第 24 卷第 2 期
2007 年 04 月

控 制 理 论 与 应 用
Control Theory & Applications

Vol. 24 No. 2
Apr. 2007

文章编号：1000−8152(2007)02−0274−05

不确定时延输出反馈网络化系统保性能控制

邱占芝[1,2], 张庆灵[1], 刘　明[1,3]

(1. 东北大学 系统科学研究所, 辽宁 沈阳 110004; 2. 大连交通大学 软件学院, 辽宁 大连 116028;

3. 香港城市大学 数学系, 中国 香港)

摘要: 研究了一类具有不确定时延的动态输出反馈网络控制系统的保性能控制问题. 针对小于等于一个采样周期的不确定时延, 利用Lyapunov理论和线性矩阵不等式方法, 推导出了动态输出反馈网络控制系统保性能控制律存在的条件, 给出了动态输出反馈保性能控制律设计方法. 利用LMI工具箱中的目标函数最小化工具, 可以求得该类系统优化的保性能控制律参数和优化的性能指标, 从而获得该系统的保性能控制律. 给出的仿真算例说明了设计方法是有效的所得结果是可行的.

关键词: 网络控制系统; 保性能控制; 线性矩阵不等式; 动态输出反馈; 不确定时延

中图分类号: TP13　　　**文献标识码**: A

Guaranteed performance control for output feedback networked control systems with uncertain time-delay

QIU Zhan-zhi[1,2], ZHANG Qing-ling[1], LIU Ming[1,3]

(1. Institute of Systems Science, Northeastern University, Shenyang Liaoning 110004, China;

2. Software Technology Institute, Dalian Jiaotong University, Dalian Liaoning 116028, China;

3. The Department of Mathematics, City University of Hong Kong, Hong Kong, China)

Abstract: The problem of guaranteed performance control for a class of dynamic output feedback networked control systems(NCS) with uncertain time-delay is studied in this paper. For the case of uncertain time-delay less than or equal to a sampling period, by using the Lyapunov theory and linear matrix inequality approach, the condition of the existence of guaranteed performance law for dynamic output feedback networked control systems is derived, the design method of dynamic output feedback guaranteed performance control law and the optimal performance index of the NCS are also presented. The parameters of optimal guaranteed performance control law can be solved by the function“mincx”of the MATLAB LMI toolbox, the guaranteed performance control law and the optimal performance index for the system can thus be obtained. Finally, a simulation example is given to validate the design method and to demonstrate the feasibility of the results.

Key words: networked control systems; guaranteed performance control; linear matrix inequality; dynamic output feedback; uncertain time-delay

1　引言(Introduction)

近年来, 工业以太网广泛应用于网络控制系统(networked control systems, NCS)中.采用工业以太网的NCS具有开放性、高速率和强大的软硬件技术支持等优势, 但同时也存在数据传输不确定的问题. 不确定的网络诱导时延对系统的稳定性和控制性能有着很大的影响, 使得NCS丧失定常性、完整性、因果性和确定性[1]. 国内外已有专家研究了NCS的建模、稳定性与保性能控制等问题[2~8], 但有关不确定时延的动态输出反馈NCS的保性能控制问题还未见报道. 实际的NCS不但要求稳定运行, 而且还要求满足一定的性能指标; 同时, 由于环境或经济条件的制约, 往往只能检测到被控对象的部分信息, 难于实现全状态反馈. 对于具有不确定时延的NCS, 采用动态输出反馈可以克服静态输出反馈的不足. 因此, 本文针对一类具有不确定时延的动态输出反馈NCS, 利用Lyapunov理论和线性矩阵不等式方法研究NCS的保性能控制问题, 给出NCS保性能控制律存在的条件和保性能控制律设计方法.

2　NCS问题描述和模型(Problem description and model of NCS)

用u和y分别表示被控对象的控制输入和输出, 第k个采样周期传感器到控制器间网络诱导时延记为τ_{sc}^k, 控制器到执行器间网络诱导时延记为τ_{ca}^k. 系

收稿日期: 2005−05−24; 收修改稿日期: 2006−04−26.
基金项目: 国家自然科学基金资助项目(60574011); 辽宁省自然科学基金资助项目(20052146).

