

平流层飞艇螺旋桨布局对蒙皮表面对流换热系数影响数值仿真研究

张宇, 谢炜程, 王晓亮

(上海交通大学 航空航天学院, 上海 200240)

摘要: **目的** 降低蒙皮以及囊体内部氦气的昼夜温差。**方法** 基于成熟的CFD数值分析软件FLUENT, 针对头部、两侧以及尾部螺旋桨布局下其尾流对于蒙皮表面气流速度分布的影响进行比较分析。**结果** 侧部和尾部布局的螺旋桨, 在来流速度15 m/s条件下, 经过螺旋桨的气流加速后, 速度最高可达约32 m/s, 加速比约为2.13, 会使强迫对流换热系数增加为原来的2倍。头部螺旋桨布局可提高整个飞艇外表面的速度, 增强其强迫对流特性。**结论** 螺旋桨布局在艇身两侧和尾部, 可改变艇身局部区域的流场速度, 增强局部热的强迫对流特性。

关键词: 飞艇; 螺旋桨; 蒙皮热特性; 平流层; CFD

DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2020.01.005

中图分类号: V274 **文献标识码:** A

文章编号: 1672-9242(2020)01-0025-06

Numerical Simulation on Influences of Stratospheric Airships Envelope with Different Layouts of Propeller on Convective Heat Transfer Coefficient on Envelope

ZHANG Yu, XIE Wei-cheng, WANG Xiao-liang

(School of Aeronautics and Astronautics, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200240, China)

ABSTRACT: The purpose aims to reduce the diurnal temperature variation of helium in envelope and helium. Based on mature CFE numerical analysis software-FLUENT, the influences of airflow velocity distribution on envelope under the propeller layout of head, both sides and tail were compared. For the layout of propeller mounted the side and tail of airship, the airflow speed could reach up to about 32m/s accelerated by the propeller at inflow speed of 15m/s, the acceleration ratio was about 2.13, which would increase the forced convective heat transfer coefficient by twice. The layout of propeller mounted the head of airship could increase the velocity of envelope and reduce the temperature difference of envelope and helium. The layout of propeller mounted the side and tail of airship can increase the local velocity of envelope and reduce the local temperature difference of envelope and helium.

KEY WORDS: airship; propeller; thermal characteristics of envelope; stratosphere; CFD

收稿日期: 2019-12-16; 修订日期: 2019-12-17

Received: 2019-12-16; Revised: 2019-12-17

基金项目: 国家自然科学基金项目基金(61733017); 上海市自然科学基金(18ZR1419000)

Fund: Supported by the National Natural Science Foundation of China(61733017); Shanghai Natural Science Foundation(18ZR1419000)

作者简介: 张宇(1996—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为计算流体力学。

Biography: ZHANG Yu(1996—), Male, Master student, Research focus: computational fluid mechanics.

通讯作者: 王晓亮(1975—), 男, 博士, 副研究员, 主要研究方向为流体力学。

Corresponding author: WANG Xiao-liang(1975—), Male, Doctor, Associate researcher, Research focus: fluid mechanics.

相比于其他飞行器,平流层飞艇具有搭载能力强、驻空时间长以及定点等显著优势,得到了各国的广泛研究^[1-6]。平流层飞艇在其驻空过程中,外界热环境具有周期时变性,且来流风速和方向也具有随机时变性。20 km 平流层高度的大气密度约为 0.0889 kg/m^3 ,空气相对稀薄,因此所设计的平流层飞艇体积庞大。在驻空过程中,其囊体结构以及内部气体的热特性受自身材料热属性、外部环境热源及囊体内外换热方式的影响极大。飞艇在具有一定的飞行空速下,囊体外部的强迫对流可抑制囊体自身及其内部氦气的温差,有效降低飞艇昼夜的超冷超热程度,从而会减缓对飞艇浮力、蒙皮应力水平以及整个飞艇的变形。这些因素的减缓对于飞艇飞行性能的改善具有一定的意义。因此,在整个飞艇设计时,可根据其自身各系统的设计以及布局,增强囊体外部强迫对流,可增强飞艇的性能。

