

冷连轧过程控制轧制力模型综合参数自适应

郭立伟¹⁾ 杨 荃¹⁾ 郭 磊²⁾

1) 北京科技大学高效轧制国家工程研究中心, 北京 100083 2) 武汉斯达实科技发展有限公司, 武汉 430080

摘 要 轧制力模型是冷连轧过程控制系统的基本模型, 影响其预报精度的主要因素是材料的变形抗力和摩擦因数. 本文采用参数自适应方法来提高轧制力的预报精度. 在对轧制力模型进行自适应过程中, 将材料的变形抗力作为轧制过程模型的整体属性, 各机架根据累计变形程度确定各自的变形抗力. 在此基础上, 将摩擦因数看成是各机架的单体属性, 各机架取不同的模型参数. 实践证明, 这种综合考虑变形抗力和摩擦因数的参数自适应方法可以对二个参数同时进行修正, 能有效提高轧制力模型的预报精度.

关键词 冷连轧; 过程控制; 轧制力; 数学模型; 自适应

分类号 TG 335.1

轧制力的确定在冷连轧生产中有着重要的意义, 它是制定工艺制度、调整轧机、提高产品质量、扩大产品范围、充分合理地挖掘设备潜力、实现生产过程计算机控制的重要设备参数和工艺参数. 可以说, 轧制力模型是参数设定过程中最重要的数学模型.

由于金属受轧制力作用变形过程非常复杂, 很难将这个过程用一个数学方程精确的描述, 所以目前使用的轧制力模型都是根据现场实际情况, 在忽略一定因素作用下的近似模型, 这就导致了模型计算的不精确. 经过分析, 导致轧制力模型不精确的主要因素是两个物理参数: 一是轧辊和轧件间的摩擦因数; 二是轧材的变形抗力或硬度. 这两个物理参数无法直接测量, 因此不易精确确定. 本文的目的是对轧制力模型中的变形抗力和摩擦因数进行综合参数自适应, 以提高轧制力模型的设定精度.

1 数学模型

1.1 轧制力数学模型

在一定的假设和简化的前提下, 本文在计算轧制力时采用了理论上较为严谨, 全面考虑外摩擦、张力、轧辊弹性压扁等因素的 Bland-Ford 冷轧轧制力计算公式.

通过 Bland-Ford 公式可以得到带张力条件下带钢单位宽度上的总压力方程为:

收稿日期: 2006-01-09 修回日期: 2006-05-30

基金项目: 国家重大技术装备研制项目(科技攻关)(No. ZZ02-13B-03-03)

作者简介: 郭立伟(1974—), 男, 博士研究生; 杨 荃(1964—), 男, 教授, 博士生导师

$$P_B = K_f \sqrt{R' \Delta h} (1 - t_b / k_H) \delta_3(a, \epsilon, b) \quad (1)$$

式中, $a = f \sqrt{R' / h}$, $b = (1 - t_f / k_h) / (1 - t_b / k_H)$; P_B 为单位宽度上的总压力, kN; K_f 为平均变形抗力, MPa; R' 为轧辊压扁半径, mm; Δh 为绝对压下量, mm; h 为出口厚度, mm; ϵ 为相对压下量; t_f 和 t_b 为轧制前后的张应力, MPa; k_H 和 k_h 为轧制前后的变形抗力, MPa; f 为摩擦因数; $\delta_3(a, \epsilon, b)$ 为一个积分项.

该公式具有清晰的物理意义, 公式右端前半部分 $K_f \sqrt{R' \Delta h}$ 反映材料本身的影响, 后半部分 $(1 - t_b / k_H) \delta_3(a, \epsilon, b)$ 反映外摩擦和张力的影响.

