

# 基于飞行器网络控制系统的多速率控制器设计

刘 斌, 耿燕丽, 李 君

(武汉科技大学 信息科学与工程学院, 武汉 430080)

**摘要:** 为了减少网络环境中的时延和数据包丢失对飞行器网络控制器系统的影响, 设计了一种具有多速率的保性能控制器设计方法; 多速率是指在具有多通道数据传输的系统中, 各通道所需控制输入的频率不完全相同; 在存在时延和丢包的情况下, 利用增广技术对飞行器控制系统在整个循环周期内建立离散模型, 此时为了使多速率控制方法更加有效, 先基于此模型在控制器输入端构造一个预测器, 根据预测器的输出为整个系统设计一个具有多控制速率的动态输出反馈控制器; 然后给出并证明保性能控制器的存在条件和求解方法; 最后通过某飞行器网络控制系统的数值算例验证了所提方法的有效性。

**关键词:** 飞行器网络控制系统; 多速率控制; 输出预测器; 保性能控制

## Guaranteed Cost Controller with Multi-rate for Networked flight control system

Liu Bin, Geng Yanli, Li Jun

(School of Information Science and Engineering, Wuhan University of Science and Technology, Wuhan 430080, China)

**Abstract:** In this paper, the guaranteed cost controller with multi-rate sampling is designed for the networked flight control systems with multiple data transmission channels, under the consideration of the networked-induced time delay and packet dropout. Multi-rate refers to different sampling period for each channel in systems with multiple data transmission channels. Considering the time delay and packet dropout, this paper firstly establishes the model for the networked flight control systems over the entire cycle period with the lifted technology. Based on this model, a predictive equation for the output of the object and a dynamic output feedback controller with multi-rate are designed to make the multi-rate control actions more effective. Sufficient conditions to guarantee the stability and performance index of control system and solutions of this problem is derive. Then the numerical simulation on a networked flight control system is used to demonstrate the effectiveness of the proposed algorithm.

**Keywords:** networked flight control system; multi-rate control; output predictor; guaranteed cost control

## 0 引言

网络控制系统由于其能够资源共享, 且布线简单等优点, 主要应用于远程控制系统和复杂控制系统中<sup>[1]</sup>。大多数的实际系统都是具有多个控制信号的多输入多输出控制系统, 但是对这些系统的控制方法的研究, 都是将某个特定的物理信号独立出来进行系统分析和控制器设计。有时为了提高控制性能, 需要将系统中的所有控制信号综合考虑进行控制器设计。对于传感器和控制器广泛散布的多输入多输出网络控制系统来说, 为了保证系统的实时性, 通常不会把所有节点的信息封装到一个数据包后再进行传输, 而是由各个设备直接传递信息, 这就需要多包传输技术<sup>[2]</sup>。对于采用多包传输技术的多输入多输出网络控制系统来说, 其模型建立过程以及控制算法的设计过程就会更加复杂。

具有多通道传输的飞行器姿态控制系统就是一种典型的多输入多输出控制系统。随着现场总线技术、计算机控制技术及航空航天技术的不断发展, 在保证飞行器可靠的稳定性能后, 现代飞行器需要向着管控一体化以及更加轻便的方向发展。因

此, 越来越多的现代飞行器开始将系统中的各个设备通过多级数据总线连接构成飞行器网络控制系统。在飞行器中加入网络能够很好的解决系统内部越来越复杂的资源共享和信号传递的问题, 成功克服了传统的点对点传输方式布线复杂、维护成本高、体积庞大等缺陷。但是, 飞行器控制系统是硬实时系统, 若网络满足不了系统的时限要求, 就会带来灾难性后果。文献[8]针对具有多通道数据传输的多输入多输出飞行器网络控制系统在同时存在时延和丢包的网络环境下, 采用状态观测器后利用李雅普诺夫函数得到系统的稳定条件。文献[9]研究了延时和数据丢包对具有多通道数据传输的飞行器网络控制系统的影响, 并讨论了系统的故障检测问题。

