



(12) 发明专利

(10) 授权公告号 CN 102489524 B

(45) 授权公告日 2013. 09. 04

(21) 申请号 201110390910. 1

CN 101372018 A, 2009. 02. 25, 全文.

(22) 申请日 2011. 11. 30

JP 56091918 A, 1981. 07. 25, 全文.

(73) 专利权人 东北大学

路义山等. 双机架热轧中厚板轧机负荷分配的工艺优化研究. 《青海大学学报(自然科学版)》. 2005, (第02期), 第1-4页.

地址 110819 辽宁省沈阳市和平区文化路3号巷11号

审查员 陈智国

(72) 发明人 唐立新 陈丽

(74) 专利代理机构 沈阳东大专利代理有限公司
21109

代理人 梁焱

(51) Int. Cl.

B21B 37/00(2006. 01)

(56) 对比文件

JP 2000280015 A, 2000. 10. 10, 全文.

JP 2003001311 A, 2003. 01. 07, 全文.

CN 101337237 A, 2009. 01. 07, 全文.

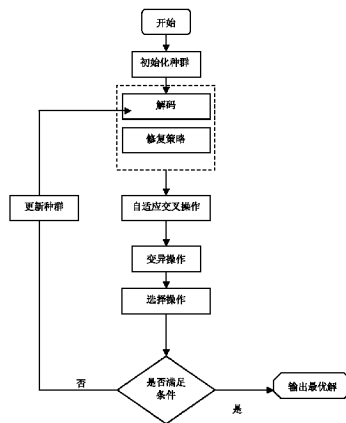
权利要求书4页 说明书11页 附图2页

(54) 发明名称

一种降低热轧带钢轧制过程能耗的机架负荷分配方法

(57) 摘要

一种降低热轧带钢轧制过程能耗的机架负荷分配方法,步骤1:确定初始控制方案的约束条件;步骤2:确定控制的目标;步骤3:确定控制方案的机器参数和轧件的参数;步骤4:利用改进的差分进化算法得到各机架出口厚度;步骤5:根据步骤4得到的各机架的出口厚度来确定各机架的穿带速度、温度、轧制力、轧制功率、总的能耗;步骤6:判断轧制力、轧制力矩、轧制功率是否超出机器的额定值,超出则重复步骤4,否则判断总的能耗是否达到最小,是则输出最终值,否则重复步骤4,直达到达到最小值。改进的差分进化算法对各机架负荷优化设定,优化分配各机架的压下量,确定各机架实际轧出厚度,使总能耗达到最小,减少了设备损害,提高生产效率和设备利用率。



1. 一种降低热轧带钢轧制过程能耗的机架负荷分配方法,其特征在于:具体包括如下步骤:

步骤 1:确定初始控制方案的约束条件,包括:

(1) 咬入条件

咬入条件保证带钢的顺利咬入,轧制各道次压下量应小于最大允许压下量,计算公式如式 (1) 所示

$$\Delta h_i < \Delta h_{\max} = D \left(1 - \frac{1}{\sqrt{1+f^2}} \right) \quad i=1,2,\dots,n \quad (1)$$

其中 Δh_i 表示第 i 个机架的压下量; Δh_{\max} 为最大允许压下量; f 为轧辊与轧件间的摩擦系数; D 表示轧辊的直径;

(2) 轧辊强度条件

为保证轧辊强度,对轧制压力和轧制力矩加以限制,保证轧制过程中不会超过最大的轧制力和轧制力矩,计算公式如式 (2)、式 (3) 所示:

$$P_i < P_{i\max} \quad i=1,2,\dots,n \quad (2)$$

$$M_i < M_{i\max} \quad i=1,2,\dots,n \quad (3)$$

其中 P_i 为第 i 个机架的轧制力; $P_{i\max}$ 为第 i 个机架允许的最大轧制力; M_i 为第 i 个机架的轧制力矩; $M_{i\max}$ 为第 i 个机架允许的最大轧制力矩;

(3) 电机能力条件

电机能力即电机过载的限制条件,轧制功率不得超过其额定功率,计算公式如式 (4) 所示

$$N_i < N_{i\max} \quad i=1,2,\dots,n \quad (4)$$

其中 N_i 为第 i 个机架的轧制功率; $N_{i\max}$ 为第 i 个机架允许的最大轧制功率;

(4) 板形质量限制条件

为了保持板形质量达到客户要求,要优化安排后几架的压下量,使其相应的轧制力之间有一定的比例,防止带钢出现边浪,计算公式如式 (5) 所示

$$-40 \left(\frac{h_i}{b} \right)^{1.86} < \Delta CR_i < 80 \left(\frac{h_i}{b} \right)^{1.86} \quad i=n-3,n-2,n-1,n \quad (5)$$

其中 ΔCR_i 为板坯通过第 i 个机架时的入口凸度和出口凸度之差; h_i 为第 i 个机架的出口厚度; b 为板坯的宽度;

步骤 2:确定控制的目标,是使轧制总的能耗达到最小,能耗计算公式如 (6) 式所示:

$$\min \sum_{i=1}^n N_i \quad i=1,2,\dots,n \quad (6)$$

其中: n —精轧机组机架数;

N_i —第 i 机架电机功率;

步骤 3:确定控制方案的机器参数和轧件的参数,机器参数包括运行时间,精轧机组的工作辊直径、支承辊直径、电机的额定功率、电机的额定转速、最大轧制力和最大轧制力矩;轧件的参数包括轧件的宽度 B ,轧件的来料厚度 H ,轧件的成品厚度 h ,粗轧机的出口温度 TFC ,精轧出口温度 T ;

步骤 4 :利用改进的差分进化算法得到各机架出口厚度 ;

具体步骤如下 :

步骤 4.1 :构造初始种群,并设置种群规模和迭代次数 ;

步骤 4.2 :改进的差分进化算法的个体向量从实数空间映射到解向量空间 ;

步骤 4.3 :对于解码之后的解向量,如果不满足约束条件,执行修复策略 ;

步骤 4.4 :计算种群中的每一个个体的适应度值,将控制目标作为计算个体适应度值的适应度函数 ;

步骤 4.5 :检查算法终止条件,看适应度值是否达到最小,并且满足约束条件 ;若满足算法终止条件,则终止并输出种群中适应度值最优的个体 ;否则,继续下一步 ;

步骤 4.6 :对算法的种群进行变异操作 ;

对于个体 $X_{i,G}$: $i=1, 2, \dots, N$, 一个新的个体 $V_{i,G+1}$ 可通过式 (27) 产生 :

$$V_{i,G+1} = X_{r_1,G} + F * (X_{r_2,G} - X_{r_3,G}) \quad (27)$$

其中, r_1, r_2 和 r_3 是从区间 $[1, N]$ 上随机选取的互不相同的整数,且不同于下标指数 i , 变异因子 F 取值在 $[0, 1]$ 之间 ;

步骤 4.7 :对算法的种群进行交叉操作 ;交叉操作如式 (28) 所示,

$$v_{i,j}^{G+1} = \begin{cases} u_{i,j}^{G+1}, & \text{if } ((\text{randb}(j) \leq CR) \text{ or } (j = \text{mbr}(i))) \\ x_{i,j}^G, & \text{if } ((\text{randb}(j) > CR) \text{ and } (j \neq \text{mbr}(i))) \end{cases}, \quad (28)$$

