文章编号: 1001-0920(2006)06-0631-05

基于终端凸集约束的新MPC控制器

张群亮, 席裕庚
(上海交通大学 自动化系, 上海 200030)

摘 要: 针对一类离散系统, 研究了带有终端约束凸集的MPC控制问题. 通过离线设计一组椭圆不变集, 并将其组合成一个终端约束凸集, 其中凸集参数作为在线优化变量. 在线运算时, 根据实际的终端状态即时地选择合适的终端不变集, 从而有效地扩大了系统的可行域. 分别给出了设计MPC控制器的离线和在线算法, 仿真实例说明了该方法的有效性.

关键词: MPC控制器; 终端约束; 不变集
中图分类号: TP13 **文献标识码**: A

New MPC Controller Based on a Terminal Convex Set Constraint

ZHANG Qun-liang, XI Yu-geng
(Department of Automation, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200030, China. Correspondent: ZHANG Qun-liang, E-mail: hbqlzhang@sjtu.edu.cn)

Abstract: For a class of discrete systems, the problem of MPC with terminal constraint convex set is investigated. A group of ellipsoidal invariant sets is designed off-line, and then constitutes a terminal constraint convex set whose coefficients are taken as on-line optimization variables. During on-line computation, an appropriate invariant ellipsoid is chosen from the terminal convex set according to the real state, which enlarges the initial feasible region efficiently. Both the off-line and the on-line algorithms are presented to design MPC controllers. A simulation example shows the validity of the proposed approach.

Key words: MPC controllers; Terminal constraints; Invariant sets

1 引 言

模型预测控制(MPC)算法因其具有鲁棒性好、约束处理能力强等特点而受到控制界的广泛关注[1,2]. 在过去几十年里, 许多学者对此做了研究, 取得了非常丰富的成果. 文献[3]研究了预测控制在串联生产过程的应用问题; 而文献[4]研究了一类广义预测控制算法的稳定性问题. 实际中, 由于预测控制算法在线优化的是一个有限时域的、控制时域之外的、状态未知的性能指标, 使得预测控制的稳定性难以保证.

为了证明预测控制算法的稳定性, 需要在原优化问题上添加一些必要的约束, 如增加终端状态约束[5~7]. 这样, 在控制时域内, 控制变量采用优化序列; 而在控制时域之外, 采用一个局部的稳定反馈律将状态驱动到稳态值. 因为终端状态约束集的大小直接影响着系统的可行域, 所以希望终端约束集尽可能的大, 这样便可以获得大的可行域. 目前, 主要有两种方法来扩大终端约束集, 一种是文献[8]提出的离线优化终端约束矩阵的方法, 另一种是文献[9]提出的在线优化终端矩阵的方法. 虽然[8]通过离线优化终端矩阵, 可以在一定程度上扩大终端约束集, 但是当该集合离线设计完毕, 便不能在线根据实际的终端状态灵活地进行调整, 从而使得到的结果比较保守. 而[9]提出的在线优化终端矩阵的方法虽然可以在线实时地改变终端约束集的大小, 但在优化终端约束矩阵时, 需要在线求解大量的不等式约束,

收稿日期: 2005-05-06; **修回日期**: 2005-08-08.
基金项目: 国家自然科学基金项目(60274013, 60474002); 上海市科技发展基金项目(04DZ11008).
作者简介: 张群亮(1978—), 男, 河北隆尧人, 博士生, 从事约束预测控制理论及应用的研究; 席裕庚(1946—), 男, 上海人, 教授, 博士生导师, 从事预测控制、动态大系统等研究.

所以常常导致较重的在线负担. 当系统维数较高时, 过重的在线计算会导致不可行问题.

针对此问题, 本文提出了一种新的基于终端凸集的MPC控制算法. 该方法首先针对不同的系统状态值, 离线设计一组终端状态约束集, 然后将这些约束集组合成终端约束凸集, 并将凸集参数作为在线优化参数. 在线运算时, 系统根据终端状态的真实值, 从终端凸集当中选出最合适的终端状态约束集, 从而扩大系统的可行域. 由于系统终端矩阵和局部控制器所满足矩阵不等式组都是离线设计的, 在线优化只增加很少的几个凸集参数. 因此, 该算法既可以扩大系统的终端约束集, 同时又不增加过大的在线计算量.