轧制过程中材料的变形抗力很大, 轧辊将产生明显的弹性压扁现象, 对轧制压力的计算精度产生相当大的影响. 目前主要采用 Hitchcock 所提出的两个圆柱体弹性接触变形理论. 依据该理论可得计算轧辊压扁半径的简化公式:

$$R' = R(1 + C_0 P_B / \Delta h) \quad (2)$$

式中, R 为轧辊半径, mm; C_0 为轧辊压扁系数, 一般取 2.2×10^{-5} .

1.2 变形抗力数学模型

所谓金属的塑性变形抗力是指金属在一定的变形条件下进行塑性变形时在单位横截面上抵抗此变形的力. 它与钢种(成分)、累计变形程度、变形速度以及变形温度有关^[1-2]. 根据冷连轧的工艺特点, 变形抗力主要与相应的累计变形程度有关. 本文用如下模型表示:

$$K_f = K_{f0} + K_{ft}(H_0 - h) / H_0 = K_{f0} + K_{ft}(1 - h / H_0) \quad (3)$$

式中, K_{f0} 为原始材料强度, MPa; K_{ft} 为加工硬化所产生强度增量, MPa; H_0 为来料厚度, mm; h 为机架出口厚度, mm. K_{f0} 和 K_{ft} 开始分别取材料原始强度 $K_{f0,0}$ 和原始强度增量 $K_{ft,0}$, 在自适应过程得到修正.

1.3 摩擦因数数学模型

摩擦因数是反应摩擦程度的参数. 它与工艺润滑乳化剂品种及数量有关, 并与轧辊表面状态、轧辊材质、单位轧制力, 变形区几何参数、轧制速度、轧制温度等有关^[1]. 根据冷连轧的工艺特点, 轧件的出口厚度 h 和各机架变形程度 ϵ 最能反映轧制过程的状态特性, 由此得到一种摩擦因数的初始值模型形式:

$$f = b_0 + b_1 h + b_2 \epsilon \quad (4)$$

式中, b_0, b_1, b_2 均为待估系数. 许多资料表明, 无论是高速的宽带钢, 还是低速的窄带钢, 该形式都能很好的拟和实验结果, 是一种较好的模型形式.

2 综合参数自适应

2.1 综合参数自适应原理

模型自适应的目的是消除设定值和实测值之间的差异, 通常的做法是给模型公式乘上一个系数, 使得由模型公式求得的值乘上该系数后接近于实测值, 这种方法称为乘法自适应, 如文献[3]; 或者是给模型公式加上一个值, 使得由模型公式求得的值加上该值后接近于实际值, 这种方法称为加法自适应. 以上两种方法一般统称为公式自适应. 本文中针对轧制力模型使用的综合参数自适应, 不是通过自适应因子对模型公式本身进行修正, 而是对轧制力模型中的变形抗力和摩擦因数进行自适应修正^[4-5], 以提高模型精度.

根据对冷轧变形抗力影响因素的研究, 可以得知摩擦因数不是变形抗力的主要影响因素; 但根据文献[6-9]的分析, 在冷轧薄带钢时, 由于轧辊存在较大的弹性压扁, 使得在不同的变形抗力条件下, 摩擦因数会对轧制力产生不同的影响, 因此可以认为摩擦因数和变形抗力对轧制力的影响存在一定的耦合关系.

在冷连轧过程中, 不同机架的变形抗力变化较大, 使得摩擦对各机架轧制力的影响是不同的. 本文首先针对模型中的变形抗力参数, 作为五个机架整体属性进行自适应, 然后在此基础上针对另一参数摩擦因数, 作为各机架单体属性进行修正, 最终达到提高轧制力模型精度的目的.

