

(12) 发明专利

(10) 授权公告号 CN 101683659 B

(45) 授权公告日 2012. 05. 30

(21) 申请号 200810200733. 4

CN 1436613 A, 2003. 08. 20,

(22) 申请日 2008. 09. 28

CN 1397877 A, 2003. 02. 19,

US 5493885 A, 1996. 02. 27,

(73) 专利权人 宝山钢铁股份有限公司

审查员 于睿

地址 201900 上海市宝山区富锦路果园

(72) 发明人 顾廷权 何汝迎 唐成龙 陈培林

张永杰 李山青 李红梅 熊斐

王瑞庭

(74) 专利代理机构 上海科琪专利代理有限责任

公司 31117

代理人 郑明辉

(51) Int. Cl.

B21B 37/28 (2006. 01)

B21B 37/16 (2006. 01)

(56) 对比文件

CN 2579539 Y, 2003. 10. 15,

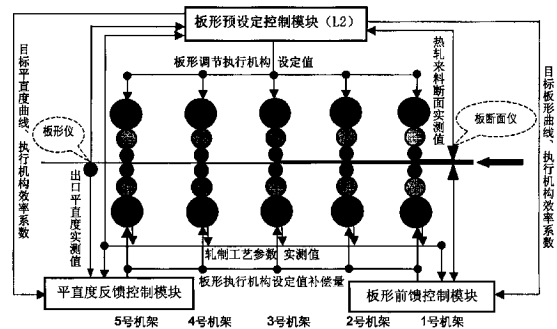
权利要求书 7 页 说明书 17 页 附图 6 页

(54) 发明名称

冷轧带钢平直度和横向厚差综合控制方法

(57) 摘要

本发明公开了一种冷轧带钢平直度和横向厚差综合控制方法,包括在冷轧机上游机架重点对带钢的断面形状进行适度控制,在下游机架重点对带钢平直度进行控制;基于在冷轧机1号机架入口配置的断面仪实测热轧来料断面形状、平直度,各个机架轧制工艺参数实测值,包括轧制力、板形调节机构实测值,和基于在冷轧机出口配置的板形仪实测冷轧带钢的平直度,以上游机架特别是1号机架为重点对带钢断面形状进行前馈控制,以下游机架特别是末机架为重点对带钢平直度进行反馈控制,实现对冷轧带钢平直度和横向厚差的综合控制。本发明通过带钢平直度和断面形状进行综合协调控制,实现在进一步提高冷轧带钢平直度质量基础上减小冷轧带钢横向厚差。



1. 一种冷轧带钢平直度和横向厚差综合控制方法,其特征是:包括在冷轧机上游机架重点对带钢的断面形状进行适度控制,在下游机架重点对带钢平直度进行控制;基于在冷轧机1号机架入口配置的断面仪实测热轧来料断面形状、平直度,各个机架轧制工艺参数实测值,包括轧制力、板形调节机构实测值,和基于在冷轧机出口配置的板形仪实测冷轧带钢的平直度,以上游机架1号机架为重点对带钢断面形状进行前馈控制,以下游机架末机架为重点对带钢平直度进行反馈控制,实现对冷轧带钢平直度和横向厚差的综合控制;具体技术措施是:

第一,板形预设控制,

板形调节机构预设值的确定,其输入数据为:轧机设备参数、热轧来料原始数据、轧制工艺参数、1号机架入口热轧来料断面形状和平直度实测值;

经板形控制执行机构预设生成模块运算后,输出数据为:各个机架板形调节机构的预设值、执行机构对出口板形影响系数、出口板形目标值;

第二,平直度反馈控制,

平直度反馈控制的技术要点包括:

(1) 用四次正交多项式拟合末机架平直度实测值与平直度目标值之间的差值,得到平直度偏差的一次、二次、三次以及四次分量,计算平直度实测值与多项式拟合值之间的偏差值,得到平直度偏差的高次分量;

(2) 基本平直度控制,改变末机架轧辊倾斜、工作辊弯辊力、中间辊弯辊力设定值大小,修正带钢宽度范围内平直度实测值与平直度目标值之间差值的一次、二次、三次以及四次分量;

(3) 精细冷却控制,确定末机架工作辊辊面分段冷却喷嘴流量,修正平直度偏差的高次分量;

(4) 边部板形控制,改变1号机架至末机架中间辊窜辊量设定值大小以及弯辊设定值大小,修正带钢边部浪形;

第三,板形前馈控制,

(1) 在1号机架对带钢凸度和楔形进行前馈控制:根据1号机架入口带钢整体凸度、中心凸度和楔形实测值及1号机架轧制工艺参数实测值,通过模型预测出1号机架出口整体凸度与目标整体凸度的偏差值、中心凸度与目标中心凸度的偏差值,确定1号机架弯辊设定值补偿量、轧辊倾斜设定值补偿量,使得本机架出口凸度偏差值最小、楔形值最小;

(2) 在1号机架至3号机架进行边缘降前馈控制:根据当前机架入口带钢边缘降实测值或预测值,以及本机架轧制工艺参数实测值,通过模型预测出本机架出口边缘降与目标边缘降的偏差值,确定本机架中间辊窜辊设定值的补偿量,使得本机架出口边缘降偏差值最小;

(3) 在2号机架至末机架进行平直度前馈控制:根据当前机架的入口带钢凸度、楔形实测值或预测计算值,以及本机架轧制工艺参数实测值,通过模型预测出本机架出口平直度与目标平直度的偏差值,确定本机架弯辊设定值补偿量、倾辊设定值补偿量,使得本机架出口平直度偏差值最小;

上述当前机架指当前跟踪控制的带钢断面位置到达的机架;

第四,板形前馈控制与平直度反馈控制之间的协调控制,

在各个机架上分别采用不同的板形调节机构控制输出策略,实现板形前馈控制与平直度反馈控制之间的协调控制:

(1) 取板形前馈控制周期大于或等于平直度反馈控制周期;

(2) 对于末机架,当平直度反馈控制输出的板形调节机构设定值补偿量与板形前馈控制输出的同一板形调节机构设定值补偿量符号相反时,将平直度前馈控制给出的板形调节机构设定值补偿量赋零,只将平直度反馈控制给出的板形调节机构设定值补偿量输出到该板形调节机构;当两者符号相同时,将平直度反馈控制给出的板形调节机构设定值补偿量与平直度前馈控制给出的板形调节机构设定值补偿量进行加权求和后输出到该板形调节机构;

(3) 对于 1 号机架,当平直度反馈控制给出的板形调节机构设定值补偿量与板形前馈控制给出的同一板形调节机构设定值补偿量符号相反时,将平直度反馈控制给出的板形调节机构设定值补偿量赋零,只将板形前馈控制给出的板形调节机构设定值补偿量输出到该板形调节机构;当两者符号相同时,将平直度反馈控制给出的板形调节机构设定值补偿量与板形前馈控制给出的板形调节机构设定值补偿量加权求和后输出到该板形调节机构;

(4) 对于 1 号机架和末机架以外的其它各个机架,将平直度反馈控制给出的板形调节机构设定值补偿量与板形前馈控制给出的板形调节机构设定值补偿量加权平均后输出到该板形调节机构。

2. 根据权利要求 1 所述的冷轧带钢平直度和横向厚差综合控制方法,其特征是:机架出口板形目标值即出口平直度目标值和凸度、边缘降目标值设定遵循以下方法:

(1) 1 号机架出口带钢凸度目标值小于或等于热轧来料凸度平均值,1 号至 3 号机架出口边缘降目标值递减且小于或等于热轧来料边缘降平均值;

(2) 上游机架带钢的厚度比较厚,上游机架出口平直度目标曲线设定为中浪,即带钢宽度方向上中间出口张应力较小而两边出口张应力较大,以有利于控制带钢边部减薄;

(3) 末机架以外的下游机架厚度比较薄,下游机架出口带钢的平直度目标曲线的设定为边浪,即中间出口张应力大两边出口张应力小,以有利于降低轧制过程中断带的发生几率;

(4) 末机架出口平直度目标曲线设定首先满足下游机架对冷轧带钢平直度的要求,其次,还要考虑补偿出口带钢平直度检测误差、带钢卷取过程中产生的附件卷取张应力、带钢冷却过程中产生的附加热应力,以确保离线后的冷轧带钢平直度良好。

3. 根据权利要求 1 所述的冷轧带钢平直度和横向厚差综合控制方法,其特征是:所述平直度反馈控制中的基本平直度控制过程为:

(1) 对末机架出口带钢平直度实测值与平直度目标值之间的偏差信号进行模式识别,用四次正交多项式将平直度偏差信号正交分解为一次分量、二次分量、三次分量和四次分量;

(2) 根据平直度偏差的一次分量 a_1 和三次分量 a_3 , 定义轧辊倾斜控制目标函数为:

$$G(\Delta F_1) = \beta \times [a_1 - K_{a_1 F_1} \times \Delta F_1]^2 + (1 - \beta) \times [a_3 - K_{a_3 F_1} \times \Delta F_1]^2 \quad 0 \leq \beta \leq 1.0$$

极小化倾辊控制目标函数 G , 得到末机架轧辊倾斜设定值补偿量 ΔF_1 ;

$$\text{Min. } G(\Delta F_1) \rightarrow \Delta F_1$$

式中：

β ——一次分量和三次分量权重系数

$K_{a_{1F_i}}$ 、 $K_{a_{3F_i}}$ ——轧辊倾斜量对平直度偏差一次分量、三次分量影响系数；

(3) 根据平直度偏差二次分量 a_2 和四次分量 a_4 ，定义弯辊控制目标函数为：

$$G'(\Delta F_w, \Delta F_i) = \beta' \times [a_2 - K_{a_{2F_w}} \times \Delta F_w - K_{a_{2F_i}} \times \Delta F_i]^2 + (1 - \beta') \times [a_4 - K_{a_{4F_w}} \times \Delta F_w - K_{a_{4F_i}} \times \Delta F_i]^2$$

$$0 \leq \beta' \leq 1.0$$

极小化弯辊控制目标函数 G' ，得到末机架工作辊弯辊设定值补偿量 ΔF_w 和中间辊弯辊设定值补偿量 ΔF_i ：

$$\text{Min. } G' (\Delta F_w, \Delta F_i) \rightarrow (\Delta F_w, \Delta F_i)$$

式中

β' ——平直度偏差二次分量和四次分量的权重系数

$K_{a_{2F_w}}$ 、 $K_{a_{4F_w}}$ ——工作辊弯辊力对平直度偏差二次分量、四次分量影响系数；

$K_{a_{2F_i}}$ 、 $K_{a_{4F_i}}$ ——中间辊弯辊力对平直度偏差二次分量、四次分量影响系数。

4. 根据权利要求 3 所述的冷轧带钢平直度和横向厚差综合控制方法，其特征是：所述平直度反馈控制中的工作辊精细冷却控制为：沿末机架工作辊身轴向布置若干个冷却液喷嘴，从平直度偏差 $\varepsilon(x)$ 中减去由上述轧辊倾斜设定值补偿量 ΔF_i 、工作辊弯辊设定值补偿量 ΔF_w 、中间辊弯辊设定值补偿量 ΔF_i 控制的一次至四次分量，得到剩余的高次分量 $\varepsilon'(x)$ ， $\varepsilon'(x)$ 如下式所示；根据第 i 冷却区段内延伸率偏差平均值 $\varepsilon'(x_i)$ 的大小，通过打开或关闭该区段所对应的喷嘴调节阀开关，调节喷射到工作辊辊面各区域的冷却液流量，

$$\varepsilon'(x) = \varepsilon(x) - \Delta F_i K_{a_{1F_i}} \phi_1 - (\Delta F_i K_{a_{2F_i}} + \Delta F_w K_{a_{2F_w}}) \phi_2 - \Delta F_i K_{a_{3F_i}} \phi_3 - (\Delta F_i K_{a_{4F_i}} + \Delta F_w K_{a_{4F_w}}) \phi_4$$

式中

ϕ_i ——平直度模式第 i 次基函数， $i = 1, 2, 3, 4$ 。

5. 根据权利要求 1 所述的冷轧带钢平直度和横向厚差综合控制方法，其特征是：所述平直度反馈控制中的边部板形控制为：末机架出口带钢边部板形偏差定义为

$$\Delta \varepsilon_{edg} = \varepsilon_{edg} - \varepsilon_{edg-1}$$

式中：

$\Delta \varepsilon_{edg}$ ——带钢边部板形偏差，

ε_{edg} ——从带钢边缘向带钢中部板形仪第 1 个有效测量通道的平直度实测值，

ε_{edg-1} ——从带钢边缘向带钢中部板形仪第 2 个有效测量通道的平直度实测值，

(1) 当 $\Delta \varepsilon_{edg} > a_u$ 时，末机架出口带钢边部起浪，末机架以外的各个机架工作辊弯辊和中间辊弯辊设定值补偿量取一给定值 a ，其中 a_u 为给定值， $a_u > 0$ ， $a < 0$ ；

(2) 当 $\Delta \varepsilon_{edg} < a_l$ 时，末机架出口带钢边部拉紧，末机架以外的各个机架工作辊弯辊和中间辊弯辊设定值补偿量取一给定值 b ，其中 a_l 为给定值， $a_l < 0$ ， $b > 0$ ；

(3) 当 $\Delta \varepsilon_{edg} > b_u$ 时，末机架出口带钢边部明显起浪，末机架以及各个机架中间辊向带钢边部内侧移动一定距离 c ，其中 $b_u > a_u > 0$ ， $c < 0$ ；

