

一类基于滚动时域优化原理的多路控制器设计及其在活套控制中的应用

张晓东¹ 姚小兰¹ 伍清河¹ 李道平¹

摘要 针对热连轧活套高度和张力的双输入双输出强耦合系统,文中提出一类基于滚动时域优化原理的多路控制策略.基于滚动优化原理,在每一个周期内,顺序求解子系统的控制律后及时更新系统.从 H_∞ 观点出发,将解耦问题转化为干扰抑制和多目标优化问题,能够减轻计算机的负担,提高控制系统的性能.仿真结果证实了该方法具有良好的解耦效果和控制性能.

关键词 H_∞ 控制, 预测控制, 活套控制, 解耦控制

DOI 10.3724/SP.J.1004.2011.00380

Design and Application of a Class of Multiplexed Receding Horizon Controllers for Looper Control System

ZHANG Xiao-Dong¹ YAO Xiao-Lan¹ WU Qing-He¹

LI Dao-Ping¹

Abstract Multiplexed receding horizon control strategy is proposed for looper height and tension double input-output strongly coupled system. Based on receding horizon control theory, after all subsystem controllers are obtained sequentially, the system is updated in time. The decoupling problem is transformed into a problem of combining disturbance rejection and comprehensive optimization based on H_∞ control theory, which can lighten computation burden and improve control performance. Simulation results prove the effectiveness of the method in both decoupling effect and control performance.

Key words H_∞ control, receding horizon control, looper control, decoupling control

采用活套控制轧制张力是热连轧的基本特征之一.活套高度和张力的系统是典型的双输入双输出强耦合系统.传统的工业控制采用单输入单输出的 PI 控制^[1],控制器设计容易,但是它主要的缺点是没有有效地考虑活套高度和张力之间的耦合情况,降低了系统的控制性能.文献 [2] 提出了采用张力尺的方法,文献 [3-4] 采用软测量技术.基于测得的张力信号,文献 [5-7] 提出了很多先进的控制算法,但是仍没有克服这个缺点,也没有考虑控制输入、状态约束的条件.于是人们开始将多输入多输出鲁棒控制、解耦控制、模型预测控制等算法引入这个领域.由于预测控制具有滚动优化特征而备受关注^[8],文献 [9] 采用自适应预测控制算法,取得了较好的控制效果,文献 [10] 分析了活套控制中各种算法的优点和缺点,并指出了预测控制算法在活套控制中的应用前景.对于多输入多输出系统,采用滚动时域控制,计算量会随着系统阶数和求解变量个数的增加呈指数增长,降低系统的实时性.因而在设计控制器的时候,不仅要充分考虑活套高度与张力系

统的耦合特性,也要尽可能的减少计算量,减轻计算负担.本文针对活套系统的双输入双输出强耦合系统,提出一种基于滚动优化原理的多路控制策略,即基于滚动优化原理,在每个周期内顺序求解子系统的控制律后及时更新系统,开始新的循环,从 H_∞ 观点出发,将解耦问题转化为扰动抑制和多目标优化问题,从而降低了系统的阶数,减小计算量,提高了控制系统的性能.仿真结果表明,该方法具有良好的解耦效果和控制性能.

1 活套高度和张力的系统综合模型

根据文献 [11] 提供的活套高度和张力的控制系统模型,控制量分别是活套电机的电流 Δi_{ref} 和轧制速度 ΔV_{ref} ,期望输出是活套的高度 $\Delta \theta_i$ 和热轧带钢的张力 $\Delta \tau_i$,活套高度和张力的传动函数形式为

$$\begin{cases} \Delta \theta_i = G_{11}(s)\Delta i_{ref} + G_{12}(s)\Delta V_{ref}(s) \\ \Delta \tau_i = G_{21}(s)\Delta i_{ref} + G_{22}(s)\Delta V_{ref}(s) \end{cases} \quad (1)$$

液压活套系统双输入双输出线性化模型如图 1 所示.

