



文献标识码: B 文章编号: 1003-0492(2013)06-0082-04 中图分类号: TG335

冷轧连退机组光整机张力波动的解析

Analysis on the Tension Fluctuation of Skin Pass Mill in CAL of Cold Rolling Mill

李洁, 庄严, 孙燕京, 张国强 (北京首钢自动化信息技术有限公司, 北京 100041)

摘要: 光整机是连续退火机组中使带钢发生变形的工艺设备。与常规轧制不同, 光整机轧制是一种小形变量的轧制, 其控制精度直接影响带钢产品质量和深加工性能。本文以首钢冷轧连续退火机组中光整机的张力波动造成带钢产品质量下降为背景, 从光整机的控制模式出发, 研究了光整机张力控制的原理, 分析了光整机张力波动大的原因, 对相关功能进行了排查和整定, 并对张力控制参数进行了优化, 从而解决了光整机张力波动大的问题, 保障了生产的顺利进行。

关键词: 光整机; 延伸率; 张力波动

Abstract: Skin pass mill (SPM) is the process equipment to make strip reformatting in continuous annealing line (CAL). SPM rolling is different from the normal rolling. SPM rolling is a kind of small deformation of rolling. The control precision of SPM directly influences product quality and processing property of strip. In this paper, a decline in the quality of products is caused by the tension fluctuation of SPM in CAL of Shougang cold rolling mill. Taking this as the background, this paper explains the control mode of SPM, researches the principle of tension control system, analyses the reason of the tension fluctuation, inspects and adjusts the related functions, optimizes the tension control parameters, and solves the problem of tension fluctuation for SPM, so as to ensure the smooth production.

Key words: Skin pass mill; Elongation control; Tension fluctuation

首钢冷轧某连退机组是以生产汽车板为主要产品的现代化生产线, 光整机作为生产线的重要设备, 其主要目的是为了高带钢表面光洁度和板型质量, 消除带钢的屈服点^[1]。延伸率是光整机控制的主要对象, 带钢延伸率的变化取决于轧制力和张力的共同作用, 因此, 实现高精度的张力控制, 不仅关系到生产线的稳定运行, 更是直接影响带钢产品质量的关键因素。汽车板表面缺陷主要来源于带钢表面的擦划伤, 而张力波动大正是导致这种擦

划伤的主要原因。

1 张力波动现象描述

该机组光整机区域的主要设备包括光整机入口张力辊、入口测张辊、6辊式光整机、出口测张辊和出口张力辊, 其工艺布置如图1所示。在光整机的入口侧和出口侧, 还装配了用于防止带钢横弯和抖动的防皱辊, 如图1所示。光整机区域的张力控制段分为光整机入口张力段和出口张力段, 在入口侧和出口侧的测张辊上装配有ABB张力计, 完成张力实际值检测, 以实现这两段张力的闭环控制。同时, 在入口和出口的测张辊上还分别装有编码器, 用于光整机延伸率的控制。

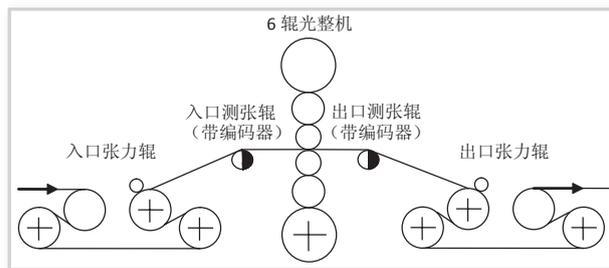


图1 光整机区域工艺布置图

在生产过程中, 由于光整机区域带钢张力波动较大, 使带钢延伸率控制出现不稳定现象, 严重时导致带钢表面形成了擦划伤, 影响了带钢产品质量和产量。光整机在恒速 (以线速度450m/min为例) 运行时, 光整机入口段张力控制精度为-7.17%~9.25%, 超出了工艺要求的静态张力控制精度 (±1.5%)。特别是光整机在升速 (线速度从60m/min到450m/min) 运行时, 光整机入口段张力控制精度为-15.01%~8.35%, 超出了工艺要求的动态张力控制精度 (±3%), 如图2所示。张力的控制精度定义如下:

$$\text{张力控制精度} (\%) = \frac{\text{张力实际值} (N) - \text{张力设定值} (N)}{\text{张力设定值} (N)} \times 100\%$$

