

舰载机着舰纵向甲板运动补偿系统设计

曲浩*, 郭润兆, 丁兴志

中航工业第一飞机设计研究院, 陕西 西安 710089

摘要:为减小着舰误差, 提高安全性, 通过纵向自动着舰系统频域响应特性分析, 确定出不满足自动着舰要求的参数项目, 有针对性地进行纵向补偿设计, 给出纵向补偿系统详细的参数设计方法。设计中考虑了航母俯仰运动对理想着舰点垂直位移影响。通过算例验证了纵向甲板运动补偿系统设计的有效性。该纵向甲板运动补偿系统设计方法可应用于舰载飞机设计。

关键词: 舰载飞机; 自动着舰; 甲板运动补偿

中图分类号: V212.1 文献标识码: A 文章编号: 1007-5453 (2016) 12-0013-05

自动着舰引导系统 (ACLS) 是现代航母舰载飞机系统关键技术之一, 是安全着舰的重要保障^[1]。为保证舰载机在预定着舰点与母舰甲板啮合, 须考虑母舰海上运动所造成着舰点位置变化, 特别是着舰点高度变化。飞机着舰最后阶段, 要求飞机能跟踪母舰甲板运动。如果母舰甲板突然升高, 舰载机可能提前撞击甲板, 冲击载荷增大, 还可能导致舰载机直接撞上舰尾; 如果母舰的甲板突然降低, 舰载机有可能飞越 4 根拦阻索, 尾钩无法钩挂上, 逃逸复飞。这些情况都将意味着舰失败, 为避免这种情况, 舰载机进场全自动着舰最后阶段, 必须能够跟踪母舰甲板的运动。目前, 国内外对纵向甲板运动补偿技术有一些研究, 但是着舰精度仍有待于提高。这里参考文献 [2-4] 对舰载机着舰纵向甲板运动补偿系统进行设计, 以期减小舰载机着舰时的纵向误差。

1 补偿系统设计要求

文献 [2-4] 研究表明, 相同海况等级、舰船航速和遭遇角下, 舰船越小, 理想着舰点垂直运动越强烈; 相同舰船航速和遭遇角下, 海况等级越高, 理想着舰点垂直运动越剧烈; 相同海况等级和舰船遭遇角下, 舰船不处于谐摇区时, 舰船速度越低, 理想着舰点的垂直运动越强烈; 相同海况等级和舰船航速的情况下, 着舰点的垂直运动随着遭遇角的增大先减弱后变强。

舰载机着舰环境是复杂多变, 受海浪、风等不确定性因素的影响, 所设计的甲板运动补偿系统应对不同情况达到很好的补偿效果。在舰载机着舰的最后几秒, 要求补偿系统可有效减小着舰误差, 且对不同舰船大小及舰船航态 (不同海况、航速、遭遇角) 下的着舰点高度变化具有很好的适应性, 使飞机在多种着舰环境下都能安全着舰。

计算理想着舰点位置偏差量, 经增益、相位补偿后送至着舰引导控制律, 使飞机与航母甲板运动同步。补偿指令在着舰前约 12.5s 加入到自动着舰系统中, 以避免过早引入后对飞机下滑航迹造成不利影响。补偿系统要满足相应的频域设计准则, 如美军标 AR-40A 是舰载机自动着舰系统时的重要设计准则, 之后还通过时域仿真的方法对结果的有效性和合理性进行验证。纵向平均着舰误差应小于 3.05m。

2 纵向自动着舰系统频域响应特性分析

不含 $G_{DMC}(s)$ 时, 通过计算系统的幅值、相角特性, 分析哪个不满足自动着舰要求, 设计中有针对性地进行补偿设计。此时纵向自动着舰系统频域响应特性如图 1 所示。从图 1 可看出原系统幅值特性基本满足要求, 相角特性在 0.1~1rad/s 频率范围内严重滞后, 故设计 $G_{DMC}(s)$ 时, 尽量不影响幅值响应特性, 主要针对原系统相角补偿, 保持飞机和甲板垂直运动相位同步。

收稿日期: 2016-06-07; 退修日期: 2016-11-11; 录用日期: 2016-11-12

* 通讯作者: Tel.: 029-86832378 E-mail: haoran_2015@tom.cn

引用格式: QU Hao, GUO Runzhao, DING Xingzhi. Design of the deck longitudinal motion compensation for carrier landing [J]. Aeronautical Science & Technology, 2016, 27 (12): 13-17. 曲浩, 郭润兆, 丁兴志. 舰载机着舰纵向甲板运动补偿系统设计 [J]. 航空科学技术, 2016, 27 (12): 13-17.

