文章编号:1674-8190(2026)05-081-09

飞行员操纵技能对进近阶段飞行安全影响研究

毛海涛,张柱柱,胡文林,刘宇麟
(中国人民解放军92728部队,上海 200436)

摘 要: 飞行员操作失误是导致飞行事故的主要原因,为了评估飞行员操纵技能对进近阶段飞行安全风险的影响,基于飞行动力学建立考虑飞行员技能水平的进近阶段飞行动力学模型。将飞行员技能水平转化为飞行操纵量概率分布函数,建立飞行员操纵模型,基于蒙特卡洛仿真方法重构飞行员进近操纵过程,实现飞行员操纵技能对进近阶段飞行安全风险的定量评估。结果表明:本文提出的模型可以有效模拟不同飞行员技能水平对进近飞行安全偏差的影响,飞行员操纵技能的改善显著提升了进近成功率,当飞行员操纵变量概率分布标准差由1.50降至0.75时,进近成功率由67.36%提升至99.69%。研究结果可为飞行安全风险评估和飞行员操纵技能水平评定提供参考。

关键词: 飞行员技能;飞行动力学;进近飞行;飞行安全;风险评估
中图分类号: V328; V323 **文献标识码:** A
DOI: 10.16615/j.cnki.1674-8190.2026.05.09

Research on the impact of pilot control skills on flight safety during approach stage

MAO Haitao, ZHANG Zhuzhu, HU Wenlin, LIU Yulin
(92728 Unit of the Chinese People's Liberation Army, Shanghai 200436, China)

Abstract: Pilot operational errors are the main cause of flight accidents. In order to evaluate the impact of pilot control skills on the safety risks during the approach stage, an approach stage flight dynamics model considering the pilot's skill level is established based on flight dynamics. The pilot's skill level is transformed into a probability distribution function of flight control variables, and a pilot control model is established. The pilot's approach control process is reconstructed based on Monte Carlo simulation method, achieving a quantitative evaluation of the pilot's control skills on the safety risks during the approach stage. The research results indicate that the model proposed in this paper can effectively simulate the impact of different pilot skill levels on approach flight safety deviation. The improvement of pilot control skills significantly increases the success rate of approach. When the standard deviation of the probability distribution of pilot control variables decreases from 1.50 to 0.75, then the success rate of approach increases from 67.36% to 99.69%. The research results can provide reference for flight safety risk assessment and pilot control skill level evaluation.

Key words: pilot skill; flight dynamics; approach flight; flight safety; risk assessment

收稿日期: 2025-06-22; **修回日期:** 2025-08-29
基金项目: 武器装备预研项目(3020303010601)
通信作者: 张柱柱(1992—),男,博士,工程师。E-mail: 352779783@qq.com
引用格式: 毛海涛,张柱柱,胡文林,等. 飞行员操纵技能对进近阶段飞行安全影响研究[J]. 航空工程进展,2026,17(5):81-89.
MAO Haitao, ZHANG Zhuzhu, HU Wenlin, et al. Research on the impact of pilot control skills on flight safety during approach stage[J]. Advances in Aeronautical Science and Engineering, 2026, 17(5): 81-89. (in Chinese)

0 引 言

飞机进近着陆是飞行安全中需重点关注的阶段，据统计有半数的飞行事故发生在进近着陆阶段[1]。根据国际航空运输组织的相关统计表明，2017—2021年间造成飞行事故的主要原因均与飞行机组直接相关，其中飞行员操作失误是最主要的类型[2]。在飞机进近着陆过程中，受到飞机状态、飞行员技能水平、气流环境等多种因素的影响，飞行员需根据飞机自身状态和环境变化时刻调整飞机姿态和航迹，以保证飞机始终位于正确的下滑道内，飞行员操纵过程复杂频繁，且可供飞行员处理特情的时间极短，飞行员的技能水平、飞行经验、心理因素等都可能对飞行安全造成影响[3]。通过分析飞行员的操纵技能水平，能够监测飞行参数超限，并进一步有针对性地规范飞行员操作行为，对降低飞行员操纵风险，预防飞行事故发生具有重要意义。

目前对于飞行员操纵风险评估研究主要包括超限事件监测[4]、飞行动作识别[5-6]和行为模式匹配[7-8]等3个方面。超限事件监测是通过对飞行超限事件进行统计分析，深入剖析飞行风险、优化组织模式，达到提升飞行安全水平的作用。张帅[9]结合快速存取记录器(Quick Access Recorder，QAR)数据对飞行品质监控中的超限裕度模型进行多参数综合量化，运用贝叶斯理论建立相关性超限事件集，并构建基于反向传播(BP)神经网络的超限裕度模型，实现对飞行品质的整体量化监控；李孟格[10]通过解析挖掘QAR数据中航班终端因素和超限航班的关联关系，运用机器学习方法识别和预测QAR严重超限事件的发生概率；Puranik等[11-12]提出了一种基于能量指标的聚类方法，可用于识别通用航空中的飞行操作异常；Matthews等[13]提出了一种识别航空安全事件前兆的数据挖掘方法，可在飞行质量数据中发现和识别重大超限事件；陈农田等[14]提出了一种基于熵权层次模糊灰色聚类的飞行进近着陆操纵绩效综合评估方法。

