

引用格式:吴鹏飞,石章松,吴中红,等.无人直升机着舰甲板运动预估与补偿方法[J].电光与控制,2019,26(12):22-27. WU P F, SHI Z S, WU Z H, et al. An estimation and compensation method of deck motion for unmanned helicopter landing on ship[J]. Electronics Optics & Control, 2019, 26(12):22-27.

无人直升机着舰甲板运动预估与补偿方法

吴鹏飞^{1,2}, 石章松¹, 吴中红¹, 郝翎钧¹

(1. 海军工程大学兵器工程学院, 武汉 430033; 2. 中国人民解放军92925部队, 山西 长治 046000)

摘要:无人直升机担负着越来越重要的作战使命,而甲板运动是影响其着舰安全的重要因素,对着舰甲板运动进行精确预估与补偿是亟待解决的难题。为此,基于自适应AR模型与最优预见控制方法,提出了一种甲板运动预估与补偿方法。基于AR模型设计甲板运动预估器时,引入时变因子设计了自适应模型参数更新律优化模型性能,强调数据的实时性,仿真结果表明,该方法在一定程度上提高了甲板运动预估的准确性,且计算相对简单;将甲板运动预估器产生的预估信号作为可预见的未来信息引入预见控制器,并基于最优控制理论对着舰甲板运动进行补偿,较好地改善了甲板运动补偿系统相位延迟问题,并在一定程度上提高了甲板运动跟踪精度,进而提高无人直升机着舰成功率。

关键词:无人直升机; 自主着舰; 甲板运动; 预估与补偿; 自适应AR模型; 最优预见控制

中图分类号: TP249 **文献标志码:** A **doi:**10.3969/j.issn.1671-637X.2019.12.005

An Estimation and Compensation Method of Deck Motion for Unmanned Helicopter Landing on Ship

WU Peng-fei^{1,2}, SHI Zhang-song¹, WU Zhong-hong¹, HAO Ling-jun¹

(1. College of Weaponry Engineering, Naval University of Engineering, Wuhan 430033, China;
2. No. 92925 Unit of PLA, Changzhi 046000, China)

Abstract: Unmanned helicopter is undertaking more and more important combat missions, and deck motion is an important factor affecting the safety of its autonomous landing, thus the accurate estimation and compensation of deck motion becomes an urgent problem. To solve the problem, a method of deck motion estimation and compensation based on adaptive AR model and optimal preview control is proposed. When designing the deck motion estimator based on AR model, the time-variant factor is introduced to design the updating law of the adaptive model parameters, so as to optimize model performance. Simulation results show that the proposed method improves the accuracy of deck motion estimation to a certain extent, and its computation process is relatively simple. Then, the prediction signals generated by the deck motion estimator are introduced into the preview controller as the foreseeable future information, and the deck motion of the landing point is compensated based on the optimal control theory. This method solves the problem of phase delay of deck motion compensation system effectively and improves the deck motion tracking accuracy to a certain extent, so that it can increase the success rate of unmanned helicopter autonomous landing.

Key words: unmanned helicopter; autonomous landing; deck motion; estimation and compensation; adaptive AR model; optimal preview control

0 引言

无人直升机在战争中扮演着越来越重要的角色,

尤其在现代海战中表现愈发突出,而在无人直升机着舰过程中,甲板运动是影响其着舰安全的重要因素。由于风浪的作用,舰船会产生六自由度的运动,其中,甲板横摇、纵摇和沉浮运动引起的理想着舰点横向和垂直方向的运动是最有可能导致无人直升机着舰失败的因素^[1]。所以,在无人直升机的着舰阶段必须对甲板运动进行跟踪和控制,将甲板运动信号引入到着舰引导控制系统中,当甲板处于一个符合着舰条件的“平

收稿日期:2019-01-07 修回日期:2019-02-24

基金项目:国家自然科学基金(61773395)

