

## 热连轧活套高度和张力的解耦控制

李伯群 傅剑 张瑞成 孙一康

北京科技大学信息工程学院, 北京 100083

**摘要** 为了进一步提高板带热轧厂厚控精度及控制品质,需对具有非线性、强耦合、不确定、多约束特性的活套系统建立工程上适用的数学模型,以实现活套高度与张力系统的解耦控制.在分析其动态耦合过程的基础上,考虑到实际的活套系统在工作过程中变量的变化离其稳态工作点的偏差很小,以实际热轧现场数据为依据,给出了完整的传递函数表达形式.采用线性预测模型的BP神经网络PID控制策略以减弱系统的耦合影响,以提高控制效果.仿真结果验证了本算法的有效性,表明解耦后的活套控制系统可获得更好的控制效果.

**关键词** 活套系统;建模;解耦;线性模型;BP整定PID

**分类号** TP 273.3

要保证热连轧过程顺利进行,各机架在单位时间内的秒流量必须相等,否则会导致拉钢或堆钢.热连轧系统大多采用活套装置,通过其缓冲作用来吸收咬钢过程中形成的套量,并保持恒定的小张力控制<sup>[1]</sup>.在实际轧制过程中影响机架间张力的工艺参数很多(如压下量、轧制力矩、轧制速度和前后滑等),不可能完全做到绝对无张力轧制,因此对活套需进行双重控制,即活套高度控制和张力控制.

传统的活套控制是通过调整上游机架轧辊速度使活套高度维持在设定值附近,通过控制活套电机力矩使机架间张力恒定.在这种控制策略中,活套高度控制与张力控制是完全独立进行的,没有考虑二者之间存在的耦合关系<sup>[2]</sup>.而实际情况是活套高度变化时,机架间张力也发生变化,反之亦然.即活套高度与张力系统是一个典型的双输入/双输出耦合系统.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<sup>[3-4]</sup>.

## 1 系统动态分析

对F3,F4机架间活套系统动态分析,检测信号 $\delta\theta$ .控制目标:保持套高不变;张力波动尽可能小.控制律:主速度 $\delta n \rightarrow \delta V_0$ ;活套电机力矩

$\delta i \rightarrow \delta M$ .

活套机构如图1所示. $R, r, h_a, \theta$ 分别为活套臂全长、活套辊半径、活套臂交点离轧制线的距离、活套臂升角; $f_3, \beta_3, \tau_{03}, \tau_{04}$ 为 $F_3$ 的前滑、后滑、前张应力、后张应力; $l, l_a$ 为机架间距离、活套器支点与 $F_3$ 距离.对于 $F_3$ 机架,如来料厚度波动或硬度波动,AGC需给出 $\delta S_3$ 的辊缝调节量送入APC以消除厚差,这里只考虑 $F_3$ 压下, $F_4$ 不动作时对系统分析.由于前滑是来料入口厚度、出口厚度、前后张应力的函数,当有 $\delta S_3$ 压下时,通过前滑 $f_3$ 影响轧件出口速度,形成套量,控制系统根据检测到的 $\delta\theta$ ,一方面给出控制率去调整上游机架的轧辊速度( $V_0$ )以保持套量不变,另一方面给活套电机电流以维持恒定小张力轧制<sup>[5,6]</sup>.在活套臂摆动的过程中,存在角加速度形成动力矩,此动力矩大小与活套系统转动惯量成正比,其使得张力矩发生变化,进而影响张力,张力的变化又通过后滑 $\beta_4$ 形成 $\delta V_4$ ,又影响着套量,其耦合关系线路如图2所示.

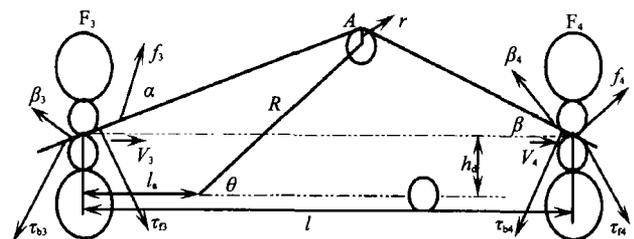


图1 活套机构参数示意图

Fig.1 Sketch map of parameters in the looper system

收稿日期: 2004-09-22 修回日期: 2005-03-23

基金项目: 国家经贸委“九五”攻关项目(No.97-316-02-02)

