

不同护卫舰船型飞行甲板气流场特征研究

刘长猛, 郜 冶

(哈尔滨工程大学 航天与建筑工程学院, 150001 哈尔滨)

摘要: 为了研究舰船气流场特征,对简化船型 SFS1 和 SFS2 以及实体护卫舰船型进行数值模拟,与风洞实验数据对比验证,分析了飞行甲板周围气流场特征.通过对 SFS1 船型的计算,得到了舰船中心表面压力系数的分布,发现涡在机库顶端分离、脱落并且再附着于飞行甲板,验证了飞行甲板表面马蹄涡的存在.算例结果表明护卫舰船体结构对空气的阻滞作用是涡分离和脱落的重要驱动力.对于实体护卫舰船型分别计算了 0° 和右舷 30° 风向角时的气流场工况,分析发现机库结构的形状和尺寸会影响飞行甲板周围涡旋的强度和位置.在 0° 风向角时,机库门敞开有助于改善飞行甲板的气流场状况.

关键词: 护卫舰; 气流场; 飞行甲板; 数值计算; 涡旋

中图分类号: U674.774

文献标志码: A

文章编号: 0367-6234(2014)03-0080-06

Research on the airwake characteristics of flight deck for different frigate ship models

LIU Changmeng, GAO Ye

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

Abstract: To study the characteristics of ship airwake, the simplified frigate ship, SFS1 and SFS2, and actual frigate ship were simulated, and the results were used to analyze the characteristics of flow field around the flight deck by comparing with the experimental data in wind tunnel. The centerline surface pressure coefficient and vortex separation off the top of hangar shed and reattached on the flight deck were found by the simulation of SFS1, and the existence of horseshoe vortex on the surface of the flight deck was verified. An example indicates that the blocking of the ship geometry is an important driving force for the vortex separation and shedding. The actual frigate ship with 0° and 30° starboard winds was simulated, and the results showed that the shape and size of the hangar affected the intensity and location of the vortices around the flight deck. In the 0° wind direction, to open the hangar door could improve the flow field status of the flight deck.

Keywords: frigate; airwake; flight deck; numerical computation; vortex

风流过舰船结构边缘引发的高度瞬态变化的湍流气流场结构对舰载飞机在船上和船体周围的操作有很大影响.将舰船气流场数据和舰载机飞行控制平台相结合,降低舰载机起飞和降落的风险是当前国际的热门研究领域^[1].国外早期的计算流体动力学(CFD)研究始于稳态的流动方程,

而时间精确的 CFD 模拟能够更好地捕捉到所需要的舰船结构引起的非稳态的湍流气流场特征^[2-4].

基于舰船气流场研究的大尺度特性,CFD 计算需要耗费大量的 CPU 时间,随着计算机硬件和处理能力的提高,并行计算不断的应用于舰船气流场研究.文献[5-7]的计算结果证明了 CFD 模拟结果能够很好地符合风洞测试的结果;文献[8]进行 CVN 级航母尾流模拟,创建和实现了 F-18 航母着陆气流场模拟,实现了对 CFD 模拟数据的二次开发.不同模型和数值方法的应用,使得

收稿日期: 2013-03-27.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(10972063).

作者简介: 刘长猛(1986—),男,博士研究生;

郜 冶(1953—),男,教授,博士生导师.

通信作者: 郜 冶,gaoye66@126.com.

CFD 技术在舰船气流场预测方面得到了更广泛的应用.典型的护卫舰船体结构被简化为了通用的计算模型, SFS1 和 SFS2(图 1).文献[9]使用 FLUENT 的 $k-\varepsilon$ 模型计算了 SFS1 的气流场结构.文献[10]研究了不同计算模型和网格对 SFS1 和 SFS2 模型气流场的影响.文献[11-12]使用不同湍流模型均获得了 SFS2 船型的流场特征并与实验数据进行了对比研究.可以看到 CFD 能够准确进行气流场特征计算,而且 CFD 还可用于全尺寸计算并能够获得详细涡脱落和时间精确的数据.但是对于涡脱落特征的研究是较为缺乏的.