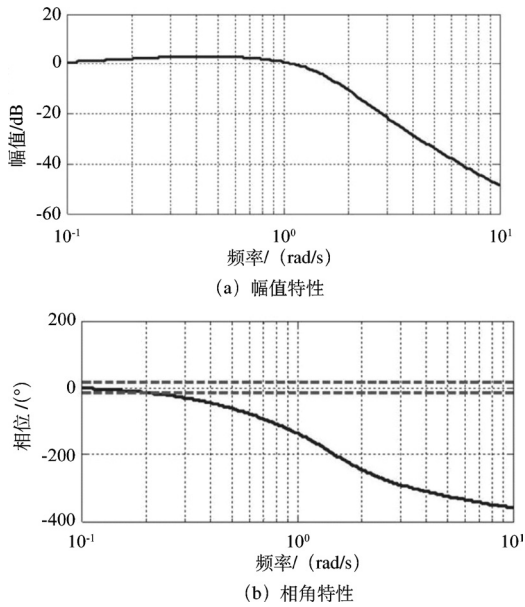


图1 原系统的频域响应特性

Fig.1 Frequency response characteristics of primary system

3 纵向甲板运动补偿系统设计

纵向甲板运动补偿系统包括甲板运动补偿指令及运动补偿器两部分,如图2所示。

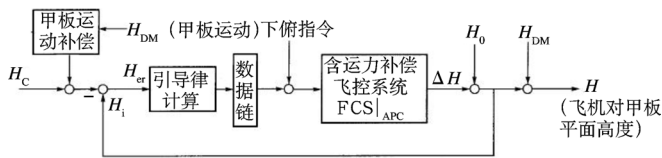


图2 含甲板运动补偿的 ACLS

Fig.2 ACLS including deck motion compensation

3.1 甲板运动补偿指令

甲板运动补偿指令 H_{DM} 与甲板垂直运动 z_s 、俯仰运动 θ_s 及理想着舰点到纵摇中心距离 X_{TDP} 有关,计算公式:

$$H_{DM} = z_s + X_{TDP}\theta_s \quad (1)$$

3.2 补偿器设计

设计甲板运动补偿器 $G_{DMC}(s)$ 时可采用简化结构形式^[5],只要保证全自动着舰系统的 $G_{DMC}(s)$ 在工作频段内满足频域响应特性要求,且有抑制高频噪声能力。目前,常用甲板运动补偿器一般形式:

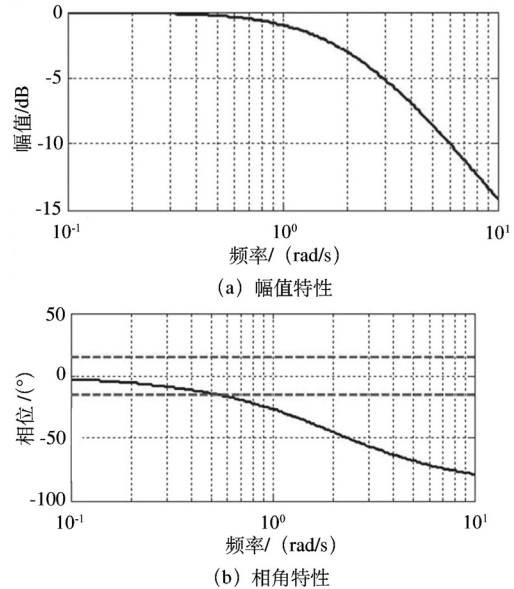
$$G_{DMC}(s) = K_{DMC} \left[\frac{1}{\frac{1}{\tau_{DMC}}s + 1} \right] \left[\frac{\frac{s^2}{\omega_{DMC}^2} + \frac{2\xi_{DMC}}{\omega_{DMC}}s + 1}{\left(\frac{1}{\omega_n}s + 1 \right)^2} \right] \left[\frac{\alpha Ts + 1}{Ts + 1} \right] \quad (2)$$

$$= K_{DMC} G_1(s) G_2(s) G_3(s)$$

式中: K_{DMC} 为甲板运动补偿器增益^[6,7],调节该值可使系统稳态误差满足要求; $G_1(s)$ 是低通滤波器,作用是抑制高频噪声干扰; τ_{DMC} 为滤波器时间常数; $G_2(s)$ 是对低通滤波器补偿环节,作用为补偿低通滤波器环节造成相位滞后,补偿原自动着舰系统在 0.1~1rad/s 频率范围内相位滞后,它与低通滤波器一起可看作一个补偿滤波网络; ξ_{DMC} 为补偿滤波器阻尼; ω_{DMC} 为补偿滤波器自然频率; $G_3(s)$ 是一个相位超前网络,它用来对系统相位作最后调整,从而使飞机相位在工作频段上与甲板运动同步。

