

冷连轧动态过程混合智能建模方法

铁 鸣¹ 柴天佑¹ 岳 恒¹ 张振山¹ 郑秀萍¹

摘 要 针对具有非线性、多变量、强耦合、参数不确定等综合复杂特性的多机架冷连轧动态过程,在工作点附近建立基于轧制过程动态机理方程的线性状态空间模型,提出基于 RBF 的轧机出口带钢速度模型以及机架间厚度延时估计方法,采用案例推理技术实现线性化多模型选择算法,研制了冷连轧动态过程的混合智能模型.使用某钢厂五机架四辊冷连轧机系统的实际生产过程数据进行仿真实验,在实际板厚控制系统的设定和轧件的扰动下,本文提出模型的各机架轧制力、冷轧板厚度和张力仿真结果与实际值的变化趋势相同,最大误差小于 20%.

关键词 冷连轧动态过程,线性化状态空间模型,混合智能模型
中图分类号 TP29

Hybrid Intelligent Modeling Approach for Dynamic Cold Tandem Rolling Process

Tie Ming¹ Chai Tian-You¹ Yue Heng¹ Zhang Zhen-Shan¹
Zheng Xiu-Ping¹

Abstract This paper presents a hybrid intelligent model for multi-stand cold tandem rolling dynamic process, a system with compositive complexity including nonlinearity, multi variable, strong coupling, varying parameter as operation condition variation. The proposed model consists of the based state-space model based on linearized physical equations near rolling operating points, the exit strip speed RBF models and estimation approach for time lag of entry thickness, case-based reasoning technique based multi models selection algorithm for different operating points. With the actual thickness system setting and plate disturbance, the simulation results of roll force, strip thickness and tension have the same dynamic characteristics with the actual process data, and the error of each variable is less than 20%.

Key words Cold tandem rolling dynamic process, linearized state-space model, hybrid intelligent model

1 引言

优化设计冷连轧机控制系统对于加工出高精度的冷轧板至关重要,建立冷连轧过程动态模型进行虚拟轧制实验是进行冷连轧机控制系统优化设计的有效途径,因此冷连轧过程的动态模型研究引起广泛关注.

基于连轧机理的动态模型^[1]中的轧制力与前滑方程是难于用精确数学模型描述的未知非线性函数.需要反复迭代的有限元模型计算时间很长且处理大变形问题不易收敛,要得

收稿日期 2005-06-28 收修改稿日期 2006-04-11

Received November 10, 2005; in revised form April 11, 2006

国家重点基础研究发展计划(973)项目(2002CB312201),国家自然科学基金重点项目(60534010),国家创新研究群体科学基金项目(60521003),长江学者和创新团队发展计划资助(IRT0421)

Supported by supported by the National Fundamental Research Program of P. R. China(2002CB312201), the State Key Program of National Natural Science of P. R. China(60534010), the Funds for Creative Research Groups of P. R. China(60521003), Program for Changjiang Scholars and Innovative Research Team in University(IRT0421)

1. 东北大学国家冶金自动化工程技术中心 沈阳 100004

1. National Engineering and Technology Research Center for Metallurgic Industry Automation, Northeastern University, Shenyang 110004

DOI: 10.1360/aas-007-0104

到规律性的结果很难, 而简化的有限元模型^[2]精度不高. 结合神经网络技术和轧制机理的模型改善了精度和泛化能力, 如轧制力方程结合神经网络补偿模型^[3], 采用神经网络模型获得轧制机理模型的线性化系数^[4]等, 但此类模型不能反映出各机架张力和厚度发生扰动时的耦合现象, 不适用于描述多机架连轧机系统的动态行为. 冷轧机工作点附近线性化状态空间模型^[5]避免了求解大量非线性方程带来的计算复杂性, 但没有考虑线性化的轧制力模型与张力模型在工况变化时的特性以及轧机出口板厚延时与轧机出口板带速度相关而变化的情况, 致使模型精度不高.

本文以某钢厂五机架四辊冷连轧机系统为背景, 将基于动态轧制机理方程线性化的状态空间模型与 RBF 网络、案例推理技术、遗传算法相结合, 研制冷连轧混合智能动态模型, 解决了上述模型存在的问题, 并采用工业现场生产数据进行了实验研究.

2 五机架冷连轧动态过程描述

如图1所示, 4辊5机架冷连轧机系统由传动机构、液压机构、轧制机架和轧件组成, 通过轧制力的压上和张力的拉伸来获得期望的冷轧板厚度.

