

罩式退火炉生产优化调度方法及其应用¹⁾

刘全利 王伟 朱瑞军 李宁 金吉凌

(大连理工大学信息与控制研究中心 大连 116024)

(E-mail: liuql@student.dlut.edu.cn)

摘要 罩式退火炉的生产调度过程是一个典型的多工序、多约束、有重入的多机并行调度问题, 难于解析建模. 对此问题, 将离散事件仿真技术与改进的遗传算法相结合, 提出罩式退火炉生产的优化调度方法. 生产现场的实际应用表明所提方法大大提高了生产设备的利用率和生产效率.

关键词 优化调度, 遗传算法, 离散事件仿真

中图分类号 TP399

Optimal Scheduling Method and Its Application for a Bell-type Batch Annealing

LIU Quan-Li WANG Wei ZHU Rui-Jun LI Ning JIN Ji-Ling

(Research Center of Information and Control, Dalian University of Technology, Dalian 116024)

(E-mail: liuql@student.dlut.edu.cn)

Abstract The production scheduling of a bell-type batch annealing is a typical multi-working procedure, multi-constraints, re-entry, multi-machine parallel scheduling problem. It is also very difficult to build its mathematic model. In this paper, an optimal scheduling method for a bell-type batch annealing is proposed by combining an improved genetic algorithm with discrete event simulation technique. The application result shows that the method improves production efficiency and gains economic benefits.

Key words Optimal scheduling, genetic algorithm, discrete event simulation

1 引言

罩式炉退火车间的生产调度过程是一个典型的多工序、有重入的多机并行调度问题, 且伴随着复杂的资源约束、能源约束和工艺约束, 难于解析建模^[1,2]. 文献 [1] 考虑了批量处理情况, 即假设开始调度时所有炉台均处于空闲状态, 在此基础上, 采用时间槽分解的方法建立了退火车间的混合整数线性规划 (MILP) 模型, 并应用分枝定界法进行求解. 该

1) 国家“863”计划重点课题 (2002AA412020) 和辽宁省高等学校学科拔尖人才基金 (2003-54) 资助

Supported by key project of National “863” Program(2002AA412020) and disciplines excellent youth fund universities of Liaoning Province (2003-54)

收稿日期 2003-05-26 收修改稿日期 2004-06-23

Received May 26, 2003; in revised form June 23, 2004

方法在应用中有两个问题:一是大部分退火车间均是不间断生产,所有炉台均空闲的初始状态假设不太符合实际;二是形成的 MILP 模型规模较大,没有特别有效的解法.文献 [2] 将问题简化为一个混合流水车间排序问题,设计了相应的贪婪排序算法进行求解.但在建模过程中将有十二个操作阶段的退火过程简化为两个阶段来处理,因此离实际应用仍有一定的差距.

本文针对罩式炉退火过程的具体特点,将离散事件仿真方法和改进的遗传算法相结合,建立了罩式炉退火过程优化调度模型.该模型中,离散事件仿真作为隐式模型出现,遗传算法根据离散事件仿真的结果对调度解可行集进行搜索,最后求得优化的调度方案.本文提出的优化调度方法已应用在某薄板厂的罩式退火炉车间生产调度系统,取得了很好的应用效果.

2 问题描述

实际的罩式炉退火操作过程可分为如下 12 个工序:1) 装炉,用行车将一个退火计划装到一个空闲炉台上;2) 扣内罩,用行车将一个内罩扣到一个已经装炉的炉台上,这个步骤和上面一个步骤一共大约需要 25 分钟;3) 冷密封,检查内罩是否扣严,15 分钟;4) 前吹扫,吹入氮气,逼出氧气,30 分钟;5) 扣加热罩,用行车将一个空闲加热罩吊到本炉台上来,扣在内罩外侧,8 分钟;6) 加热,开始对钢卷进行加热,加热时间由工艺定,各个退火计划由于内含钢卷不同,加热时间也不同;7) 吊走加热罩,加热结束时,需要用行车把加热罩吊走,8 分钟;8) 扣冷却罩,用行车吊一个空闲冷却罩扣于内罩上,8 分钟;9) 冷却,开始降温过程,冷却时间随工艺定;10) 后吹扫,用氮气对钢卷进行吹洗,30 分钟;11) 吊走冷却罩,用行车把冷却罩吊走,8 分钟;12) 出炉,用行车先把内罩吊离,然后把各个钢卷吊走,25 分钟.在这 12 个工序中,除加热和冷却时间由工艺设定外,其它操作时间基本固定.

