

基于卡尔曼滤波的理想着舰点垂向运动估计

李玉峰¹, 张斌², 纪景立²

(1. 中国人民解放军94840部队, 南京 210000; 2. 空军工程大学信息与导航学院, 西安 710077)

摘要: 为了满足无人机着舰的高精度需求, 提高对航母运动的预报精度, 研究了甲板运动预估技术。利用有理形式的成型滤波器引入白噪声作为系统输入, 以拟合航母俯仰运动, 运用卡尔曼滤波理论对航母甲板的俯仰运动进行了预估; 并在此基础上, 结合对甲板升沉及横滚运动的预估结果, 实现对理想着舰点垂向运动的预估。仿真结果表明, 能够有效将航母甲板的俯仰运动及理想着舰点垂向运动提前3秒预报, 对提高着舰安全性有着重要意义。

关键词: 无人机着舰; 航母运动; 卡尔曼滤波; 甲板运动预估; 理想着舰点

中图分类号: V279; U661 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-637X(2014)06-0090-04

The Ideal Touchdown Point Vertical Motion Prediction Based on Kalman Filtering

LI Yu-feng¹, ZHANG Bin², JI Jing-li²

(1. No. 94840 Unit of PLA, Nanjing 210000, China;

2. College of Information and Navigation, Air Force Engineering University, Xi'an 710077, China)

Abstract: In order to meet the high precision demand for UAV carrier landing and improve the prediction accuracy of carrier motion, the deck motion prediction technique was studied. In order to fit the carrier pitching motion, the shaping filter system of rational form with introduced white noise was used as input. The Kalman filtering theory was used to predict the pitching motion of the aircraft carrier deck. On which basis, and by using the prediction results of the deck heaving motion and roll motion, prediction to the ideal touchdown point vertical motion was realized. The simulation results show that, this method can effectively predict the aircraft carrier deck pitching motion and the ideal touchdown point vertical motion 3 second ahead of time, which is of great significance for improving the safety of the carrier landing.

Key words: carrier landing of UAV; aircraft carrier motion; Kalman filter; deck motion prediction; ideal touchdown point

0 引言

大型固定翼无人机采用等角直线下滑的方式着舰^[1], 下滑轨迹的生成取决于理想着舰点的位置。通常情况下, 航母的运动状态很复杂, 除了以30 n mile/h (1 n mile = 1852 m) 的速度行驶, 还有海洋固有的不稳定性所造成的舰体横摇(横滚)、纵摇(俯仰)、艏摇(航向摆动)、横荡、纵荡、垂荡(升沉)六个自由度运动^[2], 造成了理想着舰点的不确定性。六自由度运动中影响比较大的主要有升沉、横滚和纵摇, 且其主要影响的是理想着舰点的垂向位置。早在1976年, Sidar 和 Dodin

就利用航母升沉运动功率谱密度建立航母升沉运动模型, 采用卡尔曼滤波对航母的升沉运动进行预测^[3], 证明了利用卡尔曼理论对舰船在海浪中的升沉运动的实时预报的可行性; 文献[4-5]在对航母升沉运动预测的基础上设计了补偿器, 对其舰载机跟踪航母甲板升沉运动的相位延迟进行了补偿; 文献[6-7]基于卡尔曼滤波对舰船横摇进行了预测, 并且都取得很好的预测效果。但是, 由于局限于仅对航母甲板升沉或横滚单自由度运动的预测, 无法给出理想着舰点的运动预测, 很难满足无人机着舰的高精度需求。本文利用卡尔曼滤波对航母的俯仰运动和理想着舰点垂向运动进行预测。

1 航母俯仰运动的预测

甲板运动的幅值及频率与海况密切相关, 中等海

收稿日期: 2013-07-04

修回日期: 2013-08-29

作者简介: 李玉峰(1976—), 男, 安徽合肥人, 博士, 高级讲师, 研究方向为综合导航及数据分析。

况下,航母以 30 n mile/h 速度前进时,舰体运动幅值为典型的舰体俯仰运动,即俯仰 1.05° ,横滚 6° ,升沉为 1.5 m。由于舰体比较长,通常理想着舰点与航母重心相距较远,即使是很小的俯仰角,在着舰点处的影响也会被放大,因而对航母俯仰的预测是很有必要的。

1.1 甲板俯仰运动模型的建立

航母甲板及其六自由度运动示意图如图 1 所示。大量试验观测和数据分析表明,舰船在一定海情、航速和航向时被认为是一个线性定常系统,甲板运动实际上是一个平稳随机过程^[5]。国外使用航母的历史比较早,通过大量试验,给出了某航母升沉及俯仰运动的功率谱密度^[8],如图 2 中曲线 2,能够真实地体现航母随机运动的特征,并且,无人机着舰的时间比较短暂,其运动可视为平稳随机过程。

