

引用格式: 杨柳, 徐东昊. 基于极短期运动预报的舰载机着舰过程仿真分析[J]. 中国舰船研究, 2018, 13(4): 99-103.

YANG L, XU D H. Aircraft carrier landing process simulation based on extremely short-term prediction of ship motion [J]. Chinese Journal of Ship Research, 2018, 13(4): 99-103.

# 基于极短期运动预报的舰载机着舰过程仿真分析

杨柳<sup>1</sup>, 徐东昊<sup>1,2</sup>

1 哈尔滨理工大学 自动化学院, 黑龙江 哈尔滨 150080

2 哈尔滨工程大学 青岛船舶科技有限公司, 山东 青岛 266400

**摘要:** [目的] 舰载机着舰过程是其整个飞行过程中的一个关键环节, 由于受到舰船运动的影响, 技术难度较大。[方法] 基于舰船极短期运动预报, 开展舰载机着舰过程的仿真研究。首先, 基于传统的舰船极短期运动预报方法, 采用波形匹配和仿射变换, 提出一种最优预报算法的确定方法; 然后, 建立基于光波束导引的舰载机着舰导引系统模型, 并提出3个衡量着舰导引系统性能的终端误差指标; 最后, 开展舰载机着舰过程的仿真研究, 分析舰载机对光波束运动轨迹的跟踪偏差及落点分布, 得到着舰终端误差。[结果] 由仿真结果可知, 舰载机的着舰点相对集中, 大多位于理想着舰点范围内, 着舰终端误差满足着舰导引系统规范的要求。[结论] 研究成果对于舰载机的着舰引导具有参考价值。

**关键词:** 舰载机; 着舰导引; 极短期运动预报; 落点分布; 终端误差

中图分类号: U666.1

文献标志码: A

DOI: 10.19693/j.issn.1673-3185.01193

## Aircraft carrier landing process simulation based on extremely short-term prediction of ship motion

YANG Liu<sup>1</sup>, XU Donghao<sup>1,2</sup>

1 School of Automation, Harbin University of Science and Technology, Harbin 150080, China

2 Qingdao Ship Science and Technology Co., Ltd., Harbin Engineering University, Qingdao 266400, China

**Abstract:** [Objectives] Aircraft carrier landing is the key part of the whole flight process of carrier-based aircraft, and the technology design is difficult due to ship motion. [Methods] Based on the extremely short-term prediction method, this paper develops an aircraft landing simulation. First, based on the traditional extremely short-term prediction of ship motion, a method is proposed for determining the best prediction method by matching the waveform of the predicted signal combined with affine transformation. Next, an aircraft carrier landing guidance system is built on the basis of light beam guidance, and three landing end point errors for measuring the landing guidance system are presented. Finally, the aircraft carrier landing process is simulated, the errors between ideal approach path and tracking error of landing aircraft analyzed, and landing end point errors obtained. [Results] It can be seen from the simulation results that the landing points of aircraft are relatively concentrated, with most located within the scope of ideal landing points. The end point errors satisfy the requirements of landing guidance system standards. [Conclusions] The simulation results in this paper offer great reference value for the study of aircraft carrier landing.

**Key words:** carrier-based aircraft; landing guidance; extremely short-term motion prediction; landing point distribution; end point errors

收稿日期: 2018-02-08

网络出版时间: 2018-5-24 16:21

基金项目: 机器人技术与系统国家重点实验室面上课题资助项目(SKLRs-2018-KF-120)

作者简介: 杨柳, 女, 1985年生, 博士, 讲师。研究方向: 非线性系统控制, 动力学建模, 工业机器人应用。

E-mail: yangliuheu@gmail.com

徐东昊(通信作者), 女, 1981年生, 博士, 副教授。研究方向: 船舶航行与姿态控制。

E-mail: xudonghao@hrbust.edu.cn



## 0 引言

舰载机着舰技术是航母战斗群战斗力的一个重要保障,也是飞行力学与控制的一个研究热点<sup>[1-2]</sup>。目前,掌握该技术核心的有美、英、法、俄等少数拥有航母的国家。

