

doi: 10.11857/j.issn.1674-5124.2018.12.003



舰岛对航母下滑道空气尾流场特征影响的实验研究

苏轼鹏, 金良安, 苑志江

(海军大连舰艇学院航海系, 大连 116018)

摘要: 航母空气尾流场是威胁舰载机着舰安全的重要环境因素之一。该文着眼于舰载机着舰的实际需求, 以美军标的“雄鸡尾流”模型为参考, 采用实验方法, 测量航母模型下滑道的空气尾流场, 分析其规律特征以及舰岛的影响。在实验研究的过程中, 提出航母空气尾流场实验测量的新方法, 定义航母空气尾流场中作为次级分量的“舰岛空气尾流场”的概念。研究表明: 在甲板风方向与下滑着舰跑道相平时, 实验测量结果整体上与“雄鸡尾流”模型趋势基本一致, 证明该实验研究方法的有效性, 以及舰岛在不同甲板风方向上的影响是不同的。上述研究结论可为航母空气尾流场的实验研究以及确立相应工程化模型等领域提供研究积累。

关键词: 航母空气尾流场; 军用标准; 舰岛空气尾流场

中图分类号: U661.1

文献标志码: A

文章编号: 1674-5124(2018)12-0012-07

The experiment research of influence of ship island on airwake character of aircraft carrier glideslope approach

SU Shipeng, JIN Liang'an, YUAN Zhijiang

(The Navigational Department of Dalian Navy Academy, Dalian 116018, China)

Abstract: Aircraft carrier airwake is one of the most important factors to aircraft landing safety. Because of aircraft landing requirement, and Military Specification (MILSPEC), also named as 'cock wake' is regard as reference, airwake of aircraft carrier glideslope approach was measured, the character of airwake and the effect of ship island were analysed. The new method of measuring aircraft carrier airwake is put forward, and the conception of 'ship island airwake' as subscale airwake in the aircraft carrier airwake is defined. Consequence shows that the experiment result closed to MILSPEC, it proves that the experiment method is effective; At the same time, the effect of ship island is different in different wind over deck angels. All these valuable conclusions can supply aircraft carrier airwake experiment research and its engineering model etc.

Keywords: aircraft carrier airwake; military specification; ship island airwake

0 引言

舰载机是航母主要的作战武器平台, 其飞行活动相对于陆基飞机更加危险, 其起降安全受甲板风、

空气尾流场等因素的影响, 易发生偏离航线甚至撞舰等事故。自从航母投入作战使用以来, 舰船空气尾流场的规律及其影响一直倍受关注^[1], 与舰船气

收稿日期: 2018-10-09; 收到修改稿日期: 2018-11-10

作者简介: 苏轼鹏(1980-), 男, 吉林敦化市人, 讲师, 博士, 主要从事海洋气象环境研究等工作。

泡尾流^[2]等其他尾流有同等重要的地位和军事意义。国外较早开展相关研究的项目主要包括:美国海军研究生院 (naval postgraduate school) 上世纪80年代的风洞实验研究^[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],美国海军军官学校 (united states naval academy, USNA)2010年展开的“三叉戟”(trident program) 计划^[10-15]等;近年来,国内多家研究机构也开展了许多相关研究。目前舰船空气尾流场的主要研究方法是风洞实验和计算流体力学 (computational fluid dynamics, CFD) 数值模型方法。

前人通过研究建立理论模型和仿真模型,精确描述了航母空气尾流场的特征,但模型过于复杂,难以直接应用。而对于作战与训练最直接实用的是既能反映航母空气尾流场规律特征,又尽量简化工程模型,最有代表性的是美军标 MIL-F-8785C^[16]和 MIL-HDBK-1797^[17]。其最大特点是从舰载机着舰实际出发,直接描述舰载机着舰过程中下滑道航线上的气流变化规律。国内基于该模型进行了许多仿真方面的研究,但是在实验研究方面还很少关注该模型以及下滑道气流场特征,对舰岛的影响方面研究也不足,这也是国内难以形成可靠的航母空气尾流军用标准的重要原因。

