

· 系统与装置 ·

武钢三热轧 1 580 mm 热连轧机活套 控制系统研究及应用

林 刚, 许 劼

(武汉科孚德自动化有限公司 工程部, 湖北 武汉 430080)

摘要: 武汉钢铁集团公司三热轧 1 580 mm 热连轧机精轧机活套控制系统采用先进的数学模型, 精确计算活套动作的各项控制参数, 实现机架间带钢的恒定套量控制和微张力控制。数学模型包括活套套量数学模型和活套张力数学模型。实际应用结果表明, 采用该数学模型的活套套量控制器和张力控制器都获得了较好的控制效果, 降低了精轧机堆钢和拉钢事故的发生, 提高了产品产量和成材率。

关键词: 热连轧机; 活套; 数学模型; 套量控制; 张力控制

中图分类号: TG334.9 **文献标志码:** B **文章编号:** 1000-7059 (2009) 04-0030-05

Research and application on looper control system of 1 580 mm hot strip mill in the 3rd Hot Rolling Plant of WISCO

L N Gang, XU Jie

(Project Department, Converteam Wuhan Automation Co., Ltd., Wuhan 430080, China)

Abstract: In looper control system for finishing rolling mill of 1 580 mm hot strip mill in the 3rd Hot Rolling Plant of WISCO, advanced mathematic model is adopted to calculate parameters of looper and realize constant looper height control and micro-tension control of strip between stands. The mathematic model includes looper height model and looper tension model. The model has been applied to looper height controller and tension controller. Practical application results show that good control effect was obtained, strip piling and pulling during rolling were reduced, and production output and economic benefits were improved.

Key words: hot strip mill; looper; mathematic model; height control; tension control

精轧机活套是热连轧线的重要设备, 随着用户对热轧带钢产品厚度、宽度等质量指标的日益重视, 活套自动控制系统的响应速度和稳态精度也面临更高的要求。

武汉钢铁集团三热轧 1 580 mm 热连轧机生产线自动控制及传动系统由武汉 Converteam 自动化有限公司 (CONWAC) 和德国 Converteam 公司 (CVTG) 共同提供及合作调试完成。该热轧线已于 2007 年 12 月建成投产。精轧机活套机构采用了目前最先进的伺服阀控制液压缸驱动, 实践证

明该活套控制系统响应速度快、稳态精度高, 对提高热轧带钢产品质量起到很好的作用, 满足了用户生产的需要。

恒定活套量和小张力轧制是现代热连轧精轧机组的一个基本特征。武钢 1 580 mm 热轧线精轧机采用现代热连轧工艺中比较流行的 7 个精轧机架 6 个活套的配置。以 3^号活套 (位于 F_3 机架和 F_4 机架之间) 为例, 带钢头部进入 F_4 机架前, 活套定位在准备位, 带钢头部进入 F_4 机架时, 活套迅速抬起, 实行机架间带钢恒定微张力控制, 以避免拉

收稿日期: 2008-08-12; 修改稿收到日期: 2009-04-07

作者简介: 林 刚 (1966-), 男, 广西桂林人, 教授级高级工程师, 硕士, 主要从事冷轧、热轧自动化工程管理及研究工作。

钢、堆钢^[1],同时通过上游机架 F_1 、 F_2 和 F_3 的主速度调节保持套量恒定,保证连轧过程稳定进行;带钢尾部离开 F_3 机架后,活套迅速落下定位到准备位,配合 F_3 机架甩尾抛钢,同时等待下一块带钢进入;换辊时,活套抬起到最高位以便导卫装置移入移出,换辊完成后,活套下降到准备位。

1 活套套量控制

活套套量控制实际上是通过控制活套上游轧机主速度使活套套量(高度)稳定在设定值附近,是一个以上游轧机主速度为内环,活套套量(高度)为外环的双闭环控制系统。在活套套量控制系统中,位移传感器检测出活套支撑臂的角度,计算出反馈套量,该反馈值与数学模型预设值的偏差量输入给套量调节器,根据控制算法和参数调整进行运算,调节量依次按逆轧制方向输出到该活套上游所有机架主轧机速度控制系统中,实现级联控制,通过调节上游主轧机速度,使带钢套量值接近预设值。由于调节量输出的方向与带钢前进的方向相反,我们也称这种调节套量的方法为“逆调”。

