

活套关联系统建模及滚动时域控制

张晓东^{1,2}, 姚小兰², 伍清河²

(1. 中国石油大学 计算机与通信工程学院, 山东 青岛 266555; 2. 北京理工大学 自动化学院, 北京 100081)

摘要: 本文分析了热连轧活套系统下游机架轧制速度对活套张力系统的影响和热连轧多机架协同工作的特性, 建立了活套关联系统模型; 基于分散控制思想, 为每个活套系统单独设计控制器. 对于每一个活套子系统, 活套高度和张力是强耦合系统, 本文采用一类基于滚动时域优化原理的多路控制策略, 在每个周期内顺序求解活套高度和张力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. 仿真结果证实了该方法具有良好的解耦效果和控制特性.

关键词: 鲁棒控制; 滚动时域控制; 活套控制

中图分类号: TP273 **文献标识码:** A

Modeling and receding-horizon control for looper-interconnected systems

ZHANG Xiao-dong^{1,2}, YAO Xiao-lan², WU Qing-he²

(1. College of Computer & Communication Engineering, China University of Petroleum, Qingdao Shandong 266555, China;

2. School of Automation, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

Abstract: By investigate how the rolling speed of downstream stands affects on the looper tension system, and analyzing the characteristics of hot strip stands working in cooperation, we build the model for the looper interconnected system, and develop separate controller for each looper system based on distribution control. To deal with the strong coupling between the height and tension in a looper system, we employ the multiplex control strategy based on the receding horizon theory. After all the subsystem-controllers are obtained sequentially in one cycle, the system is updated in time. The decoupling problem is transformed into a compound problem of disturbance rejection and comprehensive optimization, according to the H-infinity control theory. Simulation results show the effectiveness of this strategy in improving the decoupling effect and the control performance.

Key words: robust control; receding horizon control; looper control

1 引言(Introduction)

恒定活套量和微张力轧制是现代热连轧机组的一个基本特点. 活套控制是通过调整轧机轧制速度使活套高度维持在设定值附近, 通过控制活套电机电流使机架间张力恒定, 活套控制的好坏, 直接影响产品质量. 现有的大多数活套控制都是传统的PI控制, 但是PI控制不能有效的处理活套张力和高度系统的耦合影响. 消除二者的耦合关系, 使活套稳定工作, 提高产品的尺寸精度, 已成为活套控制的一个重要课题. 针对活套高度和张力的耦合特性很多先进的控制算法应用到这一领域当中, 如模糊控制^[1]、智能控制^[2]、神经网络变结构控制^[3]、逆系统理论^[4]、鲁棒控制^[5]等. 预测控制由于具有处理硬约束的能力而受到关注^[6].

以上的文献中, 对活套系统的分析只局限于单机架活套系统, 当下游机架轧制速度的变化时, 利用计算机系统将下游机架轧制速度增量按照一定的百分

比对上游机架逐移调整, 维持活套系统稳定, 没有考虑相邻机架轧制速度增量对活套系统的影响从而导致系统控制精度下降. 同时, 在带钢的稳态轧制阶段总是存在着各种各样的带速扰动, 例如辊缝压下, 前滑后滑的影响. 因此不可能始终保持各机架间的速度配比关系. 由于按照比例逐移调整上游轧机轧制速度, 会打破上游机架的秒流量平衡, 使整个连轧活套系统的稳定性下降, 也会影响单机架的控制效果.

文中基于热连轧活套系统的工作原理, 考虑下游机架轧制速度增量对活套张力系统的影响, 建立活套关联系统模型; 基于分散控制思想, 单独为每个活套系统设计控制器. 同时, 对于单个活套系统, 活套高度与张力系统具有强耦合特性, 将彼此间的耦合作用看做扰动, 从 H_∞ 观点出发, 将解耦问题转化为干扰抑制问题, 基于滚动优化原理设计多路控制器, 即在每个周期内顺序求解子系统的控制律后及时更新系统. 仿真结果表明, 基于活套关联系统模型, 采

用多路控制策略,能获得较好的控制效果.

2 活套关联系统模型(Looper interconnected systems model)

热连轧系统,一般由6,7台机架组成,机架间通过带钢相连接.活套通常安装在两个精轧机架之间.活套系统示意图如图1所示^[7].

