第 25 卷第 3 期
2008 年 6 月

控 制 理 论 与 应 用
Control Theory & Applications

Vol. 25 No. 3
Jun. 2008

文章编号: 1000−8152(2008)03−0480−05

具有快变时延和丢包的网络控制系统镇定

张冬梅[1,2], 俞　立[2], 周明华[1]

(1. 浙江工业大学 理学院, 浙江 杭州 310032; 2. 浙江工业大学 信息学院, 浙江 杭州 310032)

摘要: 对一类网络控制系统, 研究了变时延和数据丢包对闭环系统稳定性的影响. 基于Lyapunov-Krasovskii方法, 给出了闭环系统的稳定条件, 该条件不依赖于时延变化率的上界. 通过求解一个适当的线性矩阵不等式(LMI)得到控制增益矩阵, 求解时不需要对矩阵的结构进行限制, 也不必使用重复迭代. 最后, 给出了一个数值例子以说明方法的有效性.

关键词: 网络控制系统; 时变时延; 丢包; 线性矩阵不等式

中图分类号: TP273　　　**文献标识码**: A

Stabilization of networked control systems with fast-varying delay and packet-dropout

ZHANG Dong-mei[1,2], YU Li[2], ZHOU Ming-hua[1]

(1. College of Science, Zhejiang University of Technology, Hangzhou Zhejiang 310032, China;
2. College of Information Engineering, Zhejiang University of Technology, Hangzhou Zhejiang 310032, China)

Abstract: The stability of networked control systems, subjected to time-varying delay and data-packet-dropout is considered. Based on Lyapunov-Krasovskii approach, new stability criteria, which are irrelevant to the bound of the derivative of the delay, are proposed for the closed-loop systems. The controller gain matrix is obtained by solving a linear matrix inequality (LMI). No constrain is imposed to the matrix structure, and no iterative operation is employed. A numerical example is given to illustrate the effectiveness of the proposed method.

Key words: networked control systems; time-varying delay; data packet dropout; linear matrix inequality

1　引言(Introduction)

网络控制系统(NCSs)是当今研究的热点问题之一[1,2], 很多学者对其稳定性[3]和性能[4~6]进行了分析. 时延和丢包是网络控制中的基本问题, 引起了人们的广泛关注[7~10]. 其中, 文[8]针对一类具有数据丢包和时变时延的网络系统, 基于Lyapunov-Krasovskii方法, 利用线性矩阵不等式工具, 在时延慢变(时延变化率小于某个给定常数)的前提下, 给出了保证闭环系统稳定的控制器设计方法. 由于等待时延在网络诱导时延中起主导作用, 往往是快变的(难以确定时延变化率的上界), 因而对大多数网络控制系统来说, 研究快变时延更具实际意义[10]. 快变时延通常是基于Razumikhin方法进行处理, 相比于Lyapunov-Krasovskii方法, 得到的条件往往较为保守[13]. 文[12]基于Lyapunov-Krasovskii方法, 针对一类区间快变时延系统, 利用线性矩阵不等式给出稳定性条件. 但是利用这一结果进行控制器设计时, 往往需要求解一个非线性矩阵不等式, 一般是通过限制矩阵变量的结构[11]或使用迭代算法[14]进行求解, 前者较为保守, 后者需要大量计算时间, 不利于实时控制. 本文针对闭环网络控制系统中存在快变时延和数据包丢失的情况, 基于Lyapunov-Krasovskii方法, 运用线性矩阵不等式工具, 给出了一类新的时延依赖稳定性准则. 在此基础上进行控制器设计时, 没有对矩阵变量进行结构限制或使用迭代算法, 通过适当引入不等式, 控制增益矩阵可以通过线性矩阵不等式的求解得到.

2　主要结果(Main results)

考虑如下结构的网络控制系统[8], 如图1所示: 被控对象的状态空间模型为

$$\dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t), \tag{1}$$

收稿日期: 2006−04−20; 收修改稿日期: 2007−06−26.

基金项目: 国家杰出青年科学基金资助项目(60525304); 国家自然科学基金资助项目(60604015); 工业控制技术国家重点实验室开放课题基金资助项目(0708009).

