第 18 卷　第 34 期　2018 年 12 月
1671—1815(2018)034-0149-07

科　学　技　术　与　工　程
Science Technology and Engineering

Vol. 18　No. 34　Dec. 2018
© 2018　Sci. Tech. Engrg.

引用格式:苏轼鹏, 金良安, 曹小群, 等. 舰船空气尾流场特性及其控制技术研究综述[J]. 科学技术与工程, 2018, 18(34): 149—155
Su Shipeng, Jin Liangan, Cao Xiaoqun, et al. Ship airwake field characteristic and control technology overview[J]. Science Technology and Engineering, 2018, 18(34): 149—155

交通运输

舰船空气尾流场特性及其控制技术研究综述

苏轼鹏[1]　金良安[1]*　曹小群[2]　苑志江[1]
(海军大连舰艇学院航海系[1],大连 116018;国防科技大学气象海洋学院[2],长沙 410073)

摘　要　舰船空气尾流场是影响舰载机安全起降的重要因素之一;其相关研究在舰载机作战、舰船操纵、海上航空气象保障等领域具有重要意义。总结了无耦合条件下、舰船/舰载机耦合条件下的舰船空气尾流场特性相关研究成果,分析了当前舰船空气尾流场的控制技术研究现状;并提出基于射流技术的新型舰船空气尾流场控制技术;可为舰船空气尾流场特性和控制技术研究提供有益的参考。

关键词　舰船空气尾流　实验　计算流体动力学　控制技术
中图法分类号　U611.1;　　**文献标志码**　A

舰船航行时受到舰船上层建筑、自身运动、海洋大气边界层等多种因素的影响,会在其尾部产生空气尾流场,对舰载机起降性能产生严重影响,危及舰载机安全。正是这一原因,舰载机飞行员遇到生命危险的概率远高于宇航员、陆基飞行员以及民航飞行员等其他类型的飞行员[1]。鉴于此,舰船空气尾流场的影响及预测一直是各国所关注的热点问题之一[2]。

国外许多研究机构都较早开展了舰船空气尾流场的研究。美国海军研究生院(Naval Postgraduate School)20 世纪 80 年代开展了相关风洞实验研究工作[3—6]。由美国、英国、加拿大和澳大利亚联合参与的技术合作计划(the technical cooperative program, TTCP)[7—9],对舰船空气尾流场进行了全面系统地研究。此外,美国海军军官学校(United States Naval Academy,USNA)从 2010 年展开了舰船空气尾流的调查研究工作,特别是开展了“三叉戟”(Trident Program)计划[10—15],针对特定舰型的巡逻艇展开展了实船实验、风洞实验及计算机仿真等一系列研究,得到了有意义的研究结论。近年来,中国多家研究机构也在舰船空气尾流场的风洞实验和计算流体动力学(computational fluid dynamics,CFD)数值模型方法方面进行了大量的研究。此外,还有许多小规模学术团体的相关研究。

在国内外有关舰船空气尾流场特性的几十年的研究中,逐渐形成了实船测量、缩比模型的风洞实验及全尺寸的 CFD 数值模拟等三种方法。目前国际上普遍采用以 CFD 计算为主,以风洞实验和实船测量进行验证,三种方法互相补充和配合。

本文将从无耦合条件下的舰船空气尾流场和舰/机耦合流场两方面,对舰船空气尾流的研究进行总结和分析,进一步探讨舰船空气尾流的控制技术问题,提出新型控制技术的构想,为相关研究提供参考。

1　舰船空气尾流场特性研究现状

早期的舰船空气尾流场研究大多忽略与舰载机的耦合流场,随着研究的逐步深入,近年来舰/机耦合流场的研究越来越多。下面将分别介绍这两方面的研究成果。

1.1　无耦合条件下的舰船空气尾流场特性研究

1.1.1　基于实验的舰船空气尾流场特性研究

(1)基于实船的舰船空气尾流场实验研究

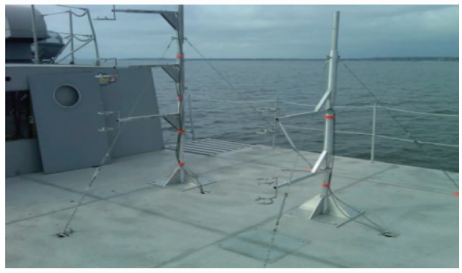
关于舰船空气尾流场对舰载机的影响是在实际起降中最早发现的[2];限于当时的技术条件,最初的研究采用的是实船直接测量方法。如早期美军在直升机两栖登陆舰(landing helicopter assault ship, LHA)的甲板上并列安装 4 根 20 英尺高的长杆,在杆顶安装测风仪,来测量甲板上的气流场[16]。2010

2018 年 7 月 12 日收到
第一作者简介:苏轼鹏(1980—),男,吉林敦化人,博士研究生。研究方向:舰船空气尾流场及其控制。E-mail:qxsspgx@163.com。
*通信作者简介:金良安(1966—),男,浙江黄岩人,博士研究生导师。研究方向:军事航海安全技术。

