

减摇水舱晃荡运动数值模拟研究

高冬冬, 李铁骊*, 胡俊明, 郭 灯

(大连理工大学 船舶工程学院, 辽宁 大连 116024)

摘要: 减摇水舱是一种全航速下都能起到减摇效果的减摇装置, 研究减摇水舱在晃荡运动过程中减摇力矩的变化规律, 是一件很有意义的工作. 首先, 考虑到减摇水舱在晃荡运动的过程中水舱角的变化对阻尼系数的影响, 将阻尼系数看作一个时变的函数; 然后求解船舶-水舱系统横摇方程, 计算不同频率简谐运动形式下, 减摇水舱对于船舶提供的减摇力矩; 最后应用CFD方法, 对水舱在上述运动形式下的晃荡过程进行3D数值模拟, 求得的减摇力矩与理论计算值比较吻合. 该研究工作为减摇水舱减摇力矩的计算提供了一个新方法, 同时也为下一步的研究奠定了理论基础.

关键词: 减摇水舱; 阻尼; 减摇力矩; CFD模拟

中图分类号: U663.85

文献标识码: A

doi: 10.7511/dllgxb201405009

0 引言

减摇水舱是一种在任何航速下都能起到减小船舶摇荡的减摇装置. 同时, 减摇水舱能够抵抗船舶横倾, 进行破冰作业及倾斜试验. 而被动式减摇水舱由于其结构简单、造价低廉、便于维护保养, 成为近年来研究的热点. 随着人们对船舶舒适性和耐波性要求的不断提高, 船舶减摇装置已被船东作为船舶的基本设备.

目前被动式减摇水舱理论计算主要是船舶-水舱系统运动方程中的系数计算和方程的求解. 在国内, 孙伟等^[1]考虑到水舱晃荡过程中的非线性因素, 即将船舶和水舱方程的一阶阻尼项加入平方项, 将其零阶恢复力项进行五阶展开, 然后用Matlab进行仿真, 解决了非线性模型难以解算的问题. 郑勇斌等^[2]给出了船舶横摇阻尼和阻尼模拟的理论基础, 提出了一种新的阻尼模拟方法, 并对阻尼模拟在规则波和不规则波下进行了仿真, 最后应用到减摇水舱台架系统中, 在此基础上做横摇、横荡试验, 为实船装备减摇水舱提供试验数据. 为了确定水舱的阻尼系数及检验减摇效果, 通常都进行台架试验, 通过试验得到的结果来进行

水舱的设计工作. 水舱的台架试验, 是将模型水舱安装在统一水平固定轴作强迫谐摇的支架上, 通过力传感器反馈力的函数, 来确定船舶和水舱之间的相位关系. 这种方法的优点在于简单、直观, 但是要合理准确地计算出水舱和水平轴之间的阻尼值. 梁利华等^[3]对这种方法进行了改进, 其将减摇水舱保持在平衡位置, 仅让舱内的液体进行衰减运动, 并通过水舱角的变化来拟合线性阻尼系数, 因为避免了计算台架水平轴的阻尼值, 所以其精度较高, 同时为非线性阻尼系数的确定提供了一定的依据.

本文应用流体力学中计算水头损失的方法, 计算减摇水舱液面高度确定情况下, 减摇水舱的阻尼系数; 在此基础上, 将时变的等效线性阻尼比函数代入船舶-水舱系统运动方程, 进行理论求解, 得到水舱在作简谐运动时, 舱内液体对于船舶的减摇力矩; 最后利用CFD方法对该过程进行3D数值模拟.

1 船舶-水舱系统数学模型

减摇水舱包含两个边舱和矩形截面的连通道, 结构简图如图1所示.

