

基于标称性能指标的 离线鲁棒预测控制器综合¹⁾

丁宝苍 杨鹏

(河北工业大学电气与自动化学院 天津 300130)
(E-mail: dingbc@jssmail.hebut.edu.cn, yangp@hebut.edu.cn)

摘要 离线鲁棒预测控制综合算法离线确定一个控制律序列, 对应一组吸引域, 在线根据当前状态的位置选择相应的控制律. 该类控制器在线计算量非常小, 而可行性和最优性与其它综合算法相比或多或少要差一些. 为此, 采用标称性能指标而不是“最坏情况”性能指标来改进离线综合算法的可行性和最优性. 改进的控制器保持了原有控制器的稳定性以及控制律关于系统状态的连续性. 仿真结果说明了采用标称性能指标的优越性.

关键词 鲁棒预测控制, 离线方法, 标称性能指标, 稳定性

中图分类号 TP273

Synthesizing Off-line Robust Model Predictive Controller Based on Nominal Performance Cost

DING Bao-Cang YANG Peng

(School of Electricity and Automation, Hebei University of Technology, Tianjin 300130)
(E-mail: dingbc@jssmail.hebut.edu.cn, yangp@hebut.edu.cn)

Abstract The off-line synthesis algorithm of robust model predictive control off-line determines a control-law-sequence with corresponding domains of attraction, and the control law is chosen on-line according to the location of the current state. This controller has very low on-line computational burden, but its feasibility and optimality aspects are, more or less, worse than other synthesizing approaches. For this reason, a nominal, instead of “worst-case”, performance cost is adopted in this paper to improve the feasibility and optimality. Simulation result illustrates the advantages of nominal performance cost.

Key words Robust model predictive control, off-line method, nominal performance cost, stability

1 引言

近年来, 不确定系统的鲁棒预测控制器的稳定性研究大量地采用了综合方法. 在保证稳定的前提下, 主要目标是降低在线计算量、改进可行性和最优性^[1]. 文 [2] 首先采用线

1) 国家自然科学基金 (60504013) 资助

Supported by National Natural Science Foundation of P. R. China (60504013)

收稿日期 2004-9-9 收修改稿日期 2005-11-28

Received September 9, 2004; in revised form November 28, 2005

性矩阵不等式 (LMI) 方法求解了“最坏情况”无穷时域二次型性能指标下的优化问题, 将其简化为在每个时刻求解一个固定的线性状态反馈控制律. 由于要在线求解 LMI 优化问题, 该法一般计算量很大, 难以实用化. 在 [2] 基础上, 文 [3,4] 进一步提出了离线算法, 即离线确定一系列的线性状态反馈控制律及其相应的椭圆型集合, 在线则选择当前状态所处的最小的一个椭圆集对应的控制律; 进一步, 当状态位于两个相邻椭圆集之间的区域时, 实际控制律采用两个相应的离线控制律的线性插值. 离线算法只需很小的在线计算量, 非常适合于工程实际.

鲁棒预测控制综合算法也有采用其它形式性能指标的. 采用摄动项 2-范数性能指标的方法^[5]可方便地处理输入饱和型约束—处理其它形式的约束则比较保守. 采用标称性能指标时稳定性还没有得到很好的解决, 这是由不确定系统的本质特点决定的, 如 [1] 采用变时域方法才得到稳定性结果, 而 [6] 则说明其方法只有当实际系统充分接近标称模型时才具有稳定性保证. 但是, 由 [1,6] 知道, 采用标称性能指标可以改进控制系统的可行性和最优性, 故本文将采用标称性能指标. 不同于 [6] 采用在线方法, 也不同于文 [1] 采用半在线半离线的做法, 本文采用离线方法. 研究表明, 对离线方法, 采用标称性能指标时稳定性将容易得到保证.

符号: \mathfrak{R}^n 表示 n 维实空间. 对向量 \mathbf{x} 和正定矩阵 \mathcal{W} , $\|\mathbf{x}\|_{\mathcal{W}}^2 = \mathbf{x}^T \mathcal{W} \mathbf{x}$. $\mathbf{x}(k+i|k)$ 为在 k 时刻对未来 $k+i$ 时刻的变量 \mathbf{x} 的预测值. I 表示相应维数的单位阵. 符号 $*$ 给出对称结构表示, 比如, 若 H 和 R 为对称矩阵, 则 $\begin{bmatrix} H & * \\ T & R \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} H & T^T \\ T & R \end{bmatrix}$.

