

# 平流层飞艇对转螺旋桨推进性能研究

张宇<sup>1</sup>, 王晓亮<sup>\*1</sup>, 马影<sup>2</sup>

(1. 上海交通大学 航空航天学院, 上海 200240;

2. 上海工程技术大学 航空运输学院, 上海 201620)

**摘要:** 为研究平流层飞艇对转螺旋桨安装参数对推进性能的影响, 探寻其效率提升的内因, 使用混合网格技术进行计算域离散, 采用基于 RANS 方程和 SST 湍流模型的求解器, 建立了多重参考系模型, 通过与由片条理论和遗传算法优化所得结果对比, 验证了数值方法的准确性. 对以 Clark Y 翼型设计的对转螺旋桨推进性能进行了研究, 分析了在不同前进比  $J$  和不同螺旋桨间距  $L$  情况下, 对转螺旋桨推力系数、扭矩系数和效率的变化. 结果表明, 在产生相同推力的情况下, 对转螺旋桨效率较单桨提高 13.3%, 综合扭矩仅为单桨的 4.8%; 随着  $L$  的增大, 推力系数和扭矩系数均有所上升, 当  $J=0.5$  时, 效率最高; 绝大多数情况下, 综合扭矩低于  $9 \text{ N} \cdot \text{m}$ , 对转螺旋桨前、后桨的推力比期望值为 1.29.

**关键词:** 平流层飞艇; 对转螺旋桨; 混合网格; 多重参考系; 计算流体力学

**中图分类号:** V211.3

**文献标识码:** A

**doi:** 10.7511/dllgxb202003001

## 0 引言

飞艇是一种典型平流层飞行器, 依托平流层空气对流强度小、风速稳定等优势, 飞艇能完成诸如中继通信、监察和运输等任务<sup>[1-3]</sup>. 飞艇一般以螺旋桨作为动力系统抵抗风阻, 完成长时定点驻留和可控飞行任务<sup>[4-5]</sup>. 平流层环境与地面大为不同, 最主要的区别在于空气密度小、运动黏度大, 因此常规螺旋桨效率在平流层环境会大打折扣. 此外, 飞艇的长航时特点需要推进系统能以较高效率运行, 这样能有效降低能源消耗, 提高飞艇寿命.

在同一轴线的内外轴上分别安装转向相反、转速相同的螺旋桨即构成对转螺旋桨<sup>[6-8]</sup>. 因为前后螺旋桨的转向相反, 故后桨可部分吸收由前桨引起的尾涡能量损失, 从而提高推进效率, 此外其综合扭矩几乎为 0. 目前, 对转螺旋桨已经应用到船舶、潜艇、鱼雷和无人机上. Nouri 等<sup>[9]</sup> 基于 RANS 方程, 使用遗传算法和克里金法对海用对转螺旋桨进行了优化. Huang 等<sup>[10]</sup> 基于叶素理论, 使用结合了响应面和遗传算法的多目标优化方法, 对原螺旋桨的叶素剖面进行了优化, 结果表

明对转螺旋桨可有效提高推进功率系数和推力系数. 陈彦勇等<sup>[11]</sup> 从噪声性能和强度两方面研究了大侧倾对转螺旋桨在鱼雷上的应用, 研究结果对鱼雷用螺旋桨的设计具有参考价值. 侯立勋等<sup>[12]</sup> 采用螺旋桨的漩涡理论分别对前桨和后桨进行设计, 结果表明该方法设计的对转螺旋桨与单桨相比效率可提高 10.24%. 郑健等<sup>[13]</sup> 研究了对转螺旋桨的敞水性能, 通过尾流场切向速度分布发现, 对转螺旋桨可大幅度回收前桨损失的周向涡动能. De Giorgi 等<sup>[14]</sup> 通过开源软件 OpenFOAM 分析了远程无人机上对转螺旋桨的旋转角速度、后桨桨距和前进比对推进性能的影响.

由此可见, 对转螺旋桨的应用价值极大, 但目前少见其应用于平流层飞艇上. 鉴于此, 本文基于 RANS 方程和 SST 湍流模型, 使用多重参考系 (MRF) 方法研究针对飞艇设计的对转螺旋桨的推进性能, 着重研究不同前、后桨间距和不同前进比对推力系数、扭矩系数和推进效率的影响.

## 1 计算模型

本文所用两叶对转螺旋桨模型来源于课题组

收稿日期: 2019-09-05; 修回日期: 2020-03-25.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(61733017); 上海市自然科学基金资助项目(18ZR1419000).

