变化风场对舰载飞机着舰安全性影响

许东松 刘星宇 王立新

(北京航空航天大学 航空科学与工程学院, 北京 100191)

摘 要: 建立了复杂环境下舰载机进舰着舰的数学仿真模型,并通过大量的仿真计算,研究了舰尾流和侧风风场对舰载机进舰着舰安全性的影响,给出了一定进舰条件下舰载机所能抗御的最大侧风强度. 研究结果表明,舰载机在进舰过程中必须通过驾驶员操纵抑制舰尾流扰动,否则将引起较大的着舰偏差,影响着舰安全;对于一定的进舰初始条件,舰载机只能抗御一定强度的侧风,超出允许侧风强度时舰载机将不能成功着舰.

关 键 词: 舰载机; 舰尾流; 侧风; 着舰偏差; 仿真模型

中图分类号: V 212. 1

文献标识码: A **文 章 编 号**: 1001-5965 (2010) 01-0077-05

Influence of changeful wind on landing safety of carrier-based airplane

Xu Dongsong Liu Xingyu Wang Lixin

(School of Aeronautic Science and Engineering, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100191, China)

Abstract: The mathematical simulation model on the approach process of carrier-based airplane was built up in consideration of complicated environment. The influence of carrier air wake and crosswind on the carrier-based airplane landing safety was researched through computation and simulation. The strongest crosswind that carrier-based airplane can endure while approaching on certain initial circumstance was given. The research results indicate that the carrier air wake disturbance must be restrained through pilot operation during the approach process, or else it would cause remarkable position error and decrease the landing precision. For certain initial approach states, the strongest crosswind that the carrier airplane can endure is certain, and any stronger crosswind would lead to failure in approaching and landing process.

Key words: carrier-based airplane; carrier air wake; crosswind; carrier landing error; simulation model

舰载飞机在进舰过程中可能遇到的变化风场主要包括舰尾流和侧风. 舰尾流和侧风的存在,不仅增大了驾驶员的操纵难度,而且会引起较大的着舰偏差. 当侧风超过一定强度时,舰载机由于副翼操纵面允许偏角的限制而无法保持定直下滑,会造成着舰失败;因此,开展变化风场对舰载飞机进舰着舰安全性影响的研究,对于保证舰载飞机的着舰安全、提高着舰精度十分必要.

本文在建立复杂环境下舰载飞机进舰下滑综合仿真模型的基础上,研究了舰尾流和侧风对驾驶员操纵策略及舰载机着舰偏差的影响,并分析了不同侧风强度下舰载机的进舰着舰安全性,最后给出了在一定的进舰条件下,舰载飞机安全着舰所能抵御的最大侧风强度.

1 着舰安全性要求

衡量舰载机着舰安全性及着舰精度的指标之一是其着舰偏差的大小. 着舰偏差是指舰载机的实际着舰点与理想着舰点之间的位置关系,包括纵向偏差和横向偏差;其中:纵向偏差又包括水平位置偏差和垂直高度偏差.

航母甲板上一般布置有 4根拦阻索:第 1根位于距船尾 50m左右处,其余 3根按照舰尾至舰首方向每隔约 12m设 1根. 理想着舰点位于第 2

收稿日期: 2008-12-16

基金项目: 航空科学基金资助项目 (20081751026)

作者简介: 许东松 (1985 -),男,河北保定人,硕士生, xudongsong@tom. com.

根和第 3根拦阻索的中心位置.

水平位置偏差指舰载机的实际着舰点与理想着舰点之间的水平距离;垂直高度偏差指在理想着舰点处舰载机的实际下滑轨迹与理想下滑轨迹之间的垂直距离;横向偏差是指舰载机在进舰过程末端到达理想着舰点处时,机身中轴线偏离拦阻区的甲板跑道中心线的横向距离. 偏差等级分类标准如表 1所示[1].

表 1 着舰偏差等级分类 m

偏差类型	理想值	允许值
水平位置偏差	-6.1～6.1	-12.2～12.2
垂直高度偏差	-0.76～1.52	-1.52～3.05
横向中心偏差	-1.52～1.52	-3.05～3.05

根据表 1中着舰偏差的等级分类,可得到航母甲板上在理想着舰点附近可供拦阻钩与拦阻索啮合的区域,即舰载机的拦阻区,如图 1所示.

