

网络系统中动态矩阵控制的稳定性条件

葛 阳, 王景成

(上海交通大学 自动化系, 上海 200240; 系统控制与信息处理教育部重点实验室, 上海 200240)

摘要: 网络控制系统中的时滞和丢包会影响控制器的稳定性; 因此, 传统的动态矩阵控制器设计方法无法适应网络化环境. 本文针对这一问题设计了一种改进型动态矩阵控制器. 通过建立缓存器将不确定时滞转化为固定时滞; 并提出了一种更新系统单位阶跃响应系数的方法, 用来处理时滞对控制器的影响. 采用一次性传输整个控制序列的方法, 避免了丢包时需要更新控制量的问题. 此外, 进一步分析了该控制系统的稳定性问题, 给出了考虑时滞和丢包信息的系统稳定性充分条件. 最后通过实时仿真软件示范了如何确定允许的最大时滞和丢包. 验证了该方法的有效性.

关键词: 网络控制系统; 动态矩阵控制; 时滞; 丢包

中图分类号: TP273 **文献标识码:** A

Stability condition for dynamic matrix control in networked system

GE Yang, WANG Jing-cheng

(Department of Automation, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China;

Key Laboratory of System Control and Information Processing, Ministry of Education of China, Shanghai 200240, China)

Abstract: The time-delay and the packet-dropout in networked control systems (NCSs) affect the stability of the control system. Hence, the traditional dynamic matrix control (DMC) controller is no longer suitable in the networked environment. To deal with this problem, we designed an improved dynamic matrix controller (DMC), in which the uncertain time-delay is transformed to the fixed time-delay by two buffers. An updating method for the step-response coefficient is put forward to handle the effect of time-delay on controller. The entire control sequence is transmitted in one time to eliminate the required updating for control data when packet-dropout is occurred. Furthermore, the stability problem of the improved DMC system is investigated and a sufficient condition considering the information of time-delay and packet-dropout is established. By using a real-time simulation software, we illustrate how to determine the maximum tolerable time-delay and packet-dropout for a given example. Results validate the proposed algorithm.

Key words: networked control systems; dynamic matrix control; time-delay; packet-dropout

1 引言(Introduction)

网络控制系统(NCSs)由于其大规模集成特性, 分布式特性以及低成本开放特性, 成为近年来的研究热点问题之一^[1]. 它的主要特征是数据在传感器、控制器与执行器之间需经过网络传输, 这不可避免的会有数据延迟、丢包等问题. 针对这一问题, 很多学者做了大量的研究.

其中费春国等人对于时滞固定的落在某个确定周期内的情况提出了一种自适应动态矩阵控制(DMC)方法^[2]. 关守平等人在仅存在丢包问题时提出了一种基于事件-时间驱动的方式^[3]. 王宝凤等人研究具有Markovian时延与丢包的离散线性系统的状态估计问题, 获得次优但是简便的计算^[4]. 罗运辉等人提出一种基于动态矩阵控制算法预测特性的新型PID控制方法^[5]. 俞立等人针对具有随机长时延

离散时间网络控制系统, 给出了状态反馈保性能控制器的设计方法^[6]. 唐斌等人针对网络诱导时延和数据包丢失问题, 研究了网络广义预测控制方法^[7]. 谢成祥等人针对长时延丢包系统, 研究了其稳定性和控制器的设计, 并依据分离原理分别设计了状态预测器和控制器^[8].

然而以上文章中, 部分只考虑了单向通道存在网络, 或者未综合考虑了时延和丢包问题. 在数据传输丢包问题的处理上, 较多的采用了零阶保持器的设计方法^[9-11], 降低了控制性能. 同时对于所提出的控制算法, 通常没有给出稳定性的条件. 另一方面, 上述文献中控制器的设计通常采用了PID或者状态反馈控制器, 对于预测控制, 特别的动态矩阵控制器的研究尚少. 在本文针对以上问题, 提出了一种事件-时间驱动的改进动态矩阵控制方法, 可以较好的

处理时滞和丢包问题,并保证系统的稳定性.

2 问题分析与控制策略(Problem analysis and control strategy)

2.1 时滞问题(Time delay problem)

本节所考虑的系统如图1所示,在传感器、控制器和执行器之间存在网络.

