

舰载机纵向自动着舰控制

彭秀艳, 王志文, 吴鑫

(哈尔滨工程大学 自动化学院, 黑龙江 哈尔滨 150001)

摘要:对舰载机纵向着舰控制系统进行了分析和研究,根据舰船甲板运动引起舰载机着舰点不断变化的问题,加入甲板运动补偿环节,并对补偿律进行了设计;对常规的纵向导引控制律进行了改进设计,引入模糊控制.仿真结果表明,引入甲板运动补偿环节,有效地减小了由于甲板运动造成的着舰误差,提高了着舰的安全性,模糊PID导引控制律比常规的PID导引控制律具有更好的控制下滑轨迹的能力,更能满足着舰的需要.

关键词:自动着舰控制;模糊控制;甲板运动补偿;纵向导引律

中图分类号: TP18; V249.122.5 **文献标识码:** A **文章编号:** 1673-4785(2011)02-0172-06

Research on a carrier-based automatic longitudinal aircraft landing control system

PENG Xiuyan, WANG Zhiwen, WU Xin

(College of Automation, Harbin Engineering University, Harbin 150001, China)

Abstract: A study was conducted on a carrier-based aircraft landing control system. Based on the fact that ship deck motion causes constant changes in the carrier-based aircraft landing points, deck motion compensation segments were added and the compensation law was re-designed. The conventional vertical guidance control law was improved through the introduction of a fuzzy PID guidance control. The simulation results indicate that the carrier-based aircraft landing error was effectively reduced and the security performance of the landing was enhanced with the application of ship deck motion compensation segments. The results also demonstrate that the fuzzy PID direction guidance control law is superior to the conventional PID guidance control law in controlling the carrier-based aircraft gliding routine, better satisfying the requirements of the carrier-based aircraft landing.

Keywords: carrier-based aircraft automatic landing control; fuzzy control; deck motion compensation; vertical guidance law

舰载机着舰是一个复杂的过程,其间,舰载机的飞行姿态时刻发生变化,为使舰载机准确地降落在飞行甲板上的阻拦区域内,就必须要求着舰控制系统具备较高的下滑轨迹控制精度^[1].而自动着舰系统(automatic carrier landing system, ACLS)主要包括飞行控制系统、推力控制系统、甲板补偿系统和着舰导引系统4部分,其中甲板补偿系统的功能是跟踪理想着舰点的变化,保证舰载机在理想着舰点与航空母舰的飞行甲板相啮合,为避免产生着舰复飞现象,一般在着舰前的12.5 s加入补偿指令.着舰导引系统的功能是将舰载机飞行的高度偏差按照某种

规律形成导引指令,通过无线电数据链发送到飞行控制系统,它的具体实现是由舰载计算机完成的,其性能的好坏将直接影响着舰准确性^[2].

着舰导引律的设计主要有常规PID控制、线性二次型理论、模型跟踪以及特征值配置等方法,这些方法都取得了成功的应用,但是也存在明显的缺点^[3].这是因为在设计中使用的是系统的近似线性化模型,整定的参数不能随着舰载机飞行状态的改变而满足系统的要求,针对这些方法的不足,以及舰载机模型的非线性、时变性特点,应寻求更加智能的控制方法.

模糊控制可以在不知道系统精确数学模型的前提下,根据操作人员的经验,凭借操作人员经验的语言表达,在实际系统中进行参数的调试和整定^[4].

实践证明,模糊控制适合于被控变量无精确的表达方法和被控对象的参数之间无法精确描述的情况.在本文中,根据模糊控制对常规 PID 控制器具有的在线调整参数的能力,对导引控制律进行改进,引入模糊控制理论,与常规的 PID 控制器相结合,组成模糊 PID 控制器.通过仿真,说明了模糊 PID 比常规 PID 更能有效地改善着舰控制系统的品质,减小着舰误差.

