

doi:10.11918/j.issn.0367-6234.2016.10.022

# 舰船尾部结构对直升机操作区流场的影响

王金玲, 郜冶

(哈尔滨工程大学 航天与建筑工程学院, 哈尔滨 150001)

**摘要:**为研究舰船尾部结构对流场环境的影响,以典型护卫舰简化模型 SFS1 为对象,选用通用软件 ANSYS ICEM 划分结构化网格并用 ANSYS FLUENT 标准  $k-\varepsilon$  湍流模型模拟了机库门开闭不同状态、不同机库高度及不同飞行甲板长度等特征结构的变化对直升机操作区气流场的影响。通过分析流场中的速度、压力等物理量,对比了不同工况下的流场环境。对比结果显示,机库高度越低、飞行甲板长度越长舰载机操作区的流场环境越好,机库门半开时流场环境较机库门关闭和全开状态时差,但是机库门关闭和全开两种状态相比没有明显的优劣之分。这可为在役舰船的改造和再建舰船的优化设计提供理论依据和数据支持,进而有效改善舰载机起降时的流场环境,提高海军指挥直升机进行安全着舰的能力。

**关键词:** 空气流场; 舰船结构; 数值模拟; 护卫舰; 湍流模型

**中图分类号:** U674.74

**文献标志码:** A

**文章编号:** 0367-6234(2016)10-0148-07

## The influence of ship tail structure to airwake on helicopter operation area

WANG Jinling, GAO Ye

(College of Aerospace and Civil Engineering, Harbin Engineering University, Harbin 150001, China)

**Abstract:** In order to study the influence of ship tail structure on the airwake, the simple frigate shape SFS1 has been chosen for this study and the numerical simulation of ship airwakes has been performed. The ANSYS FLUENT standard turbulence model is used on the structured grids generated by ANSYS ICEM. The influences of the closing/opening state of the hangar, the hangar height and the flight deck length were simulated. The ship airwakes in different conditions were compared by analysing the physical parameters such as the velocity and pressure. It is shown that: the flow field environment will become better when the hangar height becomes lower and the flight deck beomes longer; the airwake becomes worse when the door is ajar than that when the door is closed or open; while neither airwake is superior when the door of hangar is closed or open completely. The present work will provide theory and data support for the modification of ship in service and the improvement of ship in construction, which will improve the ship airwake for shipboard aircrafts, and the capability to command and control the launch and recovery of shipboard aircraft.

**Keywords:** airwake; ship structure; numerical simulation; frigate; turbulence model

随着海洋事业的发展和现代海战向立体化、大纵深、多层次方向的发展,各国海军迫切需要掌握海上制空权,维护海洋权益,保障领海安全<sup>[1]</sup>。舰载机是以航空母舰或其他军舰为基地的海军飞机,可以担负海上两栖突击、反潜反舰、空中预警、侦察救护、巡逻护航以及中继制导、垂直补给、电子战、反水雷等任务。它是海军航空兵的主要作战手段之一,其大大加强了舰船海上作业和作战能力,目前已成为世界各国海洋事业和舰船现代化的重要标志<sup>[2-3]</sup>。但

是,舰船不同于陆地,除了总体尺度小以外,它还要随风浪进行不规则的摇摆运动,加之舰面建筑物一般属于非流线型,这会对飞行甲板附近区域的气流产生强烈扰动,形成复杂的空气流场,严重影响舰载机在舰上的起降安全<sup>[4]</sup>。舰船空气流场是舰载机在舰船上起降时的主要环境条件,也是危及飞行安全的主要因素之一,另外在舰船设计领域,舰船空气流场的特性已经成为舰船设计优化工作中必须考虑的问题,因此研究舰船空气流场有重要的意义。

2001年美国的 Tai<sup>[5]</sup>通过在典型护卫舰简化模型 SFS1 的船首增加半圆柱体过渡段的方法避免了船体两侧的流动分离现象;2005年,Jeremy 等<sup>[6]</sup>以 CVN-76 为研究对象划分非结构化网格并用 CRUNCH CFD<sup>®</sup> 求解器进行了时间精确的数值模

收稿日期: 2015-03-16

基金项目: 国家自然科学基金(11372079)

作者简介: 王金玲(1988—),女,博士;

