

直升机-舰动态配合的舰面流场环境研究综述

马鸿儒, 孙文胜, 穆志韬, 李旭东
(海军航空工程学院 青岛校区, 山东 青岛 266041)

摘要: 研究了制约直升机-舰动态配合性能的首要原因——直升机的载舰在海上风场、舰面特殊结构、舰艇运动等因素作用下形成的非定常舰面紊流场。在总结早期直升机-舰动态配合试验研究特点的基础上,分析了舰面流场海上实测试验的方法及其发展;针对舰面流场模拟普遍采用的CFD技术,分析了舰面流场CFD仿真的发展过程及现状。评价了新型CFD方法——DES在处理大分离涡外流方面的优势,指出了DES在舰面流场仿真领域的光明前景。

关键词: 直升机; 动态配合; 舰面流场; DES

DOI:10.7643/issn.1672-9242.2014.05.015

中图分类号: V212.4 **文献标识码:** A

文章编号: 1672-9242(2014)05-0075-06

Review on Shipboard Flow Study for Dynamic Interface of Helicopter and Ship

MA Hong-ru, SUN Wen-sheng, MU Zhi-tao, LI Xu-dong

(Naval Aeronautical Engineering Academy Qingdao Campus, Qingdao 266041, China)

ABSTRACT: To study the main factor restraining the dynamic interface performance of helicopter and ship—an unsteady flow field formed on the helicopter carrier by sea breeze, special structure of the ship and ship movement. Based on the feature of dynamic interface test of helicopter and ship in early stage, the methods of shipboard flow measurement as well as its development were analyzed. As for the CFD technique—usually used in flow simulation, its development and status were discussed. The advantage of DES, a new method of CFD, in handling Large-separation external flow was introduced and its bright perspective in simulation of shipboard flow was pointed out.

KEY WORDS: helicopter; dynamic interface; shipboard flow; DES

舰载直升机与载舰的动态配合性能是直升机-舰适配性的重要组成部分,意指直升机在近船或舰面操纵时直升机与舰的运动和其复杂流场相适应完

成任务的能力。机-舰动态配合是一个复杂的空气动力学过程,包含大气紊流和突风的海面风场、流经上层建筑等结构产生畸变的舰面流场、直升机旋翼

收稿日期: 2014-06-05; 修订日期: 2014-07-17

Received: 2014-06-05; Revised: 2014-07-17

作者简介: 马鸿儒(1988—),男,河北人,博士研究生,主要研究方向为海洋环境与飞行器性能研究。

Biography: MA Hong-ru(1988—), Male, from Hebei, Doctorial student, Research focus: ocean environment & aircraft performance.

通讯作者: 穆志韬(1963—),男,博士,教授,主要研究方向为材料腐蚀疲劳及寿命评估。

Corresponding author: MU Zhi-tao(1963—), Male, Ph. D., Professor, Research focus: corrosion fatigue and fatigue life evaluation of materials.

尾流场以及它们之间的耦合作用构成了直升机起飞、降落所处的非定常的流场环境。在直升机-舰动态配合诸多的影响因素中,舰面紊流场对于直升机发挥其良好的操纵性和稳定性,完成舰上起降任务的能力具有重要作用,因此舰面流场环境测试在动态配合测试程序中居于首要地位。文中结合直升机-舰动态配合研究的发展,对舰面流场测试及仿真研究的现状进行综述,并对其未来发展方向作出展望。

1 直升机-舰动态配合试验

1.1 国外研究

在机-舰配合试验研究的早期阶段,国外对特定的直升机/舰组合进行了针对性极强的试验,最主要的目的就是确定安全起降包络线。直升机在舰上的安全起降包络线是直升机与载舰配合执行起降任务能力的体现,一般包括以下几个方面^[1]:特定的直升机和舰组合;起飞和进场的过程或航向;不同风向允许的最大相对风速;舰的最大横摇角、纵摇角。如图1所示。