作者简介:吴鹏飞(1987—),男,河北沧州人,博士生,研究方向为无人直升机自主着舰技术。

稳期”时,控制无人直升机迅速地着舰^[2]。着舰引导控制系统在甲板运动特征频率内必然存在一定的相位滞后,使得无人直升机无法及时跟踪着舰甲板运动,为此,有必要对甲板运动进行补偿,从而减小跟踪误差。目前,解决甲板运动补偿问题常用两种思路,即基于相位超前网络的补偿方法和基于甲板运动预估的补偿方法。相位超前网络旨在减小相位延迟,但其能力有限,并不能完全消除相位延迟^[3];基于甲板运动预估的补偿方法只是将甲板运动预估信号提前了固定时长,而甲板运动的频率存在一定带宽,预估信号根据甲板运动频率不同需要提前预估的时间也不同,所以该方法也不能彻底解决控制系统相位滞后问题^[4]。文献[5]提出了一种卡尔曼滤波与预见控制相结合的甲板纵向运动补偿方法,采用卡尔曼滤波方法对甲板运动进行预估,然后将预估信息作为预见信息对控制输入进行调整,试图解决系统相位滞后的问题,但是,采用卡尔曼滤波方法需要知道准确的状态空间模型,而且受限于模型线性和高斯噪声的约束,海上情况在实际中是复杂多变的,舰船甲板运动不满足该约束条件,且不能够用一个确定的状态空间模型进行建模^[6]。文献[7]基于时间序列预估算法设计了 AR (Auto-Regressive) 模型的

$$\begin{cases} \varphi_s(t) = 0.021\sin(0.46t) + 0.043\sin(0.54t) + 0.029\sin(0.62t) + 0.022\sin(0.7t) \\ \theta_s(t) = 0.005\sin(0.46t) + 0.00964\sin(0.58t) + 0.00725\sin(0.7t) + 0.00845\sin(0.82t) \\ H(t) = 0.2172\sin(0.4t) + 0.4714\sin(0.5t) + 0.3592\sin(0.6t) + 0.0227\sin(0.7t) \end{cases} \quad (1)$$

式中, $\varphi_s(t)$ 、 $\theta_s(t)$ 和 $H(t)$ 分别代表甲板横摇、纵摇和沉浮运动。

本文甲板运动模型仅作为仿真实验的数据来源,甲板预估器的设计只与历史数据有关,甲板运动预估与补偿过程不使用甲板运动模型任何相关信息。

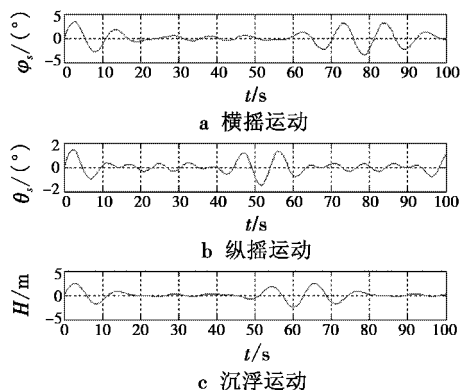


图 1 甲板运动模型

Fig. 1 Deck motion model

1.2 AR 模型序列的预估模型

设 AR 模型动态方程为^[10]

$$y(t) = \sum_{i=1}^n a_i y(t-i) + e(t) \quad (2)$$

甲板运动预估器,使得预估精度有了一定提高,基于 AR 模型的甲板运动预估算法只需要甲板运动的历史数据,而不需要甲板运动的数学模型,计算相对简单且精度较高。文献[8]基于 AR 模型和相位超前网络设计了甲板运动补偿系统,该方法在一定程度上提高了对甲板运动的跟踪性能,但依旧没有解决相位超前网络能力不足的问题。

综上,本文将 AR 模型与预见控制相结合,提出了基于自适应 AR 模型与最优预见控制的甲板运动预估与补偿方法。该方法的预估器设计基于自适应 AR 模型,计算简单且精度较高;补偿系统采用预见控制来解决控制系统延迟问题,即将自适应 AR 模型甲板运动预估器产生的预估信号作为可预见的未来信息引入预见控制器,对控制输入进行调整,以达到减小系统相位延迟和跟踪误差的控制目标,从而提高着舰成功率。

