

基于 H_2 预见控制的舰载机自动着舰控制方法

邵敏敏, 龚华军, 甄子洋, 江驹
(南京航空航天大学自动化学院, 南京 210016)

摘要: 以舰载机为研究对象, 建立了舰载机的动力学模型, 设计了基于 H_2 全信息预见控制器的舰载机自动着舰控制系统, 实现了舰尾流干扰的抑制和下滑道的跟踪。以某舰载机为受控对象, 进行非线性数值仿真, 结果表明, 采用 H_2 全信息预见控制策略能够提高对舰尾流干扰的抑制效果, 获得较快的系统响应和满意的轨迹跟踪效果, 控制效果优于 PID 控制。

关键词: 舰载机; H_2 全信息预见控制; 自动着舰; 舰尾流抑制

中图分类号: V212.13 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-637X(2015)09-0068-04

An H_2 Preview Control Based Automatic Landing Control Method for Carrier-Based Aircraft

SHAO Min-min, GONG Hua-jun, ZHEN Zi-yang, JIANG Ju

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

Abstract: By taking carrier-based aircraft as the studying object, we set up the dynamic model and design a carrier-based aircraft automatic landing control system based on the H_2 full information preview controller, which can suppress the interference caused by carrier air wake movement and track the landing glide slope. Taking a certain type of carrier-based aircraft as the controlled object, a non-linear numerical simulation is made. The results show that: 1) the H_2 full information preview control strategy can improve the effect of rejecting air wake interference, obtain a quicker system response and a satisfactory trajectory tracking effect; and 2) the control effect is better than that of PID control.

Key words: carrier-based aircraft; H_2 full information control; automatic landing; turbulence suppression

0 引言

舰载机着舰一般采用下滑道跟踪着舰。所谓下滑道跟踪着舰(舰载机等角下滑),是在进舰着舰的最后阶段,舰载机截获合适的下滑道后,一直保持相同的下滑轨迹角、俯仰角、速度和下沉率,直至舰载机与航母飞行甲板碰撞,实现撞击式着舰^[1-2]。但由于舰尾流等气流扰动影响,实际下滑过程中传统的 PID 控制器很难使舰载机完全跟踪下滑道轨迹。而舰载机在下滑过程中所保持的下滑轨迹角、俯仰角、速度和下沉率均可作为可预见信息,从而利用这些未来信息和过去、现在的信息对舰载机进行预见控制。

预见控制是利用已知的干扰或参考信息,来提高跟踪质量或干扰抑制效果。预见信息在控制系统中的作用,频域上是相位超前补偿,时域上是提前产生补偿作用。预见控制的一个主要应用领域是汽车驾驶模拟,即给无人驾驶车辆设计控制系统^[3];另一个应用领域是主动悬挂系统的设计^[4],已具有显著效益。除此之外,在信息融合方面,预见控制已有新发展,提出了信息融合最优预见控制^[5-6]。而关于飞机方面的预见控制研究包括运用预见控制对无人机航迹进行控制^[7-8]以及运用最优预见控制来减轻驾驶员的决策负担^[9]。

本文主要研究基于 H_2 全信息预见控制的舰载机自动着舰控制方法。首先将舰载机的非线性模型线性化,然后根据线性化模型设计 H_2 全信息预见控制器,最后将控制器运用到非线性模型中并进行验证,通过与传统 PID 控制比较发现, H_2 全信息预见控制跟踪效果更好。

1 舰载机 H_2 预见控制问题

舰载机通常采用将纵向通道和横侧向通道分开设

收稿日期:2014-10-10

修回日期:2015-06-21

基金项目:航空科学基金(2013ZA52002);国家自然科学基金(61304223);教育部高等学校博士学科点专项科研基金(20123218120015)

作者简介:邵敏敏(1990—),女,江苏南通人,硕士生,研究方向为飞行控制。

计控制器的方法。其中:纵向通道主要是控制高度;横侧向通道主要是控制侧偏。舰载机下滑着舰的理想轨迹是事先确定的,其中的重要信息为期望高度,作为可预见的未来期望信息,因此,为了有效利用着舰下滑轨迹预见信息,自动着舰系统的纵向通道运用了 H_2 全信息预见控制,而横侧向通道仍然采用传统的 PID 控制,以消除舰尾流扰动引起的侧偏距并保持平衡姿态。最终将舰载机非线性模型的纵向通道、横侧向通道合并起来进行全量系统的控制。