作者简介: 张宇(1996-), 男, 硕士生, E-mail: sjktyz@sjtu.edu.cn; 王晓亮\*(1975-), 男, 博士, 副研究员, 硕士生导师, E-mail: wangxiaoliang@sjtu.edu.cn.

针对某型飞艇自主研发的螺旋桨设计程序,该模型的基础剖面翼型为 Clark Y. 计算域模型如图 1 所示,整个模型包括两个旋转域和一个静止域, MRF\_F 和 MRF\_A 分别为包含前螺旋桨 PROP\_F 和后螺旋桨 PROP\_A 的旋转域, FLUID 为静止域. 旋转域与静止域和两旋转域之间的交界面均为 Interface 类型,通过插值进行数值传递.

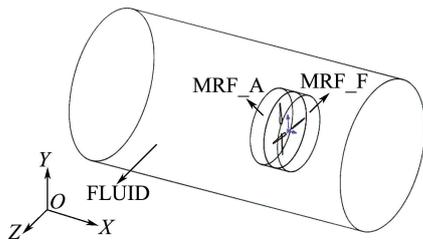


图 1 计算模型区域划分

Fig. 1 Division of the domain of the calculation model

图 2 为计算域尺寸(经缩放处理). 螺旋桨直径  $D_p$  为 4.6 m, 桨毂直径为 0.92 m, 桨根弦长为 0.22 m, 桨尖弦长为 0.067 m, 桨尖扭转角为  $21.3^\circ$ . 入口边界到旋转域 MRF\_F 的距离为  $10D_p$ , 旋转域 MRF\_A 到出口边界的距离为  $30D_p$ , 螺旋桨中心与远场壁面的距离为  $8D_p$ , 前桨与后桨的距离为  $L$ , 旋转域 MRF\_F 和 MRF\_A 的直径为  $1.5D_p$ , 旋转域 MRF\_F 右边界距离前桨  $0.25D_p$ , 旋转域 MRF\_A 左边界距离后桨  $0.25D_p$ .

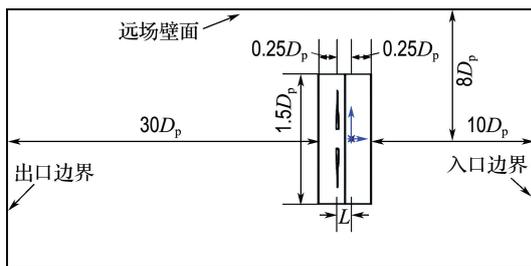


图 2 计算模型尺寸示意图

Fig. 2 Schematic diagram of the calculation model size

网格划分工具为 ICM CFD, 由于螺旋桨表面扭曲程度较大, 使用结构网格很难保证质量, 故在旋转域内采取非结构网格划分. 在静止域采用结构网格划分. 为实现对黏性效应的准确捕捉, 在螺旋桨表面及其周围区域进行更为细致的网格划分, 在螺旋桨表面扫掠生成四边形网格, 第一层网格高度  $10^{-5}$  m, 网格法向增长率 1.2, 共伸长 15 层.

## 2 数值方法

本文数值计算均由商业软件 FLUENT 16.0 实现. 通过求解基于 MRF 方法和 SST 湍流模型的 RANS 方程得到流场解. 压力-速度耦合格式为“Coupled”, 空间梯度离散格式为“least squares cell based”, 压力项采用二阶离散格式, 湍动能和能量耗散率采用二阶迎风离散格式.

### 2.1 MRF 方法

MRF 方法通过求解准静态 RANS 方程获取旋转域内流场信息. 首先在物体周围建立圆柱形包裹区域, 设定该区域旋转角速度, 并使该区域内物面以同一角速度随动. 忽略所有时间相关变量和流动不确定因素, 被指定为 MRF 区域的网格不会发生运动, 所得解为流场充分发展时的稳态解. 尽管该方法是一种近似方法, 与瞬态方法有一定差异, 但对于许多情况依然具有很高的可信度, 且该模型所需计算资源较瞬态方法低很多<sup>[15-16]</sup>.

### 2.2 SST 湍流模型

SST 湍流模型能更好地模拟逆压梯度流动和翼型边界层流动. 该模型额外计算了湍流切应力输运方程, 因此能更准确地预测流动分离情况<sup>[17]</sup>.

