

## 大型船舶空气尾流场防治新技术的数值模拟\*

苏轼鹏<sup>1</sup>, 曹小群<sup>2</sup>, 张大全<sup>3</sup>, 韦智元<sup>1</sup>

(1. 海军大连舰艇学院航海系, 辽宁大连 116018; 2. 国防科技大学气象海洋学院, 湖南长沙 410073;  
3. 广东顺德工业设计研究院(广东顺德创新设计研究院), 广东佛山 528311)

**摘要:**大型船舶空气尾流场对海上飞机安全降落有重要的影响,因此对其进行有效防治技术研究在保障飞机安全、大型船舶海上活动等方面有重要意义。采用计算流体力学方法开展大型船舶空气尾流场特性及其防治技术的数值模拟研究,以带有 Spalart-Allmaras 湍流模型的 Reynolds 平均 Navier-Stokes 方程构建模拟平台开展数值模拟,得到大型船舶空气尾流场规律特性。在此基础上,提出主动补气防治新技术,分别阐述其理论基础、核心方法和技术方案;根据主动补气防治技术思想和理论,进一步开展数值模拟验证研究。结果表明,该技术能显著改善空气尾流场的流场品质,使流场趋于平稳均匀,减小对飞机海上降落的影响。该技术进一步完善了可实现工程应用,并保证飞机海上降落安全,有巨大的应用潜力。

**关键词:**大型船舶空气尾流; Spalart-Allmaras 模型; 主动补气防治方法; 补气速度控制方程组

**中图分类号:**U661.2 **文献标志码:**A **文章编号:**1001-2486(2020)04-085-08

## Numerical modeling for new prevention and control technologies of air wake field of large ships

SU Shipeng<sup>1</sup>, CAO Xiaqun<sup>2</sup>, ZHANG Daquan<sup>3</sup>, WEI Zhiyuan<sup>1</sup>

(1. Navigation Department, Dalian Naval Academy, Dalian 116018, China;

2. College of Meteorology and Oceanography, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China;

3. Guangdong Shunde Innovative Design Institute, Foshan 528311, China)

**Abstract:** Because the air wake fields of large ships have a great influence on the safety of aircraft landing, therefore, the effective technologies to guarantee the safety of aircraft and maritime activities are of great significance. The CFD (computational fluid dynamics) method was used to study the air wake field characteristics of large ships and the prevention and control technologies. The Reynolds averaged Navier-Stokes equations with Spalart-Allmaras turbulence model were used to construct simulation platform, the numerical modeled work was carried out through the platform. The regular and characteristic of air wake fields of large ships were analyzed. Furthermore, the new prevention and control technologies of air wake field of large ships were proposed, and the theoretical basis, center method and technical proposal were expounded. According to the thinking and theory of active blowing prevention and control technology, numerical modeling method was used to test the new prevention and control technologies of air wake field of large ships. Numerical results show that the new method can significantly improve the quality of the air wake field, make the flow field stable and uniform, and hence it can reduce the impacts on the aircraft landing on large ships. After the method is further improved, the engineering application can be realized to ensure the safety of aircraft landing on ships, potentially.

**Keywords:** airwake of large ships; Spalart-Allmaras model; active blowing prevention and control methodology; blowing velocity control equation set

空气尾流场是船舶海上航行时,受到船体结构、船体运动及海表风等的影响,在船体周围产生的复杂气流扰动场。其中,大型船舶尾部气流会对飞机降落安全有严重影响<sup>[1]</sup>。因此一直是备受关注的热点和难点之一<sup>[2]</sup>,国内外许多机构都开展了相关研究<sup>[3-8]</sup>。目前,相关领域多采用以计算流体力学(Computational Fluid Dynamics,

CFD)方法为主,以风洞和实船实验测量为辅进行验证的方法。经过几十年的积累,在船舶空气尾流场规律特性认识方面取得了很大进展,为飞机海上降落安全提供了重要参考。

然而,要彻底消除空气尾流场的影响,需进一步开展防治与控制的研究。对船舶空气尾流场防治的目标是通过改善空气尾流场的结构,降低湍

\* 收稿日期:2019-12-27

基金项目:国家自然科学基金青年科学基金资助项目(51809272)

作者简介:苏轼鹏(1980—),男,吉林敦化人,讲师,博士研究生,E-mail:qxsspgx@163.com;