其中(A, B)是适当维数的实常数矩阵, 有关网络和系统的假设如下:

假设 1　(A, B)可镇定;

假设 2　传感器节点, 控制器节点采用时钟驱动, 执行器节点采用事件驱动, 网络中各节点时钟同步. 控制器取为

$$u(t) = K\bar{x}(t_k), t \in [t_k, t_{k+1}), k = 1, 2 \cdots, \tag{2}$$

其中K是控制增益矩阵.

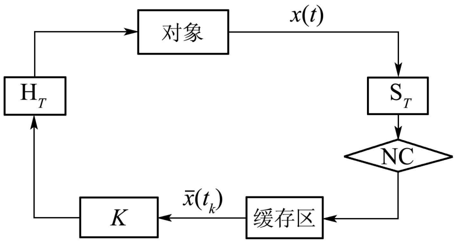

图 1　网络控制系统

Fig. 1　Networked control systems

由假设及图1所示的时序可见, 数据由传感器采样, T为采样周期, t_k是采样时刻. $\mathrm{H}_T, \mathrm{S}_T$ 分别为零阶保持器和采样器, 控制器节点具有存放每个传感器节点数据的缓存区(Buffer), 采样数据通过网络通道(NC)传输至缓冲区, 控制器节点利用缓存区内数据计算控制量, 并输出. 由于网络带宽受限, 传输过程中会产生时延$\tau_s(t)$, 又由于网络拥塞和连接中断, 不可避免地会导致数据包丢失. 因此, 缓冲区在时刻t_k 的输出可以表示成$\bar{x}(t_k) = x(t_k - d(k)T - \tau_s(t)), d(k) \in \{0, 1, \cdots, \bar{d}\}$ 为丢包数目, 从$\bar{x}(t_k)$ 更新时刻开始计算, $\bar{d} \in Z^+$ 为已知常数. 记

$$h(t) = t - t_k + d(k)T + \tau_s(t). \tag{3}$$

假定$h(t)$满足条件[12]: $0 \leqslant h_m \leqslant h(t) \leqslant h_M$. 将$\bar{x}(t_k) = x(t - h(t))$ 代入式(1), 得到闭环系统

$$\begin{aligned}&\dot{x}(t) = Ax(t) + BKx(t - h(t)),\\ &\qquad t \in [t_k, t_{k+1}),\ k = 1, 2, \cdots,\end{aligned} \tag{4}$$

在给出主要结果之前, 首先介绍下面引理.

引理 1　(积分不等式)[12]　对任意矩阵$W \in \mathbb{R}^{n\times n}$, $W = W^{\mathrm{T}} \geqslant 0, 0 < h_m \leqslant h_1(t) \leqslant h_2(t) \leqslant h_M$ 及向量值函数$w : [h_m,\ h_M] \to \mathbb{R}^n$, 以下不等式成立

$$\begin{aligned}&\left(\int_{h_1(t)}^{h_2(t)} w(s)\mathrm{d}s\right)^{\mathrm{T}} W \left(\int_{h_1(t)}^{h_2(t)} w(s)\mathrm{d}s\right) \leqslant \\ &(h_2(t) - h_1(t))\left(\int_{h_1(t)}^{h_2(t)} w^{\mathrm{T}}(s)Ww(s)\mathrm{d}s\right),\end{aligned} \tag{5}$$

针对闭环系统(4), 导出以下的时延依赖稳定性条件.

定理 1　对给定的常数$h_M > h_m \geqslant 0$和增益矩阵K, 如果存在矩阵$P > 0,\ Q \geqslant 0,\ R > 0,\ S > 0$, 使得下面的矩阵不等式

$$\varSigma_1 = \begin{bmatrix} \varSigma_{11}^{(1)} & \varSigma_{12}^{(1)} & \varSigma_{13}^{(1)} & A^{\mathrm{T}}R & A^{\mathrm{T}}S \\ * & \varSigma_{22}^{(1)} & 0 & (BK)^{\mathrm{T}}R & (BK)^{\mathrm{T}}S \\ * & * & \varSigma_{33}^{(1)} & (BK)^{\mathrm{T}}R & (BK)^{\mathrm{T}}S \\ * & * & * & -\tilde{h}_{av}R & 0 \\ * & * & * & * & -\tilde{\delta}S \end{bmatrix} < 0 \tag{6}$$

