

测风激光雷达在舰船流场模拟和探测中的应用

袁金龙¹, 夏海云^{1,2*}

(1. 南京信息工程大学 大气物理学院, 江苏 南京 210044;
2. 中国科学技术大学 地球和空间科学学院, 安徽 合肥 230026)

摘要: 舰船流场模拟和探测的研究对保障舰载机作业安全具有重要意义。文中旨在通过计算流体动力学 (CFD) 与测风激光雷达技术的结合实现优势互补, 进行舰船流场探测和模拟技术研究。首先采用延迟分离涡模型对典型舰船的流场进行数值模拟研究, CFD 模拟能够捕捉舰岛后方纵向切面显著的端流强度分布及尾流区紊乱的上洗下洗气流。考虑大气边界层特性对模拟结果的影响, 利用相干多普勒测风激光雷达通过圆锥扫描获取风廓线作为 CFD 模型入口边界条件, 将模拟结果与雷达对舰尾流场的三维切片探测结果进行对比分析。实测径向速度和模拟结果线性拟合的斜率和 R^2 分别为 1.095 和 0.841, 模拟径向风速方差为 0.941 m/s, 验证了 CFD 模型的准确性。结果表明, CFD 能够有效模拟舰船流场细节, 测风激光雷达可为 CFD 提供可靠的边界条件与验证数据, 以改善模拟精度。当前激光雷达 60 m 的距离分辨率限制了尾流结构解析, 未来需发展米级距离分辨率测风激光雷达以提升尾流探测能力, 该研究为舰船流场精细化探测提供了数值模拟与实测融合的新路径。

关键词: 计算流体动力学; 测风激光雷达; 大气边界层; 舰船流场

中图分类号: O355; TN249 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA20250318

引用格式: YUAN Jinlong, XIA Haiyun. Application of Doppler wind lidar in ship airwake simulation and detection[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2025, 54(11): 20250318.

袁金龙, 夏海云. 测风激光雷达在舰船流场模拟和探测中的应用[J]. 红外与激光工程, 2025, 54(11): 20250318.

0 引言

舰船具有复杂的钝体结构, 空气流场经过舰船上层建筑时, 伴随分离、剪切、旋涡脱落等复杂的流动现象^[1], 威胁舰载机的起飞和着舰^[2]。深入研究舰船流场特性, 对优化舰船气动外形和保障舰载设备作业安全具有重要意义。

目前针对舰船空气流场的研究主要依靠风洞试验、实船测量和数值模拟三种手段。风洞和水洞试验使用舰船的缩比模型, 被广泛地应用于舰船尾流场分布研究。其中美国海军针对罗纳德·里根号航空母舰

(CVN-76)^[3], 两栖攻击舰 (LHA)^[4], 驱逐舰 (DDG-81)^[5]等进行了大量的风洞试验。英国利物浦大学在水洞中用伊丽莎白女王级航空母舰 (QEC) 的 1:200 缩比模型研究了不同方向甲板风下的尾流形貌。风洞和水洞试验不但可以节省大量费用, 而且还能模拟一个可控多变的测试环境。但风洞和水洞试验也有不足之处, 比如人工模拟的海面大气结构、舰体模型的尺度效应和风洞的壁面干扰等都会影响实验结果, 特别是不同的大气边界层厚度、湍流尺度和湍流强度对实验结果影响很大。为了克服这些缺点, 研究人员利用风速仪在全尺寸的实船上进行现场测量^[6-8]。风速仪通

收稿日期: 2025-06-20; 修订日期: 2025-08-05

基金项目: 中国科学院战略性先导科技专项项目 (XDA22040601)

作者简介: 袁金龙, 男, 副教授, 博士, 主要从事激光雷达应用方面的研究。

通信作者: 夏海云, 男, 教授, 博士, 主要从事激光雷达遥感方面的研究。

过在飞行甲板附近移动测试点来获得较为完整的风场,但会受到成本和测量环境的限制。近年来,美国研究者通过无人机平台对舰船流场的风速和风向进行了原位动态测量^[9-10],但测量结果易受无人机平台自身的影响。

多普勒测风激光雷达具有高时空分辨率、高测量精度、大动态测量范围的优点,被广泛应用于探测风切变、大气湍流、飞机尾流、阵风以及重力波等^[11-13]。针对海洋及舰载应用,美国、英国、法国等陆续开展了海上舰载测风雷达技术研究^[14]。典型代表为美国国家海洋和大气管理局(NOAA)1.5 μm 舰载测风激光雷达,其分辨率为 33.6~62.4 m^[15]。英国的 HALO 雷达被搭载于破冰船上,对北极大气边界层中的风廓线进行了探测,其分辨率为 18 m^[16]。中国海洋大学^[17]、西南技术物理研究所^[18]、中国科学技术大学^[19]和海军装备部^[20]也相继开展了基于舰载测风雷达的相关研究,分辨率为 15~60 m。测风激光雷达的显著优势在于能够实时捕捉大气风场与舰船流场的真实状态,但仅能直接获取径向风速,存在探测盲区,且距离分辨率不足,难以捕捉米级或亚米级尺度的舰船流场细节。近年来,脉冲编码技术通过脉冲调制将激光雷达空间分辨率提升至 0.9 m^[12,21],但在舰载应用时依然存在一些工程难题。

