

文章编号: 1001-0920(2009)07-0973-06

基于网络 QoS 的网络化控制系统保性能控制

康 军, 戴冠中

(西北工业大学 自动化学院, 西安 710072)

摘 要: 研究存在时延和丢包的非理想网络传输情况下的网络化控制系统的保性能控制问题, 得到了在非理想网络传输情况下的网络化控制系统存在保性能控制律的充分条件, 提出了基于网络服务质量(QoS)的网络化控制系统的保性能控制器的设计方法, 该方法是一种能够兼顾系统控制性能和网络服务质量的综合性控制方法. 通过仿真实例验证了该方法的有效性.

关键词: 网络化控制系统; 不确定性; 保性能控制; 控制系统性能质量; 服务质量

中图分类号: TP393; TP273 **文献标识码:** A

Design of guaranteed cost controller of networked control systems based on QoS

KANG Jun, DAI Guanzhong

(Collage of Automation, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China. Correspondent: KANG Jun, E-mail: kangjun_1@263.net)

Abstract: Under the consideration of both the time-varying network-induced delay and the data packet dropout in the transmission, the problem of guaranteed cost control of networked control system with parameter uncertainty is concerned in this paper. The sufficient condition of guaranteed cost control of networked control system with parameter uncertainty is proved. Based on the quality of service of network, a guaranteed cost controller design method is proposed, which is a kind of synthesizing control method of networked control system to guarantee the quality of the performance of control system and the service of network. The simulation results show the effectiveness of the proposed algorithm.

Key words: Networked control system; Uncertainty; Guaranteed cost control; Quality of performance; Quality of service

1 引言

网络化控制系统(NCS)是将分布在不同地理空间的传感器、控制器、执行器等控制系统的部件,通过串行数据通讯网络构成闭环的反馈控制系统^[1]. NCS是构建在网络之上的复杂控制系统.传统的NCS的研究方法为了降低控制系统设计和网络实现两个阶段工作的复杂性,将网络性能和控制系统性能之间的交叉耦合关系进行简化^[2-4],而这种简化割裂了NCS中控制系统性能质量(QoP)和网络服务质量(QoS)的联系,很难保证系统良好的总体性能.兼顾控制QoP和网络QoS的NCS设计方法^[5]的研究,已经成为一个新的热点.该设计方法指的是:以优化NCS总体性能为目标,将网络性能、带宽资源限制等更多的网络因素融入网络化控制系统设

计和性能优化中,在控制系统设计的同时考虑网络实现的问题.

目前针对兼顾控制QoP和网络QoS的NCS设计方法的研究相对较少.彭晨等^[6]利用离散LQR(Linear quadratic regulator)方法来设计NCS控制系统控制器,并提出了网络控制器与网络的交互设计方法,但作者仅考虑了网络时延条件,并没有考虑模型参数的不确定性问题.然而实际的网络传输会同时存在网络时延、丢包等多种情况,同时被控对象模型参数的不确定性也是不可避免的^[7].保性能控制的概念首先由Chang等^[8]针对不确定参数系统提出的,其目的是在实际控制系统设计中,不仅要求控制系统闭环渐近稳定,而且要求闭环系统满足一定的性能指标要求,即满足给定的一种积分型二次

收稿日期: 2008-06-17; 修回日期: 2008-09-19.

作者简介: 康军(1975—),男,陕西咸阳人,博士生,从事基于网络环境的复杂控制系统的研究;戴冠中(1937—),男,上海人,教授,博士生导师,从事现代控制理论、计算机控制技术等研究.

性能指标.

本文主要研究存在时延和丢包等非理想网络传输情况下,具有参数不确定的 NCS 的保性能控制问题,得到了 NCS 存在保性能控制律的充分条件,提出了一种基于网络 QoS 的 NCS 保性能控制器的设计方法,该方法能够兼顾控制 QoP 和网络 QoS. 最后通过仿真验证了该方法的有效性.

2 NCS 综合模型

若 NCS 控制回路中的传感器是时钟驱动,控制器和执行器是事件驱动,传输的数据均为单包传送,则具有参数不确定的 NCS 系统模型可描述如下^[9]:

$$\begin{aligned} \dot{x}(t) &= \bar{A}x(t) + \bar{B}u(t) = \\ &(A + A)x(t) + (B + B)u(t), \\ t & \in [i_k h + k, i_{k+1} h + k + 1], \\ u(t^+) &= Kx(t - k), \\ t & \in \{i_k h + k, k = 1, 2, \dots\}. \end{aligned} \quad (1)$$

其中: $x(t) \in R^n$, $u(t) \in R^m$ 分别是适当维数的状态向量和控制向量; h 为采样周期; $i_k (k = 1, 2, \dots)$ 是一些整数且 $\{i_1, i_2, \dots\} \in \{0, 1, \dots\}$; k 是控制回路

闭环网络延迟. 显然 $\{i_k h + k, i_{k+1} h + k + 1\} = [t_0, \dots)$, 其中 $t_0 > 0$. 假设在第一个控制信号到达控制对象之前 $u(t) = 0$, $u(t)$ 通过零阶保持器实现. 真实控制输入是分段连续函数且分段连续的,以数据到达执行器端的时刻为基准, $u(t)$ 仅在时刻 t^+ 改变其数值. 式(1)中, A 和 B 是已知的、具有适当维数的实常数矩阵; \bar{A} 和 \bar{B} 是不确定矩阵,表示模型中的参数不确定性. 假定它们是范数有界的,且具有以下形式:

$$\bar{A} = DF(t)E_a, \quad \bar{B} = DF(t)F_b. \quad (2)$$

其中: $F(t) \in R^{n \times m}$ 是满足 $F^T(t)F(t) = I$ 的未知矩阵; D_2, E_a, F_b 是具有适当维数的常数矩阵.

