

文章编号: 1000-6893(2001)06-0500-05

舰船飞行甲板真实流场特性试验研究

顾蕴松, 明 晓

(南京航空航天大学 1201 教研室, 江苏 南京 210016)

EXPERIMENTAL INVESTIGATION ON FLOW FIELD PROPERTIES AROUND AFT-DECK OF DESTROYER

GU Yun-song, MING Xiao

(Department of Aerodynamics, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

摘 要: 介绍了某驱逐舰在实际航行时, 舰尾飞行甲板进行流场实测的结果。给出了飞行甲板直升机起降区流场的速度矢量图, 为制定直升机安全起降风限图及流场理论计算的验证提供了依据。试验结果表明, 用自行开发的适于外场测量的七孔探针测试系统, 可同时测量空间多点的三维流场速度和方向。

关键词: 舰船飞行甲板; 流场实测; 测试技术; 七孔探针

中图分类号: V 211. 5; V 211. 7 **文献标识码:** A

Abstract A seven-hole probe velocity measurement system is developed in this paper, which consists of SHP rake, multi-channel pressure transducers, data acquisition system (16bit A/D) and software. Flow field properties of the aft-deck is studied by making three-dimensional full-scale measurements of a destroyer. The flow field vector maps are given. The results of this study will also provide an experimental datum, from which the safe operating envelope can be worked out; it may also be used to validate computer fluid dynamic predictions.

Key words: ship flight deck; flow field; full-scale measurement; seven-hole probe

现代海战越来越注重海空协调作战, 从而促使舰载直升机得到迅速发展。但舰载直升机在舰船小型飞行甲板上起飞和降落一直存在着十分突出的安全问题。在常规舰艇上, 如驱逐舰、护卫舰的飞行甲板较小, 由于海面气流吹过舰体时在甲板上方产生的涡流和海面风浪造成的舰体摇摆, 将引起许多直升机在陆地起降操纵时未遇到过的特殊操纵性问题^[1]。舰载直升机的飞行安全直接涉及到舰和机两方面, 不同的舰-机配合必须有不同的安全风险与操纵规范, 其中对舰面空间流场特性的系统研究是首先和必须要解决的问题, 也是研究舰载直升机安全起降问题的关键之一。但是舰面流场的分析和预估是十分困难的, 其主要原因之一是缺乏大量而细致的实验研究来建立必要的数据库和数学模型^[2]。

目前, 对于舰面起降甲板流场的研究还较多地依赖于试验方法。直升机在舰尾飞行甲板起降时, 受舰速、航向、风向、风速、海浪等多种因素的影响, 往往经历非常复杂的气动环境。其舰尾流场特性的研究仅依靠风洞模型试验是远远不够的,

风洞中的试验模拟真实条件是有限的, 测试结果并不能完全代表真实流场情况。鉴于舰载直升机安全起降问题的重要性, 在真实情况下流场实测工作就显得越来越重要。舰尾飞行甲板流场的实地测量难度大, 影响准确测试的因素多, 投资和工作量大, 但其测试结果反映真实流场, 数据十分珍贵。目前, 国外仅有极少数国家拥有舰面流场全尺寸测量数据。本文介绍了用自行设计开发的一套适于外场测量的七孔探针测试系统, 对某驱逐舰在海面上实际航行时, 舰尾飞行甲板流场进行了全尺寸测量的结果, 为验证流场的理论计算(CFD)和制定相应的直升机安全风限图和操作规范提供了试验依据, 这在国内尚属首次。

1 七孔探针测试系统

七孔探针可以得到流场中三维速度及压力信息。尽管流体流场测量已步入光电设备测量时代, 例如热线风速仪、激光多普勒测速仪、粒子图像测速仪等, 但在某些测量场合下, 特别是在外场的测量中, 多孔压力探头仍是最实用和最可靠的测量技术之一。在三维测量情况下, 经过仔细设计、精良制造、严格校准的七孔探针, 有其独特的优越

性^[3]。此次外场测试试验时军舰航行速度较低, 试验时海面自然风速也较低, 使得合成风速速压不超过 10mm 水柱, 在尾流区内速压更低, 加上舰面自然环境恶劣, 气温较低, 舰体摇摆等因素。这对测试系统的分辨率、工作时的稳定性和可靠性提出了很高的要求。本文介绍的实流场七孔探针测试系统工作稳定可靠, 测试数据准确, 能满足现场测试要求, 系统包括:

(1) 七孔探针耙 试验在某型导弹驱逐舰舰尾甲板上进行流场测量, 为了提高测量效率, 采用了 6 根七孔探针同时测量空间多点的气动参数。每个探针头部呈圆锥形, 外径为 4mm, 7 个孔的内径为 0.8mm, 见图 1。气流流过七孔探针时, 各孔感受的压力值会随气流速度和方向的改变而发生相应的变化, 通过校准可以得到对应关系式即校准系数。所有探针预先在低速风洞中进行了校准, 由于七孔探针的校准系数较多 (420 个/根), 校准系数以数据文件的形式存入计算机。

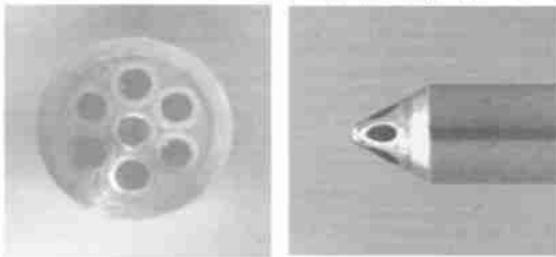


图 1 七孔探针几何外形

Fig 1 Seven-hole probe

(2) 多通道微压变送器 可同时将 42 通道气压转换成模拟电压量, 便于进行数据采集。该仪器量程为 200mmH₂O、精度高 (0.3% F.S.), 适合低速压的测试要求。

(3) 数据采集及数据处理软件 由 16 位 A/D 数据采集卡, PC 机以及数据采集软件构成。数据采集软件可以完成系统联校工作, 用最小二乘法求出微压变送器与整个数据采集系统的联校通道系数, 在测量压力时, 可直接将电压量实时转化为压力值。由于测量的是平均值, 因此无须对压力信号滤波。流场测量时, 每个探针测得 7 个孔的压力值由多通道微压变送器将气压值转换成模拟电压量, 经高精度采集模块将电压量转换成数字量, 经计算机采集运算得到速度向量, 局部总压、静压值等结果。整个测试系统的精度高、校准的重复性好 ($\pm 0.5\%$)、角度分辨率为 0.3° ; 配置框图见图 2。

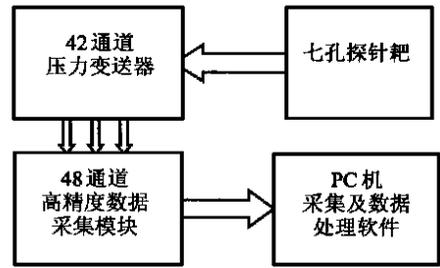


图 2 七孔探针测试系统

Fig 2 Seven-hole probe rake measurement system

2 测试和处理方法

2.1 测试和处理方法

舰面流场的外场测量难度大, 投资和工作量也大, 制约因素多, 测试系统的安装、移动、定位也十分困难。须精心选择试验方案, 以最少的时间和代价达到试验目的和测试效果。与风洞实验不同, 影响舰面流场测量的主要因素是海面上没有稳定的流场, 相对舰船的风向和风速主要取决于当时的海洋环境和舰船的舰速和航向。不可能按照预先计算的舰速和航向, 得到所要求的稳定的风向和风速。如图 3 所示, 由于海面自然风向和风速在某一范围内是不断变化的, 加上舰船的运动方向和速度, 使得相对于舰船的合成风速和风向在某范围内呈现较大的随机性。

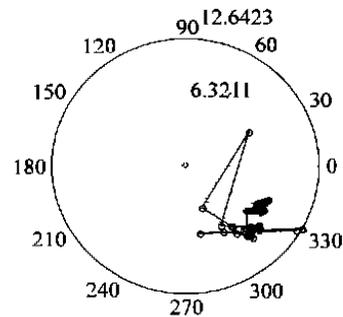


图 3 合成风速随机分布

Fig 3 Random distribution of synthetic wind vector

综合考虑各种因素, 为了提高实验效率和减少舰船航行时间, 测试时舰速和航向按下述方式安排: 正顶风 (舰船运动方向与海面自然风向呈 180° 角), 以获得舰桥相对风向为 0° 的测试状态; 右舷正侧风 (舰船运动方向与海面自然风向呈 90° 角), 舰速的改变和海面自然风的改变会得到相对舰桥不同的合成侧风角度。

七孔探针测点的布置方法为: 七孔探针轴线平行于舰体纵轴, 指向舰艏。其中一根探针 (点

F) 布置在机库上方靠右舷, 距机库顶高度 3m , 其所测结果作为来流参考风速和风向。另五根探针制成耙 (每个探针间隔 1m , 距甲板高度分别为 $2, 3, 4, 5, 6\text{m}$) 在甲板上移测, 测点分布如图 4 所示 (25 点均布)。