鉴于此,本文基于实验,立足于我国航母的船

型,分析研究航母下滑道上空气尾流特征,分析其与美军标航母空气尾流场工程化模型的差异,以及舰岛的影响,为舰船设计、建立航母工程化空气尾流标准等研究提供积累和参考。

1 美军标的航母空气尾流模型

美军标 MIL-F-8785C 和 MIL-HDBK-1797 的航母空气尾流场模型相似,航母空气尾流场产生的总扰动速度由随机自由大气紊流 (u_1, v_1, w_1)、稳态空气尾流 (u_2, w_2)、周期性空气尾流 (u_3, w_3)、随机尾流分量 (u_4, v_4, w_4) 所产生的各部分相加得出。总的大气扰动分量 u_g, v_g, w_g 为:

$$\begin{cases} u_g = u_1 + u_2 + u_3 + u_4 \\ v_g = v_1 + v_4 \\ w_g = w_1 + w_2 + w_3 + w_4 \end{cases} \quad (1)$$

其中,稳态空气尾流即“雄鸡尾流”模型,是航母空气尾流场中稳定存在的、对舰载机影响最大的一部分,而且其规律性较强,也是空气尾流控制、舰载机着舰航迹修正所要考虑的主要因素。“雄鸡尾流”描述为 u/V_{wod} 及 w/V_{wod} 与飞机离舰纵摇中心 (COP) 距离 X 的函数关系^[18],以分段函数的形式表示,如图1所示(其中:1英尺=0.3048 m,下同)。其中 u 为水平气流,相对于舰载机的着舰水平方向顺风为正; w 为垂直气流,向下为正; V_{wod} 为甲板风,通常定义平行于航母的着舰跑道,由于舰载机降落的水平方向与着舰跑道一致,故可认为甲板风风向与水平气流 u 方向一致。

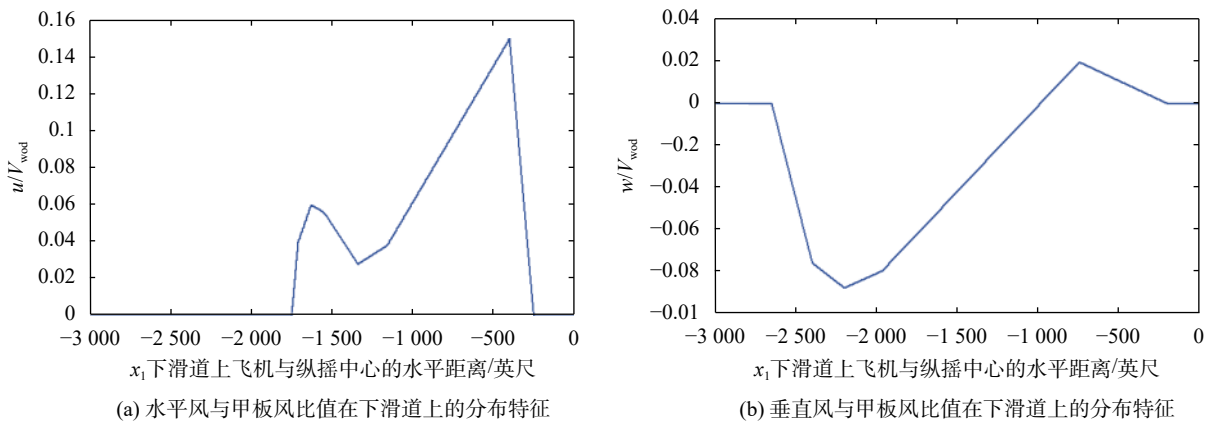


图1 u/V_{wod} 及 w/V_{wod} 与飞机离 COP 的距离关系曲线

“雄鸡尾流”模型的函数表达,较形象的描述下滑道上水平风与垂直风及其与甲板风之间的关系,加之简易实用,一直作为航母作战训练参考,也可作为航母空气尾流场的研究依据。但在相关文献中