湍动能  $k$  和湍流比耗散率  $\omega$  的输运方程为

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \Gamma_k \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) + G_k - Y_k + S_k \quad (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \omega) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \omega u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \Gamma_\omega \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right) + G_\omega - Y_\omega + S_\omega \quad (2)$$

式中:  $G_k$  和  $G_\omega$  分别为由平均速度梯度引起的湍动能和耗散率增加量;  $\Gamma_k$  和  $\Gamma_\omega$  为对应物理量实际扩散率;  $Y_k$  和  $Y_\omega$  分别为因湍流引起的湍动能和耗散率衰减;  $S_k$  和  $S_\omega$  为用户自定义源项, 取为 0.

### 2.3 边界条件

除特殊说明外, 文中均取海拔 20 km 处空气特性参数作为数值模拟输入条件, 该海拔高度下空气密度为  $0.0889 \text{ kg/m}^3$ , 运动黏度为  $1.4216 \times 10^{-5} \text{ N} \cdot \text{m/s}^2$ , 压强为  $5529.31 \text{ Pa}$ . 入口边界定义为速度入口, 考虑到平流层飞艇典型速度为  $5 \sim 15 \text{ m/s}$ <sup>[18]</sup>, 取来流速度为  $10 \text{ m/s}$ ; 出口边界定义为压力出口, 表压为 0; 远场壁面定义为无滑移壁面. 取桨叶半径 70% 处的翼型弦长作为特征长度, 特征长度为  $0.248 \text{ m}$ , 螺旋桨转速  $400 \text{ r/min}$  时对应雷诺数约为  $105400$ , 湍流强度约为  $3.77\%$ , 湍动能约为  $0.213 \text{ m}^2/\text{s}^2$ , 湍流比耗散率

约为  $20.42 \text{ s}^{-1}$ . 其余转速下雷诺数、湍流强度等参数可依此类推.

### 2.4 方法验证

本节主要验证 MRF 方法和 SST 湍流模型的可靠性. 本文数值方法的可靠性验证从两方面展开. 一方面, 要避免由网格数量带来的计算误差, 故有必要进行网格独立性检验; 另一方面, 数值方法的准确与否要与设计优化结果进行对比验证.

本节验证对象为单螺旋桨, 螺旋桨转速为  $400 \text{ r/min}$ . 前进比  $J$ 、推力系数  $K_T$ 、扭矩系数  $K_Q$  和推进效率  $\eta$  的定义式分别为

$$J = \frac{v}{nD_p} \quad (3)$$

$$K_T = \frac{T}{\rho n^2 D_p^4} \quad (4)$$

$$K_Q = \frac{Q}{\rho n^2 D_p^5} \quad (5)$$

$$\eta = \frac{K_T J}{2\pi K_Q} \quad (6)$$

式中:  $v$  为来流速度 ( $\text{m/s}$ ),  $n$  为转动角速度 ( $\text{r/s}$ ),  $\rho$  为空气密度 ( $\text{kg/m}^3$ ),  $T$  为螺旋桨推力 ( $\text{N}$ ),  $Q$  为螺旋桨扭矩 ( $\text{N}\cdot\text{m}$ ).

2.4.1 网格无关性检验 数值计算结果主要由螺旋桨表面沿桨径的网格份数  $p$  决定.  $p$  越大, 则网格越密, 反之越疏. 取海平面处的空气作为介质, 表 1 统计了取不同  $p$  时, 推力系数、扭矩系数和推进效率的变化情况, 其中  $S$  表示网格数量.

表 1 网格无关性检验

Tab. 1 Grid independence study

等级	$p$	$S/10^6$	$K_T/10^{-2}$	$K_Q/10^{-3}$	$\eta/\%$
粗糙	90	1.90	5.776	4.855	61.75
中等	200	2.77	5.863	4.790	63.53
精细	300	3.48	5.907	4.830	63.47

由表 1 可知, 当  $p$  取为 200 时, 计算结果几乎不会随网格密度变化而变化, 此时可以认为计算结果与网格无关, 螺旋桨表面网格如图 3 所示.

2.4.2 理论结果对比 为了验证数值方法准确性, 对比了转速为 350、400、450、500、550、600、650、700、750  $\text{r/min}$  时由数值计算与由片条理论和遗传算法所得结果. 图 4 为上述转速下的推进效率变化曲线, 理论方法与数值方法所得结果相对误差期望为 4.3%, 且变化趋势保持一致. 可见本文数值方法能很好地预测螺旋桨的推进特性.