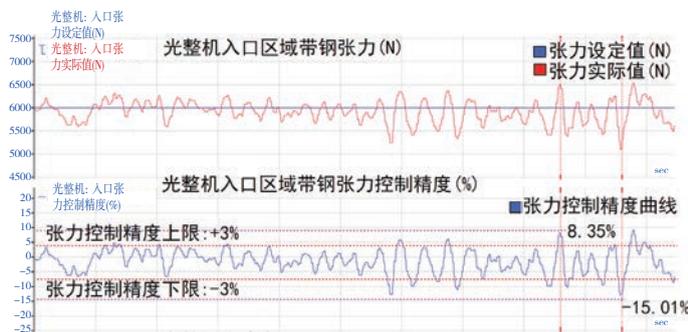
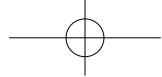


图2 光整机入口段带钢张力控制波形

2 光整机张力控制原理

基于光整机轧制是一个小压下量的轧制变形过程，通常采用恒延伸率的控制模式，来达到控制板型的目的。带钢延伸率的恒定控制是通过调节轧制力和光整机入口段及出口段张力来实现的。根据该连续退火机组产品规格特性，光整机采用的是保持张力恒定调节轧制力的延伸率控制方法。

保持张力恒定是通过基于速度的张力控制方式实现的，但光整机有别于连退线上其它的张力设备，通过光整机的带钢具有延展性，并且轧制力的变化会引起光整机入口段张力和出口段张力的变化，因此，在光整机张力控制系统中，不仅要考虑光整机出入口段的张力变化，还要考虑带钢延展的变化。

2.1 张力偏差的速度补偿

基于速度的张力控制原理就是将张力设定值与实际值的偏差通过张力调节器调节后，作为速度调节器的一个附加速度给定，送给相邻两个带有带钢的传动组的一个，使之产生速度差，通过这速度差的变化来保持这两点间带钢张力的稳定。张力调节器的任务就是消除张力偏差，因此，选用PI调节器为张力调节器，PI调节器由PLC编程实现，其内部的运算模型如式(1)所示：

$$V_{out} = \Delta T \times K_p + \Delta T \times T_n \int T_{scan} dt \quad (1)$$

其中： V_{out} 为张力调节器的输出； ΔT 为张力设定值与张力实际值的差值； K_p 为调节器比例增益； T_n 为调节器积分增益； T_{scan} 为PLC扫描时间。

张力计实时地将张力实际值反馈到PLC控制系统中，与张力设定值进行比较。它们的差值信号 ΔT 输入到张力调节器中。张力调节器按照PLC的扫描周期，对 $\Delta T \times T_n \times T_{scan}$ 进行累加，然后，加上 $\Delta T \times K_p$ ，送给张力调节器的输出 V_{out} 。 V_{out} 作为张力偏差产生的工艺速度补偿值 VT ，与光整机的工艺速度设定值 VL 之和作为光整机的速度设定值，通过速度的变化实现带钢的张力调节。

2.2 光整机延伸率预控制的速度补偿

带钢通过光整机后，带钢产生延伸，如果出口段带钢的速度仍与入口带钢速度一致，出口段带钢就会出现松弛、塌钢、失张、褶皱等问题，将无法保证生产的正常运行。因此，在基于速度的张力控制系统中要考虑延伸率的因素。

由于光整机在轧制时压下量很小，使用测厚仪几乎测不到光整机出口和入口侧的带钢厚度偏差，因此，用光整机出口带钢长度和进口带钢长度之间的关系来定义延伸率。即

$$E = \frac{L_{ex} - L_{en}}{L_{en}} \times 100\% \quad (2)$$

式中： E 为带钢延伸率， L_{en} (L_{ex})为光整机入(出)口带钢长度。

根据金属秒流量相等原理(或体积不变定律)，可知流量方程关系式为：

$$Q_m = W_{en} \times H_{en} \times L_{en} = W_{ex} \times H_{ex} \times L_{ex} \quad (3)$$

$$\text{即 } Q_m = W_{en} \times H_{en} \times V_{en} = W_{ex} \times H_{ex} \times V_{ex} \quad (4)$$

