

桁架式 Spar 平台垂荡板结构的水动力特性

沈文君^{1,2}, 唐友刚^{1,2}, 赵晶瑞^{1,2}

(1. 天津大学建筑工程学院, 天津 300072;

2. 天津大学港口与海洋工程教育部重点实验室, 天津 300072)

摘要: 研究了深海桁架式 Spar 平台垂荡板的水动力性能. 首先考虑了不同振幅和板间距对水动力的影响, 其次对不同厚度的板进行了计算分析, 并且考虑了将板四周进行消斜的情况. 通过 Fluent 中的用户自定义函数, 利用动网格技术对垂荡板的受迫振荡运动进行数值模拟, 计算得出垂荡板的附加质量系数和阻尼力系数. 结果表明: 在一定的幅值范围内, 附加质量系数随着运动幅值的增大而增大, 阻尼力系数随着运动幅值的增大而减小; 附加质量系数和阻尼力系数都随着板间距的增大而增大, 并逐渐趋于平稳; 同时发现有效厚度相同时, 经削斜后板的水动力性能得到很大改善.

关键词: 垂荡板; 水动力系数; 自定义函数; 动网格; 削斜

中图分类号: U674.38

文献标志码: A

文章编号: 0493-2137(2011)06-0491-06

Hydrodynamic Characteristics of Heave Plate Structure for Truss Spar

SHEN Wen-jun^{1,2}, TANG You-gang^{1,2}, ZHAO Jing-ru^{1,2}

(1. School of Civil Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China;

2. Key Laboratory of Harbor and Ocean Engineering, Ministry of Education, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

Abstract: The hydrodynamic characteristics of heave plates for Truss Spar were studied. Firstly, influences of different motion amplitudes and plate spacing on hydrodynamic coefficients were considered. Secondly, heave plates with different thicknesses were calculated, and the case of heave plate being tapered was also taken into account. Numerical simulations were made for the plate forced oscillation, employing the dynamic mesh method and user defined functions in Fluent, and there by the added mass coefficient C_m and the damping coefficient C_d of heave plate were calculated. The results show that, in a certain amplitude range, C_m increases with increasing amplitude and C_d decreases with increasing amplitude. The values of C_m and C_d increase with increasing plate spacing, and the trend tends to be steady. Furthermore, with the same effective thickness, the hydrodynamic performance of the heave plate after being tapered is improved greatly.

Keywords: heave plate; hydrodynamic coefficient; user defined funtions; dynamic mesh; taper

经典 Spar 平台具有较长的垂荡自然周期, 在大多数情况下, 这一频率远离了波浪频率范围, 垂荡运动不明显; 但是在恶劣海洋环境下会发生大幅垂荡运动, 而大幅垂荡运动是导致立管疲劳而引起平台破坏的重要原因, 因此减小平台的垂荡运动历来是人们关注的关键技术之一. 桁架式 Spar 平台通常采用垂荡板结构. 垂荡阻尼板通过增加平台垂向阻尼和附加质量, 增大了桁架式 Spar 平台的垂荡固有周期,

减小了垂荡运动的剧烈程度, 提高了平台的运动稳定性. 因此, 研究垂荡板的几何特征和运动特点对水动力的影响是非常重要的, 能够为垂荡板的结构设计和平台运动分析提供一定的依据.

关于垂荡板的研究国内外集中在试验研究. 1998年, Prislín 等^[1]在高雷诺数和符合 Spar 平台典型运动的 K_c 数下, 进行了单个和多个方板的水动力试验. 2000年, Downie 等^[2]进行了垂荡板尺度及板上的开

收稿日期: 2009-11-26; 修回日期: 2010-06-29.

基金项目: 国家高技术研究发展计划(863计划)资助项目(2007AA09Z304); 国家自然科学基金资助项目(50879057).

作者简介: 沈文君(1984—), 女, 博士研究生, bettyshen1984@126.com.