根据 H_2 全信息预见控制方法获得当前实际高度和当前以及未来预见期望高度之间的综合误差,这可以指导舰载机对未来自身状况做出提前操作以达到精确控制。

将一般描述舰载机非线性模型的微分代数方程统一为

$$0 = f(\dot{x}_a, x_a, w, u) \quad (1)$$

$$\dot{y} = \dot{x}_a \quad (2)$$

式中: $x_a = (x_b, x_c)$, 而 $x_b = (h, V, \alpha, q, \theta)^T$, 其中, h, V, α, q, θ 分别为飞机的高度、空速、迎角、俯仰角速度和俯仰角, $x_c = (\beta, p, r, \phi, \psi, y_c)^T$, 其中, $\beta, p, r, \phi, \psi, y_c$ 分别为飞机的侧滑角、滚转角速度、偏航角速度、滚转角、偏航角和侧偏距; w 为舰尾流干扰; y 为输出信号; $u = (u_b, u_c)$, 其中, 输入信号 $u_b = (\delta_e, \delta_r)^T$, δ_e 和 δ_r 分别为升降舵偏角和油门杆操纵量; $u_c = (\delta_a, \delta_r)^T$, δ_a 和 δ_r 分别为副翼偏角和方向舵偏角。

图1所示为含有预见控制的舰载机自动着舰引导系统。

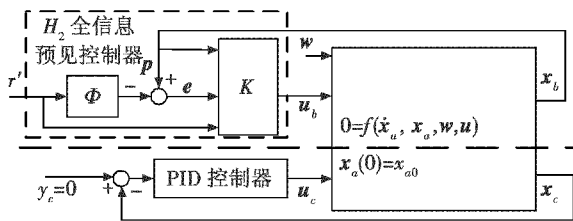


图1 含有预见控制的舰载机自动着舰引导系统

Fig.1 Automatic carrier landing system of the preview control

图中:下面部分是传统的 PID 控制的横侧向通道,其中目标侧偏距为零;上面部分是采用 H_2 全信息预见控制的纵向通道。其中: r' 为参考信息 $(h, V, \alpha, q, \theta)^T$ 的未来值,纵向输出信号为 $p = x_b$ 。

如图1所示,在纵向通道里,本文目标就是设计一个控制器 K 使得 p 尽可能地跟踪 $\Phi r'$ 。

$$\Phi: \begin{cases} x_p(k+1) = A_p x_p(k) + B_p r'(k) \\ y_p(k) = C_p x_p(k) \end{cases} \quad (3)$$

式中: Φ 代表一个类似移位寄存器的延时器; l_r 为参考信息的维数; N 为预见步数; $p(kT_s)$ 为系统的输出向量,

其从当前 kT_s 时刻到未来 $(k+N-1)T_s$ 时刻的数据都存储在 x_p 里, T_s 为采样时间; $y_p(k)$ 为延时器的输出信号;

$$x_p = \begin{pmatrix} r'(k-N) \\ \vdots \\ r'(k-1) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} p(kT_s) \\ \vdots \\ p((k+N-1)T_s) \end{pmatrix};$$

$$A_p = \begin{pmatrix} 0_{l_r} & I_{l_r} & \cdots & 0_{l_r} \\ \vdots & \vdots & I_{l_r} & \vdots \\ 0_{l_r} & 0_{l_r} & \cdots & I_{l_r} \\ 0_{l_r} & 0_{l_r} & \cdots & 0_{l_r} \end{pmatrix}; B_p = \begin{pmatrix} 0_{(N-1)l_r \times l_r} \\ I_{l_r} \end{pmatrix},$$