对于增强飞艇外部强迫对流,可采用提高飞艇飞行速度的方式,也可以利用飞艇上所布置的推进螺旋桨^[7]的尾流。螺旋桨在产生推力的同时,会形成具有较大速度的尾流场。尾流场的充分利用可在一定程度上抑制飞艇昼夜的超冷超热特性。在飞艇和螺旋桨研究中,以往主要侧重于螺旋桨和飞艇的气动特性,以及螺旋桨与艇身干扰下气动特性方面的研究。刘远强等^[8]基于 RANS 方程和 SST 湍流模型的 MRF 方法对螺旋桨进行了高精度滑流准定常数值模拟和性能计算。Long Y 等^[9]求解了基于 SST k- ω 湍流模型旋转坐标下的螺旋桨绕流场,与实验的对比结果显示,推力系数仅相差 0.96%,验证了数值模拟方法的准确性。刘沛清等^[10]建立了平流层飞艇螺旋桨的相似准则,表明螺旋桨地面风洞中可根据等雷诺数和前进比相似进行缩比实验。Lutz 等^[11]通过在艇身布置周向分布的点源/汇,从而得到了压力场和速度场,并利用边界层模型得到了不同雷诺数下的最小阻力外形。Geruti A 等^[12]基于粒子群优化算法(PSO)提出了适用于考虑附加质量的非常规布局飞艇的优化框架。Kanikdale T S 等^[13]采用 GNVR 作为飞艇基础外形,提出了飞艇外形的多变量约束方法,并用模拟退火算法对外形进行了优化。

在螺旋桨和艇身干扰方面,林瑞坤等^[14]通过 FLUENT6.3 采用 Realizable k- ϵ 湍流模型和多重参考系方法模拟了带螺旋桨的平流层飞艇周围流场。其结果表明,螺旋桨距离飞艇尾部越近,对飞艇气动特性影响越大,且飞艇气动系数随螺旋桨推力系数的增大而增大。Xie F 等^[15]将真实螺旋桨视为压力盘,模拟了具有螺旋桨吹气作用的飞艇绕流场。其结果表明,螺旋桨的吹气作用可以使艇身表面的分离涡脱离,从而减少绕流的压差阻力。

20 世纪 80 年代,国外许多学者就开始对飞艇热特性开展研究。近年来,国内学者对平流层飞艇热特

性模型的研究也在持续发展,取得了一定的成果。2007 年,方贤德等^[16]建立了瞬态运动方程和传热模型。2009 年,徐向华等^[17]用 Fluent 对飞艇进行了仿真分析。2014 年,戴秋敏^[18]详细研究了飞艇晴空时的太阳辐射、长波辐射以及强迫换热模型,2018 年,刘婷婷等^[19]分析了驻空期间,太阳能电池等效面积热阻、转换效率及铺装面积对飞艇热温度昼夜变化规律的影响。

目前对于飞艇、螺旋桨以及相互干扰等方面的研究主要侧重于气动特性以及飞艇自身热特性的研究,但就分布式螺旋桨对于整艇热特性影响方面的研究较少。由于飞艇外部的强迫对流是影响其热特性的关键因素之一,故文中针对不同布局下,螺旋桨对于飞艇热特性方面的影响进行仿真研究,给出螺旋桨尾流对于整艇热特性的影响规律。

1 飞艇外部强迫对流估算模型

飞艇在驻空飞行期间,其周围的热环境具有时变性,主要的热源及对流换热可以分为三类:太阳短波辐射、长波辐射以及对流换热。其中,太阳短波辐射由太阳直接辐射、天空散射辐射、地面及云层反射辐射三部分组成;长波辐射可分成天空长波辐射、地面长波辐射、蒙皮外表面单元辐射换热、蒙皮内表面单元与内部填充气体之间的辐射换热,以及蒙皮内表面单元之间的辐射换热等;对流换热则由蒙皮外表面与外部大气的混合对流换热以及蒙皮内表面与内部填充气体之间的自然对流换热两部分组成。飞艇的影响热源及主要换热方式如图 1 所示。