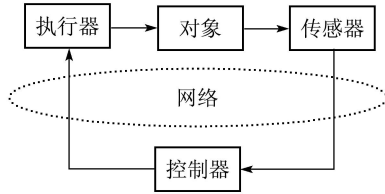


图1 系统结构示意图
Fig. 1 System structure

假设系统的状态方程为

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{x}}(t) = \mathbf{A}\mathbf{x}(t) + \mathbf{B}\mathbf{u}(t), \\ \mathbf{y}(t) = \mathbf{C}\mathbf{x}(t). \end{cases} \quad (1)$$

在无阻滞时将该系统按采样周期 h 离散化,有

$$\begin{cases} \mathbf{x}_{k+1} = \Phi\mathbf{x}_k + \Gamma\mathbf{u}_k, \\ \mathbf{y}_k = \mathbf{C}\mathbf{x}_k, \end{cases} \quad (2)$$

其中:

$$\Phi = e^{\mathbf{A}h}, \Gamma = \int_0^h e^{\mathbf{A}s}\mathbf{B}ds.$$

假设数据传输的时滞为 $\tau_k = \tau_k^{sc} + \tau_k^c + \tau_k^{ca}$,分别代表传感器到控制器、控制器自身、控制器到执行的时滞.并有 $\tau_k = nh + \varepsilon_k$,其中 n 为非负整数, $\varepsilon_k \in [0, h)$,此时将系统(1)离散化可得

$$\begin{cases} \mathbf{x}_{k+1}^* = \Phi\mathbf{x}_k^* + \Gamma_0(\varepsilon_k)\mathbf{u}_{k-n}^* + \Gamma_1(\varepsilon_k)\mathbf{u}_{k-n-1}^*, \\ \mathbf{y}_k^* = \mathbf{C}\mathbf{x}_k^*, \end{cases} \quad (3)$$

其中:

$$\begin{aligned} \Phi &= e^{\mathbf{A}h}, \Gamma_0(\varepsilon_k) = \int_0^{h-\varepsilon_k} e^{\mathbf{A}s}\mathbf{B}ds, \\ \Gamma_1(\varepsilon_k) &= \int_{h-\varepsilon_k}^h e^{\mathbf{A}s}\mathbf{B}ds. \end{aligned}$$

如果采用系统(2)来计算DMC中的单位阶跃响应系数矩阵,会由于未考虑时滞而使得整个系统的稳定性下降,因此应当采用系统(3)进行未来输出的预测.

引理 1 如果无阻滞的系统的单位阶跃响应系数向量 $\mathbf{a} = (a_1, a_2, \dots, a_N)^T$,有时滞系统(3)在第 k 个采样周期的系统单位阶跃响应系数向量为 $\mathbf{a}^* = (a_1^*, a_2^*, \dots, a_N^*)^T$,满足

$$a_i^* = \begin{cases} a_i - \mathbf{C}(\Phi^{i-1} + \dots + \Phi + \mathbf{I})\Gamma, & i \leq n, \\ a_i - \mathbf{C}(\Phi^{i-1} + \dots + \Phi^{i-n-1})\Gamma + \mathbf{C}\Phi^{i-n-1}\Gamma_0, & i > n, \end{cases} \quad (4)$$

其中 Γ_0 是 $\Gamma_0(\varepsilon_k)$ 的简写符号^[12].

推论 1 无阻滞的系统的单位脉冲响应系数为

$$\mathbf{h} = (h_1, h_2, \dots, h_N)^T,$$

有时滞系统在第 k 个采样周期的系统单位脉冲响应系数向量为

$$\mathbf{h}^* = (h_1^*, h_2^*, \dots, h_N^*)^T,$$

满足

$$h_i^* = \begin{cases} h_i - \mathbf{C}\Phi^{i-1}\Gamma, & i \leq n, \\ h_i - \mathbf{C}\Phi^{i-1}\Gamma + \mathbf{C}\Gamma_0, & i = n + 1, \\ h_i - \mathbf{C}\Phi^{i-1}\Gamma + \mathbf{C}\Phi^{i-n-1}\Gamma_0 + \mathbf{C}\Phi^{i-n-2}\Gamma_1, & i > n + 1. \end{cases} \quad (5)$$

证 令系统(2)和系统(3)中的输入为单位脉冲响应,即

$$u_k = \begin{cases} 1, & k = 0, \\ 0, & k > 0. \end{cases} \quad (6)$$

其余部分与引理1的证明过程类似. 证毕.

