基于网络服务质量的网络控制器设计

邵奇可[1]　俞 立[1]　张贵军[1]

摘 要　针对网络服务质量对控制系统性能的影响, 建立了联合网络参数和控制器参数的系统模型. 在此基础上分析了网络控制系统保性能控制器存在的网络参数和控制参数依赖条件, 并且通过求解线性矩阵不等式, 给出了控制器的参数化设计方法. 所设计的控制器在满足一定的网络服务质量摄动范围内, 不仅可以使系统渐近稳定, 而且还能确保系统性能不大于上界. 本文方法给出网络服务质量变化对控制系统性能衰减的一种定量度量, 可以为进一步的网络调度提供理论依据.

关键词　网络控制系统, 网络服务质量, 保性能控制, 线性矩阵不等式
DOI　10.3724/SP.J.1004.2010.01209

Networked Controller Design Based on QoS

SHAO Qi-Ke[1]　YU Li[1]　ZHANG Gui-Jun[1]

Abstract　Considering the influence of networked quality-of-service (QoS) on the control performance, a system model combining the network parameters and the control parameters is established for networked control systems (NCSs). Based on this, the condition dependent on the network parameters and control parameters is presented for the existence of guaranteed cost controllers. Furthermore, the parametric design method of the controllers is given by solving the linear matrix inequality (LMI). Within the scope of QoS perturbation, the designed controller can not only make the system asymptotically stable but also guarantee that the system performance index is not greater than the upper bound. The proposed method gives the quantitative relation between the QoS change and the attenuation of control performance, which provides the theoretical accordance for the scheduling of NCS.

Key words　Networked control systems (NCSs), quality of service (QoS), guaranteed cost control, linear matrix inequality (LMI)

目前, 针对基于网络服务质量 (Quality of service, QoS) 的控制器设计方法的研究主要集中在两个方面: 1) 根据在线测量的 QoS 参数来动态调整控制器的输出增益[1−3]; 2) 在网络控制系统 (Network control systems, NCS) 设计阶段结合 QoS 来完成控制器的协作设计[4−5]. 这两种方法就其本质而言是一致的, 都是通过离线方式给出的不同网络 QoS 下的控制器增益参数表和网络 QoS 的实际运行情况来动态调整控制器的输出增益, 其实现方式多为查表方式. 虽然实验表明这两种方法都具有很好的可行性, 但是这样的处理也具有一定的保守性, 主要体现在两个方面: 1) 控制器的增益调度策略完全取决于控制器输出增益参数表的完备性; 2) 由于网络服务质量的变化 (下降) 对控制系统性能的衰减缺乏一种定量度量, 导致控制器参数调整过于频繁.

收稿日期 2008-11-25　录用日期 2009-11-30
Manuscript received November 25, 2008; accepted November 30, 2009
国家自然科学基金 (60704021, 60604015), 浙江省教育厅科研项目 (Y200803505) 资助
Supported by National Natural Science Foundation of China (60704021, 60604015) and Scientific Research Fund of Zhejiang Provincial Education Department (Y200803505)
1. 浙江工业大学信息学院 杭州 310032
1. College of Information Engineering, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310032

为此, 本文讨论网络环境下, 网络服务质量变化对控制系统性能衰减的定量关系, 研究系统保性能控制器存在的网络参数和控制参数依赖条件. 进而给出联合网络参数的控制器设计方法, 使得所设计的控制器在满足一定的网络服务质量摄动范围内, 不仅可以使系统渐近稳定, 而且还能确保系统性能不大于某个上界. 本文设计方法可以为进一步的网络调度、控制器增益调度提供理论依据.

1　问题描述

网络环境下, 联合控制参数和网络参数的控制系统可描述为如下通用形式[5]:

$$\begin{aligned}\dot{x}(t) &= f(x(t), u(t), p_{x(t)}, \eta(QoS))\\ x(t) &= \varphi(t),\ t\in[-d, 0]\end{aligned}\tag{1}$$

其中, $x(t)\in\mathbf{R}^n$, $u(t)\in\mathbf{R}^m$ 分别为状态向量和控制输入向量, $p_{x(t)}\in\mathbf{R}^r$ 为远程控制对象参数, $\eta(QoS)$ 为网络服务质量相关参数, $f\in\mathbf{R}^n$ 为网络系统转换函数, d 为网络系统延时, $\varphi(t)$ 为系统初始状态函数.