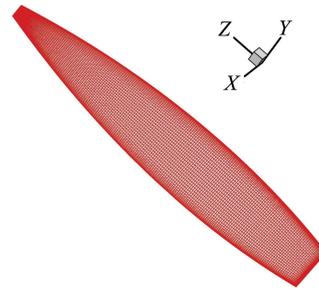


图 3  $p=200$  时螺旋桨表面网格

Fig. 3 Propeller surface grid when  $p$  equals 200

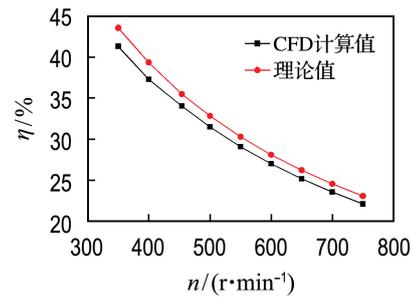


图 4 数值方法与理论方法的效率曲线对比

Fig. 4 Comparison of efficiency curves between numerical method and theoretical method

## 3 结果和讨论

式(4)~(6)应用到对转螺旋桨时, 相应参数需做调整:

$$K_{T,eq} = (T_f + T_a) / \rho n^2 D_p^4 \quad (7)$$

$$K_{Q,eq} = (|Q_f| + |Q_a|) / \rho n^2 D_p^5 \quad (8)$$

$$\eta_{eq} = K_{T,eq} J / 2\pi K_{Q,eq} \quad (9)$$

式中: 下标 eq 表示对转螺旋桨前、后桨的综合效果, 下标 f 表示前桨, 下标 a 表示后桨.

取前、后桨间距  $L$  为  $0.1D_p$ 、 $0.2D_p$ 、 $0.3D_p$  和  $0.4D_p$ ; 取前进比  $J$  为 0.1、0.2、0.3、0.4、0.5 和 0.6. 前进比  $J$  通过改变转速  $n$  来调整.

### 3.1 对转螺旋桨节能效果分析

在产生相同推力的情况下, 单桨(只保留对转螺旋桨中的前桨)所承受的负荷大, 而对转螺旋桨是前、后桨共同承担负荷, 因此对转螺旋桨的推进效率较单桨高. 表 2 为在  $L=0.1D_p$  模式下, 单桨与对转螺旋桨产生相同推力时, 扭矩和推进效率的对比. 从扭矩对比可知, 对转螺旋桨产生的综合扭矩为  $-2.44 \text{ N}\cdot\text{m}$ , 仅是单桨的 4.8%, 这将易于飞艇对飞行姿态的调整; 其次是推进效率, 在相同推力下, 对转螺旋桨的效率提高达 13.3%.

表 2 对转螺旋桨与单桨的对比

Tab.2 Comparison between CRP and single propeller

桨型	$T/N$	$J$	$Q/(N \cdot m)$	$\eta/\%$
单桨	167.5	0.14	-50.40	34.4
对转螺旋桨	167.5	0.30	-2.44	47.7

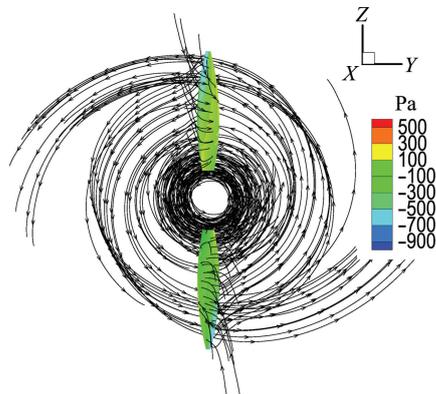
此时对转螺旋桨前桨产生的推力为 95.0 N, 后桨推力为 72.5 N, 为了探究对转螺旋桨效率提高的原因, 现将对转螺旋桨中的前、后桨单独提取分析. 表 3 统计了单独的前、后桨产生上述推力时的性能表现, 此时前桨转速为 353.2 r/min, 后桨转速为 315.3 r/min.