基于飞行技术动作识别的评估是基于飞行数据对飞行技术动作进行识别，进而评估飞行质量的方法。刘浩等[15]根据专家经验与先验知识构建基于动态贝叶斯网络的战斗机机动动作识别模型，建立飞行训练评估指标体系和灰度模糊评估矩阵，实现战斗机飞行训练评估；Wei Z L等[16]将无人机机动动作识别为多维时间序列的时空对准问题，采用多策略仿射正则时间翘曲方法提高了无人机机动动作的识别效率；Jarry等[17]运用函数主成分分析和层次聚类检测方法，基于雷达数据建立了不稳定进近检测模型；朱立成等[18]通过构建采用多尺度特征提取的深度残差网络实现了战术机动动作的准确识别，并基于博弈论构建了基于机动动作类型识别的飞行员飞行训练质量自动评估方法。

基于行为模式匹配的评估是基于飞行参数对飞行操作模式进行识别，进而评估飞行操作风险的方法。Jiao Y等[19]针对B737飞机开展研究，基于QAR数据建立了304.8 m以下不稳定进近的经验模型；郑磊等[20]基于QAR数据采用聚类挖掘方法分析飞行操作模式与QAR监控指标值的关联关系，量化不同飞行操作模式的风险水平；孙瑞山等[21]采用高斯混合模型对不同风格飞行员的QAR数据进行聚类分析，运用方差分析方法对不同操作风格飞行员的操作风险进行了分析评估。

对于进近阶段飞行安全风险的评估方法主要分为两大类：一类是通过系统仿真方法模拟飞机进近着陆过程，分析人、机、环境、管理等因素对飞行安全的影响[22]；另一类方法是利用故障树分析、层次分析法、模糊评价法等可靠性评价方法，通过分解进近过程并划分权重实现对飞行安全风险的评估[23]。Tsai等[24]采用深度学习方法分析轨迹和下滑道角度偏差变量对进近阶段安全风险的影响，获得偏差变量对模型预测的影响程度；Ayala等[25]研究了不同任务难度对飞行员着陆过程中信息处理能力的影响。

综上所述，国内外已在飞行进近阶段风险识别和评估方面取得了一系列研究成果，但层次分析法等人因差错评估方法无法反映飞行员操纵对飞机进近状态的实时影响；基于现有飞行数据结合参数分析方法进行风险评估，无法准确反映不同技能水平飞行员操纵的影响。因此，为了评估飞行员技能水平对进近阶段飞行安全风险的影响，本文基于飞行动力学建立进近阶段飞行动力学模型，将飞行员技能水平转化为飞行操纵量概率分布函数，运用蒙特卡洛仿真方法对飞行员进

近操纵过程进行计算机仿真,分析不同技能水平飞行员的进近安全风险,以期为飞行安全风险评估和飞行员操纵技能水平评定提供参考。

1　飞行安全风险评估模型

1.1　飞行动力学模型

飞机在飞行过程中的状态通常用飞行动力学模型进行描述[26-28]。飞行动力学模型是一个包含12个微分方程的非线性方程组,很难对其进行直接求解。而飞机在进近过程中,其飞行速度、迎角和下滑角等参数基本保持不变,因此为简化计算模型,可以用飞行器质心纵向运动方程表示飞机进近过程,其形式为

$$\begin{cases} m\dfrac{\mathrm{d}V}{\mathrm{d}t}=P\cos(\alpha+\sigma)-D-mg\sin\gamma \\ mV\dfrac{\mathrm{d}\gamma}{\mathrm{d}t}=P\sin(\alpha+\sigma)+L-mg\cos\gamma \\ I_y\dfrac{\mathrm{d}q}{\mathrm{d}t}=M+Pe \end{cases} \tag{1}$$

式中:m为飞行器质量;V为飞行速度;α为迎角;σ为发动机安装角;γ为速度倾角;P为发动机推力;D为气动阻力;L为气动升力;g为重力加速度;I_y为俯仰转动惯量;q为俯仰角速度;M为气动俯仰力矩;e为推力偏心距。

令F_t为切向力,F_n为法向力,M_s为总俯仰力矩,则

$$\begin{cases} F_t=P\cos(\alpha+\sigma)-D \\ F_n=P\sin(\alpha+\sigma)+L \\ M_s=M+Pe \end{cases} \tag{2}$$

考虑函数关系:

$$\begin{cases} P=P(V,h,\alpha,\delta_P) \\ D=\dfrac{1}{2}\rho V^2SC_D \\ C_D=C_D(Ma,Re,\alpha,\delta_e) \\ L=\dfrac{1}{2}\rho V^2SC_L \\ C_L=C_L(Ma,\alpha,\delta_e,q,\dot{\alpha}) \\ M=\dfrac{1}{2}\rho V^2S_CC_m \\ C_m=C_m(Ma,\alpha,\delta_e,q,\dot{\alpha}) \end{cases} \tag{3}$$

式中:S为参考面积;h为高度;ρ为空气密度;C_D为阻力系数;C_L为升力系数;C_m为气动俯仰力矩系数;Ma为马赫数;Re为雷诺数;α为迎角;δ_P为油门杆控制量;δ_e为舵面控制量。