年 USNA 在切萨皮克湾对训练用巡逻艇 YP（patrol craft, training）进行了为期一年的海上测试试验，实验中将 YP 船首和后甲板上加装了三维超声测风仪，测量空气尾流场[10,12,15]，收集实验数据进行分析研究，如图 1 所示。此外，还有利用遥控直升机的航迹特征来测量实船空气尾流场的研究[11,17]。



(a) 未经改装的USNA的YP实船



(b) YP676飞行甲板上的超声测风仪装置

图 1 USNA 的 YP 实船空气尾流实验

Fig. 1 Experience of USNA YP airwake

（2）基于风洞的舰船空气尾流场实验研究

风洞实验（图 2）可模拟真实情况下的舰船空气尾流场，并根据需要，改变气流场以及船模工况等参数。相比于实船实验，成本低，可控性好，且耗时少。

苏联 20 世纪 70 年代在“戈尔什科夫”号的设计中，利用风洞对船模飞行甲板上方的空气流场进行测量，得到实验数据，并应用到实船设计中[18]。80 年代 Bolinger[19]、Biskaduros[20] 和 Daley[21]、Johns[22] 分别完成 DD-963、LHA-1 以及 DDG-963 等实际船模的风洞实验，为后续研究提供了有益参考。

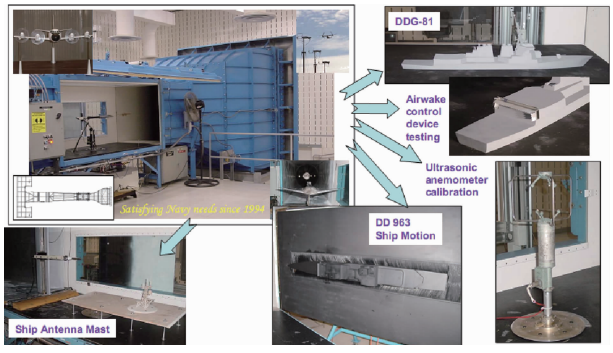


图 2 舰船空气尾流场的风洞船模实验[26]

Fig. 2 Wind tunnel experiment of ship airwake[26]

1999 年 NASA 的 Ames 流体力学实验室针对 LHA 船模，利用七孔探针进行风洞实验[16]。随后加拿大国际研究会议针对简化模型 simplified frigate shape（SFS）和 SFS2 开展了一系列的风洞测试[23]。Shipman 等[24]为研究船体几何形状、边界层模拟等敏感因素对舰船空气尾流影响问题，针对 CVN-76 航空母舰模型开展了风洞实验，发现主要空气尾流场受舰岛结构复杂程度影响不显著。Cherry 等[25]探讨了 CVN-68、CVN-78 航母模型的上层建筑和飞行甲板对空气尾流场的影响，发现甲板前部边角结构能减少影响飞行的涡旋区域。美国海军军官学校（USNA）在 2010 ~ 2011 年的舰船空气尾流项目研究中也开展了风洞实验研究[10,13]。

虽然缩比模型的风洞实验相对于实船实验有许多优点，但是也存在一定的局限性，即雷诺数偏小、湍流频率偏大、测量技术受限以及难以模拟舰船周围海洋大气边界层等。

1.1.2 基于数值仿真的舰船空气尾流场特性研究

随着计算机技术和数值计算理论的发展，基于 Navier-Stokes 方程的数值仿真、大涡模拟（large eddy simulation，LES）、脱体涡模拟（detached- eddy simulation，DES）等数值仿真方法，在舰船空气尾流场特性研究中广泛使用。相对于实船和风洞实验研究，计算机数值仿真方法具有成本低、可控性强、易于实现等优势。

（1）基于 N-S 方程的数值仿真研究

N-S 方程是用来描述黏性流体运动的基本理论依据，可直接利用计算机数值求解，得到瞬时运动解，这就是湍流的直接数值模拟 DNS（direct N-S）方法。但这一数值仿真方法需要细密的空间网格和极小的时间步长，对计算机要求很高、计算耗时长。目前的常规计算机计算能力往往仅能满足模拟雷诺数较低情况下的流体运动，难以作为高雷诺数的舰船空气尾流场的预测方法。

对于实际工程而言，首要是求出给定边界和起始条件下的湍流统计平均量，可从 Reynolds 平均方程出发，对湍流进行 Reynolds 平均数值模拟，即雷诺平均的湍流模式（Reynolds-average Navier-Stokes，RANS），这是计算舰船空气尾流场常用的模型之一。Tai 等[27]最早使用该方法，用多区域、薄层 N-S 方程对 DD-963 船模的空气尾流场进行模拟，发现空气尾流场中的流动分离、黏性涡旋的相互作用等现象。Bogstad 等[28]利用 N-S 分析方法，分析了 6 种船型的典型空气尾流场，结果与风洞数据拟合较好，证明其可用于直升机模拟训练系统。中国也有类似的研究[29,30]。该方法对不稳定态气流尤其是

