

文章编号: 1000-8152(2009)05-0562-05

多变量非线性厚度-活套系统的鲁棒逆控制

曲 蕾, 王 京

(北京科技大学 信息工程学院, 北京 100083)

摘要: 针对典型的多变量、强耦合、不确定厚度-活套非线性系统, 提出了一种基于逆系统理论的非线性解耦鲁棒控制策略. 建立了厚度-活套非线性系统动态模型, 应用该策略实现了厚度-活套系统的反馈线性化解耦, 并针对伪线性系统的未建模动态和外界干扰推导了保证厚度系统鲁棒稳定性和鲁棒性能的约束条件, 设计出抗干扰、鲁棒性强的反馈控制器. 仿真效果表明鲁棒逆系统策略对厚度-活套多变量强耦合非线性系统控制的有效性.

关键词: 厚度-活套非线性模型; 逆系统; 解耦控制; 鲁棒性

中图分类号: TP273 **文献标识码:** A

Robust inverse control for the multivariable nonlinear automatic-gauge-control and looper(AGC-LP) system

QU Lei, WANG Jing

(Information Engineering College, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China)

Abstract: A new nonlinear decoupling robust control scheme based on the inverse theory is presented for a typical multivariable, strongly coupled, nonlinear and uncertain automatic gauge control and looper(AGC-LP) system. A nonlinear AGC-LP dynamic model is built, and the nonlinear robust control method is then applied to completely decouple the MIMO nonlinear AGC-LP system. For the unmodeled dynamics and the disturbance of the pseudo linear system, a constraint relation is also derived for insuring the robust stability and robust performance. Finally, a feedback controller with disturbance-rejection property and strong robustness is designed. The simulation results show the validity of the model and the robust inverse control strategy.

Key words: AGC-LP nonlinear modeling; inverse system; decoupling control; robustness

1 引言(Introduction)

热轧带钢过程中, 带钢厚度、活套高度、张力之间的相互影响已成为进一步提高厚度精度的关键^[1]. 三者之间形成一种复杂的多变量、强耦合、不确定非线性动态关系. 要想进一步提高板带钢质量, 需要对这个多变量非线性系统进行研究, 设计行之有效的控制策略. 目前为止, 在该方面国内外的研究多是基于增量方程的线性简化模型, 忽略了许多非线性成份, 这样既不符合复杂现场实际, 对原本的非线性耦合系统来说也是不合理的^[2].

本文采用机理建模方式, 基于变量间耦合的非线性关系建立了系统非线性动态模型. 针对该多变量耦合模型, 以提高厚度控制精度为性能指标, 考虑现场干扰、建模误差和参数摄动等不确定因素, 提出了基于逆系统理论的鲁棒解耦控制策略. 理论分析和仿真结果表明该方法可完成非线性耦合系统的反馈线性化解耦并在抑制干扰和补偿未建模动态过程中使控制系统具有良好的鲁棒性能.

2 厚度-活套建模(AGC-LP modeling)

从厚度和活套控制的输出被控量, 带钢出口厚度、张力、活套角度三量之间的关系着手建立动态模型.

由弹跳方程和轧制力模型^[3], 给出带钢出口厚度的具体公式:

$$h = S + \sqrt{R(H-h)}B[YQ - \frac{\sigma + \tau}{2}]/C. \quad (1)$$

S 预调辊缝值, C 轧机刚度系数, R, H, h 分别为轧辊半径、带钢来料厚度和出口厚度; B 带宽; Y 变形抗力系数; Q 应力状态系数; τ 为入口带钢张力; σ 为出口带钢张力.