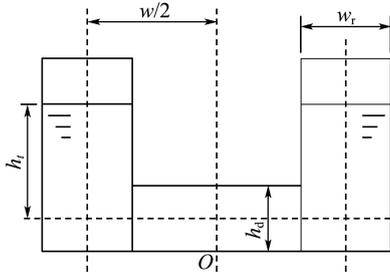


图1 减摇水舱结构简图

Fig.1 Sketch map of the anti-rolling tank

减摇水舱的坐标系定义如下:坐标系的原点为底舱轴线的中点,沿底舱和边舱轴线,向左为正,向右为负; S_p 和 S_s 分别为左右边舱的自由液面坐标; q_2 为左边舱液面高度与平衡时刻液面高度的差值, h_t 为平衡时刻水舱的液面高度, w 为底舱长度.那么通过上述的规定有

$$S_p = h_t + \frac{w}{2} + q_2 \quad (1)$$

$$S_s = -(h_t + \frac{w}{2} - q_2)$$

船舶-水舱系统的广义坐标 \mathbf{q} 为

$$\mathbf{q} = \begin{pmatrix} q_1 \\ q_2 \end{pmatrix} \quad (2)$$

$$q_1 = \phi, q_2 = \frac{1}{2}(S_p - S_s)$$

其中 ϕ 为船舶的横摇角.

本文应用船舶-水舱系统拉格朗日非线性数学模型,形式如下:

$$\mathbf{M}(\mathbf{q}) \ddot{\mathbf{q}} + \mathbf{C}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) \dot{\mathbf{q}} + \mathbf{\Gamma} \mathbf{q} + \mathbf{k}(\mathbf{q}) = \boldsymbol{\tau}(t) \quad (3)$$

其中

$$\mathbf{M}(\mathbf{q}) = \begin{pmatrix} I_\phi + \Delta I_\phi + I_t(q_2) & \rho_t c \\ \rho_t c & \rho_t \bar{V}_t \end{pmatrix}$$

$$\mathbf{C}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) = 2\alpha_5 q_2 \begin{pmatrix} \dot{q}_2 & \dot{q}_1 \\ -\dot{q}_1 & 0 \end{pmatrix}$$

$$\mathbf{\Gamma} = \begin{pmatrix} d_\phi(\dot{q}_1) & 0 \\ 0 & d_\zeta(\dot{q}_2) \end{pmatrix}$$

$$\mathbf{k}(\mathbf{q}) = \begin{pmatrix} \left(\alpha_1 + \frac{\alpha_2}{\cos^2 q_1} - \alpha_4 q_2^2 \right) \sin q_1 + \alpha_3 q_2 \cos q_1 \\ 2\alpha_4 q_2 \cos q_1 + \alpha_3 \sin q_1 \end{pmatrix}$$

式中: $\boldsymbol{\tau}(t)$ 是外激励项的时变函数, I_ϕ 为船舶的转动惯量, ΔI_ϕ 为船舶的附加转动惯量, ρ_t 为水舱内

液体的密度, $d_\phi(\dot{q}_1)$ 为船舶的阻尼系数, $d_\zeta(\dot{q}_2)$ 为水舱的阻尼系数.式中其他各参数表达式为

$$\alpha_1 = g \{ m z_g + \rho_t x_t [h_d r_d w + w_r h_t (2r_d - h_t)] \} - g m_s \frac{12D^2 - B^2}{24D}$$

$$\alpha_2 = \frac{g m_s B^2}{24D}$$

$$\alpha_3 = g \rho_t x_t w_r w$$

$$\alpha_4 = g \rho_t x_t w_r$$

$$\alpha_5 = \rho_t x_t w_r (h_t - r_d)$$

$$I_t(q_2) = 2\rho_t w_r x_t (h_t - r_d) q_2^2 + 2\rho_t w_r h_t \left(\frac{h_t^2}{3} -$$

$$r_d h_t + r_d^2 \right) + \rho_t x_t w \left(\frac{w^2 h_d}{12} + \frac{w w_r h_t}{2} + h_d r_d^2 \right)$$

$$c = w w_r x_t (h_t + r_d)$$

$$\bar{V}_t = w_r x_t \left(2h_t + \frac{w w_r}{h_d} \right)$$

推导过程见文献[4].

