

轧制批量计划问题的模型及算法研究[†]

陈 雄 郭令忠 徐心和

(东北大学控制仿真研究中心 沈阳 110006)

摘 要 网络建模在系统分析中是最有效的方法之一,广泛地应用于工业工程和生产调度中.应用组合优化中著名的车辆调度问题分析、研究钢铁生产中传统的轧制批量计划问题,提出一种新的具有优化分割功能的遗传算法,并进行了计算机仿真.仿真结果证实该方法的有效性.

关键词 轧制计划, 动态规划, 遗传算法, 车辆调度问题

1 引言

实现热送热装、热送直装、直送直轧等钢铁生产新工艺,要解决的一个典型问题是轧制批量计划的编制问题^[1,2,3].

目前,研究钢铁生产计划通常是用网络分析法或 0-1 整数规划法^[4,5,6].Chang 等^[4]应用一种满足约束的启发式算法来研究轧制计划,但这种方法缺乏优化的目标,同时也未涉及轧制批量计划的问题;Kosiba 等^[5]把轧制计划的问题归结为旅行商问题(TSP)进行研究,应用一种量化轧辊磨损的惩罚结构,来优化问题的目标,然而他们只是研究轧制计划内的排序问题,并未涉及批量问题的研究;而 Jacobs 等^[6]应用目标规划方法,基于生产利润和库存情况的考虑,对轧制批量计划进行研究,但它却没有考虑轧制计划内的合同生产顺序,又未考虑轧辊磨损对生产情况的影响,同时在组成轧制批量计划时,并没有考虑合同拖期生产的惩罚.文[7]中作者仅简单地研究了轧制批量计划问题,并未考虑准时生产的实际情况.

本文应用组合优化中著名的车辆调度问题(VRP)模型来分析、研究钢铁生产中传统的轧制批量计划问题,应用 Bethlehem 钢铁公司的 Burns Harbor 钢铁厂创建的一种量化硬度、厚度、宽度跳跃对轧辊磨损的惩罚结构^[5,6],以优化轧辊磨损和拖期惩罚为目标,协调生产率、产品质量、准时生产三者间的冲突.

2 轧制批量计划问题的模型

2.1 轧制计划的工艺约束简介

轧制批量计划是根据轧制规程约束和合同交货期要求,对预选池中合同进行聚类和排序的过程,其中聚类的个数即是轧制单元个数,每一类即是轧制单元.通常一个完整的轧制计划由烫辊材和主体材两部分组成,各部分的约束不尽相同.

具体的轧制规程约束如下.

(1) 组成烫辊材的合同约束:①合同的硬度级应 2(根据硬度等级);②在烫辊材阶段,合同的宽度应渐增变化,变化平滑;③合同的厚度应在某一范围内等.

烫辊材主要起到加热轧辊,使轧辊辊型达到热平衡、稳定的作用.

(2) 主体材部分的合同约定: ① 合同的宽度应照非增方向变化, 变化要平滑; 相同宽度的合同连续轧制不能超过一定数量; ② 厚度变化要平滑, 不能反复跳跃, 最好是非减方向变化; ③ 硬度变化要平滑, 不能反复跳跃, 最好是按渐近递减或渐近递增方向变化; ④ 宽度、厚度、硬度不允许同时变化等。

以上轧制规程的制定, 其实质主要是为了降低宽度、厚度、硬度跳跃对轧辊磨损的影响, 从而相应地保证了产品质量、提高了轧制生产率、减少了轧辊更换次数等^[5,6]。

因此, 轧制批量计划的目标就是尽可能减小硬度、厚度、宽度跳跃幅度, 从而相应实现优化产品质量、提高轧制生产率的目标。

另外, 再考虑到准时生产的要求, 在目标函数中引进了拖期惩罚, 则轧制批量计划的总优化指标: (1) 最小化带钢硬度跳跃; (2) 最小化带钢厚度跳跃; (3) 最小化带钢宽度跳跃; (4) 最小化合同交货期差异。

2.2 轧制批量计划问题的模型

设有 N 个合同, 每个合同有 5 个特征(宽度、厚度、硬度、重量、交货期)组成, 需要安排 K 个轧制计划(K 为已知), 则可以构成一个有向的网络图, $G(V, A)$, 其中顶点集 $V = (1, 2, \dots, N)$ 表示 N 个合同, 弧边集 $A = \{(i, j) : i < j\}$ 表示从合同 i 到合同 j 间的惩罚和作为弧边权重的集合。由于每个轧制计划是开环的, 为此, 需在顶点集 V 中增加一个公共虚拟合同 $N + 1$, 使得每个轧制计划均构成闭合回路, 满足车辆调度问题的需要; 公共虚拟合同 $N + 1$ 就成为车辆调度问题的车库(depot), 同时规定虚拟合同和其他合同之间的惩罚皆为 0。现定义两个决策变量为

$$y_{ik} = \begin{cases} 1, & \text{合同 } i \text{ 属于第 } k \text{ 个轧制计划} \\ 0, & \text{其他} \end{cases}$$

$$X_{ijk} = \begin{cases} 1, & \text{第 } k \text{ 个轧制计划中第 } i \text{ 个合同紧跟在第 } j \text{ 个合同之后, } i < j \\ 0, & \text{其他} \end{cases}$$