进一步, 如果系统的传感器为时间驱动, 控制器和执行器为事件驱动, 数据单包传输且系统状态完全可测, 状态反馈控制器输出 $u(t)$ 通过零阶保持器实现, 经离散化, 式 (1) 可描述为[5]

$$x(k+1) = f(x(k), Kx(k-\tau_{i_k}), p_{x(k)}, \eta(QoS))\tag{2}$$

其中, i_k $(k=1,2,\cdots)$ 为整数且 $\{i_1, i_2, \cdots\}\subset\{1,2,\cdots\}$, τ_k 为网络延时. 给定正定矩阵 Q 和 R, 考虑下列性能函数:

$$J=\sum_{k=0}^{\infty}[x^{\mathrm{T}}(k)Qx(k)+u^{\mathrm{T}}(k)Ru(k)]\tag{3}$$

定义 1. 对于系统 (1) 和性能函数 (3), 如果存在控制律 $u(k)=Kx(k)$ 和一正数 J^*, 使得在允许的非理想网络服务质量下闭环系统 (2) 稳定, 并且性能 (3) 满足 $J\le J^*$, 那么 J^* 称为保性能界, $u(k)$ 称为非理想网络服务质量下系统 (1) 的保性能控制器.

本文的主要工作包括: 1) 建立了联合网络参数和控制参数的系统模型; 2) 给出网络控制系统保性能控制器存在的网络参数和控制参数依赖的充分条件; 3) 给出网络保性能控制律的参数化设计方法; 4) 给出网络服务质量变化对控制系统性能衰减的定量度量.

2　实时数据的网络服务质量模型

典型网络化控制系统结构如图 1 所示.

由图 1 不难看出, 网络控制系统中有多个网络节点 S_i 和发送节点 p_i. 另外, 根据网络控制系统的业务特点, 其发送的数据主要分为两类: 1) 过程的周期性的实时数据; 2) 非周期性的非实时数据, 主要是一些控制参数的设置、开关命令及数据报表等. 对于非实时数据可以根据网络的服务质量, 可以利用 "断点续传" 等网络技术进行动态的输入带宽调度. 因此, 为了方便分析, 又不失一般性, 本文根据工业网络控制系统的业务特点假设:

1) 网络可调度且系统是点对点传输, 即满足 p_i 与 S_i 一一对应关系.

2) 数据包在路由过程中未发生数据丢包现象.

已有研究表明, 传输过程中数据包的网络诱导时延主要表现在传输过程中数据包在路由器 (交换机) 的缓冲队列上的等待时延[6]. 不失一般性, 我们假设网络交换机缓冲队列结构如图 2 所示[7].

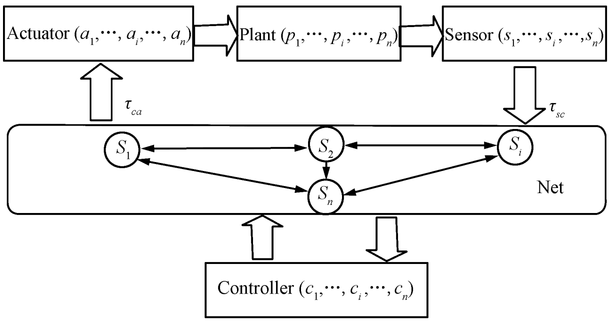

图 1 工业控制网络化控制系统结构图

Fig. 1 A basic NCS configuration

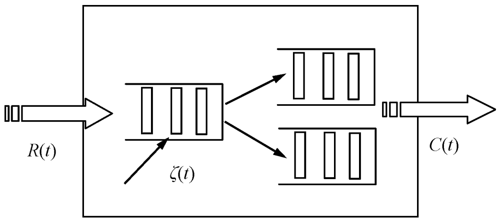

图 2 网络交换机流量及缓冲队列结构图

Fig. 2 Traffic flow and buffer models of a switching node

根据图 2, 设 $R(t)$ 为实时数据输入路由器 (交换机) 的速率, $C(t)$ 为路由器的有效带宽 (注: 非物理带宽), 因此满足:

$$\Delta S(t)=\Psi_{0,G}\left\{\int_0^t\sum_{s=1}^{S_R}R_i(\tau)\mathrm{d}\tau-\int_0^t C(\tau)\mathrm{d}\tau\right\}\tag{4}$$

其中, $\Delta S(t)$ 表示缓冲区的占有量, $R_i(t)=p_i^s/T_i$ 为路由器的输入率, $C(t)$ 为路由器带宽, p_i^s 是第 i 个发送节点所发送的数据包大小, S_R 为网络节点数, T_i 是系统的采样周期, G 是路由器缓冲区的最大值, $\Psi_{0,G}$ 是饱和函数[7]. 如果在系统设计中, 选择合适的阈值就可以保证数据不丢包, 那么路由器的缓冲区占有量满足:

$$\Delta S(t)=\int_0^t\sum_{s=1}^{S_R}R_i(\tau)\mathrm{d}\tau-\int_0^t C(\tau)\mathrm{d}\tau\tag{5}$$

定理 1. 在工控网络中点对点实时数据单包传输且无丢包的情况下, 网络的服务质量与控制系统的参数满足如下等式:

$$\sum_{i=1}^{n+1}P_i+\int_0^{\sum\limits_{i=1}^{n+1}T_i}\zeta(t)\mathrm{d}t=\int_0^{\sum\limits_{i=1}^{n+1}T_i+\tau_i}C(t)\mathrm{d}t\tag{6}$$

其中, T_i 为系统的采样周期, P_i 为数据包大小, $C(t)$ 为网络带宽, τ_i 为网络延时, $\zeta(t)$ 为非实时数据的带宽.

证明. 由于非实时数据对网络性能的影响具有不确定性, 不失一般性, 设非实时数据在缓冲区的输入率为 $\zeta(t)$. 由于实时数据为周期性数据, 因此, 实时数据实为一离散序列. 根据计算机控制的特点, 设在每个周期 T_i 的初始时刻, P_i 大小的数据即被输入到队列中. 因此, 时间可表示为一系列周期性组合: $T_1,T_2,\cdots,T_n$, 相应的数据包可表示为: $P_1,P_2,\cdots,P_n$. 则有:

1) 当 t 到 T_n 结束时, $t=\sum_{i=1}^n T_i$, 总的数据输入量为: $S_1=\sum_{i=1}^n P_i+\int_0^{\sum_{i=1}^n T_i}\zeta(t)\mathrm{d}t$; 总的数据输出量为: $S_2=\int_0^{\sum_{i=1}^n T_i}C(t)\mathrm{d}t$, 此时队列里未发送的数据量为: $\Delta S=\sum_{i=1}^n P_i+\int_0^{\sum_{i=1}^n T_i}[\zeta(t)-C(t)]\mathrm{d}t$.

2) 当 t 到 T_{n-1} 结束时, $t=\sum_{i=1}^{n-1}T_i$, 总的数据输入量为: $Q_1=\sum_{i=1}^{n-1}P_i+\int_0^{\sum_{i=1}^{n-1}T_i}\zeta(t)\mathrm{d}t$; 总的数据输出量为: $Q_2=\int_0^{\sum_{i=1}^{n-1}T_i}C(t)\mathrm{d}t$, 此时队列里未发送的数据量为: $\Delta Q=\sum_{i=1}^{n-1}P_i+\int_0^{\sum_{i=1}^{n-1}T_i}[\zeta(t)-C(t)]\mathrm{d}t$.