2 减摇水舱阻尼系数求解

本文以流体力学中计算水头损失的方法为基础,来理论计算减摇水舱的阻尼系数.将减摇水舱阻尼系数 $d_\zeta(\dot{q}_2)$ 表达为如下形式:

$$d_\zeta(\dot{q}_2) = c_a (c_{rs} c_{ws} + c_{r0} c_{w0}) \quad (4)$$

式中: c_{ws} 、 c_{w0} 为水舱边舱和底舱水头损失阻尼系数; c_{rs} 、 c_{r0} 为水舱边舱和底舱矩形阻尼系数; c_a 为水舱附加阻尼系数.

(1) 水头损失阻尼系数

由流体力学可知,层流和湍流状态下,水头损失计算公式是不同的,因此对于减摇水舱中水头损失的计算,要根据舱内液体平均流速判断液体的流动状态.

减摇水舱边舱和底舱水头损失阻尼系数 c_{ws} 、 c_{w0} 表达式为

$$c_{ws} = c_{fs} + c_{j3s}$$

$$c_{w0} = c_{f0} + c_{j1} + c_{j2} + c_{j30}$$

将推导后得到的边舱和底舱的水头损失计算公式列于表1.

表 1 阻尼系数计算公式

Tab. 1 Calculation formula of damping coefficients

边舱沿程阻尼系数	底舱沿程阻尼系数	边舱突扩阻尼系数	底舱突扩阻尼系数
层流 $Re \leq 2\ 300$ $c_{fs} = 32A_s\rho\frac{\nu h_t}{d_s^2}$	$c_{f0} = 32A_0\rho(A_0/A_s)\frac{\nu w}{d_0^2}$	—	$c_{j1} = \frac{32A_s\rho\nu(A_s/A_0)(1-A_0/A_s)^2}{0.022d_0}$
湍流 $Re > 2\ 300$ $c_{fs} = A_s\rho\lambda_s\frac{\nu h_t}{d_s}\left \frac{\dot{q}_2}{2}\right $	$c_{f0} = A_0\rho\lambda_0(A_0/A_s)^2\frac{\nu w}{d_0}\left \frac{\dot{q}_2}{2}\right $	—	$c_{j1} = \frac{A_s\rho\lambda_0}{0.022}\left(1-\frac{A_0}{A_s}\right)^2\frac{(A_s/A_0)^2}{2}\left \dot{q}_2\right $
边舱弯角阻尼系数	底舱弯角阻尼系数	边舱突缩阻尼系数	底舱突缩阻尼系数
层流 $Re \leq 2\ 300$ $c_{j3s} = \frac{0.65A_s\rho\nu}{0.022 \cdot 2d_s}$	$c_{j30} = \frac{0.65A_0\rho\nu(A_s/A_0)}{0.022 \cdot 2d_0}$	—	$c_{j2} = \frac{16A_0\rho\nu(A_s/A_0)(1-A_0/A_s)}{0.022d_0}$
湍流 $Re > 2\ 300$ $c_{j3s} = A_s\rho\frac{0.65\lambda_s}{0.022}\left \frac{\dot{q}_2}{2}\right $	$c_{j30} = A_0\rho\frac{0.65\lambda_0}{0.022}\frac{(A_s/A_0)^2}{2}\left \frac{\dot{q}_2}{2}\right $	—	$c_{j2} = \frac{0.5A_0\rho\lambda_0}{0.022}\left(1-\frac{A_0}{A_s}\right)\frac{(A_s/A_0)^2}{2}\left \dot{q}_2\right $

(2) 矩形阻尼系数

对于横截面为圆形的管道，摩阻系数表达式为如下形式：

$$\text{层流: } Re \leq 2\ 300, \lambda = \frac{64}{Re}$$

$$\text{湍流: } Re > 2\ 300, \frac{1}{\sqrt{\lambda}} = -2\lg\left(\frac{\Delta}{3.7d} + \frac{2.51}{Re\sqrt{\lambda}}\right)$$

本文中减摇水舱的横截面为矩形，摩阻系数 λ' 的计算表达式如下：

$$\lambda' = C/Re$$

C 的取值见表 2。

表 2 C 值表

Tab. 2 Value of C

a/b	C	a/b	C	a/b	C
1	56.91	7	80.79	13	87.05
2	62.19	8	82.36	14	87.63
3	68.28	9	83.64	15	88.15
4	72.94	10	84.71	20	90.03
5	76.29	11	85.61	25	91.25
6	78.82	12	86.38		

