网络出版地址：http://kns.cnki.net/kcms/detail/42.1755.TJ.20180411.0840.006.html 期刊网址：www.ship-research.com

引用格式：李航，余龙. 船用螺旋桨及桨后发电机设计可行性研究[J]. 中国舰船研究，2018，13(2)：110-115.
LI H，YU L. Feasibility research for design of marine propellers and energy recovery turbines[J]. Chinese Journal of Ship Research，2018，13(2)：110-115.

船用螺旋桨及桨后发电机设计可行性研究

李航[1]，余龙[2,3,4]

1 中国舰船研究设计中心，湖北 武汉 430064

2 上海交通大学 海洋工程国家重点实验室，上海 200240

3 高新船舶与深海开发装备协同创新中心，上海 200240

4 上海交通大学 船舶海洋与建筑工程学院，上海 200240

摘 要：[**目的**]以概念船舶节能装置为研究对象，[**方法**]在船用螺旋桨后布置尾流发电机，利用螺旋桨的高速尾流推动发电机叶轮旋转，从而带动发电机组，将尾流能回收转化为电能，降低船舶的总体能耗。将螺旋桨及海流发电机视作组合推进器一体设计，采用涡格法分析桨的水动力性能，采用原创的改进叶素动量方法评估桨后处于高度非均匀流场中的发电机的性能。采用遗传算法设计最佳的海流发电机叶片几何，为某实船提供设计方案，并通过CFD方法验证方案的性能。[**结果**]经与原桨比较，结果显示：在进速系数不变的情况下，组合推进器的推力可提高约4%，但收到功率略有增加；如果调整转速，则组合推进器在推力略有损失的情况下可降低能耗3.43%。[**结论**]计算分析证明了该节能装置的可行性，可作为降速航行的替代方法。

关键词：螺旋桨；桨后发电机；叶素动量理论；计算流体力学；遗传算法

中图分类号：U664.3 **文献标志码：**A **DOI：**10.3969/j.issn.1673-3185.2018.02.015

Feasibility research for design of marine propellers and energy recovery turbines

LI Hang[1]，*YU Long*[2,3,4]

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

2 State Key Laboratory of Ocean Engineering，Shanghai Jiao Tong University，Shanghai 200240，China

3 Collaborative Innovation Center for Advanced Ship and Deep-Sea Exploration，Shanghai 200240，China

4 School of Naval Architecture，Ocean and Civil Engineering，Shanghai Jiao Tong University，
Shanghai 200240，China

Abstract：[**Objectives**] This paper develops a design method for a new concept energy conservation device. [**Methods**] An energy recovery turbine is arranged in the slipstream of a marine propeller with the generator driven by the slipstream of the propeller，in such a way that the turbine converts the kinetic energy into electricity so as to reduce the energy consumption of the ship. In this paper，the propeller and aft turbine are holistically designed. The Vortex Lattice Method is applied in the propeller design while an in-house Matlab code based on the Modified Blade Element Momentum Theory（M-BEMT）is used for turbine performance evaluation. The turbine blade is design and optimized by a Genetic Algorithm（GA）. An application case study is completed and a combined thruster solution put forward. The efficiency in open water is simulated on the basis of CFD. [**Results**] At the same advance coefficient，the efficiency of the combined thruster is about 4% higher than that of the original propeller，with a slight increase in absorbed power. By adjusting the rotational speed，the combined thruster has lower power consumption of around 3.43%. [**Conclusions**] The feasibility of this new concept device is validated by comparison with that of the original propeller.

Key words： propeller；energy recovery turbine；Blade Element Momentum Theory（BEMT）；CFD；Genetic Algorithm（GA）

收稿日期：2017-03-08 **网络出版时间：**2018-4-11 8:41

作者简介：李航，男，1991年生，硕士，助理工程师。

余龙（通信作者），男，1976年生，博士，副教授，博士生导师。

0　引　言

船舶螺旋桨的节能问题历来是学者们研究的重点。螺旋桨工作时会带动尾流旋转,增加流体的动能,这是螺旋桨能量损失的主要形式。针对这部分能量损耗,传统的节能装置包括对转桨和自由叶轮等。Lee等[1]提出了一种新概念组合推进器,在螺旋桨后部布置海流发电机,用来代替自由叶轮。图1所示为桨后发电机的概念图。将发电机的水轮机布置在舵前,而将发电机组布置在舵内。工作时,利用螺旋桨的尾流推动发电机转动,带动发电机组运动,将螺旋桨的尾流能回收转化为电能,从而降低船舶的总体能耗。