2 预备知识

考虑如下线性离散系统:

$$x(k+1) = Ax(k) + Bu(k). \tag{1}$$

其中: A 和 B 分别是定常矩阵, $x(k) \in R^n$ 和 $u(k) \in R^m$ 分别是系统的状态和输入, 且输入满足如下约束:

$$|u(k)|_r \leq u_{\max}, \tag{2}$$

其中 $|\cdot|_r$ 表示向量第 r 个元素的绝对值.

对于上述系统, 考虑如下形式的MPC控制器C1:

$$\begin{aligned}
\min_{U(k)} J(k) = & \sum_{i=0}^{N-1} [\|x(k+i|k)\|_Q^2 + \\
& \|u(k+i|k)\|_R^2] + \\
& \|x(k+N|k)\|_P^2, \\
\text{s.t.}\ & x(k+i+1|k) = \\
& Ax(k+i|k) + Bu(k+i|k), \\
& u(k+i)|k) \in U, \\
& U(k) = [u(k|k)\quad u(k+1|k)\cdots \\
& u(k+N-1|k)], \\
& x(k+N|k) \in \Psi.
\end{aligned} \tag{3}$$

其中: $Q > 0, R > 0$ 分别为状态和输入的权矩阵, U 为满足式(2)约束的控制输入集合, 而 Ψ 为系统终端状态约束集合, 其定义如下:

$$\Psi = \{x(k+N|k) \in R^n | x^{\mathrm{T}}(k+N|k)Px(k+N|k) \leq 1\}. \tag{4}$$

其中 P 为满足如下条件的正定对称矩阵[7]:

$$(A+BK)^{\mathrm{T}}P(A+BK) - P \leq -Q - K^{\mathrm{T}}PK, \tag{5}$$

$$(KP^{-1}K^{\mathrm{T}})_{ii} \leq u_{\max}^2,\quad i = 1,2,\cdots,m. \tag{6}$$

如果有满足式(5)和(6)的 P, K 存在, 则根据文献[10], 当 k 时刻C1有最优解

$$U^*(k) = [u^*(k|k)\quad u^*(k+1|k)\quad \cdots \quad u^*(k+N-1|k)]$$

时, 其 $k+1$ 时刻的一个可行解为

$$U(k+1) = [u^*(k+1|k)\quad \cdots \quad u^*(k+N-1|k)\quad Kx^*(k+N|k)].$$

由式(3)中可以看出, C1本质上是一个带有终端状态约束集 Ψ 的有限时域优化问题. 在实际应用中, 希望终端状态约束集 Ψ 尽可能大, 这样就会获得大的可行域.

3 带有终端凸集约束的MPC控制器

在上一节分析的基础上, 给出一种带有终端凸集约束的MPC控制算法. 该算法分为两部分: 首先离线计算出终端凸集约束的各个顶点, 然后将计算出的各个顶点组合成一个凸不变集, 应用到在线优化中. 下面首先给出离线算法.

Step 1: 从 $i = 1$ 开始依次选择一个 n 维列向量 $x_i = (I_{n\times n})_i, i = 1,\cdots,n$, 其中 $I_{n\times n}$ 表示 n 维的单位矩阵.

Step 2: 给定 $r > 0$, 求解如下的LMI优化问题:

$$\min_{X_i, Y_i, Z_i, \alpha_i} \alpha_i,$$

$$X_i \geq rI, \tag{7}$$

$$\begin{bmatrix} \alpha_i & x_i^{\mathrm{T}} \\ x_i & X_i \end{bmatrix} \geq 0, \tag{8}$$

$$(Z_i)_{rr} \leq u_{\max}^2,\ \begin{bmatrix} Z_i & Y_i \\ Y_i^{\mathrm{T}} & X_i \end{bmatrix} \geq 0, \tag{9}$$

$$\begin{bmatrix} X_i & (AX_i+BY_i)^{\mathrm{T}} & X_iQ^{1/2} & Y_i^{\mathrm{T}} \\ AX_i+BY_i & X_i & 0 & 0 \\ Q^{1/2}X_i & 0 & I & 0 \\ Y_i & 0 & 0 & R^{-1} \end{bmatrix} \geq 0. \tag{10}$$

其中: X_i 和 Z_i 分别为正定对称矩阵, Y_i 和 α_i 分别为具有适当维数的矩阵和标量.