文献[10]针对模型(1)定义了 NCS 的最大允许综合界,在系统渐近稳定的条件下,若存在一个常数 γ^{\max} 满足下述不等式:

$$(i_{k+1} - i_k)h + k + 1 \leq \gamma^{\max}, \quad k = 1, 2, \dots \quad (3)$$

则 γ^{\max} 为该 NCS 的最大允许综合界.

在式(3)中,当 $i_{k+1} = i_k + 1$ 时,表示数据传输过程中没有丢包现象;当 $i_{k+1} > i_k + 1$ 时,表示出现了丢包现象,连续丢包个数为 $i_{k+1} - i_k - 1$;当 $i_{k+1} < i_k$ 时,表示数据包发生错序. 为节约网络带宽,实际系统中若数据包出现错序,则可以主动丢弃超时的数据包,此时有 $i_{k+1} = i_k + 1$ 总是成立,丢包个数则为 $i_{k+1} - i_k - 1$. γ^{\max} 反映了在保证系统稳定的条件下该 NCS 对实际网络闭环延迟、连续丢包个数及采样周期 h 等因素的最大允许综合上限. 在能够监测网

络所能提供的 QoS 的条件下,给出下述定义:

定义1 对于 NCS 系统(式(1)),设 γ 为网络闭环延迟上界, M 为网络最大连续丢包个数, h 为系统采样周期,则该系统实际综合界

$$\gamma = (M + 1)h + \dots, \quad (4)$$

其中对于采用单包传输的 NCS 控制回路, M 既表示控制量数据包的最大连续丢包个数,也表示连续丢失控制量数据包的最大采样周期数.

由定义1可知,实际综合界 γ 显然满足 $(i_{k+1} - i_k)h + k + 1 \leq \gamma$, $k = 1, 2, \dots$, 而且当网络类型及配置等参数确定后,可通过在线测量或预估的方式得到 γ . 在此重新定义 NCS 的最大允许综合界,并给出关于 M 的下述结论.

定义2 对于 NCS 系统(式(1)),在系统渐近稳定的条件下,若存在一个常数 γ^{\max} 满足下述不等式:

$$\gamma^{\max}, \quad (5)$$

则称 γ^{\max} 为该 NCS 的最大允许综合界. 其中 γ (如式(4)所示)表示系统实际综合界.

定理1 对于传感器是时钟驱动,控制器和执行器是事件驱动,采用单包传输的 NCS,设网络的丢包率 d (d 为网络流量负荷 100% 时的网络最大丢包率^[11]),对于具体网络通常可通过在线测量获得,则在可靠性为 P_a 的条件下,该 NCS 各控制回路的最大网络连续丢包个数 M 满足下述关系:

$$M = \lfloor \lg P_a / \lg((1 - d)^2) \rfloor. \quad (6)$$

证明 假设各控制回路在各采样周期的控制量数据包丢失事件相互独立. 对于采用单包传输的 NCS,当无丢包时,各控制回路在 1 个采样周期内仅产生 1 个反馈量数据包和 1 个控制量数据包.

当网络的丢包率为 d 时,在一个采样周期内,对于时间驱动传感器,其周期性产生的反馈量数据包丢失概率为 d ;由于控制器是事件驱动,则当一个周期内的反馈量数据包丢失时,将不会产生相应的控制量数据. 一个采样周期内,在反馈量数据包丢失的情况下,控制量数据包丢失的概率也为 d ;在一个采样周期内,反馈量数据包正常传输而控制量数据包丢失的概率为 $d(1 - d)$. 因此一个采样周期内控制量数据包丢失的概率 $R = d + d(1 - d)$.

因为各个采样周期内控制量数据包丢失的事件只有两个相互对立的结果,即属于贝努里实验. 根据几何分布的定义,设随机变量 X 为连续丢失控制量数据包的采样周期个数,即连续丢失控制量数据包的个数,则连续丢失 m 个控制量数据包的概率为

$$P(X = m) = (1 - R)R^m, \quad m = 0, 1, \dots \quad (7)$$

设 M 为 NCS 中控制回路连续丢失控制量数据包的最大个数,则当可靠性为 P_a ,网络丢包率 d 时,有

$$\prod_{i=0}^M (1 - R) R^i Pa. \tag{8}$$

由式(8) 可得

$$M = \lfloor \lg Pa / \lg(1 - R) \rfloor = \lfloor \lg Pa / \lg((1 - d)^2) \rfloor. \tag{9}$$

定理得证.

综上所述,NCS的综合界 主要取决于延迟、丢包率等网络 QoS 指标,是网络 QoS 指标的综合反映.为了保证系统控制性能,要求 μ_{\max} . 以 μ_{\max} 约束条件来设计 NCS,即同时考虑了时延与丢包对 NCS 性能的影响.要使系统满足对 μ_{\max} 的约束条件,就需要对有限的网络带宽资源进行合理调度.因此,NCS的设计就是在控制 QoS 与网络 QoS 的双重约束条件下,既要设计控制系统控制器,也要对网络资源调度策略进行合理选配,从而使 NCS 总体性能优化.