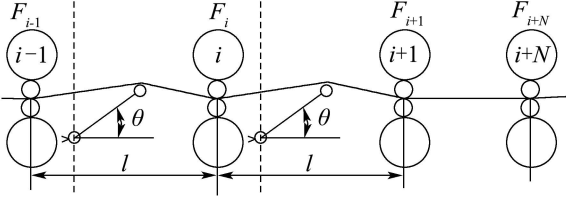


图1 活套系统示意图
Fig. 1 Configuration of looper systems

从图1中可以明显看出,活套子系统之间存在关联影响,即第*i*个机架活套系统的调控受到第*i*+1个机架轧制速度的影响.本文以*F*₅机架为例,如果调节辊缝,会直接影响*F*₅的前滑与后滑,使*V*₅变化;同时,*F*₆机架辊缝的调节也会使*V*₆变化,从而影响*F*₅机架的活套张力.通过分析下游相邻轧机轧制速度的增量对活套张力系统的影响,建立活套关联系统模型.

张力增量方程

$$\frac{d\Delta\tau_5}{dt} = \frac{E}{l}(\Delta V'_6 - \Delta V_5), \quad (1)$$

其中: $V_5 = V_{05}(1 + f_5)$, $V'_6 = V_{06}(1 - \beta_6)$; V_5 , V_{05} , τ_5 , f_5 分别为*F*₅机架的出口速度、轧制速度、张应力和前滑系数; V'_6 , V_{06} , β_6 分别为*F*₆机架的入口速度、轧制速度、和后滑系数; E 为弹性模量, l 为机架间距离, θ 为活套臂与水平线的夹角.

$$\frac{d\Delta\tau_5}{dt} = \frac{E}{l} \left\{ -\frac{\partial\beta_6}{\partial\tau_5} V_{06} \Delta\tau_5 + \Delta V_{06}(1 - \beta_6) - \Delta V_{05}(1 + f_5) - \frac{\partial f_5}{\partial\tau_5} V_{05} \Delta\tau_5 \right\}. \quad (2)$$

套量的增量方程为

$$\Delta L_{loop} = \int (\Delta V'_6 - \Delta V_5) dt. \quad (3)$$

由式(1)和式(3)得

$$\Delta\tau_5 = \frac{E}{l} \Delta L_{loop} = \frac{E}{l} \frac{dL_{loop}}{d\theta} \Delta\theta. \quad (4)$$

在活套高度控制系统中,活套支持器用作套量(角度)检测装置以实现套量反馈.当活套处于动作过程中,除受张力矩和重力矩外,活套还将承受一个动力矩,该动力矩打破了原有的平衡关系,使张力矩发生变化.忽视重力矩,整个活套输出力矩的增量形式为

$$\begin{aligned} \Delta M &= \Delta M_T + \Delta M_W + \Delta M_D = \\ &= \Delta M_T + J \frac{d\Delta\omega}{dt}, \end{aligned} \quad (5)$$

其中: J 为活套转动惯量($\text{N}\cdot\text{m}^2$), ω 为活套角速度

(rad/s), M_T 为活套张力矩, M_W 为活套重力矩, M_D 为活套动力矩.

在量纲单位分别为MPa,度($^\circ$)和 $\text{N}\cdot\text{m}$ 时,有

$$\frac{d\Delta\omega}{dt} = \frac{\pi}{180} \frac{d^2\Delta\theta}{dt^2}, \quad (6)$$

于是

$$\begin{aligned} \frac{d^2\Delta\theta}{dt^2} &= (\Delta M - \Delta M_T) \frac{1}{J} \frac{180}{\pi} = \\ &= \frac{1}{J} \frac{180}{\pi} \left(\Delta M - \frac{\partial M_T}{\partial\theta} \Delta\theta - \frac{\partial M_T}{\partial\tau_5} \Delta\tau_5 \right). \end{aligned} \quad (7)$$

根据式(2)(4)和式(7),可以得到活套系统线性化模型如图2所示.图2中: C_m 为活套电机电流到力矩的增益系数, G_R 为连接活套电机的减速机减速比. T_i 为活套电流环等效时间常数, T_v 为主机速度环等效时间常数,令 Δi_{ref} , ΔV_{ref} 为控制输入, $\Delta\theta_5$, $\Delta\tau_5$ 为控制输出.