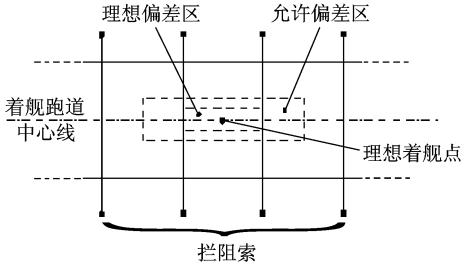


图 1 航母甲板拦阻区示意图

当舰载机在理想偏差区着舰时,着舰精度和安全性都很高,属于理想着舰情形;当舰载机在允许偏差区着舰时,虽能保证着舰安全,但着舰精度较低,属于可接受的着舰情形;当舰载机在允许偏差区外着舰时,可能会造成提前撞舰、钩索脱挂甚至坠海等. 因此,为保证舰载飞机的着舰安全,必须保证着舰偏差在允许偏差范围内,否则舰载机将不能顺利地钩住拦阻索并成功完成着舰过程.

2 舰载机进舰仿真模型

舰载机的进舰过程涉及到飞机本体运动、驾驶员操纵、舰尾流扰动、航母运动以及着舰信号指挥官 LSO (Landing Signal Officer)指令等,因此,进舰着舰仿真模型必须包含上述各子模型.

1) 飞机本体运动模型. 舰载机在进舰下滑过程中,速度和航迹倾角基本保持不变,故飞机本体运动模型可采用纵横解耦的小扰动线化方程:

$$\dot{X} = AX + BU + CW \tag{1}$$

式中,X表示飞机状态参数向量;U表示舵面操纵量,包括升降舵 δ_e,副翼 δ_a 和方向舵 δ_r;W 表示大气扰动,包括 3个方向的速度分量:U, V, W.

2) 驾驶员模型. 采用变策略驾驶员模型:舰载机若只受到比较小的尾流扰动,驾驶员对舰载机的操作是连续的轨迹跟踪行为;若要求驾驶员大幅度改变飞行状态,则采用离散操纵策略[2].

3) 舰尾流模型. 采用美军标规范 MIL-F-8785C中给出的海上大气扰动模型[3],其速度组成包括自由大气紊流分量、母舰大气尾流的稳态分量、周期性分量以及随机分量.

4) 航母运动模型. 采用工程化的航母运动模型,即通过谐波形式来模拟航母的 6自由度运动.

5) 着舰信号指挥官模型. 采用模糊控制理论模拟 LSO在进舰段前期对舰载机航迹偏差的修正功能;采用神经网络模型模拟 LSO在进舰后期对甲板运动的补偿功能[4].

综上所述,舰载机进舰下滑仿真模型整体结构如图 2所示.

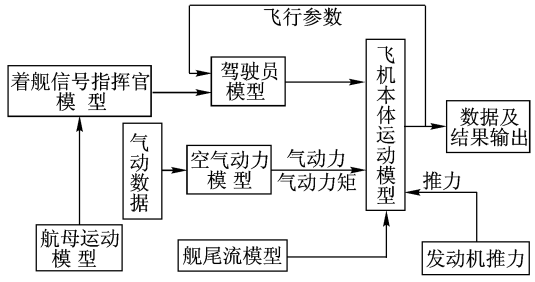


图 2 仿真模型整体结构

舰载机捕获下滑道入口以后,在驾驶员操纵下沿预定轨迹下滑. 舰载机在进舰过程中受到自身重力、发动机推力以及空气动力的作用,飞行状态发生变化;驾驶员通过跟踪飞机状态参数的变化,操纵舵面修正航迹偏差. 在着舰前 3 s,LSO对航母运动进行预报补偿,并将补偿指令反馈给驾驶员,以辅助其减小着舰偏差.

舰载机进舰初始状态如表 2所示.