本文利用 CFD 对 SFS1 和 SFS2 船型进行数值模拟,分析飞行甲板周围气流场涡旋结构特征.通过对比 SFS1 中心处压力系数,验证数值模拟准确性,发现机库后巨大回流区的涡结构特征,捕捉到马蹄形涡旋以及影响区域.分析 SFS2 的计算结果,得到了侧向风对飞行甲板气流场涡旋结构的影响.基于非结构网格计算了某护卫舰的气流场形态,建立了气流场数据库.

1 数值模拟

1.1 CFD 模型

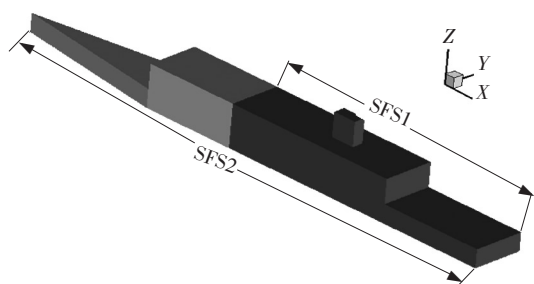
本文计算采用国际通用的简单护卫舰模型 SFS1 和 SFS2,模型如图 1(a).这个模型所产生涡的主要特征相似于典型护卫舰所产生的流场结构.有研究者^[2]使用这个模型进行并行数值研究和风洞与水洞的实验.模型 SFS1 主尺寸长 $\times$ 宽 $\times$ 高为 $97.5\text{ m}\times 13.7\text{ m}\times 16.8\text{ m}$,模型 SFS2 主尺寸长 $\times$ 宽 $\times$ 高为 $138.7\text{ m}\times 13.7\text{ m}\times 16.8\text{ m}$,具体尺寸参数见文献[2].

图 1(b)为某护卫舰 CFD 模型,基于 CFD 的计算限制,在尽可能保留完整舰船结构情况下,做了一些必要简化.实体护卫舰的计算有助于了解护卫舰船体结构真实气流场特征,并且获得舰船气流场数据用于进一步仿真计算.

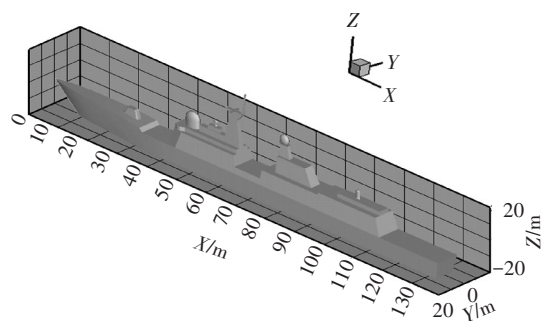
1.2 网格划分

计算使用的全部网格是由 ANSYS ICEM 生成(图 2).由于 SFS1 和 SFS2 几何形体较为简单,因此采用全结构化网格,在近壁面区域进行网格加密,在入口 20 m/s 的风速情况下,采用第一层网格高度为 0.005 m ,并且在计算过程中保证满足湍流模型计算所使用壁面函数的 y^+ 条件. SFS1 和 SFS2 网格总数分别为 2.5×10^6 和 3×10^6 .结构复杂的真实护卫舰模型采用混合网格,在船体壁面生成棱柱体网格,在外流场区域采用网格尺度逐渐粗化的四面体网格,棱柱体和四面体网格交

界处采用金字塔型网格作为过渡.网格总数为 8.9×10^6 .