2 问题的描述

考虑如下时变不确定系统

$$\mathbf{x}(k+1) = A(k)\mathbf{x}(k) + B(k)\mathbf{u}(k), \quad k \geq 0 \quad (1)$$

其中 $\mathbf{u} \in \mathfrak{R}^m$ 和 $\mathbf{x} \in \mathfrak{R}^n$ 分别为输入和可测状态. 系统约束为

$$-\bar{\mathbf{u}} \leq \mathbf{u}(k+i) \leq \bar{\mathbf{u}}, \quad -\bar{\psi} \leq \Psi \mathbf{x}(k+i+1) \leq \bar{\psi}, \quad \forall i \geq 0 \quad (2)$$

其中 $\bar{\mathbf{u}} := [\bar{u}_1, \bar{u}_2, \dots, \bar{u}_m]^T$, $\bar{u}_j > 0$, $j = 1 \dots m$, $\bar{\psi} := [\bar{\psi}_1, \bar{\psi}_2, \dots, \bar{\psi}_q]^T$, $\bar{\psi}_s > 0$, $s = 1, 2, \dots, q$, $\Psi \in \mathfrak{R}^{q \times n}$. 假设矩阵对儿 $[A(k)|B(k)] \in \Omega = Co\{A_1|B_1, A_2|B_2, \dots, A_L|B_L\}$, $\forall k \geq 0$, 即存在 L 个非负系数 $\omega_l(k)$, $l = 1 \dots L$, 使得

$$\sum_{l=1}^L \omega_l(k) = 1, \quad [A(k)|B(k)] = \sum_{l=1}^L \omega_l(k) [A_l|B_l] \quad (3)$$

记 $[\hat{A}|\hat{B}] \in \Omega$ 为“最接近”实际系统的标称模型 (如 $[\hat{A}|\hat{B}] = \sum_{l=1}^L [A_l|B_l]/L$). 目标是针对上述系统设计鲁棒预测控制器, 将系统 (1) 驱动到稳态 $(\mathbf{x}_{ss}, \mathbf{u}_{ss}) = (0, 0)$, 并使得指标 $J_{\text{true}, \infty} = \sum_{i=0}^{\infty} [\|\mathbf{x}(i)\|_{\mathcal{Q}}^2 + \|\mathbf{u}(i)\|_{\mathcal{R}}^2]$ 最小化, 其中 $\mathcal{Q} > 0$ 和 $\mathcal{R} > 0$ 为加权矩阵. 优化值 $J_{\text{true}, \infty}^*$ 的大小体现控制算法的最优性. 由于研究的系统为不确定系统, 难以直接最小化 $J_{\text{true}, \infty}$.

文 [2] 在每个时刻 k 求解如下优化问题

$$\min_{\mathbf{u}(k+i|k)=F(k)\mathbf{x}(k+i|k), i \geq 0} \max_{[A(k+i)|B(k+i)] \in \Omega, i \geq 0} J_{\infty}(k) = \sum_{i=0}^{\infty} [\|\mathbf{x}(k+i|k)\|_{\mathcal{Q}}^2 + \|\mathbf{u}(k+i|k)\|_{\mathcal{R}}^2] \quad (4a)$$

$$\text{s.t. } -\bar{\mathbf{u}} \leq \mathbf{u}(k+i|k) \leq \bar{\mathbf{u}}, \quad -\bar{\psi} \leq \Psi \mathbf{x}(k+i+1|k) \leq \bar{\psi} \quad (4b)$$

$$\mathbf{x}(k+i+1|k) = A(k+i)\mathbf{x}(k+i|k) + B(k+i)\mathbf{u}(k+i|k), \quad \mathbf{x}(k|k) = \mathbf{x}(k) \quad (4c)$$