与陆基着陆相比,舰载机着舰由于受舰体运动和飞行甲板周围特殊气流场的干扰,技术难度非常大<sup>[3-5]</sup>,飞行员必须精确控制航迹,保持舰载机以合适的速度、姿态和相对位置,在预定的着舰点啮合才能安全实施阻拦着舰<sup>[6-7]</sup>。目前,应用最广泛的着舰技术是等角下滑技术,即舰载机在着舰的最后阶段,截获合适的下滑道后,保持相同的下滑航迹角、俯仰角、速度和下沉率,直至与飞行甲板啮合,实现撞击式着舰<sup>[8-9]</sup>。该技术的优点在于,在着舰啮合前最关键的20 s内,飞行员只需保持现有的飞行状态不变,同时修正由舰船运动和气流场等扰动造成的误差即可,避免了复杂操作可能带来的误差和危险<sup>[10-11]</sup>。等角下滑技术的关键是飞行员必须准确获取下滑道和其相对位置信息,而基于菲涅尔指示灯光学视场的光学助降系统是目前采用的主要手段,该系统可在空中为舰载机提供一个基于光波束的下滑坡面,从而导引舰载机沿着基准光波束轨迹着舰<sup>[12-13]</sup>。此外,舰船的运动不仅会影响到舰载机的相对位置,同时还会影响到光学助降系统的导引和舰体周围的气流场,是舰载机起降时机选择的一个重要决策依据。在实际应用中,通常采用几种不同的预报算法来对舰船运动姿态进行预报,并通过比较预报值与实际值的均方差来确定最优预报算法<sup>[14]</sup>。而实际应用表明,当预报值与实际值存在相位差时,由于两者的误差被放大,致使真正的最优算法被排除。为此,本文将采用一种基于波形匹配和仿射变换的精度分析方法,以消除不同预报算法获得的极短期运动相位差的影响,从而确定最优算法并预测船舶在未来较短时间内的运动姿态。本文将以前美军舰载机为研究对象,考虑舰船运动对舰载机的影响,结合基准光波束的导引技术,设计一种舰载机着舰控制系统,开展着舰终端误差分析及落点分布预报,用以为舰载机着舰方式的确定以及阻拦索的合理布置提供参考。

## 1 舰船极短期运动预报技术

航行的舰船受到海浪的作用,将产生六自由度运动,直接影响到舰载机着舰的安全性。根据

舰船运动的时历,可采用卡尔曼滤波法、时间序列分析法和谱估计法等分析方法对时历数据进行处理并预报舰船未来较短时间内的运动姿态,称之为舰船极短期运动预报。极短期运动预报值是各型舰载机起降和武器系统发射时机选择的重要依据。

实际应用时,一般使用几种不同的分析方法来进行极短期运动预报,然后通过比较预报值与实际值的均方差来确定最优预报方法,最后进行当前航行状态的极短期预报。由于是采用均方差最小来确定最优预报算法,因此,可能会因相位差的原因而导致真正的最优算法被排除。相对于幅值误差,相位差对舰载机着舰的影响基本可忽略。

为了消除相位差的影响,结合传统的理论预报算法,基于波形匹配和仿射变换,建立了一种舰船极短期运动预报最优算法的筛选方法<sup>[15]</sup>,其实现过程为如下。