郜冶(1953—),男,教授,博士生导师

通信作者: 王金玲, wangjinling07@163.com

拟,研究了舰船岛型建筑复杂程度及边界层对舰面流场的影响;同年 Shafer<sup>[7]</sup>用风洞实验方法研究了舰船机库顶部加装的不同流动控制装置对飞行甲板位置处流场的改善程度,并得出网状泡沫改善效果最佳的结论.美国海军军官学校(USNA)的 Snyder 等<sup>[8-12]</sup>从 2010 年开始展开舰船空气尾流的调查研究工作,他们利用 Cobalt 中的 MILES 模型模拟了美国海军巡逻舰 YP676 舰船在不同风向角下的流场,并发现加载流动控制装置锯齿挡板后,尾流对直升机旋翼的影响有所减小,这些计算结果都经过了实船测量或者风洞实验的验证,证明 CFD 在研究舰船空气尾流对旋翼直升机的影响中是非常有用的工具.在国内,2007 年赵维义等<sup>[4]</sup>利用 PIV 测量了某型舰船不同工况下的空气流场并分析了下冲气流、涡流区及开/关机库门等对直升机着舰的影响;2009 年姜治芳等<sup>[13-14]</sup>将 LHA 的直通甲板改为滑跃式甲板,并对比了两种甲板形式下舰面流场的优劣,同时比较了上层建筑位置、大小及其边缘直角或圆弧过渡等不同形式及布局下舰面流场的特点.本文以典型护卫舰简化模型 SFS1 为对象,采用数值模拟的方法研究其不同机库门状态、不同机库高度及不同飞行甲板长度等特征结构对直升机操作区气流场的影响.

## 1 物理模型与数学描述

### 1.1 物理模型

不同舰船搭载不同直升机时,直升机的操作区域有所不同,本文以典型护卫舰简化模型 SFS1 (图 1)搭载 Westland Lynx 直升机(图 2)为例进行研究,Westland Lynx 直升机旋翼直径为 12.8 m,机高 2.964 m.坐标原点位于船首底部中心位置,计算区域  $x$  轴表示船长方向,由船头指向船尾为正方向, $y$  轴表示船宽方向,由左舷指向右舷为正方向, $z$  轴表示船高方向,由下方指向上方为正方向.计算区域边界距船首和船尾均为 10 倍船长,距船两舷均为 30 倍船宽,距船顶部为 10 倍船高.直升机理想着舰点  $O$  距离船尾 10 m,着舰瞬间旋翼距离飞行甲板的高度为 2.964 m.本文选取机库门关闭、半开和全开 3 种不同状态、3 种机库高度  $H$ 、3 种飞行甲板长度  $L$  等共 9 种工况研究来流风速  $U_0 = 20$  m/s,风向角为  $0^\circ$  时,舰船尾部结构的改变对直升机操作区流场的影响.

### 1.2 数学模型

舰船周围的流场属于三维复杂湍流场,为简化计算设空气为不可压缩流体且符合 Boussines 假设,流动为稳态紊流,忽略固体壁面间的热辐射.采用标准  $k-\varepsilon$  两方程模型对气流场进行数值模拟.建立流场稳定后的湍流控制通用方程,如<sup>[15-16]</sup>

$$\operatorname{div}(\rho \mathbf{V} \varphi) = \operatorname{div}(\Gamma \operatorname{grad} \varphi) + S.$$

式中: $\operatorname{div}(\rho \mathbf{V} \varphi)$  为对流项; $\operatorname{div}(\Gamma \operatorname{grad} \varphi)$  为扩散项; $S$  为源项.控制方程包括连续方程、动量方程、能量方程、 $k$  方程和  $\varepsilon$  方程.其中湍动能  $k$  和耗散率  $\varepsilon$  的输运方程分别为

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_i} \right] + G_k + \rho \varepsilon,$$

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \varepsilon u_i) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i} \right] + \frac{\varepsilon}{k} (C_{1\varepsilon} G_k - C_{2\varepsilon} \rho \varepsilon).$$

式中: $G_k$  为由平均速度梯度引起的湍动能  $k$  的产生项, $G_k = \mu_t \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial w_i}{\partial x_j} \right) \frac{\partial u_i}{\partial x_j}$ ;  $\mu_t$  是湍动黏度,可表示成湍动能  $k$  和耗散率  $\varepsilon$  的函数,即  $\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon}$ ;  $C_{1\varepsilon}$ 、 $C_{2\varepsilon}$  分别为经验常数; $\sigma_k$ 、 $\sigma_\varepsilon$  分别为湍动能  $k$  和耗散率  $\varepsilon$  对应的 Prandtl 数.本文模型常数取为  $C_\mu = 0.09$ ,  $C_{1\varepsilon} = 1.44$ ,  $C_{2\varepsilon} = 1.92$ ,  $\sigma_k = 1.0$ ,  $\sigma_\varepsilon = 1.3$ .

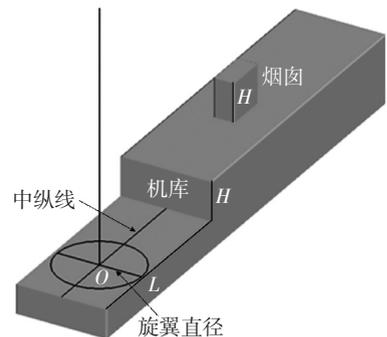


图 1 SFS1 仿真计算模型

Fig.1 CFD model of SFS1



图 2 Westland Lynx 直升机

Fig.2 Westland Lynx helicopter

## 2 网格划分及边界条件

### 2.1 网格划分

典型护卫舰简化模型 SFS1 结构简单,使用如图 3 中所示的全结构化网格,为验证网格无关性,划分 3 种不同数量的网格进行对比分析,3 种网格数量分别为: $8.32 \times 10^6$ ,  $1.14 \times 10^7$ ,  $1.43 \times 10^7$ .船体中纵线上压力系数计算结果如图 4 中所示.计算结果显示随网格数量的增加,船体中纵线上压力系数计算结果

变化不大且均与风洞试验结果吻合较好.为保证计算精度并节约计算时间,选取中等数量网格进行进一步的计算研究.