统中各节点设备的数据处理时延与网络诱导时延相比很小可忽略不计. 为分析方便, 假设: 1) 传感器时钟驱动, 以周期T采样输出. 2) 控制器和执行器接收到数据信息或控制信息立即进行相应的操作. 3) 数据单包传输, 无时序错乱和包丢失. 4) 整个闭环回路的网络诱导时延记为τ_k, $\tau_k=\tau_{\mathrm{sc}}^k+\tau_{\mathrm{ca}}^k$, τ_k不确定, 满足$\tau_k\leqslant T$. 5) 不考虑过程干扰和测量噪声.

基于上述假设, 被控对象可以表示为

$$\begin{cases}\dot{x}(t)=Ax(t)+Bu(t-\tau_k),\\ y(t)=Cx(t).\end{cases}\tag{1}$$

其中: $x(t)\in\mathbb{R}^n$ 为被控对象的状态, $u(t)\in\mathbb{R}^r$ 和 $y(t)\in\mathbb{R}^m$是具有相应维数的常矩阵.

考虑$\tau_k\in[0,T]$, 控制输入$u(t)$ 在一个周期内分段连续, 可以描述为

$$u(t)=\begin{cases}u(k-1), & t_k<t\leqslant t_k+\tau_k,\\ u(k), & t_k+\tau_k<t\leqslant t+T.\end{cases}\tag{2}$$

根据文献[7], 被控对象可以变换为下面的形式:

$$\begin{cases}x(k+1)=A_dx(k)+B_0+DF(\tau_k)E)u(k)+\\ \qquad (B_1-DF(\tau_k)E)u(k-1),\\ y(k)=Cx(k).\end{cases}\tag{3}$$

其中: $A_d=\mathrm{e}^{AT}$, $F(\tau_k)$ 满足$F^{\mathrm{T}}(\tau_k)\times F(\tau_k)\leqslant I$, B_0, B_1, D和E是常矩阵. 当A含n 个不为零的互异特征根$\lambda_1,\cdots,\lambda_n$ 时, 相应的特征向量矩阵为$\varLambda=[\varLambda_1,\cdots,\varLambda_n]$, 则$E=\varLambda^{-1}B$,

$$B_0=\varLambda\mathrm{diag}(-\frac{1}{\lambda_1},\cdots,-\frac{1}{\lambda_n})\varLambda^{-1}B,$$

$$B_1=\varLambda\mathrm{diag}(\frac{1}{\lambda_1}\mathrm{e}^{\lambda_1T},\cdots,\frac{1}{\lambda_n}\mathrm{e}^{\lambda_nT})\varLambda^{-1}B,$$

$$D=\varLambda\mathrm{diag}(\frac{1}{\lambda_1}\mathrm{e}^{\lambda_1\alpha_1},\cdots,\frac{1}{\lambda_n}\mathrm{e}^{\lambda_n\alpha_n}),$$

$$F(\tau_k)=\mathrm{diag}(\mathrm{e}^{\lambda_1(T-\tau_k-\alpha_1)},\cdots,\mathrm{e}^{\lambda_n(T-\tau_k-\alpha_n)}).$$

其中: $\alpha_1,\cdots,\alpha_n$ 的选取要保证$\mathrm{e}^{\lambda_i(T-\tau_k-\alpha_i)}<1$, $i=1,\cdots,n$; 当A 含有零特征根和r重特征根时, B_0,B_1和D 的取值参见文献[7].

离散动态输出反馈控制器采用如下形式:

$$\begin{cases}x_{\mathrm{c}}(k+1)=A_{\mathrm{c}}x_{\mathrm{c}}(k)+B_{\mathrm{c}}y(k),\\ u(k)=C_{\mathrm{c}}x_{\mathrm{c}}(k).\end{cases}\tag{4}$$

其中: $x_{\mathrm{c}}(k)\in\mathbb{R}^p$为控制器状态; A_{c}, B_{c}和C_{c}是具有相应维数的常矩阵.

