

文章编号: 1007-7294(2025)02-0232-10

# 基于LBM-LES的航母风场尾流数值模拟研究

江召兵<sup>1</sup>, 王丙<sup>2</sup>, 王亮<sup>1,3</sup>, 任智源<sup>4</sup>

(1. 南京欧帕提亚信息科技有限公司, 南京 210000; 2. 陆军军事交通学院, 天津 300161; 3. 三江学院 土木工程学院, 南京 210000; 4. 华中科技大学 能源与动力工程学院, 武汉 430074)

**摘要:** 采用格子玻尔兹曼和大涡模拟相结合(LBM-LES)的数值方法, 针对未简化的航母模型, 模拟不同风速和风向角下的风场尾流。通过分析舰载机理想着舰轨迹上风场的分布特征, 发现相同风向角、不同风速条件下, 无量纲时均风速沿着舰轨迹具有相近的分布规律和大小, 垂向分量呈典型的“雄鸡尾”式分布, 下沉气流峰值约为来流速度的10%左右; 相同来流速度、不同风向角条件下, 左舷风时着舰轨迹受尾流影响范围明显大于右舷风时。此外, 左舷风时着舰轨迹上的垂直速度以下沉为主, 右舷风时既有下沉气流又有上升气流, 但以上升气流为主。

**关键词:** 计算流体动力学; 玻尔兹曼方法; 航母; 风场尾流; 着舰轨迹

**中图分类号:** U661.1 **文献标识码:** A **doi:** 10.3969/j.issn.1007-7294.2025.02.007

## Numerical simulation of wind field wake of aircraft carrier based on LBM-LES

JIANG Zhao-bing<sup>1</sup>, WANG Bing<sup>2</sup>, WANG Liang<sup>1,3</sup>, REN Zhi-yuan<sup>4</sup>

(1. Nanjing Opatiya Information Technology Co., Ltd., Nanjing 210000, China; 2. Army Military Transportation University, Tianjin 300161, China; 3. College of Civil Engineering, Sanjiang University, Nanjing 210000, China; 4. School of Energy and Power Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

**Abstract:** A numerical method combining Lattice Boltzmann and Large Eddy Simulation (LBM-LES) is used to simulate the wind field of the unsimplified carrier model under different wind speeds and wind angles. By analyzing the distribution characteristics of the wind field on the ideal landing trajectory, it is found that the dimensionless time-averaged wind speed has a similar distribution pattern and magnitude along the trajectory under the same wind angle and different wind speed conditions. The vertical component has a typical "rooster tail" distribution, with the peak of the sinking airflow being about 10% of the incoming velocity. For the same incoming speed and different wind angles, the influence of the wake on the landing trajectory during port wind is significantly larger than that of the starboard wind. In addition, the vertical velocity on the landing trajectory is mainly sinking in port winds and both sinking and rising in starboard winds, but predominantly upwelling.

**Key words:** CFD; lattice Boltzmann method; aircraft carrier; wind field of wake; landing trajectory

收稿日期: 2024-08-19

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(11572351; 51879058)

作者简介: 江召兵(1979-), 男, 副教授; 王丙(1986-), 男, 讲师, 通讯作者, E-mail: wangbingouc@163.com;

王亮(1979-), 男, 副教授; 任智源(1995-), 男, 硕士。

## 0 引言

舰载机进场着舰过程中, 航母以一定的航速逆风行驶, 会在舰尾形成复杂的扰流区。研究航母尾流场结构及其随外界因素的变化规律, 对舰载机降落的准确性和安全性具有十分重要的意义。

依靠实船直接测量和风洞试验的舰船尾流研究不但花费巨大, 而且无法得到风场的精细结构。因此, 随着计算机软硬件水平的提高, 计算流体力学(CFD)技术在舰船风场模拟方面得到越来越多的应用。Dooley等<sup>[1]</sup>使用爱荷华大学自研求解器研究了波浪和通用直升机上气流对ONRT舰船风场尾流的影响, 并对比分析了多种海况; Park等<sup>[2]</sup>使用改进的浸入式边界方法(IBM)对旋翼飞机机身和舰船风场尾流进行了流体动力学模拟, 与试验数据验证并获得非常好的一致性; Czerwiec等<sup>[3]</sup>模拟了LHA舰船模型的风场尾流, 数值结果与风洞实验结果吻合较好; Polsky等<sup>[4]</sup>模拟了CVN航母模型的风场尾流; Kulkarni等<sup>[5]</sup>使用FLUENT进行了护卫舰烟囱热气流场的参数研究; 龚杰等<sup>[6]</sup>利用分离涡模型模拟了导管桨的近尾流场并分析了其尾涡特性; 贾亮亮等<sup>[7]</sup>利用FLUENT模拟了甲板风对舰载机进舰轨迹的影响; 郜冶等<sup>[8]</sup>利用FLUENT研究了风向变化产生的航母甲板风结构。研究表明, CFD模拟不但成本低, 而且可以进行全尺寸舰船的模拟, 与风洞实验的比较也验证了其可靠性, 目前已成为研究舰船风场的重要手段。

由于风场尾流对舰船外形的依赖性很强, 因此模拟时采用的舰船模型越接近真实舰船, 模拟结果就越接近真实风场。但是, 当数值模拟采用贴体网格时, 舰船的复杂外形导致网格生成难度非常大, 往往需要对舰船模型进行大量简化<sup>[7-9]</sup>, 从而导致模拟结果在一定程度上的失真。LBM(Lattice Boltzmann Method)是近年来出现并迅速发展的一种新的数值方法, 由于它具有天然的并行性、适于处理复杂几何边界问题、计算效率和精度较高的特点, 已在越来越多的领域得到应用, 也为舰船风场尾流模拟提供了一种新的数值工具。