(1) $G_1(s)$ 的确定

根据抑制高频噪声要求,设计滤波器时间常数 τ_{DMC} ,如取 $\tau_{DMC}=2s$,可用来滤除频率 $\omega>2rad/s$ 的噪声。如图3所示,通过 $G_1(s)$ 的频域特性曲线可看出,此项对频率 $\omega>2rad/s$ 有很好的过滤效果;在 0.1~1rad/s 内有滞后作用。需要补偿环节一方面补偿低通滤波器造成相位滞后,另一方面补偿原有系统在 0.1~1rad/s 相位滞后现象^[7,8]。

图3 低通滤波器伯德图 ($\tau_{DMC}=2s$)Fig.3 Low-pass filter Bode diagram ($\tau_{DMC}=2s$)

(2) $G_2(s)$ 的确定

对系统进行相位超前补偿。由二阶微分、二阶振荡环节构成,两者伯德 (Bode) 图关于频率 ω 轴对称,只分析二阶微分环节伯德图特性。本环节增大系统在 0.1~1rad/s 内相位,同时幅值在 0.1~1rad/s 内不要有大波动。增大系统在 0.1~1rad/s 频率范围内相位,这是二阶微分环节所能提供特性:参数 ω_{DMC} 为补偿器的自然频率,二阶微分环节相

角达到 90° 时对应的频率,从图 3 可看出,系统在 $\omega=1\text{rad/s}$ 的相角需要补上 20° 左右,可初步定 ω_{DMC} 再调整,如取 $\omega_{\text{DMC}}=0.63\text{rad/s}$,表示在 $\omega_{\text{DMC}}=0.63\text{rad/s}$ 时系统相位会提高 90° ,在 $\omega_{\text{DMC}}=1$ 时,系统经过相位补偿后,得到不错的效果,参数 ζ_{DMC} 补偿滤波器的阻尼,表征二阶微分环节相位从 0° 增大到 180° 的缓急^[9],特别是在自然频率 ω_{DMC} 附近相位增加的缓急。可以通过 ζ_{DMC} 的选取,使相位在 $0.1\sim 1\text{rad/s}$ 频率范围内的变化趋于平缓。通过试凑确定 $\zeta_{\text{DMC}}=0.45$ 。此时,二阶微分环节的伯德图如图 4 所示。

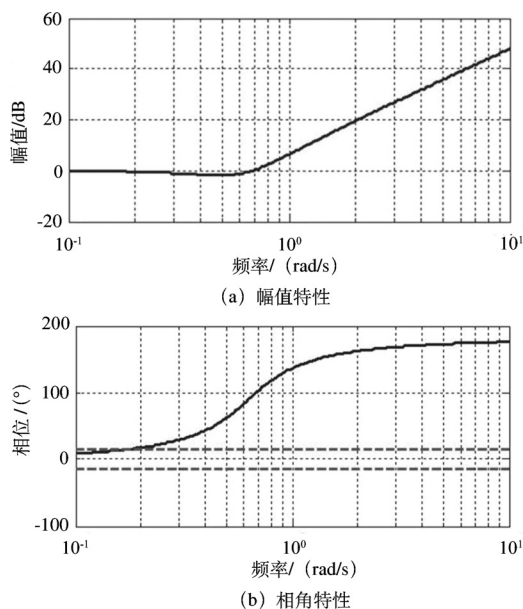


图 4 二阶微分环节伯德图

Fig.4 Second derivative Bode diagram

设计振荡环节参数时,应从两方面考虑:一是 ω_n (见式(2)) 尽量大,使其在 $0.1\sim 1\text{rad/s}$ 内相位的减小弱;二是取 ω_n 尽量小,使其在 $\omega=1\text{rad/s}$ 的幅值减小能力强^[10]。综合考虑调试确定 $\omega_n=6\text{rad/s}$ 。