轧机系统的输出为机架间张力 $Y_1=[\sigma_1 \cdots \sigma_4]^T$, 轧制压力 $Y_2=[P_1 \cdots P_5]^T$, 轧件出口厚度 $Y_3=[h_1 \cdots h_5]^T$; 控制量为轧制压力设定 $U_1=[P_1^S \cdots P_5^S]^T$, 轧辊速度设定 $U_2=[V_1^S \cdots V_5^S]^T$; 系统的可测扰动为来料厚度 $Z=[H_1 \cdots H_5]^T$; 边界条件为来料厚度工作点 H_1^* , 轧件宽度 B , 变形抗力基值 K_{F0} , 加工硬化曲线指数 K_{FE} , 屈服强度增量极限 K_{FT} , 热轧带钢出口温度 T_1 .

冷连轧过程机理模型^[1,5]为

$$\dot{\sigma}_i(t) = \frac{E}{L} [V_{i+1}^b(t) - V_i^f(t)] = \frac{E}{L} \{V_{i+1}(t)[1 + b_{i+1}(t)] - V_i(t)[1 + \gamma_i(t)]\} \quad (i = 1, \cdots, 4) \quad (1)$$

$$P_i(t) = f_i^P(H_i(t), h_i(t), \sigma_{i-1}(t), \sigma_i(t), \mu_i(t), \eta_i(t), R_i'(t)) \quad (i = 1, \cdots, 5) \quad (2)$$

$$h_i(t) = s_i(t) + \frac{P_i(t)}{\Gamma_i} - Q_{fi} = s_i(t) + \frac{P_i(t)}{\Gamma_i} - \frac{\xi_{i,1}S_i(t)}{\xi_{i,2}S_i(t) + \xi_{i,3}S_i(t)P_i(t) + 0.023P_i(t)} \quad (3)$$

其中 i 为机架顺序号, E 为带钢杨氏模量, L 轧机间距, $V_i^f(t)$ 为第 i 机架出口轧件速度, V_i 为第 $i+1$ 机架入口轧件速度, $b_{i+1}(t)$ 为第 $i+1$ 机架后滑, $\gamma_i(t)$ 为第 i 机架前滑, $V_i(t)$ 为轧辊速度, $\eta_i(t)$ 为平均变形抗力, $R_i'(t)$ 为轧辊变形半径, $\mu_i(t)$ 为滑动摩擦系数, Γ_i 为轧机刚度, $S_i(t)$ 为液压缸位移, $Q_{fi}(t)$ 为油膜厚度, $\xi_{i,1}$ 、 $\xi_{i,2}$ 、 $\xi_{i,3}$ 为轧辊固有参数. 为书写简便, 后面将变量中 t 省略.

开卷张力 σ_0 与卷曲张力 σ_5 为常数^[6]. S_i , V_i , γ_i , b_i , H_i 可表述为^[1,6]

$$\gamma_i = f_i^\gamma(H_i, h_i, \sigma_{i-1}, \mu_i, \sigma_i, R_i') \quad (i = 1, \cdots, 5) \quad (4)$$

$$b_i = \frac{h_i(1 + \gamma_i)}{H_i} - 1 \quad (5)$$

$$\dot{V}_i = -\frac{V_i}{T_{V,i}} + \frac{V_i^S}{T_{V,i}} \quad (6)$$

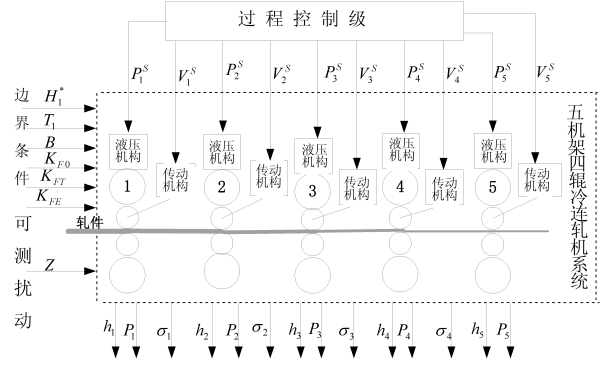


图 1 五机架冷连轧机系统示意图

Fig. 1 Schematic diagram of 5-stand tandem cold rolling system

$$\dot{S}_i = -\frac{S_i}{T_{S,i}} + \frac{h_i^*}{T_{S,i}} - \frac{P_i^S}{M_i T_{S,i}} \quad (7)$$

$$H_i(t) = h_{i-1}(t - \tau_{i-1}) \quad (\tau_{i-1} \text{ 满足 } \int_{t-\tau_{i-1}}^t V_{i-1}^f(u) du = L) \quad (8)$$