于是式(1)的线性化结果为

$$\begin{cases} m\dfrac{\mathrm{d}\Delta V}{\mathrm{d}t}=\Delta F_t-mg\cos\gamma_0\Delta\gamma \\ mV_0\dfrac{\mathrm{d}\Delta\gamma}{\mathrm{d}t}=\Delta F_n-mg\sin\gamma_0\Delta\gamma \\ I_y\dfrac{\mathrm{d}\Delta q}{\mathrm{d}t}=\Delta M+\Delta Pe \end{cases} \tag{4}$$

将式(4)写为矩阵形式,则有

$$\begin{bmatrix} m & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -mV_0-L_{\dot{\alpha}} & 0 & 0 \\ 0 & -M_{\dot{\alpha}} & I_y & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}\begin{bmatrix} \Delta\dot{V} \\ \Delta\dot{\alpha} \\ \Delta\dot{q} \\ \Delta\dot{\theta} \end{bmatrix}=$$

$$\begin{bmatrix} P_V\cos(\alpha_0+\sigma)-D_V & P_\alpha\cos(\alpha_0+\sigma)-P_0\sin(\alpha_0+\sigma)-D_\alpha+mg\cos\gamma_0 & 0 & -mg\cos\gamma_0 \\ P_V\sin(\alpha_0+\sigma)+L_V & P_\alpha\sin(\alpha_0+\sigma)+P_0\cos(\alpha_0+\sigma)+L_\alpha-mg\sin\gamma_0 & -mV_0+L_q & mg\sin\gamma_0 \\ M_V+P_Ve & M_\alpha+P_\alpha e & M_q & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}\cdot$$

$$\begin{bmatrix} \Delta V \\ \Delta\alpha \\ \Delta q \\ \Delta\theta \end{bmatrix}+\begin{bmatrix} P_{\delta_P} & -D_{\delta_e} \\ P_{\delta_P}\sin(\alpha_0+\sigma) & L_{\delta_e} \\ P_{\delta_P}e & M_{\delta_e} \\ 0 & 0 \end{bmatrix}\begin{bmatrix} \Delta\delta_P \\ \Delta\delta_e \end{bmatrix} \tag{5}$$

式中:θ为俯仰角。

式(5)中出现的气动力和力矩的导数,需用量纲为1的空气动力学导数来表示[29]。

令状态矩阵和控制矩阵分别为

$$\boldsymbol{X}=[\Delta V\ \ \Delta\alpha\ \ \Delta q\ \ \Delta\theta] \tag{6}$$

$$\boldsymbol{U}=[\Delta\delta_P\ \ \Delta\delta_e] \tag{7}$$

则可将式(5)整理为状态方程的标准形式:

$$\dot{\boldsymbol{X}}=\boldsymbol{A}\boldsymbol{X}+\boldsymbol{B}\boldsymbol{U} \tag{8}$$

1.2 飞行员控制模型

为实现对飞行员操纵技能的评估，需建立飞行员操纵模型，目前飞行员操纵飞机的人机闭环控制模型通常按照飞行员采集信息的性质，分为补偿系统、跟踪系统、预先认知吸引和预先显现系统[30]。对于进近阶段，主要采用补偿系统和跟踪系统，飞行员通过采集到的系统误差信息，不断操纵修正飞机。在飞行过程中，飞行员采取连续跟随操纵策略，根据引导系统提供的理想下滑道，通过操纵油门开度和舵面偏角实时精确地修正飞机姿态和航迹，控制飞机跟踪理想下滑航迹完成进近[31]，如图1所示。

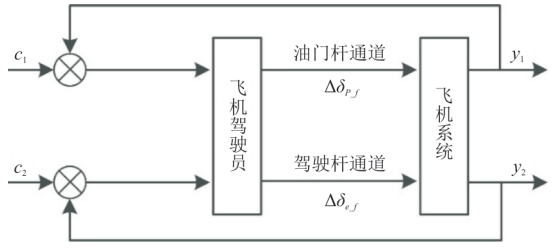

图1 飞行员操纵控制模型

Fig. 1 Pilot control model

本文中飞行员采用连续控制策略，通过油门 $\Delta\delta_P$ 和操纵杆 $\Delta\delta_e$ 对飞机姿态和航迹进行小偏差修正。为了评估飞行员技能水平对进近过程安全性的影响，引入飞行员操纵变量概率分布模型，将飞行员技能水平对飞机进近过程中的操纵修正误差量转化为概率分布模型。

$$\Delta\delta_{P_f}=f(\Delta\delta_P) \tag{9}$$

$$\Delta\delta_{e_f}=g(\Delta\delta_e) \tag{10}$$

将式(9)～式(10)代入式(7)，可得：

$$\boldsymbol{U}_f=[\Delta\delta_{P_f}\ \ \Delta\delta_{e_f}] \tag{11}$$

将式(11)代入式(8)可得到考虑飞行员控制模型的飞机进近阶段状态方程：

$$\dot{\boldsymbol{X}}=\boldsymbol{A}\boldsymbol{X}+\boldsymbol{B}\boldsymbol{U}_f \tag{12}$$

1.3 飞行安全风险仿真计算流程

在建立的飞行员操纵模型基础上，利用蒙特卡洛仿真方法重构飞机进近阶段飞行员飞行操纵过程，实现飞行员操纵技能对飞行安全风险的定量评估。蒙特卡洛仿真方法是描述装备运行过程中各种随机现象的基本方法，能够充分体现随机因素对装备运行过程的影响和作用，因而在装备效能评估中具有重要地位[32-34]。基于蒙特卡洛的飞行安全风险评估流程(如图2所示)如下：