3) 当 t 在 T_{n-1} 与 T_n 之间时, 即 $t\in(\sum_{i=1}^{n-1}T_i,\sum_{i=1}^n T_i)$, 总的数据输入量为: $K_1=\sum_{i=1}^{n-1}P_i+\int_0^t\zeta(t)\mathrm{d}t$; 总的数据输出量为: $K_2=\int_0^t C(t)\mathrm{d}t$; 此时队列里未发送的数据量为: $\Delta K=\sum_{i=1}^{n-1}P_i+\int_0^t[\zeta(t)-C(t)]\mathrm{d}t$.

不失一般性, 设 $t=\sum_{i=1}^{n+1}T_i$, 输入一个 P_{n+1} 大小的数据, 则此时队列内的数据量为: $\Delta=\Delta S+P_{n+1}=\sum_{i=1}^{n+1}P_i+\int_0^{\sum_{i=1}^{n+1}T_i}[\zeta(t)-C(t)]\mathrm{d}t$. 令 τ_i 为将 Δ 全部输出所需的时间, 存在如下关系式: $\Delta=\int_0^{\tau_i}C(t)\mathrm{d}t$, 简化后易得式 (6). □

定理 2. 假设非实时数据的传输带宽 $\vartheta(t)$ 在 $[0,kT]$, $k=1,2,\cdots,n$ 上连续, 并满足:

$$\left\|\frac{\vartheta(t)}{k+1}\right\|<T\tilde{C}-P\tag{7}$$

则网络时延小于一个采样周期, 并且 τ_k 满足:

$$\tau_k=\frac{[(k+1)P+\vartheta(t_k)]}{\tilde{C}}-(k+1)T\tag{8}$$

其中, T 为采样周期, P 为数据包大小, $\tilde{C}$ 为网络的输出带宽.

证明. 假设 $\vartheta(t)=\int_0^{\sum_{i=1}^{n+1}T_i}\zeta(t)\mathrm{d}t$, 又因为网络可调度, 故存在 $C(t)=\tilde{C}$. 另外, 考虑到实际应用, 可以发现对于在固定的工控网络上存在的控制系统, 满足 T_i, P_i 不变, 设 $T_i=T$, $P_i=P$, 则根据式 (6) 易得式 (8).

考虑到式 (7), 则有: $\|\vartheta(t)\|<(k+1)(T\tilde{C}-P)<(k+1)(T\tilde{C}-P)+T\tilde{C}$. 同时, 对式 (8) 的两边求范数易得: $\|\tau_k\|<T$. □

3 网络参数与控制系统参数联合模型

典型的 NCS 结构如图 1 所示, 其中 τ_{sc} 表示数据从传感器经网络传输到控制器端的延时, τ_{ca} 表示数据从控制器经网络传输到执行器端的延时. 如不考虑网络的影响, 大量的被控对象都可以描述为线性时变系统, 模型为

$$\begin{aligned}\dot{x}(t)&=Ax(t)+Bu(t)\\ y(t)&=Cx(t)\end{aligned}\tag{9}$$

其中, $x(t)\in\mathbf{R}^n$、$u(t)\in\mathbf{R}^r$ 和 $y(t)\in\mathbf{R}^m$ 分别表示被控对象的状态、控制输入和输出, A,B,C 是具有相应维数的常矩阵. 如果假设: 1) 传感器为时钟驱动, 控制器、执行器为事件驱动; 2) 控制器节点与传感器节点的时钟完全同步, 则工控网络上点对点实时数据单包传输, 且数据包在路由过程中未发生丢包现象. 如果非实时数据传输带宽满足式 (7), 那么系