一般的多速率控制方法只是加快了控制器的采样频率, 而控制量仍然在控制器接收到数据后才会发生变化, 控制序列具有很大的保守性。在存在短时延且数据包丢失概率已知的网络环境, 本文为具有多通道数据传输的飞行器网络控制系统提出了一种具有多控制速率的保性能控制器设计方法。本文首先利用增广技术在整个循环周期内建立飞行器姿态控制系统的离散模型, 基于此模型在动态输出反馈控制器输入端构造一个预测器, 根据预测器的输出设计一个具有多控制速率的控制器。

## 1 飞行器姿态网络控制系统模型分析

本文研究的多通道数据传输的飞行器姿态网络控制系统结

收稿日期: 2016-04-10; 修回日期: 2016-05-10。

作者简介: 刘 斌(1972-), 女, 湖北武汉人, 博士, 教授, 博导, 主要从事预测控制、系统建模及数据挖掘方向的研究。



$$\int_0^{iT-N_{ij}T_j} e^{A_p \tau} B_{pj} d\tau u_j(kT_0 + N_{ij}T_j))$$

定义输出预测序列:

$$\overline{Y}_k = [y(kT_0 + T) \quad \cdots \quad y(kT_0 + iT) \quad \cdots \quad y(kT_0 + NT)]^T, (i = 1, 2, \dots, N) \quad (5)$$

结合公式 (2) 和 (3), 预测模型可以简化为如下矩阵形式:

$$\overline{Y}_k = O \overline{x}(kT_0) + H \overline{U}_k \quad (6)$$

$$\text{其中: } O = \begin{bmatrix} C_p A \\ C_p A^2 \\ \vdots \\ C_p A^i \\ \vdots \\ C_p A^N \end{bmatrix}, H = \begin{bmatrix} H_1 \\ H_2 \\ \vdots \\ H_i \\ \vdots \\ H_N \end{bmatrix}, \text{ 其中 } H_i = \begin{bmatrix} H_{i1}^T \\ H_{i2}^T \\ \vdots \\ H_{ij}^T \\ \vdots \\ H_{im}^T \end{bmatrix}^T,$$

$$H_{ij} = [C_p A^{i-l_j} B_j \quad C_p A^{i-2l_j} B_j \quad \cdots \quad C_p A^{i-N_{ij}l_j} B_j$$

$$C_p \int_0^{iT-N_{ij}T_j} e^{A_p \tau} B_{pj} d\tau \quad 0_{r \times (N_j - N_{ij} - 1)}],$$

$N_{ij}$  是满足  $cT_j \leq iT$  的最大  $c$  值。

本文采用的数字化动态输出反馈控制器形式如下:

$$\begin{cases} \psi[(k+1)T_0] = A_c \psi(kT_0) + B_c \overline{Y}_k \\ \overline{U}_k = K \psi(kT_0) \end{cases} \quad (7)$$

其中:  $\psi(kT_0) \in R^p$  为控制器的状态。

为了得到被控对象经过网络在控制律下的闭环系统模型, 定义了增广向量:

$$\mathbf{Z}(k) = [x^T(kT_0) \quad \psi^T(kT_0)]^T, \text{ 结合公式 (4) 和 (7),}$$

可得:

$$\mathbf{Z}(k+1) = \Phi \mathbf{Z}(k) + \Phi_1 \mathbf{Z}(k-1) + \Phi_2 \mathbf{Z}(k-2) \quad (8)$$

其中:

$$\Phi = \begin{bmatrix} A_0 & WK \\ 0 & A_c + B_c HK \end{bmatrix}, \Phi_1 = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ B_c OM & 0 \end{bmatrix},$$

$$\Phi_2 = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ B_c O(1-M) & 0 \end{bmatrix}$$

对被控对象, 定义性能指标为:

$$J = E \sum_{k=0}^{\infty} [x^T(kT_0) Q x(kT_0) + \overline{U}_k^T R \overline{U}_k] = E \sum_{k=0}^{\infty} Z^T(k) \Omega Z(k) \quad (9)$$