其中线性状态反馈增益 $F(k)$ 为优化问题的决策变量. 为求解 $F(k)$, 首先定义二次型函数 $V(i, k) = \mathbf{x}(k+i|k)^T P(k)\mathbf{x}(k+i|k)$, $P(k) > 0$, $\forall k \geq 0$, 并强制满足如下的鲁棒稳定性约束

$$V(i+1, k) - V(i, k) \leq -\|\mathbf{x}(k+i|k)\|_Q^2 - \|\mathbf{u}(k+i|k)\|_R^2, \quad \forall [A(k+i)|B(k+i)] \in \Omega, \quad i \geq 0 \quad (5)$$

在系统稳定的情况下, $\mathbf{x}(\infty|k) = 0$, $V(\infty, k) = 0$. 定义标量 $\gamma > 0$ 、矩阵 $Q = \gamma P(k)^{-1}$ 和矩阵 Y, Z, Γ 为 LMI 变量. 将 (5) 从 $i = 0$ 到 $i = \infty$ 进行叠加, 得

$$\max_{[A(k+i)|B(k+i)] \in \Omega, i \geq 0} J_\infty(k) \leq V(0, k) \leq \gamma \quad (6)$$

令 $F(k) = YQ^{-1}$, 则 (5) 和 (6) 可以转化为如下的 LMI:

$$\begin{bmatrix} Q & * & * & * \\ A_l Q + B_l Y & Q & * & * \\ Q^{1/2} Q & 0 & \gamma I & * \\ \mathcal{R}^{1/2} Y & 0 & 0 & \gamma I \end{bmatrix} \geq 0, \quad l = 1 \cdots L \quad (7)$$

$$\begin{bmatrix} 1 & * \\ \mathbf{x}(k) & Q \end{bmatrix} \geq 0 \quad (8)$$

而当如下的 LMI 满足时, 约束 (4b) 也满足 (同时参考 [7]):

$$\begin{bmatrix} Z & Y \\ Y^T & Q \end{bmatrix} \geq 0, \quad Z = Z^T, \quad Z_{jj} \leq \bar{u}_j^2, \quad j = 1 \cdots m \quad (9)$$

$$\begin{bmatrix} Q & * \\ \Psi(A_l Q + B_l Y) & \Gamma \end{bmatrix} \geq 0, \quad \Gamma = \Gamma^T, \quad \Gamma_{ss} \leq \bar{\psi}_s^2, \quad l = 1, 2, \cdots, L; \quad s = 1, 2, \cdots, q \quad (10)$$

其中 $Z_{jj}(\Gamma_{ss})$ 为 $Z(\Gamma)$ 的第 $j(s)$ 个对角元. 从而, 优化问题 (4) 转化为:

$$\min_{\gamma, Q, Y, Z, \Gamma} \gamma, \quad \text{s.t. (7) ~ (10)} \quad (11)$$

在线求解 (11) 计算量较大. 在文 [2] 基础上, 文 [4] 提出如下离线鲁棒预测控制算法, 即将求解 (11) 转化为离线计算.

算法 1^[4]. a) 离线地, 确定一系列状态点 $\mathbf{x}_i, i = 1 \cdots N$, 这些状态点从远离原点的地方逐渐靠近原点. 用 \mathbf{x}_i 替换 (8) 中的 $\mathbf{x}(k)$, 求解 (11) 得到相应的 $\{Q_i, Y_i\}$, 从而也得到椭圆集 $\varepsilon_i = \{\mathbf{x} \in \mathbb{R}^n | \mathbf{x}^T Q_i^{-1} \mathbf{x} \leq 1\}$ 和控制律 $F_i = Y_i Q_i^{-1}$. 注意 \mathbf{x}_i 的选择应该使得 $\varepsilon_j \subset \varepsilon_{j-1}, \forall j = 2 \cdots N$; b) 在线地, 如果对每一个 $\mathbf{x}_i, i \neq N$, 下式成立:

$$Q_i^{-1} - (A_l + B_l F_{i+1})^T Q_i^{-1} (A_l + B_l F_{i+1}) > 0, \quad l = 1 \cdots L \quad (12)$$