飞艇整个囊体外表面的局部速度会影响带走的对流换热量,即混合对流换热中的强迫对流换热特性。单位时间内,蒙皮单元 i 外表面的对流换热量计算式为:

$$Q_{co,i} = h_{ex} \cdot (T_{atm} - T_{skin,i}) \cdot A_{skin,i} \quad (1)$$

式中: h_{ex} 为飞艇外部混合对流换热系数; T_{atm} 为外部大气环境温度; $T_{skin,i}$ 为蒙皮表面温度; $A_{skin,i}$ 蒙皮单元的面积。

由于飞艇外表面与大气既存在一定的相对运动(空速),又有温度上的差别,因此飞艇外表面与空气之间的换热为混合对流换热,要综合考虑自然对流和强迫对流两种换热。飞艇外表面对流换热系数可通过式(2)计算:

$$h_{ex} = (h_{free_ex}^n \pm h_{forced_ex}^n)^{1/n} \quad (2)$$

式中: h_{free_ex} 为外部自然对流换热系数; h_{forced_ex} 为外部强迫对流换热系数。当自然对流与强迫对流同向或横向时取正号,逆向时取负号。一般情况下 n 取值为 3,但在涉及水平平板和圆柱的横向流动时, n 分别取 3.5 和 4 更为合适。对于浮空器热特性仿真可采用正号, n 取 4。

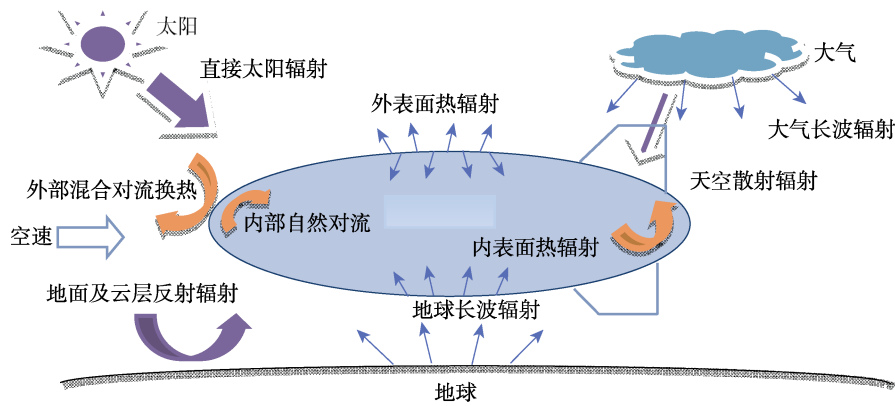


图 1 平流层飞艇热环境
Fig.1 Thermal environment of stratosphere airship

外表面局部强迫对流换热系数^[20-21]的计算公式为：

$$h_{\text{forced_ex}} = \begin{cases} 0.332 \text{Re}_y^{1/2} \text{Pr}_a^{1/3} \lambda_a / l_y & \text{Re}_y \leq \text{Re}_{y_c} \\ h_{y_c} + (h'_{y_c} - h_{y_c}) \cdot \frac{\text{Re}_y - \text{Re}_{y_c}}{\text{Re}'_{y_c} - \text{Re}_{y_c}} & \text{Re}_{y_c} < \text{Re}_y < \text{Re}'_{y_c} \\ 0.0296 \text{Re}_y^{0.8} \text{Pr}_a^{0.6} \lambda_a / l_y & \text{Re}_y \geq \text{Re}'_{y_c} \end{cases} \quad (3)$$

式中： λ_a 为外部空气的热导率； l_y 为特征长度； Re_y 为局部雷诺数， $\text{Re}_y = l_y \cdot v \mu / \rho$ (v 、 μ 、 ρ 分别为局部气流速度、空气的动力黏度和密度)； h_{y_c} 和 h'_{y_c} 分别为雷诺数 $\text{Re}_{y_c} = 5 \times 10^5$ 和 $\text{Re}'_{y_c} = \text{Re}_{y_c} + 60 \text{Re}_{y_c}^{2/3}$ 所对应的强迫对流换热系数。

