



(12) 发明专利

(10) 授权公告号 CN 102513351 B

(45) 授权公告日 2014. 01. 15

(21) 申请号 201110439759. 6

JP 特开 2003 - 164907 A, 2003. 06. 10,

(22) 申请日 2011. 12. 24

CN 101003063 A, 2007. 07. 25,

CN 101927267 A, 2010. 12. 29,

(73) 专利权人 东北大学

地址 110819 辽宁省沈阳市和平区文化路 3
号巷 11 号

审查员 强丽慧

(72) 发明人 唐立新 洪悦

(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 1/28 (2006. 01)

B21B 37/00 (2006. 01)

B21B 37/48 (2006. 01)

B21B 38/00 (2006. 01)

(56) 对比文件

CN 100421825 C, 2008. 10. 01,

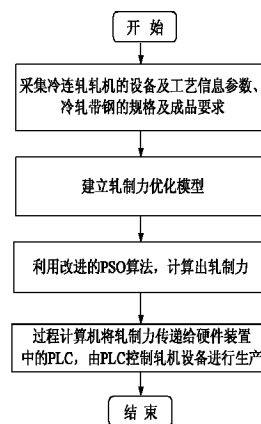
权利要求书4页 说明书8页 附图2页

(54) 发明名称

一种带钢冷连轧轧制方法及装置

(57) 摘要

一种带钢冷连轧轧制方法及装置,属于冶金过程控制技术领域,本发明在带钢冷连轧实际生产现场情况的基础上,充分考虑了轧制力优化计算的合理性,选用了能耗最低为优化目标,并采用了大量实际轧制生产过程中的约束条件,并在轧制机理关系的基础上利用改进的 PSO 优化算法进行最优计算,可以快速计算出优化的轧制规程信息,以避免由于经验规程没有综合考虑而带来的额外成本,通过本发明的优化方法及装置,可以充分发挥整个冷连轧系统的生产能力,在改善产品质量的同时,降低轧机的电机总功率,从而实现节能降耗。



1. 一种带钢冷连轧轧制方法,其特征在于:包括以下步骤:

步骤 1:采集数据,包括冷连轧轧机的设备参数、冷连轧轧机的工艺信息参数、冷轧带钢的规格参数及冷轧带钢的成品要求参数;

步骤 2:以轧制时每个机架所消耗的能耗最小为目标,建立轧制力优化模型:包括以下步骤:

步骤 2-1:确定优化目标为轧制时使每个机架所消耗的电机功率之和最低,公式如下:

$$\text{Minimize } \sum_{i=1}^n HP_i \quad i=1,2,\dots,n \quad (1)$$

式中, n 为冷连轧系统的机架总数, i 为机架的编号, HP_i 为第 i 个机架的电机功率;

所述的电机功率,计算过程如下:

利用机理公式确定轧制工艺参数,所述的轧制工艺参数包括:工作辊压扁半径、机架的中性角、机架的前滑值、带钢出口速度、机架的轧制速度、轧制力、电机转矩、电机轧制转矩和电机损失转矩和电机功率 HP_i ,具体公式如下:

计算机架出口厚度,公式如下:

$$h_i = H_i - \alpha_i \frac{P_i}{K_{pi}} + \beta_i \quad i=1,2,\dots,n \quad (2)$$

式中, h_i 为第 i 个机架出口厚度, P_i 为第 i 个机架的轧制力, K_{pi} 为第 i 个机架的轧制力横向刚度, α_i 、 β_i 为第 i 个机架的分配系数和调整系数;

利用海特科克公式,计算工作辊压扁半径,公式如下:

$$R'_i = \left(1 + \frac{C_H \cdot P_i}{B \cdot (H_i - h_i)} \right) \cdot R_i \quad i=1,2,\dots,n \quad (3)$$

式中, R'_i 为第 i 个工作辊压扁半径, R_i 为第 i 个工作辊半径, B 带钢宽度, C_H 为海特科克公式系数,取值为 0.214×10^{-3} , H_i 为第 i 个机架入口厚度;

计算机架的中性角,公式为:

$$\phi_i = \frac{1}{2} \cdot \sqrt{\frac{H_i - h_i}{R_i}} \left(1 - \frac{1}{2\mu_i} \sqrt{\frac{H_i - h_i}{R_i}} \right) \quad i=1,2,\dots,n \quad (4)$$

式中, ϕ_i 为第 i 个机架的中性角, μ_i 为第 i 个机架的摩擦系数;

利用 BLAND-FORD 前滑公式计算机架的前滑值,公式如下:

$$f_i = \frac{R'_i}{h_i} \cdot \phi_i^2 \quad i=1,2,\dots,n \quad (5)$$

式中, f_i 为第 i 个机架的前滑值;

根据秒流量恒等法则计算带钢出口速度,公式如下:

$$v_i = \frac{v_m h_m}{h_i} \quad i=1,2,\dots,n \quad (6)$$

式中, v_i 为第 i 个机架的带钢出口速度, v_m 为末机架的带钢出口速度, h_m 为末机架的带钢出口厚度;

计算机架的轧制速度,公式如下:

$$vr_i = \frac{v_i}{1+f_i} \quad i=1,2,\dots,n \quad (7)$$

式中, vr_i 为第 i 个机架的轧制速度;

利用 HILL 公式计算轧制力 P_i , 公式如下:

$$D_{pi} = 1.08 + 1.79\mu_i\xi_i\sqrt{1-\xi_i}\sqrt{\frac{R_i'}{h_i}} - 1.02\xi_i$$

$$P_i = BD_{pi}k_i\sqrt{R_i'(H_i-h_i)} \quad i=1,2,\dots,n \quad (8)$$

$$\xi_i = \frac{H_i-h_i}{H_i}$$

式中, D_{pi} 为第 i 个机架的摩擦影响系数, ξ_i 为第 i 个机架的压下率, k_i 为第 i 个机架的平均变形抗力和张应力共同影响系数;

计算电机损失转矩, 公式如下:

$$GL_i = 1000f_i(vr_i/R_i) \quad i=1,2,\dots,n \quad (9)$$

式中, GL_i 为第 i 个机架的电机损失转矩;

计算电机轧制转矩, 公式如下:

$$GR_i = 0.8\sqrt{R_i/R_i'}\sqrt{R_i'(H_i-h_i)}P_i \quad i=1,2,\dots,n \quad (10)$$

式中, GR_i 为第 i 个机架的电机轧制转矩;

计算电机转矩, 公式如下:

$$GM_i = GR_i + GL_i \quad i=1,2,\dots,n \quad (11)$$

式中, GM_i 为第 i 个机架的电机转矩;