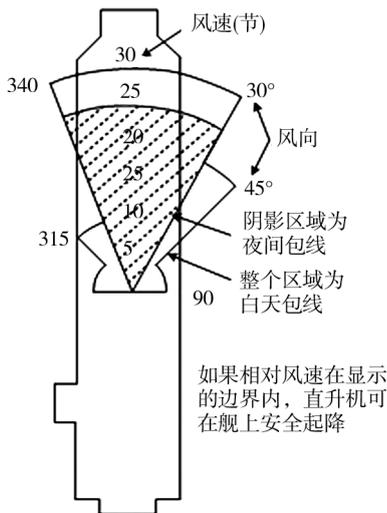


图1 典型的直升机甲板操纵包络线^[3]

Fig. 1 Typical envelope of helicopter operating on the deck

经过这一阶段的研究,一方面形成了舰载直升机舰上操纵的规范和对载舰的合格性要求;另一方面,经过这一阶段的发展,动态配合试验法已经成为了一门专门的学科,一些实验室比如美国海军航空兵实验中心 NATC 和荷兰海军研究实验室 NRL 已

经将其标准化^[2]。总结这一阶段的试验,可以得出一些研究的共性。

在这些试验中,飞行器上通常都装有电子仪表来记录动态配合时飞行器的运动和姿态参数。虽然试验方案具有多重目标,其当时试验的重点都放在起飞/降落包线的研究和对已有包线的扩展上。试验过程中要求直升机在某一特定的外界环境条件以及一定的直升机状态下起飞和降落,之后,由飞行员利用飞行员等级评定标准对整个过程进行评级。评定等级的依据是舰载环境下直升机的控制裕度、飞行品质和性能,以及由此引起的飞行员工作负荷的变化。最后,以上述依据绘制各种环境下的昼夜间操纵包线。

虽然上述海上试验在一定程度上确保了直升机舰上操纵安全的问题,但是,要对此过程中影响因素进行量化分析,还要进行精确测定才行。总结以往飞行试验的结果,人们逐渐发现,受海上紊流、舰面设备及上层建筑引起的涡流、舰面温度场分布不均等干扰形成的复杂舰尾流对直升机操纵影响巨大,于是进行了一系列舰尾流评估和测试。

美国海军研究生学校(NPS)对驱逐舰的舰面流场进行了一系列的模型试验研究。其中,Gustav A. Anderson^[4]在 DD963 模型舰上进行了直升机特定飞行航线上尾流场的绘图,并与之前该校进行的低速风洞可视化流场研究结果进行对比,指出了该航线上非定常的舰尾流效应。M. M. Rhoades^[5]在另一型舰——AOR 级上进行了类似试验,给出了测得的飞行甲板上方流场示意图,之后他又利用改进的速度测量工具进行试验,在甲板上方发现了非常规的速度分量和强烈紊流的存在^[6]。这些试验结果一方面证明了前期各国海上试验总结得出的规律——舰面上方存在紊乱的舰尾流场会给直升机操纵带来显著影响,同时也为之后的舰尾流仿真提供了可参照的依据。

澳大利亚国防部也在 20 世纪 90 年代初对直升机载舰舰面流场特性进行了研究。首先进行的是 FFG7 驱逐舰甲板流场海上测量试验^[7],记录了舰船运动、参照风速、以及甲板风速等信息。A. M. Arney^[8]对该试验实测数据的采集和处理的细节进行了描述,针对数据采集时存在的舰上高频发射装置干扰问题,提出了还原数据剔除干扰的方法。Lin-

coln P. Erm^[9] 则对 SH-60B/FFG-7 机舰仿真程序所用的舰尾流模型进行了详细研究。该模型基于另一型舰的风洞试验数据,但针对 FFG-7 舰外形特点对数据进行了修正,结果显示风洞中速度测量值与实测数据有很多不同,证明风洞试验数据在一定程度上上的不可靠性。