对象(3)经网络在控制律(4)作用下模型为

$$z(k+1)=\varPhi_1z(k)+\varPhi_2z(k-1).\tag{5}$$

其中:

$$z(k)=[x^{\mathrm{T}}(k),x_{\mathrm{c}}^{\mathrm{T}}(k)]^{\mathrm{T}},$$

$$\varPhi_1=\begin{bmatrix}A_d & (B_0+DF(\tau_k)E)C_{\mathrm{c}}\\ B_{\mathrm{c}}C & A_{\mathrm{c}}\end{bmatrix},$$

$$\varPhi_2=\begin{bmatrix}0 & (B_1-DF(\tau_k)E)C_{\mathrm{c}}\\ 0 & 0\end{bmatrix}.$$

对于被控系统(3), 性能指标定义为

$$J=\sum_{k=0}^{\infty}[x^{\mathrm{T}}(k)Qx(k)+u^{\mathrm{T}}(k)Ru(k)].\tag{6}$$

其中Q和R是给定的对称正定加权矩阵.

定义 1　对于所有满足$F^{\mathrm{T}}(\tau_k)F(\tau_k)\leqslant I$ 约束的不确定网络时延$\tau_k\leqslant T$, 如果动态输出反馈网络控制系统(5)二次稳定, 且满足$J\leqslant J^*$, 其中J^* 为确定的常数, 则称相应的控制律(4)是该系统的保性能控制律, 并称J^* 为性能指标上界.

3 保性能稳定性(Guaranteed performance stability)

定理 1　对于不确定网络时延$\tau_k\leqslant T$满足$F^{\mathrm{T}}(\tau_k)F(\tau_k)\leqslant I$约束的动态输出反馈网络控制系统(5),如果存在对称正定矩阵$P\in\mathbb{R}^{n\times n}$, S, $Z\in\mathbb{R}^{p\times p}$, 满足条件

$$\begin{bmatrix}D_1 & D_3 & A_d^{\mathrm{T}}PM_4\\ D_3^{\mathrm{T}} & D_2 & M_2^{\mathrm{T}}PM_4\\ M_4^{\mathrm{T}}PA_d & M_4^{\mathrm{T}}PM_2 & M_4^{\mathrm{T}}PM_4-Z\end{bmatrix},\tag{7}$$

其中:$D_1=A_d^{\mathrm{T}}PS_d+(B_{\mathrm{c}}C)^{\mathrm{T}}SB_{\mathrm{c}}C-P$,

$D_2=M_2^{\mathrm{T}}PM_2+A_{\mathrm{c}}^{\mathrm{T}}SA_{\mathrm{c}}+Z-S$,

$D_3=A_d^{\mathrm{T}}PM_2+(B_{\mathrm{c}}C)^{\mathrm{T}}SA_{\mathrm{c}}$, $F=F(\tau_k)$,

$M_2=(B_0+DFE)D_{\mathrm{c}}$, $M_4=(B_1-DFE)C_{\mathrm{c}}$,

则系统(5)二次稳定.

证　选择对称正定矩阵$P\in\mathbb{R}^{n\times n}$, S , $Z\in\mathbb{R}^{p\times p}$, 令Lyapunov泛函$V(k)$ 为

$$V(k)=x^{\mathrm{T}}(k)Px(k)+x_{\mathrm{c}}^{\mathrm{T}}(k)Sx_{\mathrm{c}}(k)+\\ x_{\mathrm{c}}^{\mathrm{T}}(k-1)Zx_{\mathrm{c}}(k-1)>0.\tag{8}$$

根据Lyapunov理论, 当$V(k)$ 沿系统(5)任意轨线的差分$\Delta V(k)<0$, 即可得到式(7).　　证毕.