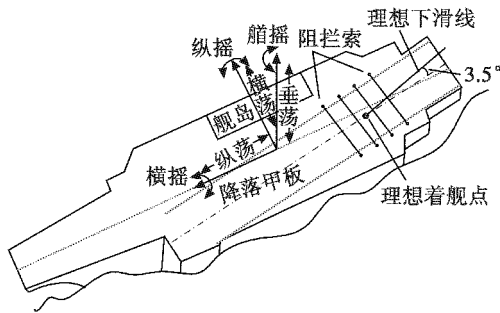


图 1 航母甲板及其六自由度运动示意图

Fig. 1 Diagram of the carrier deck and six-DOF motion

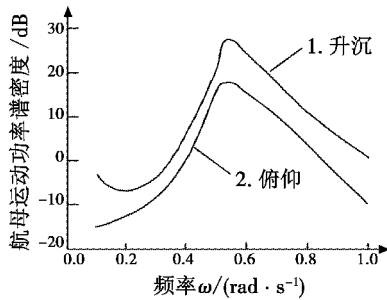


图 2 航母升沉及俯仰运动功率谱

Fig. 2 Power spectrum of carrier heaving and pitching

对于平稳随机过程,可以构造成型滤波器,以白噪声为输入,近似得到图 1 中航母纵摇运动的功率谱密度为

$$S_Y(j\omega) = |G(j\omega)|^2 S_X(j\omega) \quad (1)$$

式中: $G(j\omega)$ 为成型滤波器传递函数的傅里叶变换; $S_X(j\omega)$ 为白噪声的功率谱密度。显然, $S_X(j\omega)$ 为一个常数,取其方差为 1,式(1)简化为

$$S_Y(j\omega) = |G(j\omega)|^2 \quad (2)$$

成型滤波器采用二阶形式为

$$G(s) = gs/(s^2 + as + d) \quad (3)$$

用上式近似拟合图 2 中俯仰运动功率谱密度曲线,

得到成型滤波器的系数为 $g = 0.4, a = 0.1, d = 0.36$ 。利用线性定常系统传递函数最小实现方法,可求出甲板俯仰运动状态空间表达式为

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A}\mathbf{x} + \mathbf{b}w \\ z = \mathbf{c}^T\mathbf{x} + v \end{cases} \quad (4)$$

式中: $\mathbf{A} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -d & -a \end{bmatrix}; \mathbf{b}^T = [g \quad -ga]; \mathbf{c}^T = [1 \quad 0];$

$\mathbf{x}^T = [x_1 \quad x_2], x_1$ 为甲板俯仰角运动, x_2 为甲板俯仰角运动速度; z 为量测信号; w 为系统动态噪声; v 为量测信号。

由于计算机处理的是离散化数据,因而对上式离散化可得

$$\begin{cases} \mathbf{x}_k = \Phi_{k,k-1}\mathbf{x}_{k-1} + \Gamma_{k,k-1}w_{k-1} \\ z_k = \mathbf{H}_k\mathbf{x}_k + v_k \end{cases} \quad (5)$$

式中:状态转移矩阵 $\Phi_{k,k-1} = e^{\mathbf{A}T_s} = \begin{bmatrix} 1 & T_s \\ -dT_s & 1 - aT_s \end{bmatrix}, T_s$

为系统采样周期;噪声系数矩阵 $\Gamma_{k,k-1} = (\int_0^{T_s} e^{\mathbf{A}t} dt) \mathbf{b} = [gT_s \quad -agT_s]^T$;量测系数矩阵 $\mathbf{H}_k = [1 \quad 0]$ 。对真实甲板俯仰运动主频近似为 0.6 rad/s 。

1.2 甲板俯仰运动预估方程

假设系统动态噪声 w_k 与量测噪声 v_k 都是均值为零的正态噪声,根据离散系统卡尔曼滤波方程,可以推算出 k 时刻系统的最优估计值^[9]。

最优预测误差协方差矩阵为

$$\mathbf{P}_{k|k-1} = \Phi_{k|k-1}\mathbf{P}_{k-1|k-1}\Phi_{k|k-1}^T + \Gamma_{k,k-1}Q_{k,k-1}\Gamma_{k,k-1}^T \quad (6)$$

