

混合式CRP吊舱推进器水动力性能数值模拟及试验

盛立 熊鹰

(海军工程大学船舶与海洋工程系, 武汉, 430033)

摘要:建立混合式CRP吊舱推进器数值模型并置于数值空泡水洞内,结合RANS方程和SST $k-\omega$ 湍流模型,运用滑移网格方法对混合式CRP吊舱推进器在均匀流场中水动力性能进行了数值模拟,得到了敞水性能预报结果,并分析了混合式CRP推进器的非定常力;同时,利用空泡水洞、吊舱动力仪及长轴动力仪对混合式CRP吊舱推进器敞水性能进行了试验研究,通过3组重复性试验表明了试验方法的稳定性;并将3组试验平均值与将数值模拟所得的敞水性能结果进行了比较,彼此吻合较好。结果表明,本文所用试验方法和数值计算方法对吊舱推进器模型敞水特征的预报具有较高的可信度,能达到工程应用要求的要求;和国外学者在空泡水洞内得到的不附带吊舱相同对转桨敞水试验数据进行比较,分析了吊舱对前后桨敞水性能的影响。结果表明,吊舱对前桨的敞水性能基本没有影响,但对后桨的敞水性能影响显著。

关键词:混合式CRP吊舱推进器;水动力性能;数值模拟;RANS方程;滑移网格;空泡水洞

中图分类号:U661.71

文献标识码:A

文章编号:1005-2615(2012)02-0184-07

Numerical Simulation and Experimental Investigation on Hydrodynamics Performance of Hybrid CRP Podded Propulsion

Sheng Li, Xiong Ying

(Department of Naval Architecture & Ocean Engineering, Naval University of Engineering, Wuhan, 430033, China)

Abstract: Numerical model of hybrid contra-rotating propeller (CRP) podded propulsion is built in numerical cavitation tunnel, and the hydrodynamics performance of hybrid CRP podded propulsion in uniform flow is predicted by RANS formula with SST $k-\omega$ turbulence model based on sliding mesh method. The predicted results of open-water performance and unsteady performance of hybrid CRP podded propulsion are analyzed. Synchronously, a series of experimental investigations for open-water performance of hybrid CRP podded propulsion are carried out. Pod dynamical instrument and long-axis dynamical instrument are used in cavitation tunnel of the same size. The repeated tests' results are compared well with each other, indicating that the tests are stable. The average value of the repeated tests' results agree well with the prediction results of open-water performance. It is shown that the experimental method and the numerical method presented in this paper have good precision in the prediction of hybrid CRP podded propulsion's open-water performance. The average value of the repeated tests' results and predicted results are compared with the foreign experimental value of the same CRP without pod. The influence of pod on the open-water performance of the forward propeller and the after one are analyzed. It is shown that pod has no influence basically on open-water performance of the forward propeller, but has an obvious influence on the after one.

Key words: hybrid CRP podded propulsion; hydrodynamics performance; numerical simulation; RANS formula; sliding mesh; cavitation tunnel

近年来,由于特种推进器在提高船舶推进效率、减少舰船振动以及降低噪声、节省燃油消耗等方面发挥了巨大的优势,已越来越为国内外研究机构和学者所重视,并且创造了不少新的推进形式,并相继进行了一系列的理论和试验研究。吊舱式电力推进系统于1989年由ABB公司首先推出,获得了巨大成功^[1-2]。在此基础上,2000年推出了吊舱式CRP系统(图1)^[3],称为混合式CRP吊舱推进器,又称对转桨推进联合体(CRP propulsion complex, CRPPC)。前桨就是传统推进系统的螺旋桨,而在传统舵叶所在的位置,安装上了一个可360°旋转的吊舱式推进器。两个螺旋桨位于同一轴线上,转向相反。同时后面的吊舱式推进器还起着舵的作用,称其为“主动舵”,而传统的舵则称为“被动舵”。吊舱式CRP系统综合了吊舱式推进器和对转螺旋桨的优点,除了具有很高的螺旋桨推进效率、良好的操作性能和空泡性能、节能等特点外,还具备可靠性高、空间体积小、机械结构相对简单、机动性和灵活性好的优点,解决了单桨推进功率冗余不够、双桨推进造价昂贵的问题^[4-6]。混合式CRP吊舱推进器的模型试验设计以及航速预报较单独吊舱推进更为复杂,国外Noriyuki等人对此进行了较为系统的研究^[7]。