定理 2　对于系统(5), 如存在对称正定矩阵$P\in\mathbb{R}^{n\times n}$, S, $Z\in\mathbb{R}^{p\times p}$, 满足条件

$$\begin{bmatrix}D_1+Q & D_3 & A_d^{\mathrm{T}}PM_4\\ D_3^{\mathrm{T}} & D_2+C_{\mathrm{c}}^{\mathrm{T}}RC_{\mathrm{c}} & M_2^{\mathrm{T}}PM_4\\ M_4^{\mathrm{T}}PA_d & M_4^{\mathrm{T}}PM_2 & M_4^{\mathrm{T}}PM_4-Z\end{bmatrix}<0.\tag{9}$$

则该系统二次稳定且性能指标为

$$\bar{J}\leqslant x^{\mathrm{T}}(0)Px(0)+x_{\mathrm{c}}^{\mathrm{T}}(0)Sx_{\mathrm{c}}(0)+\\ x_{\mathrm{c}}^{\mathrm{T}}(-1)Zx_{\mathrm{c}}(-1).\tag{10}$$

对应的控制律(4)为该系统的保性能控制律.

证　根据性能指标(6)的定义, 闭环NCS(5)性能指标为

$$\bar{J}=\sum_{k=0}^{\infty} z^{\mathrm{T}}(k) \overline{Q} z(k). \tag{11}$$

其中$\bar{Q}=\begin{bmatrix} Q & 0 \\ 0 & C_{\mathrm{c}}^{\mathrm{T}} R C_{\mathrm{c}} \end{bmatrix}$.

从式(9)可推导出

$$\begin{bmatrix} D_1 & D_3 & A_d^{\mathrm{T}} P M_4 \\ D_3^{\mathrm{T}} & D_2 & M_2^{\mathrm{T}} P M_4 \\ M_4^{\mathrm{T}} P A_d & M_4^{\mathrm{T}} P M_2 & M_4^{\mathrm{T}} P M_4-Z \end{bmatrix}<$$

$$\begin{bmatrix} -Q & 0 & 0 \\ 0 & -C_{\mathrm{c}}^{\mathrm{T}} R C_{\mathrm{c}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}.$$

选择Lyapunov泛函$V(k)$ 为式(8), 由定理1可知, 系统(5)二次稳定, 有

$$\Delta V(k)<-z(k)^{\mathrm{T}}\begin{bmatrix} Q & 0 \\ 0 & C_{\mathrm{c}}^{\mathrm{T}} R C_{\mathrm{c}} \end{bmatrix} z(k) \leqslant -\lambda_{\min}(\overline{Q})\| z(k) \|^{2}, \tag{12}$$

其中$\lambda_{\min}(\cdot)$ 表示矩阵的最小特征值.

从不等式(12)有

$$z^{\mathrm{T}}(k) \overline{Q} z(k)<-\Delta V(k).$$

上式两边对k 从0→ ∞ 求和, 并利用系统的稳定性, 可以得到

$$\sum_{k=0}^{\infty} z^{\mathrm{T}}(k) \overline{Q} z(k) \leqslant x^{\mathrm{T}}(0) P x(0)+x_{\mathrm{c}}^{\mathrm{T}} S x_{\mathrm{c}}(0)+ x_{\mathrm{c}}^{\mathrm{T}}(-1) Z x_{\mathrm{c}}(-1).$$

根据性能指标(6)的定义可得到式(10), 因而, 对应的控制律是一个保性能控制律. 证毕.

4 保性能控制律设计(Design of guaranteed performance law)