则轧制批量计划问题的模型构成如下:

$$\text{minimize} \sum_{i,j=1}^{N+1} \sum_{k=1}^K (P_{ij}^w + P_{ij}^g + P_{ij}^h + P_{ij}^d) X_{ijk} \quad (1)$$

约束条件为

$$\sum_{i=1}^{N+1} w_i y_{ik} \leq W_{\max}, \quad k = 1, 2, \dots, K \quad (2)$$

$$\sum_{k=1}^K y_{ik} = \begin{cases} K, & i = N + 1 \\ 1, & i = 1, 2, \dots, N \end{cases} \quad (3)$$

$$y_{ik} \in \{0, 1\}, \quad i = 1, 2, \dots, N + 1, k = 1, 2, \dots, K \quad (4)$$

$$\sum_{i=1}^{N+1} X_{ijk} = y_{jk}, \quad j = 1, \dots, N + 1, k = 1, \dots, K \quad (5)$$

$$\sum_{j=1}^{N+1} X_{ijk} = y_{ik}, \quad i = 1, \dots, N + 1, k = 1, \dots, K \quad (6)$$

$$\sum_{i,j \in S} X_{ijk} \leq S - 1, \quad \forall S \subseteq \{2, \dots, N + 1\}, k = 1, \dots, K \quad (7)$$

$$X_{ijk} \in \{0, 1\}, \quad i, j = 1, \dots, N + 1, k = 1, \dots, K \quad (8)$$

其中 N 为要生产的合同总数; K 为要安排的轧制计划数(事先已知); w_i 为合同 i 的重量; W_{\max}

为轧制计划的能力约束; P_{ij}^w , P_{ij}^e , P_{ij}^h , P_{ij}^d 分别代表紧相邻前后两个合同之间在宽度、厚度、硬度、交货期差异引起的惩罚. 有关 P_{ij}^w , P_{ij}^e , P_{ij}^h 的惩罚详细情况, 请参阅[4]. 对于交货期差异引起的惩罚, 假定计划时间是 $[T_1, T_2]$, 定义 P_{ij}^d 为

$$P_{ij}^d = \begin{cases} C_1(d_i - d_j), & \text{第 } i \text{ 个、第 } j \text{ 个合同的交货期 } d_i, d_j \text{ 满足 } d_i > d_j \quad T_1 \\ 0, & \text{第 } i \text{ 个、第 } j \text{ 个合同的交货期 } d_i, d_j \text{ 满足 } d_j > d_i \quad T_1 \\ -C_2, & \text{第 } i \text{ 个、第 } j \text{ 个合同的交货期 } d_i, d_j \text{ 满足 } d_i \quad T_1, d_j \quad T_1 \end{cases}$$

其中 C_1, C_2 是预先给定的非常大的数.

约束(2)~(4)式确定轧制计划内的合同组合, 约束(5)~(8)式确定每个轧制计划的合同生产排序. 约束(3)式保证每个合同只能安排在一个轧制计划内; 约束(2)式是轧制计划的能力约束; 约束(5)~(6)式保证每个轧制计划安排某个合同只能一次(仅生产一次); 约束(7)式避免构成旅行商问题子回路.

以上轧制批量计划问题的数学模型是一个典型的车辆调度问题^[8], 车辆调度问题要求 K 个不同的旅行商的解, 是 NP-难题^[9]. 因此, 大量的求解车辆调度问题的方法都是寻找较好的启发式算法^[8, 10].

3 轧制批量计划问题的求解策略

有关求解车辆调度问题的算法, 通常都是两阶段方法, 要么是先排序-后聚类的方法, 要么是先聚类-后排序的方法. 本文采用先路径-后聚类的算法求解轧制批量计划问题, 第一阶段应用遗传算法将所有合同排成一个大旅行商路径, 第二阶段应用动态规划, 根据能力约束把大旅行商路径分解成 K 个子旅行商路径(K 个轧制计划)的策略.

3.1 遗传算法的描述

遗传算法模拟生物进化论而创建的, 具有并行搜索和不容易陷入局部最优等特点, 广泛用于解决诸如组合优化、机器学习等许多方面的问题^[11, 12].

