Journal of System Simulation

Volume 30 | Issue 10

Article 12

1-4-2019

Multi-Dimension Proportion-Differential Nonlinear Pilot model and Simulation Application

Weian Jiang College of Flight Technology, Flight University of China, Guanghan 618307, China;

Follow this and additional works at: https://dc-china-simulation.researchcommons.org/journal

Part of the Artificial Intelligence and Robotics Commons, Computer Engineering Commons, Numerical Analysis and Scientific Computing Commons, Operations Research, Systems Engineering and Industrial Engineering Commons, and the Systems Science Commons

This Paper is brought to you for free and open access by Journal of System Simulation. It has been accepted for inclusion in Journal of System Simulation by an authorized editor of Journal of System Simulation.

Multi-Dimension Proportion-Differential Nonlinear Pilot model and Simulation Application

Abstract

Abstract: For better simulated study of pilot's accident avoidance ability and pilot induced oscillation (PIO) characteristic of a man-aircraft close loop system, a method of "physiology-psychology-physiology" is presented to divide pilot models into three parts of input(signal), processing(decision making) and output(action), and a new multi-dimension proportion-differential nonlinear pilot model (MPDNLPM) is presented also. Simulated study is performed by simulated control of an aircraft pitch control model under backside tracking status for carrier landing. Conclusion: 1) The control performance of the man-aircraft system is slightly better than an ideal proportional control. 2) PIO is possible for well-trained pilot. 3) Proper anticipation, instant response and reasonable amplitude control are three essential abilities to prevent PIO and accident. 4) The method presented to divide pilot mode into 3 parts is reasonable and effective. 5) The new MPDNLPM presented is effective in finding the inside laws of a man-aircraft system.

Keywords

safety, man-aircraft system simulation, nonlinear pilot model (NLPM), PIO, pilot selection

Recommended Citation

Jiang Weian. Multi-Dimension Proportion-Differential Nonlinear Pilot model and Simulation Application[J]. Journal of System Simulation, 2018, 30(10): 3691-3698.

第 30 卷第 10 期 2018 年 10 月

多维比例微分非线性飞行员模型及仿真应用

蒋维安

(中国民用航空飞行学院飞行技术学院,四川 广汉 618307)

摘要:为更好地仿真研究飞行员事故避免能力和人-机闭环系统的驾驶员诱发震荡(PIO, Pilot Induced Oscillation)特性, 提出将飞行员模型按"生理-心理-生理"统一分解为"输入(信号)、处理(决策)、输 出(动作)"三个模块,并提出一种新型多维比例微分型非线性飞行员模型(MPDNLPM, Multi-Dimension Proportion-Differential Nonlinear Pilot Model)。结合某机着舰 backside 跟踪控制状态 下动力学模型进行了仿真研究。结果表明:人-机闭环系统控制效果略优于理想 P 控制;成熟飞行 员仍可出现 PIO;恰当的预估、及时的响应和合理的操纵增益控制是防止 PIO 和事故的三项关键能 力;提出的模块化分解方法合理、有效;MPDNLPM 可揭示人-机系统的内在规律。 关键词:安全;人-机闭环系统仿真;非线性飞行员模型(NLPM);PIO;飞行员选拔 中图分类号:TP391.9;V323.1;V233.7+1;X912.9 文献标识码:A 文章编号:1004-731X (2018) 10-3691-08

DOI: 10.16182/j.issn1004731x.joss.201810012

Multi-Dimension Proportion-Differential Nonlinear Pilot model and Simulation Application

Jiang Weian

(College of Flight Technology, Flight University of China, Guanghan 618307, China)