最优增益矩阵为

$$\mathbf{K}_k = \mathbf{P}_{k|k-1}\mathbf{H}_k^T(\mathbf{H}_k\mathbf{P}_{k|k-1}\mathbf{H}_k^T + R_k)^{-1} \quad (7)$$

卡尔曼最优滤波值为

$$\hat{\mathbf{x}}_{k|k} = \Phi_{k|k-1}\hat{\mathbf{x}}_{k|k-1} + \mathbf{K}_k(z_k - \mathbf{H}_k\hat{\mathbf{x}}_{k|k-1}) \quad (8)$$

最优滤波误差协方差矩阵为

$$\mathbf{P}_{k|k} = (\mathbf{I} - \mathbf{K}_k\mathbf{H}_k)\mathbf{P}_{k|k-1} \quad (9)$$

甲板运动预估用于预估 τ 时刻后的甲板运动位置信息,是甲板运动预估技术的核心。由式(5)可知,甲板俯仰运动角度是系统状态向量 \mathbf{x}_k 的一个分量,由于 \mathbf{x}_k 在 τ 时刻的最优估计值为

$$\hat{\mathbf{x}}_{k+m|k} = \Phi(k+m, k)\hat{\mathbf{x}}_{k|k} \quad (10)$$

式中, $m = \tau/T_s, \tau$ 为预估时间,因此预估 τ 时刻甲板俯仰运动信息即计算 $\hat{x}_{1(k+m|k)}$ 。

利用式(10)计算变换矩阵的计算式为

$$\Phi(k+m, k) = \Phi(mT_s) = \Phi(\tau) = e^{(-a/2)\tau} \times \begin{bmatrix} \cos \theta\tau + (a/2\theta) \sin \theta\tau & (1/\theta) \sin \theta\tau \\ (-d/\theta) \sin \theta\tau & \cos \theta\tau - (a/2\theta) \sin \theta\tau \end{bmatrix} \quad (11)$$

其中, $\theta^2 = d - a^2/2$ 。要预估 τ 时刻甲板俯仰运动角度信息 $\hat{x}_1(k+m, k)$, 按照式(10)展开,有

$$\hat{x}_1(k+m, k) = e^{(-a/2)\tau} [(\cos \theta\tau + (a/2\theta)\sin \theta\tau)\hat{x}_1(k, k) + (1/\theta)\sin \theta\tau \hat{x}_2(k, k)]. \quad (12)$$

2 理想着舰点垂向运动预估

由于在航母六自由度运动中,影响理想着舰点垂向位置的运动除了俯仰运动,还有横滚运动和升沉运动,因而必须先对这两个自由度的运动进行预估,并且时间要对准(即对于各个自由度运动,预估时间 τ 的取值要一致),才能给出理想着舰点垂向运动的预测值。

2.1 航母横滚及升沉运动预测

对于航母甲板横滚运动和升沉运动的预测已有很多人研究^[6-7,10]。可选两组预测结果在此应用。升沉运动预测是基于航母升沉运动的功率谱密度(图2中曲线1)来设计成型滤波器,进而得到航母升沉运动方程,最后利用卡尔曼滤波理论完成对航母升沉运动的预测。航

$$\begin{bmatrix} x_g \\ y_g \\ z_g \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos r \cos \gamma - \sin r \sin \gamma \sin p & -\sin \gamma \cos p \\ \cos r \sin \gamma + \sin r \cos \gamma \sin p & \cos \gamma \cos p \\ -\cos p \sin r & \sin p \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_b \\ y_b \\ z_b \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} t \\ s \\ h \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} x_{b0} \\ y_{b0} \\ z_{b0} \end{bmatrix} \quad (13)$$

其中: r, p, γ 分别是载体的横滚、俯仰、方位3个姿态角; (x_g, y_g, z_g) 和 (x_b, y_b, z_b) 分别指载体坐标系无震荡(平动)时某点在地理坐标系和载体坐标系中的坐标; (t, s, h) 指载体坐标系沿其轴向上的震荡(在此只讨论升沉); (x_{b0}, y_{b0}, z_{b0}) 为载体坐标系原点在地理坐标系中的坐标。

取1.2节估出的航母俯仰角为 $P(m) = \hat{x}_1(k+m, k)$,2.1节给出的横滚运动为 $r = R(m)$ 及升沉运动为 $h = H(m)$,即可给出航母理想着舰点的垂向位置为 $z(t) = [-\cos p \sin r \sin p \cos p \cos r]^T [x_b \ y_b \ z_b + h]^T + z_{b0}$ 。 (14)

