第 24 卷 第 9 期　　控 制 与 决 策　　2009 年 9 月
Vol. 24 No. 9　　Control and Decision　　Sep. 2009

文章编号: 1001-0920(2009)09-1326-05

有界丢包网络环境下不确定系统的预测控制

魏善碧, 丁宝苍, 柴 毅
(重庆大学 自动化学院, 重庆 400044)

摘 要: 研究了有界丢包网络环境下的多包不确定系统的鲁棒预测控制. 首先在构建无限时域性能代价函数时,不同于传统预测控制方法,只考虑成功数据传输序列,并由此提出了两种鲁棒预测控制方法:将无限时域控制作用参数化为一个状态反馈控制律;或参数化为一个自由控制作用接一个状态反馈控制律. 与传统方法一样,采用性能代价函数作为 Lyapunov 函数证明了系统的闭环稳定性. 仿真实例验证了此方法的有效性.

关键词: 鲁棒预测控制; 不确定系统; 网络控制; 丢包
中图分类号: TP273　　**文献标识码**: A

Predictive control of uncertain systems under networked environment with bounded packet loss

WEI Shan-bi, DING Bao-cang, CHAI Yi
(College of Automation, Chongqing University, Chongqing 400044, China. Correspondence: WEI Shan-bi, E-mail: wsbmei@yahoo.com.cn)

Abstract: Robust model predictive control (MPC) for networked polytopic uncertain systems with packet loss is addresed. Unlike the traditional approach, when an infinite horizon performance cost is constructed, the sequence of the successful data transmissions is only considered. Two techniques are presented, one is parameterizing the infinite horizon control into a state feedback law, the other is into a free control followed by the single state feedback law. Like the traditional approach, the performance cost is utillzed as the Lyapunov function to prove colsed-looped stability. A simulation example shows the effectiveness of the proposed techniques.

Key words: Robust MPC; Uncertain system; Networked control; Packet loss

1 引 言

网络控制系统(NCS)是通过网络通道将空间上独立分布的系统组件(如传感器、执行器和控制器)相连,并使其相互通信的反馈控制系统. 与传统点对点线路连接相比,信道的使用降低了线耗和能耗,特别是降低整个系统的安装和维护工作量,而且提高了系统可靠性. 然而,由于信道介入也产生了一系列具有挑战意义的新问题,如量化、时延和丢包[1]. 很多文献针对这些问题的稳定性进行了讨论,并取得了一定的研究成果[2-4],但未关注网络预测控制综合方法.

本文首次针对丢包过程,考虑了鲁棒预测控制综合方法. 首先,采用文献[5]中的状态反馈,将其适当地推广到丢包过程. 为了简化分析,只采用二次 Lyapunov 函数,讨论任意有界丢包[3];然后,在单一状态反馈律[6]之前加入一个自由控制作用,该作用依赖于两次成功数据传输的时间间隔. 文献[5,6]属于预测控制中比较成熟的方法,均不考虑网络环境.

本文方法具有较好的扩展性,将此算法扩展到丢包依赖型 Lyapunov 函数和马尔可夫丢包过程[4](文献[7]给出了一种采用参数依赖型 Lyapunov 函数的预测控制方法,丢包依赖型 Lyapunov 函数情形与此类似),并结合文献[8,9],分别给出了多自由控制作用算法和离线鲁棒预测控制方法.

符号说明: I 是适当维数的单位矩阵; $x(i|k)$ 是在时刻 k 对未来时刻 $i \geq k$ 向量 x 的预测值; 在线性矩阵不等式(LMI)中,符号 $*$ 表示对称结构; $\mathbf{m} := \{1, 2, \cdots, m\}$, $\mathbf{q} := \{1, 2, \cdots, q\}$, $\mathbf{L} := \{1, 2, \cdots, L\}$.