基本的遗传算法由复制、交叉、变异 3 个遗传算子组成, 其求解问题的结构如图 1 所示.

```

begin
  t = 0
  initialize P(t)
  evaluate P(t)
  while (not termination-condition) do
    begin
      t = t + 1
      select P(t) from P(t-1)
      recombine P(t)
      evaluate P(t)
    end
  end
end

```

图 1 遗传算法结构

本文应用遗传算法求解所有合同构成的大旅行商路径时, 采用的表示方法是把染色体表示成所有合同的一个排列. 例如, 设有 N 个合同, 一条可能路径可以编码长度为 N 的整数向量 (i_1, i_2, \dots, i_N) , 其中 i_k 表示第 i_k 个合同, 这个向量是 1 到 N 的一个排列, 从 1 到 N 的每

个整数在这个向量中正好出现一次. 相应地, 交叉、变异算子都采用基于次序的交叉、变异规则, 这样产生的子代可保持问题的可行解^[13]. 由此算法求得所有合同的较小惩罚的一个排序 (大旅行商). 有关更详细的遗传算法论述, 请参阅文[11, 12].

3.2 分解问题

分解问题就是寻找一个最佳的方法把一个大旅行商路径分解成 K 个小旅行商路径 (轧制计划), 其中主要考虑的约束是能力约束.

首先, 将在大旅行商路径上的 N 个合同的排序进行重新编号, 虚拟合同 $N+1$ 不在大旅行商路径内, 也不用重新编号. 设第 i 个合同是分离点, 把旅行商路径分成两段, 则一个轧制计划在第 i 个合同完成, 而第 $i+1$ 个合同是另一个轧制计划的开始. 在分解过程中, 产生了附加费用, 其值为 $E_i = C_{i, N+1} + C_{N+1, i+1} - C_{i, i+1}$. 则分解问题可表示成一个整数规划形式: 寻找 i_1, i_2, \dots, i_K 个分离点, 使

$$\text{minimize} \quad \sum_{k=1}^K E_{i_k} \quad (9)$$

约束条件为

$$\sum_{j=i_{k+1}}^{i_{k+1}} w_j \leq W_{\max}, \quad k = 1, \dots, K, \quad i_1 \leq i_2 \leq \dots \leq i_K \leq N$$

其中 w_i 是第 i 个顶点 (大旅行商路径上的新编号) 合同的重量, $i = 1, \dots, N$; i_k 是第 k 个分离点的合同编号, $k = 1, \dots, K$; E_i 是分离点 i 所引起的附加费用, $i = 1, \dots, N$; W_{\max} 是轧制计划的能力限制, $i_{k+1} = i_1$, 由文[7, 13] 可得如下形式的分解问题

$$\text{minimize} \quad \sum_{k=1}^K E_{i_k} \quad (10)$$

约束条件为

$$\sum_{j=1}^{i_k} w_j - (K - k) W_{\max} \leq \sum_{j=1}^{i_k} w_j \leq k W_{\max}, \quad k = 1, \dots, K - 1$$

$$\sum_{j=i_{k+1}}^{i_{k+1}} w_j \leq W_{\max}, \quad k = 1, \dots, K - 1, \quad i_k \leq i_{k+1}, \quad k = 1, \dots, K - 1$$

下面, 应用动态规划求解这个问题. 动态规划^[14] 是一种作出一系列相关决策的数学方法, 它的特点是把问题分成几个阶段, 每个阶段有许多状态变量, 对于某个阶段的每个状态, 应用上一个阶段的信息, 作出优化决策. 应用递归关系作出整个过程的最优决策.

设决策变量 d_k 是第 k 个轧制计划内所安排的合同数, s_k 表示计划 k 的状态, 即 $s_k = i_k$, 则 $s_{k-1} = s_k - d_k$. 令 $f_k(s_k, d_k)$ 表示计划 k 在点 s_k 完成时的附加费用, 第 k 计划内安排 d_k 个合同, 因此, 在阶段 d_k , 问题就是

$$\text{minimize} \quad f_k(s_k, d_k) = E_{s_k} + f_{k-1}^*(s_{k-1}) \quad (11)$$

其中 $f_k^*(s_k) = \min_{d_k} f_k(s_k, d_k)$.

$$d_k \geq 0 \quad (12)$$

约束条件为

$$\sum_{j=1}^{s_k} w_j - (K - k) W_{\max} \leq \sum_{j=1}^{s_k} w_j \leq k W_{\max} \quad (13)$$

$$w_i = W_{\max}, \quad k = 1, \dots, K-1, \quad i_k = i_{k+1}, \quad k = 1, \dots, K-1 \quad (14)$$

其中 $s_0 = 0, f_0^*(s_0) = 0$.

4 仿真结果和分析

本文采用某钢铁厂的实际生产合同数据4组(经过适当加工)应用文中所建立的轧制批量计划模型和所开发的算法,在486计算机上进行仿真,算法用C语言编程.仿真结果如表1所示.由表1可以看出,与熟练计划员编排的计划相比,惩罚值明显减少.数值结果证实了该方法的有效性.表1中的数据结果,是取得10次实验中的最好的结果.