混合式CRP吊舱推进器具有特殊的结构形式,因此敞水、自航试验需要开发专门的试验设备,研究相应的试验方法。在对吊舱推进器水动力性能进行预报时,ITTC推荐的是以数值模拟为基础的方法,也即吊舱推进器模型的试验测量对数值模拟形成明显的借助关系^[8]。对于混合式CRP吊舱推进器水动力性能预报,可以借鉴吊舱推进器的经验。试验方法和数值模拟是研究混合式CRP吊舱推进器水动力性能的重要手段,通过试验和计算所得到的数据是对转桨、舱体以及支架的设计与优化、实船性能预报的基础。

本文建立混合式CRP吊舱推进器数值模型,并置于数值空泡水洞内,结合RANS方程和SST k -

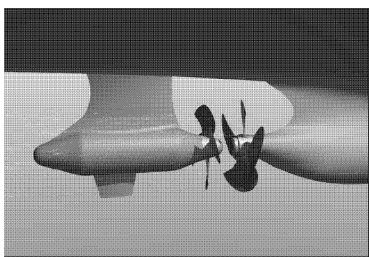


图1 混合式CRP吊舱推进器

ω 湍流模型,运用滑移网格方法对混合式CRP吊舱推进器在均匀流场中水动力性能进行了数值模拟;同时,利用空泡水洞、吊舱动力仪及长轴动力仪对混合式CRP吊舱推进器敞水性能进行了试验研究,对混合式CRP推进器的水动力性能进行了系统的研究。

1 数值模拟

1.1 RANS方程和湍流模型

RANS方程是粘性流体运动学和动力学的普适性控制方程,本文以之求解吊舱推进器水动力性能计算的基本方程。RANS方程是通过将瞬时N-S方程中的速度、压强、质量力、密度等流体变量进行时历平均化后得到,其形式如下

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\rho u_i) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_i u_j) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \\ \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu_0 \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \mu_0 \frac{\partial u_l}{\partial x_l} \delta_{ij} \right] + \\ \frac{\partial}{\partial x_j} (-\rho \overline{u_i u_j}) + \rho f_i \end{aligned} \quad (1)$$

式中: ρ 为流体密度; p 为静压; f_i 为单位质量的质量力; u_i, u_j 为速度分量,雷诺平均N-S方程与瞬时N-S方程在形式上基本一致,只是方程中的变量是时历平均值,另外还出现了代表湍流效应的雷诺应力项 $-\rho \overline{u_i u_j}$,湍流应力项的出现增加了方程的未知数个数,为了使方程封闭,须引入湍流模式。

本文采用SST k - ω 两方程湍流模型。SST k - ω 模型,综合了 k - ω 模型在近壁区计算的优点和 k - ϵ 模型在远场计算的优点,将 k - ω 模型和标准 k - ϵ 都乘以一个混合函数后再相加就得到这个模型。在近壁区,混合函数的值等于1,因此在近壁区等价于 k - ω 模型。在远离壁面的区域混合函数的值则等于0,因此自动转换为标准 k - ϵ 模型。

1.2 旋转区域处理

滑移网格技术的基本原理^[9]是将几何模型网格划分成几个区域,交界面两侧网格相互滑动,而不要求交接面两侧的网格结点相互重合,但要计算交界面两侧的通量,使其相等。为了计算交界面的通量,首先在每一个新的时间步确定出交界面两边交界区的重合面。基本上,通过网格重合面的通量由交界面两边交界区的重合面计算(图2)。交界面区域是由A-B, B-C和D-E, E-F所组成(图3)。这两个区域的相交产生d-b, b-e和e-c,两个网格单元区域在d-b, b-e和e-c上的重叠构成了内部区域。为计

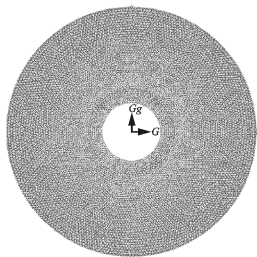


图2 吊舱舱体与后桨交界面的滑移网格

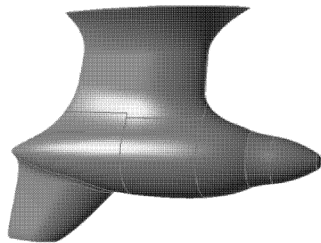


图4 吊舱舱体数值模型

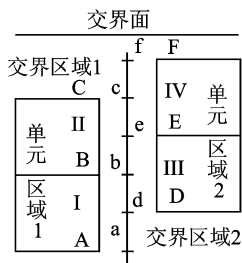


图3 静止网格与滑移网格间数据传递原理图

算通过单元 III 的流量(D-E 上),在计算过程中将不考虑D-E,而是由d-b 和b-e 来代替,通过d-b 和b-e 分别由单元 I 和单元 II 把流场信息代入到单元 III 中。