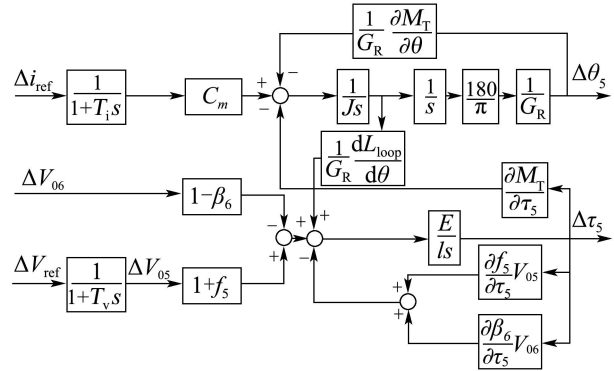


图2 活套系统方框图

Fig. 2 Block diagram of looper system

利用轧制速度控制活套张力,利用活套电机电流控制活套角度,分别得到活套高度系统模型和活套张力关联系统模型.活套高度系统模型为

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} \Delta\dot{\theta}_5(t, s) \\ \Delta\dot{\omega}_5(t, s) \\ \Delta\dot{i}_5(t, s) \end{bmatrix} &= \\ &= \begin{bmatrix} 0 & \frac{1}{G_R} & 0 \\ -\frac{1}{G_R} \frac{\partial M_T}{\partial\theta} \frac{1}{J} \frac{180}{\pi} & 0 & \frac{C_m}{J} \frac{180}{\pi} \\ 0 & 0 & -\frac{1}{T_i} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta\theta_5(t, s) \\ \Delta\omega_5 \\ \Delta i_5 \end{bmatrix} + \\ &= \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \frac{1}{T_i} \end{bmatrix} u + \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \end{bmatrix} \left(-\frac{1}{G_R} \frac{\partial M_T}{\partial\tau} \frac{1}{J} \frac{180}{\pi} \Delta\tau_5 \right). \end{aligned} \quad (8)$$

活套张力关联系统模型为

$$\begin{bmatrix} \Delta\dot{\tau}_5(t, s) \\ \Delta\dot{V}_{05}(t, s) \end{bmatrix} =$$

$$\begin{bmatrix} \frac{E}{l}(-\frac{\partial \beta_6}{\partial \tau_5} V_{06} - \frac{\partial f_5}{\partial \tau_5} V_{05}) & -\frac{E}{l}(1 + f_5) \\ 0 & -\frac{1}{T_V} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \Delta \tau_5(t, s) \\ \Delta V_{05} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & \frac{E}{l}(1 - \beta_6) \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \tau_6(t, s) \\ \Delta V_{06} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \end{bmatrix} u + \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} \frac{1}{G_R} \frac{E}{l} \frac{dL_{loop}}{d\theta} \Delta \omega_5. \quad (9)$$

3 基于滚动优化原理的多路控制策略 (Multiplexed control strategy based on receding horizon theory)

通常情况下, 在考虑多输入多输出滚动时域优化控制问题时, 所有的控制输入是同时更新的. 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. 因此对于多输入多输出的滚动时域多路控制策略, 假设最小的更新周期为 T , 在某一时刻, 可以在 T/m 内更新其中一个子系统的控制律, 而其他子系统的控制律保持不变, 在 m 个子系统的控制律顺序更新后, 及时更新整个系统, 开始新的循环^[8]. 将此思想应用到双输入双输出的活套控制系统中. 如下图3, 4所示.

图3是系统控制律同步更新简图; 图4是系统控制律异步更新简图, 即控制律在第1个 $T/2$ 内更新 u_1 , u_2 保持不变; 在第2个 $T/2$ 内更新 u_2 , u_1 保持不变, 经过两个 $T/2$ 后更新系统, 开始新的循环.

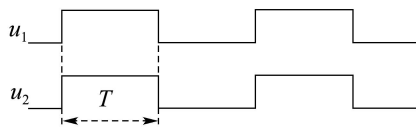


图 3 系统输入同步更新
Fig. 3 Synchronized updating scheme

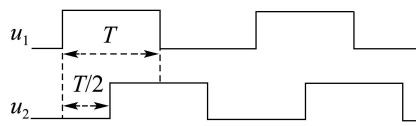


图 4 系统输入异步更新
Fig. 4 Multiplexed updating scheme

基于滚动时域原理的多路控制策略, 其实质是一种建立在滚动时域基础上的分散控制. 由于在每一个周期内顺序更新控制律, 能够充分考虑活套张力与高度系统之间的耦合影响, 提高控制性能. 同时, 与传统的多输入多输出(MIMO)滚动时域控制方式相比较, 更容易设计控制器, 减小计算量, 减轻计算机负担^[9].