在动态矩阵控制中^[13],目标函数为

$$\begin{aligned} \min J_k &= \sum_{i=1}^P q_i (w(k+i) - \tilde{y}(k+i|k))^2 + \\ &\sum_{i=1}^M r_i \Delta u(k+i-1|k)^2, \end{aligned} \quad (7)$$

其中: $w(k+i)$ 是 $k+i$ 时刻系统的期望输出, $\tilde{y}(k+i|k)$ 是 k 时刻预测的 $k+i$ 时刻的输出, q_i 是输出误差权系数, r_i 是控制增量权系数, P 是预测时域, M 是控制时域.

假定在 k 时刻认为 $k+M$ 时刻后控制量恒定,即

$$u(k+M+j) = u(k+M), j \geq 0.$$

引入有限脉冲响应(finite impulse response, FIR)模型

$$y(k) = \sum_{i=1}^N h_i u(k-i). \quad (8)$$

令

$$\mathbf{Q} = \text{diag}\{q_1, \dots, q_P\}, \mathbf{R} = \text{diag}\{r_1, \dots, r_M\},$$

并且记

$$H_k = \begin{bmatrix} h_{1,k} & \cdots & 0 & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ h_{M-1,k} & \cdots & h_{1,k} & 0 \\ h_{M,k} & \cdots & h_{2,k} & a_{1,k} \\ \vdots & & \vdots & \vdots \\ h_{P,k} & \cdots & h_{P-M+2,k} & a_{P-M+1,k} \end{bmatrix}_{P \times M}, \quad (9)$$

$$\hat{e}(k+i) = w(k+i) - \sum_{j=i+1}^N h_j^* u(k+i-j),$$

$$\mathbf{u} = \begin{pmatrix} u(k) \\ \vdots \\ u(k+M-1) \end{pmatrix}, \hat{\mathbf{e}} = \begin{pmatrix} \hat{e}(k+1) \\ \vdots \\ \hat{e}(k+P) \end{pmatrix},$$

$$\Delta \mathbf{u} = \begin{pmatrix} \Delta u(k) \\ \vdots \\ \Delta u(k+M-1) \end{pmatrix}, \mathbf{b} = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \end{pmatrix},$$

$$\mathbf{G} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & \cdots & 0 \\ -1 & 1 & \ddots & \vdots \\ \vdots & \ddots & \ddots & 0 \\ 0 & \cdots & -1 & 1 \end{pmatrix}.$$

则此时目标函数可以改写为

$$\min J_k = (\hat{\mathbf{e}} - \mathbf{H}_k \mathbf{u})^T \mathbf{Q} (\hat{\mathbf{e}} - \mathbf{H}_k \mathbf{u}) + (\mathbf{G} \mathbf{u} - \mathbf{b} u(k-1))^T \mathbf{R} (\mathbf{G} \mathbf{u} - \mathbf{b} u(k-1)). \quad (10)$$

无约束的情况下, 可求出最优的控制量序列为

$$\mathbf{u}_M = (\mathbf{H}_k^T \mathbf{Q} \mathbf{H}_k + \mathbf{G}^T \mathbf{R} \mathbf{G})^{-1} (\mathbf{H}_k^T \mathbf{Q} \hat{\mathbf{e}} + \mathbf{G}^T \mathbf{R} \mathbf{b} u(k-1)), \quad (11)$$

取第 1 个量作为控制增量, 即

$$u(k) = \mathbf{b}^T (\mathbf{H}_k^T \mathbf{Q} \mathbf{H}_k + \mathbf{G}^T \mathbf{R} \mathbf{G})^{-1} (\mathbf{H}_k^T \mathbf{Q} \hat{\mathbf{e}} + \mathbf{G}^T \mathbf{R} \mathbf{b} u(k-1)), \quad (12)$$

其中 $\mathbf{b} = [1 \ 0 \ \cdots \ 0]_{1 \times M}^T$.

注意到, τ_k 在不同时刻取值不同且无法预知, 但是通常可以预知时滞的上界 $\bar{\tau}_k^{sc}$ 和 $\bar{\tau}_k^{ca}$, 因此可以通过在控制器和执行器端设立缓存器, 将不确定时滞转化为最大时滞, 并计算相应的控制器设计参数.