1 自动着舰控制系统的工作原理

ACLS 控制系统的工作原理是:由海浪引起的

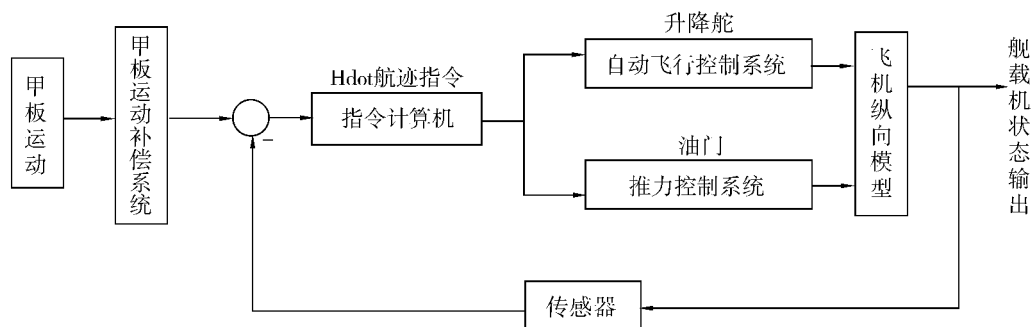


图1 自动着舰控制系统框图

Fig. 1 Block diagram of the automatic warship control system

2 自动飞行控制系统

纵向着舰控制系统的控制律为

$$\delta_z(s) = [\dot{h}_{com}(s) - K_\zeta \zeta(s) - K_1 h(s) - K_1 \omega_z(s)] * K_2 G_1(s) G_2(s) G_3(s).$$

式中: $G_1(s)$ 、 $G_2(s)$ 、 $G_3(s)$ 分别是舵回路、滤波器、助力器的传递函数; K_1 、 K_2 、 K_ζ 、 K_h 分别是俯仰角速度 ω_z 反馈增益、内回路增益、航迹角 ζ 反馈增益、高度 h 增益; \dot{h}_{com} 是综合升降速率输入指令; δ_z 是升降舵偏转角.

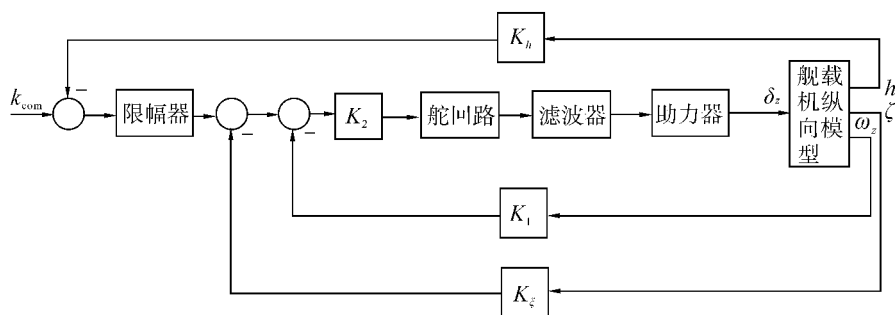


图2 纵向飞行控制系统框图

Fig. 2 Longitudinal flight control system block diagram

3 推力控制系统

推力控制系统控制率方程为

$$\delta_p = (K_\alpha \cdot \alpha - \alpha_g + K_{ny} \cdot G_4(s) \cdot n_y) \cdot [K_3/s + K_4/s + 1] \cdot G_p(s).$$

式中: K_3 、 K_4 、 K_α 、 K_{ny} 分别是控制器迎角 α 积分增益、迎角增益、迎角 α 反馈增益和过载 n_y 反馈增益; $G_4(s)$ 和 $G_p(s)$ 分别是滤波器传递函数和发动机传递函数; α_g 是迎角给定信号; $\delta_p(s)$ 是油门偏转角.