设在 $t$ 时刻,船舶已获得的运动时历信号,即理论预报算法的输入信号 $X(t)$ 为

$$X(t)=[x(t), x(t-1), \dots, x(t-m+1)] \quad (1)$$

式中: $m$ 为离散信号的数据点数; $x(t)$ 为 $t$ 时刻的运动。则 $(t+1) \sim (t+n)$ 时刻的运动时历 $Y_0$ 为

$$Y_0(t)=[x_0(t+1), x_0(t+2), \dots, x_0(t+n)] \quad (2)$$

式中: $x_0(t+1)$ 为根据输入信号 $X(t)$ 得到的 $t+1$ 时刻的运动预报值; $n$ 为预报信号的数据点数。

根据 $t$ 时刻的输入信号,采用第 $j$ 种理论算法预报的运动时间序列为

$$Y_j(t)=[x_j(t+1), x_j(t+2), \dots, x_j(t+n)]; j=1, \dots, l \quad (3)$$

式中, $l$ 为预报模型数量。

对离散时间序列 $Y_0(t)$ 和 $Y_j(t)$ 求导数<sup>[10]</sup>,得

$$f'_j(\xi) = \frac{1}{h} \left[ \frac{1}{12} f_j(\xi-2) - \frac{2}{3} f_j(\xi-1) + \frac{2}{3} f_j(\xi+1) - \frac{1}{12} f_j(\xi+2) \right] + O(h^4) \quad (4)$$

$$\xi = t+2, \dots, t+n-2$$

式中: $f_j(t)$ 为 $Y_j(t)$ 对应的函数; $h$ 为时间步长; $\xi$ 为函数的自变量,此处为时间。

确定 $Y_j(t)$ 信号的幅值和波数,仿射变换得到一个幅值与波数相同的模拟信号:

$$Y'_j(t)=[x_j(t+1 \cdot c_{\text{aff}}), x_j(t+2 \cdot c_{\text{aff}}), \dots, x_j(t+n \cdot c_{\text{aff}})] \quad (5)$$

$$j=1, \dots, l$$

$$c_{\text{aff}} = \frac{\xi_{j\text{max}} - t}{\xi_{0\text{max}} - t} \quad (6)$$

式中, $c_{\text{aff}}$ 为仿射变换系数。

衍射变换后,各预报算法的相对误差为

$$e'(j) = \frac{\sum_{i=1}^n \left( \left[ x'_j(t+i) - x_0(t+i) \right]^2 \right)^{1/2}}{n^{1/2} \cdot \max\{Y_0\}}$$

$$j = 1, \dots, l' \quad (7)$$

则当前航行状态下舰船运动的最佳预报算法为

$$j_{\text{optimum}} = \min\{e'(j)\}; j = 1, \dots, l' \quad (8)$$

据此,即可获得舰船在未来较短时间内的运动姿态与参数,通过坐标变换,即可建立光学助降系统随船运动模型。假定基于菲涅尔指示灯的光学助降系统的大地坐标系和随船坐标系分别为  $(x_g, y_g, z_g)^T$  和  $(x_s, y_s, z_s)^T$ , 则

$$(x_g, y_g, z_g)^T = \begin{bmatrix} \cos \theta_s & 0 & \sin \theta_s \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \theta_s & 0 & \cos \theta_s \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \varphi_s & -\sin \varphi_s \\ 0 & \sin \varphi_s & \cos \varphi_s \end{bmatrix} (x_s, y_s, z_s)^T \quad (9)$$

式中,  $\theta_s$  和  $\varphi_s$  分别为舰船的纵摇角与横摇角。

## 2 舰载机着舰导引技术

根据等角下滑技术,基于基准光波束轨迹的人工着舰导引系统如图1所示。该系统主要由光学助降系统、飞行员和飞控系统组成,其功能是:助降系统在船体及甲板运动的情况下提供一条稳定的下滑光波束基准,然后飞行员根据该基准光波束的引导,通过飞控系统完成着舰任务。