式中： W_{en} (W_{ex})为光整机入(出)口带钢宽度； H_{en} (H_{ex})为光整机入(出)口带钢厚度； V_{en} (V_{ex})为光整机入(出)口带钢速度； Q_m 为金属秒流量。

由于带钢在平整前后的宽度和厚度变化甚微，忽略不计，可导出：

$$\frac{V_{en}}{V_{ex}} = \frac{L_{en}}{L_{ex}} \quad (5)$$

由(2)式可得：

$$L_{ex} = L_{en} \times (1 + E) \quad (6)$$

由公式(5)和公式(6)可得：

$$V_{ex} = V_{en} \times (1 + E) = V_{en} + V_{en} \times E \quad (7)$$

从公式(7)中可以看出，光整机的出口速度等于光整机的入口速度与带钢延伸率产生的速度之和。因此，在张力控制系统中，只要预先将延伸率设定值转换成光整机和出口张力辊速度调节器的一个附加速度给定值，通过速度的增加就可弥补因带钢延伸引起的带钢张力变化，从而也可达到控制延伸率的目的。

2.3 光整机的张力控制

由于光整机具有轧制功能，在轧制速度不变时，轧制力增加，入口侧的张力变小；轧制力减小，入口侧的张力变大；而出口侧有带钢延伸率的影响。因此，对于光整机的张力控制，其入口段和出口段是不同的。如图3所示。

T^*_{en} 是光整机入口张力设定值； T^*_{ex} 是光整机出口张力设定值； T_{en} 是光整机入口张力实际值； T_{ex} 是光整机出口张力实际值； E^* 是延伸率设定值； VE 是由延伸率产生的工艺速度补偿值； VT 是由张力偏差产生的工艺速度补偿值； VL 是工艺速度设定值。

(1) 光整机入口段张力控制

由于光整机轧制力的变化会引起光整机入口侧和出口侧张力的变化，因此入口侧带钢张力控制要考虑光整机出入口张力的变化。光整机出口张力设定值 T^*_{ex} 与入口张力设定值 T^*_{en} 之差，经过斜坡发生器后作为光整机入口张力设定值 T_{set} ；光整机出口张力实际值 T_{ex} 与入口张力实际值 T_{en} 之差，经过斜坡发生器后作为光整机入口张力实际值 T_{act} ；入口张力设定值 T_{set} 与入口张

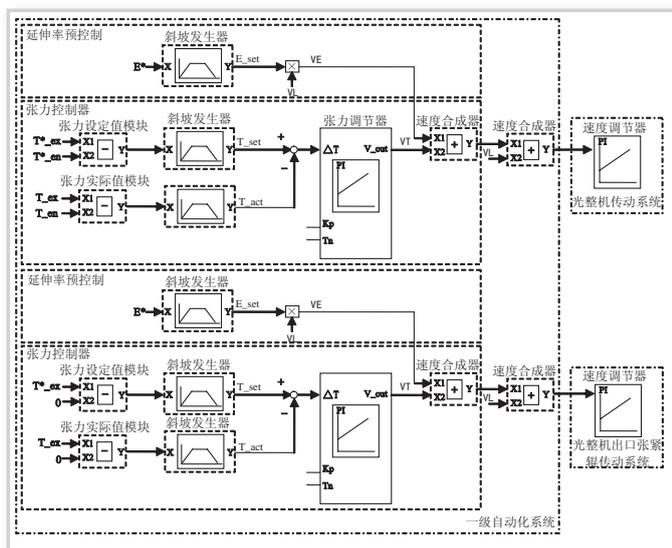


图3 光整机张力控制原理图

力实际值 T_{act} 的偏差传递给张力调节器进行调节控制,其输出值为张力偏差产生的工艺速度补偿值 VT 。在延伸率预控制中,延伸率设定值 E 经过斜坡发生器后,作为光整机延伸率设定值 E_{set} ,与工艺速度设定值 VL 乘积作为由延伸率偏差产生的工艺速度补偿值 VE (延伸率控制预设值)。 VT 与 VE 叠加后,与工艺速度设定值 VL 一起作用到光整机传动系统的速度调节器上。因此,光整机入口段带钢张力是通过控制光整机的速度来实现的。

