

文章编号: 1007-7294(2015)08-0905-07

桨后自由叶轮理论设计方法研究

侯立勋, 胡安康, 汪春辉, 韩凤磊

(哈尔滨工程大学 船舶工程学院, 哈尔滨 150001)

摘要: 为对桨后自由叶轮进行综合设计研究, 在前桨给定的前提下, 采用螺旋桨的旋涡理论对桨后自由叶轮进行设计。前桨和自由叶轮之间的相互影响通过诱导速度来考虑, 诱导速度通过以速度势为基础, 采用源汇混合分布以及双曲面元的低阶面元法求得并进行周向平均, 将非定常问题转化为定常问题。在实际设计过程中, 通过面元法对前桨尾流场进行分析来求其收缩率, 从而确定自由叶轮涡轮段直径, 并用面元法分别对前桨和自由叶轮进行水动力性能预报, 循环迭代直至桨后自由叶轮系统水动力性能收敛。实例设计分析表明: 在较低进速条件下, 设计的自由叶轮可获得较高的效益, 效率最高可提升 14.42%。

关键词: 螺旋桨; 自由叶轮; 诱导速度; 旋涡理论; 面元法

中图分类号: U622.2 文献标识码: A doi: 10.3969/j.issn.1007-7294.2015.08.003

Theoretical design method investigation of vane wheel after propeller

HOU Li-xun, HU An-kang, WANG Chun-hui, HAN Feng-lei

(College of Shipbuilding Engineering, Harbin Engineering University, Harbin 150001, China)

Abstract: In order to have comprehensive design and investigation of the vane wheel after propeller, the propeller vortex theory is adopted to design the vane wheel with the forward propeller is given. The interaction between the forward propeller and the vane wheel is considered through the induced velocities. The induced velocities are obtained through the potential based low order surface panel method employing the hyperboloidal quadrilateral panels and are circumferentially averaged. Therefore, the unsteady problem is translated to steady state. For the purpose to determine the diameter of the turbine section of vane wheel, the wake flow field of the forward propeller is analyzed through the surface panel method. The surface panel method is used to predict the hydrodynamic performance of the system. An iterative calculation method is used until the hydrodynamic performance of the system converges. The analysis of an instance shows that at lower advance speed, the vane wheel after propeller designed through this method can get greater yield and the increase of efficiency can be up to 14.42%.

Key words: propeller; vane wheel; induced velocity; vortex theory; surface panel method

0 引 言

桨后安装自由叶轮是船舶节能的一种推进方式。自由叶轮与螺旋桨同轴, 可以自由旋转, 内半径

收稿日期: 2014-12-03

基金项目: 国家自然科学基金项目(51309061)

作者简介: 侯立勋(1988-), 男, 博士研究生;

胡安康(1956-), 女, 教授, 博士生导师, E-mail: huangkangheu@163.com。

部分作用如涡轮(亦即设计成水轮机部分),通过吸收螺旋桨尾流的能量而使其旋转。自由叶轮外半径部分作用如螺旋桨,可产生附加推力,从而达到提高推进效率、节省能源的目的,在现今节能减排的大背景下,对自由叶轮进行深入的研究具有深远的现实意义。查阅相关文献^[1-6]发现,有关自由叶轮的研究主要集中于上世纪八九十年代,理论设计研究依然停留在升力线设计的水平上,且不考虑后置自由叶轮对前桨影响。

为了对桨后自由叶轮进行详细地设计研究,本文通过螺旋桨升力线理论对自由叶轮进行初步设计,再通过螺旋桨升力面理论进行修正,前桨和自由叶轮之间的干扰速度通过面元法求得,在设计过程中采用面元法对前桨和设计的桨后自由叶轮进行水动力性能预报,考虑相互之间的干扰,循环迭代直至系统水动力性能收敛,为了验证本文提出的设计方法的有效性,对 DTMB P4119 桨在三种不同的运行工况下进行了自由叶轮设计。