其中 a/b 为矩形截面的长宽比。定义矩形阻尼系数为如下形式：

$$c_r = \frac{\lambda'}{\lambda} = \frac{C}{64}$$

这样，就可以由水舱的几何尺寸，通过查表插值计算得到边舱和底舱的矩形阻尼系数 c_{rs} 、 c_{r0} 。

(3) 附加阻尼系数

在水头损失的计算中，考虑到的情况是管流的充分发展段，而水舱内的液体运动只有底舱的一

小段满足这个条件。因此，要增加一个阻尼项——附加阻尼系数。该系数是雷诺数的函数形式，在一些小角度横摇的情况下，也可以使用经验值。

由式(4)可知，阻尼系数 $d_\zeta(\dot{q}_2)$ 是随舱内液体速度 \dot{q}_2 变化的函数，需要将其编制成子函数，代入主程序中求解。

3 减摇水舱减摇力矩的理论计算

假设船体运动为正弦简谐运动形式，其表达式为^[5]

$$\phi_d = a\sin(\omega t) \tag{5}$$

式中：a 为船体作简谐运动的幅值， ω 为船体运动的频率，则式(3)可以简化为如下形式：

$$\rho_l \bar{V}_l \ddot{q}_2 + d_\zeta(\dot{q}_2) \dot{q}_2 + 2\alpha_1 q_2 \cos \phi_d + \alpha_3 \sin \phi_d + \rho_l c \ddot{\phi}_d = 0 \tag{6}$$

根据欧拉第二定律可得，水舱提供的力矩，即减摇力矩为如下形式：

$$\tau = -I_l(q_2) \ddot{\phi}_d - \rho_l c \ddot{q}_2 - \bar{\alpha}_1 \sin \phi_d - \alpha_3 q_2 \cos \phi_d + \alpha_4 q_2^2 \sin \phi_d - 4\alpha_5 q_2 \dot{\phi}_d \dot{q}_2 \tag{7}$$

其中

$$\bar{\alpha}_1 = g\rho_l x_l (h_d r_d \tau_w + \omega_l h_l (2r_d - h_l))$$

本文减摇水舱几何尺寸参数如表 3 所示。

由表 3 中的参数可得到式(6)、(7)中方程系数，由式(4)得到减摇水舱阻尼系数的时变函数 $d_\zeta(\dot{q}_2)$ ，然后应用数值方法求解非线性方程[式(6)]，最后将 \ddot{q}_2 、 \dot{q}_2 、 q_2 代入式(7)可得减摇水舱作简谐运动时提供的减摇力矩的理论值。按上述方

法得到的简谐运动周期 10、14、7.5 s 的减摇力矩理论值如图 2 所示。

从理论计算结果可以看到,固有周期 10 s 和大于固有周期的低频段 14 s 时的减摇力矩,经过一个周期后就已经比较平稳;小于固有周期的高频段 7.5 s 时的减摇力矩,在 6 个周期后,峰值依然在变化中。

