

The Application of Algorithm of Quadratic Programming in the Rolling Schedule of Aluminum Strip Rough Mill

Peichao Wei¹, Ling Zhao²

¹Hongxing Co., Ltd, Jiuquan Iron & Steel Group, Jiayuguan Gnsu

²College of Information Science and Engineering, Northeastern University, Shenyang Liaoning

Email: tshubin@163.com

Received: Nov. 30th, 2015; accepted: Dec. 19th, 2015; published: Dec. 22nd, 2015

Copyright © 2015 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

Abstract

A quadratic programming optimization method about the rolling schedule of aluminum strip rough mill based on MATLAB optimal toolbox is proposed, in order to meet the company's raising requirements about the aluminum strip products' accuracy. According to the data collected from field, the simulation and study of the rolling schedule of different-grade aluminum strip are developed. Compared with the field data, the method developed in this paper is superior to the actual rolling schedule and it's proved to be a more useful online approach.

Keywords

Quadratic Programming, Aluminum Strip Rough Mill, Rolling Schedule, MATLAB

二次规划算法在铝板带粗轧机厚度分配中的应用

魏培超¹, 赵玲²

¹酒钢集团宏兴股份公司炼铁厂, 甘肃 嘉峪关

²东北大学信息科学与工程学院, 辽宁 沈阳

Email: tshubin@163.com

收稿日期: 2015年11月30日; 录用日期: 2015年12月19日; 发布日期: 2015年12月22日

摘要

针对企业对铝合金板带产品几何尺寸精度要求的提高, 本文提出了一种基于MATLAB优化工具箱的铝板带热粗轧机二次规划厚度分配优化方法, 利用现场采集的数据对不同牌号的铝合金板带进行厚度分配仿真研究。通过与现场数据对比, 结果表明该方法优于现场实际厚度分配效果, 是一种较实用的在线厚度分配方法。

关键词

二次规划, 铝粗轧机, 厚度分配, MATLAB

1. 引言

过程自动化系统的性能对铝合金产品的质量起着至关重要的作用[1]。轧制规程计算是过程自动化系统的重要组成部分, 并且厚度分配(又称负荷分配)是板带材轧制规程计算的核心部分, 是轧制过程的关键环节[2]。因此, 寻求最优的厚度分配方案便可以提高过程自动化系统的性能。

2. 厚度分配模型的建立

二次规划是非线性规划中的一种特殊情形, 由于二次规划算法比较简单便于求解, 已成为求解非线性优化的一个重要方法。二次规划是指其目标函数为二次多项式而约束函数全部是线性函数的优化问题, 标准的二次规划格式如下[3]:

$$\begin{aligned} \min_x f(x) &= \frac{1}{2}x^T Hx + c^T x \\ \text{s.t. } A \cdot x &\leq b \\ Aeq \cdot x &= beq \\ lb \leq x &\leq ub \end{aligned}$$

其中 $c \in \mathbf{R}^n$, $H \in \mathbf{R}^{n \times n}$ 是对称阵。对 $f(x)$ 求导可以得到 $f(x)$ 在 x 处的一阶导数或梯度 $\nabla f(x) = c + Hx$, 将上式两边继续求导, 可得 $f(x)$ 在 x 处的二阶导数或 Hesse 矩阵 $\nabla^2 f(x) = H$ 。

2.1. 目标函数的建立

轧制规程优化的目的是使轧制过程处于最优状态, 保证设备合理使用, 充分发挥轧机的性能并提高产品质量。因此, 需要建立目标函数来实现铝板带热粗轧机轧制规程的优化。

由于通常情况下, 轧制功率是板带入口厚度和出口厚度的函数[4], 即 $P = f(h_{0[i]}, h_{1[i]})$ 其中, $h_{0[i]}$, $h_{1[i]}$ 分别为第 i 道次板带入口、出口厚度。因此, 通过优化各道次出口厚度可以使得轧制功率最小。各道次出口厚度的优化是在各道次出口厚度经验值的基础上, 在较小的 Δh 邻域内进行优化。厚度经验值可由经验负荷分配法计算得出。

建立目标函数, 首先需要把每个道次的出口厚度变化量合理的设置在目标函数 $f(x)$ 中。然后, 才能利用二次规划算法对各道次出口厚度在小邻域内进行优化。为了以后计算方便, 采用表示真正变形程度的对数应变。

$$\varphi_{[i]} = \ln \frac{h_{0[i]}}{h_{[i]}} \quad i = 1, 2, \dots, P_{num}$$

式中 $\varphi_{[i]}$, $h_{0[i]}$, $h_{[i]}$ 分别为第 i 道次的对数应变(又称真正变形程度[5])、入口厚度和出口厚度。将每个道次对数应变组合成矢量 x , 即 $x = \begin{bmatrix} \varphi_{[1]} & \varphi_{[2]} & \dots & \varphi_{[P_{num}^{act}]} & 0 & f_{cor} \end{bmatrix}^T$ 式中 f_{cor} 为引入的修正因子, 以便于进一步调整达到设定的精度。