大风向的舰船空气尾流场的模拟效果不够好。

（2）基于大涡模拟方法的数值仿真研究

大涡模拟（LES）方法更能反映不同尺度涡旋的运动。由于湍流中动量、标量输运主要靠大尺度脉动，且大尺度脉动与边界条件密切相关，而小尺度脉动趋于各向同性，只需对大尺度用控制方程直接计算，对小尺度用湍流模式计算出其对大尺度的影响，这就是介于 DNS 和 RANS 之间的 LES 方法。

Polsky[9—16]用单调完整大涡模拟（monotone integrated large eddy simulation，MILES）加入剪切压力输送湍流模式（shear stress transport，SST），计算了 LHA 的空气尾流场。同年，Camelli[31,32]为研究 LPD17 烟迹随空气尾流的运动状况，采用 LES 模拟空气尾流与气温的分布情况；随后，又采用极端大涡模拟方法研究相关问题，结果与风洞数据模拟较好。Syms[33]采用极端大涡模拟（very large eddy simulation，VLES）结合 Lattice-Boltzmann 方法对 SFS 的空气尾流场进行从全尺度到细节的模拟。Snyder 等[34]在 USNA 系列研究中同样采用 MILES 方法进行 YP 空气尾流场的模拟仿真研究。Linton 等[35]在模拟 SFS1 的空气尾流场中采用了 LES 和 ILES（隐性大涡模拟）两种方法，发现风向角为 0°条件下模拟比风向角 45°好。LES 模型远少于 DNS 所需的网格数量，且更准确的反应空气尾流场的实际情况。

（3）基于脱体涡模拟方法的数值仿真研究

脱体涡模拟 DES 是针对舰船复杂的气流场，结合 RANS 和 LES 方法的优点，在湍流附面层内采用 RANS 方法，而在其他区域采用 LES 方法，可大大降低计算时间和计算资源的消耗，计算结果可大幅度改善。

加拿大海军对 SFS2 进行 DES 数值模拟计算，与风洞结果拟合较好，表明 DES 能够较好地对大尺度的湍流结构进行数值模拟[36]。Roberson 等[12]的研究表明 DES 可减少模拟计算时间。Dooley[37]采用结合不稳定 RANS、DES、DDES（延迟脱体涡模拟）的 REX 软件模拟方法模拟 SFS2 的空气尾流场，结果同样较好。此外，还有学者采用 k-ε 湍流模式[7,38]和非线性扰动方程（nonlinear disturbance equation，NLDE）[39]方法进行建模研究。

无耦合条件下的舰船气流场是最早的研究模式，目前国外的研究已达到较成熟的水平，形成了相关军用标准（图 3）和甲板风包络等战术产品（图 4）。相比之下，中国研究起步较晚，计算机建模与数值仿真研究近年来有了一定研究积累，但是由于实验研究不足，难以将两种研究结果对比研究，因此仍缺乏有力的研究结论。

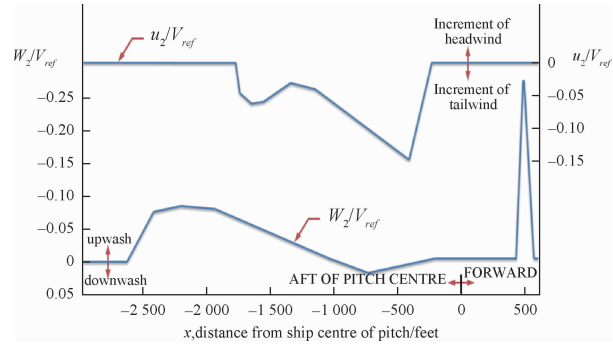


图 3　航母扰流与稳态风的比值（MIL-F-8785C）[40]

Fig. 3　Burble steady wind ratios of carrier vessle attack ship（MIL-F-8785C）[40]

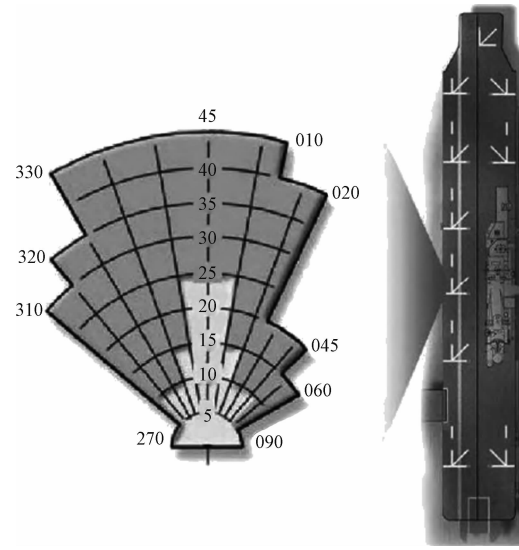


图 4　美国海军直升机两栖登陆舰的舰载机安全甲板风包络[1]