与实验方法相比,计算流体动力学(CFD)通过求解流体流动的微分控制方程来模拟连续区域内流场的分布,具有低成本、信息全、时空分辨率高的优点和模拟实际过程中各种状态的能力。随着计算流体动力学的不断发展和高性能计算(HPC)的提高,采用数值计算的方法来模拟复杂的舰船尾流受到越来越多的研究人员青睐。不同的湍流模型已被应用于研究船舶空气尾流,如雷诺平均模拟(RANS)^[22]、分离涡模拟(DES)^[2]和大涡模拟(LES)^[23]。其中 DES 既继承了 RANS 的计算效率,又具备 LES 解析小尺度流动结构的能力,DES 模型在模拟大分离气流场时表现优异^[2,24]。美国、英国、加拿大、澳大利亚、土耳其、西班牙等国家开始针对简易护卫舰(SFS)、LHA、导弹驱逐舰(DDG)、两栖作战舰(LPD)、巡逻护卫舰 CPF、核动力航母(CVN)等不同船型展开了大量的 CFD 数值计算。计算结果表明,采用数值模拟方法能够很好地预测和捕捉到尾流场中的涡旋、流动分离等现

象^[3,25-28]。而在实际应用过程中,舰船所处实际环境十分复杂,边界条件难以获得,同时缺乏高时空分辨率、大范围的实船测量数据对全尺度 CFD 模型进行修正和验证。

测风激光雷达技术的发展,为舰船流场数值模拟技术的进步提供了契机。文中将测风激光雷达速度方位显示(Velocity Azimuth Display, VAD)探测的风廓线作为舰船 CFD 模型的入口边界条件,同时利用其平面位置显示(Plan Position Indicator, PPI)扫描结果对 CFD 模拟结果进行验证,通过二者的结合实现优势互补,进行舰船流场探测和模拟技术研究。

1 舰船流场数值模拟

舰船空气尾迹具有复杂的高雷诺数流动分离。延迟分离涡模型(DDES)模拟相比传统的 DES 模型,可以阻止模型应力损耗以及网格导致的分离,近年来被广泛应用于舰船流场模拟^[2,24]。DDES 在近壁面附着涡主导的区域内采用 RANS(雷诺平均纳维-斯托克斯)模型,而在大量分离的区域采用与 LES 模型相结合的方法模拟,继承了 RANS 计算量小和 LES 计算精度高的优点。文中在舰船流场模拟时,综合考虑计算精度和计算效率,RANS 模型选择 SST $k-\omega$ 模型。SST $k-\omega$ 模型通过剪切应力传输(SST)机制解决了传统 RANS 模型分离预测的缺陷,符合舰船分离流的计算精度需求且计算量适中。

在进行网格划分时,忽略对流场影响较小的舰船微小结构,如桅杆、天线等。为了适用舰船几何结构的不规则性,采用非结构化网格,船体表面设置为无滑移壁面,第一层网格的无量纲壁面距离 Y^+ 为 30 左右。为了精确地捕捉船体周围流场的结构,对舰船附近和尾部发展区域进行网格加密处理。计算域内网格的最大尺寸设为 16.384 m,船体表面网格的尺寸为 0.256 m。船体置于 1 km $\times$ 3 km $\times$ 0.5 km 的长方体计算域中,如图 1 所示。

海平面设置为滑移壁面条件,计算域的入口设置为速度入口,出口设置为压力出口。速度入口由相对于舰船的甲板风 $\vec{V}_{\text{wod}}$ 确定:

$$25\vec{V}_{\text{wod}} = \vec{V}_{\text{wind}} - \vec{V}_{\text{ship}} \quad (1)$$