1.3 模型主参数

混合式CRP吊舱推进器主要由吊舱、前桨及后桨构成。吊舱舱体具体参数如表1所示。螺旋桨模型分为前桨和后桨,前桨选用DTMB3686,后桨选用DTMB3849,两桨间距为前桨直径的0.1415倍^[10-11],模型主要参数见表1,2。建模中采用Rhinceros软件生成吊舱舱体模型(图4),再导入Fluent前处理软件GAMBIT导入螺旋桨型值生成混合式CRP吊舱推进器。

表1 吊舱模型参数

长度 L/m	长度桨径比 L/D	最大直径 d/m	最大直径桨径比 d/D
0.303 49	1.375 9	0.095 37	0.433 5

表2 对转桨模型主参数

对转桨	前桨 DTMB3686	后桨 DTMB3849
直径/m	0.22	0.216
叶数	4	5
$(P/D)0.7R$	1.291	1.287
盘面比	0.303	0.379
旋向	左旋	右旋
剖面类型	NACA 66 模型 ($a=0.8$)	NACA 66 模型 ($a=0.8$)

1.4 网格划分

为更真实地模拟空泡水洞内混合式CRP吊舱推进器敞水性能以及前后桨和舱体、支架、尾鳍等之间的相互作用,建模中将混合式CRP吊舱推进器放置于数值空泡水洞内,空泡水洞工作段截面尺寸为0.6m×0.6m。前后螺旋桨采用滑移网格技术来实现螺旋桨的旋转效应,滑移面将整体网格分成固定区域和动区域,动区域之间以及动区域和固定区域间接触面上的网格尽量一致,接触面附近区域的网格要求尽量精细。建立计算域网格模型如图5所示,总网格数220万。固定区域网格数为115万;动区域分为两部分,都为圆柱体,直径1.18D,前桨动区域网格数约为60万,后桨动区域网格数约为55万。整个流场区域网格最差畸变度为0.8433。上游边界距离前桨桨盘约为3倍的前桨直径,下游边界距离前桨桨盘约为15倍的前桨直径,计算域横截面和空泡水洞工作段横截面一致,由于叶梢、导边、随边、桨毂上流动变化比较剧烈,对上述区域的网格进行了加密(图6)。数值模拟分析采用Fluent软件进行,其中入口设置为均匀来流入口,出口设置为压力出口,四周边界、吊舱及前轴设置为固定壁面,桨叶及桨毂均设置为滑移壁面。

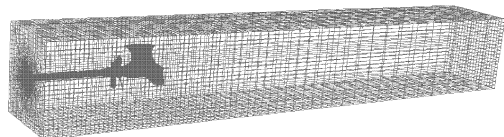


图5 计算域网格模型

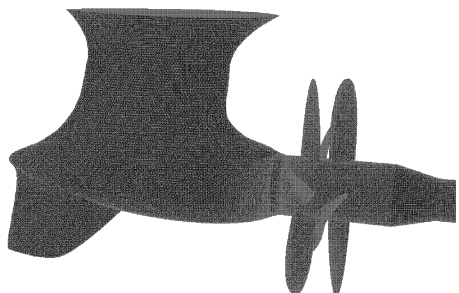


图6 混合式CRP吊舱推进器面网格

2 试验

2.1 试验方法

一般而言,混合式CRP吊舱推进器的敞水试验可分为螺旋桨的敞水试验和吊舱系统(包括螺旋桨、吊舱、支架等)的敞水试验。本次试验中,前桨安装在长轴动力仪上,后桨安装在吊舱动力仪上,调节两台动力仪电机使两桨转速相等但转向相反,可以分别得到螺旋桨和吊舱系统的敞水性能数据。试验中对前桨敞水性能的测量按照常规螺旋桨试验方法进行,主要依据下列试验规程:螺旋桨模型敞水试验方法(CB/T346—1997),螺旋桨敞水试验预报规程(7.5-02-03-02.1,23th ITTC);对后桨敞水性能的测量按照吊舱推进器模型试验及性能预报规程(7.5-02-03-01.3,23th ITTC),吊舱推进器试验及性能预报、空泡试验规程(7.5-02-03-03.6,24th ITTC)进行。