控制活套的总力矩包括张力矩 M_σ , 重力矩 M_W , 角加速度产生的动力矩 M_D .

$$M = M_\sigma + M_W + M_D. \quad (2)$$

其中:

$$M_D = \frac{GD^2}{375} \frac{60}{2\pi} \frac{dw}{dt} = J \frac{dw}{dt},$$

$$\begin{aligned}
 M_W &= Pl \cos \theta, \\
 M_\sigma &= Bh\sigma[(l \sin \theta + r)(\cos \theta_2 - \cos \theta_1) + \\
 &\quad l \cos \theta(\sin \theta_1 + \sin \theta_2)]. \\
 \theta_1 &= \arctan \frac{l \sin \theta - d + r}{a + l \cos \theta}, \\
 \theta_2 &= \arctan \frac{l \sin \theta - d + r}{L - a - l \cos \theta}.
 \end{aligned}$$

当活套在动作过程中, 活套臂摆动, 活套角速度 w 与活套角 θ 之间具有下面的关系:

$$\frac{d\theta}{dt} = w, \quad (3)$$

$$\frac{dw}{dt} = \frac{1}{J}(M - M_\sigma - M_W). \quad (4)$$

其中: J 为活套转动惯量; P 为机架间带钢重量; l 为活套臂长; θ_1, θ_2 分别是带钢与轧制线之间的夹角; L 为两机架之间的距离; r 为活套辊半径. 具体参数如图1所示.

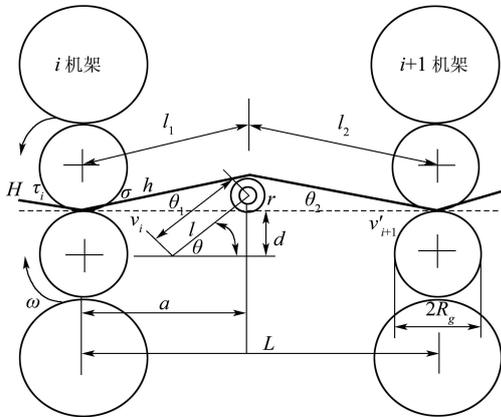


图1 机架间活套参数示意图
Fig. 1 Looper and interstand geometry

假定只调节前一机架轧辊速度, 后一机架的轧辊速度暂不改变. 由张力、套量公式可导出张力与速度、套量之间的函数关系式:

$$\frac{d\sigma_i}{dt} = \frac{E}{L} \left[\left(\frac{dl_{1i}(\theta_i)}{d\theta_i} + \frac{dl_{2i}(\theta_i)}{d\theta_i} \right) \cdot \frac{d\theta_i}{dt} + (v_{Ri+1}(1 - \beta_{i+1}) - v_{Ri}(1 + f_i)) \right], \quad (5)$$

其中:

$$\begin{aligned}
 \frac{dl_{1i}(\theta_i)}{d\theta_i} &= \frac{l \cos \theta_i (r - d - a \tan \theta_i)}{\sqrt{(l \sin \theta_i r - d)^2 + (a + l \cos \theta_i)^2}}, \\
 \frac{dl_{2i}(\theta_i)}{d\theta_i} &= \frac{l \cos \theta_i (r - d + (L - a) \tan \theta_i)}{\sqrt{(l \sin \theta_i + r - d)^2 + (L - a - l \cos \theta_i)^2}}.
 \end{aligned}$$

L_{loop} 为活套产生的套量, $v_{Ri}, v_{Ri+1}, f_i = \frac{R}{h} \gamma^2 = \frac{R}{K_s S} \gamma^2$, β_{i+1}, γ, K_s 分别为前一机架轧辊速度, 后一机架轧辊速度, i 机架前滑值, $i + 1$ 机架后滑值, 中

性角, 辊缝对前滑的影响因子; E 为材料的弹性模数; l_1 是前一机架距离活套辊的距离; l_2 活套辊距离后一机架的距离; a 为前一机架与活套支持器之间的距离; d 为活套支持器距离轧线的高度.

本文选取辊缝, 轧辊速度, 活套输出力矩 $[S \ v \ M]^T$ 为输入控制量; 张力, 角度, 角速度 $[\sigma \ \theta \ \omega]^T$ 为状态量; 带钢出口厚度, 带钢张力, 活套角度 $[h \ \sigma \ \theta]^T$ 为输出量.