其中:  $Q$ 、 $R$  为常数正定矩阵,  $E[\cdot]$  为求数学期望,  $\Omega =$

$$\begin{bmatrix} Q & 0 \\ 0 & K^T R K \end{bmatrix}^{\circ}.$$

## 2 保性能控制器设计

引理 1<sup>[7]</sup>: 给定适当维数的矩阵  $W$ 、 $M$  和  $N$ , 其中  $W$  是对称的, 则  $W + N^T F^T M^T + M F N < 0$  对所有满足  $F^T F \leq I$  的矩阵  $F$  成立, 当且仅当存在一个常数  $\varepsilon > 0$ , 使得  $Y + \varepsilon M M^T + \varepsilon^{-1} N^T N < 0$ 。

其中:

$$\Lambda = E \begin{bmatrix} \Phi^T \Phi + \Pi_1 - \Pi & \Phi^T \Phi \Phi_1 & \Phi^T \Phi \Phi_2 \\ \Phi_1^T \Phi & \Phi_1^T \Phi \Phi_1 + \Pi_2 - \Pi_1 & \Phi_1^T \Phi \Phi_2 \\ \Phi_2^T \Phi & \Phi_2^T \Phi \Phi_1 & \Phi_2^T \Phi \Phi_2 - \Pi_2 \end{bmatrix}$$

根据 schur 补理和引理 1, 可得以下的定理给出了系统

(1) 存在保性能控制律的一个充分必要条件。

定理 1: 对于存在数据包丢失, 并且网络诱导时延满足的网络控制系统, 如果存在对称正定矩阵  $P_0, P_1, P_2 \in R^{n \times n}$ ,  $S_0, S_1, S_2 \in R^{p \times p}$ , 满足条件:

$$\begin{bmatrix} \Pi_1 - \Pi + \Omega & & & & & \\ 0 & \Pi_2 - \Pi_1 & & & * & \\ 0 & 0 & -\Pi_2 & & & \\ 0 & 0 & 0 & -\Pi & & \\ 0 & 0 & 0 & \varepsilon \Pi & -\varepsilon & \\ \Phi & \Phi \Phi_1 & \Phi \Phi_2 & 0 & 0 & -\varepsilon \end{bmatrix} < 0 \quad (10)$$

$$\text{其中: } \Pi = \begin{bmatrix} P_0 & 0 \\ 0 & S_0 \end{bmatrix}, \Pi_1 = \begin{bmatrix} P_1 & 0 \\ 0 & S_1 \end{bmatrix}, \Pi_2 = \begin{bmatrix} P_2 & 0 \\ 0 & S_2 \end{bmatrix},$$

则系统渐进稳定, 且系统性能指标为:

$$J \leq x^T(0) P_0 x(0) + \psi^T(0) S_0 \psi(0) + x^T(-1) P_1 x(-1) + \psi^T(-1) S_1 \psi(-1) + x^T(-2) P_2 x(-2) + \psi^T(-2) S_2 \psi(-2) \quad (11)$$

证明: 选择对称正定矩阵  $P_0, S_0, P_1, S_1, P_2, S_2$ , 令 Lyapunov 泛函  $V(k)$  为:

$$V(k) = x^T(kT_0) P_0 x(kT_0) + \psi(kT_0)^T S_0 \psi(kT_0) + x^T[(k-1)T_0] P_1 x[(k-1)T_0] + \psi[(k-1)T_0]^T S_1 \psi[(k-1)T_0] + x^T[(k-2)T_0] P_2 x[(k-2)T_0] + \psi[(k-2)T_0]^T S_2 \psi[(k-2)T_0] = Z^T(k) \Pi Z(k) + Z^T(k-1) \Pi_1 Z(k-1) + Z^T(k-2) \Pi_2 Z(k-2)$$