2.2 试验装置

本次试验在海军工程大学空泡水洞中进行,空泡水洞试验工作段尺寸为 $0.6\text{ m}\times 0.6\text{ m}\times 2.6\text{ m}$ 。吊舱动力仪是Cussons公司专门针对吊舱推进器水动力性能测试而新开发的先进测试仪器,长轴动力仪是华中科技大学大学针对螺旋桨水动力性能测试而自主开发的测试仪器,能对螺旋桨的推力和扭矩进行测量。

2.3 试验模型

吊舱模型具体参数如表1所示,模型照片见图7。对转桨具体参数见表2,混合式CRP吊舱推进器整体安装及试验过程如图8所示。

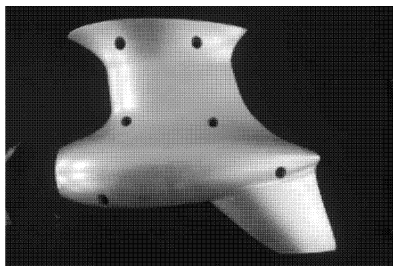


图7 吊舱模型

2.4 试验方案

本次试验在正常大气压环境下,固定进速 4.5 m/s ,相应螺旋桨转速为 $800\sim 1\,600\text{ r/min}$ (转速调整间隔为 100 r/min)工况下进行混合式CRP吊舱推进器敞水性能试验;进速系数范围约为 $J=0.70\sim 1.4$ 。

瑞典人Bjam研究过关于对转桨桨模的临界雷

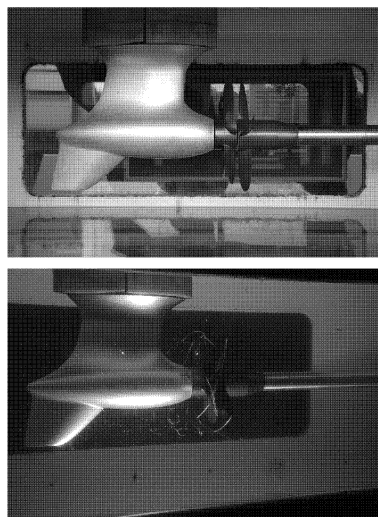


图8 混合式CRP吊舱推进器模型整体安装及试验过程

诺数问题。他计算了几对对转桨,在雷诺数 $3.4\times 10^5\sim 6.1\times 10^5$ 范围内,桨叶剖面最低阻力系数没有明显变化。中国船舶科学研究中心水池对四对对转桨进行了雷诺数影响试验,其结果表示在图9中,试验表明, $Re_{(0.75R)}\geq 2.82\times 10^5$ 以后,工作点附近的螺旋桨敞水效率基本稳定^[10]。综上所述,针对对转桨进行敞水试验时 $Re_{(0.75R)}\geq 3\times 10^5$ 能够得到稳定的敞水性能曲线。经计算,在上述工况中前后桨型位于 $0.75R$ 处叶切面弦长的雷诺数 $Re_{(0.75R)}\geq 3.4\times 10^5$,并在此工况下对混合式CRP吊舱推进器敞水性能开展了3组重复性试验。

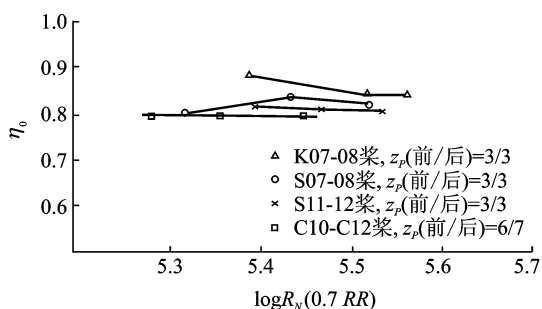


图9 对转桨敞水效率随雷诺数的变化

3 结果分析

3.1 水动力性能数据表达

混合式CRP吊舱推进器进行敞水性能预报的基本数据有:前桨推力 T_i 、吊舱推进器推力 T_p 、前桨扭矩 Q_i 、后桨推力 T_a 、后桨扭矩 Q_a 、螺旋桨转速 n 、水流进速 V 。

为了便于比较分析,通常均以前桨直径无因次化。

前桨推力系数

$$K_{tf} = T_f / \rho n^2 D_f^4 \quad (2)$$

前桨扭矩系数

$$K_{qf} = Q_f / \rho n^2 D_f^5 \quad (3)$$

吊舱推进器推力系数(后桨+吊舱)

$$K_{tx} = T_p / \rho n^2 D_f^4 \quad (4)$$

后桨推力系数 $K_{ta} = T_a / \rho n^2 D_f^4$ (5)