活套套量控制系统中,套量检测的准确性将

$$\alpha = \alpha_1 + \alpha_2 = \arcsin \frac{r}{\sqrt{(L_1 + R \cos \gamma)^2 + (R \sin \gamma - d_L)^2}} + \arctan \frac{R \sin \gamma - d_L}{L_1 + R \cos \gamma} \quad (1)$$

$$\beta = \arcsin \frac{r}{\sqrt{(L_2 - R \cos \gamma)^2 + (R \sin \gamma - d_L)^2}} + \arctan \frac{R \sin \gamma - d_L}{L_2 - R \cos \gamma} \quad (2)$$

$$AB = \frac{L_1 + R \cos \gamma}{\cos \alpha} = \frac{L_1 + R \cos \gamma}{\cos \left[\arcsin \frac{r}{\sqrt{(L_1 + R \cos \gamma)^2 + (R \sin \gamma - d_L)^2}} + \arctan \frac{R \sin \gamma - d_L}{L_1 + R \cos \gamma} \right]} \quad (3)$$

$$BC = \frac{L_2 - R \cos \gamma}{\cos \beta} = \frac{L_2 - R \cos \gamma}{\cos \left[\arcsin \frac{r}{\sqrt{(L_2 - R \cos \gamma)^2 + (R \sin \gamma - d_L)^2}} + \arctan \frac{R \sin \gamma - d_L}{L_2 - R \cos \gamma} \right]} \quad (4)$$

$$\text{则 } \Delta l = AB + BC - L_1 - L_2 \quad (5)$$

式中, Δl 为活套套量。其中, R , r , L_1 , L_2 , d_L 是常量,因此只需检测活套支撑臂角度 γ ,即可由套量检测数学模型式(5)计算活套套量实际值 Δl 。

武钢 1 580 mm 热轧线精轧机活套套量控制器输出同步传送给上游各个机架,使上游各个机架的速度按相同的百分比变化,避免某一个机架调节套量的过程中引起上游机架间的套量变化,这

直接影响套量调节的效果,由于目前还没有能够直接检测套量的设备和方法,通常都是通过活套支撑臂角度的测量间接计算活套套量,活套机械设备的的基本几何结构如图 1 所示。

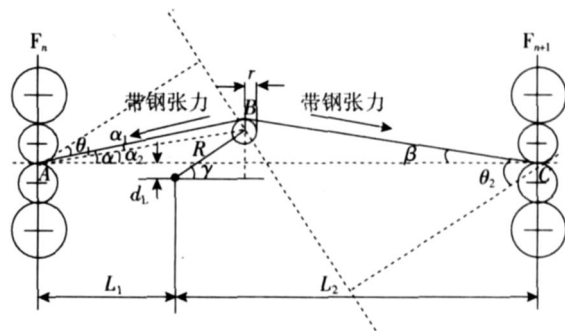


图 1 活套机械结构

Fig. 1 Loop mechanical structure

R —活套支撑臂半径; r —活套辊半径; γ —活套支撑臂角度; d_L —活套支撑臂支撑点距离轧制线的垂直距离; L_1 —活套支撑臂支撑点距离前一个机架中心线的水平距离; L_2 —活套支撑臂支撑点距离后一个机架中心线的水平距离

根据图 1 中各物理量关系,建立活套套量数学模型,计算机架间储存的套量。

种控制方式实际上是一种前馈补偿控制。为了便于各机架按比例进行速度校正,控制器输出信号变换为相对值形式,作为增益系数与机架本身计算速度相乘得到机架参考速度。以精轧 $F_4 \sim F_7$ 机架为例,速度控制原理如图 2 所示。^[2]