$$C_p = (I_{l_r} \quad 0_{(N-1)l_r \times l_r}).$$

跟踪误差 e 定义为

$$e(k) = p(kT_s) - C_p x_p(k). \quad (4)$$

2 H_2 全信息预见控制算法

1) 将非线性模型式(1)、式(2)在平衡点处线性化,然后按采样时间 T_s 进行离散化,得到如图2所示的线性化后的纵向通道的预见控制结构。

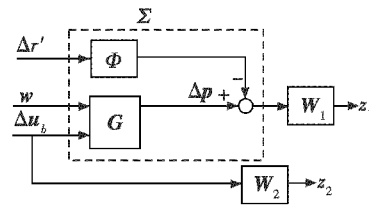


图2 线性化后的纵向通道的预见控制结构

Fig.2 The preview control structure of the linearized longitudinal channel

图中: $\Delta r'$ 为提前可预见信息的增量值; G 为被控对象的传递函数矩阵; W_1 为纵向预见控制律输出权重; W_2 为纵向预见控制律输入权重; z_1 为控制性能指标的的输出部分; z_2 为控制性能指标的输入部分。

图2中的状态空间模型为

$$\Sigma: \begin{cases} \Delta x_b(k+1) = A_b \Delta x_b(k) + B_{1b} \Delta w(k) + B_{2b} \Delta u_b(k) \\ \Delta p(k+1) = A_{cb} \Delta x_b(k) + \Delta p(k) \\ \Delta x_p(k+1) = A_p \Delta x_p(k) + B_p \Delta r'(k) \\ \Delta e(k) = \Delta p(k) - C_p \Delta x_p(k) \end{cases} \quad (5)$$

式中, $A_b, B_{1b}, B_{2b}, A_{cb}$ 均为舰载机的纵向状态空间矩阵。

2) 针对上述系统 Σ , 可推导得到

$$\begin{cases} \begin{pmatrix} \Delta x_b(k+1) \\ \Delta p(k+1) \\ \Delta y(k) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} A_b & 0 & B_{1b} & B_{2b} \\ A_{cb} & I & 0 & 0 \\ 0 & I & 0 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \Delta x_b(k) \\ \Delta p(k) \\ \Delta w(k) \\ \Delta u_b(k) \end{pmatrix} \\ G(Z) = \begin{pmatrix} A_g & B_{1g} & B_{2g} \\ C_g & 0 & 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} A_b & 0 & B_{1b} & B_{2b} \\ A_{cb} & I & 0 & 0 \\ 0 & I & 0 & 0 \end{pmatrix} \end{cases} \quad (6)$$

式中: $A_g = \begin{pmatrix} A_b & 0 \\ A_{eb} & 0 \end{pmatrix}$; $B_{1g} = \begin{pmatrix} B_{1b} \\ 0 \end{pmatrix}$; $B_{2g} = \begin{pmatrix} B_{2b} \\ 0 \end{pmatrix}$; $C_g = (0 \quad I)$ 。

定义 $G(Z)$ 的状态量为 $x_g = (\Delta x_b \quad \Delta p)^T$ 。目标要寻找控制信号 Δu , 使得控制性能指标 J 最小化, 即

$$J = \sum_{k=-N+1}^{\infty} (\Delta e^T(k) W_1^T W_1 \Delta e(k) + \Delta u_b^T(k) W_2^T W_2 \Delta u_b(k)) \quad (7)$$

要得到满足要求的 H_2 全信息预见控制器, 系统必须满足以下 3 个条件^[10]:

- 1) $(A_g \quad B_{2g})$ 是稳定的;
- 2) $W_2^T W_2 > 0$;
- 3) $\forall \theta \in (-\pi, \pi]$, $\begin{pmatrix} A_g - e^{j\theta} I & B_{2g} \\ C_g & 0 \end{pmatrix}$ 满秩。

定义 G 的状态量为 x_g , Φ 的状态量为 Δx_p , 那么图 2 中的输入信号 Δu 为

$$\Delta u_b = F_g x_g + F_p \Delta x_p + F_r \Delta r' + F_w \Delta w \quad (8)$$