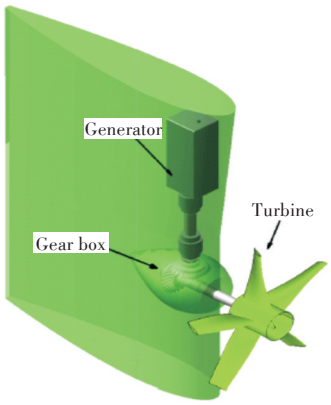


图1　桨后发电机概念图[1]

Fig.1　Concept drawing of post-propeller turbine[1]

本文将针对文献[1]给出的新概念组合推进器,研究一种新的设计方法,基于遗传算法对螺旋桨及桨后发电机的几何型式进行优化设计,并采用一体化设计方法,保证螺旋桨与桨后发电机配合得当。设计目标是使组合推进器能够获得更高的敞水效率,并评估桨后发电机的设置对船舶推进性能以及总体能耗的影响,以及研究这种新概念组合推进器的可行性。

1　设计方法

1.1　组合推进器设计流程及优化算法

设计方法的主要流程如图2所示。从母型船螺旋桨出发,进行桨的优化设计,得到特定的方案,然后将结果输出到发电机设计模块,设计桨后尾流中的发电机并对其优化,得到稳定的结果后形成组合推进器,最后,采用CFD方法校验两者结合的效果。

对螺旋桨和桨后发电机的优化设计是基于遗传算法(Genetic Algorithm,GA)。这种算法的基本思想是模拟生物进化论和自然界的遗传机制,从

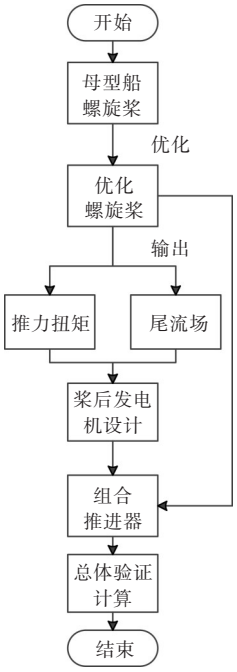


图2　设计方法流程图

Fig.2　Flow chart of design method

而形成一种基于过程搜索的最优化算法。求解优化问题时,设置若干个变量作为控制点,通过其数值的随机变化,生成不同的个体,通过外部程序计算个体性能,按设定的适应度函数数值评判其优劣,从而搜索最优解。

对于本文的组合式推进器,应用遗传算法分别对螺旋桨和桨后发电机进行优化,需选用适当的理论计算方法,计算螺旋桨与桨后发电机的性能,从而计算其适应度,评判其优劣。

1.2　螺旋桨优化设计方法

对于螺旋桨的优化设计,采用涡格法(Vortex Lattice Method,VLM)进行螺旋桨的性能计算[2]。在涡格法中,螺旋桨叶片的几何形状被简化为没有厚度的薄片,通常用叶片的拱弧面代替其几何形状。通过在拱弧面上布置涡和源汇,在尾流面上布置涡,通过涡分布和源汇分布表征螺旋桨和流场的特征。通过在拱弧面上布置控制点满足物面条件,完成对奇点分布的求解,从而计算桨叶在流场中所受的水动力。基于VLM编制计算程序,并与GA程序实现交互,完成螺旋桨的优化设计。

与一般的螺旋桨优化问题不同的是,在螺旋桨与桨后发电机的一体化设计中,螺旋桨优化的首要目的是提高螺旋桨的推力,以抵消桨后发电机的负推力,同时兼顾扭矩数值,使之尽可能小。因此,优化的目标函数中不直接出现效率,而是采用式(1)所给出的形式:

$$F_{\min}=10K_{Q}w_{2}-K_{T}w_{1} \tag{1}$$

式中：K_T，K_Q分别为螺旋桨的推力和扭矩系数，其值通过VLM程序计算；w_1，w_2分别为推力系数和扭矩系数在目标函数中的权重值。对于本文的螺旋桨设计问题，增大推力比减小功率更重要，因此取推力的权重因子为扭矩的2倍，即取$w_1=0.67$，$w_2=0.33$。