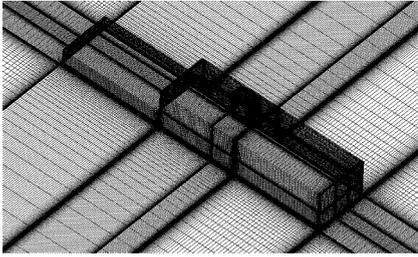


图 3 网格分布

Fig.3 Mesh distribution

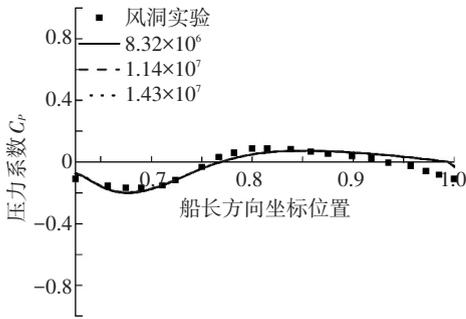


图 4 3 种网格数量下中纵线上压力系数与风洞实验结果对比

Fig.4 Comparison of CFD and experimental  $C_p$  for centerline of SFS1

### 2.2 边界条件

数值计算中入口为速度入口,风速为 20 m/s,风向角为 0°,出口设为压力出口,计算区域左右和上边界设定为压力入口(自由边界),舰船表面及海平面设为壁面.基于自由来流速度并以舰船宽度为特征长度的  $Re$  为  $1.83 \times 10^7$ .

## 3 数值计算与结果分析

如图 5 中所示,气流流过舰船表面后形成复杂的舰面流场,在机库后方的飞行甲板位置产生涡流区及下洗气流.理论分析和飞行实践表明,尾流场中的下洗气流和涡流区对直升机的影响最大,一方面涡流区内速度方向的变化会对直升机的平衡及操稳性能产生影响;另一方面,涡流区内的低压会对直升机产生吸力使其前冲,负压较大时可能致使旋翼撞击到机库门,严重威胁直升机的安全;下洗气流作用于旋翼会引起直升机明显的“前冲”和“上鼓”<sup>[4]</sup>.本文主要从涡流区的大小、垂向速度大小及压力分布等方面进行对比分析.

### 3.1 机库门开闭对直升机操作区流场的影响

为研究机库门开闭对直升机操作区流场的影响,现设置 3 种不同的机库门状态进行研究:机库门关闭、机库门半开、机库门全开.

如图 6、8、10 所示随机库门打开程度的增大,飞行甲板位置处上洗气流的范围及强度明显减弱,下

洗气流的范围增大但强度减小;图 12(经过理想着舰点的直线上量纲一的垂向速度的分布)显示机库门关闭和全开两种状态下经过理想着舰点直线上的下洗速度没有变化,但机库门半开状态下下洗速度增大,在 1.1、2.1 倍机库高度处下洗速度增加幅度较大,与机库门关闭和全开两种状态相比,下洗速度值分别增加 7% 和 3%;图 7、9、11 显示机库门开闭不同状态对旋翼高度平面内水平切向气流的影响只局限在机库门后方约 2 m 长的范围内,随机库门打开程度增大此区域内切向气流的范围及强度明显减弱,机库门全开时,机库后方的 2 m/s 等值线消失,旋翼位置处的切向气流不受机库门开闭的影响.

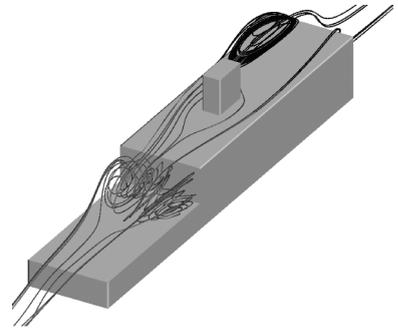


图 5 机库后方飞行甲板位置的涡流区

Fig.5 The vortex region of flight deck behind the hangar

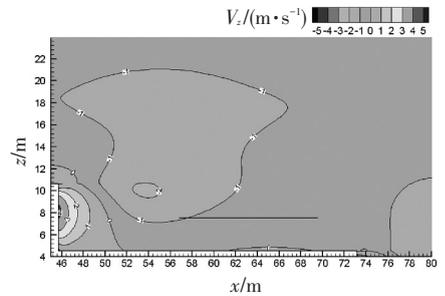


图 6 机库门关闭时中纵面垂向速度分布

Fig.6  $z$ -component velocity contours at the ship center in closed hangar door condition