曹小群(通信作者),男,研究员,博士,硕士生导师,E-mail:caoxiaoqun@nudt.edu.cn

流强度,使流场均匀稳定。目前的主要方法是通过改变船体局部结构来改善空气尾流场。2006年,Findlay等<sup>[9]</sup>在风洞实验中将锯齿状格栅安置于船模后的甲板边缘,以改变船体附近平均气流与气流的脉动;同年,Greenwell等<sup>[10]</sup>采用倾斜多孔屏作为改善气流场的工具取得较好的效果;2013年,Kääriä等<sup>[11]</sup>研究了侧风条件下将船模上层建筑迎风面加装副翼或将边缘制成凹槽的方法,发现由于气流场的影响减小,飞行器载荷明显降低;同年,Lasalle<sup>[8]</sup>也有类似的研究。上述方法可在一定程度上改变空气尾流场,但是存在明显问题:一是只对特定风向条件下的空气尾流场效果明显,缺乏灵活性;二是改变船体外形结构,在船舶设计中难于实现,同时会产生额外的、更大的涡旋。所以本文基于流动控制方法,主要包括边界层控制<sup>[12]</sup>、圆柱绕流控制<sup>[13]</sup>、后台阶流动控制<sup>[14-15]</sup>以及机翼等流动分离控制<sup>[16-17]</sup>等,提出基于主动补气方法的大型船舶空气尾流场防治新技术,从而克服已有方法的缺点,达到改善空气尾流场的目的。与此相似的工作仅有 Gallas等<sup>[18]</sup>从实验角度针对特定船模进行的试探性研究,但是仍需对船体进行改造,没有形成可靠的技术。鉴于此,本文从大型船舶空气尾流场的基本特性出发,提出主动补气方法研究其防治技术,实现对空气尾流场结构的改善。

## 1 大型船舶空气尾流场的基本特性

### 1.1 方法与模型

船舶周围的空气流动可认为是三维、低速、不可压的湍流运动,在满足连续介质假设条件下由 Navier-Stokes 方程(简称 N-S 方程)描述。本文重点集中于航母空气尾流场防治技术的研究,需多次改变边界条件进行数值模拟运算,为保证运算效率,故采用以 Spalart-Allmaras 涡黏模型为湍流模型的雷诺平均 N-S (Reynolds Average Navier-Stokes, RANS) 方法为计算模型。

### 1.2 计算参数设置

#### 1.2.1 边界条件

实现主动补气防治方法,首先要了解大型船舶空气尾流场的结构特征。采用大型船舶模型进行数值模拟分析。近壁面采用标准壁面函数,网格生成采用结构化三维六面体网格,在船体边界层附近对网格进行了适当加密设置(如图 1 所示),总网格数为 1 750 316。计算域为长方体,其长宽高尺寸为 1400 m × 450 m × 220 m,计算域边

界条件设置如下(如图 2 所示):

1) 入口边界面,位于大型船舶模型船首正对方向一个船长  $L$  位置的竖直平面,选用速度入口类型,速度分量设置为  $u = U, v = w = 0$ ,其中  $U$  为来流速度;

2) 出口边界面,位于大型船舶模型船尾正对三个船长  $L$  位置的竖直平面,选用压力出口边界类型;

3) 壁面边界,船体表面为无滑移壁面,由于不考虑海浪的影响,上下左右边界均设置为滑移壁面。在防治研究中,需要重新设置船体表面的壁面边界。

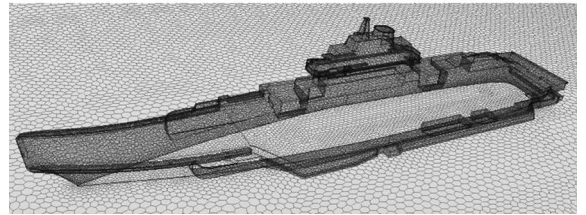


图 1 模型网格划分示意图

Fig. 1 Mesh generation of ship model

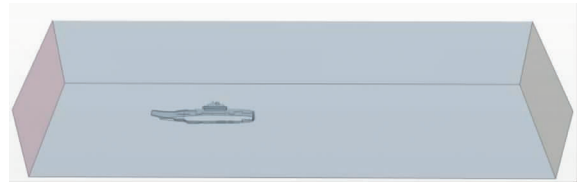


图 2 计算域及边界条件

Fig. 2 Computational field and boundary condition

#### 1.2.2 工况设置

根据研究<sup>[19]</sup>结果,甲板风平行于飞机降落跑道时为飞机降落的最佳风向,甲板风风速范围在 9 ~ 15 m/s 之间。而本文采用的斜角甲板与船体中线成 7° 夹角。可见,如果设航向,即船首正对方向为 0°,顺时针为正,理想状态下甲板风平行于斜角甲板中线,即甲板风风向角为 -7° 时最佳。采用此种工况,即甲板风风向角为 -7°,风速分为 9 m/s、12 m/s 以及 15 m/s 三种情况(如图 3 所示)。同时选用有代表性的控制面作为流场特性研究,主要包括甲板下 10.5 m 高度的水平面和与斜角甲板中线重合的垂直纵向剖面。

#### 1.2.3 计算结果分析

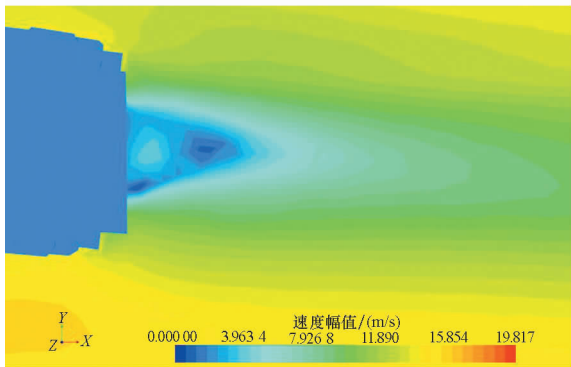
由于采用的风速差异不大,相同风向角情况下,9 m/s、12 m/s 与 15 m/s 三种情况的空气尾流场结构相似,下面以 15 m/s 风速情况为例进行分析。