其中 M_i 、 $T_{S,i}$ 分别为第 i 架轧机的机架与液压系统的固有参数, h_i^* 为静态厚度设定, $T_{V,i}$ 为第 i 架轧机的传动系统固有参数, f_i^γ 为非线性函数.

f_i^γ ($i = 1, \cdots, 4$) 与 f_i^P ($i = 1, \cdots, 5$) 是难以用精确数学模型描述的未知非线性函数, 只能用工程计算公式近似求解, 精度很低, 并且(1)-(5)中的输入、输出变量形成“代数环”^[4]使精确解很难获得.

3 冷连轧过程混合智能建模方法

如图2所示, 冷连轧混合智能动态模型由在 n 个工作点附近的冷连轧过程线性化状态空间模型、基于案例推理的线性化多模型选择算法、轧机出口轧件速度 RBF 估计模型、轧件厚度延时估计模型组成. 其中 RBF 模型输入的 V_i ($i = 1 \cdots 4$) 由 V_i^S 代入(4)得到.

3.1 五机架冷连轧机系统线性化状态空间模型

由于冷连轧机系统是按轧件的规格生产, 因此工作于 n 个较为固定的稳态工作点附近, 在第 j 个工作点附近将(1)-(7)线性化 ($j=1, \cdots, n$), 可得如下状态空间模型^[5]

$$\begin{bmatrix} Y_1^{(j)}(t) \\ Y_2^{(j)}(t) \\ Y_3^{(j)}(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I & 0 & 0 \\ C_1^{(j)} & C_2^{(j)} & C_3^{(j)} \\ C_4^{(j)} & C_5^{(j)} & C_6^{(j)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_1^{(j)}(t) \\ X_2^{(j)}(t) \\ X_3^{(j)}(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ D_1^{(j)} \\ D_2^{(j)} \end{bmatrix} \mathbf{Z}^{(j)} \quad (9)$$

$$\begin{bmatrix} \dot{X}_1^{(j)}(t) \\ \dot{X}_2^{(j)}(t) \\ \dot{X}_3^{(j)}(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_1^{(j)} & A_2^{(j)} & A_3^{(j)} \\ 0 & A_4 & 0 \\ 0 & 0 & A_5 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_1^{(j)}(t) \\ X_2^{(j)}(t) \\ X_3^{(j)}(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ B_1 & 0 \\ 0 & B_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_1^{(j)}(t) \\ U_2^{(j)}(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} B_3^{(j)} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \mathbf{Z}^{(j)}(t) \quad (10)$$

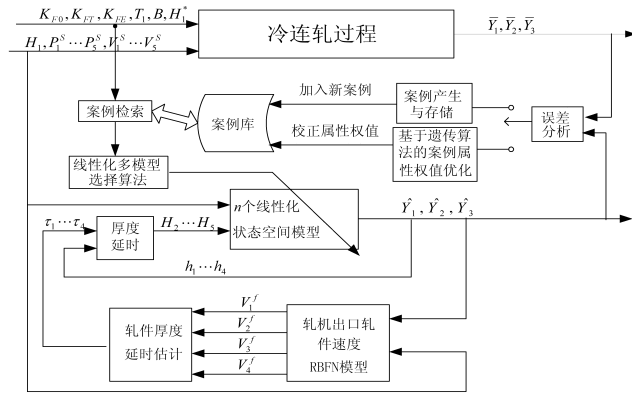


图2 冷连轧动态过程混合建模策略

Fig. 2 Hybrid modeling strategy of cold tandem rolling process

其中, $X_1 = Y_1$, $X_2 = [S_1 \cdots S_5]^T$, $X_3 = [V_1 \cdots V_5]^T$; $X^{(j)}$, $Y^{(j)}$, $U^{(j)}$, $Z^{(j)}$ 分别表示轧机系统在第 j 个工作点的状态、输出、输入和扰动的增量; I 为单位阵, 参数矩阵 A_4 、 A_5 、 B_1 、 B_2 为轧机系统固有参数组成的对角阵。由于工业现场中轧机辊缝 X_2 和辊速 X_3 未进行在线检测, 我们用 X_2 , X_3 (A_4 、 A_5 、 B_1 、 B_2) 的估计值代替真实值去估计 A_4 、 A_5 、 B_1 、 B_2 (X_2 、 X_3), 随迭代次数递增的交互估计、递阶辨识^[7], 初始值通过近似机理模型凑试给出。将(10)中的张力方程根据参数的取值范围以采样周期 $T=0.01$ 秒近似离散化为