(a) SFS1 和 SFS2 模型



(b) 护卫舰模型

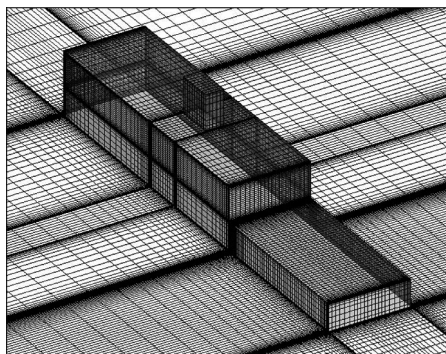
图 1 CFD 船型

1.3 计算区域和边界条件

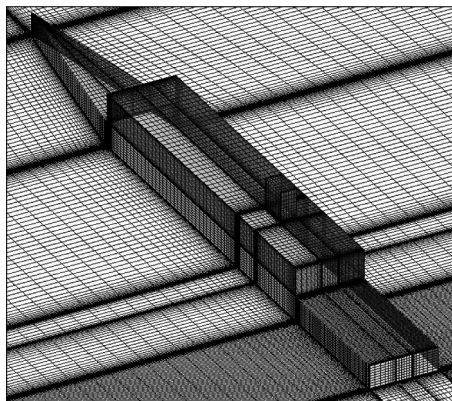
计算区域:船前为 5 倍船长 ($5L$),船后为 10 倍船长 ($10L$),左右均为 10 倍船宽 ($10W$),垂向为 10 倍船高 ($10H$).

边界条件:在本文计算中,雷诺数计算基于自由来流速度,并且以舰船 CFD 模型的宽度为特征长度.假定舰船静止不动,入口为速度入口 $U_{in} = 20\text{ m/s}$ (相当于船速 40 节),船体的所有表面均设定为无滑移壁面,出口边界为压力出口,将海平面设置为无摩擦的壁面.和风洞实验设计相比较,这样的设置也是合适的.其余边界均设为自由滑移壁面.右舷风时,船型左侧边界条件改为压力出口,右侧边界条件改为速度入口.

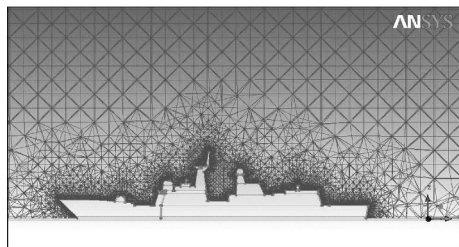
使用 FLUENT 的非稳态标准 $k-\varepsilon$ 模型进行计算,每次模拟计算要保证总体流动时间至少够一次计算域内空气彻底交换.参考文献[5-6]的设置,基于来流和最小网格尺度的关系,本文将定常时间步长选为 0.002 s ,文献[12]显示使用较小时间步长对于计算求解影响很小,迭代计算 60 000 个时间步,每 400 个时间步保存一次,时均化处理最后 12 000 个时间步的数据,以便于和风速计测得的时均的实验数据作对比.



(a) SFS1 表面和底面网格



(b) SFS2 表面和底面网格



(c) 护卫舰中间截面网格

图2 舰船网格细节

2 数值计算及结果分析

2.1 SFS1 计算结果分析

SFS1 呈现的是在船首处为前台阶流动,紧接着在飞行甲板和船体尾部处为两个后台阶流动的绕流现象,在飞行甲板处的流场结构是在三维后台阶流动中最常见的.气流在机库顶部的剪切层分离和在飞行甲板上的再附着.图3为SFS1中间截面飞行甲板处流线图.可以看到机库后存在巨大的回流区,涡旋左侧上洗气流影响范围仅到达机库顶端位置($z = 10.668 \text{ m}$).鉴于标准 $k-\varepsilon$ 模型对后台阶流动的计算能力,飞行甲板上附着点的位置应该是不够准确的.有待于利用更高级的模型进行验证.

图4为本文计算的SFS1中间截面上压力系数分布曲线与文献[2]中风洞实验数据的对比图.为了与实验数据作对比,对 x 方向长度进行了无因次化处理.可以看出本文计算结果与实验数据

整体趋势以及主要流场特征均吻合的很好,说明本文计算方法准确.图5显示为对机库后壁面马蹄涡的捕捉.与文献[11]中风洞实验图片相比较,本文计算很好地呈现了马蹄涡的位置和形状.在飞行甲板近壁面处的涡旋区呈现出了典型钝体绕流尾迹中的马蹄形流线分布.同时在水平方向,由于机库侧面对流体的阻碍作用,使得绕过机库的气流在机库后面形成了水平方向的两个对称回流涡旋.机库后面的流场结构复杂且具有极强的三维特性.

