

· 系统与装置 ·

宝钢某连续退火机组入口活套控制技术

李东江¹, 陈启军², 王国民¹

(1. 宝山钢铁股份有限公司 冷轧厂, 上海 201900; 2. 同济大学)

摘要:活套是连续生产机组的重要设备。本文以宝钢某连续退火机组入口活套为背景, 阐述了活套卷扬速度控制中位置调节、张力调节和同步调节的原理, 并详细介绍了机械损耗、惯量损耗以及重量损耗补偿计算的方法, 这些控制方法的应用大大改善了系统的动态性能和静态性能。

关键词:连续退火机组; 活套; 速度控制; 负荷补偿

中图分类号: TG334.9 **文献标志码:** B **文章编号:** 1000-7059(2009)04-0040-04

Entry looper control in continuous annealing processing line of Baosteel

L I Dong-jiang¹, CHEN Qi-jun², WANG Guo-min¹

(1. Cold Rolling Plant, Baoshan Iron & Steel Co., Ltd., Shanghai 201900, China; 2. Tongji University)

Abstract: Looper is one of the important machines in continuous processing line. Based on entry looper in a continuous annealing processing line of Baosteel, principles of position regulator, tension regulator and synchronization regulator in looper hoisting speed control are described in detail. The methods to calculate compensations of mechanical loss, inertial loss and gravity loss are also provided. Applications of these control methods improve dynamic performance and static performance greatly.

Key words: continuous annealing processing line (CAPL); looper; speed control; load compensation

0 引言

宝钢某连续退火机组从日本新日铁公司引进, 1998 年 3 月建成投产, 是我国引进的第 1 条薄板高速连续退火机组。该机组采用当时新日铁公司最先进的工艺技术和机械设备, 电气设备由日立公司提供, 带钢规格宽 730 ~ 1 230 mm, 厚 0.18 ~ 0.55 mm, 工艺段速度高达 880 m/min, 入、出口段速度高达 1 060 m/min。该机组入口活套采用立式结构, 为减小活套小车运行的惯量, 活套由独立的 3 台小车组成, 每台小车由单独的主卷扬电动机驱动。卷扬控制采用先进而缜密的算法, 不仅实现了各工艺段之间的协同工作, 而且确保了动态和静态过程中活套及其入、出口张力的稳定。本文将详细介绍日立公司的这套活套控制方法。

1 设备布置

入口活套设备布置如图 1 所示。活套的上游

为 1[#]张紧辊组, 是入口段主控速度辊; 下游为 2[#]张紧辊组, 用于控制炉子入口带钢张力的稳定。沿着带钢行进方向, 活套设置了 3 台独立的小车机构, 分别为 1[#]、2[#]和 3[#]小车, 每台小车由 1 台 75 kW 的电动机驱动。每台小车卷扬机卷筒上都直接耦合安装了 1 只绝对值脉冲编码器, 用于小车实际位置的反馈测量。小车设置上层辅助辊 10 根, 下层辅助辊 11 根, 合计 63 根, 其中 15 根为传动辊, 以增加传动力矩。为了防止带钢跑偏, 1[#]小车入口、1[#]小车与 2[#]小车之间、2[#]小车与 3[#]小车之间以及 3[#]小车出口分别设置了一套纠偏装置。另外, 在 1[#]小车入口和 3[#]小车出口还分别安装了一套张力计, 用于测量带钢张力的实际值。