作者简介: 李伯群(1970—), 工程师, 博士研究生

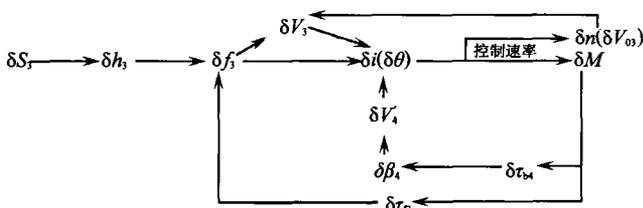


图2 活套系统耦合过程

Fig.2 Coupling process of the looper system

## 2 活套系统建模

为了实现活套高度与张力系统的解耦控制,需建立过程的动态模型.在过程控制中,大多数使用线性时不变模型来描述.当过程偏离平衡点的变化很小时,控制系统的动态行为就可以用线性时不变模型来描述.这样可避免大量非线性方程联解的困难,即完成对非线性系统线性化处理.活套控制系统为双输入双输出结构,其动态结构如图3所示.轧机主电机和活套电机分别被等效成一阶惯性环节,右边为活套在工作基准点(角度 $21^\circ$ ,张应力为 $7\text{N}\cdot\text{mm}^{-2}$ )附近的线性化模型.图中 $G_R, E, J, M_T$ 为传动比、模数、转动惯量、活套张力矩.  $L_{loop}, T_v, T_l, K_1$ 为套量、主电机、活套电机时间常数、惯性环节的放大系数.相应的非线性函数为<sup>[7]</sup>:

$$\begin{cases} M_T = R'Bht_3[\sin(\theta+\beta) - \sin(\theta-\alpha)] \\ \theta = \arctan \frac{R\sin\theta+r}{R\cos\theta}, R' = \sqrt{R^2+2Rr\sin\theta+r^2} \end{cases} \quad (1)$$

$$L_{loop} = \sqrt{(l_0+R\cos\theta)^2 + (R\sin\theta-h_0+r)^2} + \sqrt{(l-l_0-R\cos\theta)^2 + (R\sin\theta-h_0+r)^2} - l \quad (2)$$

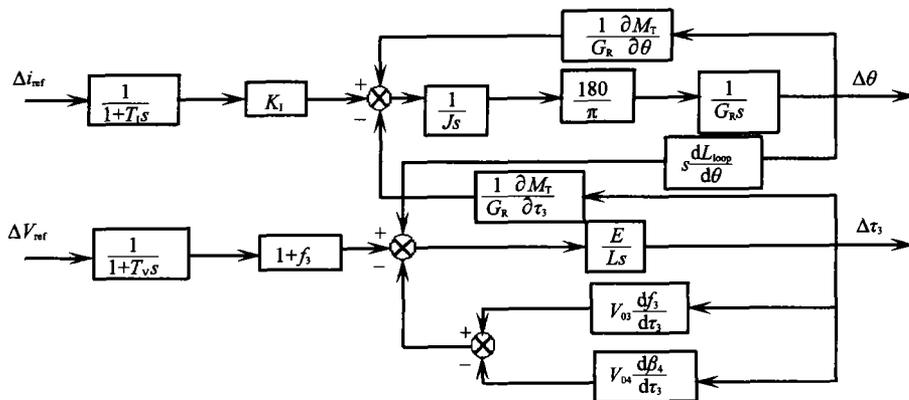


图3 活套系统线性化模型

Fig.3 Linear model of the looper system

## 3 线性预测模型的BP神经网络PID解耦控制器

对于绝大多数情况来说,解耦器的增益不应该是常数.如果要达到最优化,则解耦器必须是

$$\gamma = \sqrt{\frac{h}{R_1}} \tan \left[ \frac{1}{2} \arctan \sqrt{\frac{\varepsilon}{1-\varepsilon}} + \frac{\pi}{8} \ln(1-\varepsilon) \right] \sqrt{\frac{h}{R_1}} + \frac{1}{2} \sqrt{\frac{h}{R_1}} \left( \frac{\tau_{b3}}{K} - \frac{\tau_{b1}}{K} \right) \quad (3)$$

$$K = 1.15 \sigma_0 \exp(a_1 T + a_2) \left( \frac{u_m}{10} \right)^{a_3 T + a_4} \left[ a_6 \left( \frac{e}{0.4} \right)^{a_5} - (a_6 - 1) \left( \frac{e}{0.4} \right) \right] \quad (4)$$

$$\begin{cases} f = \frac{(1-\cos\gamma)(2R\cos\gamma-h)}{h} \\ v_l = v_0(1+f), u_m = \frac{v_{0l}}{l_c} \ln \frac{h_0}{h} \end{cases} \quad (5)$$