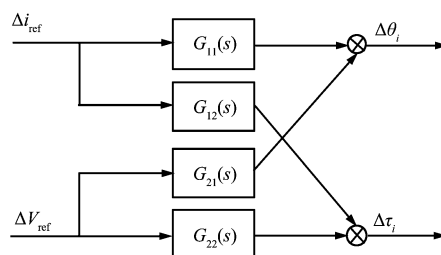


图 1 活套系统的框图

Fig. 1 Linear model of the looper system

从图 1 中看出,液压活套系统是一个双输入双输出的耦合系统.由于传递函数 G_{ii} ($i = 1, 2$) 中含有不确定参数:杨氏模量 E 和前滑系数 f ,杨氏模量受温度、含碳量影响,随时间变化;而前滑系数是未知的,很难精确获得,对板带的速度有很大的影响,从而影响机架间的张力变化.因此,在设计控制器时需要同时考虑系统耦合问题和参数不确定性.

2 基于滚动优化原理的多路控制策略

通常情况下,在考虑多输入多输出滚动优化控制问题时,所有的控制输入是同时更新的.由于求解控制器的复杂程度和计算时间是控制输入个数的立方函数 $f(m^3)$,其中 m 为控制输入的个数.对于一个给定的滚动时域控制问题,假设最小的更新周期为 T ,基于滚动优化原理,可以在 T/m 内更新一个子系统的控制律,在 m 个子系统经过顺序更新后,及时更新整个系统,开始新的循环^[12].我们将此思想应用到双输入双输出的活套控制系统中.图 2 是系统控制律同步更新简图,即在每个周期 T 后同时更新系统的控制输入.图 3 是系统控制律异步更新简图,即在第一个 $T/2$ 内更新 u_1, u_2 保持不变;在第二个 $T/2$ 内更新 u_2, u_1 保持不变,经过两个 $T/2$ 后更新整个系统,开始新的循环.因此,基于滚动优化原理的多路控制策略可以看成是在某一个周期 T 内,把一个多输入多输出的系统看作是多多个单输入单输出的子系统求解控制律.

考虑到活套高度与张力系统之间的耦合扰动,从 H_∞ 原理出发,对于各个耦合输出端信号 out_j ,认为输入 in_i ($i \neq j$)

收稿日期 2009-10-22 录用日期 2010-10-19
Manuscript received October 22, 2009; accepted October 19, 2010
1. 北京理工大学自动化学院 北京 100081
1. School of Automation, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081

是干扰信号, 从而将解耦问题转换为干扰抑制问题.

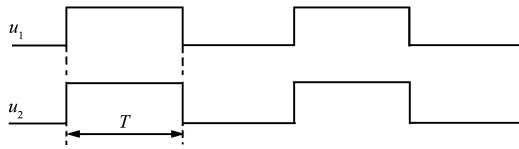


图2 系统输入同步更新
Fig. 2 Synchronized updating scheme

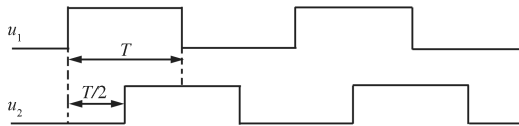


图3 系统输入异步更新
Fig. 3 Multiplexed updating scheme

基于活套控制的一个子系统, 考虑如下离散模型:

$$\begin{cases} \mathbf{x}_j(k+1) = A_j(k)\mathbf{x}_j(k) + B_j(k)\mathbf{u}_j(k) + B_{dj}(k)\mathbf{w}_j(k) \\ \mathbf{y}_j(k) = C_j\mathbf{x}_j(k) \end{cases} \quad (2)$$

其中, $\mathbf{x}_j(k) \in \mathbf{R}^n$ 是系统状态, $\mathbf{u}_j(k) \in \mathbf{R}^m$ 是控制输入, $A_j(k) = A_j + \Delta A_j(k)$, $B_j(k) = B_j + \Delta B_j(k)$, A_j, B_j, C_j, B_{dj} 是适当维数的常数矩阵, $\Delta A_j(k), \Delta B_j(k)$ 是时变的不确定矩阵, 满足范数有界条件: $\Delta A_j = H_{1,j}F_{1,j}(k)E_{1,j}, \Delta B_j = H_{1,j}F_{2,j}(k)E_{2,j}$, 其中 $H_{1,j}, E_{1,j}, E_{2,j}$ 是适当维数的已知矩阵, 并且 $F_i^T(k)F_i(k) \leq I (i = 1, 2)$. 在时刻 k , 对每个子系统 ($j = 1, 2$) 顺序求解控制律, 使得系统稳定, 并且满足约束条件及性能指标:

$$\min_{\mathbf{u}_j(k+i|k), i=0,1,\dots,n} \max_{[A_j(k+i), B_j(k+i)], i \geq 0} J_{j,\infty}(k) \quad (3)$$

s.t.