1.2 国内研究

我国自 20 世纪 80 年代以来,随着海军舰载直升机的逐步发展,开始直升机-舰配合方面的研究工作。陈碧云结合国外舰载直升机发展的特点,讨论了直升机装舰若干问题^[10],详细指出了影响直升机/舰船动态配合的有关因素,重点介绍了舰载直升机起降限制和飞行包线的确定方法。林河泉、傅百先等关于动态配合的讨论也多是在参考国外动态配合试验的基础上对飞行包线的确定进行论述,据目前掌握资料尚无公开进行的机舰动态配合试验。模型研究方面,刘航^[11]在南航 NH-2 闭口回流式低速风洞中进行了舰模尾流场风洞试验、流谱试验和地面模拟试验。试验中观察到了美国海军研究院试验中出现的流谱图像和流动特性,结果表明,飞行甲板上方的流动极为复杂,表现出十分强烈的三维性和随机性,特别是经过机库后发生了大规模分离,形成了一定的涡流区。由于该试验在国内尚属首次,船模中未考虑复杂的上层建筑,也未模拟舰船各方向运动,因此流场模拟结果的精度还较低。

2 舰尾流仿真计算

随着计算流体力学(CFD)技术的发展,动态配合的计算机仿真为目前的直升机/舰系统开发、测试和性能预测包括预测飞行包线,提供了新的解决思路。

在已经进行的直升机/舰动态配合仿真系统中,最有代表性的当属美国的 JSHIP (Joint Shipboard Helicopter Integration Process) 项目。该项目于 1998 年 7 月开始实施,由美国军方资助,对一系列机-舰系统进行测试和评估,用以解决在联合军事行动中陆军、空军直升机在舰上使用与载舰的配合能力,项目为期 4~5 年。要达到 JSHIP 中提出的增强联合行动中诸军种直升机在舰艇上操纵能力的目标,项目主要是借助 DIMSS (Dynamic Interface Modeling and Simulation System) 实现的。有了海上试验的经

验和初步结论,美国军方一开始就对 DIMSS 提出了明确要求,文献[12]对 DIMSS 的目标和结构进行了说明,着重研究了整个模型与动态配合试验相比所要达到的逼真度,给出了 DI 配合仿真逼真度的算法,如果某仿真系统达不到 DIMSS 逼真度的要求,文献[13]介绍了一种基于逼真度反馈的方法改进原仿真系统。

2.1 舰面流场仿真的发展

鉴于流场控制方程的直接求解在大多数情况下仍然难以实现,通常需针对不同流体类型、特征尺度、流场几何特性等采用合适的求解方程及格式。

一般地,描述舰面流场的流体力学方程可以表示为三维定常/非定常粘性不可压 N-S 方程^[14]。有关舰面流场的定常 N-S 方程的计算,国内外进行了大量的研究。Tsze C. Tai^[15-16]对层流和紊流情况都进行了考虑,描述了利用多区域、薄层 N-S 方程对 DD-963 舰尾流进行仿真。所得的流场包括含有大面积自由涡的气流分离区,风洞试验中表现的包括涡粘干扰的流场特征也有很好的体现。在某个特定的飞行路径上计算结果与风洞试验数据吻合良好,舰船尺寸越接近全尺寸,在风速给定的情况下其对应的雷诺数越大,而使舰船尾流的影响性相对减小,同时流场随风速的变化而产生的变化差异性减小。利物浦大学前期的研究^[17-18]表明,使用定常 CFD 尾流模型与 FL-GHTLAB 直升机模型相结合在模拟器上进行甲板着舰模拟,比海上实测执行任务时飞行员的工作负荷有所增加。Sharma 等^[19]利用改进的并行流体求解器 PUMA 计算了 LPD-17 舰周围无粘、稳态、时准的流场计算解。他们的稳态解和风洞试验的频谱之间取得了很好的一致性。Polsky 与 Bruner^[20-21]利用并行非结构流动求解器 COBALT 以不同的湍流模型 Laminar N-S, MILES, k- ϵ 和 SST 研究了 LHA 舰船尾流。结果表明,稳态 CFD 解不能准确预测紊流场的时均值,并发现湍流模型在计算中计入了太多耗散,因为通量分离格式有很大的耗散性。此外, Tattersall^[22], Liu J^[23], Guillot^[24] 以及 Reddy^[25] 等人也分别用不同的湍流模型对 N-S 方程进行了求解。

