分离涡模拟(delayed detached-eddy simulation, DDES)方法处理高雷诺数下三维流动分离, 数值模拟了不同质量比的多柱浮式平台涡激运动响应情况, 并将 数值模拟得到的运动响应与模型试验结果进行了对比分析, 验证了数值模拟的可靠性。同时分析了平台运动和受力随质 量比的变化规律, 并对典型时刻平台周围的流场进行了详细分析。

关键词:多柱浮式平台;涡激运动;质量比; CFD; naoe-FOAM-SJTU 求解器
中图分类号: O352
文献标志码: A

Numerical study on VIM of multi-column platform with different mass ratios

WANG Qiu-wen, ZHAO Wei-wen, WAN De-cheng

(Collaborative Innovation Center for Advanced Ship and Deep-Sea Exploration, State Key Laboratory of Ocean Engineering, School of Naval Architecture, Ocean and Civil Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China)

Abstract: At certain flow velocities, vortex shedding occurs on the two sides of columns of floating platforms, which leads to the vortex-induced motions (VIM). The research on the VIM is significant, since VIM will cause fatigue damage on risers and

Project supported by foundations: Supported by the National Natural Science Foundation of China (51879159, 51490675, 11432009, 51579145), Chang Jiang Scholars Program(T2014099) and the Program for Professor of Special Appointment (Eastern Scholar) at Shanghai Institutions of Higher Learning (2013022)

Biography: WANG Qiu-wen (1995–), Female, Master Candidate.

Corresponding author: WAN De-cheng, E-mail: dcwan@sjtu.edu.cn

^{*} 收稿日期: 2018-05-10(2018-10-10 修改稿)

基金项目: 国家自然科学基金项目(51879159, 51490675, 11432009, 51579145)、长江学者奖励计划(T2014099)和上海 高校东方学者特聘教授岗位跟踪计划(2013022)

作者简介: 王秋雯(1995-), 女, 广东惠州人, 硕士研究生.

通讯作者: 万德成, E-mail: dcwan@sjtu.edu.cn

Received: May 10, 2018 (Revised October 10, 2018)

mooring systems, negatively influencing the working conditions and service life of the platforms. Mass ratio is one of the important parameters for VIM characteristics. In this paper, the research was studied using the self-developed CFD solver naoe-FOAM-SJTU. Shear stress transport (SST) based delayed detached-eddy simulation (DDES) was utilized to model the three-dimensional flow separations at high Reynolds number. Numerical results were investigated on the VIM characteristics of multi-column floating platforms with different mass ratios. The motion responses were compared with the experimental data to ensure the validation of numerical simulation. The motions and forces in different mass ratios were analyzed. The detailed flow field analyses at typical time were also presented.

Key words: multi-column floating platform; vortex-induced motions; mass ratio; CFD; naoe-FOAM-SJTU solver

引言

随着海洋资源的开发逐渐由浅水转向深水,多 柱式平台凭借抵抗风浪能力强、适应水深范围广及 可变载荷大等优点,被广泛应用于海洋油气勘探开 发。然而吃水的增加会引起多柱式平台另一个问题: 涡激运动。当流体流经柱体时,由于流体黏性的影 响会在柱体两侧发生边界层分离、形成交替泻涡, 进而对柱体产生拖曳力和横向交替激振力,使得平 台发生涡激运动。涡激运动会增加锚链和立管的疲 劳破坏,缩短总体疲劳寿命,因此多柱式平台的涡 激运动也是海洋工程研究中的热点问题。

目前对多柱式平台涡激运动特性研究主要有 模型试验(EFD)和计算流体力学(CFD)数值模拟两 种方法。相较于试验的高成本和试验条件的限制, 数值方法因其高效、低成本及计算条件限制低等优 点逐渐成为研究涡激运动问题的主要手段。

Waals等^[1]采用模型试验方法研究了流体诱导 下深吃水半潜式平台、TLP平台等四种不同形式多 立柱平台的涡激运动特性,讨论了质量比、柱体高 度、浮箱形式、来流速度以及来流角度对涡激运动 的影响。Chen等^[2]利用有限分析法(finite analytic Navier-Stokes, FANS)并结合LES方法求解N-S方程, 进行了不同倒角半径的半潜式平台涡激运动的数 值模拟。赵伟文等^[3]采用基于SST模型的DDES方法, 采用动态重叠网格技术进行了不同折合速度下深 吃水半潜式平台涡激运动的数值模拟。李思明等^[4] 采用基于SST模型的DES方法进行了倒角半径对半 潜式平台绕流特性影响的数值分析。