1) 根据飞机飞行参数特征确定进近阶段初始状态，包括飞机质量、飞行速度、俯仰角、迎角、下滑角、距离、高度偏差等；

2) 由飞机飞行动力学模型计算飞机进近的实时轨迹，获得进近过程中飞机航迹实时偏差；

3) 飞行员控制模型采取连续跟随策略，引入飞行员飞行技能水平影响，将飞行员技能水平转化为飞行操纵量概率函数，建立飞行员操纵模型，通过操纵油门和舵偏控制飞机姿态和航迹，对步骤2)获得的进近偏差进行修正；

4) 重复步骤2)～步骤3)，直至飞机完成进近；

5) 计算飞机实际着陆点与理想着陆点的偏差，并判断着陆偏差是否超出安全范围；

6) 对进近过程进行 n 次仿真，并记录下超出进近安全范围的风险次数 N，获得飞机进近阶段安全风险概率 η。

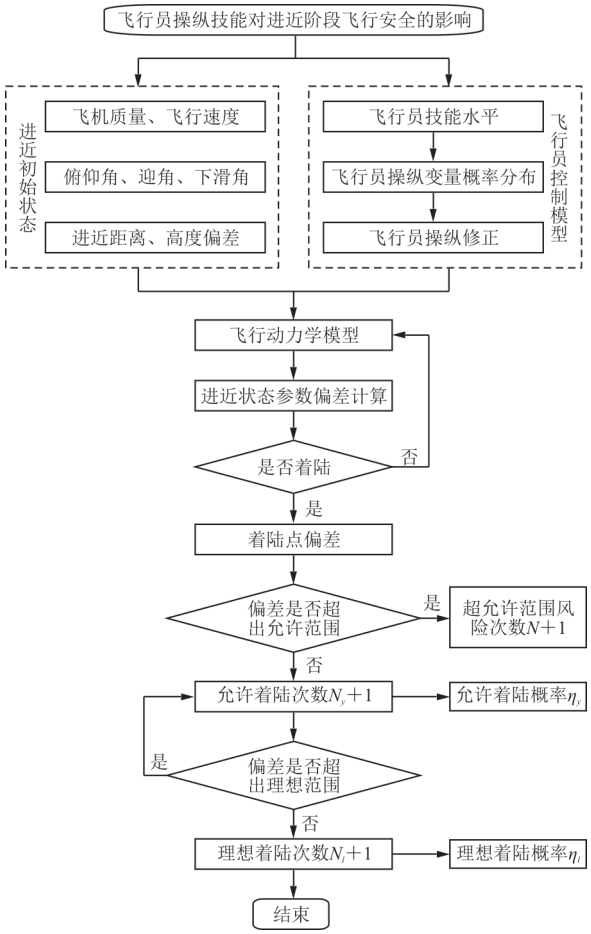

图2 进近阶段风险仿真计算流程

Fig. 2 Risk simulation calculation process during the approach stage

2　飞行安全风险仿真结果与分析

飞机进近着陆安全风险最高,而进近着舰过程风险则更高,因此为验证本文所提出的风险评估方法,以进近着舰过程为例,对提出的进近阶段飞行安全风险评估方法进行分析验证。在进近着舰过程中,为保证飞机准确落在飞行甲板上,飞行员需在助降系统的引导下控制飞机使其保持在正确的下滑道内。不同于飞机着陆进近过程,着舰进近过程还会受到平台运动和舰尾流等多种因素的影响,因此本文将平台运动也考虑到进近过程的安全风险分析中。

2.1　飞行安全评估模型构建

2.1.1　模型初始参数

假设飞机在距离 1 800 m、高度 110 m 处进入进近下滑道,并在助降系统的引导下完成进近,进近初始参数如表 1 所示。

表 1　进近初始参数

Table 1　Initial parameters of approach stage

参数	数值	参数	数值
进近质量 m/kg	21 000	迎角 α/(°)	12
进近速度/(m·s^{-1})	70	下滑角 γ/(°)	3.5
俯仰角 θ/(°)	8.5	高度偏差 ΔH/m	0

2.1.2　飞行安全偏差

为了保证飞行安全,进近下滑段的风险评估包含高度、对中和迎角偏差 3 项指标。其中,高度偏差对应于飞机实际着舰点与理想着舰点的水平位置偏差和垂直高度偏差,对中偏差对应于实际着舰点与理想着舰点的横向中心偏差。本文的安全着舰偏差范围设置如表 2 所示。

表 2　进近阶段飞行安全偏差等级

Table 2　Flight safety deviation level during approach stage

类型	理想偏差/m	允许偏差/m
垂直高度	−0.37～0.37	−0.73～0.73
水平位置	−6～6	−12～12

2.1.3　平台运动模型

在复杂海况下,航母将随波浪起伏上下前后摇晃,飞行甲板运动幅度较大时,将对进近安全造成严重影响。因此,在复杂海况下,飞行员需对甲板运动造成的安全偏差进行修正以保证飞行安全。为了更加准确地分析进近飞行安全风险,考虑平台运动对飞行安全风险的影响。