2.2 丢包问题(Packet dropout problem)

通常无记忆控制器在某个时刻 k 只能计算出该时刻的控制量 $u(k)$, 当控制量在从控制器到执行器传输的过程中丢包, 执行器只能保持前一时刻的控制量 $u(k-1)$, 即

$$\bar{u}(t) = \begin{cases} u(t), & \text{数据传送成功,} \\ u(t-1), & \text{数据丢包.} \end{cases}$$

然而在动态矩阵控制算法中, 虽然通常只取控制量序列的第一个用于加载, 但当出现数据丢包时, 前一时刻控制量序列中的冗余计算量可以用于被控对象, 从而提高系统性能.

方便起见, 假设仅在控制器到执行器的传输过程中可能发生丢包, 相应控制策略如下:

1) 每一次控制器都发送整个控制量序列, 并且储存在执行器的缓存器中;

2) 如果 k 时刻计算的控制量序列 $u(k)$ 正常到达执行器, 则更新执行器缓存中的控制量序列, 并取更

新后序列中的第一个值作为控制量;

3) 如果 k 时刻计算的控制量序列 $u(k)$ 未能到达执行器, 则执行器取其缓存中相应的控制量加载到被控对象.

3 稳定性分析(Stability analysis)

引理 2 对一个差分式 $A(z^{-1}) = \sum_{i=0}^{\infty} a_i z^{-i}$, 如果满足 $\sum_{i=0}^{\infty} |a_i| < 1$, 则由此差分式表征的离散系统是稳定的^[14].

定理 1 当满足如下条件的时候, 本文所提出的控制器是稳定的:

$$\max \Phi_i < 1, \quad i \in [1, L], \quad (13)$$

其中:

$$\Phi_i = \sum_{j=1}^{N-2} \left| \sum_{k=1}^P c_k h_{k+j+1}^* \right| + |k_{ui} - \sum_{k=1}^P c_k h_{k+1}^*|,$$

$$c_i = [\alpha_j^T (\mathbf{H}^T \mathbf{Q} \mathbf{H} + \mathbf{G}^T \mathbf{R} \mathbf{G})^{-1} \mathbf{H}^T \mathbf{Q}]_{1,i},$$

$$\alpha_i = [[0 \ \cdots \ 0]_{1 \times (i-1)} \ 1 \ 0 \ \cdots \ 0],$$

$$k_{ui} = \alpha_i^T (\mathbf{H}^T \mathbf{Q} \mathbf{H} + \mathbf{G}^T \mathbf{R} \mathbf{G})^{-1} \mathbf{G}^T \mathbf{R} \mathbf{b},$$

$L-1$ 为最大连续丢包数且满足 $L \leq M$.

证 注意到式(12)为控制量序列中的第 1 个元素, 即有 $\mathbf{b} = [1 \ 0 \ \cdots \ 0]^T$, 那么类似地, 可以得到第 i 个元素应当为

$$u(k, i) = \alpha_i^T (\mathbf{H}^T \mathbf{Q} \mathbf{H} + \mathbf{G}^T \mathbf{R} \mathbf{G})^{-1} (\mathbf{H}^T \mathbf{Q} \hat{\mathbf{e}} + \mathbf{G}^T \mathbf{R} \mathbf{b} u(k-1)), \quad (14)$$

其中

$$\alpha_i = [[0 \ \cdots \ 0]_{1 \times (i-1)} \ 1 \ 0 \ \cdots \ 0].$$

在不考虑模型失配和扰动的时候, 有

$$\hat{\mathbf{e}} = \begin{bmatrix} w(k+1) - y_P(k+1) \\ \vdots \\ w(k+P) - y_P(k+P) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} w(k+1) - \sum_{i=2}^N h_i^* u(k+1-i) \\ \vdots \\ w(k+P) - \sum_{i=P+1}^N h_i^* u(k+P-i) \end{bmatrix}.$$