统 (9) 的网络服务质量与控制系统的联合模型可进一步表示为

$$x(k+1)=\Phi x(k)+(\Gamma_0+DF_kE_0)u(k)+(\Gamma_1+DF_kE_1)u(k-1) \tag{10}$$

其中, $\Phi=\mathrm{e}^{AT}$, $\Gamma_0=\int_0^{\frac{2T\tilde{C}-P}{\tilde{C}}}\mathrm{e}^{As}\mathrm{d}s$, $D=\mathrm{e}^{A\frac{2T\tilde{C}-P}{\tilde{C}}}$, $F_k=\int_0^{-\frac{k(P-T\tilde{C})+\vartheta(t_k)}{\tilde{C}}}\mathrm{e}^{As}\mathrm{d}s$, $E_0=B$, $E_1=-B$, $\Gamma_1=\mathrm{e}^{A\frac{2T\tilde{C}-P}{\tilde{C}}}\int_0^{\frac{2T\tilde{C}-P}{\tilde{C}}}\mathrm{e}^{As}\mathrm{d}sB$.

进一步, 对系统 (9) 引入如下控制律: $u(k)=Kx(k)$, 并且定义增广状态向量 $\boldsymbol{z}(k)=[x^{\mathrm{T}}(k),x^{\mathrm{T}}(k-1)]^{\mathrm{T}}$, 则理想网络服务质量下闭环 NCS 的模型 (2) 可进一步表示为

$$\boldsymbol{z}(k+1)=(\tilde{A}+\tilde{B}\tilde{K}+\tilde{D}\tilde{F}\tilde{E}\tilde{K})\boldsymbol{z}(k) \tag{11}$$

其中, $\tilde{A}=\begin{bmatrix}\Phi & 0\\ I & 0\end{bmatrix}$, $\tilde{B}=\begin{bmatrix}\Gamma_0 & \Gamma_1\\ 0 & 0\end{bmatrix}$, $\tilde{E}=\begin{bmatrix}E_0 & E_1\end{bmatrix}$, $\tilde{D}=\begin{bmatrix}D\\ 0\end{bmatrix}$, $\tilde{F}=F_k$, $\tilde{K}=\begin{bmatrix}K & 0\\ 0 & K\end{bmatrix}$, 相应的性能函数为式 (3).

4　鲁棒性能分析与控制器设计

本节给出非理想网络服务质量下, 系统保性能控制器存在的网络参数与控制器参数依赖的充分条件, 及相应的控制器参数化设计方法.

4.1　鲁棒性能分析

考虑到如下不确定离散系统:

$$x(k+1)=(A+\Delta A)x(k)+(B+\Delta B)u(k) \tag{12}$$

其中, $x(k)\in\mathbf{R}^n$ 和 $u(k)\in\mathbf{R}^m$ 分别是系统 (12) 的状态和控制向量, A 和 B 是适当维常数矩阵, $x_0=x(0)$ 是初始状态向量, ΔA 和 ΔB 是适当维数的不确定矩阵, 并满足 $\begin{bmatrix}\Delta A & \Delta B\end{bmatrix}=DF\begin{bmatrix}E_1 & E_2\end{bmatrix}$, 其中, D,E_1,E_2 是适当维的常数矩阵, 它们反映了不确定性的矩阵, $F\in\mathbf{R}^{i\times j}$, 且满足 $F^{\mathrm{T}}F<I$. 系统的性能指标为式 (3).

引理 1[8]**.** 若 $u(k)=Kx(k)$ 是系统 (12) 和性能指标 (3) 的一个具有性能矩阵 P 的保性能控制律, 则对所有允许的不确定性, 闭环系统

$$x(k+1)=[A+BK+DF(E_1+E_2K)]\,x(k) \tag{13}$$

是二次稳定的, 且相应的闭环性能指标满足:

$$J\le x_0^{\mathrm{T}}Px_0 \tag{14}$$

引理 2[8]**.** 系统 (12) 存在一个二次保性能控制律 $u(k)=Kx(k)$, 当且仅当存在常数 $\varepsilon>0$, 矩阵 K 和对称矩阵 $X>0$, 使得

$$\begin{bmatrix}\varepsilon DD^{\mathrm{T}}-X & (A+BK)X & 0\\ X(A+BK)^{\mathrm{T}} & \Xi & X(E_1+E_2K)^{\mathrm{T}}\\ 0 & (E_1+E_2K)X & -\varepsilon I\end{bmatrix}<0 \tag{15}$$

其中, $\Xi=-X+X(Q+K^{\mathrm{T}}RK)X$. 当矩阵不等式 (15) 有可行解 K 和 $X>0$ 时, $u(k)=Kx(k)$ 是系统 (12) 的具有性能矩阵 X^{-1} 的一个二次保性能控制律.