式中: $F_g = -\bar{R}^{-1} (B_{2g}^T X_{gg} A_g)$, 为误差系数的状态反馈矩阵; $F_p(j) = -\bar{R}^{-1} B_{2g}^T (A_{gg}^T)^{j-1} S$, $0 < j < N$, $j \in \mathbf{Z}$, 为 $(k+j)$ 时刻的已知未来目标信号的前馈补偿矩阵; $F_r = -\bar{R}^{-1} B_{2g}^T (A_{gg}^T)^{N-1} S$, 为当前时刻的抑制目标信号的前馈补偿矩阵; $F_w(j) = -\bar{R}^{-1} B_{2g}^T (A_{gg}^T)^j X_{gg} B_{1g}$, $0 \leq j \leq M$, $j \in \mathbf{Z}$, 为 $(k+j)$ 时刻的已知未来干扰信号的前馈补偿矩阵; $F_p(0) = 0$; $\bar{R} = W_2^T W_2 + B_{2g}^T X_{gg} B_{2g}$; $S = C_g^T W_1^T W_1$; $A_{gg} = A_g + B_{2g} F_g$; X_{gg} 为离散代数 Riccati 方程的稳态解, 即

$$X_{gg} = A_g^T X_{gg} A_g - F_g^T \bar{R} F_g + C_g^T W_1^T W_1 C_g \quad (9)$$

由于上述 $x_g = (\Delta x_b \quad \Delta p)^T$, 那么对于图 2 中的被控对象 Σ 的输入信号 Δu 可改写为

$$\Delta u_b = F_b \Delta x_b + F_e \Delta p + F_p \Delta x_p + F_r \Delta r' + F_w \Delta w \quad (10)$$

当 w 为可预见的干扰, \bar{u}_b 为输入信号的配平值, 且干扰的可预见步数为 M , 则

$$\begin{aligned} u_b^*(k) = & \Delta u_b(k) + \bar{u}_b = F_b \Delta x_b(k) + F_e \Delta p(k) + \\ & \sum_{j=1}^N F_p(j) \Delta r'(k-N+j) + F_r \Delta r'(k) + \\ & \sum_{j=0}^M F_w(j) \Delta w(k-M+j) + \bar{u}_b \end{aligned} \quad (11)$$

当 w 为不可预见的干扰时, 则令式(11)中的 $M=0$ 。

式(11)表明 H_2 全信息预见控制由 6 项组成: 第 1、第 2 项是反馈控制, 主要作用是使系统的误差减小; 第 3~5 项都属于前馈控制, 其主要作用是提高系统的响应速度, 抑制干扰信号, 以保证系统输出对目标信号

的跟踪; 第 6 项为输入信号的配平值。

H_2 全信息预见控制是在状态反馈的基础上增加前馈控制实现的, 因此其不仅具有一般状态反馈控制的特性, 还具有前馈控制的特性。除此之外, 利用已知的未来目标信号进行前馈补偿控制还具有以下两个性质。

性质 1 根据式(5), 对确定的状态反馈系数矩阵 F_g , 若使 H_2 反馈控制系统

$$\begin{pmatrix} \Delta x_b(k+1) \\ \Delta p(k+1) \end{pmatrix} = (A_g + B_{2g} F_g) \begin{pmatrix} \Delta x_b(k) \\ \Delta p(k) \end{pmatrix} \quad (12)$$

渐近稳定, 则有

$$\lim_{j \rightarrow \infty} F_p(j) = 0 \quad \lim_{j \rightarrow \infty} F_w(j) = 0 \quad (13)$$

性质 1 说明离当前时刻越远的已知未来信息对前馈补偿的作用越弱。

性质 2 对于确定的控制对象式(1)、式(2)和已知的未来信息, 存在一个最佳的用于前馈补偿控制的预见步数 N 和 M , 使目标信号前馈控制效果最佳。

性质 2 说明了已知未来信息的前馈补偿控制, 索取的未来预见步数既不能太长, 也不能太短。预见步数太长, 将使前馈补偿控制作用过强; 预见步数太短, 其前馈补偿控制的作用将不足, 它们都会使目标信号前馈控制的效果降低。因此, 通过适当地设定预见步数 N 和 M , 可达到改善系统对目标信号的跟踪性能和抑制已知干扰信号的影响。