假定最大连续丢包数为 $L-1$, 并且有 $L \leq M$, 则对 k 时刻的实际加载到被控对象上的控制量有 L 种情况, 即

$$u(k) = u(k+1-i, i), \quad i = 1, 2, \dots, L.$$

将式(14)代入上式, 有

$$u(k) = u(k+1-i, i) =$$

$$\alpha_i^T (H^T QH + G^T RG)^{-1} (H^T Q\hat{e} + G^T Rbu(k-i)). \tag{15}$$

将式(15)展开,可以得到

$$\begin{aligned} u(k) = & \alpha_i^T (H^T QH + G^T RG)^{-1} \cdot (H^T Q\hat{e} + \\ & G^T Rbu(k-i)) = \\ & \alpha_i^T (H^T QH + G^T RG)^{-1} H^T Q\hat{e}_{k+1-i} + \\ & \alpha_i^T (H^T QH + G^T RG)^{-1} G^T Rbu(k-i) = \\ & k_{ei}\hat{e}_{k+1-i} + k_{ui}u(k-i), \end{aligned} \tag{16}$$

其中:

$$\hat{e}_{k+1-i} = \begin{bmatrix} w_{k+2-i} - \sum_{j=2}^N h_j^* u_{k+2-i-j} \\ \vdots \\ w_{k+1+P-i} - \sum_{j=P+1}^N h_j^* u_{k+1+P-i-j} \end{bmatrix},$$

$$\begin{aligned} k_{ei} &= \alpha_i^T (H^T QH + G^T RG)^{-1} H^T Q, \\ k_{ui} &= \alpha_i^T (H^T QH + G^T RG)^{-1} G^T Rb, \end{aligned}$$

$c_{i,j}$ 表示 k_{ei} 中的第 j 个元素, u_i 表示 $u(i)$, w_i 表示 $w(i)$, 式(16)等价于

$$\begin{aligned} u(k) &= k_{ei}\hat{e}_{k+1-i} + k_{ui}u(k-i) = \\ & c_{i,1}(w_{k+2-i} - \sum_{j=2}^N h_j^* u_{k+2-i-j}) + \dots + \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & c_{i,P}(w_{k+P+1-i} - \sum_{j=P+1}^N h_j^* u_{k+P+1-i-j}) = \\ & c_{i,1}w_{k+2-i} + \dots + c_{i,P}w_{k+P+1-i} - \\ & (c_{i,1}h_2^* + \dots + c_{i,P}h_{P+1}^*)u_{k-i} - \dots - \\ & (c_{i,1}h_N^* + \dots + c_{i,P}h_{P+1-N}^*)u_{k+2-N-i} = \\ & \sum_{j=1}^P c_{i,j}w_{k+1+j-i} - \sum_{j=1}^{N-2} \sum_{k=1}^P c_{i,k}h_{k+j+1}^* u_{k-i-j} + \\ & (k_{ui} - \sum_{k=1}^P c_{i,k}h_{k+1}^*)u_{k-i}, \end{aligned} \tag{17}$$

其中: $h_i^* = 0, i \notin [1, N]$.

要研究式(17)的稳定性,就要分析

$$\Phi_i = \sum_{j=1}^{N-2} \left| \sum_{k=1}^P c_{i,k}h_{k+j+1}^* \right| + \left| k_{ui} - \sum_{k=1}^P c_{i,k}h_{k+1}^* \right|, \tag{18}$$

其中 $i \in [1, L]$.

根据引理2,当满足 $\Phi_i < 1, i \in [1, L]$,即满足 $\max \Phi_i < 1, i \in [1, L]$ 时,系统渐近稳定. 证毕.

4 仿真算例(Simulation example)

本文的系统仿真基于由瑞典Lund大学开发的TrueTime软件^[15]. 仿真系统构架如图2所示,共有5个接口,分别连接传感器、控制器、执行器以及两个用于模拟时滞和丢包的干扰器. 传感器采用时间驱动,控制器、执行器以及干扰器是事件驱动的.