Abstract: For better simulated study of pilot's accident avoidance ability and pilot induced oscillation (PIO) characteristic of a man-aircraft close loop system, *a method of "physiology-psychology-physiology" is presented to divide pilot models into three parts of input(signal), processing(decision making) and output(action), and a new multi-dimension proportion-differential nonlinear pilot model (MPDNLPM) is presented also. Simulated study is performed by simulated control of an aircraft pitch control model under backside tracking status for carrier landing. Conclusion: 1) The control performance of the man-aircraft system is slightly better than an ideal proportional control. 2) PIO is possible for well-trained pilot. 3) Proper anticipation, instant response and reasonable amplitude control are three essential abilities to prevent PIO and accident. 4) The method presented to divide pilot mode into 3 parts is reasonable and effective. 5) The new MPDNLPM presented is effective in finding the inside laws of a man-aircraft system.*

Keywords: safety; man-aircraft system simulation; nonlinear pilot model (NLPM); PIO; pilot selection

引言

各种飞行员数学模型(简称飞行员模型,下同)

教授,研究方向为飞行技术与运行。



收稿日期: 2017-08-09 修回日期: 2018-05-28; 基金项目: 国家自然科学基金 60572179),民航安全 能力基金(DFS20160405); 作者简介: 蒋维安(1973-),男,四川遂宁,硕士, 被广泛用于人-机系统仿真^[1]、操作品质预测^[2]、飞 行器飞行控制系统设计^[3]、飞行性能分析、飞行技 术研究、机组工作负荷分析^[4]、飞行品质分析自动 评估^[5]、分析和预防飞行员诱发震荡(Pilot Induced Oscillation, PIO)^[6],飞机及直升机等飞行器着陆/ 舰等条件下的仿真分析和研究^[7-13]等。若用于飞行 事故(Accident)和事件(Incident)分析^[14-17],也将有

第 30 卷第 10 期	系统仿真学报	Vol. 30 No. 10
2018年10月	Journal of System Simulation	Oct., 2018

助于提高持续安全。

1 飞行员模型"生理-心理-生理"模 块化分解

人-机闭合回路系统中常用几种飞行员模型。

$$y = \frac{ke^{-12}}{S}$$
,其中,k是环路增益,典型值为2;
 τ 是延迟,典型值为0.2。 (1)

SYCOS 飞行员模型^[4]:

$$y = \frac{ke^{-\tau s}}{s}SYS^{-1} \tag{2}$$

飞行员(拟)线性模型^[18]:。

$$y_p = k_p e^{-\tau s} \frac{T_L s + 1}{(T_1 s + 1)(T_N s + 1)}$$
(3)

式中, *K_p*, *τ*, *T_L*, *T*₁, *T_N*分别为飞行员增益、开 始反应延迟时间、超前时间常数、滞后时间常数和 动作滞后时间常数。

文献[11]运用简化结构飞行员模型^[18]、运动神 经传递动力学模型、增稳飞机动力学模型完成了单 回路跟踪任务建模和参数设定(见式 4)。

$$\begin{cases} G_{nm} = \frac{10^2}{s^2 + 2 \times 0.707 \times 10s + 10^2} \\ w_{h_c}^{h}(s) = \frac{0.75}{1.18s^4 + 24.89s^3 + 25.05s^2 + 6.16s + 1} \\ k_d = 0.318, k_d = 2.64 \end{cases}$$
(4)

这些模型在一定条件下和一定程度上较好的 反应了飞行员的特性。

1.1 模块化分解的含义

真实的飞行员是"生理+心理"的交叉复合体。 为方便分析飞行员预防飞行事故、事件和 PIO 等 危险状态的能力,可将飞行员模型按"生理+心理+ 生理"的结构模块化分解为"输入(信号)+处理(决 策)+输出(动作)"的形式。其中"输入(信号)"和"输出 (动作)"主要是生理活动,基于信号,以信息为接 口;"处理(决策)"主要是心理活动,全部或主要基 于信息。 "输入(信号)"此处指飞行员感知外界而需要的 信号,形成知觉。如听、视、触、冷热、本体等知 觉信息的形成和所需要的信号。

"处理(决策)"此处指知觉信息的处理,决策的 形成和发出。包括对输入信号中所包含的信息的提 取、分析、判断、综合并达成最终的输出意图(决 策)。如平飞、爬升、下降、转弯、加减速等决策 和抬头、拉杆、蹬舵、加减油门、通话等操着动作 指令。