3 NCS 保性能稳定控制

设 NCS 中的全部状态变量是可量测的,由于控制器与执行器为事件驱动,模型(1) 的闭环形式可描述为

$$\begin{aligned} \dot{x}(t) &= \bar{A}x(t) + \tilde{B}Kx(ikh) = \\ &(A + A)x(t) + (B + B)Kx(ikh), \\ t &\in [ikh + k, i_{k+1}h + k_{+1}), k = 1, 2, \dots, \\ \phi(t) &= x(t_0 -)e^{A(t-t_0)}, \\ t &\in [t_0 - , t_0]. \end{aligned} \tag{10}$$

其中 $\phi(t)$ 是确定性系统的初始条件函数, A 和 B 如式(2) 所示.对于控制系统(10) 定义系统性能指标为

$$\begin{aligned} J &= \int_{t_0}^{\infty} [x^T(t) Qx(t) + u^T(t) Su(t)] dt = \\ &\int_{t_0}^{\infty} x(t)^T Qx(t) dt + \\ &\sum_{k=1}^{\infty} \int_{i_k h + k}^{i_{k+1} h + k_{+1}} x(ikh)^T K^T S Kx(ikh) dt, \end{aligned} \tag{11}$$

其中 Q 和 S 为给定的正定对称加权矩阵.

定义 3 设系统(10) 状态可测,对于给定的常数 $\mu > 0$ (满足式(4)), 如果存在控制律 $u(k) = Kx(t)$,其中 $K \in R^{p \times n}$ 为反馈增益待常数矩阵,使得对所有允许的不确定性,系统(10) 渐近稳定,且其性能指标值(11) 具有确定上界,则称控制律 $u(t) = Kx(t)$ 是系统在综合界 下的保性能控制律.

引理 1^[12] 对适当维数的矩阵 D, E 及 F ,且有 $F^T(t) F(t) = I$,则对任何标量 $\mu > 0$,有

$$DEF + E^T F^T D^T - DD^T + \mu^{-1} E^T E.$$

定理 2 对于给定的综合界 $\mu > 0$ 及标量 $\mu_i (i = 2, 3)$, 如果存在标量 $\mu_1 > 0, \mu_2 > 0$, 矩阵 $\tilde{P} > 0$,

$\tilde{R} > 0, Y, \bar{N}_i (i = 1, 2, 3)$ 以及非奇异矩阵 X ,使得线性矩阵不等式

$$\begin{bmatrix} \tilde{11} & * \\ \tilde{21} & \tilde{22} \end{bmatrix} < 0 \tag{12}$$

成立,则由 $K = YX^{-T}$ 构成状态反馈控制器的闭环系统是保性能控制律,性能指标(式(11)) 满足如下约束:

$$\begin{aligned} J &= \phi^T(t_0) X^{-1} \tilde{P} X^{-T} \phi(t_0) + \\ &\int_{t_0}^{\infty} \phi^T(v) X^{-1} \tilde{R} X^{-T} \phi(v) dv ds. \end{aligned} \tag{13}$$

其中 $*$ 表示由矩阵对称性得到的矩阵块

$$\begin{aligned} \tilde{11} &= \begin{bmatrix} 11 & * & * \\ 21 & 22 & * \\ 31 & 32 & 33 \end{bmatrix}, \\ \tilde{21} &= \begin{bmatrix} N_1^T & N_2^T & N_3^T \\ 0 & Y & 0 \\ X^T & 0 & 0 \\ \mu E_a X^T & 0 & 0 \\ 0 & \mu E_b Y & 0 \end{bmatrix}, \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \tilde{22} &= \text{diag}(-\tilde{R}, -S^{-1}, -Q^{-1}, -\mu_1 I, -\mu_2 I), \\ 11 &= \bar{N}_1 + \bar{N}_1^T + AX^T + \\ &XA^T + (\mu_1 + \mu_2) D_2 D_2^T, \\ 21 &= \bar{N}_2 - \bar{N}_1^T + \mu_2 AX^T + Y^T B^T, \\ 31 &= \bar{N}_3 + \mu_3 AX^T - X + \tilde{P}^T, \\ 22 &= -\bar{N}_2 - \bar{N}_2^T + \mu_2 BY + \\ &\mu_2 Y^T B^T + \mu_2 (\mu_1 + \mu_2) D_2 D_2^T, \\ 32 &= -\bar{N}_3 - \mu_2 X + \mu_3 BY, \\ 33 &= -\mu_3 X - \mu_3 X^T + \tilde{R} + \mu_3 (\mu_1 + \mu_2) D_2 D_2^T, \\ \mu &= 1 + \mu_2 + \mu_3. \end{aligned}$$

证明 构造 Lyapunov 泛函为

$$V(t) = x^T(t) Px(t) + \int_{t_0}^t \int_s^t \dot{x}^T(v) R \dot{x}(v) dv ds. \tag{14}$$