当  $V(k)$  沿系统任意轨线的差分为:

$$E[\Delta V(k)] = E[V(k+1) - V(k)] =$$

$$\begin{bmatrix} \mathbf{Z}(k) \\ \mathbf{Z}(k-1) \\ \mathbf{Z}(k-2) \end{bmatrix}^T \Lambda \begin{bmatrix} \mathbf{Z}(k) \\ \mathbf{Z}(k-1) \\ \mathbf{Z}(k-2) \end{bmatrix}$$

$$\Lambda = \begin{bmatrix} \Pi_1 - \Pi & & & & \\ 0 & \Pi_2 - \Pi_1 & & & * \\ 0 & 0 & -\Pi_2 & & \\ 0 & 0 & 0 & -\Pi & \\ 0 & 0 & 0 & \varepsilon \Pi & -\varepsilon \\ \Phi & \Phi \Phi_1 & \Phi \Phi_2 & 0 & 0 & -\varepsilon \end{bmatrix}$$

由不等式 (10), 可以得到:

$$E[\Delta V(k)] < - \begin{bmatrix} \mathbf{Z}(k) \\ \mathbf{Z}(k-1) \\ \mathbf{Z}(k-2) \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} \Omega & & \\ & 0 & \\ & & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{Z}(k) \\ \mathbf{Z}(k-1) \\ \mathbf{Z}(k-2) \end{bmatrix} < 0$$

根据 Lyapunov 理论, 可以推出系统渐进稳定。反之, 如果系统渐进稳定并且能使性能指标最小, 则需  $E[\Delta V(k)] + Z_k^T \Omega Z_k < 0$ , 即可以得到定理 1 中的不等式 (10) 成立。

另外,  $Z^T(k) \Omega Z(k) < -E[\Delta V(k)]$ , 不等式两边对  $k$  从 0 到  $\infty$  求和, 并利用系统稳定性, 可以得到:

$$E \sum_{k=0}^{\infty} Z^T(k) \Omega Z(k) < x^T(0) P_0 x(0) + \psi^T(0) S_0 \psi(0) + x^T(-1) P_1 x(-1) + \psi^T(-1) S_1 \psi(-1) + x^T(-2) P_2 x(-2) + \psi^T(-2) S_2 \psi(-2)$$

即可得公式 (11), 也即定理 1 成立。

定理 2: 对系统 (4), 在控制律 (7) 作用下, 如果给定的常矩阵  $U$ 、 $U_1$ 、 $Q$ 、 $R$ , 以下优化问题:

$$\min_{P_0, P_1, P_2, S_0, S_1, S_2, L, Y, T, \varepsilon, \varepsilon_1} \sum_{j=0}^2 \alpha_j + \beta_j$$

s.  $t$ 

$$\begin{bmatrix}
\overline{P_1} - \overline{P_0} & & & & & & & & & & & & & & & & \\
0 & \overline{S_1} - \overline{S_0} & & & & & & & & & & & & & & & \\
0 & 0 & \overline{P_2} - \overline{P_1} & & & & & & & & & & & & & & \\
0 & 0 & 0 & \overline{S_2} - \overline{S_1} & & & & & & & & & & & & & * \\
0 & 0 & 0 & 0 & -\overline{P_2} & & & & & & & & & & & & \\
0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -\overline{S_2} & & & & & & & & & & & \\
0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -\overline{P_0} & & & & & & & & & & \\
0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -\overline{S_0} & & & & & & & & & \\
0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \overline{P_0} & 0 & -\epsilon & & & & & & & \\
0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \overline{S_0} & 0 & -\epsilon & & & & & & & \\
\epsilon A_0 & WY & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -\epsilon & & & & & \\
0 & L & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -\epsilon & & & & \\
0 & HY & \epsilon O \overline{M} & 0 & \epsilon O(1 - \overline{M}) & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -\epsilon_1 & & & \\
0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & T^T & -\epsilon_1 & & \\
0 & Y & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -R^{-1} & \\
\epsilon & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -Q^{-1}
\end{bmatrix}$$

$$\begin{aligned}
& \leq 0 \\
& \quad \quad \quad (12)
\end{aligned}$$

$$\begin{bmatrix}
\alpha_j & 0 & U^T \epsilon^{-1} & 0 \\
0 & -\beta_j & 0 & U_1^T \epsilon^{-1} \\
\epsilon^{-1} U & 0 & -\overline{P_j}^{-1} & 0 \\
0 & \epsilon^{-1} U_1 & 0 & -\overline{S_j}^{-1}
\end{bmatrix} < 0 \quad (13)$$