Fig. 4　Wind over deck envelope of an aircraft of an landing helicopter assault ship[1]

1.2　舰/机耦合条件下的舰船空气尾流特性研究

舰/机耦合空气尾流场的研究，更接近空气尾流场的实际情况。基本思路是在舰船气流场的基础上加入舰载机气流场模式，实现两者耦合。目前的研究大多是舰船与旋翼飞行器耦合的研究，具体成果如下。

1.2.1　基于实验的耦合舰船空气尾流场特性研究

舰/机耦合空气尾流场的研究难以在实船条件下开展，缩比实验研究对模型、测量等软硬条件要求高，实现难度较大，相关研究开展较少。

Silva 等[41]利用粒子图像测速技术（particle image velocimetry，PIV），研究了 LHA 两栖舰模型空气尾流场下，V-22、CH-46 和 CH-53 旋翼飞机附近耦合气流场。Nacakli 等[42]同样利用 PIV 测量了忽略机身的直升机转子与船模的耦合空气尾流场。实验结果表明：转子冲击系数受空气尾流影响程度将会随高度的增加而增加。Stargel 等[43]基于耦合分析技

术,发现了空气动力耦合现象。Kääriä 等[44]在水洞中用空气尾流测力计(AirDyn)来测量直升机在舰船空气尾流场中的空气动力载荷,讨论飞行员工作量、控制进舰策略等问题。Khouli 等[45]针对旋翼飞行器着舰时的"叶片漂移"现象,设计了折叶铰链式转子系统,嵌入风洞舰船空气尾流中进行测试,得到了在直升机起降中的空气动力环境影响、转子叶片伸缩偏度上的转子运行参数等研究结论。

1.2.2 基于数值仿真的耦合舰船空气尾流场特性研究

计算机数值仿真方法具有成本低、可控性强、易于实现等优势,在舰/机耦合流场研究中体现更为明显,应用更加广泛。

1988 年 Tattersall 等[46]较早研究了耦合流场,得出飞行甲板上的气流其本质是直升机转子对气流的影响的结论。Landsberg 等[47]将直升机下洗流模式嵌入 FAST3D 中,研究机库门开闭情况下的甲板气流情况;结果表明着舰区表面有快速、显著的空气尾流垂直分量,打开机库门对着舰甲板上气流场影响很小。文献[48]也得到了相似结论。Modi 等[49]应用平行气流求解器的非结构网格,研究复杂船体和直升机附近的三维、非定常、分离流体的预报可能性,研究中采用 LHA 和 AH-64 直升机机身(去除螺旋桨)两种模型。Keller[50]用耦合副翼-延迟-扭转方程、有限元法,研究直升机转子在船舷起降操作中的短暂空气动力反应。Wakefield 等[51]用修改过的 N-S 方程模拟转子模式,与舰船气流场模式结合产生气流解,结果表明,转子下洗流和舰船气流的相互作用,会对飞行器产生突然的、消极的气动力影响。Bridges 等[52]将舰/机耦合分为三种情况[全耦合(fully-coupled)、只有舰船气流对飞行器的影响(one-way)、无耦合(no coupling)]进行模拟,结果表明 one-way 比 fully-coupled 更快更灵活;fully-coupled 接近于实际,但是受下洗流影响存在偏差。同年,Alpman 等[53]利用 fully-coupled 模拟方法分析舰/机耦合问题,忽略大气边界层的影响,发现在靠近机库时相互作用强烈。Thornber 等[54]采用隐性大涡模拟(ILES)计算两型船的船/机耦合,讨论了不同风向角下的气流现象。Crozon 等[55]采用不稳定 RANS 方程结合 actuator-disc 方法,证明了耦合影响在尾流和转子气流中的重要性,发现了在向前飞行和靠近甲板操作中转子载荷的差异。Forsythe 等[56]为提高飞行模拟器的真实性,应用 HPCMP CREATE™-AV Kestrel,模拟旋翼飞行器和舰船空气尾流的相互耦合,效果较好,如图 5 所示。Orbay 等[57]用 RANS 和混合 RANS/LES 方程计算 SFS2 附近的气流场,分析转子与空气尾流场的相互作用以及影响空气尾流的因素。中国目前在耦合流场方面研究较少,但是在直升机气动性能模拟方面有一定的研究[58]。