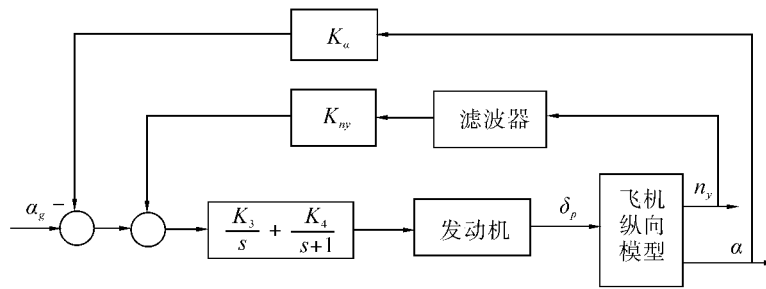


图3 推力控制系统框图

Fig. 3 Block diagram of the propulsive force control system

4 甲板运动补偿系统

甲板运动补偿系统主要是对舰载机下滑轨迹的控制补偿,对于舰载机的纵向着舰来说,主要是考虑舰体的垂荡和纵摇运动,舰体在垂直方向上的运动直接影响到理想着舰点高度的变化,对舰载机运动的补偿就是根据理想着舰点在垂直方向上的高度变化,使其经过补偿滤波器形成指令信号^[5]。甲板运动补偿指令仅在着舰的最后阶段才作用于舰载机,一般是在着舰前的 12.5 s,以保证舰载机有足够的时间使姿态发生相应的变化,改变其下降轨迹以跟踪甲板的运动,因此采用超前网络来获得控制系统对甲板运动的超前响应,进行开环补偿^[6]。

在中等海况下,甲板运动的纵摇运动可以表示为^[2]

$$\theta_s(t) = 0.5 \sin 0.6t + 0.3 \sin 0.63t + 0.25.$$

甲板运动的垂荡运动可以表示为^[2]

$$h_s(t) = 1.22 \sin 0.6t + 0.305 \sin 0.2t.$$

甲板运动的补偿模型为

$$\dot{H}_{DMC} = \dot{h}_s(t) - 0.5 X_F \dot{\theta}_s(t).$$

式中: X_F 是理想着舰点到舰船飞行甲板艏突的距离。

5 纵向导引系统

纵向导引系统是将雷达测量出的舰载机高度和规定下滑高度的差值,以及甲板运动补偿指令一起形成舰载机的姿态控制指令。从 20 世纪 50 年代美国研制的 AN/SPN-10 型雷达全自动着舰控制系统开始一直到现在,着舰导引控制的方程基本形式就基本没有变化,PID (比例-积分-微分) 控制器一直是其控制的核心,常规 PID 设计的算法和控制结构都不复杂,且控制效果比较令人满意,在工程上得到

广泛的应用^[7]。而舰载机的着舰过程是一个复杂的过程,舰载机的环境存在着极大的随机性,而常规 PID 导引控制律的参数是固定不变的,不能灵活地满足着舰的要求,因此,在此基础上引入模糊控制,根据模糊控制对常规 PID 控制器具有的在线调整参数的能力,对纵向导引控制律进行改进,与常规 PID 相结合,组成模糊 PID 控制器。

模糊控制器选取的输入变量是理想着舰点的高度与舰载机实际高度间的偏差 e 和它的偏差变化率 e_c ,输出为 PID 参数的修正量 ΔK_P 、 ΔK_I 、 ΔK_D ,这 5 个变量对应的模糊语言集是 NB (负大)、NM (负中)、NS (负小)、ZO (零)、PS (正小)、PM (正中)、PB (正大),5 个变量 e 、 e_c 、 ΔK_P 、 ΔK_I 、 ΔK_D 的基本论域分别为 $[-3, 3]$ 、 $[-3, 3]$ 、 $[-3.5, 3.5]$ 、 $[-3.5, 3.5]$ 、 $[-3.5, 3.5]$,根据军用 MIL-F-8785C 标准取偏差 e 和其偏差变化率 e_c 取值范围分别为 $[-3, 3]$ 、 $[-3, 3]$ 、 ΔK_P 、 ΔK_I 、 ΔK_D 的取值范围分别为 $[-9, +9]$ 、 $[-6, +6]$ 、 $[-3, 3]$,所以对应的比例因子为 $k_e = 3/10$, $k_{e_c} = 3/10$,量化因子 $P_{\Delta K_P} = 3/9$, $P_{\Delta K_I} = 2/6$, $P_{\Delta K_D} = 1/3$,选择变量的隶属度函数为均匀三角形。