套量控制器采用比例积分(PI)调节算法结合死区控制和给定值调节器的控制模式,如图 3 所示。给定值调节器实际就是带限幅的积分器,积

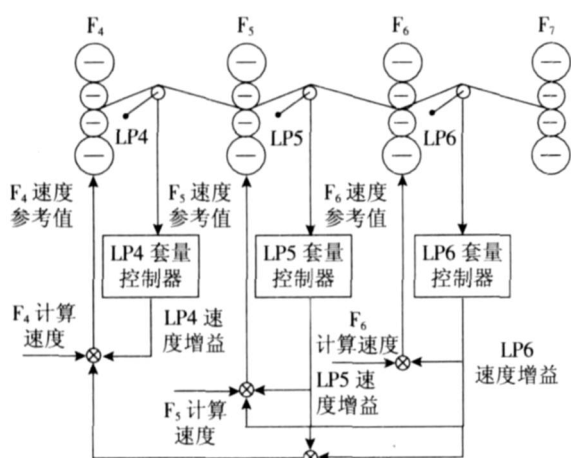


图 2 速度控制原理

Fig 2 Main drive speed control

分器的输出增益系数初始化为 1,当套量参考值和实际值偏差较小时,PI调节器进入死区,积分器停止工作,输出保持不变;当套量参考值和实际值偏差较大,PI调节器有正或负的输出时,积分器以一定的设定变化率积分。死区控制和给定值调节器限制了输出的增益系数不会在 1 附近频繁上下波动。这种套量控制方法不过分追求套量快速调节,避免活套臂过大的角加速度和转动惯量导致的大幅度动态力矩变化,同时轧机主速度也不会产生速升和速降,保证了带钢张力和速度的相对平稳。

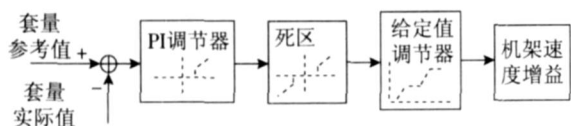


图 3 套量控制器

Fig 3 Looper's height controller

2 活套张力控制

2.1 活套张力数学模型

活套张力控制是精轧机活套控制系统的核心,由于活套张力控制效果直接影响带钢质量,因此保持带钢轧制过程中机架间张力的恒定就尤为重要。在稳定轧制的状态下,活套支撑臂承受的负载力矩方程如下^[3]:

$$T = T_t + T_s + T_l \quad (6)$$

式中, T 为活套支撑臂的负载力矩; T_t 为带钢张力矩; T_s 为带钢重力矩; T_l 为活套自重矩。由于热轧生产过程中精轧机组带钢实际张力并不能实际检测,我们无法计算出 T_t 的实际值,因此上式并不能用于活套支撑臂的实际负载力矩 T 的闭环控

制,也就不能实现带钢张力的反馈控制。实际中我们根据力矩平衡原理,用带钢张力设定值代替带钢张力实际值,计算出上式中的 T_t ,即计算出活套支撑臂的设定负载力矩,然后通过调节活套液压缸内压力使活套支撑臂的实际负载力矩等于设定负载力矩。为了保证间接控制的带钢张力实际值等于带钢张力设定值,必须建立活套负载力矩平衡的数学模型。图 4 给出了活套机械设备及液压缸的几何结构关系。

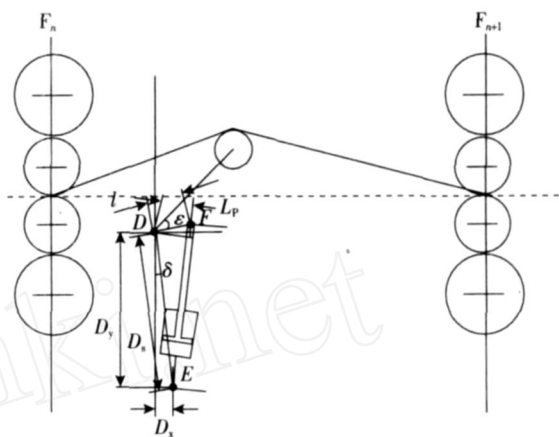


图 4 活套液压缸结构

Fig. 4 Looper hydraulic cylinder structure

D_x —液压缸支撑点距离活套支撑臂支撑点的水平距离; D_y —液压缸支撑点距离活套支撑臂支撑点的垂直距离; D_s —液压缸支撑点距离活套支撑臂支撑点的距离; ϵ —活套支撑臂与连接液压缸支撑杆的夹角; l —活套支撑臂与连接液压缸支撑杆的长度; L_p —活塞杆作用在活套上的力臂长度