3 仿真验证及分析

3.1 航母甲板俯仰运动预测仿真

卡尔曼滤波初始参数的设置并不影响估计效果,只是影响收敛速度及初始相位。取 $x_0 = \hat{x}_{0|0} = [0.5 \ 0.5]^T$, $P_0 = \hat{P}_{0|0} = \text{diag}[0.8 \ 0.1]$, $Q_k = 0.64$, $R_k = 0.49$ 。航母甲板俯仰运动仿真结果如图3所示。

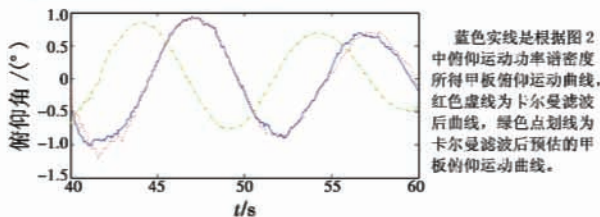


图3 甲板俯仰运动姿态角预测结果

Fig.3 Prediction results of the deck pitching

显然,经过卡尔曼滤波后,甲板俯仰运动曲线更为

平滑,取得了抑制噪声的效果;并且通过最优估计将甲板俯仰运动提前3s进行了预报。

2.2 航母理想着舰

航母的理想着舰点如图1所示,理想着舰点在垂向上的变动并不能直观地看出来,故建立两个坐标系:

1) 地理直角坐标系 $O_g x_g y_g z_g$,为了便于计算,设原点位于航母静止时理想着舰点的位置, $O_g y_g$ 指向航母行进方向, $O_g z_g$ 沿当地垂线指向天上, $O_g x_g$ 指向航母右舷与其他两轴形成右手坐标系;

2) 航母载体坐标系 $O_b x_b y_b z_b$,即固联于航母载体上的坐标系,其原点在载体的质心, $O_b y_b$ 轴指向载体的纵轴方向向前, $O_b z_b$ 轴沿载体的竖轴方向向上, $O_b x_b$ 轴与 $O_b y_b, O_b z_b$ 轴构成右手坐标系。可得从载体坐标系到地理坐标系的坐标变换公式^[11]为

$$\begin{bmatrix} x_g \\ y_g \\ z_g \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos r \cos \gamma - \sin r \sin \gamma \sin p & -\sin \gamma \cos p \\ \cos r \sin \gamma + \sin r \cos \gamma \sin p & \cos \gamma \cos p \\ -\cos p \sin r & \sin p \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_b \\ y_b \\ z_b \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} t \\ s \\ h \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} x_{b0} \\ y_{b0} \\ z_{b0} \end{bmatrix} \quad (13)$$

平滑,取得了抑制噪声的效果;并且通过最优估计将甲板俯仰运动提前3s进行了预报。

3.2 理想着舰点位移仿真

根据2.1节,对文献[3]中航母甲板升沉运动的扩展卡尔曼滤波及预估结果再现,如图4所示。

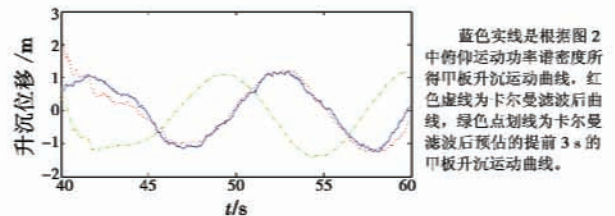


图4 甲板升沉运动位移预测结果

Fig.4 Prediction results of the deck heaving

对于横滚运动,由于数据获取不全,对文献[6]中横滚运动取20s近似给出,如图5所示。

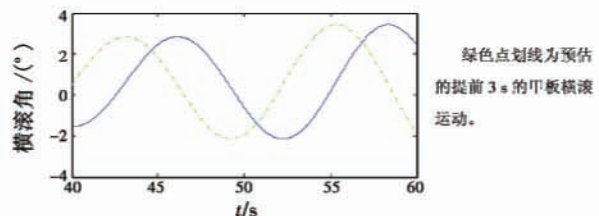


图5 甲板横滚运动姿态角预测结果

Fig.5 Prediction results of the deck rolling

以美国CVN65号航母为例,其理想着舰点相对于航母重心的位置分别为后67.97m,上19.5m,左3.05m^[12]。由以上预测的俯仰、升沉及横滚运动,根据式(14)可得对理想着舰点垂向运动的预测仿真,如图6中绿色点划线,蓝色曲线是未预测俯仰、升沉及横滚运