$$\|T_{j,yw}\|_{\infty}^2 < \delta_j \quad (4)$$

$$J_{j,\infty}(k) = \sum_{i=0}^{\infty} \mathbf{y}_j(k+i|k)^T \mathbf{y}_j(k+i|k) \quad (5)$$

其中, $T_{j,yw}$ 是外部扰动 $\mathbf{w}_j(t)$ 到被调输出 $\mathbf{y}_j(t)$ 的传递函数矩阵, 它的 H_{∞} 范数不超过给定的常数 $\delta_j (\delta_j > 0)$.

在文中证明的过程中将会用到如下引理^[13]:

引理 1. 给定具有适当维数的矩阵 $Y = Y^T, G, E$, 存在:

$$Y + GF(t)E + E^T F(t)^T G^T < 0$$

则对所有满足 $F(t)^T F(t) \leq I$ 的 $F(t)$ 都成立的充要条件是存在一个正数 $a > 0$, 使得下式成立:

$$Y + aGG^T + a^{-1}E^T E < 0 \quad (6)$$

定理 1. 对于不确定系统 (2) 和性能指标 (3), 若以下优化问题:

$$\min_{\mathbf{u}_j(k+i|k), i=0,1,\dots,n} \max_{[A_j(k+i), B_j(k+i)], i \geq 0} r_{0j} \quad (7)$$

s.t.

$$\begin{bmatrix} -r_{0j}^{-1} & r_{0j}^{-1}\mathbf{x}_j(k|k)^T \\ * & -L_j \end{bmatrix} < 0 \quad (8)$$

$$\begin{bmatrix} -r_{0j}\mathbf{u}_{j,\max}^2 & K_j \\ * & -P_j \end{bmatrix} < 0 \quad (9)$$

$$\begin{bmatrix} -L_j & 0 & M_1 & M_2 & 0 & 0 & 0 & L_j C_j^T \\ * & -\delta_j I & B_{dj}^T & 0 & 0 & E_{2j}^T & 0 & 0 \\ * & * & -L_j & 0 & a_1 H_{1j} & 0 & a_2 H_{1j} & 0 \\ * & * & * & -a_{1j} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ * & * & * & * & -a_{1j} & 0 & 0 & 0 \\ * & * & * & * & * & -a_{2j} & 0 & 0 \\ * & * & * & * & * & * & -a_{2j} & 0 \\ * & * & * & * & * & * & * & -I \end{bmatrix} < 0 \quad (10)$$

有解, 则系统 (2) 存在输出反馈控制律. 其中, $P_j > 0, M_1 = L_j(A_j + B_j K_j)^T, L_j = P_j^{-1}, M_2 = L_j(E_{1j} + E_{2j} K_j)^T$, “*” 处的矩阵块可以由矩阵的对角关系得到.

证明. 选取 Lyapunov 函数: $V_j(\mathbf{x}_j(k|k)) = \mathbf{x}_j(k|k)^T \times P_j \mathbf{x}_j(k|k)$, 状态反馈控制律 $\mathbf{u}_j(k|k) = K_j \mathbf{x}_j(k|k)$, 则对于时刻 k 的每个子系统, 如下等式成立:

$$\begin{aligned} \Delta V_j(\mathbf{x}_j(k+i|k)) &= \\ V_j(\mathbf{x}_j(k+i+1|k)) - V_j(\mathbf{x}_j(k+i|k)) &= \\ \begin{bmatrix} \mathbf{x}_j(k|k) \\ \mathbf{w}_j(k|k) \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} \Omega_{1,j} - P_j & \Omega_{2,j} \\ * & \Omega_{3,j} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{x}_j(k|k) \\ \mathbf{w}_j(k|k) \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (11)$$