表 3 单独的前、后螺旋桨推进性能

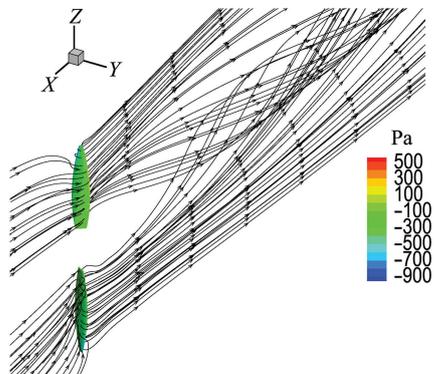
Tab.3 Propulsion performance of PROP\_F and PROP\_A

桨型	$T/N$	$J$	$Q/(N \cdot m)$	$\eta/\%$
单独前桨	95.0	0.18	-31.2	41.2
单独后桨	72.5	0.21	24.6	44.6

单桨和对转螺旋桨流线图如图 5、6 所示. 单桨尾流会互相交错, 形成网状漩涡. 对比图 6(a)、



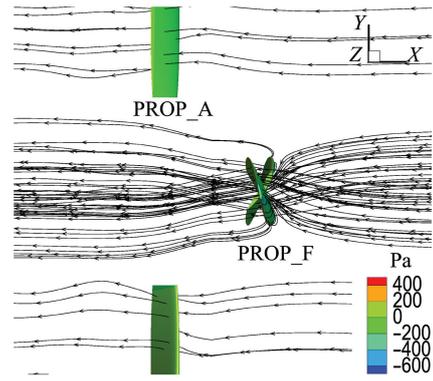
(a) 单桨正视方向流线图



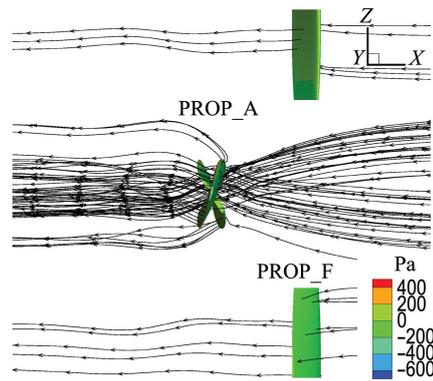
(b) 单桨空间流线图

图 5 单桨流线图

Fig. 5 Streamline diagram of single propeller



(a) 对转螺旋桨的前桨流线图



(b) 对转螺旋桨的后桨流线图

图 6 对转螺旋桨流线图

Fig. 6 Streamline diagram of CRP

(b)可知:后桨来流受前桨压迫,会出现明显的气流压缩,这将减少由于气流波动带来的能量耗散;由于受后桨约束,前桨尾流包络面呈现出先缩小再扩大现象,这点明显区别于图 6(b)中后桨尾流包络面的直接扩张现象. 综合而言,由于前、后桨的相互约束,流动受限,能量耗散降低.

综上所述,对转螺旋桨在产生与单桨相同推力情况下,由于是前、后桨同时分担推力,作用在每对螺旋桨叶上的荷载较单桨大大降低. 由动量定理可知螺旋桨推力系数随着经过螺旋桨后气流流速的加速比  $a$  的增大而增大,而推进效率  $\eta$  的变化趋势与  $a$  相反,因此推力系数越大,螺旋桨推进效率越低,反之推进效率越高. 因此在同时分担荷载情况下,对转螺旋桨系统的推进效率会有所提高. 加之前、后桨的相互约束,使得流场的能量耗散程度降低. 这两方面原因使对转螺旋桨在相同推力输出下具有更高的推进效率.

### 3.2 $L$ 与 $J$ 对推进性能的影响

在不同前、后桨间距  $L$  下,推力系数、扭矩系数和推进效率随前进比  $J$  的变化规律如图 7~9

所示. 从图 7、8 可知, 不论  $L$  取何值, 推力系数与扭矩系数均随  $J$  的增大而降低, 说明这两个系数的变化趋势与  $L$  无关.

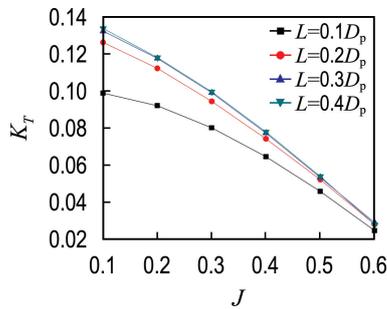


图 7 推力系数  $K_T$  随参数  $L$  和  $J$  的变化  
Fig. 7 The variation of thrust coefficient  $K_T$  with parameters  $L$  and  $J$

