

# 基于模糊推理的舰载机进舰过程安全性仿真分析

李晓磊, 赵廷弟\*

北京航空航天大学 可靠性与系统工程学院, 北京 100191

**摘要:** 舰载机进舰过程复杂, 驾驶员对舰载机的控制是影响进舰安全的重要因素, 驾驶员操作的偏差受到人员自身状态、环境状态以及设备(舰载机)状态的综合影响。以国外某型舰载机为例, 提出了基于模糊推理的舰载机进舰过程安全性建模与仿真方法。考虑舰载机进舰过程中驾驶员控制的不确定性, 分析了引起驾驶员不确定性的人-机-环因素, 基于模糊推理建立不确定因素引起的驾驶员控制偏差模型, 并在此基础上建立了舰载机进舰过程安全性仿真模型。通过仿真分析明确危险模式、危险程度以及危险发生的时刻点等关键因素的影响程度, 为进一步保证舰载机进舰安全提供基础。

**关键词:** 系统安全; 舰载机; 进舰; 安全性仿真; 模糊推理

中图分类号: V328; N945

文献标识码: A

文章编号: 1000-6893(2013)02-0325-09

影响舰载机进舰过程的因素复杂, 需控制的参数较多, 控制精度要求高, 安全风险大, 特别是进舰的最后 20 s 是事故的多发阶段。据统计, 约 40% 的事故发生在这一阶段, 并且事故造成的危害性及损失尤为严重<sup>[1-2]</sup>。为此, 国内外开展了相关研究, 主要包括着舰过程控制和着舰控制系统的优化与设计等方面<sup>[3-4]</sup>。在安全性方面主要考虑了环境扰动对舰载机进舰安全的影响。目前, 进舰着舰控制系统设计以及环境的影响都是在假设人员操作正常的前提下开展的<sup>[5-6]</sup>。然而, 由于进舰过程事件紧凑、操作复杂以及环境多样等因素, 人员操作本身也具有较大影响, 人员自身的素质以及人员对于舰载机的控制也成为影响着舰安全的重要因素。

现有的安全性分析方法, 如故障模式与影响分析(FMEA)、故障树分析(FTA)、危险与可操

作性研究(HAZOP)等, 大都是定性的、静态的分析方法, 难以反映人-机-环之间的动态交互, 对相同危险模式下因危险程度不同而带来的后果不同的问题分析不足<sup>[7]</sup>。在安全性仿真方面, 已经开展了基于模型的安全性仿真, 进行危险注入, 主要针对具体设备或一个具体的分系统运行机理, 将可能的故障模式进行注入, 仿真模拟此情况下系统状态的变化<sup>[8-9]</sup>。

本文提出了基于模糊推理的舰载机进舰过程安全性建模与仿真方法, 将危险模式描述为偏差, 即系统偏离正常情况下的状态, 并明确了偏差的属性。在此基础上基于模糊推理进行危险模式建模, 将定性的人-机-环交互影响描述转化为可用于仿真的定量描述。通过仿真分析明确危险模式、危险程度和危险发生的时刻点等关键因素的影响程度, 为进一步保证舰载机进舰安全提供基础。

收稿日期: 2012-02-24; 退修日期: 2012-04-11; 录用日期: 2012-04-20; 网络出版时间: 2012-10-25 17:10

网络出版地址: www.cnki.net/kcms/detail/11.1929.V.20121025.1710.003.html

\* 通讯作者. Tel.: 010-82316570 E-mail: ztd@buaa.edu.cn

**引用格式:** Li X L, Zhao T D. Carrier-based aircraft landing process safety simulation analysis based on fuzzy inference. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2013, 34(2): 325-333. 李晓磊, 赵廷弟. 基于模糊推理的舰载机进舰过程安全性仿真分析. *航空学报*, 2013, 34(2): 325-333.

## 1 舰载机进近着舰过程风险分析

### 1.1 舰载机进近着舰过程概述

舰载机截获下滑道入口后,驾驶员根据菲涅尔透镜光学助降系统(Fresnel Lens Optical Landing System, FLOLS)操纵舰载机沿下滑道下降,保持大约 $-3.5^\circ$ 的航迹角。FLOLS可发出5层不同颜色的与下滑道平行的光束,中间为橙色光束指示理想航迹,如果驾驶员看到的是橙色光束,表示舰载机已经在理想航迹上。此时,舰载机处在复杂的气流环境下,除了自然风场外,还受航母运动引发的扰流影响,其中最为显著的是称为“公鸡尾”的舰尾流。另外,由于航母甲板始终处于运动之中,幅度较大时可使舰尾抬高2 m左右,很可能造成较大的着舰偏差<sup>[10]</sup>。因此,这些外部影响因素会给驾驶员保持下滑航迹和精确着舰造成困难。

衡量舰载机进舰安全性及着舰精度的指标之一一是着舰偏差的大小。着舰偏差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。偏差等级分类标准如表1所示,本文着重考虑垂直高度偏差<sup>[5]</sup>。

