文章编号: 1000-8608(2015)05-0457-07

多旋翼对舰船甲板流场影响数值研究

张术佳,赵佳,孙鹏*,刘文峰,钟兢军

(大连海事大学 轮机工程学院, 辽宁 大连 116026)

摘要:为了研究多架直升机同时悬停时对舰船甲板流场特性的影响,采用 Fluent软件对直 升机多旋翼结构和舰船耦合流场进行数值模拟,分析了不同风向工况下的流场结构、螺旋度 分布以及湍动能.结果表明:各旋翼周围的流场参数相互耦合、相互影响;侧风的加入使得流 场结构更加紊乱,形成来流、多旋翼与上层建筑之间的混合流场;湍动能超限区域覆盖了整个 甲板流场,这对于直升机的起降是非常不利的.

关键词:舰船;多旋翼;流场结构;数值模拟 中**图分类号:**O351 **文献标识码:**A

doi:10.7511/dllgxb201505002

0 引 言

舰载直升机以其独有的悬停特性和超低空飞 行能力用以执行海上搜救、反潜、导弹超视距目标 指示等任务^[1].而舰载直升机特有的工作环境使 直升机在起飞和降落过程中对舰船甲板的空气流 场要求比较严格,飞行甲板上方的飞行作业变得 极具挑战性,这也就要求必须对舰船飞行甲板上 方的空气流场特性有一个清楚的认识^[2].

美国海军以 LHA-2"塞班"号两栖攻击舰为 平台,采用 CFD 技术来分析美国海军塔拉瓦级两 栖攻击舰上层建筑的空气流场特性^[3].英国 CVF 项目设计团队对 CVF 及现役的无敌级航母开展 CFD 研究,分析 CVF 的空气流场特性并与现有 船型进行对比^[4].

陆超等^[5]针对 LHA 型舰缩比模型开展数值 研究,证明在甲板风速没有明显差异的情况下,风 向角的变化对舰面甲板流场的影响较大. 部冶 等^[6]对美国 CVN 船型进行全尺寸的数值模拟, 得出在相同风速工况下,风向角不同时甲板流场 结构发生较大变化. 该数值研究是基于固定船身 而言,而对于海上舰面甲板,舰船的六自由度不稳 定运动^[7]以及海面风向的复杂性^[8],使得在甲板 与上层建筑区域常有分离、旋涡以及回流等产 生^[9],舰面流场非常复杂,严重影响直升机起降的 安全.

据美国安全中心统计,舰载直升机飞行员面临的危及飞行安全的因素,大约是宇航员的5倍, 轰炸机飞行员的10倍,民航飞行员的54倍^[10]. 由此可见,对舰船甲板流场参数的探究不容忽视. 但是目前我国将直升机旋翼流场与上层建筑及舰 船航行工况引起的甲板流场相结合开展的研究较 少.基于此,本文采用 Fluent 软件,考虑直升机旋 翼的影响,模拟舰面多旋翼复合结构与上层建筑以 及来流的耦合流场,探究流场结构的分布变化规 律,为直升机在舰船甲板上方安全作业提供参考.

1 计算模型及数值方法

本文的研究对象如图 1 所示,该模型主要是 以塔拉瓦级两栖攻击舰为参考.其中,xz 和 yz 平面的阻塞率分别为 1.35%和 2.80%.旋转旋翼 以某 直 升 机 为 参 考 原 型,翼 型 选 用 传 统 的 NACA0012,旋翼转速为 350 r/min,叶片长度为 5 m,具体参数如表 1 所示.图 2 为旋翼的物理模 型,根据某直升机的机身高度,将旋翼模型置于甲 板停机坪中心点正上方 5 m 处.甲板为全通式平 甲板,布置 3 个旋翼位置,分别命名为 a、b、c.

收稿日期: 2015-05-05; 修回日期: 2015-07-15.

基金项目:国家自然科学基金青年基金资助项目(51409031).

作者简介:张术佳(1975-),男,博士生,E-mail:9228111@163.com;孙 鹏*(1979-),男,教授,E-mail:sunpeng-KIT@dlmu.edu.cn.