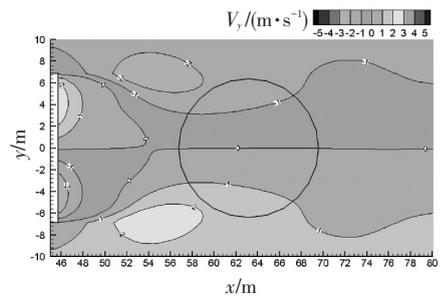


图 7 机库关闭时旋翼平面切向速度分布

Fig.7  $y$ -component velocity contours at the rotor plane in closed hangar door condition

机库门 3 种状态下舰船中纵面上压力分布分别如图 13、15、17 所示,机库门打开后,受机库内部低压的抽吸作用,气流流入机库进一步形成涡流区,尤其是机库门半开(图 15)时,受机库门的阻挡作用,机库内部的涡流区与飞行甲板处的涡流区发生分

离,形成两个方向相反的涡,机库内的涡流充满整个机库.机库内的低压会对在飞行甲板位置进行作业的直升机产生附加的吸力,使直升机前冲幅度增大,这将严重影响直升机的安全.

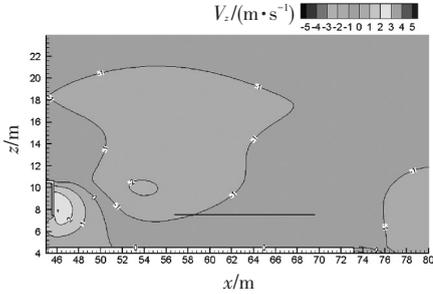


图 8 机库门半开时中纵面垂向速度分布

Fig.8 z-component velocity contours at the ship center in half open hangar door condition

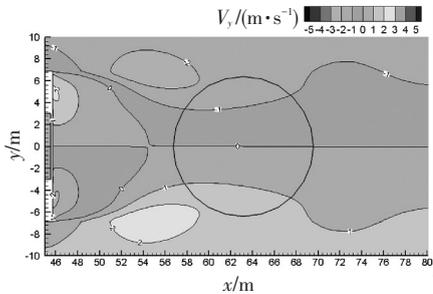


图 9 机库半开时旋翼平面切向速度分布

Fig.9 y-component velocity contours at the rotor plane in half open hangar door condition

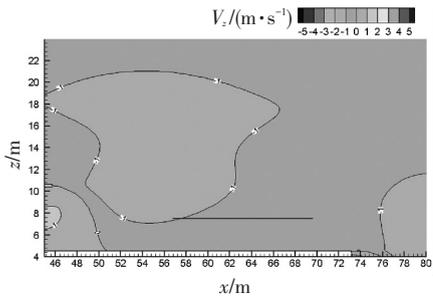


图 10 机库门全开时中纵面垂向速度分布

Fig.10 z-component velocity contours at the ship center in open hangar door condition

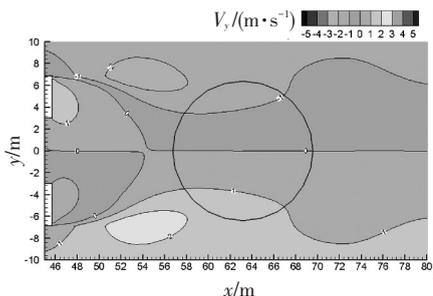


图 11 机库全开时旋翼平面切向速度分布

Fig.11 y-component velocity contours at the rotor plane in open hangar door condition

机库门 3 种状态下舰船中纵面上流线分布分别如图 14、16、18 所示.与机库门关闭状态相比,机库门全开(图 18)时,受机库内低压影响涡流区向机库

内移动,使旋翼接触到的涡流区减小;同时可减弱旋翼诱导速度形成的返流,这有助于提高直升机的操稳性能;另外,机库门打开后会给飞行员一种空间增加的感觉,增强其心理上的安全性.但机库门半开状态时飞行甲板位置的涡流区并没有向机库内部移动,且旋翼诱导速度仍会在机库门位置形成较强烈的返流,因此 3 种状态中机库门半开状态时飞行甲板处的流场环境最差.但关闭和全开两种状态下的流场环境相比,各有利弊,仅从目前的计算结果中很难得出结论,可能需要结合大量飞行实验及飞行员的经验做进一步的研究.

