

舰载机着舰纵向甲板运动预估及补偿技术

周鑫 彭荣鲲 袁锁中 江驹

(南京航空航天大学自动化学院, 南京, 210016)

摘要:纵向甲板运动造成了理想着舰点高度的变化,是影响舰载机安全着舰的一个主要因素。为了减小纵向甲板运动对着舰的影响,本文提出了对纵向甲板运动进行预估和补偿的方法。基于超前网络设计了甲板运动补偿器,基于粒子滤波设计了甲板运动预估器,将甲板运动信号经过预估器和补偿器后接入纵向自动着舰引导系统,使得舰载机在着舰最后阶段可以准确跟踪甲板运动,以减小甲板运动对着舰的影响。针对不同的海况条件,对本文设计的预估器和补偿器进行了仿真验证,并与其他方法进行了比较。结果表明,本文设计的纵向甲板运动预估器和补偿器可以有效补偿由甲板运动引起的着舰误差,显著提高了着舰的安全性和准确性。

关键词:甲板运动预估;甲板运动补偿;粒子滤波;自动着舰引导系统

中图分类号:V249.12

文献标志码:A

文章编号:1005-2615(2013)05-0599-06

Longitudinal Deck Motion Prediction and Compensation for Carrier Landing

Zhou Xin, Peng Rongkun, Yuan Suozhong, Jiang Ju

(College of Automation Engineering, Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, Nanjing, 210016, China)

Abstract: Longitudinal deck motion causes the variation of the height of ideal touch down point, which is a main factor affecting the safety of carrier landing. In order to decrease the influences of longitudinal deck motion on carrier landing, a method of deck motion prediction and compensation is proposed. Deck motion compensator based on lead network and deck motion predictor based on particle filter are designed. The deck motion signal is first processed by the predictor and compensator and then connected to the longitudinal automatic carrier landing system, which helps the carrier aircraft track the deck motion accurately in the final stage of landing and decreases the influences of deck motion on carrier landing. The designed compensator and predictor are examined and compared with other method through simulation experiments in different sea states. Simulation results show that the designed deck motion predictor and compensator can effectively compensate for the landing error caused by deck motion and can significantly improve the safety and accuracy of carrier landing.

Key words: deck motion prediction; deck motion compensation; particle filtering; automatic carrier landing system

甲板运动对着舰的影响可分为纵向和侧向两个方面,其中纵向运动会引起甲板上理想着舰点的高度变化,这给着舰过程增加了难度,严重影响着舰的安全^[1-4]。在着舰的最后阶段将理想着舰点的高度变化信号引入到纵向自动着舰引导系统

(Longitudinal automatic carrier landing system, ACLS_{|long})中,使飞机跟踪理想着舰点的高度变化,如此可减小着舰误差,提高着舰安全。然而 ACLS_{|long} 由于自身因素,在舰体运动特征频率内不可避免地存在一定的相位滞后,从而导致舰载机

基金项目:国家自然科学基金(61273050)资助项目;航空科学基金(20121352026)资助项目;中央高校基本科研业务费专项资金(NZ2012004)资助项目。

收稿日期:2013-02-19;**修订日期:**2013-06-20

通信作者:周鑫,男,副教授,1980年生,E-mail:zxzhou@nuaa.edu.cn。

无法准确及时地跟踪理想着舰点的高度变化,容易造成较大的着舰误差。因此,为了减小跟踪误差,应当对纵向甲板运动进行补偿,以提高飞机的跟踪性能。结构简单、实现方便的基于相位超前网络的甲板运动补偿(Deck motion compensation, DMC)网络首先得到了应用^[1,5-7]。该种甲板运动补偿器可以一定程度上改善 $ACLS|_{long}$ 在舰体运动特征频率内的相位延迟,然而由于超前网络本身补偿能力有限,该方法还不能使系统相位滞后得到完全消除。另外一种策略是采用预估算法设计甲板运动预估(Deck motion prediction, DMP)器,将预估得到的未来时刻甲板运动信号引入 $ACLS|_{long}$ 中,来达到对 $ACLS|_{long}$ 相位滞后补偿的效果。目前,应用于甲板运动预估的方法主要包括 Kalman 滤波理论^[8]、神经网络^[4]、自回归(Auto-regressive, AR)模型^[9-10]等。这类方法通常都只是基于固定时长来预测未来甲板运动信息。而实际的甲板运动具有一定的频率带宽,针对不同频率, $ACLS|_{long}$ 的相位滞后程度也是不同的,因此预估方法所需提前预测的时间理论上是不能固定的,所以这类方法同样存在不足。