"输出(动作)"此处指根据接收到的指令信息而 对外部环境施加动作。如语言、眼神、面部表情、 肢体位移等等肌肉运动的最终效果。

1.2 常见飞行员模型按"生理-心理-生理"模 块化分解

1.2.1 SYCOS 飞行员模型的"生理-心理-生理"模块 化分解

将式(2)改写为:

$$y = k_1 e^{-\tau_1 s} \times k_2 e^{-\tau_2 s} SYS^{-1} \times k_3 e^{-\tau_3 s} \frac{1}{s}$$
(5)

SYS⁻¹代表被控系统的逆。

模块化分解得输入(信号)、处理(决策)、输出 (动作)模型分别为:

$$\begin{cases} y_{in} = k_1 e^{-\tau_1 s} \\ y_{dec} = k_2 e^{-\tau_2 s} SYS^{-1} \\ y_{act} = k_3 e^{-\tau_3 s} \frac{1}{s} \end{cases}$$
(6)

式中, τ_1, k_1 ; τ_2, k_2 ; τ_3, k_3 分别代表各部分的时间 和 增 益, $\tau = \tau_1 + \tau_2 + \tau_3$, 典 型 值 为 0.2, $k_p = k_1 \times k_2 \times k_3$, 典型值为 2.0。

1.2.2 拟线性飞行员模型的"生理-心理-生理"模块 化分解

將式(3)代表的飞行员模型模块化分解得:

$$\begin{cases}
y_{in} = k_1 e^{-\tau_1 s} \\
y_{dec} = k_2 e^{-\tau_2 s} \frac{T_L s + 1}{(T_1 s + 1)} \\
y_{act} = k_3 e^{-\tau_3 s} \frac{1}{(T_N s + 1)}
\end{cases}$$
(7)

第 30 卷第 10 期	
2018年10月	

可见,输出(动作)模型以动作惯性为主要内容,纯粹的延迟环节仅是其一部分而不是全部。

1.2.3 简化结构飞行员模型的"生理-心理-生理"模

块化分解

文献[11]中简化结构飞行员模型为线性 PD 型,模块化分解得:

$$\begin{cases} y_{in} = k_1 \\ y_{dec} = k_2 k_d (k_d + s) \\ y_{act} = k_3 G_{nm} \end{cases}$$

$$(8)$$

1.3 "生理-心理-生理"模块化分解后飞行员 模型参数的确定

比较式(6)~(8),取飞行员身高为输出动作特征 参数可得:

$$k_1 = 1; \quad k_2 = \frac{k_p}{k_1 k_3}; \quad k_3 = k_h$$
(9)

式中: k_h为飞行员身高,单位为 m。

设中等飞行员正常反应时间^[6] τ=0.12~0.20 取最小值(最好状态)时飞行员的输入、处理和输出 时间相等且输入、输出时间为常数,得:

$$\tau_1 = \tau_2 = \tau_3 = 0.04 \tag{10}$$

2 多维比例微分非线性飞行员模型 (MPDNLPM)

2.1 MPDNLPM 的提出

真实飞行员的生理、心理耦合和非线性比较复杂,提出一种多维比例微分非线性模型作为飞行员输入(信号)模型,根据应用需求,可以采用1-范数或2-范数或其他范数,以1-范数为例:

$$u_{in}(A) = Fun(A + k_f \left| \frac{df}{dt} \right| + k_{as} \left(\left| \frac{\partial A}{\partial x} \right| + \left| \frac{\partial A}{\partial y} \right| \right) + k_{at} \left| \frac{dA}{dt} \right| + k_{af} \left| \frac{\partial A}{\partial f} \right| \right)$$
(11)