2 问题描述

考虑如下多包不确定性描述时变线性系统:

收稿日期: 2008-09-18; **修回日期**: 2009-01-28.
基金项目: 国家自然科学基金项目(60504013,60874046); 重庆市自然科学基金项目(2008BB2049).
作者简介: 魏善碧(1981 —),男,四川富顺人,博士生,从事预测控制、网络控制等研究; 丁宝苍(1972 —),男,河北隆化人,教授,博士,从事预测控制、网络控制等研究.

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

其中

$$[A(k) \mid B(k)] \in \Omega,$$
$$\Omega = \mathrm{Co}\{[A_l \mid B_l], l \in \mathbf{L}\}, \tag{2}$$

$\mathrm{Co}\{\cdot\}$ 表示凸包; $u \in \mathbf{R}^m$ 和 $x \in \mathbf{R}^n$ 分别是控制输入和状态. 采用鲁棒预测控制方法控制该系统,传感器与控制器通过有限带宽信道进行网络通信[3]. 控制器与执行器为点对点连接,采样器为时间驱动,控制器为事件驱动. 在每一个时间步,数据通过单个包进行传输. 控制输入和状态必须满足

$$-\underline{u} \le u(j_1 + p) \le \overline{u},$$
$$-\underline{\Psi} \le \Psi x(j_1 + p + 1) \le \overline{\Psi}, \ \forall p \ge 0. \tag{3}$$

其中

$$\underline{u} := [\underline{u}_1, \underline{u}_2, \cdots, \underline{u}_m]^{\mathrm{T}}, \ \underline{u}_i > 0,$$
$$\overline{u} := [\overline{u}_1, \overline{u}_2, \cdots, \overline{u}_m]^{\mathrm{T}}, \ \overline{u}_i > 0, \ i \in \mathbf{m};$$
$$\underline{\Psi} := [\underline{\Psi}_1, \underline{\Psi}_2, \cdots, \underline{\Psi}_q]^{\mathrm{T}}, \ \underline{\Psi}_j > 0,$$
$$\overline{\Psi} := [\overline{\Psi}_1, \overline{\Psi}_1, \cdots, \overline{\Psi}_q]^{\mathrm{T}}, \ \overline{\Psi}_j > 0, \ j \in \mathbf{q};$$
$$\Psi \in \mathbf{R}^{q \times n};$$

j_1 是控制器从采样器成功接收第一个数据的时刻.

令 $\mathbf{J} := \{j_1, j_2, \cdots\}$ 为 $\{0, 1, \cdots\}$ 的子序列,表示从传感器到控制器成功数据传输时间点序列. $d := \max\limits_{j_k \in \mathbf{J}} (j_{k+1} - j_k)$ 为最大丢包上界. 如果 $j_1 > 1$,则初始输入设定为零,即 $u(i) = 0, 0 < i < j_1 < 1$.

如果 $j_{k+1} - j_k$, $\forall k > 1$,在有限集 $\mathbf{D} := \{1, 2, \cdots, d\}$ 上任意取值,则丢包为任意的. 本文只考虑任意丢包过程. 结合文献[4]中的“Theorem 9”和“Theorem 13”,可推广到马尔可夫丢包过程.

在网络鲁棒预测控制综合中,采用状态反馈控制器 $u(\cdot) = F(j_k)x(\cdot)$,其中 $F(j_k)$ 在每个 j_k 时刻进行优化. 给出两种不同的方法:不带自由控制作用(方法 1)和带一个自由控制作用(方法 2).