若系统稳定, 则 $x(\infty|k) \rightarrow 0$, 因此 $V(x(\infty|k)) \rightarrow 0$, 将式 (11) 累加可得到:

$$\begin{aligned} -V_j(\mathbf{x}_j(k|k)) &= \\ \sum_{i=0}^{\infty} \begin{bmatrix} \mathbf{x}_j(k|k) \\ \mathbf{w}_j(k|k) \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} \Omega_{1,j} - P_j & \Omega_{2,j} \\ * & \Omega_{3,j} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{x}_j(k|k) \\ \mathbf{w}_j(k|k) \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (12)$$

其中

$$\begin{aligned} \Omega_{1,j} &= (A_j(k) + B_j(k)K_j)^T P_j (A_j(k) + B_j(k)K_j) \\ \Omega_{2,j} &= (A_j(k) + B_j(k)K_j)^T P_j B_{dj}(k) \\ \Omega_{3,j} &= B_{dj}^T(k) P_j B_{dj}(k) \end{aligned}$$

因此, 式 (5) 可以写成如下形式:

$$\begin{aligned} J_{j,\infty}(k) &= \sum_{i=0}^{\infty} \mathbf{y}_j(k+i|k)^T \mathbf{y}_j(k+i|k) = \\ & \delta_j \sum_{i=0}^{\infty} \mathbf{w}_j(k+i|k)^T \mathbf{w}_j(k+i|k) + \\ & \sum_{i=0}^{\infty} \begin{bmatrix} \mathbf{x}_j(k+i|k) \\ \mathbf{w}_j(k+i|k) \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} C_j^T C_j & 0 \\ 0 & -\delta_j I \end{bmatrix} \times \\ & \begin{bmatrix} \mathbf{x}_j(k+i|k) \\ \mathbf{w}_j(k+i|k) \end{bmatrix} = V_j(\mathbf{x}_j(k|k)) + \delta_j \sum_{i=0}^{\infty} \mathbf{w}_j(k+i|k)^T \times \\ & \mathbf{w}_j(k+i|k) + \sum_{i=0}^{\infty} \begin{bmatrix} \mathbf{x}_j(k+i|k) \\ \mathbf{w}_j(k+i|k) \end{bmatrix}^T \Lambda_j \begin{bmatrix} \mathbf{x}_j(k+i|k) \\ \mathbf{w}_j(k+i|k) \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (13)$$

其中

$$\Lambda_j = \begin{bmatrix} \Omega_{1,j} - P_j + C_j^T C_j & \Omega_{2,j} \\ * & \Omega_{3,j} - \delta_j I \end{bmatrix}$$

如果要满足 H_∞ 性能指标 δ_j ($\delta_j > 0$), 使得 $\|T_{j,y\omega}\| < \delta_j$, 那么式 (14) 成立^[14]:

$$\Lambda_j < 0 \tag{14}$$

根据 Schur 补性质^[15], 式 (14) 可以写成如下形式:

$$\Lambda_j = \begin{bmatrix} -P_j + C_j^T C_j & 0 & (A_j + B_j K_j)^T \\ * & -\delta_j I & B_{dj} \\ * & * & -P_j^{-1} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \Xi_{1,j} + \Xi_{1,j}^T & \Xi_{2,j} + \Xi_{2,j}^T \end{bmatrix} < 0 \tag{15}$$

其中,

$$\Xi_{1,j} = \begin{bmatrix} (E_{1,j} + E_{1,j} K)^T \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} F_{1,j}(k)^T \begin{bmatrix} 0 & 0 & H_{1,j}^T \end{bmatrix}$$

$$\Xi_{2,j} = \begin{bmatrix} 0 \\ E_{2,j}^T \\ 0 \end{bmatrix} F_{1,j}(k)^T \begin{bmatrix} 0 & 0 & H_{1,j}^T \end{bmatrix}$$

则式 (15) 可以写成式 (16) 的形式.