状态方程:

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = \frac{E}{L} \left[\left(\frac{dl_{1i}(\theta)}{d\theta} + \frac{dl_{2i}(\theta)}{d\theta} \right) x_3 + (v_{Ri+1}(1 - \beta_{i+1}) - u_2 \left(1 + \frac{R}{K_s u_1} \gamma^2 \right)) \right], \\ \dot{x}_2 = x_3, \\ \dot{x}_3 = \frac{1}{J} (u_3 - M_\sigma - M_W). \end{cases} \quad (6)$$

输出方程:

$$\begin{cases} y_1 = u_1 + \sqrt{R_i(H_i - y_i)} B [Y_i Q_i - \frac{x_1 + \tau_i}{2}] / C_i, \\ y_2 = x_1, \\ y_3 = x_2. \end{cases} \quad (7)$$

3 厚度-活套逆系统(AGC-LP inverse system)

针对非线性厚度-活套模型, 基于逆系统理论对其进行多变量非线性系统的解耦处理. 逆系统方法是非线性系统的一种反馈线性化方法, 在非线系统线性化解耦控制方面具有良好效果.

逆系统方法需要在原系统可逆的情况下, 才能用状态(输出)反馈来实现原系统的“ a 阶积分逆系统”^[4], 从而完成非线性耦合系统到伪线性解耦系统的转换. 以下分析厚度-活套系统的可逆性, 并求其逆系统模型.

引理 1 系统 Σ 在点 (x_0, u_0) 的某一领域内可逆的充要条件是: 系统存在相对阶 $\{a_1, a_2, \dots, a_q\}$, 且 $\sum_{i=1}^{i=q} \alpha_i \leq n$ ^[5].

采用 Interactor 算法^[4] 分析厚度-活套系统的可逆性. 分析过程如下:

第1步 y_1 中直接显含 u ,

$$y_1 = u_1 + \sqrt{R_i(H_i - y_i)} B [Y_i Q_i - \frac{x_1 + \tau_i}{2}] / C_i,$$

令 $Y_1 = y_1$, 有

$$\frac{\partial Y_1}{\partial u^T} = [1, 0, 0],$$

$$t_1 = \text{rank} \left\{ \frac{\partial Y_1}{\partial u^T} \right\} = 1.$$

第2步 对 y_2 求导直到显含输入 u 为止,

$$\dot{y}_2 = \dot{x}_1.$$

令 $Y_2 = (Y_1, \dot{y}_2)$, 有

$$\det\left(\frac{\partial Y_2}{\partial u^T}\right) = \det\begin{pmatrix} \frac{\partial y_1}{\partial u_1} & \frac{\partial y_1}{\partial u_2} & \frac{\partial y_1}{\partial u_3} \\ \frac{\partial \dot{y}_2}{\partial u_1} & \frac{\partial \dot{y}_2}{\partial u_2} & \frac{\partial \dot{y}_2}{\partial u_3} \end{pmatrix} =$$

$$\det\begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ -R * u_2 / (K_s * u_1^2) \gamma^2 & 1 + R / (K_s u_1) \gamma^2 & 0 \\ 0 & 0 & 1/J \end{pmatrix},$$

$$t_2 = \text{rank}\left\{\frac{\partial Y_2}{\partial u^T}\right\} = 2.$$

第3步 对 y_3 求导直到显含输入 u 为止,

$$\dot{y}_3 = \dot{x}_2 = x_3,$$

$$\ddot{y}_3 = \dot{x}_3 = \frac{1}{J}(u_3 - M_\sigma - M_W),$$

令 $Y_3 = (y_1, \dot{y}_2, \ddot{y}_3)$, 有

$$\det\left(\frac{\partial Y_3}{\partial u^T}\right) = \det\begin{pmatrix} \frac{\partial y_1}{\partial u_1} & \frac{\partial y_1}{\partial u_2} & \frac{\partial y_1}{\partial u_3} \\ \frac{\partial \dot{y}_2}{\partial u_1} & \frac{\partial \dot{y}_2}{\partial u_2} & \frac{\partial \dot{y}_2}{\partial u_3} \\ \frac{\partial \ddot{y}_3}{\partial u_1} & \frac{\partial \ddot{y}_3}{\partial u_2} & \frac{\partial \ddot{y}_3}{\partial u_3} \end{pmatrix} =$$

$$\det\begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ -R * u_2 / (K_s * u_1^2) \gamma^2 & 1 + R / (K_s u_1) \gamma^2 & 0 \\ 0 & 0 & 1/J \end{pmatrix},$$

$$t_3 = \text{rank}\left\{\frac{\partial Y_3}{\partial u^T}\right\} = 3.$$

雅可比矩阵满秩, 等于系统输出个数, Interactor过程结束.