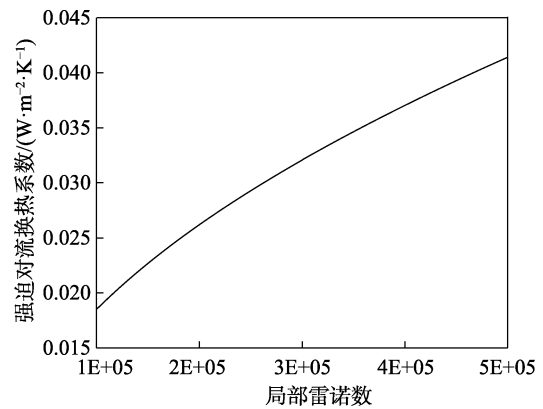
空气的动力黏度 μ_a 、热导率 λ_a 和普朗特数 Pr_a 随温度的变化如式 (4) — (6) 所示：

$$\mu_a = \frac{1.458 \times 10^{-6} \cdot T_a^{1.5}}{T_a + 110.4} \quad (4)$$

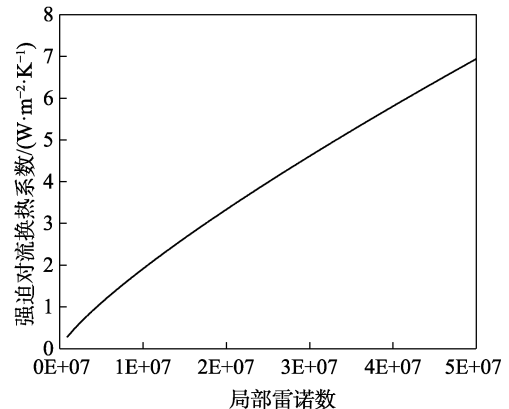
$$\lambda_a = 0.0241 \left(\frac{T_a}{273.15} \right)^{0.9} \quad (5)$$

$$\text{Pr}_a = 0.804 - 3.25 \times 10^{-4} \cdot T_a \quad (6)$$

飞艇在 20 km 高空，特征长度 $l_y=100$ 的条件下，强迫对流换热系数随雷诺数的变化趋势如图 2 所示。从图 2 可以得出，飞艇局部雷诺数会影响强迫对流换热系数。当局部雷诺数为 1×10^7 时，强迫对流换热系数为 1.9；局部雷诺数为 2×10^7 时，强迫对流换热系数会增加到 3.3。局部雷诺数与局部的绕流速度成正比，故通过增强局部绕流速度，可提高强迫对流换热系数，有效抑制蒙皮和囊体内部氦气的热特性。下面针对螺旋桨尾流对于飞艇局部气流扰流速度的影响进行数值分析，从而可得出螺旋桨尾流对于改善局部强迫对流换热特性的规律。



a 局部雷诺数 $< \text{Re}_{y_c} < 5 \times 10^5$



b 局部雷诺数 $> \text{Re}'_{y_c} < 8.7798 \times 10^5$

图 2 强迫对流换热系数随局部雷诺数的变化曲线
Fig.2 Forced convection heat transfer coefficient curve along with the change of local Reynolds number: a) local Reynolds number $< \text{Re}_{y_c} < 5 \times 10^5$; b) local Reynolds number $> \text{Re}'_{y_c} = 8.7798 \times 10^5$

2 螺旋桨布局对飞艇表面速度影响分析

2.1 飞艇外形与螺旋桨布局形式

飞艇外形通常采用流线型低阻外形。文中在飞艇外形与螺旋桨布局分析时选取了常规低阻外形。艇身

长度 $L_a=100\text{ m}$ ，螺旋桨为三叶桨，直径为 6 m 。根据螺旋桨距离艇身头部长度的远近，将三叶螺旋桨分 5 处布置在艇身轴向位置，三叶螺旋桨旋转中心距离艇身头部的距离分别为 $-0.01L_a$ 、 $0.2L_a$ 、 $0.5L_a$ 、 $0.8L_a$ 和 $1.01L_a$ 。艇身外形和螺旋桨布局如图 3 所示，布局编号依次为 w_1 、 w_2 、 w_3 、 w_4 、 w_5 。