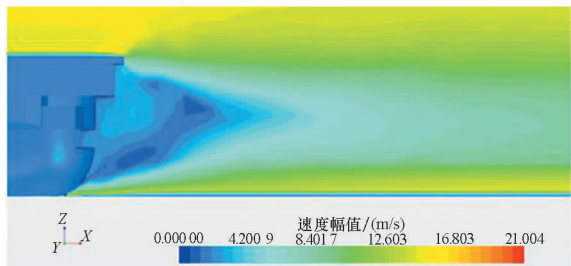
图 3 甲板风风向角

Fig. 3 Wind of deck angel

从速度标量场分析可知,在甲板以下存在着一个明显的低速区(如图 4(a)~(b)所示),与速度矢量场中涡旋区相对应(如图 5(a)~(b)所示)。水平方向为两个近似对称的涡旋,垂直方



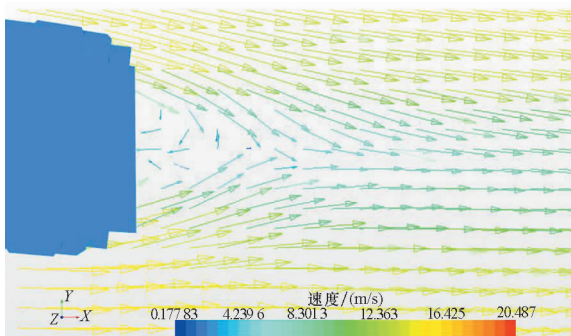
(a) 甲板以下 10.5 m 高度的水平面  
(a) Horizontal section 10.5 m below deck



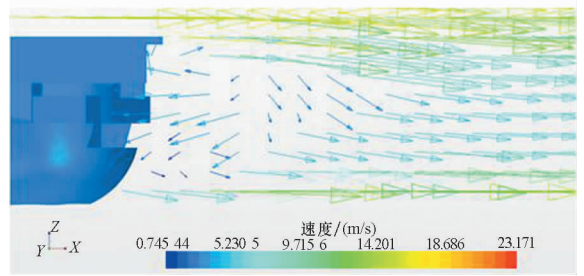
(b) 与斜角甲板中线重合的纵向剖面  
(b) Lengthways section coincident with the center line of inclined deck

图 4 船尾空气尾流场速度标量场

Fig. 4 Scalar velocity field of stern airwake



(a) 甲板以下 10.5 m 高度的水平面  
(a) Horizontal section 10.5 m below deck

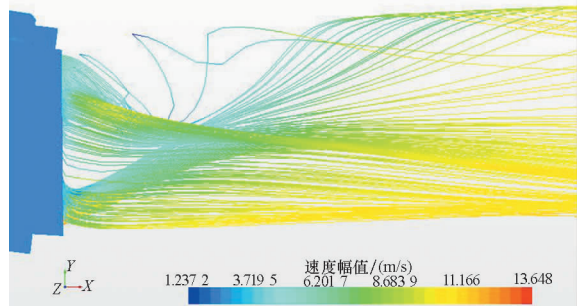


(b) 与斜角甲板中线重合的纵向剖面  
(b) Lengthways section coincident with the center line of inclined deck

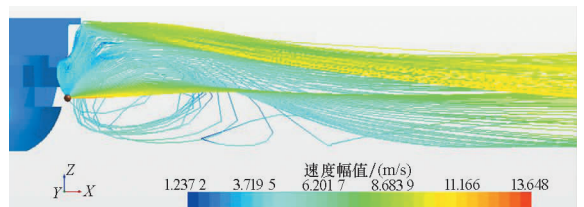
图 5 船尾空气尾流场的速度矢量场

Fig. 5 Vector velocity field of stern airwake

向是一个大的且船尾下滑道附近有明显下沉分量的涡旋,而气流场中的其他部分相对均匀。这是空气尾流场中最明显、面积最大的涡旋区,是形成尾部下沉气流分量的主要原因,也是防治的重点区域。在流线分布图中也可明显看到相似的流场特征(如图 6(a)~(b)所示)。此外,在下边界壁



(a) 甲板以下 10.5 m 高度的流线水平面图  
(a) Horizontal section 10.5 m below deck



(b) 甲板以下 10.5 m 高度的流线剖面图  
(b) Lengthways section 10.5 m below deck

图 6 空气尾流场的流线图

Fig. 6 Streamline of airwake



面处由于气流与边界的相互作用,存在流速增大的现象。

## 2 大型船舶空气尾流场防治技术基础

### 2.1 理论基础与核心方法

一项成熟的技术需要具备理论基础、核心方法和技术方案等多个层次的内容。大型船舶空气尾流场防治技术的理论基础是边界层控制理论<sup>[12]</sup>。根据相关理论可知,通过抽气、补气等措施可改变气流场结构。本文研究的核心方法为主动补气防治方法,其基本思想是向空气尾流场气流扰动最大的区域实施补气措施,以削弱气流扰动,使气流场达到均匀稳定。与传统防治方法相比,它具有无须改变船体外形结构、能自主调节气流方向和速度以适应气流场变化以及不会产生额外湍流涡旋等优势。主动补气方法的核心问题:一是补气区域和位置,二是补气速度。下面分别加以分析。