系统的向量相对阶为 $\alpha = (0, 1, 2)^T$, 根据引理1可知 $\sum_{i=1}^3 \alpha_i \leq 3$, 厚度-活套系统可逆.

由此, 可将厚度-活套逆模型表示为:

$$\begin{cases} u_1 = y_1 - \sqrt{R_i(H_i - y_i)} B[Y_i Q_i - \frac{x_1 + \tau_i}{2}] / C_i, \\ u_2 = [\frac{dl_{1i}(\theta)}{d\theta} + \frac{dl_{2i}(\theta)}{d\theta}] x_3 / (1 + \frac{R}{K_s u_1} \gamma^2) + \\ \quad [v_{R_{i+1}}(1 - \beta_{i+1}) - \frac{L}{E} \dot{y}_2] / (1 + \frac{R}{K_s u_1} \gamma^2), \\ u_3 = J * \ddot{y}_3 + M_i \sigma + M_W. \end{cases} \quad (8)$$

令新的输入向量为 v , 有

$$v = (v_1, v_2, v_3)^T = (y_1, \dot{y}_2, \ddot{y}_3)^T = (h, \dot{\sigma}, \ddot{\theta})^T.$$

原模型和逆模型复合后的伪线性系统结构如图2所示. 构造的逆系统不仅能将MIMO非线性系统线性化, 同时能实现解耦, 伪线性复合系统3个输入能分别控制3个输出, 解除了活套高度和张力的影响.

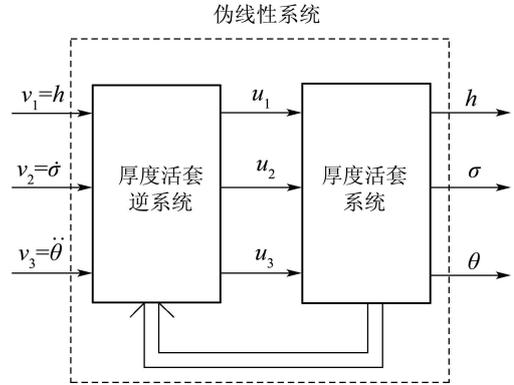


图2 机架间活套参数示意图

Fig. 2 Looper and interstand geometry

4 基于逆系统厚度-活套鲁棒控制器设计(AGC-LP Robust controller design based on inverse system)

根据逆系统理论^[4], 若非线性系统其向量相对阶满足 $\sum_{i=1}^q \alpha_i = n$ 条件, 则从理论上可实现非线性系统的完全线性化和理想解耦, 即伪线性复合系统的状态方程中不含有非线性微分方程. 由第3节厚度-活套系统可逆性的分析结果可知, 厚度-活套逆系统, 理论上可将非线性系统补偿成为厚度、张力、活套高度3个独立的线性系统. 但考虑实际建模过程中的未建模动态、参数变化等不确定性因素的影响, 复合伪线性系统将是一个非理想解耦的近似线性系统, 若仅以逆系统作为控制器构成开环控制结构, 其控制效果较差. 本文针对实际过程中存在的不确定性和未完全解耦的情况, 基于逆系统设计复合控制器. 将完全解耦的伪线性系统作为标称模型, 不确定性产生的未被对消部分采用有界非线性函数表示, 对于未能实现完全解耦的残余耦合信号, 将其视为有界干扰信号进行处理, 基于该思路, 设计保证系统稳定、抑制外界干扰和残余耦合信号影响、跟踪性能好的反馈控制器. 控制结构如图3所示. 其中, 将理想线性化和解耦后的线性部分作为标称系统用 $G_m(s)$ 表示, G_p^{-1} 为原系统 G_p 的逆系统, $G_c(s)$ 为鲁棒控制器, $[z_1 z_2 z_3]^T$ 为评价跟踪性能、抗干扰性能和模型摄动的输出量, $[w_1 w_2 w_3]^T$ 为评价跟踪性能、抗干扰性能和模型摄动的外部输入量, W_s, W_2, W_3, W_d 分别为假想摄动的加权函数.