表1 着舰偏差等级分类

Table 1 Landing deviation levels classification

Deviation type	Ideal value/m	Allowable value/m
Horizontal position deviation	-6.1-6.1	-12.2-12.2
Vertical height deviation	-0.76-1.52	-1.52-3.05
Lateral deviation	-1.52-1.52	-3.05-3.05

### 1.2 驾驶员操作偏差分析

在舰载机着舰过程中,人-机-环交互影响体现在人员对于飞机的控制量,进而影响飞机的飞行状态。人员操作偏差受到人员自身状态、环境状态以及设备状态等的影响。

其中人员自身状态包括:①心理状态(侥幸心理、思想麻痹大意、心不在焉、工作马虎、自满/自负、缺乏安全意识、急于完成任务、慌忙、应急事件影响、疲劳、疾病和睡眠不足等);②身体智力局限

(生理局限、缺乏处置负责情况的经验、理论/业务知识不足和以往经验干扰等);③准备状态不足(不熟悉程序/机场/航路/天气情况和飞行计划不适当等)。异常环境的影响主要为舰尾流、黑夜、雾和雨等。

人员的实际控制量 $P_a = P_c + P_e$ ,其中 $P_c$ 为在不考虑任何干扰情况下的理想控制量,假设其为正确; $P_e$ 为在人-机-环综合影响下的控制偏差,如图1所示。

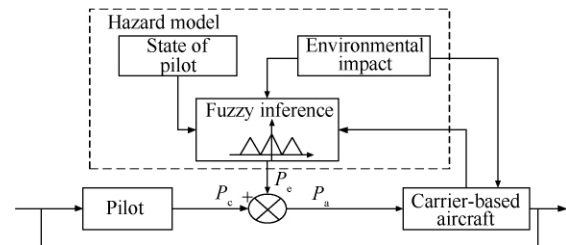


图1 驾驶员控制偏差

Fig. 1 Pilot control deviation

驾驶员控制偏差形式描述为 $P_e = \langle E, P_1, T, F \rangle$ ,其中: $E$ 为事件; $T$ 为偏差在行为过程中发生的时刻点; $F$ 为影响因素, $F = \langle F_R, F_H, F_S \rangle$ ,即人为因素 $F_R$ (包括设备运行的操作人员、管理人员和监控人员等)、环境因素 $F_H$ (能见度低、侧风)和设备因素 $F_S$ ;  $P_1$ 为偏差范围,具体包括两类:①确定性,如人员操作延时(偏差)的区间 $[t_1, t_2]$ ;②模糊性,如操作延时非常大、延时很大、延时较大和无延时等,在安全性分析中,通常属于模糊性偏差范围,本文主要针对此类型开展分析。

## 2 基于模糊推理的危险建模分析方法

### 2.1 基于模糊推理的驾驶员操作偏差建模

驾驶员控制偏差的模糊推理包含4个重要步骤:模糊化、蕴含关系提取、推理合成和反模糊化。模糊化是指输入变量为确定值形式,而输出变量用模糊变量表示,以满足模糊运算的要求,涉及模糊分类、范围的划分以及隶属函数的选取等。蕴含关系提取是指从推理规则库中提取输入与输出间的模糊映射关系。推理规则库的建立基于已有的领域知识和专家经验,通常以IF-THEN的形

式描述。推理合成是指实际输入与蕴含关系间的合成运算, 结果为输出值的模糊形式<sup>[11-13]</sup>, 具体描述如下。

1) 模糊控制的输入量包括人员状态  $R$ 、环境状态  $H$  以及设备状态  $S$ , 输出量为人员对系统的操作控制量  $P$ 。

2) 输入量模糊语言值包括: ①人员的状态  $R$ , 分为{状态非常差, 状态很差, 状态较差, 状态正常}, 即{PB, PM, PS, ZO}, 具体描述为{ $R_{PB}, R_{PM}, R_{PS}, R_{ZO}$ }; ②环境的状态  $H$ , 分为{环境非常恶劣, 环境很恶劣, 环境较恶劣, 环境正常}, 即{PB, PM, PS, ZO}, 具体描述为{ $H_{PB}, H_{PM}, H_{PS}, H_{ZO}$ }。以雾影响能见度的情况为例建立偏差范围, 如表 2 所示。

表 2 能见度偏差范围

Table 2 Visibility deviation range

Type	Deviation range/m
$R_{PB}$	<50
$R_{PM}$	50-200
$R_{PS}$	200-500
$R_{ZO}$	500-1 000

3) 设备(机)的状态分为{状态负大, 状态负中, 状态负小, 状态正常, 状态正小, 状态正中, 状态正大}, 即{NB, NM, NS, ZO, PS, PM, PB}, 具体描述为{ $S_{NB}, S_{NM}, S_{NS}, S_{ZO}, S_{PS}, S_{PM}, S_{PB}$ }。舰载机进舰高度是影响舰载机进舰安全的一个重要参数, 本文以高度为例建立高度偏差范围, 表 3 为高度偏差说明。