对视觉, $u_{in}(A)$ 代表目标亮度 A 引起的视觉系统信号。假定在正常情况下 k_p 可由飞行员训练和 经验自动调节予以适当补偿,则 $u_{in}(A)$ 主要影响 T_{id} 和总反应时间 τ , Fun()为非线性函数。

以此为输入(信号)模型,加上适当的处理(决策)模型和输出(动作)模型,即构成完整的多维比例 微分非线性飞行员模型(MPDNLPM)。

2.2 着陆/舰阶段 backside 跟踪下滑道状态 下 MPDNLPM 简化

目视着陆/舰跟踪状态,需控制下滑线、横向 偏离、速度、姿态、下滑点等。以跟踪下滑道状态 ^[11]的控制为例,在好天气、左右偏差、速度偏差 稳定等条件下简化并设r₀处(开始切入下滑道轨迹 的标称位置)观察到的亮度为A₀。则:

$$\begin{cases} \frac{df}{dt} = k_q \frac{dq(t)}{dt}, \\ \frac{\partial A}{\partial x} \cong 0, \frac{\partial A}{\partial y} \cong 0, \frac{\partial A}{\partial f} \cong 0 \\ A = A_0 (\frac{r_0}{r})^n, r \ge r_{\min}, n \text{ bise fits}, \\ \text{ft } \Omega \notin \text{FT}: n = 2, \end{cases}$$

$$\vec{x} (11) \text{ ft } \textbf{X}:$$

$$(12)$$

$$u_{in}(A) = Fun(A + k_f k_q \left| \frac{dq}{dt} \right| + k_{at} \left| \frac{dA}{dt} \right|)$$
(13)

非线性特征考虑对数特性、眼睛相对运动采 样、饱和、阀值等特性,得:

 $u_{in}(A) =$

$$\log(z^{-1}(\begin{cases} limt_{up}, & A > limt_{up} \\ A, & limt_{up} \ge A \ge limt_{dn} \\ limt_{dn}, & A < limt_{dn} \end{cases}) + k_{q}k_{f} \left| \frac{df}{dt} \right| + k_{at} \left| \frac{dA}{dt} \right|))$$
(14)

式中: $limt_{up}$, $limt_{dn}$ 分别代表上限(饱和)和下限(不可见阀值)。 z^{-1} 为眼睛相对运动采样延迟,例如可取常数 0.1 s。

2.3 着陆/舰阶段 backside 跟踪下滑道状态 下 MPDNLPM 的工程化

1) 输入(信号)模型

飞行员首先获得信号(生理),然后理解其信息 (心理活动),将亮度与角度信息分开处理并用常用 参数超前滞后网络取代微分环节工程化得:

第 30 卷第 10 期 2018 年 10 月

亮度信号处理模型:

$$u_{in}(A) = \log(z^{-1}(\begin{cases} limt_{up}, & A > limt_{up} \\ A, & limt_{up} \ge A \ge limt_{dn} \\ limt_{dn}, & A < limt_{dn} \end{cases} +$$

$$k_q k_f q(s) \frac{s+0.1}{0.2s+1} + k_{at} A(s) \frac{s+0.1}{0.2s+1}))$$
(15)

信息识别:

$$y_{in}(s) = k_1 e^{-\tau_1 s} \times NL_{dg}(c_{dg}) \times \frac{1}{T_{id}s + 1} \times HLD(0, T_{rr})q(s),$$
(16)
$$T_{id} = k_{id} \times 1/|u_{in}(A)|, \quad k_{id} = 1.0$$

式中: $NL_{dg}(c_{dg})$, 分辨率常数为 c_{dg} (取 0.1 度)的 非线性环节; $HLD(0,T_{rr})$, 刷新时间平均为 T_{rr} 秒 的 0 阶保持器, 代表飞行员对信息的获取、更新和 记忆, 取 $T_{rr} = T_{id} + \tau_2$, 单位为 s;