成立, 则闭环系统(4)渐近稳定, 其中:

$$\begin{aligned}&\tilde{h}_{av} = 1/h_{av},\\ &\tilde{\delta} = 1/2\delta,\\ &h_{av} = (h_m + h_M)/2,\\ &\delta = (h_M - h_m)/2,\\ &\varSigma_{11}^{(1)} = PA + A^{\mathrm{T}}P + Q - \tilde{h}_{av}R,\\ &\varSigma_{12}^{(1)} = PBK + \tilde{h}_{av}R,\\ &\varSigma_{13}^{(1)} = PBK,\\ &\varSigma_{22}^{(1)} = -Q - \tilde{h}_{av}R,\\ &\varSigma_{33}^{(1)} = -2\tilde{\delta}S.\end{aligned}$$

证　利用牛顿–莱布尼兹公式

$$x(t - h(t)) = x(t - h_{av}) + \int_{t-h_{av}}^{t-h(t)} \dot{x}(s)\mathrm{d}s,$$

将闭环系统(4)转化为

$$\dot{x}(t) = Ax(t) + BK[x(t - h_{av}) + \int_{t-h_{av}}^{t-h(t)} \dot{x}(s)\mathrm{d}s]. \tag{7}$$

选取Lyapunov-Krasovskii泛函

$$\begin{aligned}V(x(t)) = &x^{\mathrm{T}}(t)Px(t) + \int_{t-h_{av}}^{t} x^{\mathrm{T}}(s)Qx(s)\mathrm{d}s + \\ &\int_{-h_{av}}^{0}\int_{t+\theta}^{t} \dot{x}^{\mathrm{T}}(s)R\dot{x}(s)\mathrm{d}s\mathrm{d}\theta + \\ &\int_{-h_{av}-\delta}^{-h_{av}+\delta}\int_{t+\theta}^{t} \dot{x}^{\mathrm{T}}(s)S\dot{x}(s)\mathrm{d}s\mathrm{d}\theta,\end{aligned} \tag{8}$$

其中: $P > 0,\ Q \geqslant 0,\ R > 0,\ S > 0$是式(6)的解, 则

$$\begin{aligned}&\dot{V}(x(t)) = \\ &2x^{\mathrm{T}}(t)P\dot{x}(t) + x^{\mathrm{T}}(t)Qx(t) - x^{\mathrm{T}}(t - h_{av})Qx(t - \\ &h_{av}) + h_{av}\dot{x}^{\mathrm{T}}(t)R\dot{x}(t) - \int_{t-h_{av}}^{t} \dot{x}^{\mathrm{T}}(s)R\dot{x}(s)\mathrm{d}s + \\ &2\delta\dot{x}^{\mathrm{T}}(t)S\dot{x}(t) - \int_{t-h_{av}-\delta}^{t-h_{av}+\delta} \dot{x}^{\mathrm{T}}(s)S\dot{x}(s)\mathrm{d}s,\end{aligned} \tag{9}$$

利用引理1, 得到

$$\begin{aligned}&-\int_{t-h_{av}}^{t} \dot{x}^{\mathrm{T}}(s)R\dot{x}(s)\mathrm{d}s \leqslant \\ &-\frac{1}{h_{av}}[x(t) - x(t - h_{av})]^{\mathrm{T}}R[x(t) - x(t - h_{av})],\end{aligned} \tag{10}$$

$$-\int_{t-h_{av}-\delta}^{t-h_{av}+\delta}\dot{x}^{\mathrm{T}}(s)S\dot{x}(s)\mathrm{d}s\leqslant$$
$$-\frac{h_{av}-h(t)}{\delta}\int_{t-h_{av}}^{t-h(t)}\dot{x}^{\mathrm{T}}(s)S\dot{x}(s)\mathrm{d}s\leqslant$$
$$-\frac{1}{\delta}(\int_{t-h_{av}}^{t-h(t)}\dot{x}(s)\mathrm{d}s)^{\mathrm{T}}S(\int_{t-h_{av}}^{t-h(t)}\dot{x}(s)\mathrm{d}s),\quad(11)$$