### 2.2 补气的区域和位置

由 1.2.3 节分析结果可知,空气尾流场气流扰动最显著的部分位于船尾甲板以下区域,该区域在水平面上存在对称的双涡旋,垂直方向存在一个大涡旋,气流扰动能量很大,是整个空气尾流场扰动能量的主要来源。该区域由于在速度场上是低速区,可以通过补气的方式将低速区削弱,气流扰动就会随之减弱,所以需选择该区域作为补气防治区域。补气具体位置要根据船体特征来定。由大型船舶外形可知,在船尾能施以补气的部位只有船尾两层甲板之间的空隙(如图 7 所示),由图 4、图 5 可知,该处存在明显低速区,存在与甲板风方向相反的气流,双涡旋特征最明显,是气流扰动最明显的地方,故将此处作为补气防治位置。

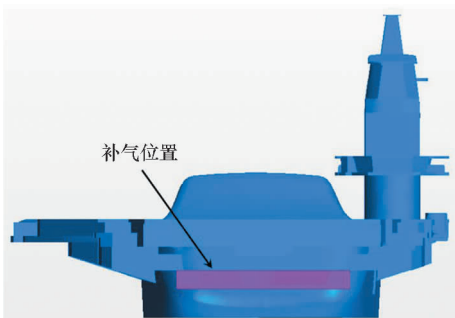


图 7 船尾补气位置

Fig. 7 Location of active flow control on stern

### 2.3 主动补气速度的计算

#### 2.3.1 基于射流边界层控制方程的补气速度分析

速度设置是主动补气防治方法的核心问题,

如果补气速度太小,则无法达到尾流防治的目的;如果补气速度太大,则耗费能量代价太大,同时也影响了防治效果,因此需要从理论上进行深入研究。船尾补气与射流的物理过程一致,故采用射流相关理论。主动补气防治的  $Re$  远远大于 30,属于紊动射流。而且由于补气区域的边界存在气流扰动,故需考虑三维紊动射流理论。对于三维紊动射流,以  $x$  表示射流的纵轴, $y$  表示水平方向垂直于  $x$  的横向坐标, $z$  表示垂直于由  $xy$  确定的水平面垂直坐标,原点位置随补气位置移动(如图 8 所示)。

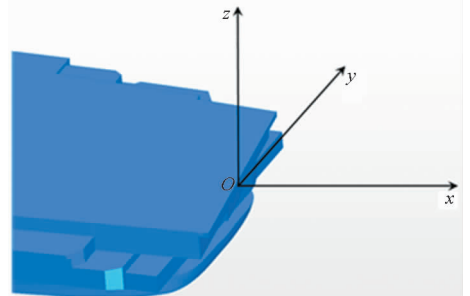


图 8 船尾坐标设置

Fig. 8 Stern coordinate setting

时均三维紊动射流的边界层方程和连续性方程<sup>[12]</sup>为

$$\begin{cases} u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} = \frac{1}{\rho} \frac{\partial \tau_{xi}}{\partial y} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial \tau_{zi}}{\partial z} \\ \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \end{cases} \quad (1)$$

其中: $u$ 、 $v$ 、 $w$  分别为空间三个方向的时均速度分量; $\rho$  为空气密度,视为常数; $\tau_{xi}$ 、 $\tau_{zi}$  分别代表水平  $x$  方向紊动切应力项在水平  $y$  方向和垂直  $z$  方向的变化。可基于这两个方程探讨补气速度的设置问题。

对于船尾主动补气防治方法而言,应属于平面紊动射流,设其补气界面的边界条件为  $u = u_0$ 、 $v = 0$ 、 $w = 0$ ,即射流的出口速度与甲板风方向一致,其大小即  $u_0$  的数值需要进一步确定。将边界条件代入式(1),同时考虑平流紊动射流在水平横向的紊动切应力项远远小于垂直方向,可忽略边界层控制方程右边第一项,满足补气截面边界层方程可转化为

$$u_0 \frac{\partial u}{\partial x} = \frac{1}{\rho} \frac{\partial \tau_{zi}}{\partial z} \quad (2)$$

在初始段,核心流速度是保持不变的,初始段过后,核心最大速度开始衰减,与射流轴向坐标  $x$  的关系为  $u_m \propto x^m$ ,即轴向最大速度与距离的  $m$  次方成正比,在补气边界附近可近似地将  $\frac{\partial u}{\partial x}$  当作常

数,因此出口速度  $u_0$  与紊动切应力项垂直方向的变化  $\frac{\partial \tau_{ij}}{\partial z}$  成正比,即出口速度越大,垂直方向上湍流切应力变化越大,容易使局部湍流强度增强,产生多余的涡旋和气流扰动,从而削弱补气效果。船尾主动补气防治方法属于局部补气方式,也存在类似情况。这说明主动补气速度存在上限,但是补气速度过小又起不到补气效果。所以需要设置最佳补气速度,最佳补气速度的数值需基于连续性方程进行分析讨论。