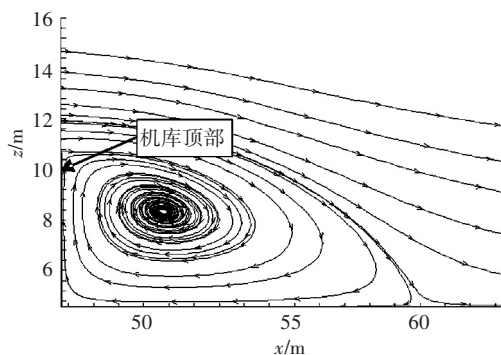


图3 飞行甲板中间截面二维流线图

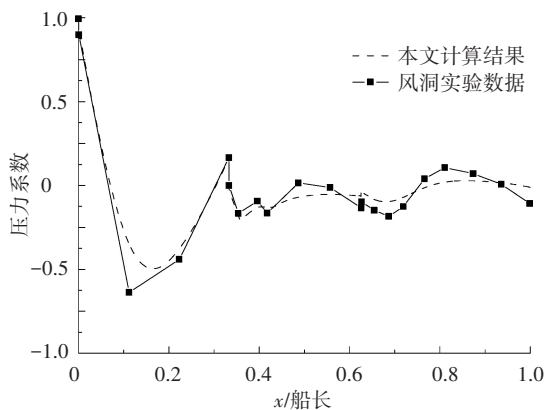
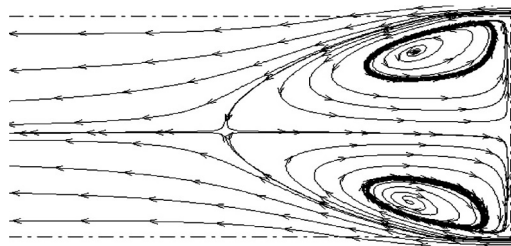
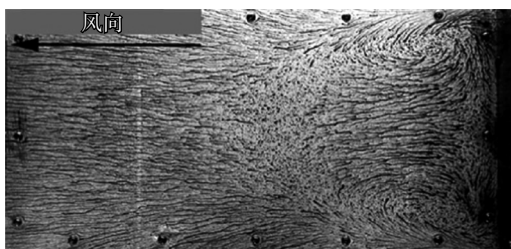


图4 舰船中心表面压力系数比较



(a) CFD 结果



(b) 风洞结果

图5 SFS1 飞行甲板的表面流线

图 6 为 $x = 49\text{ m}$, 50 m 处的截面流线图,从图 3 可以得到此两截面位于回流漩涡中心处。可以看到不同形态的涡旋结构相互作用在 yz 截面呈现的流动状态。 $x = 49\text{ m}$ 处,流线在距离飞行甲板的一定范围内形成长方形界面,并且存在一个压力梯度较高的空中分界面,界面内外的流线方向不同。在 $x = 50\text{ m}$ 处,界面内部气流变为下洗,且向两侧分流,规则的长方形界面已经被破坏,两侧界面内外流线仍然相反。SFS1 的计算结果显示机库结构影响了下游飞行甲板气流场涡旋结构的形态。

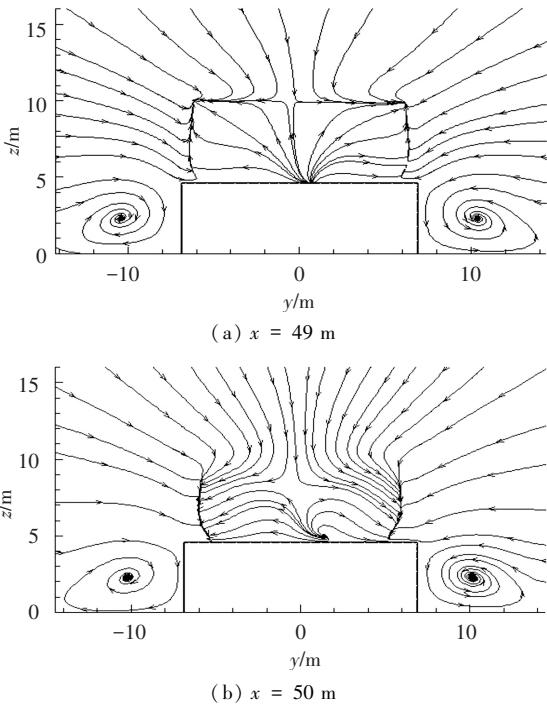


图 6 $x = 49\text{ m}$, 50 m 处二维流线图

2.2 SFS2 计算结果分析

SFS2 的模型更加接近于真实的护卫舰。减少了实体舰船天线和烟囱等结构对气流场产生的干扰, SFS2 的气流场研究有助于发现护卫舰舰船结构的更加本质的气流场特征。对于 SFS2 模型, 0° 风向角情况下, 飞行甲板上的气流场结构与 SFS1 的气流场结构完全相同。