本文中,选取误差和误差变化率作为模糊 PID 控制器的输入,每个输入选取 7 个语言变量,这样共能提取 49 条模糊规则,其基本结构为

1) if \tilde{e} is PB and \tilde{e}_c is PB, then $\Delta \tilde{K}_P$ is NB, $\Delta \tilde{K}_I$ is PB, $\Delta \tilde{K}_D$ is PB;

2) if \tilde{e} is NB and \tilde{e}_c is NB, then $\Delta \tilde{K}_P$ is PB, $\Delta \tilde{K}_I$ is NB, $\Delta \tilde{K}_D$ is PS.

剩下的 47 条规则也是按照上面的原则提取的,在初步制定了规则之后,用于着舰控制系统的仿真,根据仿真结果,不断地调整规则,最终得到了 49 条规则如表 1、表 2、表 3 所示。

表 1 ΔK_p 的模糊规则表
Table 1 Fuzzy rules of ΔK_p

ΔK_p	ec						
	-3	-2	-1	0	1	2	3
-3	3	3	2	2	1	0	0
-2	3	3	2	1	1	0	-1
-1	2	2	2	1	0	-1	-1
0	2	2	1	0	-1	-2	-2
1	1	1	0	-1	-1	-2	-2
2	1	0	-1	-2	-2	-2	-3
3	0	0	-2	-2	-2	-3	-3

表 2 ΔK_i 的模糊规则表
Table 2 Fuzzy rules of ΔK_i

ΔK_i	ec						
	-3	-2	-1	0	1	2	3
-3	-3	-3	-2	-2	-1	0	0
-2	-3	-3	-2	-1	-1	0	0
-1	-3	-2	-1	-1	0	1	1
0	-2	-2	-1	0	1	2	2
1	-2	-1	0	1	1	2	3
2	0	0	1	1	2	3	3
3	0	0	1	2	2	3	3

表 3 ΔK_D 的模糊规则表
Table 3 Fuzzy rules of ΔK_D

ΔK_D	ec						
	-3	-2	-1	0	1	2	3
-3	1	-1	-3	-3	-3	-2	1
-2	1	-1	-3	-2	-2	-1	0
-1	0	-1	-2	-2	-1	-1	0
0	0	-1	-1	-1	-1	-1	0
1	0	0	0	0	0	0	0
2	3	-1	1	1	1	1	3
3	3	2	2	2	1	1	3

在模糊规则制定之后,接着就要进行模糊推理,采用 Mamdani 型模糊推理算法. 设模糊控制器的输入模糊量为 \tilde{e} 是 A , \tilde{e}_c 是 B ,则根据模糊规则进行近似推理,可以得到输出模糊量 \bar{u} (用模糊集合 C 表示)为:

$$\begin{cases} R_i = (A_i \text{ and } B_i) \rightarrow c_i; \\ R = \bigcup_{i=1}^n R_i; \\ \bar{u} = (A_i \text{ and } B_i) \rightarrow C_i. \end{cases}$$

其中包含了 3 种主要的模糊逻辑运算:“and”运算、“ \cup ”合成运算和“ \rightarrow ”蕴含运算.