$i=1, 2, \dots, N, j=1, 2, \dots, Dv$

式中, $v_{i,j}^{G+1}$ 是 V_i^{G+1} 的第 j 维分量 ; $u_{i,j}^{G+1}$ 是 U_i^{G+1} 的第 j 维分量, U_i^{G+1} 为变异产生的个体 ; $x_{i,j}^G$ 是 X_i^G 的第 j 维分量, X_i^G 为父代个体 ; $\text{randb}(j)$ 是 $[0, 1]$ 之间均匀分布的概率 ; $\text{mbr}(i)$ 表示 $[1, Dv]$ 之间随机生成的一个整数, CR 是交叉概率,一般取 $[0, 2]$ 之间的数 ;这里

$$CR = CR_{\min} + \frac{g}{G} \left(1 - CR_{\min} \cdot \frac{F(X_i)}{F(U_i) + F(X_i)} \right) \quad (29)$$

式中, $F(X_i)$ 表示第 i 个父代个体的适应度值 ; $F(U_i)$ 表示第 i 个父代对应的变异个体的适应度值 ; CR_{\min} 为最小交叉概率 ; g 为当前迭代代数 ; G 为算法最大迭代代数 ;

步骤 4.8 :对种群中的子代进行选择操作 ;

差分进化算法的选择操作是在父代群体与子代群体之间,父代个体与子代个体一对一的竞争,算法的选择操作如式 (30) 所示,

$$X_i^{G+1} = \begin{cases} V_i^{G+1}, & \text{if } (F(V_i^{G+1}) \leq F(X_i^G)) \\ X_i^G, & \text{otherwise} \end{cases}, \quad i=1, 2, \dots, N \quad (30)$$

步骤 4.9 :返回步骤 4.2 ;

步骤 5 :根据步骤 4 得到的各机架的出口厚度来确定各机架的穿带速度、温度、轧制力、轧制功率、总的能耗 ;

步骤 6 :判断轧制力、轧制力矩、轧制功率是否超出机器的额定值,超出,则重复步骤 4, 否则判断总的能耗是否达到最小,是则输出最终值,否则重复步骤 4,直到达到最小值。

2. 根据权利要求 1 所述的降低热轧带钢轧制过程能耗的机架负荷分配方法,其特征在

于：

步骤 4.1 所述初始种群产生的步骤如下：

设种群中有 N 个 n 维个体，每个个体向量 X_i 的表示形式为 $X_i = [x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{in}]$ ，

步骤 4.1.1：令 $x_{01}=500$, $x_{0n}=-500$, $Slot = \frac{1000}{n-1}$ ；

步骤 4.1.2：利用式 (24) 计算 x_{0j} ，得到 X_0 , $X_0 = [x_{01}, x_{02}, \dots, x_{0n}]$ ；

$x_{0j} = x_{0j} - Slot$, $j=2, 3, \dots, n-1$ (24)

步骤 4.1.3：令 $i=1$ ；

步骤 4.1.4：利用式 (25)，以 X_0 为模板，产生种群中的个体 X_i , $i=1, 2, \dots, N$, $x_{i1}=500$, $x_{in}=-500$,

$x_{ij} = x_{0j} + f \cdot Slot$, $j=2, 3, \dots, n-1$ (25)

式中， f 是随机数， $f \in (-1, 1)$ ；

步骤 4.1.5： $i=i+1$ ；

步骤 4.1.6：若 $i=N$ ，则初始种群构造结束；否则，转入步骤 4.1.4。

3. 根据权利要求 1 所述的降低热轧带钢轧制过程能耗的机架负荷分配方法，其特征在于：

所述步骤 4.2 进化算法的个体向量从实数空间映射到解向量空间，具体步骤如下：

步骤 4.2.1：找出个体向量 X 中各个分量的最大值与最小值，记为 x_{\max} 和 x_{\min} ，令 $v_{\max}=h_0$, $v_{\min}=h_n$ ，其中 v_{\max} 和 v_{\min} 分别为 x_{\max} 与 x_{\min} 解码后对应的分量； h_0 为精轧机组入口带钢厚度； h_n 为精轧机组出口带钢厚度；对于 X 中其他的分量，用式 (26) 映射到解空间：

$$v_i = v_{\max} - \frac{(x_{\max} - x_i)}{(x_{\max} - x_{\min})} * (v_{\max} - v_{\min}), \quad i=1, 2, \dots, n,$$

$i \neq \max, \min$ (26)

步骤 4.2.2：将解码后的中间向量 V 的分量 (v_1, v_2, \dots, v_n) 按从大到小排列；

步骤 4.2.3：用排列后的分量 v_i 更新解向量 U ： $u_1=v_{\max}$, \dots , $u_n=v_{\min}$ 。

4. 根据权利要求 1 所述的降低热轧带钢轧制过程能耗的机架负荷分配方法，其特征在于：

步骤 4.3 所述的修复策略，具体步骤如下：

步骤 4.3.1：若解码后的解向量不满足约束条件，则进入步骤 4.3.2；否则，保存当前解向量，结束修复策略；

步骤 4.3.2：计算出解向量对应的各个机架的压下量 Δh_i ，并将这些压下量从大到小排列： $\Delta h_1 = \Delta h_{\max}$, \dots , $\Delta h_n = \Delta h_{\min}$ ；

步骤 4.3.3：为各个机架重新分配的压下量，并重新计算各机架的出口厚度，更新解向量； $x_1=h_0 + \Delta h_1$, $x_2=x_1 + \Delta h_2$, \dots , $x_n=x_{n-1} + \Delta h_n$ ；

步骤 4.3.4：如果更新后的解向量能满足约束条件，保存当前解向量，结束修复策略；否则，进入步骤 4.3.5；

步骤 4.3.5：令 $i=n$ ；

步骤 4.3.6：检查解向量的分量 x_i 是否满足约束条件，如果 x_i 不满足约束，进入步骤

4.3.7, 否则, 进入步骤 4.3.9;

步骤 4.3.7: $x_i = x_i - 0.1$, $i=1, 2, \dots, n$;

步骤 4.3.8: 如果 $x_i \leq x_{i+1}$ ($i=1, 2, \dots, n$), 转入步骤 4.3.11; 如果 x_i 满足约束, 则保留 x_i , 进入步骤 4.3.9; 否则, 继续步骤 4.3.7;

步骤 4.3.9: 如果 $i=1$, 保存当前解向量, 结束修复策略; 否则, 进入步骤 4.3.10;

步骤 4.3.10: $i=i-1$, 进入步骤 4.3.6;