$$\Lambda_j = \begin{bmatrix} -P_j + C_j^T C_j & 0 & (A_j + B_j K_j)^T \\ * & -\delta_j I & B_{dj} \\ * & * & -P_j^{-1} \end{bmatrix} + a_{1,j} \begin{bmatrix} (E_{1,j} + E_{2,j} K)^T \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_{1,j} + E_{2,j} K & 0 & 0 \end{bmatrix} + a_{1,j}^{-1} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ H_{1,j} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 & 0 & H_{1,j}^T \end{bmatrix} + a_{2,j} \begin{bmatrix} 0 \\ E_{2,j}^T \\ 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 & E_{2,j} & 0 \end{bmatrix} + a_{2,j}^{-1} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ H_{1,j} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 & 0 & H_{1,j}^T \end{bmatrix} < 0 \tag{16}$$

再次利用 Schur 补性质, 式 (16) 可以转化为式 (10). 同时, 根据式 (13), 式 (5) 可以写成如下形式:

$$J_{j,\infty}(k) \leq V_j(\mathbf{x}(k+i|k)) + \delta_j \sum_{i=0}^{\infty} \mathbf{w}_j(k+i|k)^T \mathbf{w}_j(k+i|k) = \mathbf{x}_j(k+i|k)^T P_j \mathbf{x}_j(k+i|k) + \delta_j \sum_{i=0}^{\infty} \mathbf{w}_j(k+i|k)^T \mathbf{w}_j(k+i|k) \leq r_{0,j} + r_{1,j} \tag{17}$$

扰动项 $\|\mathbf{w}_j(k+i|k)\| \leq r_{1,j}$ 有界, 则优化性能指标 (3) 等价于式 (18):

$$\min_{u_j(k+i|k), i=0,1,\dots,n} \max_{[A_j(k+i), B_j(k+i)], i \geq 0} r_{0,j} \text{ s.t. (8) } \sim \text{(10)} \tag{18}$$

式 (8) 和式 (9) 的证明过程可参考文献 [13]. \square

3 仿真研究

以某钢厂的轧机活套参数为例^[17].

$K_v = 1, T_v = 0.0885 \text{ s}, K_M = 0.5 \text{ km}, T_M = 0.0324 \text{ s}, J = 0.48 \text{ kN} \cdot \text{m}^2, f = 0.0687, E = 210 \text{ kN/mm}^2, L = 4500 \text{ mm}, K_{v\sigma} = 0.3586, K_{M\sigma} = 0.0255, K_{v\omega} = 0.2361, K_{M\omega} = 0.3428, K_{M\theta} = 0.3586$. 基于系统 (1) 得到传递函数为

$$G_{11} = \frac{2587s^2 + 18480s + 10780}{s^4 + 93.75s^3 + 1444s^2 + 6107s + 3546}$$

$$G_{12} = \frac{-17760s}{s^4 + 113.3s^3 + 3057s^2 + 16140s + 9684}$$

$$G_{21} = \frac{-1375}{s^4 + 93.75s^3 + 1444s^2 + 6107s + 3546}$$

$$G_{22} = \frac{321.4s + 24210}{s^4 + 113.3s^3 + 3057s^2 + 16140s + 9684}$$

取采样时间为 10 ms, 得到离散化系统 (2) 的参数为

$$A_1 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & -0.3916 \\ 0.5 & 0 & 0 & 1.042 \\ 0 & 1 & 0 & -1.994 \\ 0 & 0 & 2 & 3.297 \end{bmatrix}$$

$$A_2 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & -0.322 \\ 0.5 & 0 & 0 & 0.896 \\ 0 & 1 & 0 & -1.804 \\ 0 & 0 & 2 & 3.138 \end{bmatrix}$$

$$B_1 = \begin{bmatrix} 0.2744 & -1.09 \times 10^{-6} \\ -0.1015 & -7.314 \times 10^{-6} \\ -0.232 & -8.814 \times 10^{-6} \\ 0.394 & -1.912 \times 10^{-6} \end{bmatrix}$$

$$B_2 = \begin{bmatrix} 0.02043 & -0.000304 \\ 0.04448 & -0.000347 \\ -0.0367 & 0.001238 \\ -0.0367 & 0.0007808 \end{bmatrix}$$

$$C_1 = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0.25 \end{bmatrix}^T, \quad C_2 = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0.0625 \end{bmatrix}^T$$

$$F_i(k) = \sin(k)$$

考虑杨氏模量和前滑系数的不确定性, 令摄动参数为

$$H_1 = \begin{bmatrix} -0.039 & 0.1 & -0.2 & 0.3 \end{bmatrix}^T$$

$$H_2 = \begin{bmatrix} -0.032 & 0.09 & -0.18 & 0.31 \end{bmatrix}^T$$

$$E_{11} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, E_{12} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \end{bmatrix}$$

$$E_{21} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, E_{22} = \begin{bmatrix} 0.8 & 0 \end{bmatrix}$$