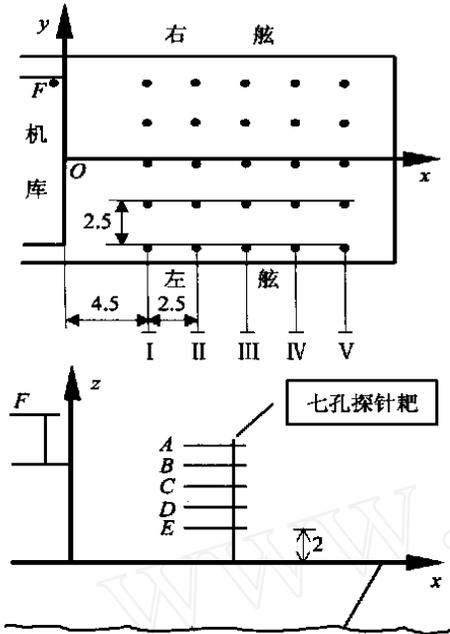


图 4 舰船尾流场量点位置示意图(单位: m)

Fig 4 Sketch of the position of test point of flow field on ship flight deck (unit: m)

2.2 试验数据处理方法

为了得到同一状态下尽可能多的有效数据, 本次试验实测时在每一测点间隔 5s 采集一组读数, 采样频率为 100k 。每组读数共有 6 根七孔探针的 42 个气流压力值, 每个压力值样本长度为 1k , 共采集 60 组, 从中筛选出各点在相同风向下的有效数据并以参考风速大小为基准无量纲化进行分析。先以点 F 所测结果作为来流参考风速和风向, 根据在不同测点时对应 F 探针实测结果所含合成风向角的分布情况, 选出对应不同风向角下 $A \sim E$ 探针在各测点相应的数据。(例如若 F 探针实测结果风向角为 50° 时, 所有的测点对应 F 探针结果都含风向角 50° 或近似 50° 角的数据, 则该风向角被选取为有效试验状态)。然后, 在选取的某有效风向角下, 各测点 $A \sim E$ 探针所测风速分别以相对应的 F 探针实测风速大小为参考基准无量纲化, 以便进行分析。因数据量大及数据文件多, 实际挑选和处理时, 采用多次批处理程序来完成, 经过七孔探针运算程序运算后得到各测点的速度矢量, 将这些速度矢分别投影到 xz, yz 平面

内, 即可得到各水平截面 (A, B, C, D, E) 和横向垂直截面 (I, II, III, IV, V) 内相应测点处的定常速度及方向分布。

3 试验结果与分析

由于舰上烟囱、雷达、机库及其它上层建筑物的影响和由此引起的气流分离, 导致飞行甲板上方近机库尾流场中有较强的低压分离区, 在该分离区内速压低且气流速度大小方向有较大的随机性。在分离区之外流动有比较好的规律。

(1) 正顶风状态 直升机起降平台区低于机库高度水平面(图 5C, E) 内前三排测点的速度都

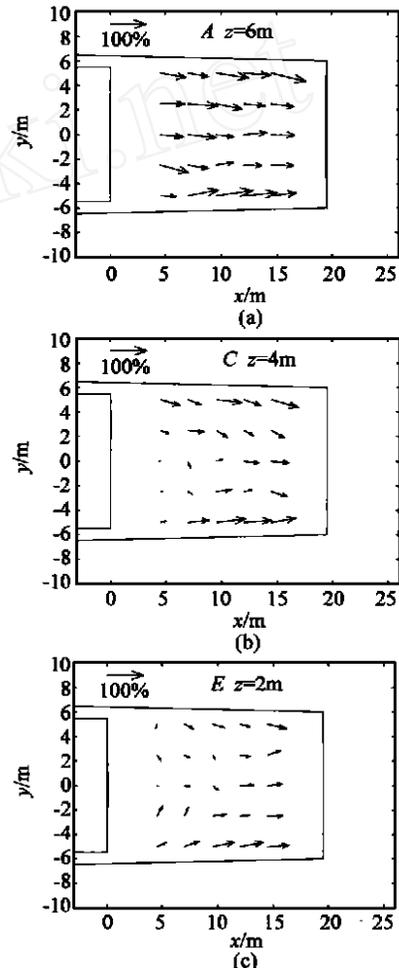


图 5 舰尾流场水平面速度矢量分布 (xy 平面正顶风)

Fig 5 Velocity vector map of flow field in horizontal plane with zero slip angle (xy plane)

很小, 气流偏角大, 且方向各异, 靠近甲板两舷的气流向内偏角较大, 其主要原因是受机库遮蔽影响, 气流经过机库顶部后边缘时发生分离, 在飞行甲板上方近机库区域 ($x < 9\text{m}$) 成为强涡流区, 处于分离流中的气流速度紊乱压力大大降低, 两