### 2.3.2 基于连续性方程的补气速度分析

连续性方程的基本思想是,对于一个界面,流体的流入量等于流出量,将此观点用于航母空气尾流场的计算域中:假设计算域中没有航母模型,只有速度入口气流存在,整个流场速度大小方向处处一致,是均匀稳定的气流场。而将航母模型置于其中,受阻挡的气流会发生绕流,产生扰动现象,从而形成了空气尾流场。若要消除空气尾流场,理想情况是将整个航母后部的横截面都进行补气,只有速度保持与速度入口一致,才会达到最佳补气效果。但该方法难以实现,只能在如图7所示的补气区域进行补气设置。由式(2)可知,补气速度过大会提高湍流强度。综合以上分析,将补气速度设置为与计算域速度入口相一致,即合成射流速度  $u_0$  等于甲板风速度  $U$ ,而不必将补气速度设为甲板风的倍数。具体分析如下。

在航母补气界面中取一个三维长方体微元(如图9所示),不可压缩的空气流体从  $x, y, z$  三个方向流入和流出。在  $x$  方向,流入速度为  $u$ ,流出速度经过  $\delta x$  距离变为  $u + \frac{\partial u}{\partial x} \delta x$ ,同理  $y, z$  方向的流入、流出分别为  $v, w$  以及  $v + \frac{\partial v}{\partial y} \delta y, w + \frac{\partial w}{\partial z} \delta z$ 。将该分析过程用于航母的补气界面,加入补气后流出量与流入量之差为零,而是补气流量。其关系式可表示为

$$V_{出} \cdot S_{出} - V_{入} \cdot S_{入} = V_{补} \cdot S_{补} \quad (3)$$

其中:  $V_{出}$ 、 $V_{入}$  和  $V_{补}$  分别为流出速度、流入速度

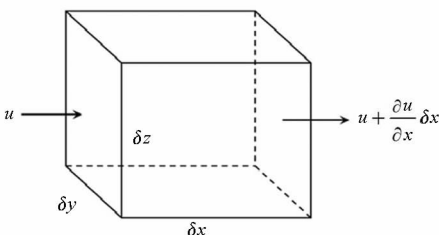


图9 流体微元中  $x$  方向的流入、流出

Fig. 9 Inflow and outflow in  $x$  direction of fluid element

和补气速度;  $S_{出}$ 、 $S_{入}$  和  $S_{补}$  分别为流出面积、流入面积和补气面积,在同一方向上,3个面积相等。式(3)可简化为

$$V_{出} - V_{入} = V_{补} \quad (4)$$

$(u, v, w)$  为补气界面气流扰动,流出速度矢量  $(u + \frac{\partial u}{\partial x} \delta x, v + \frac{\partial v}{\partial y} \delta y, w + \frac{\partial w}{\partial z} \delta z)$  等于射流出口速度矢量  $(U, 0, 0)$ , 而补气速度矢量为  $(\frac{\partial u}{\partial x} \delta x, \frac{\partial v}{\partial y} \delta y, \frac{\partial w}{\partial z} \delta z)$ 。即

$$(U, 0, 0) = (u + \frac{\partial u}{\partial x} \delta x, v + \frac{\partial v}{\partial y} \delta y, w + \frac{\partial w}{\partial z} \delta z) \quad (5)$$

由此得到最简化补气速度控制方程组,其表达式为

$$\begin{cases} \frac{\partial u}{\partial x} \delta x = U - u \\ \frac{\partial v}{\partial y} \delta y = -v \\ \frac{\partial w}{\partial z} \delta z = -w \end{cases} \quad (6)$$

对于 15 m/s 甲板风条件,  $U = 15$ 。

### 2.4 补气防治技术方案

补气防治技术方案是理论向工程转化的关键点。根据以上分析,设定补气速度与原气流场速度合成后与甲板风大小、方向相同。由于船尾补气区过长,速度不均匀,从工程实现角度宜纵向等分为8个大小均匀的区域,分别在相应区域中心设置8个控制点(如图10所示),测得其平均气流速度代表补气界面气流初始速度,再根据式(6)得到补气速度。将8个补气区域边界条件由壁面改为速度入口,设置相应的补气速度,经1000步以上迭代运算得到完全收敛后的计算结果。

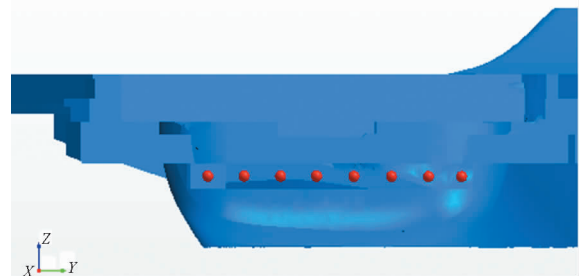


图10 补气部位的设置

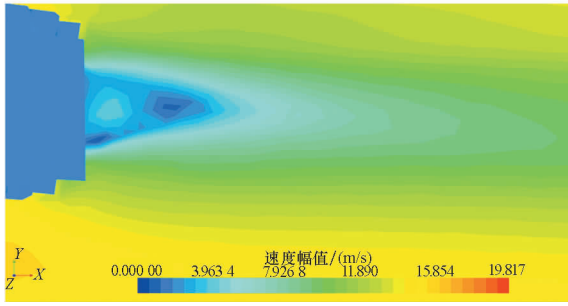
Fig. 10 Location set of active flow control