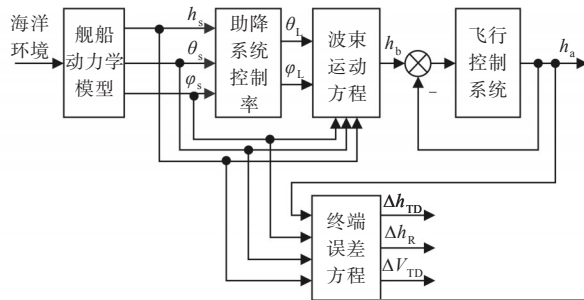


图1 光波束着舰导引框图

Fig.1 Block diagram of optical beam landing guidance

定义舰载机在实际下滑基准光波束上的一点相对于理想下滑基准光波束的垂向偏移为波束运动,如图2所示,则波束运动方程可表达为<sup>[16]</sup>:

$$h_b = h_s + h_{\theta_s} + h_{\varphi_s} + h_{\theta_L} + h_{\varphi_L} = [h_s + C_1 \theta_s + C_2 \varphi_s + C_3 \varphi_L] + [C_4 \theta_s + C_5 \varphi_s + C_6 \varphi_L] R \quad (10)$$

式中:  $h_s$ ,  $h_{\theta_s}$  和  $h_{\varphi_s}$  分别为由船体升沉、纵摇和横摇引起的波束高度变化;  $h_{\theta_L}$  和  $h_{\varphi_L}$  分别为由光学助降系统控制透镜的仰角与翻转角  $\theta_L$ ,  $\varphi_L$  所引

起的光波束高度变化;  $R$  为实际下滑基准光波束上的一点到透镜的距离;  $C_1 \sim C_6$  为相关转换系数,具体见文献[17]。

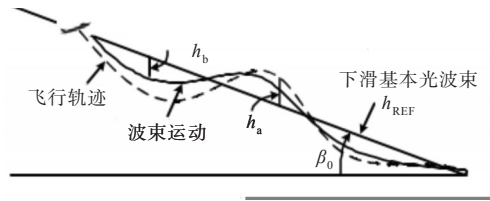


图2 舰载机对光波束运动的跟踪

Fig.2 Tracking for optical beam motion of aircraft

当舰载机距离飞行甲板的垂直高度为  $h_0$ 、水平距离为  $x_0$  时,以对地速度  $v$  采用等角下滑着舰,如图3所示,舰船航速  $U_s$  与飞机航迹角  $\gamma_0$  的关系为:

$$\tan \gamma_0 = \frac{h_0}{\frac{h_0}{\tan \beta_0} + U_s \cdot \frac{h_0}{v \cdot \sin \gamma_0}} \quad (11)$$

在任一时刻  $t_i$  时舰载机的理想高度  $h_{di}$  为

$$h_{di} = h_0 - \tan \gamma_0 \cdot \int_0^{t_i} v(t) \cdot \cos \gamma(t) dt \quad (12)$$

则飞机在任一时刻  $t_i$  时飞行员看到的光波束运动的实际高度为:

$$h_B = h_b + h_{di} \quad (13)$$

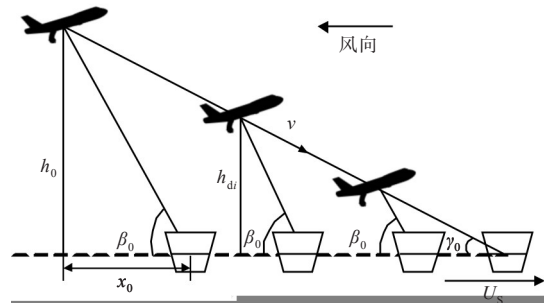


图3 等角下滑着舰示意图

Fig.3 Schematic diagram of angle stable landing

由于飞机是在光波束的引导下工作,为使着舰终端误差最小,要求飞行员通过操纵飞控系统,使飞机的高度变化  $h_a$  不断跟踪  $h_b$ 。目前常用的3种光波束运动稳定方案有惯性稳定、角稳定和点稳定,本文采用角稳定助降导引控制方案。角稳定方案<sup>[18]</sup>要求通过控制透镜的仰角  $\theta_L$  和翻转角  $\varphi_L$  来使波束运动  $h_b$  跟随理想着舰点的垂直运动  $h_{TD}$  进行相应的平移,则波束运动方程进一步简化为

$$h_b = h_{TD} = h_s - L_{TD} \cdot \theta_s + Y_{TD} \cdot \varphi_s \quad (14)$$