则每个时刻 k 采用如下控制律

$$F(k) = \begin{cases} F(\alpha_i(k)), & \mathbf{x}(k) \in \varepsilon_i, \mathbf{x}(k) \notin \varepsilon_{i+1}, i \neq N \\ F_N, & \mathbf{x}(k) \in \varepsilon_N \end{cases} \quad (13)$$

其中 $F(\alpha_i(k)) = \alpha_i(k)F_i + (1 - \alpha_i(k))F_{i+1}$, $0 \leq \alpha_i(k) \leq 1$ 且

$$\mathbf{x}(k)^T [\alpha_i(k)Q_i^{-1} + (1 - \alpha_i(k))Q_{i+1}^{-1}] \mathbf{x}(k) = 1.$$

定理 1. 算法 1 中所实现的状态反馈控制律 (13) 是状态 \mathbf{x} 的连续函数. 给定初始状态 $\mathbf{x}(0) \in \varepsilon_1$, 则算法 1 指数镇定闭环系统.

由于采用“最坏情况”性能指标, 使得稳定、约束处理和优化都建立在 (7) 的基础上. 对 (7) 的改进是提高控制器的可行性和最优性的关键. 这里, 对在线算法, 可行性是指使 (11) 可解的 $\mathbf{x}(k)$ 的范围; 对离线算法, 可行性是指 ε_1 的大小. 文 [8] 已经采用参数 Lyapunov 方法对 (7) 进行了改进, 但效果较小, 下文中将采用标称性能指标, 以达到有效地改进 (7) 的目的.

3 采用标称性能指标的控制方案

不同于文 [4], 本文将采用标称性能指标, 旨在每个时刻 k 求解如下优化问题

$$\min_{\mathbf{u}(k+i|k)=F(k)\mathbf{x}(k+i|k), i \geq 0} J_{n,\infty}(k) = \sum_{i=0}^{\infty} [\|\hat{\mathbf{x}}(k+i|k)\|_{\mathcal{Q}}^2 + \|\mathbf{u}(k+i|k)\|_{\mathcal{R}}^2] \quad (14a)$$

$$\text{s.t. } \hat{\mathbf{x}}(k+i+1|k) = \hat{A}\hat{\mathbf{x}}(k+i|k) + \hat{B}\mathbf{u}(k+i|k), \quad \hat{\mathbf{x}}(k|k) = \mathbf{x}(k) \quad (14b)$$

$$-\bar{\mathbf{u}} \leq \mathbf{u}(k+i|k) \leq \bar{\mathbf{u}}, \quad -\bar{\psi} \leq \Psi\mathbf{x}(k+i+1|k) \leq \bar{\psi} \quad (14c)$$

$$\mathbf{x}(k+i+1|k) = A(k+i)\mathbf{x}(k+i|k) + B(k+i)\mathbf{u}(k+i|k), \quad \mathbf{x}(k|k) = \mathbf{x}(k) \quad (14d)$$

其中 $\hat{\mathbf{x}}$ 为采用标称模型计算的状态. 定义二次型函数 $\hat{V}(i, k) = \hat{\mathbf{x}}(k+i|k)^T P(k)\hat{\mathbf{x}}(k+i|k)$, 并强制满足如下约束

$$\hat{V}(i+1, k) - \hat{V}(i, k) \leq -\|\hat{\mathbf{x}}(k+i|k)\|_{\mathcal{Q}}^2 - \|\mathbf{u}(k+i|k)\|_{\mathcal{R}}^2, \quad \forall k, i \geq 0 \quad (15)$$

在系统稳定的情况下 $\hat{\mathbf{x}}(\infty|k) = 0$, $\hat{V}(\infty, k) = 0$. 定义标量 $\gamma > 0$ 、矩阵 $Q = \gamma P(k)^{-1}$ 和矩阵 Y, G, Z, Γ 为 LMI 变量. 将 (15) 从 $i = 0$ 到 $i = \infty$ 进行叠加, 得

$$\max_{[A(k+i)|B(k+i)] \in \Omega, i \geq 0} J_{n,\infty}(k) \leq \hat{V}(0, k) \leq \gamma \quad (16)$$

引理 1. 约束 (15) 与下式等价:

$$(\hat{A} + \hat{B}F(k))^T P(k)(\hat{A} + \hat{B}F(k)) - P(k) \leq -Q - F(k)^T \mathcal{R}F(k) \quad (17)$$

证明略.