2.2 变形抗力的自适应

对变形抗力进行自适应首先要知道实际的变形抗力值, 而这又无法测量. 文献[10]中通过实测轧制力, 利用轧制力模型反求变形抗力, 也就是所谓的“后计算”方法. 本文使用的 Bland-Ford 轧制力模型是一个积分式, 求出变形抗力的显式解非常困难. 因此这里使用文献[11]中的方法直接对变形抗力模型中的两个参数进行迭代计算, 此时摩擦因数 f 根据初始值模型计算得出. 本文的实验对象是低速轧机, 所以取 $f=0.069$ 左右. 使用 Bland-Ford 轧制力公式, 对某一机架的变形抗力 K_{fi} 迭代计算流程如图 1 所示. 图中, P_r 是实测轧制力, kN; P_c 是利用相关实测值以及迭代变形抗力计算的轧制力, kN; $\Delta_{\max}$ 是最大允许误差, 取一个较小的正值, 本文取 0.01; C 为逼近迭代系数, 本文取 0.8; K_{fi} 为第 i 机架前的“实际”变形抗力, MPa; FD 是一个中间变量.

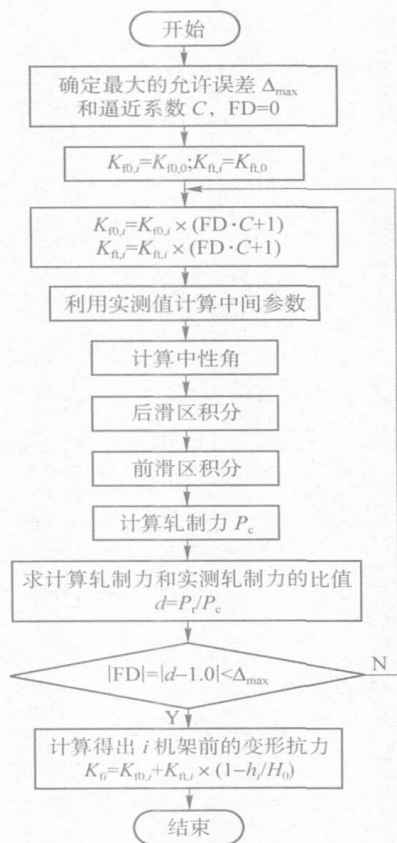


图 1 变形抗力迭代算法流程图

Fig. 1 Flow chart of iterative algorithm for deformation resistance

对于 Bland-Ford 公式中积分的计算, 为了既保证达到一定的计算精度, 又有一定的计算速度, 本文采用了龙贝格(Romberg)数值积分的方法.

同样的算法过程可以分别得出五个机架轧制前

的“实际”变形抗力, K_{f1} , K_{f2} , K_{f3} , K_{f4} , K_{f5} . 对于这五个不同的变形抗力值, 可以分段使用, 也就是计算不同机架轧制力时使用相应的变形抗力值. 但是考虑到材料的强度和强度增量是材料的自身属性, 所以结合本文所用的变形抗力数学模型, 以累计相对压下量为自变量, “实际”变形抗力为因变量, 得到五组值 $(1-h_i/H_0, K_{fi})$, $i=1, 2, 3, 4, 5$. 通过一元线性回归就可以得到一组新的 K_{f0}^{new} 和 K_{ft}^{new} . 为了防止变形抗力出现突变, 将 K_{f0}^{new} 和 K_{ft}^{new} 和原来的 K_{f0} 和 K_{ft} 做指数平滑处理, 得到下次要使用的 K_{f0}^{next} 和 K_{ft}^{next} . 最终完成了对参数变形抗力的自适应.

$$K_{f0}^{next} = K_{f0}^{new} + \theta_0 (K_{f0}^{new} - K_{f0})$$

(5)

$$K_{ft}^{next} = K_{ft}^{new} + \theta_t (K_{ft}^{new} - K_{ft})$$

(6)

式中, θ_0 和 θ_t 为增益系数.

最终作为五个机架的共同属性, 变形抗力模型表达为:

$$K_f^{next} = K_{f0}^{next} + K_{ft}^{next} (1 - h/H_0)$$

(7)

本文利用实测轧制力分别对五个机架的变形抗力进行迭代, 然后作线性回归如图 2 所示.