其中 $P > 0, R > 0$. 当 $t \in [ikh + k, i_{k+1}h + k_{+1})$ 时对 $V(t)$ 求导,并利用式(10) 以及 Newton-Leibniz 公式

$$x(t) - x(ikh) - \int_{ikh}^t \dot{x}(s) ds = 0$$

可以得到

$$\begin{aligned} \dot{V}(t) &= 2x^T(t) P \dot{x}(t) + 2[x^T(t) N_1 + x^T(ikh) N_2 + \\ &\dot{x}^T(t) N_3][x(t) - x(ikh) - \int_{ikh}^t \dot{x}(s) ds] + \\ &2[x^T(t) M_1 + x^T(ikh) M_2 + \dot{x}^T(t) M_3][\bar{A}x(t) + \\ &\tilde{B}Kx(ikh) - \dot{x}(t)] + \dot{x}^T(t) R \dot{x}(t) - \end{aligned}$$

$$\int_{t_k}^t \dot{x}^T(s) R \dot{x}(s) ds, \tag{15}$$

其中 N_i 和 $M_i (i = 1, 2, 3)$ 是相应维数的自由矩阵.

由的定义可知 $(i_{k+1} - i_k)h + \dots + i_{k+1}h + i_{k+1}$, $k = 1, 2, \dots$, 则当 $t \in [i_k h + i_k, i_{k+1} h + i_{k+1})$ 时, 有

$$- \int_{t_k}^t \dot{x}^T(s) R \dot{x}(s) ds - \int_{i_k h}^t \dot{x}^T(s) R \dot{x}(s) ds, \tag{16}$$

$$- 2[x^T(t) N_1 + x^T(i_k h) N_2 + \dot{x}^T(t) N_3] \int_{i_k h}^t \dot{x}(s) ds + \int_{i_k h}^t \dot{x}^T(s) R \dot{x}(s) ds. \tag{17}$$

其中

$$N^T = [N_1^T \quad N_2^T \quad N_3^T],$$

则由式(15) ~ (17) 可得

$$\dot{V}(t) = (t)^T \left[\begin{array}{ccc} \mu_{11} & * & * \\ \mu_{21} & \mu_{22} & * \\ \mu_{31} & \mu_{32} & \mu_{33} \end{array} \right] x(t) - x(t)^T Qx(t) - x(i_k h)^T K^T S Kx(i_k h). \tag{18}$$

其中 (* 表示由矩阵对称性得到的矩阵块)

$$\begin{aligned} \mu_{11} &= N_1 + N_1^T + M_1 \bar{A} + \bar{A}^T M_1^T + Q, \\ \mu_{21} &= N_2 - N_1^T + M_2 \bar{A} + K^T \tilde{B}^T M_1^T, \\ \mu_{31} &= N_3 + M_3 \bar{A} - M_1^T + P^T, \\ \mu_{22} &= -N_2 - N_2^T + M_2 \tilde{B} K + K^T \tilde{B}^T M_2^T + K^T S K, \\ \mu_{32} &= -N_3 - M_2^T + M_3 \tilde{B} K, \\ \mu_{33} &= -M_3 - M_3^T + R, \\ &= N R^{-1} N^T. \end{aligned}$$

$$\text{令 } \mu = \left[\begin{array}{ccc} \mu_{11} & * & * \\ \mu_{21} & \mu_{22} & * \\ \mu_{31} & \mu_{32} & \mu_{33} \end{array} \right] + \dots, \text{ 如果 } \mu < 0 \text{ 成立,}$$

则根据 Lyapunov 稳定性理论和定义 1 可知, 闭环系统(10) 是渐近稳定的. $\mu < 0$ 与下式等价:

$$\mu = \tilde{\mu} + M_d^T F M_e + M_e^T F^T M_d < 0. \tag{19}$$

其中

$$M_d = [D^T M_1^T \quad D^T M_2^T \quad D^T M_3^T \quad 0],$$

$$M_e = [E_a \quad E_b K \quad 0 \quad 0],$$

$$\tilde{\mu} = \left[\begin{array}{cccc} \mu_{11} & * & * & * \\ \mu_{21} & \mu_{22} & * & * \\ \mu_{31} & \mu_{32} & \mu_{33} & * \\ N_1^T & N_2^T & N_3^T & -R \end{array} \right],$$

$$\begin{aligned} \mu_{11} &= N_1 + N_1^T + M_1 A + A^T M_1^T + Q, \\ \mu_{21} &= N_2 - N_1^T + M_2 A + K^T B^T M_1^T, \\ \mu_{31} &= N_3 + M_3 A - M_1^T + P^T, \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \mu_{22} &= -N_2 - N_2^T + M_2 B K + K^T B^T M_2^T + K^T S K, \\ \mu_{32} &= -N_3 - M_2^T + M_3 B K, \\ \mu_{33} &= -M_3 - M_3^T + R. \end{aligned}$$