步骤 4.3.11: 修复失败, 给目标函数加一个大的惩罚值, 抛弃当前解。

一种降低热轧带钢轧制过程能耗的机架负荷分配方法

技术领域

[0001] 本发明属于钢板轧制过程控制技术领域,具体涉及一种降低热轧带钢轧制过程能耗的机架负荷分配方法。

背景技术

[0002] 在热轧轧制板带钢材时,钢坯从加热炉里出来,经过 n 个机架或道次的轧制 (n 为机架数或者道次数),轧制出符合质量标准的成品带钢,这一系列轧制过程,是按照事先所设定的轧制规程进行的,如图 1 所示。制定轧制规程的中心问题是如何分配各机架的压下量、确定各机架的出口厚度,也就是确定各机架的压下负荷分配,从本质上讲,负荷分配决定了轧制过程的状态特性,对成品质量要求、设备调整均有重要的影响。制定负荷分配,需要考虑的限制条件有设备强度、电机的过载和发热、工艺条件、板形和速度的限制等,这些因素往往是相互矛盾的,在不同的轧制条件下,各架轧机的限制因素也是不同的,各因素之间又互相影响,关系十分复杂。因此,为使带钢生产能够达到优质、高产、低消耗,就需要优化分配各机架的压下量。

[0003] 长期以来,国内外学者对提高精轧机组负荷分配模型的精度方面进行了大量的研究工作。但从本质上讲仍是基于经验操作方法,先根据经验分配各机架负荷,然后计算达到终轧目标温度所需的穿带速度,确定轧件在各机架的温度,用数学模型预测变形抗力、轧制力、轧制功率、及其他参数,进行极限校核;如果某一机架的轧制功率超过主电机功率极限,就利用修正算法重新分配各机架的压下量,以调整各机架负荷,不断调整,校核,直到所有机架的轧制功率都不超限。校核通过后再算出辊缝、速度等控制系统设定值,完成参数的设定。

[0004] 这种方法简便、可靠,能确保设备安全,且对设备的自动化程度依赖性小,但需要不断校核和修工,易导致各架负荷不均,造成负荷向前架或向后架积累的现象。这种方法的计算模型一般不能在线自适应,而且在生产过程中不能保证各道次中或各机架都能在允许的负荷下进行轧制,更谈不上节能和考虑带钢板形。并且当生产品种规格或轧制条件改变时,又要重新积累经验,才能重新定出负荷分配。这样不仅影响整个机组能力的发挥,而且影响带钢的质量。这种方法并没有过多地从生产过程的优化设计来考虑进行生产过程操作优化。

[0005] 另外,有的学者提出基于相关算法的厚度分配优化方法,如等负荷分配、多种目标函数结合等方法,这些方法从均衡负荷、减少能耗的角度出发,由于该方法中的负荷(轧制力,功率等)与压下量呈复杂的非线性关系,且轧制力,功率等参数是压下产生的结果,难以得到比较好解,不能很好的满足热轧生产的需要。

[0006] 在轧钢生产中,坯料经过数机架(道次)轧制,产生塑性变形,最终轧制出符合规格要求的产品。这一系列的轧制过程,是按着坯料进入轧机前事先设定的规程进行的,这是带钢连续轧制的重要工作。其中负荷分配是设定计算的前提和基础,是设定计算的中心环节。在轧钢生产中,能耗一直是影响生产成本的重要因素之一。因此降耗增效也是生产者

追求的目标。

发明内容

[0007] 针对现有技术的不足,本发明提供一种降低热轧带钢轧制过程能耗的机架负荷分配方法,优化分配各机架的压下量,确定各机架实际轧出厚度,使总的能耗达到最小。

[0008] 本发明的技术方案:一种降低热轧带钢轧制过程能耗的机架负荷分配方法,具体包括如下步骤:

[0009] 步骤1:确定初始控制方案的约束条件,包括:

[0010] (1) 咬入条件

[0011] 咬入条件保证带钢的顺利咬入,顺利咬入保证带钢能够进入轧机轧制,如果轧件的厚度大、温度高、压下量大,就不能保证带钢的顺利咬入。为了保证带钢的顺利咬入,用压下量来保证咬入条件,即轧制各道次压下量应小于最大允许压下量,计算公式如式(1)所示

$$[0012] \quad \Delta h_i < \Delta h_{\max} = D \left(1 - \frac{1}{\sqrt{1+f^2}} \right) \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (1)$$

[0013] 其中 Δh_i 表示第 i 个机架的压下量; Δh_{\max} 为最大允许压下量; f 为轧辊与轧件间的摩擦系数; D 表示轧辊的直径。

[0014] (2) 轧辊强度条件

[0015] 当轧制压力大于轧辊所能承受的最大压力时,轧辊某部分可能发生破坏。为保证轧辊强度,应对轧制压力和轧制力矩加以限制,保证轧制过程中不会超过最大的轧制力和轧制力矩,计算公式如式(2)式(3)所示:

$$[0016] \quad P_i < P_{i\max} \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (2)$$

$$[0017] \quad M_i < M_{i\max} \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (3)$$

[0018] 其中 P_i 为第 i 个机架的轧制力; $P_{i\max}$ 为第 i 个机架允许的最大轧制力; M_i 为第 i 个机架的轧制力矩; $M_{i\max}$ 为第 i 个机架允许的最大轧制力矩。

[0019] (3) 电机能力条件

[0020] 电机能力即电机过载的限制条件,轧制功率应满足轧机主电机的负荷条件,要求轧制功率不得超过其额定功率,计算公式如式(4)所示

$$[0021] \quad N_i < N_{i\max} \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (4)$$

[0022] 其中 N_i 为第 i 个机架的轧制功率; $N_{i\max}$ 为第 i 个机架允许的最大轧制功率。

[0023] (4) 板形质量限制条件

[0024] 为了保持板形质量达到客户要求,要优化安排后几架的压下量,使其相应的轧制力之间有一定的比例,防止带钢出现边浪,计算公式如式(5)所示

$$[0025] \quad -40 \left(\frac{h_i}{b} \right)^{1.86} < \Delta CR_i < 80 \left(\frac{h_i}{b} \right)^{1.86} \quad i = n-3, n-2, n-1, n$$

[0026] (5)

[0027] 其中 ΔCR_i 为板坯通过第 i 个机架时的入口凸度和出口凸度之差; h_i 为第 i 个机架的出口厚度; b 为板坯的宽度。

[0028] 步骤2:确定控制的目标。本方法控制的目标是使轧制总的能耗达到最小,能耗计

算公式如 (6) 式所示：

$$[0029] \quad \min \sum_{i=1}^n N_i \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (6)$$

[0030] 其中 :n- 精轧机组机架数；

[0031] N_i - 第 i 机架电机功率, 计算公式如式 (7) 所示：

$$[0032] \quad N_i = \frac{2\pi * 10^3}{60 * 102} c_i * M_i \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (7)$$

[0033] 式 (7) 中 c_i 为转数；

[0034] M_i 为第 i 个机架的水平辊的力矩, 计算公式如式 (8) 所示：

$$[0035] \quad M_i = 2P_i \phi_c' \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (8)$$

[0036] 其中, ϕ 是力臂系数；

[0037] P_i 是水平辊的轧制力计算公式如式 (9) 所示：

$$[0038] \quad P_i = B l_c' Q_p K \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (9)$$

[0039] 式 (9) 中 B 为坯料的宽度；

[0040] l_c' 为接触弧长, 计算公式如式 (10) 所示：

$$[0041] \quad l_c' = \sqrt{R' \Delta h_i} \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (10)$$