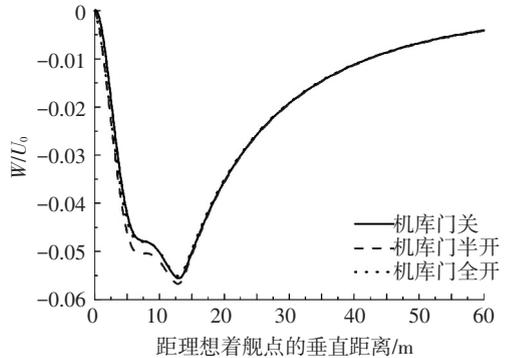


图 12 不同机库门状态时经过理想着舰点的直线上量纲一的垂向速度的分布

Fig.12 Dimensionless z-component velocity on the line passing ITDP in different hangar door conditions

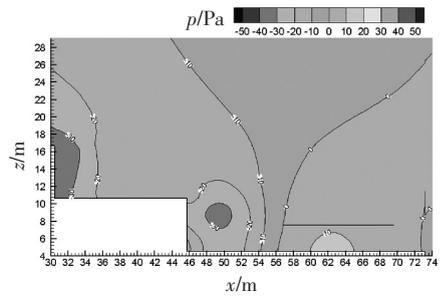


图 13 机库门关闭时中纵面压力分布

Fig.13 Pressure contours at the ship center in closed hangar door condition

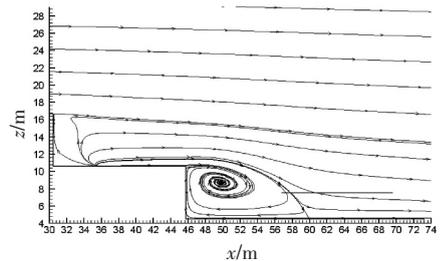


图 14 机库门关闭时中纵面流线分布

Fig.14 Streamlines at the ship center in closed hangar door condition

### 3.2 机库高度对直升机操作区流场的影响

为研究机库高度对直升机操作区流场的影响,现设置 3 种不同的机库高度进行研究:原机库高度、机库高度降低 5%、降低 10%.如图 19、21、23 所示随

机库高度降低垂向气流的影响范围逐渐减小,0 m/s 速度等值线高度逐渐降低,机库高度降低 10% 时,4 m/s 的上洗速度等值线及 2 m/s 的下洗速度等值线均已消失.因为机库后方的涡流区高度及长度主要由机库高度决定,故随机库高度的降低,涡流区的高度和长度均有所减小(如图 20、22、24 所示);经过理想着舰点的垂向直线上量纲一的下洗速度的计算结果如图 25 中所示,随机库高度的降低,下洗速度值逐渐减小,且速度改变较大的位置为 1.1 倍机库高度及 2.1 倍机库高度处,相比与原机库高度计算结果,机库高度降低 5% 后在这两个位置处下洗速度值均降低 4%;机库高度降低 10% 后在这两个位置处下洗速度值分别降低 8%、7%.可见机库高度降低可以减小涡流区的高度及长度,并有效改善直升机操作区的垂向气流.

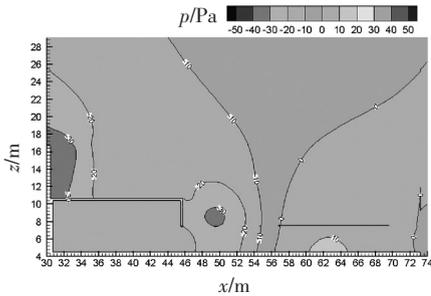


图 15 机库门半开时中纵面压力分布

Fig.15 Pressure contours at the ship center in half open hangar door condition

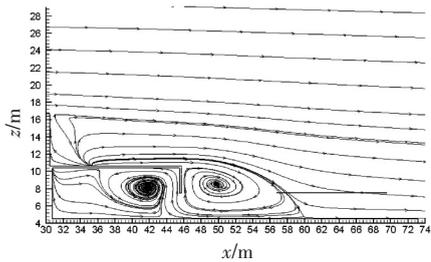


图 16 机库门半开时中纵面流线分布

Fig.16 Streamlines at the ship center in half open hangar door condition

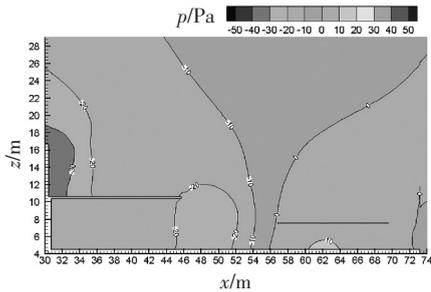


图 17 机库门全开时中纵面压力分布

Fig.17 Pressure contours at the ship center in open hangar door condition

### 3.3 飞行甲板长度对直升机操作区流场的影响

为研究飞行甲板长度对直升机操作区流场的影

响,现设置 3 种不同的飞行甲板长度进行研究:原飞行甲板长度、飞行甲板加长 10%、加长 20%.