(2) 光整机出口段张力控制

光整机出口张力设定值 T^*_{ex} ,经过斜坡发生器后作为光整机出口张力设定值 T_{set} ;光整机出口张力实际值 T_{ex} ,经过斜坡发生器后作为光整机出口张力实际值 T_{act} ;出口张力设定值 T_{set} 与出口张力实际值 T_{act} 的偏差传递给张力调节器进行调节控制,其输出值为张力偏差产生的工艺速度补偿值 VT 。在延伸率预控制中,延伸率设定值 E 经过斜坡发生器后,作为光整机延伸率设定值 E_{set} ,并与工艺速度设定值 VL 乘积作为由延伸率偏差产生的工艺速度补偿值 VE (延伸率控制预设值)。 VT 与 VE 叠加后,与工艺速度设定值 VL 一起作用到光整机出口张力辊传动系统的速度调节器上。因此,光整机出口段带钢张力是通过控制出口张力辊的速度来实现的。

3 光整机张力波动的分析及优化

从上述张力控制原理中可以看出,张力实际值、轧制力、调节器的调整参数等都可能造成张力的波动。因此,要解决张力波动问题就要从反馈回路和控制系统参数的优化入手。

3.1 反馈回路的标定和调整

(1) 延伸率反馈环节的标定和调整

轧制力是影响光整机张力的一个关键因素,而延伸率设定值与延伸率实际值的偏差是轧制力控制环节的一个附加给定,如果实际延伸率出现问题,势必造成轧制力的不稳定,轧制力的不稳定将引起光整区张力的波动。

从公式(2)可知,光整机区域的延伸率是由光整机出口和入口的带钢长度来决定的。带钢实际长度由安装在光整机出口和入口测张辊上的编码器记数而得,编码器发出的脉冲数由PLC的高速计数器模块读出。因此,可以通过测张辊编码器计算出实际延伸率:

$$E = \frac{L_{ex} - L_{en}}{L_{en}} = \frac{L_{ex}}{L_{en}} - 1 \quad (8)$$

$$L_{en} = \frac{N_{en} \times \pi \times D_{en}}{C_{en}} \quad L_{ex} = \frac{N_{ex} \times \pi \times D_{ex}}{C_{ex}} \quad (9)$$

式中: N_{en} (N_{ex})为光整机入(出)口编码器脉冲数; D_{en} (D_{ex})为光整机入(出)口测张辊直径; C_{en} (C_{ex})为光整机入(出)口编码器每周脉冲数。

由公式(8)和公式(9)可得:

$$E = \left(\frac{N_{ex} \times \pi \times D_{ex}}{C_{ex}} / \frac{N_{en} \times \pi \times D_{en}}{C_{en}} - 1 \right) \times 100\% \quad (10)$$

已知光整机入口和出口测张辊直径相等(忽略辊子磨损,即: $D_{en} = D_{ex}$),且入口和出口编码器一周脉冲数相等(即: $C_{en} = C_{ex}$),则由公式(10)可得延伸率为:

$$E = \left(\frac{N_{ex}}{N_{en}} - 1 \right) \times 100\% \quad (11)$$

由上式(11)就可计算出实际的延伸率。如果编码器发生故障,则实际延伸率的计算就会出现错误。因此,要对编码器及其信号接收回路进行检查,核实发出的脉冲信号是否正确,排除外界干扰源。在PLC中重新检查标定带钢行走单位长度所对应的脉冲数,保证带钢长度计算的准确性。