Fig. 1 Composite model of multiple helicopter rotors and warship and computational domain

表1 旋翼参数

Tab. 1 Rotor parameters

物理量	数值
翼型	NACA0012
翼型弦长	1 m
桨叶片数	2
桨叶仰角	10°
旋翼直径	12 m
桨毂长度	2 m
旋翼转速	350 r/min



图 2 旋翼物理模型 Fig. 2 Rotor physical model

数值模拟计算中,在定常条件下,设定来流风 速为 20 m/s,风向分别为 0°、+15°(船艏顺时针 为正)、-15°3 个工况进行数值模拟.在 Fluent 的计算中,参考耿雪等^[11]的边界条件设置.这样 设定坐标系的好处是可以把非定常问题转换成时 均定常问题,进而减少对计算机硬件的要求,缩短 计算周期,削减计算成本.

2 计算结果分析

本文主要分析在不同风向时,3个旋翼同时 悬停甲板上方的流场结构,即旋翼与旋翼之间、旋 翼与上层建筑及尾迹流场的相互掺混作用.流场 结构主要从三维流线图、截面流线螺旋度云图与 湍动能云图进行分析.

沿x方向分别截取7个截面,其中3、4、5号截 面分别经过直升机旋翼的中心;而在y方向,作y= 0的截面,该截面同样经过3个旋翼的中心,如 图 3 所示.



图 3 复合模型各截面的位置

Fig. 3 The position of each section of the composite model

2.1 多旋翼复合流场结构分析

图 4 给出了不同来流风向时甲板上方多个截 面的流线和螺旋度云图.0°风向时,来流在船体的 前缘发生了分离,在船艏位置形成对称涡流区,根 据图 4(a)中 1~7 号截面可知,在船体两侧形成 了对称、旋向相反的旋涡,之后顺着船体向后发 展,旋涡尺度逐渐增加、强度逐渐减弱,直至从船 艉消失.而对于来流为+15°和-15°风向工况时, 并没有在船艏位置分离,而只是分别在船体左舷 和右舷边缘产生涡流,发展规律与0°风向一致, 最后在船艉处消失.各旋翼均卷吸其周围流体随 其一起旋转,在旋翼桨尖处产生桨尖涡.而只有 0°风向工况时,旋翼产生的桨尖涡与来流中的下 冲气流发生掺混,形成新的涡流,如图 4(a)中的 截面 4、5、6 右下角所示,其与从船艏发展过来的 涡流旋向相反,相互挤压,并且沿着船体向后发 展,最终也在尾部脱落.当来流为-15°时(左舷 风),如图 4(c)所示,流场结构较其他两个工况简 单,只在上层建筑右侧(即甲板外侧)产生较大旋 涡区,但其对甲板上方直升机旋翼附近影响较小.

对于 3、4 号截面流线和螺旋度,即图 5、6 所 示,3 个风向工况下,旋翼尾流中向上层建筑方向 发展的部分,受到上层建筑的阻滞,使之压力升 高,而被迫向上流动,形成方向向上的反流,并反 作用于直升机旋翼^[12].对比 3 号和 4 号截面,4 号 截面处的反流旋涡强度较 3 号截面大,这是因为 旋翼 a 处于甲板前端,与上层建筑之间的相互作 用小于旋翼 b. 而 5 号截面处,即图 7 所示,旋翼 c 所处的位置由于右侧没有上层建筑,旋翼尾流将 不受阻滞,从而没有反流的产生.相比 3 号和 5 号 截面,4 号截面处的流场结构更为复杂,除了受上 层建筑的影响外,还因为旋翼 b 处于旋翼 a、c 之 间,其前、后桨尖涡分别与旋翼 a 后方桨尖涡、旋 翼 c 前方桨尖涡发生掺混形成更为复杂的混合涡 流. 当来流为+15°风向时,如图 4~7 中(b)所示, 根据各截面的流线方向,来流经过上层建筑时,产 生明显的下洗气流,其中 4 号截面最为显著;同 理,来流为-15°风向时,如图 4~7 中(c)所示,4 号截面处的上洗气流最为显著. 旋翼 c 产生的尾 流主要影响甲板后方区域,这对后面直升机悬停 的稳定性产生一定影响.





(b)+15° 图7 5号截面流线和螺旋度

(c) -15°

Fig. 7 Streamlines and helicity on section 5

2.2 多旋翼复合流场湍动能的分析

涡量定义的是速度场的旋度,涡量越大,对应 的湍流强度越大,也象征着该区域的湍动能越大. 所以,湍动能分布与流场中的旋涡结构有关.根据 CAP437的判定准则,在直升机起飞和降落区域 内,竖直方向速度的标准方差不能超过 1.75 m/s^[13].根据流体力学的知识,可以将其转化为湍动 能,即该起降区域的湍动能不能超过 4.59 m²/s².