(4) 当 $\Delta \varepsilon_{edg} < b_1$ 时, 末机架出口带钢边部明显拉紧, 末机架以及各个机架中间辊向带钢边部外侧移动一定距离 d , 其中: $b_1 < a_1 < 0, d > 0$ 。

6. 根据权利要求 1 所述的冷轧带钢平直度和横向厚差综合控制方法, 其特征是: 所述板形前馈控制的主要流程为:

(1) 在冷轧机 1 号机架入口配置一台带钢断面形状检测仪, 实时检测热轧来料断面形状和平直度; 根据本机架入口热轧来料断面形状实测值计算得到入口带钢断面特征参数: 包括中心凸度、整体凸度、边缘降和楔形, 根据入口热轧来料平直度实测值计算得到入口带钢平直度的一次、二次和四次分量;

(2) 对于 1 号机架, 根据本机架入口带钢断面特征参数、平直度分量以及本机架轧制工艺参数实测值, 通过模型分别计算出本机架出口带钢断面特征参数预报值, 包括中心凸度、整体凸度、边缘降和楔形, 以及出口平直度预报值; 根据本机架出口整体凸度与整体凸度目标值之间的偏差、中心凸度预报值与中心凸度目标值之间的偏差, 确定本机架工作辊弯辊设定值补偿量、中间辊弯辊设定值补偿量, 使得本机架出口整体凸度、中心凸度偏差最小; 根据本机架出口边缘降预报值与边缘降目标值之间的偏差, 确定本机架中间辊窜辊设定值补偿量, 使得本机架出口边缘降偏差最小; 根据本机架出口楔形预报值, 确定本机架轧辊倾斜设定值补偿量, 使得本机架出口楔形最小;

(3) 对于 2 号和 3 号机架, 根据本机架入口即前一个机架出口带钢断面特征参数、平直度分量预报值以及本机架轧制工艺参数实测值, 通过模型分别计算出本机架出口带钢断面特征参数预报值, 包括中心凸度、整体凸度、边缘降和楔形, 以及出口平直度预报值; 根据本机架出口边缘降预报值与边缘降目标值之间的偏差, 确定本机架中间辊窜辊设定值补偿量, 使得本机架出口边缘降偏差最小; 根据本机架出口平直度预报值与平直度目标值之间的偏差, 确定本机架工作辊弯辊设定值补偿量、中间辊弯辊设定值补偿量以及轧辊倾斜设定值补偿量, 使得本机架出口平直度偏差最小;

(4) 对于 4 号机架至末机架, 根据本机架入口即前一个机架出口带钢断面特征参数、平直度分量预报值以及本机架轧制工艺参数实测值, 通过模型分别计算出本机架出口带钢断面特征参数预报值, 包括中心凸度、整体凸度、边缘降和楔形, 以及出口平直度预报值; 根据本机架出口平直度预报值与平直度目标值之间的偏差, 确定本机架工作辊弯辊设定值补偿量、中间辊弯辊设定值补偿量以及轧辊倾斜设定值补偿量, 使得本机架出口平直度偏差最小。

7. 根据权利要求 1 所述的冷轧带钢平直度和横向厚差综合控制方法, 其特征是: 所述板形前馈控制方法中, 各个机架出口带钢中心凸度 C_q 、整体凸度 C_e 、边缘降 E 和楔形 W_g 预报值计算公式为:

$$C_q = K_{CqP}P + K_{CqFw}F_w + K_{CqFi}F_i + K_{CqIr}I_r + K_{CqCq0}C_{q0} + b_{Cq}$$

$$C_e = K_{CeP}P + K_{CeFw}F_w + K_{CeFi}F_i + K_{CeIr}I_r + K_{CeCe0}C_{e0} + b_{Ce}$$

$$E = K_{eP}P + K_{eFw}F_w + K_{eFi}F_i + K_{eIr}I_r + K_{eE0}E_0 + a_e$$

$$W_g = K_{Wg Pwd} \Delta P + K_{Wg Wg0} W_{g0} + w$$

式中 K_{CqP} 、 K_{CqFw} 、 K_{CqFi} 、 K_{CqIr} 以及 K_{CqCq0} , 分别是本机架轧制力 P 、工作辊弯辊力 F_w 、中间辊弯辊力 F_i 、中间辊窜辊量 I_r 以及入口中心凸度 C_{q0} 对出口中心凸度 C_q 的影响系数, b_{Cq} 为出口中心凸度常数; K_{CeP} 、 K_{CeFw} 、 K_{CeFi} 、 K_{CeIr} 以及 K_{CeCe0} , 分别是本机架轧制力 P 、工作辊弯辊力 F_w 、

中间辊弯辊力 F_i 、中间辊窜辊量 I_r 以及入口整体凸度 C_{e0} 对出口整体凸度 C_e 的影响系数, b_{C_e} 为出口整体凸度常数; K_{eP} 、 K_{eF_w} 、 K_{eF_i} 、 K_{eI_r} 、 K_{eE_0} , 分别是轧制力 P 、工作辊弯辊力 F_w 、中间辊弯辊力 F_i 、中间辊窜辊量 I_r 及入口边缘降 E_0 对出口边缘降 E 的影响系数, a_e 为出口边缘降常数; $K_{W_g Pwd}$ 、 $K_{W_g W_{g0}}$ 分别是本机架操作侧轧制力与传动侧轧制力之间差值 ΔP 、入口来料楔形 W_{g0} 对出口楔形 W_g 的影响系数, w 为出口楔形常数。

8. 根据权利要求 1 所述的冷轧带钢平直度和横向厚差综合控制方法, 其特征是: 所述带钢板形前馈控制方法中, 各个机架出口带钢平直度预报值包括一次分量 F_1 、二次分量 F_e 和四次分量 F_q , 计算公式分别为:

$$F_1 = K_{f1Pwd} \Delta P + K_{f1W_g} W_{g0} + K_{f1F_{10}} F_{10} + a_{f1}$$

$$F_e = K_{feP} P + K_{feF_w} F_w + K_{feF_i} F_i + K_{feI_r} I_r + K_{feC_{e0}} C_{e0} + K_{feF_{e0}} F_{e0} + a_{fe}$$

$$F_q = K_{fqP} P + K_{fqF_w} F_w + K_{fqF_i} F_i + K_{fqI_r} I_r + K_{fqC_{q0}} C_{q0} + K_{fqF_{q0}} F_{q0} + a_{fq}$$

式中: K_{f1Pwd} 、 K_{f1W_g} 以及 $K_{f1F_{10}}$ 分别是本机架操作侧轧制力与传动侧轧制力之间差值 ΔP 、入口来料楔形 W_{g0} 以及入口来料平直度一次分量 F_{10} 对出口平直度一次分量 F_1 的影响系数, a_{f1} 为出口平直度一次分量常数; K_{feP} 、 K_{feF_w} 、 K_{feF_i} 、 $K_{feC_{e0}}$ 、 K_{feI_r} 以及 $K_{feF_{e0}}$, 分别是本机架轧制力 P 、工作辊弯辊力 F_w 、中间辊弯辊力 F_i 、中间辊窜辊量 I_r 、入口整体凸度 C_{e0} 以及入口平直度二次分量 F_{e0} 对出口平直度二次分量 F_e 的影响系数, a_{fe} 为出口平直度二次分量常数; K_{fqP} 、 K_{fqF_w} 、 K_{fqF_i} 、 $K_{fqC_{q0}}$ 、 K_{fqI_r} 以及 $K_{fqF_{q0}}$, 分别是本机架轧制力 P 、工作辊弯辊力 F_w 、中间辊弯辊力 F_i 、中间辊窜辊量 I_r 、入口中心凸度 C_{q0} 以及入口平直度四次分量 F_{q0} 对出口平直度四次分量 F_q 的影响系数, a_{fq} 为出口平直度四次分量常数。

9. 根据权利要求 6 所述的冷轧带钢平直度和横向厚差综合控制方法, 其特征是: 所述板形前馈控制方法中, 1 号机架凸度和楔形前馈控制模型为:

凸度前馈控制评价函数 J :

$$J(\Delta F_w, \Delta F_i) = \alpha \times [\Delta C_e - K_{ceF_w} \Delta F_w - K_{ceF_i} \Delta F_i]^2 + (1 - \alpha) \times [\Delta C_q - K_{cqF_w} \Delta F_w - K_{cqF_i} \Delta F_i]^2$$

$$0 \leq \alpha \leq 1.0$$

$$\Delta C_e = C_{e_ref} - C_e$$

$$\Delta C_q = C_{q_ref} - C_q$$

极小化凸度前馈控制目标函数 J , 得到最佳弯辊力设定值补偿量:

$$\text{Min. } J(\Delta F_w, \Delta F_i) \rightarrow [\Delta F_w, \Delta F_i]$$

式中

C_{e_ref} 、 C_{q_ref} ——1 号机架出口带钢整体凸度目标值、中心凸度目标值,

C_e 、 C_q ——1 号机架出口带钢整体凸度、中心凸度,

ΔC_e 、 ΔC_q ——1 号机架出口带钢整体凸度偏差值、中心凸度偏差值,

C_{e0} 、 C_{q0} ——1 号机架入口带钢整体凸度实测值、中心凸度实测值,

K_{ceF_w} 、 K_{ceF_i} 、 K_{cqF_w} 、 K_{cqF_i} ——分别是工作辊弯辊力对出口整体凸度影响系数、中间辊弯辊力对出口整体凸度影响系数、工作辊弯辊力对出口中心凸度影响系数、中间辊弯辊力对出口中心凸度影响系数,

α ——加权系数,

ΔF_w 、 ΔF_i ——工作辊弯辊力设定值补偿量、中间辊弯辊力设定值补偿量;

1 号机架轧辊倾斜设定值补偿量 ΔF_1 计算模型:

$$\Delta F_i = -(K_{wgPwd} \Delta P' + K_{wgWg0} Wg_0 + a_{wg}) / K_{wgFl}$$

式中

$\Delta P'$ ——传动侧轧制力实测值与操作侧轧制力实测值之间差值, Wg_0 ——入口来料楔形,

K_{wgPwd} 、 K_{wgWg0} 、 K_{wgFl} ——分别是传动侧轧制力实测值与操作侧轧制力实测值之间差值对出口楔形的影响系数、入口来料楔形对出口楔形的影响系数、轧辊倾斜量对出口楔形的影响系数, a_{wg} 为出口楔形常数。

10. 根据权利要求6所述的冷轧带钢平直度和横向厚差综合控制方法,其特征是:所述板形前馈控制方法中,1号至3号机架边缘降前馈控制模型为:

$$\Delta E_d = E_{d_ref} - E_d$$

$$\Delta E_w = E_{w_ref} - E_w$$

$$\Delta Ir_d = \Delta E_d / K_{eIr}$$

$$\Delta Ir_w = \Delta E_w / K_{eIr}$$

式中

ΔE_d 、 ΔE_w ——分别是出口带钢传动侧边缘降偏差值、操作侧边缘降偏差值,

E_d 、 E_w ——分别是出口带钢传动侧边缘降、操作侧边缘降预报值,

E_{d_ref} 、 E_{w_ref} ——分别是出口带钢传动侧目标值、操作侧边缘降目标值,

K_{eIr} ——中间辊窜辊对出口边缘降影响系数

ΔIr_d 、 ΔIr_w ——分别是中间辊传动侧窜动补偿量、操作侧窜动补偿量。

11. 根据权利要求6所述的冷轧带钢平直度和横向厚差综合控制方法,其特征是:所述板形前馈控制方法中,2号至末机架平直度前馈控制模型为:

平直度前馈控制评价函数为:

$$M(\Delta F_w, \Delta F_i) = \gamma \times [\Delta F_e - K_{FeFw} \Delta F_w - K_{FeFi} \Delta F_i]^2 + (1 - \gamma) \times [\Delta F_q - K_{FqFw} \Delta F_w - K_{FqFi} \Delta F_i]^2$$

$$0 \leq \gamma \leq 1.0$$

$$\Delta F_e = F_{e_ref} - F_e$$

$$\Delta F_q = F_{q_ref} - F_q$$

极小化评价函数M,得到最佳弯辊力设定值补偿量:

$$\text{Min. } M(\Delta F_w, \Delta F_i) \rightarrow [\Delta F_w, \Delta F_i]$$

式中

ΔF_e 、 ΔF_q ——分别是出口带钢平直度二次分量偏差值、平直度四次分量偏差值,

F_{e_ref} 、 F_{q_ref} ——分别是出口带钢平直度二次分量目标值、平直度四次分量目标值,

F_e 、 F_q ——分别是出口带钢平直度二次分量、平直度四次分量预报值,

K_{FeFw} 、 K_{FeFi} 、 K_{FqFw} 、 K_{FqFi} ——分别是工作辊弯辊力对出口平直度二次分量影响系数、中间辊弯辊力对出口平直度二次分量影响系数、工作辊弯辊力对出口平直度四次分量影响系数、中间辊弯辊力对出口平直度四次分量影响系数,

γ ——加权系数,

ΔF_w 、 ΔF_i ——分别是工作辊弯辊力设定值补偿量、中间辊弯辊力补偿量。

2号机架至末机架轧辊倾斜设定值补偿量 ΔF_1 计算模型:

$$\Delta F_l = -(K_{f1Pwd} \Delta P' + K_{f1Wg} Wg_0 + K_{f1F10} F_{10} + a_{f1}) / K_{f1F1}$$