后桨扭矩系数 $K_{qa} = Q_a / \rho n^2 D_f^5$ (6)

对转桨总推力系数

$$K_{tc} = K_{ta} + K_{tf} \quad (7)$$

混合式CRP吊舱推进器总推力系数

$$K_t = K_{tf} + K_{tp} \quad (8)$$

混合式CRP吊舱推进器总扭矩系数

$$K_q = K_{qa} + K_{qf} \quad (9)$$

进速系数 $J = V / n D_f$ (10)

混合式CRP吊舱推进器敞水推进效率

$$\eta_0 = (J / 2\pi) (K_t / K_q) \quad (11)$$

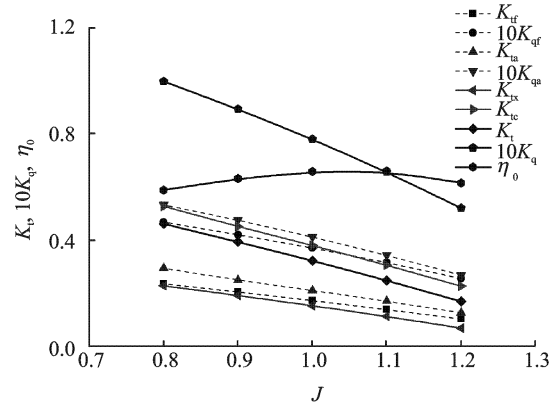


图11 敞水数值模拟性能曲线

表4 第2组敞水试验性能曲线插值表

J-Test 2	K_{tf}	$10K_{qf}$	K_{ta}	$10K_{qa}$	K_{tx}
1.2	0.096 0	0.237 1	0.124 7	0.242 2	0.061 6
1.1	0.130 8	0.296 2	0.171 6	0.320 4	0.106 8
1.0	0.165 9	0.355 4	0.215 6	0.396 2	0.151 3
0.9	0.199 3	0.405 9	0.263 3	0.463 8	0.192 1
0.8	0.232 3	0.454 5	0.310 9	0.528 1	0.230 2

表5 第3组敞水试验性能曲线插值表

J-Test 3	K_{tf}	$10K_{qf}$	K_{ta}	$10K_{qa}$	K_{tx}
1.2	0.098 3	0.243 2	0.129 9	0.248 2	0.064 7
1.1	0.130 9	0.299 5	0.169 9	0.320 8	0.106 4
1.0	0.164 5	0.355 7	0.213 7	0.393 3	0.149 9
0.9	0.197 2	0.405 2	0.260 4	0.459 8	0.190 1
0.8	0.231 3	0.458 6	0.310 5	0.528 8	0.229 4

3.2 敞水性能试验重复性分析

以进速系数 J 为横坐标,以 $K_{tf}, K_{ta}, K_{tx}, 10K_{qf}, 10K_{qa}, 10K_{q}, K_{tc}, K_t, \eta_0$ 为纵坐标绘制出混合式CRP吊舱推进器敞水试验性征曲线。混合式CRP吊舱推进器第1组敞水性能试验结果及数值模拟结果分别见图10,11。将3组敞水性能试验结果插值得到 $J=0.8, 0.9, 1.0, 1.1, 1.2$ 时前后桨以及吊舱推进器的 K_t 和 $10K_q$,如表3~5所示。

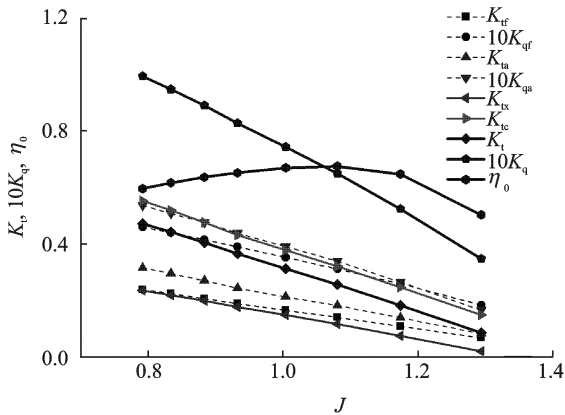


图10 第1组敞水试验性能曲线图

表3 第1组敞水试验性能曲线插值表

J-Test 1	K_{tf}	$10K_{qf}$	K_{ta}	$10K_{qa}$	K_{tx}
1.2	0.099 2	0.243 9	0.125 7	0.243 6	0.062 0
1.1	0.133 3	0.301 1	0.172 7	0.324 0	0.107 7
1.0	0.166 3	0.355 4	0.214 4	0.393 9	0.149 4
0.9	0.200 0	0.407 1	0.261 6	0.464 4	0.192 0
0.8	0.235 2	0.456 5	0.311 7	0.530 9	0.231 6