罩式炉退火生产的约束条件分为工艺约束、资源约束和能源约束.

1) 工艺约束.每个退火计划必须严格按照给定的 12 个工序进行生产,同时不允许辐射冷却,即在加热罩吊走后,必须立刻扣上冷却罩,若加热结束时没有空闲的冷却罩,则加热罩不能卸走,进行带热罩冷却,直到有空闲的冷却罩为止.

2) 资源约束.包括加热罩、冷却罩、行车、地爬车约束.加热罩和冷却罩资源约束中还存在炉型匹配问题.行车资源和地爬车资源的重入性质使得当炉台数增多时,这两种资源的合理调度对整个车间的作业效率有很大影响.

3) 能源约束.包括煤气和氮气能源两种约束.这两种约束一般根据煤气和氮气管道的分布按照炉区来进行限制.

3 罩式退火炉生产优化调度方法

因为各个退火计划的加热时间和冷却时间不同,装炉顺序对退火车间产量有很大的影响.装炉顺序不合适会导致集中装出炉、集中加热、集中冷却现象,从而造成大量炉台中出现等待资源状况,导致产量下降,交货期延迟.所以,优化目标是找到合理的装炉顺序.优化调度的基本思想如图 1 所示,用离散事件仿真对整个退火车间进行动态模拟,用

遗传算法对装炉顺序可行集进行搜索. 图中“其它决策变量”包括各个炉台相应退火作业各阶段中使用的资源号(行车号、加热罩号、冷却罩号)及各操作的起始时间.



图 1 基于仿真优化的退火炉调度原理

Fig. 1 Batch annealing scheduling principle based on simulation and optimization

3.1 目标函数设计

以资源抛空率总和作为调度的性能指标, 如下式所示:

$$\min f = \sum_{k=1}^R a_k \left(1 - \frac{\sum_{i=1}^N t(i, k)}{\sum_{i=1}^N T(i, k)} \right) \quad (1)$$

其中 R 为受限资源(加热罩、冷却罩和行车)总数, a_k 表示 k 受限资源的加权系数, $t(i, k)$ 为退火计划 i 对 k 受限资源的工序时间要求(已知), $T(i, k)$ 为生产计划 i 花费在 k 受限资源上的实际时间(包括等待时间), N 为退火计划总数量. 由于采用了离散事件仿真隐式建模方法, 决策变量未在目标函数中显式出现.

3.2 基于面向对象技术的离散事件动态仿真

采用事件驱动法建立离散事件仿真模型, 模型中事件的划分、约束的处理、竞争资源的处理以及高效面向对象实现可参见文献 [3].

3.3 带有参数自适应调节的遗传算法

遗传算法作为一种优化方法, 现已广泛应用于各种复杂优化问题的求解^[4~7]. 但在传统遗传算法中, 较大的固定的交叉率和变异率会浪费大量计算, 优化效率不高; 相反, 较小会产生“早收敛”, 优化结果达不到要求^[8]. 对此问题, 本文提出改进的遗传算法, 用适应度的均值和方差联合描述种群的状态, 通过适应度的集中程度自适应地调节种群的交叉率和变异率, 从而保证算法的全局收敛和快速收敛效率. 具体的自适应调节参数公式如下:

$$p_c = \begin{cases} p_{c1} + k_1 \exp(-\beta)\alpha, & k_1 \exp(-\beta)\alpha \leq k_2 - p_{c1} \\ k_2, & k_1 \exp(-\beta)\alpha > k_2 - p_{c1} \end{cases} \quad (2)$$

$$p_m = \begin{cases} p_{m1} + k_3 \exp(-\beta)\alpha, & k_3 \exp(-\beta)\alpha \leq k_4 - p_{m1} \\ k_4, & k_3 \exp(-\beta)\alpha > k_4 - p_{m1} \end{cases} \quad (3)$$

式中 p_c 表示交叉率, p_m 表示变异率, $\alpha = f_{ave}/f_{max}$, $\beta = f_{dev}/f_{dev-max}$, f_{ave} 表示种群个体适应度的平均值, f_{max} 表示种群个体适应度的最大值, f_{dev} 表示目前种群个体适应度的方差值, $f_{dev-max}$ 表示到目前为止个体适应度方差的最大值. p_{c1} 和 p_{m1} 为常数, 根据不同的问题通常分别取值为 0.2 ~ 0.65 和 0.001 ~ 0.2. 常数 k_1 和 k_3 取值范围 0 ~ 1.0. 常数 k_2 是接近于 1 的常数, 通常取为 1.0, 常数 k_4 通常取为 0.2 ~ 0.4.