将式(10)和(11)两式代入式(9), 得到

$$\dot{V}(x(t))\leqslant q^{\mathrm{T}}(t)\Xi_1 q(t),$$

其中

$$q(t)=[x^{\mathrm{T}}(t)\ \ x^{\mathrm{T}}(t-h_{av})\ \ \int_{t-h_{av}}^{t-h_{av}}\dot{x}^{\mathrm{T}}(s)\mathrm{d}s]^{\mathrm{T}},$$

$$\Xi_1=\begin{bmatrix}\Xi_{11}^{(1)} & \Xi_{12}^{(1)} & \Xi_{13}^{(1)}\\ * & \Xi_{22}^{(1)} & \Xi_{23}^{(1)}\\ * & * & \Xi_{33}^{(1)}\end{bmatrix},$$

$$\Xi_{11}^{(1)}=PA+A^{\mathrm{T}}P+Q-(1/h_{av})R+2\delta A^{\mathrm{T}}SA+h_{av}A^{\mathrm{T}}RA,$$
$$\Xi_{12}^{(1)}=PBK+(1/h_{av})R+2\delta A^{\mathrm{T}}SBK+h_{av}A^{\mathrm{T}}RBK,$$
$$\Xi_{13}^{(1)}=PBK+2\delta A^{\mathrm{T}}S(BK)+h_{av}A^{\mathrm{T}}R(BK),$$
$$\Xi_{22}^{(1)}=-Q-(1/h_{av})R+2\delta(BK)^{\mathrm{T}}S(BK)+h_{av}(BK)^{\mathrm{T}}R(BK),$$
$$\Xi_{23}^{(1)}=2\delta(BK)^{\mathrm{T}}S(BK)+h_{av}(BK)^{\mathrm{T}}R(BK),$$
$$\Xi_{33}^{(1)}=-(1/\delta)S+2\delta(BK)^{\mathrm{T}}S(BK)+h_{av}(BK)^{\mathrm{T}}R(BK),$$

令$\tilde{h}_{av}=1/h_{av}$, $\tilde{\delta}=1/2\delta$, 利用Schur补性质可知, $\Xi_1<0$ 等价于$\Sigma_1<0$, 进一步, 由不等式(6)可得闭环系统(4)渐近稳定. 证毕.

注 1 式(6)中包含4个矩阵变量P,Q,R,S, 并且均出现在Lyapunov-Krasovskii泛函中, 具有变量数目少, 物理意义清晰的特点.

特别的, 如果假定时延是定常的, 即$h(t)=h$, 则$\delta=0$, $h_{av}=h$, 相应的Lyapunov-Krasovskii泛函为

$$V(x(t))=x^{\mathrm{T}}(t)Px(t)+\int_{t-h}^{t}x^{\mathrm{T}}(s)Qx(s)\mathrm{d}s+\int_{-h}^{0}\int_{t+\theta}^{t}\dot{x}^{\mathrm{T}}(s)R\dot{x}(s)\mathrm{d}s\mathrm{d}\theta,\quad(12)$$

根据定理1, 相应的稳定性准则为

推论 1 给定常数$h>0$及增益矩阵K, 如果存在矩阵$P>0,Q>0,R>0$ 使得矩阵不等式

$$\Sigma_2=\begin{bmatrix}\Sigma_{11}^{(2)} & PBK+\tilde{h}R & A^{\mathrm{T}}R\\ * & -Q-\tilde{h}R & (BK)^{\mathrm{T}}R\\ * & * & -\tilde{h}R\end{bmatrix}<0\quad(13)$$

成立, 则闭环系统(4)渐近稳定, 其中:

$$\tilde{h}=1/h,$$
$$\Sigma_{11}^{(2)}=PA+A^{\mathrm{T}}P+Q-\tilde{h}R.$$

下面的定理2给出了使得闭环系统(4)渐近稳定的控制器(2)的设计方法.

定理 2 给定常数$h_M>h_m\geqslant 0$, 如果存在矩阵$X>0$, $U>0$, $\tilde{Q}\geqslant 0$, $W>0$ 及V, 使得下面的线性矩阵不等式

$$\Sigma_3=\begin{bmatrix}\Sigma_{11}^{(3)} & \Sigma_{12}^{(3)} & BV & XA^{\mathrm{T}} & XA^{\mathrm{T}}\\ * & \Sigma_{22}^{(3)} & 0 & V^{\mathrm{T}}B^{\mathrm{T}} & V^{\mathrm{T}}B^{\mathrm{T}}\\ * & * & \Sigma_{33}^{(3)} & V^{\mathrm{T}}B^{\mathrm{T}} & V^{\mathrm{T}}B^{\mathrm{T}}\\ * & * & * & -\tilde{h}_{av}U & 0\\ * & * & * & * & -\tilde{\delta}W\end{bmatrix}<0\quad(14)$$