2 卷扬控制方案

活套小车卷扬控制包含 3 个独立的调节器: 活套小车位置调节器、带钢张力调节器和活套小

收稿日期: 2008-12-04; 修改稿收到日期: 2009-03-18

作者简介: 李东江 (1972-), 男, 上海人, 高级工程师, 博士研究生, 主要从事冷轧设备管理和技术工作。

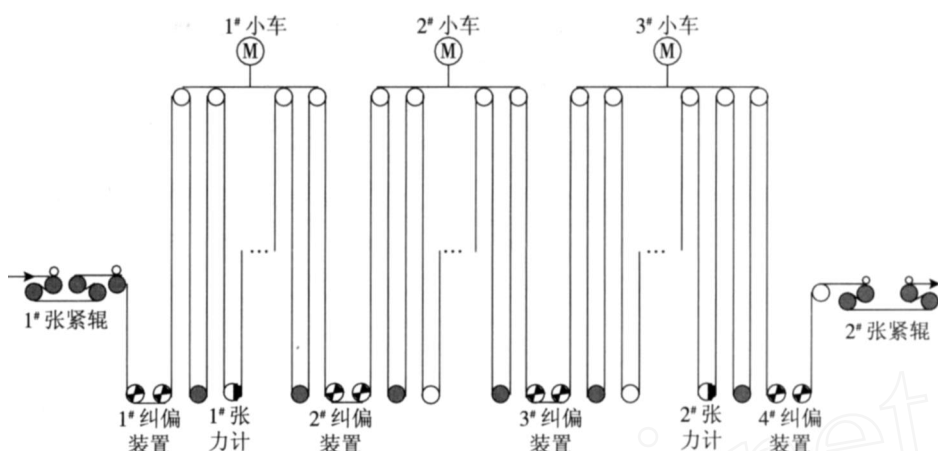


图 1 入口活套设备布置

Fig 1 Arrangement of entry looper equipments

车同步调节器。卷扬电动机传动的基本方式是转速控制,即无论是张力调节器,还是同步调节器,最终都是通过附加转速补偿改变卷扬电动机的转速来达到控制目的。卷扬电动机的转速给定

$$n_e = n_{e0} + n_t + n_p \quad (1)$$

式中, n_{e0} 为活套小车因位置调节需要而给定的初始转速, r/min ; n_t 为活套小车张力调节转速补偿, r/min ; n_p 为活套小车同步调节转速补偿, r/min 。

2.1 活套小车转速初始给定 n_{e0}

活套小车位置调节是活套控制的基本功能。当活套入口和出口速度出现偏差时,活套卷扬电动机必须相应运转以保证带钢秒流量的平衡。当活套入口速度大于出口速度时,活套冲套;当活套入口速度小于出口速度时,活套放套。设活套小车冲套方向为正,则活套小车卷扬电动机初始转速给定

$$n_{e0} = \frac{(V_{en} - V_{ex}) \cdot 60}{N\pi D G_r} \quad (2)$$

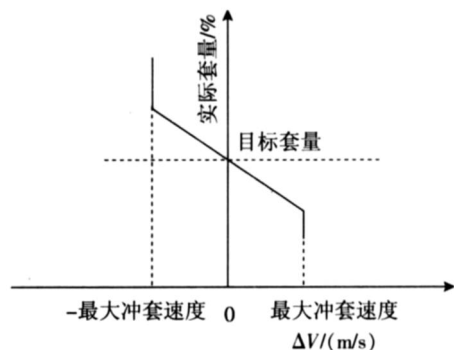
式中, V_{en} 为活套小车入口速度,即 1#张紧辊 5#辊速度, m/s ; V_{ex} 为活套小车出口速度,即 2#张紧辊 1#辊速度, m/s ; N 为活套小车带钢股数; D 为活套小车卷筒直径, m ; G_r 为活套小车卷扬齿轮箱变速比。

由式 (2) 可知,活套小车的速度由活套入口和出口的速度差决定。在忽略了一些张力调节环节后,活套出口速度 V_{ex} 即为工艺段速度,由操作人员直接设定。活套入口速度 V_{en} 在机组稳定生产过程中由活套小车的实际位置决定:

$$V_{en} = V_{ex} + \Delta V \quad (3)$$

式中, ΔV 为根据套量计算出来的附加速度。生产

过程中,活套会被设定 1 个目标套量,而实际套量与目标套量的差值经过图 2 所示的函数发生器计算,得出 ΔV 。当活套实际值大于目标值时,入口速度适当降低以减少套量;当活套实际值小于目标值时,入口速度适当提高以增加套量,最终将套量控制在目标值附近,实现活套小车的位置调节。