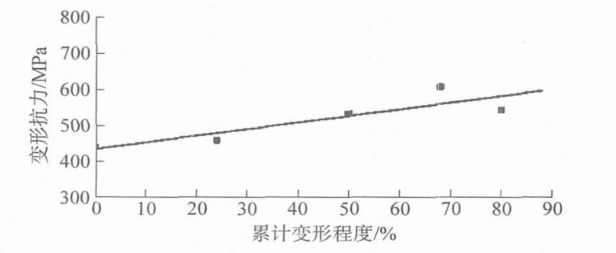


图 2 变形抗力回归曲线

Fig.2 Regression curve of deformation resistance

2.3 摩擦因数模型修正

通过以上对变形抗力的自适应, 可以看出如果对所得到的五个机架前的“实际”变形抗力分段使用, 那么轧制力模型可以以一定的精度接近实测值. 但是变形抗力作为材料的自身属性线性回归后, 又产生了新的偏差, 如图 2 所示. 对于这种偏差, 本文通过对摩擦因数的修正来消除.

$$f_i = \frac{P_r / K_f^{next} - 1.08 + 1.02 \epsilon}{1.79 \epsilon \sqrt{R' / H}}$$

(8)

式中, f_i 是第 i 机架的摩擦因数; P_r 是实际轧制力, kN; K_f^{next} 是根据变形抗力回归方程式得到的第 i 机架新的变形抗力值, MPa; ϵ 是第 i 机架相对变形量; H 是第 i 机架的入口厚度, mm; R' 是压扁半径, mm.

在不同的相对变形量和出口厚度情况下, 利用实测数据, 对第 i 机架多次反求 f_i , 可以得到一组数

据 (f_i, ϵ, h) . 利用这一组数据通过多元线性回归获得新的第 i 机架摩擦因数模型中的 b_{0i} , b_{1i} , b_{2i} 参数. 这样在考虑变形抗力情况下, 修正了第 i 机架的摩擦因数模型. 同理, 可以得到新的针对各机架的摩擦因数模型.

$$f_i = b_{0i} + b_{1i} h + b_{2i} \epsilon, i=1, 2, 3, 4, 5$$

(9)

本文利用摩擦因数的计算结果, 针对五个机架分别进行二元线性回归, 可以得到如表 1 所示的模型系数修正值.

表 1 摩擦因数模型的系数

Table 1 Coefficients of the model for friction factor

机架号	b_0	b_1	b_2
1#	0.974 8	-0.380 6	-0.142 0
2#	0.041 2	-0.001 8	0.068 4
3#	0.032 3	0.009 7	0.071 1
4#	0.085 0	-0.002 0	-0.001 1
5#	0.184 4	-0.027 5	-0.182 3

3 实际应用

通过 Visual C++ 可视化编程语言, 在 PC 机上编写程序, 以国内某新建的全连续五机架冷连轧机组的实测数据为例, 利用上述的综合参数自适应方法对轧制力模型进行了自适应取得了较好的效果.

本文取钢种 Q235, 材料数据 $K_{f0}=420$ MPa, $K_{ft}=300$ MPa; 原料厚度 $H_0=3.0$ mm, 成品厚度 $h=0.47$ mm, 带钢宽度 $B=1\,005$ mm, 工作辊半径 $R=145$ mm, 润滑剂为乳化液.

经过本文所述的综合参数自适应后, 可以得到表 2 所示的对比数据.

表 2 轧制力计算对比数据

Table 2 Comparison data of roll force kN

机架号	实测轧制力	原模型轧制力	变形抗力自适应后的轧制力	摩擦因数修正后的轧制力
1#	5 800	5 530	5 320	5 550
2#	5 400	5 720	5 230	5 190
3#	5 100	5 420	4 760	4 850
4#	4 660	4 820	4 140	4 730
5#	4 240	5 110	4 270	4 170

由于变形抗力和摩擦因数等因素的影响, 与实测轧制力相比较, 原模型计算的轧制力最大相对误差达到 20.6%. 经过对变形抗力进行自适应修正后, 轧制力最大相对误差减小到 11.1%. 这说明将变形抗力作为材料的自身属性, 用线性关系来处理

能提高预报精度,但依然有较大误差.在变形抗力自适应的基础上,进一步对摩擦因数进行修正,得到的轧制力最大相对误差为 4.7%.