式中: $\vec{V}_{\text{wind}}$ 和 $\vec{V}_{\text{ship}}$ 分别为自然风速和舰船航速。

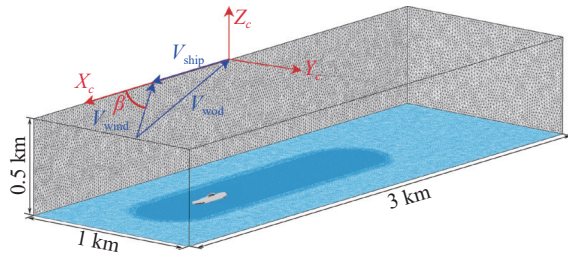


图1 计算域和速度示意图

Fig.1 The computational domain and velocity diagram

由于海平面的风速剖面 and 湍流特性的实测资料比较缺乏,目前大气边界层中湍流对流场特性的影响尚不清楚,舰船模拟研究通常将甲板风中的自然风简化为均匀来流。但是实际中,大气风场受到海洋表面的摩擦作用,这种摩擦阻力由于大气中的湍流而向上传递,并随高度的增加而逐渐减弱,当超过某一高度后,可以忽略这种摩擦的影响,此时大气能够自由流动,这一高度即为大气边界层厚度。近年来,大量研究发现,大气边界层对 CFD 模拟的影响不可忽略^[29-30]。在考虑大气边界层的影响时,平均风速剖面 and 湍流强度通常采用经验公式,如对数律^[29]和指数律^[31]:

$$28U(z) = U_{\text{ref}} \left(\ln \frac{z}{z_0} / \ln \frac{z_{\text{ref}}}{z_0} \right) \quad (2)$$

式中: $U(z)$ 为海面上任一高度 z 处的风速; U_{ref} 为参考高度 z_{ref} 处的风速; z_0 为海平面的粗糙度指数,一般取

0.001。以舰船迎风行驶为例, U_{ref} 和 z_{ref} 分别取 10 m/s 和 300 m, 进行 CFD 模拟。

图2展示了以速度大小着色的涡核瞬时等值面(通过涡量表征)。涡量是速度旋度的模值。在迎风条件下,船艏脱落的涡旋呈对称分布,右舷与左舷的涡旋从船甲板边缘延伸至船尾区域。飞行甲板上方的流场取决于前方来流的角度,当来流风方向与船行驶方向夹角为零时,飞行甲板着舰区域上方的流场扰动较小,因此该情形下飞机在飞行甲板附近面临的风险较低。然而,由于上层建筑的复杂性,舰岛与船尾后方的脱落涡旋复杂且无规则。相比于船艏脱落的涡旋,舰岛分离形成的涡旋数量也更多。为便于将实验数据与 CFD 模拟结构进行对比,舰岛与船尾后方是重点关注的流场区域。图3为舰岛后方纵向切面的湍流强度分布图。其中湍流强度定义为脉动风速的标准方差与平均风速的比值。

$$I = \sqrt{\frac{1}{3} (v_x'^2 + v_y'^2 + v_z'^2)} / \bar{U} \quad (3)$$

空气流场经过舰岛时,产生强烈的漩涡分离、脱落现象。由于涡旋脱落的影响,舰岛后方的湍流强度较大,影响范围超过了1倍船身距离。对应的尾流区域速度波动十分强烈。尾流区域的垂直速度如图4所示。在舰岛和飞行甲板后方都存在紊乱的上洗和下洗气流。相较于舰岛附近的尾流,舰岛后方

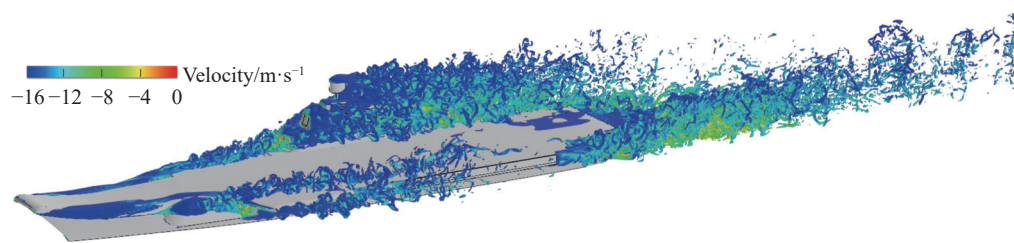


图2 舰船迎风流场的涡量瞬时等值面

Fig.2 The instantaneous iso-surfaces of vorticity for the headwind flow over the ship model

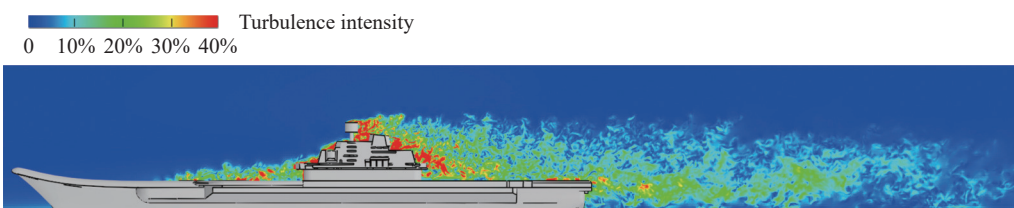


图3 舰岛后方纵向切面的湍流强度分布

Fig.3 Contours of instantaneous turbulence intensity in a vertical plane through the centre of the island