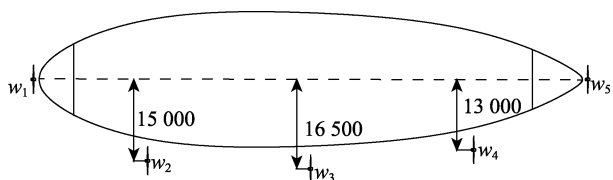


图 3 流线型艇身及螺旋桨安装位置 (单位: mm)

Fig.3 Streamlined boat body and propeller installation location (Unit: mm)

2.2 螺旋桨布局下流场速度分布计算方法

针对艇身和螺旋桨相互干扰下的流场特性，借助成熟的 FLUENT 数值分析方法对不同螺旋桨布局下飞艇表面的绕流场进行分析，得出飞艇表面的速度分布。FLUENT 在计算各类飞行器气动特性和扰流特性方面已得到广泛的应用，并具有较好的求解精度^[22-23]。

考虑到螺旋桨转速较大，引起桨尖气流压缩，选取基于密度的求解器，湍流模型选取两方程 k- ω SST 模型^[24]，采取多重参考系^[25]求解准静态的旋转域流场。在计算过程中，监控螺旋桨推力系数，以该值作为收敛判据，流动库朗数 CFL 设置为 50。压力-速度项采取“Coupled”耦合算法，空间梯度离散采取“Least Squares Cell Based”格式，压力项采取二阶精度，动量、湍动能和耗散率均采用二阶迎风格式离散。

计算条件：飞行高度设置在海拔 20 km 处，来流速度为 15 m/s ，当地大气压为 5529.31 Pa ，空气密度为 0.0889 kg/m^3 ，动力黏度为 $1.4216 \times 10^{-5}\text{ N}\cdot\text{s/m}^2$ 。CFD 计算采用的流场网格和边界条件如图 4 所示，螺旋桨表面网格如图 5 所示。

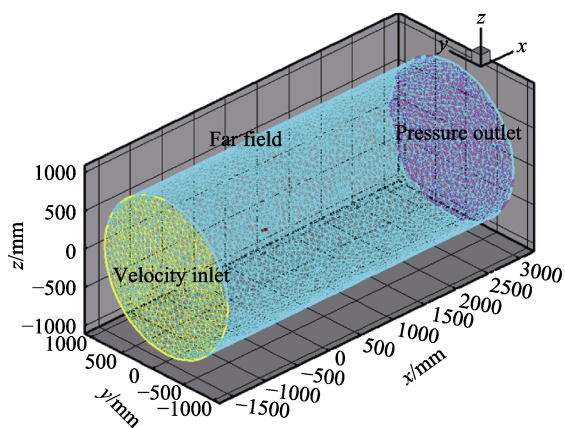


图 4 流场网格和边界条件

Fig.4 The flow field grid and boundary conditions

2.3 螺旋桨布局对艇身绕流及强迫对流影响分析

采用 CFD 方法针对单独艇身外形，以及螺旋桨不同布局 (w_1 、 w_2 、 w_3 、 w_4 、 w_5) 下的艇身周围气流速度分布进行分析，结果如图 6 所示。通过图 6 给出的不同螺旋桨布局下的艇身附近速度分布可得出，头部螺旋桨布局可增加整个艇身上的绕流速度，会使强迫对流增加，有助于整艇蒙皮和内部氦气温差的抑制。侧部和尾部布局的螺旋桨，经过螺旋桨的气流加速后，速度最高可达约 32 m/s ，加速比约为 2.13，会使强迫对流换热系数增加为原来的 2 倍，也可改善飞艇局部区域的强迫对流特性，降低蒙皮和囊体内部氦气的昼夜温差量。对于流线型艇身而言，当螺旋桨处于艇身最大截面之前时，经螺旋桨加速的气流会附着于艇身表面；但当螺旋桨布置位置越过最大截面处后，加速的气流不会附着在艇身表面。