约束 (15) 或 (17) 不足以保证稳定性. 为保证稳定性可加入如下的约束:

$$\mathbf{x}(k+i+1|k)^T P(k)\mathbf{x}(k+i+1|k) - \mathbf{x}(k+i|k)^T P(k)\mathbf{x}(k+i|k) < 0 \quad (18)$$

由于多包描述的凸性, 约束 (18) 等价于

$$(A_l + B_l F(k))^T P(k)(A_l + B_l F(k)) - P(k) < 0, \quad \forall l = 1 \cdots L \quad (19)$$

令 $F(k) = YG^{-1}$, 则 (17) 和 (19) 可以转化为如下的 LMI

$$\begin{bmatrix} G + G^T - Q & * & * & * \\ \hat{A}G + \hat{B}Y & Q & * & * \\ Q^{1/2}G & 0 & \gamma I & * \\ \mathcal{R}^{1/2}Y & 0 & 0 & \gamma I \end{bmatrix} \geq 0 \quad (20)$$

$$\begin{bmatrix} G + G^T - Q & * \\ A_l G + B_l Y & Q \end{bmatrix} > 0, \quad l = 1 \cdots L \quad (21)$$

(16) 可以转化为 (8), 而当如下的 LMI 满足时, 约束 (14c) 也满足 (同时参考 [7]):

$$\begin{bmatrix} Z & Y \\ Y^T & G + G^T - Q \end{bmatrix}, \quad Z = Z^T, \quad Z_{jj} \leq \bar{u}_j^2, \quad j = 1 \cdots m \quad (22)$$

$$\begin{bmatrix} G + G^T - Q & * \\ \Psi(A_l G + B_l Y) & \Gamma \end{bmatrix} \geq 0, \quad \Gamma = \Gamma^T, \quad \Gamma_{ss} \leq \bar{\psi}_s^2, \quad l = 1, 2, \cdots, L; \quad s = 1, 2, \cdots, q \quad (23)$$

这样, 求解优化问题 (14) 转化为求解

$$\min_{\gamma, Q, Y, G, Z, \Gamma} \gamma, \quad \text{s.t. (8), (20) \sim (23)} \quad (24)$$

注 1. 由 [9,10] 知, 引入变量 G 不改变优化问题的可行性, 即: 如果在 (24) 中令 $G = G^T = Q$, 则可行性不会降低. 但是, 由于引入额外的变量 G , 使得优化的自由度增加, 一般可以增强解 $F(k)$ 的最优性. 除此以外, 由于 (24) 是基于标称性能指标的, 至少当实际系统“比较接近”标称模型时, (24) 能够改进 (11) 的最优性.

注 2. 考虑 $G = G^T = Q$, 显然 (21) 是 (7) 的一部分, (20) 是 (7) 的必要条件. 故, (24) 比 (11) 更容易可解, 即采用 (24) 可改进可行性.

基于上述结论, 给出如下的离线鲁棒预测控制算法及其对应的稳定性结果.

算法 2. a) 离线地, 确定一系列状态点 $x_i, i = 1 \cdots N$, 这些状态点从远离原点的地方逐渐靠近原点. 求解 (24) 得到相应的 $\{Q_i, G_i, Y_i\}$, 这样, 得到集合 ε_i 和控制律 $F_i = Y_i G_i^{-1}$, $i = 1 \cdots N$. 注意 x_i 的选择应该使得 $\varepsilon_j \subset \varepsilon_{j-1}, \forall j = 2 \cdots N$; b) 在线地, 如果对每一个 $x_i, i \neq N$, (12) 成立, 则每个时刻 k 采用控制律 (13). 各符号表示见算法 1, 但实现意义不同.

定理 2. 算法 2 中所实现的状态反馈控制律是状态 x 的连续函数. 给定初始状态 $x(0) \in \varepsilon_1$, 则算法 2 渐近镇定闭环系统.