定理 3 具有不确定网络时延$\tau_k \leqslant T$ 且满足$F^{\mathrm{T}}(\tau_k) F(\tau_k) \leqslant I$ 约束的网络控制系统(5), 如果存在标量$\varepsilon, \varepsilon_1>0$, 对称正定矩阵$\bar{P} \in \mathbb{R}^{n \times n}$, $\bar{Z}$, $\bar{S} \in \mathbb{R}^{p \times p}$, 矩阵$N \in \mathbb{R}^{p \times p}$, $W \in \mathbb{R}^{r \times p}$, $Y \in \mathbb{R}^{r \times n}$, 使得下面矩阵不等式成立:

$$\begin{bmatrix} -\bar{P} & 0 & 0 & \bar{P} A_d^{\mathrm{T}} & 0 & 0 & 0 & \bar{P} C^{\mathrm{T}} & 0 & \bar{P} \\ 0 & \bar{Z}-\bar{S} & 0 & W^{\mathrm{T}} B_0^{\mathrm{T}} & W^{\mathrm{T}} E^{\mathrm{T}} & N^{\mathrm{T}} & W^{\mathrm{T}} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -\bar{Z} & W^{\mathrm{T}} B_1^{\mathrm{T}} & -W^{\mathrm{T}} E^{\mathrm{T}} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ A_d \bar{P} & B_0 W & B_1 W & \varepsilon D D^{\mathrm{T}}-\bar{P} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & E W & -E W & 0 & -\varepsilon I & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & N & 0 & 0 & 0 & -\bar{S} & 0 & 0 & Y^{\mathrm{T}} & 0 \\ 0 & W & 0 & 0 & 0 & 0 & -R^{-1} & 0 & 0 & 0 \\ C \bar{P} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -\varepsilon_1 I & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & Y & 0 & 0 & -\varepsilon_1 I & 0 \\ \bar{P} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -Q^{-1} \end{bmatrix}<0. \tag{13}$$

则该系统的保性能控制律为

$$\begin{cases} x_{\mathrm{c}}(k+1)=N \bar{S}^{-1} x_{\mathrm{c}}(k)+\frac{1}{\varepsilon_1} Y^{\mathrm{T}} y(k), \\ u(k)=W \bar{S}^{-1} x_{\mathrm{c}}(k). \end{cases} \tag{14}$$

该系统的性能指标为

$$\bar{J} \leqslant \lambda_{\max}(U^{\mathrm{T}} \bar{P}^{-1} U)+\lambda_{\max}(U_1^{\mathrm{T}} \bar{S}^{-1} U_1)+ \lambda_{\max}(U_1^{\mathrm{T}} \bar{S}^{-1} \bar{Z} \bar{S}^{-1} U_1). \tag{15}$$

证 如果存在保性能控制律, 使得系统(5)二次稳定, 则式(9)成立, 式(9)可变换写为

$$\begin{bmatrix} -P+Q & 0 & 0 & A_d^{\mathrm{T}} & 0 & 0 & 0 & C^{\mathrm{T}} & 0 \\ 0 & Z-S & 0 & (B_0 C_{\mathrm{c}})^{\mathrm{T}} & (E C_{\mathrm{c}})^{\mathrm{T}} & A_{\mathrm{c}}^{\mathrm{T}} & C_{\mathrm{c}}^{\mathrm{T}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -Z & (B_1 C_{\mathrm{c}})^{\mathrm{T}} & -(E C_{\mathrm{c}})^{\mathrm{T}} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ A_d & B_0 C_{\mathrm{c}} & B_1 C_{\mathrm{c}} & \varepsilon D D^{\mathrm{T}}-P^{-1} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & E C_{\mathrm{c}} & -E C_{\mathrm{c}} & 0 & -\varepsilon I & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & A_{\mathrm{c}} & 0 & 0 & 0 & -S^{-1} & 0 & 0 & \varepsilon_1 B_{\mathrm{c}} \\ 0 & C_{\mathrm{c}} & 0 & 0 & 0 & 0 & -R^{-1} & 0 & 0 \\ C & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -\varepsilon_1 I & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \varepsilon_1 B_{\mathrm{c}}^{\mathrm{T}} & 0 & 0 & -\varepsilon_1 I \end{bmatrix}<0. \tag{16}$$

左乘、右乘$\mathrm{diag}(P^{-1}, S^{-1}, S^{-1}, I, I, I, I, I, I)$, 并令$\bar{P}=P^{-1}$, $\bar{S}=S^{-1}$, $\bar{Z}=S^{-1} Z S^{-1}$, $A_{\mathrm{c}} \bar{S}= N$, $C_{\mathrm{c}} \bar{S}=W$, $\varepsilon_1 B_{\mathrm{c}}^{\mathrm{T}}=Y$, 则式(16)成为式(13).