[0042] v 式 (5) 中, R' 为压扁后的轧辊半径, 计算公式如式 (11) 所示：

$$[0043] \quad R'_i = R_i \cdot (1 + 2.2 \times 10^{-5} \frac{P_i}{B \Delta h_i}) \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (11)$$

[0044] R_i 为第 i 个机架的工作辊的半径；

[0045] Δh_i 表示压下量计算公式如式 (12) 所示：

$$[0046] \quad \Delta h_i = \Delta h_{i-1} - h_i \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (12)$$

[0047] 式中 h_{i-1} 为第 i 机架的入口厚度 ; h_i 为第 i 机架的出口厚度；

[0048] Q_p 为外摩擦应力状态系数, 计算公式如式 (13) 所示：

$$[0049] \quad Q_p = 0.8206 + 0.2376 l_c / h_c + 0.1006 \varepsilon l_c / h_c - 0.3768 \varepsilon \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (13)$$

[0050] 式中 ε 是相对压下量计算公式如式 (14) 所示

$$[0051] \quad \varepsilon = \frac{h_{i-1} - h_i}{h_{i-1}} \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (14)$$

[0052] l_c 是接触弧的水平投影长度, 计算公式如式 (15) 所示：

$$[0053] \quad l_c = \sqrt{R_i \Delta h_i} \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (15)$$

[0054] h_c 是轧制时轧件的入口厚度和出口厚度的平均值, 计算公式如式 (16) 所示

$$[0055] \quad h_c = \frac{h_{i-1} + h_i}{2} \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (16)$$

[0056] K 平面变形下的变形阻力, 计算公式为式 (17) 式 (18)

$$[0057] \quad K = 1.15 \sigma \quad (17)$$

$$[0058] \quad \sigma = \sigma_0 \exp(a_1 T + a_2) \left(\frac{U_m}{10}\right)^{(a_3 T + a_4)} \left[a_6 \left(\frac{e}{0.4}\right)^{a_5} - (a_6 - 1) \left(\frac{e}{0.4}\right) \right] \quad (18)$$

[0059] 其中, T 是轧制时钢板的温度；

[0060] e 为真正变形程度, 计算公式如式 (19) 所示

[0061] $e = \ln \frac{h_{i-1}}{h_i} \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (19)$

[0062] u_m 为平均变形速度, 计算公式如式 (20) 所示

[0063] $u_m = \frac{v_i}{L_c} e \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (20)$

[0064] v_i 是第 i 个机架的轧制速度, 计算公式如式 (21) 所示

[0065] $v_i = \frac{v_n h_n}{h_i} \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (21)$

[0066] v_n 为最后一个轧机的轧辊线速度;

[0067] h_n 为最后一个轧机的出口厚度;

[0068] $\sigma_0, a_1 \sim a_6$ 均为回归系数。

[0069] T_i 为第 i 个轧机的轧制温度, 计算公式如式 (22) 所示

[0070] $\frac{T_i - T_w}{T_{F0} - T_w} = \exp(-K_a \frac{\sum_{i=1}^n L_i}{h_n v_n}) \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (22)$

[0071] L_1 - 精轧入口测温点到 F_1 的距离;

[0072] L_{i-i-1} 机架到 i 机架的距离 ($i = 2 \sim 7$); m

[0073] L_n - 精轧末架到精轧出口测温仪所在点的距离; m

[0074] T_w - 机架间喷水的水温;

[0075] K_a - 综合对流冷却系数;

[0076] T_{F0} - 精轧机组入口处估算温度, 计算公式如式 (23) 所示

[0077] $T_{F0} = 100 \left(\frac{6\varepsilon\sigma}{100\gamma c_p h_0} \tau + \left(\frac{T_{Rc}}{100} \right)^{-3} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (23)$

[0078] σ 为斯蒂芬 - 波尔斯曼常数;

[0079] ε 为黑度;

[0080] C_p 为比热容;

[0081] γ 为密度;

[0082] τ 为从粗轧机出口到精轧机入口的带钢运动时间;

[0083] h_0 为粗轧机组出口处实测厚度;

[0084] T_{Rc} 为粗轧机组出口处实测温度。

[0085] 步骤 3: 确定控制方案的机器参数和轧件的参数, 机器参数包括运行时间, 精轧机组的工作辊直径、支承辊直径、电机的额定功率、电机的额定转速、最大轧制力和最大轧制力矩; 轧件的参数包括轧件的宽度 B , 轧件的来料厚度 H , 轧件的成品厚度 h , 粗轧机的出口温度 T_{FC} , 精轧出口温度 T 。

[0086] 步骤 4: 利用改进的差分进化算法得到各机架出口厚度, 具体步骤如下:

[0087] 步骤 4.1: 构造初始种群, 并设置种群规模和迭代次数。本发明初始种群采用实数编码, 初始种群产生的步骤如下:

[0088] 设种群中有 N 个 n 维个体, 每个个体向量 X_i 的表示形式为 $X_i = [x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{in}]$ 。

- [0089] 步骤 4.1.1:令 $x_{01} = 500$, $x_{0n} = -500$, $Slot = \frac{1000}{n-1}$ 。
- [0090] 步骤 4.1.2:利用式 (24) 计算 x_{0j} , 得到 X_0 , $X_0 = [x_{01}, x_{02}, \dots, x_{0n}]$ 。
- [0091] $x_{0j} = x_{0j} - Slot$, $j = 2, 3, \dots, n-1$ (24)
- [0092] 步骤 4.1.3:令 $i = 1$ 。
- [0093] 步骤 4.1.4:利用式 (25), 以 X_0 为模板, 产生种群中的个体 X_i , $i = 1, 2, \dots, N$ 。 $x_{i1} = 500$, $x_{in} = -500$,
- [0094] $x_{ij} = x_{0j} + f \cdot Slot$, $j = 2, 3, \dots, n-1$ (25)
- [0095] 式中, f 是随机数, $f \in (-1, 1)$ 。
- [0096] 步骤 4.1.5: $i = i+1$ 。
- [0097] 步骤 4.1.6:若 $i = N$, 则初始种群构造结束; 否则, 转入步骤 4.1.4。
- [0098] 步骤 4.2:改进的差分进化算法的个体向量从实数空间映射到解向量空间, 具体步骤如下:
- [0099] 步骤 4.2.1:找出个体向量 X 中各个分量的最大值与最小值, 记为 x_{\max} 和 x_{\min} , 令 $v_{\max} = h_0$, $v_{\min} = h_n$, 其中 v_{\max} 和 v_{\min} 分别为 x_{\max} 与 x_{\min} 解码后对应的分量; h_0 为精轧机组入口带钢厚度; h_n 为精轧机组出口带钢厚度。对于 X 中其他的分量, 用式 (26) 映射到解空间:
- [0100]
$$v_i = v_{\max} - \frac{(x_{\max} - x_i)}{(x_{\max} - x_{\min})} * (v_{\max} - v_{\min}) \quad i = 1, 2, \dots, n,$$
- [0101] $i \neq \max, \min$ (26)
- [0102] 步骤 4.2.2:将解码后的中间向量 V 的分量 (v_1, v_2, \dots, v_n) 按从大到小排列。
- [0103] 步骤 4.2.3:用排列后的分量 v_i 更新解向量 U : $u_1 = v_{\max}, \dots, u_n = v_{\min}$ 。
- [0104] 步骤 4.3:对于解码之后的解向量, 如果不满足约束条件, 执行修复策略, 具体步骤如下:
- [0105] 步骤 4.3.1:若解码后的解向量不满足约束条件, 则进入步骤 4.3.2; 否则, 保存当前解向量, 结束修复策略。
- [0106] 步骤 4.3.2:计算出解向量对应的各个机架的压下量 Δh_i , 并将这些压下量从大到小排列: $\Delta h_1 = \Delta h_{\max}, \dots, \Delta h_n = \Delta h_{\min}$ 。
- [0107] 步骤 4.3.3:为各个机架重新分配的压下量, 并重新计算各机架的出口厚度, 更新解向量。 $x_1 = h_0 + \Delta h_1$, $x_2 = x_1 + \Delta h_2, \dots, x_n = x_{n-1} + \Delta h_n$ 。
- [0108] 步骤 4.3.4:如果更新后的解向量能满足约束条件, 保存当前解向量, 结束修复策略; 否则, 进入步骤 4.3.5。
- [0109] 步骤 4.3.5:令 $i = n$ 。
- [0110] 步骤 4.3.6:检查解向量的分量 x_i 是否满足约束条件。如果 x_i 不满足约束, 进入步骤 4.3.7, 否则, 进入步骤 4.3.9。
- [0111] 步骤 4.3.7: $x_i = x_i - 0.1$, $i = 1, 2, \dots, n$ 。
- [0112] 步骤 4.3.8:如果 $x_i \leq x_{i+1}$ ($i = 1, 2, \dots, n$), 转入步骤 4.3.11; 如果 x_i 满足约束, 则保留 x_i , 进入步骤 4.3.9; 否则, 继续步骤 4.3.7。
- [0113] 步骤 4.3.9:如果 $i = 1$, 保存当前解向量, 结束修复策略; 否则, 进入步骤 4.3.10。
- [0114] 步骤 4.3.10: $i = i-1$, 进入步骤 4.3.6。