4 控制器设计(Controller designing)

根据活套张力关联系统模型(9), 为了一般起见, 考虑如下线性离散模型:

$$\begin{cases} \mathbf{x}_j(k+1) = A_j \mathbf{x}_j(k) + B_j \mathbf{u}_j(k) + \sum_{l=1}^N A_{lj} \mathbf{x}_l(k) + B_{jd} \mathbf{w}_j(k), \\ \mathbf{y}_j(k) = C_j \mathbf{x}_j(k), \end{cases} \quad (10)$$

其中: $\mathbf{x}_j(k) \in \mathbb{R}^n$ 是第 $j(j = 1, 2, \dots, N)$ 个子系统的状态, $\mathbf{u}_j(k) \in \mathbb{R}^m$ 是控制输入, $\mathbf{y}_j(k)$ 是系统输出, $\mathbf{w}_j(k)$ 是有限能量的外来扰动; $A_j, A_{lj}, B_j, B_{jd}, C_j$ 是适当维数的矩阵, A_{lj} 反应了第 $l(l \neq j, l = 1, 2, \dots, N)$ 个子系统和第 j 个子系统之间的关联.

在 k 时刻对每个活套子系统顺序求解控制律, 保证系统稳定性且满足系统的约束条件及性能指标:

$$\min_{\mathbf{u}_j(k+i|k), i=0,1,\dots,n} \max_{A_j, B_j, A_{lj}, B_{jd}, j=1,2} J_{j,\infty}(k), \quad (11)$$

s.t.

$$\|T_{j,\mathbf{y}\mathbf{w}}\|_{\infty} < \delta_j, \quad (12)$$

$$J_{j,\infty}(k) = \sum_{j=1}^N \sum_{i=0}^{\infty} \mathbf{y}_j(k+i|k)^T \mathbf{y}_j(k+i|k), \quad (13)$$

其中 $T_{j,\mathbf{y}\mathbf{w}}$ 是外部扰动 \mathbf{w}_j 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 $\delta_j (\delta_j > 0)$.

定理 1 对于不确定系统(10)和性能指标(11)若以下优化问题:

$$\min_{\mathbf{u}_j(k+i|k), i=0,1,\dots,n} \max_{A_j, B_j, A_{lj}, B_{jd}, j=1,2} r_{0,j}, \quad (14)$$

s.t.

$$\begin{bmatrix} -r_{0,j} & \mathbf{x}_j(k|k)^T \\ * & -Q_j \end{bmatrix} < 0, \quad (15)$$

$$\begin{bmatrix} -r_{0,j}^{-1} \mathbf{u}_{j,\max}^2 & X_j \\ * & -Q_j \end{bmatrix} < 0, \quad (16)$$

$$\begin{bmatrix} -Q_j & * & * & * & * & * \\ 0 & -R^{-1} & * & * & * & * \\ 0 & 0 & -\delta_j I & * & * & * \\ A_j Q_j + B_j X_j & A_{lj} R^{-1} & B_{jd} & -Q_j & * & * \\ C_j Q_j & 0 & 0 & 0 & -I & * \\ Q_{lj} & 0 & 0 & 0 & 0 & R^{-1} \end{bmatrix} < 0 \quad (17)$$

有解, 其中: $P_j > 0, Q_j = P_j^{-1}, X_j = K_j P_j^{-1}, R_j = \text{diag}\{W_{j1}, W_{j2}, \dots, W_{jN}\}, Q_{lj} = [Q_{lj1} \ Q_{lj2} \ \dots \ Q_{ljN}]^T$, “*” 处的矩阵块可以由矩阵的对角关系得到. 则系统(10)存在反馈控制律: $\mathbf{u}_j(k) = K_j \mathbf{x}_j(k)$ 满足约束条件 $\|\mathbf{u}_j\|_{\max} \leq \mathbf{u}_{j,\max}$ 及性能指标(11).

证 选取Lyapunov函数

$$V_j(\mathbf{x}(k|k)) = \mathbf{x}_j^T(k|k) P \mathbf{x}_j(k|k),$$

状态反馈控制律 $\mathbf{u}_j(k|k) = K_j \mathbf{x}_j(k|k)$, 则对于 k 时

刻的每个子系统,如下等式成立:

$$\begin{aligned} &\Delta V_j(\mathbf{x}(k+i|k)) = \\ &V_j(\mathbf{x}(k+i+1|k)) - V_j(\mathbf{x}(k+i|k)) = \\ &\sum_{j=1}^N \begin{bmatrix} \mathbf{x}_j(k+i|k) \\ \bar{\mathbf{x}}_l(k+i|k) \\ \mathbf{w}_j(k+i|k) \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} G_{11} & G_{12} & G_{13} \\ * & G_{22} & G_{23} \\ * & * & G_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{x}_j(k+i|k) \\ \bar{\mathbf{x}}_l(k+i|k) \\ \mathbf{w}_j(k+i|k) \end{bmatrix}, \end{aligned} \tag{18}$$