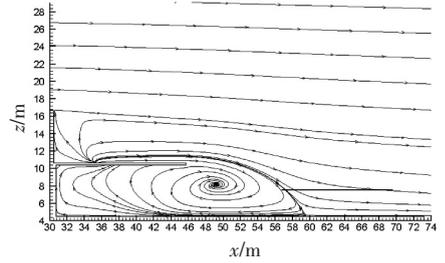


图 18 机库门全开时中纵面流线分布

Fig.18 Streamlines at the ship center in open hangar door condition

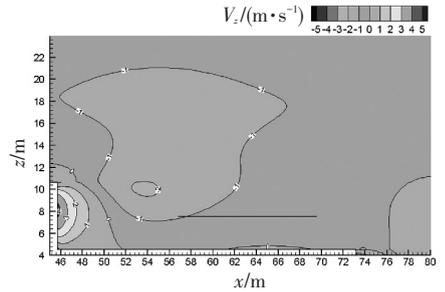


图 19 原机库高度时中纵面垂向速度分布

Fig.19 z-component velocity contours at the ship center in original hangar height

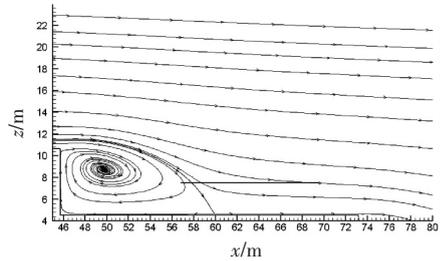


图 20 原机库高度时中纵面流线分布

Fig.20 Streamlines at the rotor plane in original hangar height

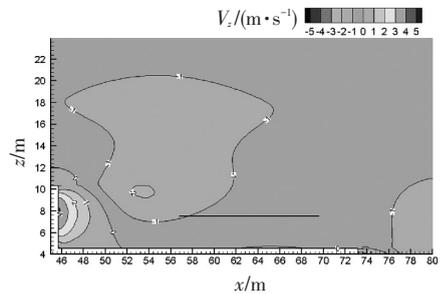


图 21 机库高度降低 5% 时中纵面垂向速度分布

Fig.21 z-component velocity contours at the ship center in hangar height cut-off 5%

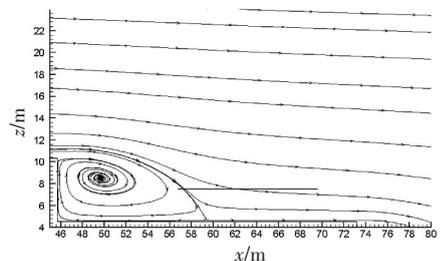


图 22 机库高度降低 5% 时中纵面流线分布

Fig.22 Streamlines at the rotor plane in hangar height cut-off 5%

舰船中纵面上垂向速度如图 26、28、30 所示, 流线分布如图 27、29、31 所示, 因为涡流区的长度主要有其前方障碍物的高度决定的, 故随飞行甲板长度的增加, 垂向速度和涡流区的大小基本没有变化。但因已经假设理想着舰点距船尾的距离为固定值, 所以随着飞行甲板长度的增加, 旋翼的位置向后移动, 其离涡流区越来越远, 受到的干扰也越来越小。图 32 中不同飞行甲板长度时经过理想着舰点的直线上量纲一的垂向速度分布显示, 随飞行甲板长度的增加理想着舰点上方的下洗速度逐渐减小, 且速度改变较大的位置为 1.1 倍及 2.1 倍机库高度处, 相比于原飞行甲板长度计算结果, 飞行甲板加长 10% 后在这两个位置处下洗速度值分别降低 4%、5%; 飞行甲板加长 20% 后在这两个位置处下洗速度值分别降低 20%、10%。可见飞行甲板加长可以使旋翼远离涡流区的影响, 降低理想着舰点上方的下洗速度。

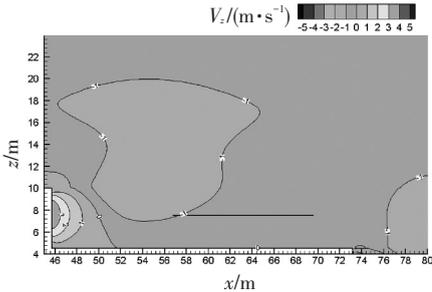


图 23 机库高度降低 10% 时中纵面垂向速度分布

Fig.23 z-component velocity contours at the ship center in hangar height cut-off 10%

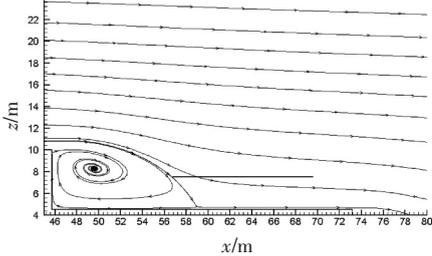


图 24 机库高度降低 10% 时中纵面流线分布

Fig.24 Streamlines at the rotor plane in hangar height cut-off 10%

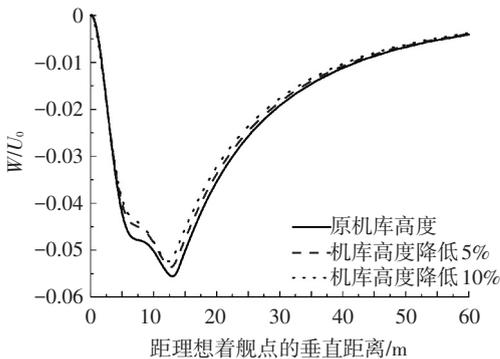


图 25 不同机库高度时经过理想着舰点的直线上量纲一的垂向速度的分布

Fig.25 Dimensionless z-component velocity on the line passing ITDP in different hangar heights