动,根据式(14)计算所得。对比可知,实现了对理想着舰点垂向运动提前3 s秒预报。

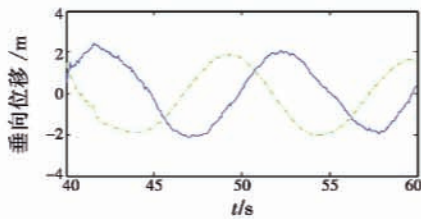


图6 理想着舰点垂向运动预测结果

Fig. 6 Prediction results of the ideal touchdown point vertical motion

显然,主导航母理想着舰点垂向运动的为升沉运动。在甲板运动到达波峰和波谷时垂向运动速度最小,因此无人机在此时触舰最为有利,本文选取在甲板运动到达波峰时刻进行无人机触舰计算。由于海浪运动的随机性,导致各自由度运动的随机性,该组仿真结果有可能会受3个自由度运动初相设置所干扰。为排除偶然因素,将俯仰运动和横滚运动设置为随机初相,将升沉运动设置为固定初相,做1000次仿真,理想着舰点垂向运动曲线如图7所示。可以看出,理想着舰点垂向运动的相位和升沉运动的相位一致。

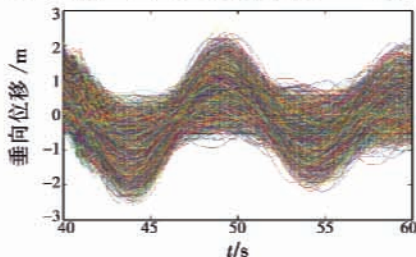


图7 理想着舰点垂向运动预测结果

Fig. 7 Prediction results of the ideal touchdown point vertical motion

4 结语

对于无人机着舰的高精度要求,仅对航母单自由度运动进行预测已无法满足。本文首先基于卡尔曼滤波理论对航母的俯仰运动进行了预估;然后在此基础上,实现了对理想着舰点的垂向运动的预估,对提高着舰安全性有重要意义。但由本文可以看出卡尔曼滤波的局限性,即需要建立在航母甲板运动模型的基础上,本文估计是建立在中等海况的条件下;通常情况下,海浪的变化相当复杂,很难给出一个确定的不变的运动模型。

参考文献

[1] DENISON N A. Automated carrier landing of an unmanned combat aerial vehicle using dynamic inversion[R]. ADA 469901, 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 D S, LIU X Y, WANG L X. 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] 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.
- [4] 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 Y, YANG Y D. Deck motion prediction technique based on Kalman filtering theory[J]. Journal of Data Acquisition and Processing, 2002, 17(4):381-384.
- [5] 张永花,周鑫. 纵向甲板运动补偿技术研究[J]. 电光与控制, 2012, 19(4):18-22.
ZHANG Y H, ZHOU X. Study on the longitudinal deck motion compensation technique[J]. Electronics Optics & Control, 2012, 19(4):18-22.
- [6] 刘胜,靳伟. Kalman 滤波用于舰船运动姿态估计的研究[J]. 哈尔滨船舶工程学院学报, 1992, 13(3):275-285.
LIU S, JIN W. The study of estimation for posture of ship with Kalman filtering[J]. Journal of Harbin Shipbuilding Engineering Institute, 1992, 13(3):275-285.
- [7] 蒋玉莲,唐慧妍. 基于扩展卡尔曼滤波的船舶横向运动扰动估计[J]. 自动化与仪表, 2005, 20(3):40-42, 46.
JIANG Y L, TANG H Y. Disturbed estimation for horizontal motion of shipping based on extended Kalman filter[J]. Automation & Instrumentation, 2005, 20(3):40-42, 46.
- [8] HESS R A, JUDD T M. Improved automatic carrier landing using deck motion prediction[J]. Journal of Aircraft, 1976, 13(2):153-155.
- [9] 丁玉美,阔永红,高新波. 数字信号处理——时域离散随机信号处理[M]. 西安:西安电子科技大学出版社, 2002.
DING Y M, KUO Y H, GAO X B. Digital signal processing—discrete random signal processing[M]. Xi'an:Xiidian University Press, 2002.
- [10] 金鸿章,张宏翰. 可控被动式减摇水舱随机控制策略研究[J]. 船舶工程, 2009, 31(4):48-51.
JIN H Z, ZHANG H H. Strategic study on stochastic control of passively controlled anti-rolling tank[J]. Ship Engineering, 2009, 31(4):48-51.
- [11] GHYZEL P A. Vision-based navigation for autonomous landing of unmanned aerial vehicles[D]. California:Naval Postgraduate School, 2006.
- [12] SWEGER J F. Design specifications development for unmanned aircraft carrier landings: A simulation approach[D]. Maryland:United States Naval Academy, 2003.