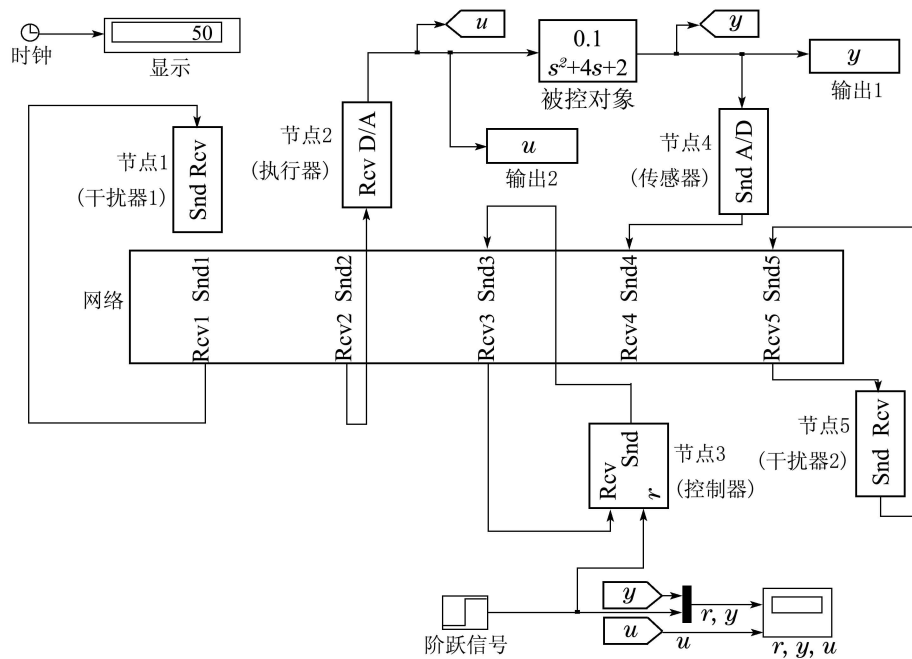


图2 基于TrueTime的NCSs仿真构架

Fig. 2 Simulation structure of NCSs based on TrueTime

本文仿真对象的状态空间方程如下:

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{x}}(t) = \begin{bmatrix} -4 & -2 \\ 1 & 0 \end{bmatrix} \mathbf{x}(t) + \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} u(t), \\ \mathbf{y}(t) = [0 \ 0.1] \mathbf{x}(t). \end{cases}$$

将系统按照 $T = 0.4\text{s}$ 离散化. 控制器参数如下:

$$N = 100, P = 40, M = 3, Q = 1, R = 0.01,$$

校正系数为1, 期望输出为定值1, L 取值分别为1, 2, 3. 图3为根据定理1绘制的最大时滞与不等式值的对应关系.

可以看出, 连续丢包数与所允许的最大时滞成反相关. 当连续丢包数分别为0, 1, 2时, 对应的最大时延分别为15.6s, 15.3s和14.7s. 即如果假设该系统的最大允许时延为15s, 则所允许的最大连续丢包数为1.

当最大连续丢包数为2, $\bar{\tau}^{sc}$ 为4s, $\bar{\tau}^{ca}$ 分别为4s, 8s和10s时, 系统最终都能够达到稳态, 但是其控制性能逐渐降低. 其输出结果见图4.

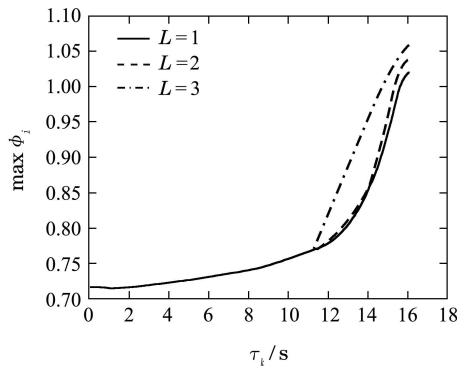


图3 不同丢包情况下最大时延与不等式值的关系
Fig. 3 The relationship between max delay and inequality value under different packet dropout rates

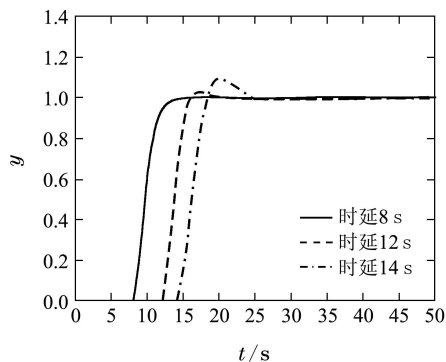


图4 不同时滞下系统的输出量
Fig. 4 Output volume of system with different delays

另外给出对比算法. 该算法保持DMC各项参数设定不变, 但丢包时执行器保持前一时刻的值. 在最大时延为10s, 最大丢包数为2时, 图5比较了本文算法和对比算法.