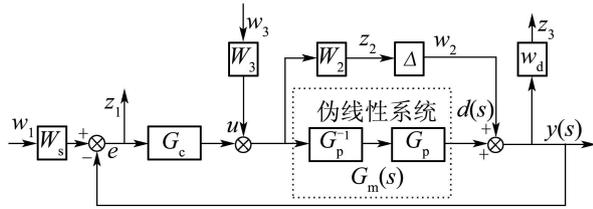


图3 鲁棒控制系统结构图

Fig. 3 Robust control system structure

4.1 鲁棒稳定性分析(Robust stability)

通过上面分析可知厚度-活套系统基于逆系统补偿可实现完全线性化, 不存在部分线性化时隐动态对系统稳定性的影响, 因此本文只考虑未建模动态、参数时变等不确定性对系统稳定性的影响. 本文将伪线性系统认为是由线性主体部分和不确定性影响的非线性部分组合而成. 由文献[6]中引理对非线性部分进行线性化假设处理. 本文用加法不确定性来表示基于逆系统的伪线性系统模型. 复合伪线性系统 \$G(s)\$ 的不确定集合可表示为: \$G(s) = G_m(s) + \Delta P(s)\$, 其中, \$\sigma_{\max}(\Delta P(s)) \leq |W(s)|, \forall \omega \in \mathbb{R}\$, \$G_m\$ 为伪线性系统标称模型, \$\Delta P(s)\$ 表示未建模动态所对应的传递函数, \$|W(s)|\$ 为误差界函数. 将不确定性进行规范化处理有 \$G(s) = G_m(s) + \Delta W(s)\$, \$\Delta \in \overline{BH}_\infty\$.

根据小增益定理, 当 \$G_c\$ 和 \$G_m\$ 均是稳定的条件下, 系统稳定的充要条件是:

$$\left\| \frac{G_c(s)W(s)}{1 + G_c(s)G_m(s)} \right\| \leq 1. \quad (9)$$

4.2 鲁棒性能分析(Robust performance)

由于厚度精度是带钢质量的重要衡量指标之一, 因此, 本文重点分析解耦后的厚度系统, 根据厚度数学模型, 分析导致厚度系统建模误差和各种干扰的现场因素. 在实际轧制过程中, 温度波动和轧辊磨损等, 对轧机刚度 \$C_m\$ 和变形抗力产生影响, 加之来料厚度波动, 这些参数的时变性是产生系统模型误差和不确定性的主要因素. 干扰主要来自温度变化和厚度-活套系统解耦后的残余耦合作用.

根据厚度系统实际特点, 设计的目标是在未建模动态和参数摄动情况下保证厚度控制系统的鲁棒稳定性, 在稳定基础上, 实现对外界干扰及残余耦合信号的抑制和鲁棒跟踪性能的综合, 由图3推出抑制扰动和减小跟踪误差的条件分别为:

$$\left\| \frac{W_d(s)W_3(s)G(s)}{1 + G_c(s)[G(s) + W(s)\Delta(s)]} \right\| \leq 1, \quad (10)$$

$$\left\| \frac{W_s(s)}{1 + G_c(s)[G(s) + W(s)\Delta(s)]} \right\| \leq 1, \quad (11)$$

在鲁棒稳定性满足之下提高厚度控制系统鲁棒

性能, 要求公式(9)(10)(11)必须同时成立. 消去公式(10)(11)中的不确定项, 厚度控制系统鲁棒性能问题等价于导入理想摄动后的鲁棒稳定问题. 控制系统鲁棒性能问题的充要条件为广义控制对象 \$\|G_g\|_\infty \leq 1\$, 其中

$$\begin{bmatrix} z_1 \\ z_2 \\ z_3 \end{bmatrix} = G_g(s) \begin{bmatrix} w_1 \\ w_2 \\ w_3 \end{bmatrix}. \text{ 可推出}$$