LBM是在介观尺度上求解Navier-Stokes方程, 可以对湍流进行直接模拟, 但以目前的计算条件只能模拟中低雷诺数流动, 无法满足工程需要。因此, 为了模拟实际工程中的高雷诺数流动, Succi等<sup>[10]</sup>将 $k-\varepsilon$ 两方程湍流模型引入到LBM中; Filippova等<sup>[11]</sup>将 $k-\omega$ 两方程湍流模型引入LBM中并研究了翼型的高雷诺数绕流; Li等<sup>[12]</sup>使用浸没边界法(IBM, Immersed Moving Boundary)和离散元法(DEM, Discrete Element Method)结合LBM建立了流固耦合的相间闭环系统; Shu等<sup>[13]</sup>分别用 $k-\omega$ 两方程模型和S-A模型结合LBM研究了后台阶绕流问题。由于两方程湍流模型需要求解额外的输运方程, 会破坏LBM算法简单、易于编程的优点, 因此Hou等<sup>[14]</sup>探讨了将LES(Large Eddy Simulation)亚网格黏黏模型引入LBM的方法; Krafczyk等<sup>[15]</sup>利用LBM与LES相结合的数值方法模拟了高雷诺数下的方柱绕流。LES与两方程湍流模型相比, 无需额外求解复杂的输运方程, 因此具有更高的精度和计算效率。

本文基于未做任何简化的俄罗斯基辅级航母“巴库号”模型, 采用LBM与LES相结合的数值方法(LBM-LES), 模拟了不同风速和风向角下航母的风场尾流, 并分析了舰载机理想着舰轨迹上的风场特征。

## 1 数值方法与验证

### 1.1 格子 Boltzmann 方法

离散形式的格子 Boltzmann 输运方程<sup>[16]</sup>为

$$f_i(\vec{r} + \vec{e}_i \Delta t, t + \Delta t) - f_i(\vec{r}, t) = \Omega_i, \quad i = 1, 2, \dots, b \quad (1)$$

其中,  $\vec{e}_i$  是粒子的离散速度,  $b$  是离散速度个数,  $\Delta t$  是时间步长,  $f_i$  是  $i$  方向上的分布函数,  $\Omega_i$  是碰撞算子。

基于 Bhatnagar-Gross-Krook (BGK) 模型的碰撞算子为

$$\Omega_i^{\text{BGK}} = \frac{1}{\tau} [f_i^{(\text{eq})} - f_i] \quad (2)$$

式中,  $\tau$  是松弛时间, 它与宏观尺度运动学粘性系数  $\nu$  之间的关系为

$$\nu = c_s^2 \left( \tau - \frac{1}{2} \right) \quad (3)$$

$f_i^{(\text{eq})}$  是局部平衡态分布函数, 其定义为

$$f_i^{(\text{eq})} = \rho \omega_i \left[ 1 + \frac{e_{i\alpha} u_\alpha}{c_s^2} + \frac{u_\alpha u_\beta}{2c_s^2} \left( \frac{e_{i\alpha} e_{i\beta}}{c_s^2} - \delta_{\alpha\beta} \right) \right] \quad (4)$$

式中,  $\rho$  是密度,  $c_s$  是声速,  $\omega_i$  是权重系数,  $\vec{u}$  是宏观尺度的流体运动速度, 下标  $\alpha$  和  $\beta$  表示向量的不同空间分量,  $\delta$  是 Kronecker delat 函数。

### 1.2 LBM-LES 方法

采用 LES 方法来模拟高雷诺数下的湍流运动, 该方法的基本思想是使用滤波器对控制方程进行滤波, 将流场分解为大尺度结构和小尺度结构。数值模拟时对大尺度结构进行直接求解, 而对小尺度脉动采用亚网格模型进行模拟。

在 LBM-LES 方法中, 湍流通过引入湍流松弛时间  $\tau_t$  加以考虑, 则有效松弛时间  $\tau^*$  为

$$\tau^* = \tau_0 + \tau_t \quad (5)$$

其中,  $\tau_0$  是层流松弛时间,  $\tau_t$  是湍流松弛时间。

$\tau^*$  与有效粘性系数  $\nu^*$  之间的关系为

$$\nu^* = \nu_0 + \nu_t = c_s^2 \left( \tau^* - \frac{1}{2} \right) \quad (6)$$

式中, 层流粘性系数  $\nu_0$  和湍流粘性系数  $\nu_t$  分别为

$$\nu_0 = c_s^2 \left( \tau_0 - \frac{1}{2} \right), \quad \nu_t = c_s^2 \tau_t \quad (7)$$

当  $\nu_0$  和  $\nu_t$  知道以后, 就可以通过上式求得相应松弛时间。

当雷诺数  $Re$  已知时, 层流粘性系数为

$$\nu_0 = \frac{UL}{Re} \quad (8)$$

式中,  $U$  是特征速度,  $L$  是特征长度。

湍流粘性系数  $\nu_t$  由 Smagorinsky 涡粘模型得到, 即

$$\nu_t = (C_s \Delta)^2 |S| \quad (9)$$

式中,  $\Delta$  是滤波尺度;  $C_s$  是 Smagorinsky 常数, 取 0.10; 变形率张量  $S_{ij}$  为

$$S_{ij} = \sum_{\alpha=1}^b e_{\alpha i} e_{\alpha j} (f_\alpha - f_\alpha^{(\text{eq})}) \quad (10)$$