120 m 以后的尾流的影响范围和强度更大,但其影响高度低于舰岛尾流。结合图 2 和图 3 可知,随着离舰尾距离增大,湍流强度在减弱,且影响范围也在减小。CFD 模拟结构能够很好地捕捉舰船流场细节,当舰船迎风行驶时,舰岛和飞行甲板对流场的扰动非常明显。当舰载机经过这些区域时,升力容易受到影响,进而发生危险。

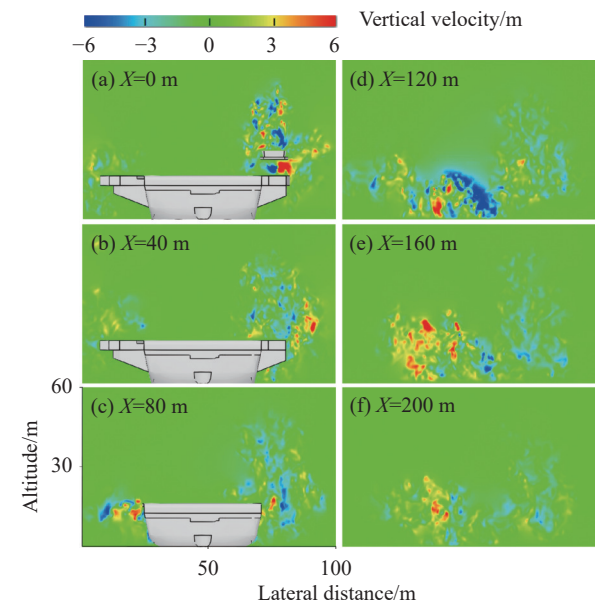


图 4 舰尾横截面垂直速度分布 (100 m×60 m),其中 X 轴表示舰岛距离
Fig.4 Contours of instantaneous vertical velocity magnitude at transverse cross-section, X is the distance from the rear of ship island

2 测风激光雷达在舰船流探测中的应用

海上天气复杂多变,风廓线除了受到海面摩擦力的影响,还受海上温度变化、压强变化、大气紊流和气旋等因素影响,因此实际风廓线难以用经验公式来描述。不同海域、不同季节、不同时段的大气边界层分布特征不同。以往简单采用经验公式来衡量大气边界层特性对舰船流场的作用存在不足。为了提高舰船流场模拟的准确性,需要实测的大气边界层特性,而测风激光雷达能很好地解决这个问题。

2.1 相干多普勒测风激光雷达

在进行舰船流场测量时,采用高度集成化的相干多普勒测风激光雷达。全光纤结构和温控系统,使得

激光雷达能在各种海况下连续工作。测风激光雷达在和安庆气象局探空仪的对比结果中,风速和风向的标准偏差分别为 0.84 m/s 和 9.2°^[32]。其工作波长为 1 548 nm,具有人眼安全的特性,典型参数如表 1 所示。

表 1 相干多普勒测风激光雷达参数

Tab.1 The parameters of coherent Doppler wind lidar

Parameter	Value
Wavelength/nm	1 548
Pulse width/ns	300
Pulse energy/μJ	100
Telescope diameter/mm	80
Temporal resolution/s	1
Spatial resolution/m	60
Repetition frequency/kHz	10
Azimuth scanning range/(°)	0-360
Zenith scanning range/(°)	0-90

测风激光雷达的工作原理为:种子光发出连续波激光,经分束器分为本振光和发射激光,发射激光经声光调制器转为脉冲光,并频移 80 MHz,经过掺铈光纤放大器和准直器后传输进入大气中,大气回波信号与本征光在平衡探测器中产生拍频信号,经过傅里叶变换后,从拍频信号的功率谱中提取多普勒频移信息,从而获得径向速度。激光雷达可支持多种灵活的扫描模式以适配不同观测需求,包括 PPI 扫描和 VAD 扫描等。

2.2 海上大气风场探测结果

在进行舰船流场探测时,激光雷达进行 VAD 扫描,典型海上大气廓线探测结果如图 5 所示。

在海上白天和夜间的载噪比相差不大,如图 5(a)所示。利用小波变换法 (HWCT) 计算出的海洋大气边界层高度如图中蓝色点线所示,随时间变化不大。相比于陆地,由于海水体积大且比热容大,海面温度的日变化较小,风向稳定,大气边界层结构变化缓慢。根据风廓线可进一步计算湍流强度廓线,如图 5(e)所示。海上大气垂直风速在白天的变化幅度较小,对流活动较弱,湍流强度日变化相对不明显。