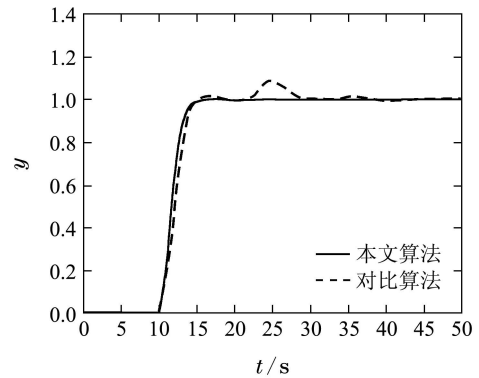


图5 不同算法下系统的输出量

Fig. 5 Output volume of system with different algorithms

图5表明了在有丢包的情况下, 本文提出的控制算法较对比算法具有更好的控制性能.

5 结论(Conclusion)

DMC算法在过程控制中应用广泛. 本文主要关注如何处理网络环境下DMC控制器的镇定问题. 首先根据时滞对阶跃响应系数的影响提出了DMC控制器的改进方法, 以及传输过程中存在丢包时的处理策略. 随后给出一个确保DMC在时滞丢包情况下稳定的充分条件. 最后通过基于TrueTime的实时仿真算例验证了理论的有效性.

笔者下一步的工作主要有两方面: 一是考虑直接处理不确定时滞, 降低设计方法的保守性; 另一方面是研究如何利用稳定性判据指导控制器设计问题.

参考文献(References):

- [1] YE H. *Research on networked control systems* [D]. College Park, Maryland: University of Maryland, 2000.
- [2] 费春国, 李昌刚, 张奇智, 等. 网络控制系统中自适应DMC算法的仿真研究 [J]. 系统仿真学报, 2008, 20(1): 65 - 67. (FEI Chunguo, LI Changgang, ZHANG Qizhi, et al. Simulation of adaptive dmc algorithm in networked control systems [J]. *Journal of System Simulation*, 2008, 20(8): 65 - 67.)
- [3] 关守平, 应婷. 基于动态矩阵方法的网络控制系统补偿策略 [J]. 东北大学学报(自然科学版), 2008, 29(11): 1532 - 1535. (GUAN Shouping, YING Ting. Compensating strategy based on dynamic matrix control for networked control system [J]. *Journal of Northeastern University(Natural Science)*, 2008, 29(11): 1532 - 1535.)
- [4] 王宝凤, 郭戈. 具有Markovian时延与丢包的离散系统的状态估计 [J]. 控制理论与应用, 2009, 26(12): 1332 - 1336. (WANG Baofeng, GUO Ge. State estimation for discrete-time systems with Markovian time-delay and packet loss [J]. *Control Theory & Applications*, 2009, 26(12): 1332 - 1336.)
- [5] 罗运辉, 刘红波, 贾磊, 等. 一种基于DMC的新型预测PID控制器及其整定 [J]. 控制理论与应用, 2010, 27(12): 1743 - 1749. (LUO Yunhui, LIU Hongbo, JIA Lei, et al. A novel DMC-based predictive PID controller and its tuning [J]. *Control Theory & Applications*, 2010, 27(12): 1743 - 1749.)
- [6] 俞立, 吴玉书, 宋洪波. 具有随机长时延的网络控制系统保性能控制 [J]. 控制理论与应用, 2010, 27(8): 985 - 990.