其中:

$$\begin{aligned} G_{11} &= (A_j + B_j K_j)^T P_j (A_j + B_j K_j) - P_j, \\ G_{12} &= (A_j + B_j K_j)^T P_j \bar{A}_{jl}, \\ G_{13} &= (A_j + B_j K_j)^T P_j B_{jd}, \quad G_{22} = \bar{A}_{jl}^T P_j \bar{A}_{jl}, \\ G_{23} &= \bar{A}_{jl}^T P_j B_{jd}, \quad G_{33} = B_{jd}^T P_j B_{jd}, \\ \bar{A}_{jl} &= [A_{j1} \quad A_{j2} \quad \cdots \quad A_{jN}], \quad \bar{\mathbf{x}}_l = [\mathbf{x}_1^T \quad \mathbf{x}_2^T \quad \cdots \quad \mathbf{x}_N^T]^T. \end{aligned}$$

若系统稳定则 $\mathbf{x}_j(\infty|k) \rightarrow 0$,因此 $V_j(\mathbf{x}(\infty|k)) \rightarrow 0$,将上式累加可得到

$$\begin{aligned} -V(\mathbf{x}(k|k)) &= \\ &\sum_{j=1}^N \left\{ \sum_{i=0}^{\infty} \begin{bmatrix} \mathbf{x}_j(k+i|k) \\ \bar{\mathbf{x}}_l(k+i|k) \\ \mathbf{w}_j(k+i|k) \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} G_{11} & G_{12} & G_{13} \\ * & G_{22} & G_{23} \\ * & * & v_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{x}_j(k+i|k) \\ \bar{\mathbf{x}}_l(k+i|k) \\ \mathbf{w}_j(k+i|k) \end{bmatrix} \right\}, \end{aligned} \tag{19}$$

因此性能指标可以写成如下形式:

$$\begin{aligned} J_{j,\infty}(k) &= \\ &\sum_{j=1}^N \sum_{i=0}^{\infty} \mathbf{y}_j^T(k+i|k) \mathbf{y}_j(k+i|k) = \\ &\sum_{j=1}^N \left\{ \delta_j \sum_{i=0}^{\infty} \mathbf{w}_j^T(k+i|k) \mathbf{w}_j(k+i|k) + \right. \\ &\left. \sum_{i=0}^{\infty} \begin{bmatrix} \mathbf{x}_j(k+i|k) \\ \bar{\mathbf{x}}_l(k+i|k) \\ \mathbf{w}_j(k+i|k) \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} C_j^T C_j & 0 & 0 \\ * & 0 & 0 \\ * & * & -\delta_j I \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{x}_j(k+i|k) \\ \bar{\mathbf{x}}_l(k+i|k) \\ \mathbf{w}_j(k+i|k) \end{bmatrix} \right\} = \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} &\sum_{j=1}^N \{V_j(\mathbf{x}(k|k)) - V_j(\mathbf{x}(k|k)) + \\ &\delta_j \sum_{i=0}^{\infty} \mathbf{w}_j^T(k+i|k) \mathbf{w}_j(k+i|k) - \\ &\sum_{l=1}^N \mathbf{x}_j^T(k) W_j^T W_j \mathbf{x}_j(k) + \\ &\sum_{l=1}^N \mathbf{x}_j^T(k) W_j^T W_j \mathbf{x}_j(k)\} < 0. \end{aligned} \tag{20}$$

由于

$$\sum_{l=1}^N \sum_{j=1}^N \mathbf{x}_j^T(k) W_{jl} \mathbf{x}_j(k) = \sum_{l=1}^N \sum_{j=1}^N \mathbf{x}_l^T(k) W_{lj} \mathbf{x}_l(k),$$

