

三圆柱体附连水质量的数值计算

董 威¹ 吴卫国^{2,3} 徐双喜² 李晓彬²

1 中国舰船研究设计中心,湖北 武汉 430064

2 武汉理工大学交通学院,湖北 武汉 430063

3 高速船舶工程教育部重点实验室,湖北 武汉 430063

摘 要: 研究船舶总振动时,单体船及双体船的附连水质量已经有了计算公式,但是针对多体船(如三体船)的总振动,国内外的研究甚少。随着三体船的需求增加,需在设计时对其总振动进行预报。正确预报三体船的振动,需正确计算参与振动的附连水质量。介绍采用 CFD 软件 Fluent 数值计算三圆柱体附连水质量的简便方法,通过计算得出三圆柱体附连水质量随间距变化的规律,得出三体船垂向振动的单位长度的附连水质量,为三体船的总振动计算提供了依据。

关键词: 三体船; 总振动; 附连水; Fluent; 动网格

中图分类号: U661.4

文献标志码: A

文章编号: 1673-3185(2009)02-34-03

Numerical Calculation for Added Water Mass of Ternate Cylinders

Dong Wei¹ Wu Wei-guo^{2,3} Xu Shuang-xi² Li Xiao-bin²

1 China Ship Development and Design Center, Wuhan 430064, China

2 School of Transportation, Wuhan University of Technology, Wuhan 430063, China

3 Ministerial Level Key Laboratory of High Speed Ship Engineering, Wuhan 430063, China

Abstract: Until now, there have been calculation formulations for added water mass of monohull and catamaran in the research of ship overall vibration. But for the overall vibration of multihull, such as trimaran, there has been little research domestically and overseas. With the increasing need of trimaran, its overall vibration should be calculated in the process of design. And the proper calculation of its overall vibration is in need of its added water mass. A simple method for calculating the added water mass of ternate cylinders by means of the CFD software Fluent is put forward in the paper. From the calculation, the change of their added water mass with their distance is obtained, and the added water mass of unit length of the trimaran vertical vibration is also obtained, which provides foundation for the trimaran overall vibration.

Key words: trimaran; overall vibration; added water mass; Fluent; dynamic mesh

1 引言

目前,研究船舶总振动时,单体船及双体船的附连水质量已经有了计算公式,但是针对多体船(如三体船、五体船)的总振动,国内外的研究甚少,因此需要对其进行研究^[1-5]。而随着计算机技术的迅速发展,数值计算方法已经成为研究复杂

流体运动的主要工具。目前,Fluent 等商用计算软件已经普遍运用到各种与流体力学相关的科学研究及工程项目中^[6]。

本文采用流体动力学软件 Fluent 数值计算三圆柱体附连水质量,令三圆柱体在流场中同时做恒定加速度的非定常运动,通过 Fluent 数值模拟三圆柱体加速运动时的绕流场并得到三圆柱体

收稿日期: 2008-08-29

基金项目: 863 计划“高速三体船的关键技术研究”(2006AA11Z227)

作者简介: 董 威(1983-),男,助理工程师,硕士。

吴卫国(1960-),男,教授,博士生导师。

所受的阻力,进而得到附连水质量的大小。由计算结果可得出三圆柱体附连水质量随间距变化的规律,从而为三体船总振动附连水质量的计算提供依据。

2 数值计算附连水质量的方法

众所周知,实际船舶的运动流场都是粘性流体,在研究船舶运动时,流体的粘性作用不能忽略,但根据定义^[7],船体总振动附连水质量的大小与周围流体的粘性无关,只与船体的形状和周围流体的密度有关。因此,在计算附连水质量时无需考虑粘性,即假设流体是无粘性的理想流体。通过 Fluent 的无粘流非定常运动模型和动网格技术,给定船体变速运动的方程,由船体所受的合力求得船体的附连水质量。

2.1 数值模拟的控制方程

假设物体速度小于 100 m/s,其绕流场可按不可压缩流体计算。Fluent 中无粘流模型^[8]的控制方程如下:

连续性方程可以写成:

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

无粘流动量守恒方程:

$$\frac{\partial}{\partial t}(u_i) + \frac{\partial}{\partial x_j}(u_i u_j) = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} + g_i + \frac{1}{\rho} F_i \quad (i \text{ 方向}) \quad (2)$$

式中, p 为静压; ρg_i 为 i 方向的重力体积力; F_i 为其他外部体积力。

2.2 数值计算时的边界条件

通过计算可以发现,如果三圆柱体初始时刻没有初速度,而突然产生一个加速度,其流场计算的稳定性将大大降低,结果误差较大。为了能增加计算的收敛性,减少数值计算误差,这里先模拟三圆柱体匀速运动时的绕流场。然后运用 Fluent 中的动网格技术,在定常运动计算的结果上模拟三圆柱体以一恒定加速度非定常运动的流场,这样能得到相对稳定的流场和较高的精度。