对于方法 1,执行控制输入为

$$u(l) = u(j_k) = F(j_k)x(j_k),$$
$$j_k < l < j_{k+1} - 1. \tag{4}$$

因此,闭环系统变换为

$$x(l+1) = A(l)x(l) + B(l)F(j_k)x(j_k).$$
$$j_k < l < j_{k+1} - 1, \ j_k \in \mathbf{J}. \tag{5}$$

方法 1 的目标是寻找式(4)使(5)达到原点 $x = 0$,且在每个 j_k 时刻求解

$$\min_{F(j_k)} \max_{[A(j_k+p) \mid B(j_k+p)] \in \Omega, j_{k+1} \in \mathbf{J}} J_x(j_k). \tag{6a}$$

$$\text{s.t.} \ -\underline{u} \le u(j_k + p \mid j_k) \le \overline{u},$$
$$-\underline{\Psi} \le \Psi x(j_k + p + 1 \mid j_k) \le \overline{\Psi},$$
$$\forall p \ge 0; \tag{6b}$$

$$x(j_k + p + 1 \mid j_k) =$$
$$A(j_k + p)x(j_k + p \mid j_k) +$$
$$B(j_k + p)u(j_k + p \mid j_k), \ \forall p \ge 0; \tag{6c}$$
$$u(j_{k+i} + h \mid j_k) = u(j_{k+1} \mid j_k) =$$
$$F(j_k)x(j_{k+1} \mid j_k),$$
$$j_{k+i} < h < j_{k+i+1} - 1, \ i > 0. \tag{6d}$$

其中

$$J_\infty(j_k) = \sum_{i=1}^{\infty} [\| x(j_{k+1} \mid j_k) \|_Q^2 +$$
$$\| u(j_{k+1} \mid j_k) \|_R^2];$$

$Q, R > 0$ 为权矩阵. 在采样时刻执行控制律(4),在 j_{k+1} 时刻再一次求解问题(6).

对于方法 2,实际控制输入为

$$u(l) = u(j_k), \ j_k < l < j_{k+1} - 1. \tag{7}$$

从优化的自由度来看,该实际控制输入是“自由的”. 因此,闭环系统变换为

$$x(l+1) = A(l)x(l) + B(l)u(j_k),$$
$$j_k < l < j_{k+1} - 1, \ j_k \in \mathbf{J}. \tag{8}$$

方法 2 的目标是寻找控制律(7)使(8)能够达到原点 $x = 0$,且在每个 j_k 时刻求解

$$\min_{u(J_k), F(j_k)} \max_{[A(j_k+p) \mid B(j_k+p)] \in \Omega, j_{k+i} \in \mathbf{J}} J_\infty(j_k). \tag{9a}$$

$$\text{s.t. 式(6b) 和(6c)}; \tag{9b}$$
$$u(j_{k+i} + h \mid j_k) = u(j_k),$$
$$0 < h < j_{k+1} - j_k - 1; \tag{9c}$$
$$u(j_{k+i} + h \mid j_k) =$$
$$u(j_{k+i} \mid j_k) = F(j_k)x(j_{k+i} \mid j_k),$$
$$j_{k+i} < h < j_{k+i+1} - 1, \ i > 1. \tag{9d}$$

在采样时刻执行控制律(7),在 j_{k+1} 时刻再一次求解问题(9).

3　不带自由控制作用的鲁棒预测控制

为了得到性能目标的上界和求解式(6),选取

$$V(j_k, j_{k+i}) = x(j_{k+i} \mid j_k)^{\mathrm{T}} P x(j_{k+i} \mid j_k) \tag{10}$$

为 Lyapunov 函数,其中 P 为对称正定矩阵. 鲁棒稳定性约束为

$$V(j_k, j_{k+i+1}) - V(j_k, j_{k+i}) \le$$
$$-\| x(j_{k+1} \mid j_k) \|_Q^2 - \| u(j_{k+1} \mid j_k) \|_R^2,$$
$$\forall j_{k+i+1} - j_{k+i} \in \mathbf{D}, \ \forall i > 0. \tag{11}$$