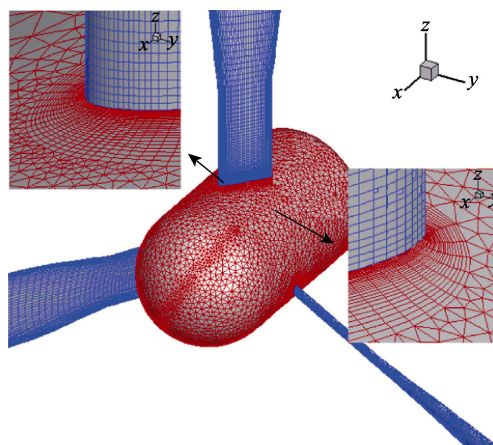


图 5 三叶螺旋桨表面网格

Fig.5 Three-blade propellers surface grid

3 结语

飞艇外部强迫对流特性的优劣，可对整艇蒙皮和内部氦气温度的昼夜变化具有显著的影响。艇身外对流换热的强弱与局部速度直接相关，局部速度增加可增大强迫对流效果，改善飞艇的热特性。艇身局部雷诺数为 1×10^7 时，强迫对流换热系数为 1.9，局部雷诺数为 2×10^7 时，强迫对流换热系数会增加到 3.3。局部雷诺数与局部的绕流速度成正比，故通过增强局部绕流速度，可提高强迫对流换热系数，有效抑制蒙皮和囊体内部氦气的热特性。文中以流线型艇身为基础，考虑典型的螺旋桨布局方式，采用成熟的并通过大量不同飞行器定常和非定常气动特性分析和流场特性分析等方面验证的 CFD 软件 FLUENT，求解基于 k- ω SST 湍流模型和多重参考系的 RANS 方程，得到了艇身周围的绕流场，对不同螺旋桨安装位置的蒙皮表面气流加速效果进行了分析，得出

