

Memetic 算法在板坯排序中的应用

高知新^{1,2}, 李铁克¹, 苏志雄¹

GAO Zhi-xin^{1,2}, LI Tie-ke¹, SU Zhi-xiong¹

1.北京科技大学 经济管理学院, 北京 100083

2.辽宁工程技术大学 理学院, 辽宁 阜新 123000

1.School of Economics and Management, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China

2.College of Science, Liaoning Technical University, Fuxin, Liaoning 123000, China

E-mail: gao-zhixin@163.com

GAO Zhi-xin, LI Tie-ke, SU Zhi-xiong. Application of Memetic algorithm on slab sequencing. Computer Engineering and Applications, 2009, 45(19): 192-194.

Abstract: The slab sequencing problem in hot strip production is a complex combination optimization problem. It can be formulated as Prize Collecting Traveling Salesman Problem (PCTSP). Memetic algorithm is a marriage between a population-based global search and the heuristic local search, used to solve this problem. Considering the production constraints, a new scheme for initial solution generation is presented, and reduced 3-opt algorithm is used as local search strategy. The experiment results show that the effectiveness and efficiency of this algorithm are satisfactory.

Key words: slab sequencing; Prize Collecting Traveling Salesman Problem (PCTSP); Memetic algorithm; 3-opt

摘要: 热轧带钢生产中的板坯排序是一种复杂的组合优化问题, 可以归结为一个 PCTSP 问题。Memetic 算法(种群全局搜索和启发式局部搜索的结合), 被用来求解热轧板坯排序。考虑到热轧生产约束的特点, 提出了一种初始解构造策略, 并利用缩减 3-opt 邻域搜索算法进行局部优化。仿真结果表明了该算法的优化效果和时间效率都是令人满意的。

关键词: 板坯排序; PCTSP; Memetic 算法; 3-opt

DOI: 10.3778/j.issn.1002-8331.2009.19.059 文章编号: 1002-8331(2009)19-0192-03 文献标识码: A 中图分类号: TP13

1 引言

热轧生产调度是钢铁企业生产调度研究中的热点问题之一。国内外对轧制计划问题做了大量的研究, 文献[1]给出了钢板宽度、厚度、硬度跳跃的惩罚函数表, 并将热轧生产计划编制问题归结为 TSP 模型。文献[2]将热轧计划编制问题建模为 MTSP, 可以同时编制出多个热轧单元计划。文献[3]给出了宽度反跳的惩罚函数表, 并用 VRP 作为问题的模型, 可以编制多个单元计划。文献[4]给出了不同的宽度、厚度、硬度跳跃惩罚结构, 并给出了超过最大停留时间惩罚结构和违反优先级约束的惩罚值, 最后利用 PCTSP 建模来求解热轧调度问题。文献[1]以最小化相邻板坯之间的宽度、厚度、硬度跳跃的惩罚值为目标, 只能生成一个热轧单元计划, 但这种思路对后来的研究者影响很大, 例如文献[2]采用同样的优化目标, 文献[3]在此基础上考虑了宽度反跳的惩罚。

随着钢铁行业的不断发展, 对计划编制水平和产品质量提出了更高的要求, 针对当前的实际生产情况, 在充分考虑工艺约束的基础上建立了基于 PCTSP 的热轧单元计划模型, 并利用 Memetic 算法来求解该模型, 最后用实际生产数据对所提出

的模型和算法进行了仿真实验。

2 Memetic 算法

2.1 算法简介

目前, Memetic 算法 (Memetic Algorithm, MA) 是进化算法 (Evolutionary Algorithm, EA) 研究领域中的一个热点。MA 是一种基于种群的超启发式搜索算法, 是基于种群的全局搜索与启发式局部搜索的结合, 其思想来源于达尔文的自然进化法则和道金斯 (Dawkins) 的 Meme 概念。Meme 是文化进化中的基本单元, 具有局部改进 (local refinements) 的能力。

Meme 一词最早于 1976 年提出^[5], 它仿照基因 (Gene) 一词的拼写, 用于表示在人们交流时传播的信息单元, 它和基因的本质区别在于: Meme 在传播前往往会因个人的思想和理解而改变, 而基因只是进行简单的传播。MA 通过对 Meme 的复制、传播和进化来模仿文化进化, 在这过程中利用局部搜索使每个演化代的所有个体都达到局部最优, 从而大大提高算法的执行速度和性能。一些关于 MA 的最新研究表明这种算法能有效地解决一系列现实世界中的问题, 不仅收敛到高质量的解, 而且

基金项目: 国家自然科学基金 (the National Natural Science Foundation of China under Grant No.70771008, No.70371057)。