成立, 则控制器(2)镇定闭环系统(4), 相应的反馈增益矩阵为

$$K=VX^{-1},\quad(15)$$

其中: $\tilde{h}_{av}$, $\tilde{\delta}$由定理1给出,

$$\Sigma_{11}^{(3)}=AX+XA^{\mathrm{T}}+\tilde{Q}-\tilde{h}_{av}(2X-U),$$
$$\Sigma_{12}^{(3)}=BV+\tilde{h}_{av}(2X-U),$$
$$\Sigma_{22}^{(3)}=-\tilde{Q}-\tilde{h}_{av}(2X-U),$$
$$\Sigma_{33}^{(3)}=-2\tilde{\delta}(2X-W).$$

证 对式(6)两端同时乘以对角矩阵diag$\{P^{-1}, P^{-1}, P^{-1}, R^{-1}, S^{-1}\}$, 并令$P^{-1}=X, R^{-1}=U, S^{-1}=W, P^{-1}QP^{-1}=\tilde{Q}$, 得到

$$\Xi_2=\begin{bmatrix}\Xi_{11}^{(2)} & \Xi_{12}^{(2)} & BV & XA^{\mathrm{T}} & XA^{\mathrm{T}}\\ * & \Xi_{22}^{(2)} & 0 & V^{\mathrm{T}}B^{\mathrm{T}} & V^{\mathrm{T}}B^{\mathrm{T}}\\ * & * & \Xi_{33}^{(2)} & V^{\mathrm{T}}B^{\mathrm{T}} & V^{\mathrm{T}}B^{\mathrm{T}}\\ * & * & * & -\tilde{h}_{av}U & 0\\ * & * & * & * & -\tilde{\delta}W\end{bmatrix}<0,\quad(16)$$

其中:

$$\Xi_{11}^{(2)}=AX+XA^{\mathrm{T}}+\tilde{Q}-\tilde{h}_{av}P^{-1}RP^{-1},$$
$$\Xi_{12}^{(2)}=BV+\tilde{h}_{av}P^{-1}RP^{-1},$$
$$\Xi_{22}^{(2)}=-\tilde{Q}-\tilde{h}_{av}P^{-1}RP^{-1},$$
$$\Xi_{33}^{(2)}=-2\tilde{\delta}P^{-1}SP^{-1},$$

注意到

$$P^{-1}SP^{-1}\geqslant 2P^{-1}-S^{-1}=2X-W,$$
$$P^{-1}RP^{-1}\geqslant 2P^{-1}-R^{-1}=2X-U\triangleq M,$$

而后者等价于

$$\begin{bmatrix}-P^{-1}RP^{-1}+M & 0\\ * & 0\end{bmatrix}\leqslant 0.\quad(17)$$

对其进行初等变换, 即分别左乘和右乘矩阵Φ, 得到

$$\begin{bmatrix} -P^{-1}RP^{-1}+M & P^{-1}RP^{-1}-M \\ * & -P^{-1}RP^{-1}+M \end{bmatrix} \leqslant 0, \quad (18)$$

其中$\Phi=\begin{bmatrix} \mathrm{I} & -I \\ -I & I \end{bmatrix}$, 注意到式(18)等价于

$$\begin{bmatrix} -P^{-1}RP^{-1} & P^{-1}RP^{-1} \\ * & -P^{-1}RP^{-1} \end{bmatrix} \leqslant \begin{bmatrix} -M & M \\ * & -M \end{bmatrix}, \quad (19)$$

显然, $\Xi_2 \leqslant \Sigma_3$, 因此若存在矩阵$X > 0$, $U > 0$, $\tilde{Q} \geqslant 0$, $W > 0$ 及V, 使得$\Sigma_3 < 0$, 则对同样的矩阵$X > 0, U > 0, \tilde{Q} > 0$, $W > 0$ 及V, 有$\Xi_2 < 0$, 注意到$\Xi_2 < 0$等价于$\Sigma_1 < 0$, 因此, 若$\Sigma_3 < 0$, 则闭环系统(4)渐近稳定.