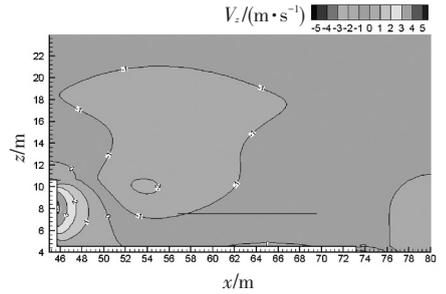


图 26 原飞行甲板长度时中纵面垂向速度分布

Fig.26 z-component velocity contours at the ship center in original flight deck length

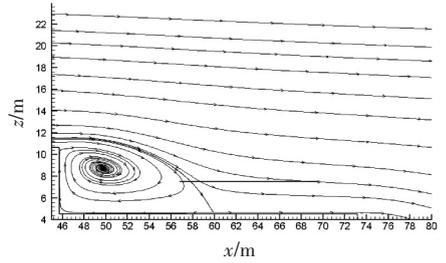


图 27 原飞行甲板长度时中纵面流线分布

Fig.27 Streamlines at the rotor plane in original flight deck length

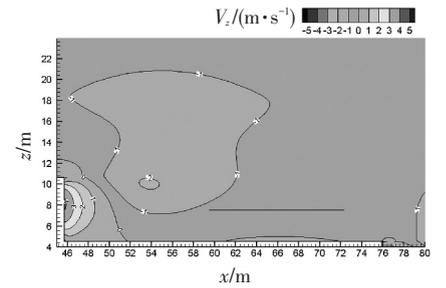


图 28 飞行甲板加长 10% 时中纵面垂向速度分布

Fig.28 z-component velocity contours at the ship center in flight deck length with more 10%

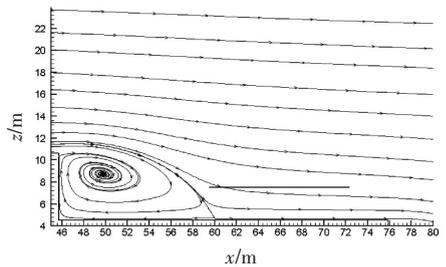


图 29 飞行甲板加长 10% 时中纵面流线分布

Fig.29 Streamlines at the rotor plane in flight deck length with more 10%

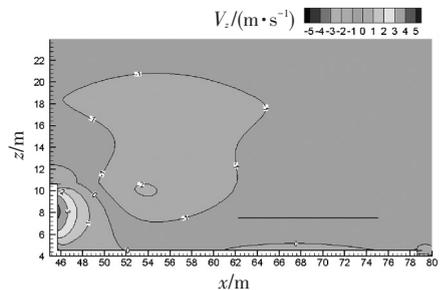


图 30 飞行甲板加长 20% 时中纵面垂向速度分布

Fig.30 z-component velocity contours at the ship center in flight deck length with more 20%

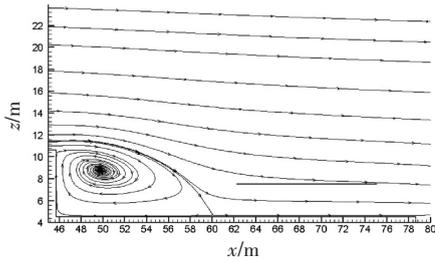


图 31 飞行甲板加长 20% 时中纵面流线分布

Fig.31 Streamlines at the rotor plane in flight deck length with more 20%

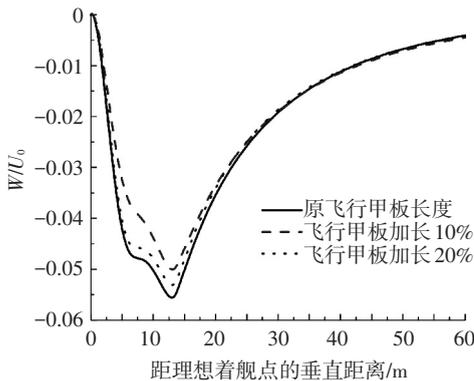


图 32 不同飞行甲板长度时经过理想着舰点的直线上量纲一的垂向速度的分布

Fig.32 Dimensionless  $z$ -component velocity on the line passing ITDP in different flight deck lengths