[0115] 步骤 4.3.11:修复失败,给目标函数加一个大的惩罚值,抛弃当前解。

[0116] 步骤 4.4:计算种群中的每一个个体的适应度值。本发明将控制目标作为计算个体适应度值的适应度函数。

[0117] 步骤 4.5:检查算法终止条件。看适应度值是否达到最小,并且满足本发明考虑的约束条件。若满足算法终止条件,则终止并输出种群中适应度值最优的个体;否则,继续下一步。

[0118] 步骤 4.6:对算法的种群进行变异操作。对于个体 $X_{i,G} : i = 1, 2, \dots, N$, 一个新的个体 $V_{i,G+1}$ 可通过式 (27) 产生:

$$[0119] \quad V_{i,G+1} = X_{r_1,G} + F * (X_{r_2,G} - X_{r_3,G}) \quad (27)$$

[0120] 其中, r_1, r_2 和 r_3 是从区间 $[1, N]$ 上随机选取的互不相同的整数,且不同于下标指数 i , 变异因子 F 取值在 $[0, 1]$ 之间。

[0121] 步骤 4.7:对算法的种群进行交叉操作。交叉操作如式 (28) 所示。

$$[0122] \quad v_{i,j}^{G+1} = \begin{cases} u_{i,j}^{G+1}, & \text{if } (\text{randb}(j) \leq CR) \text{ or } (j = \text{mbr}(i)) \\ x_{i,j}^G, & \text{if } (\text{randb}(j) > CR) \text{ and } (j \neq \text{mbr}(i)) \end{cases}, \quad (28)$$

[0123] $i = 1, 2, \dots, N, j = 1, 2, \dots, Dv$

[0124] 式中, $v_{i,j}^{G+1}$ 是 V_i^{G+1} 的第 j 维分量; $u_{i,j}^{G+1}$ 是 U_i^{G+1} 的第 j 维分量, U_i^{G+1} 为变异产生的个体; $x_{i,j}^G$ 是 X_i^G 的第 j 维分量, X_i^G 为父代个体; $\text{randb}(j)$ 是 $[0, 1]$ 之间均匀分布的概率; $\text{mbr}(i)$ 表示 $[1, Dv]$ 之间随机生成的一个整数, CR 是交叉概率,一般取 $[0, 2]$ 之间的数。这里

[0125]

$$CR = CR_{\min} + \frac{g}{G} \left(1 - CR_{\min} \cdot \frac{F(X_i)}{F(U_i) + F(X_i)} \right) \quad (29)$$

[0126] 式中, $F(X_i)$ 表示第 i 个父代个体的适应度值; $F(U_i)$ 表示第 i 个父代对应的变异个体的适应度值; CR_{\min} 为最小交叉概率; g 为当前迭代代数; G 为算法最大迭代代数。

[0127] 步骤 4.8:对种群中的子代进行选择操作。差分进化算法的选择操作是在父代群体与子代群体之间,父代个体与子代个体一对一的竞争。算法的选择操作如式 (30) 所示。

$$[0128] \quad X_i^{G+1} = \begin{cases} V_i^{G+1}, & \text{if } (F(V_i^{G+1}) \leq F(X_i^G)) \\ X_i^G, & \text{otherwise} \end{cases}, \quad i = 1, 2, \dots, N \quad (30)$$

[0129] 步骤 4.9:返回步骤 4.2。

[0130] 步骤 5:根据步骤 4 得到的各机架的出口厚度来确定各机架的穿带速度、温度、轧制力、轧制功率、总的能耗。

[0131] 步骤 6:判断轧制力、轧制力矩、轧制功率是否超出机器的额定值,超出,则重复步骤 4, 否则判断总的能耗是否达到最小,是则输出最终值,否则重复步骤 4, 直到达到最小值。

[0132] 有益效果:本发明通过改进的差分进化算法对热轧生产过程各机架的负荷进行优化设定,达到降低能耗的目的,按照本发明的机架负荷分配方法,各机架的出口厚度、轧制功率其结果要好于经验负荷分配结果,同时由于轧制功率优化分配,减少了设备损害,提高

了生产效率和设备利用率。

附图说明

[0133] 图 1 钢铁热轧生产示意图；

[0134] 图 2 本发明实施例机架负荷分配方法流程图；

[0135] 图 3 本发明实施例七机架两种方法各机架的轧制功率分配对比；

[0136] 图 4 本发明实施例六机架两种方法各机架的轧制功率分配对比。

具体实施方式

[0137] 下面结合实施例和附图对本发明做进一步说明。

[0138] 实施例 1

[0139] 以七机架热轧精轧机组生产线为例。钢板材质为 Q235, 带钢宽度 B_0 为 1535mm, 带钢厚度 H_0 为 36.7mm, 成品厚度 h_n 为 5.7mm, 粗轧出口温度 t_{RC} 为 1067℃, 精轧出口温度 t_{FC} 为 891℃, 运行时间是 21s, 机架间的距离 $L = 5.5m$, $L_1 = 14.5m$, $L_8 = 8.5m$, 轧辊与轧件间的摩擦系数 $f = 0.45$, 密度 $\gamma = 7800kg/m^3$, 斯蒂芬-波尔斯曼常数 $\sigma = 5.6662J/m^2SK^4$, 末机架穿带速度 $v_7 = 10m/s$, 其他主要设备的机械及工艺参数见表 1。