2) 处理(決策)模型。 $\begin{cases}
y_{dec_1} = \\
Satu(k_2k_a(\frac{s}{0.2s+1} + k_d), U_{max}, U_{min}) \times y_{in}, \\$ 视觉信息提取和处理*PD*特性 $y_{dec_2} = Dead(d_{up}, d_{dn}) \times y_{dec_1},$ 決策阀值 $y_{dec} = Quant(c_{qn}, y_{dec_2}),$ 修正动作是模糊、
量化、有间歇的,其中 c_{qn} 为量化分辨率
3) 输出(动作)構刊

$$y_{act} = k_3 e^{-\tau_3 s} G_{nm} \tag{18}$$

2.4 着陆/舰阶段 backside 跟踪状态下人-机 系统闭环仿真分析和对比

2.4.1 初始参数设定

"backside"操纵技术保持飞机姿态和速度均不 变,通过控制发动机推力来跟踪下滑道。令: $k_f = k_{at} = k_{as} = 1.0$; $c_{as} = 1.0$; $k_h = 1.80$ m;下滑进 近速度 v = 70 m/s; $A_0 = 0.1$, $r_0 = 10$ 000 m, $r_{min} = 100$ m, $T(z_{-1}) = 0.1$ s; "炫目"饱和阀值 $limt_{up} = 100$, $limt_{dn} = 0.01$,低于该值无法获取信息。

设以纯角偏差进行垂直引导^[11],1°偏差产生4 个 Meat_ball 指示灯,最多显示7个灯的偏差,飞 机初始位置高于要求下滑轨迹4个灯(近似代表最 难操作的极端情况),要求4.5°的下滑轨迹^[7]。

2.4.2 MPDNLPM 操纵某机着舰的闭环仿真

将 MPDNLPM 与式(5)和式(6)组合成闭环系统 建立 simulink 仿真回路(见图 1)。其中 subsystem 是 飞行员模型组,通过切换可以选用不同的飞行员模 型进行仿真; objective 是 backside 跟踪控制状态下 某机着舰阶段的动力学模型传递函数;后续部分是 运行及几何变换部分。A 是亮度,r 是到着陆入口 点的距离,分别由其他模块模拟。用不同飞行员模 型与同一飞机模型分别进行仿真便于比较。因采用 的是单通道飞机动力学模型,故未与双或多通道飞 行员模型比较。

k_p=0.5 时,高度误差过零点比较晚,入
 口)误差为-20m,是增益太低导致。

2) $k_p = 1.0$ 时,误差仅约--1.9 m(见图 2)。



图 1 "人-机"闭环回路 Fig. 1 "man-aircraft" closed loop

第 30 卷第 10 期 2018 年 10 月





由图 3~5 可见 MPDNLPM 的操纵特点:

对较大的初始误差,操纵动作幅度准确
 但并非一次到位,而是有轻微的超调量。符合人
 类飞行员实际飞行中"有去有回"的操纵特征。

 误差减小过程中,操纵动作分多次、逐 渐调整而非一次调整到位(见图 3)。与人类飞行员 实际飞行中强调的"少量多次"的操纵特征接近。

输出动作中在每次小幅操纵时出现局部
 颤动,并在持续若干周期后迅速地自行消失,直到
 下一次小幅操纵开始(见图 4),这一现象与实际飞行中飞行员追求精细操作时的动作特性类似。

● 没有发生明显的、整体的 PIO 现象。

3) k_p=2.0 时(中等水平飞行员常见值),误差收 敛快,且入口点误差仅约 2.2 m。但操纵动作在飞 行末段开始表现出操纵量逐渐震荡加大的 PIO 趋 势。k_p=1.0 时具有的"少量多次"的操纵特点(即动 作曲线中的"小台阶")趋于消失(见图 5),显示飞行 员操纵开始变得迅速、紧张。

4) k_p=5 时,终点误差达 30 多米。末段出现了
 典型的大幅度的 PIO 状态,对应的动态误差、操
 纵动作幅度均逐渐加大且趋于发散(见图 6)。

5) $k_p \ge 10$ 时,末段出现严重的 PIO。



图 6 MPDNLPM 全程操纵动作(k_p =5.0) Fig. 6 MPDNLPM full actions (k_p =5.0)

http://www.china-simulation.com

第 30 卷第 10 期	系统仿真学报	Vol. 30 No. 10
2018年10月	Journal of System Simulation	Oct., 2018