表 2 进舰初始状态

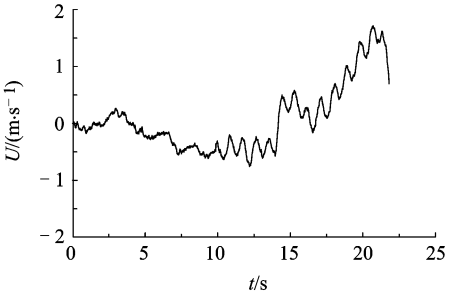
状态参数	进舰质量 m/kg	进舰速度/(m·s^{-1})	俯仰角 θ/(°)	迎角 α/(°)	侧滑角 β/(°)
数值	23000	70	2.71	6.21	0
状态参数	**滚转角 ϕ/(°)**	**航迹倾角 γ/(°)**	**襟翼偏度/(°)**	**高度偏差 ΔH/m**	**横向偏差 Δy/m**
数值	0	-3.5	20	0	0

3 舰尾流对着舰安全性影响

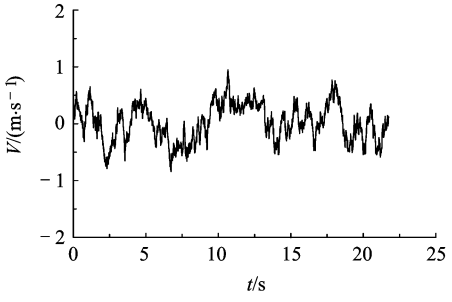
3.1 舰尾流的成因和特点

由于舰尾流是来自舰船远前方的海面自由流流经舰船后形成的,故舰尾流场的分布主要取决于海况、舰船的剖面形状以及航母的运动状况(如运动速度、舰船纵倾频率、纵倾幅度)等.

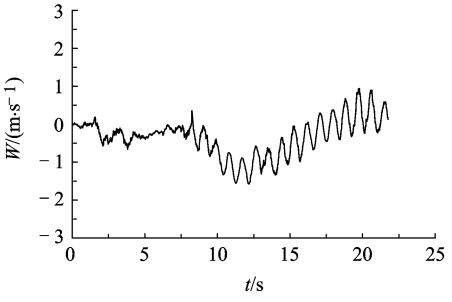
针对 M L-F-8785C给出的舰尾流模型,仿真结果如图 3所示.



a 水平速度分量



b 横向速度分量



c 垂直速度分量

图 3 舰尾流仿真结果

舰尾流中最典型的特征是“公鸡尾”形状的尾流分量 (见图 3c),该分量的存在,会使得舰载机在进舰后期先后遭遇上洗流和下洗流,航迹发生很大变化,严重影响飞机安全准确地着舰.

3.2 舰尾流对着舰安全性影响

对于图 3所示舰尾流,分别研究有/无驾驶员操纵情况下舰载机垂直高度偏差的变化情况.

对于图 3a、图 3c所示的纵向速度分量,在引入驾驶员操纵前后高度偏差的变化及相应驾驶员操纵指令时间历程如图 4、图 5所示.

仿真结果表明,若驾驶员不操纵飞机,则进舰过程中的高度偏差最大可达 4m,超出了允许偏差范围,会导致舰载机着舰失败;为保证着舰安全,驾驶员必须通过升降舵操纵抑制舰尾流扰动.

引入驾驶员操纵以后,垂直高度偏差最大为 2.1m,末端着舰偏差为 -0.68m,均在允许偏差范围内.因此,驾驶员操纵对于舰载飞机抵抗舰尾流扰动,保证安全着舰是十分必要的.