表 3 高度偏差说明

Table 3 Height deviation description

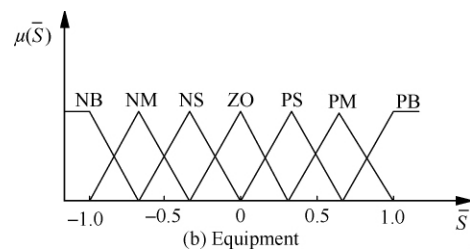
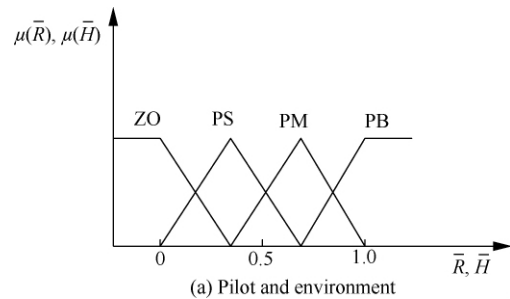
Type	Height deviation description
$S_{NB}$	Carrier-based aircraft is outside the borders of red light
$S_{NM}$	Carrier-based aircraft is in the red region
$S_{NS}$	Carrier-based aircraft is in the orange light on the border with the red boundary
$S_{ZO}$	Carrier-based aircraft is in the orange region
$S_{PS}$	Carrier-based aircraft is on the orange border and yellow border
$S_{PM}$	Carrier-based aircraft is in the yellow region
$S_{PB}$	Carrier-based aircraft is outside the borders of yellow light

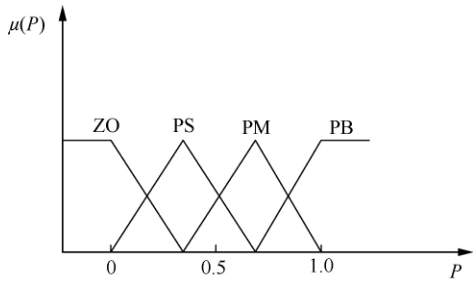
4) 归一化, 即将人员、设备和环境的状态表示量调整至  $(-1, 1)$  范围内, 具体描述为  $\bar{R} = \text{Saturation}(0, G_R R, 1)$ ,  $\bar{S} = \text{Saturation}(-1, G_S S, 1)$ ,  $\bar{H} = \text{Saturation}(0, G_H H, 1)$ , 其中:  $G_R R = 1/R_{\max}$ ,  $G_S S = 1/S_{\max}$ ,  $G_H H = 1/H_{\max}$ 。

5) 输出量, 即相对控制偏差量的绝对值  $|\bar{P}_e|$ , 其数学描述为  $|\bar{P}_e| = \left| \frac{P_e}{P_c} \right| \times 100\% = \left| \frac{P_a - P_c}{P_c} \right| \times 100\%$ 。  $P_e = \pm |\bar{P}_e| P_c$ , 当人员状态、环境以及飞机状态越恶劣时, 驾驶员控制相对于正常而言的偏差量的绝对值越大, 而实际偏差量的正负具有一定的随机性。在仿真中, 通过将其转化为控制量的偏差进行分析, 输出量状态分为{偏差非常大, 偏差很大, 偏差较大, 无偏差}, 即{PB, PM, PS, ZO}; 具体描述为{ $P_{PB}, P_{PM}, P_{PS}, P_{ZO}$ }。

由于三角形曲线形状简单、计算工作量小、可节约存储空间, 当输入量变化时, 比其他(例如正态分布)隶属函数具有更大的灵敏性, 因此本文采用三角隶属函数。人员与环境、设备以及人员操作控制量的隶属函数 ( $\mu(\bar{R}), \mu(\bar{H}), \mu(\bar{S})$  和  $\mu(P)$ ) 如图 2 所示。

建立模糊规则, 模糊规则共包含  $4 \times 4 \times 7 = 112$  个, 采用 IF-THEN 的规则, 其形式为: 如果  $\bar{R}_i = \bar{R}, \bar{S}_j = \bar{S}, \bar{H}_f = \bar{H}$ , 那么  $P_g = P$ , 其中:  $\bar{R}_i = \{ZO, PS, PM, PB\}, \bar{S}_j = \{NB, NM, NS, ZO, PS, PM, PB\}, \bar{H}_f = \{ZO, PS, PM, PB\}, P_g = \{ZO,$





(c) Pilot operation controlling variable

图 2 隶属函数

Fig 2 Membership function

PS,PM,PB},具体描述如表 4~表 7 所示。每条模糊条件语句只代表了一种情况下的控制策略,各条模糊条件语句决定的控制策略之间是并列关系。

表 4 模糊规则( $\bar{R}=ZO$ )

Table 4 Fuzzy rules ( $\bar{R}=ZO$ )