1 基本原理与理论计算方法

1.1 桨后自由叶轮节能原理

自由叶轮叶片可分为两部分,即涡轮段和螺旋桨段,如图 1 所示,图中 D_L 、 D_W 分别代表自由叶轮直径及叶轮涡轮段直径, D_p 为前置螺旋桨直径。水流经过前置桨后会产生收缩,从而涡轮段直径小于前桨。自由叶轮的直径约比前桨大 15% -35% (视尾框大小而定)。

图 2 分别给出了自由叶轮涡轮段和螺旋桨段在某半径处的速度三角形,其中 r_w 、 r_L 分别为自由叶轮涡轮段和螺旋桨段无因次半径, n_L 、 D_L 为自由叶轮转速和直径,叶轮进速为 V_p ,其轴向和周向自身诱导速度为 u_{al} 和 u_{il} ,前桨对自由叶轮的轴向和周向诱导速度分别为 u_{alp} 和 u_{ilp} ; V_{RL} 为叶元体来流速度; β_i 、 β 分别代表水动力螺距角及进角。由图 2(a)可知,在自由叶轮涡轮段,其自身周向诱导速度 u_{il} 与螺旋桨的周向诱导速度 u_{ilp} 方向相反,从而可以部分或全部抵消前置螺旋桨尾流的旋转;同时,叶轮自身轴向诱导速度 u_{al} 与螺旋桨的轴向诱导速度 u_{alp} 方向也相反,致使螺旋桨—叶轮系统在无穷远后方轴向诱导速度较螺旋桨单独工作时变小,从而损失了部分推力,但获得了机械能。这种机械能立即在自由叶轮的螺旋桨部分转换为推进能,进而产生了向前的推力。

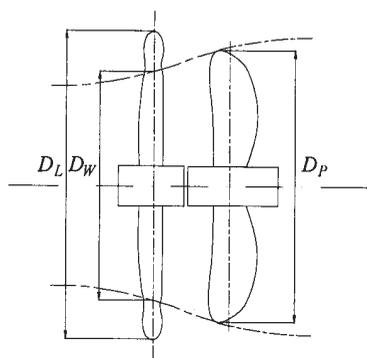


图 1 桨后自由叶轮

Fig.1 Vane wheel after propeller

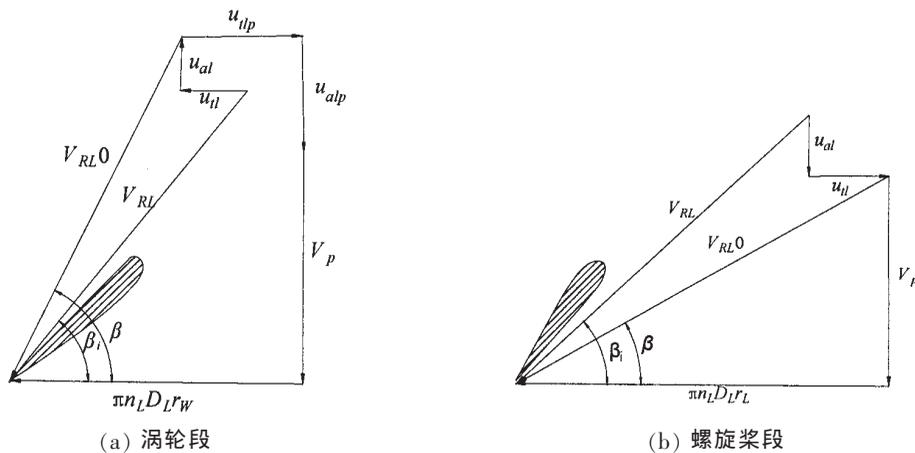


图 2 自由叶轮速度多角形

Fig.2 Vane wheel speed polygon

由于叶轮的螺旋桨部分产生的推力大于涡轮部分损失的推力,因而可提高推进器效率,起到节能效果。

1.2 涡轮段直径的确定

螺旋桨在旋转过程中,尾涡会发生收缩致使叶轮涡轮段直径小于前桨,如图 3 所示。首先,通过公式(1)求前桨在其自身盘面及叶轮盘面处的加权平均轴向诱导速度 $\overline{u_{ap}0}$ 和 $\overline{u_{al}0}$ 。