根据活套套量数学模型式 (5),我们可以计算式 (6)中 T_t , T_s 和 T_l :

$$\begin{aligned} T_t &= T_e \sin \theta_2 \cdot R - T_e \sin \theta_1 \cdot R = \\ &T_e R (\sin \theta_2 - \sin \theta_1) = \\ &T_e R [\sin (\gamma + \beta) - \sin (\gamma - \alpha)] = \\ &2 T_e R \cos \left[\gamma + \frac{\beta}{2} - \frac{\alpha}{2} \right] \cdot \sin \left[\frac{\beta}{2} + \frac{\alpha}{2} \right] = \\ &2 t_s S_s R \cdot \cos \left[\gamma + \frac{\beta}{2} - \frac{\alpha}{2} \right] \cdot \sin \left[\frac{\beta}{2} + \frac{\alpha}{2} \right] \end{aligned} \quad (7)$$

$$\begin{aligned} T_s &= G_s R \cos \gamma = \rho_s v_s g R \cos \gamma = \\ &\rho_s R \cos \gamma \cdot S_s (AB + BC + L_1) \cdot g \end{aligned} \quad (8)$$

$$T_l = G_l R_l \cos \gamma = m_l g R_l \cos \gamma \quad (9)$$

上述式中, α , β , AB , BC 由式 (1) ~ (4) 可算出; T_e 为机架间带钢总张力设定值; t_s 为机架间带钢单位横截面面积张力设定; G_s 为机架间带钢重力; S_s 为机架间带钢横截面积; ρ_s 为带钢密度 7800 kg/m^3 ;

v_s 为机架间带钢体积; L_l 为带钢在机架间的延伸长度,通常取一个很小的定值; G_l 为活套重力; m_l 为活套质量; g 为重力加速度, 9.8 m/s^2 ; R_l 为活套重心距离支撑点距离。

由于活套液压缸力矩由活塞两侧压力差带动活塞杆推拉活套引起,因此负载力矩平衡模型为

$$F_r L_p = T$$

式中, F_r 为活塞两侧压力差的计算值。

$$FDE = \gamma + \pi/2 - \varepsilon - \delta = \gamma + \pi/2 - \varepsilon - \arctan \frac{D_y}{D_x}$$

$$S_{\Delta DEF} = 1/2 \cdot DF \cdot DE \cdot \sin FDE = 1/2 \cdot D_s \cdot \sin \left[\gamma + \pi/2 - \varepsilon - \arctan \frac{D_y}{D_x} \right]$$

$$EF = \sqrt{D_s^2 - 2D_s l \cos FDE + l^2} = \sqrt{D_x^2 + D_y^2 - 2 \sqrt{D_x^2 + D_y^2} \cdot l \cos \left[\gamma + \pi/2 - \varepsilon - \arctan \frac{D_y}{D_x} \right] + l^2}$$

$$\text{又 } S_{DEF} = 1/2 \cdot L_p \cdot EF$$

$$\text{则 } L_p = \frac{l \sqrt{D_x^2 + D_y^2} \cdot \sin \left[\gamma + \pi/2 - \varepsilon - \arctan \frac{D_y}{D_x} \right]}{\sqrt{D_x^2 + D_y^2 - 2 \sqrt{D_x^2 + D_y^2} \cdot l \cos \left[\gamma + \pi/2 - \varepsilon - \arctan \frac{D_y}{D_x} \right] + l^2}} \quad (11)$$