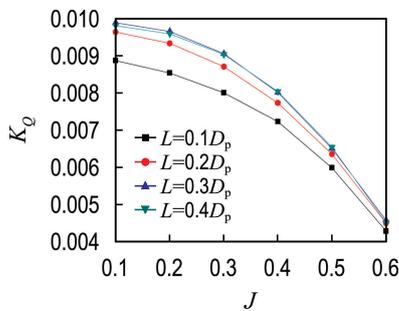


图 8 扭矩系数  $K_Q$  随参数  $L$  和  $J$  的变化  
Fig. 8 The variation of torque coefficient  $K_Q$  with parameters  $L$  and  $J$

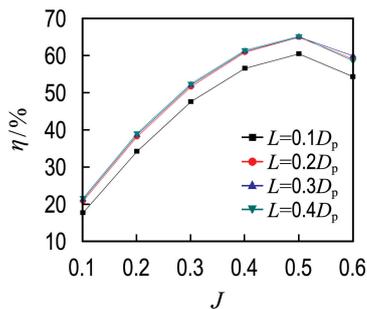


图 9 推进效率  $\eta$  随参数  $L$  和  $J$  的变化  
Fig. 9 The variation of propulsion efficiency  $\eta$  with parameters  $L$  and  $J$

另外, 随前、后桨间距增大, 推力系数和扭矩系数均有所上升, 在  $L=0.1D_p$  时取最小值, 但这种差异会随着前进比增大而逐渐减小. 当  $L \geq 0.2D_p$  时, 推力系数和扭矩系数几乎不再改变, 原因在于随着  $L$  增大, 前、后桨的干扰逐渐削弱, 当达到一定距离时, 这种干扰将被忽略, 体现在数值

上的结果就是  $K_T$  和  $K_Q$  几乎不再变化.

由图 9 可知, 在整个前进比变化过程中, 推进效率并不是单调递增, 当  $J=0.5$  时, 推进效率取极大值. 并且随着  $L$  增大, 推进效率也会增大, 一旦  $L \geq 0.2D_p$ , 推进效率将不会被  $L$  的取值所影响. 因此在对转螺旋桨的实际使用过程中, 往往需要选取合适的前、后桨间距  $L$ , 使得产生的推力足以抵御风阻, 同时要兼顾前进比  $J$ , 使对转螺旋桨在发挥最大效率的同时, 能满足动力输出.

本文中, 当  $L$  取  $0.2D_p$  时, 能较好地满足要求, 至于前进比  $J$ , 须从效率和动力两方面综合衡量才能给予适当的取值.

### 3.3 对转螺旋桨扭矩平衡及推力比

推进过程中, 前、后桨产生方向相反的扭矩, 其中前桨产生负向扭矩, 后桨产生正向扭矩, 两者能大幅度相互抵消, 使推进系统吸收的综合扭矩  $Q_{re}$  极小, 这是对转螺旋桨另一大优势. 图 10 展示了本文案例综合扭矩随  $L$  和  $J$  的变化情况.

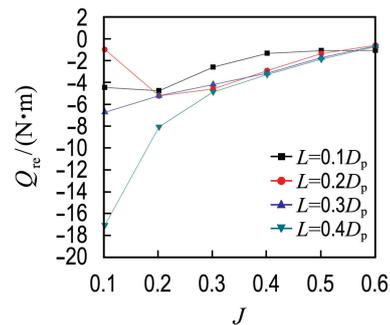


图 10 综合扭矩的变化情况  
Fig. 10 Changes of resultant torque

综合扭矩总是取负值, 说明前桨吸收扭矩总大于后桨. 综合扭矩(绝对值, 后同)最大  $17 \text{ N} \cdot \text{m}$ , 绝大多数低于  $9 \text{ N} \cdot \text{m}$ . 总体而言, 综合扭矩随着前进比  $J$  增大而逐渐降低, 且前、后桨间距越小, 综合扭矩越小, 扭矩平衡效果越好. 当  $J$  取  $0.1$  和  $0.2$  时, 前、后桨间距  $L=0.4D_p$  的综合扭矩较其他桨间距差异较大,  $L \leq 0.3D_p$  时扭矩平衡效果较好. 当  $J \geq 0.3$  时, 由前、后桨间距带来的差异又将缩小. 因此, 出于对扭矩平衡的考虑, 可适当缩小前、后桨间距  $L$  以期取得较好平衡效果.