计算电机功率 HP_i , 公式如下:

$$HP_i = 0.16(vr_i/R_i)GM_i \quad i=1,2,\dots,n \quad (12)$$

步骤 2-2: 确定冷连轧带钢生产正常运行的约束条件, 所述的约束条件包括: 带钢板形约束条件、轧制力约束条件、轧制速度约束条件、电机功率约束条件、电机功率平衡约束条件、机架轧制转矩约束条件、压下率约束条件、轧制力形状约束条件、轧制力平衡约束条件、机架功率形状约束条件;

所述的带钢板形约束条件为保持每个机架出口的相对凸度不变, 并利用凸度方程计算, 公式如下:

$$\left(\frac{CR_i}{h_i} - \frac{\Delta}{H_0}\right) \leq \delta$$

$$CR_i = \frac{P_i}{K_{pi}} \quad i=1,2,\dots,n \quad (13)$$

式中, CR_i 为第 i 个机架的带钢凸度, Δ 为来料的凸度, H_0 为来料的厚度, δ 为给定的数值, 取 0.31;

所述的轧制力约束条件为每个机架的轧制力设定值不高于该机架允许的最大轧制力数值, 公式如下:

$$0 \leq P_i \leq P_{imax} \quad i=1,2,\dots,n \quad (14)$$

式中, P_{imax} 为第 i 个机架允许的最大轧制力;

所述的轧制速度约束条件为每个机架的轧制速度不高于该机架的最大轧制速度,同时要高于能够保证正常生产的最小轧制速度,公式如下:

$$vr_{i\min} \leq vr_i \leq vr_{i\max} \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (15)$$

式中, $Vr_{i\min}$ 为保证正常生产第 i 个机架的最小轧制速度, $Vr_{i\max}$ 为第 i 个机架允许的最大轧制速度;

所述的电机功率约束条件为每个机架的电机功率不高于该机架的最大电机功率,保证电机功率在电机所能够提供的最大功率之内,公式如下:

$$0 \leq HP_i \leq HP_{i\max} \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (16)$$

式中, $HP_{i\max}$ 为第 i 个机架所能够提供的最大功率;

所述的电机功率平衡约束条件为中间相邻机架的电机功率比值应满足如下公式:

$$0.8 \leq (HP_i/HP_{i+1}) \leq 1.6 \quad i = 2, 3, \dots, n-2 \quad (17)$$

所述的机架轧制转矩约束条件为每个机架的轧制转矩不高于该机架的最大轧制转矩,公式如下:

$$0 \leq GR_i \leq GR_{i\max} \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (18)$$

式中, $GR_{i\max}$ 为第 i 个机架的最大轧制转矩;

所述的压下率约束条件为每个机架的压下率不高于最大的压下率,公式如下:

$$0 \leq \xi_i \leq \xi_{i\max} \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (19)$$

式中, $\xi_{i\max}$ 为第 i 个机架的最大压下率;

所述的轧制力形状约束条件为在实际生产过程中基于实际的工艺条件,要保证轧制系统最优运行,整个机架的轧制力呈现递减趋势,公式如下:

$$P_i \leq P_{i-1} \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (20)$$

所述的轧制力平衡约束条件为前 1 机架的轧制力与相邻的后 1 机架的轧制力的比值满足如下公式,使机架的轧制力达到平衡:

$$1 \leq (P_i/P_{i+1}) \leq 1.5 \quad 1 \leq i \leq n-1 \quad (21)$$

所述的机架功率形状约束条件为保证机架间的电机功率平衡,使中间机架的电机发挥最大功效,以实现稳定地轧制,公式如下:

$$\sum_{i=1, n} \frac{HP_i}{2} \leq \sum_{i=2, 3, \dots, n-1} \frac{HP_i}{n-2} \quad i=1, 2, \dots, n \quad (22)$$

步骤 3: 利用改进的 PSO 算法对步骤 2 的轧制力优化模型进行求解,计算出轧制力;

所述的改进的 PSO 算法,包括以下步骤:

步骤 3-1: 初始化 PSO 算法的基本参数,包括:种群规模、粒子维度、最大允许位置、最大允许速度、最大迭代次数、偏差值、惯性权重和加速因子;

步骤 3-2: 根据种群规模、粒子维度信息在轧制力的最大值范围内随机产生每个机架轧制力的初始数值:根据约束条件 (14)、(20)、(21),使用下述公式初始化第一机架至末机架的轧制力数值:

$$P_{i0} = \text{Rand} * (P_{i0\max} - P_{i0\min}) + P_{i0\min} \quad i \in \Omega$$

$$P_{i1} = \text{Rand} * (\min \{P_{i0}, P_{i1\max}\} - \max \{0.667P_{i0}, P_{i1\min}\}) + \max \{0.667P_{i0}, P_{i1\min}\} \quad i \in \Omega \quad (23)$$

$$P_{ij} = \text{Rand} * (P_{ij-1} - P_{ij\min}) + P_{ij\min} \quad i \in \Omega, j \in (1, m)$$

式中, i 表示粒子的编号, j 表示粒子的维度编号, m 为机架的数量, P_{ij} 为第 i 个粒子的

第 j 个维度 (即第 j 个机架) 的轧制力, Ω 为粒子的集合, 粒子的数量为偶数, $P_{i,jmax}$ 和 $P_{i,jmin}$ 分别为第 i 个粒子的第 j 个机架轧制力的最小值和最大值, $Rand$ 为在 $[0, 1]$ 范围内产生随机数的函数;

步骤 3-3: 利用 PSO 算法的粒子更新公式更新每个粒子的位置值和速度值并进行粒子保护比较, 公式如下:

$$\begin{aligned} v_{ijk} &= c_0 v_{ijk-1} + c_1 rand_1(pbest_{ijk-1} - p_{ijk-1}) + c_2 rand_2(gbest_{jk-1} - p_{ijk-1}) \\ p_{ijk} &= p_{ijk-1} + v_{ijk} \end{aligned} \quad (24)$$

式中, k 为迭代次数, v_{ijk} 为第 k 次迭代计算时第 i 个粒子的第 j 个维度的速度值, c_0 为惯性权重, c_1 和 c_2 为加速因子, $rand_1$ 和 $rand_2$ 为在 $[0, 1]$ 范围内产生随机数的函数, $pbest_{ijk-1}$ 为前 $k-1$ 次迭代计算过程中, 第 i 个粒子的第 j 个维度的最佳数值, $gbest_{jk-1}$ 为前 $k-1$ 次迭代计算过程中, 所有粒子的第 j 个维度中最佳的数值, p_{ijk} 为第 k 次迭代计算时为第 i 个粒子的第 j 个维度的位置值;