1 自适应 AR 模型的甲板运动预估器

1.1 甲板运动模型

本文选取甲板横摇、纵摇和沉浮运动进行研究。某军舰在中等海况下以 20 kn 速度航行时甲板运动模型如图 1 所示^[9],其运动模型采用正弦波叠加法,为

式中: n 为模型阶数; a_i 为模型参数; $e(t)$ 为噪声序列。

若令

$$\begin{cases} \mathbf{A}(t) = [a_1(t) & a_2(t) & \cdots & a_n(t)] \\ \mathbf{Y}(t) = [y(t-1) & y(t-2) & \cdots & y(t-n)] \end{cases} \quad (3)$$

那么

$$y(t) = \mathbf{A}(t)\mathbf{Y}^T(t) + e(t) \quad (4)$$

在 AR 模型的阶数和参数确定后,设 $\hat{y}(t+l)$ 为 $y(t)$ 的未来 l 步的预估,则

$$\hat{y}(t+l) = \begin{cases} \sum_{i=1}^n a_i y(t+l-i) & l=1 \\ \sum_{i=1}^{l-1} a_i \hat{y}(t+l-i) + \sum_{i=l}^n a_i y(t+l-i) & 1 < l \leq n \\ \sum_{i=1}^n a_i \hat{y}(t+l-i) & l > n \end{cases} \quad (5)$$

1.3 自适应 AR 模型的定阶与参数更新率设计

为使 AR 模型能够更好地适应甲板运动信号统计性质的变化,自适应 AR 模型采用引入时变因子的最小二乘法来估计模型参数^[11],使预估误差的加权平方和最小,一般情况下取时变因子 $\lambda \in [0.98, 0.99]$ 。

定义预估误差为

$$\xi(t+1) = y(t+1) - Y(t+1)A^T(t) \quad (6)$$

预估误差的加权平方和为

$$J_e = \sum_{j=1}^t \lambda^{t-j} \xi^2(j) \quad (7)$$

因此,自适应 AR 模型预估器模型参数递推算式为

$$\begin{cases} A^T(t) = [\sum_{j=1}^t \lambda^{t-j} Y^T(j) Y(j)]^{-1} [\sum_{j=1}^t \lambda^{t-j} Y^T(j) Y(j)] \\ A^T(t+1) = A^T(t) + M(t+1)[y(t+1) - Y(t+1)A^T(t)] \\ M(t+1) = P(t)Y^T(t+1)[\lambda + Y(t+1)P(t)Y^T(t+1)]^{-1} \\ P(t+1) = [P(t) - M(t+1)Y(t+1)P(t)]/\lambda \end{cases} \quad (8)$$

式中:初始条件为 $A^T(0) = 0, P(0) = \alpha I, I$ 为单位矩阵, α 一般为正常数,且取值较大; $M(t)$ 和 $P(t)$ 分别为更新矩阵和误差协方差矩阵^[12]。

设样本容量为 N , BIC 准则函数 F_{BIC} 为

$$F_{\text{BIC}}(p, N) = \ln \left(\frac{\sum_{i=n+1}^N \xi^2(t)}{N-p} \right) + \frac{n \ln N}{N-n} \quad (9)$$

则最优阶数 n 为最小的 BIC 函数值所对应的 p 值。

1.4 甲板运动预估器工作流程

基于自适应 AR 模型的甲板运动预估器主要包括模型定阶、模型参数估计和更新等,预估器工作流程如图 2 所示。

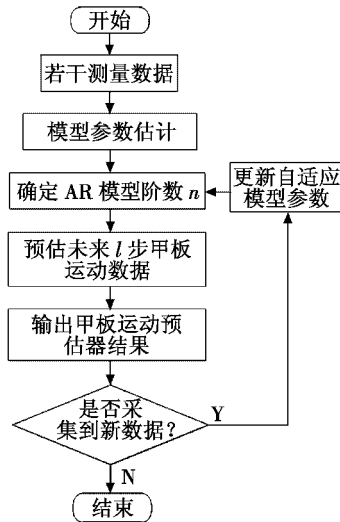


图 2 甲板运动预估器工作流程

Fig. 2 Working process of deck motion estimator

2 基于最优预见控制的甲板运动补偿器设计

最优预见控制是在控制系统中增加一个前馈通道,将未来可预见的信息接入控制系统,然后基于最优控制理论对控制输入进行调整,从而达到比较好的控制效果的一种控制方法^[13]。