## 3 主动补气防治的效果分析

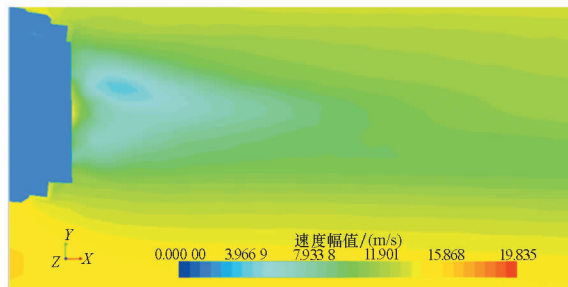
### 3.1 水平控制面效果分析

由船尾涡旋最明显的补气位置速度标量场分

析可知,补气后的速度低值区面积明显减小,速度梯度减弱(如图 11(a)~(b)所示)。补气前距船尾 150 m 处接近 0 的速度极小值区补气后消失。在速度矢量场中(如图 12(a)~(b)所示)可见,补气前对称的双涡旋结构消失,流场气流呈平稳向中线汇聚的特征。从流线分析中可更加明显地看出补气前后的效果差异(如图 13 所示)。补气后流线的涡旋扰动消失,流线变得平滑。综上所述可见,补气后空气尾流场变得平稳、均匀。



(a) 补气前  
(a) Before active flow control

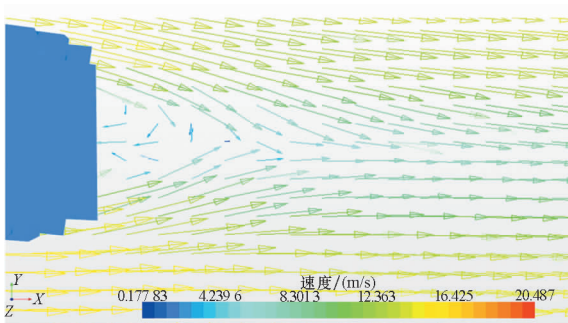


(b) 补气后  
(b) After active flow control

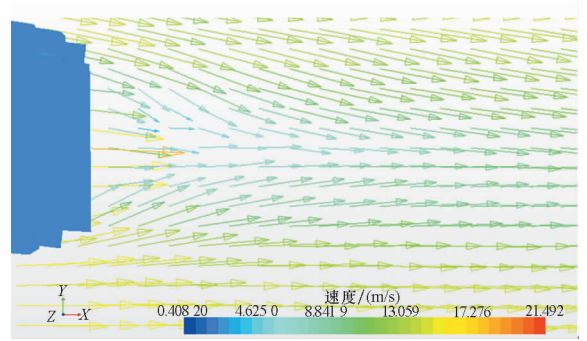
图 11 补气位置水平面的速度标量场  
Fig. 11 Scalar velocity field of active flow control location surface

### 3.2 垂直控制面效果分析

在与斜角甲板中线重合的纵向剖面中分析垂直方向的补气效果。由速度标量场分析可见(如图 14(a)~(b)所示),补气后低速区依然存在,

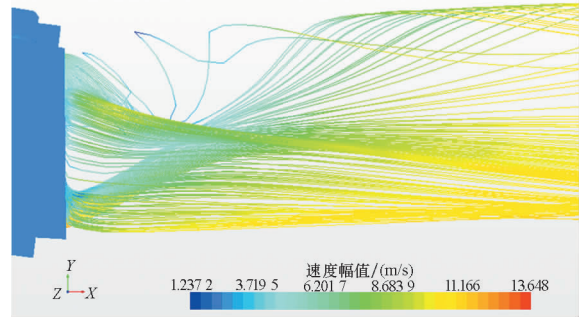


(a) 补气前  
(a) Before active flow control

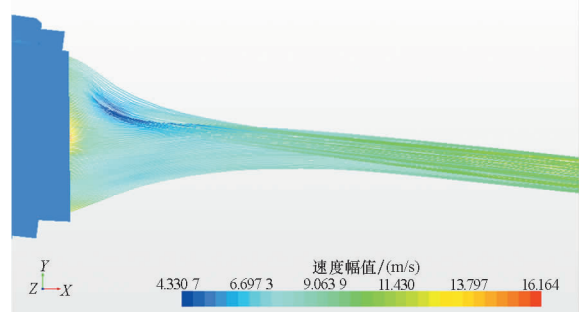


(b) 补气后  
(b) After active flow control

图 12 补气位置水平面的速度矢量场  
Fig. 12 Vector velocity field of active flow control location surface