3 仿真结果

为考察 H_2 全信息预见控制算法的有效性, 考虑式(1)、式(2)所描述的某舰载机非线性模型, 并使其在平衡点 \bar{x}_a 处线性化, 其中: $\bar{x}_b = (\bar{h}, \bar{V}, \bar{\alpha}, \bar{q}, \bar{\theta})^T$; $\bar{x}_c = (0, 0, 0, 0, 0)^T$; $\bar{h} = 789.3 \text{ ft}$; $\bar{V} = \begin{pmatrix} 69.3 \\ 0.3048 \end{pmatrix} \text{ ft/s}$; $\bar{\alpha} = \begin{pmatrix} 5 \\ 57.3 \end{pmatrix} \text{ r/s}$; $\bar{q} = 0 \text{ r/s}$; $\bar{\theta} = \begin{pmatrix} 8.5 \\ 57.3 \end{pmatrix} \text{ r/s}$ 。

将干扰简化为舰尾流垂直风速, 得到系统的纵向通道的状态方程

$$\begin{pmatrix} \Delta \dot{h} \\ \Delta \dot{V} \\ \Delta \dot{\alpha} \\ \Delta \dot{q} \\ \Delta \dot{\theta} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & 0 & -\frac{70}{0.3048} & 0 & \frac{70}{0.3048} \\ 0 & -0.0895 & 3.3703 & -0.0254 & -32.1112 \\ 0 & -0.0012 & -0.5871 & 0.9908 & 0.0085 \\ 0 & 0 & -0.3001 & -0.1845 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \Delta h \\ \Delta V \\ \Delta \alpha \\ \Delta q \\ \Delta \theta \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 1 \\ 0.3048 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \Delta w + \begin{pmatrix} 0 & 0 \\ -0.0045 & 18.8037 \\ -0.0014 & -0.0123 \\ -0.0260 & 0 \\ 0 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \Delta \delta_e \\ \Delta \delta_T \end{pmatrix} \quad (14)$$

以采样时间 $T_s = 1 \text{ ms}$ 使其离散化,得到对应的离散系统状态方程,求出对应的传递函数矩阵 $G(Z)$ 。根据上述 H_2 全信息预见控制算法,取 $W_1 = \text{diag}(1 \ 10^3 \ 10^3 \ 1 \ 1)$; $W_2 = \text{diag}(10^3 \ 1)$ 。

求出对应的状态反馈系数 $F_g = (F_b \ F_e)$,即

$$F_b = \begin{pmatrix} 4.56 & -1.1431 & -1745.81 & 311.86 & 2410 \\ -0.41 & -105.67 & 152.18 & -8.94 & -155.8 \end{pmatrix},$$

$$F_e = \begin{pmatrix} 0 & -0.0023 & 0.001 & 0 & 0 \\ 0 & -52.7458 & 0.1143 & 0 & 0 \end{pmatrix}。$$

当舰载机非线性系统未受到舰尾流干扰时, H_2 全信息预见控制和 PID 控制的效果如图 3 所示。

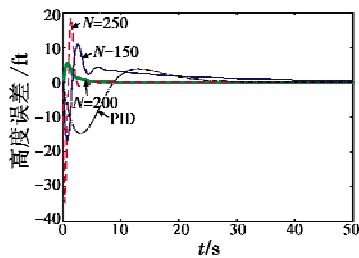


图3 无干扰时, H_2 全信息预见控制和 PID 控制的高度误差比较

Fig. 3 The height error of H_2 full information control and PID control without disturbance

由实验可知,当 $N = 200$ 时,跟踪效果最佳,且控制效果优于 PID 控制。由图可知, H_2 全信息预见控制加快了系统响应速度,且当预见步数选取适当时,能很好地改善跟踪性能。

当系统受到不可预见的舰尾流干扰时,根据式(11),令 $M = 0$,经仿真验证得到 H_2 全信息预见控制和 PID 控制抑制干扰的效果比较,如图 4 所示。当系统稳定后, PID 抑制不可预见的舰尾流干扰效果比预见控制的抑制效果好。