式中

$\Delta P'$ ——传动侧轧制力实测值与操作侧轧制力实测值之间差值，

K_{f1Pwd} 、 K_{f1Wg} 、 K_{f1F10} 、 K_{f1F1} ——分别是传动侧轧制力与操作侧轧制力之差对出口平直度一次分量影响系数、入口来料楔形对出口平直度一次分量影响系数、入口来料平直度一次分量对出口平直度一次分量影响系数、轧辊倾斜量对出口平直度一次分量影响系数，

a_{f1} ——出口平直度一次分量常数。

冷轧带钢平直度和横向厚差综合控制方法

技术领域

[0001] 本发明涉及带钢的一种轧制方法,特别涉及在冷轧机上对带钢的平直度和横向厚差进行综合控制的方法。

[0002] 背景技术

[0003] 板带材的几何尺寸精度包括板厚精度即纵向厚差、平直度和横向厚差以及板宽等质量指标。带钢板形通常指平直度,由于平直度与横向厚差有着密切的内在联系,所以广义的带钢板形同时包括平直度和横向厚差,即板横断面形状,有凸度、边缘降以及楔形等表征指标。板厚控制和板形控制是板带轧制领域里的两项关键技术。纵向厚差的控制首先得到应用和发展,理论及技术上相对成熟。目前,采用计算机控制的厚度自动控制 AGC(Automatic Gage Control) 以及新出现的基于激光测速的物流自动厚度控制 (Mass Flow AGC) 系统等控制方式,已经比较成功地解决了纵向厚差的控制问题,基本上能够满足用户的要求。

[0004] 由于轧制过程中带钢边部区域的金属横向流动阻力较小、工作辊辊面弹性压扁跃变等因素,致使断面形状也即宽向厚度分布的变化呈现中部平缓,越靠近边部厚度减小越快的特点,即存在着一定的横向厚差,如图 1 所示。

[0005] 当前厚度自动控制 AGC 技术已经能够将冷轧带钢纵向厚度偏差稳定地控制在成品厚度 $\pm 1\%$ 左右(如 $\pm 5\mu\text{m}$ 甚至 $\pm 2\mu\text{m}$ 以内),而带钢横向厚差还停留在在 $10\mu\text{m}$ 甚至几十微米的水平。随着用户对冷轧带钢产品质量要求越来越高,除了目前对硅钢、造币钢等产品的边缘降已经有了比较严格的要求之外,下游用户对其它一些冷轧带钢产品(如主要用于冲压成型的汽车板、镀锡板等)横向厚差的要求也将越来越高。

[0006] 目前冷连轧最常见的以末道机架反馈控制为核心的板形自动控制系统的主要控制目标是冷连轧机出口带钢的平直度,对出口带钢的横向厚差大多无法控制或不控制。一般认为,冷轧时带钢比较薄,轧制变形区内金属横向流动很小,如果保持负载辊缝形状恒定不变的话,轧机入口带钢断面形状的变化几乎都将直接转化为出口带钢宽度方向上相对长度即平直度的改变,来料断面形状的微小改变将会引起出口平直度的显著变化。基于此,现有绝大多数冷连轧机的板形控制思想是,各个机架都严格按照等比例凸度原则控制负载辊缝以保证末机架出口带钢平直度。这样冷轧成品横向厚差基本上就是由热轧来料断面形状决定的,若热轧来料凸度比较大,相应地就会造成冷轧产品横向厚差偏大。

[0007] 实际上,在冷轧前道机架特别是 1 号机架,当带钢还比较厚时,轧制过程中仍然存在少量的金属横向流动,板断面形状的改变转化为纵向相对长度变化和横向宽展两个部分,一定限度内改变板断面形状(特别是边部形状调整)一般不会引起出口平直度的大幅度变化,故此时可以对带钢断面形状进行适度控制。实际检测结果显示:热轧带钢经过冷连轧之后比例凸度值有较大幅度的增加,说明冷轧过程中带钢断面形状是变化的,因此也是可以改变的。

[0008] 一般来说,当轧机负载辊缝形状与入口带钢横断面形状呈等比例相似时,出口带钢平直度良好;否则,出口带钢将有板形缺陷(如中浪、边浪等)。冷连轧机组入口热轧来

料断面形状（如凸度和楔形等指标）沿带钢长度方向的变化，是冷轧轧机出口板形的一个直接扰动，对冷轧带钢平直度影响很大。热轧来料带钢的断面形状沿长度方向往往存在波动，特别是带头带尾比较大，由于冷轧入口没有相应的检测手段，仅依靠操作人员凭观察和经验手动调节负载辊缝形状，显然难以响应断面形状的快速变化，需要末机架平直度闭环控制环节来调节的负荷大幅度增加，常常超出其调节能力范围，是造成冷轧带钢平直度超差的主要原因之一。

[0009] 在传统的平直度反馈控制系统基础上，采用平直度前馈控制技术，可以在末机架出口板形仪检测到平直度缺陷之前，及时修正来料断面变化对上游机架出口平直度的扰动。文献报道的平直度反馈控制加前馈控制技术有以下两种类型：

[0010] (1) 末机架平直度反馈控制加 1 号机架平直度前馈控制。阿塞诺 EKO 厂和 BFI 共同开发了新的平直度协调控制系统，并为此定制开发了专用的带钢断面形状检测仪。新系统提供了所有机架的平直度控制策略，即组合前 3 个机架中的前馈控制和末机架中的预测反馈控制，参见图 2。该项目中开发的控制系统主要由四个部分组成：

[0011] 1) 在 1 号机架前馈补偿来料带钢横断面变化对该机架出口平直度的影响；

[0012] 2) 在 1-4 号机架通过弯辊力补偿轧制力变化对出口平直度的影响；

[0013] 3) 在末机架中使用内部模型控制 IMC (Internal Model Control) 的平直度控制器，这个控制器可以用模型预测控制器 MPC (Model Predictive Controller) 代替；

[0014] 4) 机架观察器 (Mill Observer)，在线预报机架带钢平直度，根据实际轧制情况自适应修正传递函数。

[0015] (2) 末机架平直度反馈控制加末机架平直度前馈控制。1994 年下半年，英国 Sidmar 钢厂将 1 号冷连轧机改造为酸轧联合机组。此次改造过程中 Sidmar 开发了独特的前馈控制技术。即通过 1 号机架出口平直度仪实测平直度信号，识别出 1 号机架入口热轧来料的断面形状变化，并且对其在机架间的传递进行跟踪，直接修正末机架的弯辊力。通过这种方法，由于板断面形状快速变化将要引起的平直度扰动在末机架反馈控制修正之前，就得到了显著的削弱。此外，各个机架都采用了轧制力对弯辊力的前馈控制策略，降低了轧制力波动对出口板形的影响。

[0016] 其它的现有相关专利分析如下：

[0017] 日本专利 JP2005-118840 提出了一种板形板厚综合控制方法：在冷轧机入口，在线检测冷轧机入口来料板凸度和来料厚度，据此推算出轧机出口机械板凸度（假设轧制压力分布均匀条件下的板凸度），并推算（或实测）出出口侧板厚，再根据入口比例板凸度与出口比例机械板凸度的差值，计算出带钢中间点与另外 1 个边部点的张力差。以同时减小出口板厚与目标板厚的差值、出口张力差与目标张力差的差值为目标，确定压下位置（轧制力）修正值和弯辊力的修正值。

[0018] 日本专利 JP10-005837A 提出了一种冷连轧控制方法和设备配置，参见图 3，通过合理设定各机架出口目标板形曲线并据此对各机架出口板形进行控制，实现薄板的高速大张力轧制。薄板高速轧制时容易出现热划伤。提高带钢张力可以降低轧制压力，进而避免薄板高速轧制时可能发生的表面热划伤。但是薄带钢大张力轧制容易发生断带现象。当带钢为边浪时，即使大张力轧制，断带的可能性也会降低。因此，为保证轧制过程稳定，可以将带钢出口目标曲线设定为边浪。另外，如果为了减小带钢边部减薄，可以将上游机架出口目

标板形曲线设定为中浪,下游机架设定为边浪。具体控制方法是:对于4个机架及以上冷连轧机组,在轧机入口设置带钢厚度横向分布检测仪,连续检测来料断面形状沿带钢长度的变化情况,并计算检测断面达到各机架的时刻。根据各机架出口目标机械板凸度曲线,计算确定各机架出口的目标机械板凸度。根据出口机械板凸度与目标机械板凸度一致原则,计算确定该时刻板形调节机构的修正设定值并进行控制,以使得各个机架出口平直度达到目标平直度曲线,避免断带的发生。

[0019] 发明内容

[0020] 本发明的目的在于提供一种冷轧带钢平直度横向厚差综合控制方法,该控制方法通过在冷轧机上游机架对带钢的断面形状进行适度控制,在下游机架重点对带钢平直度进行控制,实现在进一步提高冷轧带钢平直度质量的基础上减小冷轧带钢横向厚差。

[0021] 本发明是这样实现的:一种冷轧带钢平直度横向厚差综合控制方法,包括在冷轧机上游机架重点对带钢的断面形状进行适度控制,在下游机架重点对带钢平直度进行控制;基于在冷轧机1号机架入口配置的断面仪实测热轧来料断面形状、平直度,各个机架轧制工艺参数实测值,包括轧制力、板形调节机构实测值,和基于在冷轧机出口配置的板形仪实测冷轧带钢的平直度,以上游机架特别是1号机架为重点对带钢断面形状进行前馈控制,以下游机架特别是末机架为重点对带钢平直度进行反馈控制,实现对冷轧带钢平直度和横向厚差的综合控制;具体技术措施是:

[0022] 第一,板形预设控制,

[0023] 板形调节机构预设值的确定,其输入数据为:轧机设备参数、热轧来料原始数据、轧制工艺参数、1号机架入口热轧来料断面形状和平直度实测值;

[0024] 经板形控制执行机构预设生成模块运算后,输出数据为:各个机架板形调节机构的预设值、执行机构对出口板形影响系数、出口板形目标值;

[0025] 第二,平直度反馈控制,

[0026] 平直度反馈控制的技术要点包括:

[0027] (1) 用四次正交多项式拟合末机架平直度实测值与平直度目标值之间的差值,得到平直度偏差的一次、二次、三次以及四次分量,计算平直度实测值与多项式拟合值之间的偏差值,得到平直度偏差的高次分量;

[0028] (2) 基本平直度控制,改变末机架轧辊倾斜、工作辊弯辊力、中间辊弯辊力设定值大小,修正带钢宽度范围内平直度实测值与平直度目标值之间差值的一次、二次、三次以及四次分量;

[0029] (3) 精细冷却控制,确定末机架工作辊辊面分段冷却喷嘴流量,修正平直度偏差的高次分量;

[0030] (4) 边部板形控制,改变1号机架至末机架中间辊窜辊量以及弯辊设定值大小,修正带钢边部浪形;

[0031] 第三,板形前馈控制,

[0032] (1) 在1号机架对带钢凸度和楔形进行前馈控制(即断面前馈控制):根据1号机架入口带钢整体凸度、中心凸度和楔形实测值及1号机架轧制工艺参数实测值,通过模型预测出1号机架出口整体凸度、中心凸度与目标凸度的偏差值,确定1号机架弯辊、轧辊倾斜设定值的补偿量,使得本机架出口凸度偏差值最小、楔形值最小;

[0033] (2) 在 1 号机架至 3 号机架进行边缘降前馈控制：根据当前机架入口带钢边缘降实测值或预测值，以及本机架轧制工艺参数实测值，通过模型预测出本机架出口边缘降与目标边缘降的偏差值，确定本机架中间辊窜辊设定值的补偿量，使得本机架出口边缘降偏差值最小；

[0034] (3) 在 2 号机架至末机架进行平直度前馈控制：根据当前机架的入口带钢凸度、楔形实测值或预测计算值，以及本机架轧制工艺参数实测值，通过模型预测出本机架出口平直度与目标平直度的偏差值，确定本机架弯辊、倾辊设定值的补偿量，使得本机架出口平直度偏差值最小；

[0035] 上述当前机架指当前跟踪控制的带钢断面位置到达的机架；

[0036] 第四，板形前馈控制与平直度反馈控制之间的协调控制，

[0037] 在各个机架上分别采用不同的板形调节机构控制输出策略，实现板形前馈控制与平直度反馈控制之间的协调控制：

[0038] (1) 取板形前馈控制周期大于或等于平直度反馈控制周期；

[0039] (2) 对于末机架，当平直度反馈控制输出的板形调节机构设定值补偿量与板形前馈控制输出的同一板形调节机构设定值补偿量符号相反时，将平直度前馈控制给出的板形调节机构设定值补偿量赋零，只将平直度反馈控制给出的板形调节机构设定值补偿量输出到该板形调节机构；当两者符号相同时，将平直度反馈控制给出的板形调节机构设定值补偿量与平直度前馈控制给出的板形调节机构设定值补偿量进行加权求和后输出到该板形调节机构；

[0040] (3) 对于 1 号机架，当平直度反馈控制给出的板形调节机构设定值补偿量与板形前馈控制给出的同一板形调节机构设定值补偿量符号相反时，将平直度反馈控制给出的板形调节机构设定值补偿量赋零，只将板形前馈控制给出的板形调节机构设定值补偿量输出到该板形调节机构；当两者符号相同时，将平直度反馈控制给出的板形调节机构设定值补偿量与板形前馈控制给出的板形调节机构设定值补偿量加权求和后输出到该板形调节机构；