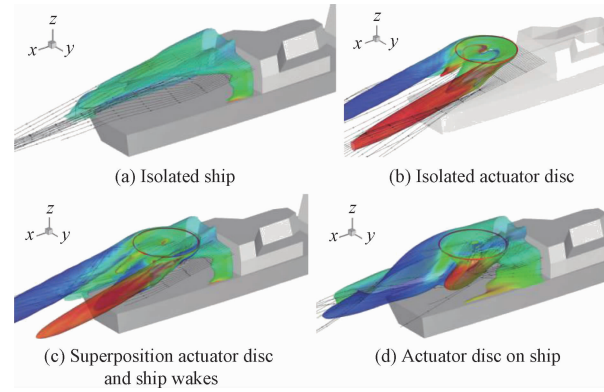


图 5 直升机转子与舰船气流场的耦合空气尾流场[56]

Fig. 5 The fully-coupled airwake field of rotor and ship airflow[56]

由于舰船空气尾流场会影响舰载机的起降性能,危害舰载机安全,所以在研究其特性的基础上要进一步研究消除其负面影响。主要途径有两条:①舰载机起降时根据舰船空气尾流场的情况在正常起降中修正起降性能参数,以去除其干扰;②改变舰船空气尾流场本身的结构,减小其对舰载机的影响。其中,后者的安全性更好,是舰船空气尾流场深入研究的方向之一。下面对其研究现状及其发展趋势做一分析展望。

2 舰船空气尾流场控制技术研究及展望

舰船空气尾流场控制技术是基于舰船空气尾流场特性,开展的针对性工程应用措施,旨在通过改变空气尾流场的结构,来降低并消除其对舰载机的影响。该研究主要思路是通过改变船体结构,实现对空气尾流场控制。

2.1 舰船空气尾流场的控制技术现状分析

Findlay 等[59]在风洞实验中将锯齿状格栅安置于船模机库后部的边缘,作为气流控制装置,发现该气流控制装置可改变船体附近平均气流与气流的脉动。同年,Greenwell 等[60]为减少空气尾流的影响,用倾斜多孔屏安置于船模机库和飞行甲板的边缘(图 6),经风洞测试表明将该装置加装于机库两侧和顶部并保持倾斜时效果最佳,在机库的背风区域改善最大。

2013 年 Kääriä 等[61]在前面实验的基础上又研究了空气尾流场的控制问题,在侧风条件下,设计将实验船模上层建筑的迎风面加装各种类型的副翼或将边缘制成凹槽,结果发现该方法会明显降低飞行器载荷。同年 LaSalle[14]也有类似的研究。

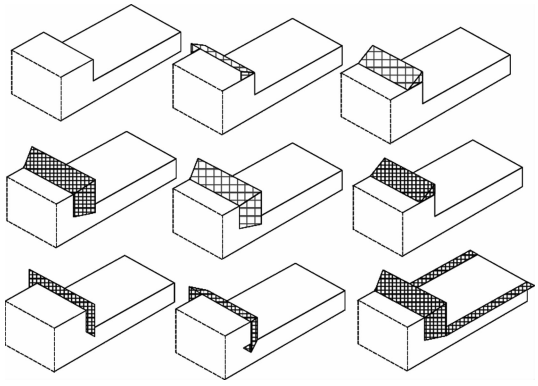


图 6　倾斜气流控制屏的结构[61]

Fig. 6　Inclined screen flow control configurations[61]

通过加装气流控制装置改变舰体上层建筑结构的方法,可以在一定程度上改变空气尾流场,但是存在明显问题。

(1)只对特定角度风向的无耦合条件下的舰船空气尾流场效果明显,而对其他角度的气流效果控制效果欠佳,对于复杂的耦合流场的适用性更低。

(2)改变船体外形结构,与舰船总体设计、舰船隐身性而言,具有一定的矛盾性,可行性有待商榷。

(3) 改变船体外形结构,会产生更大的涡旋,对耦合气流场不适用。

2.2　舰船空气尾流场的控制技术研究思考

基于主动补气方法的舰船空气尾流场控制技术的基本思想是,依据射流原理,设计构建主动补气装置,通过补气方法改善空气尾流场,消除其中对飞行器有影响的分量,为舰载机起降提供平稳的气流场条件,保障舰载机安全起降。主动补气法相比加装气流控制装置有以下优势:①无需改变船体外形结构;②可调节自身的气流方向和速度以适应气流场变化;③不会产生更大的湍流涡旋;④对无耦合条件下的舰船空气尾流场和耦合气流场均适用。

初步的实现构想是对空气尾流影响舰载机起降的涡旋区进行补气,减小对舰载机影响较大的下沉分量,从而改变空气尾流的结构,使舰船尾部气流场均匀稳定,有利于舰载机起降安全。这样从根本上解决舰载机起降条件受舰船空气尾流影响问题。其中关键性问题主要有如何构建及设置主动补气装置,补充气流与空气尾流场的相互作用,补气后的气流场稳定性控制等。如果相关问题得到充分解决,主动补气方法将是是未来舰船空气尾流控制技术发展的趋势,可应用于相关的业务领域中。