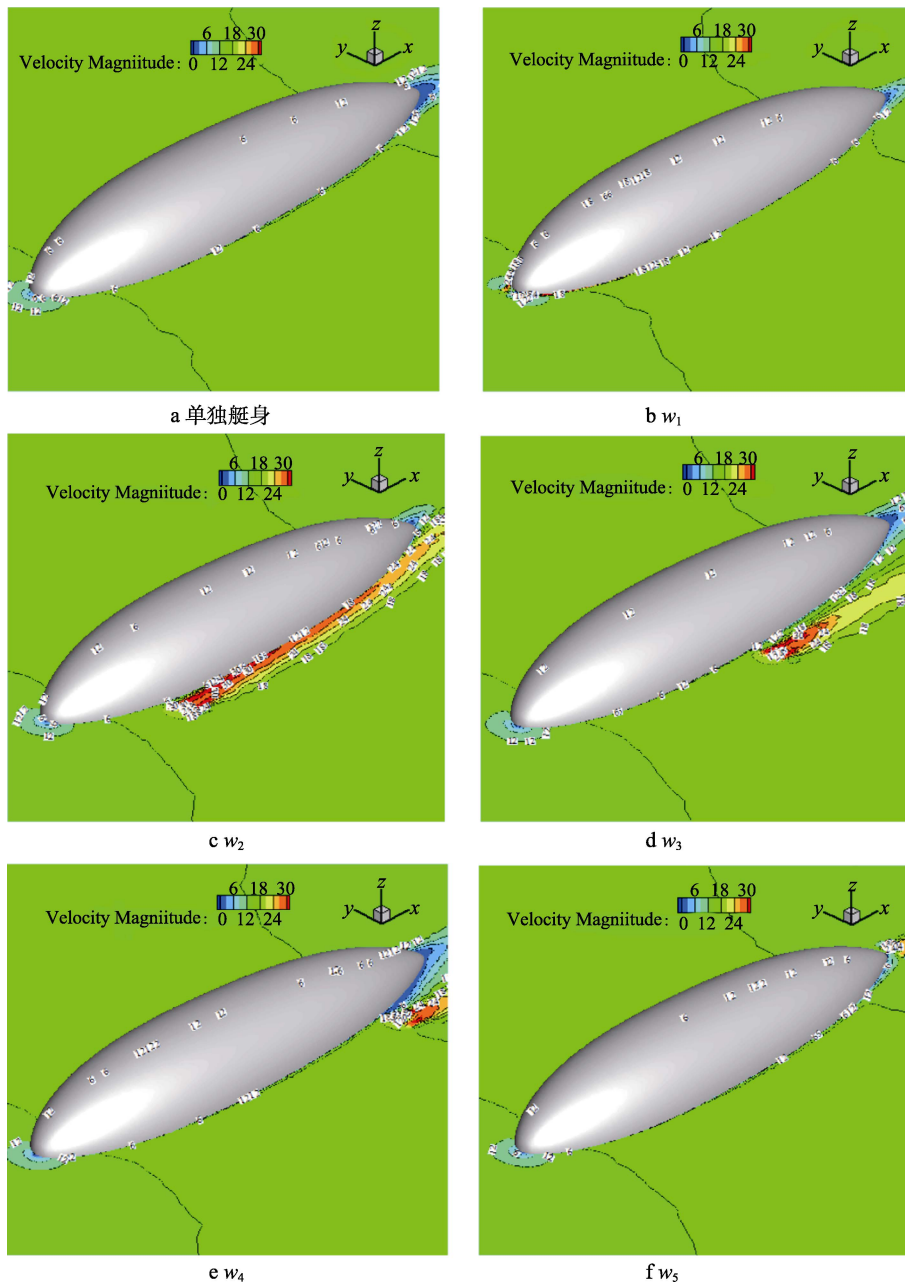


图 6 不同布局下艇身周围气流速度分布云图

Fig.6 Nephogram on airflow velocity distribution around the boat body under different layout: a) separate boat body; b) w_1 ; c) w_2 ; d) w_3 ; e) w_4 ; f) w_5

以下结论。

1) 头部螺旋桨布局可增加整个艇身上的绕流速度，增加强迫对流，有助于整艇蒙皮和内部氦气温差的抑制。

2) 侧部和尾部布局的螺旋桨，在来流速度 15 m/s 条件下，经过螺旋桨的气流加速后，速度最高可达约 32 m/s，加速比约为 2.13，会使强迫对流换热系数增加为原来的 2 倍，也可改善飞艇局部区域的强迫对流特性，降低蒙皮和囊体内部氦气的昼夜温差量。

参考文献：

[1] MANTESCU L. HiSentinel80: Flight of a High Altitude

Airship[C]// 11th AIAA Aviation Technology, Integration, and Operations (ATIO) Conference. Virginia Beach, VA, 2011.

[2] ANDROULAKAKIS S P, JUDY R. Status and Plans of High Altitude Airship (HAATM) program[C]// AIAA Lighter-Than-Air Systems Technology. Florida, 2013.

[3] OKAYA S. R & D Status of RFC Technology for SPF Airship in Japan[C]// 9th Annual International Energy Conversion Engineering Conference. San Diego, California, 2013.

[4] LINDSTRAND P. ESA-HALE Airship Research and Development Program[C]// Proceedings of the 2nd Stratospheric Platform Systems Workshop. Tokyo, Japan, 2000.