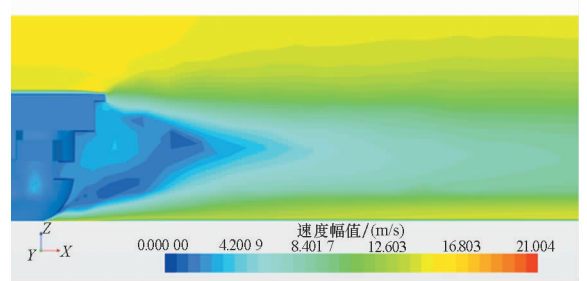


(a) 补气前  
(a) Before active flow control



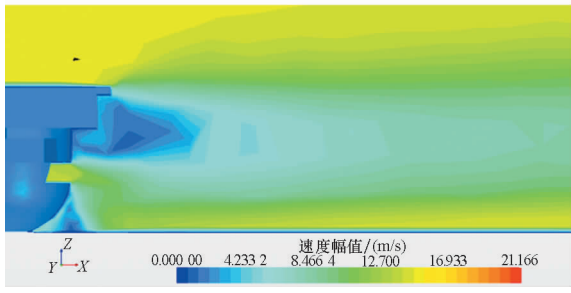
(b) 补气后  
(b) After active flow control

图 13 补气位置水平面的流线分析  
Fig. 13 Streamline of active flow control location surface



(a) 补气前  
(a) Before active flow control





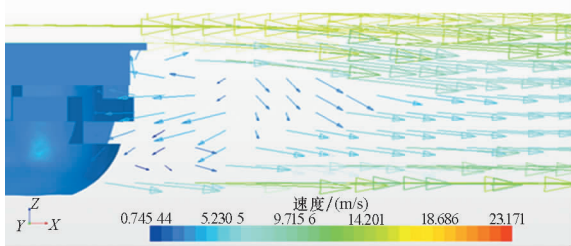
(b) 补气后  
(b) After active flow control

图 14 船尾与斜角甲板中线重合纵向剖面的速度标量场

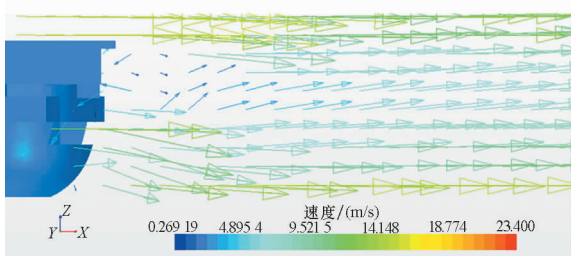
Fig. 14 Scalar velocity field of glide slope lengthways section on stern

但是其面积缩小为依附于上甲板船尾附近的小块区域。

由速度矢量场分析可见(如图 15(a)~(b)所示),由于补气气流的存在,竖直方向上的涡旋同样减弱至上甲板船尾附近,成为一个小的涡旋。下沉气流区域在补气后消失了,流场变的平稳、均匀。流线分析中可以看到相似的效果(如图 16(a)~(b)所示)。与斜角甲板中线重合的纵向剖面与补气位置水平面都是用来分析船尾补气效果的。



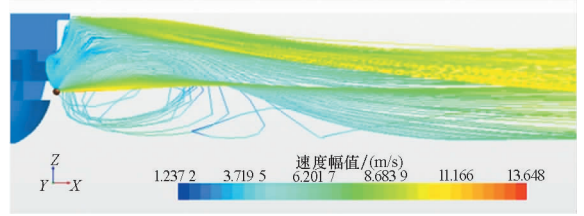
(a) 补气前  
(a) Before active flow control



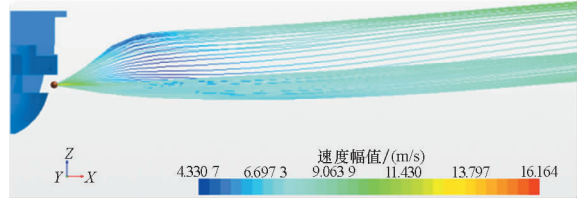
(b) 补气后  
(b) After active flow control

图 15 船尾下滑道剖面的速度矢量场  
Fig. 15 Vector velocity field of glide slope lengthways section on stern

由于大型船舶空气尾流场补气防治的实验成本和技术要求较高,所以本文没有进行实验方面



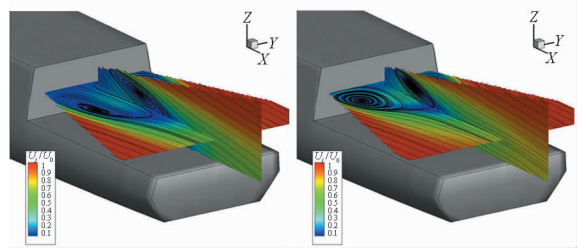
(a) 补气前  
(a) Before active flow control



(b) 补气后  
(b) After active flow control

图 16 船尾下滑道剖面的流线分析  
Fig. 16 Streamline of glide slope lengthways section on stern

的研究。相似的研究如文献[18],该文献中采用实验手段将大型船舶上层建筑面向后甲板的壁面横向和纵向垂直交叉开缝(如图 17 所示),进行补气设置,补气速度为甲板风的 2 倍。采用 PIV 和热线风速仪法测量结果如图 17 所示。可见补气后的涡旋面积明显减小,但是涡旋中心附近强度反而有所增强,相比本文的补气效果要差一些,证明本文的防治方法具有一定的优势。



(a) 无控制 (a) Without control  
(b) 有控制(U<sub>j</sub>/U<sub>0</sub> = 2) (b) With control(U<sub>j</sub>/U<sub>0</sub> = 2)

图 17 空气尾流场防治效果<sup>[18]</sup>  
Fig. 17 Airwake control result<sup>[18]</sup>

## 4 结论

采用带有 Spalart-Allmaras 湍流模型的 Reynolds 平均 Navier-Stokes 方程,对大型船舶空气尾流场特性进行了数值模拟,在此基础上结合射流边界层控制方程,提出了对大型船舶空气尾流场防治新技术,并进行了数值模拟验证。主要研究结论如下:由大型船舶空气尾流场特性的 CFD 数值模拟结果分析,空气尾流场最明显的特