有可行解  $\overline{P_0}, \overline{P_1}, \overline{P_2}, \overline{S_0}, \overline{S_1}, \overline{S_2}, L, Y, T, \epsilon, \epsilon_1$ , 则动态输出反馈控制律为:

$$J \leq \sum_{j=0}^2 \alpha_j + \beta_j$$

证明: 由定理1中不等式(10)可得系统稳定, 将表达式  $\Phi, \Phi_1, \Phi_2, \Pi, \Pi_1, \Pi_2$  代入定理1中不等式(10)可得不等式(14):

$$\begin{bmatrix}
P_1 - P + Q & & & & & & & & & & & & & & & & \\
0 & S_1 - S + K^T R K & & & & & & & & & & & & & & & \\
0 & 0 & P_2 - P_1 & & & & & & & & & & & & & & \\
0 & 0 & 0 & S_2 - S_1 & & & & & & & & & & & & & * \\
0 & 0 & 0 & 0 & -P_2 & & & & & & & & & & & & \\
0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -S_2 & & & & & & & & & & & \\
0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -P & & & & & & & & & & \\
0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -S & & & & & & & & & \\
0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \epsilon P & 0 & -\epsilon & & & & & & & \\
0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \epsilon S & 0 & -\epsilon & & & & & & \\
A_0 & WK & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -\epsilon & & & & & \\
0 & A_c + B_c H K & B_c O \overline{M} & 0 & B_c O(1 - \overline{M}) & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -\epsilon
\end{bmatrix} < 0 \quad (14)$$

将不等式(14)两边同时乘以  $\text{diag}\{\epsilon, \epsilon, \epsilon, \epsilon, \epsilon, \epsilon, \epsilon, \epsilon, I, I, I, I\}$ , 对所得不等式依次经过引理1和Schur补引理, 然后令:

$$\begin{aligned}
& \epsilon P_0 \epsilon = \overline{P_0}, \epsilon P_1 \epsilon = \overline{P_1}, \epsilon P_2 \epsilon = \overline{P_2}, \epsilon S_0 \epsilon = \overline{S_0}, \\
& \epsilon S_1 \epsilon = \overline{S_1}, \epsilon S_2 \epsilon = \overline{S_2}, \epsilon A_c = L, \epsilon K = Y, \epsilon_1 B_c = T \quad (15)
\end{aligned}$$

即可得到条件不等式(12), 即可保证系统的稳定性。

定理1中所得到的闭环性能指标的上界依赖于初始状态  $x(0), x(-1), x(-2), \psi(0), \psi(-1), \psi(-2)$ , 然而, 在实际系统中, 人们往往难以精确确定系统的初始状态为克服这个困难, 我们假定:

$$\begin{cases} x(-j) = Ux_j, x_j^T x_j \leq I \\ \psi(-j) = U_1 \psi_j, \psi_j^T \psi_j \leq I \end{cases} \quad j = 0, 1, 2$$

其中:  $U$  和  $U_1$  是给定的常矩阵。代入公式(11), 可得:

$$\begin{aligned}
J & \leq \sum_{j=0}^2 \begin{bmatrix} x(-j) \\ \psi(-j) \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} P_j & 0 \\ 0 & S_j \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x(-j) \\ \psi(-j) \end{bmatrix} = \\
& \sum_{j=0}^2 \begin{bmatrix} x_j \\ \psi_j \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} U^T & 0 \\ 0 & U_1^T \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P_j & 0 \\ 0 & S_j \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U & 0 \\ 0 & U_1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_j \\ \psi_j \end{bmatrix} = \\
& \sum_{j=0}^2 \begin{bmatrix} x_j \\ \psi_j \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} U^T P_j U & 0 \\ 0 & U_1^T S_j U_1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_j \\ \psi_j \end{bmatrix} \leq \\
& \sum_{j=0}^2 \lambda_{\max} \begin{bmatrix} U^T P_j U & 0 \\ 0 & U_1^T S_j U_1 \end{bmatrix}
\end{aligned}$$