文献[11]将上述补偿和预估的方法进行了结合,利用预估器获得未来时刻甲板运动信号,将预估得到的未来时刻甲板运动信号经过补偿器后引入 $ACLS|_{long}$ 。这种方法利用超前网络补偿器来改善 $ACLS|_{long}$ 的频率特性,减小其相位延迟,并且使补偿后的 $ACLS|_{long}$ 的相位和幅值在舰体运动特征频率范围内保持基本一致。同时再使用预估器来进一步减小系统的延迟,提高飞机的跟踪能力。但是文献[11]采用的预估方法是基于 Kalman 滤波的, Kalman 滤波理论上受到模型线性和噪声高斯的约束,而真实的甲板运动并不满足这个约束。粒子滤波是近年兴起的一种基于随机采样的滤波方法,可以应用到系统模型非线性和噪声非高斯的情形下,理论上比 Kalman 滤波方法更适用于甲板运动预估,并且仿真实验也证明了粒子滤波较自回归模型和 Kalman 滤波更能准确预估甲板运动^[12]。本文将粒子滤波方法应用到甲板运动预估中,并将其与基于超前网络的补偿器进行结合,引入纵向自动着舰引导系统 $ACLS|_{long}$ 中,以减小着舰点高度变化对着舰过程的影响,提高着舰的安全性和精确性。

1 甲板运动和纵向自动着舰引导系统

本节首先给出基于功率谱的甲板运动模型,然

后简要介绍纵向自动着舰引导系统。

1.1 甲板运动

本文分别在3种海况下的对甲板运动预估和补偿技术进行了验证。参考文献[13,14],给出3种海况下甲板沉浮运动成形滤波器传递函数。

平稳海况

$$G_H(s) = \frac{0.312s^2}{s^4 + 0.54s^3 + 0.912s^2 + 0.176s + 0.138}$$

中等海况

$$G_H(s) = \frac{0.354s^2 + 0.014s}{s^4 + 0.38s^3 + 0.496s^2 + 0.084s + 0.0484}$$

恶劣海况

$$G_H(s) = \frac{6.001s^2}{s^4 + 2.08s^3 + 1.32s^2 + 0.4s + 0.16}$$

需要指出的是,理想着舰点高度除了受到甲板沉浮运动的影响还受到甲板俯仰运动和横滚运动的影响,但是俯仰运动和横滚运动对着舰点高度的影响不如沉浮运动显著,因此本文忽略了甲板俯仰运动和横滚运动造成的着舰点高度变化。下文如无特殊说明,甲板运动即是指甲板的沉浮运动,也即是指理想着舰点的高度变化。

采用白噪声通过成形滤波器的方法可对上述甲板运动进行仿真,设置仿真条件为:有限带宽白噪声随机种子为14 444,噪声功率为1.0,采样时间为0.1 s。上述3种海况下的甲板沉浮运动仿真结果如图1所示。图中纵坐标 H 表示航母沉浮运动引起的理想着舰点的高度变化,该变化将作为舰载机着舰偏差的一部分叠加到总的垂直高度偏差中去。由图中可以看出,在50多秒的仿真时间中,平稳海况下甲板沉浮运动表现出的最大峰值为1.7 m,平均峰值在1 m左右,曲线变化平缓;恶劣海况下沉浮的最大峰值可以达到11.2 m,平均峰值大概在7 m左右,曲线变化较大;中等海况下沉浮运动的曲线变化介于平稳海况和恶劣海况之间。