2.2. 约束条件的设定

计算最优轧制规程, 除了必须考虑提高产能、保证产品质量等因素外, 还需要考虑轧机设备本身以及工艺方面的限制[6]。根据铝板带热粗轧机的特点, 通常需要考虑以下几个方面: 最大(小)轧制力限制, 最大轧制力矩限制, 最大咬入角限制等。因此, 我们根据设备和工艺限制条件, 进行约束条件的设置。

等式约束条件

等式约束条件主要体现了所有道次总的真正变形程度的变化量。我们所期望的是各道次真正变形程度的总和, 恰好等于所有道次预定的真正变形程度之和与据经验负荷分配方案得出的真正变形程度之和的差值。可用公式表示如下:

$$A_{eq} \cdot x = b_{eq}$$

其中, $A_{eq} = [1 \quad 1 \quad \dots \quad 1]_{1 \times P_{num}^{act}}$ 。

$$b_{eq} = \varphi_{total}^{sch} - \varphi_{sum}, \quad \varphi_{sum} = \sum_{i=0}^{P_{num}^{act}-1} \varphi_{[i]}, \quad \varphi_{total}^{sch} = \ln \frac{h_{0[1]}}{h_{sch}}$$

上面公式中个变量的意义分别为: $h_{0[1]}$ 为第 1 道次入口厚度; h_{sch} 为预定的最后道次出口厚度(即生产目标); φ_{total}^{sch} 为预定的总的变形程度。

不等式约束条件

不等式约束条件包含了最大/小轧制力限制, 最大轧制力矩限制以及最大咬入角的限制。其矩阵形式可用公式表示如下:

$$A \cdot x \leq b$$

首先, 以最大轧制力限制为例, 说明如何将上述限制设置到不等式约束条件中。显然, 轧制力的允许变化量应小于最大轧制力限制值与实际轧制力的差值。可用公式表示如下:

$$F_{sens[i]} \cdot \varphi_{[i]} < F_{max[i]} - P_{[i]}^{act}$$

其中, $F_{sens[i]} = \Delta F_{roll[i]} / \varphi_{[i]}$ 。

$\Delta F_{roll[i]}$ ——第 i 道次轧制力的变化量; $F_{sens[i]}$ ——第 i 道次轧制力的灵敏度 $F_{max[i]}$ ——第 i 道次最大轧制力的限制值 $P_{[i]}^{act}$ ——第 i 道次实际轧制力

同理, 最大轧制力矩的限制也是同样设置。然而, 最小轧制力限制条件的设置需要注意符号的变化。亦可用公式表示如下:

$$F_{sens[i]} \cdot \varphi_{[i]} < P_{[i]}^{act} - F_{min[i]}$$

式中, $F_{min[i]}$ ——第 i 道次最大轧制力的限制值。

对于最大咬入角的限制值设置稍有不同, 其实质还是每个道次压下量的最大允许的变化量必须小于按最大咬入角计算的变化量与该道次实际压下变化量之差。咬入角相关各参数关系如图 1 所示。

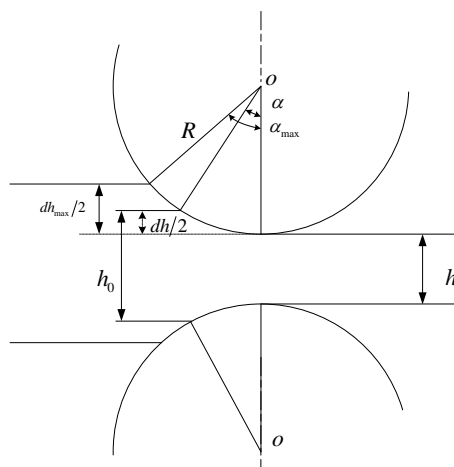


Figure 1. The schematic of nip angle parameter settings

图 1. 咬入角参数设置示意图

可用公式表示如下:

$$h_{[i]} \cdot \varphi_{[i]} < dh_{\max[i]} - dh_{[i]}$$

$$dh_{[i]} = h_{0[i]} - h_{[i]}$$

$$dh_{\max[i]} = (G_{angle}^{\max})^2 \times r$$

式中 G_{angle}^{\max} ——最大咬入角的限制值;

r ——粗轧机机架的工作辊表面半径。

3. 优化求解方法

在 MATLAB 优化工具箱中提供了求解二次规划算法的函数, 求解二次规划的命令为 `quadprog`, 其完整的调用格式如下:

`[x,fval,exitflag,output,lambda]=quadprog(c,A,b,Aeq,beq,lb,ub,x0,options)`。

各矩阵约束如果不存在, 则应该用空矩阵[]来代替。最优化运算完成后, 结果将在变量 x 中返回, 最优化的目标函数将在变量 $fval$ 中返回。`exitflag` 为求解成功标志, 若 `exitflag = 1` 表示求解成功, 否则求解出现问题。

3.1. 基本原理

求解二次规划问题, 程序采取“有效集”方法, 将带约束的二次规划问题转化成无约束二次规划问题, 并最终将问题转化成最小二乘问题, 用 QR (Quadratic Programming) 分解的方法求解。在 QP 问题的有效集解法中, 程序采用构造线性规划子问题的方法来获取问题的迭代初始解, 并使用单纯形法求解[7]。

文献[8]中证明了 QP 问题有效集解法的收敛性。

3.2. 程序实现步骤

调用 MATLAB 优化工具箱中二次规划优化函数进行负荷分配优化的具体操作步骤如下:

第一步: 取得经验负荷分配方案, 预设最大轧制力、最大轧制力矩以及最大咬入角的限制值;

第二步: 设置 Hasse 矩阵 H 以及矢量 c ;

第三步: 根据约束条件公式, 设置等式、不等式、边界约束条件;

第四步: 调用 `quadprog()` 函数, 求解 x 的最小值;

第五步: 判断是否达到精度要求, 如果满足, 表明负荷分配成功; 否则, 跳到第二步再次计算, 根据 dx 值调整 f_{cor} 以便于达到设定精度。

4. 实例仿真分析

以国内某铝板带企业单机架可逆热粗轧机为研究对象。设备的实际参数和所选板带规格如下: 粗轧机的工作辊尺寸: $\Phi 1050(980) \text{ mm} \times 2600 \text{ mm}$; 最大轧制力: 40000 KN ; 最大轧制力矩: $2245 \text{ KN} \cdot \text{M}$; 铝板带型号分别为: 3104、5052、8079; 其中, 板坯初始厚度分别为 643.215 mm , 641.48 mm , 583.292 mm ; 中间坯厚度分别 38.334 mm , 26.20 mm , 32.267 mm 。

选用三种不同规格的铝合金材料, 在入口厚度 $h_{0[i]}$ 和出口厚度 $h_{[i]}$ 已知的情况下, 可根据轧制参数的数学模型求出各个道次的负荷[9], 对优化结果和现场实测数据进行对比, 如图 2、图 3、图 4 所示, 牌号 3104 和 8079 铝合金厚度分配方案略优于实际效果, 牌号 5052 铝合金厚度分配方案接近于现场效果。

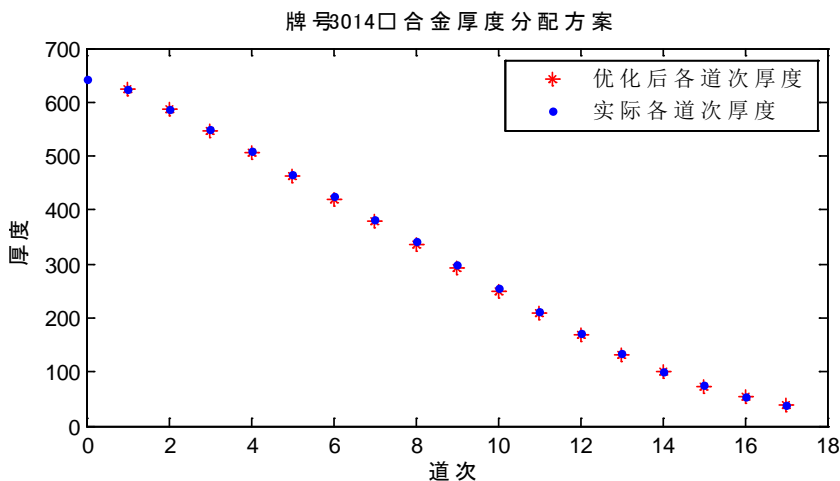


Figure 2. The rolling schedule of 3104 grade aluminum strip
图 2. 牌号 3104 铝合金厚度分配方案