Step 3: 如果Step 2中的优化问题有可行解, 则增大 r 的值重新计算; 否则缩小 r 的初始值, 返回Step 2求解. 循环此过程直至 r 达到最大值.

Step 4: 判断 $i > n$ 是否成立, 如果是则退出; 相反, 令 $i = i+1$, 返回Step 1继续.

注 1 根据文献[10]可知, 式(5)和(6)成立, 当且仅当式(9)和(10)成立. 其中 $P = X^{-1}, K = YX^{-1}$. 而式(7)是为了使得 X_i 尽可能的大. 另外, 在Step 2中优化问题有解的情况下, 可以得到 α_i 的最小值 $\alpha_{\min}$, 这样根据条件(8)可知 $x_i^{\mathrm{T}}X_i^{-1}x_i \leq \alpha_{\min}$. 将该式两边同时除以非零正数 $\alpha_{\min}$, 并令 $\hat{x}_i = \alpha_{\min}^{1/2}(I_{n\times n})_i$, 则有 $\hat{x}_i^{\mathrm{T}}X_i^{-1}\hat{x}_i \leq 1$ 成立, 因此, $\alpha_{\min}^{1/2}$ 可看作是状态 $\hat{x}_i$ 中的最大元素值.

将离线计算出的 $X_i (i = 1,\cdots,n)$ 组成如下的终端约束凸集:

$$T=\{x(k+N|k)\in R^n \mid x^{\mathrm{T}}(k+N|k)\times \Big(\sum_{i=1}^{n}\gamma_i(k)X_i\Big)^{-1}x(k+N|k)\le 1\}. \tag{11}$$

在线优化时, 可将终端凸集约束转化为如下形式:

$$\begin{bmatrix} 1 & x^{\mathrm{T}}(k+N|k) \\ x(k+N|k) & X_n+\sum_{i=1}^{n-1}\gamma_i(k)(X_i-X_n)\end{bmatrix}\ge 0, \tag{12}$$

$$\sum_{i=1}^{n-1}\gamma_i(k)\le 1,\ \gamma_i(k)\ge 0, \tag{13}$$

其中 $\gamma_n(k)=1-\sum_{i=1}^{n-1}\gamma_i(k)$. 另外, 根据式(1), N 步状态预测值可通过下面的关系计算得出:

$$\begin{bmatrix} x(k+1|k) \\ \vdots \\ x(k+N|k)\end{bmatrix}=\begin{bmatrix} A \\ \vdots \\ A^N\end{bmatrix}x(k|k)+\begin{bmatrix} B & 0 & \cdots & 0 \\ \vdots & & \ddots & \\ A^{N-1}B & & \cdots & B\end{bmatrix}\begin{bmatrix} u(k|k) \\ \vdots \\ u(k+N-1|k)\end{bmatrix}, \tag{14}$$

可等价地写为

$$\begin{bmatrix} \tilde{x}(k) \\ x(k+N|k)\end{bmatrix}=\begin{bmatrix} \tilde{A} \\ A^N\end{bmatrix}x(k|k)+\begin{bmatrix} \tilde{B} \\ \tilde{B}_N\end{bmatrix}\tilde{u}(k). \tag{15}$$

这样, 在线实施控制时只需求解如下的优化问题以获得控制律:

$$\min_{U(k),\gamma_i(k)} J(k)=\|x(k|k)\|_Q^2+\|\tilde{A}x(k|k)+\tilde{B}\tilde{u}(k)\|_{\tilde{Q}}^2+\|\tilde{u}(k)\|_{\tilde{R}}^2+\|\tilde{A}_N x(k|k)+\tilde{B}_N\tilde{u}(k)\|_{X(k)}^2, \tag{16}$$

s.t. 不等式(2), (12), (13).