由式(13)的可行解求得A_{c}, C_{c} 和B_{c}, 即可得到式(14).

由式(10)看出, 性能指标上界依赖于系统初始

状态, 为避免此依赖, 假定系统初始状态未知, 但属于集合[9,10]

$$G=\begin{cases}x(0)\in\mathbb{R}^n: x(0)=Uv, v^{\mathrm{T}}v\leqslant 1,\\ x_{\mathrm{c}}(-j)\in\mathbb{R}^n: x_{\mathrm{c}}(-j)=U_1v_j,\\ v_j^{\mathrm{T}}v_j\leqslant 1, j=0,1.\end{cases}\tag{17}$$

其中U 和U_1 是给定的常矩阵.

基于上述假定, 式(10)成为

$$\begin{aligned}\bar J\leqslant{}& v^{\mathrm{T}}U^{\mathrm{T}}Pv+v_0^{\mathrm{T}}U_1^{\mathrm{T}}SU_1v_0+v_1^{\mathrm{T}}U_1^{\mathrm{T}}ZU_1v_1\leqslant\\ &\lambda_{\max}(U^{\mathrm{T}}PU)+\lambda_{\max}(U_1^{\mathrm{T}}SU_1)+\\ &\lambda_{\max}(U_1^{\mathrm{T}}ZU_1).\end{aligned}\tag{18}$$

由$\bar P$, $\bar S$和$\bar Z$定义, 式(18)变为式(15). 证毕.

定理 3 给出了一组控制律. 对于不同的控制律, 系统(5)将有不同的性能指标上界.

定理 4 具有不确定网络时延$\tau_k\leqslant T$ 且满足$F^{\mathrm{T}}(\tau_k)F(\tau_k)\leqslant I$ 约束的网络控制系统(5), 对于给定的常矩阵U 和U_1 及标量$\alpha,\beta,\omega>0$, 如果以下优化问题

$$\min_{\bar P,\bar S,\bar Z,N,W,Y,\varepsilon_1,\varepsilon_2}\ \alpha+\beta+\omega,\tag{19}$$

$$\text{s.t. (13)},$$

$$\begin{bmatrix}-\alpha I & U^{\mathrm{T}}\\ U & -\bar P\end{bmatrix}<0,\ \begin{bmatrix}-\beta I & U_1^{\mathrm{T}}\\ U_1 & -\bar S\end{bmatrix}<0,$$

$$\begin{bmatrix}-\omega I & U_1^{\mathrm{T}}\bar S^{-1}\\ \bar S^{-1}U_1 & -\bar Z^{-1}\end{bmatrix}<0$$

有解$\widehat{\bar P}$, $\widehat{\bar S}$, $\widehat{\bar Z}$, $\widehat N$, $\widehat W$, $\widehat Y$, $\widehat\varepsilon$ 和$\widehat\varepsilon_1$, 则该系统的动态输出反馈次优保性能控制律为

$$\begin{cases}x_{\mathrm{c}}(k+1)=\widehat N\widehat{\bar S}^{-1}x_{\mathrm{c}}(k)+\dfrac{1}{\widehat\varepsilon_1}\widehat Y^{\mathrm{T}}y(k),\\ \widehat u(k)=\widehat W\widehat{\bar S}^{-1}x_{\mathrm{c}}(k).\end{cases}\tag{20}$$

该系统的次优性能指标为

$$\widehat J\leqslant\alpha+\beta+\omega.\tag{21}$$

5 算例仿真(Example and simulation)

考虑如下的被控对象

$$\begin{cases}\dot x(t)=\begin{bmatrix}0 & 1\\ -2 & -3\end{bmatrix}x(t)+\begin{bmatrix}0\\1\end{bmatrix}u(t-\tau_k),\\ y(t)=[1\ \ 0]x(t).\end{cases}$$