由于 $\mu < 0$ 时下式成立:

$$(t)^T \mu (t) < 0, \tag{20}$$

定义新变量 $M = M_1, M_2 = \mu_2 M, M_3 = \mu_3 M, X = M^{-1}, Y = KX^T, \tilde{P} = X P X^T, \bar{N}_i = X N_i X^T, \tilde{M}_i = X M_i X^T, \tilde{R} = X R X^T$, 用 $\text{diag}\{X, X, X, X, X, X\}$ 及其转置左乘和右乘式(19) 并代入式(20), 同时利用引理 1, 则有

$$\begin{aligned} & [x^T(t) D_2 F E_a X^T x(t) + *] \\ & \mu_{11} x^T(t) D_2 D_2^T x(t) + \mu_{11}^1 x^T(t) X E_a^T E_a X^T x(t), \\ & [x^T(i_k h) (Y^T E_b^T F^T D_2^T + \mu_2 D_2 F E_a X^T) x(t) + *] \\ & \mu_{12} x^T(t) D_2 D_2^T x(t) + \mu_{12}^1 x^T(i_k h) Y^T E_b^T E_b Y X(i_k h) + \\ & \mu_{21} x^T(i_k h) D_2 D_2^T x(i_k h) + \mu_{21}^1 x^T(t) X E_a^T E_a X^T x(t), \\ & [\mu_3 \dot{x}^T(t) D_2 F E_a X^T x(t) + *] \\ & \mu_{31} \dot{x}^T(t) D_2 D_2^T \dot{x}(t) + \mu_{31}^1 x^T(t) X E_a^T E_a X^T x(t), \\ & [\mu_2 x^T(i_k h) D_2 F E_b Y X(i_k h) + *] \\ & \mu_{22} x^T(i_k h) D_2 D_2^T x(i_k h) + \mu_{22}^1 x^T(i_k h) Y^T E_b^T E_b Y X(i_k h), \\ & [\mu_3 \dot{x}^T(t) D_2 F E_b Y X(i_k h) + *] \\ & \mu_{32} \dot{x}^T(t) D_2 D_2^T \dot{x}(t) + \mu_{32}^1 x^T(i_k h) Y^T E_b^T E_b Y X(i_k h). \end{aligned}$$

其中 * 代表 + 号前面式子的转置, 同时取

$$\begin{aligned} \mu_{11} &= \mu_{21} = \mu_{31} = 1, \\ \mu_{12} &= \mu_{22} = \mu_{32} = 2, \end{aligned}$$

再利用 Schur 补引理即可得式(12). 即当式(12) 成立时可以保证 $\mu < 0$. 根据 Lyapunov 稳定性理论和定义 2 可知, 此时闭环系统(10) 是渐近稳定的. 结合式(12) 与(18), 当 $t \in [i_k h + i_k, i_{k+1} h + i_{k+1})$ 时有

$$x(t)^T Qx(t) + x(i_k h)^T K^T S Kx(i_k h) < \dot{V}(t). \tag{21}$$

从 $i_k h + i_k$ 到 $i_{k+1} h + i_{k+1}$ 对式(19) 两边积分, 并利用

$$[i_k h + i_k, i_{k+1} h + i_{k+1}) = [t_0, t_1) \text{ 可得}$$

$$\begin{aligned} & \int_{t_0}^{t_1} x(s)^T Qx(s) ds + \int_{k=1}^{i_{k+1} h + i_{k+1}} x(i_k h)^T K^T S Kx(i_k h) ds < V(t_0). \end{aligned} \tag{22}$$

定理证毕.

显然定理 2 的求解与综合界 μ_i ($i = 2, 3$) 相关. 通过下述寻优算法可获取在给定综合界的条件下的极小性能指标上界(式(13)) J^* .

算法 1 给定综合界 μ_i 的值, 设定 μ_i ($i = 2, 3$) 的搜索上下界分别为 μ_i^l 和 μ_i^u 以及增量为 $\Delta\mu_i$. 设定 $J^*(0)$ 为性能指标上界的初值且要求充分大.

1) 利用 $\mu_i = \mu_i + \Delta\mu_i$, 组合不同的 μ_i ($i = 2, 3$), 根据式(12) 建立相应的 LMI, 求取当式(12) 成立时对应的 K 以及最小 J^* . 如当 $J^*(\mu_i) < J^*(0)$, 则 $J^*(0) = J^*(\mu_i)$, $K(0) = K(\mu_i)$.

2) 返回步骤 1) 直至 $\mu_i^l = \mu_i = \mu_i^u$.

3) 输出 $J^*(0)$ 及 $K(0)$, 其中 $K(0)$ 是使系统取得性能指标上界 $J^*(0)$ 时的状态反馈增益矩阵.

由于上述算法的最终结果与 μ_i ($i = 2, 3$) 的范围选取有关, 只能求取次优解. 在实际仿真中需初步设定 μ_i^l, μ_i 和 μ_i^u 的大致区间, 然后找出敏感区间后再进一步细化搜索参数. 当使综合界 μ_i 在合理范围内按一定步长分别取样且迭代使用算法 1 时, 还可求得系统的最大允许综合界 μ_i^{\max} 及对应的性能指标上界与状态反馈增益矩阵.