[0041] (4) 对于 1 号机架和末机架以外的其它各个机架，将平直度反馈控制给出的板形调节机构设定值补偿量与板形前馈控制给出的板形调节机构设定值补偿量加权平均后输出到该板形调节机构。

[0042] 本发明改变了目前大多数冷连轧机组只控制带钢平直度，且平直度控制过分依赖于末机架的状况，对上、下游机架进行合理分工，上游机架重点控制带钢断面形状，下游机架重点控制平直度，将板形前馈控制与平直度反馈控制相结合。

[0043] 本发明与现有技术相比，其特点和有益效果是：

[0044] (1) 提高极薄板高速轧制过程稳定性：改变上游机架主要依靠人工调整进行控制板形的现状，基于实测热轧来料断面形状变化，对上游各个机架间的出口板形进行自动前馈控制，确保薄板高速轧制过程的稳定性，减少人工操作干预。

[0045] (2) 提高冷轧板平直度质量：通过调整板形执行机构设定值，使得冷轧机负载辊缝形状自动适应入口来料断面形状的波动、或者抑制热轧来料断面形状的波动，降低热轧来料断面形状异常（如楔形、凸度过大等）对冷轧板形的不良影响，减轻平直度反馈控制负荷，控制进一步提高冷轧板平直度质量，降低过渡轧制过程平直度超差程度与超差长度。

[0046] (3) 提高冷轧板横向厚差精度:提高可以在一定程度上减小冷轧板的边部减薄和整体凸度,提高带钢横向厚差精度。

[0047] (4) 各个机架平直度前馈控制与末机架平直度反馈控制相配合,及时消除热轧来料断面形状和平直度波动对末机架出口平直度的影响,以进一步提高冷轧带钢的平直度质量;

[0048] (5) 对各个机架出口平直度进行自动前馈控制,减少断面、跑偏等异常情况的发生率,提高冷连轧生产过程的稳定性。

[0049] (6) 减小冷轧带钢横向厚差。

附图说明

[0050] 图 1 为带钢断面形状示意图

[0051] 图 2 为 EKO 四机架冷连轧机新的平直度控制系统结构示意图;

[0052] 图 3 为 JP10-005837A 冷连轧机组一种系统配置图;图中:1-板形仪 2-板形调节机构 3-断面仪 4-测压仪 5-测厚仪 6-测速仪 7-测宽仪;

[0053] 图 4 为本发明的平直度综合控制系统功能框图;

[0054] 图 5 为带钢断面分区示意图;

[0055] 图 6 为平直度反馈控制功能简图;

[0056] 图 7 为带钢边部平直度偏差示意图;

[0057] 图 8 为板断面前馈控制流程简图;

[0058] 图 9 为边缘降前馈控制流程简图;

[0059] 图 10 为平直度前馈控制流程简图。

具体实施方式

[0060] 下面结合附图和具体实施例对本发明作进一步说明。

[0061] 参见图 4,一种冷轧带钢平直度横向厚差综合控制方法,包括在冷轧机上游机架重点对带钢的断面形状进行适度控制,在下游机架重点对带钢平直度进行控制;基于在冷轧机 1 号机架入口配置的断面仪实测热轧来料断面形状、平直度,各个机架轧制工艺参数实测值,包括轧制力、板形调节机构实测值,和基于在冷轧机出口配置的板形仪实测冷轧带钢的平直度,以上游机架特别是 1 号机架为重点对带钢断面形状进行前馈控制,以下游机架特别是末机架为重点对带钢平直度进行反馈控制,实现对冷轧带钢平直度和横向厚差的综合控制。

[0062] 下面具体说明:

[0063] 一、平直度横向厚差综合控制系统构成

[0064] 如图 4 所示,本发明的平直度横向厚差综合控制系统功能构成:由轧机(包括各种板形调节执行机构)、板形预设定控制单元、板形自动控制单元(包括横向厚差/平直度前馈控制和平直度反馈控制)、板形检测单元(包括板形仪、板断面仪)等单元模块组成。各个单元模块的主要功能概述如下:

[0065] 1、板形预设定控制单元——以轧机设备基本参数、带钢基本参数(包括实测热轧来料断面信息)和轧制工艺参数等为输入,通过数学模型在线计算确定最佳化的板形调节

机构设定值、执行机构效率系数以及板形目标曲线等。通过模型参数自适应提高板形模型的预报精度。

[0066] 2、板形自动控制单元——包含平直度反馈控制和板形前馈控制两个功能模块。在平直度反馈控制功能模块中,通过板形辊仪测量末机架出口带钢实际平直度值,根据目标平直度和实际平直度的偏差,计算确定各个板形执行机构设定值的补偿量。在板形前馈控制功能模块中,根据板断面仪测量1号机架入口热轧来料实际板断面值、平直度以及实际轧制工艺参数值,通过模型预报出机架出口板形,包括平直度和断面形状,根据机架出口目标板形与估计板形的偏差,计算确定各个板形执行机构设定值的补偿量。

[0067] 3、板形检测单元——主要包括板形仪和平直度检测系统、板断面仪和板断面形状及平直度检测系统。板形辊安装与末机架出口,在线检测冷轧带钢平直度。板断面仪安装于1号机架入口,在线检测热轧来料断面形状及平直度。

[0068] 4、板形执行控制单元——包括板形调节执行机构、检测元件及其控制回路。板形执行机构包括:各个机架轧辊倾斜、工作辊弯辊、中间辊弯辊、中间辊窜辊以及末机架工作辊辊面精细冷却。执行机构控制回路根据执行机构设定值和实际值的偏差,计算控制输出到液压控制阀,控制液压缸的输出,从而改变带钢的实际板形。精细冷却采用开环控制方式,通过气动阀门控制喷嘴的打开和关闭。

[0069] 二、带钢断面描述与特征参数定义

[0070] 如图5所示,根据带钢断面厚度分布中间部分变化平缓、边缘部分变化明显的特点,将带钢横断面形状划分成骤减区、边缘降区和中间凸形区,对带钢断面按分区分别进行描述。在断面仪实测断面各点厚度值的基础上,进行多项式曲线拟合,得到骤减区、边缘降区和凸形区的轮廓曲线方程式。根据拟合后得到的带钢断面形状方程式,计算得到断面形状的特征参数中心凸度、整体凸度以及楔形,带钢断面形状各有关的特征参数定义如表1所示:

[0071] 表1

[0072]

断面特征参数	符号	定义	计算公式
中心厚度	H_c	带钢中心线上测得的厚度	若中心测点左右各一个,则取平均值
边部减薄区厚度 1) DS侧厚度 2) WS侧厚度 3) 平均厚度	H_{qd} H_{qw} H_q	距传动侧DS边缘距离为 q 处的带钢厚度 距操作侧WS边缘距离为 q 处的带钢厚度 传动侧DS和操作侧WS边部减薄区厚度算术平均值	$q = \left(\frac{1}{2} - \frac{\sqrt{2}}{4}\right) B$ 其中 B 为带钢宽度
骤减区厚度 1) DS侧厚度 2) WS侧厚度 3) 平均厚度	H_{ed} H_{ew} H_e	距传动侧边缘距离为 e 处的带钢厚度 距操作侧边缘距离为 e 处的带钢厚度 传动侧和操作侧骤减区厚度算术平均值	$e = 10 \sim 80 \text{mm}$
边缘降			

[0073]

1) DS 侧边缘降	E_d	距传动侧边缘距离为 a 处与 b 处带钢厚度之差	$E_d = H_{ad} - H_{bd}$
2) WS 侧边缘降	E_w	距操作侧边缘距离为 a 处与 b 处带钢厚度之差	$E_w = H_{aw} - H_{bw}$ (常取 $a = 100\text{mm}$, $b = 15\text{mm}$)
3) 平均边缘降	E	传动侧 DS 和操作侧 WS 边缘降平均值	$E = (E_d + E_w) / 2$
楔形	W_g	传动侧骤减区厚度与操作侧骤减区厚度之差	$W_g = H_{ed} - H_{ew}$
整体凸度	C_e	中心厚度与骤减区平均厚度之差	$C_e = H_c - (H_{ed} + H_{ew}) / 2$
中心凸度	C_q	中心厚度与边部减薄区平均厚度之差	$C_q = H_c - (H_{qd} + H_{qw}) / 2$

[0074] 三、板形预设控制

[0075] 六辊轧机 (6Hi 轧机) 的板形调节机构包括轧辊倾斜、工作辊弯辊、中间辊弯辊、中间辊倾斜以及工作辊分区冷却等。板形调节机构预设值可以采用两种方式产生: 要么查询预设值经验表格, 要么调用预设数学模型进行在线计算。预设值经验表格可以通过模型离线计算方法得到, 或者通过实验的方法得到。

[0076] 确定板形调节机构预设值的输入条件主要包括三个方面:

[0077] (1) 来料条件, 包括带钢钢种规格如钢种等级、来料厚度、宽度、平直度和断面形状等;

[0078] (2) 轧制工艺条件, 包括轧制力、轧制速度、张力、压下规程、各个机架出口平直度目标曲线以及工艺润滑等;

[0079] (3) 设备条件, 包括轧辊辊系参数、辊形曲线、辊面粗糙度等。

[0080] 板形控制机构预设值生成模块在机组过程控制计算机中, 模块的输出设定值包括:

[0081] (1) 轧辊倾斜、工作辊弯辊、中间辊弯辊、中间辊倾斜以及工作辊分区冷却等板形调节机构的预设值;

[0082] (2) 各板形调节机构设定值的改化对机架出口平直度、断面形状的影响系数;

[0083] (3) 各个机架出口板形目标值即目标板形曲线等。

[0084] 为了提高板形调节机构的预设精度, 考虑热轧来料断面形状和平直度变化对板形控制设定值的影响, 将历史和当前实测热轧来料钢卷的实测断面形状和平直度数据进行平滑处理后, 作为同组别钢种规格将要轧制钢卷的板形调节机构预设值确定的输入参数。

[0085] 目标板形曲线包括 1—5 号机架出口目标平直度曲线和 1—3 号机架目标断面形状 (具体包括 1 号机架出口凸度和 1 号至 3 号机架出口边缘降)。目标板形曲线参数按钢卷的轧制方式、钢种、厚度、宽度等级等分组, 以数据文件方式存储。在进行板形设定值计算时, 通过查询数据表格方式得到最合适的目标板形曲线参数。

[0086] 过程机根据 L1 发送的当前最新的热轧来料带钢板断面参数平均值, 动态确定下一卷同组别带钢 1 号机架入口的设定断面曲线, 并据此计算确定各机架出口的目标断面曲线。

[0087] 各个机架出口平直度目标值和凸度、边缘降目标值设定遵循以下方法:

[0088] (1) 1 号机架出口带钢凸度目标值小于或等于热轧来料凸度平均值, 1 号至 3 号机架出口边缘降目标值递减且小于或等于热轧来料边缘降平均值;

[0089] (2) 上游机架带钢的厚度比较厚, 上游机架出口平直度目标曲线一般设定为中浪,

即带钢宽度方向上中间出口张应力较小而两边出口张应力较大,以有利于控制带钢边部减薄;

[0090] (3) 末机架以外的下游机架厚度比较薄,下游机架出口带钢的平直度目标曲线的设定为边浪,即中间出口张应力大两边出口张应力小,以有利于降低轧制过程中断带的发生几率;

[0091] (4) 末机架出口平直度目标曲线设定首先满足下游机组对冷轧带钢平直度的要求,其次,还要考虑补偿出口带钢平直度检测误差、带钢卷取过程中产生的附件卷取张应力、带钢冷却过程中产生的附加热应力,以确保离线后的冷轧带钢平直度良好。

[0092] 四、平直度反馈控制

[0093] 平直度反馈控制以末机架为重点,纳入反馈控制的调节手段及其分工策略:

[0094] (1) 末机架工作辊倾斜,控制末机架出口平直度偏差一次分量;

[0095] (2) 末机架工作辊弯辊和中间辊弯辊,控制平直度偏差二次分量,以及 M、W 型浪形的四次分量;

[0096] (3) 1 号机架至 4 号机架工作辊弯辊、中间辊弯辊和中间辊窜辊以及末机架中间辊窜辊,控制边部板形,即小边浪或碎边浪。

[0097] (4) 末机架工作辊分区冷却,控制平直度偏差的高次分量,即高次不规则浪形。

[0098] 平直度反馈控制功能的组成如图 6 所示,主要包括:

[0099] (1) 基本平直度控制——改变末机架轧辊倾斜、工作辊弯辊力、中间辊弯辊力设定值大小,修正带钢宽度范围内平直度偏差的一次、二次和四次分量。

[0100] (2) 精细冷却控制——确定末机架工作辊辊面分段冷却喷嘴控制气动阀门的打开和关闭,修正平直度偏差的高次分量。

[0101] (3) 边部板形控制——改变 1 号机架至末机架中间辊窜辊量、弯辊力设定值大小,修正带钢边部浪形。

[0102] 具体来说:

[0103] 1、基本平直度控制

[0104] 基本平直度控制原理与控制过程:

[0105] (1) 平直度偏差模式识别,用四次正交多项式拟合末机架平直度实测值与平直度目标值之间的差值即平直度偏差,得到平直度偏差的一次、二次、三次以及四次分量,计算平直度实测值与多项式拟合值之间的偏差值,得到平直度偏差的高次分量;

[0106] (2) 基本平直度控制,改变末机架轧辊倾斜、工作辊弯辊力、中间辊弯辊力设定值大小,修正带钢宽度范围内平直度实测值与平直度目标值之间差值的一次、二次、三次以及四次分量;