假设采样周期为1 s, 网络时延不确定满足$\tau_k\leqslant T$, 因A的特征值为-1和-2, 特征向量选

$$\Lambda=\begin{bmatrix}1 & 1\\ -1 & -2\end{bmatrix}.$$

为保证$\mathrm{e}^{\lambda_i(T-\tau_k-\alpha_i)}<1, i=1,\cdots,n$，选$\alpha_1=0$, $\alpha_2=0$, 则可计算出

$$A_d=\begin{bmatrix}0.6004 & 0.2325\\ -0.4651 & -0.0972\end{bmatrix},\ D=\begin{bmatrix}-1 & -0.5\\ 1 & 1\end{bmatrix},$$

$$B_0=\begin{bmatrix}-1\\3\end{bmatrix},\ B_1=\begin{bmatrix}-0.3002\\0.2325\end{bmatrix},\ E=\begin{bmatrix}1\\-1\end{bmatrix}.$$

应用定理4, 性能指标加权矩阵选取$Q=\mathrm{diag}(1,1)$, $R=1.5$, 假定$U=U_1=\mathrm{diag}(1.5,1.5)$, 用LMI工具箱中的工具mincx, 得到次优解分别为

$$\widehat{\bar P}=\begin{bmatrix}0.4462 & -0.122\\ -0.122 & 0.8698\end{bmatrix},$$

$$\widehat N=10^5\times\begin{bmatrix}-7.2966 & 0\\ 0 & -6.6389\end{bmatrix},$$

$$\widehat{\bar Z}=10^{-6}\times\begin{bmatrix}0.1123 & 0\\ 0 & 0.112\end{bmatrix},$$

$$\widehat{\bar S}=10^5\times\begin{bmatrix}7.2966 & 0\\ 0 & 6.6389\end{bmatrix},$$

$$\beta=3.4\times10^{-6}, \widehat\varepsilon_1=2.4144,$$

$$Y=[-2.4144\ \ 0], \alpha=5.4399,$$

$$\widehat W=10^6\times[-0.2405\ \ 0],\ \omega=1.6875.$$

因此, 动态输出反馈次优保性能控制律为

$$\begin{cases}x_{\mathrm{c}}(k+1)=\begin{bmatrix}-1 & 0\\ 0 & -1\end{bmatrix}x_{\mathrm{c}}(k)+\begin{bmatrix}-1\\0\end{bmatrix}y(k),\\ \widehat u(k)=[-0.3296\ \ 0]x_{\mathrm{c}}(k).\end{cases}$$

该系统次优性能指标为$\widehat J\leqslant 7.1274$.

此时该系统输出的单位阶跃响应和初始状态为(4,–1) 的状态响应的仿真分别如图1和图2所示.

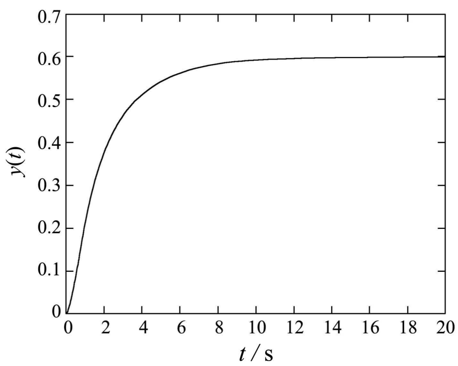

图 1 闭环系统输出的单位阶跃响应

Fig. 1 Step response of the closed-system output

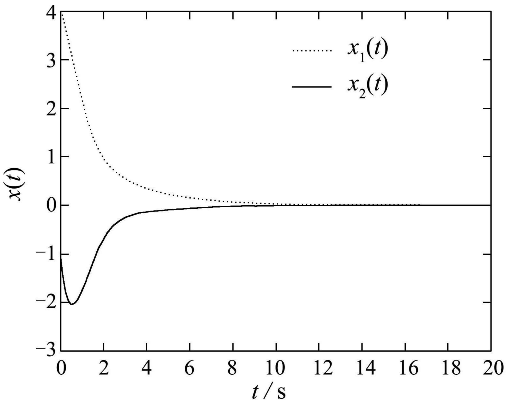

图 2 闭环系统状态响应

Fig. 2 Response of the closed-system states

6 结论(Conclusion)