4 基于网络 QoS 的 NCS 保性能控制

对于 NCS 的第 i 号控制回路, 给定控制性能指标上界 J_i^* 后, 可利用定理 2 及算法 1 来设计在给定的综合界 μ_i 条件下, 满足上述性能要求的保性能控制律. 基于网络 QoS 的 NCS 保性能控制是一种能够同时兼顾系统 QoP 和网络 QoS 的 NCS 综合控制方法, 其工作机理如下所述:

由定理 1 可知, 在可靠性 Pa 的条件下, NCS 的第 i 号控制回路的综合界 μ_i 是由闭环网络延迟的上界 $\sup(\tau_i)$, 网络丢包率的上界 d , 控制系统采样周期 h_i 等因素共同确定的. 当 h_i, P 及 d 确定后, 则 μ_i 主要取决于 $\sup(\tau_i)$. 对于 NCS 的第 i 号控制回路, 当已知 h_i, P 及 d 时, 令 $\sup(\tau_i)$ 在一个合理范围按一定步长分别取样 $\sup(\tau_{ij})$ (其中 i 表示控制回路编号, j 表示相应的取样编号), 由式(4) 将得到一个综合界的集合 $\{\mu_{ij}\}$. 对应各个综合界样本 μ_{ij} , 由定理 2 及算法 1 来设计满足控制性能约束 J_i^* 的控制器, 将会得到一个控制器集合 $\{c_{ij}\}$. 定义集合 $N = \{n_1, n_2, \dots, n_n\}$. 其中: $n_i = \{n_{ij}\}$, $n_{ij} = \{(\tau_{ij}, c_{ij})\}$, 下标 n 表示控制回路数目, μ_{ij} 是综合界样本, c_{ij} 表示当综合界取样在 μ_{ij} 时所设计的满足 J_i^* 约束的控制器.

从各个 n_i 中任选一个 n_{ij} 构成一个组合, 验证其中各个控制回路的综合界 μ_{ij} 样本对应的 $\sup(\tau_{ij})$ 组合, 是否满足网络资源(带宽)的可调度性条件(根据网络资源调度策略而定). 将所有满足可调度性条件的组合构成一个新的集合 $NS = \{ns_m\}$, 其中 ns_m

$= \{(1., c_{1.}), (2., c_{2.}), \dots, (n., c_{n.})\}$. 如果 $NS = \emptyset$, 则说明网络不可调度即网络过载, 此时应该返回对系统进行调整(如减少节点数, 降低控制性能约束等); 对 NS 中各个元素分别计算其能产生的理论负载, 找到与网络最佳负载最接近的一个组合, 即该 NCS 的最佳性能解 ns^* . 采用最佳性能解中各个回路对应的控制器 c_{ij}^* , 并以最佳性能解中各个回路的 μ_{ij}^* 样本对应的 $\sup(\tau_{ij}^*)$ 为网络带宽调度的约束条件. 由于满足网络资源的可调度性条件, 这些约束条件通过网络资源调度策略可以保证满足. 因此, 该最佳性能解 ns^* 在满足系统 QoP 约束条件下也使网络性能最佳, 即同时兼顾系统 QoP 和网络 QoS.

5 仿真实例

设 NCS 有 3 条控制回路, 各个控制回路的被控对象是具有如下参数的不确定系统(式(1)):

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & -0.1 \end{bmatrix}, B = \begin{bmatrix} 0 \\ 0.1 \end{bmatrix}, D = 0.1, \\ A = 0.01, B = 0.01.$$

设初始条件为 $x_1(t) = 0, x_2(t) = 0.2e^{t+1}, t \in [-1, 0]$. 表 1 中给出了该 NCS 相关的参数条件. 由定理 1 可知, 可靠性为 99% 的条件下, 各个控制回路的最大网络连续丢包个数 $M = 5$.

表 1 NCS 相关参数与条件

| 网络参数 | | | |
|---------------|-----------------------------|--------------------------|--------------------------|
| 带宽 B | 500 Kbps | | |
| 数据包长度 L | 1 000 bits | | |
| 最大网络容许负载 LM | 400 Kbps ($B * 80\%$) | | |
| 网络丢包率 | 0.1% | | |
| 控制回路参数 | | | |
| | The 1 st loop | The 2 nd loop | The 3 rd loop |
| 采样周期 T_i | 0.3 s | | |
| 性能指标上界 J | 10 | | |
| 性能参数 | $Q = 0.1 \times I, S = 0.1$ | | |

根据文献[13, 14] 中所提出的网络带宽调度算法, 可归纳网络带宽可调度性条件为: 单位时间内实际网络负载小于最大网络容许负载. 当采用主动丢弃超时的网络数据包的机制时, 则不会出现超时重发, 此时可忽略网络丢包对实际网络负载大小的影响, 因此可提出网络带宽的可调度性条件如下:

$$\text{load} = 2L \sum_{i=1}^m \frac{1}{\tau_i} < LM. \quad (23)$$

其中 LM 表示最大网络容许负载, load 表示网络的实际负载, m 表示控制回路数, τ_i 表示控制回路的闭环延迟样本. 利用 Matlab 的 LMI 工具箱进行仿真, 可以得到各控制回路的集合 N , 如表 2 所示. 本次仿

真中闭环延迟时间样本域定为 $[0.01\text{ s}, 90.08\text{ s}]$, 取
 样步长为 0.01 s .