图 7 为本文 CFD 计算的飞行甲板上部空间直线上的速度分布曲线与文献[12]的对比结果。直线位置为飞行甲板中间位置的 yz 截面上, 和机库等高度的直线。 x 轴为 y 向坐标与飞行甲板宽度的无量纲化的比值, y 轴为各向速度分量无量纲化比值。由图 7 可以看出, 本文 CFD 计算结果很好地吻合于风洞实验结果。速度曲线的整体分布趋势为左右对称, 但是从 x 轴 ± 0.4 处的 u 方向分量实验数据分布看出右侧速度明显小于左侧速度, 呈现了微弱的不对称性。在 Syms^[11] 所做的研

究中也可以看到这种不对称性。 v 方向速度分量左右两侧速度方向相反, 即均为从甲板外侧向中心流动, 但是数值呈现了很好的对称性。 w 方向上存在明显的下洗气流, 也显示了在机库顶部发生分离的气流向向下运动, 并附着于飞行甲板的流动现象。

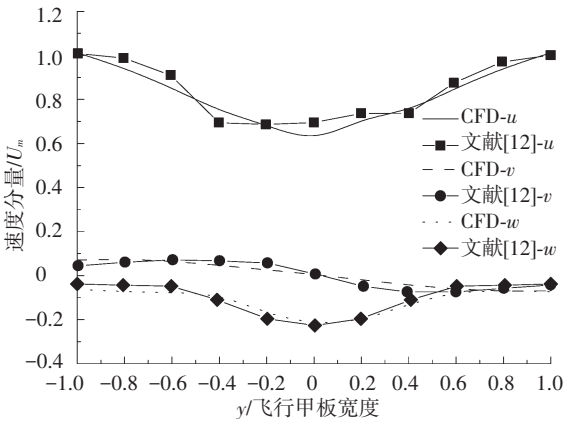


图 7 飞行甲板中间位置无量纲化速度

图 8 为当气流从右舷 45° 吹过船体时, 飞行甲板处三维流线示意图。可以看到飞行甲板上共有两个主要的涡旋。当气流接近船体右舷边界时, 由于受到船体阻碍作用, 在飞行甲板右侧壁面处出现紧贴船体壁面的上洗气流, 并且在向下游运动时控制了飞行甲板上的主要流场特征, 但是涡旋强度较小。第二个旋转的涡结构产生于机库的顶端, 气流向右下方运动的过程中, 在机库和飞行甲板相交的右侧夹角处出现三维特征明显的涡旋结构, 随着涡心向下游运动并且与飞行甲板交界处的上洗卷起的第一个涡旋发生强烈的相互作用, 逐渐向下游脱落并且伴有极强的瞬时特性。在船尾处同样存在涡旋, 但是对飞行甲板上的流场影响很小。