对每个粒子的第 1 维度, 如果 $p_{i1k-1} + v_{i1k} < P_{i1min}$, 则将 P_{i1min} 赋给 p_{i1k} , 否则, 继续比较, 如果 $p_{i1k-1} + v_{i1k} > P_{i1max}$, 则将 P_{i1max} 赋给 p_{i1k} , 否则, 令 p_{i1k} 等于 $p_{i1k-1} + v_{i1k}$;

对于每个粒子的其他维度, 如果 $p_{ijk-1} + v_{ijk} \leq 0.7p_{ij-1k}$, 则将 $0.7p_{ij-1k}$ 赋给 p_{ijk} , 如果 $p_{ijk-1} + v_{ijk} \geq p_{ij-1k}$, 则将 p_{ij-1k} 赋给 p_{ijk} , 否则令 p_{ijk} 等于 $p_{ijk-1} + v_{ijk}$;

步骤 3-4: 应用 PSO 算法的改进策略更新粒子的位置信息, 方法为:

在每次迭代过程中, 按照目标函数值的大小对种群中的所有粒子进行排序, 目标函数值小的粒子排在前面, 目标函数值大的粒子排在后面, 将种群中后一半不好的粒子位置替换成前一半较好的粒子位置, 即淘汰效果不好粒子, 公式如下:

$$p_{sjk} = p_{ijk}, \quad s = t + \frac{n}{2}, \quad t \in (1, \frac{n}{2}) \quad (25)$$

式中, n 为粒子的个数, t 为前一半粒子的编号, s 为后一半粒子的编号;

步骤 3-5: 比较每个粒子的位置值, 判断当前轧制力以及带钢凸度、轧制速度、电机功率、轧制转矩是否满足约束条件 (13)-(22);

步骤 3-6: 采用公式 (1) 的目标函数, 计算目标函数值;

步骤 3-7: 存储最优的目标函数值以及对应的轧制力数值;

步骤 3-8: 继续跳转至步骤 3-3 进行迭代计算, 直到输出最优的轧制力数值;

步骤 4: 过程计算机将步骤 3 的计算出的轧制力传递给硬件装置中的 PLC 控制器, 由 PLC 控制器控制轧机设备进行生产, 同时输出计算结果, 并在过程操作站上显示。

2. 根据权利要求 1 所述的带钢冷连轧轧制方法, 其特征在于: 步骤 1 所述的冷连轧轧机的设备参数包括: 轧机机架数、轧机辊数、工作辊直径、支承辊直径、最大的轧制力、最大的轧制速度、最大的转矩、轧制力横向刚度、最大压下率、电机额定功率;

所述的冷连轧轧机的工艺信息参数包括: 末机架的带钢出口速度、分配和调整系数、摩擦系数、变形抗力及张应力影响系数;

所述的冷轧带钢的规格参数包括: 来料钢种、元素含量、带钢宽度、来料产品厚度;

所述的冷轧带钢的成品要求参数包括: 成品厚度、重量。

一种带钢冷连轧轧制方法及装置

技术领域

[0001] 本发明属于冶金过程控制技术领域,特别涉及一种带钢冷连轧轧制方法及装置。

背景技术

[0002] 随着人民生活水平及物质需求的提高,冷轧带钢这种高附加值的产品凭借其优良的机械性能及工艺性能和表面质量成为各行各业所必不可少的原料,人们对其的要求也越来越高。带钢冷连轧系统主要由以下几部分组成:开卷、焊接、矫直、酸洗、冷连轧轧制、剪切、收卷等。其中每一部分的控制系统都很复杂,而且它们控制性能的好坏都会影响最终的产品质量。

[0003] 因此,对于带钢冷连轧轧制过程来说,如何确定优化的轧制方案,对实际生产有着重要的意义,不仅可以改善冷轧带钢的板形精度,而且可以科学地保证设备的最佳性能,充分发挥轧机的生产能力,提高生产量,降低能量消耗。

[0004] 降低带钢冷连轧轧制过程能耗的方案包含了对每个机架前后张力、每个轧辊压下量、每个机架的轧制力和轧制厚度等参数的优化设定。由于这些参数在冷连轧轧制过程中起着重要的作用,因此在这方面已经作了大量的研究工作。专利号 ZL200410015884.4 的中国专利公开了“冷带钢连轧机轧制规程的综合优化控制方法”,其在轧制规程优化过程中将电机负荷、板厚控制、板形控制和打滑与热滑伤防治等诸多因素综合考虑进去。申请号为 200910182709.7 的专利申请公开了“不可逆铝板带冷轧机轧制规程的优化方法”,其以实际应用规程为优化基础,考虑了实际轧制的静态约束和动态约束,改进了动态优化算法。

[0005] 上述的公开文献所涉及的轧制规程优化方法,都对轧制过程参数进行了优化设定计算,大量考虑了轧机本身的约束,而对于与工艺相关的约束条件及经验约束则考虑不够,因此与实际的生产过程相比存在较大的差异。

发明内容

[0006] 针对现有方法存在的不足,本发明提出一种带钢冷连轧轧制方法及装置,通过优化过程操作参数,保证轧机的机械和电气安全,以达到提高轧机的生产能力,降低轧制能耗,降低生产成本,提高产品的质量,减少环境污染和提高资源利用率的目的。

[0007] 本发明的技术方案是这样实现的:一种带钢冷连轧轧制方法,包括以下步骤:

[0008] 步骤 1:采集数据,包括冷连轧轧机的设备参数、冷连轧轧机的工艺信息参数、冷轧带钢的规格参数及冷轧带钢的成品要求参数;

[0009] 所述的冷连轧轧机的设备参数包括:轧机机架数、轧机辊数、工作辊直径、支承辊直径、最大的轧制力、最大的轧制速度、最大的转矩、轧制力横向刚度、最大压下率、电机额定功率;

[0010] 所述的冷连轧轧机的工艺信息参数包括:末机架的带钢出口速度、分配和调整系数、摩擦系数、变形抗力及张应力影响系数;

[0011] 所述的冷轧带钢的规格参数包括:来料钢种、元素含量、带钢宽度、来料产品厚

度；

[0012] 所述的冷轧带钢的成品要求参数包括：成品厚度、重量；

[0013] 步骤 2：以轧制时每个机架所消耗的能耗最小为目标，建立轧制力优化模型：包括以下步骤：

[0014] 步骤 2-1：确定优化目标为轧制时使每个机架所消耗的电机功率之和最低，公式如下：

$$[0015] \quad \text{Minimize} \sum_{i=1}^n HP_i \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (1)$$