飞行甲板随海浪波动的运动是三轴六自由度的不规则运动,包括横摇、纵摇、艏摇、横荡、纵荡和垂荡[35]。其中,飞行甲板的纵摇和垂荡运动对飞机理想着舰点的位置偏差影响最大[36],为了简化计算,本文在仿真计算中仅考虑甲板纵摇和垂荡运动的影响。

本文参照文献[29]中给出的飞行甲板纵摇 θ_s 和垂荡 H_s 运动方程,如式(13)～式(15)所示。

$$\Delta H=\Delta H_0+0.5\Delta H_1 \tag{13}$$

$$H_s(s)=\frac{0.353\,568\,s(s+0.04)}{(s^2+0.16\,s+0.16)(s^2+0.22s+0.302\,5)} \tag{14}$$

$$\theta_s(s)=\frac{0.334\,059\,s}{(s^2+0.22\,s+0.302\,5)(s^2+0.384\,s+0.409\,6)} \tag{15}$$

由式(13)～式(15)计算得到的平台运动对飞行安全偏差为

$$H_{\mathrm{DMC}}=H_s+0.5\times\frac{L_f}{57.33}\theta_s \tag{16}$$

式中,H_{DMC} 为理想着舰点的高度变化;L_f 为理想着舰点距母舰尾部的距离。

平台运动对飞行安全偏差的影响如图 3 所示,加入平台运动信号的飞行员操纵控制模型如图 4 所示,平台运动信号通过补偿网络 $G(s)$ 加入到输入端,与飞机进近垂直高度耦合后作为偏差信号加入飞行员操纵模型中。

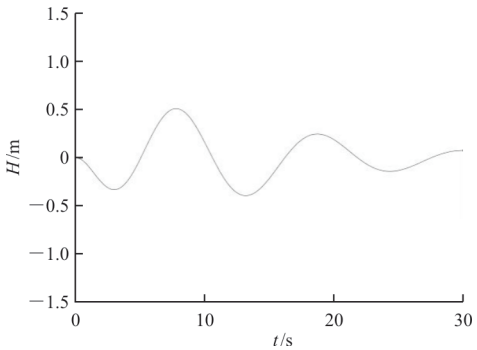

图 3　平台运动对飞行安全偏差的影响

Fig. 3　The impact of platform movement on flight safety deviation

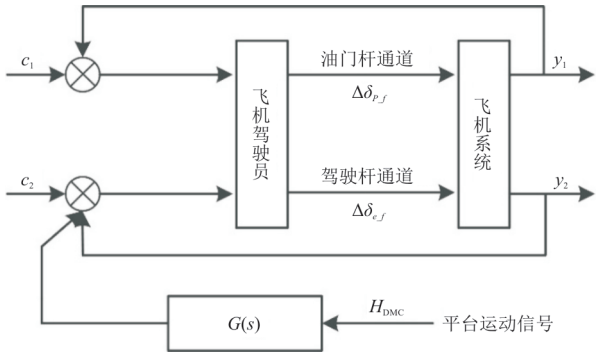

图 4 平台运动仿真示意图

Fig. 4 Schematic diagram of platform motion simulation

2.2 飞行安全评估模型验证

2.2.1 进近高度偏差修正

利用提出的飞机进近阶段飞行动力学模型、飞行员控制模型和平台运动模型对飞机进近着舰过程进行编程实现。为了验证本文提出模型的可靠性,将飞机进近高度修改为 115～130 m,即进近高度初始偏差 ΔH 为 5～20 m,模拟飞机进近初始高度高于标准进近不同高度时,飞行员控制模型对飞机飞行航迹的修正过程。利用编制的程序对进近过程进行仿真计算,计算结果如图 5 所示,可以看出:在飞行员控制模型的干预下,飞机航迹不同高度偏差均得到了快速稳定的修正,表明本文采用的模型可以有效的模拟飞机进近着舰过程。

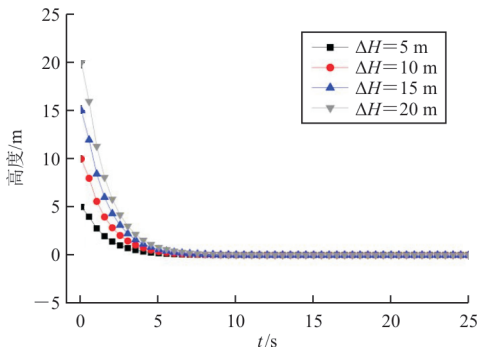

图 5 进近下滑航迹高度偏差修正过程

Fig. 5 Process of altitude deviation correction for approach glide path

2.2.2 平台运动对飞行航迹影响

将平台运动模型导入飞机进近模型中,以模拟海洋环境下平台运动对飞机航迹的影响。将平台运动方程式(5)～式(6)代入建立的飞机进近模型中,计算获得了飞机进近航迹高度偏差如图 6 所示。