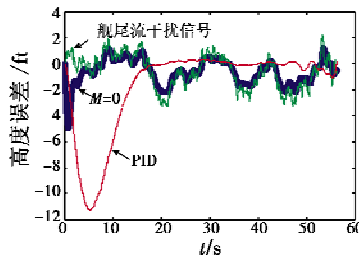


图4 $M = 0$ 时, H_2 全信息预见控制和 PID 对舰尾流干扰抑制对比

Fig. 4 The air wake disturbance suppression of H_2 full information control and PID control when $M = 0$

当系统受到可以预见的舰尾流干扰时,根据式(11),如图 5 所示,令 $M = 100$,经仿真验证得到 H_2 全信息预见控制抑制舰尾流干扰的效果比 PID 控制更理想。

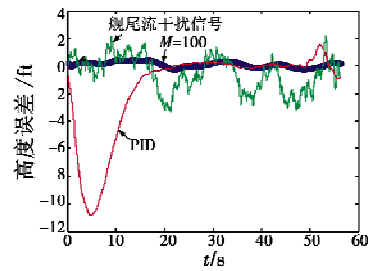


图5 $M = 100$ 时, H_2 全信息预见控制和 PID 对舰尾流干扰抑制对比

Fig. 5 The comparison of air wake disturbance suppression of H_2 full information control and PID control when $M = 100$

4 结论

H_2 全信息预见控制是一种最优控制方法。使用 H_2 全信息预见控制对舰载机下滑道轨迹跟踪控制,不仅可以抑制舰尾流扰动,还能更好地跟踪着舰,优化控制过程。实验结果表明, H_2 全信息预见控制算法对于非线性系统的控制可行,预见步数选取适当,则控制效果优于传统的 PID 控制,具有实用价值。

参考文献

- [1] 杨一栋. 舰载飞机着舰引导与控制 [M]. 北京:国防工业出版社,2007. (YANG Y D. Guidance and control of carrier aircraft landing [M]. Beijing: National Defence Industry Press, 2007.)
- [2] 吴森堂,费玉华. 飞行控制系统 [M]. 北京:北京航空航天大学出版社,2010. (WU S T, FEI Y H. Flight control system [M]. Beijing: Beihang University Press, 2010.)
- [3] FAROOQ A, LIMEBEER D J N. Path following of optimal trajectories using preview control [C]//European Control Conference CDC-ECC 44th IEEE Conference on Decision and Control, 2005 :2787-2792.
- [4] 朱浩,刘少军. 列车车辆垂向主动悬挂的最优预见控制研究 [J]. 机械科学与技术, 2005, 24 (5) :510-514. (ZHU H, LIU S J. Study on optimum-preview control of vertical active suspension of rail vehicle [J]. Mechanical Science and Technology, 2005, 24 (5) :510-514.)
- [5] 甄子洋,王志胜,王道波. 基于误差系统的信息融合最优预见跟踪控制 [J]. 控制理论与应用, 2009, 26 (4) : 425-428. (ZHEN Z Y, WANG Z S, WANG D B. Optimal preview tracking control based on information fusion in error system [J]. Control Theory and Application, 2009, 26 (4) :425-428.)
- [6] 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. (ZHEN Z Y, WANG Z S, WANG D B. Information

本文验证了经典 GM(1,1) 模型比较适用于描述单调变化的过程, 而 GIM(1) 模型不仅适用于灰指数律系统的分析建模, 也适用于比指数律更复杂的线性律与幂指数律耦合系统的分析建模。当数据序列呈现摆动趋势且具有线性律与幂指数律时, 用摆动处理结合 GIM(1) 模型将使模型的预测和拟合精度得到显著提高。