[0016] 式中，n 为冷连轧系统的机架总数，i 为机架的编号， HP_i 为第 i 个机架的电机功率；

[0017] 利用机理公式确定轧制工艺参数，所述的轧制工艺参数包括：工作辊压扁半径、机架的中性角、机架的前滑值、带钢出口速度、机架的轧制速度、轧制力、电机转矩、电机轧制转矩和电机损失转矩和电机功率 HP_i ，具体公式如下：

[0018] 计算机架出口厚度，公式如下：

$$[0019] \quad h_i = H_i - \alpha_i \frac{P_i}{K_{pi}} + \beta_i \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (2)$$

[0020] 式中， h_i 为第 i 个机架出口厚度， P_i 为第 i 个机架的轧制力， K_{pi} 为第 i 个机架的轧制力横向刚度， α_i 、 β_i 为第 i 个机架的分配系数和调整系数；

[0021] 利用海特科克公式，计算工作辊压扁半径，公式如下：

$$[0022] \quad R'_i = \left(1 + \frac{C_H \cdot P_i}{B \cdot (H_i - h_i)} \right) \cdot R_i \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (3)$$

[0023] 式中， R'_i 为第 i 个工作辊压扁半径， R_i 为第 i 个工作辊半径，B 带钢宽度， C_H 为海特科克公式系数，取值为 0.214×10^{-3} ， H_i 为第 i 个机架入口厚度；

[0024] 计算机架的中性角，公式为：

$$[0025] \quad \phi_i = \frac{1}{2} \cdot \sqrt{\frac{H_i - h_i}{R_i}} \left(1 - \frac{1}{2\mu_i} \sqrt{\frac{H_i - h_i}{R_i}} \right) \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (4)$$

[0026] 式中， ϕ_i 为第 i 个机架的中性角， μ_i 为第 i 个机架的摩擦系数；

[0027] 利用 BLAND-FORD 前滑公式计算机架的前滑值，公式如下：

$$[0028] \quad f_i = \frac{R'_i}{h_i} \cdot \phi_i^2 \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (5)$$

[0029] 式中， f_i 为第 i 个机架的前滑值；

[0030] 根据秒流量恒等法则计算带钢出口速度，公式如下：

$$[0031] \quad v_i = \frac{v_m h_m}{h_i} \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (6)$$

[0032] 式中， v_i 为第 i 个机架的带钢出口速度， v_m 为末机架的带钢出口速度， h_m 为末机架的带钢出口厚度；

[0033] 计算机架的轧制速度，公式如下：

$$[0034] \quad vr_i = \frac{v_i}{1 + f_i} \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (7)$$

[0035] 式中， vr_i 为第 i 个机架的轧制速度；

[0036] 利用 HILL 公式计算轧制力 P_i , 公式如下 :

$$[0037] \quad D_{pi} = 1.08 + 1.79 \mu_i \xi_i \sqrt{1 - \xi_i} \sqrt{\frac{R_i'}{h_i}} - 1.02 \xi_i$$

$$[0038] \quad P_i = BD_{pi} k_i \sqrt{R_i' (H_i - h_i)} \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (8)$$

$$[0039] \quad \xi_i = \frac{H_i - h_i}{H_i}$$

[0040] 式中, D_{pi} 为第 i 个机架的摩擦影响系数, ξ_i 为第 i 个机架的压下率, k_i 为第 i 个机架的平均变形抗力和张应力共同影响系数 ;

[0041] 计算电机损失转矩, 公式如下 :

$$[0042] \quad GL_i = 1000 f_i (vr_i / R_i) \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (9)$$

[0043] 式中, GL_i 为第 i 个机架的电机损失转矩 ;

[0044] 计算电机轧制转矩, 公式如下 :

$$[0045] \quad GR_i = 0.8 \sqrt{R_i / R_i'} \sqrt{R_i' (H_i - h_i)} P_i \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (10)$$

[0046] 式中, GR_i 为第 i 个机架的电机轧制转矩 ;

[0047] 计算电机转矩, 公式如下 :

$$[0048] \quad GM_i = GR_i + GL_i \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (11)$$

[0049] 式中, GM_i 为第 i 个机架的电机转矩 ;

[0050] 计算电机功率 HP_i , 公式如下 :

$$[0051] \quad HP_i = 0.16 (vr_i / R_i) GM_i \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (12)$$

[0052] 在轧制过程中, 电机的功一部分转化为动能, 带动轧辊旋转轧制带钢, 另一部分转化为热能, 以热量的方式耗散, 在保证良好板形的前提下, 建立以轧制时消耗的电机功率之和最少为目标的目标函数公式 (1), 并通过机理公式 (2)-(12) 进行计算 ;

[0053] 步骤 2-2: 确定冷连轧带钢生产正常运行的约束条件, 所述的约束条件包括: 带钢板形约束条件、轧制力约束条件、轧制速度约束条件、电机功率约束条件、电机功率平衡约束条件、机架轧制转矩约束条件、压下率约束条件、轧制力形状约束条件、轧制力平衡约束条件、机架功率形状约束条件 ;

[0054] 其中, 所述的带钢板形约束条件为保持每个机架出口的相对凸度不变, 并利用凸度方程计算, 公式如下 :

$$[0055] \quad \left(\frac{CR_i}{h_i} - \frac{\Delta}{H_0} \right) \leq \delta \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (13)$$

$$[0056] \quad CR_i = \frac{P_i}{K_{Pi}}$$

[0057] 式中, CR_i 为第 i 个机架的带钢凸度, Δ 为来料的凸度, H_0 为来料的厚度, δ 为给定的数值, 取 0.31 ;

[0058] 所述的轧制力约束条件为每个机架的轧制力设定值不高于该机架允许的最大轧制力数值, 公式如下 :

$$[0059] \quad 0 \leq P_i \leq P_{imax} \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (14)$$

[0060] 式中, P_{imax} 为第 i 个机架允许的最大轧制力 ;

[0061] 所述的轧制速度约束条件为每个机架的轧制速度不高于该机架的最大轧制速度，同时要高于能够保证正常生产的最小轧制速度，公式如下：

$$[0062] \quad vr_{i\min} \leq vr_i \leq vr_{i\max} \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (15)$$

[0063] 式中， $vr_{i\min}$ 为保证正常生产第 i 个机架的最小轧制速度， $vr_{i\max}$ 为第 i 个机架允许的最大轧制速度；

[0064] 所述的电机功率约束条件为每个机架的电机功率不高于该机架的最大电机功率，保证电机功率在电机所能够提供的最大功率之内，公式如下：

$$[0065] \quad 0 \leq HP_i \leq HP_{i\max} \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (16)$$