公式 (2) 和 (3) 的基本思想就是根据种群个体的聚散程度动态调节 p_c 和 p_m , 保持群体的多样性, 使算法快速全局收敛. 在上面的公式中, 用 β 来描述种群中个体聚散程度,

β 越小,表示适应度值越集中,种群的多样性丧失的越厉害.所以 p_c 和 p_m 应该随着增加而减小.用 α 来描述种群的进化程度和集中程度, α 越大表示越接近于种群进化的后期,种群个体的集中程度越大,也就越可能陷入局部最优点.所以, p_c 和 p_m 应该随着 α 的增加而增加.在进化的开始阶段 β 会很大, α 会很小,那么 p_c 和 p_m 就会很小,为了加快寻优速度,给 p_c 和 p_m 一个比较小的初值分别为 p_{c1} 和 p_{m1} .随着进化的不断进行, α 和 β 能够完整的表示目前种群的进化状态和个体的聚散状态.根据 α 和 β 的值来动态调整 p_c 和 p_m ,能够根据目前种群的状态来决定下一步进化的操作,使得整个搜索过程能够快速寻优.

采用文献 [8] 中的标准测试用例,对本文所提具有参数自适应调整功能的遗传算法与文献 [8] 中的自适应遗传算法进行了对比,在种群规模、优化代数、复制方法、标定方法均相同的情况下,本文所提遗传算法在最优解质量和求解速度上均优于文献 [8] 的遗传算法.

3.4 优化调度算法

罩式退火炉优化调度算法如下.

假定有 M 个炉台, H 个加热罩, C 个冷却罩, L 部行车, N 个待排产的生产计划.

步骤 1. 启动遗传算法模块.遗传算法模块把 N 个待排产的生产计划从 1 到 N 编号.产生初始种群,初始种群的每个个体代表一个调度方案,采用自然数编码,例如 $(1, 2, 3, \dots, N-1, N)$ 是一个个体,代表一种调度方案;而 $(N, N-1, \dots, 3, 2, 1)$ 是另一个个体,代表另一种调度方案,其生产顺序与上一种相反.把初始种群作为当前种群保存.

步骤 2. 判断是否达到规定的最大代数.若达到规定的最大代数,从仿真过的所有种群中选出具有最优生产指标的个体,该个体所代表的排产计划作为最优的调度方案,结束程序运行;否则进入下一步.

步骤 3. 把当前种群中的每个个体作为输入调用离散事件仿真模块.每个个体的仿真过程如步骤 4 至步骤 11.

步骤 4. 仿真初始化.读入 M 个炉台的当前生产状态,把这些生产状态转换成对应的事件或者等待事件,事件按时间顺序放入事件队列,事件队列只有 1 个.等待事件放入等待事件队列,根据实际情况按优先级不同把等待事件分成 4 类,用 4 个二叉排序树存放这 4 类等待事件,每个二叉排序树就是一个等待事件队列,相同优先级的等待事件按发生时间排序.然后,设置仿真时钟为 0.

步骤 5. 判断有没有满足条件的等待事件.按优先级查看哪个等待事件所等待的条件可以得到满足.如果满足,从等待事件队列中提出此等待事件,进入下一步;如果不满足则跳过下一步.

步骤 6. 执行满足条件的等待事件.其操作包括产生下一个事件,占用相关资源,销毁自身(即释放该等待事件对象占用的内存资源).将所有满足条件的等待事件都执行后,进入下一步.

步骤 7. 选择一个最早发生的非等待事件.从事件队列中选择一个发生时间最早的事件,如果不只一个,一并选择出来.

步骤 8. 将仿真时钟推进到该事件的发生时间.

步骤 9. 执行该非等待事件.操作包括释放与占用相关资源,产生下一个事件或者等待事件,销毁自身(即释放该非等待事件对象占用的内存资源).

步骤 10. 判断仿真是否可以结束. 判断结束条件是否满足, 即判断事件队列是否为空, 若为空则进入下一步; 若不为空, 则回到步骤 5 继续执行.

步骤 11. 结束仿真.

步骤 12. 进行选择运算. 在仿真的执行过程当中, 不断记录程序状态, 包括等待受限资源的时间以及工作时间等. 一个个体仿真结束后, 利用所记录的数据计算式 (1) 的目标函数, 并计算相应的适应度函数值送入遗传算法模块, 遗传算法模块会根据当前种群中所有个体的适应度函数值采用轮盘赌的方法对这些个体进行选择.