图 2 ΔV 函数曲线Fig 2 Curve of ΔV

2.2 活套小车张力调节转速补偿 n_t

控制稳定的张力是活套小车的重要任务之一,无论活套入口速度、出口速度以及活套小车位置如何变化,活套中的带钢都必须保持恒定的张力,张力不稳,将引起带钢张弛、跑偏、擦边,甚至导致炉内断带。张力调节的原理为:张力设定值 T_r 与张力计反馈的实际张力值 T_f 进行比较,差值经 PI 调节器调节后作为转速附加补偿值 n_t ,通过调整卷扬电动机速度达到调节张力的作用,即所谓的 ATR (张力调节器) 调节。典型的 ATR 调节公式如下:

$$n_t = \left[K_p + \frac{K_i}{T_{ii}} \right] (T_r - T_f) \quad (4)$$

式中, K_p , K_i 和 T_i 分别为 PI 调节器的比例增益、积分增益和积分时间常数。 T_i 根据张力计的设置而有所不同, 对于活套的 1[#] 小车和 3[#] 小车, 由于直接设置了张力计, T_i 即为张力计的实测值, 无需考虑带钢的厚度、摩擦力、弯曲损失以及小车的重量等对控制系统的影响; 而对于 2[#] 小车, 由于没有设置张力计, T_i 为根据卷扬电动机力矩电流折算出的张力值:

$$T_i = \frac{2\xi_\phi \eta G_f}{D} \cdot I_t \quad (5)$$

式中, ξ_ϕ 为转矩常数, $N \cdot m$; η 为效率, %; I_t 为卷扬电动机为建立张力而输出的力矩电流, A, 它与总的力矩电流 I_0 关系如下:

$$I_t = I_0 - I_m - I_a - I_w \quad (6)$$

式中, I_m 为机械损耗补偿电流; I_a 为惯量补偿电流; I_w 为重量补偿电流, 将在后续章节中详细说明。为了保证系统的稳定性, 张力调节器输出的 n_t 绝对值一般限制在 n_{e0} 的 10% 以内。

2.3 活套小车同步调节转速补偿 n_p

活套小车同步控制是配置 2 台及 2 台以上小车的活套特有的控制环节, 单小车活套不必考虑。本入口活套设计有 3 台活套小车, 每 1 台活套小车都有 1 个独立的卷扬电动机控制活套的位置, 由于各卷扬电动机响应速度不同, 或辅助辊面摩擦系数不同, 可能导致 3 台活套小车存在位置差。这个位置差对于控制具有负面影响, 不仅干扰空套、满套等逻辑的正常产生, 而且增加了位置调节和张力的难度, 因此设计了同步调节器消除这个位置差。同步调节是有差调节, 即位置存在偏差时调节器输出控制量, 而位置偏差为 0 时调节器输出也为 0, 所以采用比例调节器。活套小车的实际位置 P_i 与各小车位置的平均值 $\bar{P}$ 进行比较, 差值经比例调节器调节后作为转速附加补偿值 n_p , 即:

$$n_p = K_{pp} (P_i - \bar{P}) \quad (7)$$

式中, K_{pp} 为比例调节器的增益。同样为了保证系统的稳定性, 位置调节器输出的 n_p 绝对值一般也限制在 n_{e0} 的 10% 以内。

3 卷扬电动机的负荷补偿

卷扬电动机在运转过程中, 除了要输出控制带钢张力的力矩外, 还必须克服摩擦力引起的机械损耗、惯量引起的加减速损耗以及带钢和小车重量引起的重量损耗。为了提高张力控制分量的

精度, 改善加、减速过程中的动态性能, 需要逐一计算这些损耗的大小, 然后通过传动装置的负荷补偿端口, 与 ASR 的输出取和后, 作为 ACR (速度调节器) 的给定。

3.1 机械损耗补偿电流 I_m

机械损耗补偿电流与机构的运转速度有关, 而与加减速无关, 一般是通过单机试车阶段对试车数据进行分析计算得出的。例如, 在空载情况下, 以从低到高均匀分布的 10 种速度提升活套机构, 测得每种稳态速度下的力矩电流输出, 然后利用一元函数线性回归的数学方法^[1]求得机械损耗补偿 I_m :

$$I_m = \beta_0 + \beta_1 V \quad (8)$$

式中, β_0 为回归函数常量; β_1 回归函数速度变动系数; V 为活套速度, m/s 。具体实现手段上, 可以直接通过式 (8) 计算, 也可以通过定义 I_m-V 二维表查表求取。