式中,  $L_{TD}$  和  $Y_{TD}$  分别为理想着舰点与舰体运动中心的纵向距离和横向距离。当  $h_{TD} = 0$  时,为理想着舰状态,即着舰点相对惯性平面无相对运动

和扰动因素。

由此,可得角稳定助降控制律:

$$\begin{cases} \theta_L = -\frac{C_4}{C_6}\theta_s - \frac{C_5}{C_6}\varphi_s \\ \varphi_L = -\frac{C_1 + L_{TD}}{C_3}\theta_s - \frac{C_2 - Y_{TD}}{C_3}\varphi_s \end{cases} \quad (15)$$

通常用着舰终端误差大小来评估着舰导引系统的性能。定义  $h_{aTD}$  为飞机尾钩在理想着舰点处的实际高度,则理想着舰点处的高度误差定义为:

$$\Delta h_{TD} = h_{aTD} - (h_s - L_{TD} \cdot \theta_s + Y_{TD} \cdot \varphi_s) \quad (16)$$

同理,可得飞机尾钩在理想着舰点处的撞击速度误差  $\Delta V_{TD}$  和尾钩在舰艏处的高度误差  $\Delta h_R$ 。其中,  $\Delta h_R$  可表示为

$$\Delta h_R = h_{aR} - (h_s - L_R \cdot \theta_s + Y_R \cdot \varphi_s) \quad (17)$$

式中:  $L_R$  和  $Y_R$  分别为舰体运动中心距离舰艏的纵向距离和横向距离;  $h_{aR}$  为飞机尾钩至舰艏的实际高度。

根据极短期运动预报获得的舰船运动时历开展着舰过程的动态仿真,即可得到终端着舰误差的均方差为

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n x_i^2}{n-1}} \quad (18)$$

### 3 舰载机着舰过程仿真与分析

以某舰为例,开展舰船极短期运动预报和着舰过程仿真,其飞行甲板布置如图4所示,理想着舰点应位于第2与第3条阻拦索之间。

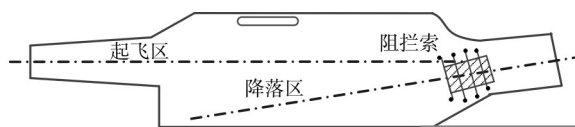


图4 飞行甲板及阻拦索布置

Fig.4 Layout of flight deck and arresting cable

图5给出了某舰的横摇运动时历,并基于卡尔曼滤波法的自回归模型(KAM法)和卡尔曼滤波法的伏尔特拉级数模型(VR法)分别预报了未来20s的横摇运动。根据波形匹配和仿射变换确定的最优预报算法为VR法,以根据此算法得到的运动预报结果建立舰船动力学模型。

在此基础上,开展了舰载机着舰过程仿真和着舰终端误差分析。图6所示为舰载机航迹角随舰船航速的变化,图7所示为角稳定光波束引导动态仿真结果,图8所示为舰载机着舰点分布。从仿真结果可以发现:

1) 舰载机下滑着舰的航迹角在其基准下滑角下随舰船速度的增加而减小。

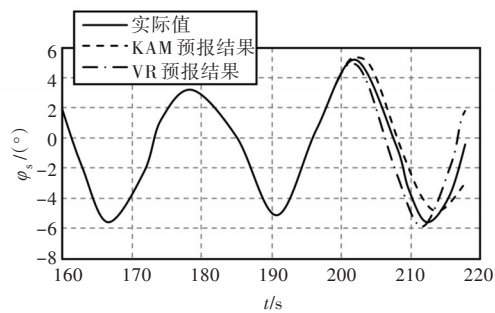


图5 横摇运动时历与极短期预报结果

Fig.5 Time history of rolling motions and extremely short-term prediction results