影响平台涡激运动的因素众多,其中包括平台的质量比。平台质量比*m*^{*}定义为平台结构物的质量*M*与结构物排开流体体积质量Δ的比值,即

$$m^* = \frac{M}{\Delta} \tag{1}$$

涡激运动是流固耦合运动。平台附近的流体分 布和流体产生的激振力与平台运动时历相互影响, 同时附加质量会自适应于平台结构物的运动,且当 附加质量越大,附加质量适应运动的变化就会更加 明显,质量比低的平台附加质量大,因此质量比越 低的平台涡激运动越大。浮式平台中,Spar平台和 半潜式平台的 *m** 接近于1,TLP平台的 *m** 则小于1。 Waals等^[1]的研究表明,相较于半潜式平台,质量比 较低的TLP平台的涡激运动响应更大。

本文以四立柱浮式平台为研究对象,采用基于 剪切应力运输(shear stress transport, SST)的延迟分 离涡模拟(delayed detached-eddy simulation, DDES) 的方法,数值模拟了不同质量比的多柱式浮式平台 的涡激运动特性。首先介绍了数值方法原理,然后 给出计算模型的几何参数以及计算域条件,将计算 结果与试验结果对比,验证数值模拟的可靠性,最 后结合详细流场分析探讨平台运动和受力随质量 比变化的相关结论。

1 数值方法

1.1 naoe-FOAM-SJTU求解器

naoe-FOAM-SJTU是基于OpenFOAM自主开发的专门面向船舶与海洋工程水动力学问题的求解器^[12, 13]。求解器采用分离涡模拟(detached-eddy simulation, DES)方法处理高雷诺数下三维流动分离问题,结合物体六自由度运动理论和动网格技术求解海洋平台运动,适用于浮筒、Spar和半潜式平台等浮式海洋结构物的涡激运动预报。

1.2 SST-DDES模型

RANS方法在时间上对速度进行平均,可处理 近壁面复杂流场,但也忽略了流场的脉动信息,无 法体现流场的湍流特性;而LES方法可通过精细的 网格捕捉到流场的湍流脉动信息,但所需的计算网 格量巨大。DES方法结合了RANS和LES 方法,在 近壁面流场采用RANS方法以减少网格计算量,在 远离壁面处采用LES方法以捕捉大尺度分离流动。 DDES方法则是对DES方法的修正,采用混合长度 尺度代替距壁面距离,以解决求解区域过早由 RANS方法转向LES方法所导致网格精细度不足的 模化应力损耗问题^[5]。

SST 模型由Menter等^[6,7]提出,结合了 $k-\varepsilon$ 和 $k-\omega$ 模型的优点,用 $k-\omega$ 处理近壁面的边界层区 域的流动,而用 $k-\varepsilon$ 处理自由剪切流区域的流动。 因此本论文选用SST模型作为延迟分离涡模拟方法 的RANS部分。SST-DDES模型的关键点是:在k方 程中引用了混合长度 l_{DDES} ,其由当地网格尺寸和 RANS计算得到的长度尺度进行比较得出,并决定 动量方程中应力项相应取雷诺应力或亚格子应力 张量,进而实现RANS和LES方法转换。具体控制 方程和推导过程见文献[8-11]。

1.3 离散格式

控制方程采用有限体积法进行离散:时间项采 用二阶隐式离散格式,对流项采用LUST离散格式, 扩散项采用高斯线性守恒离散格式。求解器采用 PIMPLE算法求解耦合的压力与速度。PIMPLE算法 是PISO算法和SIMPLE算法的结合,PISO算法采用 先预估一步,再修正两步的方法求解N-S方程,因 此求解非稳态问题时需要较小的时间步长; SIMPLE算法则是用于针对稳态计算,PIMPLE算法 在PISO方法的基础上对一个时间步内进行多次循 环修正,取最后一次修正结果作为下一时间步的初 始值进行迭代,因此PIMPLE算法可使用较大时间 步长进行计算。