3　结论

舰船空气尾流场对舰载机的安全起降具有重要影响,研究其发生机制和控制技术对保证舰载机起降安全、作战使用及海上航空气象保障等领域具有深远意义。概括了舰船空气尾流场关键技术的研究现状,归纳总结了舰船空气尾流场实验研究、计算机仿真研究以及控制技术研究成果与现状,同时展望了未来舰船空气尾流场控制技术方面发展的重点方向,着重论证了舰船空气尾流场控制技术的新思考。研究结论能够为相关领域的研究提供有益参考。

参　考　文　献

1　贺少华,刘东岳,谭大力,等. 载机舰船气流场相关研究综述. 舰船科学技术,2014; 36(2):1—7
He Shaohua, Liu Dongyue, Tan Dali, *et al*. A review of researches on ship airwakes. Ship Science and Technology, 2014; 36(2):1—7

2　王金玲. 舰船空气尾流场特性数值研究. 哈尔滨:哈尔滨工程大学,2016
Wang Jinling. Numerical research of ship airwake characteristic. Harbin: Harbin Engineering University, 2016

3　Bolinger W K. Visualization of the flow field around a generic destroyer model in a simulated turbulent atmospheric boundary layer. Monterey: Naval Postgraduate School, 1987

4　Biskaduros J L. Flow visualization of the airwake of an oscillating generic ship model. Monterey: Naval Postgraduate School, 1987

5　Daley W H. Flow visualization of the airwake around a model of a tarawa class LHA in a simulated atmospheric boundary layer. Monterey: Naval Postgraduate School, 1988

6　Johns M K. Flow visualization of the airwake around a model of a DD-963 class destroyer in a simulated atmospheric boundary layer. Monterey: Naval Postgraduate School, 1988

7　Reddy K R, Toffoletto R, Jones K R W. Numerical simulation of ship airwake. Computers & Fluids, 2000;29:451—465

8　Tai T C. Airwake simulation of modified TTCP /SFS ship. NATO RTO symposium on vortex flow and high angle of attack, Loan NATO Research and Technology Organisation, 2001: 1—12

9　Polsky S A. CFD prediction of airwake flowfields for ships experiencing beam winds. 21st Applied Aerodynamics Conference. Reston: American Institute of Aeronautics and Astronautics,2003:2003-3657

10　Snyder M R, Shishkoff J P. Comparison of experimental and computational ship air wakes for YP class patrol craft. ASNE Launch and Recovery Symposium. Annapolis: United States Naval Academy, 2010:2011-7045

11　Metzger J D. Measurement of ship air wake impact on a remotely piloted vehicle. Annapolis: U. S. Naval Academy,2012

12　Roberson F D, Kang H S, Snyder M R. Ship air wake CFD comparisons to wind tunnel and YP ship results. 29th AIAA Applied Aerodynamics Conference. Honolulu: American Institute of Aeronautics and Astronautics, 2011:2011-3156

13　Miklosovic D S, Kang Murray H S, Snyder R. Ship air wake wind tunnel test results. 29th AIAA Applied Aerodynamics Conference. Honolulu: American Institute of Aeronautics and Astronautics, 2011:2011-3155

14　LaSalle N R. Study of passive flow control for ship air wakes. Annapolis: U. S. Naval Academy, 2013:1—93

15　Snyder M R, Kang H S, Brownell C J, *et al*. Validation of ship air

wake simulations and investigation of ship air wake impact on rotary wing aircraft. Naval Engineers Journal, 2013;125(1): 1—18

16 Polsky S A, Bruner C W S. A computational study of unsteady ship airwake The RTO AVT Symposium. Loen NATO Research and Technology Organisation, 2003: 25

17 Kumar A, Ben-Tzvi P, Snyder M. Uav-based wireless telemetry system for the estimation of ship air wake patterns. International Design Engineering Technical Conferences & Computers and Information in Engineering Conference. Boston: IDETC/CIE, 2015:1—7

18 曲 飞,陆 超,姜治芳,等. 舰船舰面空气流场的 CFD 数值模拟探讨. 中国舰船研究,2009; 4(5): 23—27
Qu Fei, Lu Chao, Jiang Zhifang, *et al*. CFD numerical simulation of ship air-wake. Chinese Journal of Ship Research, 2009; 4(5): 23—27

19 Bolinger W K. Visualization of the flow field around a generic destroyer model in a simulated turbulent atmospheric boundary layer. Monterey:Naval Postgraduate School, 1987

20 Biskaduros J L. Flow visualization of the airwake of an oscillating generic ship model. Monterey: Naval Postgraduate School, 1987

21 Daley W H. Flow visualization of the airwake around a model of a tarawa class LHA in a simulated atmospheric boundary layer. Monterey: Naval Postgraduate School, 1988

22 Johns M K. Flow visualization of the airwake around a model of a DD-963 class destroyer in a simulated atmospheric boundary layer. Monterey: Naval Postgraduate School, 1988

23 Forrest J S, Owen I. An investigation of ship airwakes using Detached-Eddy simulation. Computers & Fluids, 2010;39:656—673