从结果可知,3次敞水性能试验曲线彼此吻合较好,从表3~5看出,3组敞水性能曲线相互之间最大误差不超过5%,说明本文采用的试验方法对混合式CRP吊舱推进器进行敞水性能试验有较好的重复性。

3.3 敞水性能数值模拟分析

在数值空泡水洞内对混合式CRP吊舱推进器数值模型敞水性能进行了计算,敞水性能数值模拟结果见表6。以进速系数 J 为横坐标,以 $K_{tf}, K_{ta}, K_{tx}, 10K_{qf}, 10K_{qa}, 10K_{q}, K_{tc}, K_t, \eta_0$ 为纵坐标绘制出混合式CRP吊舱推进器敞水性征预报曲线,如图11所示。

表6 混合式CRP吊舱推进器数值模拟结果

J-CFD	K_{tf}	$10K_{qf}$	K_{ta}	$10K_{qa}$	K_{tx}
1.2	0.100 3	0.252 8	0.123 6	0.265 4	0.066 1
1.1	0.135 7	0.313 4	0.167 6	0.341 4	0.110 5
1.0	0.170 1	0.368 5	0.208 0	0.409 6	0.150 4
0.9	0.202 0	0.418 0	0.246 7	0.473 1	0.189 2
0.8	0.233 5	0.465 4	0.292 2	0.530 4	0.225 3

将3组试验结果在对应进速系数下进行平均,如表7所示,将平均值与数值模拟结果进行比较,得到两者之间的误差,如表8所示。

表7 混合式CRP吊舱推进器试验结果平均值

J -平均值	K_{if}	$10K_{qf}$	K_{ta}	$10K_{qa}$	K_{tx}
1.2	0.097 8	0.241 4	0.126 8	0.244 7	0.062 7
1.1	0.131 7	0.298 9	0.171 4	0.321 7	0.107 0
1.0	0.165 6	0.355 5	0.214 6	0.394 5	0.150 2
0.9	0.198 8	0.406 1	0.261 8	0.462 7	0.191 4
0.8	0.232 9	0.456 5	0.311 0	0.529 3	0.230 4

表8 试验平均值和计算值之间的误差 %

J -误差	K_{if}	$10K_{qf}$	K_{ta}	$10K_{qa}$	K_{tx}
1.2	-2.49	-4.51	2.53	-7.81	-5.00
1.1	-2.94	-4.63	2.24	-5.77	-3.16
1.0	-2.66	-3.54	3.10	-3.69	-0.18
0.9	-1.59	-2.86	5.74	-2.21	1.12
0.8	-0.22	-1.91	6.07	-0.21	2.23

从结果可知,前桨的误差要比后桨的误差总体来说偏低,并且前后桨扭矩系数计算值略微大于试验均值,总体上计算值与3组试验平均数据吻合较好,最大误差为7.81%,绝大部分误差控制在6%以内,说明本文所用数值计算方法和试验方法均适用于混合式CRP吊舱推进器敞水性能预报,且都具备较好的预报精度和稳定性,满足工程应用的要求。

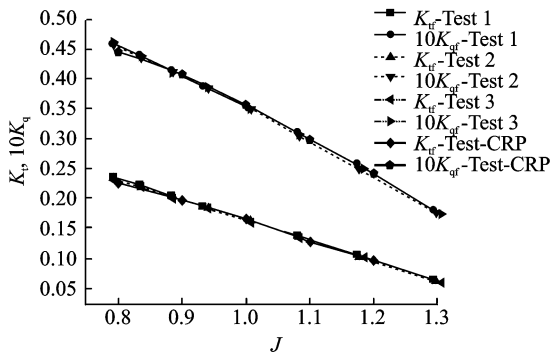
3.4 吊舱对前后桨影响分析

Miller于1976年在美国泰勒海军舰船研究与发展中心针对前桨选用DTMB3686,后桨选用DTMB3849的对转桨在水洞中进行了敞水性能试验^[11],对文献中敞水试验曲线进行了取值,取值得到的试验数据如表9所示。