对于获得的螺旋桨几何，建立三维几何模型，采用CFD计算确定其敞水性能，通过与原桨性能的比较评价优化效果，对于符合要求的设计方案，将其性能数据输出到发电机设计模块，用于设定发电机设计的目标函数；并分析其尾流场情况，将尾流区域的速度分布数值同样输出到发电机设计模块，作为桨后发电机工作的来流条件。

1.3 桨后发电机设计方法

桨后发电机的设计包括两部分：首先，对所选用的翼型进行性能优化；然后，基于获得的优化翼型进行发电机设计。两部分优化设计仍然基于遗传算法。翼型的性能计算基于Xfoil软件。其理论基础是二维翼型的面元法和边界层理论，适用于模拟亚音速翼型在小攻角下的性能，包括翼型的升阻力系数、压力分布系数等性能参数，可用于计算翼型的适应度数值。

对于翼型优化，选取特定的基础翼型，优化其在特定攻角范围内的性能。在进行翼型优化前，在翼型表面布置若干控制点（图3），这些点的位置在一定范围内变动，通过样条插值生成新翼型，其适应度通过GA程序调用Xfoil软件计算。图中：x为弦向坐标；y为厚度方向坐标；C为翼型弦长；t为翼型厚度。

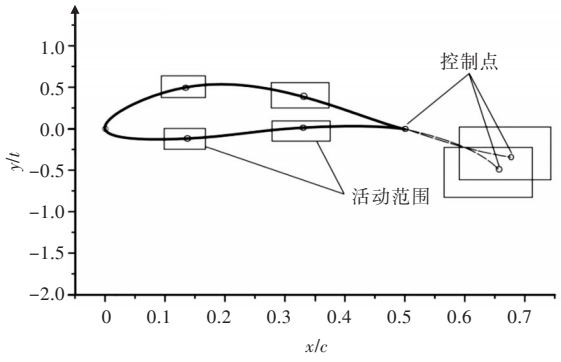


图3 翼型优化控制点布置示意图

Fig.3 Illustration of arrangement of control points on hydrofoils

对于布置在叶片不同展向位置的翼型，采用不同的设计目标函数。对于布置在叶片根部和中部的翼型，其优化目标是提高攻角范围内的升阻比，兼顾空泡性能，如式（2）所示；对于布置在梢部的翼型，设计目标中避免负压的权重更大，如式（3）所示。

$$R_{\min}=0.6\cdot C_{D}(2°)/C_{L}(2°)+0.4\cdot C_{D}(9°)/C_{L}(9°)-0.01C_{p\min}(2°) \tag{2}$$

$$R_{\min}=-0.01\cdot C_{L}(0°)/C_{D}(0°)-0.01\cdot C_{L}(5°)/C_{D}(5°)-C_{p\min}(0°) \tag{3}$$

式中：C_D为翼型阻力系数；C_L为升力系数；$C_{p\min}$为最小压力系数。

对于发电机几何优化，基于获得的优化翼型，对叶片的弦长和扭角分布进行优化。叶片性能计算基于叶素动量理论[3]（Blade Element Momentum Theory，BEMT）。常规的BEMT仅适用于均匀轴向来流，这里对常规理论进行了修改，以适应来流非均匀且具有周向速度的情况[4]。计算时，以螺旋桨设计模块所输出的尾流区速度分布为来流条件，计算桨后发电机在螺旋桨尾流中的推力扭矩数值。