设系统的初始状态和约束条件分别为

$$\begin{aligned} \mathbf{x}_1 &= [0.4 \quad 0.4 \quad -0.3 \quad 0.3]^T \\ \mathbf{x}_2 &= [0.4 \quad 0.4 \quad -0.3 \quad 0.3]^T \\ -2 &\leq \mathbf{u}_{1,k+i|k} \leq 2, \quad -0.5 \leq \mathbf{u}_{2,k+i|k} \leq 0.5 \end{aligned}$$

基于参数不确定性模型 (2), 采用多路预测控制算法。在 600 ms 时刻, 分别对轧制速度和活套电机电流引入幅值 [0.3, 0.3] 的阶跃扰动信号, 仿真结果如图 4 和图 5 所示, 经过反复仿真可知, 活套电机电流变化对活套高度影响较大, 对带钢张力的影响较小; 轧制速度的变化对活套高度的影响较小, 对带钢张力的影响较大。相比较而言, 张力对带钢的影响大, 活套角度控制主要是给轧制速度匹配提供一定的裕度。由仿真图 6 能够看出, 与传统双输入双输出预测控制算法相比较, 采用多路预测控制算法, 活套张力控制系统扰动抑制效果更好些。控制律变化曲线如图 7 所示, 活套电机电流的变化范围是 $-1.8 \text{ A} \sim 0.2 \text{ A}$ 之间, 轧制速度的变化范围是 $-0.5 \text{ m/s} \sim 0.4 \text{ m/s}$, 满足约束条件。

为了进一步说明多路预测控制算法的特征, 对于采样时间为 10 ms 的离散控制系统, 我们截取仿真过程前 180 ms 内的仿真结果, 如图 8 所示, 在第一个 10 ms 内, \mathbf{u}_1 更新, \mathbf{u}_2 保持不变; 在第二个 10 ms 内, \mathbf{u}_2 更新, \mathbf{u}_1 保持不变。20 ms 后, 开始新的循环。其实质是一种建立在滚动时域控制原理基础上的分散控制, 把复杂的大系统分解成简单的子系统, 更容易设计控制器, 减小计算量, 减轻计算机负担^[18-19]。