通讯作者: 唐友刚, tangyougang_td@163.com.

口对性能影响的试验研究, 得出了模型在垂直方向上的水动力系数. 2001 年, Holmes^[3]通过计算流体动力学 (computational fluid dynamics, CFD) 方法, 预报了垂荡板的水动力, 利用最小二乘法得到垂荡板在一系列海况下的 Morison 公式水动力系数. 2003 年, 纪亨腾等^[4-5]为了研究垂荡板的水动力, 采用三角形垂荡板分别研究单板和双板两种情况下的强迫振荡试验, 得出附加质量系数和阻尼力系数与雷诺数 Re 和 K_C 的关系. 2006 年, Zhang 等^[6]用试验的方法研究了垂荡板在 Cell Truss Spar 平台上的作用效果. 2007 年, Tao 等^[7]用有限差分法和数值试验研究了板间距对垂荡板水动力系数的影响. 2008 年, Tao 等^[8]用试验的方法研究了实心垂荡板和多孔垂荡板的水动力性能.

目前关于优化垂荡板水动力性能的研究工作还比较少, 尤其是需要进一步展开通过改变垂荡板的形状改善垂荡板水动力性能的研究. 笔者应用 CFD 方法, 通过对 Fluent 软件的二次开发, 研究垂荡板运动振幅以及板间距对水动力的影响, 并且研究了垂荡板不同边缘形式对水动力性能的影响, 这些工作对于完善垂荡板的设计理论和方法具有重要意义.

1 垂荡板运动数值模拟

1.1 数值算法

桁架式 Spar 平台上采用的垂荡板结构如图 1 所示. 本文应用 CFD 方法, 通过求解 RANS 方程获得垂荡板的水动力系数. 采用标准 $k-\epsilon$ 两方程模型求解黏性流动, 控制方程包括连续性方程、动量方程、 k 方程和 ϵ 方程. 采用压力基耦合求解器, 选择一阶迎风格式的差分格式建立离散化方程.

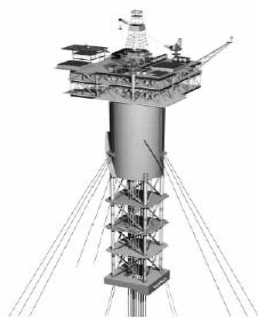


图 1 桁架式 Spar 平台
Fig.1 Truss Spar platform

边界条件设置如下: 计算区域的左侧为压力入口, 压力值设置为零; 右侧为压力出口, 压力值设置为零, 如图 2 所示; 垂荡板表面及计算域的其他几个面看作固壁边界.

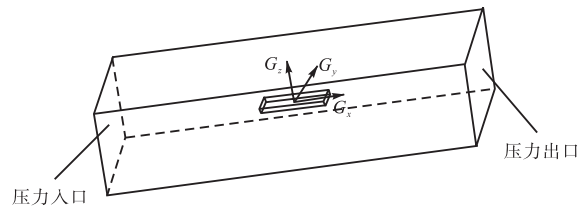


图 2 边界条件
Fig.2 Boundary conditions

通过编译用户自定义函数 (user defined functions, UDF) 来控制垂荡板的运动, 利用动网格技术使垂荡板在静止的流场做简谐垂荡运动, 将编好的 C 语言程序导入到 Fluent 中, 通过编译, 就可以把所定义的函数赋给所要运动的边界.

1.2 水动力系数计算公式推导

垂荡板的位移为

$$z = A \sin(\omega t) \tag{1}$$

则垂荡板的受力为

$$F = F_0 \sin(\omega t + \varphi) \tag{2}$$

经过对式 (2) 进行转换, 得到

$$F_0 \sin(\omega t + \varphi) = -\frac{F_0 \cos \varphi}{A\omega^2} \ddot{z} + \frac{F_0 \sin \varphi}{A\omega} \dot{z} = -\frac{F_0 \cos \varphi}{A\omega^2} \ddot{z} + \frac{F_0 \sin \varphi}{A^2 \omega^2} \dot{z} |\dot{z}| \tag{3}$$

式中: A 为振幅; ω 为垂荡板运动的频率; F_0 为垂向力幅值; z 为垂荡板的位移; \dot{z} 为垂荡板的速度, $\dot{z} = A\omega \cos(\omega t)$; \ddot{z} 为垂荡板的加速度, $\ddot{z} = -A\omega^2 \sin(\omega t)$; φ 为垂荡板的速度曲线与受力曲线的相位差.