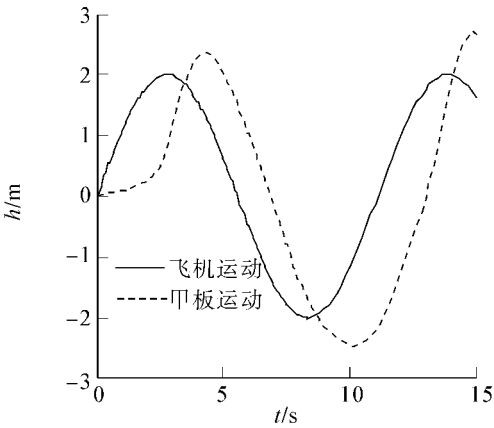
在表 1~3 所得的模糊控制规则基础上,系统实时的参数取值应分别为 $K_p + \Delta K_p$ 、 $K_i + \Delta K_i$ 、 $K_D + \Delta K_D$,其中 K_p 、 K_i 、 K_D 是已整定的初始 PID 参数.

6 仿真实例

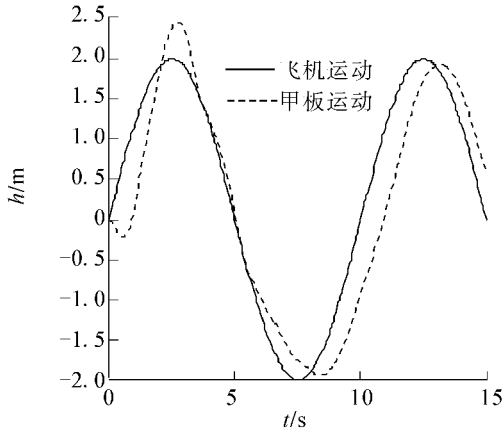
F/A-18A 型号舰载机在海平面高度上飞行状态下的纵向线性化状态方程为

$$\begin{bmatrix} \dot{v} \\ \dot{\alpha} \\ \dot{\theta} \\ \dot{\omega}_z \\ \dot{h} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -0.0749 & 3.3246 & -9.8208 & 0 & -0.000060 \\ -0.0045 & -0.3431 & 0 & 0.9915 & 0.000016 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0.0029 & -1.1659 & 0 & -0.2544 & 0 \\ 0 & -70 & 70 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v \\ \alpha \\ \theta \\ \omega_z \\ h \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0.8468 & 16.2116 \\ -0.0719 & -0.0340 \\ 0 & 0 \\ -1.81452 & 0.0022 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \delta_z \\ \delta_p \end{bmatrix}.$$

舰载机的进舰速度是 $V_0 = 66.15 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,下滑轨迹角是 -3.5° ,船艏沿着斜角甲板中心线航行,速度为 $15.3 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,下滑通道入口处到理想着舰点的水平距离是 1 233 m,甲板补偿指令在着舰前 12.5 s 时加入,假设航空母舰的垂荡运动的初始相位是 0,纵摇运动的初始相位超前垂荡运动 45° ,根据上面对着舰控制系统各环节的讨论,对整个控制系统进行闭环仿真.可以得到不带甲板运动补偿环节的 ACLS 输出响应曲线(a)和带甲板运动补偿环节的 ACLS 输出响应曲线(b),如图 4 所示.



(a) 无甲板运动补偿系统



(b)有甲板运动补偿系统

图4 有无甲板运动补偿系统的输出响应曲线

Fig.4 No and have deck to move back-off systematic output response curve

由图4可以看出,在加入所设计的甲板运动补偿环节以后,舰载机在下滑着舰过程中,可以很好地跟踪上甲板的运动,有效地减小了由于甲板运动造成的着舰误差,提高了着舰的安全性。

在模糊PID控制的纵向导引律控制之下,3个参数的初始值 $K_p=0.4002$, $K_i=0.004$, $K_d=1.1$,经过在线调参可以得到3个参数的输出曲线如图5~7,此时的俯仰角、迎角的响应曲线分别为图8~9所示。