2.1 最优预见控制问题

线性离散系统为

$$\begin{cases} x(k+1) = Ax(k) + Bu(k) \\ y(k) = Cx(k) \end{cases} \quad (10)$$

式中: $x(k) \in \mathbf{R}^n, y(k) \in \mathbf{R}^m, u(k) \in \mathbf{R}^r$, 并且 $x(k), y(k), u(k)$ 分别表示无人直升机相应控制通道不同维度的状态、输出和输入变量; A, B, C 为对应的状态矩阵。在式(10)所表示的离散系统中,设其是能控能观的,且 $r \geq m$, 目标参考输入为 $r(k)$, 误差为 $e(k)$, 则有

$$e(k) = r(k) - y(k) \quad (11)$$

将 $e(k)$ 和 $x(k)$ 进行融合可以导出状态空间方程^[14]为

$$x(k+1) = G_x x(k) + G_u \Delta u(k) + G_r \Delta r(k) \quad (12)$$

式中: Δ 表示差分算子; $x(k) = (e(k) \quad \Delta x(k))^T$; $G_x = \begin{pmatrix} I_m & -CA \\ 0 & A \end{pmatrix}$; $G_u = (-CB \quad B)^T$; $G_r = (I_m \quad 0)^T$ 。

假设未来 l 步的目标值信息是已知的,则定义二次型评价函数为^[15]

$$J = \sum_{k=-l+1}^{\infty} [x^T(k) Q x(k) + \Delta u^T(k) H \Delta u(k)] \quad (13)$$

式中:使得评价函数取最小值的 $\Delta u(k)$ 就是求解的目标; Q, H 是权重矩阵,需要多次实验进行选择。另外,根据预见控制的性质,控制输入在 l 步之前就开始变化,因此 k 的取值是从 $-l+1$ 步开始的。

2.2 最优预见控制律

设系统的控制输入为

$$\Delta u(k) = Fx(k) + \sum_{j=0}^l F_r(j) \Delta r(k+j) \quad (14)$$

式中: $Fx(k)$ 为状态反馈的最优解; F_r 为待求解的前馈控制系数。

$$\begin{cases} F = -(H + G_u^T P G_u)^{-1} G_u^T P G_x \\ P = Q + G_x^T P G_x - G_x^T P G_u [H + G_u^T P G_u]^{-1} \times G_u^T P G_x \end{cases} \quad (15)$$

式(14)中等号右边第 2 项采用了未来 l 步目标值的预见前馈补偿。

假设未来 l 步之后目标值为定值,即

$$\Delta r(k+i) = 0 \quad i = l+1, l+2, \dots \quad (16)$$

那么包含未来目标值的误差系统扩大为

$$\begin{bmatrix} x(k+1) \\ x_r(k+1) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} G_x & G_{pr} \\ 0 & A_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x(k) \\ x_r(k) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} G_u \\ 0 \end{bmatrix} \Delta u(k) \quad (17)$$

$$\text{式中: } G_{pr} = [G_r \quad 0 \quad \dots \quad 0]; A_r = \begin{bmatrix} 0 & I_m & 0 & \dots & 0 \\ \vdots & 0 & I_m & \dots & \vdots \\ 0 & \vdots & \vdots & \ddots & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \dots & I_m \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 0 \end{bmatrix};$$

$$x_r(k) = \begin{bmatrix} \Delta r(k+1) \\ \Delta r(k+2) \\ \vdots \\ \Delta r(k+l) \end{bmatrix}。$$

由式(17)可得最小化评价函数

$$J = \sum_{k=-j+1}^{\infty} \left[x^T(k) \quad x_r(k) \right] \begin{bmatrix} Q & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x(k) \\ x_r(k) \end{bmatrix} + \Delta u^T(k) H \Delta u(k) \quad (18)$$

式中： $Q \in \mathbf{R}^{(m+n) \times (m+n)}$ ， $Q = \begin{bmatrix} Q_e & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$ ， $Q_e \in \mathbf{R}^{m \times m}$ ； $H \in \mathbf{R}^{r \times r}$ 。

根据最优控制理论，由式(17)和式(18)可解得目标值预见前馈系数 $F_r(j)$ 和最优预见控制律分别为

$$F_r(j) = -[H + G_u^T P G_u]^{-1} G_u^T (\xi^T)^{j-1} P G_r \quad (19)$$

$$\Delta u(k) = F_e e(k) + F_x \Delta x(k) + \sum_{j=0}^l F_r(j) \Delta r(k+j) \quad (20)$$