[0140] 表 1 精轧机组主要参数

[0141]

参数	机架	F ₁	F ₂	F ₃	F ₄	F ₅	F ₆	F ₇
工作辊直径/mm		800	800	800	760	760	760	760
支撑辊直径/mm		1570	1570	1570	1570	1570	1570	1570
电机额定功率/KW		7600	7600	7600	7600	7350	7350	5000
电机额定转速 (m/s)		1.74	2.82	4.33	5.97	7.36	8.56	9.55
最大轧制力 (MN)		40	40	40	32	32	32	32
最大轧制力矩 (KN.M)		500	500	500	500	500	500	500

[0142] 执行本发明方法, 具体如下:

[0143] 步骤 1: 确定控制的约束条件, 约束条件如下式所示:

$$[0144] \quad \Delta h_i < \Delta h_{\max} = D \left(1 - \frac{1}{\sqrt{1+f^2}} \right) \quad i = 1, \dots, 7$$

$$[0145] \quad P_i < P_{i\max} \quad i = 1, \dots, 7$$

$$[0146] \quad M_i < M_{i\max} \quad i = 1, \dots, 7$$

$$[0147] \quad N_i < N_{i\max} \quad i = 1, \dots, 7$$

$$[0148] \quad -40 \left(\frac{h}{b} \right)^{1.86} < \Delta CR_i < 80 \left(\frac{h}{b} \right)^{1.86} \quad i = 4, \dots, N$$

[0149] 步骤 2: 确定控制的目标。本发明控制的目标是使总的能耗达到最小, 能耗计算公式如下式:

$$[0150] \quad \min \sum_{i=1}^n N_i \quad i = 1, \dots, 7, n = 7$$

[0151] 步骤 3: 确定控制方案的机器参数和轧件的参数。包括轧件的宽度 $B = 1535mm$, 轧件的来料厚度 $H = 36.7mm$, 轧件的成品厚度 $h = 5.7mm$, 粗轧机的出口温度 $T_{RC} = 1067^\circ C$,

精轧出口温度 $T = 891^{\circ}\text{C}$, 运行时间 $\tau = 21\text{s}$, 精轧机组的工作辊直径, 支撑辊直径, 电机的额定功率, 电机的额定转速, 最大轧制力, 最大轧制力矩如表 1 所示。

[0152] 步骤 4 : 利用改进的差分进化算法得到各机架的出口厚度, 具体步骤如下 :

[0153] 步骤 4.1 : 构造初始种群, 并设置种群规模和最大迭代次数。本发明种群是 60, 最大迭代次数是 1000, 初始种群采用实数编码, 初始种群产生的步骤如下 :

[0154] 设种群中有 60 个 7 维个体, 每个个体向量 X_i 的表示形式为 $X_i = [x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{i7}]$ 。

[0155] 步骤 4.1.1 : 令 $x_1 = 500, x_7 = -500, Slot = \frac{1000}{7-1}$ 。

[0156] 步骤 4.1.2 : 利用式 (24) 计算 x_j , 得到 $X_0 : X_0 = [x_{01}, x_{02}, \dots, x_{07}]$ 。

[0157] $x_j = x_{j-1} - Slot, j = 2, 3, \dots, 6$ (24)

[0158] 步骤 4.1.3 : 令 $i = 1$ 。

[0159] 步骤 4.1.4 : 利用式 (25), 以 X_0 为模板, 产生种群中的个体 $X_i, i = 1, 2, \dots, N$ 。 $x_{i1} = 500, x_{i7} = -500, x_{ij} = x_{0j} + f \cdot Slot, j = 2, 3, \dots, 6$ (25)

[0160] 式中, f 是随机数, $f \in (-1, 1)$ 。

[0161] 步骤 4.1.5 : $i = i + 1$ 。

[0162] 步骤 4.1.6 : 若 $i = N$, 则初始种群构造结束 ; 否则, 转入步骤 4.1.4。

[0163] 步骤 4.2 : 自适应差分下降算法的个体向量从实数空间映射到解向量空间。具体步骤如下 :

[0164] 步骤 4.2.1 : 找出个体向量 X 中各个分量的最大值与最小值, 记为 x_{\max} 和 x_{\min} , 令 $v_{\max} = h_0, v_{\min} = h_7$ (v_{\max} 和 v_{\min} 分别为 x_{\max} 与 x_{\min} 解码后对应的分量 ; h_0 为精轧机组入口带钢厚度 ; h_7 为精轧机组出口带钢厚度)。对于 X 中其他的分量, 用式 (26) 映射到解空间 :

[0165] $v_i = v_{\max} - \frac{(x_{\max} - x_i)}{(x_{\max} - x_{\min})} * (v_{\max} - v_{\min}), i = 1, 2, \dots, 7, i \neq \max, \min$ (26)

[0166] 步骤 4.2.2 : 将解码后的中间向量 V 的分量 (v_1, v_2, \dots, v_7) 按从大到小排列。

[0167] 步骤 4.2.3 : 用排列后的分量 v_i 更新解向量 $U : u_1 = v_{\max}, \dots, u_7 = v_{\min}$ 。

[0168] 步骤 4.3 : 对于解码之后的解向量, 如果不满足约束条件, 采用下面的修复策略, 具体步骤如下 :

[0169] 步骤 4.3.1 : 若解码后的解向量不满足约束条件, 则进入步骤 4.3.2 ; 否则, 保存当前解向量, 结束修复策略。

[0170] 步骤 4.3.2 : 计算出解向量对应的各个机架的压下量 Δh_i , 并将这些压下量从大到小排列 : $\Delta h_1 = \Delta h_{\max}, \dots, \Delta h_7 = \Delta h_{\min}$ 。

[0171] 步骤 4.3.3 : 为各个机架重新分配的压下量, 并重新计算各机架的出口厚度, 更新解向量。 $x_1 = h_0 + \Delta h_1, x_2 = x_1 + \Delta h_2, x_7 = x_6 + \Delta h_7$ 。

[0172] 步骤 4.3.4 : 如果更新后的解向量能满足约束条件, 保存当前解向量, 结束修复策略 ; 否则, 进入步骤 4.3.5。

[0173] 步骤 4.3.5 : 令 $i = 7$ 。

[0174] 步骤 4.3.6 : 检查解向量的分量 x_i 是否满足约束条件。如果 x_i 不满足约束, 进入步骤 4.3.7, 否则, 进入步骤 4.3.9。

[0175] 步骤 4.3.7 : $x_i = x_i - 0.1$ 。

[0176] 步骤 4.3.8 : 如果 $x_i \leq x_{i+1}$, 转入步骤 4.3.11 ; 如果 x_i 满足约束, 则保留 x_i , 进入步骤 4.3.9 ; 否则, 继续步骤 4.3.7。

[0177] 步骤 4.3.9 : 如果 $i = 1$, 保存当前解向量, 结束修复策略 ; 否则, 进入步骤 4.3.10。

[0178] 步骤 4.3.10 : $i = i - 1$, 进入步骤 4.3.6。

[0179] 步骤 4.3.11 : 修复失败, 给目标函数加一个大的惩罚值, 抛弃当前解。

[0180] 步骤 4.4 : 为种群中的每一个个体计算适应度值。本发明采用控制目标作为自适应差分下降算法的适应度值函数, 根据公式 (6), 计算适应度值 $F = \sum_{i=1}^7 N_i$ 。