$\bar{S}$	$\bar{H}$			
	ZO	PS	PM	PB
NB	PS	PM	PB	PB
NM	PS	PS	PM	PB
NS	ZO	PS	PM	PB
ZO	ZO	ZO	PS	PM
PS	ZO	PS	PM	PB
PM	PS	PS	PM	PB
PB	PS	PM	PB	PB

表 5 模糊规则( $\bar{R}=PS$ )

Table 5 Fuzzy rules ( $\bar{R}=PS$ )

$\bar{S}$	$\bar{H}$			
	ZO	PB	PM	PB
NB	PM	PB	PB	PB
NM	PM	PM	PB	PB
NS	PS	PS	PM	PB
ZO	ZO	PS	PM	PM
PS	PS	PS	PM	PB
PM	PM	PM	PB	PB
PB	PM	PB	PB	PB

表 6 模糊规则( $\bar{R}=PM$ )

Table 6 Fuzzy rules ( $\bar{R}=PM$ )

$\bar{S}$	$\bar{H}$			
	ZO	PS	PM	PB
NB	PB	PB	PB	PB
NM	PM	PB	PB	PB
NS	PS	PM	PB	PB
ZO	ZO	PS	PM	PB
PS	PS	PM	PB	PB
PM	PM	PB	PB	PB
PB	PB	PB	PB	PB

表 7 模糊规则( $\bar{R}=PB$ )

Table 7 Fuzzy rules ( $\bar{R}=PB$ )

$\bar{S}$	$\bar{H}$			
	ZO	PS	PM	PB
NB	PB	PB	PB	PB
NM	PM	PB	PB	PB
NS	PM	PM	PB	PB
ZO	PS	PM	PB	PB
PS	PB	PB	PB	PB
PM	PM	PB	PB	PB
PB	PM	PM	PB	PB

根据模糊集理论,表 4~表 7 中的每条似然推理规则可用模糊运算进行描述。例如,对第 1 条规则( $\bar{R}=ZO$ ),可表达为

$$C_1 = \bar{R} \circ (\bar{R}_{ZO} \times P_{PS}) \cdot \bar{S} \circ (\bar{S}_{NB} \times P_{PS}) \cdot \bar{H} \circ (\bar{H}_{ZO} \times P_{PS}) \quad (1)$$

同样,其余各条规则(如  $C_2, C_3 \dots, C_{112}$ )可类似写出,表 4~表 7 中全部推理规则可概括为

$$C = C_1 + C_2 + \dots + C_{112} = \bar{R} \circ (\bar{R}_{ZO} \times P_{PS}) \cdot \bar{S} \circ (\bar{S}_{NB} \times P_{PS}) \cdot \bar{H} \circ (\bar{H}_{ZO} \times P_{PS}) + \dots + \bar{R} \circ (\bar{R}_{PB} \times P_{PB}) \cdot \bar{S} \circ (\bar{S}_{PB} \times P_{PB}) \cdot \bar{H} \circ (\bar{H}_{PB} \times P_{PB}) \quad (2)$$

式中: $+$ , $\cdot$ , $\times$ , $\circ$ 分别为模糊集理论中的并、交、笛卡尔积和组合运算。

本文采用质心法取模糊化的方法,即

$$P = \frac{\sum_{i=1}^n y_i \min(\mu_i(\bar{R}), \mu_i(\bar{H}), \mu_i(\bar{S}))}{\sum_{i=1}^n \min(\mu_i(\bar{R}), \mu_i(\bar{H}), \mu_i(\bar{S}))} \quad (3)$$

人员在操作飞机过程中,主要的控制量为升降舵偏转角  $\delta_z$  和油门杆偏转角  $\delta_p$ ,因此,偏差主要是体现在两个偏转角相对于正确操作的变化量。

本文为验证方法实用性,将舰载机进舰过程中  $\delta_z$  和  $\delta_p$  的相对控制偏差量  $|(\delta_z)_e|$  和  $|(\delta_p)_e|$  的绝对值范围定义如表 8 所示。

表 8 相对控制偏差量绝对值范围

Table 8 Absolute value range of relative controlling deviation

Parameter	Absolute value range			
	$P_{PB}$	$P_{PM}$	$P_{PS}$	$P_{ZO}$
$ (\delta_z)_e $	[100%, +∞)	[50%, 100%)	[20%, 50%)	[0, 20%)
$ (\delta_p)_e $	[100%, +∞)	[50%, 100%)	[20%, 50%)	[0, 20%)