如果物体在流体中做升沉运动, 根据莫里森公式, 其所受的垂向力 F_z 可以表示为

$$F_z = \frac{1}{2} \rho C_d L^2 u_z |u_z| + \rho C_m L^3 \dot{u}_z \tag{4}$$

式中: ρ 为流体的密度; u_z 为流体质点速度; \dot{u}_z 为流体质点加速度; L 为板长度; C_d 为阻尼力系数; C_m 为附加质量系数. 式 (4) 中第 1 部分是阻尼力项, 第 2 部分是惯性力项. 对照式 (3) 和式 (4), 可以得出莫里森公式中的阻尼力系数和附加质量系数为

$$\begin{cases} C_d = \frac{F_0 \sin \varphi}{\frac{1}{2} \rho L^2 A^2 \omega^2} \\ C_m = \frac{F_0 \cos \varphi}{\rho L^3 A \omega^2} \end{cases} \tag{5}$$

式 (5) 中的 ρ 、 L 、 A 和 ω 都是已知的, 只需要得出垂荡板所受垂向力的幅值 F_0 和相位差 φ , 即可求得垂荡板的水动力系数 C_d 和 C_m .

1.3 垂荡板模型的建立

在计算中选取的桁架式 Spar 平台的相关数据是

参考文献[2-3],以便对数据结果进行对比.在前处理器 GAMBIT 中建立模型,方板尺寸是 31.5 m × 31.5 m × 1.0 m,为了取得最好的结果,同时为了减小计算时间需要控制网格数量,经过多次尝试,确定的计算流体域是 180 m × 180 m × 40 m 的长方体.由于垂荡板做垂向运动,因此在竖直方向上流体域取的尺寸较大.采用非结构化网格技术,运用 GAMBIT 生成网格,网格的划分如图 3~图 6 所示,采用尺寸函

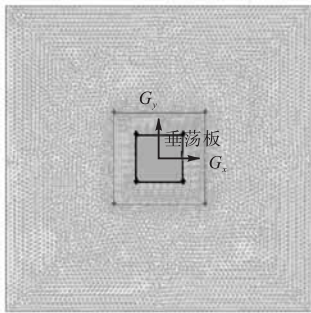


图 3 单个垂荡板网格

Fig.3 Mesh grids for single heave plate

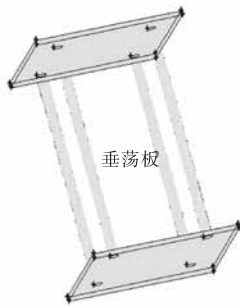


图 4 两个垂荡板表面网格

Fig.4 Mesh grids for two heave plates



图 5 垂荡板附近网格加密

Fig.5 Refined mesh grids around heave plate



图 6 整个流体域网格模型

Fig.6 Mesh grids for the whole fluid domain

数对垂荡板附近网格进行加密.

2 垂荡板水动力系数的数值计算结果

根据 RANS 方程,振荡物体所受的水动力除与物体形状有关外,还取决于运动的 Re 和 K_c 这两个无量纲数,定义

$$Re = \frac{\rho u_0 l}{\eta}, K_c = \frac{u_0 T}{l} = \frac{2\pi A}{l}$$

式中: u_0 为物体的运动速度幅值; l 为物体的特征长度; η 为水的黏度; T 为物体运动的周期; A 为简谐运动的振幅.