[0066] 式中， $HP_{i\max}$ 为第 i 个机架所能够提供的最大功率；

[0067] 所述的电机功率平衡约束条件为中间相邻机架的电机功率比值应满足如下公式：

$$[0068] \quad 0.8 \leq (HP_i/HP_{i+1}) \leq 1.6 \quad i = 2, 3, \dots, n-2 \quad (17)$$

[0069] 所述的机架轧制转矩约束条件为每个机架的轧制转矩不高于该机架的最大轧制转矩，公式如下：

$$[0070] \quad 0 \leq GR_i \leq GR_{i\max} \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (18)$$

[0071] 式中， $GR_{i\max}$ 为第 i 个机架的最大轧制转矩；

[0072] 所述的压下率约束条件为每个机架的压下率不高于最大压下率，公式如下：

$$[0073] \quad 0 \leq \xi_i \leq \xi_{i\max} \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (19)$$

[0074] 式中， $\xi_{i\max}$ 为第 i 个机架的最大压下率；

[0075] 所述的轧制力形状约束条件为在实际生产过程中基于实际的工艺条件，要保证轧制系统最优运行，整个机架的轧制力呈现递减趋势，公式如下：

$$[0076] \quad P_i \leq P_{i-1} \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (20)$$

[0077] 所述的轧制力平衡约束条件为前 1 机架的轧制力与相邻的后 1 机架的轧制力的比值满足如下公式，使机架的轧制力达到平衡：

$$[0078] \quad 1 \leq (P_i/P_{i+1}) \leq 1.5 \quad 1 \leq i \leq n-1 \quad (21)$$

[0079] 所述的机架功率形状约束条件为保证机架间的电机功率平衡，使中间机架的电机发挥最大功效，以实现稳定地轧制，公式如下：

$$[0080] \quad \sum_{i=1, n} \frac{HP_i}{2} \leq \sum_{i=2, 3, \dots, n-1} \frac{HP_i}{n-2} \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (22)$$

[0081] 步骤 3：利用改进的 PSO 算法对步骤 2 的轧制力优化模型进行求解，计算出轧制力，方法为：

[0082] 步骤 3-1：初始化 PSO 算法的基本参数，包括：种群规模、粒子维度、最大允许位置、最大允许速度、最大迭代次数、偏差值、惯性权重和加速因子；

[0083] 步骤 3-2：根据种群规模、粒子维度信息在轧制力的最大值范围内随机产生每个机架轧制力的初始数值。由于各机架轧制力之间存在相互关系，根据约束条件 (14)、(20)、(21)，使用下述公式初始化第一机架至末机架的轧制力数值：

$$[0084] \quad P_{i0} = \text{Rand} * (P_{i0\max} - P_{i0\min}) + P_{i0\min} \quad i \in \Omega$$

$$[0085] \quad P_{i1} = \text{Rand} * (\min\{P_{i0}, P_{i1\max}\} - \max\{0, 0.667P_{i0}, P_{i1\min}\}) + \max\{0, 0.667P_{i0}, P_{i1\min}\} \quad i \in \Omega \quad (23)$$

$$[0086] \quad P_{ij} = \text{Rand} * (P_{ij-1} - P_{ij\min}) + P_{ij\min} \quad i \in \Omega, j \in (1, m)$$

[0087] 式中, i 表示粒子的编号, j 表示粒子的维度编号, m 为机架的数量, P_{ij} 为第 i 个粒子的第 j 个维度 (即第 j 个机架) 的轧制力, Ω 为粒子的集合, 粒子的数量为偶数, P_{ijmin} 和 P_{ijmax} 分别为第 i 个粒子的第 j 个机架轧制力的最小值和最大值, $Rand$ 为在 $[0, 1]$ 范围内产生随机数的函数;

[0088] 步骤 3-3: 利用 PSO 算法的粒子更新公式更新每个粒子的位置值 (即机架的轧制力) 和速度值并进行粒子保护比较, 公式如下:

$$[0089] \quad v_{ijk} = c_0 v_{ijk-1} + c_1 rand_1 (pbest_{ijk-1} - p_{ijk-1}) + c_2 rand_2 (gbest_{jk-1} - p_{ijk-1}) \quad (24)$$

$$[0090] \quad p_{ijk} = p_{ijk-1} + v_{ijk}$$

[0091] 式中, k 为迭代次数, v_{ijk} 为第 k 次迭代计算时第 i 个粒子的第 j 个维度的速度值, c_0 为惯性权重, c_1 和 c_2 为加速因子, $rand_1$ 和 $rand_2$ 为在 $[0, 1]$ 范围内产生随机数的函数, $pbest_{ijk-1}$ 为前 $k-1$ 次迭代计算过程中, 第 i 个粒子的第 j 个维度的最佳数值, $gbest_{jk-1}$ 为前 $k-1$ 次迭代计算过程中, 所有粒子的第 j 个维度中最佳的数值, p_{ijk} 为第 k 次迭代计算时为第 i 个粒子的第 j 个维度的位置值;

[0092] 对每个粒子的第 1 维度, 如果 $p_{i1k-1} + v_{i1k} < P_{i1min}$, 则将 P_{i1min} 赋给 p_{i1k} , 否则, 继续比较, 如果 $p_{i1k-1} + v_{i1k} > P_{i1max}$, 则将 P_{i1max} 赋给 p_{i1k} , 否则, 令 p_{i1k} 等于 $p_{i1k-1} + v_{i1k}$;

[0093] 对于每个粒子的其他维度, 如果 $p_{ijk-1} + v_{ijk} \leq 0.7p_{ij-1k}$, 则将 $0.7p_{ij-1k}$ 赋给 p_{ijk} , 如果 $p_{ijk-1} + v_{ijk} \geq p_{ij-1k}$, 则将 p_{ij-1k} 赋给 p_{ijk} , 否则令 p_{ijk} 等于 $p_{ijk-1} + v_{ijk}$;

[0094] 步骤 3-4: 应用 PSO 算法的改进策略更新粒子的位置信息, 方法为:

[0095] 在每次迭代过程中, 按照目标函数值的大小对种群中的所有粒子进行排序, 目标函数值小的粒子排在前面, 目标函数值大的粒子排在后面, 将种群中后一半不好的粒子位置替换成前一半较好的粒子位置, 即淘汰效果不好粒子, 公式如下:

$$[0096] \quad p_{sjk} = p_{tjk}, s = t + \frac{n}{2}, t \in (1, \frac{n}{2}) \quad (25)$$

[0097] 式中, n 为粒子的个数, t 为前一半粒子的编号, s 为后一半粒子的编号;