引理 1　假设存在标量 γ,使对称正定矩阵 $Q = \gamma P^{-1}$ 和矩阵 $Y = F(j_k)Q$ 满足

$$\begin{bmatrix} Q & * & * & * \\ \mathbf{A}_{t+1}^{l_t \cdots l_1 l_0} Q + \mathbf{B}_{t+1}^{l_t \cdots l_1 l_0} Y & Q & * & * \\ \mathbf{R}^{1/2} Q & 0 & \gamma I & * \\ \mathbf{R}^{1/2} Y & 0 & 0 & \gamma I \end{bmatrix} \ge 0,$$
$$\forall l_0, l_1, \cdots, l_t \in \mathbf{L}, \ \forall t+1 \in \mathbf{D}. \tag{12}$$

其中

$$\mathbf{A}_{t+1}^{l_t\cdots l_1 l_0}:=\prod_{s=0}^{t}\mathbf{A}_{l_{t-s}},\quad \mathbf{B}_{t+1}^{l_t\cdots l_1 l_0}:=\sum_{r=0}^{t}\Big(\prod_{s=0}^{t-r-1}A_{l_{t-s}}\Big)B_{l_r}.$$

则不等式(11)成立.

证明 根据式(6),如果

$$(\mathbf{A}_{t+1}(j_{k+i})+\mathbf{B}_{t+1}(j_{k+i})F(j_k))^{\mathrm{T}}P(\mathbf{A}_{t+1}(j_{k+i})+\mathbf{B}_{t+1}(j_{k+i})F(j_k))-P\leqslant -Q-F(j_k)^{\mathrm{T}}RF(j_k),$$
$$\forall t+1\in\mathbf{D},\ \forall i\geqslant 0. \tag{13}$$

其中

$$\mathbf{A}_{t+1}(j_{k+i}):=\prod_{s=0}^{t}A(j_{k+i}+t-s),$$
$$\mathbf{B}_{t+1}(j_{k+i}):=\sum_{r=0}^{t}\Big(\prod_{s=0}^{t-r-1}A(j_{k+i}+t-s)\Big)B(j_{k+i}+r).$$

则约束(11)得到满足.

在不等式(13)两侧同乘以 $\gamma^{1/2}Q$,并应用 Schur 补,式(13)就等价于

$$\begin{bmatrix} Q & * & * & * \\ \mathbf{A}_{t+1}(j_{k+i})Q+\mathrm{B}_{t+1}(j_{k+i})Y & Q & * & * \\ R^{1/2}Q & 0 & \gamma I & * \\ R^{1/2}Y & 0 & 0 & \gamma I \end{bmatrix}\geqslant 0,$$
$$\forall t+1\in\mathbf{D}. \tag{14}$$

定义

$$[\mathbf{A}_{t+1}(j_{k+1})\mid \mathbf{B}_{t+1}(j_{k+i})]:=$$
$$\mathrm{Co}\{[\mathbf{A}_{t+1}^{l_t\cdots l_1 l_0}\mid \mathbf{B}_{t+1}^{l_t\cdots l_1 l_0}],\ \forall l_0,l_1,\cdots,l_t\in\mathbf{L}\}.$$

由于多包描述为凸的,不等式(14)等价于(12).

对于稳定闭环系统,有

$$\lim_{i\to\infty}x(j_{k+i}\mid j_k)=0,$$
$$\lim_{i\to\infty}u(j_{k+i}\mid j_k)=0,$$
$$\lim_{t\to\infty}V(j_{k+i}\mid j_k)=0.$$