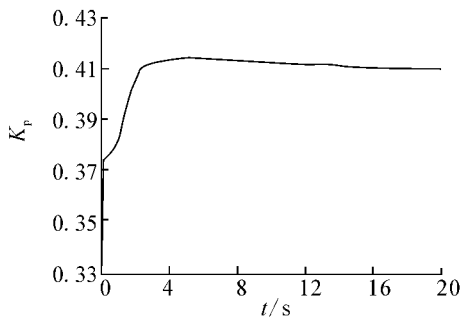
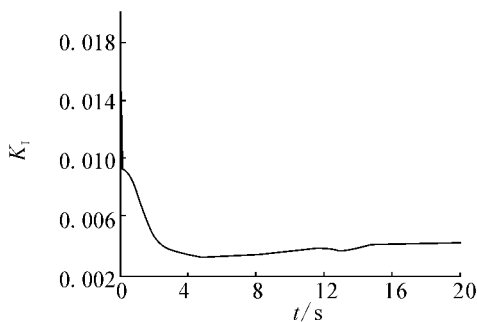
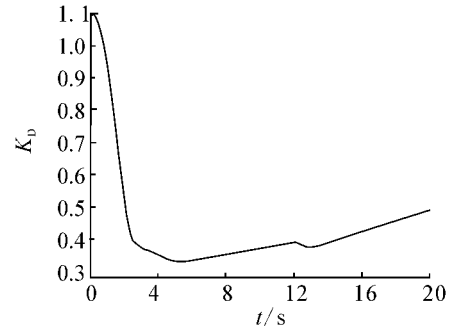
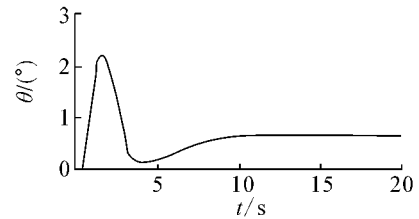
图5 K_p 调节曲线Fig.5 The K_p adjustment curve图6 K_i 调节曲线Fig.6 The K_i adjustment curve图7 K_d 调节曲线Fig.7 The K_d adjustment curve

图8 模糊PID控制下的俯仰角的响应曲线

Fig.8 Fuzzy PID controlling lower angle of pitch response curve

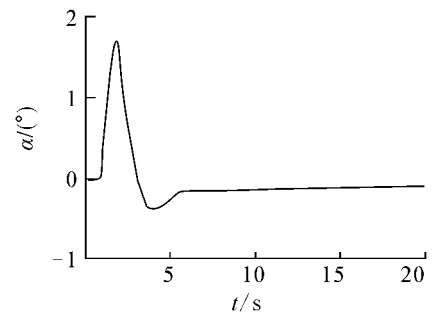


图9 模糊PID控制下的迎角的响应曲线

Fig.9 Fuzzy PID controlling lower angle of incidence response curve

为便于比较,在常规PID导引律下,3个参数的初始值也是 $K_p=0.4002$, $K_i=0.004$, $K_d=1.1$,此时的俯仰角、迎角的响应曲线分别为图10、11所示。

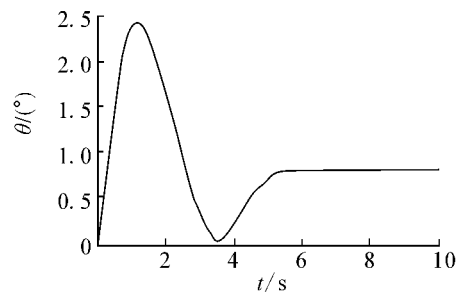


图10 常规PID控制下的俯仰角响应曲线

Fig.10 Routine PID controls lower angle of pitch response curve

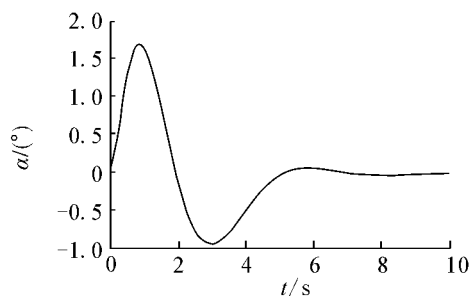


图11 常规PID控制下的迎角响应曲线

Fig. 11 Routine PID controls lower angle of incidence response curve

比较图8和图10、图9和图11,相比于常规PID控制方法,在模糊PID控制方法下的系统达到稳定的时间变小,超调也相应地减小,动态性能得到了提高,图5~7可以看出PID参数在仿真过程中也始终满足设计要求。