[0098] 步骤 3-5: 比较每个粒子的位置值, 判断当前轧制力以及带钢凸度、轧制速度、电机功率、轧制转矩是否满足约束条件 (13)-(22);

[0099] 步骤 3-6: 采用公式 (1) 的目标函数, 计算目标函数值;

[0100] 步骤 3-7: 存储最优的目标函数值以及对应的轧制力数值;

[0101] 步骤 3-8: 继续跳转至步骤 3-3 进行迭代计算, 直到输出最优的轧制力数值;

[0102] 步骤 4: 过程计算机将步骤 3 的计算出的轧制力传递给硬件装置中的 PLC, 由 PLC 控制轧机设备进行生产, 同时输出计算结果, 并在过程操作站上显示。

[0103] 本发明一种降低带钢冷连轧轧制装置, 包括过程计算机以及 PLC 控制系统, 过程计算机内安装有软件, 通过上述优化方法计算出的参数设定值后, 将其传送给 PLC 控制器, 作为其控制目标, 然后 PLC 控制器驱动执行机构带动轧机设备进行生产; 轧机设备的状态信息通过传感器和仪表反馈到 PLC 控制器中, 并且通过通讯网络传送给过程计算机; 而过程计算机通过对生产过程信息的监视, 掌握过程状态, 对数据进行记录, 出现越限状态输出报警或预示信息, 对状态信息进行分析及状态信息特征数据识别; 过程计算机在控制对象的轧制力优化模型上, 利用 PSO 优化方法进行设定值的实时优化计算, 对生产过程进行控制与调节, 并为冷连轧轧制过程操作优化方法提供执行平台。

[0104] 本发明优点：本发明在带钢冷连轧实际生产现场情况的基础上，充分考虑了轧制力优化计算的合理性，选用了能耗最低为优化目标，并采用了大量实际轧制生产过程中的约束条件，并在轧制机理关系的基础上利用改进的 PSO 优化算法进行最优计算，可以快速计算出优化的轧制规程信息，以避免由于经验规程没有综合考虑而带来的额外成本。通过本发明的优化方法及装置，可以充分发挥整个冷连轧系统的生产能力，在改善产品质量的同时，降低轧机的电机总功率，从而实现节能降耗。

附图说明

- [0105] 图 1 为实施例带钢冷连轧轧制装置结构框图；
- [0106] 图 2 为本发明带钢冷连轧轧制方法总流程图；
- [0107] 图 3 为本发明带钢冷连轧轧制方法机理计算流程图；
- [0108] 图 4 为本发明带钢冷连轧轧制方法轧制力初始化流程图；
- [0109] 图 5 为本发明带钢冷连轧轧制方法优化算法计算流程图。

具体实施方式

[0110] 下面结合附图和实施例对本发明作进一步详细的说明。

[0111] 本实施例采用钢铁厂 2030mm 五机架带钢冷连轧机。

[0112] 步骤 1：采集冷连轧轧机的设备参数和工艺条件、冷轧带钢的规格和成品要求参数数据；

[0113] (1) 收集冷连轧轧机的设备参数和工艺条件：本实施例中的系统由五组机架组成，编号为 1-5，每组机架的轧辊数为 4，它们的工作辊直径以及支承辊直径的尺寸不同，具体数值如表 1 所示：

[0114] 表 1 冷连轧的技术参数以及工艺参数

[0115]

项目	机架号				
	1#机架	2#机架	3#机架	4#机架	5#机架
工作辊直径(mm)	420.90	430.11	420.32	425.49	425.58
支承辊直径(mm)	1300.88	1301.45	1303.57	1301.45	1303.29
最大的轧制力(kN)	20000	20000	20000	20000	20000
电机额定功率(kW)	7800	7800	7800	7800	7800
最大的轧制速度(mpm)	1650	1650	1650	1650	1650
保证正常生产的最小轧制速度(mpm)	100	100	100	100	100
最大的轧制转矩(t-m)	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
摩擦系数	0.049	0.048	0.043	0.042	0.023
变形抗力及张应力影响系数	0.66	0.75	0.82	0.91	2.20
分配系数	5.08	5.38	5.36	5.56	5.84
调整系数	0.13	0.82	1.01	1.01	0.97

[0116] 由表 1 可知,这五组机架的最大轧制力均为 20000kN,最大的轧制速度均为 1650mpm,最大的转矩均为 0.5t-m,轧制力横向刚度均为 51012kN/mm,最大压下率为 0.4,电机额定功率均为 7800kW,第 5 机架的带钢出口速度为 340mpm;

[0117] (2) 收集冷轧带钢的规格参数及成品要求参数如下:来料带钢钢种 PHC, C 含量 0.004%, Mn 含量 0.209%, Si 含量 0.017%;来料带钢宽度为 1540mm,并且在整个轧制过程中认为宽度不变;来料带钢厚度为 4.8mm,来料带钢凸度为 2mm,成品厚度为 0.985mm,重量为 26050kg;

[0118] 步骤 2:以轧制时每个机架所消耗的能耗最小为优化目标,建立轧制力优化模型;

[0119] 利用目标函数公式 (1),以及机理公式 (2)-(12) 计算每次迭代计算的目标函数;

[0120] 步骤 3:调用优化计算程序,利用改进的 PSO 算法对过程参数进行优化计算;

[0121] 步骤 3-1:初始化 PSO 算法的基本参数,种群规模:40,粒子维度:5,最大允许位置:20000,最大允许速度:10,最大迭代次数:3000,偏差值:0.02,惯性权重:0.8 至 0.4,加速因子: $C_1 = C_2 = 1.49445$;

[0122] 步骤 3-2:利用种群规模、粒子维度信息在轧制力的最大值范围内随机产生每个机架轧制力的初始数值。因为各机架轧制力之间存在相互关系,根据约束条件 (14)、(20)、(21),使用下述公式初始化第一机架至第五机架的轧制力数值,公式为:

$$[0123] \quad P_{i0} = \text{Rand} * (P_{i0\max} - P_{i0\min}) + P_{i0\min}$$

$$[0124] \quad P_{i1} = \text{Rand} * (\min \{P_{i0}, P_{i1\max}\} - \max \{0.667P_{i0}, P_{i1\min}\}) + \max \{0.667P_{i0}, P_{i1\min}\}$$

$$[0125] \quad P_{ij} = \text{Rand} * (P_{ij-1} - P_{ij\min}) + P_{ij\min}$$

[0126] 步骤 3-3:利用 PSO 算法的粒子更新公式进行粒子更新,即改变每个粒子所代表的轧制力数值,公式为:

[0127] $v_{ijk} = c_0 v_{ijk-1} + c_1 \text{rand}_1 (pbest_{ijk-1} - p_{ijk-1}) + c_2 \text{rand}_2 (gbest_{jk-1} - p_{ijk-1})$

[0128] $p_{ijk} = p_{ijk-1} + v_{ijk}$

[0129] 并进行粒子保护比较,针对每个粒子的第 1 维度,如果 $p_{i1k-1} + v_{i1k} < P_{i1min}$,那么将 P_{i1min} 赋给 p_{i1k} ,否则,继续比较,如果 $p_{i1k-1} + v_{i1k} > P_{i1max}$,那么将 P_{i1max} 赋给 p_{i1k} ,否则,令 p_{i1k} 等于 $p_{i1k-1} + v_{i1k}$ 。对于每个粒子的其他维度,如果 $p_{ijk-1} + v_{ijk} \leq 0.7p_{ij-1k}$,那么将 $0.7p_{ij-1k}$ 赋给 p_{ijk} ,如果 $p_{ijk-1} + v_{ijk} \geq p_{ij-1k}$,那么将 p_{ij-1k} 赋给 p_{ijk} ,否则令 p_{ijk} 等于 $p_{ijk-1} + v_{ijk}$ 。

[0130] 步骤 3-4:加入 PSO 算法的改进策略更新粒子的位置信息:在每次迭代过程中,计算每个粒子的目标函数值,即根据每个粒子代表的轧制力数值计算电机功率,并根据电机功率数值的大小将 40 个粒子进行排序,电机功率数值小的粒子排在前,电机功率数值大的粒子排在后,将种群中后 20 个不好的粒子位置替换成前 20 个较好的粒子位置,利用下列公式实现:

[0131] $p_{s,jk} = p_{t,jk}, s = t+20, t \in (1,20)$

[0132] 步骤 3-5:比较每个粒子的位置值,判断当前轧制力以及带钢凸度、轧制速度、电机功率、轧制转矩是否满足约束条件,所述的约束条件为公式 (13)-(22);

[0133] 步骤 3-6:利用公式 (1) 的目标函数,计算电机功率数值;

[0134] 步骤 3-7:存储最小的电机功率数值以及对应的轧制力数值;

[0135] 步骤 3-8:继续跳转至步骤 3-3 进行迭代计算,直到输出最优的轧制力数值;

[0136] 步骤 4:完成优化计算,过程计算机传递步骤 3 的计算结果。

[0137] 当完成优化计算后,过程计算机通过高速以太网将计算出的轧制力设定值参数传送给 PLC 控制器,PLC 控制器根据这些设定值对冷连轧机以及整个生产线进行驱动控制,进行生产。冷连轧机等设备的状态信息通过仪表及传感器反馈到 PLC 控制器中,并且通过高速以太网传送给过程计算机。过程计算机在控制对象的数学模型基础上,利用优化方法进行设定值的实时优化计算,对生产过程进行控制与调节,同时在过程操作计算机上输出最终结果。

[0138] 冷连轧生产现场数据与优化计算结果如表 2 所示:

[0139] 表 2 冷连轧生产现场数据与优化计算结果对比

项目 机架号	实际现场轧制规程计算结果			PSO 改进算法优化计算结果		
	轧制力 (kN)	电机输出功率(kW)	电机总功率(kW)	轧制力 (kN)	电机输出功率(kW)	电机总功率(kW)
[0140] 1#机架	18780	2925	14020	17520	2671	13169
2#机架	18120	3481		17470	3027	
3#机架	16350	4201		15820	3295	
4#机架	11570	2703		12860	3307	
5#机架	8680	710		8780	869	

[0141] 从最终结果表 2 中可以看出,优化后的电机总功率为 13169kW,而实际生产中的电机总功率为 14020kW,优化后的电机总功率降低了 6.1%,达到了节能降耗的目的。