将式(11)从 $i=0$ 到 $i=\infty$ 求和,可以得到 $J_\infty(j_k)\leqslant V(j_k\mid j_k)$. 定义

$$V(j_k\mid j_k)\leqslant\gamma. \tag{15}$$

代入定理 1,若

$$\begin{bmatrix} 1 & * \\ x(j_k) & Q \end{bmatrix}\geqslant 0, \tag{16}$$

则式(12)成立. □

引理 2 假设存在标量 γ,对称矩阵 Z,Γ,Q 和 Y,使得

$$\begin{bmatrix} Z & * \\ Y^{\mathrm{T}} & Q \end{bmatrix}\geqslant 0,\ Z_{jj}\leqslant u_{j,\inf}^2,\ j\in\mathbf{m}; \tag{17}$$

$$\begin{bmatrix} \Gamma & * \\ \Psi\mathbf{A}_{t+1}^{l_t\cdots l_1 l_0}Q+\Psi\mathbf{B}_{t+1}^{l_t\cdots l_1 l_0}Y & Q \end{bmatrix}\geqslant 0,$$
$$\forall l_0,l_1,\cdots,l_t\in\mathbf{L},\ \forall t+1\in\mathbf{D},$$
$$\Gamma_{ss}\leqslant\Psi_{s,\inf}^2,\ s\in\mathbf{q} \tag{18}$$

和式(12),(16)成立. 其中: $u_{j,\inf}^2=\min(\underline{u}_j,\overline{u}^j)$, $\Psi_{s,\inf}^2=\min(\underline{\Psi}_s,\overline{\Psi}_s)$, $Z_{ij}(\Gamma_{ss})$ 是 $Z(\Gamma)$ 中第 $j(s)$ 个对角元素,则式(6b)成立.

证明 在 j_k 时刻同时满足式(12)和(16),结合文献[3,5]的结果可得

$$\begin{bmatrix} 1 & * \\ x(j_k+p\mid j_k) & Q \end{bmatrix}\geqslant 0,\ \forall p\geqslant 0, \tag{19}$$

因此,可处理控制输入约束和状态约束,并可证式(17)使(6)中的控制输入约束满足[4].

针对状态约束,定义 ξ_s 为 q 维单位矩阵第 s 行. 利用式(6c),(6d),(19)可以得到

$$\min_{t\geqslant 0}|\xi_s\Psi x(j_{k+i}+t+1\mid j_k)|^2=$$
$$\min_{t\geqslant 0}|\xi_s\Psi[\mathbf{A}_{t+1}(j_{k+i})+$$
$$\mathbf{B}_{t+1}(j_{k+i})F(j_k)]Q^{1/2}Q^{-1/2}x(j_{k+i}\mid j_k)|^2\leqslant$$
$$\min_{t\geqslant 0}|\xi_s\Psi[\mathbf{A}_{t+1}(j_{k+i}+\mathbf{B}_{t+1}(j_{k+1})F_{j_k})]Q^{1/2}|^2.$$

假设存在对称矩阵 Γ,使得

$$\Gamma-\Psi[\mathbf{A}_{t+1}(j_{k+i})+\mathbf{B}_{t+1}(j_{k+i})F(j_k)]Q[\mathbf{A}_{t+1}(j_{k+i})+\mathbf{B}_{t+1}(j_{k+i})F(j_k)]^{\mathrm{T}}\Psi^{\mathrm{T}}\geqslant 0,$$
$$\Gamma_{ss}<\Psi_{s,\inf}^2,\ s\in\mathbf{q}, \tag{20}$$

则式(6b)成立. 应用 Schur 补和多包描述的凸性,可知不等式(20)等价于(18). □

总之,问题(6)可以近似处理为以下 LMI 优化问题:

$$\min_{\gamma,Q,Y,Z,\Gamma}\gamma,$$
$$\text{s.t. 式(12),(16)}\sim\text{(18)}. \tag{21}$$

定理 1[5] 假设式(21)在 j_1 时刻可行,则滚动执行控制律(4)(其中 $F(j_k)=YQ^{-1}$)保证式(3)成立且闭环系统渐近稳定.

4 带一个自由控制作用的鲁棒预测控制

对于所有 $i\geqslant 1$,为了得到性能目标的上限和求解式(9),选取式(10)为 Lyapunov 函数,式(11)为鲁棒稳定性约束条件. 引理 1 可以直接使用.