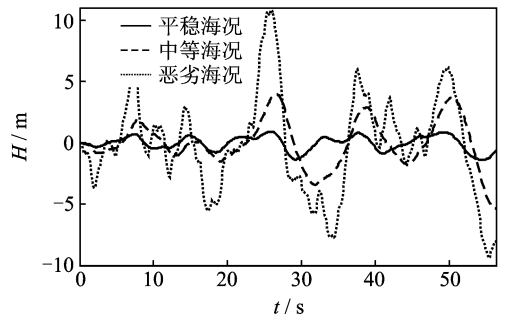


图1 3种海况下航母甲板沉浮运动曲线

1.2 纵向自动着舰引导系统

图2中虚线框内为 $ACLS|_{long}$ 的原理结构图。

H_{com} 为给定的理想基准下滑轨迹, H_i 为 $ACLS|_{long}$ 中雷达系统测量出的飞机高度, 这两者之差为高度偏差信号 H_{er} 。该信号通过导引律计算后, 作为控制信号输入飞控系统, 来对飞机姿态进行调整, 从而调整飞机高度, 实现对基准下滑轨迹的跟踪。本文构建的自动着舰导引系统是以 F/A-18A 为研究对象的, 有关飞机的模型参数见文献[15~17], 有关自动着舰导引系统的设计细节见参考文献[1,18]。

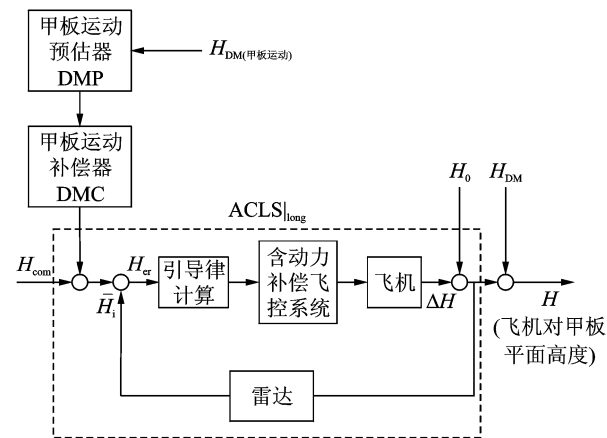


图 2 纵向自动着舰导引系统结构图

由于自身的原因, $ACLS|_{long}$ 在舰体运动特征频率内存在一定的相位滞后, 影响了舰载机对理想着舰点高度变化的跟踪, 进而影响了着舰精度。为此, 本文将甲板运动预估和补偿进行了结合, 如图 2 所示, 先通过预估器对甲板运动进行预估, 然后将预估得到的未来时刻甲板运动信号经过补偿器处理后再引入 $ACLS|_{long}$ 中。

2 纵向甲板运动补偿器设计

令 $G_{ACLS}(s)$ 为 $ACLS|_{long}$ 的闭环传递函数, $G_{DMC}(s)$ 为补偿器的传递函数。本文中补偿器采用了相位超前网络, 该补偿器对 $ACLS|_{long}$ 的相位滞后进行补偿, 理论上期望在舰体运动特征频率 ($\omega_s=0.2\sim 1.0$ rad/s) 内达到

$$G_{DMC}(s)G_{ACLS}(s)|_{s=j\omega, \omega=0.2\sim 1.0 \text{ rad/s}} = 1 \quad (1)$$

实际中, 满足式(1)的补偿器无法实现。实际工程中, 一般采用简化结构形式来设计 $G_{DMC}(s)$, 并且只要保证 $G_{DMC}(s)G_{ACLS}(s)$ 在舰体运动特征频率内具有较平坦的增益和较小的相移, 并且具有一定的抑制高频噪声的能力即可。常用的 $G_{DMC}(s)$ 的结构形式为

$$G_{DMC}(s) = K_{DMC}G_C(s)G_F(s) \quad (2)$$

式中: K_{DMC} 为补偿滤波器的增益; $G_C(s)$ 为一个超

前滤波网络用于相位补偿; $G_F(s)$ 为补偿滤波网络用于抑制高频噪声。 $G_C(s)$ 和 $G_F(s)$ 的形式分别为

$$G_C(s) = \frac{T_1s + 1}{T_2s + 1} \quad (3)$$

$$G_F(s) = \frac{s^2 + 2\xi\omega s + \omega^2}{\omega^2(\tau s + 1)^3} \quad (4)$$