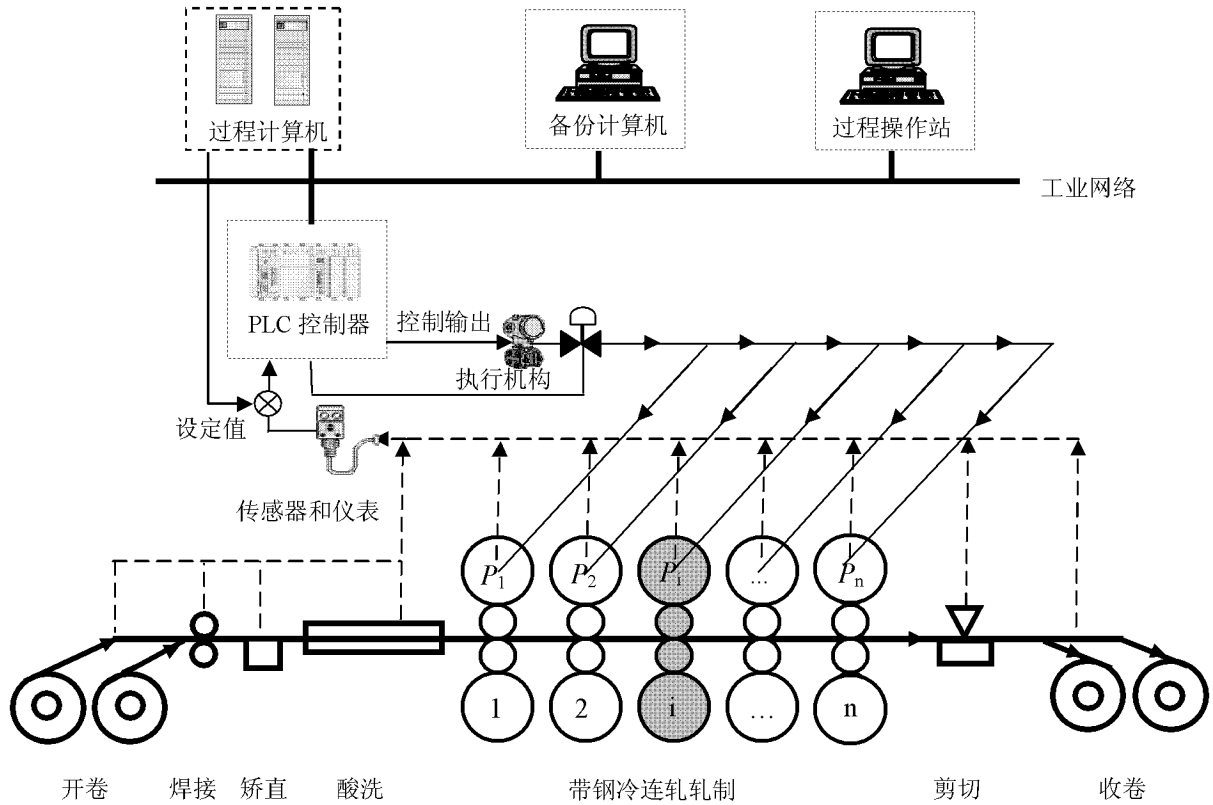


图 1

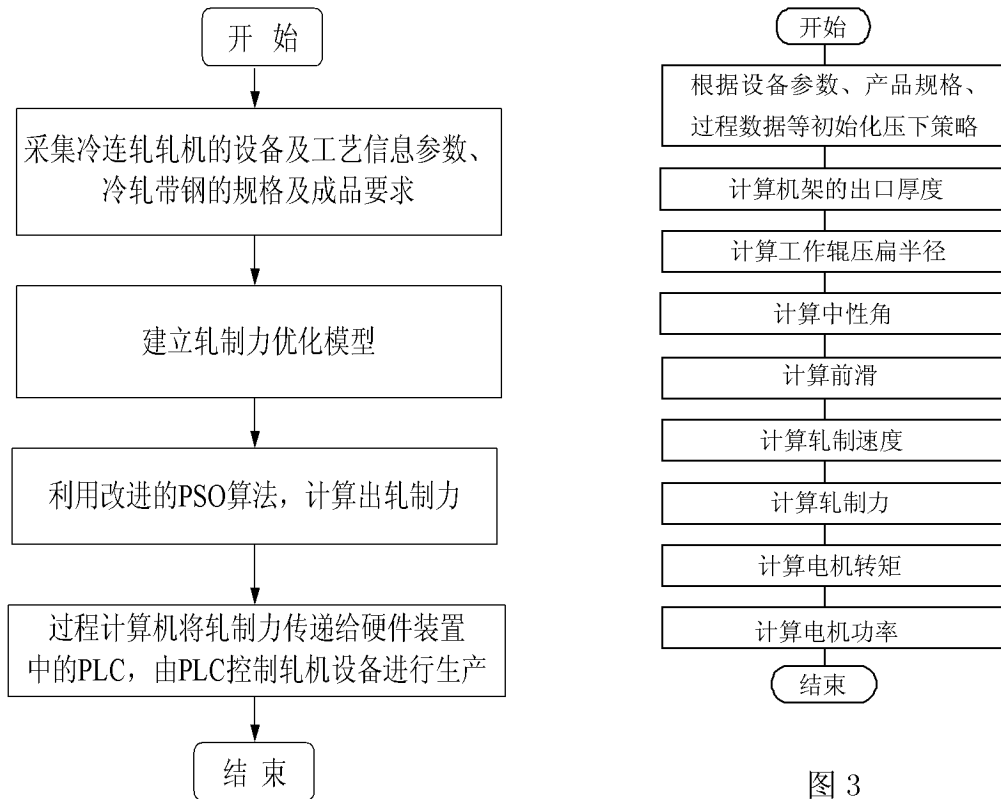


图 3

图 2

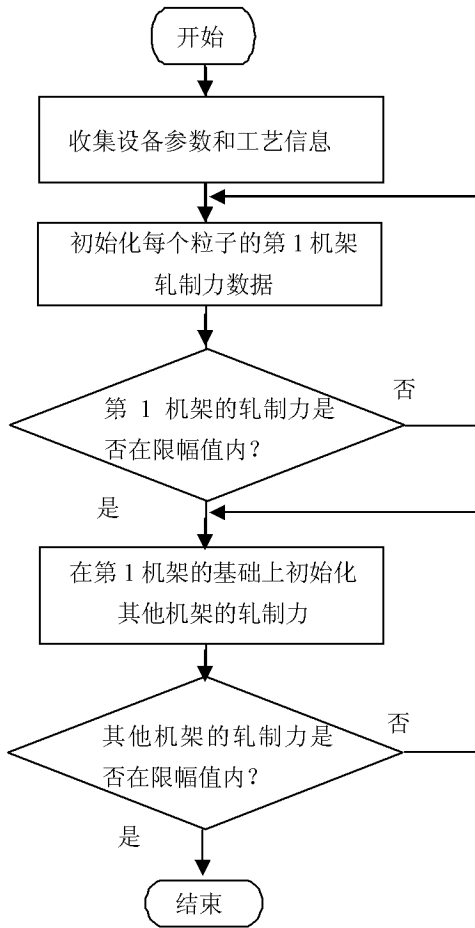


图 4

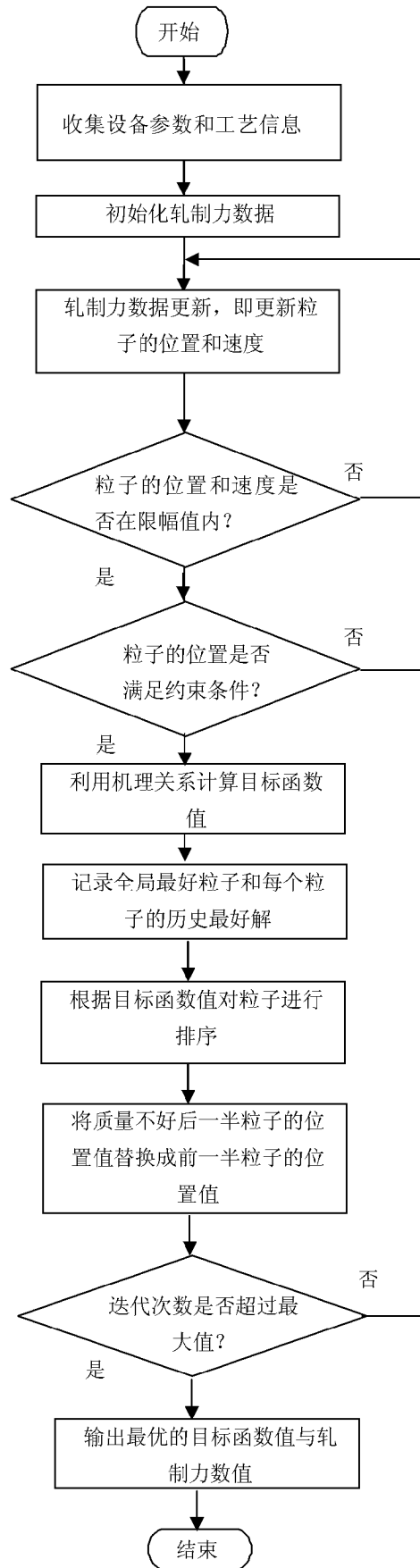


图 5