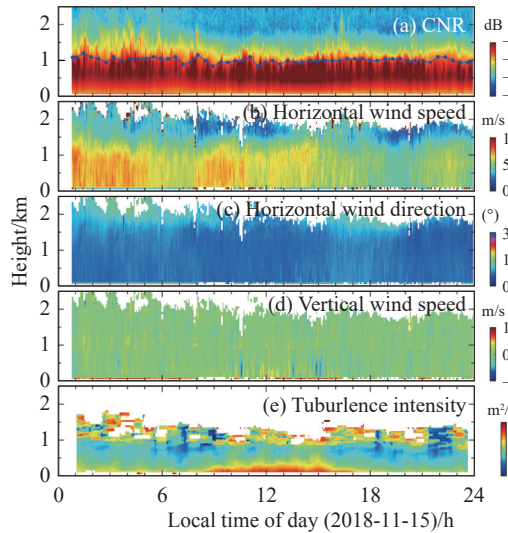


图5 海上连续风场探测结果。(a) 信噪比; (b) 水平风速; (c) 水平风向; (d) 垂直风速; (e) 湍流强度 (蓝色点线代表大气边界层高度)

Fig.5 Detection results of continuous wind field above sea. (a) Carrier-to-noise ratio; (b) Horizontal wind speed; (c) Horizontal wind direction; (d) Vertical wind speed; (e) Turbulence intensity (The blue dots line represents the atmospheric boundary layer height)

2.3 探测和模拟的结合

将 2018-11-15T09:01:00 测得的廓线作为速度入口边界条件,代入对应舰船的 CFD 模型,计算舰船的流场结果。在实际处理时,靠近舰船上方的流场,易受舰船上层建筑的干扰,1.5 倍船高以下的风场依然采用对数率估计。因为靠近海面处的风场受到摩擦阻力影响较大,风场的垂直分布可以用经验函数估计。基于雷达探测和经验公式的廓线结果,如图 6

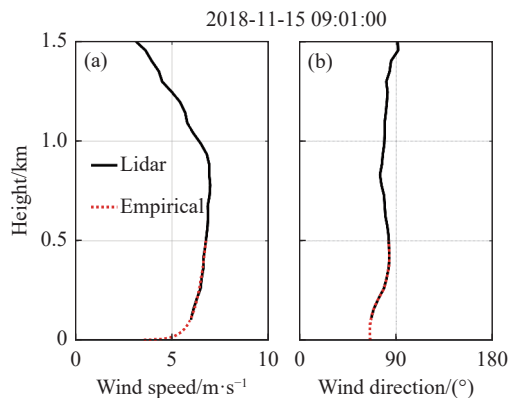


图6 基于雷达探测和经验公式的廓线结果。(a) 风速廓线; (b) 风向廓线

Fig.6 Profile results based on lidar detection and empirical formulas. (a) Wind speed profile; (b) Wind direction profile

所示。

为了验证流场模拟结果的有效性,激光雷达布设于舰岛后方,主要用于捕捉舰岛形成的尾流,雷达方位角的 0° 指向船尾。激光雷达在完成风廓线模式扫描后,对舰船尾部的流场结构进行的 PPI 扫描。通过改变 PPI 扫描的仰角进行舰尾流的三维切片扫描。其中仰角范围为 $0^\circ \sim 10^\circ$, 每 2° 为一组, 每组的方位角扫描范围为 $-50^\circ \sim 50^\circ$, 共 6 组。

CFD 模拟结果包含了流场的细节信息,包括每个节点的三维速度分量 (v_x, v_y, v_z)。为了与雷达实测径向速度进行对比,从 CFD 结果中提取径向速度 V_r^{CFD} :

$$93V_r^{\text{CFD}} = v_x \cos\varphi \cos\theta + v_y \cos\varphi \sin\theta + v_z \sin\varphi \quad (4)$$

式中: v_x, v_y 和 v_z 分别代表模拟结果的水平速度、横向速度和垂直速度; φ 和 θ 分别代表仰角和方位角。由于计算域尺寸的限制,保留了 600 m 以内的实验数据与 CFD 结果进行对比。不同仰角下 PPI 扫描实验的径向速度如图 7(a) 所示。对应的径向速度模拟结果如图 7(b) 所示。径向速度模拟结果的空间分辨率较高,通过稀疏采样匹配与雷达距离门相对应。结果表明,CFD 径向速度模拟结果与雷达探测结果吻合较好。流场经过舰船上层建筑时流场结构发生剧烈变化,形成低压区和大量的脱落涡,因此舰船尾部径向速度实测和模拟结果均存在明显的尾流结构区。然而,要获得更清晰的尾流结构,需要进一步提高雷达的距离分辨率。