$$\overline{y} = \frac{\int_0^1 y(x) x dx}{\int_0^1 x dx} \tag{1}$$

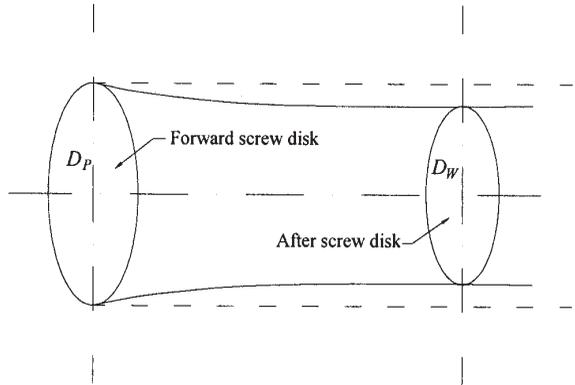


图 3 尾流收缩示意图

Fig.3 Wake flow shrinkage schematic diagram

前桨在其自身盘面及叶轮盘面处轴向诱导速度均通过面元法^[7]求得,尾涡收缩率 δ 可由下式确定:

$$\delta = \sqrt{\frac{\overline{u_{ap}0} + 1}{\overline{u_{al}0} + 1}} \tag{2}$$

则叶轮涡轮段直径为 $D_w = \delta D_p$ 。

1.3 叶轮水动力螺距角的确定

由于自由叶轮分为涡轮部分和螺旋桨部分,两部分作用不同,螺距分布迥异,如何正确选定水动力螺距角的分布成为自由叶轮设计的关键点。设计时,首先选定叶轮叶数 z_L 和直径 D_L ,在已知进速系数 J_L 下进行计算。自由叶轮两部分临界半径 r_F 可由下式计算:

$$r_F = \delta D_p / D_L \tag{3}$$

则有

$$\left. \begin{aligned} \tan(2\beta_i - \beta + \varepsilon) &= L_1 J / (\pi r) & (r_H \leq r \leq r_F) \\ \tan\beta_i &= L_2 J / (\pi r) & (r_F \leq r \leq 1) \end{aligned} \right\} \tag{4}$$

即

$$\beta_i = \begin{cases} \frac{1}{2} \left(\arctan \frac{L_1 J}{\pi r} + \beta - \varepsilon \right) & (r_H \leq r \leq r_F) \\ \arctan \frac{L_2 J}{\pi r} & (r_F \leq r \leq 1) \end{cases} \tag{5}$$

式中: β_i 、 β 分别为水动力螺距角及进角; r_H 为毂径比; ε 为粘性修正系数:

$$\varepsilon = \begin{cases} -0.029(0.9 + 0.02z_L) & (r_H \leq r \leq r_F) \\ 0.031(0.9 + 0.02z_L) & (r_F \leq r \leq 1) \end{cases} \tag{6}$$

L_1 和 L_2 均为常数,在开始时可以任意选取,但必须大于1,否则涡轮部分负荷太大,而螺旋桨部分为负。通过大量的计算发现, L_1 和 L_2 是互为增减的(满足转矩为零的前提下),可以通过一定的数学手段对 L_1 和 L_2 进行搜寻。

1.4 水动力性能表达

设计过程中,桨后自由叶轮系统性能可表示为:

$$K_{TP} = \frac{T_p}{\rho n_p D_p^4}; K_Q = \frac{Q_p}{\rho n_p D_p^5}; K_{TL} = \frac{T_L}{\rho n_p D_p^4}$$

$$\eta_p = \frac{K_{TP}}{K_Q} \frac{J}{2\pi}; K_{TC} = K_{TP} + K_{TL}; \eta_c = \frac{K_{TC}}{K_Q} \frac{J}{2\pi}$$