(3) $G_3(s)$ 的确定

首先画出加入前两个环节后系统伯德图,如图 5 所示。可知接近频率 $\omega=1\text{rad/s}$ 时,系统的相位需要补偿 30° 才能满足性能要求,故使用相位超前网络 $\frac{\alpha Ts+1}{Ts+1}$,在 $\omega=1\text{rad/s}$ 处补偿相位 30° ,相位超前网络幅频特性随迎角变化如图 6 所示。

故可取 $\alpha=3.1$, $T=0.568$,使最大补偿相位在 $\omega=1\text{rad/s}$ 处补偿相位 30° 。甲板运动补偿器各参数设计见式(3),至此纵向甲板补偿器设计完毕。设计的甲板运动补偿器效果如图 7 所示。

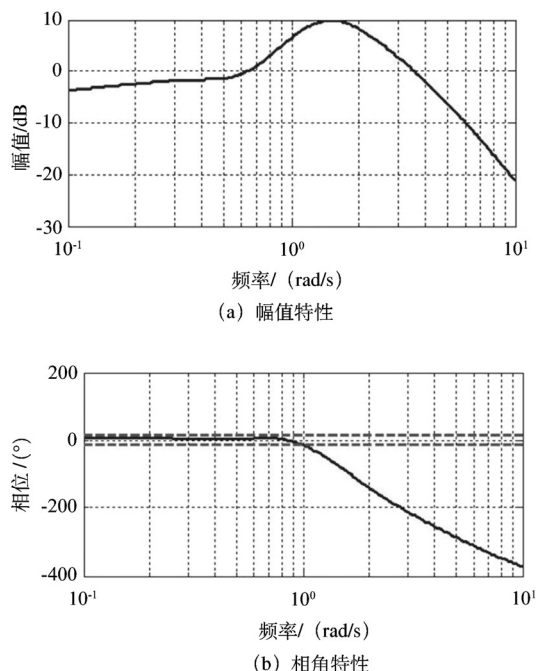


图 5 甲板运动补偿环节的系统伯德图

Fig.5 Deck motion compensation Bode diagram

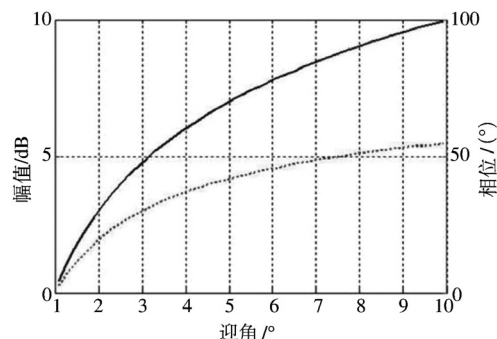


图 6 相位超前网络幅频特性随迎角变化

Fig.6 Characteristic of phase lead network with change of angle of attack

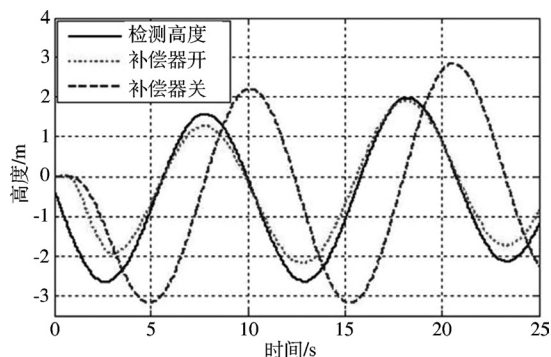


图 7 甲板运动补偿器效果

Fig.7 Deck motion compensation effect

$$G_{DMC}(s)=0.6\cdot\frac{1}{\frac{1}{2}s+1}\cdot\frac{\frac{1}{0.63^2}s^2+2\times\frac{0.45}{0.63}s+1}{\left(\frac{1}{6}s+1\right)^2}\cdot\frac{3.1\times0.568s+1}{0.568s+1}\quad(3)$$