- [5] ILIEVA G, PÁSCOA J, DUMAS A, et al. MAAT—Promising Innovative Design and Green Propulsive Concept for Future Airship's Transport[J]. *Aerospace Science and Technology*, 2014, 35: 1-14.
- [6] MILLER J. Update of ATG Stratsat Programme[C]// Proceedings of the 4th Stratospheric Platform Systems Workshop. Tokyo, Japan, 2003.
- [7] 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 Bi-feng, ZHANG Yu-gang, 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.
- [8] 刘远强, 项松, 佟刚, 等. 某电动飞机螺旋桨气动特性数值模拟与风洞试验[J]. *飞行力学*, 2017, 35(3): 81-84.
LIU Yuan-qiang, XIANG Song, TONG Gang, et al. Aerodynamic Characteristics Numerical Simulation and Wind Tunnel Test of an Electric Powered Aircraft Propeller[J]. *Flight Dynamics*, 2017, 35(3): 81-84.
- [9] LONG Y, LONG X P, JI B, et al. Numerical Simulations of Cavitating Turbulent Flow Around a Marine Propeller Behind the Hull with Analyses of the Vorticity Distribution and Particle Tracks[J]. *Ocean Engineering*, 2019, 189: 106310.
- [10] 刘沛清, 马蓉, 段中喆, 等. 平流层飞艇螺旋桨地面风洞试验[J]. *航空动力学报*, 2011, 26(8): 1775-1781.
LIU Pei-qing, MA Rong, DUAN Zhong-zhe, et al. Ground Wind Tunnel Test Study of the Propeller of Stratospheric Airships[J]. *Journal of Aerospace Power*, 2011, 26(8): 1775-1781.
- [11] LUTZ W S. Drag Reduction and Shape Optimization of Airship Bodies[J]. *Journal of Aircraft*, 1998, 35(3): 345-351.
- [12] GERUTI A, GAMBACORTA D, MARZOCCA P. Unconventional Hybrid Airships Design Optimization Accounting for Added Masses[J]. *Aerospace Science and Technology*, 2018, 72: 164-173.
- [13] KANIKDALE T S, MARATHE A G, PANT R S. Multi-Disciplinary Optimization of Airship Envelope Shape[C]// 10th AI-AA/ISSMO Multidisciplinary Analysis and Optimization Conference. AIAA, 2004.
- [14] 林瑞坤, 郭雪岩. 带螺旋桨平流层飞艇气动性能的数值分析[J]. *力学季刊*, 2010, 31(3): 355-362.
LIN Rui-kun, GUO Xue-yan. Numerical Analysis of Aerodynamic Performance for Stratospheric Airship with a Propeller[J]. *Chinese Quarterly of Mechanics*, 2010, 31(3): 355-362.
- [15] XIE F, YE Z Y. Drag Reduction for an Airship with Proper Arrangement of Propellers[J]. *Chinese Journal of Aeronautics*, 2009, 22: 575-582.
- [16] 方贤德, 王伟志, 李小建. 平流层飞艇热仿真初步探讨[J]. *航天返回与遥感*, 2007, 28(2): 5-9.
FANG Xian-de, WANG Wei-zhi, LI Xiao-jian. A Study of Thermal Simulation of Stratospheric Airships[J]. *Spacecraft Recovery & Remote Sensing*, 2007, 28(2): 5-9.
- [17] 徐向华, 程雪涛, 梁新刚. 平流层浮空器的热数值分析[J]. *清华大学学报: 自然科学版*, 2009, 49(11): 1848-1851.
XU Xiang-hua, CHEN Xue-tao, LIANG Xin-gang. Thermal Analysis of a Stratospheric Airship[J]. *J Tsinghua Univ (Sci &Tech)*, 2009, 49(11): 1848-1851.
- [18] 戴秋敏. 浮空器热环境与热特性研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2014.
DAI Qiu-min. Research on the Thermal Environment and Thermal Characteristics for Aerostats[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2014.
- [19] 刘婷婷, 麻震宇, 杨希祥, 等. 太阳能电池对平流层飞艇热特性的影响分析[J]. *宇航学报*, 2018, 39(1): 35-42.
LIU Ting-ting, MA Zhen-yu, YANG Xi-xiang, et al. Influence of Solar Cells on Thermal Characteristics of Stratospheric Airship[J]. *Journal of Astronautics*, 2018, 39(1): 35-42.
- [20] CHEN K K, THYSON N A. Extension of Emmons spot theory to flow on blunt bodies[J]. *AIAA Journal*, 2012, 9(5): 821-825.
- [21] HOLMAN J P. Heat Transfer[M]. New York: McGraw-Hill, 2002.
- [22] WANG Xiao-liang, XUAN Bin-bin. Propulsive Characteristics of Twin Oscillating Airfoils[J]. *Journal of Bionic Engineering*, 2016, 13: 468-477.
- [23] WANG Xiao-Liang. Computational Fluid Dynamics Predictions of Stability Derivatives for Airship[J]. *Journal of Aircraft*, 2012, 49(3): 933-940.
- [24] MAXIME A J K, RUXANDRA M B. Modeling Novel Methodologies for Unmanned Aerial Systems Applications to the UAS-S4 Ehecattl and the UAS S45 Balaam[J]. *Chinese Journal of Aeronautics*, 2019, 32(1): 58-77.
- [25] MENTER F R. Review of the SST Turbulence Model Experience from an Industrial Perspective[J]. *International Journal of Computational Fluid Dynamics*, 2009, 23(4): 305-316.