式(19)中， $\xi = [I - G_u [H + G_u^T P G_u]^{-1} G_u^T P] G_x$ ， $F = (F_e \quad F_x)$ 。由式(20)可以看出，最优预见控制在普通最优控制基础上增加了前馈通道，如图 3 所示。

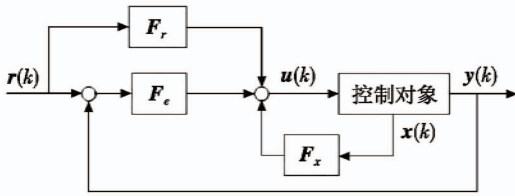


图 3 最优预见控制结构图

Fig. 3 Optimal preview control structure

2.3 甲板运动补偿器设计

无人直升机在着舰阶段，其理想着舰点跟随甲板始终在运动，其中，对着舰安全影响最大的主要是垂直运动 h 和横向运动 y ，基于最优预见控制的甲板运动补偿器因此也分为垂直和横向两部分，控制器的预见信息也分别为增加了垂直运动的高度指令和横向运动的侧偏指令，在飞行控制系统内部甲板运动补偿器以前馈控制的形式发挥补偿作用，补偿器结构如图 4 所示。

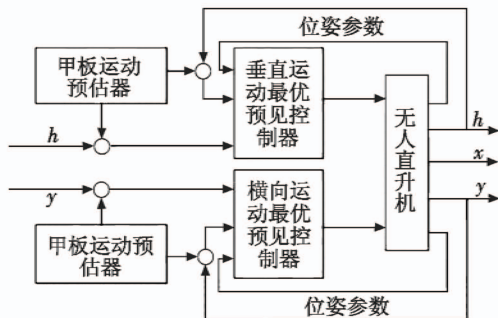


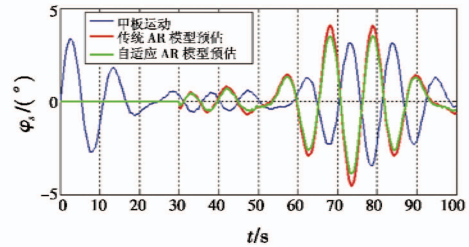
图 4 甲板运动补偿器设计

Fig. 4 Deck motion compensator

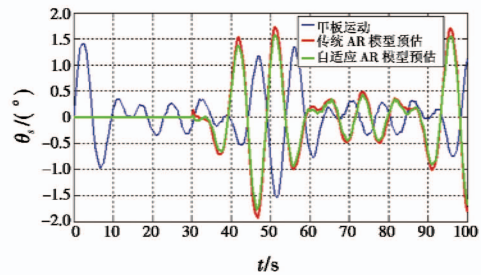
3 仿真分析

3.1 甲板运动预估仿真分析

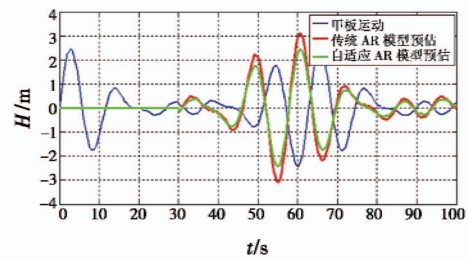
本文将基于传统 AR 模型的预估器与本文设计的预估器进行了对比分析。甲板运动仿真模型采用 1.1 节中某军舰在中等海况下以 20 kn 的速度航行时的甲板运动模型，设置仿真时间为 100 s，预估器从第 30 s 开始工作，采样周期为 0.25 s，预估步长为 20，即预估 5 s 后的甲板运动情况。由于对无人直升机着舰安全影响最大的分别是甲板横摇、纵摇和沉浮运动，所以基于两种预估器分别对这 3 种运动进行了预估，仿真对比结果如图 5 所示。



a 横摇运动



b 纵摇运动



c 沉浮运动

图 5 3 种甲板运动预估

Fig. 5 Estimation of 3 kinds of deck motion

由图 5 可知，2 种预估器在甲板运动 30 s 后开始工作，都能够较为准确地预估 5 s 后的甲板运动。相较而言，本文的甲板运动预估器的预估曲线与甲板实际运动曲线更为接近，明显优于传统 AR 模型预估器。这是因为自适应 AR 模型引入了时变因子，逐渐减小时间较久数据的权重，使得预估结果受此刻相近数据影响更大，另外，自适应 AR 模型预估器能够自适应地调整模型阶数，从而提高了预估的准确度。