证毕.

注 2　定理1, 2 给出的稳定性准则包含了时延的信息, 因此是时延依赖的. 但基于时延依赖稳定性条件设计控制律时, 往往得到的是非线性矩阵不等式, 一般是对变量结构进行限定[11]或使用迭代算法[14]进行求解, 前者较为保守, 后者要耗用大量计算时间, 不利于实时控制. 定理2没有对变量结构进行限定, 式(14)是线性矩阵不等式, 可以利用MATLAB中的LMI工具箱方便地进行求解.

注 3　通常利用Lyapunov-Krasovskii方法进行稳定性分析时, 要求时延变化率有上界. 由于网络控制中信息采用分时复用的方式传输, 时延变化率很难界定, 难于用传统的Lyapunov-Krasovskii方法进行求解. 定理3说明: 只要时延在给定区间$[h_m, h_M]$ 内变化, 就可以利用LMI的可行性对问题进行求解, 这里去掉了对时延变化率的约束, 更符合网络控制的具体情况.

3　数值例子(Numerical examples)

例 1　考虑闭环系统(4), 系统矩阵为

$$A=\begin{bmatrix} -1 & -1 \\ 0 & -2 \end{bmatrix}, B=\begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix},$$

初始状态取为$x(0)=[0.5 \quad 1]^{\mathrm{T}}$, 不妨假设采样周期为$T=0.1$, 每个采样周期内丢包数目为1个. 第$k$个采样周期内等待时延取为$\tau_s(t)=0.4\cdot|\sin t|-t+t_k$, 则时延函数

$$h(t)=t-t_k+T+\tau_s(t)=0.1+0.4\cdot|\sin t|,$$

此时$h_m=0.1$, $h_M=0.5$, 即$h_{av}=0.3$, $\delta=0.2$. 利用MATLAB中LMI工具箱, 应用定理2, 可以求得

$$X=\begin{bmatrix} 12.4637 & 0.0011 \\ 0.0011 & 10.9998 \end{bmatrix},$$

$$\tilde{Q}=\begin{bmatrix} 19.5381 & 2.5690 \\ 2.5690 & 21.0170 \end{bmatrix},$$

$$U=\begin{bmatrix} 18.9274 & 1.1646 \\ 1.1646 & 18.0000 \end{bmatrix},$$

$$W=\begin{bmatrix} 19.7379 & 0.1327 \\ 0.1327 & 17.4198 \end{bmatrix},$$

$$V=\begin{bmatrix} -7.8252 & 3.1470 \end{bmatrix},$$

相应的反馈增益矩阵为

$$K=\begin{bmatrix} -0.6279 & 0.2862 \end{bmatrix}.$$

图2和图3分别给出了状态分量的响应曲线. 从仿真曲线可以看出, 定理2给出的条件可以保证闭环系统渐近稳定.

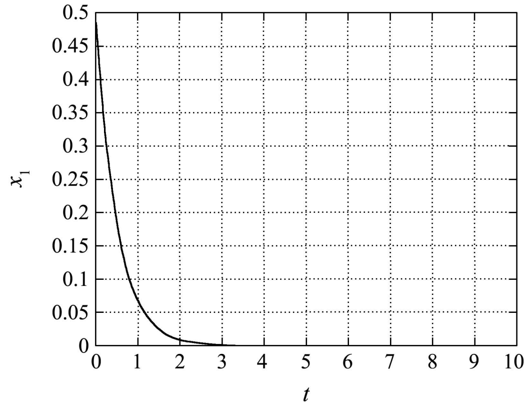

图 2　闭环系统(4)的状态分量x_1 响应曲线

Fig. 2　Response of state x_1 for closed-loop system (4)

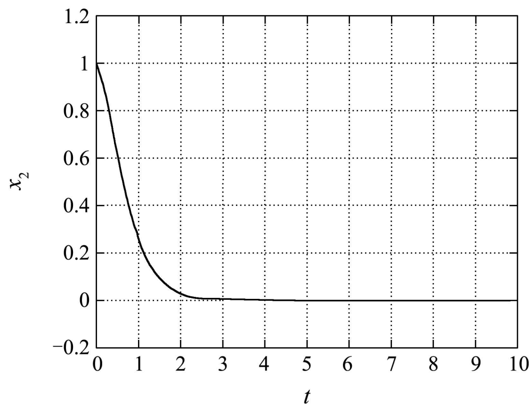

图 3　闭环系统(4)的状态分量x_2 响应曲线

Fig. 3　Response of state x_2 for closed-loop system (4)