并未明确说明舰岛的影响问题。本文基于实验方法,测量航母下滑道的空气尾流场中水平风和垂直风,结合舰岛的影响分析,与“雄鸡尾流”模型加以对比,研究下滑道尾流的特征。

2 航母下滑道空气尾流场的测量实验设计

2.1 舰载机着舰过程分析

首先需了解舰载机的着舰过程,以通常引用的美国 F/A-18 舰载飞机下滑进舰过程为例。从图 2 中可以看出舰载机的入口点离舰尾 0.75 海里 (1 389 m), 以下滑轨迹角 -3.5° 下滑, 约 20 s 后着舰, 这一段是进舰着舰事故的多发段^[19]。由“雄鸡尾流”模型可知, 舰载机在接近舰尾时, 水平方向受一直增大的顺风影响, 垂直方向先受上洗气流影响, 然后受到下洗气流的影响, 极易失控而发生事故。所以从舰载机着舰安全角度出发, 重点需研究下滑道末端作为空气尾流场测量区域。实验中所选的水平测量区域为舰尾后一个舰长的范围。

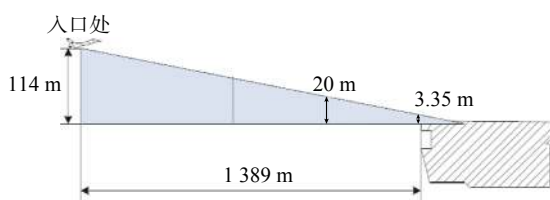


图 2 F/A-18 舰载飞机下滑进舰过程示意图

2.2 航母下滑道空气尾流场实验设计

2.2.1 实验设计的思路

目前相关的实验研究通常采用风洞作为实验平台, 将航母船模置于风洞实验段, 由风洞的动力系统产生均匀气流绕过船模模拟航母在航行中的甲板风, 然后测量船模尾部的气流场。风洞实验研究的主流为航母空气尾流场的机理, 测量三维结构及其变化特征。而实际应用中最重要的是航母下滑道的空气尾流场, 这方面的研究并不多。本实验的设计思路就是参考舰载机着舰过程以及风洞实验设计, 测量航母船模下滑道空气尾流场的水平分量与垂直分量特征, 同时为分析舰岛的影响, 分为有舰岛与无舰岛两种工况测量。

2.2.2 实验方案设计

实验方案需满足相似性准则, 由于航母模型缩比过小, 不能严格满足相似性准则, 但是在满足几何相似条件下, 流动结构与高雷诺数时呈现相似性。而且测量的下滑道气流与甲板风比值才是与美军标对比研究的关键, 风速绝对值大小与实际情况的相似度的影响并不重要。

1) 实验模型的安置

根据边界层理论, 风洞壁面上由于摩擦作用存

在气流的切变, 壁面附近也是气流稳定性和均匀性较差的区域, 而靠近实验中心高度上气流是最稳定的, 在小型简易风洞的检测中也发现该规律。故将海面模拟板置于风洞实验段内部气流稳定性、均匀性最好的中心部位, 下部用 6 根长螺柱固定。为模拟船浮于海面的状态, 将船模去掉水线以下部分置于海面模拟板的中部 (如图 3 所示), 并且在海面模拟板前面加上机翼形附加装置使气更加平滑, 减少来流脉动。

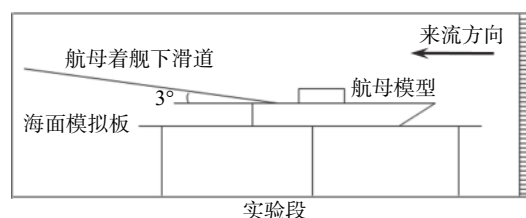


图 3 航母模型在实验段内的安置

2) 测量点的选取

由于下滑道中对舰载机影响最大的是进舰的最后阶段, 所以选取的区域为舰尾一个舰长的范围, 而不是美军标中的整个进舰范围。同时, 根据实际情况, 航母在顶风航行时, 甲板风方向不可能如美军标规定的那样严格沿下滑着舰跑道, 会有一定角度。风洞模拟的甲板风沿风洞主轴方向, 为更贴近实际情况, 考虑改变航母模型与风洞主轴夹角进行测量, 以风洞主轴正对来流方向为 0° , 顺时针为正, 分为 -15° 、 0° 和 15° 3 种航母受风姿态 (见图 4)。 -15° 即相当于甲板风从航母舰首左舷 15° 吹来, 0° 即航母顶风, 15° 相当于甲板风从航母舰首右舷 15° 吹来。