## 2.2 基于模糊推理的着舰过程安全仿真模型

在现有驾驶员变策略控制模型基础上, 增加人-机-环之间的模糊推理模型, 描述在环境和设

备的影响下人员操作偏差进一步影响飞机的状态变化。基于模糊推理的着舰过程安全仿真模型描述如图 3 所示。

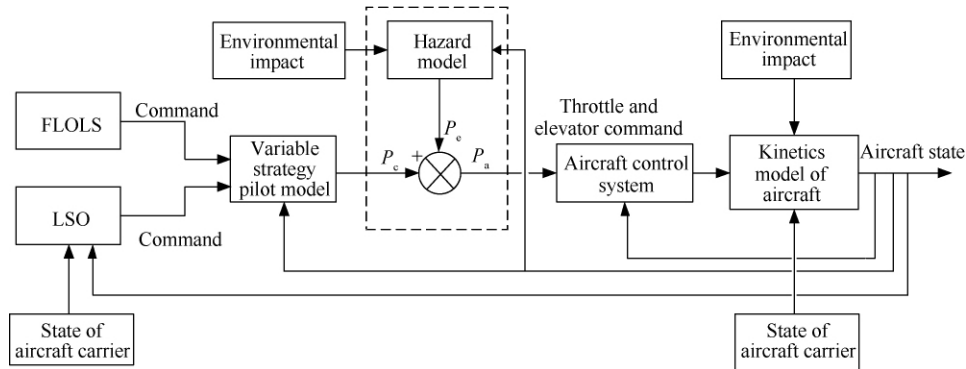


图 3 基于模糊推理的进舰过程安全仿真模型

Fig. 3 Landing process safety simulation model based on fuzzy inference

舰载机的进舰过程涉及到飞机本体运动、驾驶员操纵、舰尾流扰动和航母运动等, 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, 故可采用小扰动线性化方程, 即

$$\begin{cases} \dot{x} = Ax + Bu + Ew \\ y = Cx + Du \end{cases} \quad (4)$$

式中: 状态向量  $x = [v \ \alpha \ \vartheta \ \omega_z \ h]^T$ ,  $v$  为舰载机飞行速度扰动量,  $\alpha$  为扰动迎角,  $\vartheta$  为扰动俯仰角,  $\omega_z$  为扰动俯仰角速度,  $h$  为扰动高度变化量; 控制向量  $u = [\delta_z \ \delta_p]^T$ ; 输出向量  $y = [\theta \ n_y \ v \ \alpha \ \vartheta \ \omega_z \ h]$ ,  $\theta$  为扰动航迹角,  $n_y$  为扰动纵向过载;  $A$ 、 $B$ 、 $C$ 、 $D$  和  $E$  均为状态矩阵。

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<sup>[14]</sup>。

3) 舰尾流模型。采用美国军标规范 MIL 2F28785C 中给出的海上大气扰动模型, 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<sup>[15]</sup>。

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六自由度运动。

5) 着舰信号指挥官(Landing Signal Officer,

LSO)模型。采用模糊控制理论模拟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<sup>[16]</sup>。

6) 危险模型。建立基于模糊控制理论的危险模型。

## 3 舰载机进近着舰安全仿真分析

在以上方法研究的基础上, 基于 Simulink 开展舰载机进近着舰安全仿真分析, 进而分析验证危险模式、危险程度和危险发生的时刻点等关键因素的影响程度。

初始条件设置为当舰载机截获下滑道时, 飞机速度为 70 m/s, 航迹角为  $-3.5^\circ$ , 初始俯仰角为  $2.71^\circ$ , 航母行驶速度为 12.86 m/s。考虑事件为飞行过程中着舰指挥官指出舰载机飞行高度出现偏差, 此时驾驶员需要采取偏差修正的应急操作, 在综合考虑人员、环境及设备状态的影响下, 人员操作出现偏差。

仿真案例 1 同样的危险模式及危险程度, 发生的时刻点不同。具体测试用例如表 9 所示, 仿真分析结果如图 4 所示, 图中  $H_1$  -  $H_4$ 、 $\delta_{z1}$  -  $\delta_{z4}$ 、 $\delta_{p1}$  -  $\delta_{p4}$ 、 $\gamma_1$  -  $\gamma_4$  和  $V_{k1}$  -  $V_{k4}$  分别为事件 1-事件 4 的飞行高度、升降舵偏转角、油门杆偏转角、航迹角和空速。

表 9 仿真案例 1  
Table 9 Simulation case 1

No.	Event	Factors	Time/s
1	State of pilot, environment and aircraft is normal		
2	Deviation correction error in the flight	State of pilot is poor 200 m < visibility < 500 m carrier-based aircraft is in the red region	0
3	Deviation correction error in the flight	State of pilot is poor 200 m < visibility < 500 m carrier-based aircraft is in the red region	10
4	Deviation correction error in the flight	State of pilot is poor 200 m < visibility < 500 m carrier-based aircraft is in the red region	15