定理 3[8]**.** 若 $u(k)=Kx(k)$ 是系统 (9) 和性能指标 (3) 的一个具有性能矩阵 P 的非理想网络服务质量下保性能控制律, 则对所有允许的网络服务质量, 闭环系统 (11) 是二次稳定的, 且相应的闭环性能指标满足 $J\le x_0^{\mathrm{T}}Px_0$.

证明. 直接应用引理 1 可得结论. □

注 1. 考虑到模型 (10) 结合了网络参数, 因此定理 3 给出了网络环境下系统二次保性能控制和闭环性能指标值之间的控制参数和网络参数的关系.

4.2　控制器设计

本小节给出了控制器的参数化设计方法.

定理 4. 系统 (9) 存在二次保性能控制律, 当且仅当存在常数 $\varepsilon>0$, 矩阵 V 和对称正定矩阵 Y, 使得以下矩阵不等式:

$$\begin{bmatrix}\Theta_1 & \Theta_2 & 0 & 0 & 0\\ \Theta_3 & -X & (\tilde{E}\tilde{V})^{\mathrm{T}} & \begin{bmatrix}Y\\ 0\end{bmatrix} & \begin{bmatrix}V^{\mathrm{T}}\\ 0\end{bmatrix}\\ 0 & \tilde{E}\tilde{V} & -\varepsilon I & 0 & 0\\ 0 & \begin{bmatrix}Y & 0\end{bmatrix} & 0 & -Q^{-1} & 0\\ 0 & \begin{bmatrix}V & 0\end{bmatrix} & 0 & 0 & 0\end{bmatrix}<0 \tag{16}$$

成立. 其中, $\Theta_1=\varepsilon\tilde{D}\tilde{D}^{\mathrm{T}}-X$, $\Theta_2=\tilde{A}X+\tilde{B}\tilde{V}$, $\Theta_3=(\tilde{A}X+\tilde{B}\tilde{V})^{\mathrm{T}}$, $X=\begin{bmatrix}Y & 0\\ 0 & Y\end{bmatrix}$. 进而, 当矩阵不等式 (16) 有解, V 和 $Y>0$ 时, $u(k)=VY^{-1}x(k)$ 是系统 (9) 的一个非理想网络服务质量下的二次保性能控制律, 相应的系统性能指标上界是 $J^*\le\mathrm{tr}\,(X)^{-1}$.

证明. 直接应用引理 2 可知, 系统 (9) 存在一个非理想网络服务质量下的二次保性能控制律 $u(k)=Kx(k)$, 当且仅当存在常数 $\varepsilon>0$, 矩阵 K 和对称矩阵 $X>0$, 使得以下矩阵不等式:

$$\begin{bmatrix}\varepsilon\tilde{D}\tilde{D}^{\mathrm{T}}-X & (\tilde{A}+\tilde{B}\tilde{K})X & 0\\ X(\tilde{A}+\tilde{B}\tilde{K})^{\mathrm{T}} & -X\Xi X & X(\tilde{E}\tilde{K})^{\mathrm{T}}\\ 0 & \tilde{E}\tilde{K}X & -\varepsilon I\end{bmatrix}<0 \tag{17}$$

成立. 其中, $\Xi=\begin{bmatrix}Q+K^{\mathrm{T}}RK & 0\\ 0 & 0\end{bmatrix}$, 限定 X 为一对称正定矩阵, 即 $X=\begin{bmatrix}Y & 0\\ 0 & Y\end{bmatrix}$. 其中 $Y>0$, 令 $V=KY$, $\tilde{V}=\tilde{K}X=\begin{bmatrix}V & 0\\ 0 & V\end{bmatrix}$. 则由 Schur 补引理, 式 (16) 等价于式 (17). 另一方面, 假设系统初态 x_0 是一个满足 $\mathrm{E}\{x_0x_0^{\mathrm{T}}\}=I$ 的零均值随机变量, 则系统性能指标的期望值满足: $\bar{J}=\mathrm{E}\{J\}\le\mathrm{E}\{x_0^{\mathrm{T}}Px_0\}=\mathrm{tr}\,(P)$. 因此, 定理 4 成立. □