### 1.3 网格自适应方法

适用于 LBM 的网格技术有标准格子 Boltzmann 方法、插值格子 Boltzmann 方法、多块网格方法、多重网格方法和无网格方法等。本研究采用无网格技术<sup>[17-18]</sup>进行格点布置, 根据流动的特点, 在不同的区域采用不同的分辨率。为了更精确地模拟航母的风场尾流, 还采用了自适应技术<sup>[19]</sup>, 定义无量纲涡量为

$$\omega^* = \left( \frac{|\vec{\omega}|}{dx/dt} \right)^2 \quad (11)$$

对于任意小量  $\varepsilon$ , 在  $\omega^* \geq \varepsilon$  的区域进行加密, 在  $\omega^* < \varepsilon$  的区域进行疏化。

1.4 算法验证

首先,本文通过模拟  $Re_D = UD/\nu = 100$  ( $D$ 是圆柱直径,  $U$ 是来流速度,  $\nu$ 是运动学粘性系数)时的圆柱绕流来对算法的可靠性进行检验。计算区域大小为  $32D \times 24D$ , 圆柱附近和尾涡区域的分辨率为  $D/32$ 。图1给出了圆柱后方的卡门涡街以及相对应的格点分布,从图中可以看到,涡量最大区域格点的分辨率也最高,说明本研究采用的自适应方法是有效的。

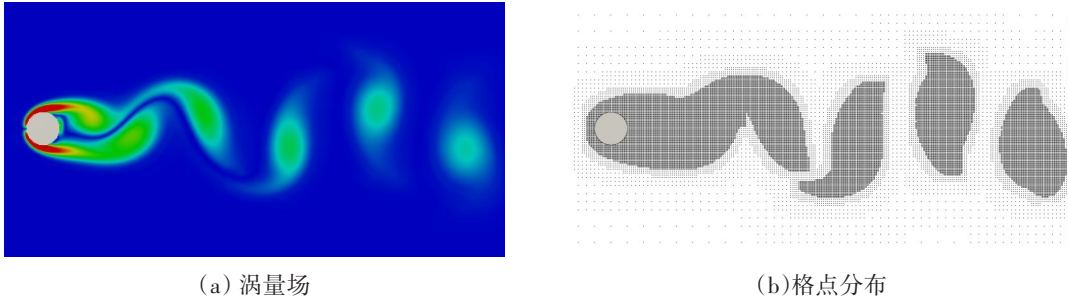


图1 圆柱绕流的涡量场及相应格点分布

Fig.1 Vortex field and corresponding lattice distribution of cylindrical winding flow

圆柱绕流的阻力系数  $C_D$ 、升力系数  $C_L$  以及斯特劳哈尔数  $St$  的定义分别为

$$C_D = \frac{F_D}{0.5\rho U^2 D}, C_L = \frac{F_L}{0.5\rho U^2 D}, St = \frac{fD}{U} \quad (12)$$

式中,  $F_D$  为阻力,  $F_L$  为升力,  $f$  为尾涡脱落频率。

图2给出了  $C_D$  和  $C_L$  随时间的变化曲线,表1给出了  $St$  数、平均阻力系数  $\bar{C}_D$  和升力系数波动幅值  $C_L$ , 结果表明本文的模拟结果与文献中报道的实验和数值模拟结果吻合较好,说明利用LBM模拟中低雷诺数时物体绕流问题的结果是可靠的。

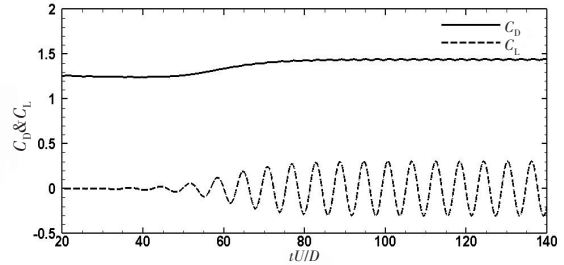


图2  $Re=100$ 时柱体绕流的升阻力系数

Fig.2 Coefficients of lift and resistance for cylindrical winding at  $Re = 100$

表1 柱体绕流升阻力系数比较 ( $Re=100$ )

Tab.1 Comparison of cylindrical winding lift and resistance coefficients ( $Re=100$ )

	$St$	$\bar{C}_D$	$C_L$
Present study	0.168	1.44	$\pm 0.31$
Tseng and Ferziger <sup>[20]</sup>	0.164	1.42	$\pm 0.29$
Lai and Peskin <sup>[21]</sup>	0.165	1.45	$\pm 0.33$
Zdravkovich <sup>[22]</sup> (Exp.)	0.165	1.40	—

然后,本文选取文献[23]中的参数,通过模拟  $Re_D = UL/\nu = 14\ 000$  时方形柱体绕流来对算法的可靠性进行进一步检验,计算区域大小为  $26D \times 7.8D$ 。图3给出了  $C_D$  和  $C_L$  随时间的变化曲线,表2给出了平均阻力系数  $\bar{C}_D$ 、平均升力系数  $\bar{C}_L$ 、升力振荡周期  $T_L$  和升力振荡频率  $f_L$ 。由图3可知,当计算稳定以后,阻力和升力都作周期性的振荡,这与实验结果是相符的,本文计算所得的频率为  $4.76\text{ Hz}$ ,与 Durao 等<sup>[24]</sup>的实验值  $4.7\text{ Hz}$  非常接近。由表2可以看出,各种系数的计算值与文献[23]和 Koobu 等<sup>[25]</sup>的结果都比较接近,说明利用LBM模拟高雷诺数时物体绕流问题的结果也是可靠的。

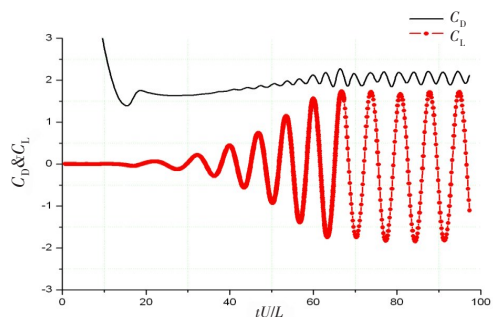


图3  $Re=14\ 000$ 时柱体绕流的升阻力系数

Fig.3 Coefficient of lift and resistance for cylindrical winding at  $Re=14\ 000$