所以

$$\begin{aligned} J_{j,\infty}(k) &= \\ &\sum_{j=1}^N \left\{ \delta_j \sum_{i=0}^{\infty} \mathbf{w}_j^T(k+i|k) \mathbf{w}_j(k+i|k) + V_j(\mathbf{x}(k|k)) \right\} + \\ &\sum_{j=1}^N \sum_{i=0}^{\infty} \begin{bmatrix} \mathbf{x}_j(k+i|k) \\ \bar{\mathbf{x}}_l(k+i|k) \\ \mathbf{w}_j(k+i|k) \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} N_{11} & G_{12} & G_{13} \\ * & G_{22} - R & G_{23} \\ * & * & G_{33} - G_j I \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{x}_j(k+i|k) \\ \bar{\mathbf{x}}_l(k+i|k) \\ \mathbf{w}_j(k+i|k) \end{bmatrix}, \end{aligned} \tag{21}$$

其中: $N_{11} = G_{11} + C_j^T C_j + M_j$, $M_j = \sum_{l=1}^N W_{jl}$.

令

$$\begin{aligned} A_j &= \begin{bmatrix} N_{11} & G_{12} & G_{13} \\ * & G_{22} - R & G_{23} \\ * & * & G_{33} - \delta_j I \end{bmatrix} = \\ &\begin{bmatrix} (A_j + B_j K_j)^T \\ \bar{A}_{lj}^T \\ B_{jd}^T \end{bmatrix} P_j [(A_j + B_j K_j) \quad \bar{A}_{lj} \quad B_{jd}] + \\ &\begin{bmatrix} C_j^T C_j - P_j + R & 0 & 0 \\ * & -R & 0 \\ * & * & -\delta_j I \end{bmatrix}, \end{aligned} \tag{22}$$

根据Schur补性质^[10],

$$A_j = \begin{bmatrix} C_j^T C_j - P_j + M_j & 0 & 0 & (A_j + B_j K_j)^T \\ * & -R_j & 0 & \bar{A}_{jl}^T \\ * & * & -\delta_j I & B_{jd}^T \\ * & * & * & -P_j^{-1} \end{bmatrix}. \tag{23}$$

如果要满足 H_∞ 性能指标 $\delta_j (\delta_j > 0)$,使得 $\|T_{j,yw}\|_\infty < \delta_j$,那么如下不等式成立^[11]:

$$A_j < 0. \tag{24}$$

式(24)与式(17)等价,根据式(20)(24),性能指标可以写成如下形式:

$$\begin{aligned} J_\infty(k) &\leq \\ &\sum_{j=1}^N \{V_j(\mathbf{x}(k+i|k)) + \delta_j \sum_{i=0}^{\infty} \mathbf{w}_j^T(k+i|k) \mathbf{w}_j(k+i|k)\} = \\ &\sum_{j=1}^N \{ \mathbf{x}_j^T(k+i|k) P_j \mathbf{x}_j(k+i|k) + \\ &\delta_j \sum_{i=0}^{\infty} \mathbf{w}_j^T(k+i|k) \mathbf{w}_j(k+i|k) \} \leq r_{0,j} + r_{1,j}. \end{aligned} \tag{25}$$

扰动项 $\|w_j(k+i|k)\| \leq r_{1,j}$ 有界, 则优化性能指标(11)可以转化为式(26), 即

$$\min_{u(k+i|k), i=0,1,\dots,n} \max_{A_j, B_j, A_{1j}, B_{1j}, j=1,2} r_{0,j}, \quad (26)$$

s. t. 式(15)(16)(17).

式(15)(16)的证明过程可以参考文献[12]. 同样方法求解活套高度系统控制律. 证毕.

5 仿真研究(Simulation results)

根据某热连轧厂的第5号轧机活套实际参数^[13]:

$$\begin{aligned} E &= 1.4 \times 10^5 \text{ MPa}, l = 5.5 \text{ m}, 1/T_v = 0.091, \\ T_i &= 0.0182, G_R = 11.638, f_5 = 0.0687, \\ \beta_6 &= 0.1595, C_m = 8.2404 \text{ Nm/A}, \\ v_5 &= 6.6445 \text{ m/s}, v_6 = 8.4034 \text{ m/s}, \\ J &= 74.1342 \text{ N} \cdot \text{m}^2, -\frac{\partial \beta}{\partial \tau} = 0.08304, \\ \frac{\partial f}{\partial \tau} &= -0.1075, \frac{dL_{\text{loop}}}{d\theta} = 1.2312, \\ \frac{1}{G_R} \frac{\partial M_T}{\partial \theta} &= 6.7652, \frac{1}{G_R} \frac{\partial M_T}{\partial \tau} = 209.6705. \end{aligned}$$