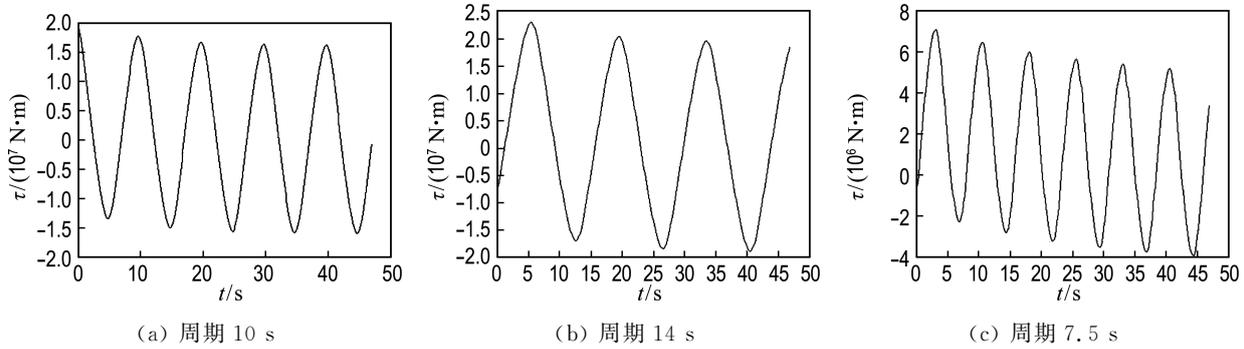


图 2 减摇水舱减摇力矩理论计算值

Fig. 2 Theoretical value of the restoring moment for anti-rolling tank

4 减摇水舱 CFD 模型仿真

本文应用 CFD 商业软件 Fluent 对减摇水舱进行数值仿真计算。

4.1 Gambit 建模

首先在 Gambit 中进行 3D 建模,网格均为六面体形状,尺寸为 0.1 m,在气液交界处对网格进行适当加密,以保证计算精度。

4.2 控制方程和湍流模型

在水舱的数值模型中,对于水舱中的水和空气的相互作用,作为两相(水和空气)流处理,自由面就是水和空气的交界面,自由面使用 VOF 方法处理。这样,该数学模型的控制方程包括连续性方程、体积分数方程、动量方程,以及 Standard $k-\epsilon$ 湍流模型。模型常数 $\sigma_k = 1.0, \sigma_\epsilon = 1.3, C_{1\epsilon} = 1.44, C_{2\epsilon} = 1.92, C_\mu = 0.09$ 。

4.3 水舱的运动形式

为计算简便,将水舱的运动形式进行简化,令水舱绕其底舱中心轴处进行幅值为 5° ,周期分别为 7.5、10 和 14 s 的简谐运动。本文利用 Fluent 里的用户自定义(UDF)功能,借助 Fluent 所提供的预定义宏编制 C 语言程序(简称 UDF 文件),通过解释性编译使该 UDF 文件动态地连接到 Fluent 中进行求解。

4.4 初始条件及求解方案

这里采用有限体积法来对控制方程进行离散

表 3 减摇水舱几何尺寸参数

Tab. 3 Geometry size parameter of the anti-rolling tank

x_r/m	h_r/m	h_d/m	h_r/m
15.2	6.25	0.85	1.075
w_r/m	w/m	w_d/m	r_d/m
2.09	23.51	19.82	6.695

求解。瞬态项、对流项和扩散项均采用二阶迎风格式,压力-速度项采用 PISO (pressure implicit split operator) 算法进行迭代计算。计算初始条件:压强采用静水压强,其他所有待求变量均为零。

4.5 Fluent 求解器设置

在仿真中采用基于压力 (pressure-based) 的求解器,选用隐式求解方式(高斯/赛德尔对称块方法)。

对流形式的内插方案采用一阶迎风 (first-order upwind) 算法。单元体重心处结构变量的梯度应用格林-高斯基于单元体 (Green-Gauss cell-based) 方法。对于压力项的插值,采用 PRESTO 插值方式,该方式对于像水舱这样的有剧烈弯曲区域的流体计算有很好的计算效果。压力-速度耦合采用 PISO 算法进行迭代计算。在 operation condition 选项中设置重力,在 y 轴方向设置重力加速度为 9.8 m/s^2 。

然后设置水域,应用 region adaption 选项,设置水舱的液面高度为 1.5 m。将壁面设置成 wall 形式,读入 UDF 文件设定水舱的运动形式为幅值 5° ,周期分别为 7.5、10、14 s 的简谐运动,在进行初始化和 patch 设置后,开始计算。设定时间步长为 0.01 s,每个时间步长最大迭代次数为 200 次。