本文首先研究了单个实板在不同 K_c 下,水动力系数的变化规律;然后对不同板厚的实板进行了优化计算,并且考虑了将板边缘消斜的情况;最后考虑了板间距对水动力系数的影响,得出了合适的板间距.

2.1 单个垂荡板水动力系数计算

垂荡板的尺寸可参考文献[2],以便于对数据结果进行对比.针对不同的强迫振动振幅,计算得到垂荡板所受 z 向力的时间历程曲线,垂荡板受迫振荡的周期是 10 s.

图 7 为垂荡板的速度和受力的时间历程曲线.从图中可以看出:①垂荡板所受合力的变化周期与速度变化的周期是相同的,不同的是垂荡板的受力曲线与运动曲线有明显的相位差;②对垂荡板的受力图进行分析,发现在周期相同、振幅不同的情况下,力的最大值出现的时刻是大致相同的;③垂荡板的受力曲线在峰值处(即运动方向发生变化的时候)有锯齿状跳跃现象,在第 1 个峰值处,跳跃现象比较明显,随着时间的增加,其幅值跳跃逐渐趋于平缓.

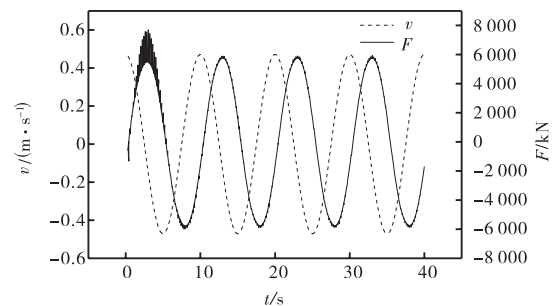


图 7 垂荡板的速度和受力的时间历程曲线

Fig.7 Time history of velocity and force of heave plate

综上所述,可将垂荡板的受力曲线图近似看成有初始相位的正弦曲线.根据正弦曲线在峰值处的值 F_0 (从图 7 可以看出在第 1 个峰值处,跳跃现象特别明显,为了减小计算误差, F_0 为后几个峰值的平均

值)以及时间 t 可计算出相位差 φ , 这样依据式(5)便可计算出 C_m 值和 C_d 值. 选取 $K_C = 0.05 \sim 0.25$ 的不同值, 进行数值模拟计算, 图 8 和图 9 为 C_m 值和 C_d 值随 K_C 数的变化关系.

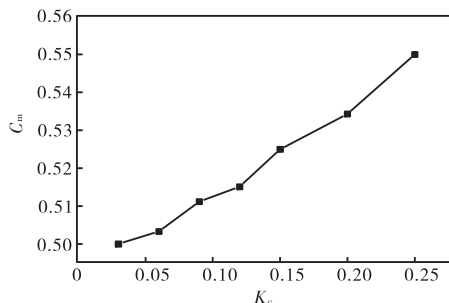


图 8 C_m 值随着 K_C 数的变化规律
Fig.8 C_m as function of K_C number

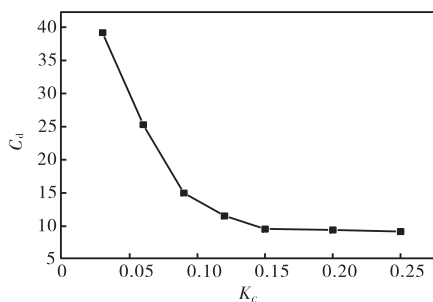


图 9 C_d 值随 K_C 数的变化规律
Fig.9 C_d as function of K_C number

本文的计算结果与文献[2]的试验结果吻合良好; 同时, 本文选取了 0.315 m 的板厚在 $K_C = 0.25$ 时的计算结果与文献[3]在 $K_C = 0.26$ 时的结果和文献[1]的试验结果进行了比较, 如表 1 所示.