式中, D_x, D_y, ε, l 均为定值,因此只需检测出活套支撑臂角度 γ 即可计算出 L_p 。

根据活套张力模型式 (10) 可以得到活套液压缸活塞两侧压力差计算值 F_r 。

需要指出的是,无论是式 (10) 中活套支撑臂负载总力矩 T , 还是式 (11) 中活塞杆作用的力臂长度 L_p , 都是随活套的调节快速动态变化的, 且式 (10) 和 (11) 涉及大量的变量运算, 因此对工业计算机的性能提出了很高的要求。Converteam 公司的高性能控制器 HPCi (High-Performance Controller) 是一个基于标准 VME 计算机的多任务实时处理器, 响应速度快、处理能力强。其 CPU (中央处理单元) 的最高主频可达 1.8 GHz, 程序轮询速度最快可达 1 ms, 基于 HPCi 的编程软件 P80i 功能强大, 不仅能实现基本的逻辑控制功能, 其功能库 (Function Libraries) 也包含了丰富的数学函数计算功能块, 能很好地满足活套控制的复杂计算和快速响应的要求。

2.2 活套张力控制器

武钢热轧厂 1 580 mm 热轧线精轧机活套张力控制系统中, 根据活套张力模型式 (10) 给出的活塞两侧压力差计算值 F_r , 以活套液压缸活塞两侧压力实际差值 F_a 为反馈, 建立压力差闭环控制器, F_a 用下面的方程计算

根据式 (6) 可以得到活套张力数学模型为

$$F_r = \frac{T}{L_p} = \frac{T_l + T_s + T_i}{L_p} \quad (10)$$

根据图 1 和图 4 中的几何关系, 我们得到以下算式。

$$D_s = \sqrt{D_x^2 + D_y^2}$$

$$\delta = \arctan \frac{D_y}{D_x}$$

$$F_a = P_p S_p - P_r S_r \quad (12)$$

式中, P_p, S_p 分别为活塞侧压强和压力作用面积; P_r, S_r 分别为活塞杆侧压强和压力作用面积。

压力差闭环控制器采用比例积分 (PI) 调节算法结合数字陷波器、蝶形增益修正和伺服阀漂移补偿, 压力差控制原理如图 5 所示。

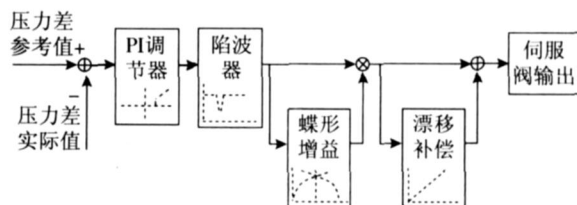


图 5 压力闭环控制

Fig 5 Pressure close loop control

(1) 数字陷波器。由于伺服阀响应速度快, 快速调节过程中经常输出高频信号, 因此如果某一时刻输出频率与液压缸固有频率接近, 就容易产生共振现象。利用能够设定陷波频率和陷波宽度的数字陷波器可有效消除机械共振, 保护设备, 提高控制精度。数字陷波器对应的系统函数为^[4]:

$$H(z) = \frac{Y(z)}{X(z)} = \frac{\sum_{k=0}^M b_k z^{-k}}{1 - \sum_{k=1}^N a_k z^{-k}} \quad (13)$$

式中, $H(z), Y(z), X(z)$ 分别为线性非移变系统的

单位取样响应、输出和输入响应的 z 变换; M, N 分别为输出和输入的阶数; b_k, a_k 分别为输出和输入对应阶数的系数。

二阶数字陷波器可以用下面的差分方程表示:

$$Y(t) = a_1 Y(t-1) + a_2 Y(t-2) + b_0 X(t) + b_1 X(t-1) + b_2 X(t-2) \quad (14)$$

式中, $X(t)$ 为 t 时刻伺服阀输出; $Y(t)$ 为 t 时刻伺服阀经数字陷波器滤波后的输出; b_0, b_1, b_2, a_1, a_2 分别为伺服阀经滤波前后输出对应阶数的系数。