2.2 国内研究现状

我国研究人员也进行了相关研究。非航空舰船方面:孙文胜利用有限元法求解二维定常粘性不可压

N-S 方程,对甲板上方舰船纵向对称面内气流场进行了仿真^[26],表明了采用有限元法求解舰面流场的可行性。吴裕平^[27]求解三维 N-S 方程对舰面流场进行了仿真,指出甲板后方机库产生下洗气流,将对直升机起降产生不利影响。为了满足在实时仿真中直升机飞行仿真计算对于流场数据的实时性需要,孙文胜^[28]在求解 N-S 方程的基础上,利用神经网络的误差反向传播算法,可仿真计算甲板流场任一点的流场数据。结果显示,神经网络对流场的模拟结果与实验结果及采用高精度网格的 N-S 方程模拟结果相比有良好的—致性,同时计算时间大为缩短。机舰动态配合实时仿真及直升机该课目训练模拟器的开发对于流场数据的实时性都有较高要求,在提高仿真计算硬件之外,该方法提供了一条切实可行的思路。

航空舰船方面对 LHA 舰的研究较多,中国舰船研究设计中心进行了 LHA 型舰缩比模型的舰面空气流场多工况条件的 CFD 数值模拟计算^[29],该数值模拟试验在定常条件下进行。同时进行了 2 种飞行甲板形式的舰船空气流场特性比较研究^[30],认为具备采用全通平甲板的各类技术条件时,不推荐使用滑跃式飞行甲板的设计形式。曲飞等^[31]通过 CFD 计算得到了 LHA 飞行甲板不同着舰点区域的定常气流场数据,并将 CFX 定常流数值模拟所得的速度时均值与风洞试验结果及实船测量数据均进行了对比。

上述研究反映了利用 CFD 求解舰面流场的发展趋势——从二维流到三维流,从有限元法到有限体积法等多种方法,求解网格尺寸的精细,在求解中关注了越来越多的外部因素等。要达到为机舰动态配合提供速度场的目的,还 更高的求解速度。

3 DES 方法在舰面流场仿真中的应用

考虑湍流模型的精度,Hodge S. J. 等在文献[18]的基础上引入了非定常模型^[32],增加了整个仿真的逼真度,将计算结果应用于直升机舰载起降飞行仿真时飞行员工作载荷有所增加。该研究首先采用的是简单驱逐舰模型(如图 2a 所示),来生成 CFD 尾流数据。近期的研究使用了更切合实际的舰船模型——皇家海军 23 型护卫舰^[33](如图 2b 所示),使得模型精度进一步增加。

包括上述研究在内,很多利用 CFD 计算舰船尾流的文章都采用了无粘流方法或雷诺平均的 N-S 方

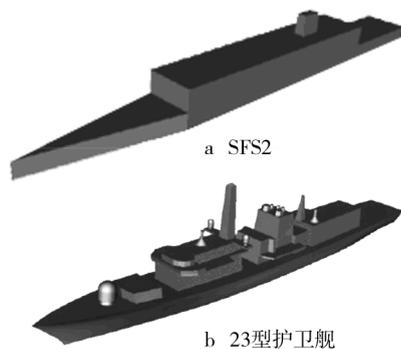


图2 计算采用的舰几何外形^[33]

Fig. 2 Geometries used for computations^[33]

法(RANS)和一些其他形式的湍流模型^[34],然而,多数情况下 RANS 方法和标准湍流模型在应用于陡壁体产生大分离尾流时给出的结果较差^[35]。在高分离区域湍流各向异性,并且经常表现出非定常特性,因此湍流模型作用下的结果与他们在试验条件下得到的参数相去甚远。由于 RANS 在处理大范围分离流时的局限性,人们尝试用大涡模拟(LES)方法解决问题。大涡模拟的本质是用非稳态的 N-S 方程直接模拟大尺度涡运动,而通过模型来模拟小尺度涡运动,即大涡直接求解,小涡用模型求解。Camelli 等^[36]利用 Smagorinsky 湍流模型对 LPD-17 舰尾流进行了 LES 模拟且加入了温度场。这种情况下的近壁区网格处理是一个难题,另外 LES 多年来已经被证明对于高雷诺数的外流是不适用的^[37]。