作者简介: 高知新 (1971-), 男, 博士研究生, 主要从事生产计划与调度研究; 李铁克 (1958-), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事先进制造管理与生产调度方面的研究与应用工作; 苏志雄 (1980-), 男, 博士研究生, 主要从事生产计划与调度研究。

收稿日期: 2008-10-06 修回日期: 2008-11-19

比传统的方法更有效率。在不同的背景下,MA 也称为混合进化算法,Baldwinian 进化算法,Lamarckian 进化算法,文化算法与遗传局部搜索算法。

基本 Memetic 算法的流程可以描述如下,并给出算法的伪代码程序:

(1)初始解生成,这里可以采用一些构造性启发策略,并对初始种群进行局部优化。

(2)随机选择种群中的个体进行交叉,并对所生成子个体进行局部优化。

(3)随机对种群中的个体进行变异,并对生成个体进行局部优化。

(4)对种群进行更新。

(5)判断结束条件,如不满足则返回第(2)步。

Memetic 算法的程序如下:

```
Initialize population(gen)
evaluation population(gen)
for each individual  $i \in \text{gen}$  do
     $i = \text{local\_search}(i)$ 
end for
while not terminated do
    repeat
        select two individuals  $i, j \in \text{gen}$ 
        apply Crossover( $i, j$ ) giving children( $c$ )
         $c = \text{local\_search}(c)$ 
        add children( $c$ ) to gen
    until crossover=false
    for each individual  $i \in \text{gen}$  do
        if probability=mutation then
             $i = \text{apply local\_search}(\text{Mutation}(i))$ 
        end if
    end for
    gen=Select(gen)
end while
```

2.2 k -Opt 交换法

k -Opt 交换法是 Lin 于 1965 年所提出的^[6], k 表示每次交换边的数目。 k -Opt 法以边为基础,先由当前解中任意删掉 k 条边,此时会将解拆成 k 部分,然后再用 k 条新边将这 k 部分连接起来。当 $k \geq 4$ 的时候,其复杂度太高且效率不佳^[7],因此常用的方法是 2-opt 法与 3-opt 法。对于 ATSP 问题,2-opt 交换将其中一部分的路径反接回另一路径,方向性变化使这部分路径的长度不可预计(对称性 TSP 与方向无关),因此,这种方法不适用。为了克服这个问题,采用 3-opt 交换^[8]。

对于 3 边交换,任选板坯 $i, j, k (i < j < k)$,删除边 $(i, i+1), (j, j+1), (k, k+1)$ 为了避免将某部分路径反转,只能连接新边 $(i, j+1), (j, k+1), (k, i+1)$ 形成唯一的新路径,交换过程如图 1 所示。称这种 3 边交换为缩减 3-opt 交换 (reduced 3-opt exchange),其邻域就是所有可能的这种 3 边交换的集合,邻域大小为 C_{n+1}^3 (含节点 0)。下面给出了缩减 3-opt 算法的伪代码程序。

```
Procedure Reduced3Opt( $T$ )
gain=0
for all  $T' \in \text{3ExchangeNeighborhood}(T)$  do
    NewGain=Original3EdgesCost-New3EdgesCost
    if NewGain>gain
```

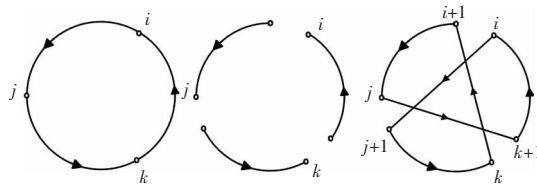


图1 ATSPs 的缩减 3-opt 交换

```
3OptRecord= $T'$ 
gain=NewGain
end if
end for
if gain
     $T = 3\text{OptRecord}$ 
End if
```

3 热轧单元计划的数学模型

3.1 工艺约束

钢铁企业在实际编制热轧调度计划时,是以客户合同为依据,经工艺设计、合同整理归并后,生成生产合同,其中满足一定条件的纳入预选池合同,然后根据生产能力、工艺约束等条件生成轧制单元计划。在热轧生产过程中,由于高温高速轧制,轧辊磨损会影响板形,需要更换。更换两工作辊之间的轧制对象称为轧制单元(roll),即一个轧制计划;两支撑辊之间的轧制对象称为轧制单元组,一般由多个轧制单元组成。出于对产品质量、轧辊寿命和生产效益等的考虑,编制单元计划必须遵守一定的工艺约束,主要包括总轧制长度限制,同宽轧制长度限制,板坯宽度、厚度、硬度变化要平缓等。一个完整的轧制单元由烫辊材和主体材两部分组成,单元中的板坯编排在宽度上呈“双梯形结构”。烫辊材主要用于加热轧辊,由于所需板坯数量少,因此不在本文优化范围之内。