参考文献

- [1] 邓聚龙. 灰理论基础[M]. 武汉: 华中科技大学出版社, 2002. (DENG J L. Grey theory [M]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology Press, 2002.)
- [2] 王清朝. GM(1,1) 模型在铁路装卸运输综合生产效率预测中的应用[J]. 油气储运, 2013, 32(11): 1198-1201. (WANG Q C. Application of GM (1, 1) in comprehensive production efficiency prediction [J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2013, 32(11): 1198-1201.)
- [3] 仝蕊, 申卯兴, 任俊亮, 等. 基于反三角函数变换的振荡序列灰色预测模型研究[J]. 统计与决策, 2010(24): 20-22. (TONG R, SHEN M X, REN J L, et al. The oscillatory sequence grey prediction model based on inverse trigonometric function transformation [J]. Statistics and Decision, 2010(24): 20-22.)
- [4] 刘思峰. 灰色系统理论的产生与发展[J]. 南京航空航天大学学报, 2004, 36(2): 267-272. (LIU S F. Emergence and development of grey system theory and its forward trends [J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2004, 36(2): 267-272.)
- [5] 李小力, 李言俊, 张科. 改进的灰色预测模型在导弹中的应用[J]. 计算机仿真, 2010, 8: 33-36, 60. (LI X L, LI Y J, ZHANG K. Improved grey forecasting model of fault prediction in missile applications [J]. Computer Simulation, 2010, 8: 33-36, 60.)
- [6] 刘发全, 职承杰. 灰色预测 GM(1,1) 模型的一点改进[J]. 数学的实践与认识, 2005, 35(11): 11-15. (LIU F Q, ZHI C J. Improvement of grey prediction model GM (1, 1) [J]. Mathematics in Practice and Theory, 2005, 35(11): 11-15.)
- [7] 周俊, 张鹏. 基于灰色预测的农业机器人 GPS 导航系统硬故障隔离[J]. 农业机械学报, 2010, 41(12): 165-168, 177. (ZHOU J, ZHANG P. Hard fault isolation of GPS navigation system based on gray prediction for agricultural robot [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 41(12): 165-168, 177.)
- [8] 王奎民. 基于灰色预测的无人水下航行器目标跟踪[J]. 自动化技术与应用, 2013, 32(12): 1-4. (WANG K M. Moving target tracking based on grey prediction for unmanned underwater vehicle [J]. Techniques of Automation and Application, 2013, 32(12): 1-4.)
- [9] 邓微, 吴东伟, 李文, 等. 基于灰色预测理论的频谱空洞特性分析研究[J]. 信息技术, 2012(9): 28-32. (DENG W, WU D W, LI W, et al. Research on spectrum hole in characteristics analysis based on gray-predictive-model [J]. Information Technology, 2012(9): 28-32.)
- [10] 曾祥艳, 舒兰, 蒋贵荣, 等. 基于三角模糊数序列的灰色预测模型[J]. 数学的实践与认识, 2012, 42(19): 107-112. (ZENG X Y, SHU L, JIANG G R, et al. Grey prediction model based on triangular fuzzy number series [J]. Mathematics in Practice and Theory, 2012, 42(19): 107-112.)
- [11] 刘乐, 王洪国, 王宝伟. 基于背景值构造方法的 GM(1,1) 模型优化[J]. 统计与决策, 2009(1): 153-155. (LIU L, WANG H G, WANG B W. The GM(1, 1) model optimization based on the structure method of background value [J]. Statistics and Decision, 2009(1): 153-155.)

(上接第 71 页)

- fusion estimation based preview control for discrete linear system [J]. Journal of Automation, 2010, 36(2): 347-352.)
- [7] 崔麦会, 周建军, 陈超. 无人机航迹预见控制及其仿真研究[J]. 计算机测量与控制, 2005, 13(5): 446-448. (CUI M H, ZHOU J J, CHEN C. Flight path preview control of UAV and simulation research [J]. Computer Measurement and Control, 2005, 13(5): 446-448.)
- [8] ZHEN Z Y, JIANG J, WANG X H. Information fusion-based optimal attitude control for an alterable thrust direction unmanned aerial vehicle [J]. International Journal of Advanced Robotic System, 2013, 43(10): 1-9.
- [9] 王亮, 刘乐平, 卢永锦. 驾驶员最优预见跟踪仿真研究[J]. 系统仿真学报, 2008, 20(9): 2441-2444. (WANG L, LIU L P, LU Y J. Simulation research of pilot optimal preview tracking control [J]. Journal of System Simulation, 2008, 20(9): 2441-2444.)
- [10] HAZELL A. Discrete-time optimal preview control [D]. London: University of London, 2008.