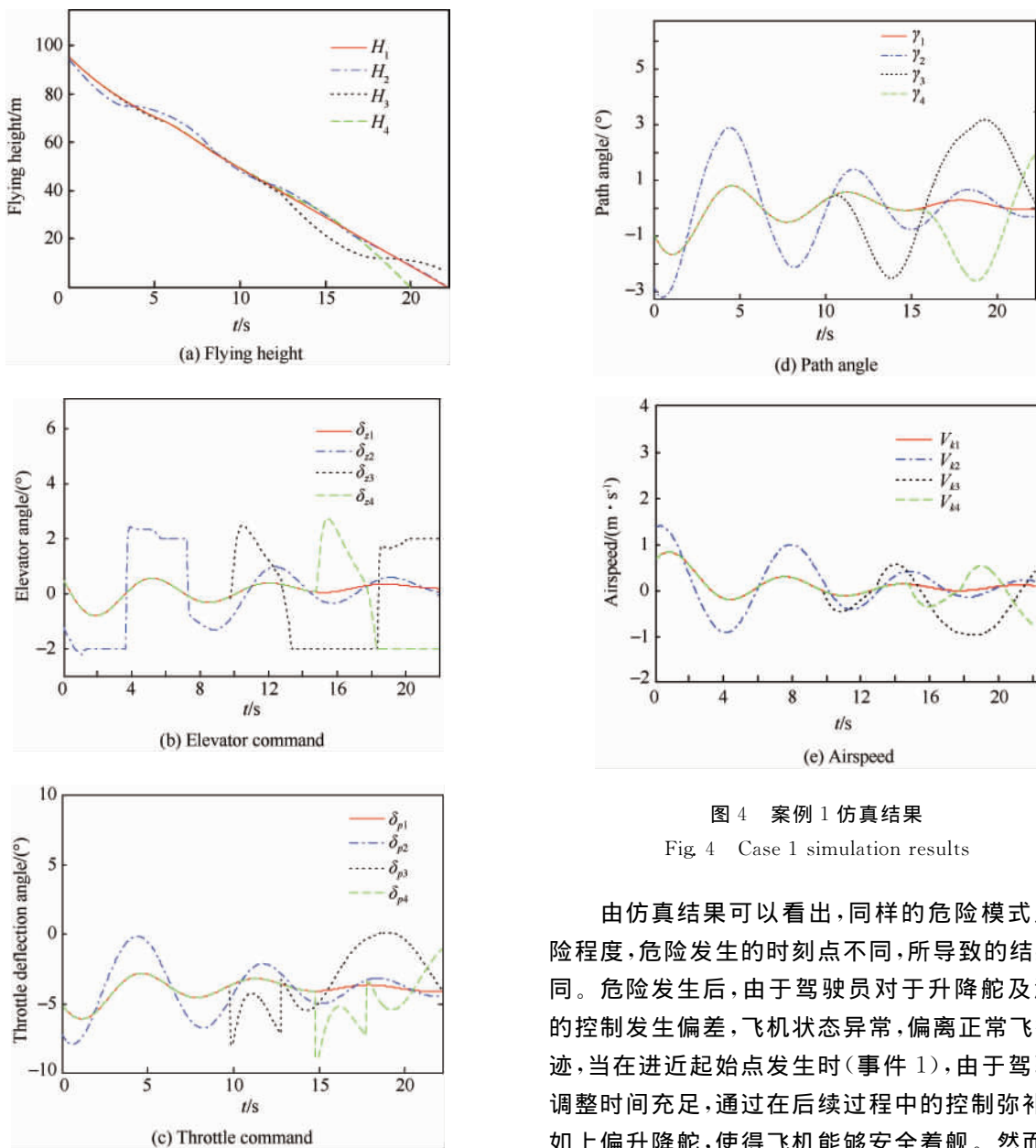


图 4 案例 1 仿真结果  
Fig. 4 Case 1 simulation results

由仿真结果可以看出,同样的危险模式及危险程度,危险发生的时刻点不同,所导致的结果不同。危险发生后,由于驾驶员对于升降舵及油门的控制发生偏差,飞机状态异常,偏离正常飞行轨迹,当在进近起始点发生时(事件 1),由于驾驶员调整时间充足,通过在后续过程中的控制弥补,比如上偏升降舵,使得飞机能够安全着舰。然而,当