[0181] 步骤 4.5 : 检查算法终止条件。看适应度值 F 是否达到最小, 并且满足本发明考虑的约束条件。若满足算法终止条件, 则终止并输出种群中适应度值最优的个体 ; 否则, 继续下一步。

[0182] 步骤 4.6 : 对算法的种群进行变异操作。对于个体 $X_{i,G} : i = 1, 2, \dots, 60$, 一个新的个体 $V_{i,G+1}$ 可通过式 (27) 产生 :

[0183]

$$V_{i,G+1} = X_{r_1,G} + F * (X_{r_2,G} - X_{r_3,G}) \quad (27)$$

[0184] 这里 r_1, r_2 和 r_3 是从区间 $[1, N]$ 上随机选取的互不相同的整数, 且不同于下标指数 i , 变异因子 F 取值在 $[0, 1]$ 之间。

[0185] 步骤 4.7 : 对算法的种群进行交叉操作。交叉操作如式 (28) 所示。

$$[0186] \quad v_{i,j}^{G+1} = \begin{cases} u_{i,j}^{G+1}, & \text{if } (\text{randb}(j) \leq 0.4 + \frac{g}{1000} \left(1 - 0.4 \cdot \frac{F(X_i)}{F(U_i) + F(X_i)} \right)) \text{ or } (j = \text{mbr}(i)) \\ x_{i,j}^G, & \text{if } (\text{randb}(j) > 0.4 + \frac{g}{1000} \left(1 - 0.4 \cdot \frac{F(X_i)}{F(U_i) + F(X_i)} \right)) \text{ and } (j \neq \text{mbr}(i)) \end{cases}$$

[0187] $i = 1, 2, \dots, 60, j = 1, 2, \dots, 7$ (28)

[0188] 步骤 4.8 : 对种群中的子代进行选择操作。差分进化算法的选择操作是在父代群体与子代群体之间, 父代个体与子代个体一对一的竞争。算法的选择操作如式 (30) 所示。

$$[0189] \quad X_i^{G+1} = \begin{cases} V_i^{G+1}, & \text{if } (F(V_i^{G+1}) \leq F(X_i^G)) \\ X_i^G, & \text{otherwise} \end{cases}, \quad i = 1, 2, \dots, 60$$

[0190] (30)

[0191] 步骤 4.7 : 返回步骤 4.2。

[0192] 步骤 5、根据步骤 4 得到的各机架的出口厚度来确定各机架的穿带速度 v 、温度 T 、轧制力 P 、轧制功率 N 、总的能耗 F 。

[0193] 步骤 4 : 判断轧制力、轧制力矩、轧制功率是否超出机器的额定值, 超出, 则重复步骤 4, 否则判断总的能耗是否达到最小, 是则输出最终值, 否则重复步骤 4, 直到达到最小值。经验法和本发明方法得到的各机架的负荷分配结果如表 3 所示。

[0194] 表 3 经验法和本发明方法比较结果

[0195]

		F1	F2	F3	F4	F5	F6	F7	目标函数/KW
经验法	入口厚度/mm	36.7	24.89	18.04	12.20	9.31	7.66	6.47	20992.55
	出口厚度/mm	19.95	13.3	9.98	8.0	6.91	6.2	5.7	
	轧制功率/KW	2715	3440	5557	3505	2344	2052	1380	
	轧制力/MN	37.26	25.62	17.98	12.93	8.34	5.93	4.48	
本发明方法	入口厚度/mm	36.7	20.6	14.02	11.08	8.83	7.32	6.2	17825
	出口厚度/mm	20.6	14.02	11.08	8.83	7.32	6.2	5.7	
	轧制功率	4313.65	3820.02	2345.14	2575.19	2130.06	1919.18	721.77	

[0196]

	/KW								
	轧制力/MN	35.86	24.59	14.92	13.59	10.91	9.44	4.51	

[0197] 从表 3 和图 3 来看,用本发明方法比用经验法得到的负荷分配更加合理,消耗的总功率也有所下降,用经验法得到的目标函数是 20992.55KW,用本发明方法的目标函数是 17825KW,节省能耗 3167.55KW,从而说明采用本发明的方法,可以达到节省能耗的目的。

[0198] 实施例 2

[0199] 如果热轧精轧机组的轧机不是七机架,本发明也适用。以六机架热轧精轧机组生产线为例。具体步骤同实施例 1,将 n 换成 6,负荷分配得到的各机架出口厚度、轧制功率、轧制力、目标函数如表 4,经验法和本发明方法得到的轧制功率对比如图 4 所示。

[0200] 表 4 经验法和改进的差分算法比较结果

[0201]

		F1	F2	F3	F4	F5	F6	目标函数/KW
经验法	入口厚度/mm	36.7	25.53	18.57	12.66	7.84	6.52	22457.7
	出口厚度/mm	25.53	18.57	12.66	7.84	6.52	5.7	
	轧制功率/KW	2493.85	4244.54	5804.86	4616.66	3766.24	1531.54	
	轧制力/MN	24.89	24.93	26.16	20.07	14.56	7.50	
改进差分进化算法	入口厚度/mm	36.7	19.95	13.3	9.98	7.98	6.60	18189.6
	出口厚度/mm	19.85	13.3	9.98	7.98	6.60	5.7	
	轧制功率/MN	4570.62	4004.54	3013.09	2345.56	2481.13	1774.64	
	轧制力/KW	37.26	25.62	17.98	13.11	11.03	8.28	

[0202] 从表 4 和图 4 来看,用本发明方法比用经验法得到的负荷分配更加合理,消耗的总功率也有所下降,经验法得到的目标函数是 22457.7KW,用本发明方法的目标函数是 18189.6KW,节省能耗 4268.1KW,能耗降低 19%,从而说明采用本发明的方法,可以达到节