表 1 数据对比
Tab.1 Comparison of data

数据来源	C_m	C_d
本文计算结果	0.56	10.4
文献[3]计算结果	0.52	11.0
文献[1]试验结果	0.55	10.0

2.2 边缘形式对于水动力性能的影响

板厚也是影响垂荡板水动力性能的主要因素之一. 本文中计算了不同板厚的垂荡板的水动力性能. 垂荡板尺寸分为 3 种. 结构 A: 31.5 m×31.5 m×1.0 m. 结构 B: 考虑了将方形板的边缘消斜的结构形式, 四周的长宽方向各消斜 0.5 m, 垂直方向上下各消斜 0.25 m, 这样经消斜后的板在边缘处的板厚也为 0.5 m, 如图 10 所示. 结构 C: 31.5 m×31.5 m×0.5 m. 3 种结构侧视图如图 11 所示. 消斜前后的时间历程如图 12 和图 13 所示.

从图 14 和图15 的计算结果可以看出, 结构 B > 结构 C > 结构 A, 即经过消斜之后, 垂荡板的水动力性能明显地提高了很多. 这是由于经消斜后, 垂荡板的上下边缘处出现的漩涡会产生强烈的相互作用, 使得漩涡脱落增强, 从而使阻尼增大; 同时也因为消斜后的垂荡板与水接触的范围增加, 产生了更多的漩涡, 增大了阻尼. 另一方面, 经消斜后的垂荡板与水接触的面积增加了, 带动了更多的水运动, 使得附加质量也增大了. 因此, 在保证垂荡板的强度需求下, 合理地布置板厚及垂荡板上的骨材对垂荡板的水动力性能尤为重要.