式中： K_{TP}, K_Q 为螺旋桨的推力系数和转矩系数； K_{TL} 为自由叶轮贡献的推力系数（以前桨为标准进行计算）； K_{TC}, η_c 为桨—自由叶轮系统的推力系数及推进效率； T_p 和 T_L 分别为螺旋桨和自由叶轮的推力； Q_p 为螺旋桨转矩； η_p 为螺旋桨效率； J 为进速系数； ρ 为流体密度； D_p 为螺旋桨直径； n_p 为螺旋桨转速。

1.5 设计迭代过程

进行设计之前，需根据已知螺旋桨选定自由叶轮叶数、直径及旋转速度。首先，采用面元对前桨进行水动力性能预报，并对螺旋桨尾流场进行分析确定尾涡收缩率，从而确定自由叶轮涡轮段直径，通过面元法求前置螺旋桨在自由叶轮设计点处的诱导速度；接着对 L_1 和 L_2 附初值，采用升力线理论对自由叶轮进行初步设计，进而进行升力面修正^[8-11]，通过面元法对设计的自由叶轮进行水动力性能预报，判断叶轮转矩是否满足设计需求，如满足，则进一步求自由叶轮对前置螺旋桨控制点的扰动速度，重复上述过程直至桨—自由叶轮系统水动力性能收敛。由于螺旋桨在旋转时扰动场周期性变化^[12]，这种周期性变化在螺旋桨坐标系 $O-xyz$ 中相当于以螺旋桨桨盘中心为圆心到相应场点距离为半径的圆周上的扰动速度。因此在定常情况下，螺旋桨对船体坐标系 $O-XYZ$ 中任意一点的扰动场的计算需要在这个圆周上进行周向平均。桨后自由叶轮设计计算过程如图 4 所示。