其中

$$X(k)=\Big(X_n+\sum_{i=1}^{n-1}\gamma_i(k)(X_i-X_n)\Big)^{-1},$$

$\tilde{Q}$ 和 $\tilde{R}$ 分别为对角元素为 Q 和 R 的对角矩阵. 如果式(16) 优化问题在 k 时刻有可行解

$$U^*(k)=[u^*(k|k)\quad\cdots\quad u^*(k+N-1|k)],$$

则将 $u=u^*(k|k)$ 作为该时刻的输入应用到系统当中.

注 2　上述算法的本质是通过离线构造一个终端状态凸集, 然后在线找出一个“最接近”系统终端状态 $x(k+N|k)$ 的一个椭圆不变集, 从而达到扩大终端约束集的目的.

由于 $\|x(k|k)\|_Q^2$ 项不影响式(16) 的优化结果, 因此通过最小化式(16) 求得控制律的过程可以用下面的LMI优化问题来实现, 即

$$\min_{\tilde{u}(k),\gamma_i(k)}\beta,$$

$$\begin{bmatrix} 1 & (\tilde{A}_N x(k|k)+\tilde{B}_N\tilde{u}(k))^{\mathrm{T}} \\ \tilde{A}_N x(k|k)+\tilde{B}_N\tilde{u}(k) & X_n+\sum_{i=1}^{n-1}\gamma_i(k)(X_i-X_n)\end{bmatrix}\ge 0, \tag{17}$$

$$\begin{bmatrix} \beta & * & * & * \\ \tilde{A}x(k|k)+\tilde{B}\tilde{u}(k) & \tilde{Q}^{-1} & * & * \\ \tilde{u}(k) & 0 & \tilde{R}^{-1} & * \\ \tilde{A}_N x(k|k)+\tilde{B}_N\tilde{u}(k) & 0 & 0 & X_n+\sum_{i=1}^{n-1}\gamma_i(k)(X_i-X_n)\end{bmatrix}\ge 0. \tag{18}$$

其中 * 表示对称矩阵的相应元素, $\tilde{u}(k)\in U$, 而式(17) 中的 $\gamma_i(k)$ 满足约束条件(13).

下面给出基于终端状态凸集约束的在线算法:

Step 1: 在初始时刻, 以 $x(0|0)$ 为初始状态, 求解式(17) 和(18) 的LMI优化问题, 如果存在可行解 $\tilde{u}^*(0)$, $\gamma_i^*(0)$ 序列, 则将 $u(0)=u^*(0|0)$ 作为输入应用到系统当中. 其相应的终端约束集为 $T^*(0)$.

Step 2: 在 k 时刻, 以 $x(k|k)$ 为初始状态, 求解式(17) 和(18) 的LMI优化问题得到可行解 $\tilde{u}^*(k)$, $\gamma_i^*(k)$ 序列, 显然这时 $x^*(k+N|k)$ 必属于集合 $T^*(k)$. 判断 $x^*(k+N|k)$ 是否属于集合 $T^*(k-1)$, 如果是, 则取 $U^*(k+1)$ 为解序列, 将 $u(k)=u^*(k|k)$ 应用到系统当中, 并令终端约束集为 $T^*(k)$; 相反, 取 $U(k+1)$ 为解序列, 令控制输入为 $u(k)=u^*(k|k-1)$, 终端约束集为 $T^*(k-1)$. 其中

$$U(k+1)=[u^*(k+1|k),\cdots,u^*(k+N|k),Kx^*(k+N|k)],$$

$$K=\Big(\sum_{i=1}^{n}\gamma_i^*(k-1)Y_i\Big)\Big(\sum_{i=1}^{n}\gamma_i^*(k-1)X_i\Big)^{-1}.$$

Step 3: 在 $k+1$ 采样时刻, 令 $k=k+1$, 重复 Step 2.

注 3　上述算法中表明, 在系统实时改变终端约束集时, 如果当前时刻的系统终端状态落在了前面时刻计算的终端约束集合内, 则用当前时刻的终端约束集代替前一时刻的终端约束集. 否则, 终端约束集合不变.