由此,综合 RANS 法和 LES 方法优点的分离涡仿真(DES)建模技术^[37]应运而生。DES 将分离涡区域湍流结构网格进行单独的精确划分,而不是对整个流场整体建模,从而克服了传统湍流模型的限制,保证了尾流的不稳定特性并因此得到了更切合实际的湍流谱。一些验证性研究表明 DES 生成的舰船尾流频谱比非定常 RANS 方法更接近实验数据。DES 也被应用于多种高雷诺数外部气动流场中,经证明在气动预测中,结果等于或在某些情况下好于 RANS 模型^[38]。例如,James S Forrest^[39]采用 DES 方法,对于两种舰模型——简单护卫舰和 23 型护卫舰,以一系列甲板风向角产生了不同的流场,CFD 数据与风洞数据和全尺寸海上试验数据有较好的一致性,提高了 CFD 模拟流场的精度,从而改善了直升机-舰动态配合仿真精度。

采用 DES 等更精确 CFD 方法的重要前提是需要

划分更精细的计算网格。随着网格更加精细,计算单元数量和计算尾流所需的时间将会增加。当模型复杂时,问题更加严重,因为复杂的外形需要更多的网格来精确描述。对 CAD 模型划分网格时,采用 23 型驱逐舰比 SFS2 所需的计算时间要高出一个数量级。

国内有关该方法的研究相对国外较晚,杨春蕾等^[40]对 RANS 和 DES 方法的船体绕流模拟及其不确定性进行了分析。空气动力学领域,目前国内对 DES 的工程应用案例较少,少数的研究如应用于汽车外流场模拟研究^[41]和基本起落架的非定常分离流^[42],已经显示出了在处理大范围分离流方面良好的计算性能。随着计算机计算能力的提高,该优势还将使其在空气动力学领域内具有广阔的应用前景。

4 结论

无论是直升机-舰动态配合海上试验还是动态配合特性仿真研究抑或是训练模拟器的开发,舰面流场的测量和计算都是直升机-舰动态配合的前提条件,为直升机飞行动力学仿真提供了输入。舰面流场数据的获取方式也随动态配合研究的需要不断变化,分析其发展历程和趋势,可得以下结论。

1) 舰面流场的海上实测由于其耗资大、周期长,应用正逐渐减少,但其可为仿真计算数据的对比提供重要参考依据,具有不可替代的作用,因此随数据采集和处理技术的进步,该方法还将进一步得到应用。

2) 舰面流场的 CFD 仿真随更高精度湍流模型和求解方法的出现得到了更广泛的应用,DES 方法由于其自身的优势提高了大范围分离涡仿真的精度,将在舰面外流场计算方面发挥更多的作用。

3) 机舰动态配合实时仿真对舰面流场计算耗时提出了很高的要求,使得流场求解在满足精度要求的前提下更加关注计算效率,同时差值方法的应用也是一种可行的思路。

参考文献:

[1] 林河泉,高正. 直升机/舰动态配合问题的探讨[C]//第五届全国直升机年会论文集. 1989:168—171. (余不详)
LIN Quan-he, GAO Zheng. Investigation on Helicopter/ship Dynamic Interface[C]//Proceedings of the 5th Na-