注 2. 模型 (10) 结合了网络参数, 因此定理 4 给出了在非理想网络服务质量下, 网络控制系统保性能控制器的存在性条件.

同时考虑到不等式 (16) 是关于 ε, $\tilde{V}$ 和 X 的一个线性矩阵不等式, 因此可以应用 LMI 工具中的求解器 feasp 求解线性矩阵不等式 (16) 的可行性问题, 并用得到的可行解来构造所求的非理想网络服务质量下的二次保性能控制律.

定理 5. 对于给定的系统 (9) 和性能指标 (3), 如果以下

的优化问题:

$$\min_{\varepsilon,X,S,W} Z = \mathrm{tr}(S)$$

$$\text{s.t.}\quad 1)\begin{bmatrix} \prod_1 & \prod_2 & 0 & 0 & 0 \\ \prod_2^{\mathrm{T}} & -X & (\tilde{E}\tilde{V})^{\mathrm{T}} & X & \tilde{V}^{\mathrm{T}} \\ 0 & \tilde{E}\tilde{V} & -\varepsilon I & 0 & 0 \\ 0 & X & 0 & -Q^{-1} & 0 \\ 0 & \tilde{V} & 0 & 0 & -R^{-1} \end{bmatrix} < 0$$

$$2)\begin{bmatrix} X & I \\ I & S \end{bmatrix} > 0 \tag{18}$$

其中, $\prod_1 = \varepsilon\tilde{D}\tilde{D}^{\mathrm{T}} - X$, $\prod_2 = \tilde{A}X + \tilde{B}\tilde{V}$, 有一个最优解 $(\varepsilon^*, S^*, Y^*, V^*)$, 则 $u(k) = V^*(Y^*)^{-1}x(k)$ 是系统 (9) 的非理想网络服务质量下的二次保性能控制律, 相应的一个系统性能上界是 $J^* = \mathrm{tr}\,((x^*)^{-1})$.

证明. 如果 $(\varepsilon^*, S^*, Y^*, V^*)$ 是优化问题 (18) 的一个解, 则 $(\varepsilon^*, S^*, Y^*, V^*)$ 也是问题 (18) 约束条件 1) 的一个可行解. 根据定理 4, 控制律 $u(k) = V^*(Y^*)^{-1}x(k)$ 是系统 (9) 的一个非理想网络服务质量下的保性能控制律.

根据矩阵 Schur 补性质, 问题 (18) 中的约束条件 2) 等价于 $S > X^{-1} > 0$. 因此, $\mathrm{tr}\,(S)$ 的最小化保证 $\mathrm{tr}\,(X^{-1})$ 的最小化, 即系统性能上界的最小化. 由于问题 (18) 是一个凸优化问题, 从而可以达到全局最小值. □

注 3. 在保性能控制器存在性条件的证明过程中, 假设 F_k 满足 $F_kF_k^{\mathrm{T}} \leq I$, 而 F_k 是一个与网络特征参数相关的参量. 因此, 必须通过适当选取网络特征参数 T, C, P 以保证 F_k 满足单位范数有界性, 从而保证所给出的控制器存在性条件的合理性.

5 数值仿真

考虑如下的被控对象:

$$\dot{x}(t) = \begin{bmatrix} -0.8 & -0.01 \\ 1 & 0.1 \end{bmatrix} x(t) + \begin{bmatrix} 0.4 \\ 0.1 \end{bmatrix} u(t) \tag{19}$$

采用状态反馈控制器, 对不同的网络参数和控制器参数, 利用本文方法设计非理想网络服务质量下的状态反馈 NCS 保性能控制律, 仿真结果如表 1 所示.