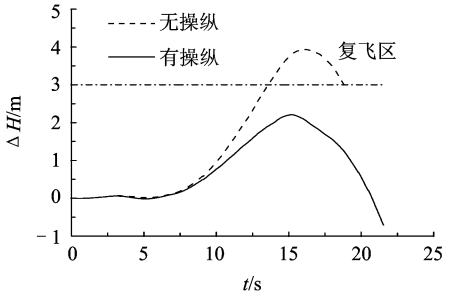


图 4 高度偏差时间历程

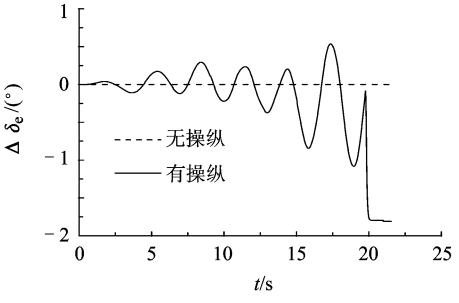
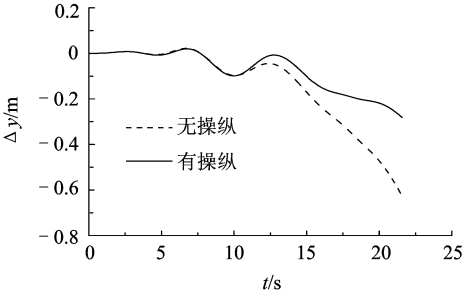
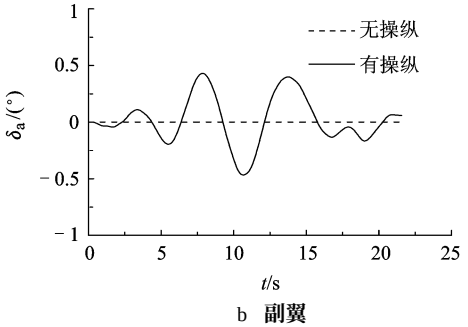


图 5 升降舵时间历程

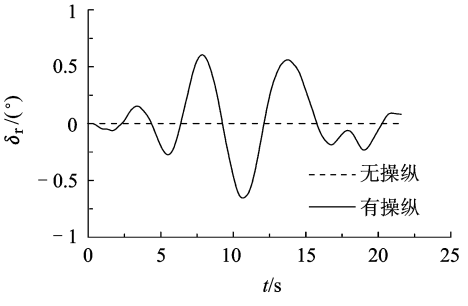
对于图 3b所示的舰尾流横向速度分量,图 6给出了有/无驾驶员操纵两种情形下飞机的横向偏差和舵面的时间响应历程.



a 横向偏差



b 副翼



c 方向舵

图 6 横向舰尾流影响

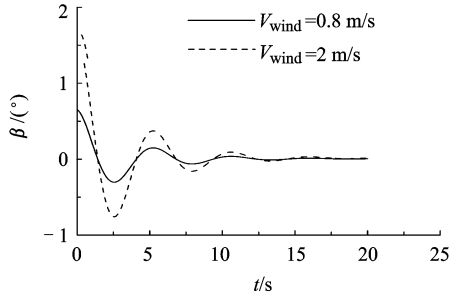
仿真结果表明,在没有驾驶员操纵时,舰载机仅凭自身的稳定特性抵御横向舰尾流扰动,末端横向偏差为 -0.62m;引入副翼和方向舵操纵以后,该偏差降为 -0.28m,表明通过驾驶员的操纵,可以有效地减小横向速度分量引起的着舰偏差.

同时,在有/无驾驶员操纵 2种情况下,舰载机的横向偏差均在允许偏差范围内,这是因为舰尾流横向速度分量只由自由大气紊流分量和随机分量 2部分组成,没有可以在某一方向对舰载机产生持续影响的稳态分量部分,故横向舰尾流主要表现为小幅随机紊流扰动,且大致在 ±1m/s的范围内对称分布,因此对着舰偏差影响不大,驾驶员所需施加的舵面操纵幅度也较小.

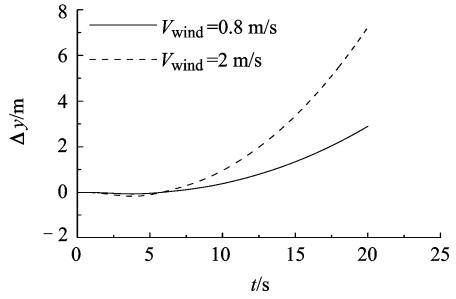
4 侧风对着舰安全性影响

4.1 无操纵下的侧风影响

假设侧风风速 V_{wind}分别为 0.8m/s和 2m/s,在驾驶员不操纵副翼和方向舵的情况下,舰载机进舰过程中侧滑角和横向偏差的时间历程如图 7所示.