$$X_1^{(j)}(k+1) = e^{A_1^{(j)T}} X_1^{(j)}(k) + e^{A_1^{(j)T}} A_2^{(j)T} X_2^{(j)}(k) + e^{A_1^{(j)T}} A_3^{(j)T} X_3^{(j)}(k) + \bar{B}_3^{(j)} Z_j(k) \quad (11)$$

定义数据向量

$$\Theta^{(j)} = \begin{bmatrix} e^{A_1^{(j)T}} & e^{A_1^{(j)T}} A_2^{(j)T} & e^{A_1^{(j)T}} A_3^{(j)T} & \bar{B}_3^{(j)} \\ C_1^{(j)} & C_2^{(j)} & C_3^{(j)} & D_1^{(j)} \\ C_4^{(j)} & C_5^{(j)} & C_6^{(j)} & D_2^{(j)} \end{bmatrix}_{14 \times 19}$$

$$\psi^{(j)}(k) = [\sigma_1^{(j)}(k+1) \cdots \sigma_4^{(j)}(k+1), P_1^{(j)}(k) \cdots P_5^{(j)}(k), h_1^{(j)}(k) \cdots h_5^{(j)}(k)]^T$$

$$\phi^{(j)}(k) = [\sigma_1^{(j)}(k) \cdots \sigma_4^{(j)}(k), S_1^{(j)}(k) \cdots S_5^{(j)}(k), V_1^{(j)}(k) \cdots V_5^{(j)}(k), H_1^{(j)}(k) \cdots H_5^{(j)}(k)]^T$$

用 $\theta_m^{(j)}$, $\psi_m^{(j)}$ 分别表示 $\Theta^{(j)}$ 与 $\psi^{(j)}$ 的第 m 行, 则有

$$\psi_m^{(j)}(k) = \theta_m^{(j)} \varphi^{(j)}(k) + e_m^{(j)} \quad (m = 1 \cdots 14) \quad (12)$$

可用递推最小二乘辨识 θ , 从而获得 $\Theta^{(j)}$, 并求出 $A_1^{(j)}$ 、 $A_2^{(j)}$ 、 $A_3^{(j)}$ 、 $B_3^{(j)}$ 。

3.2 基于案例推理的线性化多模型选择算法

状态空间模型(9)、(10)的参数中, 轧制力模型(2)的线性化系数与张力模型中含有的前滑模型(4)的线性化系数没有物理意义且因不同轧制静态工作点而变化, 本文采用案例推理技术根据不同的轧制过程边界条件来选择合适的线性化模型。案例的解为线性化状态空间模型 W , 案例的属性包括轧件

的变形抗力基值 K_{F0} 、屈服强度增量极限 K_{FT} , 加工硬化曲线指数 K_{FE} , 来料厚度静态值 H_1^* , 轧件宽度 B , 热轧带钢出口温度 T_1 。

本文采用改进TC相似法^[8]的相似度定义, 对于属性集不同的案例设置属性集为其并集。取相似度最大案例作为匹配案例, 即适合当前轧件的线性化状态空间模型。当库中存储案例较少时, 可根据专家经验结合仿真凑试的方法确定特征权重, 库中案例较多时采用实数编码方案^[9]的遗传算法对案例属性权重进行离线寻优, 适应度函数为

$$CR = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m CM_i \quad (13)$$

$$CM_i = \begin{cases} 1 & \max\{e_i^{h1}, e_i^{h2}, e_i^{h3}, e_i^{h4}, e_i^{h5}\} \leq \varepsilon \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (14)$$

其中, CR 为测试案例集检索精度(适应度), CM_i 为第 i 个测试案例检索精度, ε 为案例检索误差阈值, 设 $\varepsilon=0.1$, m 为测试案例的数量。