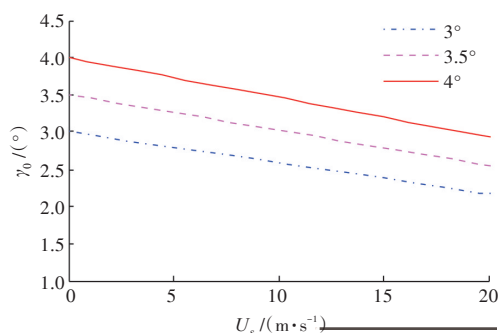


图6 舰船航速对飞机航迹角的影响

Fig.6 Influence of ship speed on aircraft track angle

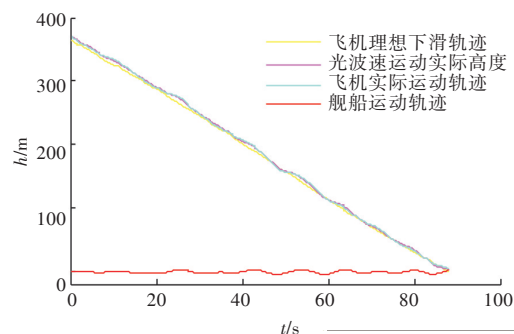


图7 角稳定光波束引导仿真

Fig.7 Simulation of angle stable optical beam riding

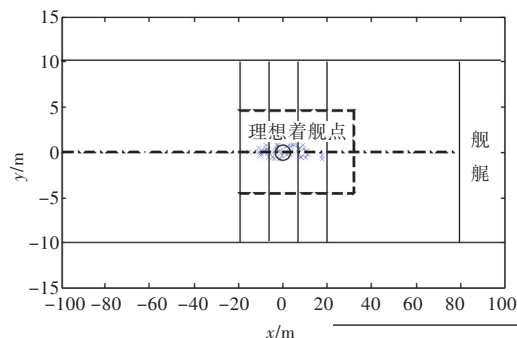


图8 舰载机着舰点分布图

Fig.8 Landing point distribution of carrier-based aircraft

2) 着舰终端误差分别为:  $\sigma(\Delta h_{TD}) = 3.99 \text{ m}$ ,  $\sigma(\Delta h_R) = 2.47 \text{ m}$ ,  $\sigma(\Delta V_{TD}) = 2.14 \text{ m/s}$ , 满足美国着舰引导系统规范<sup>[19]</sup>的要求。

3) 舰载机的着舰点相对集中,大多位于理想着舰点范围内,即第2和第3条阻拦索之间,部分着舰点落在了该区域外,着舰安全性较高。

## 4 结 语

本文在 Matlab/Simulink 仿真环境下建立了飞机着舰导引控制系统的仿真模型,开展了舰船极短期运动预报和舰载机着舰过程动态仿真,并根据仿真结果进行了着舰终端误差分析和落点分布的预报。