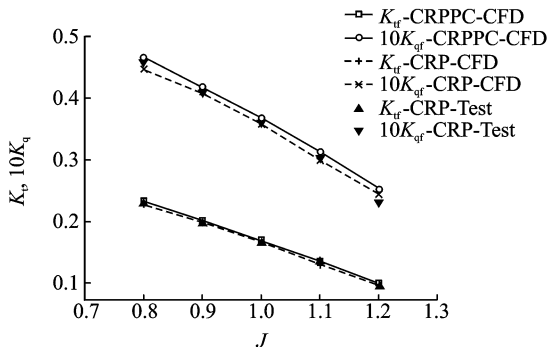
表9 对转桨试验数据

J -CRP	K_{if}	$10K_{qf}$	K_{ta}	$10K_{qa}$
1.2	0.098 6	0.244 2	0.083 3	0.203 5
1.1	0.130 0	0.300 0	0.130 0	0.280 0
1.0	0.168 6	0.358 2	0.168 6	0.358 2
0.9	0.198 9	0.409 9	0.219 3	0.431 9
0.8	0.227 5	0.446 7	0.260 5	0.506 2

将本文针对混合式CRP吊舱推进器进行敞水试验得到的前后桨、吊舱推进器敞水性能试验结果以及数值模拟结果与国外针对相同对转桨(不附加吊舱)得到前后桨试验数据进行比较,如图12~13所示,其中Test 1,Test 2,Test 3分别表示3组敞水试验结果,CFD表示数值模拟结果,CRP表示国外无吊舱试验数据。

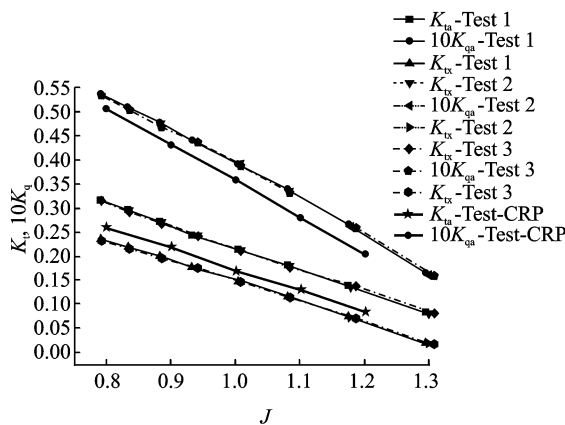


(a) 试验结果比较图

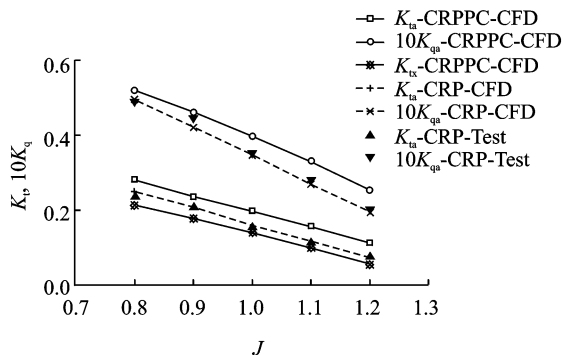


(b) 数值模拟结果比较图

图12 前桨(CRPPC和CRP)试验结果及数值模拟结果比较图



(a) 试验结果比较图



(b) 数值模拟结果比较图

图13 后桨(CRPPC和CRP)及吊舱推进器(CRPPC)试验结果及数值模拟结果比较图

从图12可以看出,本次试验和数值模拟中混合式CRP吊舱推进器前桨敞水性能结果与对转桨前桨敞水性能试验数据吻合良好,在进速系数较低(即桨转速较高)时,推力系数和扭矩系数相比试验数据要稍高,总体误差在3%以内,表明吊舱对前桨敞水性能基本没有影响,这是因为后桨强烈的吸水作用使前桨所处的流场在有无吊舱的情况下变化不大。而从图13中可以看出,后桨敞水性能结果相比国外对转桨后桨敞水性能试验数据偏大,但推力系数和扭矩系数与国外对应试验数据相比基本平行,表明吊舱对后桨敞水性能影响显著,这是因为吊舱的存在改变了后桨所处的流场,产生了明显的阻塞效应;吊舱推进器(后桨+吊舱)推力系数与对转桨后桨推力系数基本平行,但总体的推力要低于对转桨后桨所产生推力,这说明吊舱的阻力抵消了一部分后桨产生的推力。