对于稳定的闭环系统,将式(11)从 $i=1$ 到 $i=\infty$ 求和,得到

$$J_\infty(j_k)\leqslant\|x(j_k)\|_Q^2+\|u(j_k)\|_R^2+V(j_k,j_{k+1}).$$

定义

$$V(j_k,j_{k+1})\leqslant\gamma, \tag{22}$$
$$\|u(j_k)\|_R^2\leqslant\gamma_1, \tag{23}$$

其中 $\gamma_1>0$ 为一标量.

式(22)与 $x(j_{k+i}\mid j_k)^{\mathrm{T}}Q^{-1}x(j_{k+i}\mid j_k)\leqslant 1$ 是等价的,其中

$$x(j_{k+i}\mid j_k)=\mathbf{A}_{j_{k+1}-j_k}(j_k)x(j_k)+$$
$$\mathbf{B}_{j_{k+1}-j_k}(j_k)u(j_k).$$

因此,应用多包描述的凸性和引理 1 中对 Q 的定义,当

$$\begin{bmatrix} 1 & * \\ \mathbf{A}_{l_{t+1}\cdots l_1 l_0} x(j_k) + \mathbf{B}_{l_{t+1}\cdots l_1 l_0} u(j_k) & Q \end{bmatrix} \geq 0,$$

$$\forall l_0, l_1, \cdots, l_t \in \mathbf{L}, \quad \forall t+1 \in \mathbf{D} \tag{24}$$

成立时,式(22)成立.

式(23)等价于

$$\begin{bmatrix} 1 & * \\ R^{1/2} u(j_k) & I \end{bmatrix} \geq 0. \tag{25}$$

引理 3　假设存在标量 γ,向量 $u(j_k)$,对称矩阵 Z,$\boldsymbol{\Gamma}$,Q 和 Y,使得

$$-\underline{u} \leq u(j_k) \leq \overline{u}; \tag{26}$$

$$-\underline{\Psi} \leq \Psi \mathbf{A}_{l_{t+1}\cdots l_1 l_0} x(j_k) + \Psi \mathbf{B}_{l_{t+1}\cdots l_1 l_0} u(j_k) \leq \overline{\Psi},$$

$$\forall l_0, l_1, \cdots, l_t \in \mathbf{L}, \quad \forall t+1 \in \mathbf{D} \tag{27}$$

和式(3),(17),(18),(24)成立,则式(6b)成立.

证明　当 $0 \leq p \leq j_{k+1} - j_k - 1$ 时,式(26)和(27)保证(6b)成立.根据引理 2,当 $0 \leq p \leq j_{k+1} - j_k - 1$ 时,式(3),(17),(18),(24)保证(6b)成立. □

这样,问题(19)可近似处理为以下 LMI 优化问题:

$$\min_{\gamma, Q, Y, Z, \boldsymbol{\Gamma}} \gamma,$$

$$\text{s.t. 式(3),(17),(18),(24),(27).} \tag{28}$$

定理 2[6]　假设式(28)在 j_1 时刻可行,则滚动地执行控制律(7)保证了式(3)成立以及闭环系统渐近稳定.

注 1　若选取 $u(j_k) = F(j_k) x(j_k)$,则式(17)～(19)保证了(24),(26),(27)成立.故相比于(21),(28)更易有解,且能得到更加优化的控制作用,即在反馈控制律之前加入一个自由控制作用可以改进可行性和最优性.