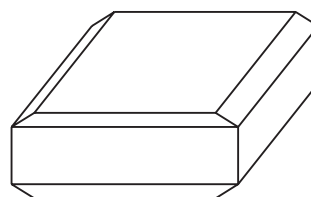


图 10 结构 B 示意
Fig.10 Schematic for structure B

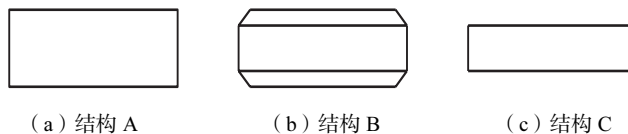


图 11 A、B、C 3 种结构的侧视图
Fig.11 Side view for structures A, B and C

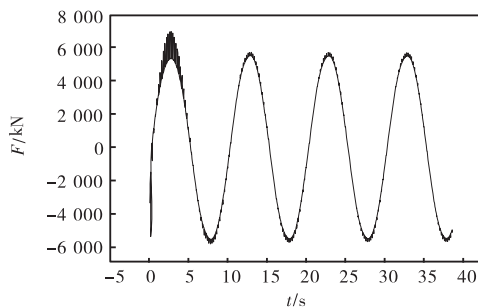


图 12 板厚 0.5 m 时的力时间历程曲线
Fig.12 Force time history with 0.5 m thickness

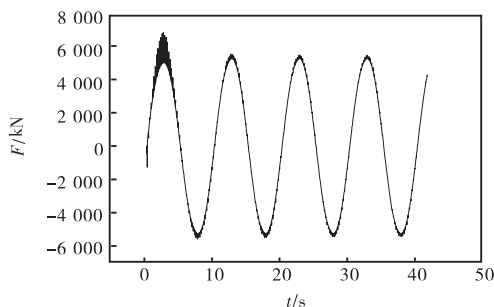


图 13 板经消斜后力的时间历程曲线
Fig.13 Force time history after being tapered

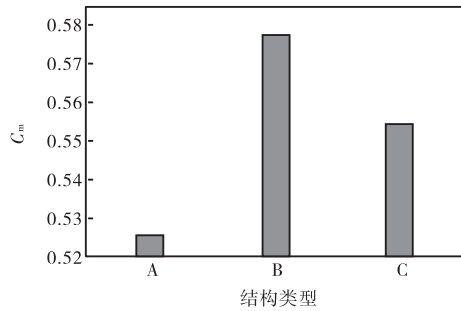


图 14 不同结构的 C_m 值
Fig.14 C_m for structures A, B and C

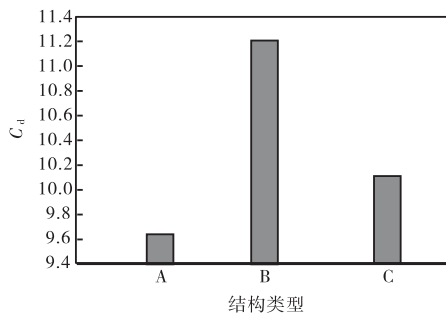


图 15 不同结构的 C_d 值
Fig.15 C_d for structures A, B and C

2.3 双板结构不同间距对水动力数值的影响

针对 2 个垂荡板结构,选取的运动幅值和周期分别为 0.75 m 和 10 s. 由于板间的遮蔽效应,其总体的水动力系数并不直接等于每个板的简单叠加. 从图 16 和图 17 中可以看出,板间距超过 1.5 倍的板宽时,附加质量系数 C_m 随着板间距增大的趋势变得逐渐平稳,此时平均到每个垂荡板上的附加质量系数大约为 0.478,是单板情况时的 90%左右. 可见由于垂荡板之间的遮蔽作用,使垂荡板的使用效率下降. 另一方面,阻力系数 C_d 在板间距超过 1.5 倍板宽时,其数值变化也逐渐平缓,随着板间距的增大,已对水动力系数的影响甚微(图中的计算结果均为两板结果之和). 这与文献[4]的试验结果完全吻合.

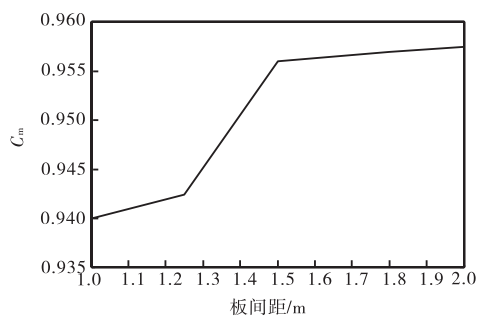


图 16 C_m 随板间距的变化曲线
Fig.16 C_m as function of plate spacing

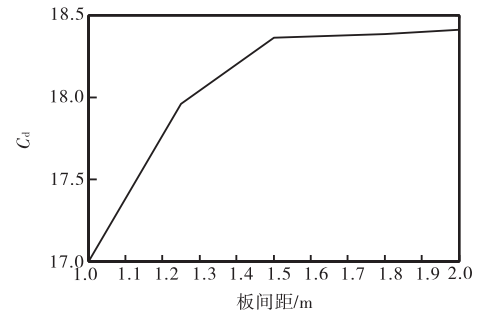


图 17 C_d 随板间距的变化曲线
Fig.17 C_d as function of plate spacing

2.4 双板结构不同振幅对水动力数值的影响

图 18 和图 19 是双板结构在不同振幅下的水动力系数结果. 与单板结构不同的是,附加质量系数 C_m 值不是随着 K_C 值的增加而一直增大的. 在较小范围内, C_m 值随着 K_C 值的增大而减小;而在 K_C 值较大范围内, C_m 值随着 K_C 值的增大而增加. 阻力系数的变化趋势同单板结构相同, K_C 值在某一范围内, C_d 值随着 K_C 值的增加而下降,并逐渐趋于稳定.