4 结 论

本文建立混合式CRP吊舱推进器数值模型并置于虚拟空泡水洞内,结合RANS方程和SST $k-\omega$ 湍流模型,运用滑移网格方法对混合式CRP吊舱推进器在均匀流场中水动力性能进行了数值模拟;同时,利用空泡水洞、吊舱动力仪及长轴动力仪对混合式CRP吊舱推进器敞水性能进行了试验研究,对混合式CRP推进器的水动力性能进行了系统的研究。结果表明:

(1)本文采用的试验方法对混合式CRP吊舱推进器进行敞水性能试验有较好的重复性。

(2)本文所用数值计算方法和试验方法均适用于混合式CRP吊舱推进器敞水性能预报,且都具备较好的预报精度和稳定性,初步满足工程应用的要求。

(3)因为后桨强烈的吸水作用使前桨所处的流场在有无吊舱的情况下变化不大,吊舱对前桨敞水性能基本没有影响;而吊舱的存在改变了后桨所处的流场,产生了明显的阻塞效应,对后桨敞水性能影响显著,使得后桨敞水性能结果相比国外对转桨后桨敞水性能试验数据整体偏大,且推力系数和扭矩系数与国外对应试验数据相比基本平行。由于吊舱的阻力抵消了一部分后桨产生的推力,所以吊舱推进单元(吊舱+后桨)总体的推力要低于对转桨后桨所产生推力,且其推力系数与对转桨后桨推力系数基本平行。

参考文献:

[1] Pakaste R. Experience with Azipod propulsion system on boat marine vessels[J]. ABB Review, 1999

(2):12-18.

- [2] 冀路明,汪庆周. 二十一世纪的Azipod吊舱式电力推进系统[J]. 船舶工程,2002(2):61-64.
Ji Lumin, Wang Qinzhou. Azipod electric underwater pod propulsion system for century 21[J]. Ship Engineering, 2002(2): 61-64.
- [3] Levander O. Advanced machinery with CRP propulsion for fast RoPax vessels[C]// Proceedings of the 24th Motorship Marine Propulsion Conference. Copenhagen;the Society of Naval Architects & Marine Engineers, 2002:132-143.
- [4] 廖慧清,魏海波,李祝清,等. 混合电力吊舱式推进系统[J]. 船电技术,2006(1):1-3.
Liao Huiqing, Wei Haibo, Li Zhuqing, et al. Hybrid podded propulsion with contra-rotating propeller[J]. Marine Electric & Electronic Engineering, 2006(1): 1-3.
- [5] 廖慧清,孙培廷,李祝清,等. 吊舱式混合电力推进系统综合性能评估[J]. 船海技术,2005(6):49-52.
Liao Huiqing, Sun Peiting, Li Zhuqing, et al. Comprehensive performance assessment of hybrid CRP podded propulsion system[J]. Marine Technology, 2005(6): 49-52.
- [6] 张庆文. 吊舱式CRP推进系统发展及应用前景[J]. 船海工程,2007(2):57-60.
Zhang Qingwen. Prospect and utilization of the podded CRP propulsion system[J]. Ship & Ocean Engineering, 2007(2): 57-60.
- [7] Noriyuki S, Mariko K. On the model tests and design method of hybrid CRP podded propulsion system of a feeder container ship[C]//First International Symposium on Marine Propulsors. Trondheim. Norway: [s. n.], 2009:538-551.
- [8] 盛立. 吊舱式推进器水动力性能数值模拟及试验研究[D]. 武汉:海军工程大学,2011.
- [9] 姚震球,高慧,杨春蕾. 基于滑移网格的带螺旋桨艇尾流场数值分析方法[J]. 江苏科技大学学报:自然科学版,2008,22(2):15-20.
Yao Zhenqiu, Gao Hui, Yang Chunlei. Numerical simulation of interaction between submarine and propeller based on approach of sliding mesh[J]. Journal of Jiangsu University of Science and Technology: Natural Science Edition, 2008, 22(2): 15-20.
- [10] Sheng Li, Xiong Ying, Wang Zhanzhi. Numerical Simulation on the hydrodynamics performance of contra-rotating propellers in uniform flow[C]//The 3rd International Conference on Information Science and Engineering. Yangzhou:IEEE,2011:5295-5299.
- [11] Miller M L. Experimental determination of unsteady forces on contrarotating propellers in uniform flow[R]. SPD-659-01. [S. l.]:National Technical Information Service,1976.