[0107] (3) 精细冷却控制,确定末机架工作辊辊面分段冷却喷嘴流量,修正平直度偏差的高次分量;

[0108] (4) 边部板形控制,改变 1 号机架至末机架中间辊窜辊量以及弯辊设定值大小,修正带钢边部浪形。

[0109] 1.1 平直度偏差模式识别

[0110] 平直度模式识别不仅要考虑实际平直度实测曲线的形状,而且要考虑轧机的控制特性。选择平直度偏差识别的基本模式依据如下方法:

[0111] (1) 平直度基本模式与轧机各板形调节机构的控制特性之间有良好的对应关系,以简化控制策略;

[0112] (2) 基本模式能够比较准确地拟合逼近实际生产中各种常见的平直度类型;

[0113] (3) 基本模式具有正交性或近似正交性,以保证平直度曲线数学描述的唯一性和稳定性。

[0114] 根据以上原则,平直度偏差信号采用下面的正交多项式进行描述:

$$[0115] \begin{cases} \varepsilon(x) = a_0\phi_0 + a_1\phi_1 + a_2\phi_2 + a_3\phi_3 + a_4\phi_4 + \Delta\varepsilon(x) \\ a_i = \int_{-1.0}^{+1.0} \varepsilon(x) \cdot \phi_i(x) dx \end{cases} \quad (1)$$

[0116] 上式中 $\varepsilon(x)$ —平直度偏差横向分布

[0117] a_i —平直度模式系数,即平直度偏差的各次分量

[0118] $\phi_i(x)$ —平直度模式基函数

[0119] x —带钢宽向各点位置的归一化横坐标

[0120] $\Delta\varepsilon(x)$ —平直度偏差高次分量

[0121] 式(1)中的基函数 $\phi_i(x)$ 满足式(2)正交条件:

$$[0122] \int_{-1.0}^{+1.0} \phi_i(x) \cdot \phi_m(x) dx = \begin{cases} 1.0 & i = m \\ 0 & i \neq m \end{cases} \quad (2)$$

[0123] 正交基函数可以根据具体要求选择如勒让德正交多项式等。通过最小二乘法拟合求出平直度偏差的一次至四次分量 a_1 、 a_2 、 a_3 和 a_4 。

[0124] 1.2 末机架倾辊补偿量计算模型

[0125] 设 $K_{a_1F_1}$ 、 $K_{a_3F_1}$ 分别是轧辊倾斜对平直度偏差一次分量、三次分量的影响系数,由过程控制计算机设定。设 ΔF_1 为轧辊倾斜补偿量。

[0126] 定义轧辊倾斜控制评价函数为:

$$[0127] G(\Delta F_1) = \beta \times [a_1 - K_{a_1F_1} \times \Delta F_1]^2 + (1 - \beta) \times [a_3 - K_{a_3F_1} \times \Delta F_1]^2 \quad 0 \leq \beta \leq 1.0$$

[0128] 式中 β 为加权系数。

[0129] 极小化评价函数 G 得到最佳轧辊倾斜设定值补偿量 ΔF_1 :

$$[0130] \text{Min. } G(\Delta F_1) \rightarrow \Delta F_1$$

[0131] 1.3 末机架弯辊力补偿量计算模型

[0132] 设 $K_{a_2F_w}$ 、 $K_{a_2F_i}$ 、 $K_{a_4F_w}$ 、 $K_{a_4F_i}$ 分别是工作辊弯辊、中间辊弯辊对平直度偏差二次分量、四次分量的影响系数,由过程控制计算机设定。设 ΔF_w 、 ΔF_i 为工作辊弯辊、中间辊弯辊补偿量。

[0133] 定义弯辊控制评价函数为:

[0134]

$$G'(\Delta F_w, \Delta F_i) = \beta' \times [a_2 - K_{a_2F_w} \times \Delta F_w - K_{a_2F_i} \times \Delta F_i]^2 + (1 - \beta') \times [a_4 - K_{a_4F_w} \times \Delta F_w - K_{a_4F_i} \times \Delta F_i]^2$$

$$[0135] 0 \leq \beta' \leq 1.0$$

[0136] 式中 β' 为加权系数。

[0137] 极小化评价函数 G' 得到最佳工作辊弯辊、中间辊弯辊设定值补偿量 ΔF_w 、 ΔF_i :

$$[0138] \text{Min. } G'(\Delta F_w, \Delta F_i) \rightarrow (\Delta F_w, \Delta F_i)$$

[0139] 2、工作辊精细冷却控制

[0140] 沿末机架工作辊身轴向布置若干个冷却液喷嘴。从平直度偏差中减去由上述弯辊、窜辊补偿量决定的一次至四次分量,得到剩余高次分量, $\varepsilon'(x)$ 如下式所示。根据第 i 冷却区段内延伸率偏差平均值 $\varepsilon'(x_i)$ 的大小,通过打开或关闭该区段所对应的喷嘴调节阀开关,调节喷射到工作辊辊面各区域的冷却液流量,改变辊面热膨胀的横向分布,从而改变轧制带钢相应位置处的延伸率,达到控制高次复杂板形缺陷的目的。

$$[0141] \quad \varepsilon'(x) = \varepsilon(x) - \Delta F_i K_{F_i a_1} \phi_1 - (\Delta F_i K_{F_i a_2} + \Delta F_w K_{F_w a_2}) \phi_2 - \Delta F_i K_{F_i a_3} \phi_3$$

$$[0142] \quad - (\Delta F_i K_{F_i a_4} + \Delta F_w K_{F_w a_4}) \phi_4$$

[0143] 3、边部板形控制

[0144] 带钢边部平直度偏差如图 7 所示。

[0145] 末机架出口带钢边部板形偏差定义为

$$[0146] \quad \Delta \varepsilon_{\text{edg}} = \varepsilon_{\text{edg}} - \varepsilon_{\text{edg}-1}$$

[0147] 式中：

[0148] $\Delta \varepsilon_{\text{edg}}$ —带钢边部板形偏差

[0149] ε_{edg} —从带钢边缘向带钢中部板形仪第 1 个有效测量通道的平直度实测值

[0150] $\varepsilon_{\text{edg}-1}$ —从带钢边缘向带钢中部板形仪第 2 个有效测量通道的平直度实测值

[0151] (1) 当 $\Delta \varepsilon_{\text{edg}} > a_u$ 时,末机架出口带钢边部起浪,末机架以外的各个机架工作辊弯辊和中间辊弯辊设定值补偿量取一给定值 a ,其中 a_u 为给定值, $a_u > 0$, $a < 0$;

[0152] (2) 当 $\Delta \varepsilon_{\text{edg}} < a_l$ 时,末机架出口带钢边部拉紧,末机架以外的各个机架工作辊弯辊和中间辊弯辊设定值补偿量取一给定值 b ,其中 a_l 为给定值, $a_l < 0$, $b > 0$;

[0153] (3) 当 $\Delta \varepsilon_{\text{edg}} > b_u$ 时,末机架出口带钢边部明显起浪,末机架以及各个机架中间辊向带钢边部内侧移动一定距离 c ,其中 $b_u > a_u > 0$, $c < 0$;

[0154] (4) 当 $\Delta \varepsilon_{\text{edg}} < b_l$ 时,末机架出口带钢边部明显拉紧,末机架以及各个机架中间辊向带钢边部外侧移动一定距离 d ,其中 $b_l < a_l < 0$, $d > 0$ 。

[0155] 五、板形前馈控制

[0156] 1、基本控制策略

[0157] 各机架之间的分工策略：

[0158] (1) 在 1 号机架进行板凸度和楔形前馈控制；

[0159] (2) 在 1 号机架至 3 号机架进行边缘降前馈控制；

[0160] (3) 在 2 号机架至末机架进行平直度前馈控制。

[0161] 各个机架板形控制执行机构的分工策略如表 2 所示：

[0162] 表 2

[0163]

1 号机架板断面前馈控制	带钢断面形状偏差	
1 号机架工作辊弯辊	带钢整体凸度偏差	
1 号机架中间辊弯辊	带钢中心凸度偏差	
1 号机架轧辊倾斜	带钢楔形	
1 号—3 号机架边缘降前馈控制	边缘降偏差	
1 号—3 号机架中间辊窜辊	带钢 DS 侧、WS 侧边缘降偏差	
2 号—末机架平直度前馈控制	带钢宽度方向不同区域平直度偏差	
2 号—末机架工作辊弯辊	2 次部分	中浪、边浪
2 号—末机架中间辊弯辊	4 次部分	W 型浪、M 型浪
2-末机架轧辊倾斜	1 次部分、3 次部分	单边浪

[0164] 2、板形前馈控制流程

[0165] 板形前馈控制的控制流程为：

[0166] (1) 在冷轧机 1 号机架入口配置一台带钢断面形状检测仪，实时检测热轧来料断面形状和平直度；根据本机架入口热轧来料断面形状实测值计算得到入口带钢断面特征参数：包括中心凸度、整体凸度、边缘降和楔形，根据入口热轧来料平直度实测值计算得到入口带钢平直度的一次、二次和四次分量。

[0167] (2) 1 号机架带钢凸度和楔形前馈控制：对于 1 号机架，根据本机架入口带钢断面特征参数、平直度分量以及本机架轧制工艺参数实测值，通过模型分别计算出本机架出口带钢断面特征参数预报值，包括中心凸度、整体凸度、边缘降和楔形，以及出口平直度预报值；根据本机架出口整体凸度、中心凸度预报值与目标值之间的偏差，确定本机架工作辊弯辊、中间辊弯辊设定值的补偿量，使得本机架出口整体凸度、中心凸度偏差最小；根据本机架出口边缘降预报值与目标值之间的偏差，确定本机架中间辊窜辊设定值的补偿量，使得本机架出口边缘降偏差最小；根据本机架出口楔形预报值，确定本机架轧辊倾斜设定值的补偿量，使得本机架出口楔形最小。

[0168] (3) 对于 2 号和 3 号机架，根据本机架入口即前一个机架出口带钢断面特征参数、平直度分量预报值以及本机架轧制工艺参数实测值，通过模型分别计算出本机架出口带钢断面特征参数预报值，包括中心凸度、整体凸度、边缘降和楔形，以及出口平直度预报值；根据本机架出口边缘降预报值与目标值之间的偏差，确定本机架中间辊窜辊设定值的补偿量，使得本机架出口边缘降偏差最小；根据本机架出口平直度预报值与目标值之间的偏差，确定本机架工作辊弯辊、中间辊弯辊以及轧辊倾斜设定值的补偿量，使得本机架出口平直度偏差最小。

[0169] (4) 对于 4 号机架至末机架，根据本机架入口即前一个机架出口带钢断面特征参数、平直度分量预报值以及本机架轧制工艺参数实测值，通过模型分别计算出本机架出口带钢断面特征参数预报值，包括中心凸度、整体凸度、边缘降和楔形，以及出口平直度预报值；根据本机架出口平直度预报值与目标值之间的偏差，确定本机架工作辊弯辊、中间辊弯辊以及轧辊倾斜设定值的补偿量，使得本机架出口平直度偏差最小。

[0170] 3、1 号机架板凸度和楔形前馈控制模型

[0171] 1号机架板凸度和楔形前馈控制基本流程为：

[0172] (1) 根据1号机架入口带钢整体凸度、中心凸度实测值及1号机架轧制工艺参数实测值，预测出1号机架出口整体凸度、中心凸度预报值；

[0173] (2) 根据出口整体凸度、中心凸度预报值与目标值之间的差值，确定1号机架工作辊弯辊、中间辊弯辊设定值补偿量，使得本机架出口凸度偏差值最小；

[0174] (3) 根据1号机架入口带钢楔形实测值及1号机架轧制工艺参数实测值等，预测1号机架出口楔形预报值，确定轧辊倾斜设定值补偿量，使得出口带钢的楔形最小。

[0175] 板凸度和楔形前馈控制流程简图如图8所示。

[0176] 板凸度和楔形前馈控制的基本模型：

[0177] 3.1 弯辊力补偿量计算

[0178] (1) 计算1号机架出口凸度

[0179] 由冷轧板带轧制变形理论可知，轧机出口带材的凸度 C 是轧制工艺参数、入口来料条件和轧机设备参数等的函数。由于在一个钢卷的轧制过程中，来料带钢的宽度、强度以及轧机参数如轧辊尺寸、原始辊形等基本保持不变的，这里重点考虑轧制工艺参数入轧制压力 P 、工作辊弯辊力 F_w 、中间辊弯辊力 F_i 和中间辊窜辊量 I_r ，和来料整体凸度 C_{e0} 、中心凸度 C_{q0} 等与出口整体凸度 C_e 、中心凸度 C_q 之间的关系，可用下式表示：

$$[0180] \quad C_e = K_{cep}P + K_{cefW}F_w + K_{cefi}F_i + K_{ceir}I_r + K_{cece0}C_{e0} + d_e$$

$$[0181] \quad C_q = K_{cqP}P + K_{cqFw}F_w + K_{cqFi}F_i + K_{cqIr}I_r + K_{cqCq0}C_{q0} + d_q$$

[0182] 式中， K_{cep} 、 K_{cefW} 、 K_{cefi} 、 K_{ceir} 、 K_{cece0} ，分别是轧制力、工作辊弯辊、中间辊弯辊、中间辊窜辊及入口整体凸度对出口整体凸度的影响系数， d_e 为整体凸度常数； K_{cqP} 、 K_{cqFw} 、 K_{cqFi} 、 K_{cqIr} 、 K_{cqCq0} ，分别是轧制力、工作辊弯辊、中间辊弯辊、中间辊窜辊及入口中心凸度对出口中心凸度的影响系数， d_q 为中心凸度常数。上述系数及常数随着带钢的宽度、厚度、性能以及轧制变形量的不同而不同，可以将带钢按钢种、规格进行分组，通过理论模型求解或实验的办法获得，由过程控制计算机进行预设。