24 Shipman J, Arunajatesan S, Menchini C, *et al*. Ship airwake sensitivities to modeling parameters. 43rd AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit. Reno: American Institute of Aeronautics and Astronautics,2005:1—14

25 Cherry B E, Constantion M M. The burble effect: Superstructure and flight deck effects on carrier air wake. Launch, Recovery & Operations of Manned and Unmanned Vehicles from Marine Platforms. Annapolis: United States Naval Academy, 2010:1—15

26 赵永振. 大型舰船定常与非定常气流场数值模拟. 哈尔滨:哈尔滨工程大学, 2012:1—90
Zhao Yongzhen. Numerical simulation of steady and unsteady air flow field around large ship. Harbin: Harbin Engineering University, 2012:1—90

27 Tai T C, Carico D. Simulation of DD—963 ship airwake by Navier-Stokes method. 24th AIAA Fluid Dynamics Conference. Orlando: Airnraft, 1993:1399—1401

28 Bogstad M C, Habashi W G, Akel I,*et al*. Computational-fluid-dynamics based advanced ship airwake database for helicopter flight simulators. Journal of Aircraft, 2002;39(5):830—838

29 孙文胜, 林 明. 基于神经网络模型的舰面流场仿真算法. 中国工程科学,2003;5(5):76—79
Sun Wensheng, Lin Ming. Simulation algorithm of flightdeck airflow based on neural network. Engineering Science,2003;5(5):76—79

30 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. 舰船科学技术,2009;31(9):38—42
Lu Chao, Jiang Zhifang, Wang Tao. Influences of different airflow situations for ship airwake. Ship Science and Technology, 2009;31(9):38—42

31 Camelli F, Soto O, Lohner R, *et al*. Topside LPD17 row and temperature study with an implicit monolithic scheme. 41st AIAA Aerospace Sciences Meeting & Exhibit. Reno: AIAA, 2003: 2003—0969

32 Camelli F, Lohner R, Sandberg W, *et al*. VLES study of ship stack gas dynamics. 42nd AIAA Aerospace Sciences Meeting & Exhibit. Reno: AIAA, 2003: 2004—72

33 Syms G F. Simulation of simplified-frigate air-wakes using a lattice-Boltzmann method. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2007; 96: 1197—1206

34 Snyder M R, Kang H S, Brownell C J, *et al*. USNA ship air wake program overview. 29th AIAA Applied Aerodynamics Conference. Honolulu: American Institute of Aeronautics and Astronautics, 2011:1—12

35 Linton D, Thornber B. A study of LES methods for simulation of ship airwakes. 46th AIAA Fluid Dynamics Conference. Washington D. C.: American Institute of Aeronautics and Astronautics, 2016: 1—14

36 Forrest J S, Owen I. An investigation of ship airwakes using detached-eddy simulat-ion. Computers and Fluids, 2010; 39 (4): 656—673

37 Dooley G. Ship airwake computational mode-ling method verification. Iowa:University of Iowa's Institutional Repository, 2017

38 王 祎. 载机舰在风、浪中的气流场数值模拟研究. 哈尔滨:哈尔滨工程大学, 2010
Wang Yi. The numerical simulation of the airflow of ships sailing in the wind and waves. Harbin: Harbin Engineering University, 2010

39 Long L N, Liu J M. Higher order accurate solutions of ship airwake flow fields using parallel computers. Fluid Dynamics Problems of Vehicles Operating near or in the Air-Sea Interface. Amsterdam: RTO AVT Symposium,1998:1—3

40 飞行力学杂志社. 军用规范——有人驾驶飞机的飞行品质(MIL-F-8785C)的背景资料和使用指南. 西安: 飞行力学杂志社, 1985: 149—152
Flight Mechanics. Military specifications—Background information and guidelines for the flight quality of manned aircraft (MIL-F-8785C). Xi'an: Flight Mechanics, 1985: 149—152

41 Silva M J, Yamauchi G K, Wadcock A J, *et al*. Wind tunnel investigation of the aerodynamic interactions between helicopters and tiltrotors in a shipboard environment. 4th Decennial Specialist's Conference on Aeromechanics. San Francisco: American Helicopter Society, 2004:21—23

42 Nacakli Y, Landman D. Helicopter down-wash/frigate airwake interaction flowfield PIV surveys in a low speed wind tunnel. The AHS International 67th Annual Forum & Technology Display. Virginia: the American Helicopter Society International, 2011:1—12

43 Stargel R, Doane A. Wind tunnel technique for the identification of ship airwakerotor downwash coupling. Norfolk: Old Dominion University,2011

44 Kääriä C H, Wang Yaxing, Padfield G D. Aerodynamic loading characteristics of a model-scale helicopter in a ship's airwake. Journal of Aircraft, 2012; 49(5):1271—1278