3.3 轧机出口轧件速度估计RBF模型与轧件厚度延时估计模型

以采样周期 $T=0.01$ 秒将(8)离散化, 得到 τ_i ($i=1, \dots, 4$) 为

$$\tau_i = mT + \frac{L - T \sum_{k=\frac{L}{T}}^{\frac{T}{T}-m} V_i^f(kT)}{V_i^f(t - mT - 1)} \quad (15)$$

$$(m \text{ 满足 } \sum_{k=\frac{L}{T}}^{\frac{T}{T}-m} V_i^f(kT) < L, \text{ 且 } \sum_{k=\frac{L}{T}}^{\frac{T}{T}-m-1} V_i^f(kT) > L)$$

其中, V_i^f 与板带入口厚度 H_i 、出口厚度 h_i 、轧辊速度 V_i 、入口张力 σ_{i-1} 、出口张力 σ_i 、轧制压力 P_i 存在难以用数学模型描述的复杂非线性关系。

本文用以描述第 i 架轧机出口轧件速度的 RBF 估计模型为

$$V_i^f = f_i^{RBF}(H_i, h_i, V_i, \sigma_{i-1}, \sigma_i, P_i) \quad (i = 1, \dots, 4) \quad (16)$$

其中, f_i^{RBF} 为描述第 i 架轧机出口轧件速度的径向基函数, V_i 由 V_i^S 代入(6)得到, h_i , σ_{i-1} , σ_i , P_i 由状态空间模型输出得到, H_1 已知, H_i ($i=2, \dots, 4$) 为第 $i-1$ 架轧机出口冷轧板厚度经过延时的结果。

本文应用模糊 C 均值聚类(FCM)^[10] 方法确定基函数中心并通过仿真凑试隐层节点数。

4 实验研究

建模数据和测试数据来自某钢厂 2030mm 五机架四辊冷连轧机系统实际生产过程。取 230 组轧机出口轧件速度(间接检测得到)、板带入口厚度、出口厚度、轧辊速度、入口张力、出口张力、轧制力数据作为训练样本, 建立第 1~4 架轧机出口轧件速度 RBF 网络, 输入层节点数分别为 5、6、6、6, 隐层节点数分别为 16、20、21、20。以第 2 架轧机出口轧件速度 RBF 网络为例进行测试, 另取训练集之外的 90 组样本, 仿真结果与实际值对比如图 3 所示, 可以看出本文的轧机出口轧件速度 RBF 模型的估计精度较高。

根据轧制过程边界条件的差异, 在轧制过程历史数据中取 n 卷(暂定 $n=26$)带钢的板带接合处的轧制力、板厚、张

表 1 各机架轧制力、厚度、张力仿真实验结果误差
Table. 1 Simulation result error of roll force, tension, exit strip thickness

	P_1	P_2	P_3	P_4	P_5	σ_1	σ_2	σ_3	σ_4
err	9.6%	3.57%	6.04%	5.28%	4.61%	9.66%	3.57%	6.04%	5.28%
	h_1	h_2	h_3	h_4	h_5				
err	3.02%	5.22%	8.37%	10.22%	10.83%				

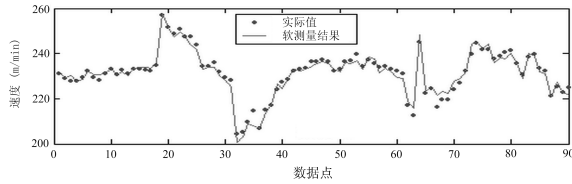


图 3 二机架出口轧件速度仿真结果与实测值曲线对比

Fig. 3 Contrast curves of the real value with the estimation result of the 2nd stand strip delivery speed

力以及轧机系统控制量等动态轧制数据,经过滤波,采用如图2所示的建模策略建立冷连轧混合智能模型,经过优化得到案例属性 K_{F0} 、 K_{FT} 、 K_{FE} 、 H_1^* 、 B 、 T_1 的案例检索权值分别为3.55、2.3、1.27、0.46、1.04、3.1。

另取出钢记号为 16694300 与 16694400 的钢卷数据用于模型测试,钢种号为 IT0139,属于低硬度、压下率高和高附加值的 IF 钢,来料厚度 2.96 mm,成品厚度 0.57mm,带钢的变形抗力基值 422MPa,加工硬化曲线指数 0.291,屈服强度增量极限 240 MPa,带钢宽度 1704mm,热轧出口温度 823 度。