对于 0°风向,如图 8 所示,从(a)中可知,在甲 板上方 y=0 截面处,高能区域从船艏一直连续 延伸到船艉,即当 a、b、c 旋翼都旋转时,甲板区域 的湍动能全部超限.在 1~6 号截面中,船艏的 1 号和 2 号截面湍流区域较小,但来流与旋翼 a 的 相互作用,使得该区域的湍动能超过限定值.3、4、 5 号截面有旋翼存在,从图中可以看出,湍动能超 限区域非常大,其中 4 号截面的超限区域最大,主 要是因为 a、c 旋翼产生的桨尖涡与 b 旋翼产生的 涡流相互掺混,并且甲板右舷方向有上层建筑的 阻滞,使得湍流更加紊乱,湍流区域必然较大.对 于 5 号截面,虽然没有上层建筑的阻滞,但是前方 来流与上层建筑产生的尾流以及旋翼的尾流最终 作用于甲板后方,使得后方大部分区域都是湍动 能超限区,但随着向后发展,该区域逐渐减小.





对于+15°风向,如图 9 所示,在 y=0截面 中,与 0°风向不同的是,在 2 号截面处,湍流区域 出现了断层,没有一直连续下去.1 号和 2 号截面 相比于 0°风向,湍动能超限区明显减小,但是 3、 4、5 号截面却大大增加,这主要是由于上层建筑 的影响.右舷来流在进入甲板区域前,受到上层建 筑的阻挡,使得上层建筑后方(即上层建筑的下风 向)形成涡流紊乱区域,而 a、b、c 旋翼的介入,使 得湍流更加的复杂.根据图 9(a)可知,4 号截面处 于湍流区域最高点,即该截面为受湍流影响最大 的区域.另外,右舷来风时,绕流只在船身左舷外 侧(即图 9(b)、(c)、(d)中右边)产生一道沿船身 向后发展的旋涡,故使得+15°风向工况船身左舷 方向的湍动能超限区域较 0°风向工况大.



Fig. 9 Turbulent kinetic energy on each section of composite model with the wind direction of + 15°

对于-15°风向工况,如图 10 所示,在 y=0 截面上,与+15°风向一致.风向的相反,使得 -15°风向工况下的上层建筑右舷,即甲板外侧, 出现大范围湍动能超限区域.3、4、5 号截面同样是 高湍动能的集中区域,因为左舷来流时,上层建筑 的阻滞,产生的反流与 a、b、c 旋翼产生的旋涡相 互作用,致使该截面附近的湍动能超限区域较大.



composite model with the wind direction of $-\,15^\circ$

由上可知,当 a、b、c 3 个旋翼同时旋转时,3 种风向工况下,该 3 处位置的湍动能都超限,同时 还影响着船艏和船艉的湍动能.其中,当来流风向为 -15°和+15°,只有 2 号截面处停机坪的位置不受其 影响,其湍动能未超限,满足直升机起降的要求.

从耿雪等^[11]单旋翼甲板复合流场的研究中 可知,在不同来流风向时,旋翼附近均处于湍动能 超限区域,但远离旋翼的船艏和船艉却处于安全 区域.因此,对比于多旋翼复合流场,为了保证直 升机的正常作业,相邻停机坪不宜同时进行直升 机的起降;右舷来流工况下,直升机的起降位置应 尽量靠近船艏和船艉;左舷来流工况下,旋翼 b 处 的停机坪不适宜进行作业.

2.3 风向对不同位置旋翼表面静压分布的影响

直升机旋翼表面静压分布直接决定其升力和 力矩的大小,而当两侧桨叶静压差值过大时,将会 影响旋翼的平衡性,不利于直升机的起降.为比较 旋翼不同展长位置的表面升力差异,将旋翼桨叶 对称截面位置静压值进行对比,各截面位置如图 11 所示,y=±1 m 为桨根位置,y=±6 m 为桨 尖位置,各截面间距1 m.由前文中多旋翼复合的 流场结构和湍动能分析中可知,+15°风向来流时 流场结构最为紊乱,故下文将以该工况为例来分 析各旋翼表面静压分布的情况.