## 4 结 论

1) 改变舰船尾部结构时,理想着舰点上方下洗速度改变最大的位置均相同,即流场前方障碍物高度位置处。

2) 机库高度越低,飞行甲板长度越长,直升机操作区的流场环境越好。

3) 机库门半开时其流场环境较机库门关闭和全开时都差,但关闭和全开两种状态时理想着舰点上方的下洗气流分布基本相同,且流场环境各有利弊。

## 参 考 文 献

- [1] 金仲林. 舰载直升机系留座分布及系留载荷的仿真研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2006.  
JIN Zhonglin. Research on design of mooring bed distribution and simulation of mooring loads for ship-based helicopter[D]. Nanjing, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2006.
- [2] 安军. 航母尾流模拟及舰载机着舰控制的初步研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2012.  
AN Jun. Numerical simulation of aircraft carrier airwake and preliminary study on control law for automatic carrier landing[D]. Wuhan, Huazhong University of Science & Technology, 2012.
- [3] 傅百先, 赵维义. 舰载直升机着舰动力学分析[J]. 飞行力学, 1996, 14(1): 23-29.  
FU Baixian, ZHAO Weiyl. Dynamic analysis of shipboard helicopter landing[J]. Flight Mechanics, 1996, 14(1): 23-29.
- [4] 赵维义, 王占勇. 舰船空气尾流场对直升机着舰的影响研究[J].

海军航空工程学院学报, 2007, 22(4): 435-438. DOI: 10.3969/j.issn.1673-1522.2007.04.008.

ZHAO Weiyl, WANG Zhanyong. Research on the effect of warship air-wake on helicopter landing on shipboard[J]. Journal of Naval Aeronautical Engineering Institute, 2007, 22(4): 435-438. DOI: 10.3969/j.issn.1673-1522.2007.04.008.

- [5] TAI T C. Airwake Simulation of modified TTCP/SFS ship. RTO applied vehicle technology panel (AVT) symposium ADM001490 [R]. Loen; RTO-MP-069(1), 2003.
- [6] JEREMY S, SRINIVASAN A, CHRISTOPHER M, et al. Ship airwake sensitivities to modeling parameters[C]//Proceedings of the 43rd AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit. Reno; AIAA, 2005: 1-14.
- [7] SHAFER D M. Active and passive flow control over the flight deck of small naval vessels[D]. Virginia: Virginia Polytechnic Institute and State University, 2005.
- [8] SNYDER M R, SHISHKOFF J P, ROBerson F D, et al. Comparison of experimental and computational ship air wakes for YP class patrol craft[C]//AIAA Centennial of Naval Aviation Forum "100 Years of Achievement and Progress". Virginia Beach, VA: AIAA, 2011. DOI: 10.2514/6.2011-7045.
- [9] METAGER J D. Measurement of ship air wake impact on a remotely piloted vehicle[C]//Proceedings of the 68th American Helicopter Society International Annual Forum 2012, Worth, TX: AHS, 2012: 2916-2924.
- [10] SNYDER M R, KANG H S, BROUWELL C J, et al. Validation of ship air wake simulations and investigation of ship air wake impact on rotary wing aircraft [J]. Naval Engineers Journal, 2013, 125(1): 69-78.
- [11] LASALLE N R, SNYDER M R, KANG H S. Passive flow control for ship air wakes [C]//Proceedings of the 69th American Helicopter Society International Annual Forum 2013. [s.l.]: AHS, 2013: 576-589.
- [12] SNYDER M R, KUMAR A, BELTZVI P, et al. Validation of computational ship air wakes for a naval research vessel [C]//51st AIAA Aerospace Sciences Meeting Including the New Horizons Forum and Aerospace Exposition. Grapevine, TX: AIAA, 2013: 1-25.
- [13] 陆超, 姜治芳, 王涛. 两种飞行甲板形式的舰船空气流场特性比较[J]. 舰船科学技术, 2009, 31(7): 29-31. DOI: 10.3404/j.issn.1672-7649.2009.07.004.  
LU Chao, JIANG Zhifang, WANG Tao. A comparison of ships' airwakes with different flight decks [J]. Ship Science and Technology, 2009, 31(7): 29-31. DOI: 10.3404/j.issn.1672-7649.2009.07.004.
- [14] 洪伟宏, 姜治芳, 王涛. 上层建筑形式及布局对舰船空气流场的影响[J]. 中国舰船研究, 2009, 4(2): 53-68. DOI: 10.3969/j.issn.1673-3185.2009.02.012.  
HONG Weihong, JIANG Zhifang, WANG Tao. Influence on air-wake with different layout of ship superstructure [J]. Chinese Journal of Ship Research, 2009, 4(2): 53-68. DOI: 10.3969/j.issn.1673-3185.2009.02.012.
- [15] LAUNDER B E, SPALDING D B. The numerical computation of turbulent flows[J]. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 1990, 3(2): 269-289.
- [16] COMINI G, GIUDICE S. A ( $k-\epsilon$ ) model of turbulent flow [J]. Numer Heat Transfer, 1985, 8(2): 299-316 133-147. DOI: 10.1080/01495728508961846.

(编辑 张 红)