危险在 10 s(事件 3)和 15 s(事件 4)发生时,驾驶员无法实施有效的调节而出现事故,而且发生时刻点越晚,飞机偏离的程度越大,导致的后果越严重。

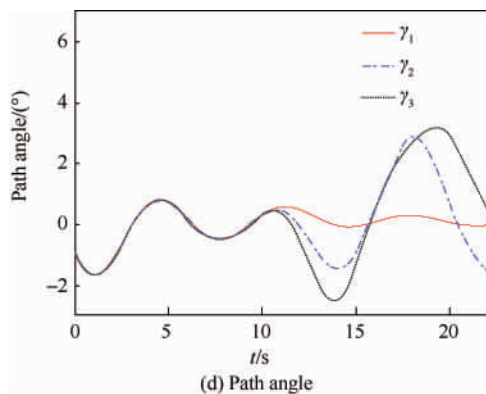
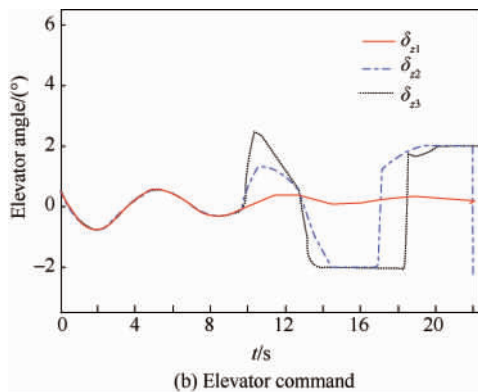
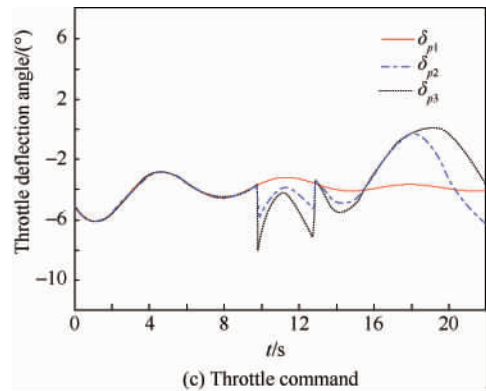
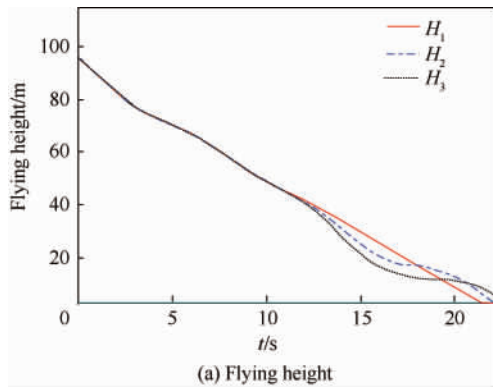
仿真案例 2 发生的时刻点相同,危险模式和危险程度不同,具体测试用例如表 10 所示,仿真分析如图 5 所示。

由仿真结果可以看出,在相同的时刻点,危险

模式和危险程度不同时,所导致的结果也不同。当危险级别较低时(事件 1),飞机轨迹偏离不大,驾驶员能够在后续过程中弥补使得飞机安全着舰。当危险级别较高时(事件 3),驾驶员无法实施有效的调节而导致发生事故,而且发生的危险程度越大,飞机轨迹偏离的越大,导致的后果越严重。

表 10 仿真案例 2  
Table 10 Simulation case 2

No.	Event	Factor	Time/s
1	Deviation correction error in the flight	State of pilot is normal visibility is normal carrier-based aircraft is normal	10
2	Deviation correction error in the flight	State of pilot is poor 200 m < visibility < 500 m carrier-based aircraft is normal	10
3	Deviation correction error in the flight	State of pilot is worse 50 m < visibility < 200 m carrier-based aircraft is in the red region	10



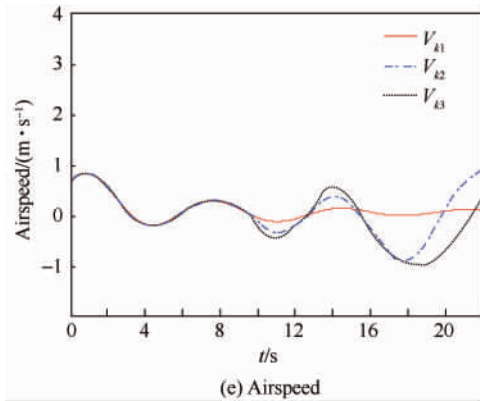


图5 案例2仿真结果

Fig. 5 Case 2 simulation results

## 4 结论

1) 考虑舰载机进舰过程中驾驶员控制的不确定性,提出了基于模糊推理的人-机-环交互影响的危险建模方法,将传统安全性分析方法所得的定性危险模式转化为可用于仿真的定量模型。

2) 以危险模型注入的形式,结合舰载机进舰过程的控制模型,建立着舰过程安全性仿真模型,用于开展安全性分析。

3) 通过仿真可以看出危险模式及危险发生时刻点不同,导致的后果亦不同。为确保安全,在设计方面,需要通过训练提高人员自身素质和通过系统设计降低系统发生故障和状态偏差的概率。与此同时,在系统运行过程中,应重视危险发生时刻点,根据不同的危险发生时刻及危险状态,建立相应的应急措施及应急预案,以尽可能降低事故发生概率。

## 参 考 文 献

[1] Shi Q H. Study on control technology for carrier aircraft landing research on carrier landing technology. Harbin: Harbin Engineering University, 2006. (in Chinese)  
史青海. 舰载机着舰控制技术研究. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2006.

[2] Rudowsky T, Hynes M, Luter M, et al. Review of the carrier approach criteria for carrier-based aircraft phase I: final report. NAWCADPAX/TR-2002-71, 2002.

[3] Yan Z P. Study on the automatic carrier landing system. Shanghai: Fudan University, 2009. (in Chinese)  
颜振萍. 舰载机自动着舰控制系统研究. 上海: 复旦大学

学, 2009.

[4] Li H. Study and design on automatic carrier landing system. Harbin: Harbin Engineering University, 2009. (in Chinese)  
李卉. 舰载机自动着舰控制系统研究与设计. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2009.