桨后发电机的设计目标是使桨后发电机产生的负推力数值与螺旋桨经优化后的推力增量基本相当，在此前提下，提高桨后发电机的收到功率，从而抵消螺旋桨功率的增加，进而降低船舶的总体能耗。为使得桨后发电机与螺旋桨有较好的匹配效果，桨后发电机的设计目标函数根据螺旋桨优化前后的性能变化确定。为衡量组合推进器对能量的利用率，按式（4）定义组合推进器的总体效率值：

$$\eta=\frac{T_1-T_2}{P_1-P_2}V_{A} \tag{4}$$

式中：T为推力；P为功率；下标1，2分别代表新螺旋桨和桨后发电机；V_A为螺旋桨进速。优化目标函数如下式所示：

$$F_{\min}=\frac{|T_1-T_2-T_0|}{T_0}w_3-\eta w_4 \tag{5}$$

式中：T_0为原桨推力；T_1为优化桨推力；T_2为发电机推力。由于螺旋桨性能数据参与桨后发电机设计目标函数的确定，因此可以较好地实现螺旋桨与发电机的以桨为基础的一体化设计，保证两者的匹配度。式中2项分别表示控制推力和获能效率，w_3，w_4为它们的权重因子，代表2个优化目标的重要度，其和为1。

2 螺旋桨的优化设计

以DTNSRDC4382桨为原型。该桨为五叶桨，取直径D=250 mm，设计工况进速系数J=0.889。对其弦长、螺距的径向分布进行优化，选取0.2R，

0.4R,0.7R,0.9R处的弦长、螺距作为控制点,其初值设置为原型桨的数值,变化范围设定为初值的0.9~1.1倍。基于遗传算法,对设计工况的性能按式(1)给出的目标函数进行优化,获得新桨的几何,并完成CFD计算。

图4给出了原桨的敞水试验数据与优化桨的推力系数和效率计算值的对比。由图可知,在相同的进速系数下,优化桨的推力比原桨高,但效率的计算值比原桨的低。

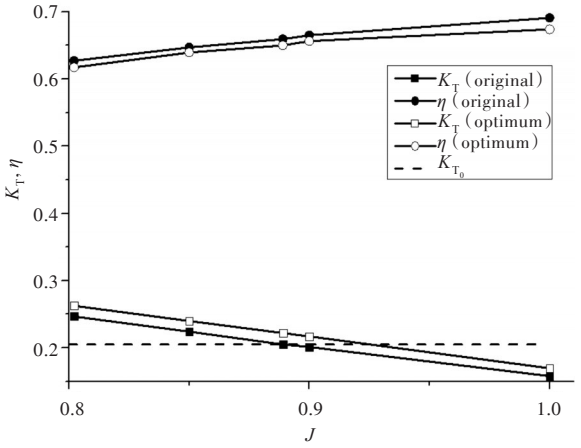


图4　优化桨与原桨性能对比

Fig.4　Performance comparison between original and optimum propeller

图4中的水平虚线对应原桨在设计处的推力系数,与优化桨推力曲线的交点处对应的进速系数约为0.92。根据设计目标,只有在优化桨的推力系数值高于水平虚线时,才能达到增加螺旋桨推力的效果。因此,尽管效率在随J的增加而增加,但优化桨的设计工况对应的进速系数仍不宜超过0.9。

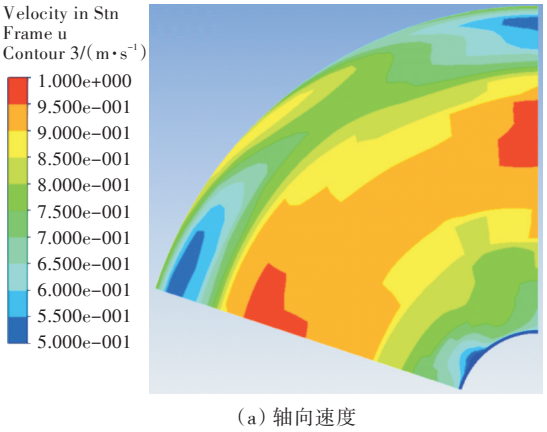
表1给出了优化桨的推力系数数值,以及以原桨设计工况的推力为基准的推力增值(ΔT)。从表中可知,当J=1.0时优化桨的效率最高,但其推力和原桨相比降低很多,因此不适合作为组合推进器中的桨型。对于J=0.889和J=0.9的情况,其推力比原桨分别增加了8.29%和5.85%。尽管效率值均未达到原桨的0.659,但仍比较接近。综合推力和效率的情况,认为J=0.889和J=0.9的情况较适合设计目标。