1.4 动网格

OpenFOAM中有两种处理网格运动的技术:一种是拉伸或变形网格并保持拓扑关系不变;另一种则是改变拓扑关系,网格运动后重新建立网格之间的连接点。相比于改变拓扑关系的技术,第一种技术在移动网格时不会产生额外的离散误差,因此在计算上更容易实现,并能保证数值准确性,但该技术较难解决大变形和复杂的旋转运动等问题。本文研究的涡激运动主要为横荡和纵荡两个自由度,首摇方向的运动较小,且平台立柱结构简单,因此采用第一种技术处理平台运动,网格运动通过求解基于有限元的拉普拉斯方程得到,具体方程可见文献[14]。

2 计算模型

2.1 几何模型

本文研究的多柱式平台取自Waals等^[1]所做的 模型试验。平台的具体参数值如表1所示,其几何 尺寸见图1。

2.2 计算域及网格划分

计算域范围: -10D≤x≤28D, -10D≤y≤

表1 平台几何参数

Table 1. Parameters of the platform				
参数名称	实尺度	模型尺度		
缩尺比 (λ)	1:1	1:70		
吃水 (T)	35 m	0.50 m		
立柱宽度 (L)	14 m	0.20 m		
立柱高度 (H)	24.5 m	0.35 m		
浮筒宽度 (B)	14 m	0.20 m		
浮筒高度 (H _{pontoon})	10.5 m	0.15 m		
排水量 (Δ)	53000 t	0.158 t		



Fig.1 Dimensions of the platform in full scale

10D, $-5H \le z \le 0$,如图2所示,其中D为特征长度,取垂直来流方向的立柱最大宽度,此模型中 $D=\sqrt{2}L=0.283$ m。网格采用OpenFOAM内部的网格生成工具,先利用blockMesh生成背景网格,然 后再利用OpenFOAM内置的SnappHexMesh工具生成贴体网格,并加密局部区域和添加模型边界层, 边界层数量为8,最终生成的网格数量为347万。



计算域边界条件设置为:上游入口处采用速度 入口的均匀来流条件,即速度设置为来流速度,压 力设置为法向零梯度;下游出口采用压力出口边界 条件,即速度设置为法向零梯度,压力设置为0; 忽略自由面效应,顶部边界采用对称边界条件;两 侧和底部边界采用可滑移边界条件;平台表面采用 不可滑移边界条件。

2.3 计算工况

本次计算选取45°来流角度,考虑了同一模型 下三个不同质量比的参数设置,其中质量比为0.83 和0.57的设置与Waals等^[1]模型试验 一致。本次计 算的折合速度范围U,=4-20。折合速度的定义可表 示为:

$$U_r = \frac{U}{f_N D} \tag{2}$$

式中: U为来流速度, f_N为平台固有频率,本研究 取横向运动的固有频率。折合速度是研究涡激运动 的重要参数,研究表明,在折合速度约为6-10范围 内,平台会发生大幅度稳定的周期运动,称为平台 涡激运动的锁定现象。

3 结果分析

3.1 **固有周期**

模型的固有周期由模型在静水中的自由衰减 试验给出:纵向和横向固有周期通过在X和Y方向上 给定模型初始速度,让其在无来流条件下做纵向 (横向)衰减试验得出;首摇固有周期则在Z方向 上给定初始旋转速度计算得出。三种质量比的平台 弹簧系泊系统设置保持一致。表2给出了自由衰减 试验得到的结果,从表中可看出平台质量比越大, 其固有周期也越大。CFD计算得到的固有周期与试 验值比较接近,表明CFD计算所用的系泊系统有效 刚度与试验相同。

Table 2. Natural period of platforms						
m^*	固有周期/s	CFD	EFD	误差/%		
	T_x	15.78	15.78	0		
0.83	T_y	24.99	24.50	1.97		
	T_{yaw}	6.25	5.86	6.20		
	T_x	13.62	14.58	7.05		
0.57	T_y	21.40	22.35	4.44		
	T_{yaw}	5.76	5.14	10.77		
0.70	T_y	23.06	-	-		

表 2 平台固有周期

3.2 运动响应与幅频特性

本文首先选取了低质量比下不同折合速度的 运动响应进行分析,图4(a)、(b)和(c)展示了 m^* =0.57 在U₁=4、7和15的横向运动响应时历曲线的CFD计 算结果,分别代表前锁定、锁定和后锁定区间的平 台运动特征。由图中可看出,在低折合速度下,平



台的振荡幅值较小、周期性明显:锁定区间平台运

0.83

1.38

动幅度大幅增大;而在高折合速度下,平台的运动 幅值减小。图4(b)、图4(d)和图4(e)则对比了三种质 量比平台在锁定区间的横向运动响应,从时历曲线 的振荡幅值包络线观察到,质量比低的平台的振荡 幅值出现调制变化,而质量比高的平台振荡幅值则 保持一致。