3.2 惯量补偿电流 I_a

惯量补偿电流与机构的转动惯量和加减速率有关, 可以通过实验测定和理论计算两种方法求取。实验测定同样是在单机试车时进行, 首先令活套以 10% 的速度匀速提升, 然后将速度提高到 20%, 记录动态过程中的速度曲线和力矩曲线, 通过对曲线斜率和幅值进行分析, 就可以得到惯量补偿电流^[2]。理论计算的基础是电动机的电磁转矩公式 $M_d = C_M \phi \cdot I_t$ (C_M 为电动机转矩常数; ϕ 为磁通, Wb ; I_t 为转矩电流, A) 和转矩定律 $M_z = J \cdot d\omega/dt$ (J 为旋转机构的转动惯量, $kg \cdot m^2$; $d\omega/dt$ 为旋转机构的角加速度, rad/s^2), 消去中间变量, 并用已知的工程参数替代原公式参数, 可得:

$$I_a = \frac{2}{\xi_\phi} \cdot \frac{G_f}{\eta} \cdot \frac{J}{D} \cdot \frac{dv}{dt} \quad (9)$$

式中, J 为卷扬机构转动惯量, $kg \cdot m^2$, 机械机构设计完后即确定; dv/dt 为活套小车加速度, m/s^2 , 程序中计算方法为: 本次采样的速度值与上次采样的速度值的差值, 除以两次采样的时间间隔。

3.3 重量补偿电流 I_w

活套小车是垂直运动的, 因此要考虑小车自重对卷扬电动机负荷的影响。立式活套用配重块来减轻小车的重量, 一般情况下小车比配重块重 10% 左右^[3], 下面所指的小车重量就是小车重量与配重块的差。除了小车重量, 还要考虑带钢重量。对于一般的辊类传动而言, 带钢按水平方向

行进,或者以低高度、单股数垂直方向行进,可以忽略带钢重量的影响。但对于立式活套而言,高度往往大于 20 m,股数往往多于 20 股,带钢重量很大,就必须加以考虑,否则在高套位时由于力矩主要消耗在带重上而导致张力大幅降低而松弛。要考虑的带钢包括各辅助辊之间的带钢以及包覆在辊面上的带钢,即需要补偿的重量 W 为:

$$W = W_C + W_{S1} + W_{S2} \tag{10}$$

式中, W_C 为小车重量, N , 由机械设计决定; W_{S1} 为辊间带钢重量, N ; W_{S2} 为辊面带钢重量, N 。 W_{S1} 和 W_{S2} 可分别计算如下:

$$W_{S1} = \rho S L_1 g N \tag{11}$$

$$W_{S2} = \rho S L_2 g N \tag{12}$$

式中, ρ 为带钢比重, $7.8 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$; S 为带钢横截面积, m^2 ; L_1 为辊间带钢长度, 即活套高度, m ; L_2 为辊面带钢长度, m , 可以粗略地取辊子的半个周长, 或按几何关系精确计算; g 为重力加速度, 9.8 N/kg

知道了 W , 就可以方便地求得重量补偿电流 I_w :

$$I_w = W \cdot \frac{D}{2} \cdot \frac{1}{G_r} \cdot \frac{1}{\xi_\phi} \cdot \frac{1}{\eta} \tag{13}$$

4 控制的实现

活套卷扬控制采用典型的 PLC - 传动 - 电动机架构, 如图 3 所示。每台电动机都配有脉冲发生器, 提供速度闭环控制的反馈信号, 而安装在卷筒上的绝对值脉冲发生器提供各小车的实际位置信号 P_{f1} , P_{f2} 和 P_{f3} 。传动装置采用日立公司的 Hivectol-VS 系列矢量变频器, 双处理器结构提高了系统的响应速度和控制精度, 内置的垂度控制 (Droop) 环节大大简化了各传动单元之间负荷的平衡控制。变频器与 PLC 之间的通信采用日立公司的远程 I/O 协议, 接收来自 PLC 的速度给定、负荷补偿以及命令字, 并将实际速度、负荷以及状态发送回 PLC。PLC 采用的是日立公司 20 世纪 90 年代的 HFX 系列产品, 使用日立公司独有的 MFC 语言编程。连续退火机组共配置 3 台 PLC 设备, 分别控制入口段、工艺段和出口段, 每台 PLC 包含 1 块 CPU 卡以及 2~4 块 HPU 卡, CPU 主要用来管理 PLC 框架、协调各卡件功能以及外部通信, 而 HPU 具体实现机组的工艺控制、速度控制和逻辑控制, 各 PLC 设备之间通过 $\mu\Sigma$ Network 网络进行通信。入口活套控制由炉子段 PLC 实现, 通过远程 I/O 读取变频器以及其它现场设备的状