[0183] 通过1号机架入口板断面仪实时检测得到来料凸度 C_{e0} 和 C_{q0} ， P 、 F_w 、 F_i 以及 I_r 等可以通过实测得到。

[0184] (2) 1号机架出口凸度偏差计算

[0185] 设 C_{e_ref} 和 C_{q_ref} 分别是出口带钢整体凸度、中心凸度目标值，则可以得到出口带钢凸度偏差值：

$$[0186] \quad \Delta C_e = C_{e_ref} - C_e$$

$$[0187] \quad \Delta C_q = C_{q_ref} - C_q$$

[0188] (3) 定义凸度前馈控制评价函数为

$$[0189] \quad J(\Delta F_w, \Delta F_i) = \alpha \times [\Delta C_e - K_{cefW} \Delta F_w - K_{cefi} \Delta F_i]^2 + (1 - \alpha) \times [\Delta C_q - K_{cqFw} \Delta F_w - K_{cqFi} \Delta F_i]^2$$

$$[0190] \quad 0 \leq \alpha \leq 1.0$$

[0191] 式中 ΔF_w 、 ΔF_i 为待确定的工作辊弯辊力、中间辊弯辊力补偿值， α 为加权系数。

[0192] (4) 确定最佳弯辊力补偿值

[0193] 极小化评价函数 J 得到最佳的工作辊弯辊、中间辊弯辊设定值补偿量 ΔF_w ， ΔF_i ：

$$[0194] \quad \text{Min. } J(\Delta F_w, \Delta F_i) \rightarrow [\Delta F_w, \Delta F_i]$$

[0195] 3.2 轧辊倾斜补偿量计算

[0196] 机架出口带钢楔形 W_g 可由下式计算得到：

$$[0197] \quad W_g = K_{wgP_{wd}} \Delta P' + K_{wgW_{g0}} W_{g0} + K_{wgF_l} \Delta F_l + a_{wg}$$

[0198] 上式中, $\Delta P'$ 为传动侧轧制压力 P_d 与操作侧轧制力 P_w 之差, 即 $\Delta P' = P_d - P_w$, 可通过实测得到; $K_{wgP_{wd}}$ 、 $K_{wgW_{g0}}$ 、 K_{wgF_l} 以及 a_{wg} , 分别是轧制力差、入口来料楔形 W_{g0} 、轧辊倾斜量 ΔF_l 等对出口楔形的影响系数, a_{wg} 为出口楔形常数, 随着带钢的宽度、厚度、性能以及轧制变形量的不同而不同, 可以将带钢按钢种、规格进行分组, 通过理论模型求解或实验的办法获得, 由过程控制计算机进行预设。

[0199] 通常不希望出口带钢出现楔形, 即 $W_g \rightarrow 0$ 。因此, 令上式左边等于 0, 则可以得到轧辊倾斜量 ΔF_l ：

$$[0200] \quad \Delta F_l = -(K_{wgP_{wd}} \Delta P' + K_{wgW_{g0}} W_{g0} + a_{wg}) / K_{f1}$$

[0201] 4.1 号机架至 3 号机架边缘降前馈控制模型

[0202] 边缘降前馈控制基本原理: 根据当前机架 (当前跟踪控制带钢断面位置即将到达的机架) 入口带钢边缘降 (实测值或预测值) 及本机架轧制工艺参数实测值, 预测本机架出口边缘降与目标边缘降的偏差值, 确定本机架中间辊弯辊设定值的补偿量, 使得本机架出口边缘降偏差值最小。

[0203] 边缘降前馈控制流程简图如图 9 所示。

[0204] 在 1 号—3 号机架进行边缘降前馈控制主要流程为：

[0205] (1) 冷轧机 1 号机架入口配置的带钢断面形状检测仪实时检测热轧来料边缘降；

[0206] (2) 对于 1 号机架, 根据本机架入口热轧来料边缘降实测值, 以及本机架轧制工艺参数实测值, 计算出本机架出口带钢边缘降预报值；

[0207] (3) 对于 1 号机架以外的其它第 2、第 3 号机架, 根据本机架入口也就是前一个机架出口带钢断面边缘降预报值, 以及本机架轧制工艺参数实测值, 分别计算出本机架出口带钢边缘降预报值；

[0208] (4) 根据计算得到的各个机架出口边缘降预报值与边缘降目标值之间的偏差, 分别确定本机架轧辊倾斜、工作辊弯辊和中间辊弯辊设定值的补偿量, 使得本机架出口带钢边缘降偏差最小。

[0209] 边缘降前馈控制基本模型：

[0210] (1) 机架出口边缘降计算

[0211] 由冷轧板带轧制变形理论可知, 轧机出口带材的边缘降 E 是轧制工艺参数、入口来料条件和轧机设备参数等的函数。由于在一个钢卷的轧制过程中, 来料带钢的宽度、强度以及轧机参数如轧辊尺寸、原始辊形等基本保持不变的, 这里重点考虑轧制工艺参数入轧制压力 P 、工作辊弯辊力 F_w 、中间辊弯辊力 F_i 、中间辊传动侧窜辊量 I_{rd} / 工作侧窜辊量 I_{rw} , 和入口来料传动侧边缘降 E_{d0} / 工作侧边缘降 E_{w0} 等, 与出口传动侧边缘降 E_d / 传动侧边缘降 E_w 之间的关系, 可用下式表示：

$$[0212] \quad E_{ds} = K_{ep}P + K_{efw}F_w + K_{efi}F_i + K_{eir}I_{rd} + K_{ee0}E_{d0} + a_{ed}$$

$$[0213] \quad E_{ws} = K_{ep}P + K_{efw}F_w + K_{efi}F_i + K_{eir}I_{rw} + K_{ee0}E_{w0} + a_{ew}$$

[0214] 式中, K_{ep} 、 K_{efw} 、 K_{efi} 、 K_{eir} 、 K_{ee0} , 分别是轧制力、工作辊弯辊、中间辊弯辊、中间辊窜辊及入口边缘降对出口边缘降的影响系数, a_{ed} 、 a_{ew} 为边缘降常数。上述系数及常数随着带钢

的宽度、厚度、性能以及轧制变形量的不同而不同,可以将带钢按钢种、规格进行分组,通过理论模型求解或实验的办法获得,由过程控制计算机进行预设。

[0215] 通过机架入口板断面仪实时检测或者通过模型计算得到入口来料 E_{d0} 和 E_{w0} , P 、 F_w 、 F_i 以及 I_r 等可以通过实测得到。

[0216] (2) 机架出口边缘降偏差计算

[0217] 设 E_{d_ref} 和 E_{w_ref} 分别是出口带钢传动侧、操作侧边缘降目标值,则可以得到出口带钢凸度偏差值:

$$[0218] \quad \Delta E_d = E_{d_ref} - E_d$$

$$[0219] \quad \Delta E_w = E_{w_ref} - E_w$$

[0220] (3) 中间辊窜动补偿值确定

[0221] 设 ΔI_{r_d} 和 ΔI_{r_w} 分别是中间辊传动侧、操作侧窜动的补偿值,为消除出口边缘降偏差,则得到:

$$[0222] \quad \Delta I_{r_d} = \Delta E_d / K_{eIr}$$

$$[0223] \quad \Delta I_{r_w} = \Delta E_w / K_{eIr}$$

[0224] 因为中间辊窜动会引起带钢边部板形变化,为了确保边缘降控制不会造成明显的带钢边部板形缺陷,对中间辊的窜动范围需要进行一定的限制,即:

$$[0225] \quad \Delta I_{r^1} \leq (I_{r_d}, I_{r_w}) \leq \Delta I_{r^u}$$

[0226] 式中, I_r 为中间辊窜动量, I_{r^1} 为中间辊窜动量下限值, I_{r^u} 为中间辊窜动量上限值。

[0227] 根据限制条件对中间辊窜动量补偿值进行极限判断:

[0228] 如果 $(I_{r_w} + \Delta I_{r_w}) < I_{r^1}$, $\Delta I_{r_w} = I_{r^1} - I_{r_w}$; 如果 $(I_{r_d} + \Delta I_{r_d}) < I_{r^1}$, $\Delta I_{r_d} = I_{r^1} - I_{r_d}$ 。

[0229] 如果 $(I_{r_w} + \Delta I_{r_w}) > I_{r^u}$, $\Delta I_{r_w} = I_{r^u} - I_{r_w}$; 如果 $(I_{r_d} + \Delta I_{r_d}) > I_{r^u}$, $\Delta I_{r_d} = I_{r^u} - I_{r_d}$ 。

[0230] 5、2 号机架至末机架平直度前馈控制模型

[0231] 平直度前馈控制基本原理:根据当前机架入口带钢凸度、楔形(实测值或预测计算值)及本机架轧制工艺参数实测值,预测本机架出口平直度与目标平直度的偏差值,确定本机架弯辊、倾辊设定值的补偿量,使得本机架出口平直度偏差值最小。

[0232] 平直度前馈控制流程简图如图 10 所示。

[0233] 2 号至末机架平直度前馈控制主要流程为:

[0234] (1) 根据本机架入口也就是前一个机架出口带钢断面特征参数预报值和平直度预报值,以及本机架轧制工艺参数实测值,分别计算出本机架出口带钢平直度预报值和断面特征参数预报值;

[0235] (2) 根据计算得到的各个机架出口平直度预报值与平直度目标值之间的偏差,分别确定本机架轧辊倾斜、工作辊弯辊和中间辊弯辊设定值的补偿量,使得本机架出口平直度偏差最小。

[0236] 平直度前馈控制基本模型:

[0237] 5.1 工作辊 / 中间辊弯辊补偿值计算

[0238] 由冷轧板带轧制变形理论可知,轧机出口带材平直度 F 是轧制工艺参数、入口来料条件和轧机设备参数等的函数。由于在一个钢卷的轧制过程中,来料带钢的宽度、强度以及轧机参数如轧辊尺寸、原始辊形等基本保持不变的,这里重点考虑轧制工艺参数入轧制

压力 P 、工作辊弯辊力 F_w 、中间辊弯辊力 F_i 和中间辊窜辊量 I_r ，和来料参数如来料平直度 F_0 、来料凸度 C_0 等与出口平直度 F 之间的关系，可用下式表示：

$$[0239] \quad F = K_{fP}P + K_{fFw}F_w + K_{fFi}F_i + K_{fIr}I_r + K_{fC0}C_0 + K_{fF0}F_0 + a$$

[0240] 这里 K_{fP} 、 K_{fFw} 、 K_{fFi} 、 K_{fIr} 、 K_{fC0} 以及 K_{fF0} ，分别是轧制力、弯辊力、入口凸度及入口平直度等对出口平直度的影响系数， a 为平直度常数，随着带钢的宽度、厚度、性能以及轧制变形量的不同而不同，可以将带钢按钢种、规格进行分组，通过理论模型求解或实验的办法获得，由过程控制计算机进行预设。

[0241] (1) 机架出口平直度预报计算

[0242] 通过机架入口断面仪实时检测或模型计算得到来料凸度 C_0 和平直度 F_0 ， P 、 F_w 、 F_i 以及 I_r 等可以通过实测得到。将平直度 F 分解为一次分量 F_1 、二次分量 F_e 、四次分量 F_q 等。机架出口平直度二次分量 C_e 、四次分量 C_q 可分别由下面计算式得到：

$$[0243] \quad F_e = K_{feP}P + K_{feFw}F_w + K_{feFi}F_i + K_{feIr}I_r + K_{feC0}C_0 + K_{feF0}F_0 + a_{fe}$$

$$[0244] \quad F_q = K_{fqP}P + K_{fqFw}F_w + K_{fqFi}F_i + K_{fqIr}I_r + K_{fqC0}C_0 + K_{fqF0}F_0 + a_{fq}$$

[0245] 式中， K_{feP} 、 K_{feFw} 、 K_{feFi} 、 K_{feIr} 、 K_{feC0} 以及 K_{feF0} ，分别是轧制力、弯辊力、入口整体凸度及入口平直度二次分量等对出口平直度二次分量的影响系数， a_{fe} 为二次分量常数； K_{fqP} 、 K_{fqFw} 、 K_{fqFi} 、 K_{fqIr} 、 K_{fqC0} 以及 K_{fqF0} ，分别是轧制力、弯辊力、入口中心凸度及入口平直度四次分量等对出口平直度四次分量的影响系数， a_{fq} 为四次分量常数。

[0246] (2) 出口平直度预测值偏差计算

[0247] 设机架出口目标平直度四次分量、二次分量分别为 $F_{q,ref}$ 、 $F_{e,ref}$ ，则可平直度偏差值：

$$[0248] \quad \Delta F_e = F_{e,ref} - F$$

$$[0249] \quad \Delta F_q = F_{q,ref} - F_q$$

[0250] (3) 定义平直度前馈控制评价函数为

$$[0251] \quad M(\Delta F_w, \Delta F_i) = \gamma \times [\Delta F_e - K_{feFw} \Delta F_w - K_{feFi} \Delta F_i]^2 + (1 - \gamma) \times [\Delta F_q - K_{fqFw} \Delta F_w - K_{fqFi} \Delta F_i]^2$$

$$[0252] \quad 0 \leq \gamma \leq 1.0$$

[0253] 式中 ΔF_w 、 ΔF_i 为待确定的工作辊弯辊力、中间辊弯辊力补偿值， γ 为加权系数。

[0254] (4) 确定最佳弯辊力补偿值

[0255] 极小化评价函数 M 得到最佳的工作辊弯辊、中间辊弯辊设定值补偿量 ΔF_w ， ΔF_i ：

$$[0256] \quad \text{Min. } M(\Delta F_w, \Delta F_i) \rightarrow [\Delta F_w, \Delta F_i]$$