表1　优化桨推力系数增量及效率表

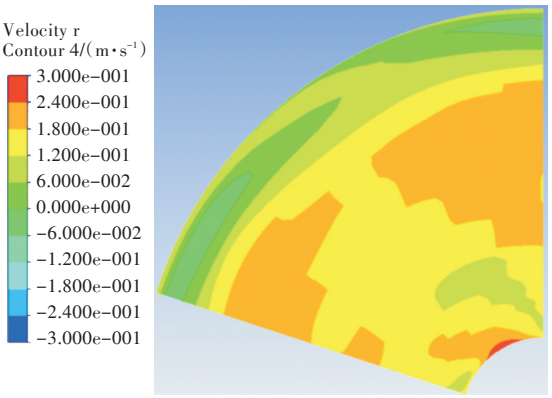
Table 1　Thrust increase and efficiency of optimum propeller

J	K_T	K_{T_0}	ΔT/%	η
0.8	0.263	0.205	28.29	0.617
0.85	0.240	0.205	17.07	0.639
0.889	0.222	0.205	8.29	0.650
0.9	0.217	0.205	5.85	0.656
1.0	0.170	0.205	−17.07	0.674

由于螺旋桨的存在,对尾流场造成了显著的扰动,使得尾流速度的轴向分量具有相当明显的不均匀性,也具有较大的周向速度。图5给出了螺旋桨尾流区剖面上的轴向、周向速度云图。从图中可知,轴向速度分布在0.5~1.0 m/s内时具有较显著的非均匀性,周向速度分布在0.12~0.24 m/s内时,与轴向速度分量的量级相比,周向速度的数值更小,但仍值得考虑。在对桨后发电机进行设计时,需充分考虑来流的非均匀性和周向速度,才能取得较好的设计效果。利用CFD后处理软件CFD-POST的功能,导出螺旋桨尾流区盘面上的各处速度矢量,形成数据文件,以供在对桨后发电机进行BEMT计算时读取。



(a) 轴向速度



(b) 周向速度

图5　螺旋桨尾流区域速度云图

Fig.5　Contours of velocity in propeller slipstream

3　桨后发电机的优化设计

3.1　二维翼型的优化设计

桨后发电机的设计以文献[5]给出的海流发电机叶型为基础叶型,对其所用的翼型、弦长和扭角分布进行优化。文献给出叶片所采用的翼型为NACA 63812~63824。其中,厚度较大的翼型布置在根部,厚度较小的翼型布置在梢部。这里,在厚度比为12%~24%范围内选取了4种翼型,即

NACA 63824，NACA 63818，NACA 63814 和 NACA 63812，分别对其进行优化。其中，前3种翼型布置在叶片的根部和中部，NACA 63812翼型布置在梢部。因此，这里对前3种翼型采用式(2)给出的目标函数进行优化，NACA 63812翼型按式(3)给出的目标函数进行优化。

图6给出了NACA 63818翼型优化前后的性能对比。新翼型在2°~9°攻角范围内升阻比相较于基础翼型有所提高，并延迟了失速攻角。而在进入深度失速阶段后，优化翼型的升阻比要低于初始翼型，由于不处在工作范围内，故对叶片的性能并无影响。总体而言，翼型在所设置攻角范围内的性能要优于原翼型，优化效果显著。