u_T 为第5台轧机活套张力系统的控制输入满足约束条件 $-0.3 < u_T < 0.3$. 基于系统(10), 采样时间为 0.01 s , 离散化后, 得到活套系统的参数为

$$\begin{aligned} A_{dH} &= \begin{bmatrix} 0.9987 & 0.04922 & 0.001317 \\ -0.05229 & 0.9987 & 0.04903 \\ 0 & 0 & 0.5773 \end{bmatrix}, \\ B_{dH} &= \begin{bmatrix} 0.0002518 \\ 0.0147 \\ 0.4227 \end{bmatrix}, d_{dH} = \begin{bmatrix} -0.0399 \\ -1.621 \\ 0 \end{bmatrix}, \\ A_{dT} &= \begin{bmatrix} 0.015 & -58.53 \\ 0 & 0.8949 \end{bmatrix}, B_{dT} = \begin{bmatrix} -5.257 \\ 0.1051 \end{bmatrix}, \\ A_{j,dT} &= \begin{bmatrix} 0 & 50.7 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}, d_{dT} = \begin{bmatrix} 0.11 \\ 0 \end{bmatrix}, \\ C_{dT} &= [10], C_{dH} = [100], \\ x_{H,0} &= [0.1 \ 0.2 \ 0.1], x_{T,0} = [0.1 \ 0.2], \end{aligned}$$

其中: $A_{dH}, B_{dH}, d_{dH}, C_{dH}$ 和 $x_{H,0}$ 为活套高度系统参数以及初始条件; $A_{dT}, B_{dT}, A_{j,dT}, d_{dT}, C_{dT}$ 和 $x_{T,0}$ 为活套张力系统参数及初始条件. 假设6号轧机具有相同的参数和初始值. 仿真结果如图5~7所示: 图5中实线为6号轧机的轧制速度增量, 它会对5号轧机活套系统产生影响; 图5中实线为5号轧机轧制速度增量 $-0.2 < u_T < 0.2$, 满足控约束条件. 图6为活套张力系统的响应输出, 图7为活套高度系统的响应输出, 其中: 虚线是非关联系统的响应输出, 实线为关联系统的响应输出. 从图中可以看出, 基于关联系统模型, 充分考虑了下游相邻轧机轧制速度增量, 提高了控制精度, 不仅使得活套张力系统本身获得较好

的控制效果, 与活套张力系统相耦合的活套高度系统也得到改善.

6 结论(Conclusion)

本文分析了热连轧活套系统的工作原理, 考虑下游轧机轧制速度增量对活套张力系统的影响, 建立活套关联系统模型, 对于每一个活套子系统分别设计控制器. 由于活套高度和张力系统具有强耦合特性, 文中采用一类基于滚动时域原理的多路控制策略, 在每个周期内顺序求解活套高度和张力子系统的控制律后及时更新系统, 从 H_∞ 观点出发, 将活套高度与张力系统的耦合影响看做扰动, 将解耦问题转化为干扰抑制问题. 仿真结果表明, 基于建立的活套关联系统模型, 采用滚动优化原理设计多路控制器, 能获得较好的控制效果.

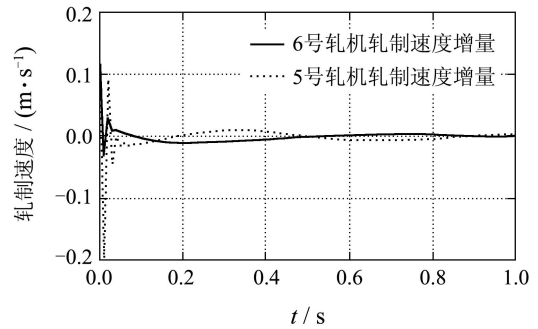


图 5 轧制速度增量

Fig. 5 Rolling speed increment

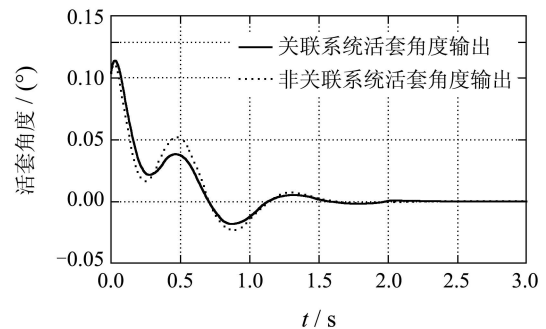


图 6 活套张力响应输出

Fig. 6 Output of looper tension

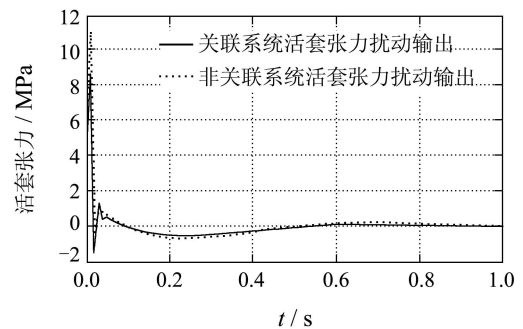


图 7 活套角度响应输出

Fig. 7 Output of looper angle

参考文献(References):