- (YU Li, WU Yushu, SONG Hongbo. Guaranteed cost control for networked control systems with random long time-delay [J]. *Control Theory & Applications*, 2010, 27(8): 985 – 990.)
- [7] 唐斌, 章云, 刘国平, 等. 面向网络诱导时延和数据丢失补偿的网络化广义预测控制 [J]. 控制理论与应用, 2010, 27(7): 880 – 890. (TANG Bin, ZHANG Yun, LIU Guoping, et al. Networked generalized predictive control for compensation of network-induced time delay and packet loss [J]. *Control Theory & Applications*, 2010, 27(7): 880 – 890.)
- [8] 谢成祥, 胡维礼. 一类具有数据包丢失的长时延网络控制系统的分析与设计 [J]. 控制理论与应用, 2010, 27(9): 1207 – 1213. (XIE Chengxiang, HU Weili. Analysis and design of a class of networked-control systems with long time-delay and data-packet-dropout [J]. *Control Theory & Applications*, 2010, 27(9): 1207 – 1213.)
- [9] HADJICOSTIS C N, TOURI R. Feedback control utilizing packet dropping network links [C] // *Proceedings of the 41st IEEE Conference on Decision and Control*. New York: IEEE, 2002: 1205 – 1210.
- [10] YU J Y, WANG L, ZHANG G F, et al. Output feedback stabilization of networked control systems via switched system approach [J]. *International Journal of Control*, 2009, 82(9): 1665 – 1677.
- [11] ZHANG W A, YU L. Modelling and control of networked control systems with both networked-induced delay and packet-dropout [J]. *Automatica*, 2008, 44: 3206 – 3210.
- [12] 葛阳, 王景成. 基于动态矩阵的随机时延丢包网络控制系统 [J]. 信息与控制, 2011, 40(6): 835 – 840. (GE Yang, WANG Jingcheng. Networked control system with random delay and packet loss based on dynamic matrix [J]. *Information and Control*, 2011, 40(6): 835 – 840.)
- [13] 席裕庚. 预测控制 [M]. 北京: 国防工业出版社, 1993. (XI Yugeng. *Predictive Control* [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 1993.)
- [14] JURY E I. *Theory and Application of Z-Transform Method* [M]. New York: Wiley, 1964.
- [15] OHLIN M, HENRIKSSON D, CERVIN A. *TRUETIME 1.5-Reference Manual* [M]. Lund: Lund University, 2007.

作者简介:

- 葛阳 (1986-), 男, 博士研究生, 从事网络控制系统的研究, E-mail: geyang888@163.com;
- 王景成 (1972-), 男, 教授, 博士生导师, 从事实时控制系统的研究, E-mail: jcwang@sjtu.edu.cn, 通讯作者。

(上接第748页)

- [5] BECKER K. Closed-form solution of pure proportional navigation [J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 1990, 26(3): 526 – 533.
- [6] SHULA U S, MAHAPATRA P R. Generalized linear solution of proportional navigation [J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 1988, 24(3): 231 – 238.
- [7] GUELMAN M. A qualitative study of proportional navigation [J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 1971, 7(4): 637 – 64.
- [8] GUELMAN M. Proportional navigation with a maneuvering target [J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 1972, 8(3): 364 – 371.
- [9] GUELMAN M. Missile acceleration in proportional navigation [J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 1973, 9(3): 462 – 463.
- [10] GHAWGHAWE S N, GHOSE D. Prue proportional navigation against time-varying target maneuvers [J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 1996, 32(4): 1336 – 1347.
- [11] 张靖男, 赵兴锋, 郑志强, 等. 战术导弹制导律设计 [J]. 航空兵器, 2006, (3): 3 – 6. (ZHANG Jingnan, ZHAO Xingfeng, ZHENG Zhiqiang, et al. Design of guidance law for tactical missile [J]. *Aero Weaponry*, 2006, (3): 3 – 6.)
- [12] PODLUBNY I. *Fractional Differential Equations* [M]. San Diego: Academic Press, 1999.
- [13] CHEN Y Q, VINAGRE B M, XUE D, et al. *Fractional-Order Systems and Controls: Fundamentals and Applications* [M]. London: Springer, 2010.
- [14] CAPONETTO R, DONGOLA G, FORTUNA L. *Fractional Order Systems: Modeling and Control Applications* [M]. Singapore: World Scientific, 2010.
- [15] DAS S. *Fractional Calculus for System Identification and Controls* [M]. Berlin: Springer, 2008.
- [16] HA I J, HUR J S, KO M S, et al. Performance analysis of PNG laws for randomly maneuvering targets [J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 1990, 26(5): 713 – 721.
- [17] SONG S H, HA I J. A Lyapunov-like approach to performance analysis of 3-dimensional pure PNG law [J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 1994, 30(1): 238 – 248.

作者简介:

- 朱竹婷 (1987-), 女, 硕士研究生, 目前研究方向为导弹制导律研究, E-mail: zzting@mail.ustc.edu.cn;
- 廖增 (1985-), 男, 硕士研究生, 目前研究方向为分数阶系统辨识, E-mail: theo888@mail.ustc.edu.cn;
- 彭程 (1978-), 男, 副教授, 目前研究方向为分数阶系统辨识及控制, E-mail: pengc@ustc.edu.cn;
- 王永 (1962-), 男, 教授, 博士生导师, 目前研究方向为振动主动控制、飞行器制导与控制, E-mail: yongwang@ustc.edu.cn.