摩擦因数模型是在有限几种工艺条件下回归得到的,在不同的工艺条件下,回归结果存在一定的误差.因此对不同情况,轧制力的预报精度会有差异,但较原轧制力模型有较大提高.

产生误差的原因可能是轧辊压扁半径计算不准,以及没有考虑轧件的弹性恢复.

4 结 论

将材料的强度和强度增量作为材料的原始属性,五个机架根据累计变形程度不同确定各自的变形抗力.而将摩擦因数看成是各机架的单体属性,各机架取不同的模型参数.实验证明,这种综合考虑变形抗力和摩擦因数的参数自适应方法可以提高轧制力模型的预报精度.

参 考 文 献

[1] 赵志业.金属塑性变形与轧制理论.北京:冶金工业出版社,1991:45

- [2] 周富强,曹建国,张杰,等.冷连轧轧制力在线计算模型.北京科技大学学报,2006,28(9):859
- [3] 李伟明,穆志纯,刘克.基于实测值的自适应算法在中厚板轧制中的应用.北京科技大学学报,2003,25(1):6
- [4] Wang J S, Jiang Z Y, Tieu A K, et al. Adaptive calculation of deformation resistance model of online process control in tandem cold mill. J Mater Process Technol, 2005, 162: 585
- [5] Larkiola J, Myllykoski P, Nylander J, et al. Prediction of rolling force in cold rolling by using physical models and neural computing. J Mater Process Technol, 1996, 60: 381
- [6] 朱光明,杜凤山,孙等月,等.2030板带冷连轧系统在线控制模型接触摩擦应力分布.钢铁,2003,38(12):30
- [7] Sun J L, Kang Y L, Xiao T G, et al. Lubrication in strip cold rolling process. J Univ Sci Technol Beijing, 2004, 11(4): 368
- [8] 王伟,连家创.采用混合摩擦模型预报冷轧薄板轧制力.钢铁研究学报,2000,12(1):10
- [9] 时旭,刘向华,王国栋.薄板轧制的接触摩擦及其对轧制力的影响.塑性工程学报,2005,12(3):31
- [10] 王军生,赵启林,矫志杰,等.冷连轧过程控制变形抗力模型的自适应学习.东北大学学报:自然科学版,2004,25(10):973
- [11] 华建新,王贞祥.全连续式冷连轧过程控制.北京:冶金工业出版社,2000:70

Comprehensive parameters self-adapting for a rolling force model of tandem cold rolling process control

GUO Liwei¹⁾, YANG Quan¹⁾, GUO Lei²⁾

1) National Engineering Research Center for Advanced Rolling Technology, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China

2) Wuhan STARTS Science and Technology Development Co. Ltd., Wuhan 430080, China

ABSTRACT The rolling force model is a foundation model of the process control system of a tandem cold rolling mill. Deformation resistance and friction factor have important effect on the prediction precision of rolling force. A parameter self-adaptive method was used to improve the prediction precision. During self-adapting process for the rolling force model, deformation resistance was regarded as the common property of each stand, and each stand decides its deformation resistance according to its absolute deformation grade. On this condition, friction factor was regarded as the special property of each stand, and different coefficients were given to the mathematical model for friction factor of each stand. This self-adaptive method can correct deformation resistance and friction factor at the same time. It is proved to be useful to improve the prediction precision of rolling force by practice.

KEY WORDS tandem cold rolling; process control; rolling force; mathematical model; self-adapting