2.4.3 MPDNLPM 与理想比例(P)控制的仿真比较

理想比例控制总增益为 k_p,无任何非线性特性,飞行员模型变为常数 k_p。

1) k_p=1.0 时,入口误差-0.5 m 以内(见图 7)。
 操纵动作光滑、连续、无震荡(见图 8)。



图 8 理想 P 控制动作与 MPDNLPM 输出(k_p=1.0) Fig. 8 Control actions comparing between ideal P control and MPDNLPM control (k_p=1.0)

2) k_p=2 时,误差-0.3 m 以内,无显著 PIO。
3) k_p≥5 时,出现显著 PIO,入口误差-80 m 以上。
对比可见:

1) 处理(决策)核心为 PD 控制特性的 MPDNLPM 接近且稍优于理想的比例控制器。

2) MPDNLPM 中的非线性环节使飞行员预估 操纵(即核心 PD 控制中的微分项 D)效果降低。

3) 飞行员操纵增益过高易导致 PIO。

4) 飞行员总操纵增益过低或过高均会出现较

大的终点误差,不能满足要求。

2.4.4 MPDNLPM 与理想 PD 控制器仿真比较

理想 PD 控制器和 MPDNLPM 采用同样的控制参数设定进行"人-机"闭环仿真。k_p=5 时,理想 PD 控制器入口误差小于-0.11 m(见图 9),远优于 k_p=5 时 MPDNLPM 操作的表现。但理想 PD 控制器初始及末段需要的操纵量比 MPDNLPM 操作的大得多(见图 10),现实中飞机推力达不到这样大的调整范围。由此可见,非线性特性会显著地降低"人-机"闭环系统的稳定范围。





2.4.5 MPDNLPM 与简化结构飞行员模型仿真比较

利用简化结构飞行员模型^[11,20](总增益为 0.839 52)进行闭环仿真,结果表明在不附加输出 (动作)延迟τ₃的情况下,入口点误差小于 0.2 m。

http://www.china-simulation.com

第 30 卷第 10 期		Vol. 30 No. 10
2018年10月	蒋维安: 多维比例微分非线性飞行员模型及仿真应用	Oct., 2018

附加输出(动作)延迟τ₃后,入口点误差显著增加, 但仍小于 1.0 m。

该飞行员模型参数是固定,因此对飞行员要求 非常高,某些条件下难以实现。

2.4.6 MPDNLPM 与(拟)线性飞行员模型仿真比较

线性飞行员模型利用同等参数设置进行闭环 仿真与 MPDNLPM 对比,结果表明, k_p=1 或 2 时 入口点误差在 0.3 m 以内效果好; k_p=5 时轨迹出现 震荡并在末段飞行时发展为强烈的 PIO,入口误差 超过–124 m(见图 11),需要的操纵量很大。



图 11 线性飞行员模型操纵的垂直轨迹(k_p =5.0) Fig. 11 Linear pilot model controlled profile (k_p =5.0)

2.4.7 MPDNLPM 与 SYCOS 飞行员模型操纵舰载 机着舰的闭环响应特性仿真比较

考虑飞行员输出非线性后未能设计出性能可 接受的与SYCOS飞行员模型对应的物理可实现的 控制器。表明对于增稳的高阶被控系统,设计合适 的SYCOS飞行员模型控制器(控制律)并非易事。

2.4.8 仿真结果综合分析

1) 处理(决策)为PD 控制律特性的 MPDNLPM 在非线性环节的作用下,总体控制特性接近理想的 P 控制器,可发生 PIO。这与实践中具有良好经验 的飞行员甚至经验丰富的试飞员在一定条件下仍 有发生飞行操纵震荡甚至陷入 PIO 的情况相吻合。