表2 柱体绕流升阻力系数比较 ( $Re=14\ 000$ )Tab.2 Comparison of cylindrical winding lift and resistance coefficients ( $Re=14\ 000$ )

	$\bar{C}_D$	$\bar{C}_L$	$T_L$	$f_L$
Present study	2.07	0.00	0.21	4.76
Xing <sup>[23]</sup>	2.01~2.23	0.00	0.22	4.53
Koobu <sup>[25]</sup>	1.97	/	/	/
Koobu <sup>[25]</sup> (Exp.)	2.05~2.23	0.00	/	/

## 2 航母风场尾流数值模拟方案

### 2.1 航母模型与舰载机理想着舰轨迹

航母模型选取的是俄罗斯的基辅级航母“巴库号”，航母全长为273 m，宽为52 m，斜角甲板中线与航母船艏中线的夹角为 $10^\circ$ 。航母甲板上一般布置4根拦阻索，第1根位于距舰尾50 m左右，其余3根从舰尾到舰首方向每间隔12 m设1根。理想着舰时舰载机沿斜角甲板方向并与水平面成 $4^\circ$ 的夹角飞行，理想着舰点位于第2根和第3根拦阻索的中心位置<sup>[9, 26]</sup>。

为了模拟出精确的风场尾流，本研究的航母模型考虑了大量甲板上的附属设施，模拟采用三维航母模型以及舰载机理想着舰轨迹，如图4所示。

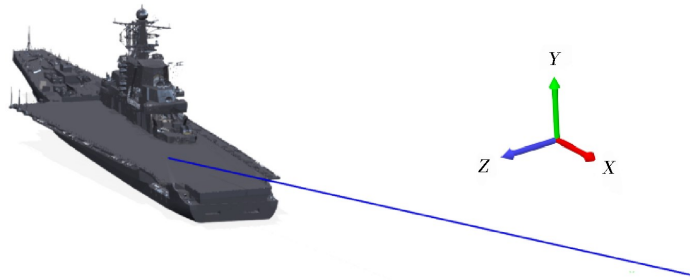


图4 航母模型与舰载机理想着舰轨迹

Fig.4 Aircraft carrier model and ideal landing trajectory

### 2.2 计算模型

计算区域为 $2000\text{ m} \times 300\text{ m} \times 1000\text{ m}$ ，Y轴正向为甲板垂直上方，航母几何中心距入口700 m。格点配置最小分辨率为5 m，最大分辨率为0.3125 m，航母附近始终保持最高分辨率，尾流区域根据相对涡量 $\omega^*$ 自适应调整分辨率。

X轴负向为入流边界条件，入流风速为 $U_0$ ，X轴正向为出流边界条件，即风从舰艏吹向舰艉；Y向和Z向均取为滑移边界条件。在模拟不同风向角的情形时，入流风向始终保持与X轴平行，风向与航母的夹角通过旋转航母模型来实现。

## 3 结果分析与讨论

为了更准确地反映来流风速 $U_0$ 和风向角 $\Phi$ 对舰载机理想着舰轨迹上风场的影响，我们建立了一套舰体坐标系，规定 $X'$ 轴正向为沿斜角甲板中线的舰艏方向， $Y'$ 轴正向为甲板垂直上方（与Y轴一致）， $Z'$ 轴正向为舰体左舷方向，舰体坐标系下的风速 $(u', v', w')$ 才是舰载机在着舰时真正遇到的水平风速、垂直风速和侧向风速。

### 3.1 风速对风场尾流的影响

为了了解来流风速 $U_0$ 对风场尾流的影响，我们在风向角正迎风( $\Phi = 0^\circ$ )条件下，分别模拟了

$U_0 = 5、10、15 \text{ m/s}$ 时航母的风场尾流,航母周围的瞬时三维涡量场如图5所示。从图中可以看到,航母的风场尾流主要受舰岛的影响。由于本研究采用的数值方法能够模拟出航母上非常细小构筑物诱导出的涡量场,因此甲板和舰岛上的附属设施(如雷达、天线、武器系统等)都对风场尾流产生了影响,从而形成最接近真实情况的三维湍流风场。

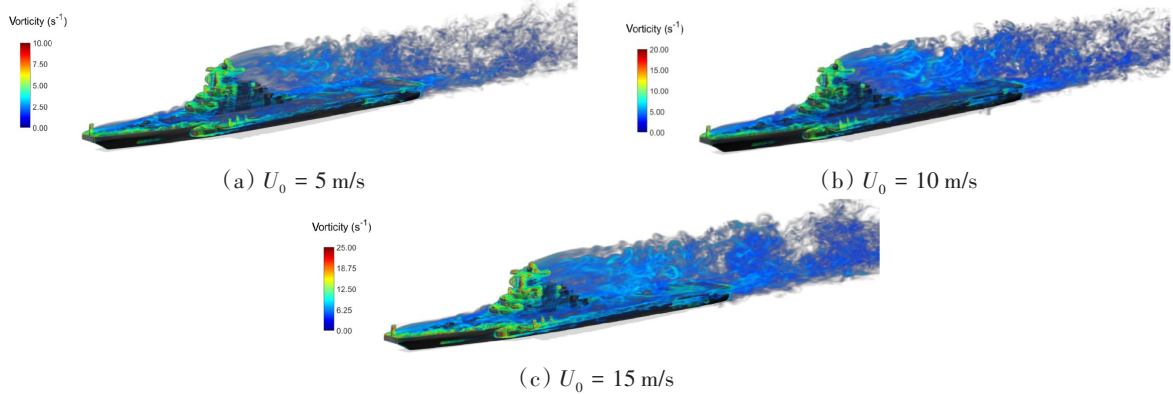


图5 不同风速下航母周围的三维涡量场( $\Phi = 0^\circ$ )