式中: T_1 和 T_2 为超前滤波器时间常数; ξ, ω, τ 分别为补偿滤波器的阻尼、自然频率和时间常数。针对本文的 $ACLS|_{long}$, 设计的超前补偿网络如式(5)所示

$$G_{DMC}(s) = 180 \left(\frac{s + 0.8}{s + 7} \right) \left[\frac{0.2s^2 + 0.7s + 1}{(s + 3)^3} \right] \quad (5)$$

由图 3 给出的频率特性曲线可以看出在 $0.2\sim 1.0$ rad/s 的频率范围内, 经过补偿后的纵向自动着舰导引系统频率特性得到了明显的改善, 与未经补偿的系统相比, 增益更加平坦, 相移更小。

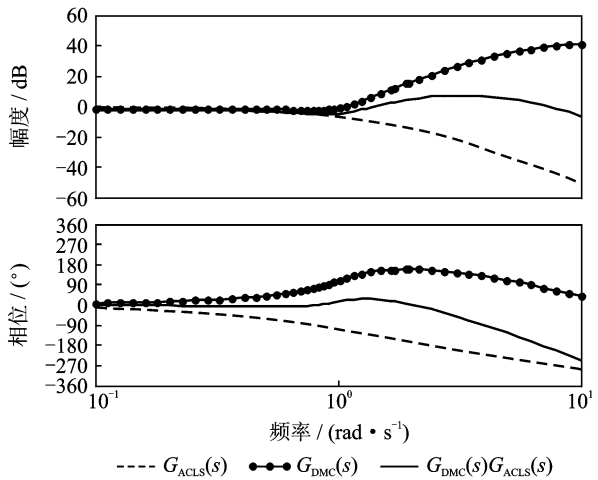


图 3 $G_{DMC}(s), G_{ACLS}(s)$ 和 $G_{DMC}(s)G_{ACLS}(s)$ 频率特性曲线

3 纵向甲板运动预估器设计

本节给出基于粒子滤波理论的甲板运动预估方法。如 1.1 节所述, 甲板沉浮运动可以用功率谱模型描述, 进而可以通过传递函数进行建模。利用线性定常系统传递函数的最小实现方法, 可将传递函数描述的甲板运动转化为由状态空间的方式进行描述。以 1.1 节中平稳海况下的甲板沉浮运动为例, 其状态空间表达式为

$$\begin{cases} \dot{x} = Ax + bw \\ z = c^T x + v \end{cases} \quad (6)$$

$$\text{式中, } A = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ -0.138 & -0.176 & -0.912 & -0.540 \end{bmatrix}; \quad b^T = [0 \quad 0.312 \quad -0.168 \quad -0.194]; \quad c^T =$$

$[1 \ 0 \ 0 \ 0]$; $\mathbf{x}^T = [x_1 \ x_2 \ x_3 \ x_4]$, x_1 为沉浮运动位移, x_2, x_3, x_4 分别为沉浮运动 x_1 的一次、二次和三次导数; z 为观测信号; w 为系统动态噪声; v 为观测噪声。将式(6)离散化得到沉浮运动的离散模型为

$$\begin{cases} \mathbf{x}_k = \Phi_{k,k-1} \mathbf{x}_{k-1} + \Gamma_{k,k-1} \mathbf{w}_{k-1} \\ z_k = \mathbf{H}_k \mathbf{x}_k + v_k \end{cases} \quad (7)$$