由图5的横向运动响应时历曲线经傅里叶变换 得到的频域图中看出,在U_r=6-8时,振荡峰值发生 在平台固有频率附近(图中黑虚线),运动频率分 布集中,且运动幅值不随折合速度的增加而增大, 此即为涡激运动的锁定现象。脱离锁定区域后随着 折合速度增加,平台的运动频率逐渐远离固有频率 向高阶分散,呈现复杂的频率特性。对比图5(a)和 图5(b)可发现质量比低的平台运动频率分布较分散, 在锁定区间质量比低平台的运动主频更偏离固有 频率。分散的幅频特性可能与复杂的尾流场分布有 关,本章第四节将从流场的角度分析其原因。



Fig.5 Frequency series of transverse motion responses

平台横向运动中的振荡周期除了受系泊系统 和立柱泻涡影响外,还受到流体附加质量力的影响。 表3统计了图4各工况对应的横向时历曲线的跨零 周期标准差。可发现相同质量比下,平台的跨零周 期标准差在锁定区间最小,表明平台的运动周期稳 定,平台做规律的横向振荡运动。同时随着质量比 减小,跨零周期的标准差增大,表明质量比低的平 台受流体附加质量的作用更大,平台运动响应的非 线性更强。

different mass ratios at different reduced velocities				
m^{*}	U_r	跨零周期标准差		
0.57	4	6.48		
0.57	7	3.48		
0.57	15	6.70		
0.70	7	3.06		

表 3 不同质量比不同折合速度下跨零周期标准差 Table 3. The standard deviations of crossing periods of different mass ratios at different reduced velocities

图6给出了不同质量比平台在不同折合速度下的标称横向运动响应幅值(A/D)_{Nominal},计算该值时 已略去运动初始不稳定阶段,其定义如下

7





Fig.6 Nominal transverse motion responses of different mass ratios at different reduced velocities



图 7 不同质量比平台不同折合速度下的泻涡频率比 Fig.7 Shedding frequency ratios of different mass ratios at different reduced velocities

由图6可看出,CFD与EFD结果发生锁定的起始 速度存在差异,分析可能为U_=5是涡激运动锁定 现象的临界点,需要细化速度区间和重复试验进行 验证。其余速度的运动响应CFD与EFD结果吻合良 好,且无论是EFD还是CFD结果,在锁定区间内质 量比低的平台运动响应峰值都大于质量比高的平 台。图7展示了平台泻涡频率与固有频率比随折合 速度的变化。当平台发生涡激运动的锁定现象时, 其泻涡频率约等于固有频率值,因而平台与流体运 动发生共振。结合图6可看出,质量比低的平台其 涡激运动发生的速度区间更加集中,平台质量比越 低,泻涡频率曲线斜率越大,表明其泻涡频率随速 度变化更快。这可能是由于质量比低的平台受到流 体动力中的附加质量力作用更大,因此随着来流速 度增大,附加质量力的影响也越明显,泻涡频率显 著增加,平台运动脱离锁定区域。

3.3 受力分析

图8给出了平台拖曳力系数 C_D 随U_r 变化的关系,拖曳力系数的定义如式(4)所示

$$C_D = \frac{F_D}{0.5\rho U^2 A_w} \tag{4}$$

式中: ρ 为流体密度, A_w 为平台垂直来流方向的 湿表面面积。CFD的计算结果与试验值较吻合, 同 时可看出 C_D 随 U_r 的变化关系与 $(A/D)_{\text{Nominal}}$ 随 U_r 变化的趋势相似, 说明平台拖曳力大小不仅受 来流速度的影响, 还与平台横向运动响应有关。



图 8 他又刀杀奴与扪言迷度曲线 Fig.8 Drag coefficient vs. reduced velocity

图9得出升力系数 C_L 与 U_r 之间的关系,升力 系数的定义如式(5)所示

$$C_L = \frac{F_L}{0.5\rho U^2 D A_w} \tag{5}$$

发现对于质量比为0.57和0.83的两种平台,其 升力峰值和运动峰值对应的折合速度存在滞后效 应。猜测平台来流角度的布置会影响平台运动时前 后立柱之间的尾涡发展,从而导致不同折合速度立 柱尾涡产生的总体升力发生变化,故需要进一步研 究流场对平台作用的发展历程。质量比越低的平台, 升力系数的均方根值越小,而从图10展现的三种质 量比升力系数中看出,升力系数的峰值大致相同,