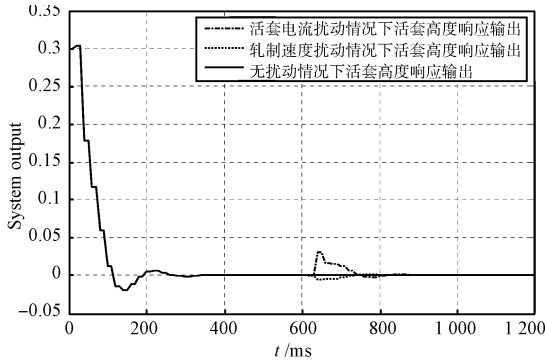


图 4 有扰情况下活套高度响应输出

Fig. 4 Output of looper height with disturbance

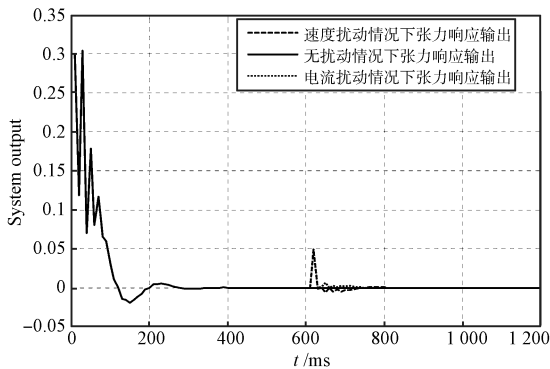


图 5 有扰情况下活套张力响应输出

Fig. 5 Output of looper tension with disturbance

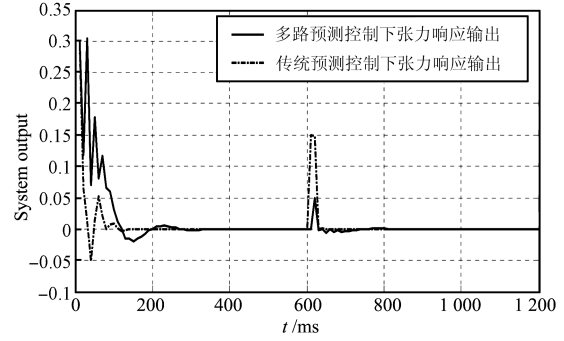


图 6 多路预测控制下活套张力响应输出

Fig. 6 Output of looper tension with multiplexed receding horizon control

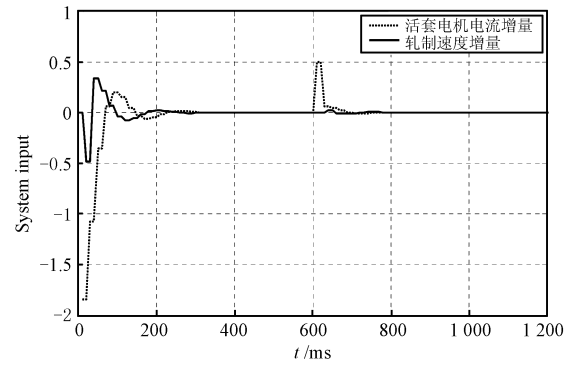


图 7 活套系统控制输入

Fig. 7 Control inputs of looper system

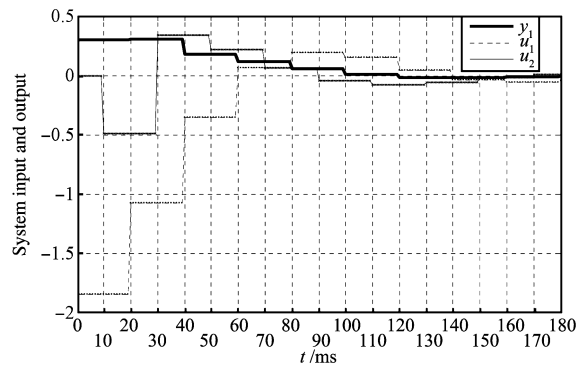


图 8 活套系统多路预测控制

Fig. 8 Multiplexed receding horizon control of looper system

4 结论

板带热连轧活套高度和张力控制系统是典型的双输入双输出强耦合系统, 本文提出一类基于滚动时域优化原理的多路控制策略, 将双输入双输出系统看成两个单输入单输出系统, 在每个周期内, 从 H_∞ 观点出发, 顺序求解子系统的控制律后及时更新系统, 将解耦问题转化为干扰抑制和多目标优化问题, 减轻了计算负担, 提高系统的控制性能。仿真结果表明该方法具有良好的解耦效果和控制性能。