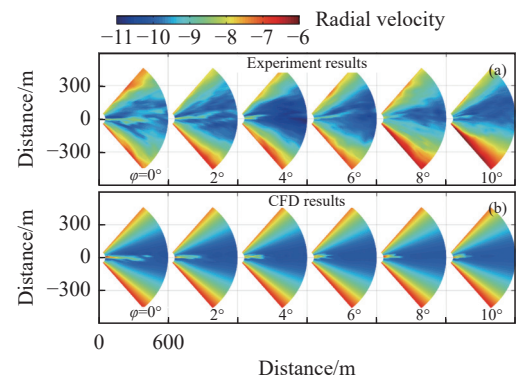


图7 不同 PPI 扫描仰角舰尾流探测结果和模拟结果

Fig.7 Radial velocity of experiment and simulation in different elevation

为了进一步分析 CFD 模拟结果的有效性,将图 7 中的所有实测结果和模拟结果进行线性拟合,如图 8(a) 所示。6 组 PPI 扫描的总采样数为 3060。雷

达实测径向速度和 CFD 模拟结果线性拟合的斜率和 R^2 分别为 1.095 和 0.841。图 8(b) 为模拟径向速度差异的直方分布图。高斯拟合的 R^2 为 0.991, 模拟径向风速的平均差为 0.768 m/s, 标准差为 0.941 m/s, 进一步验证了基于测风激光雷达实测输入边界条件的 CFD 模拟结果的准确性。相比于传统测风激光雷达直接观测结果, 经验证的 CFD 模型的输出结果在距离分辨率上可提升 10 倍以上, 并且可提供全域的三维空间风矢量参考。

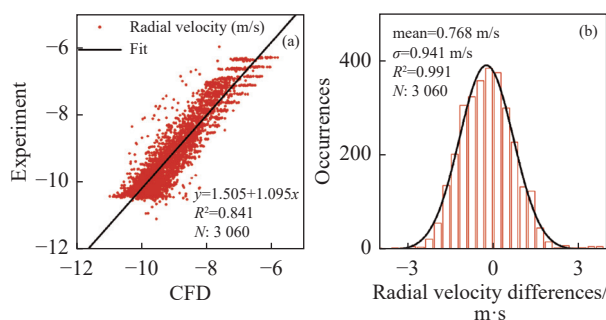


图 8 探测结果与模拟结果对比。(a) 径向速度线性拟合;(b) 径向速度差异直方图, 黑线为高斯拟合曲线

Fig.8 Comparison of radial velocity between experiment and simulation.

(a) Linear fit of radial velocity; (b) Histogram of radial velocity differences, with the black line representing the Gaussian fitting curve

虽然 CFD 模型输出结果和测风激光雷达的探测结果一致性较好, 但是还存在改善空间。CFD 虽然可以有效地解析舰船流场的分离涡, 但是解析远场的大气扰动能力有限。如图 7 所示, CFD 可以很好地捕捉舰尾流的扰动结构, 但是非尾流核心区的结果趋于平滑, 而激光雷达依然可以探测到大气紊流结构, 这是二者存在差别主要原因。此外, 激光雷达波束修正效果、自身系统测量误差和机械扫描的时间滞后效应等, 也会造成激光雷达探测结果和 CFD 模拟结果的偏差。因此, 需要通过改善 CFD 模型对大气紊流的解析能力和加快激光雷达的扫描速度等方法来进一步缩小二者的偏差。

3 结 论

文中结合计算流体动力学模拟和测风激光雷达研究了舰船流场的流动特性, 为了保障舰载机作业安

全提供了参考。利用计算流体动力学能够有效模拟舰船流场特征, 模拟结果显示, 舰岛和飞行甲板后方存在明显的速度扰动区域。相干多普勒测风激光雷达能够探测海上大气边界层特性和舰船尾流场结构, 激光雷达的探测数据可以为计算流体动力学模拟提供边界条件和模拟结果验证。实测和模拟结果的对比表明, 将测风激光雷达的风廓线作为舰船计算流体动力学模型的入口边界条件, 能够改善 CFD 模型, 使得模拟结果更加接近舰船流场的真实流动状况。然而, 测风激光雷达和 CFD 模拟融合的方法还存在实时性的问题, 且激光雷达 60 m 的距离分辨率难以解析舰尾流场的细微结构 (如小尺度涡旋), 对复杂海况下大气边界层瞬态变化的捕捉能力有限。未来需从三方面推进: 研发米级距离分辨率的相干多普勒测风激光雷达, 提升尾流结构解析能力; 构建 CFD-激光雷达实时反演模型; 开展不同海况下的对比试验, 建立普适性的舰船流场重建模型。

参考文献:

- [1] WANG J. Numerical research of ship airwake characteristic [D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2018. (in Chinese)
- [2] YUAN W, WALL A, LEE R. Combined numerical and experimental simulations of unsteady ship airwakes [J]. *Computers & Fluids*, 2018, 172: 29-53.
- [3] SHIPMAN J, ARUNAJATESAN S, MENCHINI C, et al. Ship airwake sensitivities to modeling parameters[C]//43rd AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit, AIAA, 2005: 1105.
- [4] CZERWIEC R, POLSKY S. LHA airwake wind tunnel and CFD comparison with and without bow flap[C]//22nd Applied Aerodynamics Conference and Exhibit, AIAA, 2004: 4832.
- [5] FINDLAY D, GHEE T. Experimental investigation of ship airwake flow control for a US Navy flight II-A class destroyer (DDG)[C]//3rd AIAA Flow Control Conference, AIAA, 2006: 3501.
- [6] SNYDER M, KANG H, BROWNELL C, et al. USNA ship air wake program overview[C]//29th AIAA Applied Aerodynamics Conference, AIAA, 2011: 3153.
- [7] BROWNELL C, LUZNIK L, SNYDER M, et al. Velocity measurements in a ship airwake with crosswind[C]//42nd AIAA Fluid Dynamics Conference and Exhibit, AIAA, 2012: 2851.
- [8] LUZNIK L, BROWNELL C, SNYDER M R, et al. Influence of the atmospheric surface layer on a turbulent flow downstream of

- a ship superstructure [J]. *Journal of Atmospheric & Oceanic Technology*, 2013, 30(8): 1803-1819.
- [9] MALLON C J, MUTHIG B J, GAMAGEDARA K, et al. Measurements of ship air wake using airborne anemometers[C]//55th AIAA Aerospace Sciences Meeting, AIAA, 2017: 0252.
- [10] KUMAR A, BEN-TZVI P. Novel wireless sensing platform for experimental mapping and validation of ship air wake [J]. *Mechatronics*, 2018, 52: 58-69.
- [11] XIA H, CHEN Y, YUAN J, et al. Windshear detection in rain using a 30 km radius coherent Doppler wind lidar at mega airport in plateau [J]. *Remote Sensing*, 2024, 16: 924.
- [12] ZHANG Y, YUAN J, WU Y, et al. Sub-meter wind detection with pulsed coherent Doppler lidar [J]. *Physical Review Fluids*, 2023, 8: L022701.
- [13] YUAN J, XIA H, WEI T, et al. Identifying cloud, precipitation, windshear, and turbulence by deep analysis of the power spectrum of coherent Doppler wind lidar [J]. *Optics Express*, 2020, 28: 37406-37418.
- [14] LIANG Xiaofeng, ZHANG Zhenhua. Application and development trend of shipborne wind lidar [J]. *Laser Technology*, 2021, 45(6): 768-775. (in Chinese)
- [15] SCHROEDER P, BREWER W A, CHOUKULKAR A, et al. A compact, flexible, and robust micro-pulsed Doppler lidar [J]. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 2020, 37: 1387-1402.
- [16] ACHTERT P, BROOKS I M, BROOKS B J, et al. Measurement of wind profiles by motion-stabilised ship-borne Doppler lidar [J]. *Atmospheric Measurement Techniques*, 2015, 8: 4993-5007.
- [17] ZHAI X, WU S, LIU B, et al. Shipborne wind measurement and motion-induced error correction of a coherent Doppler lidar over the Yellow Sea in 2014 [J]. *Atmospheric Measurement Techniques*, 2018, 11: 1313-1331.
- [18] ZHOU J, YANG Z, SONG S, et al. Shipborne wind lidar for regional 3-D wind field measurement [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2020, 49(S2): 20200189. (in Chinese)
- [19] WANG L, YUAN J, XIA H, et al. Marine mixed layer height detection using ship-borne coherent Doppler wind lidar based on constant turbulence threshold [J]. *Remote Sensing*, 2022, 14(3): 745.
- [20] DUAN G, DONG H, JIA Z, et al. Wind field fusion and fusion algorithm testing based on shipboard wind measurement data [J]. *Ship Electronic Engineering*, 2023, 43: 32-37. (in Chinese)
- [21] ZHANG Y, WU Y, XIA H. Spatial resolution enhancement of coherent Doppler wind lidar using differential correlation pair technique [J]. *Optics Letters*, 2021, 46: 5550-5553.
- [22] SU S, CAO X, ZHANG D, et al. Numerical modeling for new prevention and control technologies of air wake field of large ships [J]. *Journal of National University of Defense Technology*, 2020, 42: 4. (in Chinese)
- [23] LINTON D, THORNBURGH B, WIDJAJA R. A study of LES methods for simulation of ship airwakes[C]//46th AIAA Fluid Dynamics Conference, AIAA, 2016: 3798.
- [24] WATSON N, KELLY M, OWEN I, et al. Computational and experimental modelling study of the unsteady airflow over the aircraft carrier HMS Queen Elizabeth [J]. *Ocean Engineering*, 2019, 172: 562-574.
- [25] POLSKY S. CFD prediction of airwake flowfields for ships experiencing beam winds[C]//21st AIAA Applied Aerodynamics Conference, AIAA, 2003: 3657.
- [26] KULKARNI P, SINGH S, SESHADRI V. Parametric studies of exhaust smoke-superstructure interaction on a naval ship using CFD [J]. *Computers & Fluids*, 2007, 36: 794-816.
- [27] POLSKY S A, GHEE T A. Application and verification of internal boundary conditions for antenna mast wake predictions [J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 2008, 96: 817-830.
- [28] SHUKLA S, SINHA S S, SINGH S N. Ship-helo coupled airwake aerodynamics: A comprehensive review [J]. *Progress in Aerospace Sciences*, 2019, 106: 71-107.
- [29] WANG J, JIANG G, YANG M. Influence of ABL on SFS2 ship airwake [J]. *Ship Science and Technology*, 2018, 40(8): 37-40. (in Chinese)
- [30] SNYDER M, KANG H, BURKS J. 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, AIAA, 2013: 0959.
- [31] GARRATT J R. The Atmospheric Boundary Layer[M]. United Kingdom: Cambridge University Press, 1992.
- [32] WEI T, XIA H, HU J, et al. Simultaneous wind and rainfall detection by power spectrum analysis using a VAD scanning coherent Doppler lidar [J]. *Optics Express*, 2019, 27: 31235-31245.