Fig.10 Time series of lift coefficients in lock-in range

因此均方根值越小则表明平台升力的非线性越强。

3.4 流场分析

图11给出了 $m^* = 0.57 \pm U_r = 4$ 、15时,Z/H = -0.5平面内的立柱尾涡流场图。截取的尾涡图均对应平 台处在同侧最大横向运动响应的位置。图12和图13 则考察了 $m^* = 0.57 \pm m^* = 0.83 \pm U_r = 7$ 下一个周期 内的立柱尾涡流场图。其中图12还对比了低质量比 平台前后两个周期的流场变化,这两个周期分别取 自横向运动响应幅值相差较大的两处。涡量大小采 用式(6)进行了无量纲化处理。



 (b) *m**=0.57, *U*,=15
图 11 *m**=0.57 在 *Z/H*= -0.5 平台立柱尾涡流场图
Fig.11 Z vorticity contours of *m**=0.57 on the *Z/H*= -0.5 plane

由图11(a)、图11(b)与图12可看出,锁定区间前 的平台立柱泻涡较小,且泻涡点离立柱后方较远, 上下涡之间的横向拉引力作用较弱,因而横向运动 响应幅值较小。锁定区间后的平台立柱后方的泻涡 形状狭长,且上下涡之间无明显的回涡结构,推测 这是由于来流速度过大导致后方尾涡在形成过程 中被破坏。破碎的尾涡结构形成复杂的尾流场, 立 柱两侧无法形成规律的泻涡结构以产生交替的脉 动升力, 这解释了平台在高折合速度下的复杂幅频 特性。而在锁定区间内, 立柱后方的尾涡较大, 且 泻涡点靠近立柱, 立柱两侧的尾涡距离相近, 因此 上下涡之间的拉引力较大, 立柱两侧形成交替的脉 动压力。

图12(a)、图12(c)、图12(e)和图12(g)取自平台 刚稳定后一个周期内的尾流场,可以看出平台起初 由于横向运动幅值较小,两侧立柱上下振荡期间并 未与上游立柱的泻涡发生碰撞,因而上游立柱尾涡 结构较完整,能量相对集中。而到了图12(b)、图12(d)、 图12(f)和图12(h)所示的周期内,平台此时由于两侧 脉动升力和流场附加质量力的作用,平台运动幅值 达到最大值。因而当平台在横向运动偏离最大时, 两侧立柱正好处在平台平衡位置,此时上游立柱的 尾涡正好作用在两侧立柱表面,造成立柱后方破碎 的尾流场。破碎的尾涡结果会使得流场能量损耗分 散, 立柱两侧的脉动升力也会减小, 从而使得平台 的横向运动幅值降低。同时尾流场的湍流特性使平 台运动的幅频特性更加不规律。而从图13可看出, 质量比高的平台的尾涡横向范围较小,上游立柱产 生的泻涡并未作用在两侧立柱表面;且由于质量比 高平台的横向固有周期较大,使得相同折合速度下 平台的来流速度较小,因此流场对平台的作用较弱, 从而平台的涡激运动状态较稳定,横向运动幅值较 为一致。

4 结论

本文以四立柱浮式平台为研究对象,采用SST-DDES方法,数值模拟了不同质量比的多柱式浮式 平台的涡激运动特性,并得到如下主要结论:

(1)折合速度较低的工况下平台运动响应呈现规律的周期性,超出锁定区间后随着折合速度增大,平台运动的非线性增强,平台尾流场的湍流特性增强。

(2) 在相同折合速度下,质量比越低的平台 标称横向运动响应的峰值越大,运动的非线性更强; 且涡激运动发生的速度区间更加集中,在锁定区间 低质量比平台的泻涡频率更快。因此低质量比会对 平台锚链和立管的疲劳损耗带来负面影响,在平台 设计上可以考虑适当提高平台质量比。