2) MPDNLPM 中的非线性特性使飞行员的预 估控制(即PD控制中的微分项D)的控制效果降低。 这解释了非线性特性产生危害导致 PIO 的机理。 3)不同飞行员模型,闭环仿真主要结果有一 定相似性,但也会产生有显著差异的结果。说明多 数飞行员模型均具有合理性和可用性;但还难以完 全准确代表飞行员的实际情况。

4) 大多数飞行员模型在参数合适的情况下均 能产生较好的控制效果;在增益过小或过大情况下 控制效果均变差;当增益大到一定程度后,均导致 PIO 的发生和发展。说明当飞行员或"人-机"系统操 纵的总增益过高时容易导致 PIO,故应对飞行员进 行专项培训或在飞行控制环路设计中予以保护以 防止 PIO。

5) 单纯基于角度误差的着陆/舰操纵技术在 末段对飞行员要求高风险大,应改进操纵技术。

6)发展新的操纵技术、避免过于恶劣的着陆/ 舰条件、采用合适的自动着陆/舰系统等将是必然 选择。特定训练方法、新的引导方法(如动态卫星 着陆系统、高度与角度偏差结合)、新的操纵手段 等均值得研究。

3 结论

 非线性因素破坏飞行员的操作预估,影响 严重时处理(决策)为PD控制率的MPDNLPM(代表 成熟飞行员)控制效果接近纯 P 控制,可导致 PIO。

2) 即使是经过严格训练的成熟飞行员,仍可 出现 PIO,应考虑改进飞行操纵技术。

3) "恰当的预估、及时的响应以及合理的操纵 增益控制"这三项指标是飞行员及"人-机"闭环系 统避免飞行事故、事件和 PIO 的关键能力。

 4)提出的将飞行员模型按"生理-心理-生理" 分解为"输入(信号)模型+处理(决策)模型+输出(动 作)模型"是合理的、有效的。

5) 提出的 MPDNLPM 用于仿真分析"人-机" 闭环系统 PIO 特性和飞行员事故避免能力可有效 揭示其内在规律。

参考文献:

 Jacob Enciu, Aviv Rosen. Simulation of Coupled Helicopter-Slung Load-Pilot Dynamics [J]. Journal of the

第 30 卷第 10 期	系统仿真学报	Vol. 30 No. 10
2018年10月	Journal of System Simulation	Oct., 2018

Aemrican Helicopter Society(S0002-8711), 2017, 62(13): 1-13.

- [2] Andreea-Irina Afloare, Achim Ionita. Prediction of the handling qualities and pilot-induced oscillation rating levels [J]. INCAS BULLETIN(S0002-8711), 2014, 6(S1): 3-13.
- [3] 刘嘉,向锦武,张颖,等. 自适应飞机驾驶员最优控制 模型研究及应用 [J]. 航空学报, 2016, 37(4): 1127-1138.
 Liu Jia, Xiang Jinwu, Zhang Ying, et al. Research and application of adaptive optimal control pilot model [J]. Acta Aeronautic et Astronautic Sinica, 2016, 37(4): 1127-1138.
- [4] R Bradley, G Brindley. Progress in the development of a robust pilot model for the evaluation of rotorcraft performance, control strategy and pilot workload [J]. The Aeronautical Journal, 1968,107(1078): 731-738.
- [5] 韩晓宁,赵欣凯.用飞行员模型进行飞行品质自动评估技术研究 [J].飞行力学, 2013, 31(4): 293-296.
 Han Xiaoning, Zhao Xinkai. Study on automatic flight quality evaluation with the pilot model [J]. Flight Dynamics, 2013, 31(4): 293-296.
- [6] 刘继权, 豆国辉, 颜世伟. 驾驶员模型对驾驶员诱发振荡评估结果的影响 [J]. 航空计算技术, 2012, 42(4): 43-46.