征为在船尾水平方向上是两个明显的对称涡旋, 竖直方向上表现为一个大的涡旋, 这是船尾产生下沉气流分量的主要原因, 也是补气防治区域; 从理论基础、核心方法和技术方案提出了大型船舶空气尾流场的防治技术, 其理论基础为边界层控制理论, 核心方法即基于边界层控制理论的主动补气防治方法, 技术方案为主动补气防治方法的应用转化; 从速度标量场、速度矢量场和流线等不同角度分析了补气前后的空气尾流场变化情况, 发现整体到局部细节上涡旋明显减弱、气流扰动减小、下沉气流和低速区均减弱, 整个空气尾流场趋于平稳、均匀, 得到显著的改善, 证明主动补气防治方法是一种效果显著的防治方法。

虽然本文开展了大量深入研究, 但所提出的大型船舶空气尾流场防治技术在工程实践中的推广应用还需要大量技术细节的完善和实验验证。

## 参考文献 (References)

- [1] 贺少华, 刘东岳, 谭大力, 等. 载机舰船气流场相关研究综述[J]. 舰船科学技术, 2014, 36(2): 1-7.  
HE Shaohua, LIU Dongyue, TAN Dali, et al. A review of researches on ship airwakes [J]. Ship Science and Technology, 2014, 36(2): 1-7. (in Chinese)
- [2] 王金玲. 舰船空气尾流场特性数值研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2016.  
WANG Jinling. Numerical research of ship airwake characteristic [D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2016. (in Chinese)
- [3] Bolinger W K. Visualization of the flow field around a generic destroyer model in a simulated turbulent atmospheric boundary layer[D]. Monterey: Naval Postgraduate School, 1987.
- [4] Biskaduros J L, Healey J V. Flow visualization of the airwake of an oscillating generic ship model[D]. Monterey: Naval Postgraduate School, 1987.
- [5] Johns M K. Flow visualization of the airwake around a model of a DD-963 class destroyer in a simulated atmospheric boundary layer [D]. Monterey: Naval Postgraduate School, 1988.
- [6] Tai T C. Airwake simulation of modified TTCP/SFS ship[J]. NATO RTO Symposium on Vortex Flow and High Angle of Attack, Loan, 2001, 26: 1-12.
- [7] Roberson F D, Synder M, Kang H. Ship air wake CFD comparisons to wind tunnel and YP ship results [C]// Proceedings of 29th AIAA Applied Aerodynamics Conference, 2011.
- [8] Lasalle N R. Study of passive flow control for ship air wakes[R]. Annapolis: U. S. Naval Academy, 2013.
- [9] Findlay D B, Ghee T. Experimental investigation of ship airwake flow control for a US navy flight II-A class destroyer (DDG) [C]// Proceedings of 3rd AIAA Flow Control Conference, 2006: 1-11.
- [10] Greenwell D I, Barrett R V. Inclined screens for control of ship air wakes[C]// Proceedings of 3rd AIAA Flow Control Conference, 2006: 1-12.
- [11] Kääriä C H, Wang Y X, White M D. An experimental technique for evaluating the aerodynamic impact of ship superstructures on helicopter operations [J]. Ocean Engineering, 2013, 61: 97-108.
- [12] H. 史里希廷. 边界层理论[M]. 北京: 科学出版社, 2016.  
Schlichting H. Boundary layer theory[M]. Beijing: Science Press, 2016. (in Chinese)
- [13] 汪健生, 田永生. 非定常绕流主动控制的数值分析[J]. 化工学报, 2012(12): 3784-3790.  
WANG Jiansheng, TIAN Yongsheng. Numerical analysis on active control for unsteady flow around cylinder [J]. CIESC Journal, 2012(12): 3784-3790. (in Chinese)
- [14] 李斌斌, 姚勇, 顾蕴松, 等. 合成射流后台阶分离流动控制的实验研究[J]. 实验流体力学, 2016, 30(3): 53-60.  
LI Binbin, YAO Yong, GU Yunsong, et al. Experimental investigation on separation flow control of backward facing step with synthetic jet [J]. Journal of Experiments in Fluid Mechanics, 2016, 30(3): 53-60. (in Chinese)
- [15] 陈国定. 后台阶流动控制研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2012.  
CHEN Guoding. Research on the backward-facing step flow control[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2012. (in Chinese)
- [16] Krzysiak A. Control of flow separation using self-supplying air-jet vortex generators[J]. AIAA Journal, 2008, 46(9): 2229-2234.
- [17] Hecklau M, Wiederhold O, Zander V, et al. Active separation control with pulsed jets in a critically loaded compressor cascade [J]. AIAA Journal, 2011, 49(8): 1729-1739.
- [18] Gallas Q, Lamoureux M, Monnier J C, et al. Experimental flow control on a simplified ship helideck[J]. AIAA Journal, 2017, 55(10): 3356-3370.
- [19] 李新飞. 舰载机起降关键技术仿真研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2012.  
LI Xinfei. Simulation of key technology of launch and land for carrier-based aircraft [D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2012. (in Chinese)