45 Khouli F, Afagh F F, Langlois R G. Design, simulation, and experimental results for flexible rotors in a ship airwake. Journal of Aircraft,2016;53(1): 262—275

46 Tattersall P, Albone C M, Soliman M M, *et al*. Prediction of ship air wakes over flight decks using CFD. Fluid Dynamics Problems of Vehicles Operating near or in the Air-Sea Interface. Amsterdam: The RTO AVT Symposium, 1998:1—5

47 Landsberg A M, Boris J P, Sandberg W, *et al*. Analysis of the non-linear coupling effects of a helicopter downwash with an unsteady air-wake. 33rd Aerospace Sciences Meeting & Exhibit. Washington, D. C.: AIAA, 1995:95-0047

48 杨　俊. 舰船机库大门对直升机起降特性影响研究. 飞行力学, 2017;35(4):10—13
Yang Jun. Study of influence of warship hangar door on helicopter's take-off and landing characteristics. Flight Dynamics, 2017; 35(4):10—13

49 Modi A, Long L N. Unsteady separated flow simulations using a cluster of workstations. 38 th Aerospace Sciences Meeting & Exhibit. American Institute of Aeronautics & Astronautics, 2000. Reston: AIAA 2000:0272

50 Keller J A. Analysis and control of the transient aeroelastic response of rotors during shipboard engagement and disengagement operations. State College: The Pennsylvania State University, 2001

51 Wakefield N H, Newman S J, Wilson P A. Helicopter flight around a ship's superstructure. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part G: Journal of Aerospace Engineering. 2002, 216: 13—28

52 Bridges D O, Horn J F, Alpman E, *et al*. Coupled flight dynamics and CFD analysis of pilot workload in ship airwakes. AAIA Atmosphere Flight Dynamic Conference. Hilton Head: American Institute of Aeronautics and Astronautics, 2007: 1—19

53 Alpman E, Long L N, Bridges D O, *et al*. Fully-coupled simulations of the rotorcraft ship dynamic interface. The American Helicopter Society 63rd Annual Forum. Virginia Beach: The American Helicopter Society International, 2007: AHS2007-000206

54 Thornber B, Starr M, Drikakis D. Implicit large eddy simulation of ship airwakes. Aeronautical Journal, 2010;114(1162):715—736

55 Crozon C, Steijl R, Barakos G N. Numerical study of helicopter rotors in a ship airwake. Journal Ofaircraft, 2014;51(6):11—12

56 Forsythe J R, Lynch C E, Polsky S, *et al*. Coupled flight simulator and CFD calculations of ship airwake using HPCMP CREA-TE™-AV Kestrel. 53rd AIAA Aerospace Sciences Meeting 2015. Kissimmee: AIAA SciTech, 2015:1—18

57 Orbay E, Sezer-Uzol N. Computational fluid dynamics simulations of ship airwake with a hovering helicopter rotor. Ninth International Conference on Computational Fluid Dynamics. Istanbul: Istanbul Technical University, 2016: ICCFD9-281

58 余智豪,虞志浩,李　赟,等. 直升机旋翼前飞状态下的气动弹性分析. 科学技术与工程,2018;18(11):332—336
Yu Zhihao, Yu Zhihao, Li Yun, *et al*. Aeroelastic analysis of helicopter main rotor in forward flight. Science Technology and Engineering, 2018;18(11):332—336

59 Findlay D B, Ghee T. Experimental investigation of ship airwake flow control for a US navy flight II-A class destroyer (DDG). 3rd AIAA Flow Control Conference. San Francisco: American Institute of Aeronautics and Astronautics, 2006: 1—11

60 Greenwell D I, Barrett R V. Inclined screens for control of ship air wakes. 3rd AIAA Flow Control Conference. San Francisco: American Institute of Aeronautics and Astronautics, 2006: 1—12

61 Kääriä C H, Wang Yaxing, White M D, *et al*. An experimental technique for evaluating the aerodynamic impact of ship superstructures on helicopter operations. Ocean Engineering, 2013; 61: 97—108

Ship Airwake Field Characteristic and Control Technology Overview

SU Shi-peng[1], JIN Liang-an[1*], CAO Xiao-qun[2], YUAN Zhi-jiang[1]

(Navigation Department, Dalian Naval Academy[1], Dalian 116018, China;
College of Meteorology and Oceanography, National University of Defense Technology[2], Changsha 410073, China)

[**Abstract**] Ship airwakes field is one of the important factors to aircraft's take-off and landing safety. The research of ship airwake is valuable for ship-base aircraft fight, vessel sea training, aeronautical meteorology support, et al. A review of the latest progress in researches on no-coupled airwake flow field and coupling airwake flow field are pointed out, the previous studies of ship airwake field control technology is summarized. Furthermore, the new type ship airwake control technology is proposed. These are useful to the research of ship airwake field characteristic and control technology.

[**Key words**] ship airwake feild　　experiment　　computational fluid dynamics　　control technology