Liu Jiquan, Dou Guohui, Yan shiwei. Effect of Pilot Model Additions on Pilot Induced Oscillation Assessment Result [J]. Aeronautical Computing Technique, 2012, 42(4): 43-46.

- [7] 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.
- [8] 刘嘉,向锦武,刘剑超,等.面向着舰安全性仿真的 飞行员人因可靠性模型 [J].中国安全科学学报, 2016,26(10):19-24.

Liu Jia, Xiang Jinwu, Liu Jianchao, et al. Pilot reliability model for safety simulation in carrier landing [J]. China Safety Science Journal, 2016, 26(10): 19-24.

 [9] 朱齐丹, 王立鹏, 张智. 基于实际行为策略的飞行员 着舰模型 [J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2015, 43(7): 98-103.
 Zhu Qidan, Wang Lipeng, Zhang Zhi. Pilot landing

model based on actual behavioral strategies [J]. J. Huazhong Univ. of Sci. & Tech. (Natural Science Edition), 2015, 43(7): 98-103.

[10] 龚华军, 方芬, 邢建芳, 等. 先进的目视回收光学助

降系统纵向着舰精度 [J]. 南京航空航天大学学报, 2009, 41(5): 677-681.

Gong Huajun, Fang Fen, Xing Jianfang, et al. Longitudinal Landing Precision for AVCARS Optical Landing Aid System [J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2009, 41(5): 677-681.

- [11] 胡恩勇, 袁锁中, 杨一栋. 跟踪控制状态飞行员建模研究 [J]. 飞行力学, 2008, 26(4): 11-13, 18.
 Hu Enyong, Yuan Suozhong, Yang Yidong. Study of Modeling Pilot Pursuit Control Behavior [J]. Flight Dynamics, 2008, 26(4): 11-13, 18.
- [12] 王延刚, 屈香菊. 舰载机进舰着舰过程仿真建模 [J]. 系统仿真学报, 2008, 20(24): 6592-6594.
 Wang Yangang, Qu Xiangju. Modeling and Simulation of Carrier Approach and Landing [J]. Journal of System Simulation (S1004-731X), 2008, 20(24): 6592-6594.
- [13] 赵振宇, 韩维, 陈俊锋. 飞行员着舰下滑轨迹跟踪操 纵策略研究 [J]. 飞行力学, 2015, 33(6): 519-522.
 Zhao Zhenyu, Han Wei, Chen Junfeng. Research of pilot control strategy to pursuit flight path in carrier landing [J]. Flight Dynamics, 2015, 33(6): 519-522.
- [14] 蒋维安. 一种提高飞行运行安全的战略分析方法 [J]. 中国安全科学学报, 2016, 26(5): 37-41.
 Jiang Weian, Strategy analysis method for improving flight safety [J]. China Safety Science Journal, 2016, 26(5): 37-41.
- [15] International Civil Aviation Organization (ICAO) ANNEX 13 to the convention on international civil aviation, aircraft accident and incident investigation (10th Edition) [S]. 2010.
- [16] 刘川驰, 尹堂文, 傅山. 人一机一环境系统仿真及人为因素量化方法 [J]. 计算机仿真, 2013, 30(6): 63-67.
 Liu Chuanchi, Yin Tangwen, Fu Shan. Man-Machine-Environment Complex Flight System Simulation and Human Factors Quantitative Research Methods [J]. Computer Simulation, 2013, 30(6): 63-67.
- [17] 杜红兵,刘明,靳慧斌.基于信息处理和事故链原理 的结构化飞行员差错模型 [J].中国安全科学学报, 2011,21(6):25-31.

Du Hongbing, Liu Ming, Jin Huibing. Study on a structured Pilot error model based on information processing and accident chain principle [J]. China Safety Science Journal, 2011, 21(6): 25-31.

[18] Hess Ronald. Simplified Approach for Modeling Pilot Pursuit Control Behavior in Multi - Loop Flight Control Tasks [J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part G:Journal of Aerospace Engineering. 2006, 220(2): 85-102.