前、后桨推力关系如图 11 所示, 纵坐标为前、后桨推力比  $\lambda$ , 可知随参数变化  $\lambda$  并不会有明显改变, 所有  $\lambda$  处在  $1.23 \sim 1.35$ . 图 11 说明了对转

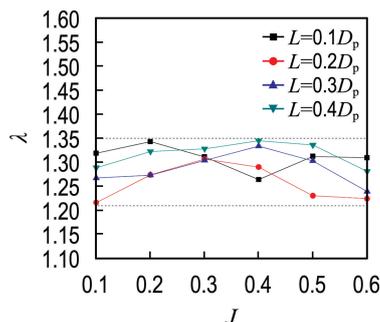


图 11 推力比的变化情况

Fig. 11 Changes of thrust ratio

螺旋桨前、后桨推力的分配规律,推力比期望值  $E(\lambda)=1.29$ . 在已知综合推力情况下,应用该期望可以比较准确地预测出前、后桨分担的推力.

## 4 结 论

(1) SST 湍流模型和 MRF 方法能较好地预测螺旋桨流场信息.

(2) 对转螺旋桨的综合扭矩远低于单桨;对转螺旋桨效率的提高主要由分荷载的降低和前、后桨相互约束引起.

(3) 当  $J=0.5$  时,对转螺旋桨效率取极大值,并随  $L$  的增大而增大.当  $L \geq 0.2D_p$  时,推力系数、扭矩系数和推进效率几乎不再改变.对转螺旋桨前、后桨的推力比期望值  $E(\lambda)=1.29$ .

(4) 综合推进性能和扭矩平衡,可取对转螺旋桨前、后桨间距  $L=0.2D_p$ .

## 参 考 文 献:

[1] COLOZZA A, DOLCE J L. High-altitude, long endurance airships for coastal surveillance: NASA/TM-2005-213427 [R]. Cleveland: NASA Glenn Research Center, 2005.

[2] YOUNG M, KEITH S, PANCOTTI A. An overview of advanced concepts for near-space systems [C] // **45th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference and Exhibit**. Reston: American Institute of Aeronautics and Astronautics, 2009.

[3] 陈宇峰,陈务军,何艳丽,等. 柔性飞艇及其悬挂屏体系结构力学性能分析 [J]. 哈尔滨工程大学学报, 2014, **35**(7): 826-832.  
CHEN Yufeng, CHEN Wujun, HE Yanli, *et al.* Structural performance analysis of a flexible airship and its suspended curtain [J]. **Journal of Harbin**

**Engineering University**, 2014, **35**(7): 826-832. (in Chinese)

[4] 赵 达,刘东旭,孙康文,等. 平流层飞艇研制现状、技术难点及发展趋势 [J]. 航空学报, 2016, **37**(1): 45-56.  
ZHAO Da, LIU Dongxu, SUN Kangwen, *et al.* Research status, technical difficulties and development trend of stratospheric airship [J]. **Acta Aeronautica et Astronautica Sinica**, 2016, **37**(1): 45-56. (in Chinese)

[5] 焦 俊,宋笔锋,张玉刚,等. 高空飞艇螺旋桨优化设计与气动性能车载试验 [J]. 航空动力学报, 2017, **32**(1): 196-202.  
JIAO Jun, SONG Bifeng, ZHANG Yugang, *et al.* Optimal design and truck-mounted testing of aerodynamic performance for the propeller of high altitude airship [J]. **Journal of Aerospace Power**, 2017, **32**(1): 196-202. (in Chinese)

[6] LEE Kyungjun, BAE Joonhwan, KIM Heetaek, *et al.* A performance study on the energy recovering turbine behind a marine propeller [J]. **Ocean Engineering**, 2014, **91**: 152-158.

[7] NAN Ding, SHIGEMITSU T, ZHAO Shengdun, *et al.* Study on performance of contra-rotating small hydro-turbine with thinner blade and longer front hub [J]. **Renewable Energy**, 2018, **117**: 184-192.

[8] KRAVITZ E. Analysis and experiments for contra-rotating propeller [D]. Boston: Massachusetts Institute of Technology, 2011.

[9] NOURI N M, MOHAMMADI S, ZAREZADEH M. Optimization of a marine contra-rotating propellers set [J]. **Ocean Engineering**, 2018, **167**: 397-404.

[10] HUANG B, KANEMOTO T. Multi-objective numerical optimization of the front blade pitch angle distribution in a counter-rotating type horizontal-axis tidal turbine [J]. **Renewable Energy**, 2015, **81**: 837-844.