3.2 甲板运动补偿仿真分析

目前比较典型的甲板运动补偿系统(DMC)是基于相位超前网络设计的,本文采用基于最优预见控制的方法对无人直升机理想着舰点运动进行补偿,并与典型的DMC进行了对比,由于着舰点的纵向运动对无人直升机着舰影响不大,所以重点分析对着舰点垂直运动和横向运动的补偿,仿真对比结果如图6所示。

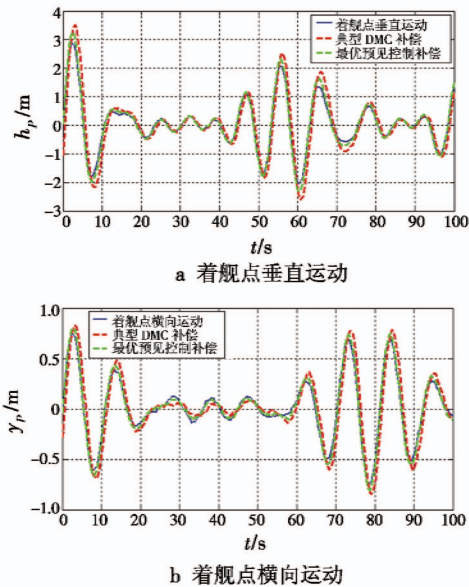


图6 甲板运动补偿

Fig. 6 Deck motion compensation

由图6可知,2种补偿系统都能较好地对着舰点运动预估信号进行补偿。但相较而言,典型DMC补偿由于相位超前网络本身能力的限制,还是存在较大的相位延迟,而基于最优预见控制的补偿系统较好地改善了系统相位延迟问题,这是由于将甲板运动预估器产生的预估信号作为可预见的未来信息引入预见控制器后,控制系统通过对未来信息的利用提前对控制输入进行调节,从而减小了系统相位延迟。另外,2种补偿方法都是基于同一种甲板运动预估信号,从仿真曲线明显看出,基于最优预见控制的补偿系统在准确度上也优于典型DMC补偿,2种补偿方法的误差曲线如图7所示。

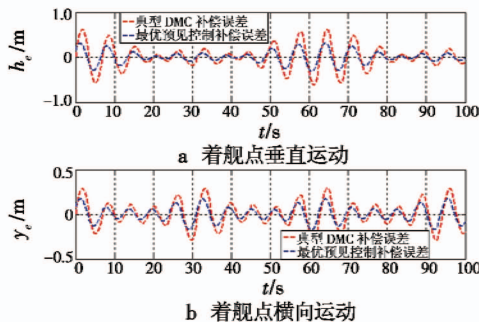


图7 甲板运动补偿误差比较

Fig. 7 Comparison of compensation errors

综上所述,本文设计的甲板运动预估器能够较好地预估甲板运动,由于可自适应调整模型参数并引入了时变因子,其预估准确度相较传统AR模型有较大提高。本文设计的甲板运动补偿系统先将影响无人直升机着舰安全的着舰点运动预见信息引入预见控制器,然后基于最优控制理论对着舰点运动预估信号进行补偿,改善了补偿系统相位延迟的问题,并有效提高了补偿精度。

4 结束语

鉴于甲板运动对于无人直升机着舰安全的重要影响,对甲板运动进行精确预估与补偿成为亟待解决的难题。为此,本文提出了一种基于自适应AR模型与最优预见控制的甲板运动预估与补偿方法,在AR模型基础上设计了甲板运动预估器,引入时变因子设计了自适应模型参数更新律优化模型性能,强调数据的实时性,将甲板运动预估信号作为可预见的未来信息引入预见控制器,并基于最优控制理论对影响无人直升机着舰安全的着舰点垂直运动和横向运动进行了补偿。仿真结果表明,该方法在一定程度上提高了甲板运动预估的准确性,且改善了甲板运动补偿相位延迟的问题,从而为解决高海况下无人直升机自主着舰时的甲板运动预估与补偿难题提供了借鉴,具有一定的理论与工程实践价值。