Fig.5 Three-dimensional vortex field around the aircraft carrier at different wind speeds

图6给出了无量纲时间 $t^* = tU_0/L = 5$ ( $L$ 为航母长度)时,在舰体坐标系下,不同 $U_0$ 时着舰轨迹上垂直速度 $v'$ 的瞬态分布。从图中可以看到,着舰轨迹上 $v'$ 的扰动主要集中在着舰前的最后200 m内。图7给出了 $U_0 = 15 \text{ m/s}$ , $\Phi = 0^\circ$ 时,着舰轨迹上距着舰点80 m处 $v'$ 随时间的脉动曲线。从图中可以看到, $v'$ 呈现出明显的湍流特征,变化幅度接近8 m/s。

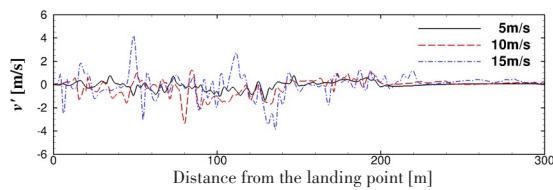


图6 不同风速下着舰轨迹上垂直速度的瞬态分布( $\Phi = 0^\circ$ )

Fig.6 Transient distribution of vertical velocity on the landing trajectory at different wind speeds

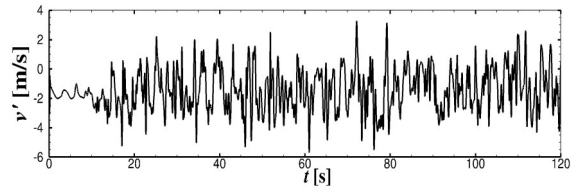


图7 着舰轨迹上 $x = 80 \text{ m}$ 处垂直风速随时间的变化曲线( $U_0 = 15 \text{ m/s}$ , $\Phi = 0^\circ$ )

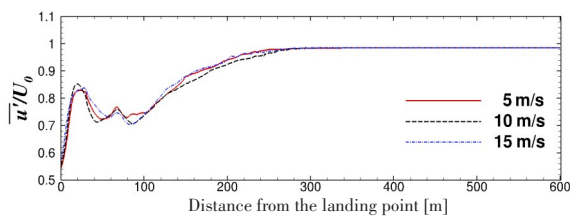
Fig.7 Vertical wind speed as a function of time at  $x = 80 \text{ m}$  on the landing trajectory

由于着舰轨迹上的瞬时风场缺乏规律性,为了深入了解着舰轨迹上风场的分布规律,我们计算了着舰轨迹上的时均风场。时均化处理时采用的时间区间 $\Delta t$ 满足:

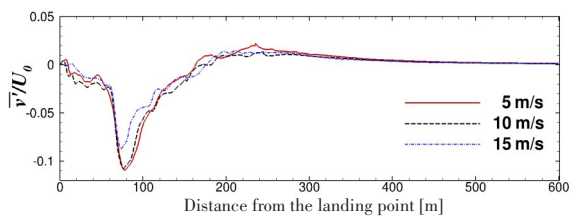
$$\frac{U_0 \Delta t}{L} \approx 3 \tag{13}$$

即在 $\Delta t$ 区间内风大约吹过3倍的舰体长度。

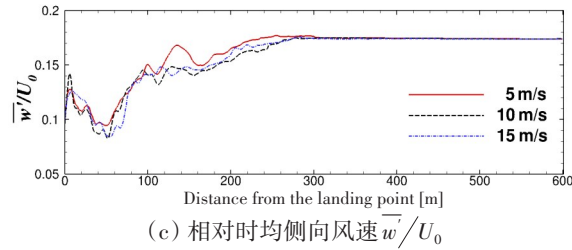
图8给出了风向角 $\Phi = 0^\circ$ 时,不同 $U_0$ 条件下着舰轨迹上的相对时均风速场,其中横轴表示着舰轨迹上距离着舰点的距离。从图中可以看到,不同 $U_0$ 条件下,相对时均风速沿着舰轨迹的分布规律和大小差别很小。因此,建立着舰轨迹上相对时均风速的尾流风场数学模型是可行的,通过该模型能够



(a) 相对时均水平风速 $\bar{u}'/U_0$



(b) 相对时均垂直风速 $\bar{v}'/U_0$



(c) 相对时均侧向风速  $\bar{w}/U_0$

图 8 不同来流风速下着舰轨迹上的相对时均风速 ( $\Phi = 0^\circ$ )

Fig.8 Relative time-averaged wind speed on the landing trajectory with different incoming wind speeds

快速得到任意来流风速下的时均风速大小和分布。

从图 8 中还可以看到,着舰轨迹上航母风场尾流的影响主要集中在  $x < 300$  m 的区域内。这是由于当  $x > 300$  m 时,不仅尾涡的强度大幅减弱,而且着舰轨迹的高度已基本超出了尾流的影响范围(如图 9 所示)。

图 8(a)给出了着舰轨迹上相对时均水平风速  $\bar{u}/U_0$  的分布规律,从图中可以看到, $x < 300$  m 时的水平风速明显减小,这主要是由于舰岛的阻挡作用造成的。舰载机着舰时航母通常处于迎风航行状态<sup>[27]</sup>,来流速度  $U_0$  和风向角  $\Phi$  是由航母航行速度和海面风速的矢量和决定的。如海面风速较小,舰载机降落时在  $x < 300$  m 范围内会遭遇顺风。