References

1 Byoung J A, Sung H P, Baek Y K, Tai D Y, Dae H K, Man H L. Tension control system for hot strip mills. In: Pro-

- ceedings of the IEEE International Symposium on Industrial Electronics. Pusan, South Korea: IEEE, 2001. 1452–1457
- 2 Hong W K, Kim P H, Moon Y H, Yi J J. Hot strip width control method by using looper tension measuring system in finishing mill. *Journal of Materials Processing Technology*, 2001, **111**(1–3): 74–78
 - 3 Hearn G, Grimble M J. Inferential control for rolling mills. *IEEE Proceedings — Control Theory and Applications*, 2000, **147**(6): 673–679
 - 4 Tong Chao-Nan, Hu Hong-Jun, Sun Yi-Kang. Micro tension control system with load observer in continuous hot strip mill. *Control and Decision*, 1996, **11**(2): 291–295
(童朝南, 胡红军, 孙一康. 热连轧机带观测器的微张力控制. 控制与决策, 1996, **11**(2): 291–295)
 - 5 Asano K, Yamamoto K, Kawase T, Nomura N. Hot strip mill tension-looper control based on decentralization and coordination. *Control Engineering Practice*, 2000, **8**(3): 337–344
 - 6 Imanari H, Morimatsu Y, Sekiguchi K, Ezure H, Matuoka R, Tokuda A, Otake H. Looper H_∞ control for hot strip mills. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 1997, **33**(3): 790–796
 - 7 Hesketh T, Yu A J, Clements D J, Butler D H, Van der Laan R. Controller design for hot strip finishing mills. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 1998, **6**(2): 208–219
 - 8 Lee J W, Kwon W H, Choi J H. On stability of constrained receding horizon control with finite terminal weighting matrix. *Automatica*, 1998, **34**(12): 1607–1612
 - 9 Park C J, Hwang I C. Tension control in hot strip process using adaptive receding horizon control. *Journal of Materials Processing Technology*, 2009, **209**(1): 426–434
 - 10 Choi I S, Rossiter J A, Fleming P J. Looper and tension control in hot rolling mills: a survey. *Journal of Process Control*, 2007, **17**(6): 509–521
 - 11 Tong Chao-Nan, Wu Yan-Kun, Liu Lei-Ming, Li Jiang-Yun. Modeling and integral variable structure control of hydraulic looper multivariable system. *Acta Automatica Sinica*, 2008, **34**(10): 1381–1389
(童朝南, 武延坤, 刘磊明, 李江均. 液压活套多变量系统的建模及积分变结构控制. 自动化学报, 2008, **34**(10): 1381–1389)
 - 12 Ling K V, Maciejowski J, Wu B F. Multiplexed model predictive control [Online], available: <http://www-control.eng.cam.ac.uk/Homepage/publications.php>, October 5, 2009
 - 13 Xia Y Q, Liu G P, Shi P, Chen J, Rees D. Robust constrained model predictive control based on parameter dependent Lyapunov functions. *Circuits, System, and Signal Processing*, 2008, **27**(4): 429–446
 - 14 Fu Xing-Jian, Tong Chao-Nan, Zong Sheng-Yue. H_∞ control and simulation study for looper system of hot strip rolling mill. *Journal of System Simulation*, 2006, **18**(1): 162–164
(付兴建, 童朝南, 宗胜悦. 带钢热连轧活套系统的 H_∞ 控制及仿真研究. 系统仿真学报, 2006, **18**(1): 162–164)
 - 15 Zheng A. Reducing on-line computational demands in model predictive control by approximating QP constraints. *Journal of Process Control*, 1999, **9**(4): 279–290
 - 16 Siljak D D. Decentralized control and computations: status and prospects. *Annual Reviews in Control*, 1996, **20**: 131–141
 - 17 Gu K, Zohdy M A, Loh N K. Necessary and sufficient conditions for quadratic stability of uncertain linear systems. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 1990, **35**(5): 601–604
 - 18 Dumitrescu B. Bounded real lemma for FIR MIMO systems. *IEEE Signal Processing Letters*, 2005, **12**(7): 496–499
 - 19 Boyd S, Ghaoui L E, Feron E, Balakrishnan V. *Linear Matrix Inequality in System and Control Theory*. Philadelphia: SIAM, 1994
- 张晓东 北京理工大学自动化学院博士研究生. 主要研究方向为鲁棒预测控制. 本文通信作者. E-mail: zhangxiaodong09@126.com
(ZHANG Xiao-Dong Ph.D. candidate at the School of Automation, Beijing Institute of Technology. His main research interest is robust predictive control. Corresponding author of this paper.)
- 姚小兰 北京理工大学自动化学院副教授. 主要研究方向为大型工业系统控制. E-mail: yaoxiaolan@bit.edu.cn
(YAO Xiao-Lan Associate professor at the School of Automation, Beijing Institute of Technology. Her main research interest is large industry process control.)
- 伍清河 北京理工大学自动化学院教授. 主要研究方向为鲁棒控制. E-mail: qinghew@bit.edu
(WU Qing-He Professor at the School of Automation, Beijing Institute of Technology. His main research interest is robust control.)
- 李道平 北京理工大学自动化学院博士研究生. 主要研究方向为鲁棒预测控制. E-mail: leedaoping@gmail.com
(LI Dao-Ping Ph.D. candidate at the School of Automation, Beijing Institute of Technology. His main research interest is robust predictive control.)