a 侧滑角



b 横向偏差

图 7 无操纵下的侧风影响

仿真结果表明,若驾驶员不加操纵,舰载机在进入侧风风场后会由于自身的航向稳定性通过偏转机头指向而消除侧滑,同时会导致舰载机偏离预定下滑轨迹,形成很大的横向着舰偏差.对于 0.8m/s和 2m/s的侧风,末端横向偏差分别为 2.89m和 7.23m,前者已接近最大允许偏差,后者已超出允许偏差范围.这表明,在没有驾驶员操纵情况下,舰载机只能抵御约 0.8m/s左右的侧风,且着舰偏差较大,着舰精度较低.

4.2 带操纵下的侧风影响

在侧风条件下,驾驶员需要协调操纵舵面,使舰载机沿预定轨迹下滑.

按照飞行员训练和舰载飞机性能的要求,舰载机进舰下滑过程中副翼输入量限定为最大 ±3.5°[65],故副翼的舵面输入指令需限制在该范围内;同时认为方向舵能自动满足舰载机所需的航向操纵要求.

引入驾驶员操纵以后,假设侧风风速 V_{wind}分别为 5m/s,10m/s和 12m/s,舰载机在上述侧风风场中进舰下滑,各参数时间历程见图 8.

如图 8所示,引入副翼和方向舵操纵以后,侧滑角和滚转角经过初始振荡趋于稳态值,舰载机将保持一定的侧滑和滚转下滑.对于上述侧风条件,舰载机的末端状态参数和舵面最大操纵量如表 3所示.

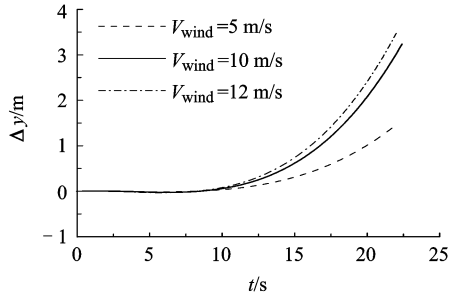
表 3 不同侧风强度下的进舰参数

V_{wind}/(m·s^{-1})	δ_a/(°)	δ_r/(°)	β/(°)	φ/(°)	Δy/m
5	-2.4	2.5	3.9	3.2	1.6
10	-3.5	4.9	7.7	6.1	3.0
12	-3.5	5.9	9.2	8.8	3.5

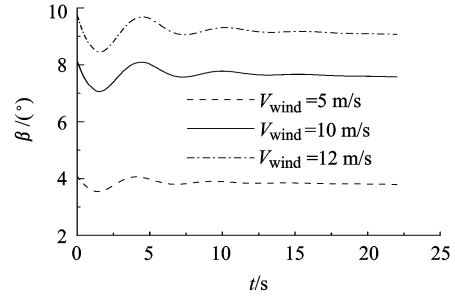
仿真结果表明,随着侧风强度的增加,舰载机的稳态侧滑角和滚转角均随之增大,所需的副翼和方向舵偏度也随之增大由于受到舵面许可偏度的限制,末端横向偏差将随着侧风强度增加而增大.

对于 5m/s的侧风,其副翼最大偏转为 -2.4°,在舵面偏度的限制范围内,可以满足驾驶员操纵的要求;末端横向偏差为 1.6m,在允许偏差的范围之内.对于 10m/s的侧风,副翼最大偏转为 -3.5°,为舵面最大允许偏度,此时末端横向偏差为 3.0m,已经达到最大允许偏差(±3m),表明在 10m/s的侧风条件下,舰载机在副翼最大偏转范围内虽能勉强着舰,但着舰精度已经很低;考虑到副翼和方向舵还要有一定的操纵余量来消除横侧舰尾流的影响等,故在该进舰条件下,10m/s的侧风是舰载飞机所能抵御的最大侧风强度.对于 12m/s的侧风,在舵面偏度限制范围内的着舰偏差为 3.5m,已经超出了允许的偏差范围,表明舰载机在 12m/s的侧风条件下不能安全着舰.