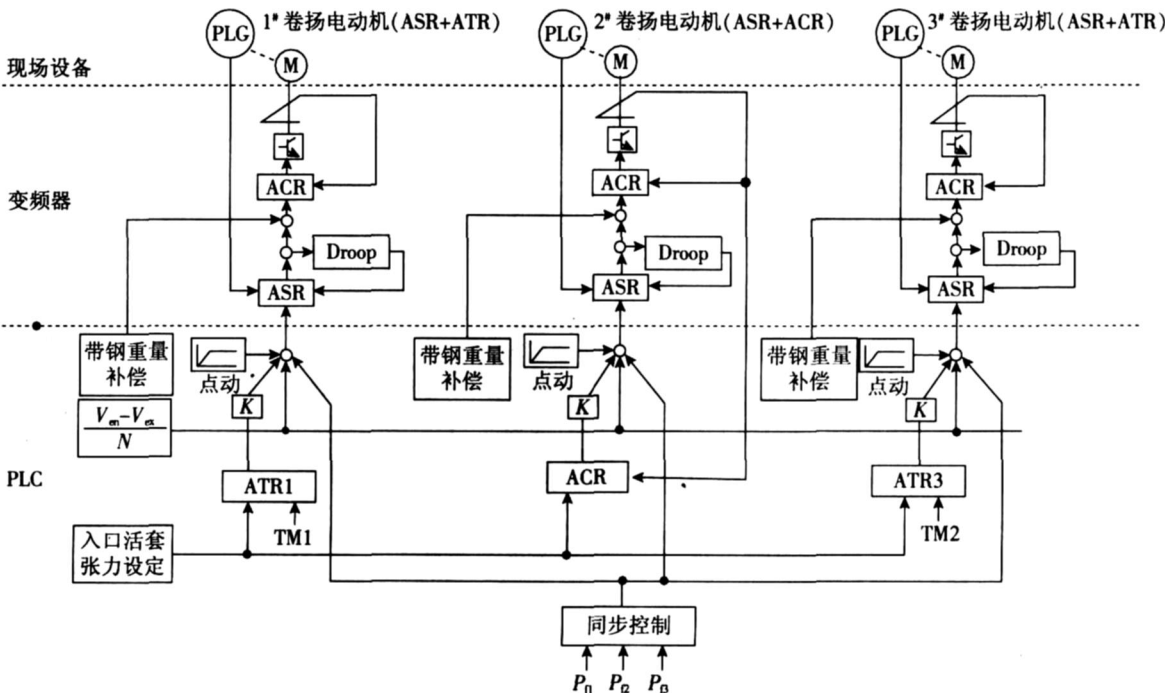


图 3 活套控制方案

Fig. 3 Schedule of looper control

PLG—脉冲发生器; M—电动机; ASR—速度调节器; ACR—电流调节器; ATR—张力调节器; K—张力调节器输出增益; Droop—垂度控制; TM—张力计

(下转第 52 页)

数据信息错误 (如其值不在正常值范围内), 或者没有炉号, 则系统会采纳默认值 (正常范围以内的值, 并提示可以进行人工输入)。当有新的计划下达时, 就会进行新一轮的校验, 这样就避免了错误数据的传送。这样做的优点是: (1) 采用一体化组合定位器, 在每一个需要定位的工位, 如转炉, 出钢线等, 加坐标定位标识模块 (行列式面定位方式), 自动跟踪天车, 判断物料种类; (2) 根据工艺流程, 自动进行数据统计; (3) 多部天车, 单计算机管理; (4) 无线通信, 网络布局灵活; (5) CDMA 通信方式, 节省频率资源; (6) 时效性高; (7) 数据传输精确。