表1 实验结果

总合同数	能力约束	轧制单元数	人工编排计划	VRP方法	改善比例	交叉率 P_c	变异率 P_m	最大代数	子群数	时间 (s)
78	1200	1	302	208	31%	0.90	0.04	100	30	12.02
152	1000	2	450	160	64%	0.85	0.03	100	30	16.92
224	1200	3	608	285	53%	0.85	0.02	100	30	25.31
322	1000	4	950	454	52%	0.90	0.02	100	30	31.11

5 结语

在本文中,我们用车辆调度模型对轧制批量计划进行分析、求解,将多个独立且相关的生产目标综合成一个指标——总惩罚值来确定板坯在轧制计划中的分配、排序.初步的实验结果表明:轧制批量计划的车辆调度问题模型, Bethlehem 钢铁公司 Burns Harbor 钢铁厂创建的惩罚结构,以及两阶段算法——遗传算法+动态规划(先排序-后聚类)可以令人满意地求解这一困难的问题.

参 考 文 献

- 徐心和, 陈雄, 郭令忠等. 炼钢-连铸-热轧一体化管理. 冶金自动化, 待发表
- Eimei Ohnishi, *et al.* System Technology Supporting Operation of Direct Rolling. *Iron Steel*, 1988, 7: 1314 ~ 1321
- Hiroshi Yoshimura, *et al.* Production Control System for Direct Linked Process between Continuous Casters and Hot Strip Millor Plate Mill at Oita Works, Nippon Steel Co. *Iron Steel*, 1988, 7: 1323 ~ 1330
- Chang S Y, Yushin Hong, Chilyuk Jun. Constraint Satisfaction A pproach to Scheduling DHCR Process. *Proceedings of International Conference on Computerized Production Control in Steel Plant*, South Korea, 1993: 464 ~ 470
- Kosiba E D, Wright J R, Cobbs A E. Discrete Event Sequencing as a Traveling Salesman Problem. *Computers in Industry*, 1992, 19: 317 ~ 327
- Jacobs T L, *et al.* Optimal Inter-process Steel Production Scheduling. *Comput Oper Res*, 1988
- Bodin L, Golden B, Assad A. Routing and Scheduling of Vehicles and Crews: the State of the Art. *Comput Oper Res*, 1983, 10: 62 ~ 212
- Johnson D S, Papdimitrou C H. Computation Complexity. In: E L Lawler, J K Lensta, A H G Rinnooy Kan, D B Shmoys (eds.) *The Traveling Salesman Problem*, Wiley, 1985: 37 ~ 86
- Laporte G. The Vehicle Routing Problem: an Overview of Exact and Approximate Algorithms. *European Journal of Research*, 1992, 59: 345 ~ 358
- Holland J h. *Adaptation in Natural and Artificial Systems*. Ann Arbor: The University of Michigan Press, 1975

- 11 Goldberg D E. Genetic Algorithms in Search, Optimization, Machine Learning. Reading MA: Addison Wesley, 1989
- 12 Bellman r. Dynamic Programming. Princeton University Press, Princeton, NJ, 1957
- 13 Xiong Chen, Weishui Wan, Xinhe Xu, *et al.* Model of Rolling Batch Planning and its Solution. to be Published in Proceeding of the Fourth International Conference on Control, Automation, Robotics and Vision (ICARCV'96), Singapore, 1996
- 14 Bowerman R L, *et al.* The Spacefilling Curve with Optimal Partitioning Heuristics for VRP. European Journal of OR, 1994, **76**: 128 ~ 142

MODEL AND ALGORITHM FOR ROLLING BATCH PLANNING

CHEN Xiong GUO Lingzhong XU Xinhe

(Control & Simulation Center, Northeastern University 110006)

Abstract network model is one of the most effective methods for the system analysis, and has been applied widely in industrial engineering and production scheduling. In this paper, the vehicle routing problem of combinational optimization is used to analyse and study the rolling batch planning in steel-making plant. A new genetic algorithm with optimal partitioning function is developed for the problem, and numerical simulation is tested. This algorithm is proved effective by the simulating results.

Key words rolling plan, genetic algorithm, dynamic programming, vehicle routing problem

作者简介

陈 雄, 33 岁, 博士生. 研究领域为钢铁生产计划与调度, 智能算法.

郭令忠, 32 岁, 副教授. 研究领域为 CIMS, 连铸、连轧过程控制与仿真, 生产计划和调度等.

徐心和, 男, 57 岁, 教授, 博士生导师. 研究领域为 CIMS, 连铸、连轧过程控制与仿真, 管理信息系统, 离散优化与调度等.