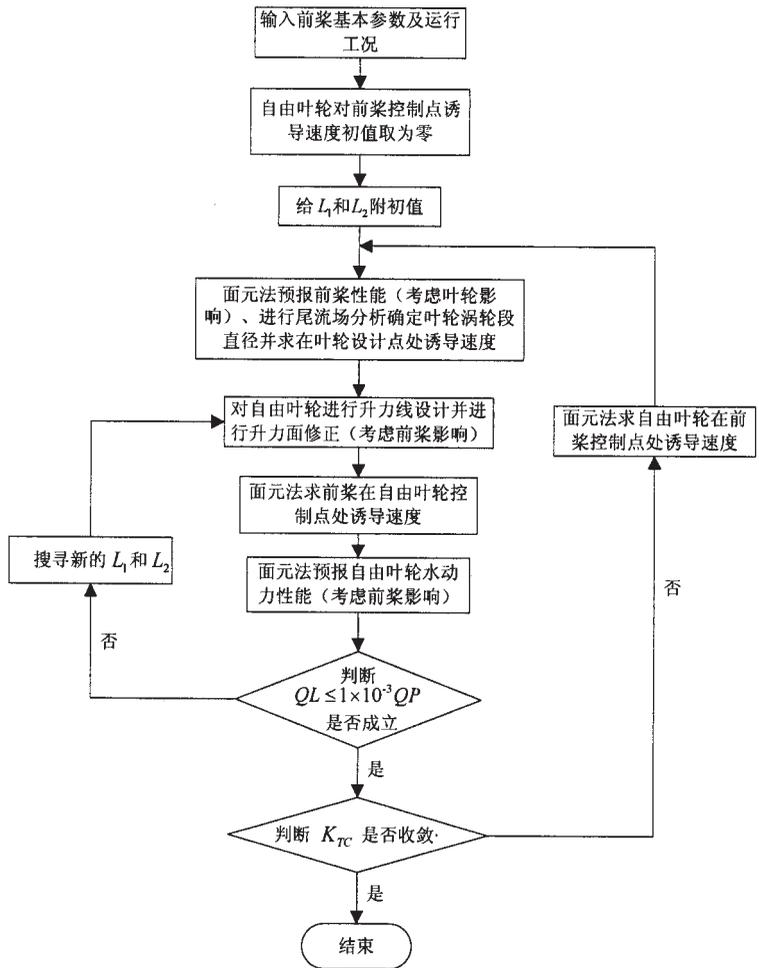


图 4 桨后自由叶轮设计计算流程图

Fig.4 Design and calculation flowchart of vane wheel after propeller

2 实例研究

2.1 实例模型设计

为了对本文提出的桨后自由叶轮设计方法进行验证研究，以母型桨 DTMB P4119 桨作为前置桨进行相应的后置自由叶轮设计，取 P4119 桨直径为 5 m，毂径比为 0.2，螺距比为 1.084，采用 NACA66mod 翼型，不考虑侧斜及后倾，弦向和展向面元均采用余弦方式划分，采用线性尾涡，如图 5 所示。

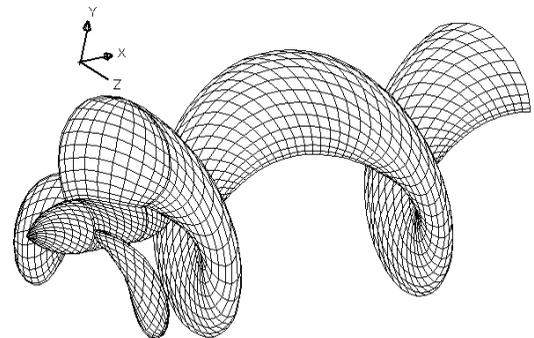


图 5 P4119 桨示意图

Fig.5 Schematic diagram of P4119 propeller

分别对 P4119 桨在进速系数 $J=0.5、0.65、0.8$ 三种工况下设计相应的自由叶轮，分别记为 A、B 和 C，前桨尾涡在自由叶轮盘面处收速率 δ 分别为 0.861、0.896 及 0.927，三种叶轮均采用 8 叶，与前桨直径比均为 1.3，即 6.5 m，与前桨间距均为 $0.25D_p$ ，转速均为前桨转速的 0.4 倍，至于自由叶轮最佳的直径比、叶数、转速及与前桨间距，由于篇幅有限，本文暂不做讨论，将作为后续的研究工作。剖面均采用 NACA66(mod)翼型，环量分布形式均采用 Van Oossanen。设计结果及面元划分如图 6 所示，自由叶轮涡轮段和螺旋桨段分别进行面元划分，均采用余弦划分方式，从而对两部分衔接部分的面元进行加密。

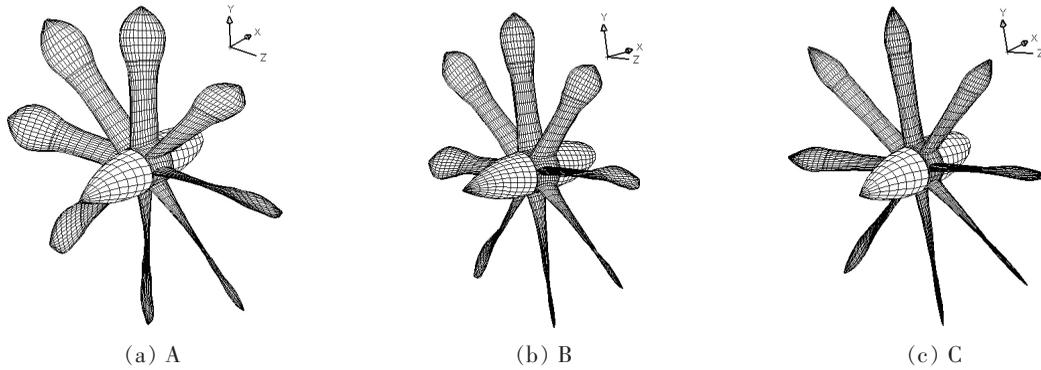


图 6 自由叶轮示意图

Fig.6 Schematic diagram of vane wheel

表 1 给出了 A、B 和 C 自由叶轮相应的几何参数，从结果可知，随着进速的增加，相应的自由叶轮的盘面比减小、毂径比增加，螺距角也相应地增大。

表 1 自由叶轮几何参数

Tab.1 Geometric parameters of vane wheel

(a) A (盘面比 $A_d/A=0.443 5$)