tional Helicopter Society. 1989:168—171. (余不详)
[2] 中国直升机设计研究所. 舰载直升机文集(上卷)[M]. 2006:94—95. (余不详)
China Helicopter Design Research Institute. Corpus of Shipboard Helicopter[M]. 2006:94—95. (余不详)
[3] WILKINSON C H, VANDER G M, ROSCOE M F. Modeling and Simulation of The Ship-helicopter Environment[C]//AIAA. 2000:4583. (余不详)
[4] GUSTAV A A. Mapping the Airwake of a Model DD-963 Along Specific Helicopter Flight Paths[C]// Monterey, California, 1989. (余不详)
[5] MARK M R. A Study of the Airwake Aerodynamics over the Flight Deck of an AOR Model Ship[C]// Monterey, California, 1989. (余不详)
[6] RHOADES M M, HEALEY J Val. Flight Deck Aerodynamics of a Nonaviation Ship[J]. Journal of Aircraft, 1992, 29(4):619—626.
[7] HOURIGAN D T, SUTTON C W, BIRD F J. Instrumentation For Airwake Measurements on the Flight Deck of a FFG-7[R]. Australia, Department of Defence Defence Science and Technology Organisation Aeronautical Research Laboratory. 1991:AR-006-623.
[8] ARNEY A M. FFG-7 Ship Motion and Airwake Trial; Part 1-Data Processing Procedures[R]. Australia, Department of Defence, Defence Science And Technology Organisation Aeronautical Research Laboratory, 1994:AR-008-349.
[9] LINCOLN P E. A Preliminary Study of the Airwake Model Used in an Existing SH-60B/FFG-7 Helicopter/Ship Simulation Program[R]. Australia, Department of Defence, Defence Science And Technology Organisation Aeronautical Research Laboratory. 1994:AR-008-644.
[10] 陈碧云. 直升机:舰载与海上作战[M]. 北京:海洋出版社, 2003.
CHEN Bi-yun. Helicopter: Shipboard & Maritime Conduct[M]. Beijing, Ocean Press, 2003.
[11] 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.
[12] WILKINSON C H, ROSCOE M F, VANDERVLIT G M. Determining Fidelity Standards for the Shipboard Launch and Recovery Task[C]//AIAA Modeling and Simulation Technologies Conference and Exhibit. Montreal, Canada, 2001:4583.
[13] ADVANI S K, WILKINSON C H. Dynamic Interface Mod-