式中,  $\gamma$ 为中性角;  $h_0$ 为轧入厚度;  $h$ 为轧出厚度;  $B$ 为板带宽度;  $R_1$ 为轧辊半径;  $\varepsilon$ 为相对变形程度;  $K$ 为金属变形阻力;  $\sigma_0, a_1, \dots, a_6$ 为变形阻力数学模型回归系数;  $v_l$ 为本机架出口带钢的速度;  $v_0$ 为本机架轧辊线速度;  $u_m$ 为平均变形速度;  $l_c$ 为变形区接触弧长水平投影;  $e$ 为变形程度;  $\tau_3$ 为张应力.

在工作点线性化处理,即取非线性函数的一阶泰勒级数,忽视增量的高次项得

$$\begin{aligned} v_{03} \frac{\partial f_3}{\partial \tau_3} + v_{04} \frac{\partial \beta_4}{\partial \tau_3} &= 0.0114, & \frac{\partial M_T}{G_R \partial \tau_3} &= 209.7, \\ s \frac{dL_{loop}}{d\theta} &= 0.106s, & \frac{\partial M_T}{G_R \partial \theta} &= 6.77, \\ \frac{1+f_3}{1+T_v s} &= \frac{1.068}{0.091s+1}, & \frac{K_1}{1+T_l s} &= \frac{8.24}{0.18s+1}, \\ \frac{E}{Ls} &= \frac{25.4}{s}, & \frac{180}{\pi J G_R s^2} &= \frac{1.54}{s^2}. \end{aligned}$$

由此可得到活套系统耦合传递函数矩阵表式  $G_{11}(s), G_{12}(s), G_{21}(s), G_{22}(s)$  即:

$$\begin{bmatrix} \Delta\theta(s) \\ \Delta\tau_3(s) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} G_{11}(s) & G_{12}(s) \\ G_{21}(s) & G_{22}(s) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta v(s) \\ \Delta i(s) \end{bmatrix} \quad (6)$$

应该指出,线性化后所得到的传递函数是被控对象的近似数学模型,系数是慢时变的.

非线性的,甚至是适应性的.如果解耦器是线性和定常的,那么可以预料解耦将是不完善的.在某些情况下解耦器的误差可能引起不稳定<sup>[9]</sup>.

基于BP网络的PID控制系统的控制部分由经典PID控制器、神经网络构成,其根据系统的运

行状态, 调节 PID 控制器的参数, 以期达到某种性能指标的最优化. 经典增量式数字 PID 的控制算法为:

$$u(k)=u(k-1)+k_p[e(k)-e(k-1)]+k_i e(k)+k_d[e(k)-2e(k-1)+e(k-2)] \quad (7)$$

本文采用 3 层 BP 网络, 网络输入层的输入为

$$O_j^{(1)}=x(j), j=1, 2, \dots, M \quad (8)$$

网络隐含层的输入、输出为:

$$\begin{cases} \text{net}_i^{(2)}(k)=\sum_{j=1}^M w_{ij}^{(2)} O_j^{(1)} \\ O_i^{(2)}(k)=f[\text{net}_i^{(2)}(k)] \end{cases} \quad (9)$$

其中,  $i=1, 2, \dots, Q$ .

网络输出层的输入输出为:

$$\text{net}_l^3(k)=\sum_{i=1}^Q w_{li}^3 O_i^{(2)}(k), O_l^3(k)=g[\text{net}_l^3(k)], l=1, 2, 3 \quad (10)$$

$$O_1^3(k)=k_p, O_2^3(k)=k_i, O_3^3(k)=k_d \quad (11)$$

输出层输出节点分别对应三个可调参数  $k_p, k_i, k_d$ , 由于其不能为负值, 所以输出层神经元的活化函数取非负的 Sigmoid 函数, 隐含神经元的活化函数取对称的 Sigmoid 函数:

$$g(x)=\frac{1}{2}[1+\tanh(x)]=\frac{e^x}{e^x+e^{-x}}, f(x)=\tanh(x)=\frac{e^x-e^{-x}}{e^x+e^{-x}} \quad (12)$$