[0257] 5.2 轧辊倾斜补偿量计算

[0258] 机架出口带钢平直度一次分量可由下式计算得到：

$$[0259] \quad F_1 = K_{f1P_{wd}} \Delta P' + K_{f1Wg} Wg_0 + K_{f1F_{10}} F_{10} + K_{f1F_1} \Delta F_1 + a_{f1}$$

[0260] 上式中 $\Delta P'$ 为传动侧轧制压力 P_d 与操作侧轧制力 P_w 之差，即 $\Delta P' = P_d - P_w$ 。 $K_{f1P_{wd}}$ 、 K_{f1Wg} 、 $K_{f1F_{10}}$ 以及 K_{f1F_1} ，分别是轧制力差、入口来料楔形 Wg_0 、入口来料平直度一次分量 F_{10} 等对出口平直度一次分量的影响系数， a_{f1} 为一次分量常数。

[0261] 平直度一次分量对应于单边浪，容易引起带钢跑偏，一般不希望带钢出现单边浪，即 $F_1 \rightarrow 0$ 。因此，令上式左边等于 0，则可以得到轧辊倾斜量：

$$[0262] \quad \Delta F_1 = -(K_{f1P_{wd}} \Delta P' + K_{f1Wg} Wg_0 + K_{f1F_{10}} F_{10} + a_{f1}) / K_{f1}$$

[0263] 5.3 机架出口整体凸度、中心凸度及楔形预报值计算模型

[0264] 由冷轧板带轧制变形理论可知, 轧机出口带材的凸度 C 是轧制工艺参数、入口来料条件和轧机设备参数等的函数。由于在一个钢卷的轧制过程中, 来料带钢的宽度、强度以及轧机参数如轧辊尺寸、原始辊形等基本保持不变的, 这里重点考虑轧制工艺参数入轧制压力 P 、工作辊弯辊力 F_w 、中间辊弯辊力 F_i 和中间辊窜辊量 I_r , 和来料参数如来料凸度 C_0 等与出口凸度 C 之间的关系, 可用函数式表示:

$$[0265] \quad C = K_{CP}P + K_{CFw}F_w + K_{CFi}F_i + K_{CIr}I_r + K_{CC0}C_0 + b$$

[0266] 这里 K_{CP} 、 K_{CFw} 、 K_{CFi} 、 K_{CIr} 以及 K_{CC0} , 分别是轧制力、弯辊力、入口凸度等对出口平直度的影响系数, b 为常数, 随着带钢的宽度、厚度、性能以及轧制变形量的不同而不同, 可以将带钢按钢种、规格进行分组, 通过理论模型求解或实验的办法获得, 由过程控制计算机进行预设。

[0267] 通过机架入口断面仪实时检测或模型计算得到来料凸度 C_{e0} 、 C_{q0} , P 、 F_w 、 F_i 以及 I_r 等可以通过实测得到。轧机出口带钢凸度有下式计算得到:

$$[0268] \quad C_e = K_{CeP}P + K_{CeFw}F_w + K_{CeFi}F_i + K_{CeIr}I_r + K_{CeCe0}C_{e0} + b_{Ce}$$

$$[0269] \quad C_q = K_{CqP}P + K_{CqFw}F_w + K_{CqFi}F_i + K_{CqIr}I_r + K_{CqCq0}C_{q0} + b_{Cq}$$

[0270] 式中, K_{CeP} 、 K_{CeFw} 、 K_{CeFi} 、 K_{CeIr} 以及 K_{CeCe0} , 分别是轧制力、弯辊力、入口整体凸度等对出口整体凸度的影响系数, b_{Ce} 为整体凸度常数; K_{CqP} 、 K_{CqFw} 、 K_{CqFi} 、 K_{CqIr} 以及 K_{CqCq0} , 分别是轧制力、弯辊力、入口整体凸度等对出口中心凸度的影响系数, b_{Cq} 为中心凸度常数。

[0271] 机架出口带钢楔形 W_g 可由下式计算得到:

$$[0272] \quad W_g = K_{WgPwd} \Delta P' + K_{WgWg0} W_{g0} + w$$

[0273] 上式中 $\Delta P'$ 为传动侧轧制压力 P_d 与操作侧轧制力 P_w 之差, 即 $\Delta P' = P_d - P_w$ 。 K_{WgPwd} 、 K_{WgWg0} 分别是轧制力差、入口来料楔形 W_{g0} 对出口楔形的影响系数, w 为楔形常数。

[0274] 六、平直度反馈控制与板形前馈控制间协调控制,

[0275] 在各个机架上分别采用不同的板形调节机构控制输出策略, 实现板形前馈控制与平直度反馈控制之间的协调控制:

[0276] (1) 取板形前馈控制周期大于或等于平直度反馈调节周期;

[0277] (2) 对于末机架, 当平直度反馈控制输出的板形调节机构设定值补偿量与板形前馈控制输出的同一板形调节机构设定值补偿量符号相反时, 将平直度前馈控制给出的板形调节机构设定值补偿量赋零, 只将平直度反馈控制给出的板形调节机构设定值补偿量输出到该板形调节机构; 当两者符号相同时, 将平直度反馈控制给出的板形调节机构设定值补偿量与平直度前馈控制给出的板形调节机构设定值补偿量进行加权求和后输出到该板形调节机构;

[0278] (3) 对于 1 号机架, 当平直度反馈控制给出的板形调节机构设定值补偿量与板形前馈控制给出的同一板形调节机构设定值补偿量符号相反时, 将平直度反馈控制给出的板形调节机构设定值补偿量赋零, 只将板形前馈控制给出的板形调节机构设定值补偿量输出到该板形调节机构; 当两者符号相同时, 将平直度反馈控制给出的板形调节机构设定值补偿量与板形前馈控制给出的板形调节机构设定值补偿量加权求和后输出到该板形调节机构;

[0279] (4) 对于 1 号机架和末机架以外的其它各个机架, 将平直度反馈控制给出的板形

调节机构设定值补偿量与板形前馈控制给出的板形调节机构设定值补偿量加权平均后输出到该板形调节机构。

[0280] 本发明提供一种冷连轧机组平直度和横向厚差综合控制方法,即基于在冷轧机入口实测热轧来料带钢断面形状以及平直度,对各个机架的出口板形进行前馈控制;基于末机架出口实测带钢平直度,以末机架为重点进行平直度反馈控制。可以达到以下效果:

[0281] (1) 各个机架板形前馈控制与平直度反馈控制相配合,及时消除热轧来料断面形状和平直度波动对末机架出口平直度的影响,以进一步提高冷轧带钢的平直度质量;

[0282] (2) 对各个机架出口板形进行自动前馈控制,减少断面、跑偏等异常情况的发生率,提高冷连轧生产过程的稳定性。

[0283] (3) 减小冷轧带钢横向厚差。

[0284] 本发明提供一种冷轧机组平直度横向厚差综合控制方法,特别适用于由多机架(四个机架或四机架以上)六辊轧机组成的冷连轧机组,其中的基本方法还适用于由六辊轧机、四辊轧机组成的单机架或双机架冷轧机组。