式中: $\Phi_{k,k-1}$ 为状态向量 \mathbf{x} 从 t_{k-1} 时刻转移到 t_k 时刻的转移矩阵, $\Phi_{k,k-1} = e^{A T_s}$; $\Gamma_{k,k-1}$ 为 t_{k-1} 时刻的噪声向量 \mathbf{w}_{k-1} 对 t_k 时刻状态向量 \mathbf{x}_k 影响的噪声系数矩阵; $\Gamma_{k,k-1} = (\int_0^{T_s} e^{A t} dt) \mathbf{b}$; $\mathbf{H}_k = [1 \ 0 \ 0 \ 0]$ 为观测系数矩阵; \mathbf{w}_{k-1} 为系统动态噪声, 其方差阵为 \mathbf{Q}_{k-1} ; v_k 为观测噪声, 其方差阵为 \mathbf{R}_k ; T_s 为采样时间。根据式(7)的离散模型, 基于粒子滤波设计甲板运动预估算法流程如下。

(1) 利用式(7), 计算 k 时刻系统的最优滤波值 $\hat{x}_{k|k}$, 具体计算过程如下:

步骤1 初始化。 设 $k=0$, 从先验概率 $P(x_0)$ 采样得到粒子 $\{x_0^i\}_{i=1}^N$, 设权值 $\{\omega_0^i\}_{i=1}^N$ 均为 N^{-1} 。

步骤2 预测。 由 $k-1$ 时刻的粒子 $\{x_{k-1}^i\}_{i=1}^N$, 利用离散方程组(7), 得到 k 时刻的预测粒子 $\{\hat{x}_k^i\}_{i=1}^N$ 。

步骤3 权值更新。 根据 k 时刻的观测向量及预测粒子, 利用 $\omega_k^i = \omega_{k-1}^i \cdot P(z_k | \hat{x}_k^i)$, 更新每个粒子的权值; 进而对权值进行归一化处理: $\tilde{\omega}_k^i = \omega_k^i / \sum_{i=1}^N \omega_k^i$ 。

步骤4 重采样。 根据 $\{\hat{x}_k^i\}_{i=1}^N$ 的权值 $\{\tilde{\omega}_k^i\}_{i=1}^N$, 重新采样得到粒子 $\{x_k^i\}_{i=1}^N$, 并重置权值 $\{\omega_k^i\}_{i=1}^N$ 均为 N^{-1} 。

步骤5 k 时刻状态估计: $\hat{x}_{k|k} = \sum_{i=1}^N \omega_k^i \cdot x_k^i$, 同时令 $k=k+1$ 。若 k 小于设定阈值, 返回到步骤2, 否则退出循环。

(2) 沉浮运动位移信息 x_k 在未来 τ 时刻的最优估计值 $\hat{x}_{k+m|k}$ 的表达式为 $\hat{x}_{k+m|k} = \Phi(k+m, k) \hat{x}_{k|k}$, 其中 $m = \tau/T_s$, 状态转移阵 $\Phi(k+m, k) = e^{A \tau} = \sum_{i=0}^{\infty} \frac{1}{i!} \cdot A^i \tau^i$ 。

采用传统的 Kalman 滤波预估方法^[11] 和本文设计的粒子滤波预估方法分别对3种不同海况下的甲板运动进行预估处理, 选取预估时间为2 s, 系统动态噪声 w_k 功率取为1, 观测噪声 v_k 功率取为0.225。图4给出了典型的3种海况下沉浮运动和两种方法预估的运动曲线, 图中曲线1为甲板的实际运动, 曲线2为 Kalman 滤波预估的甲板运动,

曲线3为粒子滤波预估的甲板运动。将预估的运动与2 s后的实际运动进行对比可以获得预估的误差。对图4中的数据统计平均的预估绝对误差, 可以得到平稳海况下, Kalman 滤波预估误差平均值为0.203 1 m, 粒子滤波预估误差平均值为0.150 8 m; 中等海况下, Kalman 滤波预估误差平均值为0.394 6 m, 粒子滤波预估误差平均值为0.236 1 m; 恶劣海况下, Kalman 滤波预估误差平均值为0.575 2 m, 粒子滤波预估误差平均值为0.394 2 m。从上述统计数据可以看出, 粒子滤波预估的甲板运动较 Kalman 滤波预估的结果更贴近真实的未来时刻的甲板运动。