图 8(b)给出了着舰轨迹上相对时均垂直风速  $\bar{v}/U_0$  的分布规律,从图中可以看到,任何  $U_0$  条件下,通过甲板上的气流都会在舰尾突然向海面下沉然后再上升,从而形成所谓的“雄鸡尾”形状的风场尾流分量,该分量会使得舰载机在进舰后期先遭遇上升气流再遭遇下降气流,严重影响舰载机着舰的安全性和准确性<sup>[28]</sup>。从图中还可以看到,在着舰点附近垂直速度为负值,即下沉气流,这与文献中的美国 CVN 船型风洞实验结果<sup>[4]</sup>相吻合,而文献[8]中利用 Fluent 模拟 CVN 船型风场尾流时的结果却为上升气流。

图 8 (c)给出了着舰轨迹上相对时均侧向风速  $\bar{w}/U_0$  的分布规律,从图中可以看到, $x > 300$  m 时的侧向风速几乎为常数且明显大于着舰点附近,这说明着舰轨迹上远场的侧向风主要是由于斜角甲板中线与风向之间的夹角造成的,而着舰点附近由于舰岛的阻挡作用和绕流效应造成侧向风速较小。

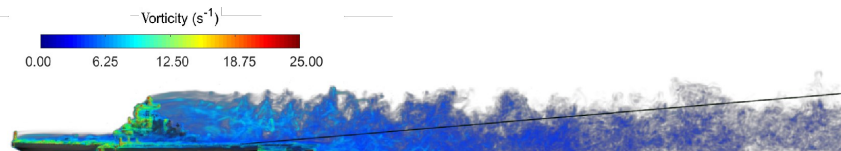
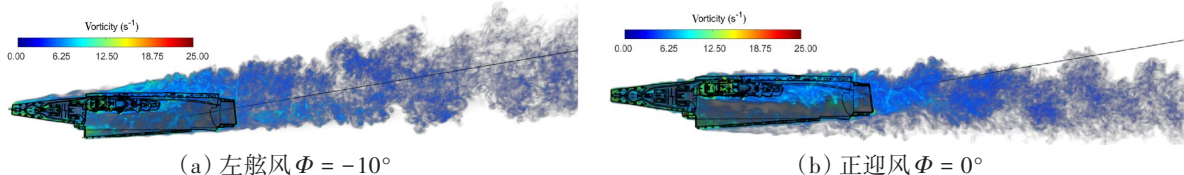


图 9 航母风场尾流三维涡量场和着舰轨迹侧视图 ( $U_0 = 15$  m/s,  $\Phi = 0^\circ$ )

Fig.9 Three-dimensional vortex field and side view of aircraft carrier landing trajectory

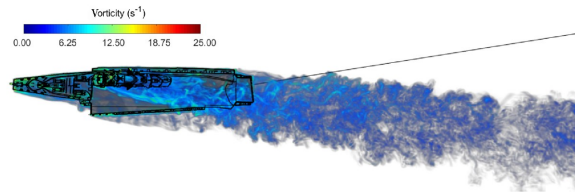
### 3.2 风向对风场尾流的影响

舰载机着舰时航母通常处于迎风航行状态,但由于海面风向复杂多变,航母不可能一直处于顶风航行状态,因此探讨不同风向角下甲板后方气流场的特征,对于舰载机在甲板上安全起降非常必要<sup>[29]</sup>。我们分别模拟了  $U_0 = 15$  m/s,风向角  $\Phi = -10^\circ, 0^\circ, 10^\circ$  时航母周围的风场, $\Phi > 0^\circ$  表示右舷风, $\Phi < 0^\circ$  表示左舷风。图 10 给出了不同风向角下航母尾流三维涡量场的俯视图。由于斜角甲板中线与航母船艏中线的夹角为  $10^\circ$ ,当  $\Phi = -10^\circ$  时甲板风风向与斜角甲板中线之间的夹角为零,因此从图中可以看到,左舷风  $\Phi = -10^\circ$  时着舰轨迹上受尾流影响范围最大,右舷风  $\Phi = 10^\circ$  时受影响范围最小。



(a) 左舷风  $\Phi = -10^\circ$

(b) 正迎风  $\Phi = 0^\circ$



(c) 右舷风  $\Phi = 10^\circ$

图10 不同风向角时航母风场尾流三维涡量场俯视图 ( $U_0 = 15 \text{ m/s}$ )

Fig.10 Top view of the three-dimensional vortex field of the aircraft carrier wind field of wake with different wind angles

图11给出了不同风向角下理想着舰轨迹上的相对时均风速分布,从图中也可以看到,当左舷风  $\Phi = -10^\circ$  时,着舰轨迹上受尾流风场影响的范围最大。图11(a)和图11(c)分别给出了不同风向角下着舰轨迹上相对时均水平风速  $\bar{u}/U_0$  和侧向风速  $\bar{w}/U_0$  的分布规律。从图中可以看到,虽然  $\Phi = 10^\circ$  时着舰轨迹上受风场尾流的影响范围最小,但在着舰前最后120 m左右范围内的水平和侧向风速变化最剧烈,这主要是由于该区域在右舷风时受舰岛影响最大。从图11(c)中还可以看到,当  $x > 100 \text{ m}$  时平均侧向风几乎为定值,  $\Phi = -10^\circ$  产生的侧向风最小,  $\Phi = 10^\circ$  产生的侧向风最大。结合图10不难发现,着舰轨迹上  $x > 100 \text{ m}$  时的侧向风主要是由甲板风风向与斜角甲板中心线之间的夹角决定的,夹角越大,侧向风也就越大。当  $\Phi = -10^\circ$  时,二者之间的夹角为零,所以侧向风也几乎为零。