当前钢铁生产企业和用户提高了钢铁产品的质量要求,工艺约束更为严格,主体材是轧制单元的主要组成部分,必须严格遵守如下轧制规范:(1)宽度应向非增方向变化(下跳),跳跃差不大于 25 cm,变化要平滑,允许部分反跳(上跳),跳跃差不大于 15 cm;(2)相邻板坯的厚度和硬度跳跃值必须控制在一定范围内;(3)宽度、厚度、硬度不允许同时变化;(4)一个轧制计划内的钢板的总长度(或重量)不能超过计划的能力;(5)相同宽度的钢板连续轧制不能超过一定长度。

由文献[1-2],给出了宽度、厚度、硬度跳跃惩罚结构,分别为表 1~表 3。

表 1 宽度跳跃惩罚结构

宽度跳跃	惩罚值 (正跳)	惩罚值 (反跳)
0~3	1	10
3~6	2	20
6~9	3	40
9~12	5	80
12~15	10	160
15~18	20	
18~21	30	
21~24	50	
24~25	70	

表 2 厚度跳跃惩罚结构

厚度跳跃	惩罚值 (上跳)	惩罚值 (下跳)
0.000 3~0.03	3	6
0.030 1~0.06	7	14
0.060 1~0.09	12	24
0.090 1~0.12	18	36
0.120 1~0.15	25	50
0.150 1~0.18	33	66
0.180 1~0.21	42	84
0.210 1~0.24	52	104
0.240 1~0.30	66	132
0.300 1~0.45	99	198
0.450 1~3.00	199	398

表3 硬度跳跃惩罚结构

硬度跳跃	惩罚值
1	5
2	15
3	35
4	60
5	75

3.2 数学模型

在文献[9]的基础上,并考虑了轧制规范,基于 PCTSP 建立轧制单元计划优化模型。记 V 为全部板坯集合, $i \in V$ 对应板坯 i , $n=|V|$ 为板坯总数, $i=0$ 对应虚拟板坯 0。 $V_c \subseteq V$ 为被编入轧制单元计划的板坯集合。 w_i, g_i 和 h_i 分别为板坯 i 的宽度、厚度和硬度, $\Delta w_{\max}^-, \Delta w_{\max}^+, \Delta g_{\max}$ 和 Δh_{\max} 分别为热轧轧制规范所允许的相邻板坯最大宽度反跳、宽度正跳、厚度跳跃和硬度跳跃。 c_{ij}^w, c_{ij}^g 和 c_{ij}^h 分别为板坯 i 到板坯 j 的宽度、厚度和硬度跳跃惩罚, 则 $c_{ij} = c_{ij}^w + c_{ij}^g + c_{ij}^h$ 为总惩罚值, 其中 $c_{i0} = c_{0i} = 0, i \in V \setminus \{0\}$ 。 p_i 为板坯 i 的轧制长度, 对应板坯 i 被编入计划时获得的奖金, $p_0 = 0$ 。 γ_i 为板坯 i 未被编入轧制计划时受到的惩罚。 B_{\min} 和 B_{\max} 分别为奖金下限和上限, 对应一个轧制单元的最小轧制长度和最大轧制长度。 $K^s = \{i_1, \dots, i_{|K^s|}\}$ (其中 $s=1, \dots, Q$) 为编入计划、同属宽度系列 s 且连续轧制的最长板坯序列。 R^s 为属于宽度系列 s 的板坯的最大连续轧制长度。 $x_{ij}=1$, 如果 $i, j \in V_c$ 且在计划中板坯 j 紧接在板坯 i 后轧制, 否则 $x_{ij}=0$ 。 $y_i=1$, 如果 $i \in V_c$, 否则 $y_i=0$ 。 则热轧轧制单元计划优化模型描述如下:

$$\min Z = \sum_{i \in V} \sum_{j \in V \setminus \{i\}} c_{ij} x_{ij} + \sum_{i \in V} \gamma_i (1 - y_i) \tag{1}$$

$$\text{s.t. } \sum_{j \in V \setminus \{i\}} x_{ij} = y_i, \forall i \in V \tag{2}$$

$$\sum_{i \in V \setminus \{j\}} x_{ij} = y_j, \forall j \in V \tag{3}$$

$$\sum_{i \in S} \sum_{j \in V \setminus S} x_{ij} \geq y_h, \forall h \in V \setminus \{0\}, \forall S \subseteq V; 0 \in S, h \in V \setminus S \tag{4}$$