舷气流被向内吸引, 机库顶部气流被吸引向内向下, 形成下洗气流 (参见图 6); 飞行甲板的后部区域内 (后两排), 相应测点比其它测点的速度高且气流偏角减小, 两侧气流速度大, 越向中心气流速度越小, 呈现典型尾流速度剖面分布。随着距飞行甲板面高度之增加, 分离区逐渐减小消失, 机库尾流影响逐减弱, 速度相应增大, 气流偏角也相对减小, 整个水平面内速度分布相对均匀。虽然高于机库的 A 平面的同区域速度得到较大的恢复, 但仍受到机库顶部远前方的舰桥烟囱等其它上层建筑的尾流影响, 该区速度仍小于自由来流速度。

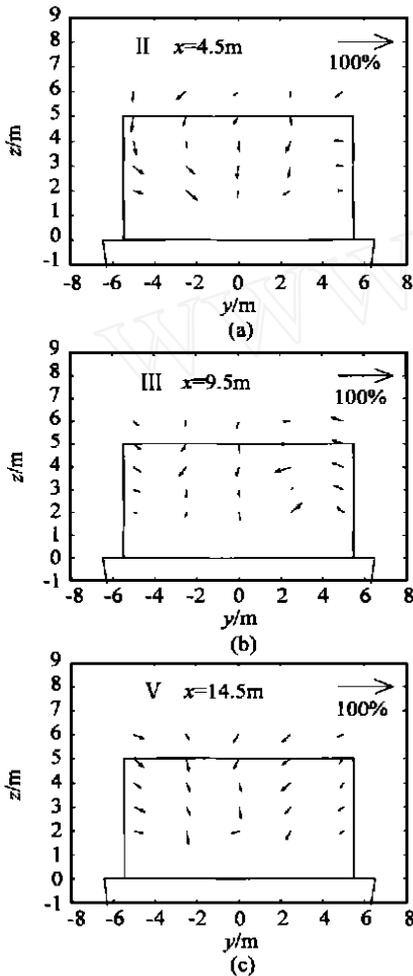


图 6 舰尾流场横向铅垂面速度矢量分布 (yz 平面正顶风)

Fig 6 Velocity vector map of flow field in vertical plane with zero slip angle (yz plane)

A, B, C, D, E 水平面内的平均水平向后定常速度分别为 7.10, 5.39, 3.75, 3.88, 2.76m/s, 高度越高所测截面内定常速度之平均值越大, 但都小于自由来流速度 8.7m/s (F 探针所测结果), 平均下洗气流定常速度分别为 0.66, 0.88, 0.92, 0.81, 0.62m/s, 在 B, C, D 平面有较大

下洗气流。在飞行甲板中心面上速压较低的区域为 $x = 4.5\text{m}, z = 2\text{m}$ 附近, 随着高度及离机库距离的增加速度逐渐恢复, 但都远小于自由来流速压, 当直升机从自由流区进入该区时, 易被向下向前“吸”向机库发生碰撞事故, 若相对风速增加, 则这种现象更加明显。

(1) 水平面的速度分布 见图 7, 当有右舷侧向风时, 气流经过机库在机库顶部后缘及右侧缘发生分离, 强烈的右侧缘分离使得机库后的低压分离区向左舷移动, 其中 E 平面分离区最大, 随高度增加分离区减小, 接近机库顶部时与经过机库顶部的下洗气流汇合, 速压增加气流偏角随机性减小。飞行甲板区域有较强的侧洗气流, A, B, C, D, E 水平面内的平均水平定常向左侧洗速度分别为 2.41, 2.71, 2.91, 1.41, 0.99m/s, 在机库高度平面有较强向左侧洗气流。

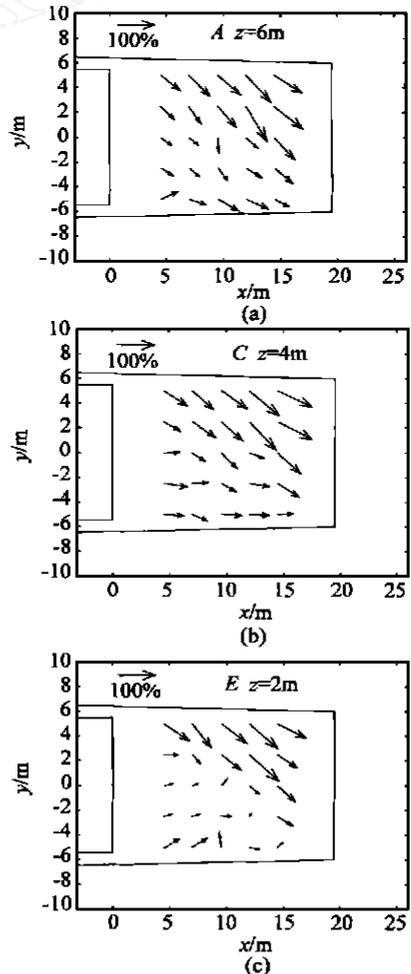


图 7 舰尾流场水平面速度矢量分布 (实测相对舰船风向角为 50°)