[11] 陈彦勇,高咏涛,夏 雨. 大侧斜对转螺旋桨在鱼雷上的应用研究 [J]. 船舶力学, 2008, **12**(2): 231-236.  
CHEN Yanyong, GAO Yongtao, XIA Yu. Application of high-skewed contra-rotating propeller for the torpedoes [J]. **Journal of Ship Mechanics**, 2008, **12**(2): 231-236. (in Chinese)

[12] 侯立勋,王 超,黄 胜. 对转桨综合设计方法研究 [J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2014, **42**(1): 49-52.  
HOU Lixun, WANG Chao, HUANG Sheng.

- Comprehensive design method research on contra-rotating propeller [J]. *Journal of Huazhong University of Science and Technology (Natural Science Edition)*, 2014, **42**(1): 49-52. (in Chinese)
- [13] 郑健,何东亚,万德成. 对转桨叶数比对散水性能影响的CFD分析[J]. *水动力学研究与进展*, 2018, **33**(2): 169-175.  
ZHENG Jian, HE Dongya, WAN Decheng. Numerical analysis of different blade number ratios influence on open water performance of CRPs based on CFD method [J]. *Chinese Journal of Hydrodynamics*, 2018, **33**(2): 169-175. (in Chinese)
- [14] DE GIORGI M G, DONATEO T, FICARELLA A, *et al.* Numerical investigation of the performance of contra-rotating propellers for a remotely piloted aerial vehicle [C] // *ATI 2017 - 72nd Conference of the Italian Thermal Machines Engineering Association*. Lecce: Elsevier Ltd., 2017: 1011-1018.
- [15] 王科雷,祝小平,周洲,等. 低雷诺数分布式螺旋桨滑流气动影响[J]. *航空学报*, 2016, **37**(9): 2669-2678.  
WANG Kelei, ZHU Xiaoping, ZHOU Zhou, *et al.* Distributed electric propulsion slipstream aerodynamic effects at low Reynolds number [J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2016, **37**(9): 2669-2678. (in Chinese)
- [16] 孙威,高正红,黄江涛,等. 旋转机翼悬停气动特性研究[J]. *空气动力学学报*, 2015, **33**(2): 232-238.  
SUN Wei, GAO Zhenghong, HUANG Jiangtao, *et al.* Aerodynamic characteristics of hovering rotor/wing [J]. *Acta Aerodynamica Sinica*, 2015, **33**(2): 232-238. (in Chinese)
- [17] MENTER F R. Review of the shear-stress transport turbulence model experience from an industrial perspective [J]. *International Journal of Computational Fluid Dynamics*, 2009, **23**(4): 305-316.
- [18] 雷光新,刘巍,杨涛,等. 平流层飞艇螺旋桨设计参数对效率的影响[J]. *计算机仿真*, 2011, **28**(5): 56-59.  
LEI Guangxin, LIU Wei, YANG Tao, *et al.* Design parameters effects on propeller efficiency of stratosphere airship [J]. *Computer Simulation*, 2011, **28**(5): 56-59. (in Chinese)

## Study of propulsion performance of contra-rotating propellers for stratospheric airship

ZHANG Yu<sup>1</sup>, WANG Xiaoliang<sup>\*1</sup>, MA Ying<sup>2</sup>

( 1. School of Aeronautics and Astronautics, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China;

2. School of Air Transportation, Shanghai University of Engineering Science, Shanghai 201620, China )

**Abstract:** In order to study the influence of the installation parameters of the stratospheric airship contra-rotating propellers (CRP) on the propulsion performance and explore the internal factors of its efficiency improvement, the hybrid grid technique is used to discretize the computational domain, and the multi-reference frame model is established with using the solver based on Reynolds averaged Navier-Stokes (RANS) equations and SST turbulence model. The accuracy of the numerical method is verified by comparison with results obtained by strip theory and genetic algorithm. The propulsion performance of CRP designed with Clark Y airfoil is studied. The variation of thrust coefficient, torque coefficient and efficiency of the propellers is analyzed under different forward ratios  $J$  and different propeller spacing  $L$ . The results show, in the case of the same thrust, the efficiency of CRP is 13.3% higher than that of the single propeller, and the resultant torque is only 4.8% of the single propeller; as  $L$  increases, the thrust and torque coefficients both rise, when  $J$  equals 0.5, the efficiency is the highest; in most cases, the resultant torque is less than 9 N·m, and the average thrust ratio of the front and rear propellers is 1.29.

**Key words:** stratospheric airship; contra-rotating propellers; hybrid grid; multi-reference frame; computational fluid dynamic