LMI 优化问题(21)或(28)的复杂度是时间多项式,采用最快的内点法时,与 $\mathbf{K}^2\mathbf{L}$ 成正比.其中:$\mathbf{K}$ 是标量变量数,$\mathbf{L}$ 是全局 LMI 系统[2]的行数.参量 $\mathbf{K}$ 在式(21)中为

$$\mathbf{K} = 1 + nm + \frac{1}{2}n(n+1) + \frac{1}{2}m(m+1) + \frac{1}{2}q(q+1),$$

在式(28)中为

$$\mathbf{K} = 2 + nm + \frac{1}{2}n(n+1) + \frac{1}{2}m(m+1) + \frac{1}{2}q(q+1),$$

参量 $\mathbf{L}$ 在式(21)中为

$$\mathbf{L} = (4n + m + q)\sum_{t=1}^{d} L^t + 2n + 2m + q + 1,$$

在式(28)中为

$$\mathbf{L} = (5n + 3m + q + 1)\sum_{t=1}^{d} L^t + n + 5m + q + 1.$$

当 $n = m = q$ 时,式(28)的计算复杂度为式(21)的 1.5 倍.

5　数值仿真

考虑

$$x(k+1) = \beta\left\{\begin{bmatrix} 1 & 0.2 \\ \rho(k) & 1 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} u(k)\right\}.$$

其中:丢包上限为 $d = 3$,$\rho(k) \in [0.5, 1.5]$ 为不确定参数,$\beta > 0$ 为一常量,约束 $|u| \leq 2$.取 $Q = I$,$R = 1$.

对于式(21)或(28)提出的网络鲁棒预测控制方法,定义吸引域 **P** 为使闭环系统渐近稳定的 $x(j_1)$ 的所在区域.对于所有的 $x(j_1) \in \mathbf{P}$,存在可行控制序列使闭环系统渐近稳定.**P** 是凸的,通常为非椭圆形.对于 $\beta = 1$,采用式(21)所对应的吸引域 **P** 如图 1 中点线区域,采用式(28)所对应的吸引域 **P** 如图 1 中实线区域.随机选取了这些吸引域中 300 个点,并将其作为 $x(j_1)$.求解式(21) 300 次耗时 5/3 min,求解式(28) 300 次耗时 7/3 min.

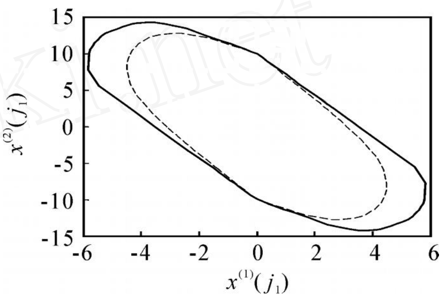

图 1　吸引域

选取 $x(0) = [-4 \quad 5]^{\mathrm{T}}$ 和 $j_1 = 0$.当 $\beta \leq 1.01$ 时,式(21)存在可行解;当 $\beta \leq 1.06$ 时,式(28)存在可行解.进一步选取

$$\rho(k) = 1 + 0.5\sin(k),$$

$$j_{k+1} = j_k + 2.5 + 0.5(-1)^k.$$

对于 $\beta = 1.01$ 时,采用式(21)所对应的闭环状态轨迹为图 2 中的虚线;对于 $\beta = 1.06$ 时,采用式(28)所对应的闭环状态轨迹为图 2 中的实线.

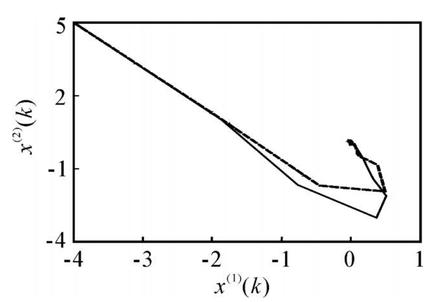

图 2　闭环状态轨迹

由图 2 可知,两种控制方法皆可使闭环系统达到渐近稳定.由图 1 可知,方法 2 的吸引域大于方法 1.

仿真是基于 Matlab5.3 的 LMI 工具箱完成的[10]. 硬件平台为 1.5G PentiumV CPU, 256M Memory.