4　结论(Conclusions)

本文利用Lyapunov-Krasovskii方法讨论了一类基于具有数据丢包及区间时变时延的网络控制系统的控制器设计问题, 允许时延在给定范围内快速变化, 通过线性矩阵不等式的求解得到了时延依赖的闭环系统稳定性准则. 准则中涉及的变量数目少; 并且每个变量均出现在Lyapunov-Krasovskii泛函中, 有明确的物理意义; 不需限定矩阵变量结构或使用迭代算法.

参考文献(References):

[1] ANTSAKLIS P, BAILLIEUL J. Special issue on networked control systems[J]. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2004, 49(9): 1421 – 1423.

[2] CHOW M Y. Special section on distributed network-based control systems and applications[J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2004, 51(6): 1126 – 1279.

[3] ZHANG W, BRANICKY M S, PHILLIPS S M. Stability of networked control systems[J]. *IEEE Control Systems Magazine*, 2001, 21: 84 – 99.

[4] LIAN F L, MOYNE J R, TILBURY D M. Performance evaluation of control networks: Ethernet, ControlNet and DeviceNet[J]. *IEEE Control Systems Magazine*, 2001, 21(1): 66 – 83.

[5] LIAN F L, MOYNE J R, TILBURY D M. Network design consideration for distributed control systems[J]. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 2002, 10(2): 297 – 307.

[6] KIM D K, KIM J W, PARK P G. Stabilization of the asymmetric network control system using a deterministic switching system approach[C] // *Proceedings of the 41st IEEE Conference on Decision and Control*. Las Vegas, Nevada USA: IEEE Press, 2002, 2: 1638 – 1642.

[7] KIM D S, LEE Y S, KWON W H, et al. Maximum allowable delay bounds of networked control systems[J]. *Control Engineering Practice*, 2003, 11: 1301 – 1313.

[8] YU M, WANG L, CHU T. Sampled-data stabilization of networked control systems with nonlinearity[J]. *IEE Proceedings: Control Theory and Applications*, 2005, 152(6): 609 – 614.

[9] QING L, LEMMON M D. Robust performance of soft real-time networked control systems with data dropouts[C] // *Proceedings of the 41st IEEE Conference on Decision and Control*. Las Vegas, Nevada USA: IEEE Press, 2002, 2: 1225 – 1230.

[10] PHILIPS S M, TILBURY D M, MOYNE J R, et al. Discussion on: "Stabilization of networked control systems with data packet dropout and transmission delays: continuous-time case"[J]. *European Journal of Control*, 2005, 11(1): 50 – 55.

[11] FRIDMAN E, SEURET A, RICHARD J P. Robust sampled-data stabilization of linear systems: an input delay approach[J]. *Automatica*, 2004, 40: 1441 – 1446.

[12] HAN Q L, JIANG X F, MA X. Computation of delay bound for linear neutral systems with interval time-varying discrete delay[J]. *Dynnamics of Continuous, Discrete and Impulsive Systems*, 2006, 13: 117 – 131.

[13] GU K, KHARITONOV V L, CHEN J. *Stability of Time-Delay Systems*[M]. Boston: Birkhauser, 2003.

[14] MOON Y S, PARK P, KWON W H, et al. Delay-dependent robust stabilization of uncertain state-delays systems[J]. *International Journal of Control*, 2001, 74(14): 1447 – 1455.

作者简介:

张冬梅 (1973—), 女, 浙江工业大学信息学院自动化系博士研究生, 目前主要研究领域为网络控制系统、鲁棒控制, E-mail: meidzh@zjut.edu.cn;

俞 立 (1961—), 男, 浙江工业大学信息学院自动化系教授, 博士生导师, 研究方向为网络控制、先进控制策略、计算机控制系统的设计与集成, E-mail: lyu@zjut.edu.cn;

周明华 (1959—), 男, 浙江工业大学理学院副教授, 博士, 研究方向为现代优化算法及其应用, E-mail: mhzhou@zjut.edu.cn.