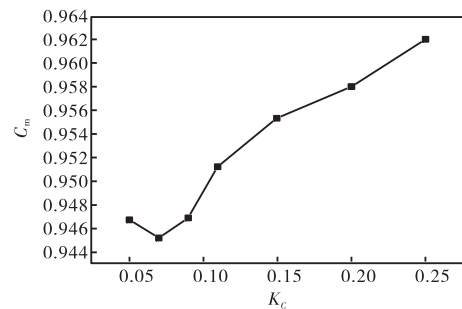


图 18 C_m 值随 K_C 值的变化曲线
Fig.18 C_m as function of K_C number

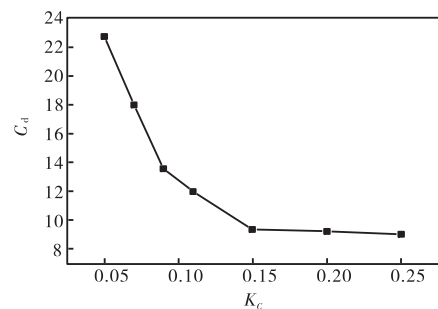


图 19 C_d 值随 K_C 值的变化曲线
Fig.19 C_d as function of K_C number

3 结 论

- (1) 在一定的幅值范围内,附加质量系数随着幅值的增大而增加,阻尼力系数随着幅值的增加而下降,并随着幅值的增加,其下降的幅度逐渐变缓.
- (2) 板厚和垂荡板的边缘形式对水动力性能的

影响很大,计算发现经过消斜后的板的水动力性能最为优越.边缘等效厚度相同时,消斜后板的附加质量系数和阻尼力系数比正方形板提高了 10%.因此在设计垂荡板时,可将板的边缘部分进行消斜,增加平台的附加质量系数和阻尼力系数,从而使平台获得更良好的运动性能.

(3) 当板间距超过 1.5 倍的板宽时,附加质量系数随着板间距增大的趋势变得逐渐平稳,由于垂荡板之间的遮蔽作用,垂荡板的使用效率下降;另一方面,阻尼力系数在板间距超过 1.5 倍板宽时,其数值变化也逐渐平缓.随着板间距的增大,已对水动力系数的影响甚微.

(4) 数值模拟结果与相关文献的计算结果和试验结果吻合良好,可以预测垂荡板的水动力性能,为垂荡板的设计提供依据.

参考文献:

- [1] Prislun I, Blevins R, Halkyard J E. Viscous damping and added mass of solid square plates[C]// 17th International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering. Lisbon, Portugal, 1998.
- [2] Downie M J, Graham J M R, Hall C, et al. An experimental investigation of motion control devices for truss spars[J]. *Marine Structures*, 2000, 13: 75-90.
- [3] Holmes Samuel. Heave plate design with computational fluid dynamics[J]. *Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering*, 2001, 123: 1-21.
- [4] 纪亨腾, 黄国梁, 范菊. 垂荡阻尼板的强迫振荡试验[J]. 上海交通大学学报, 2003, 37(7): 977-980.
Ji Hengteng, Huang Guoliang, Fan Ju. The forced oscillation tests on heave damping plates[J]. *Journal of Shanghai Jiaotong University*, 2003, 37(7): 977-980 (in Chinese).
- [5] 纪亨腾, 范菊, 黄祥鹿. 垂荡板水动力的数值模拟[J]. 上海交通大学学报, 2003, 37(8): 1266-1270.
Ji Hengteng, Fan Ju, Huang Xianglu. Numerical simulation of hydrodynamic forces of heave plate[J]. *Journal of Shanghai Jiaotong University*, 2003, 37(8): 1266-1270 (in Chinese).
- [6] Zhang Fan, Yang Jianmin. Effects of heave plate on the hydrodynamic behaviors of cell spar platform[C]// 25th International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering. Hamburg, Germany, OMAE, 2006: 92199.
- [7] Tao L, Molin B, Scolan Y M, et al. Spacing effects on hydrodynamics of heave plates on offshore structures[J]. *Journal of Fluids and Structures*, 2007, 23(8): 1119-1136.
- [8] Tao Longbin, Dray Daniel. Hydrodynamic performance of solid and porous heave plates[J]. *Ocean Engineering*, 2008, 35: 1006-1014.