4　可行性和稳定性分析

关于上节提出算法的可行性和稳定性, 本文有如下结论:

定理 1 对于带有输入约束的线性离散系统(1), 如果k时刻在线算法是可行的, 则在k时刻以后的任何时刻都是可行的, 且将可行序列的第一项作为输入会使得系统(1) 渐近稳定.

证明 假定在k时刻, 应用在线算法求得如下的可行解:

$$[U^*(k) \quad \gamma^*(k)] = [u^*(k|k) \quad \cdots \quad u^*(k+N-1|k) \quad \gamma_1^*(k) \quad \cdots \quad \gamma_n^*(k)], \tag{19}$$

相应的状态序列为$[x^*(k|k) \quad \cdots \quad x^*(k+N-1|k)]$, 且系统的终端状态满足

$$T^*(k) = (x^*(k+N|k))^{\mathrm{T}}\left(\sum_{i=1}^{n}\gamma(k)^* X_i\right)^{-1} \times x^*(k+N|k) \leqslant 1. \tag{20}$$

为了书写方便, 定义符号

$$\overline{X} = \sum_{i=1}^{n}\gamma_i^*(k)X_i,$$

$$\overline{Y} = \sum_{i=1}^{n}\gamma_i^*(k)Y_i,$$

$$\overline{Z} = \sum_{i=1}^{n}\gamma_i^*(k)Z_i.$$

其中X_i, Y_i, Z_i分别是在离线算法中求出的参数. 根据凸集定理, 必存在任意的$\sum_{i=1}^{n}\gamma_i^*(k) = 1, \gamma_i^*(k) \geqslant 0, i = 1, \cdots, n$, 使得下式成立:

$$(\overline{Z})_{rr} \leqslant u_{\max}^2, \begin{bmatrix} \overline{Z} & \overline{Y} \\ \overline{Y}^{\mathrm{T}} & \overline{X} \end{bmatrix} \geqslant 0, \tag{21}$$

$$\begin{bmatrix} \overline{X} & (A\overline{X}+B\overline{Y})^{\mathrm{T}} & \overline{X}Q^{1/2} & \overline{Y}^{\mathrm{T}} \\ A\overline{X}+B\overline{Y} & \overline{X} & 0 & 0 \\ Q^{1/2}\overline{X} & 0 & I & 0 \\ \overline{Y} & 0 & 0 & R^{-1} \end{bmatrix} \geqslant 0. \tag{22}$$

下面分析按在线算法得到的$k+1$时刻的解是否可行. 根据在线算法的 Step 2, 新的优化控制序列$U^*(k+1)$必定保证系统的终端状态在终端状态约束集合$T^*(k+1)$内, 如取$U^*(k+1)$为该时刻的解序列, 则它必定是该优化问题的可行解. 下面分析在$U^*(k+1)$的作用下, 系统的终端状态不满足终端约束集$T^*(k)$时, 取$U(k+1)$为解并取终端约束集为$T^*(k)$时, 它是否为可行解.

根据式(1), 在$U(k+1)$序列的控制下必有$x(k+i|k+1) = x^*(k+i|k), i = 1, \cdots, N-1$, 此时相应的状态序列为$[x^*(k+1|k) \quad \cdots \quad x^*(k+N|k)]$. 因为状态$x^*(k+N|k)$满足式(20), 只需证明在$Kx^*(k+N|k)$的作用下, 系统的终端状态$x(k+N+1|k+1) = (A+BK)x^*(k+N|k)$是否仍然满足约束(20).