在采用了天车物流跟踪系统后, 数据传送的准确率大大提高, 差错率由以前的 2.0% 下降到了 0.1% 以下, 为转炉智能炼钢的实现打下了坚实的基础, 并且大大降低了原材料的浪费。

4 结束语

自从 2008 年 6 月莱钢 120 t 转炉投入智能控制后, 最大的意义在于提高了终点双命中率, 使得补吹率大大降低, 提高了生产节奏, 冶炼周期平均

缩短了 2 min, 冷却剂加入量平均每炉钢减少 600 kg 以上, 脱氧剂的加入量平均每炉钢节省 20 kg 以上, 钢水质量也有了大幅度提高,

在今后的研究工作中, 需要对转炉炼钢的动态模型进行进一步的训练与优化, 进一步提高各个子系统的控制水平, 不断完善一级系统以及现场设备, 进一步优化整个转炉区域的协调作业能力, 以期提高炼钢终点控制精度, 达到更高的自动控制水平。莱钢在 120 t 转炉上实现的基于副枪的智能控制, 对国内同等级别的转炉具有很好的借鉴作用。

参考文献:

- [1] 龙英, 潘恒. 基于全集成自动化平台的转炉控制系统 [J]. 冶金自动化, 2007, 31 (1): 58-60.
LONG Ying, PAN Heng BOF control system based on TIA platform [J]. Metallurgical Industry Automation, 2007, 31 (1): 58-60.
- [2] 高卫立. 静、动态炼钢模型在济钢 120 t 转炉上的研究和应用 [J]. 冶金自动化, 2007, 31 (2): 68.

[编辑:魏方]

(上接第 43 页)

态, 并通过 $\mu\Sigma$ Network 网络获取入口段 PLC 中速度等信息, 实现位置调节、张力调节、同步调节和逻辑控制等所有功能的计算, 并将计算出的速度给定和负荷补偿等数据发送给变频器以实现控制。

5 应用效果

本连续退火机组的入口活套在采用位置调节、张力调节、同步调节以及精确的负荷补偿控制后, 位置精度达到 0.01%, 动态过程中张力波动控制在 10% 以内, 满足了薄板高速稳定生产的需要, 为其它大型活套的设计提供了典范。当然, 活套是机、电设备的综合体, 如果辅助辊摩擦系数下降而引起带钢打滑, 将直接影响到控制的品质和运行的稳定, 因此保证辊面粗糙度十分重要。另外, 活套入、出口速度或自身速度的变化, 必然会导致张力和位置的变化, 即式 (1) 中 n_t 和 n_p 的变化, 假设某种工况下, 张力控制输出结果 n_t 是某个正值,

位置控制输出结果 n_p 是某个负值, 则两种控制环节的输出值相互抵消, 系统无法对张力偏差和位置偏差进行调节, 这样增加了活套工作状态的不稳定性, 因此如何通过先进的控制算法克服这一缺陷, 是目前工业控制领域研究的一个方向。

参考文献:

- [1] 同济大学应用数学系. 工程数学 (下册) [M]. 上海: 同济大学出版社, 2002: 99-114.
- [2] 李东江, 黄正芳, 王劲, 等. 宝钢 1420 电镀锡机组中央段张力控制分析及改进 [J]. 宝钢技术, 2004 (3): 22-27.
LI Dong-jiang, HUANG Zheng-fang, WANG Jin, et al. Tension control analysis and improvement at central section of 1420 electrolyte tinning line [J]. Baosteel Technology, 2004 (3): 22-27.
- [3] 张晓伟, 董伟明. 宝钢 1550 连续热镀锌机组入口活套设计计算 [J]. 一重技术, 2002 (4): 4-5.

[编辑:沈黎颖]

本刊 启事

本刊已加入《中国学术期刊 (光盘版)》, “中国期刊网”, “万方数据系统科技期刊群”, “中国工控网”, “中文科技期刊”和“中文电子期刊服务”等数据库。本刊付给论文作者的稿酬中, 已包含《中国学术期刊 (光盘版)》的稿酬。对于进入因特网的论文, 本刊不收取上网费用, 也不另付稿酬。如作者不同意将文章纳入上述数据库, 请来函声明, 本刊将做适当处理。