表 1 不同网络参数和控制参数下的仿真结果

Table 1 The simulation results under different networks and control parameter values

$T(s)$	$P(k)$	$\tilde{C}\,(kps)$	$\vartheta(t)\,(kbps)$	J^*	K
0.8	8	10	[0.1,8]	20.1655	[−1.461, −1.3395]
0.75	8.5	9.8	[0.1,8]	39.8903	[−1.8903, −1.7037]

从仿真结果可以看出, 随着网络参数的改变, 闭环系统的性能会下降, 这是由于不同的网络参数和控制系统参数会导致网络服务质量的下降, 进而影响闭环系统的性能. 因此, 本文的基于网络服务质量的网络控制器设计方法给出了网络参数和控制系统参数的变化对控制系统性能衰减的一种定量度量, 可以为进一步的网络调度提供一定的理论依据.

6 结论

本文针对网络服务质量和控制系统性能具有强耦合性的特点, 提出基于网络服务质量的网络控制器设计方法. 分析了网络控制系统保性能控制器存在的网络参数依赖条件. 最后仿真结果表明本文方法的有效性.

References

1 Shao Qi-Ke, Yu Li, Zhang Gui-Jun. A remote control system based on QoS performance compensation. *Acta Automatica Sinica*, 2007, **33**(3): 309−314
(邵奇可, 俞立, 张贵军. 基于 QoS 性能补偿的远程控制系统. 自动化学报, 2007, **33**(3): 309−314)

2 Tipsuwan Y, Chow M Y. Gain scheduler middleware: a methodology to enable existing controllers for networked control and teleoperation part I: networked control. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2004, **51**(6): 1218−1226

3 Branicky M S, Liberatore V, Phillips S M. Networked control system co-simulation for co-designed. In: Proceedings of the American Control Conference. Colorado, USA: IEEE, 2003. 3341−3346

4 Tipsuwan Y, Chow M Y. On the gain scheduling for networked PI controller over IP network. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 2004, **9**(3): 491−498

5 Peng Chen, Yue Dong. Network-based optimal controller design based on QoS. *Acta Automatica Sinica*, 2007, **33**(2): 214−217
(彭晨, 岳东. 网络环境下基于网络 QoS 的网络控制器优化设计. 自动化学报, 2007, **33**(2): 214−217)

6 Lian F L. Analysis Design, Modeling and Control of Networked Control Systems [Ph. D. dissertation], University of Michigan, USA, 2001

7 Kim H S, Shin S Y, Kwon W H. Feedback control for QoS of mixed traffic in communication networks. *Control Engineering Practice*, 2004, **12**(5): 527−536

8 Yu Li. *Robust Control — Linear Matrix Inequalities Method*. Beijing: Tsinghua University, 2002. 69−83
(俞立. 鲁棒控制 — 线性矩阵不等式处理方法. 北京: 清华大学出版社, 2002. 69−83)

邵奇可 浙江工业大学信息学院讲师. 主要研究方向为网络控制系统和计算机网络. 本文通信作者. E-mail: sqk@zjut.edu.cn
(**SHAO Qi-Ke** Lecturer at the College of Information Engineering, Zhejiang University of Technology. His research interest covers networked control systems and computer network. Corresponding author of this paper.)

俞 立 浙江工业大学信息学院教授. 主要研究方向为鲁棒控制, 时滞系统和网络控制系统. E-mail: lyu@zjut.edu.cn
(**YU Li** Professor at the College of Information Engineering, Zhejiang University of Technology. His research interest covers robust control, time-delay systems, and networked control systems.)

张贵军 浙江工业大学信息学院副教授. 主要研究方向为进化计算, 网络控制和地理信息系统. E-mail: zgj@zjut.edu.cn
(**ZHANG Gui-Jun** Associate professor at the College of Information Engineering, Zhejiang University of Technology. His research interest covers evolutionary computation, networked control systems, and geographic information system.)