案例解的状态空间模型中张力模型参数 A_1 、 A_2 、 A_3 、 B_3 分别为

$$A_1 = \begin{bmatrix} -11.14 & -0.12 & 0 & 0 \\ 3.65 & -10.9 & -0.38 & 0 \\ 0 & 3.9 & -12.74 & -1.13 \\ 0 & 0 & 4.24 & -10.34 \end{bmatrix}$$

$$A_2 = \begin{bmatrix} 7.8 & 26.5 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 6.1 & 30.21 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 9.7 & 43.7 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 13.9 & 35.2 \end{bmatrix}$$

$$A_3 = \begin{bmatrix} -1.18 & 0.82 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1.01 & 0.71 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -0.97 & 0.87 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1.23 & 0.92 \end{bmatrix}$$

$$B_3 = \begin{bmatrix} -9.5 & 171.6 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -24.9 & -214.1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -18.47 & -286.3 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -12.72 & -311.75 \end{bmatrix}$$

本文冷连轧混合智能模型的仿真结果误差如表1,其误差定义为

$$err = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{j=1}^n \left(\frac{y_j - \hat{y}(j)}{y(j)} \right)^2} \quad (17)$$

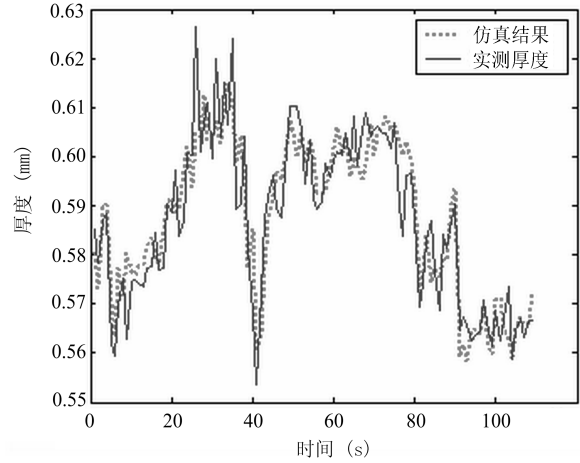


图 4 4 机架出口板厚仿真结果与实测值对比

Fig. 4 Contrast curves of the real value with the simulation result of the 4th stand exit thickness

其中, err 为仿真误差, n 为样本数, $y(j)$ 为实测值, $\hat{y}(j)$ 为仿真结果。

由于要在 1 机架消除大部分厚差,因此 P_1 的仿真误差较大。轧机系统的厚度扰动后向传递和张力的扰动前向传递的原因使 σ_1 与 h_5 的仿真误差超过其他机架,由于第 5 架轧机主要用于平整板型, h_5 波动不大,因此我们以 h_4 和 P_1 仿真曲线为例说明,如图 4、图 5 所示。

表 1 与图 4、5 说明在系统发生扰动时,本文提出模型各机架轧制力、冷轧板厚度和轧制力仿真结果与实际值的变化趋势相同,各变量仿真误差最大值低于 20%。由于本文的冷连轧混合智能模型以线性状态空间模型为主体,因而计算复杂度低,仿真速度快。

5 结论

本文提出的五机架冷连轧过程动态混合智能模型解决了复杂的动态轧制机理方程难以用于仿真各架轧机的轧件厚度、轧制力和张力的动态特性的难题。通过五机架冷连轧过程实际数据的仿真实验研究表明,本文的模型在厚度控制系统给定值和轧件边界条件变化时所产生的板厚、轧制力和张力的动态特性与实际相符,仿真速度快,且精度高,适用范围较宽,对于研究冷连轧机控制系统的改进和冷连轧过程动态特性具有重要实际意义。

References

- 1 Bryant G F. *Automation of Tandem Mills*. London: Iron and Steel Institute, 1973, 20~71
- 2 Hua Jian-Xin, Jin Yi-Hui, Zhou Yong, et al. The discussion of roll gap model of multi-roller rolling mill. *Control Engineering*, 2002, 9(3): 23~25

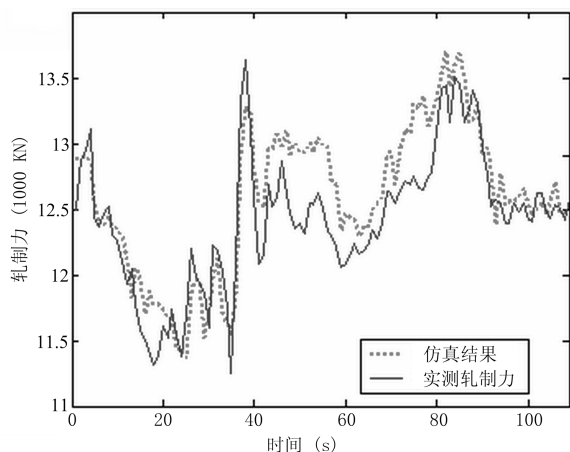


图 5 1 机架轧制力仿真结果与实测值对比

Fig. 5 Contrast curves of the real value with the simulation result of the 1st stand roll force