- eling and Simulation-A Unique Challenge[C]//The Royal Aeronautical Society Conference on Helicopter Flight Simulation. London, UK, 2001.
- [14] 吕红. 舰船周围气流场数值模拟方法及分布规律的研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2008.
- LYU Hong. The Study on the Numeric Simulation Method and the Distributed Law of Airflow Field Around Naval Ship[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2008.
- [15] TAI T C. Simulation of DD-963 Ship Airwake by Navier-Stokes Method[J]. Journal of Aircraft. 1995, 32(6): 1399—1401.
- [16] TAI T C. Simulation and Analysis of LHD Ship Airwake by Navier-Stokes Method[C]//Presented at the NATO RTO Symposium on Fluid Dynamics Problems of Vehicles Operating near or in the Air-Sea Interface. Amsterdam, The Netherlands, 1998.
- [17] ZAN S J. On Aerodynamic Modeling and Simulation of the Dynamic Interface, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers[J]. Part G: Aerospace Engineering, 2005, 219: 393—410.
- [18] ROPER D M, HODGE S J, OWEN I, et al. Integrating CFD and Piloted Simulation to Quantify Ship-Helicopter Operating Limits[J]. The Aeronautical Journal, 2006, 110(1109): 419—428.
- [19] SHARMA A, LONG L N. Airwake Simulations on an LPD 17 Ship[C]//AIAA Computational Fluid Dynamics Conference. Anaheim, CA, 2001.
- [20] POLSKY S A, BRUNER C W S. Time-Accurate Computational Simulations of an LHA Ship Airwake[C]//18th AIAA Applied Aerodynamics Conference. Denver, CO, 2000.
- [21] POLSKY S A. A Computational Study of Unsteady Ship Airwake[C]//40th AIAA Aerospace Sciences Meeting & Exhibit. Reno, Nevada, 2002.
- [22] TATTERSALL P, ALBONE C M, SOLIMAN M M, et al. Prediction of Ship Air Wakes over Flight Decks Using CFD[C]//In AGARD Fluid Dynamics Symposium on Fluid dynamics of Vehicles Operating Near or In the Air-Sea Interface. Amsterdam, 1998.
- [23] LIU J, LONG L N. Higher Order Accurate Ship Airwake Predictions for the Helicopter-Ship Interface Problem[C]//Presented at AHS 54th Annual Forum. Washington D C, 1998.
- [24] GUILLOT M J, WALKER M A. Unsteady Analysis of the Air Wake over the LPD-17[C]//AIAA Applied Aerodynamics Conference and Exhibit. Denver, CO, 2000.
- [25] REDDY K R, TOFFOLETTO R, JONES K R W. Numerical Simulation of Ship Airwake[J]. Computers and Fluids, 2000, 129: 451—465.
- [26] 孙文胜. 直升机舰载起降环境的气动特性仿真[J]. 系统仿真学报, 2003, 15(2): 254—256.
- SUN Wen-sheng. Aerodynamic Simulation of Helicopter Landing and Take-off Environment on Shipboard[J]. Journal of System Simulation, 2003, 15(2): 254—256.
- [27] 孙文胜, 林明. 基于神经网络模型的舰面流场仿真算法[J]. 中国工程科学, 2003, 5(5): 76—79.
- SUN Wen-sheng, LIN Ming. Simulation Algorithm of Flightdeck Airflow Based on Neural Network[J]. Engineering Science, 2003, 5(5): 76—79.
- [28] 吴裕平. CFD在舰船甲板流场计算与特性研究中的应用[J]. 直升机技术, 2006, 147(3): 1—4.
- WU Yu-ping. The Research and Applications of CFD to Calculation the Flow Field on Warship Deck[J]. Helicopter Technique, 2006, 147(3): 1—4.
- [29] 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. Influence of Different Airflow Situation for Ship Airwake[J]. Ship Science and Technology, 2009, 31(9): 38—42.
- [30] 陆超, 姜治芳, 王涛. 两种飞行甲板形式的舰船空气流场特性比较[J]. 舰船科学技术, 2009, 31(7): 29—31.
- LU Chao, JIANG Zhi-fang, WANG Tao. A Comparison of Ship's Airwakes With Different Flight Decks[J]. Ship Science and Technology, 2009, 31(7): 29—31.
- [31] 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.
- [32] HODGE S J, PADFIELD G D, SOUTHWORTH M R. Helicopter-Ship Dynamic Interface Simulation: Fidelity at Low-Cost, Cutting Costs in Flight Simulation-Balancing Quality and Capability[C]//RaeS Conference. London, UK, 2006.
- [33] FORREST J S, OWEN I, PADFIELD G D, et al. Detached-Eddy Simulation of Ship Airwakes for Piloted Helicopter Flight Simulation[C]//1st International Aerospace CFD Conference. Paris, France, 2007.
- [34] REDDY K R, TOFFOLETTO R, JONES K R. Numerical Simulation of Ship Airwake[J]. Computers & Fluids, 2000, 29: 451—465.
- [35] SPALART P R. Strategies for Turbulence Modelling and Simulations[J]. International Journal of Heat and Fluid Flow, 2000, 21: 252—263.