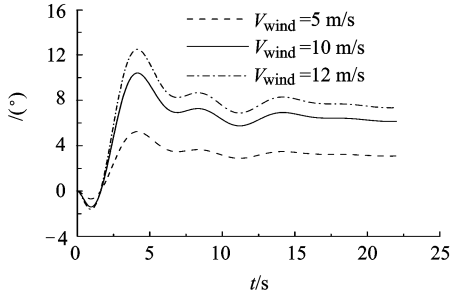
因此,对于该进舰初始条件下的舰载飞机,所允许的最大侧风强度为 10m/s,超过该强度的侧



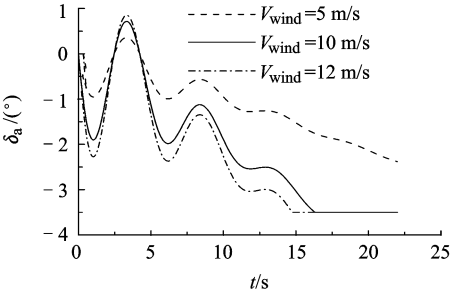
a　横向偏差



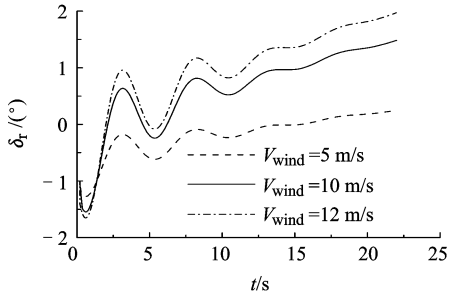
b　侧滑角



c　滚转角



d　副翼偏角



e　方向舵偏角

图 8　引入操纵后的侧风影响

风风场将造成舰载机着舰失败. 在实际的进舰着舰过程中,为了提高着舰精度和安全性,一般通过调整航母的运动方向,使侧风速度保持在 5 m/s 范围内.

5　结　论

舰载机在进舰过程中必须通过驾驶员操纵抑制舰尾流扰动才能保证安全着舰;舰载机在侧风风场中进舰时,驾驶员必须协调副翼和方向舵,使飞机保持一定的侧滑角和滚转角;且侧风风速越大时,驾驶员操纵量越大,横向着舰偏差越大. 因此,对于一定的初始进舰条件,舰载机所能抗御的最大侧风风速是一定的,必须保证进舰过程中的侧风强度在允许范围内.

参考文献 (References)

[1] Anderson M R. Inner and outer loop manual control of carrier aircraft landing [R]. AIAA-96-3877, 1996

[2] 屈香菊,崔海亮. 舰载机进舰任务中的驾驶员变策略控制模型 [J]. 北京航空航天大学学报, 2003, 29(11): 993 - 997
Qu Xiangju, Cui Hailiang. Variable strategy pilot model of carrier landing approach [J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2003, 29(11): 993 - 997 (in Chinese)

[3] Moorgouse D J, Woodcock R J. 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 [M]. 李成忠,肖业伦,方振平,等译. 西安:飞行力学杂志社, 1985: 149 - 153
Moorgouse D J, Woodcock R J. Background information and user guide for MIL-F-8785C, military specification flying qualities of piloted airplanes [M]. Translated by Li Chengzhong, Xiao Yelun, Fang Zhenping, et al. Xi'an: Flight Dynamics Press, 1985: 149 - 153 (in Chinese)

[4] 石明,崔海亮,屈香菊. 舰载飞机进舰降落信号员模型建模 [J]. 北京航空航天大学学报, 2006, 32(2): 135 - 138
Shi Ming, Cui Hailiang, Qu Xiangju. Modeling landing signal officer for carrier approach [J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2006, 32(2): 135 - 138 (in Chinese)

[5] 石明. 舰载机人工控制下的建模仿真 [D]. 北京:北京航空航天大学航空科学与工程学院, 2004
Shi Ming. Modeling and simulation of man-control carrier approaching [D]. Beijing: School of Aeronautic Science and Engineering, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2004 (in Chinese)

(编　辑:李　晶)