(华建新, 金以慧, 周勇, 羌菊兴, 袁枫华, 王贞祥, 徐心和. 多辊轧机中辊缝模型的探讨. 控制工程, 2002, 9(3): 23~25)

- 3 Cho S, Cho Y, Yoon S. Reliable roll force prediction in cold mill using multiple neural networks. *IEEE Transactions on Neural Networks*, 1997, 8(4): 874~882
- 4 Zarate E. A model for the simulation of a cold rolling mill using neural networks and sensitivity factors. In: *Proceedings of IEEE Brazilian Symposium on Neural Networks, Brazil. IEEE*, 2000, 185~190
- 5 Pan Xue-Jun, Chai Tian-You. Dynamic model for cold tandem rolling mill. *Journal of System Simulation*, 1998, 10(6): 35~39
(潘学军, 张承进, 柴天佑. 冷连轧过程线性化动态模型的研究. 系统仿真学报, 1998, 10(6): 35~39)
- 6 Hoshino I, Maekawa Y, Fujimoto T, Kimura, H. Observer-based multivariable control of the aluminum cold tandem mill. *Automatica*, 1988, 24(6): 741~754
- 7 Ding Feng, Yang Jia-Ben. Hierarchical identification of large scale systems. *Acta Automatica Sinica*, 1999, 25(3): 647~654
(丁峰, 杨家本. 大系统的递阶辨识. 自动化学报, 1999, 25(5): 647~654)
- 8 Gupta K M, Montazent A R. Empirical evaluation of retrieval in case-based reasoning system using modified cosine matching function. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, 1997, 27(5): 601~612
- 9 Fogel D B. An introduction to simulated evolutionary optimization. *IEEE Transactions on Neural Networks*, 1994, 5(1): 3~14
- 10 Wang Xi-Huai, Li Sao-Yuan, Xi Yu-Geng. Research on soft sensor for slab temperature in reheating furnace. *Acta Automatica Sinica*, 2004, 30(4): 928~932
(王锡怀, 李少远, 席裕庚. 加热炉钢坯温度软测量模型研究. 自动化学报, 2004, 30(6): 928~932)

铁 鸣 东北大学国家冶金工业自动化工程技术研究中心博士, 研究方向为复杂工业过程智能建模与智能控制. 本文通信作者. E-mail: tming7611@sina.com .

(Tie Ming Ph. D. at National Engineering and Technology Research Center for Metallurgic Industry Automation of Northeast University. His research interests include intelligent modeling and intelligent control approach for complex industrial process. Corresponding author of this paper.)

柴天佑 东北大学教授, 博士生导师, 中国工程院院士, 东北大学国家冶金工业自动化工程技术研究中心主任, 主要研究领域包括自适应控制、智能控制与工业过程综合自动化. E-mail: tychai@mail.neu.edu.cn .

(Chai Tian-You Professor at Northeastern University, a academican of Chinese Academy of Engineering, the director of National Engineering and Technology Research Center for Metallurgic Industry Automation of Northeast University. His research interests include adaptive control, intelligent control, and integrated automation of industrial processes.)

岳 恒 东北大学教授, 博士, 研究生导师, 研究领域为多变量解耦控制, 复杂工业过程建模与优化控制.

(Yue Heng Ph. D., professor at Northeastern University. His research interest includes multivariable decoupling control, modeling, and optimizing control of complex industrial processes.)

张振山 东北大学国家冶金工业自动化工程技术研究中心博士, 研究方向为工业过程自动化产品研发.

(Zhang Zhen-Shan Ph. D. in National Engineering and Technology Research Center for Metallurgic Industry Automation at Northeast University. His research interests include automation products development of industrial processes, etc.)

郑秀萍 东北大学副教授, 研究方向为复杂工业过程综合自动化

(Zheng Xiu-Ping Associate professor at Northeast University. Her research interests include integrated automation of complex industrial processes, etc.)