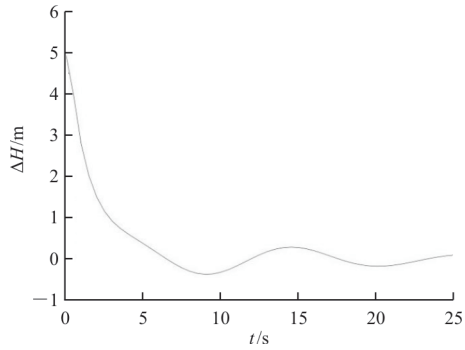

图 6 平台运动对飞机进近航迹的影响

Fig. 6 The impact of platform motion on aircraft approach trajectory

从图 6 可以看出:飞行甲板的纵摇和垂荡运动对飞机进近航迹影响显著,但在飞行员控制模型的修正下,航迹偏差得到了有效控制。

2.3 飞行安全风险分析

2.3.1 飞行员操纵变量概率分布

飞机在进近阶段,飞行员通过油门和升降舵控制飞机的姿态和航迹完成进近着陆。在进近过程中,飞行员需实时对飞机姿态和航迹进行修正。为了提高进近成功率和安全性,飞行员需进行大量的进近飞行训练,以提高进近阶段的技能水平。为评估不同飞行员进近阶段技能水平对飞行安全性的影响,以不同飞行员的油门和舵面操纵变量概率分布模型来模拟不同技能水平的飞行员对飞机进近过程中的操纵修正量。4 种不同技能水平的操纵变量概率分布如表 3 所示。

表 3 飞行员操纵变量概率分布

Table 3 Probability distribution of pilot manipulated variables

技能水平	操纵变量概率分布
1	$\Delta\delta\sim(\Delta\delta_0, 0.75)$
2	$\Delta\delta\sim(\Delta\delta_0, 1.00)$
3	$\Delta\delta\sim(\Delta\delta_0, 1.25)$
4	$\Delta\delta\sim(\Delta\delta_0, 1.50)$

2.3.2 飞行员飞行技能水平对安全偏差影响

将表 3 中的飞行员操纵变量概率分布引入飞机进近模型中,对飞机进近过程进行仿真计算,技能水平 1 对进近安全偏差影响计算结果如图 7 所示。

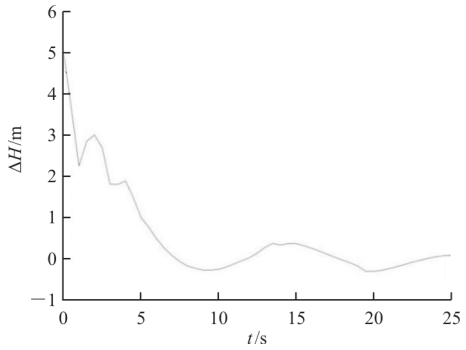

图 7　飞行员技能水平对进近安全偏差影响

Fig. 7　The impact of pilot skill level on approach safety deviation

从图 7 可以看出：飞行员技能水平对飞行偏差产生了显著影响，并且飞机航迹高度偏差越大时，飞行员技能水平对航迹偏差修正的影响越大。这主要是因为飞机航迹高度偏差越大，飞行员对油门和舵面的操纵量越大，由此产生的航迹修正误差越大。

2.3.3　飞行安全风险概率

利用蒙特卡洛仿真方法对飞机进近过程中的风险进行 10 000 次仿真计算，并根据表 1 中的飞行安全偏差等级，分别获得 4 种飞行员技能水平下的飞机进近风险概率。不同飞行员技能水平下进近水平位置偏差分布如图 8 所示，不同飞行员技能水平下飞行安全等级风险如表 4 所示。

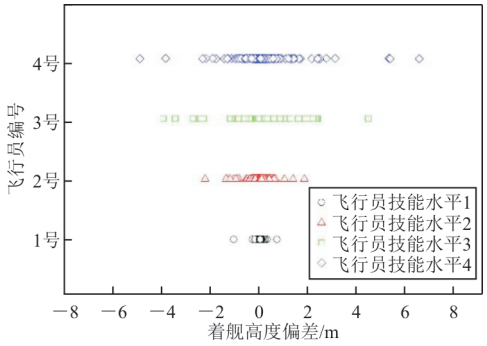

图 8　不同飞行员技能水平下进近高度偏差分布

Fig. 8　Distribution of approach altitude deviation under different pilot skill levels

表 4　不同飞行员技能水平下飞行安全等级风险

Table 4　Flight safety level risks under different pilot skill levels

技能水平	理想范围/%	允许范围/%	超出范围/%	进近成功率/%
1	99.39	0.30	0.31	99.69
2	93.40	3.68	2.92	97.08
3	74.40	7.73	17.87	82.13
4	56.25	11.11	32.64	67.36

从图 8 和表 4 可以看出：当飞行员操纵变量概率分布标准差由 1.50 降至 0.75 时，飞行员进近水平位置偏差分布明显减小，表明高水平飞行员进近飞行超出安全风险范围的概率相比低水平飞行员显著降低，着舰点位于理想范围内的概率由 56.25% 提升到了 99.39%，进近成功率由 67.36% 提升到了 99.69%，表明操纵技能的改善显著增加了进近飞行成功率，降低了飞行安全风险。

3　结　论

1）基于飞行动力学建立了考虑飞行员技能水平和平台运动的飞机进近阶段飞行动力学模型，并运用蒙特卡洛仿真方法对飞行员进近飞行操纵过程进行风险仿真。在飞行员控制模型的干预下，飞机进近初始高度高于标准进近不同高度下，飞机航迹不同高度偏差均得到了快速稳定的修正，表明本文提出的模型可以有效地模拟飞机进近过程中不同飞行员技能水平和平台运动对飞机进近航迹偏差的影响。