图 4 船模放置水平示意图

为分析舰岛对下滑道空气尾流场的影响, 又将对 3 种受风情况分为有舰岛和无舰岛两种工况。舰载机下滑道与舰尾甲板平面成 3° 角, 沿着舰跑道方向, 测量点就选在下滑道这条线上。测量点从航母舰尾向外的下滑道的测量范围内取 10 个点, 每个点的间距相同 (见图 5), 采用热线风速仪进行逐点测量。

3) 实验测量仪器与方法

实验气流速度检测所用的热线风速仪是

SMART SENSOR 系列 AR866 型热线风速仪(如图 6 所示), 该设备能测量固定方向的风速, 可在气流场中分别测量不同方向的风。

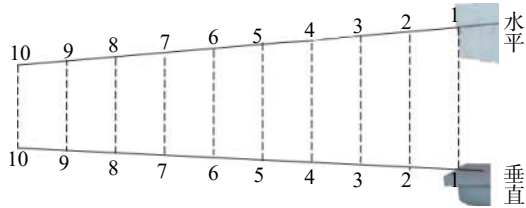


图 5 下滑道上测量点的选取



图 6 热线风速仪实物图

实验中逐点测量 3 种甲板风各点的水平风与垂直风, 其中水平风与下滑道水平方向保持一致, 以顺风为正; 垂直风为各点的垂直分量, 以向下为正。每个点的两个分量分别测量 30 组数据。

3 测量结果的订正与分析

3.1 测量结果的订正

经过测量得到甲板风以及在有舰岛与无舰岛两种情况下, 3 种航母受风姿态中下滑道上水平风和垂直风的数据。由“雄鸡尾流”模型可知, 稳态尾流场的水平风和垂直风都是相对于海面的实际风。而实验中, 风洞产生的气流是模拟航母航行中所产生的甲板风, 直接测量风洞中航母模型空气尾流中的水平风是实际风与甲板风的合成风, 垂直风与甲板风垂直, 故不受影响。因水平风与下滑着舰跑道方向一致, 跑道与航母主轴成 7° 角, 实验设定的 3 种情况表明甲板风与水平风有一定的夹角, 故要得到实际水平风, 需要做矢量减法去除甲板风的影响, 公式如下:

$$u = V_{\text{测}} - V_{\text{wod}} \quad (2)$$

这就是实际的水平风, 垂直风无需订正, 直接采用测量值。

3.2 测量结果的分析

先将各点下滑道水平风与垂直风数值与甲板风作比值, 得到数值后作曲线分析, 同时将美军标中同区域的曲线作为标准进行对比分析。逐一比较 3 种航母受风姿态下有舰岛和无舰岛两种情况的下滑道空气尾流场的测量值与“雄鸡尾流”模型的对比情况。

经分析可知, 航母模型舰首左舷 15° 受风与 0° 受风两种情况下整体上与“雄鸡尾流”模型比较接近, 左舷 15° 受风情况如图 7 所示, 右舷 15° 受风偏差较大, 如图 8 所示(图 7、图 8 的横坐标均为下滑道距舰尾的距离, 纵坐标均为下滑道风的分量与甲板风的比值)。无舰岛的情况下, 整体误差大于有舰岛的情况。说明美军标中充分考虑到了舰岛的影响, 证明了下滑道空气尾流中的水平风、甲板风与下滑着舰跑道平行这一前提条件的存在, 文献[17]中也有相似的说明。同时也证明右舷 15° 受风情况不利于舰载机着舰, 其主要原因为航母舰岛位于甲板右侧, 航母以右舷时舰岛位于空气尾流区上游会产生剧烈的干扰作用。舰岛的存在是导致下滑道空气尾流场随受风角度不同而变化的主要影响因素。

3.3 舰岛对下滑道空气尾流场的影响分析

舰岛对航母空气流场的影响是多方面的, 文献[20]、文献[21]分别研究了舰岛形状和舰岛上细微结构的影响, 发现舰岛形状影响较为明显, 而舰岛上细微结构如天线等影响不大。这对舰船设计研究有一定的参考意义。而本文研究的是航母不同风向角中舰岛的影响。