取性能指标函数为:

$$E(k)=\frac{1}{2}[r(k)-y(k)]^2 \quad (13)$$

相应的学习算法为<sup>[9]</sup>:

$$\Delta w_{ij}^3(k)=\alpha \Delta w_{ij}^3(k-1)+\eta \delta_i^3 O_j^2(k) \quad (14)$$

$$\delta_i^3=e(k) \frac{\partial \hat{y}(k)}{\partial u(k)} \frac{\partial u(k)}{\partial O_i^3(k)} g'[\text{net}_i^3(k)] \quad (15)$$

$$\Delta w_{ij}^2(k)=\alpha \Delta w_{ij}^2(k-1)+\eta \delta_i^2 O_j^1(k) \quad (16)$$

$$\delta_i^2=f'[\text{net}_i^2(k)] \sum_{l=1}^3 \delta_l^3 w_{li}^3(k) \quad (17)$$

$$g'(\bullet)=g(x)[1-g(x)], f'(\bullet)=[1-f^2(x)]/2 \quad (18)$$

将神经网络用于控制器的设计或直接学习计算控制器的输出控制量, 一般都要用到系统的输出值或其变化量来计算加权系数的修正量. 但实际上, 系统的预测输出值是不易直接测得的, 式(15)中的  $\hat{y}(k)$  可采用最小二乘法建立被控对象的预测数学模型而得到, 即用该模型所计算的预测输出来取代预测输出的实测值, 不用近似符号函数  $\text{sgn}\left(\frac{\partial y(k+1)}{\partial u(k)}\right)$  代替, 可进一步提高控制效果.

### 4 仿真研究

将上面所得到的活套高度与张力耦合系统离散化, 采样周期为 20ms, 为使仿真更接近实际控制对象, 考虑对象参数的慢时变特性, 对  $y(k-1), u(k-1)$  的系数分别引入  $1-0.85e^{-0.1k}$  及  $1+0.2\sin(k\pi/50)$  慢时变函数, 以此来代替实际系统

的响应过程.

实际的活套臂长度为 600mm, 在线性工作点处对应的套高 215mm. 用线性预测模型的 BP 神经网络 PID 控制器对其进行控制: 神经网络的结构选 3-6-3, 为反映 PID 三类信号的特性, NN 的输入模式选为

$$O_1^{(1)}(k)=e(k), O_2^{(1)}(k)=\sum_{i=1}^k e(i), O_3^{(1)}(k)=e(k)-e(k-1),$$

且学习速率  $\eta=0.36$  和惯性系数  $\alpha=0.15$ , 加权系数初始值取区间  $[-0.5, 0.5]$  上的随机数; 采用递推最小二乘法估计预测模型, 并进行一步输出预测. 输入指令信号分为两种: 第一种情况是对活套高度附加 15% 左右, 即幅度为 30mm 的阶跃扰动信号; 第二种情况是对活套张力附加 20% 左右, 即幅度为  $1.5 \text{ N}\cdot\text{mm}^{-2}$  的阶跃扰动信号. 解耦后的带钢张力与高度的变化曲线如图 4 和图 5 所示. 不考虑活套高度和张力系统的耦合, 传统活套系统仿真控制结果如图 6 所示.

仿真结果表明, 采用 BP-PID 控制策略对活套高度与张力多变量耦合系统进行解耦控制, 系统的耦合程度大大减少, 且具有响应速度快、自适应能力强、抗干扰能力强等优点. 当活套高度、张力发生变化时, 带钢张力和套高所受影响是很有限的, 其本质上就是使活套高度、张力可以很