2）对不同技能水平飞行员进近过程风险的蒙特卡洛仿真结果表明，飞行员进近飞行技能的改善显著增加了进近成功率，当飞行员操纵变量概率分布标准差由 1.50 降至 0.75 时，进近成功率由 67.36% 提升到 99.69%。研究结果可为飞机进近阶段飞行安全风险评估和飞行员技能水平评定提供参考。

参考文献

[1]　卢晓光，许忠睿，张喆，等. ECOD算法在飞机不稳定进近检测中的应用[J]. 安全与环境学报，2024，24(5)：1872-1878.
Lu Xiaoguang，Xu Zhongrui，Zhang Zhe，et al. Application of ECOD algorithm for detection of aircraft unstable approach [J]. Journal of Safety and Environment，2024，24(5)：1872-1878.(in Chinese)

[2]　International Air Transport Association. Safety report 2021 [R]. Geneva，Switzerland：International Air Transport Association，2022.

[3]　吴皓珲. 飞行员心理风险因素识别与评估方法研究[D]. 成都：电子科技大学，2024.
Wu Haohui. Research on pilots′ psychological risk factors recognition and evaluation [D]. Chengdu：University of Electronic Science and Technology of China，2024.(in Chinese)

[4]　常文兵，张佳宁，周晟瀚. 基于支持向量机的飞机重着陆预测模型[J]. 飞机设计，2017，37(2)：19-22.

Chang Wenbing, Zhang Jianing, Zhou Shenghan. A prediction model of airplane hard landing based on support vector machine[J]. Aircraft Design, 2017, 37(2): 19-22. (in Chinese)

[5] 沈一超, 倪世宏, 张鹏. 基于贝叶斯网络的飞行动作识别方法[J]. 计算机工程与应用, 2017, 53(24): 161-167, 218.
Shen Yichao, Ni Shihong, Zhang Peng. Flight action recognition method based on Bayesian network[J]. Computer Engineering and Applications, 2017, 53(24): 161-167, 218. (in Chinese)

[6] 张玉叶, 王颖颖, 王春款, 等. 分析参数相关和时序特征的飞行动作识别方法[J]. 计算机工程与应用, 2016, 52(5): 246-249.
Zhang Yuye, Wang Yingying, Wang Chunxin, et al. Acrobatic maneuver reorganization method compared with parameters relevance and feature of sequence change[J]. Computer Engineering and Applications, 2016, 52(5): 246-249. (in Chinese)

[7] 汪磊, 董传亭, 崔美叶. 基于功率谱的飞行操作技能评价方法[J]. 飞行力学, 2018, 36(4): 92-96.
Wang Lei, Dong Chuanting, Cui Meiye. Evaluation method of flight operation skills based on power spectrum[J]. Flight Dynamics, 2018, 36(4): 92-96. (in Chinese)

[8] 张兆宁, 陈子辰, 卢飞. 配对进近侧向位置误差QAR参数关联性分析[J]. 中国安全科学学报, 2021, 31(8): 47-52.
Zhang Zhaoning, Chen Zichen, Lu Fei. Correlation analysis of QAR parameters for paired approach lateral position error [J]. China Safety Science Journal, 2021, 31(8): 47-52. (in Chinese)

[9] 张帅. 飞行品质监控中的超限裕度模型研究[D]. 天津: 中国民航大学, 2014.
Zhang Shuai. Event margin model for flight operation quality assurance[D]. Tianjin: Civil Aviation University of China, 2014. (in Chinese)

[10] 李孟格. 利用机器学习预测QAR严重超限事件的分析模型[J]. 民航学报, 2018, 2(4): 4-7.
Li Mengge. Prediction model of QAR serious overlimit event based on machine learning[J]. Journal of Civil Aviation, 2018, 2(4): 4-7. (in Chinese)

[11] Puranik T G, Jimenez H, Mavris D N. Energy-based metrics for safety analysis of general aviation operations [J]. Journal of Aircraft, 2017, 54(6): 2285-2297.

[12] Puranik T G, Mavris D N. Anomaly detection in general-aviation operations using energy metrics and flight-data records[J]. Journal of Aerospace Information Systems, 2017, 15(1): 22-36.

[13] Matthews B, Das S, Bhaduri K, et al. Discovering anomalous aviation safety events using scalable data mining algorithms [J]. Journal of Aerospace Information Systems, 2013, 10(10): 467-475.

[14] 陈农田, 陈凯, 韩亦杨, 等. 基于熵权AHP-FGCM的飞行进近着陆操纵绩效评估方法[J]. 数学的实践与认识, 2024, 54(7): 228-236.
Chen Nongtian, Chen Kai, Han Yiyang, et al. Flight approach landing maneuver performance evaluation method based on entropy weighted AHP-FGCM[J]. Mathematics in Practice and Theory, 2024, 54(7): 228-236. (in Chinese)

[15] 刘浩, 王昊, 孟光磊, 等. 基于动态贝叶斯网络和模糊灰度理论的飞行训练评估[J]. 航空学报, 2021, 42(8): 525838.
Liu Hao, Wang Hao, Meng Guanglei, et al. Flight training evaluation based on dynamic Bayesian network and fuzzy gray theory[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2021, 42(8): 525838. (in Chinese)

[16] Wei Z L, Ding D L, Zhou H, et al. A flight maneuver recognition method based on multi-strategy affine canonical time warping [J]. Applied Soft Computing, 2020, 95: 106527.