表 2 集合 N 的仿真结果 (n_1, n_2, n_3)

| 序 号 | 实际 综合界 | 闭环延迟 上限样本 | 实际 性能指标 J | 控制器 K |
|--------|-----------|--------------|----------------|----------------------|
| 1 | 1.88 | 0.08 | 9.6204 | $[-0.7340 - 4.1903]$ |
| 2 | 1.87 | 0.07 | 9.1368 | $[-0.7236 - 4.1681]$ |
| 3 | 1.86 | 0.06 | 9.0693 | $[-0.7293 - 4.1935]$ |
| 4 | 1.85 | 0.05 | 9.0027 | $[-0.7352 - 4.2192]$ |
| 5 | 1.84 | 0.04 | 8.9369 | $[-0.7410 - 4.2451]$ |
| 6 | 1.83 | 0.03 | 8.8720 | $[-0.7470 - 4.2712]$ |
| 7 | 1.82 | 0.02 | 8.6336 | $[-0.7488 - 4.2864]$ |
| 8 | 1.81 | 0.01 | 8.5734 | $[-0.7548 - 4.3129]$ |

从各个 n_i 中任选一个 n_{ij} 构成一个组合 (组合中的
 延迟样本必须满足网络带宽调度策略中的谐调性
 条件, 即先选定某个回路的延迟界为基本延迟界
 n_{base} , 其余的回路延迟样本应分别是该基本延迟界
 的 2^i 倍, 其中 $i = 1, 2$); 然后验证其中各个控制回路

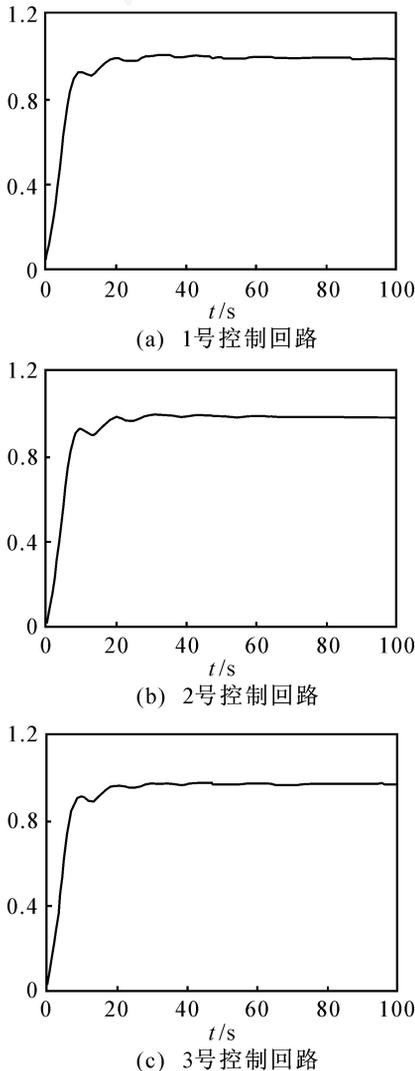


图 1 各控制回路的单位阶跃响应

的 i_j 组合是否满足网络带宽的可调度性条件 (23).
 将所有满足可调度性条件的组合构成一个新的集合
 NS , 经过计算可得 $NS = \{ns_1, ns_2, ns_3, ns_4, ns_5,$
 $ns_6, ns_7, ns_8, ns_9, ns_{10}, ns_{11}, ns_{12}\} = \{(n_{11}, n_{25}, n_{37}),$
 $(n_{11}, n_{27}, n_{35}), (n_{15}, n_{21}, n_{37}), (n_{15}, n_{27}, n_{31}), (n_{17},$
 $n_{21}, n_{35}), (n_{17}, n_{25}, n_{31}), (n_{15}, n_{27}, n_{38}), (n_{15}, n_{28},$
 $n_{37}), (n_{17}, n_{25}, n_{38}), (n_{17}, n_{28}, n_{35}), (n_{18}, n_{25}, n_{37}),$
 $(n_{18}, n_{27}, n_{35})\}$. 由式 (23) 中负载的计算方法, 经过
 验算可知, $ns_1 \sim ns_6$ 的理论负载均为 175 Kbps , ns_7
 $\sim ns_{12}$ 的理论负载均为 350 Kbps , 由前面分析可知
 $ns_7 \sim ns_{12}$ 均为最佳解, 可任意选用一组应用. 在实
 际中可根据对各个控制回路性能要求的期望程度,
 选择其中一组. 若选择 (n_{15}, n_{27}, n_{38}) , 则各控制回路
 分别采用 n_{15}, n_{27}, n_{38} 中的控制器来实现保性能控
 制, 以满足相应的综合性能指标 J ; n_{15}, n_{27}, n_{38} 中的
 闭环延迟上限样本则作为约束条件, 由网络带宽调
 度策略来满足. 在满足相应的综合界的条件下, 各个
 控制回路的单位阶跃响应如图 1 所示.

6 结 论

网络为 NCS 带来了诸多优点的同时也增加了
 系统设计的复杂度. 网络 QoS 的变化将直接影响着
 NCS 控制 QoP, 因此在设计 NCS 时必须考虑网络
 对控制系统的影响. 在综合考虑了网络延迟和丢包,
 而且被控对象存在参数时变不确定性的条件下, 本
 文研究了基于网络 QoS 的 NCS 保性能控制的问题,
 提出的设计策略能够兼顾控制 QoP 和网络
 QoS, 从而可以优化 NCS 总体性能.

参考文献 (References)

[1] Halevi Y, Ray A. Integrated communication and control systems: Part I — Analysis, Part II — Design [J]. ASME J of Dynamic Systems, Measurement and Control, 1988, 110(4): 367-373, 374-381.

[2] Zhang W, Branickym S, Philips S M. Stability of networked control system [J]. IEEE Control Systems Magazine, 2001, 21(1): 84-99.