[5] Xu D S, Liu X Y, Wang L X. Influence of changeful wind on landing safety of carrier-based airplane. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2010, 36(1): 77-81. (in Chinese)  
许东松, 刘星宇, 王立新. 变化风场对舰载飞机着舰安全性影响. 北京航空航天大学学报, 2010, 36(1): 77-81.

[6] Shi L. Influence of disturbances on ship-based aircraft's landing process. Computer Simulation, 2009, 26(12): 46-48, 61. (in Chinese)  
施亮. 各扰动对舰载机着舰过程的影响分析. 计算机仿真, 2009, 26(12): 46-48, 61.

[7] National Defense Science and Technology Industry Committee. GJB/Z 99-97 Engineering handbook for system safety. Beijing: Standards Press of China, 1997.  
国防科学技术工业委员会. GJB/Z 99-97 系统安全工程手册. 北京: 中国标准出版社, 1997.

[8] Chaudemar J C, Bensana E, Seguin C. Model based safety analysis for an unmanned aerial system. Dependable Robots in Human Environments, 2010.

[9] Bretschneider M, Holberg H J, Bode E, et al. Model-based safety analysis of a flap control system. Proceedings of 14th Annual International Symposium, 2004.

[10] Wang Y G, Qu X J. Modeling and simulation of carrier approach and landing. Journal of System Simulation, 2008, 20(24): 6592-6594, 6598. (in Chinese)  
王延刚, 屈香菊. 舰载机进舰着舰过程仿真建模. 系统仿真学报, 2008, 20(24): 6592-6594, 6598.

[11] Wang G C, Cheng J, Bao C M, et al. Diagnosis method of aero-engine fault based on fuzzy inference and evidence theory. Journal of Aerospace Power, 2011, 26(9): 2101-2106. (in Chinese)  
王古常, 成坚, 鲍传美, 等. 模糊推理和证据理论融合的航空发动机故障诊断. 航空动力学报, 2011, 26(9): 2101-2106.

[12] Du W J. Study of several key problems on fuzzy control system. Xi'an: Xidian University, 1999. (in Chinese)  
杜文吉. 模糊控制系统中的若干关键问题研究. 西安: 西安电子科技大学, 1999.

[13] Xing Z Y. Fuzzy modeling and control of complex industrial processes. Beijing: China Academy of Railway Sciences, 2003. (in Chinese)  
邢宗义. 复杂工业过程的模糊建模与控制. 北京: 铁道科学研究院, 2003.

[14] Qu X J, Cui H L. Variable strategy pilot model of carrier



- landing approach. *Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics*, 2003, 29(11): 993-997. (in Chinese)
- 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. *北京航空航天大学学报*, 2003, 29(11): 993-997.
- [15] Li C Z, Xiao Y L, Fang Z P, et al. Military specification; the background and guide for flying quality of piloted airplanes (MIL-F-8785C). Xi'an: Flight Dynamics Journal Office, 1985. (in Chinese)
- 李成忠, 肖业轮, 方振平, 等. 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.
- [16] Shi M, Cui H L, Qu X J. Modeling landing signal officer for carrier approach. *Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics*, 2006, 32(2): 135-138.
- 石明, 崔海亮, 屈香菊. 舰载飞机进舰降落信号员模型建模. *北京航空航天大学学报*, 2006, 32(2): 135-138.
- 作者简介:  
 李晓磊 男, 博士研究生. 主要研究方向: 系统安全, 安全性分析与评价。  
 Tel: 010-82317665  
 E-mail: xiaoke0813@163.com
- 赵廷弟 男, 博士, 教授, 博士生导师. 主要研究方向: 系统安全, 安全性分析与评价, 可靠性系统工程。  
 Tel: 010-82316570  
 E-mail: ztd@buaa.edu.cn

## Carrier-based Aircraft Landing Process Safety Simulation Analysis Based on Fuzzy Inference

LI Xiaolei, ZHAO Tingdi \*

*School of Reliability and Systems Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China*

**Abstract:** Carrier-based aircraft landing is a complex process, its safety largely depending on the control deviation of the pilot which is again influenced by a combination of the state of the physical condition of the pilot, the environment and the equipment (carrier-based aircraft). Taking a certain type of foreign carrier-based aircraft as an example, this paper provides a method of carrier-based aircraft landing process safety modeling and simulation based on fuzzy inference. The uncertainty of pilot control during the process of carrier-based aircraft landing is considered, and this method analyzes the influencing factors of the uncertainty from the point of view of human-machine-environment. A hazard model is presented based on fuzzy inference, on the basis of this model, a safety simulation model of the landing process is proposed. And then the degree of influence of key factors, such as hazard mode, criticality, and hazard occurrence time, etc., is determined from simulation analysis which lays the foundation for safe carrier-based aircraft landing.

**Key words:** system safety; carrier-based aircraft; landing; safety simulation; fuzzy inference