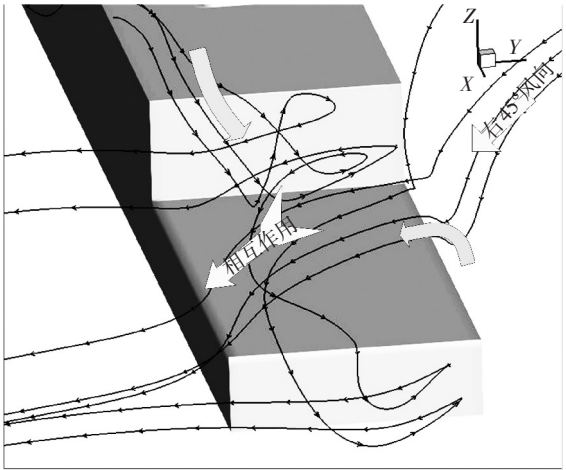


图 8 右舷 45° 风向角时飞行甲板流场结构

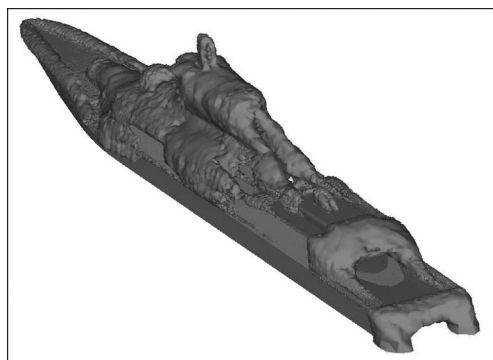
通过分析船体结构的影响, 发现空气受到船体的阻滞作用而使气流产生分离, 脱落和附着, 并且产生了飞行甲板处强烈的涡旋结构。因此护卫

舰船体结构对空气的阻滞作用是飞行甲板涡分离和脱落的重要驱动力。

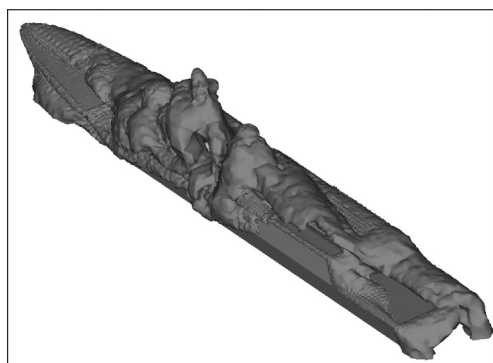
2.3 实体护卫舰计算结果分析

文献[13]针对非结构网格应用于舰船流场计算的研究结果表明,沿甲板边界的网格细化是采集船首和边界涡产生的关键.对位于船首,甲板和岛型建筑边界的网格进行细化,船体边界的网格细化对于下游船体边界分离涡的捕捉有重要作用.由于采用非结构网格且数量巨大,因此并没有计算非稳态结果。

图9为不同风向角时的涡量等值面图.由图9(a)可以清楚地看出主要有4个不同位置的涡系,船首两侧甲板的上洗涡结构,船体中间岛型建筑脱落涡,飞行甲板和船尾的涡旋结构.在主要影响飞行操作的飞行甲板区域,涡旋结构的产生主要因为机库后面巨大的低压区,气流在此分离和脱落.在侧向风情况下,整个船体的涡旋结构主要是由于右侧船体对气流的阻碍引起的,并且控制了整个船体区域的流场特征,流场结构也更为复杂.在涡量图中可以直观地看到,在机库和飞行甲板相交的右侧夹角处,不同涡旋结构相互作用,严重影响下游区域流场结构.在涡量图中可以更加明显地看出舰船结构对气流的阻滞作用,分析发现机库结构的形状和尺寸会影响飞行甲板周围涡旋的强度和位置。



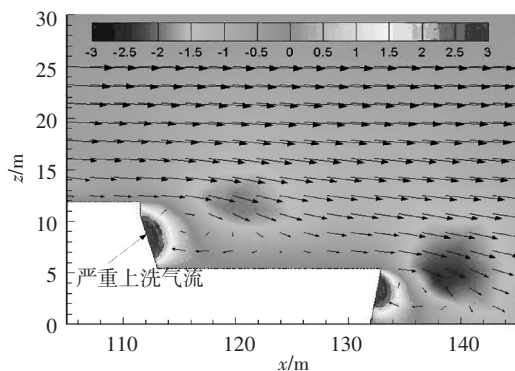
(a) 0°风向角



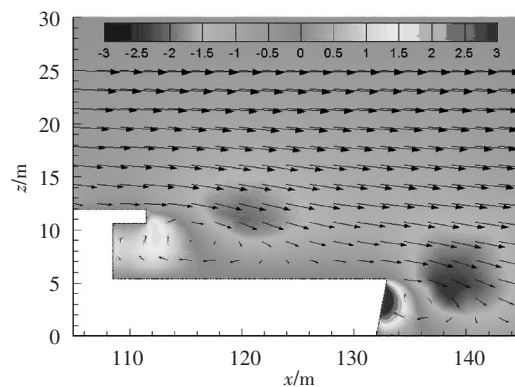
(b) 右舷 30°风向角

图9 涡量等值面(涡量值为2)