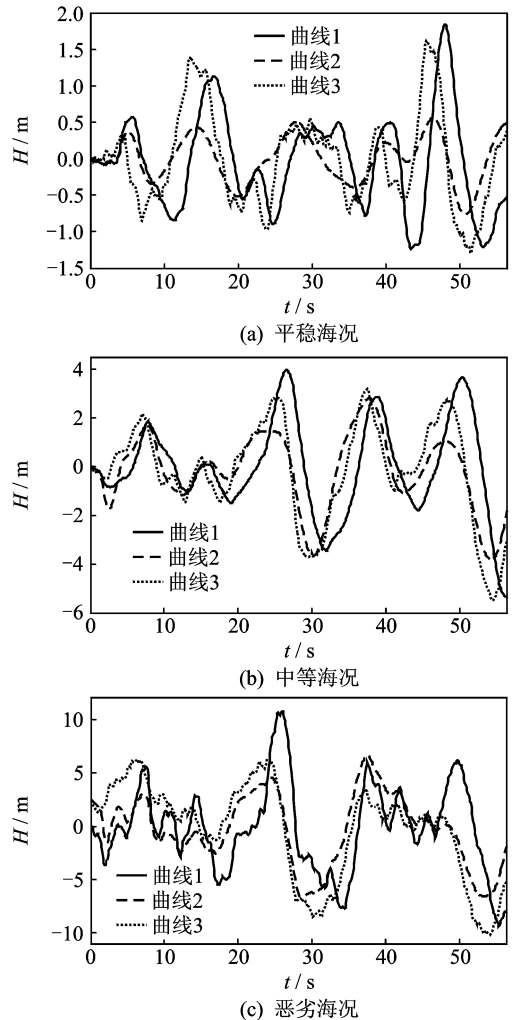


图4 甲板运动及其预估值

4 仿真实验

仿真实验中, 设置航空母舰速度为15.4 m/s (30 kn), 舰载机速度为70 m/s, 着舰基准下滑线的下滑角为 -3.5° , 舰载机在着舰引导开始后的56.3 s时着舰。依据文献[1]提供的F/A-18着舰时序, 选择在着舰前12.5 s, 将甲板运动的预估信

号(提前 2 s)经过甲板运动补偿器后加入到 $ACLS|_{long}$ 中,使飞机跟踪甲板运动。

图 5 给出了 3 种海况下具有代表性的甲板运动和舰载机跟踪甲板运动的曲线,其中舰载机的运动曲线是减去下滑基准线后的运动曲线。图中,曲线 1 表示甲板运动的实际值,曲线 2 为采用文献 [11] 的方法将基于 Kalman 滤波的甲板运动预估信息经补偿后引入 $ACLS|_{long}$ 的飞机跟踪曲线,曲线 3 为采用本文给出的粒子滤波方法对甲板运动信息预估后再通过补偿网络来引导飞机运动的跟踪曲线。可以看出,采用粒子滤波方法得到的补偿指令较采用 Kalman 滤波方法得到的补偿指令使飞机运动曲线更接近甲板运动的真实曲线,即跟踪甲板运动更准确。从最后的着舰误差来看,平稳海况下,采用 Kalman 滤波方法得到的着舰误差为 0.446 4 m,采用粒子滤波方法得到的着舰误差为 0.196 4 m;中等海况下,采用 Kalman 滤波方法得到的着舰误差为 1.689 0 m,采用粒子滤波方法得到的着舰误差为 0.571 4 m;恶劣海况下,采用 Kalman 滤波方法得到的着舰误差为 2.912 0 m,