4 仿真分析

采用某型舰载机全自动着舰控制系统验证甲板运动补偿能力,针对有甲板运动补偿器进行了仿真验证。

仿真舰载机及航母参数如表 1 所示。其中舰载机构型为轻载,航母有摇晃,大气环境为:无大气紊流、无常值风、无舰尾流。

表 1 仿真条件
Table 1 Simulation conditions

参数	数值
飞机飞行高度 /m	260
飞机空速 / (m/s)	48
飞机配平迎角 / (°)	8.66
飞机航迹倾角 / (°)	0
飞机航迹偏角 / (°)	350
飞机离舰距离 /m	1589
机舰垂直高度偏差 /m	0.15
航母航速 / (m/s)	166
航母航向 / (°)	0
航母斜角飞行甲板 / (°)	350

仿真计算的着舰时刻参数如表 2 所示。

表 2 着舰时刻参数
Table 2 The datas of carrier landing

参数	数值
纵向着舰误差 /m	+2.2674
飞机空速 / (m/s)	48.2
飞机航迹倾角 / (°)	-2.68
飞机航迹偏角 / (°)	351.5
飞机高度变化率 / (m/s)	-2.25
航母横滚角 / (°)	-3.51
航母艏摇角 / (°)	-0.10
理想着舰点的高度变化率 / (m/s)	0.97
通过舰尾时刻净空高度 /m	5.98
通过舰尾时刻航迹高度偏差 /m	0.6921

从表 2 可以看出:着舰时飞机的高度变化率为 -2.25m/s,航迹倾角(下滑角)为 -2.68°,这是由于理想着舰点此时正处于上升状态(0.97m/s),为了修正航母横滚运动所致。飞机未出现不安全、不可控情况;飞机最终的纵向着舰误差为 +2.2674m,着舰精度满足误差要求。

5 结束语

理论分析了纵向自动着舰系统频域响应特性,给出了纵向甲板补偿各参数设计方法。通过算例仿真结果表明提出的纵向甲板运动补偿策略可有效地减少由甲板运动引起的着舰误差。

当然对于舰载机的安全着舰问题,在进行纵向甲板运动补偿的同时还应考虑侧向甲板运动补偿设计,以全面提高着舰安全性。

AST

参考文献

[1] Nastasi R, Martorella R P. Carrier landing simulation results of flight path controllers in manual and automatic approach [R]. AIAA-83-2072, 1983.

[2] Kevin D C, James E B. Investigation of roll requirement for carrier approach[R]. AIAA-933649, 1993.

[3] 许东松. 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. 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)

[4] Triantafyllou M S, Bodson M, Athans M. Real time estimation of ship motions using Kalman filtering techniques [J] . IEEE Journal of Oceanic Engineering, 1983, 8 (1): 9-20.

[5] Sidar M M, Doolin B F. On the feasibility of real-time prediction of aircraft carrier motion at sea [J] . Automatic Control, 1983, 28 (3): 350-356.

[6] ZHAO X, XU R, Kwan C. Ship motion prediction: algorithms and simulation results [C] // IEEE International Conference on Acoustics Speech and Signal Processing, 2004: 125-128.

[7] 鲍华. 基于小波网的船舶运动建模预报 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2008.

BAO Hua. Based on wavelet neural network modeling and prediction of ship motion[D]. Harbin: Harbin Engineering

- University, 2008. (in Chinese)
- [8] Nicolau V. Neural network prediction of the wave influence on the yaw motion [C] // IEEE International Joint Conference on Neural Networks, 2004; 2081-2086.
- [9] Tournes C, Landrum B. Adaptive aircraft lateral guidance [C] // Proceedings of the 33rd Southeastern Symposium on System Theory, 2001; 413-417.
- [10] YU Yong. Study on the lateral deck motion compensation technique [J]. Acta Aeronautica et Astronaut Ica Sinica, 2003, 24 (1) .
- 作者简介**
曲浩 (1984—) 男, 硕士, 工程师。主要研究方向: 飞机总体设计。
Tel: 029-86832378 E-mail: haoran_2015@tom.cn

Design of the Deck Longitudinal Motion Compensation for Carrier Landing

QU Hao*, GUO Runzhao, DING Xingzhi

AVIC The First Aircraft Institute, Xi'an 710089, China

Abstract: In order to reduce landing error and improve security, analyzed frequency response characteristics of longitudinal automatic landing system. The parameters that can not meet the requirements of the automatic landing were determined, and the design in longitudinal compensation was done pertinently. The detailed parameter design method of the longitudinal compensation system was given. The influence of carrier pitching motion on the ideal landing point was considered. The validity of the longitudinal deck compensation system was verified by an example. This method can be used for carrier aircraft design.

Key Words: carrier aircraft; automatic carrier landing; deck motion compensation