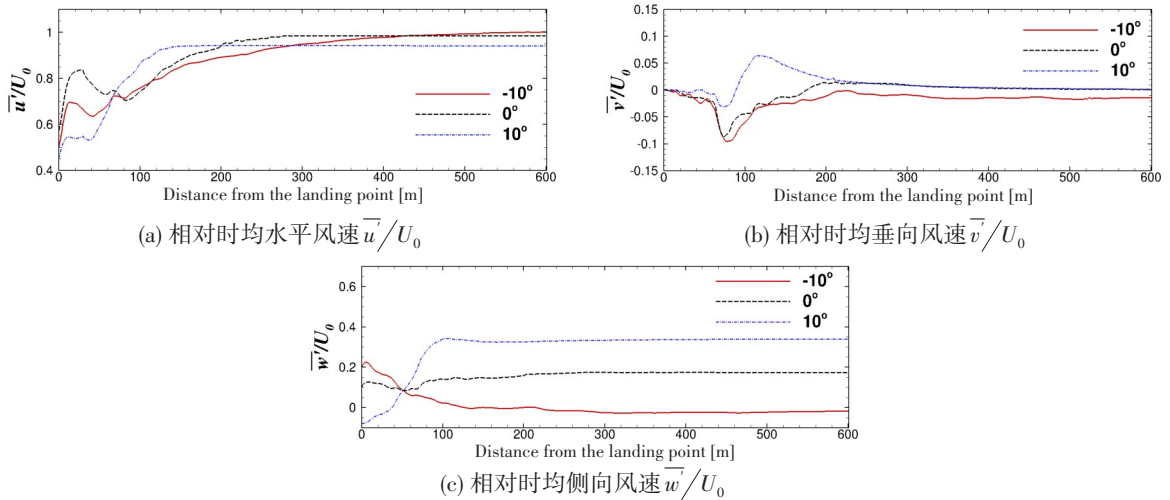


图11 不同风向角下理想着舰轨迹上的平均风速 ( $U_0 = 15 \text{ m/s}$ )

Fig.11 Average wind speed on the ideal landing trajectory with different wind angles

图11(b)给出了不同风向角下着舰轨迹上相对时均垂直风速  $\bar{v}/U_0$  的分布规律,从图中可以看到,左舷风和右舷风产生的垂直气流是完全不同的。当  $\Phi = 0^\circ$  和  $\Phi = -10^\circ$  时,即风从航母左前方吹来时,垂直方向以下沉气流为主,最大下沉速度可以达到  $1.5 \text{ m/s}$ ,即来流的10%左右。当  $\Phi = 10^\circ$  时,即风从航母右前方吹来时,在  $x = 80 \text{ m}$  左右有一个峰值约为  $0.5 \text{ m/s}$  的下沉气流,在  $x = 120 \text{ m}$  左右有一个峰值约为  $1.0 \text{ m/s}$  的上升气流。从图中还可以看到,当  $x > 300 \text{ m}$  时,左舷风仍会在着舰轨迹上产生微弱的下沉气流,而右舷风和正迎风对着舰轨迹上的垂直速度几乎无影响。

### 4 结 论

本文采用LBM-LES方法模拟了不同风速和风向角下航母的风场尾流,分析了舰载机理想着舰轨迹上时均风场的分布特征,得出如下结论:

(1) LBM-LES方法结合无网格法进行航母风场数值模拟时,航母模型无需任何简化,就能够模拟出航母上各种构筑物对风场的影响,使得模拟结果更加接近真实风场。

(2) 正迎风条件下,当来流风速不同时,相对平均风速沿理想着舰轨迹的分布规律和大小都非常相似,建立着舰轨迹上相对平均风速的风场尾流数学模型是可行的。

(3) 相同来流速度、不同风向角条件下,左舷风时着舰轨迹上受尾流影响范围明显大于右舷风时,但着舰前最后100 m范围内的水平风速和侧向风速变化比右舷风弱;左舷风时着舰轨迹上的垂直速度以下沉为主,右舷风时既有下沉气流又有上升气流,但以上升气流为主。