证明. 控制律的连续性参考文 [4]. 由 [1] 知道: 当 $x(k) \in \varepsilon_i$ 时, F_i 是可行且稳定的控制律, 其中 (21) 保证了稳定性, 而 (21)~(23) 共同保证了输入和状态约束对未来任意时刻满足. 当状态位于 ε_i 和 ε_{i+1} 之间时, 记 $Q(\alpha_i(k))^{-1} = \alpha_i(k)Q_i^{-1} + (1 - \alpha_i(k))Q_{i+1}^{-1}$, $X(\alpha_i(k)) = \alpha_i(k)X_i + (1 - \alpha_i(k))X_{i+1}$, $X \in \{Z, \Gamma\}$. 考虑 x_i 以及 G 不影响可行性, (12) 和 (21) 同时满足时, 将有

$$\begin{bmatrix} Q_i^{-1} & * \\ A_l + B_l F(\alpha_i(k)) & Q_i \end{bmatrix} > 0, \quad \forall l = 1 \cdots L \quad (25)$$

而 (22)、(23) 同时对 i 和 $i+1$ 满足时, 可以得到

$$\begin{bmatrix} Z(\alpha_i(k)) & * \\ F(\alpha_i(k))^T & Q(\alpha_i(k))^{-1} \end{bmatrix} \geq 0, \quad \begin{bmatrix} Q(\alpha_i(k))^{-1} & * \\ \Psi(A_l + B_l F(\alpha_i(k))) & \Gamma(\alpha_i(k)) \end{bmatrix} \geq 0 \quad (26)$$

根据 [2], (25)~(26) 表示状态反馈控制律 $u(k) = F(\alpha_i(k))x(k)$ 将使未来的状态保持在 ε_i 内部并向 ε_{i+1} 收敛, 同时满足约束. 其它细节均同文 [4]. \square

4 仿真验证

采用系统 $\begin{bmatrix} x^{(1)}(k+1) \\ x^{(2)}(k+1) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ K(k) & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x^{(1)}(k) \\ x^{(2)}(k) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} u(k)$, 其中 $K(k)$ 为不确定参数.

取加权矩阵为 $Q = I$, $R = 1$, 并取输入约束为 $|u| \leq 1$, 初始状态为 $x(0) = [7, 80]^T$. 考虑如下两种情况.

CASE 1: 取 $K(k) \in [1, K_M]$, 变化 K_M . 当 $K_M \geq 49.4$ 时算法 1 不再可行, 但是算法 2 当 $K_M = 56.9$ 时仍然可行, 这说明算法 2 改进了可行性.

CASE 2: $K(k) \in [0.1, 2.9]$. 取 $x_i^{(1)} = x_i^{(2)} = \xi_i$, $\xi_1 = 10$, $\xi_2 = 8$, $\xi_3 = 7$, $\xi_4 = 6$, $\xi_5 = 5$, $\xi_6 = 4$, $\xi_7 = 3$, $\xi_8 = 2.5$, $\xi_9 = 2$, $\xi_{10} = 1.5$. 当状态采用不同的产生方法时, 分别采用算法 1、算法 2 和文 [2] 的在线方法, 得到的代价函数值 $J_{\text{true}, \infty}^*$ 见表 1. 这些结果说明: 即使是针对一些“极端”情况, 算法 2 也都可以改进最优性. 当状态由 $K(k) = 1.5 + 1.4 \sin(k)$ 产生时, 采用算法 1 和算法 2 得到的闭环状态轨迹如图 1 所示, 其中虚线表示算法 1, 实线表示算法 2.

表 1 采用不同的状态产生方法和不同算法时得到的代价函数值 $J_{\text{true}, \infty}^*$

Table 1 The cost value $J_{\text{true}, \infty}^*$ under different state generation methods and different algorithms

状态产生公式	算法 1	算法 2	文 [2] 在线方法
$K(k) = 1.5 + 1.4 \sin(k)$	353123	290041	342556
$K(k) = 1.5 + (-1)^k 1.4$	331336	272086	321960
$K(k) = 0.1$	653110	527367	526830
$K(k) = 2.9$	454295	364132	453740
$K(k) = 0.1 + 2.8 \text{rand}(0, 1)$	330616	268903	319876

注: $\text{rand}(0, 1)$ 为 $[0, 1]$ 区间随机数; 对三种算法所取随机数序列完全相同.