- [1] JUNG J Y, IM Y T. Fuzzy algorithm for the prediction of tension variations in hot rolling[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 1999, 96(1/3): 163 – 172.
- [2] JANABI-SHARIFI F. A neuro-fuzzy system for looper tension control in rolling mills[J]. *Control Engineering Practice*, 2005, 13(1): 1 – 13.
- [3] 童朝南, 武延坤, 王丽君, 等. 活套系统的神经网络离散变结构控制[J]. *控制与决策*, 2008, 23(9): 1011 – 1014.
(TONG Chaonan, WU Yankun, WANG Lijun, et al. A neuro-fuzzy system for looper tension control in rolling mills[J]. *Control and Decision*, 2008, 23(9): 1011 – 1014.)
- [4] 曲蕾, 王京. 多变量非线性厚度—活套系统的鲁棒逆控制[J]. *控制理论与应用*, 2009, 26(5): 562 – 566.
(QU Lei, WANG Jing. Robust inverse control for the multivariable nonlinear automatic-gauge-control and looper(AGC-LP) system[J]. *Control Theory & Applications*, 2009, 26(5): 562 – 566.)
- [5] 傅剑, 杨卫东, 李伯群. 基于LMI的 H_∞ 解耦及活套高度张力控制[J]. *控制与决策*, 2005, 20(8): 883 – 891.
(FU Jian, YANG Weidong, LI Boqun. LMIs based H_∞ decoupling method and the looper height and tension control[J]. *Control and Decision*, 2005, 20(8): 883 – 891.)
- [6] ROSSITER J A, KOUVARITAKIS B, RICE M J. A numerically robust statespace approach to stable predictive control strategies[J]. *Automatica*, 1998, 34(1): 65 – 73.
- [7] 童朝南, 武延坤, 宗胜悦, 等. 热连轧中液压活套系统数学模型的研究[J]. *系统仿真学报*, 2008, 20(6): 1381 – 1389.
(TONG Chaonan, WU Yankun, ZONG Shengyue, et al. Research on hydraulic looper mathematical model in hot rolling[J]. *Journal of System Simulation*, 2008, 20(6): 1381 – 1389.)
- [8] LING K V, MACIEJOWSKI J, WU B F. *Multiplexed model predictive control*[EB/OL]. [2009.10.05]http://www-control.eng.cam.ac.uk/Homepage/publications.php.
- [9] SILJAK D D. Decentralized control and computations: status and prospects[J]. *Annual Reviews in Control*, 1996, 20: 131 – 141.
- [10] BOYD S, GHAOUI L E, FERON E, et al. *Linear Matrix Inequality in System and Control Theory*[M]. Philadelphia, PA: Society for Industrial and Applied Mathematics, 1994.
- [11] DUMITRESCU B. Bounded real lemma for FIR MIMO systems[J]. *IEEE Signal Processing Letters*, 2005, 12(7): 496 – 499.
- [12] XIA Y Q, LIU G P, SHI P, et al. Robust constrained model predictive control based on parameter-dependent Lyapunov functions[J]. *Circuits, Systems, and Signal Processing*, 2008, 27(4): 429 – 446.
- [13] 傅剑. 现代鲁棒控制理论应用研究与热连轧综合控制[D]. 北京: 北京科技大学, 2006.
(FU Jian. *Application study on modern robust control theory and integrated control in hot strip rolling*[D]. Beijing: University of Science and Technology Beijing, 2006.)

作者简介:

张晓东 (1979—), 男, 博士, 目前研究方向为鲁棒预测控制, E-mail: zhangxiaodong09@126.com;

姚小兰 (1964—), 女, 副教授, 目前研究方向为大型工业系统控制, E-mail: yaoxiaolan@bit.edu.cn;

伍清河 (1955—), 男, 教授, 目前研究方向为鲁棒预测控制, E-mail: qinghew@bit.edu.cn.