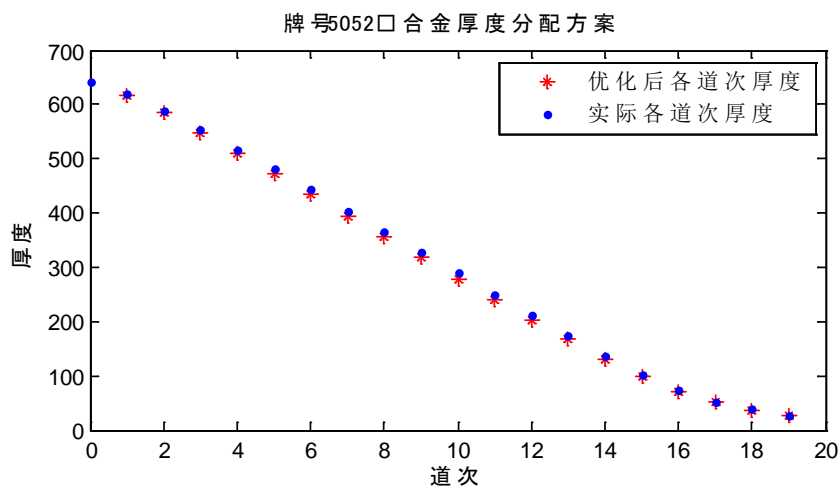


Figure 3. The rolling schedule of 5052 grade aluminum strip
图 3. 牌号 5052 铝合金厚度分配方案

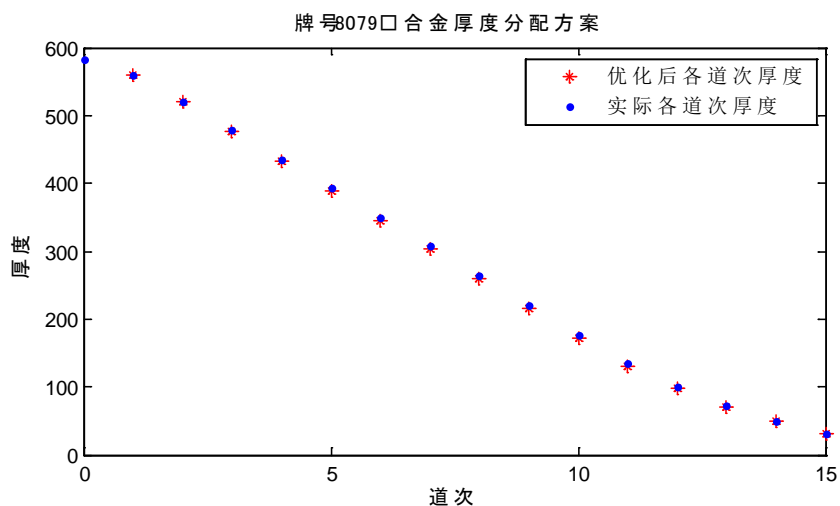


Figure 4. The rolling schedule of 8079 grade aluminum strip
图 4. 牌号 8079 铝合金厚度分配方案

通过对比分析可以得出, 基于二次规划的负荷分配优化算法, 收敛速度快, 能在较短的时间内获得问题的最优解。是一种较为实用的铝板带粗轧机在线负荷分配方案, 有利于提高企业的经济效益。

参考文献 (References)

- [1] 刘荣峰, 王仁忠, 彭鹏, 蒋虬. 不可逆轧机冷轧铝板带厚度分配方法研究[J]. 轻合金加工技术, 2010, 38(4): 17-18+57.
- [2] 魏云华. 现代铝热连轧机组主体设备的配置和控制特点[J]. 有色金属加工, 2004, 33(2): 5-9.
- [3] 马昌凤. 最优化方法及其 Matlab 程序设计[M]. 北京: 科学出版社, 2010.
- [4] 李慧超, 蔡庆伍, 余伟, 杨荃. 双机架可逆冷连轧机组厚度分配途径[J]. 北京科技大学学报, 2004, 26(4): 424-428.
- [5] 孙一康. 带钢热连轧的模型与控制[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2002.
- [6] 蒋虬, 刘荣峰. 遗传算法在铝板带冷轧机轧制规程优化中的应用研究[J]. 有色金属加工, 2010, 39(3): 30-32+29.
- [7] (2010) Algorithm Research of the SQP Method Used in Roll Schedule Calculation for Baosteel's 5m Heavy Plate. *Baosteel Technical Research*, No. S1, 103.
- [8] 孙文瑜, 袁亚湘. 最优化理论与方法[M]. 北京: 科学出版社, 1997.
- [9] 白金兰, 常安, 王国栋, 刘相华, 阳代军, 潘丽梅, 刘光明. 六辊轧机的负荷分配计算[J]. 重型机械, 2005(6): 49-52.