(2) 蝶形输出增益。活套液压缸是单杆结构, 活塞腔和活塞杆腔的压力作用面积相差较大, 因此对于相同的伺服阀开度 (正反两个方向开度相同), 活塞杆伸出和收回的速度相差也比较大, 为达到活套调节时活塞杆伸出和收回的动态响应一致的要求, 必须调节伺服阀输出增益, 算法如下:

$$\text{设 } F_m = P_s \cdot S_p - P_t \cdot S_r$$

$$F_n = P_t \cdot S_p - P_s \cdot S_r$$

$$\text{则 } K_1 = \frac{F_m - F_n}{\sqrt{2} \cdot (F_m - F_a)} \quad (15)$$

$$K_2 = \frac{F_m - F_n}{\sqrt{2} \cdot (F_a - F_n)} \quad (16)$$

式中, P_s 为系统压力; P_t 为回油压力; K_1 为活塞杆伸出时的伺服阀开度增益; K_2 为活塞杆收回时的伺服阀开度增益。经过增益修正后, 实际应用中活套液压缸活塞杆伸出和收回时对应的压力 P 和流量 Q 曲线如图 6 所示, 可以看到两条曲线呈蝴蝶形对称。

(3) 伺服阀漂移补偿。由于活套伺服阀在调节张力时常在零位区域附近工作, 而伺服阀零点漂移又是由工作条件或环境变化引起的, 很难完全消除, 因此, 伺服阀输出加漂移补偿就很有必要。伺服阀漂移补偿其实就是对伺服阀输出加一个时间常数很大的积分补偿, 在伺服阀长期工作

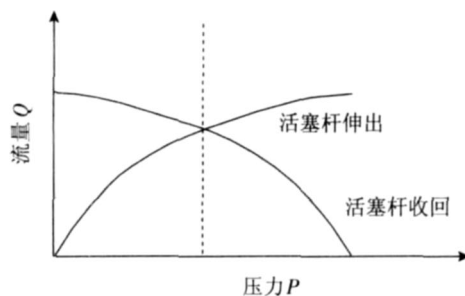


图 6 增益修正曲线

Fig 6 Gain correction curve

在零位附近某个范围内该积分器工作。实践证明该方法可有效补偿伺服阀零位漂移带来的稳态误差。

3 结论

武钢 1 580mm 热连轧精轧机活套控制系统于 2007 年 12 月投入应用以来, 机架间带钢套量、张力控制稳定良好, 降低了精轧机堆钢和拉钢事故的发生, 得到了用户的好评。

参考文献:

- [1] 刘 玠, 杨卫东, 刘文仲. 热轧生产自动化技术 [M]. 北京: 冶金工业出版社, 2006: 120-121.
- [2] 汪庭宽, 李绍阳, 吴家昌, 等. 热轧带钢生产中电动活套的控制 [J]. 电气传动, 2005, 35 (1): 53-55. WANG Ting-kuan, LI Shao-yang, WU Jia-chang, et al. Electric looper control system of hot strip mill [J]. Electric Transmission, 2005, 35 (1): 53-55.
- [3] 傅 剑, 杨卫东, 刘 彤, 等. 活套张力矩实时计算的多项式逼近算法 [J]. 控制工程, 2004, 11 (3): 226-228. FU Jian, YANG Wei-dong, LIU Tong, et al. Polynomial approach algorithm in real time calculation of looper tension moment [J]. Control Engineering of China, 2004, 11 (3): 226-228.
- [4] 姚天任, 江太辉. 数字信号处理 [M]. 武汉: 华中科技大学出版社, 2000: 107-108. [编辑: 沈黎颖]

(上接第 8 页)

[5] 汪 焱, 孙一康. 基于板厚板形综合目标函数的冷连轧机轧制参数智能优化新方法 [J]. 冶金自动化, 2002, 26 (3): 11-14.

WANG Yan, SUN Yi-kang. New intelligent optimization means for rolling parameters of cold strip tandem mill based on strip gauge and shape objective function [J]. Metallurgical Industry Automation, 2002, 26 (3): 11-14.

[6] 严爱军, 柴天佑, 岳 恒. 竖炉焙烧过程的多变量智

能优化控制 [J]. 自动化学报, 2006, 32 (4): 636-640. YAN Ai-jun, CHAI Tian-you, YUE Heng. Multivariable intelligent optimizing control approach for shaft furnace roasting process [J]. Acta Automatica Sinica, 2006, 32 (4): 636-640.

[7] Dieterle W, Kochs H D, Dittmar E. Communication architectures for distributed computer control systems [J]. Control Engineering Practice, 1995, 3 (8): 1 171-1 176.

[编辑: 魏 方]