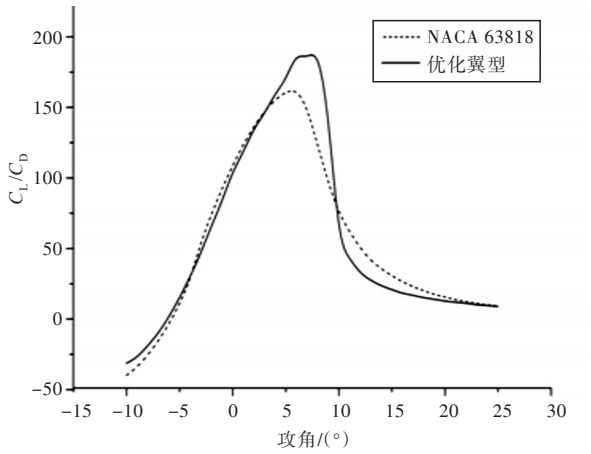


图6 NACA 63818翼型优化前后升阻比对比

Fig.6 Lift-drag ratio comparison for NACA 63818 before and after optimization

图7给出了5°攻角下NACA 63812翼型优化前后表面压力分布的对比。由图可知，优化后的翼型表面的压力分布比原始翼型更均匀，最小压力更小，发生空泡的可能性比原始翼型更低。因此，所获得的优化翼型达到了预定的优化效果。

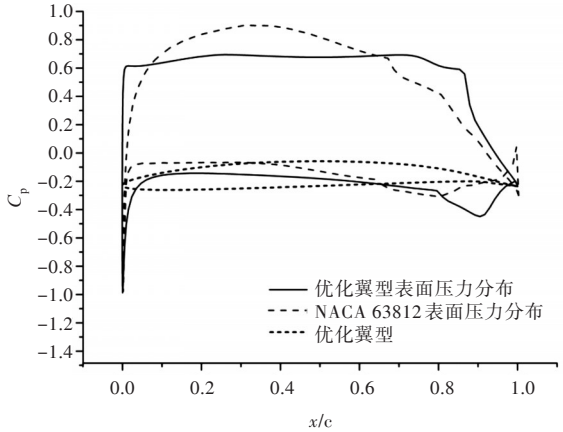


图7 NACA 63812翼型优化前后表面压力分布对比

Fig.7 Pressure distribution comparison for NACA 63812 before and after optimization

对于根据优化得到的4种新翼型，采用不同的权重因子进行组合，获得一系列不同厚度比的新翼型，用于三维叶片的优化设计。

3.2 三维叶片的优化设计

基于获得的优化翼型，对桨后发电机的叶型进行优化设计[6-7]。一方面，螺旋桨的设计为了增大效率尽量增大直径后，与船体间的间隙较小，因此桨后叶片的直径通常略小于桨叶，以保证后部叶片在前桨尾流中；另一方面，发电机涡轮叶片直径的增大有利于提升效率。本文考虑敞水情况，为充分利用尾流区域的能量，将发电机直径取为与螺旋桨相同。文献[1]对转速做了参数化分析，涡轮叶片较低的转速将导致阻力快速增加，根据本文中桨的设计点及涡轮机的理想进速，涡轮与桨的转速比约为0.5~1.0，因而在计算时考虑转速为螺旋桨的0.5倍。对0.2R，0.4R，0.6R，0.8R，1.0R处的叶片弦长、扭角以及选用翼型进行优化，基于GA程序和修正的BEMT程序，按式(5)给出的目标函数进行优化计算。对于获得的新桨的几何，建立三维几何模型，并与优化桨进行联合CFD计算。计算时，调整螺旋桨转速，分别取进速系数J=0.889和0.9，计算2种工况下的组合推进器性能。表2给出了2种方案与原桨相比的推力及数据。

表2 调整螺旋桨转速的组合推进器方案性能对比表

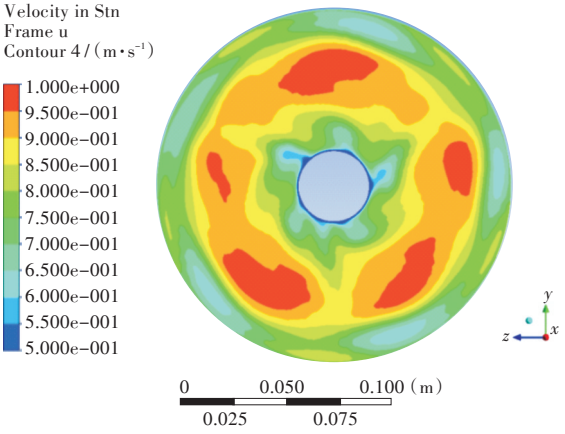
Table 2 Performance comparison of combine propulsor with variable rotational speed