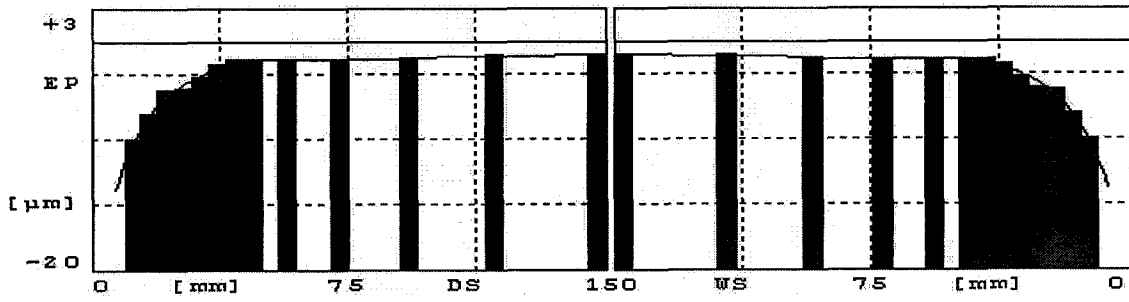


图 1

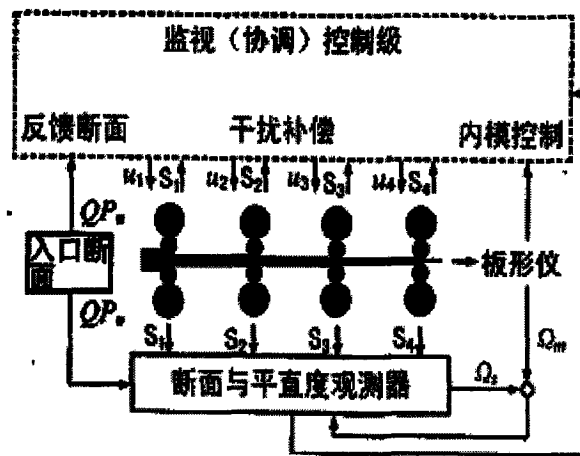


图 2

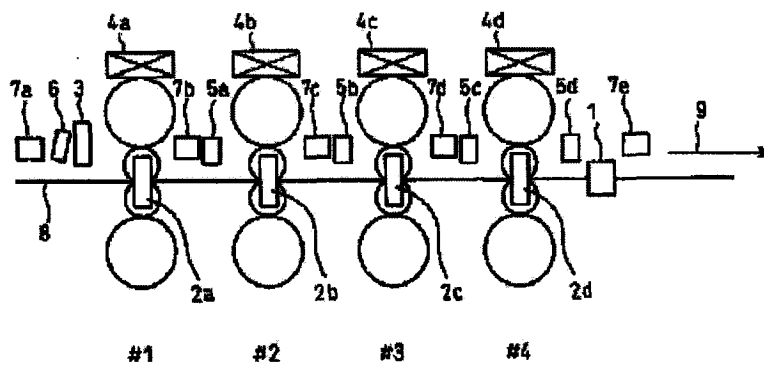


图 3

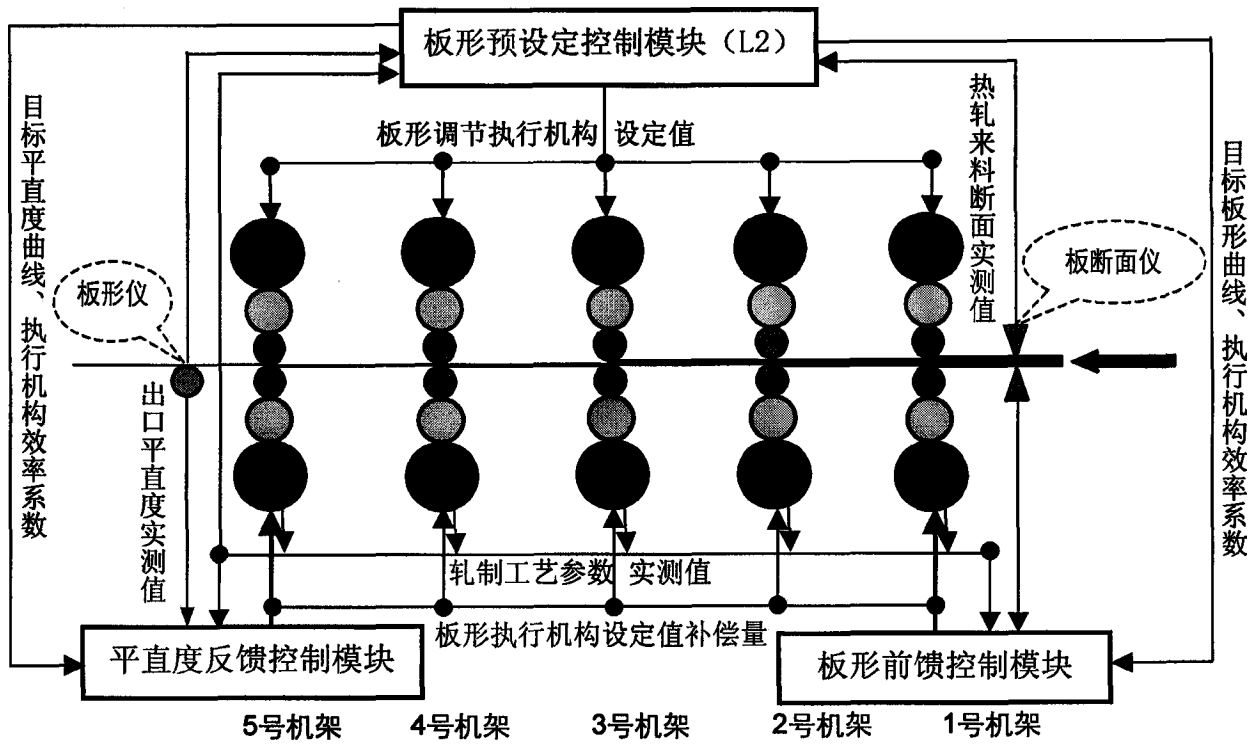


图 4

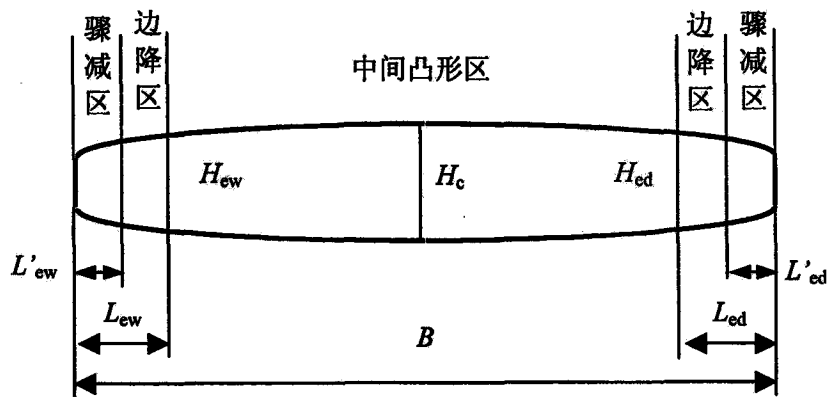


图 5

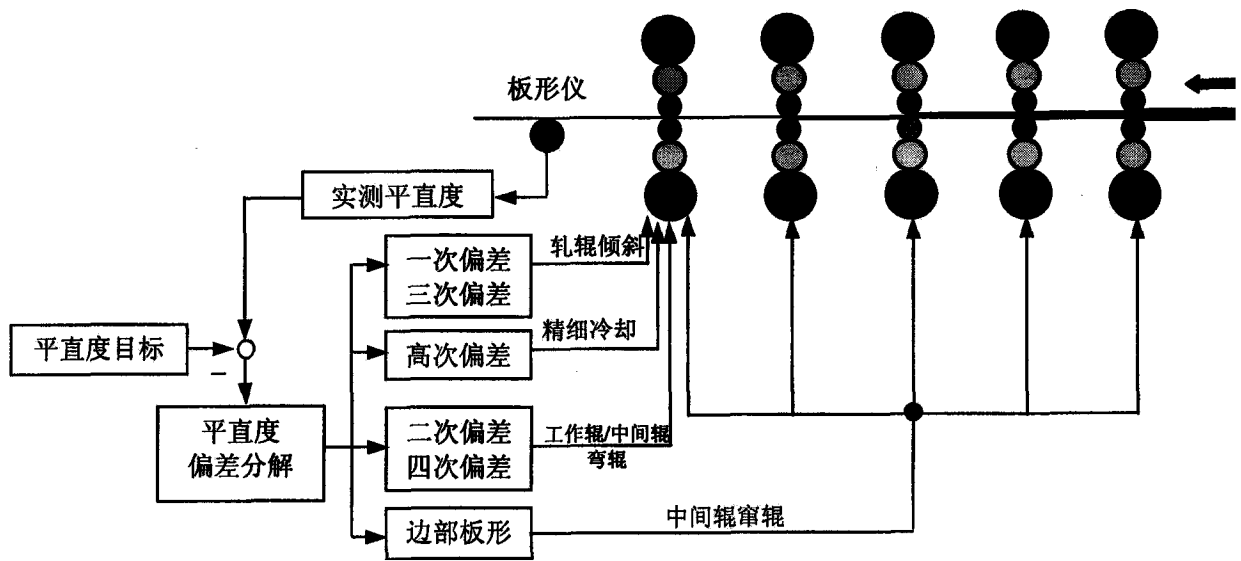


图 6

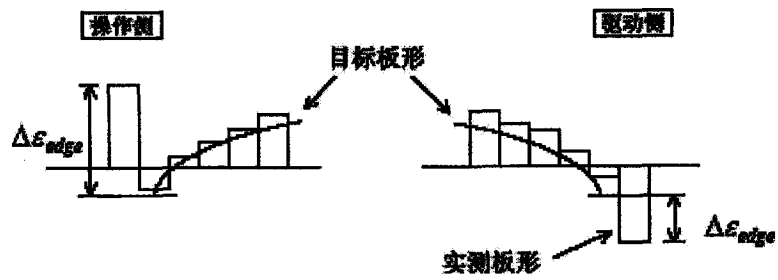


图 7

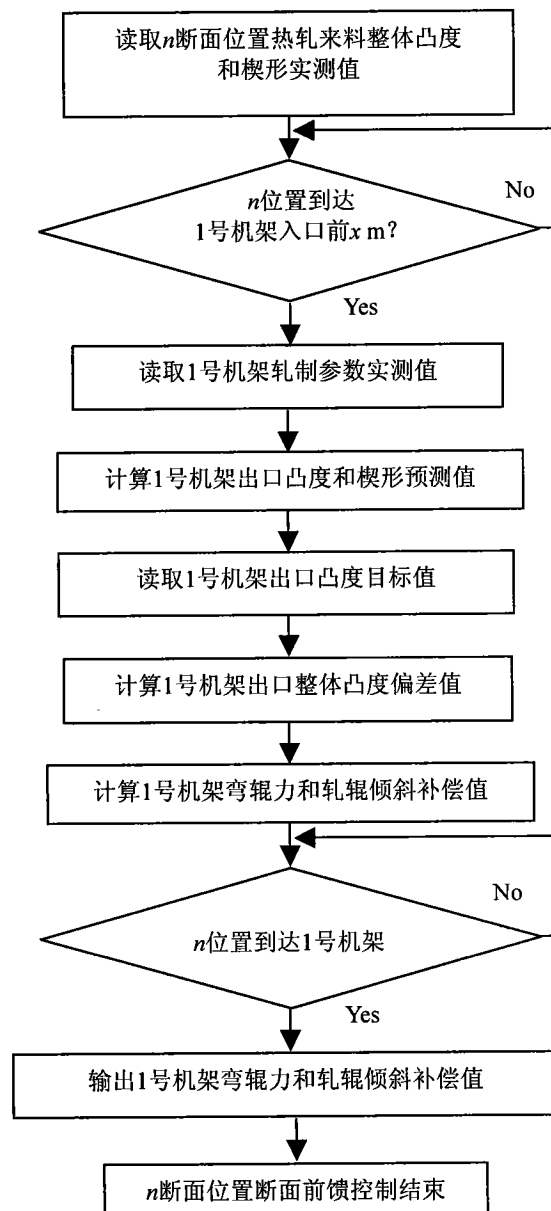


图 8

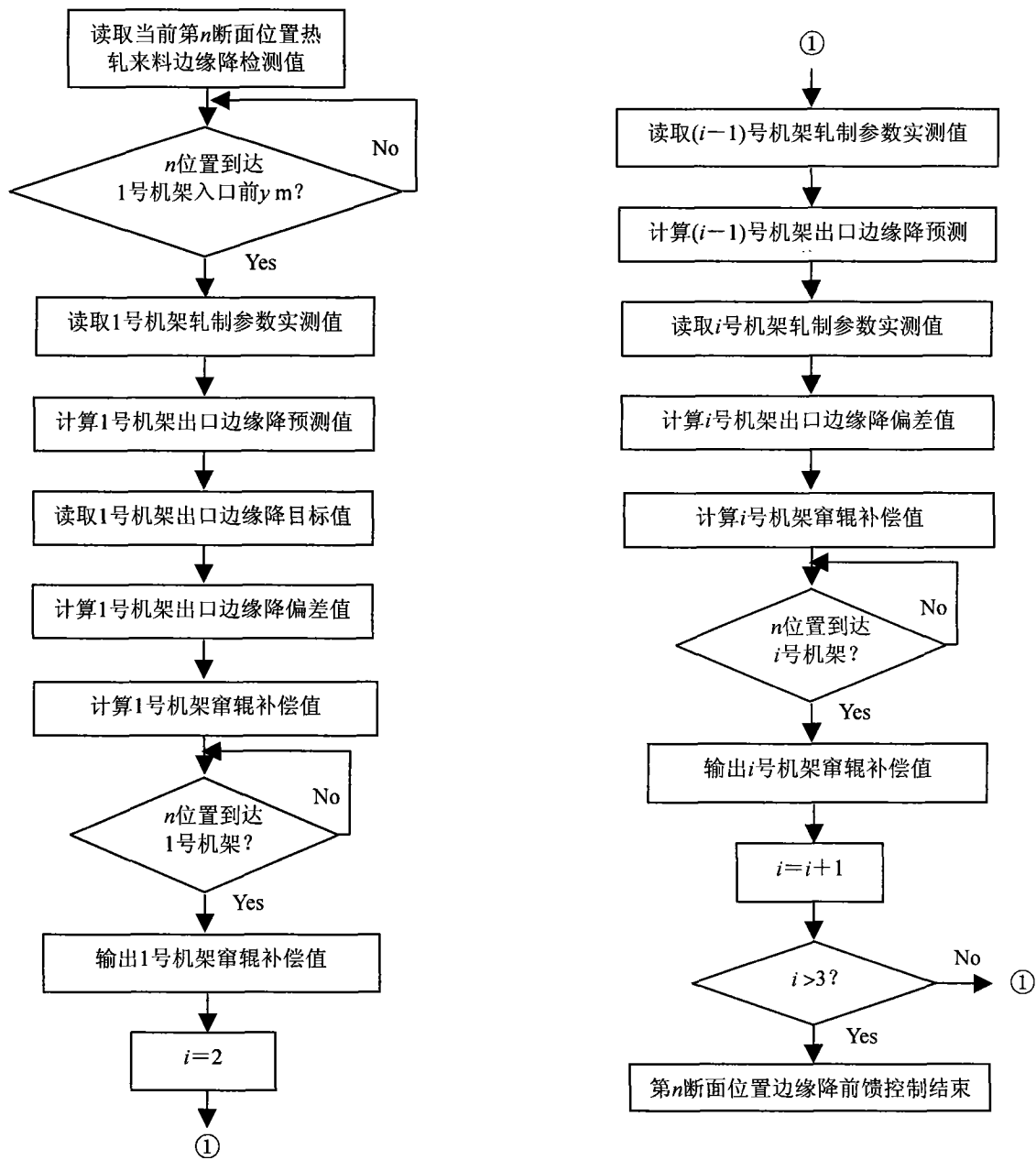


图 9

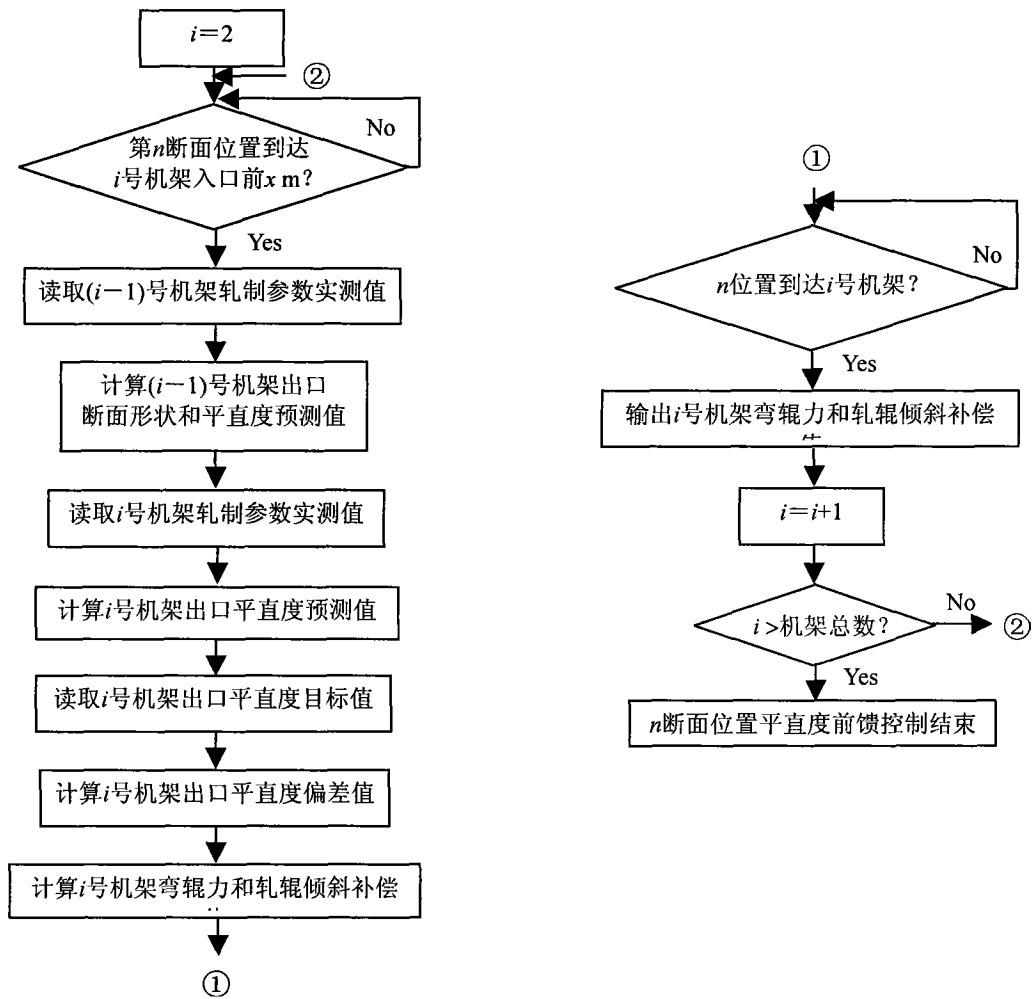


图 10