[17] Jarry G, Delahaye D, Nicol F, et al. Aircraft atypical approach detection using functional principal component analysis[J]. Journal of Air Transport Management, 2020, 84: 101787.

[18] 朱立成, 孙青, 端军红, 等. 基于机动动作类型识别的飞行员飞行训练质量自动评估方法[J]. 系统工程与电子技术, 2023, 45(12): 3932-3940.
Zhu Licheng, Sun Qing, Duan Junhong, et al. Automatic evaluation method of pilot flight training quality based on maneuver action type recognition[J]. Systems Engineering and Electronics, 2023, 45(12): 3932-3940. (in Chinese)

[19] Jiao Y, Sun H B, Wang C, et al. Research on unstable approach detection of civil aviation aircraft[J]. Procedia Computer Science, 2018, 131: 525-530.

[20] 郑磊, 池宏, 邵雪焱. 基于QAR数据的飞行操作模式及其风险分析[J]. 中国管理科学, 2017, 25(10): 109-118.
Zheng Lei, Chi Hong, Shao Xueyan. Pattern recognition and risk analysis for flight operations[J]. Chinese Journal of Management Science, 2017, 25(10): 109-118. (in Chinese)

[21] 孙瑞山, 刘胤甫. 基于QAR数据的飞行员飞行操作风格研究[J]. 中国安全科学学报, 2022, 32(12): 63-69.
Sun Ruishan, Liu Yinfu. Research on pilots′ flight operation style based on QAR data[J]. China Safety Science Journal, 2022, 32(12): 63-69. (in Chinese)

[22] 鲁志东, 张曙光, 戴闰志, 等. 大型民机进近着陆段异常能量风险判据[J]. 航空学报, 2021, 42(6): 624132.
Lu Zhidong, Zhang Shuguang, Dai Runzhi, et al. Abnormal energy risk criteria of large civil airplanes in approach and landing[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2021, 42(6): 624132. (in Chinese)

[23] 谢嘉仪, 孙华波, 王纯, 等. 精细尺度下的不稳定进近影响因素分析[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2021, 46(8): 1201-1208.
Xie Jiayi, Sun Huabo, Wang Chun, et al. Analysis of influence factors for unstable approach in fine-grained scale[J].

Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2021, 46(8): 1201-1208. (in Chinese)

[24] Tsai P C, Lai Y C. Risk assessment procedure of final approach to landing using deep learning[J]. Journal of Aerospace Information Systems, 2024, 21(4): 323-331.

[25] Ayala N, Kearns S, Irving E, et al. Investigating the role of flight phase and task difficulty on low-time pilot performance, gaze dynamics and subjective situation awareness during simulated flight[J]. Journal of Eye Movement Research, 2024, 17(1): 1-15.

[26] Hess R A. Investigating handling qualities using a structure model of human pilot: AIAA-87-2537[R]. USA: AIAA, 1987.

[27] 肖业伦, 金长江. 大气扰动中的飞行原理[M]. 北京: 国防工业出版社, 1993.
Xiao Yelun, Jin Changjiang. Principles of flight in atmospheric disturbance[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 1993. (in Chinese)

[28] 肖业伦. 航空航天器运动的建模: 飞行动力学的理论基础[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2003.
Xiao Yelun. Modeling of aerospace vehicle motion: theoretical basis of flight dynamics[M]. Beijing: Beihang University Press, 2003. (in Chinese)

[29] 史青海. 舰载机着舰控制技术研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2007.
Shi Qinghai. Research on landing control technology of carrier based aircraft[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2007. (in Chinese)

[30] 韩维, 赵振宇, 陈志刚. 舰载机着舰任务下的飞行员建模研究[J]. 飞行力学, 2016, 34(1): 14-17.
Han Wei, Zhao Zhenyu, Chen Zhigang. Research on modeling of the pilot for carrier landing task[J]. Flight Dynamics, 2016, 34(1): 14-17. (in Chinese)

[31] 徐秋. 舰载机进舰环境下驾驶员建模与仿真[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2012.
Xu Qiu. Pilot modeling and simulation in the carrier final approach[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2012. (in Chinese)

[32] 程超. 舰载飞机着舰飞行动力学仿真[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2011.
Cheng Chao. The flight dynamics simulation of carrier-based aircraft[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2011. (in Chinese)

[33] Papadopoulos C E, Yeung H. Uncertainty estimation and Monte Carlo simulation method[J]. Flow Measurement and Instrumentation, 2001, 12(4): 291-298.

[34] Betz W, Papaioannou I, Straub D. Bayesian post-processing of Monte Carlo simulation in reliability analysis[J]. Reliability Engineering & System Safety, 2022, 227: 108731.

[35] 于浩. 舰载飞机着舰动态性能仿真研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2008.
Yu Hao. Simulation study on dynamic performance of carrier based aircraft landing[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2008. (in Chinese)

[36] 许东松, 刘星宇, 王立新. 航母运动对舰载飞机着舰安全性的影响[J]. 北京航空航天大学学报, 2011, 37(3): 289-294.
Xu Dongsong, Liu Xingyu, Wang Lixin. Influence of carrier motion on landing safety for carrier-based airplanes[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2011, 37(3): 289-294. (in Chinese)

(编辑:马文静)