7 结束语

本文讨论了自动着舰控制系统的各个分系统,着重对甲板运动补偿系统和纵向导引控制律进行了分析,仿真结果说明了在有甲板运动补偿环节的情况下,舰载机可以很好地对甲板运动进行跟踪,减小着舰误差。在常规PID控制的基础上,通过引入模糊控制,对舰导引律进行了改进,仿真结果说明了模糊控制适用于舰载机着舰控制这一复杂系统,模糊PID控制器的性能比常规PID控制器有明显的改善,其响应时间加快,超调减小,动态性能得到了提高,其具有的在线调参的能力,使其更能满足着舰的要求。

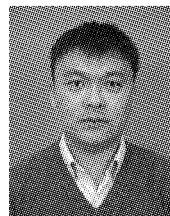
参考文献:

- [1] 张明廉,徐军. 舰载飞机自动着舰系统的研究[J]. 北京航空航天大学学报, 1994, 20(4): 386-391.
ZHANG Minglian, XU Jun. Studies on automatic carrier landing system for carrier aircraft[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 1994, 20(4): 386-391.
- [2] 郭锁凤,申功勋. 先进飞行控制系统[M]. 北京:国防工业出版社, 2003: 206-244.
- [3] LIU Bo, SHEN Qinghua. Elementary discussion of flight control technology[J]. Flight Dynamics, 2007, 25(2): 6-8.
- [4] 席爱民. 模糊控制技术[M]. 西安:西安电子科技大学出版社, 2008: 65-92.
- [5] 吴森堂,费玉华. 飞行控制系统[M]. 北京:北京航空航天大学出版社, 2005: 125-127.
- [6] 石明,屈香菊. 甲板运动对舰载机人工着舰的影响和补偿[J]. 飞行力学, 2006, 1: 5-8.
SHI Ming, QU Xiangju. The influence and compensation of deck motion in carrier landing approach[J]. Flight Dynamics, 2006, 1: 5-8.
- [7] 陈华坤,章卫国,刘长林. 舰载机纵向自动着舰控制系统设计[J]. 弹舰与制导学报, 2007, 1: 73-76.
CHEN Huakun, ZHANG Weiguo, LIU Changlin. Design of automatic control system for longitudinal landing on carrier[J]. Journal Projectiles, Rockets, Missiles and Guidance, 2007, 1: 73-76.
- [8] 杨建新,杜永贵. 模糊自适应PID控制及其仿真[J]. 机械工程与自动化, 2006, 5: 110-113.
YANG Jianxin, DU Yonggui. Self-adaptive tuning of fuzzy PID controller and its simulation[J]. Mechanical Engineering and Automation, 2006, 5: 110-113.
- [9] 彭兢. 舰载飞机进舰着舰的自动引导和控制研究[D]. 北京:北京航空航天大学, 2001: 25-28.
PENG Jing. Carrier-based aircraft carrier landing ship into the automatic guidance and control[D]. Beijing: Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2001: 25-28.
- [10] CRASSIDIS J L, MOOK D J. Robust control design of an automatic carrier landing system[J]. AIAA-92-4619-CP.

作者简介:



彭秀艳,1962年,女,教授,研究方向为随机系统估计与控制;复杂系统建模及预测。近年来获省部级科技进步奖5项,发表文章40余篇。其中多篇被EI/ISTP检索。



王志文,男,1978年生,博士,主要研究方向为船舶运动智能控制方法、船舶运动控制系统设计、船舶运动控制方法研究。