3.3.1 不同风向角中的舰岛影响

由实验测量结果分析, 航母模型舰首左舷 15° 受风与 0° 受风两种情况下, 下滑道空气尾流场中的水平风在有无舰岛的两种工况条件下, 与“雄鸡尾流”模型均比较接近, 说明舰岛对下滑道上水平风的影响较小; 相对比较而言, 左舷 15° 受风情况下影响更小。而垂直风受舰岛影响很大, 主要表现为无舰岛的情况与“雄鸡尾流”差别较大, 而且垂直风变化剧烈, 进一步说明“雄鸡尾流”模型所依据的舰型是考虑舰岛影响的, 而且舰岛对下滑道垂直风的变化起到一定调节作用。航母模型舰首右舷 15° 受风情

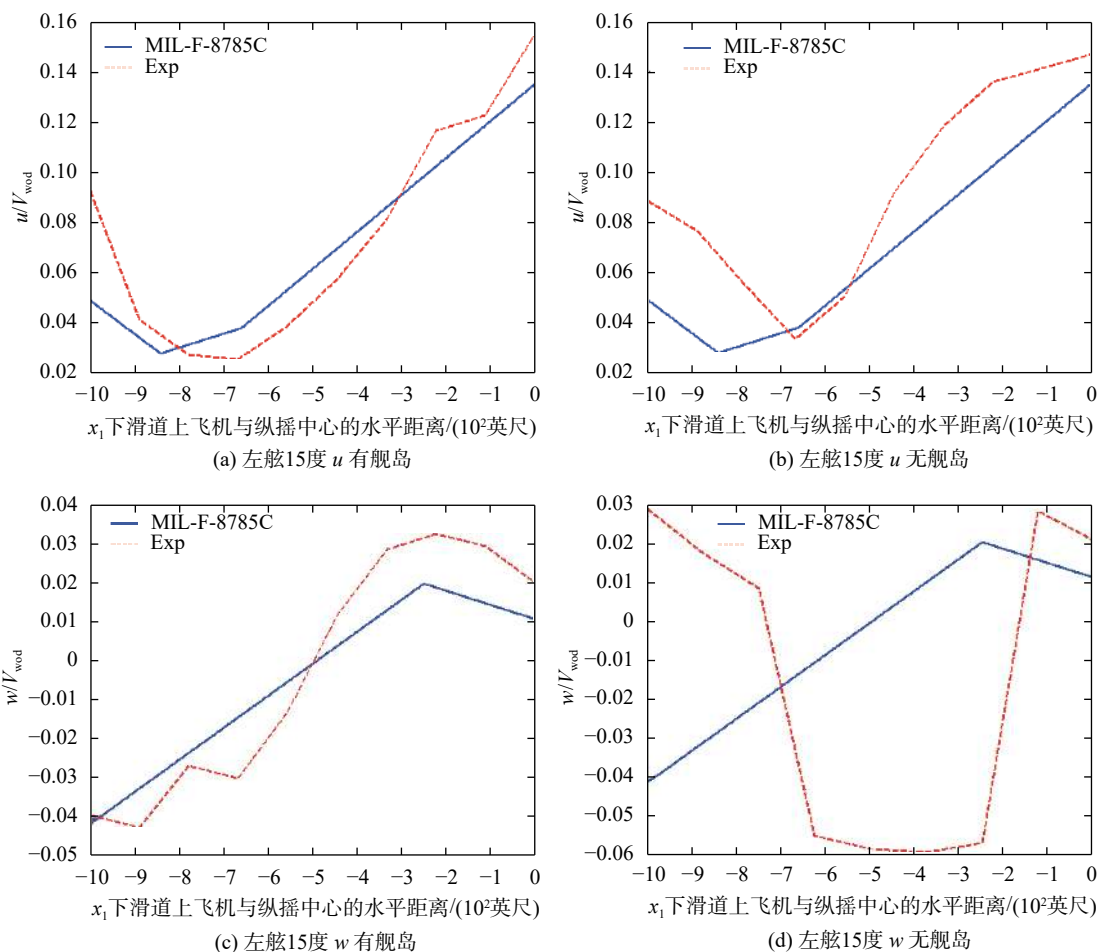


图7 航母模型左舷15°受风时下滑道空气尾流测量值与标准值的对比

况下,与“雄鸡尾流”模型差别很大,而且表现为有舰岛情况的差别要更大一些。

其原因为甲板风会在舰岛后面形成乱流区,在甲板风不同角度时影响不同。甲板风从左舷15°吹来时,乱流区向右舷侧流出,与下滑道没有相交区域,对下滑道气流场几乎没有影响;当甲板风从舰首0°吹来时,舰岛后部乱流区与下滑道有相交区域,但是位置较远,乱流传到该区域湍流能量变弱,所以影响也不大;甲板风从右舷15°吹来时,乱流区与下滑道的相交区域很大,对下滑道气流场影响最大。文献[22]中也有类似方法和结论。