[3] Walsh G C, Ye H, Linda Get, et al. Stability analysis of networked control systems [J]. IEEE Trans on Control Systems Technology, 2002, 10(3): 438-446.

[4] Chen Z P, Liu L, Zhang J F. Observer based networked control system with network-induced time delay [C]. IEEE Int Conf on Systems, Man and Cybernetics. Hague, 2004: 3333-3337.

[5] 白涛, 吴智铭, 杨根科. 网络化的控制系统 [J]. 控制理论与应用, 2004, 21(4): 586-590.
 (Bai T, Wu Z M, Yang G K. Networked control systems [J]. Control Theory & Applications, 2004, 21(4): 586-590.)

(下转第 984 页)

分析了吸引域的受限因素,预估的线性域与嵌入饱和函数幅值;然后定义不同意义的“最大”椭球不变集.在此基础上,引入设置初始状态法和参考形状集法,采用线性矩阵不等式求解.该算法简单、方便.仿真结果表明,这两种方法能够获得不太保守的估计,取得了较好的结果.

对机器人吸引域估计问题有影响的两个因素相互制约,如何合理地分配两者之间的影响权值,得到更大的吸引域估计将是进一步研究的问题.

参考文献(References)

- [1] Pittet C, Tarbouriech S, Burgat C. Stability regions for linear systems with saturating controls via circle and popov criteria[C]. Proc of 36th IEEE Conf on Decision and Control. San Diego, 1997: 4518-4523.
- [2] Hu T, Lin Z, Chen B M. An analysis and design method to linear systems subject to actuator saturation and disturbance[J]. Automatica, 2002, 38(2): 351-359.
- [3] Hu T, Lin Z. Composite quadratic Lyapunov functions for constrained control systems[J]. IEEE Trans on Automatic Control, 2003, 48(3): 440-450.
- [4] Llama M A, Kelly R, Santibaez V. Stable computed torque control of robot manipulators via fuzzy self-tuning[J]. IEEE Trans on Systems, Man, and Cybernetics Part B: Cybernetics, 2000, 30(1): 143-150.
- [5] Santibaez V, Kelly R, Llama M A. Global asymptotic stability of a tracking sectorial fuzzy controller for robot manipulators[J]. IEEE Trans on Systems, Man, and Cybernetics Part B: Cybernetics, 2004, 34(1): 710-718.
- [6] Chen B M, Lee T H, Peng K, et al. Composite nonlinear feedback control for linear systems with input saturation: Theory and application[J]. IEEE Trans on Automatic Control, 2003, 48(3): 427-439.
- [7] He Y J, Chen B M, Wu C. Composite nonlinear control with state and measurement feedback for general multivariable systems with input saturation[J]. Systems & Control Letters, 2005, 54(5): 455-469.
- [8] Cheng G, Peng K, Chen B M, et al. Improving transient performance in tracking general references using composite nonlinear feedback control and its application to high-speed XY-table positioning mechanism[J]. IEEE Trans on Industrial Electronics, 2007, 54(2): 1039-1051.
- [9] Sciacivco L, Siciliano B. Modelling and control of robot manipulators[M]. London: Springer, 2000.
- [10] Boukas E. Control of singular systems with random abrupt changes[M]. Berlin: Springer, 2008.
- (上接第 978 页)
- [6] 彭晨, 岳东. 网络环境下基于网络 QoS 的网络控制器优化设计[J]. 自动化学报, 2007, 33(2): 214-217.
(Peng C, Yue D. Network-based optimal controller design based on QoS[J]. Acta Automatica Sinica, 2007, 33(2): 214-217.)
- [7] 高金凤, 俞立. 不确定时滞系统的鲁棒绝对稳定性研究[J]. 控制与决策, 2004, 19(1): 114-116.
(Gao J F, Yu L. Study of absolute robust stability of uncertain time delay system[J]. Control and Decision, 2004, 19(1): 114-116.)
- [8] Chang S, Peng T. Adaptive guaranteed cost control of systems with uncertain parameters[J]. IEEE Trans on Automatic Control, 1972, 17(4): 474-483.
- [9] Yue D, Han Q L, Peng C. State feedback controller design of networked control systems[J]. IEEE Trans on Circuits and Systems II, 2004, 51(11): 640-644.
- [10] Yue D, Han Q L. Maximum allowable equivalent delay bound of networked control systems[C]. Proc of the 6th World Congress on Intelligent Control and Automation. Dalian, 2006: 4547-4550.
- [11] RFC2544-1999. Benchmarking methodology for network interconnect devices[S].
- [12] Xie L, Souza C E. Delay-dependent robust stability and stabilization of uncertain linear delay systems: A linear matrix inequality approach[J]. IEEE Trans on Automatic Control, 1997, 42(8): 1144-1148.
- [13] Hong Seong Park. Scheduling algorithm of data sampling times in the integrated communication and control systems[J]. IEEE Trans on Control System Technology, 1995, 3(2): 225-231.
- [14] 白涛, 吴智铭, 杨根科. 网络化控制系统带宽配置的一种新策略[J]. 自动化学报, 2004, 30(6): 961-967.
(Bai T, Wu Z M, Yang G K. A new scheme of bandwidth allocation for networked control systems[J]. Acta Automatica Sinica, 2004, 30(6): 961-967.)