4.6 仿真结果

CFD 软件 Fluent 计算后的减摇水舱体积分数云图如图 3 所示。

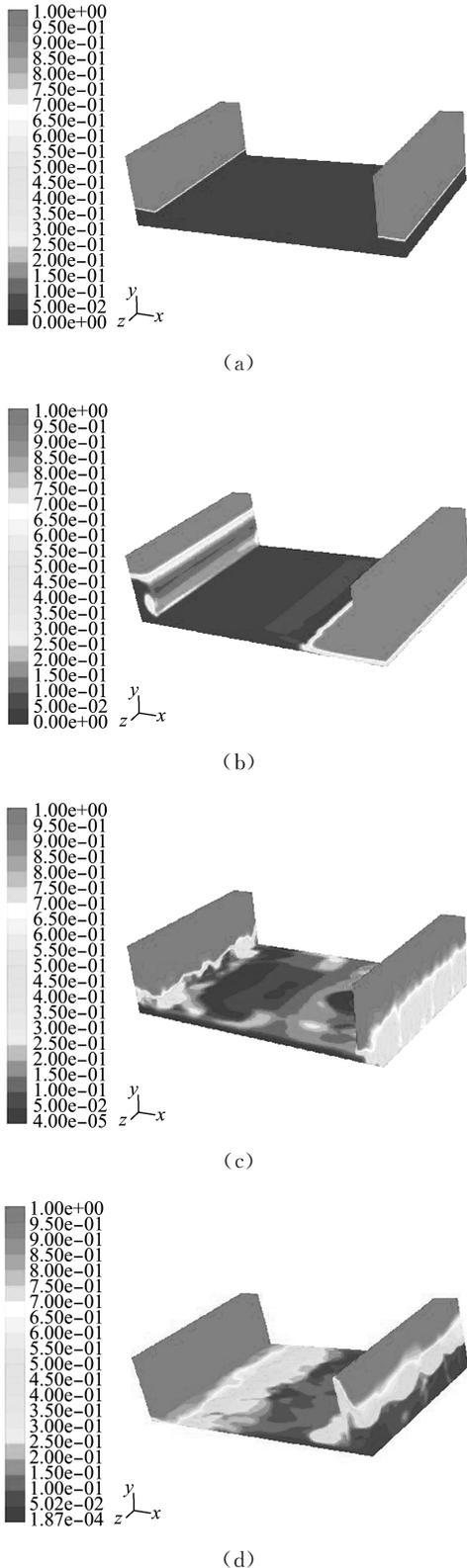


图 3 减摇水舱体积分数云图

Fig. 3 Contours of volume fraction for anti-rolling tank

在求得水舱的体积分数云图后,通过 UDF 编译,将各个壁面网格处的压力对于重心位置产生的力矩进行积分,然后在每个时间步长输出,可以得到水舱减摇力矩.由于在计算的前几个时间步长,在收敛性上有一定偏差,力矩的数值有些偏大,已人为去掉.经过处理后的水舱减摇力矩的仿真结果如图 4 所示.