3.3.2 “舰岛空气尾流场”的界定

可见舰岛后部的乱流区在航母空气尾流场中是一个影响较大而相对独立的部分,范围相对整个航母空气尾流场较小,但是由图7、图8的综合分析可见其影响明显而且相对独立,影响范围覆盖整个研究的下滑道区域,可看作次级尺度的空气尾流场,定义为“舰岛空气尾流场”。由文献[20, 22]可知,在

接近舰尾的1/3舰长区域,舰岛的影响最显著,使空气尾流场具有显著的不对称结构,从而危及舰载机的着舰安全。这也是舰载机着舰最关键、最具风险的区域。当然,“舰岛空气尾流场”作为一个新的界定,其特征、精确范围和影响程度还需要作进一步的深入研究。

4 结束语

本文在实验条件下测量航母模型下滑道上的空气尾流场特征,分为3个角度甲板风情况,同时讨论有舰岛和无舰岛两种工况条件,通过与美军标“雄鸡尾流”模型比较,结果表明:

1)有舰岛的工况下整体上与美军标稳态分量,即“雄鸡尾流”模型趋势一致,证明了测量航母模型下滑道空气尾流场实验方法的有效性;

2)航母模型舰首左舷15°受风与0°受风两种情况下整体上与“雄鸡尾流”模型比较接近,右舷15°受风情况下偏差较大,说明航母以右舷15°受风对舰载机着舰是不利的情况,应尽量予以避免;