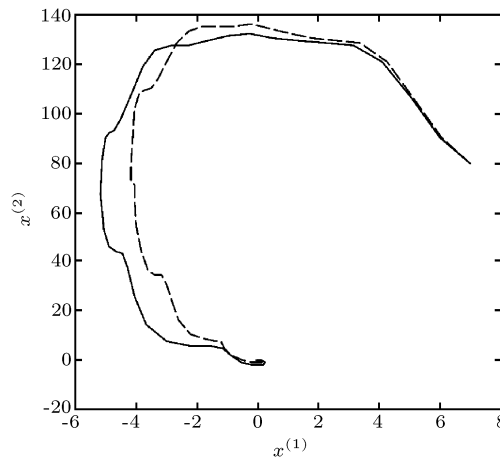


图 1 闭环系统状态轨迹图

Fig. 1 State trajectories of the closed-loop system

5 结论

采用标称性能指标研究了离线鲁棒预测控制综合算法. 这样, 得到的控制器适用范围更广泛一些, 并且一般可给出更优的控制作用. 此外, 得到的控制器保证了闭环稳定性、以及控制律相对于系统状态的连续性. 在大多数在线综合算法和半在线半离线综合算法

中,都不采用标称性能指标,主要原因在于闭环系统稳定性证明还没有得到很好的解决. 本文研究结果表明,离线方法不仅具有很低的在线计算量(完全可以和PID比美),而且其稳定性更容易得到保证,故应属于适合于工程实际的预测控制的新形式.

References

- 1 Wan Z Y, Kothare M V. Efficient robust constrained model predictive with a time varying terminal constraint set. *Systems and Control Letters*, 2003, **48**(3): 375~383
- 2 Kothare M V, Balakrishnan V, Morari M. Robust constrained model predictive control using linear matrix inequalities. *Automatica*, 1996, **32**(11): 1361~1379
- 3 Wan Z Y, Kothare M V. Robust output feedback model predictive control using off-line linear matrix inequalities. *Journal of Process Control*, 2002, **12**(5): 763~774
- 4 Wan Z Y, Kothare M V. An efficient off-line formulation of robust model predictive control using linear matrix inequalities. *Automatica*, 2003, **39**(6): 837~846
- 5 Kouvaritakis B, Rossiter J A, Schuurmans J. Efficient robust predictive control. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2000, **45**(8): 1545~1549
- 6 Ding B C, Yang P, Li S Y, Sun H X. Synthesizing on-line constrained robust model predictive control based-on nominal performance cost. In: Proceedings of the World Congress on Intelligent Control and Automation (WCICA), Piscataway, United States: IEEE Press, 2004. **1**: 610~614
- 7 Ding B C, Xi Y G, Li S Y. A synthesis approach of on-line constrained robust model predictive control. *Automatica*, 2004, **40**(1): 163~167
- 8 Ding B C, Yang P, Sun H X, Dong Y. Improving off-line synthesis approach of robust model predictive control. *Control and Decision*, 2005, **20**(3): 312~315
- 9 Mao W J. Robust stabilization of uncertain time-varying discrete systems and comments on "an improved approach for constrained robust model predictive control". *Automatica*, 2003, **39**(12): 1109~1112
- 10 De Oliveira M C, Bernussou J, Geromel J C. A new discrete-time robust stability condition. *Systems and Control Letters*, 1999, **37**(2): 261~265

丁宝苍 2000年和2003年分别在石油大学(北京)和上海交通大学获得硕士、博士学位. 目前为河北工业大学副教授, 主要研究方向为预测控制、模糊控制及其在过程系统中的应用.

(**DING Bao-Cang** Received his master degree from University of Petroleum in China (Beijing) in 2000, and Ph.D. degree from Shanghai Jiaotong University in 2003, respectively. Now he is an associate professor at Hebei University of Technology. His research interests include predictive control, fuzzy control and their applications in process industry.)

杨 鹏 河北工业大学教授, 研究领域为计算机控制与工程应用.

(**YANG Peng** Professor at Hebei University of Technology. His research interests include computer control and engineering application.)