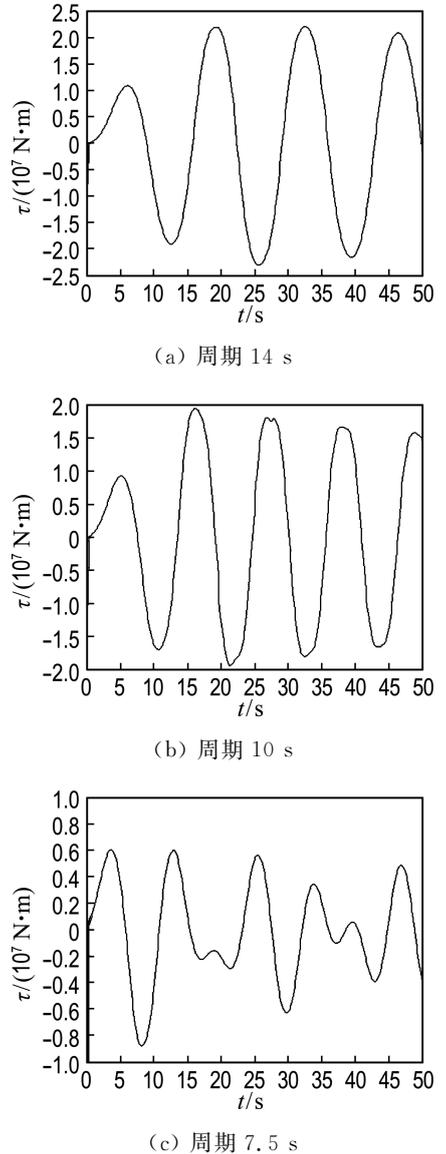


图 4 减摇水舱减摇力矩仿真结果

Fig. 4 Simulation result of the restoring moment for anti-rolling tank

可以看到,同理论值相比较,固有频率 10 s 和低频段 14 s 的峰值平均误差分别为 6.54% 和 7.62%,周期误差均小于 5%,满足工程需要;高频段 7.5 s 误差较大,这是因为晃荡不规则,需要网格细化或寻找更适合的湍流模型.

5 结 论

(1)减摇水舱拉格朗日非线性数学模型是最近新兴起的水舱计算方程,尽管方程比较烦琐,但在计算减摇力矩方面却比较简便,理论依据更加充分和合理。

(2)减摇水舱阻尼系数理论计算方法,精度可以保证,计算上也较为简便,可以大大节省时间和成本。

(3)应用 CFD 商业软件 Fluent 对上述减摇水舱运动形式进行数值仿真,然后和理论计算的结果进行对比,可以发现,在固有频率和低频段,仿真结果和理论结果比较吻合,满足工程计算要求。

减摇水舱阻尼系数中的附加阻尼系数,本文采用的是经验值,如果通过大量试验数据得到该系数的精确表达式,可以将计算精度进一步提高;数值仿真在高频段误差较大,需要进一步改进,这些是下一步工作的重点。

参 考 文 献:

[1] 孙 伟,梁利华. 非线性条件下被动式减摇水舱仿真研究[J]. 船舶工程, 2005, **27**(6):52-55.

SUN Wei, LIANG Li-hua. Simulation study of passive anti-rolling tank under non-linear conditions [J]. *Ship Engineering*, 2005, **27**(6): 52-55. (in Chinese)

[2] 郑勇斌,张 虹,张志虎,等. 减摇水舱台架系统中横摇阻尼的模拟实现[J]. 中国造船, 2003, **44**(1): 80-83.

ZHENG Yong-bin, ZHANG Hong, ZHANG Zhi-hu, *et al.* Simulant realization of rolling damping in anti-rolling tank testing platform system [J]. *Shipbuilding of China*, 2003, **44**(1): 80-83. (in Chinese)

[3] 梁利华,刘志坤,张松涛. 减摇水舱的固有频率和阻尼研究与试验分析[J]. 船舶工程, 2010, **32**(3): 35-38.

LIANG Li-hua, LIU Zhi-kun, ZHANG Song-tao. Study and experiment analysis on the natural frequency and damping of anti-rolling tank [J]. *Ship Engineering*, 2010, **32**(3):35-38. (in Chinese)

[4] Holden C, Perez T, Fossen T I. A Lagrangian approach to nonlinear modeling of anti-roll tanks [J]. *Ocean Engineering*, 2011, **38**(2-3):341-359.

[5] Abdel Gawad A F, Ragab S A, Nayfeh A H, *et al.* Roll stabilization by anti-roll passive tanks [J]. *Ocean Engineering*, 2001, **28**(5):457-469.

Research on numerical simulation of sloshing motions for anti-rolling tank

GAO Dong-dong, LI Tie-li*, HU Jun-ming, GUO Deng

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

Abstract: The anti-rolling tank is the device that can play the anti-rolling effect for full service speed. It has great significance to study the variation rule of the restoring moment in the process of sloshing motion for the anti-rolling tank. First, considering the impact of the change of the tank angle of the anti-rolling tank in the process of sloshing motion, the damping coefficient is seen as a time-varying function. Then, the rolling equation of the ship-tank system is solved and the restoring moment provided by the tank at different frequencies of the harmonic motion is calculated. Finally, the 3D numerical simulation of the sloshing motions of the tank is carried out by the CFD method and the good agreement is obtained with the theoretical value for the calculation of the restoring moment. The research provides a new method to calculate the restoring moment and also lays a theoretical foundation for further study.

Key words: anti-rolling tank; damping; restoring moment; CFD simulation