Application of Doppler wind lidar in ship airwake simulation and detection

YUAN Jinlong¹, XIA Haiyun^{1,2*}

(1. School of Atmospheric Physics, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044, China;

2. School of Earth and Space Science, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China)

Abstract:

Objective The simulation and detection of ship airwake are of great significance for ensuring the safety of carrier-based aircraft operations. Traditional methods such as wind tunnel tests, real ship measurements, and computational fluid dynamics (CFD) simulations face challenges such as scale effects, high costs, and inaccurate boundary conditions. This study aims to integrate Doppler wind lidar with CFD to improve the accuracy of ship airwake simulations, providing a more reliable approach for analyzing complex flow fields affected by the atmospheric boundary layer (ABL).

Methods A CFD model based on the delayed detached eddy simulation (DDES) was established to simulate the airwake of the aircraft carrier. The computational domain was set as 1 km×3 km×0.5 km with unstructured meshes, and the hull surface was encrypted to capture flow details (Fig.1). A 1548 nm coherent Doppler wind lidar (Tab.1) was employed to obtain real-time ABL wind profiles and turbulence intensity through velocity-azimuth display (VAD) scanning, which were used as inlet boundary conditions for the CFD model (Fig.6). The lidar also conducted planar position indicator (PPI) scans at elevation angles from 0° to 10° and azimuth angles from -50° to 50° to acquire three-dimensional ship airwake data (Fig.7).

Results and Discussions The CFD simulation accurately captured the turbulence intensity distribution behind the ship island and the vertical velocity fluctuations in the wake region, with the simulated results showing good consistency with the physical phenomena of flow separation and vortex shedding (Fig.2 and Fig.3). With the detected wind profile as boundary condition for simulation, the linear fitting of the measured and simulated radial velocities yielded a slope of 1.095 and an R^2 of 0.841, with the simulated radial velocity having a mean error of 0.768 m/s and a standard deviation of 0.941 m/s, verifying the accuracy of the simulation model (Fig.8). Compared with traditional CFD simulations using empirical ABL models, the integration of lidar-measured data can improve simulation accuracy.

Conclusions This paper investigates the flow characteristics of ship airwake by combining computational fluid dynamics (CFD) simulation and Doppler wind lidar, providing new means for ensuring the safety of carrier-based aircraft operations. CFD can effectively simulate the characteristics of ship airwake, and the simulation results show that obvious velocity disturbance areas exist behind the ship island and flight deck. The coherent Doppler wind lidar can detect the characteristics of the marine atmospheric boundary layer and the wake structure of the ship airwake. The lidar detection data can provide boundary conditions and simulation result verification for CFD simulation. The comparison between the measured and simulated results shows that using the wind profile of the Doppler wind lidar as the inlet boundary condition of the ship CFD model can improve the CFD model, making the simulation results closer to the real flow situation of the ship airwake. However, the 60 m distance resolution of the lidar is difficult to resolve the fine structures (such as small-scale vortices) of the ship wake flow field, and

its ability to capture the transient changes of the atmospheric boundary layer under complex sea conditions is limited. In the future, it is necessary to advance from three aspects: developing a coherent Doppler wind lidar with meter-scale resolution to improve the resolution ability of wake structures; constructing a real-time inversion model of CFD-lidar; and carrying out comparative experiments under different sea conditions to establish a universal ship airwake reconstruction model.

Key words: computational fluid dynamics; Doppler wind lidar; atmospheric boundary layer; ship airwake

Funding projects: Strategic Priority Research Program of Chinese Academy of Sciences (XDA22040601)