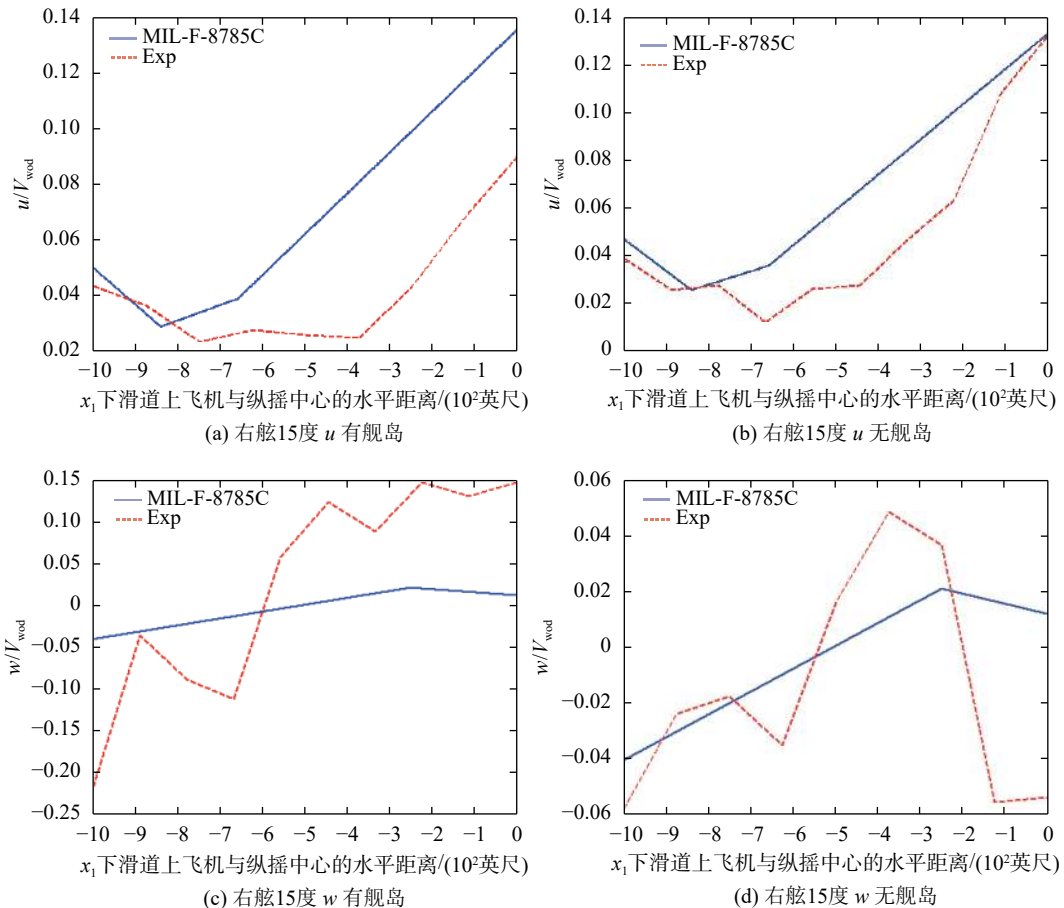


图8 航母模型右舷15°受风下滑道空气尾流测量值与标准值的对比

3) 舰岛对下滑道空气尾流场的影响不容忽视,尤其是对下滑道垂直风的影响很大,在不同甲板风角度中对下滑道影响不同,其后部乱流区是航母空气尾流场中具有独立性的分量,对舰载机着舰影响很大,故可单独定义为“舰岛空气尾流场”,是航母空气尾流场中的一个次级尺度尾流场,与舰尾流一起构成了复杂、多变的空气尾流场;

4) 在实验测量结果与美军标“雄鸡尾流”模型对比中发现“雄鸡尾流”模型充分考虑到舰岛的影响,而且初始条件甲板风方向定义为与下滑着舰跑道相平行,这在美军标相应的文献中没有明确说明^[15-16]。

本文的研究可为航母空气尾流场的实验研究及确立相应的工程化模型提供参考。

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[J]. 舰船科学技术, 2014, 2(36): 1-7.

[2] 张志友,金良安,苑志江,等. 高温大气泡群对舰流的聚并作用机理[J]. 过程工程学报, 2017, 17(5): 952-958.

[3] BOLINGER W K. Visualization of the flow field around a generic destroyer model in a simulated turbulent atmospheric

boundary layer[D]. Monterey: Naval Postgraduate School, 1987.

- [4] BISKADUROS J L. Flow Visualization of the airwake of an oscillating generic ship model[D]. 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[D]. 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[D]. Monterey: Naval Postgraduate School, 1988.
- [7] EDDY K R, TOFFOLETTO R, JONES K R W. Numerical simulation of ship airwake[J]. Computers & Fluids, 2000(29): 451-465.
- [8] TSZE C. TAI Airwake simulation of modified TTCP/SFS ship[J]. NATO RTO Symposium on Vortex Flow and High Angle of Attack, Loan, 2001, 26(SYA): 1-12.
- [9] SUSAN A. POLSKY. CFD Prediction of airwake flowfields for ships experiencing beam winds [C]// 21st Applied Aerodynamics Conference, 2003, American Institute of Aeronautics and Astronautics, Orlando: 1-13.
- [10] SNYDER M R, SHISHKOFF J P, etc. Comparison of