参考文献

- [1] 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.
- [2] 周鑫,彭荣鲲,袁锁中,等. 舰载机着舰纵向甲板运动预估及补偿技术[J]. 南京航空航天大学学报, 2013, 45(5):599-604.
- [3] YANG X L. Displacement motion prediction of a landing deck for recovery operations of rotary UAVs[J]. International Journal of Control, Automation and Systems, 2013, 11(1):58-64.
- [4] 戴文正. 无人直升机自主着舰引导与控制技术研究[D]. 南京:南京航空航天大学, 2014.
- [5] 马坤,甄子洋,覃海群. 基于预见控制的甲板运动跟踪控制研究[J]. 电光与控制, 2017, 24(11):74-77.
- [6] KOO S, KIM S, SUK J. Model predictive control for UAV automatic landing on moving carrier deck with heave motion[J]. International Federation of Automatic Control - PapersOnLine, 2015, 48(5):59-64.
- [7] 侯敏,甄子洋,龚华军. 基于自适应AR模型的甲板运

- 动预估技术[J]. 飞行力学, 2018, 36(3):33-36.
- [8] 黄誉. 无人直升机自主着舰关键技术研究[D]. 西安: 西北工业大学, 2015.
- [9] YIN J C, PERAKIS A N, WANG N. A real-time ship roll motion prediction using wavelet transform and variable RBF network[J]. *Ocean Engineering*, 2018, 160:10-19.
- [10] LU K K, CHENG N, LI Q. Research and simulation on the carrier deck motion adaptive prediction for ACLS design [C]//IEEE Chinese Guidance, Navigation and Control Conference, 2014:1341-1345.
- [11] YU Y, WANG H L, LI N, et al. Automatic carrier landing system based on active disturbance rejection control with a novel parameters optimizer[J]. *Aerospace Science and Technology*, 2017, 69:149-160.
- [12] ZHEN Z Y, JIANG S Y, MA K. Automatic carrier landing control for unmanned aerial vehicles based on preview control and particle filtering[J]. *Aerospace Science and Technology*, 2018, 81:99-107.
- [13] 甄子洋, 王志胜, 王道波. 基于信息融合估计的离散线性系统预见控制[J]. *自动化学报*, 2010, 36(2):347-352.
- [14] YOUN I, KHAN M A, UDDIN N, et al. Road disturbance estimation for the optimal preview control of an active suspension systems based on tracked vehicle model[J]. *International Journal of Automotive Technology*, 2017, 18(2):307-316.
- [15] YOUN I, TCHAMNA R, LEE S H, et al. Preview suspension control for a full tracked vehicle[J]. *International Journal of Automotive Technology*, 2014, 15(3):399-410.
-
- (上接第 16 页)
2055-2061.
- [4] 李家豪, 孙洪飞. 自抗扰控制技术的改进和应用[J]. *厦门大学学报: 自然科学版*, 2018, 57(5):695-701.
- [5] 王清, 招启军. 基于遗传算法的旋翼翼型综合气动优化设计[J]. *航空动力学报*, 2016, 31(6):1486-1495.
- [6] 陈冲. 量子群智能算法及其在控制器优化设计中的应用[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2010.
- [7] 杨立本, 章卫国, 黄得刚. 基于 ADRC 姿态解耦的四旋翼飞行器鲁棒轨迹跟踪[J]. *北京航空航天大学学报*, 2015, 41(6):1026-1033.
- [8] 杨成顺. 多旋翼飞行器建模与飞行控制技术研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2013.
- [9] 聂博文. 微小型四旋翼无人直升机建模及控制方法研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2006.
- [10] SHI Y H, EBERHART R C. A modified particle swarm optimizer [C]//Proceedings of the IEEE International Conference on Evolutionary Computation, 1998:69-73.
- [11] 周利军, 彭卫, 曾小强, 等. 基于杂交变异的动态粒子群优化算法[J]. *计算机科学*, 2013, 40(11A):143-146.