采用粒子滤波方法得到的着舰误差为 2.219 4 m。可见,在各种海况下采用粒子滤波方法都可以取得更佳着舰效果。

海浪运动及其所引起的甲板运动均具有很大的随机性,因此采用多次实验来进一步验证。在 3 种不同海况下,利用功率谱模型随机产生 100 次不同的沉浮运动数据,将其用于着舰仿真实验,即在 3 种不同海况下分别进行了 100 次着舰仿真实验。如表 1 所示,就各种海况,分别统计了总的着舰误差(均方根误差)、理想着舰次数(着舰误差在理想范围内的次数)、允许着舰次数(着舰误差超出理想范围但在允许范围内的次数)和着舰成功率(理想着舰次数与允许着舰次数之和与总着舰次数的比例)。关于理想着舰和允许着舰的标准见文献[2,19]。由表 1 中数据可以看出,使用粒子滤波着舰的精度较使用 Kalman 滤波要高,显著提高了着舰的成功率,特别是在中等和恶劣海况条件下,使用粒子滤波更能保证着舰的安全性。仿真结果也显示了,在恶劣海况下,尽管使用粒子滤波进行预估补偿可以达到 81% 的着舰成功率,但还是相对偏低,因此舰载机应该尽量避免恶劣海况下着舰。

表 1 各种海况下 100 次着舰仿真统计结果

海况	滤波方法	理想着舰次数	允许着舰次数	着舰成功率/%	着舰误差均方根值/m
平稳	Kalman	93	7	100	0.548 2
	粒子	95	5	100	0.372 3
中等	Kalman	70	13	83	1.129 5
	粒子	82	14	96	0.863 3
恶劣	Kalman	47	20	67	2.327 8
	粒子	65	16	81	1.281 6

5 结束语

为了进一步提高着舰的安全性和精度,本文将甲板运动预估与补偿进行了结合,设计了基于超前网络的甲板运动补偿器和基于粒子滤波的甲板运动预估器,利用预估器对甲板运动未来时刻信息进行预估,将预估所得信号经补偿器后引入纵向自动着舰引导系统中,来提高舰载机对甲板运动的跟踪能力。分别在 3 种典型海况下进行了仿真实验,实验结果表明,本文提出的甲板运动预估和补偿方法可以有效补偿纵向自动着舰引导系统存在的相位滞后,与原有的方法相比,提高了舰载机对甲板运动的跟踪能力,增强了着舰的安全性和准确性。

参考文献:

[1] 杨一栋. 舰载飞机着舰引导与控制[M]. 北京:国防工

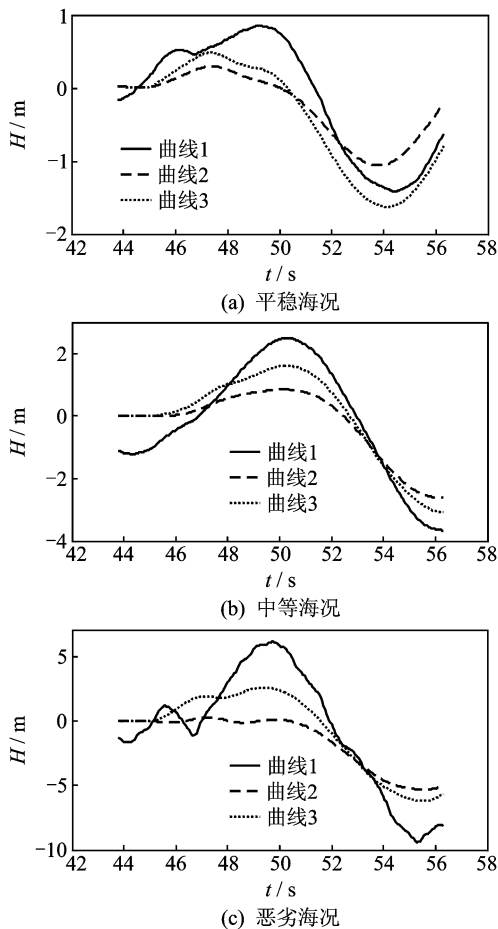


图 5 3 种海况下着舰前 12.5 s 飞机跟踪甲板运动的响应曲线

- 业出版社,2007.
- Yang Yidong. Guidance and control of carrier aircraft landing [M]. Beijing: National Defense Industry Press,2007.
- [2] 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 Lixing. 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.
- [3] 郭锁凤,申功璋,吴成富. 先进飞行控制系统[M]. 北京:国防工业出版社,2003.
- Guo Suofeng, Shen Gongzhang, Wu Chengfu. Advanced flight control system [M]. Beijing: National Defense Industry Press,2003.
- [4] 石明,屈香菊,王萌辉. 甲板运动对舰载机人工着舰的影响和补偿[J]. 飞行力学,2006,24(1):5-8.
- Shi Ming, Qu Xiangju, Wang Menghui. The influence and compensation of deck motion in carrier landing approach [J]. Flight Dynamics, 2006, 24(1):5-8.
- [5] 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.
- [6] Urnes J, Hess R. Development of the F/A-18A automatic carrier landing system [J]. Journal of Guidance, Control and Dynamics, 1985, 8(3):289-295.
- [7] 陈华坤,章卫国,王新民. 舰载机纵向自动着舰控制系统设计[J]. 弹箭与制导学报,2007,27(1):73-76.
- Chen Huakun, Zhang Weiguang, Wang Xinmin. Design of automatic control system for longitudinal landing on carrier [J]. Journal of Projectiles, Rockets, Missiles and Guidance, 2007, 27(1):73-76.
- [8] Sidar M, Doolin B. On the feasibility of real-time prediction of aircraft carrier motion at sea [J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 1983, 28(3):350-356.
- [9] 祖恩林,董新民,陈娅莉. 着舰控制系统中的甲板运动补偿技术研究[J]. 电光与控制,2009,16(12):85-88.
- Zu Enlin, Dong Xinmin, Chen Yali. Research on deck motion compensation for automatic carrier landing [J]. Electronics Optics and Control, 2009, 16(12):85-88.
- [10] 王敏,张晶,申功璋. 基于甲板运动预报的自动着舰系统综合设计[J]. 系统仿真学报,2010,22(S1):119-122.
- Wang Min, Zhang Jing, Shen Gongzhang. Design of automatic carrier landing system based on deck motion prediction [J]. Journal of System Simulation, 2010, 22(S1):119-122.
- [11] 余勇,杨一栋. 基于卡尔曼滤波理论的甲板运动预估技术研究[J]. 数据采集与处理,2002,17(4):381-384.
- Yu Yong, Yang Yidong. Deck motion prediction technique based on Kalman filtering theory [J]. Journal of Data Acquisition and Processing, 2002, 17(4):381-384.
- [12] 李静,左斌,韩维. 基于粒子滤波算法的载机着舰甲板运动预测[J]. 海军航空工程学院学报,2011,26(4):405-409.
- Li Jing, Zuo Bin, Han Wei. Deck motion prediction for carrier aircraft's landing based on particle filtering [J]. Journal of Naval Aeronautical and Astronautical University, 2011, 26(4):405-409.
- [13] Durand T, Teper G. An analysis of terminal flight path control in carrier landing [R]. AD 606040. [S. l.]: Defense Technical Information Center, 1964.
- [14] 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.
- Peng Jing. Research on the automatic guide and control of carrier-based airplane approach and landing [D]. Beijing: Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2001.
- [15] Subrahmanyam M. H-infinity design of F/A-18A automatic carrier landing system [J]. Journal of Guidance, Control and Dynamics, 1994, 17(1):187-191.
- [16] Iliff K, Wang K. Extraction of lateral-directional stability and control derivatives for the basic F-18 aircraft at high angles of attack [R]. NASA Technical Memorandum 4786, 1997.
- [17] Iliff K, Wang K. Flight-determined subsonic longitudinal stability and control derivatives of the F-18 high angle of attack research vehicle (HARV) with thrust vectoring [R]. NASA/TP-97-206539, 1997.
- [18] 袁锁中,杨京,龚华军,等. 着舰导引系统 H_∞ 控制器设计[J]. 南京航空航天大学学报,1998,30(4):377-381.
- Yuan Suozhong, Yang Jing, Gong Huajun, et al. Design of an automatic carrier landing system using H_∞ synthesis [J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 1998, 30(4):377-381.
- [19] Anderson M. Inner and outer loop manual control of carrier aircraft landing [R]. AIAA-1996-3877, 1996.