图 11 旋翼桨叶截面位置 Fig. 11 Section positions of the rotor blades

图 12 分别为旋翼 a、b、c 桨叶表面静压曲线 图.由于 $y=\pm 2$ m、 $y=\pm 3$ m、 $y=\pm 4$ m 与 $y=\pm 5$ m 截面静压分布形态大致相同,故下文中主 要选取 $y=\pm 1$ m、 $y=\pm 5$ m 与 $y=\pm 6$ m 截面进 行对比.



Fig. 12 Static pressure on symmetric sections of rotor blade

从图中可以看出,各截面均在翼型前缘处取 得最大正压值与最大负压值; $y = \pm 1$ m 与 $y = \pm 6$ m 截面静压值分布异于其他截面,尤其 $y = \pm 6$ m 截面,上下表面静压几乎全部为负值;从桨 根($y = \pm 1$ m)到桨尖($y = \pm 6$ m),静压值跨度先 增大后减小,在 $y = \pm 5$ m 截面,静压差最大.

在同一工况下,旋翼 a、b、c 在相同截面位置 处的静压值分布趋势大致相同,但数值却有一定 的差异.其中,旋翼 a、b、c 的前行桨叶(实线曲线) 的静压值相比于后行桨叶(虚线曲线)要小,而沿 船艏至船艉方向,旋翼在相同截面位置处的静压 逐渐减小.两侧桨叶静压值的不同,势必会引起两 侧桨叶的升力和力矩产生一定的差值,影响旋翼 的平衡性.根据各旋翼的静压曲线图可知,旋翼 a 的平衡性最差,旋翼 c 的平衡性最好.

3 结 论

(1)3个风向工况下,直升机旋翼附近流场结构最为复杂.船艏区域受到来流与旋翼 a 的作用, 船艉受旋翼 c 产生的尾流的影响,使得甲板区域 前后方均产生不稳定的流场结构.

(2)旋翼 a、b 的尾流向上层建筑方向发展的 部分,受上层建筑的阻滞,形成反流并反作用于直 升机旋翼.同时,旋翼 b 前后桨尖涡分别与旋翼 a 后方桨尖涡、旋翼 c 前方桨尖涡发生掺混形成更 为复杂的混合涡流,使其附近流场的紊乱程度最 大,同时也导致旋翼 b 附近湍动能最大,即与旋翼 a 和 c 相比,旋翼 b 所在位置最不适合直升机起 降.

(3)船艏钝体结构使得不同风向的来流经过 船艏时,会在船身两侧形成不同大小的旋涡.0°风 向时,船体两侧形成对称、旋向相反的旋涡,之后 顺着船体向后发展,直至从船艉消失;+15°和 -15°风向时,分别只在船体左侧和右侧形成一道 涡流,其中+15°风向的流场结构较0°和-15°更 加复杂,对直升机旋翼的影响更大.

(4)0°风向时船体的湍动能超限区从船艏一 直延伸到船艉,而+15°和-15°在2号截面出现 了断层.当3个旋翼同时旋转时,该3处停机坪的 湍动能强度均超限,同时还影响着甲板大部分区 域.只有2号截面附近满足直升机的起降要求.

(5)+15°风向工况下,各旋翼桨叶表面的静

压分布趋势基本一致,均在翼型前缘处取得最大 正压值与最大负压值.在各旋翼中,旋翼 a 的平衡 性最差,旋翼 c 的平衡性最好.

参考文献:

- Lee D, Horn J F, Sezer-Uzol N, et al. Simulation of pilot control activity during helicopter shipboard operation [C] // AIAA Atmospheric Flight Mechanics Conference and Exhibit. Reston: AIAA, 2003:577-586.
- [2] 赵永振. 大型舰船定常与非定常气流场数值模拟
 [D]. 哈尔滨:哈尔滨工程大学, 2012.
 ZHAO Yong-zhen. Numerical simulation of steady and unsteady air flow field around large ship [D].
 Harbin: Harbin Engineering University, 2012. (in Chinese)
- [3] Polsky S A. A computational study of unsteady ship airwake [C] // 40th AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit. Reston: AIAA, 2002.
- [4] 曲 飞,陆 超,姜治芳,等.舰船舰面空气流场的 CFD 数值模拟探讨[J].中国舰船研究,2009, 4(5):23-27.