1) 三圆柱体匀速平移运动时的边界条件

以沿 z 轴方向运动为例,在三圆柱体外一定距离处构筑流场的外边界,外边界与三圆柱体之间的区域为计算域。

入口采用速度边界条件:

$$u_x = 0, u_y = 0, u_z = 1 \text{ m/s}$$

出口采用流量边界条件:

$$Q_{\text{out}} = Q_{\text{in}}$$

2) 三圆柱体加速运动时的边界条件

平动加速时三圆柱体表面加速度边界: $a = 1 \text{ m/s}^2$,由用户自定义函数 UDF 实现。

2.3 附连水质量的计算公式

在三圆柱体匀速平动的定常运动计算的结果上,使用动网格技术中的铺层方法^[8]模拟三圆柱体在匀速运动后突然以一恒定加速度在流场中做加速运动,从而带动周围流体一起加速,产生由于三圆柱体加速而引起的附加惯性阻力。根据物体的受力方程,通过 Fluent 读出此时三圆柱体所受的阻力 F ,便能计算得到三圆柱体的附连水质量,其计算表达式如下:

$$m = \frac{|F_{\text{非}} - F_{\text{定}}|}{a} \quad (3)$$

式中, $F_{\text{非}}$ 为三圆柱体加速运动下的阻力; $F_{\text{定}}$ 为三圆柱体匀速运动下的阻力,它们都可由 Fluent 直接读出。

3 三圆柱体附连水质量计算

3.1 计算模型

根据文献^[9],三体船主体的长宽比 L/B 为 12.5 ~ 18.3,多数为 13.5 ~ 14.5;单个片体的排水量占全船排水量的 3.1% ~ 7.7%。则本计算模型各圆柱壳的尺寸取为:中间大圆柱壳(称为 WALL3)的外径 $D_1 = 0.17 \text{ m}$,高度 $h_1 = 2.38 \text{ m}$;两侧两个小圆柱壳(分别称为 WALL1 和 WALL2)的外径 $D_2 = 0.05 \text{ m}$,高度 $h_2 = 0.79 \text{ m}$ 。间距 S 取 $D_1, 2D_1, \dots, 6D_1$;计算域为圆柱体形,直径 D 随 S 的变化而变化,依次取为 4 m、8 m、11 m、15 m、18 m、24 m,高度 $h = 24 \text{ m}$ 。将大圆柱壳置于计算域中心,故满足无限水深的条件。液体密度取为 $\rho = 1000 \text{ kg/m}^3$,液体流动的速度方向(本模型为 $+Z$ 方向)与圆柱壳的轴向垂直。由于模型及边界条件具有对称性,为了提高计算效率,取一半模型进行建模,网格及 Fluent 中边界设置如图 1 所示。

3.2 匀速绕流场数值计算结果

首先对三圆柱体匀速平动进行计算。速度入口的边界条件为 $u_x = 0, u_y = 0, u_z = 1 \text{ m/s}$ 。此时定义, WALL1 和 WALL2 的匀速平动时的阻力分别为 $F_{\text{定片体1}}$ 和 $F_{\text{定片体2}}$,它们所受的合平动阻力为 $F_{\text{定片体}} = F_{\text{定片体1}} + F_{\text{定片体2}}$; WALL3 的匀速平动的阻力为 $F_{\text{定主体}}$ 。由计算迭代的收敛曲线可知计算迭代的速度比较快,也比较精确。计算结果如表 1 所示。

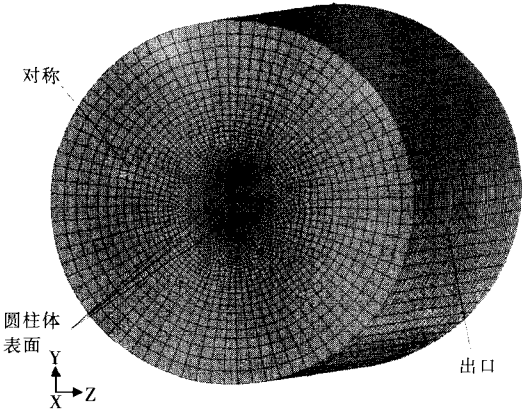


图1 计算模型的计算域网格及边界类型

表1 不同间距时定常计算结果(N)

	$S=D_1$	$S=2D_1$	$S=3D_1$	$S=4D_1$	$S=5D_1$	$S=6D_1$
$F_{\text{非片体}}$	30.827 60	29.455 59	28.849 66	29.743 74	30.097 46	29.691 77
$F_{\text{非主体}}$	102.919 17	100.663 24	105.582 04	99.742 32	105.715 24	99.451 90