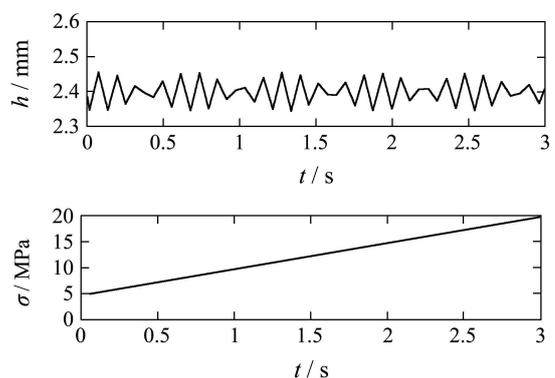
$$G_g(s) = \begin{bmatrix} W_s S & -W_s S & -W_d G W_s S \\ G_c W_2 S & -G_c W_2 S & W_3 W_2 S \\ G_c G W_d S & W_d S & W_3 G W_d S \end{bmatrix}.$$

至此推导了保证厚度系统鲁棒稳定和鲁棒性能能的 \$H_\infty\$ 范数约束条件.

5 仿真试验(Simulation)

厚度-活套逆模型与原系统复合实现解耦, 将非线性系统转化为伪线性系统, 对精度要求较高的厚度控制, 在鲁棒稳定性和鲁棒性能约束条件下进行反馈控制器的设计. 对解耦后的张力控制器和活套高度控制器采用传统PID控制算法.

复合后的厚度伪线性系统可写为线性部分与非线性部分的组合, 考虑辊缝检测误差 \$\Delta S\$, 厚度伪线性系统表示为 \$h = h_r - f(H, M, C) + \Delta S\$, 其中 \$M = \sqrt{RB}[Y_i Q_i - (\sigma_i + \tau_i)/2]\$. 理想情况下, 厚度伪线性系统是一个输出完全跟踪输入的单位模型. 但在实际生产中, 轧机刚度 \$c\$ 和带钢入口厚度 \$H\$ 的时变性, 存在非线性不确定部分. 仿真讨论在这两个参数时变的情况下, 采用逆系统方法对厚度-活套系统进行解耦和线性化的效果. 以2,3机架之间的厚度-活套系统为仿真对象, 出口厚度设定值为 2.196 mm, 张应力值 4.9 MPa, 角度为 \$21^\circ\$, 当轧机刚度 \$c\$ 在标称值的 20% 内变化, 来料厚度 \$H\$ 在 \$100 \mu\text{m}\$ 之内变化, 用正弦函数表示参数摄动, 解耦效果如图4所示, 厚度、张力、活套角度之间实现大范围的解耦和近似线性化.



在鲁棒稳定性满足之下提高厚度控制系统鲁棒

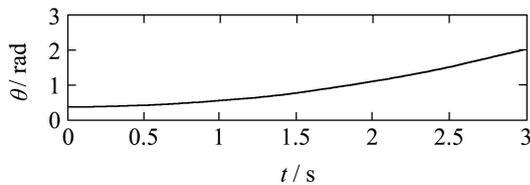


图4 解耦后活套对厚度的影响

Fig. 4 Uncoupled figure

接着对具有不确定性的厚度系统设计鲁棒控制器,标称模型取为单位传函.针对轧机刚度 c 和来料厚度 H 变化引起的系统建模误差,确定出非线性函数的上界,从而确定模型不确定性的加权函数.温度作为外界干扰变化缓慢,可认为是阶跃信号,其模型用积分器来描述.针对建模误差和参数摄动及干扰抑制设计的厚度反馈控制器,在鲁棒稳定性和鲁棒性能约束条件下,当来料厚度在 $100\ \mu\text{m}$ 之间波动且轧机刚度有界变化时,在 $0.1\ \text{s}$ 加入阶跃干扰后,具有很好的动态跟踪性能和干扰抑制作用,如图5、图6所示.控制器作用下厚度精度能够控制在 $\pm 10\ \mu\text{m}$ 之内,仿真验证了多变量非线性厚度-活套系统鲁棒逆控制策略的有效性.