- experimental and computational ship air wakes for YP class patrol craft[R]. Annapolis, MD: United States Naval Academy, 2010.
- [11] METZGER J D. Measurement of ship air wake impact on a remotely piloted vehicle[R]. Annapolis: U.S. Naval Academy, 2012.
- [12] FRANKLIN D, ROBERSON, HYUNG S K, et al. Ship air wake CFD comparisons to wind tunnel and YP ship results[C]. Honolulu, Hawaii, AIAA 2011-3156: 1-23.
- [13] DAVID S. MIKLOSOVIC, HYUNG S, et al. SNYDER. Ship air wake wind tunnel test results[C]. Honolulu: American Institute of Aeronautics and Astronautics, AIAA 2011-3155: 1-22.
- [14] LASALLE N R. Study of passive flow control for ship air wakes[R]. Annapolis: U.S. Naval Academy, 2013.
- [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[J]. Naval Engineers Journal, 2013, 125(1): 1-18.
- [16] 贾亮亮.舰载机着舰环境扰动影响及其响应分析[D].南京:南京航空航天大学学位论文, 2013.12.
- [17] STACEY G. Creating a unified graphical wind turbulence model from multiple specifications.[C]. AIAA Modeling and Simulation Technologies Conference and Exhibit, 2003(8):11-14.
- [18] 盛振邦, 刘应中. 船舶原理[M]. 上海: 上海交通大学出版社, 2003.
- [19] 李新飞. 舰载机起降关键技术仿真研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2012.
- [20] BRADLEY E C, MATTHEW M C. The burble effect: superstructure and flight deck effects on carrier air wake[C]. Launch, Recovery & Operations of Manned and Unmanned Vehicles from Marine Platforms. Annapolis: United States Naval Academy, 2010: 1-15.
- [21] JEREMY S, SRINIVASAN A, CHRISTOPHER M, et al. Ship airwake sensitivities to modeling parameters[C]. 43rd AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit, Reno: American Institute of Aeronautics and Astronautics, 2005, Nevada: AIAA 2005-1105: 1-14.
- [22] SUSAN A, CHRISTOPHER W S, BRUNER. A computational study of unsteady ship airwake [C]. The RTO AVT Symposium, Loen, RTO-MP-069(I) (SYA)25: 1-11.

(编辑:徐柳)

(上接第5页)

- [22] XIONG Z, ZHU J G, ZHAO Z Y, et al. Workspace measuring and positioning system based on rotating laser planes[J]. Mechanics, 2012, 18(1): 94-98.
- [23] SAADAT M, CRETIN L. Measurement systems for large aerospace components[J]. *Sensor Review*, 2002, 22(3): 199-206.
- [24] MUELANER J E, MAROPOULOS P. Large scale metrology in aerospace assembly[C]//5th International Conference on Digital Enterprise Technology. Proceedings of DET2008, 2008.
- [25] 熊芝. wMPS 空间测量定位网络布局优化研究[D]. 天津: 天津大学, 2012.
- [26] GUO S, LIN J, REN Y, et al. Study of network topology effect on measurement accuracy for a distributed rotary-laser measurement system[J]. *Optical Engineering*, 2017, 56(9): 094101.
- [27] REN Y, LIN J, ZHU J, et al. Coordinate transformation uncertainty analysis in large-scale metrology[J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2015, 64(9): 2380-2388.
- [28] LIU Z, ZHU J, YANG L, et al. A single-station multi-tasking 3D coordinate measurement method for large-scale metrology based on rotary-laser scanning[J]. *Measurement Science and Technology*, 2013, 24(10): 105004.
- [29] 杨凌辉, 郝继贵, 张广军, 等. 采用标准尺的工作空间测量定位系统定向方法[J]. 天津大学学报, 2012(9): 814-819.
- [30] 林嘉睿, 孟伟, 杨凌辉, 等. 激光跟踪仪的双面互瞄定向[J]. *光学精密工程*, 2017, 25(10): 2752-2758.
- [31] EASA S M. Space resection in photogrammetry using collinearity condition without linearisation[J]. *Survey Review*, 2010, 42(315): 40-49.
- [32] 倾敏, 林嘉睿, 郭思阳, 等. 基于后方交会的室内空间测量定位系统定向方法[J]. *纳米技术与精密工程*, 2017(6): 473-479.
- [33] LIU Z, ZHU J, YANG L, et al. A single-station multi-tasking 3D coordinate measurement method for large-scale metrology based on rotary-laser scanning[J]. *Measurement Science and Technology*, 2013, 24(10): 105004.
- [34] SHI S, YANG L, Lin J, et al. Omnidirectional angle constraint based dynamic six-degree-of-freedom measurement for spacecraft rendezvous and docking simulation[J]. *Measurement Science and Technology*, 2018, 29(4): 045005.
- [35] GUO S, LIN J, REN Y, et al. Application of a self-compensation mechanism to a rotary-laser scanning measurement system[J]. *Measurement Science and Technology*, 2017, 28(11): 1150.
- [36] 郝继贵, 郭思阳, 史慎东, 等. 面向先进装备制造业的室内空间测量定位系统[J]. *计测技术*, 2018, 38(3): 9-19.

(编辑:李刚)