r	C/D_L	t/D_L	f/C	P/D_L
0.132 4	0.099 6	0.021 0	-0.019 1	1.794 7
0.256 4	0.088 0	0.017 7	-0.043 9	1.785 2
0.380 3	0.079 1	0.014 7	-0.040 6	1.783 1
0.504 2	0.079 5	0.011 9	-0.030 4	1.743 0
0.628 2	0.092 9	0.009 3	-0.018 6	1.625 7
0.662 1	0.103 0	0.008 7	-0.006 3	1.583 1
0.752 1	0.126 2	0.007 0	0.019 7	1.903 5
0.876 1	0.118 9	0.004 8	0.025 0	1.785 8
1.000 0	0.003 1	0.000 0	0.00	1.698 3

(b) B (盘面比 $A_d/A=0.345 3$)

r	C/D_L	t/D_L	f/C	P/D_L
0.137 8	0.099 0	0.026 0	-0.019 0	2.008 7
0.261 0	0.078 9	0.021 7	-0.039 3	2.053 1
0.384 1	0.069 5	0.017 7	-0.039 0	2.059 1
0.507 3	0.068 8	0.014 8	-0.038 0	2.237 5
0.630 5	0.076 4	0.010 3	-0.017 7	2.453 3
0.688 9	0.090 2	0.008 1	0.009 0	2.128 6
0.753 7	0.098 3	0.006 9	0.016 5	1.948 1
0.876 8	0.105 8	0.004 8	0.032 6	1.873 6
1.000 0	0.002 5	0.003 0	0.00	1.824 1

(c) C(盘面比 $A_d/A=0.278 2$)

r	C/D_L	t/D_L	f/C	P/D_L
0.142 6	0.078 3	0.025 0	-0.009 3	2.410 6
0.265 1	0.068 3	0.020 7	-0.036 8	2.441 5
0.387 6	0.063 5	0.016 6	-0.045 8	2.490 9
0.510 1	0.066 2	0.014 8	-0.025 5	2.475 3
0.632 5	0.069 6	0.010 2	-0.001 6	2.152 2
0.713 1	0.070 8	0.008 7	0.007 6	1.885 4
0.753 7	0.077 3	0.006 9	0.011 0	1.991 1
0.876 8	0.062 0	0.004 8	0.020 9	2.126 0
1.000 0	0.003 2	0.003 0	0.00	1.876 8

2.2 实例模型分析

采用面元法分别对三组螺旋桨-自由叶轮系统进行了水动力性能预报,考虑了前桨和桨后自由叶轮之间的相互干扰,表 2 给出了计算结果,其中 $P-KT$ 、 $P-10KQ$ 分别代表 P4119 桨推力及 10 倍转矩系数; $A-KT$ 、 $B-KT$ 、 $C-KT$ 分别代表 A、B、C 自由叶轮的推力系数; $A-10KQ$ 、 $B-10KQ$ 、 $C-10KQ$ 分别代表 A、B、C 自由叶轮的 10 倍转矩系数。

表 2 水动力性能

Tab.2 Hydrodynamic performance

J	$P-KT$	$P-10KQ$	$A-KT$	$A-10KQ$	$B-KT$	$B-10KQ$	$C-KT$	$C-10KQ$
0.50	0.285 26	0.443 2	0.035 45	0.000 3				
0.65	0.227 14	0.361 6			0.021 03	0.000 2		
0.80	0.163 41	0.278 1					0.013 76	0.000 08

由计算结果可知,A、B、C 自由叶轮转矩仅相当于 P4119 在相应进速下转矩的 0.067 7%、0.055 3%、0.028 7%,满足设计精度要求,通过与表 3 给出的 P4119 桨在相应进速下的敞水性能相比,加装 A、B、C 自由叶轮后效率分别提高 14.42%、11.64% 和 9.68%,从而得知,在低进速条件下加装自由叶轮节能效果更好,但在低进速条件下相应的自由叶轮盘面比也相应增加,致使制造成本较高,需要进行综合权衡,做到兼顾推进性能及经济性。