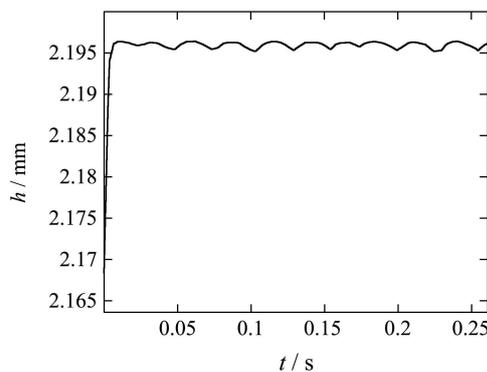


图5 厚度控制效果

Fig. 5 Dynamic performance of gauge system

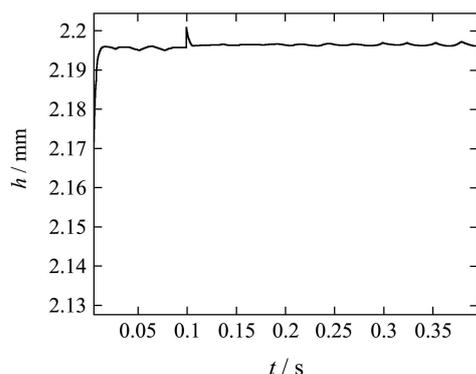


图6 干扰抑制

Fig. 6 Anti-disturbance performance

6 结论(Conclusions)

为了提高板带钢的厚度精度,抑制活套系统对厚度的影响,在建立厚度-活套多变量非线性动态模型基础上,基于逆系统理论对非线性模型进行反馈线性化解耦控制,使厚度控制不受活套系统的干扰.为了补偿解耦后的伪线性系统未建模动态和抑制干扰,推导出保证鲁棒性能和鲁棒稳定性的约束条件.在该约束条件下设计反馈控制器,实现了厚度-活套多变量非线性系统的解耦鲁棒控制.仿真研究证明非线性动态模型的合理性和鲁棒逆控制策略对厚度-活套系统的有效性.

参考文献(References):

- [1] 孙一康. 带钢热连轧的模型与控制[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2002: 211 - 219.
(SUN Yikang. *Model and Control on Hot Strip Mill*[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2002: 211 - 219.)
- [2] 李伯群, 张克君, 傅剑, 等. 活套高度和张力系统的神经网络自适应解耦控制[J]. 控制与决策, 2006, 21(1): 46 - 49.
(LI Boqun, ZHANG Kekun, FU Jian, et al. Adaptive neural network decoupling control for the loopers height and tension system[J]. *Control and Decision*, 2006, 21(1): 46 - 49.)
- [3] RICCARDO F, FRANCESCO A. Friction compensation in the interstand looper of hot strip mills: a sliding-mode control approach[C] // *Proceedings of the 11th IFAC Symposium on Automation in Mining, Mineral and Metal*. Franch: Nancy: IFAC Publisher, 2004, 8: 129 - 134.
- [4] 戴先中. 多变量非线性系统的神经网络逆控制方法[M]. 北京: 科学出版社, 2005: 18 - 37.
(DAI Xianzhong. *ANN Inverse System Method of MIMO Nonlinear System*[M]. Beijing: Science Press, 2005: 18 - 37.)
- [5] 李春元, 冯元琨. 多变量非线性控制的逆系统方法[M]. 北京: 清华大学出版社, 1990: 62.
(LI Chunwen, FENG Yuankun. *Inverse System Method of Multivariable Nonlinear Control*[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 1990: 62.)
- [6] 谢胜利, 陈庆伟, 吕朝霞, 等. 基于逆系统方法的非线性内模控制[J]. 自动化学报, 2002, 28(5): 715 - 721.
(XIE Shengli, CHEN Qingwei, LV Zhaoxia, et al. Nonlinear internal model control based on inverse system method[J]. *Acta Automatica Sinica*, 2002, 28(5): 715 - 721.)

作者简介:

曲蕾 (1979—), 女, 博士研究生, 研究方向为智能控制、轧钢自动化等, E-mail: qulei1979@sina.com.cn;

王京 (1948—), 男, 教授, 研究方向为控制理论及轧钢自动化等, E-mail: wangj@necar.ustb.edu.cn.