- ment Environmental Engineering, 2005, 2(6): 1—9.
- [6] 祝耀昌, 常文君, 傅耘. 武器装备环境适应性与环境工程[J]. 装备环境工程, 2005, 2(1): 14—19.
ZHU Yao-chang, CHANG Wen-jun, FU Yun. Environmental Suitability of Weapons and Environmental Engineering [J]. Equipment Environmental Engineering, 2005, 2(1): 14—19.
- [7] 祝耀昌, 王丹. 武器装备环境适应性要求探讨[J]. 航天器环境工程, 2008, 25(5): 416—422.
ZHU Yao-chang, WANG Dan. The Environmental Worthiness Requirements with Respect to Weapon Materials [J]. Spacecraft Environment Engineering, 2008, 25(5): 416—422.
- [8] 傅耘, 祝耀昌, 陈丹明. 装备环境要求及其确定方法[J]. 装备环境工程, 2008, 5(6): 46—51.
FU Yun, ZHU Yao-chang, CHEN Dan-ming. Materiel Environmental Requirements and Their Determination Method [J]. Equipment Environmental Engineering, 2008, 5(6): 46—51.
- [9] 祝耀昌, 张建军. 武器装备环境适应性要求、环境适应性验证要求和环境条件及其相互关系和讨论(一)[J]. 航天器环境工程, 2012, 29(1): 1—5.
ZHU Yao-chang, ZHANG Jian-jun. Discussion of Relationships among Environmental Worthiness Requirement, Verification Requirement of Environmental Worthiness and Environmental Conditions of Materiel (Part One) [J]. Spacecraft Environment Engineering, 2012, 29(1): 1—5.
- [10] 祝耀昌, 张建军. 武器装备环境适应性要求、环境适应性验证要求和环境条件及其相互关系和讨论(二)[J]. 航天器环境工程, 2012, 29(2): 119—122.
ZHU Yao-chang, ZHANG Jian-jun. Discussion of Relationships among Environmental Worthiness Requirement, Verification Requirement of Environmental Worthiness and Environmental Conditions of Materiel (Part Two) [J]. Spacecraft Environment Engineering, 2012, 29(2): 119—122.
- [11] 祝耀昌, 王建刚, 张建军. GJB 150A 与 GJB 150 内容对比和分析(一)[J]. 航天器环境工程, 2011, 28(1): 5—10.
ZHU Yao-chang, WANG Jian-gang, ZHANG Jian-jun. A Comparative Study of GJB 150A and GJB 150 (Part I) [J]. Spacecraft Environment Engineering, 2011, 28(1): 5—10.
- [12] 祝耀昌, 王建刚, 张建军. GJB 150A 与 GJB 150 内容对比和分析(二)[J]. 航天器环境工程, 2011, 28(2): 110—114.
ZHU Yao-chang, WANG Jian-gang, ZHANG Jian-jun. A Comparative Study of GJB 150A and GJB 150 (Part II) [J]. Spacecraft Environment Engineering, 2011, 28(2): 110—114.
- [13] 祝耀昌, 李明. 谈谈环境工程剪裁和环境试验剪裁[J]. 航天器环境工程, 2012, 29(5): 479—485.
ZHU Yao-chang, LI Ming. Environmental Engineering Tailoring and Environmental Test Tailoring [J]. Spacecraft Environment Engineering, 2012, 29(5): 479—485.

(上接第 80 页)

- [36] CAMELLI F E, SOTO O, LOHNER R, et al. Topside LPD17 Flow and Temperature Study with an Implicit Monolithic Scheme [C]//41st AIAA Aerospace Sciences Meeting & Exhibit. Reno, Nevada, 2003.
- [37] SPALART P R, JOU W-H, STRELETS M, et al. Comments on the Feasibility of LES For Wings and on a Hybrid RANS/LES Approach [C]//1st AFOSR International Conference on DNS/LES. Ruston, LA, 1997.
- [38] STRELETS M. Detached Eddy Simulation of Massively Separated Flows [C]//39th AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit. Reno, NV, 2001.
- [39] JAMES S F, STEVEN J H, IEUAN O, et al. Towards Fully Simulated Ship-Helicopter Operating Limits [C]//The Importance of Ship Airwake Fidelity the American Helicopter Society 64th Annual Forum. Montréal, Canada, 2008.
- [40] 杨春蕾, 朱仁传, 缪国平, 等. 基于 RANS 和 DES 法船体绕流模拟及不确定度分析[J]. 上海交通大学学报, 2012, 46(3): 430—435.
YANG Chun-lei, ZHU Ren-chuan, MOU Guo-ping, et al. Uncertainty Analysis in CFD for Flow Simulation Around Ship Using RANS and DES [J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 2012, 46(3): 430—435.
- [41] 林铁平. 汽车外流场 DES 模拟研究 [D]. 长沙: 湖南大学, 2010.
LIN Tie-ping. Detached Eddy Simulation of Vehicle External Flow Field [D]. Changsha: Hunan University, 2010.
- [42] 刘建. 采用 DES 类方法研究基本起落架非正常大范围分离流动 [D]. 北京: 清华大学, 2011.
LIU Jian. Study of Unsteady and Massively Separated Flows Past Rudimentary Landing Gear Using DES-type Methods [D]. Beijing: Tsinghua University, 2011.