步骤 13. 进行交叉运算. 将选择后的各个个体采用部分映射交叉 (PMX) 法交叉, 按式 (2) 计算交叉率.

步骤 14. 进行变异运算. 采用的是互换变异, 随机的选择两个位置, 并将这两个位置互换, 按式 (3) 计算变异率.

步骤 15. 把经过选择、交叉和变异的所有个体作为当前种群, 返回步骤 2.

4 罩式炉生产调度系统及应用效果

本文提出的优化调度方法已成功地应用于某厂罩式退火炉车间的调度排产. 优化调度系统采用了 ASP.NET 技术, 实现了 B/S 架构的软件体系结构. 车间内 46 个炉台的当前的生产状态包括计划号、当前操作、剩余时间、行车、冷罩、热罩由该厂原有的产销系统数据库中导入. 优化调度系统可给出分班操作指导、总操作指导、指导甘特图. 以 2003 年 1 月 30 日的实际生产排产为例, 共排产 19 炉, 优化调度系统调度结果为 60.50 小时, 而按以前通常的人工排产作业时间为 66.57 小时, 优化调度系统排产比人工排产减少了 6.07 小时. 图 2 给出了其中 18 个炉台以调度时刻为起始时刻, 未来时段内各个炉台的生产情况预测. 图中纵轴表示相应的炉台号, 横轴表示生产时间, 为显示方便, 图中只给出了装炉、加热、冷却、出炉四个事件. 优化调度系统应用后, 排产准确率提高了 10%, 热罩抛空率减小了 3%, 退火车间月产量提高 2%, 创造了明显的经济效益.