表 3 P4119 敞水性能

Tab.3 Open water performance of P4119

J	KT	$10KQ$
0.50	0.280 28	0.433 2
0.65	0.222 29	0.355 6
0.80	0.161 54	0.271 1

3 结 论

基于螺旋桨的旋涡理论及面元法,本文提出了桨后自由叶轮的綜合设计方法,以 P4119 桨为研究对象,分别在三种不同的进速条件下进行了桨后自由叶轮设计,通过设计计算得到如下结论:

(1) 前桨尾涡在自由叶轮盘面处的收缩率与进速系数成反比,进速越高,尾涡收缩越小,即叶轮涡轮段直径越大。

(2) 自由叶轮盘面比与进速系数成反比,进速越高,盘面比越小,且螺距角越大,相对敞水桨而言效率提升幅度越大,节能效果越好。

由于本文的研究仅局限于理论方面,且没有考虑伴流,设计结果可能存在一定的不足,所以考虑伴流场、开展模型实验以及自由叶轮相关因素分析将作为后续的研究工作。

参 考 文 献:

- [1] Grim O. Propeller and vane wheel[J]. JSR, 1980, 24(4): 203–226.
- [2] Cock J. Designing vane wheel systems[J]. Schiff and Hafen, 1989: 64–70.
- [3] Lips. Improved grim vane wheel system applied to a new generation VLCCs[J]. Shipping World and Shipbuilding, 1980, 380–381.
- [4] 郭永松, 郭宏宇, 等. 船舶推进节能研究—导轮理论设计和实验[J]. 上海船舶交通运输研究所, 1990, 13(1): 8–17.
Guo Yongsong, Guo Hongyu, et al. Marine propulsion energy saving study—theoretical design and tests of the guide vanes [J]. Shanghai Institute of Transportation of the Ship, 1990, 13(1): 8–17.
- [5] 谭廷寿, 滄建川. 螺旋桨和自由叶轮的性能预估[J]. 武汉交通科技大学学报, 1995, 19(1): 23–29.
Tan Tingshou, She Jianchuan. Performance prediction about the propeller and guide vanes[J]. Journal of Wuhan Transportation University, 1995, 19(1): 23–29.
- [6] Liu Quanhong, Liu Huran. The computer-aided design and manufacture of the vane wheel[C]// 2010 Second International Conference on Computer Engineering and Applications. Bali Isl, Indonesia, 2010: 457–461.
- [7] 苏玉民, 刘业宝, 等. 基于面元法预报导管桨性能的数值计算方法[J]. 华中科技大学学报, 2012, 44(8): 58–59.
Su Yumin, Liu Yebao, et al. Surface panel method- based numerical calculation for predicting ducted propeller performances[J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology, 2012, 44(8): 58–59.
- [8] Rossgatterer M, Juettler B, Kapl M, et al. Medial design of blades for hydroelectric turbines and ship propellers[J]. Computers & Graphics, 2012, 36(5): 434–444.
- [9] Zeng Zhibo, Kuiper G. Blade section design of marine propellers with maximum cavitation inception speed[J]. Journal of Hydrodynamics, 2012, 24(1): 65–75.
- [10] Liang Hui, Zong Zhi. A lifting line theory for a three-dimensional hydrofoil[J]. Journal of Marine Science and Application, 2011, 10(2): 199–205.
- [11] Zong Zhi, Liang Hui, Zhou L. Lifting line theory for wing-in-ground effect in proximity to a free surface[J]. Journal of Engineering Mathematics, 2012, 74(1): 143–158.
- [12] 何 苗, 王 超. 舵球几何参数对螺旋桨水动力性能的影响[J]. 武汉理工大学学报, 2011, 33(7): 69–70.
He Miao, Wang Chao. Effect of rudder ball geometric parameters on propeller hydrodynamic performance[J]. Journal of Wuhan University of Science and Technology, 2011, 33(7): 69–70.