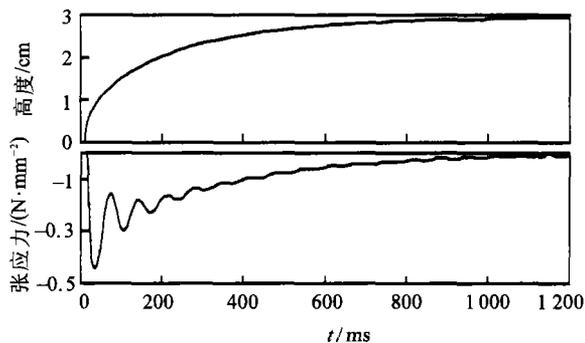


图 4 活套张力解耦响应曲线

Fig.4 Looper tension response curve after decoupled

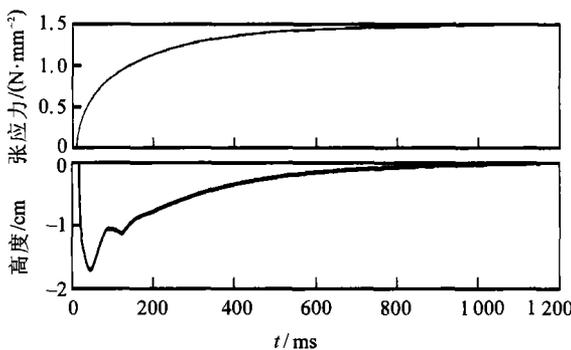


图 5 活套高度解耦响应曲线

Fig.5 Looper height response curve after decoupled

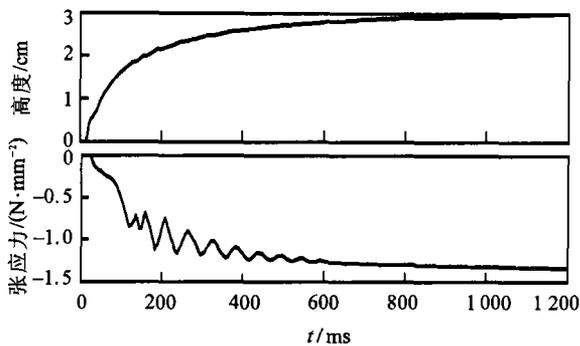


图6 传统活套控制张力变化曲线

Fig.6 Conventional looper tension response curve

好地稳定在设定值附近,使活套系统稳定工作,避免了由于张力波动所引起的板带厚度与宽度的变化,从而提高了产品质量.基于传统控制策略,活套张应力变化较大,在活套高度响应进入稳态时,其值达到  $-1.3 \text{ N} \cdot \text{mm}^{-2}$ .

## 5 结论

本文针对工业系统模型未知情况,研究了活套高度和张力系统的神经网络自适应解耦控制问题.实际工程控制要求保持输出量(活套高度)基本不变,控制系统工作在稳态工作点附近,符合线性化的条件.最后基于小偏差理论,结合具有典型非线性和时变特点的活套耦合系统,通过忽略系统中一些非线性因素和外界干扰的影响,

并在工作点附近进行增量线性化处理,以此为模型进行了仿真研究,结果表明,解耦后的活套控制系统可获得更好的控制效果,证明了所提出的控制策略对于非线性系统是有效的.

## 参考文献

- [1] 何虎,孙一康.热连轧活套系统分析与控制方式比较.北京科技大学学报,2000,22(5):482
- [2] 张殿华,郑芳,王国栋.板带热连轧活套高度和张力系统的解耦控制.控制与决策,2000,15(2):158
- [3] Clark M T, Versteeg H, Konijn W. Development of new high performance loopers for hot strip mills. *Iron Steel Eng*, 1997, 74 (6): 640
- [4] Okada M, Iwasaki Y, Murayama K, et al. Optimal control system for hot strip finishing mill. In: Proceedings of the 35th IEEE Conference on Decision and Control. IEEE, 1996. 1236
- [5] Anbe Y, Sekiguchi K, Imanari H. Tension control of a hot strip mill finisher. In: Proceedings of the 13th World Congress, International Federation of Automatic Control. Vol M: Chemical Process Control, Mineral, Mining, Metals. Pergamon, 1997. 439
- [6] Asano K, Yamamoto K, Kawase T, et al. Hot strip tension-looper control based on decentralization and coordination. In: Proceedings of Automation in Mining, Mineral and Metal Processing. Cologne (Germany), 1998. 221
- [7] 孙一康.带钢热连轧的模型与控制.北京:冶金工业出版社,2002
- [8] 金以慧,方崇智.过程控制.北京:清华大学出版社,2002
- [9] 陶永华.新型PID控制及其应用.北京:机械工业出版社,2002

## Decoupling control of loopers' height and tension system in hot rolling processing

LI Boqun, FU Jian, ZHANG Ruicheng, SUN Yikang

Information Engineering School, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China

**ABSTRACT** A looper system possesses strong nonlinear, strong coupling, uncertain and multi-constrained features. For improving automatic gauge control accuracy and quality in hot strip mills, an appropriate mathematical model ought to be built so as to complete the decoupling control of loopers' height and tension system. According to the little signal theory, whole transferring functions of the looper system were presented by analyzing its coupling process and practical data. The control strategy of prediction for a linear model based on BP-PID was introduced to improve control effect and to decouple the looper system. The simulated results showed the effectiveness of this algorithm and after decoupled, the loopers' control performance got much better.

**KEY WORDS** looper system; modelling; decoupling; linear model; BP- PID