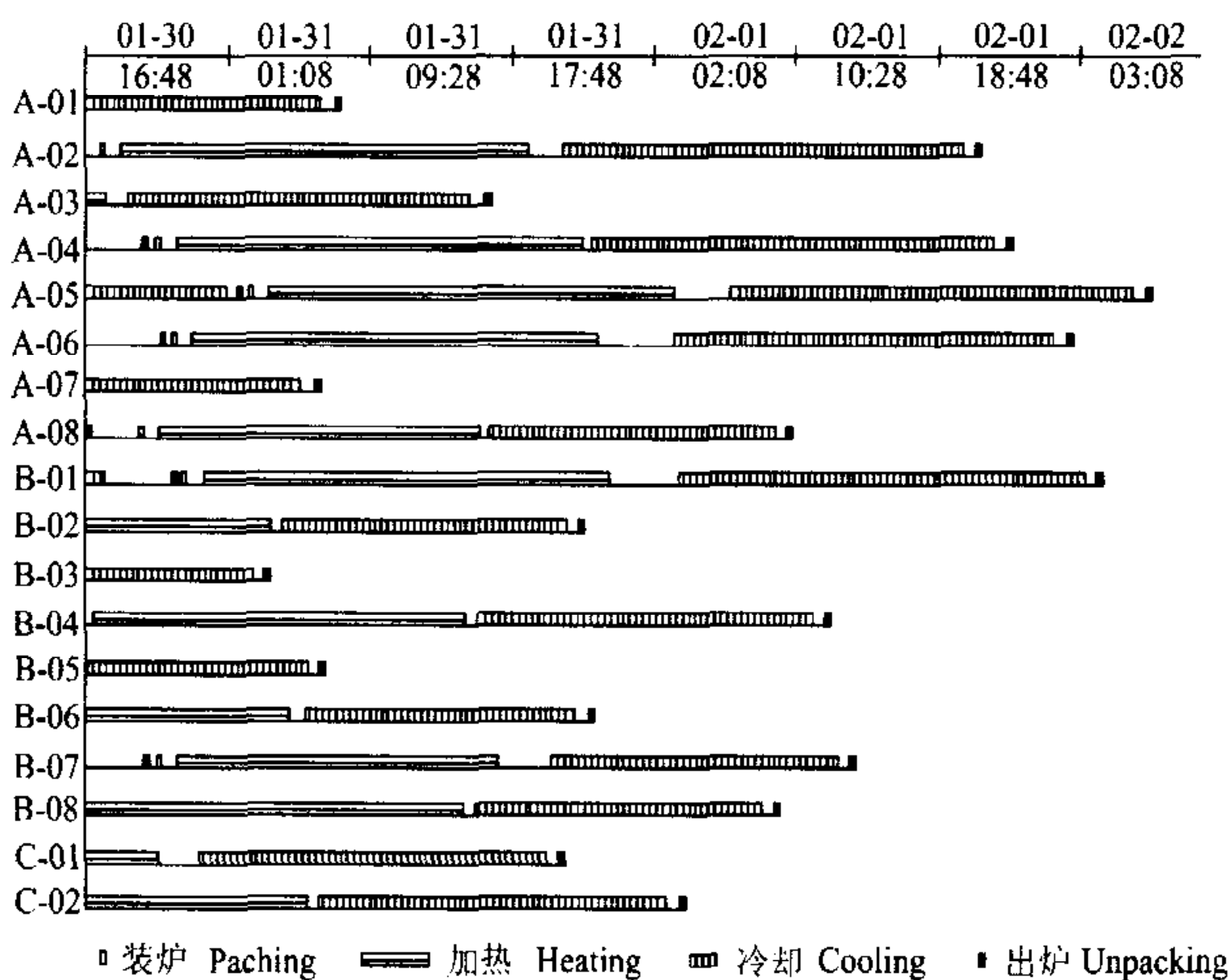


图 2 优化调度甘特图

Fig. 2 Gantt chart of optimized scheduling

5 结束语

本文的主要贡献: 一是引入个体适应度值的方差和均值来描述种群的聚散程度, 提出了一种具有参数动态调节功能的改进遗传算法; 二是将离散事件仿真技术与改进的遗传算法相结合, 提出罩式退火炉生产的优化调度方法. 并以此为核心开发了罩式退火炉生产优化调度计算机系统并成功应用于生产实际, 取得了很好的调度效果, 为企业带来了经济效益.

References

- 1 Moon S, Hrymak A N. Scheduling of the batch annealing process-deterministic case. *Computers and Chemical Engineering*, 1999, **23**(9): 1193~1208
- 2 Dong J F, Liu Z X, Xie J X, Xing W X. Mathematical model and algorithm for scheduling of steel coils annealing. *Iron and Steel*, 2001, **36**(12): 73~76(in Chinese)
- 3 Li N, LIU Q L, Wang W, Liu R G. A batch annealing shop discrete event simulation system and its application. *Computer Integrated Manufacturing Systems*, 2003, **9**(7): 571~575(in Chinese)
- 4 Fan Y L, Tan M. Solving the programming problem in reconfigurable manufacturing system based on genetic algorithm and tabu search. *Acta Automatica Sinica*, 2002, **28**(3): 461~465(in Chinese)
- 5 Tang L X, Yang Z H. Integer programming model and modified genetic algorithm for optimal turned-out slab pile for hot rolling schedule. *Acta Automatica Sinica*, 2000, **26**(4): 461~469 (in Chinese)
- 6 Liu M, Wu C, Yin W J. Solving identical parallel machine production line scheduling problem with special procedure constraint by genetic algorithm. *Acta Automatica Sinica*, 2001, **27**(3): 381~386 (in Chinese)
- 7 Catherine A P, Leonardo B H, Philippe B. A two-stage methodology for short-term batch plant scheduling: discrete-event simulation and genetic algorithm. *Computers and Chemical Engineering*, 1998, **22**(10): 1461~1481
- 8 Srinivas M, Patnaik L M. Adaptive probabilities of crossover and mutation in genetic algorithms. *IEEE Transactions on System, Man and Cybernetics*, 1994, **24**(4): 656~667

刘全利 大连理工大学信息与控制研究中心博士研究生, 主要研究领域为先进生产计划与调度方法.

(LIU Quan-Li Ph. D. candidate at Research Center of Information and Control, Dalian University of Technology. His research interests include advanced method in production plan and scheduling.)

王伟 大连理工大学信息与控制研究中心主任, 教授, 博士生导师, 主要研究领域为复杂工业过程建模与控制、智能调度方法等.

(WANG Wei Professor, Ph.D. director and Director of Research Center of Information and Control, Dalian University of Technology. His research interests include modeling and control of complicated industry process, intelligent scheduling method etc.)

朱瑞军 大连理工大学副教授, 博士, 主要研究领域为非线性系统控制、鲁棒控制等.

(ZHU Rui-Jun Ph.D. and associate professor at Dalian University of Technology. His research interests include non-linear system control and robust control.)

李宁 硕士, 主要从事离散事件仿真方法的研究.

(LI Ning Master. His research interests include discrete event simulation method.)

金吉凌 硕士, 感兴趣的研究方向为遗传算法、进化算法等.

(JIN Ji-Ling Master. His research interests include genetic algorithm and evolution algorithm.)