6 结 论

本文对网络环境下带任意有界丢包的多包描述系统的鲁棒预测控制进行了研究. 将文献[4,6]中的基本方法进行了扩展, 综合了不带自由控制作用和带一个自由控制作用的鲁棒预测控制方法. 由本文方法可方便地得到带多个自由控制作用的鲁棒预测控制和离线型鲁棒预测控制.

参考文献(References)

[1] Goodwin G C, Haimovich H, Quevedo D E, et al. A moving horizon approach to networked control system design[J]. IEEE Trans on Automatic Control, 2004, 49(9): 1427-1445

[2] Fu M, Xie L. The sector bound approach to quantized feedback control[J]. IEEE Trans on Automatic Control, 2005, 50(11): 1689-1711.

[3] Yu M, Wang L, Chu T, et al. Stabilization of networked control systems with data packet dropout and network delays via switching system approach[C]. Proc of the IEEE Conf on Decision and Control. Atlantis: Paradise Island, Bahamas, 2004: 3539-3544.

[4] Xiong J, Lam J. Stabilization of linear systems over networks with bounded packet loss[J]. Automatica, 2007, 43(5): 80-87.

[5] Kothare M V, Balakrishnan V, Morai M. Robust constrained model predictive control using linear matrix inequalities[J]. Automatica, 1996, 32(10): 1361-1379.

[6] Lu Y, Arkun Y. Quasi-min-max MPC algorithms for LPV systems[J]. Automatica, 2000, 36(4): 527-540.

[7] Mao W. Robust stabilization of uncertain time-varying discrete systems and comments on "an improved approach for constrained robust model predictive control"[J]. Automatica, 2003, 39(6): 1109-1112.

[8] Schuurmans J, Rossiter J A. Robust predictive control using tight sets of predicted states[J]. IEEE Proc on Control Theory and Application, 2000, 47(1): 13-18.

[9] Wan Z, Kothare M V. An efficient off-line formulation of robust model predictive control using linear matrix inequalities[J]. Automatica, 2003, 39: 837-846.

[10] Gahinet P, Nemirovski A, Laub A J, et al. LMI control toolbox for use with matlab[Z]. The Math Works Inc, 1995.

(上接第 1325 页)

[6] 董广智, 柳军飞, 齐璇. 一种反应式 SPM 及其动态语义 XYZ 表示[J]. 软件学报, 2005, 16(11): 1876-1885.
(Dong G Z, Liu J F, Qi X. A kindof reactive SPM and the expression of its dynamic semantics with XYZ[J]. J of Software, 2005, 16(11): 1876-1885.)

[7] 史忠植, 董明楷, 蒋运承, 等. 语义 Web 的逻辑基础[J]. 中国科学, 2004, 34(10): 1123-1138.
(Shi Z Z, Dong M K, Jiang Y C, et al. Logic base for semantic web[J]. Science in China, 2004, 34(10): 1123-1138.)

[8] Dzikovska M O, Allen J F, Swift M D. Linking semantic and knowledge representations in a multi-domain dialogue system[J]. J of Logic and Computation, 2008, 18(3): 405-430.

[9] 王坚强. 一种多准则纯语言群决策方法[J]. 控制与决策, 2007, 22(5): 545-553.
(Wang J Q. Multi-criteria group decision-making approach with linguistic assessment information[J]. Control and Decision, 2007, 22(5): 545-553.)

[10] 王素芬, 杨保安, 封均康. 基于描述逻辑的面向管理决策的异构知识的表示[J]. 控制与决策, 2006, 21(4): 462-469.
(Wang S F, Yang B A, Feng J K. Representation of isomeric knowledge on management decision problem based on description logics[J]. Control and Decision, 2006, 21(4): 462-469.)

[11] 董明楷, 张海俊, 史忠植. 基于动态描述逻辑的主体模型[J]. 计算机研究与发展, 2004, 41(5): 780-786.
(Dong M K, Zhang H J, Shi Z Z. An agent model based on dynamic description logic[J]. J of Computer Research and Development, 2004, 41(5): 780-786.)