3.3 三圆柱体附连水质量计算结果

在得到匀速定常运动结果后,同时给三个圆柱体平动加速度 $a=1\text{ m/s}^2$,取时间步长 Δt 为 0.000 1 s。此时定义,WALL1 和 WALL2 的阻力分别为 $F_{\text{非片体}1}$ 和 $F_{\text{非片体}2}$,它们所受的合阻力为 $F_{\text{非片体}}=F_{\text{非片体}1}+F_{\text{非片体}2}$;WALL3 的阻力为 $F_{\text{非主体}}$ 。通过计算得出不同间距时 $F_{\text{非片体}}$ 和 $F_{\text{非主体}}$,如表 2。

表2 不同间距时非定常计算结果(N)

	$S=D_1$	$S=2D_1$	$S=3D_1$	$S=4D_1$	$S=5D_1$	$S=6D_1$
$F_{\text{非片体}}$	34.300 3	32.056 6	30.975 5	31.666	31.884 3	31.383 6
$F_{\text{非主体}}$	133.356 8	131.014 5	135.621	129.614 6	135.231 7	128.684 2

结合表 1 和表 2,由式(3)求得不同间距 S 时两小圆柱体的附连水质量和 m_{12} 及大圆柱体的附连水质量 m_3 ,如表 3 所示。

表3 不同间距时附连水质量(kg)

	$S=D_1$	$S=2D_1$	$S=3D_1$	$S=4D_1$	$S=5D_1$	$S=6D_1$
m_{12}	3.472 7	2.601 01	2.125 84	1.922 26	1.786 84	1.691 83
m_3	30.437 63	30.351 26	30.038 96	29.872 28	29.516 46	29.232 3

而不考虑间距影响时,由理论计算得,两小圆柱体的附连水质量之和 $m'_{12}=2\rho\pi(D_1/2)^2h_1/2=1.551\ 166\text{ kg}$ 及大圆柱体的附连水质量 $m'_3=\rho\pi(D_2/2)^2h_2/2=27.010\ 63\text{ kg}$ 。则不同间距时的附连水质量的修正系数 $\varphi=m'/m$,如表 4 所示。回归曲线如图 2 及图 3 所示。

4 结论

1) 当 $1\leq S/D_1\leq 6$ 时,随着 S/D_1 值的增大,

表4 不同间距时的修正系数 φ

	$S=D_1$	$S=2D_1$	$S=3D_1$	$S=4D_1$	$S=5D_1$	$S=6D_1$
φ_{12}	2.238 8	1.676 8	1.370 5	1.239 2	1.151 9	1.090 7
φ_3	1.126 9	1.123 7	1.112 1	1.105 9	1.092 8	1.082 3

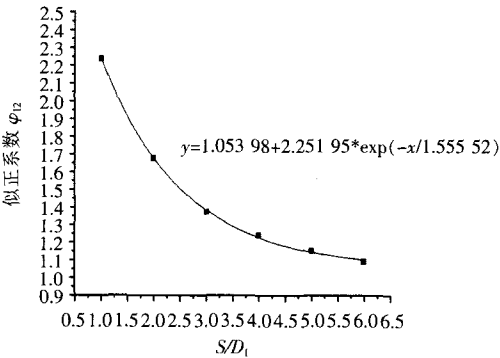


图2 片体的附连水质量修正系数

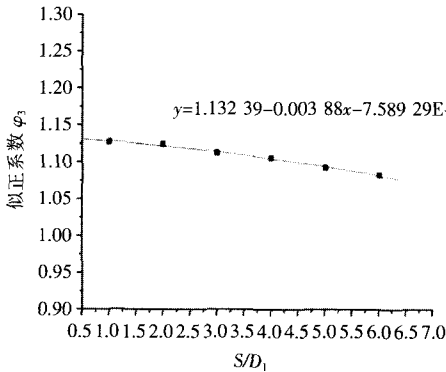


图3 主体的附连水质量修正系数

φ_{12} 与 φ_3 均逐渐减小,但都大于 1,即三圆柱体的附连水质量大于 3 个同尺度的单圆柱体的附连水质量之和,说明间距对附连水质量有影响。由此推论,三体船片体的存在将使附连水质量增加。

2) 由表 4 可知,对于片体,附连水质量的增加最大可达 1.239;而对于主体,最大可达 0.127。为此建议,对三体船垂向振动单位长度的附连水质量的求取公式为: $m_{\omega\text{片体}}=\varphi_{12}m'_{\omega}$ 和 $m_{\omega\text{主体}}=\varphi_3m'_{\omega}$ 。其中 m'_{ω} 见文献[1]中的式(4)式(7)。

3) 本文的公式仅适用于计算三体船垂向微幅振动时的附连水质量,关于水平振动、扭转振动等其他振动时的附连水质量还需进一步研究,并且本文提供的公式还有待于试验验证。

参考文献:

[1] 翁长俭,张保玉. 船体振动学[M]. 北京:人民交通出版社,1985.
[2] 王显正. 船舶总振动特性研究 [D]. 大连:大连理工大学,2005.
[3] 郑豪,郭列. 双体穿浪船船体振动特性分析[J]. 中国造船,2006,47(1):90-93.