省能耗的目的。

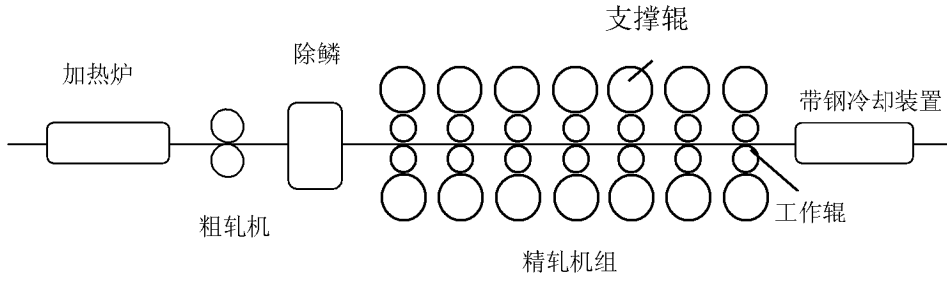


图 1

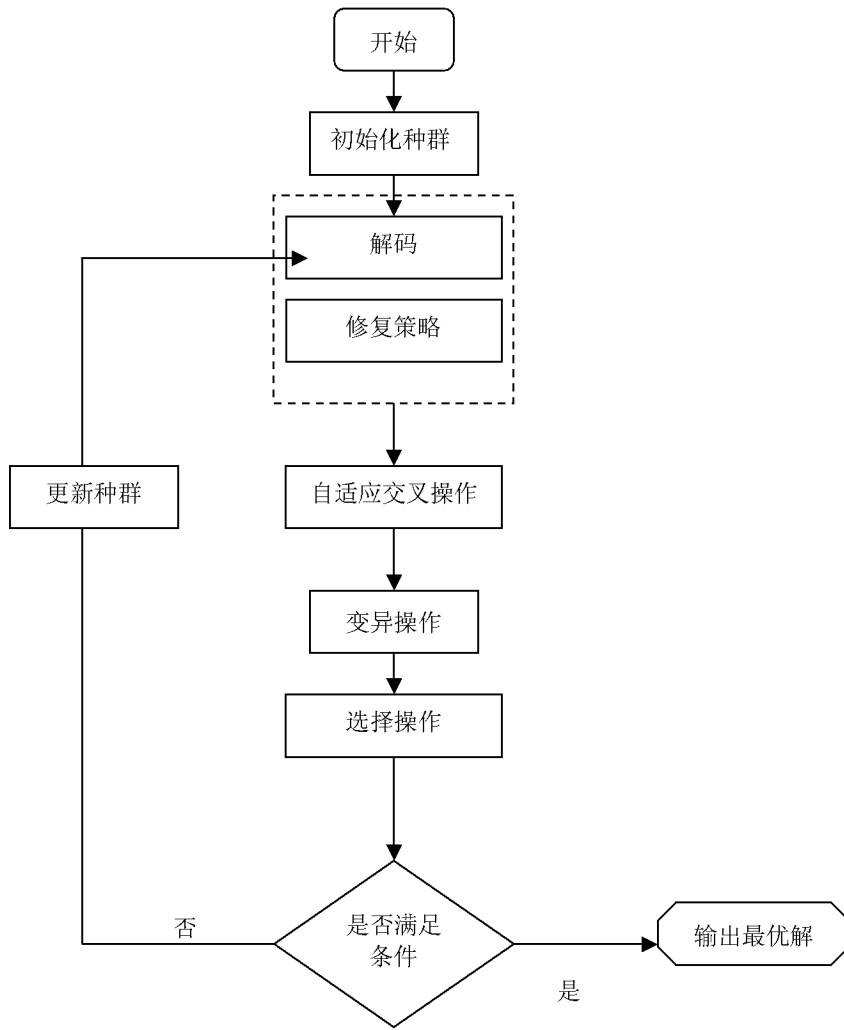


图 2

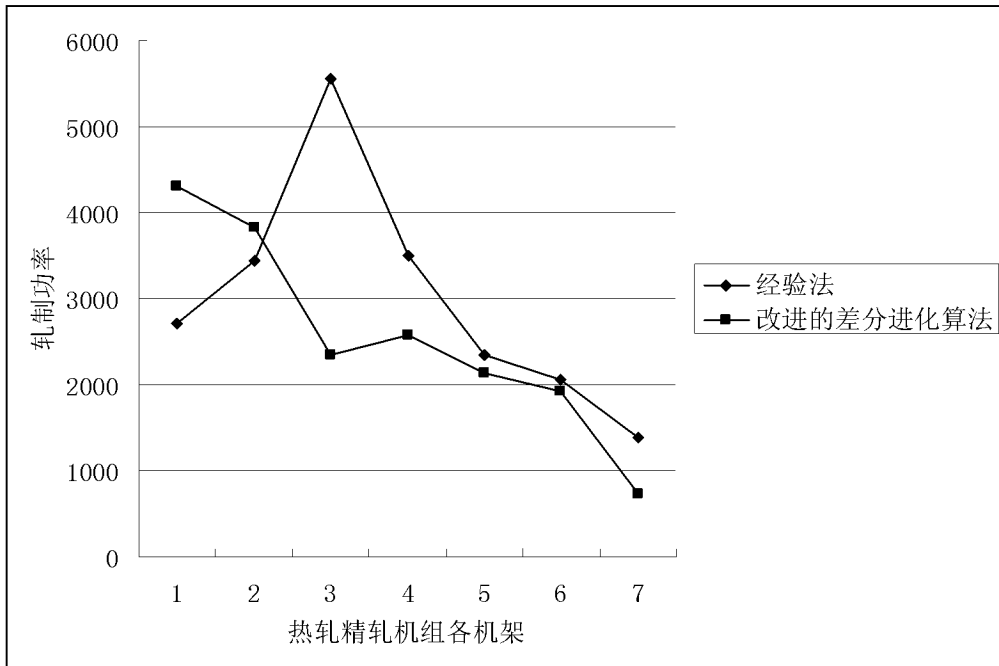


图 3

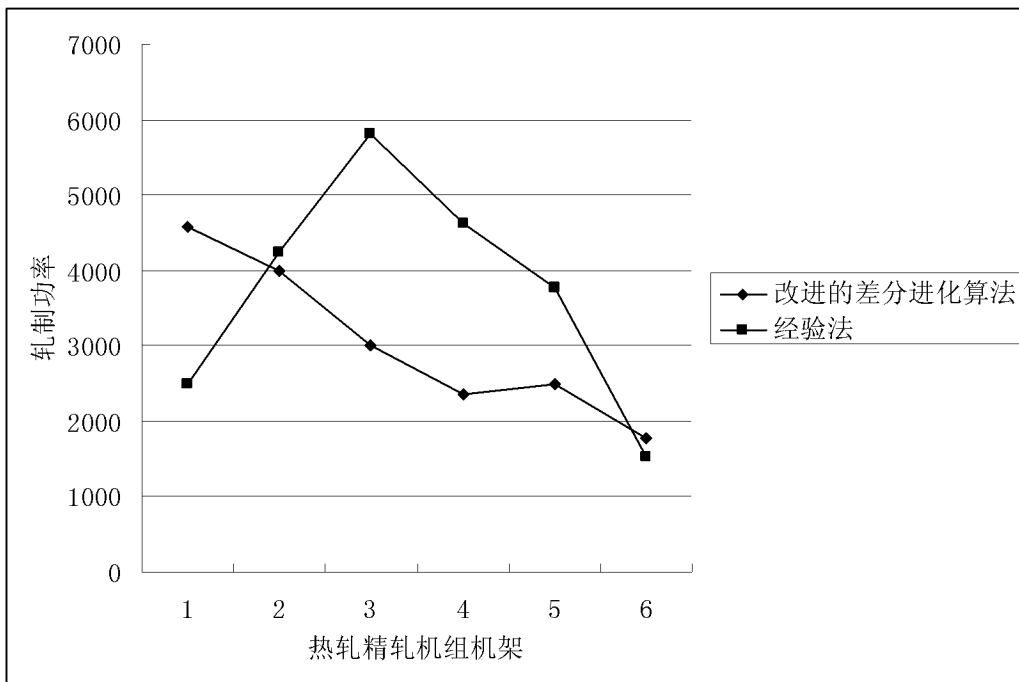


图 4