QU Fei, LU Chao, JIANG Zhi-fang, *et al.* CFD numerical simulation of ship air-wake [J]. **Chinese Journal of Ship Research**, 2009, **4**(5):23-27. (in Chinese)

 [5] 陆 超,姜治芳,王 涛.不同工况条件对舰船舰面空气流场的影响[J].舰船科学技术,2009, 31(9):38-42.

LU Chao, JIANG Zhi-fang, WANG Tao. Influences of different airflow situations for ship airwake [J]. Ship Science and Technology, 2009, 31(9):38-42. (in Chinese)

[6] 部 治,刘长猛,贺 征.风向变化产生的航母甲板 涡结构特征研究[J].空气动力学学报,2013, 31(3):310-315.
GAO Ye, LIU Chang-meng, HE Zheng. Research on CVN deck vortices structure characteristics caused by wind direction changes [J]. Acta Aerodynamica Sinica, 2013, 31(3): 310-315. (in

Chinese)

[7] 胡国才,侯志强,应朝龙.六自由度舰面模拟平台的 数学建模与仿真[J].海军航空工程学院学报, 2006,21(3):307-310,324.

> HU Guo-cai, HOU Zhi-qiang, YING Chao-long. Mathematical model and simulations of a 6-DOF

shipboard deck simulated platform [J]. Journal of Naval Aeronautical Engineering Institute, 2006, 21(3):307-310, 324. (in Chinese)

- [8] 孙文胜,毕玉泉,白春华. 舰载直升机的舰面效应研究[J]. 航空计算技术,2006,36(2):9-12.
 SUN Wen-sheng, BI Yu-quan, BAI Chun-hua.
 Research on shipboard effect of naval helicopter
 [J]. Aeronautical Computing Technique, 2006, 36(2):9-12. (in Chinese)
- [9] 马 强,朱旭程.舰载直升机起飞着舰事故模式影响及危害性分析[J].海军航空工程学院学报, 2012, 27(2):209-214.

MA Qiang, ZHU Xu-cheng. Failure mode effect and criticality analysis of shipboard helicopter during launch and recovery [J]. Journal of Naval Aeronautical and Astronautical University, 2012, 27(2):209-214. (in Chinese)

[10] 刘 航,赵维义.直升机载舰空气尾流特性试验方法[J].流体力学实验与测量,2002,16(4):57-63.
LIU Hang, ZHAO Wei-yi. Experimental methods on air wake characteristics of shipborne helicopter
[J]. Experiments and Measurements in Fluid Mechanics, 2002, 16(4):57-63. (in Chinese)

- [11] 耿 雪,孙 鹏,钟兢军.风向对甲板直升机旋翼流场结构的影响[J].工程热物理学报,2014, 35(3):465-471.
 GENG Xue, SUN Peng, ZHONG Jing-Jun. Influence of wind direction on flow field structure of the ship-borne helicopter rotor [J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2014, 35(3):465-471. (in Chinese)
- [12] 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.
 ZHAO Wei-yi, WANG Zhan-yong. 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. (in

Chinese)

 [13] 高 华,李东芳,于国杰,等.海上直升机甲板受环 境条件影响安全评估的研究综述[J].中国海洋平 台,2012,27(1):4-7,56.
 GAO Hua, LI Dong-fang, YU Guo-jie, et al.

Review of risk assessment for the environmental effects on the offshore helideck [J]. China Offshore Platform, 2012, 27(1):4-7,56. (in Chinese)

Numerical study of influence of multiple helicopter rotors on warship deck flow field

ZHANG Shu-jia, ZHAO Jia, SUN Peng*, LIU Wen-feng, ZHONG Jing-jun

(College of Marine Engineering, Dalian Maritime University, Dalian 116026, China)

Abstract: In order to study the influence of hovering helicopters on the flow field characteristics around a warship deck, numerical simulation is carried out on the coupling flow field of multiple helicopter rotors and warship using Fluent software. The flow field structure, helicity distribution and turbulent kinetic energy are mainly analyzed under different wind direction conditions. Simulation results show that parameters of flow field around each helicopter rotor couple and affect each other. Crosswind makes the flow field structure more disorderly, and the incoming flow, multiple helicopter rotors and superstructure generate the mixed flow field. Also, the zone of turbulent kinetic energy exceeding the limit covers the whole deck, which is bad for helicopter landing.

Key words: warship; multiple helicopter rotors; flow field structure; numerical simulation