(2) 张力反馈环节的标定和调整

张力计是用来测量带钢张力实际值,构成带钢张力闭环控制的重要元件,是张力稳定的关键因素。因此,要特别注意对张力计检查,包括:量程标定和接线检查,清除压头处的淤泥等,必要时重新更换压头。停机时从PDA检测张力计输出是否稳定。由于张力计反馈信号有毛刺,通过反复测试将张力计反馈滤波时间从15ms调至75ms,实际生产证明此值即满足了反馈的跟随性,也避免了反馈信号的波动。

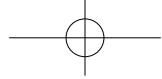
反馈回路检查完成后,大量的PDA数据显示,张力波动有明显改善,在匀速稳态的情况下,光整机入口段和出口段张力控制精度基本上小于 $\pm 1\%$,满足工艺要求的静态张力控制精度($\pm 1.5\%$)。在光整机升降速的过程中,出口张力波动小,满足工艺要求的动态张力控制精度($\pm 3\%$)。而入口张力波动大,张力控制精度为 $\pm 5\%$ 左右,尚不能满足工艺要求的动态张力控制精度。

3.2 入口段张力控制器的优化

入口段的动态张力控制精度与光整机的转动惯量和入口段张力调节器的调节参数有关,因此,主要从这两个方面对光整机的动态张力控制精度进行优化。

(1) 转动惯量标定

光整机转动惯量补偿控制是对光整机在升降速时的转矩补偿,从而克服因传动设备转动惯量而带来的张力扰动。转动惯量



补偿力矩直接叠加到光整机转矩调节器的附加转矩设定接口上，实现光整机的转动惯量补偿控制。

$$M_{\text{惯量}} = J * (d\omega / dt) = J * a \quad (12)$$

公式中， $M_{\text{惯量}}$ 为转动惯量转矩； J 为转动惯量； ω 为角速度； t 为时间， a 为角加速度。

在光整机转动惯量检测和标定过程中，PLC发送角加速度 ω 到光整机的传动控制装置，在升降速过程中，标定传动系统的转动惯量，使得光整机的传动系统速度调节器的积分分量输出的变化量保持在一个很小的波动范围之内。

(2) 入口张力调节器的参数优化

张力PI调节器中的增益参数 K_p 和积分参数 T_n 是保证带钢张力能够精确稳定调节的重要调节参数。当增大 K_p 或减小 T_n 时，可以加快张力调节器的调节速度，但可能导致超调甚至震荡；当减小 K_p 或增大 T_n 时，可以使张力调节器稳定，但可能导致跟随性差。因此，要使张力调节器快速、稳定，减小张力波动，需要两个参数的配合调整。通常 K_p 和 T_n 是在调试中得来的，其值为固定值。

在该连退机组光整机张力控制中，通过数据分析可以看出增益参数 K_p 和积分参数 T_n 比较适合光整机在稳速运行时的张力调节，张力控制精度满足工艺要求。而在光整机的升降速过程中，张力控制精度就不能令人满意了。针对这种情况，进行了增益参数 K_p 和积分参数 T_n 的优化。在原有的张力PI调节器的基础上，建立了增益参数 K_p 和积分参数 T_n 的动态优化模块，将原有固定的增益参数 K_p 和积分参数 T_n 分别转换成与加速度 a 有函数关系的动态调整值 $K_p(a)$ 和 $T_n(a)$ 。采用动态优化模块后的张力PI调节器的运算模型由公式(1)变为：