$$x_{ij} \in \{0, 1\}, i, j \in V, i \neq j \tag{5}$$

$$y_i \in \{0, 1\}, i \in V \tag{6}$$

$$-\Delta w_{\max}^- \leq x_{ij} (w_i - w_j) \leq \Delta w_{\max}^+ \tag{7}$$

$$|x_{ij} (g_j - g_i)| \leq \Delta g_{\max} \tag{8}$$

$$|x_{ij} (h_j - h_i)| \leq \Delta h_{\max} \tag{9}$$

$$y_0 = 1 \tag{10}$$

$$\sum_{i \in V} p_i y_i \geq B_{\min} \tag{11}$$

$$\sum_{i \in V} p_i y_i \leq B_{\max} \tag{12}$$

$$\sum_{i=1}^{|K^s|} p_i \leq R^s, s=1, \dots, Q \tag{13}$$

其中目标函数(1)使得板坯宽度、厚度、和硬度跳跃以及因未编入计划板坯而受到的惩罚值之和最小;约束式(2)和(3)分别表示轧制单元计划中,板坯后有且只有一块板坯,板坯 j 前有且只有一块板坯;约束式(4)保证任何编入计划的板坯 h 都可以排在板坯 0 后面,且避免子回路的产生;约束式(5)、式(6)表示变量是 0-1 变量;约束式(7)~式(9)表示轧制规范;约束式(10)

表示虚拟板坯 0 一定被编入计划;约束式(11)、式(12)表示轧制单元轧制长度限制;约束式(13)表示同宽轧制长度限制。

如果所有板坯均可以排入轧制单元,即满足约束式(11)~式(13),则上述模型可以表示为:

$$\min Z = \sum_{i \in V} \sum_{j \in V \setminus \{i\}} c_{ij} x_{ij} \tag{14}$$

$$\text{s.t. } \sum_{j \in V \setminus \{i\}} x_{ij} = 1, \forall i \in V \tag{15}$$

$$\sum_{i \in V \setminus \{j\}} x_{ij} = 1, \forall j \in V \tag{16}$$

$$\sum_{i \in S} \sum_{j \in S} x_{ij} \leq |S| - 1, \forall S \subseteq V \setminus \{0\} \tag{17}$$

$$x_{ij} \in \{0, 1\}, i, j \in V, i \neq j \tag{5}$$

$$-\Delta w_{\max}^- \leq x_{ij} (w_i - w_j) \leq \Delta w_{\max}^+ \tag{7}$$

$$|x_{ij} (g_j - g_i)| \leq \Delta g_{\max} \tag{8}$$

$$|x_{ij} (h_j - h_i)| \leq \Delta h_{\max} \tag{9}$$

4 MA 求解板坯排序问题

采用的 Memetic 算法,其 Meme 编码方式为路径表示法,这是表示 TSP 旅程对应的基因编码中最自然、最简单的表示方法。热轧板坯排序问题,其旅程的费用是非对称的,因此,交叉算子、变异算子分别采用单亲逆转算子、单亲换位算子;局部优化策略采用缩减 3-opt 领域搜索算法。

热轧板坯排序要严格遵守轧制规范,但是约束式(7)~式(9)很复杂,难以满足,因此种群里面往往存在很多非法解。非法解在搜索空间中占的比例非常大,如果采用随机方法去产生初始种群,难于达到较好的效果。约束式(7)要求宽度应向非增方向变化,允许少量的反跳,是最难保证的。因此,设计了一种初始解构造策略,尽量减少违反硬约束的个数,又能保证初始解的多样性。

(1)将板坯按宽度降序排列;

(2)相同宽度的板坯产生一个随机排列,并按降序组成一个初始解。

5 仿真实验及其对比

采用上述 Memetic 算法,对 2 个实际轧制单元进行重新排序,并与采用相应初始解构造策略的单亲遗传算法进行比较。种群大小为 40,保留 2 个适应度值最佳的子辈 (Elite children),交叉概率为 0.8,所以计算 $0.8 \times 38 = 30.4$ 取整得 30,生成 30 个交叉子个体,另外还有 8 个变异子个体。本文算法用 MATLAB7.5 遗传工具箱实现,在 CPU 为 T5600(1.83 G)的笔记本上运行。

表 4 为分别计算 10 次的平均目标值、平均运行时间。对于第 2 组数据^[10],求得最好解的宽度、厚度、硬度变化情况见图 2。

由上述结果,对第两组数据来说,Memetic 算法效果比较好,不仅计算时间短,且寻优能力比较强,收敛到目前找到的最好解(目标值为 288 与 188)。对第 2 组数据来说,与文献[10]相比,本文算法找到的最好解(目标值 188)远远小于该文的 1 763,且平均计算时间为 0.72 s 也更具优势,该文的 10 次平均计算时间为 87.92 s。