根据 Schur 定理, 式(22) 等价于

$$\overline{X}^{-1} - (A+BK)^{\mathrm{T}}\overline{X}^{-1}(A+BK) - Q - K^{\mathrm{T}}RK \geqslant 0. \tag{23}$$

再将上式两边分别乘以状态向量$(x^*(k+N|k))^{\mathrm{T}}$和$x^*(k+N|k)$, 可得

$$\begin{aligned} &x^{\mathrm{T}}(k+N+1|k)\overline{X}^{-1}x(k+N+1|k) \leqslant \\ &(x^*(k+N|k))^{\mathrm{T}}(\overline{X}^{-1} - Q - K^{\mathrm{T}}RK)x^*(k+N|k) \leqslant \\ &(x^*(k+N|k))^{\mathrm{T}}\overline{X}^{-1}x^*(k+N|k), \end{aligned} \tag{24}$$

所以有$x^{\mathrm{T}}(k+N+1|k) \in T^*(k)$. 这说明在$k+1$时刻, 以$x^*(k+1|k)$为初始状态, 以$U(k+1)$作为控制序列, 仍可使得$x(k+N+1|k)$满足终端状态约束.

另一方面, 由式(21) 可以看出, $Kx^*(k+N|k)$满足式(2) 的控制输入约束条件. 因此, 可以判定$U(k+1)$是式(17) 和(18) 的一个可行解.

下面对算法的稳定性进行分析. 设$J^*(k)$和$J^*(k+1)$分别对应k时刻和$k+1$时刻式(16) 的性能指标最优值, 而$J(k+1)$是由$U(k+1)$控制序列对应的性能指标函数值. 根据最优性原理

$$\begin{aligned} &J^*(k+1) - J^*(k) \leqslant J(k+1) - J^*(k) \leqslant \\ &-\|x^*(k|k)\|_Q^2 - \|u^*(k|k)\|_R^2, \end{aligned} \tag{25}$$

并将式(25) 两边从$k = 0$到∞进行迭加, 可得

$$\sum_{k=0}^{\infty}\|x^*(k|k)\|_Q^2 + \|u^*(k|k)\|_R^2 \leqslant J^*(0) - J^*(\infty) \leqslant J^*(0). \tag{26}$$

由于$J^*(0)$是有限值, 所以必有$\lim_{k\to\infty}x^*(k|k) = 0$, 即闭环系统是渐近稳定的. □

5 计算实例

为了验证算法的有效性, 下面给出一个仿真实例. 沿用前面的符号, 假设系统的各个参数如下:

$$A = \begin{bmatrix} 0.99 & 0.25 \\ -0.23 & 0.5 \end{bmatrix}, B = \begin{bmatrix} 1.6 \\ -0.8 \end{bmatrix}, |u| \leqslant 0.2.$$

分别选择权矩阵$Q = \begin{bmatrix} 0.25 & 0 \\ 0 & 0.04 \end{bmatrix}, R = 1$. 将上述参数代入到离线算法中进行计算, 可以得到终端凸集约束

$$T = \{x \in R^n | x^{\mathrm{T}}(\lambda_1 X_1 + \lambda_2 X_2)^{-1}x \leqslant 1\}.$$

其中

$$X_1 = \begin{bmatrix} 2.2538 & -2.2159 \\ -2.2159 & 9.5374 \end{bmatrix},$$

$$X_2 = \begin{bmatrix} 2.2089 & -2.3533 \\ -2.3533 & 11.0358 \end{bmatrix}.$$

为了将本文结果与文献[8] 进行比较, 将上述

参数分别带入本文的在线算法和文献[8]的离线算法. 当控制时域 $N = 2$ 时, 针对不同的初始状态, 得到结果如表 1 所示.

表 1　本文方法与文献[8]算法的比较结果

初始状态	[0　4　2]	[2　15　0]	[1.5　1]
本文结果	feasible	feasible	feasible
文献[8]结果	infeasible	infeasible	feasible

由表 1 可以看出, 本文的结果比已有的结果可以更有效地扩大系统的终端状态约束集, 从而说明了本文结果的有效性.

6　结　语

本文从一个新的角度重新分析了带有终端约束集的预测控制问题, 通过选取一些特定的状态向量作为假定的系统终端状态, 计算针对这些状态的最大终端约束集, 然后将计算好的终端状态约束集组合成一个凸集, 其中凸集参数作为在线优化变量. 实际在线运算时, 系统可根据真实的终端状态从凸集当中选取合适的集合作为终端约束集, 以扩大系统的可行域. 另外, 与已有的在线算法相比, 利用本文算法确定终端约束集只需要计算很少的几个参数, 而不是在线算法中的一系列矩阵不等式, 因此该算法可以降低已有算法的在线计算量.