$$V_{out} = \Delta T * K_p(a) + \Delta T * T_n(a) * \int T_{scandt} \quad (13)$$

其中 $Y(a)$ 函数曲线如图4所示。

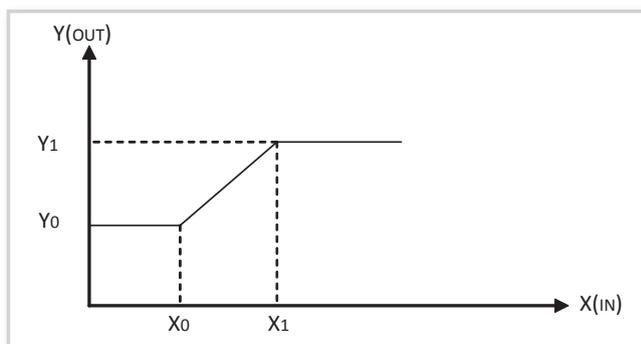


图4 动态 K_p 和 T_n 函数曲线

输入端 X 与输出端 Y 存在以下函数关系：

当 $X \leq X_0$ 时， $Y = Y_0$ ；

当 $X_0 < X < X_1$ 时， $Y = \frac{Y_1 - Y_0}{X_1 - X_0} * (X - X_0) + Y_0$ ；

当 $X \geq X_1$ 时， $Y = Y_1$ ；

X 取值为带钢的加速度，输出端 Y 为 K_p （或 T_n ）； Y_0 是与 X_0 对应的 K_p （或 T_n ）值， Y_1 是与 X_1 对应的 K_p （或 T_n ）值；通过优化，

对于 K_p 取值，当生产线稳定运行（即加速度 $X_0=0m/s^2$ ）时，调节器比例增益 $K_p = Y_0=0.00001$ ；当生产线处于加减速（即加速度 $X_1=0.5m/s^2$ ）时，调节器比例增益 $K_p = Y_1=0.000014$ ；对于 T_n 取值，当生产线稳定运行（即加速度 $X_0=0 m/s^2$ ）时，调节器积分增益 $T_n = Y_0=3.5$ ；当生产线处于加减速（即加速度 $X_1=0.5 m/s^2$ ）时，调节器积分增益 $T_n = Y_1=18.5$ 。光整机入口张力调节器采用动态的增益参数 K_p 和积分参数 T_n 之后，张力控制满足了光整机区域带钢的工艺要求。

4 张力控制系统优化后的实际效果

经过数据采集分析、检测设备检查和控制器参数优化后，光整机张力控制系统运行稳定，张力控制精度得到了明显的提升，满足了张力控制的工艺要求。优化后的光整机在恒速（以线速度450m/min为例）运行时，光整机入口区域带钢的张力控制精度为-0.92%~0.87%，满足了工艺要求的静态张力控制精度（±1.5%）。优化后的光整机升速（线速度从60m/min到450m/min）运行时，光整机入口区域带钢的张力控制精度为-1.53%~1.18%，满足了工艺要求的动态张力控制精度（±3%）。实际张力波形如图5所示。

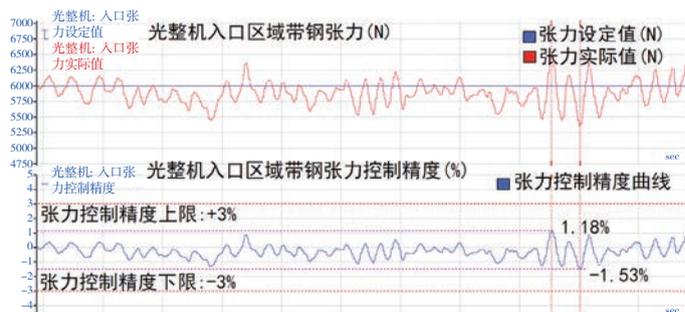


图5 优化后的光整机入口区域带钢张力控制波形

5 结语

针对首钢冷轧连退机组光整机区域带钢张力波动大，带钢表面出现擦划伤的问题，经过对光整机张力控制原理的研究，分析了光整机张力波动大的原因，对相关功能进行了标定和调整，避免了检测设备检测信号不准确对带钢张力的影响，并对张力控制参数进行了优化，解决了光整机张力波动大所造成的带钢表面擦划伤问题，为公司创造了很好的经济效益。

参考文献：

- [1] 孙一康. 冷轧生产自动化技术[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2008.
- [2] 唐谋凤. 现代带钢冷轧机的自动化[M]. 北京: 冶金工业出版社, 1995.
- [3] 孙一康. 带钢冷轧计算机控制[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2002.

作者简介

李洁 (1971-) 男，北京人，教授级高工，硕士，现任北京首钢自动化信息技术有限公司传动事业部部长助理兼设计室主任。长期从事传动和自动化控制设备的设计、开发和编程调试。