当传感器时钟驱动、控制器和执行器事件驱动、不确定时延小于等于一个采样周期、不考虑过程干扰和测量噪声以及数据包丢失时, 本文给出了动态输出反馈网络控制系统保性能控制律存在的条件和保性能控制律设计方法. 借助LMI工具箱的mincx, 通过求解优化问题, 可以获得该类系统优化的性能指标上界, 并构造出性能指标上界尽可能小的次优保性能控制律.

参考文献(References):

[1] 王飞跃, 王成红. 基于网络控制的若干基本问题的思考和分析[J]. 自动化学报, 2002, 28(增刊): 171 – 176.
(WANG Feiyue, WANG Chenghong. On some basic issues in network-based direct control systems[J]. *Acta Automatica Sinica*, 2002, 28(Suppl): 171 – 176.)

[2] ISHII H, FRANCIS B A. *Limited Data Rate in Control Systems with Networks*[M]. Berlin: Springer-Verlag , 2002.

[3] ZhANG W, BRANICKY M S, PHILLIPS S M. Stability of networked control systems[J]. *IEEE Control Systems Magazine*, 2001, 21(1): 84 – 99.

[4] XIE Lei, ZhANG Jingming, WANG Shuqing. Stability analysis of networked control system[C]// *Proc of the First Int on Machine and Cybernetics*. Beijing: IEEE Press, 2002: 753 – 759.

[5] 朱其新, 胡寿松. 网络控制系统的可镇定性和可检测性[J]. 系统工程学报, 2005, 20(1): 1 – 5.
(ZHU Qixin, HU Shousong. Stabilizability and detectability of networked control systems[J]. *J of Systems Engineering*, 2005, 20(1): 1 – 5.)

[6] 李春文, 姜培刚, 龙图景, 等. 时延不确定离散时间系统的鲁棒跟踪控制[J]. 控制与决策, 2004, 19(6): 680 – 686.
(LI Chunwen, JIANG Peigang, LONG Tujing,et al. Robust state tracking control for uncertain discrete systems with tiem-varying delay[J]. *Control and Decision*, 2004, 19(6): 680 – 686.)

[7] 樊卫华, 蔡骅, 胡维礼, 等. 时延网络控制系统的稳定性[J]. 控制理论与应用, 2004, 21(6) : 880 – 884.
(FAN Weihua, CAI Hua, HU Weili, et al. Stability of networked control systems with time-delsy[J]. *Control Theory and Applocations*, 2004, 21(6): 880 – 884.)

[8] XIE Linbe, FANG Huajing, ZHENG Ying. AGuaranteed cost control for networked control systems[J]. *J of Control Theory and Applications*, 2004, (2): 143 – 148.

[9] 俞立. 鲁棒控制—–线性矩阵不等式处理方法[M]. 北京: 清华大学出版社, 2002.
(YU L. *Robust Control-Linear Matrix Inequalities Method*[M]. Beiing: Tsinghua University Press, 2002.

[10] GUAN Xinping, CEN Cailian, DUAN Guangren, et al. Robust guaranteed cost control for uncertain discrete delay systems via dynamic output feedback [J]. *J of Control Theory and Applications*, 2003, 20(2): 199 – 204.

作者简介:

邱占芝 (1960—), 女, 博士, 大连交通大学教授, 主要研究方向为基于网络的控制系统、广义系统和计算机应用技术等, E-mail: zhanzhiqiuok@163.com;

张庆灵 (1956—), 男, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为广义系统和复杂大系统的网络控制、模糊控制、鲁棒控制和混沌控制等, E-mail:qlzhang@mail.neu.edu.cn;

刘 明 (1981—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为基于网络的控制系统.