Fig 7 Velocity vector map of flow field in horizontal plane with 50 degree slip angle from right side (xy plane)

(2) 垂直面内的速度分布 由于舰船飞行甲板距海面都有一定的高度, 当有右舷侧向风时, 海面气流从舰船右侧吹来, 由于受舰船右舷阻挡, 被迫向上流动, 产生类似前台阶分离流动。图8为距机库不同距离垂直面内的速度分布。由图可见, 当有右舷侧向风时, 气流经过飞行甲板右侧边缘发生分离并产生上洗气流。在近机库区 $x = 4.5\text{m}$

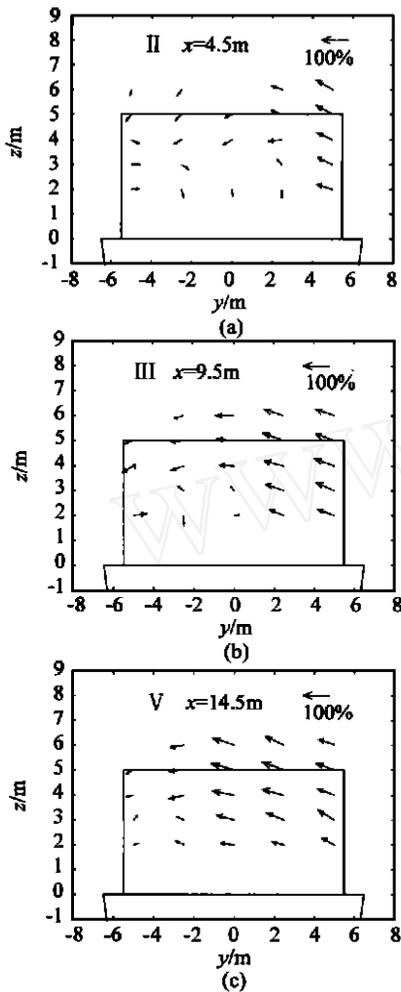


图8 舰尾流场横向铅垂面速度矢量分布
(实测相对舰船风向角为 50°)

Fig. 8 Velocity vector map of flow field in vertical plane with 50 degree slip angle from right side (xy plane)

处以飞行甲板中心为界, 左侧是低压涡流区, 气流

紊乱, 速压低; 右侧有侧洗及上洗气流。随着距机库距离的增加, 涡流区向左舷移动, 直至移出飞行甲板(图8V), 飞行甲板上方大部份区域被上洗气流和侧洗气流所控制。

4 结论

试验结果表明, 七孔探针三维流场测试设备在恶劣的试验环境下工作稳定可靠, 体现了其外场测量的优势。方形盒状机库, 舰船上层建筑物和较高的舰体尾部, 是造成舰尾流场品质恶劣的主要原因。飞行甲板上方近机库区内为低压分离区, 直升机从远场自由流区骤然进入该区, 对着舰安全构成威胁。由于七孔探针测量的是平均速度, 因此在分离区之外的流场有比较好的测试结果, 能满足直升飞机安全起降所需的风限图测量的要求。在分离区内, 气流紊乱, 变化快, 局部有回流。要获得分离区内流动的详细结构, 必须采用瞬态流场测试手段来完成。

参考文献

- [1] Rhoades M M, Healey V J. Flight deck aerodynamics of a nonaviation ship[J]. Journal of Aircraft, 1992, 29(4): 619 - 626
- [2] Healey J V. Establishing a database for flight in the wakes of structures[J]. Journal of Aircraft, 1992, 29(4): 559 - 564
- [3] Zilliac G G. Modelling calibration and error analysis of seven-hole pressure probes[J]. Experiments in Fluids, 1993, 14: 104 - 120

作者简介:



顾蕴松(1971-) 男, 硕士, 南京航空航天大学空气动力学讲师, 研究方向为实验空气动力学和流体流动测试技术。电话: 025-4892610, E-mail: mingan@dns.nuaa.edu.cn

(责任编辑: 吴小勇)