本文建立的方法可以更真实地考虑舰船运动对舰载机着舰的影响,研究成果可为舰载机着舰方式的确定和阻拦索的合理布置提供参考。

### 参考文献:

- [1] 申安玉,申学仁,李云保. 自动飞行控制系统[M]. 北京:国防工业出版社,2003:48-64.  
SHEN A Y, SHEN X R, LI Y B. Automatic flight control system [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2003: 48-64 (in Chinese).
- [2] 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,2003:201-224.  
GUO S F, SHEN G Z, WU C F. Advanced flight control system [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2003: 201-224 (in Chinese).
- [3] 贾新强,林鹏,王敏文,等. 舰载机着舰甲板运动误差及其补偿仿真研究[J]. 航空计算技术, 2010, 40(1): 114-118.  
JIA X Q, LIN P, WANG M W, et al. Study on disturbance of board movement in process of carrier aircraft's landing and its compensation [J]. Aeronautical Computing Technique, 2010, 40(1): 114-118 (in Chinese).
- [4] 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 (in Chinese).
- [5] 陆超,姜治芳,王涛. 基于舰载机起降限制的舰船气流场特性评估方法初探[J]. 中国舰船研究, 2010, 5(1): 39-42.  
LU C, JIANG Z F, WANG T. Simplified evaluation of ship airwake characteristics for takeoff/landing of shipborne aircraft [J]. Chinese Journal of Ship Research, 2010, 5(1): 39-42 (in Chinese).
- [6] 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, 6598.  
WANG Y G, QU X J. Modeling and simulation of carrier approach and landing [J]. Journal of System Simulation, 2008, 20(24): 6592-6594, 6598 (in Chinese).
- [7] 钟涛. 带有舰尾流的舰载机进场动力补偿系统分析[J]. 中国舰船研究, 2013, 8(3): 6-11.  
ZHONG T. Analysis of the approach power compensator system with carrier air wake [J]. Chinese Journal of Ship Research, 2013, 8(3): 6-11 (in Chinese).
- [8] HUFF R W, KESSLER G K. Enhanced displays, flight controls and guidance systems for approach and landing: AD/A244 869 [R]. [S.l.:s.n], 1978: 341-402.
- [9] 晋文超,李鹏,李亚军,等. 舰载机起降限制区域及主要影响参数[J]. 中国舰船研究, 2016, 11(5): 28-34.  
JIN W C, LI P, LI Y J, et al. Restricted regions and main influence parameters for the takeoff and landing of carrier-based aircrafts [J]. Chinese Journal of Ship Research, 2016, 11(5): 28-34 (in Chinese).
- [10] 彭秀艳,赵希人. 舰载机起降指导技术研究现状及发展趋势[J]. 机电设备, 2006, 23(2): 12-16.  
PENG X Y, ZHAO X R. The research status and trend on guidance technology of taking off & landing for carrier [J]. Mechanical and Electrical Equipment, 2006, 23(2): 12-16 (in Chinese).
- [11] 桑德一,赵建军,杨利斌. 航母运动对着舰引导雷达精度的影响[J]. 中国舰船研究, 2014, 9(6): 8-13.  
SANG D Y, ZHAO J J, YANG L B. The impact on landing guidance radar precision caused by the movement of aircraft carriers [J]. Chinese Journal of Ship Research, 2014, 9(6): 8-13 (in Chinese).
- [12] 屈程,邹鑫,王鹏. 菲涅尔助降系统控制律对舰载机着舰安全性影响[J]. 科技创新与应用, 2017(35): 17-19.
- [13] 欧汛. 航母舰载机着舰助降装置[J]. 现代舰船, 2005(8): 44-47.
- [14] HUANG L M, DUAN W Y, HAN Y, et al. A review of short-term prediction techniques for ship motions in seaway [J]. Journal of Ship Mechanics, 2014, 18(12): 1534-1542.
- [15] 徐东吴,杨柳,曾骥. 一种改进的船舶极短期运动预报精度分析方法[J]. 船舶工程, 2017, 39(9): 40-43.  
XU D H, YANG L, ZENG J. An accuracy improved analytical approach for very-short term prediction of ship motions [J]. Ship Engineering, 2017, 39(9): 40-43 (in Chinese).
- [16] SCHUST A P, YOUNG P N, SINPSON W R. Automatic landing system certification manual: AD/A118181 [R]. [S.l.:s.n], 1982: 324-387.
- [17] 胡恩勇. 光波束着舰引导系统研究[D]. 南京:南京航空航天大学, 2008.  
HU E Y. Research on optical landing aid system [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2008 (in Chinese).
- [18] DURAND T S, TEPER G L. An analysis of terminal flight path control in carrier landing: AD606040 [R]. [S.l.:s.n], 1964: 9-13.
- [19] DURAND T S, WASICKO R J. An analysis of carrier landing [C]//Aircraft Design and Technology Meeting. Los Angeles, USA: [s.n.], 1965: 67-78.