(3)质量比低的平台在上游立柱后方产生的 泻涡横向影响范围更大,上游尾涡对下游立柱的作 用使得平台运动呈现复杂的幅频特性。

致谢

本研究工作还得到上海市优秀学术带头人计

 $\omega_z D \cdot U^{-1}$

 $\omega_z D \cdot U^{-1}$

-2.0 0 2.5

-2.0 0

50

(a) t=1/4 T

5.0

0.4 0.2

0 -0.2 -0.4 -0.6 432 436 440 444 448 T/s

时间: 432s

 $_{!} \cdot D^{\cdot _{!}}$

 $A \cdot D^{-1}$

 $\neg A \cdot D$

0.4] $- C_{\iota}$

0.2 **★***A*·*D*

时间:111s

-0.4 112 116 120 124 128 *T* / s

0.4 $-C_{\iota}$ 0.2 -A.D

 $A \cdot D^{-1}$ 0

-0.2

-0.4 112 116 120 124 128 *T* / s

 $A \cdot D^{-1}$

0

-0.2



 $\omega_z D \cdot U^{-1}$

2.5

-2.0 0

5.0











划(17XD1402300),工信部数值水池创新专项 VIV/VIM项目(2016-23/09)的资助,在此一并表 示衷心感谢。

参考文献:

- [1] WAALS O J, Phadke A C, Bultema S. Flow induced motions of multi column floaters [C]. Proceedings of the 26th International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering, California, USA, 2007.
- [2] CHEN C R, CHEN H C. Simulation of vortex-induced motions of a deep draft semi-submersible in current [J]. Ocean Engineering, 2016(118): 107-116.
- [3] 赵伟文, 万德成. 不同折合速度下深吃水半潜平台涡 激运动的数值模拟[C]. 首届"高新船舶与深海开发装 备"创新论坛论文集, 上海, 中国, 2017.
 ZHAO Wei-wen, WAN De-cheng. Numerical simulation of deep draft semi-submersible at different reduced velocities[C]. Proceedings of the first "High-tech Ship and Deep Sea Development Equipment" Innovation Forum, Shanghai, China, 2017.
- [4] 李思明,刘正浩,万德成.数值分析倒角半径对半潜 式平台绕流特性影响[J].水动力学研究与进展,A辑, 2018,33(3):271-280.

LI Si-ming, LIU Zheng-hao, WAN De-cheng. Numerical simulation on the effect of corner radius on flow past a semi-submersible platform[J]. Chinese Journal of Hydrodynamics, 2018, 33(3): 271-280.

- [5] ZHAO W W, WAN D C. Detached-eddy simulation of flow past tandem cylinders[J]. Applied Mathematics and Mechanics, 2016, 37(12): 1272-1281.
- [6] MENTER F R, KUNTZ M, LANGTRY R. Ten years of industrial experience with the SST turbulence model [J]. Turbulence, Heat and Mass Transfer, 2003, 4(1): 625-632.
- [7] MENTER F R. Two-equation eddy-viscosity turbulence models for engineering applications[J]. AIAA Journal, 1994, 32(8): 1598-1605.
- [8] 赵伟文,万德成.用 SST-DES 和 SST-URANS 方法数 值模拟亚临界雷诺数下三维圆柱绕流问题[J].水动 力学研究与进展,A 辑, 2016, 31(1): 1-8. ZHAO Wei-wen, WAN De-cheng. Numerical study of 3D flow past a circular cylinder at subcritical Reynolds number using SST-DES and SST-URANS[J]. Chinese Journal of Hydrodynamics, 2016, 31(1): 1-8.
- [9] SPALART P, JOU W, STRELETS M, et al. Comments on the feasibility of LES for wings, and on a hybrid RANS/LES approach[J]. Advances in DNS/LES,

1997(1): 4-8.

- [10] SPALART P R, ALLMARAS S R. A one-equation turbulence model for aerodynamic flows[J]. Recherche Aerospatiale, 1994, (1): 5-21.
- [11] SPALART P R, DECK S, SHUR M L, et al. A new version of detached-eddy simulation, resistant to ambiguous grid densities[J]. Theoretical and Computational Fluid Dynamics, 2006, 20(3): 181-195.
- [12] SHEN Z, CAO H, YE H, et al. The manual of CFD solver for ship and ocean engineering flows: naoe-FOAM-SJTU[R]. Shanghai, China: Shanghai Jiao Tong University, 2012.
- [13] SHEN Z, WAN D. RANS computations of added resistance and motions of a ship in head waves[J]. International Journal of Offshore and Polar Engineering, 2013, 23(4): 263-271.
- [14] JASAK H, RUSCHE H. Dynamic mesh handling in OpenFOAM[C]. Proceeding of the 47th Aerospace Sciences Meeting Including the New Horizons Forum and Aerospace Exposition, Orlando, Florida, USA, 2009.