对比项	原桨	组合推进器	
		J=0.889	J=0.9
T/N	7.185	7.477	7.103
P/W	7.268	7.434	7.019
ΔT/%	0.00	4.06	−1.14
ΔP/%	0.00	2.29	−3.43
η	0.659	0.671	0.675

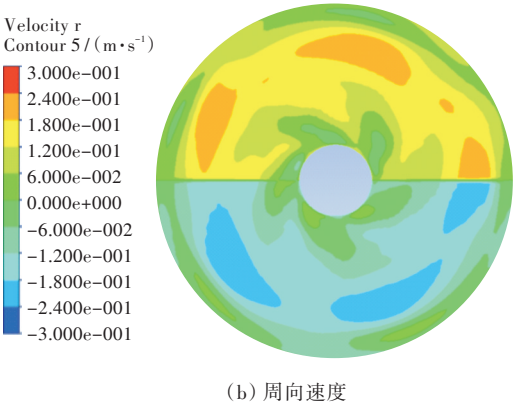
由表2可知，在螺旋桨进速系数不变的情况下，组合式推进器的推力比原桨提高了4.06%，但同时功率消耗也增加了2.29%。总体效率达0.671。调整螺旋桨转速后，组合推进器的推力、功率均比采用单桨时更低。在推力损失1.14%的情况下，船舶的总体功率消耗降低了3.43%；按式(4)和式(5)计算的效率达0.675，比调整螺旋桨转速前的组合推进器更高。前者提高了船舶的航速，而后者则可节约船舶的总体能耗。

图8给出了组合推进器尾流区域桨和发电机中间位置的轴向和周向速度云图。与图5相比，盘面上的轴向速度更小，表明布置了桨后发电机

后,螺旋桨尾流能在经过发电机时被吸收,从而使得轴向速度下降。同时,由于桨后发电机的布置,使得组合推进器对流体的轴向加速作用减弱,从而使得组合推进器的推力比采用优化桨单桨推进时更低。图8(b)所示的周向速度与图5相比显著降低,说明桨后发电机的布置使得螺旋桨的尾流旋转程度降低,可将流体旋转所具有的动能吸收用于推动发电机的转动,从而起到节能的作用,提高了能量的总体利用率。



(a) 轴向速度



(b) 周向速度

图8　组合推进器尾流区域速度云图

Fig.8　Contours of velocity in turbine slipstream

4　结　语

本文以一种新概念船舶节能装置作为研究对象,在船用螺旋桨后部布置尾流发电机,用于回收尾流能量。结合叶素动量理论、涡格法、遗传算法对组合推进器进行了设计,并通过CFD方法验证了方案的性能。研究显示,通过本文方法设计的组合推进器对船舶的总推进效率有一定提高作用。通过对螺旋桨进行微调,可以分别起到增加推力和降低能耗的效果。因此,用这种新概念推进器完成节能效果是可行的,有必要进行进一步的研究以获得更好的综合效果。

参考文献:

[1] LEE K J, BAE J H, KIM H T, et al. A performance study on the energy recovering turbine behind a marine propeller[J]. Ocean Engineering, 2014, 91: 152-158.

[2] 王国强, 董世汤. 船舶螺旋桨理论与应用[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学出版社, 2007.

[3] SAETA E. The blade element momentum method[M]. 2008.

[4] 李航. 船用螺旋桨及桨后发电机一体化设计方法研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2017.

[5] BAHAJ A S, BATTEN W M J, MCCANN G. Experimental verifications of numerical predictions for the hydrodynamic performance of horizontal axis marine current turbines[J]. Renewable Energy, 2007, 32(15): 2479-2490.

[6] YU L, LI H, HE Y P, et al. Development of an optimal approach from hydrofoil to blade for a horizontal axis marine current turbine[C]//Proceedings of the 26th International Ocean and Polar Engineering Conference. Rhodes Island, Greece: International Society of Offshore and Polar Engineers, 2016.

[7] LI H, ZHOU S Y, YU L, et al. Development of an optimal approach for hydrofoils and blades of marine current turbines[C]//Proceedings of the Second Conference of Global Chinese Scholars on Hydrodynamics. Wuxi, Jiangsu, China: [s.n.], 2016.