参考文献(References)

[1] 席裕庚. *预测控制*[M]. 北京: 国防工业出版社, 1993: 1-20.
(Xi Y G. *Model Predictive Control* [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 1993: 1-20.)

[2] Xi Y G, Zhang Q L. New Approach to Designing Constrained Predictive Controllers[J]. *Acta Automatica Sinica*, 2005, 31(5): 655-661.

[3] 宋崇辉, 柴天佑. 一类具有稳定性的广义预测控制算法[J]. *自动化学报*, 2004, 30(6): 807-815.
(Song C H, Chai T Y. A Weighted Predictive Control Algorithm with Guaranteed Stability [J]. *Acta Automatica Sinica*, 2004, 30(6): 807-815.)

[4] 陈庆, 李少远, 席裕庚. 一类串联生产过程的分布式解耦预测控制[J]. *控制与决策*, 2004, 19(6): 647-656.
(Chen Q, Li S Y, Xi Y G. Distributed Decoupling Predictive Control of a Kind of Cascade Processes[J]. *Control and Decision*, 2004, 19(6): 647-656.)

[5] Lu Y H, Arkun Y. A Scheduling Quasi-min-max Model Predictive Control Algorithm for Nonlinear Systems[J]. *J of Process Control*, 2002, 12(5): 589-604.

[6] Ding B C, Xi Y G, Li S Y. A Synthesis Approach of On-line Constrained Robust Model Predictive Control [J]. *Automatica*, 2004, 40(1): 163-167.

[7] Wan Z Y, Kothare M V. Efficient Robust Constrained Model Predictive Control with Time-varying Terminal Constraint Set[J]. *Systems and Control Letters*, 2003, 48(5): 375-383.

[8] Lee J W, Kwon W H, Choi J. On Stability of Constrained Receding Horizon Control with Finite Terminal Weighting Matrix [J]. *Automatica*, 1998, 34(12): 1607-1612.

[9] Bloemen H H J, Van De Boom T J J, Verbruggen H B. Optimizing the End-point State-weighting Matrix in Model-based Predictive Control[J]. *Automatica*, 2002, 38(6): 1061-1068.

[10] Kothare M V, Balakrishnan V, Morari M. Robust Constrained Model Predictive Control Using Linear Matrix Inequalities [J]. *Automatica*, 1996, 32(10): 1361-1379.

(上接第 630 页)

[4] 邱占芝, 张庆灵. 一类多输入多输出网络控制系统的稳定性分析[J]. *控制与决策*, 2005, 20(5): 525-529.
(Qiu Z Z, Zhang Q L. Stability Analysis of a Class of Networked Control Systems with Multiple Inputs and Multiple Outputs [J]. *Control and Decision*, 2005, 20(5): 525-529.)

[5] Zhang W, Branicky M S, Phillips M. Stability of Networked Control Systems[J]. *IEEE Control Systems Magazine*, 2001, 21(1): 84-99.

[6] Rabello A, Bhaya A. Stability of Asynchronous Dynamical Systems with Rate Constraints and Applications [J]. *IEE Proc Control Theory Application*, 2003, 150(5): 546-550.

[7] Xie L B, Fang H J, Zheng Y. Guaranteed Cost Control for Networked Control Systems [J]. *J of Control Theory and Applications*, 2004, 2: 143-148.

[8] Vu N P, Jianming J, Andrey V S, et al. Robust Stabilization of Linear Uncertain Discrete-time Systems via a Limited Capacity Communication Channel [J]. *Systems & Control Letters*, 2004, 53: 347-360.

[9] Hassibi A, Boyd S P, How J P. Control of Asynchronous Dynamical Systems with Rate Constraints on Events [A]. *Proc of the IEEE Conf Decision and Control* [C]. Phoenix, 1999: 1345-1351.

[10] Ishii H, Francis B A. *Limited Data Rate in Control Systems with Networks* [M]. Berlin: Springer, 2002: 1-40.