图10(a)为船体中心截面飞行甲板处速度矢量和垂向速度云图.由于垂向速度分量对于舰载直升机的飞行影响最大,因此研究并分析垂向速度分布对于舰载机飞行安全有重要意义.在图中可以明显地看到机库尾端存在严重的上洗气流.为了初步研究机库大门敞开对飞行甲板的影响,人为设定机库敞开并且进深3 m以内没有物体存在.如图10(b),初步研究发现在机库大门敞开情况下,垂向速度减弱,因此对于改善飞行甲板处的气流场有极为重要的作用。



(a) 机库门封闭



(b) 机库门敞开

图10 中间截面飞行甲板速度矢量和垂向速度云图

3 结 论

1)通过分析 SFS1 和 SFS2 气流场特征发现,0°风向角时,机库后面存在巨大的回流区,气流在机库顶端发生分离,脱落并且附着于飞行甲板,此时飞行甲板流场主要受回流区涡旋结构影响。

2)在右舷风向角时,飞行甲板处流场被两个主要涡旋结构控制,机库顶端分离涡和右侧甲板气流上洗涡旋.两个涡系在机库和飞行甲板的右侧夹角处相互作用和影响。

3)船体结构对空气的阻滞作用是涡分离和脱落的重要驱动力,机库结构的形状和尺寸会影响飞行甲板周围涡旋的强度和位置.初步研究结果表明,护卫舰机库敞开有利于减弱机库门附近

强烈的上洗气流.对于机库开口空间对气流场的影响有必要做进一步的研究.

参考文献

- [1] BOGSTAD M C, HABASHI W G, AKEL I, et al. Computational-fluid-dynamics based advanced ship airwake database for helicopter flight simulators [J]. Aircraft, 2002, 39(5): 830-834.
- [2] ROPER D M, OWEN I, PADFIELD G D, et al. Integrating CFD and piloted simulation to quantify ship-helicopter operating limits [J]. Aeronaut, 2006, 110 (1109): 419-428.
- [3] ZAN S. Technical comment on computational fluid dynamics based advanced ship-airwake database for helicopter flight simulation [J]. Journal of Aircraft, 2003, 40(5): 1007.
- [4] ROPER D M, OWEN I, PADFIELD G D. CFD investigation of the helicopter-ship dynamic interface [C]//In: 61st AHS annual forum proceedings. Grapevine, TX: AHS, 2005: 1985.
- [5] POLSKY S A, BRUNER C W S. Time-accurate computational simulations of an LHA ship airwake [C]//18th AIAA Applied Aerodynamics Conference. Reston, VA: AIAA, 2000: 288-297.
- [6] POLSKY S A. A computational study of unsteady ship airwake [C]//40th AIAA Aerospace Sciences Meeting & Exhibit. Reston, VA: AIAA, 2002: (SYA)25-1-(SYA)25-11.
- [7] CZERWIEC R M, POLSKY S A. LHA airwake wind tunnel and CFD comparison with and without bow flap [C]//22nd Applied Aerodynamics Conference. Reston, VA: AIAA, 2004: AIAA 2004-4832.
- [8] POLSKY S A, NAYLOR S. CVN airwake modeling and integration: initial steps in the creation and implementation of a virtual burble for F-18 carrier landing simulations [C]//AIAA Modeling and Simulation Technologies Conference and Exhibit. Reston, VA: AIAA, 2005: AIAA 2005-6298.
- [9] REDDY K, TOFFOLETTO R, JONES K. Numerical simulation of ship airwake [J]. Comput. Fluids, 1999, 29(4): 451-465.
- [10] YESILEL H, EDIS F O. Ship airwake analysis by CFD methods [J]. Am Inst Phys Conf Proc, 2007: 936: 674-677.
- [11] SYMS G F. Simulation of simplified-frigate air wakes using a lattice-Boltzmann method [J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2008, 96 (6/7): 1197-1206.
- [12] FORREST S, OWEN I. An investigation of ship airwakes using Detached-Eddy Simulation [J]. Computers & Fluids, 2010, 39(4): 656-673.
- [13] LIU Changmeng, GAO Ye. Grid Generation and Airwake Simulation on ship [J]. Applied Mechanics and Materials, 2013, 246-247: 336-340.

(编辑 张 宏)