由于  $P_j = \epsilon^{-1} \overline{P_j} \epsilon^{-1}, S_j = \epsilon^{-1} \overline{S_j} \epsilon^{-1}$  则:

$$J \leq \sum_{j=0}^2 \lambda_{\max} \begin{bmatrix} U^T \epsilon^{-1} \bar{P}_j \epsilon^{-1} U & 0 \\ 0 & U_1^T \epsilon^{-1} \bar{S}_j \epsilon^{-1} U_1 \end{bmatrix}$$

在定理 2 中的凸优化问题中, 约束条件 (13) 等价于  $U^T \epsilon^{-1} \bar{P}_j \epsilon^{-1} U < \alpha_j, U_1^T \epsilon^{-1} \bar{S}_j \epsilon^{-1} U_1 < \beta_j$ , 因此, 可以通过使  $\sum_{j=0}^2 \alpha_j + \beta_j$  的最小化来保证公式 (11) 给出的性能指标上界的最小化。如果该凸优化问题有解, 那么, 其全局最优解一定是约束条件 (12) 和 (13) 的可行解。结合公式 (15), 即可得到系统的最优保性能控制律, 证毕。

### 3 数值算例

某飞行器姿态控制系统连续状态空间模型<sup>[14]</sup>为:

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = \begin{bmatrix} -1.2052 & 0.9732 \\ -13.7620 & -1.6540 \end{bmatrix} x(t) + \begin{bmatrix} -0.1839 & -0.1310 & -0.0143 \\ -11.4080 & -6.9597 & 7.1350 \end{bmatrix} u(t) \\ y(t) = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} x(t) \end{cases}$$

其中:  $x = [\theta_p^T \ \theta_r^T]^T$  为攻角和俯仰角角速率,  $u = [\xi_e^T \ \xi_v^T \ \xi_r^T]^T$  表示升降舵偏角、升降舵辅助翼偏角和鸭翼偏舵偏角。取传感器采样周期  $T_s = 0.2$  s, 各控制回路采样周期  $T_1 = 0.1$  s,  $T_2 = 0.2$  s,  $T_3 = 0.05$  s, 丢包率为 0.01, 时延  $0 < \tau < T_s$ , 权矩阵  $Q = [0.5 \ 0; 0 \ 0.25], R = 100 * \text{diag}\{1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1\}, U = 2 * \text{diag}\{1 \ 1\}, U_1 = 0.1 * \text{diag}\{1 \ 1\}$ , 飞行器姿态控制系统经离散化得形式如 (4) 的模型, 其系数矩阵为:

$$\begin{aligned} A_0 &= \begin{bmatrix} 0.5904 & 0.1336 \\ -1.8888 & 0.5288 \end{bmatrix}, \\ W &= \begin{bmatrix} -0.1394 & -0.669 & -0.1289 & -0.0445 \\ -0.7263 & -1.0175 & -0.2586 & -0.2115 \\ -0.0355 & -0.0236 & -0.0089 \\ -0.2586 & -0.3023 & -0.3403 \end{bmatrix} \end{aligned}$$

输出预测矩阵为:

$$\begin{aligned} O &= \begin{bmatrix} 0.9259 & -0.637 & 0.8286 & -1.1665 \\ 0.0451 & 0.9051 & 0.0825 & 0.7906 \\ 0.7147 & -1.5838 & 0.5904 & -1.888 \\ 0.112 & 0.663 & 0.1336 & 0.5288 \end{bmatrix}^T, \\ H &= \begin{bmatrix} 0.0221 & 0 & -0.0144 & -0.0089 \\ -0.5414 & 0 & -0.33 & -0.3403 \\ -0.0669 & 0 & -0.0425 & -0.0236 \\ -1.0175 & 0 & -0.6196 & -0.3023 \\ -0.1078 & -0.0221 & -0.0817 & -0.0355 \\ -0.8783 & -0.5414 & -0.8637 & -0.2586 \\ -0.1394 & -0.0669 & -0.1289 & -0.0445 \\ -0.7263 & -1.0175 & -1.0597 & -0.2115 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ -0.0089 & 0 & 0 & 0 \\ -0.3403 & 0 & 0 & 0 \\ -0.0236 & -0.0089 & 0 & 0 \\ -0.3023 & -0.3403 & 0 & 0 \\ -0.0355 & -0.0236 & -0.0089 & 0 \\ -0.2586 & -0.3023 & -0.3403 & 0 \end{bmatrix} \end{aligned}$$

通过线性矩阵不等式方法可以得到控制器参数为:

$$\begin{aligned} A_c &= \begin{bmatrix} -0.3790 & -0.1564 \\ 0.2100 & 0.3833 \end{bmatrix}, \\ B_c &= \begin{bmatrix} -0.2608 & -0.2981 & -0.0813 & 0.2448 \\ -0.1565 & 0.1568 & 0.3125 & 0.2241 \\ 0.2953 & 0.1846 & -0.2067 & -0.2731 \\ -0.1198 & -0.2971 & -0.2300 & 0.0445 \end{bmatrix}, \\ K &= \begin{bmatrix} 0.0231 & -0.0185 \\ -0.0420 & -0.0298 \\ 0.0111 & 0.0388 \\ 0.00316 & -0.0065 \\ -0.0388 & -0.0355 \\ 0.003 & 0.0358 \\ 0.0381 & 0.0054 \end{bmatrix} \end{aligned}$$

系统的性能指标为  $J \leq 17.0679$ 。

给定被控对象的初始状态  $x(0) = [4 \ 2]^T$ , 可得攻角和俯仰角角速率响应曲线 (图 2) 和所需的升降舵偏角、升降舵辅助翼偏角和鸭翼偏舵偏角曲线 (图 3) 如下所示:

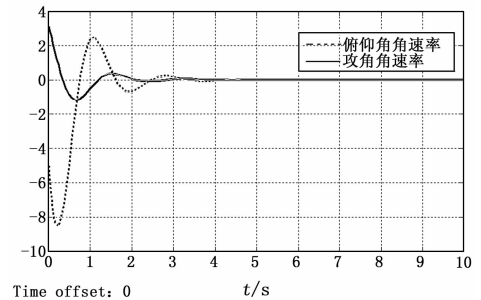


图 2 攻角和俯仰角角速率响应曲线

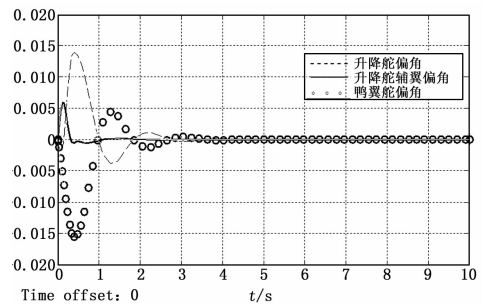


图 3 升降舵偏角、升降舵辅助翼偏角和鸭翼偏舵偏角曲线

由图可知, 攻角和俯仰角 3 秒左右进入稳态, 响应加快, 而且所需的升降舵偏角、升降舵辅助翼偏角和鸭翼偏舵偏角较小, 飞行器姿态控制系统比较容易实现。

### 4 结论

本文针对具有多通道数据传输的飞行器姿态控制系统采用了多速率的控制方法, 为了系统的使控制输入序列更加有效, 提出了一种基于输出预测的具有保性能控制特性的动态输出反馈控制器设计方法。通过为系统建立离散模型、设计控制器、数值仿真, 获得了攻角和俯仰角角速率响应曲线和所需的升降舵偏角、升降舵辅助翼偏角和鸭翼偏舵偏角曲线。本文中的方法可以减少具有复杂计算功能的智能系统达到稳定状态的时间。

(下转第 169 页)