下一步,我们将进一步研究舰船外形和六自由度运动对风场的影响,为建立真实舰船的风场尾流数据库和数学模型,进而研究舰船周围风场对舰载机起降的影响奠定技术和理论基础。

## 参 考 文 献:

- [1] Dooley G, Martin J E, Buchholz J H J, et al. Ship airwakes in waves and motions and effects on helicopter operation[J]. *Computers & Fluids*, 2020, 208(1): 104627.
- [2] Park H S, Linton D, Thornber B. Rotorcraft fuselage and ship airwakes simulations using an immersed boundary method[J]. *International Journal of Heat and Fluid Flow*, 2022, 93: 108916.
- [3] Czerwiec R, Polsky S. LHA airwake wind tunnel and CFD comparison with and without bow flap[C]//22nd Applied Aerodynamics Conference and Exhibit, 2004.
- [4] Polsky S, Naylor S. CVN airwake modeling and integration: Initial steps in the creation and implementation of a virtual burble for F-18 carrier landing simulations[J]. *Synthese*, 2015, 66: 405-435.
- [5] Kulkarni P R, Singh S N, Seshadri V. Parametric studies of exhaust smoke-superstructure interaction on a naval ship using CFD[J]. *Computers & Fluids*, 2007, 36: 794-816.
- [6] 龚 杰, 郭春雨, 吴铁成, 等. 基于分离涡模拟方法的导管桨近尾流场及尾涡特性分析[J]. *上海交通大学学报(自然版)*, 2018, 52: 674-680.  
Gong Jie, Guo Chunyu, Wu Tiecheng, et al. Detached eddy simulation of near wake field and vortex characteristics for a ducted propeller[J]. *Journal of Shanghai Jiao Tong University*, 2018, 52: 674-680. (in Chinese)
- [7] 贲亮亮, 魏小辉, 刘成龙, 等. 航母甲板风对舰载机进舰轨迹流场影响分析[J]. *舰船科学技术*, 2014, 36: 27-30.  
Ben Liangliang, Wei Xiaohui, Liu Chenglong, et al. Effects of air flow on the landing track of the carrier aircraft[J]. *Ship Science and Technology*, 2014, 36: 27-30. (in Chinese)
- [8] 郜 冶, 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: 310-315.  
Gao Ye, Liu Changmeng, He Zheng. Research on CVN deck vortices structure characteristics caused by wind direction changes[J]. *Acta Aerodynamica Sinica*, 2013, 31: 310-315. (in Chinese)
- [9] 胡国才, 王 奇, 刘湘一, 等. 舰尾流对舰载机着舰轨迹和动态响应的影响研究[J]. *飞行力学*, 2009, 27: 18-21.  
Hu Guocai, Wang Qi, Liu Xiangyi, et al. Influence of carrier air wake on carrier-based aircraft landing trajectory and dynamic response[J]. *Flight Dynamics*, 2009, 27: 18-21. (in Chinese)
- [10] Succi S, Amati G, Benzi R. Challenges in lattice Boltzmann computing[J]. *Journal of Statistical Physics*, 1995, 81: 5-16.
- [11] Filippova O, Succi S, Mazzocco F, et al. Multiscale lattice Boltzmann schemes with turbulence modeling[J]. *Journal of Computational Physics*, 2001, 170: 812-829.
- [12] Li Qiang, Tang Ran, Wang Shuai, et al. A coupled LES-LBM-IMB-DEM modeling for evaluating pressure drop of a heterogeneous alternating-layer packed bed[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2022, 433(2): 133529.
- [13] Shu C, Peng Y, Zhou C F, et al. Application of Taylor series expansion and least-squares-based lattice Boltzmann method to simulate turbulent flows[J]. *Journal of Turbulence*, 2006, 7(38): 1-12.
- [14] Hou S, Sterling J, Chen S, et al. A lattice Boltzmann subgrid model for high Reynolds number flows[J]. *Fields Institute Communications*, 2012, 6: 151.
- [15] Krafczyk M, Tölke J, Luo L. Large-eddy simulations with a multiple-relaxation-time LBE model[J]. *International Journal of Modern Physics B*, 2003, 17: 33-39.

- [16] Marlow F, Jacon J, Sagaut P. A multidisciplinary model coupling Lattice-Boltzmann-based CFD and a social force model for the simulation of pollutant dispersion in evacuation situations[J]. *Building and Environment*, 2021, 205: 108212.
- [17] Das S, Eldho T I. A meshless weak strong form method for the groundwater flow simulation in an unconfined aquifer[J]. *Engineering Analysis with Boundary Elements*, 2022, 137: 147-159.
- [18] Rao Xiang, Zhan Wentao, Zhao Hui, et al. Application of the least-square meshless method to gas-water flow simulation of complex-shape shale gas reservoirs[J]. *Engineering Analysis with Boundary Elements*, 2021, 129: 39-54.
- [19] Lashkariani M R, Firoozjaee A R. An improved node moving technique for adaptive analysis using collocated discrete least squares meshless method[J]. *Engineering Analysis with Boundary Elements*, 2021, 130: 322-331.
- [20] Tseng Y H, Ferziger J H. A ghost-cell immersed boundary method for flow in complex geometry[J]. *Journal of Computational Physics*, 2003, 192: 593-623.
- [21] Lai M C, Peskin C S. An immersed boundary method with formal second-order accuracy and reduced numerical viscosity [J]. *Journal of Computational Physics*, 2000, 160: 705-719.
- [22] Zdravkovich M M, Bearman P W. Flow around circular cylinders-Volume 1: Fundamentals[J]. *Journal of Fluids Engineering*, 1998, 120: 105-106.
- [23] 邢景棠, Price W G, 陈义根. 非线性流体-刚体结构相互作用问题的一种数值方法[J]. *固体力学学报*, 2005, 26(4): 373-384.  
Xing Jingtang, Price W G, Chen Yigen. A numerical method to simulate nonlinear fluid-rigid structure interaction problems [J]. *Chinese Journal of Solid Mechanics*, 2005, 26(4): 373-384. (in Chinese)
- [24] Durao D F, Heitor M V, Pereira J C. Measurements of turbulent and periodic flows around a square cross-section cylinder [J]. *Exp in Fluids*, 1988, 6: 298-304.
- [25] Koobus B, Farhat C, Tran H. Computation of unsteady viscous flows around moving bodies using the  $\kappa$ - $\varepsilon$  turbulence model on unstructured dynamic grids[J]. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 2000, 190: 1441-1466.
- [26] Anderson M. Inner and outer loop manual control of carrier aircraft landing[J]. *Guidance, Navigation, and Control Conference*, 2015: 71-92.
- [27] 胡孟权, 林国华. 舰载飞机着舰拦阻动力学分析[J]. *空军工程大学学报(自然科学版)*, 2000, 1: 8-11.  
Hu Mengquan, Lin Guohua. Arresting dynamics research of carrier aircraft[J]. *Journal of Air Force Engineering University (Natural Science Edition)*, 2000, 1: 8-11. (in Chinese)
- [28] 许东松, 刘星宇, 王立新. 变化风场对舰载飞机着舰安全性影响[J]. *北京航空航天大学学报*, 2010, 36: 77-81.  
Xu Dongsong, Liu Xingyu, Wang Lixin. Influence of changeful wind on landing safety of carrier based airplane[J]. *Nanjing University of Aeronautics and Astronautics*, 2010, 36: 77-81. (in Chinese)
- [29] 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. (in Chinese)