

基于 PSO 的置换流水车间调度算法

周 驰, 高 亮, 高海兵

(华中科技大学工业工程系, 湖北武汉 430074)

摘 要: 置换流水车间调度问题(PFSP)是典型的具有工程背景的组合优化问题. 对该问题的研究具有重要的理论意义与应用价值. 本文针对 PFSP 问题提出了新的基于粒子群优化(PSO)的调度算法. 论文分析了广义粒子群优化(GPSO)模型中信息流动拓扑结构的缺陷, 提出新的基于种群的元启发式算法信息共享机制 SISM. 基于 SISM 信息共享机制的 PSO 调度算法利用 PFSP 问题的邻域知识指导个体的局部搜索. 与历史文献中该问题的代表性算法比较, 该算法可在调度质量与计算费用之间获得较好的平衡. 仿真实例验证了该调度算法的有效性.

关键词: 粒子群优化; 置换流水车间调度; 信息共享机制; 邻域知识

中图分类号: TP38 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2006) 11-2008-04

Particle Swarm Optimization Based Algorithm for Permutation Flow Shop Scheduling

ZHOU Chi, GAO Liang, GAO Hai bing

(Department of Industrial Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan, Hubei 430074, China)

Abstract: Permutation Flow shop scheduling (PFSP) is a complex combinatorial optimization problem with strong engineering background, and is of great importance in both theory and application. In this paper, a new PSO based flow shop scheduling algorithm is proposed to generate optimized PFSP schedule. First, limitation of information sharing mechanism in GPSO model is analyzed and new population based information sharing strategy is proposed. PFSP scheduling algorithm based on new information sharing strategy utilizes problem concerned knowledge to direct its search in the local search procedure. Compared with representative PFSP scheduling algorithms, the proposed algorithm can obtain good balance between quality of schedule and computational cost. Simulation results validate its efficiency.

Key words: particle swarm optimization; permutation flow shop scheduling; information sharing strategy; neighborhood knowledge

1 引言

置换流水车间调度(Permutation Flow Shop Scheduling Problem: PFSP)是制造系统中重要的规划问题. 该问题一般可以描述为: n 个待加工的工件 $J = \{1, 2, \dots, n\}$, 需要在 m 台机床 $M = \{1, 2, \dots, m\}$ 上完成加工. 每个工件包含 m 道加工工序 $O_{j1}, O_{j2}, \dots, O_{jm}$, 其中 O_{jk} 代表工件 j 在机床 k 上加工时间为 p_{jk} 的工序. PFSP 规定: (1) 每个工件在机床上的加工顺序相同; (2) 每台机床上工件的加工顺序相同; (3) 每台机床每次最多只能加工一个工件; (4) 每个工件每次只能由一台机床加工. 优化调度的目的是在该问题的所有可行调度中确定每个工序的开始时间 s_{ij} , 使总完工时间 C_{\max} 最小即: $C_{\max}^* = \min(C_{\max}) = \min\{\max(s_j + p_{ij}) : \forall J_i \in J, M_j \in M\}$, 满足以上条件的工件加工顺序即为置换流水车间调度的最优解.

车间生产环境中优化调度的自动生成是智能制造领域的重要研究内容. PFSP 调度算法通过对制造过程进行作业计划, 以实现流水车间环境下生产过程的优化调度. PFSP 广泛

应用于实际生产, 尤其适用于单件大批量生产背景的制造企业. 对流水车间生产的优化调度可有效提高制造资源利用率与企业生产效益.

置换流水车间调度的常用方法大致可分为三类^[1]: 构造启发式方法(如 Gupta, Johnson, Palmer, CDS, NEH 等)、运筹学方法(如分枝定界法、割平面法、动态规划法等)、基于人工智能的元启发式算法(如模拟退火、禁忌搜索、遗传算法、蚂蚁算法等). PFSP 问题的构造启发式算法可以在较短时间内获得调度问题的解. 但是该类方法在构造调度的过程中依赖根据问题局部信息设计的调度规则, 所获得的调度一般为局部最优解. 运筹学方法的应用受问题规模与计算费用的限制. 对于类似 PFSP 的复杂组合优化问题, 该类方法难以在有限时间内获得问题的优质解. 基于物理或仿生学机理的一类元启发式调度算法能够在可行时间内以较大概率获得该类问题的最优解或近似最优解, 成为各种车间调度问题最常用的算法.

粒子群优化(Particle Swarm Optimization: PSO)是受鸟群捕食启发产生的元启发式算法. PSO 通过种群内粒子之间的合

作与竞争产生的群体智能指导优化搜索. 与遗传算法比较, PSO 保留了基于种群的全局搜索策略, 其优化机理清晰易懂, 搜索模型步骤简单, 计算费用较低. 该算法已在切削参数优化^[2]、PID 控制器的参数设计^[3]、补偿电容器配置优化^[4]等工程优化问题获得成功应用. 本文将基于 PSO 的算法用于 PFSP 优化调度的生成, 针对遗传算法与广义粒子群优化模型(GPSO)中信息共享机制的缺陷, 论文提出新的基于群体智能思想的信息共享机制. 该信息共享机制可维持算法在全局搜索与计算费用之间良好的平衡. 基于新的信息共享机制的 PSO 调度算法充分利用 PFSP 问题本身的邻域知识指导算法的局部搜索, 很大程度地避免了 PSO 的随机策略导致的盲目搜索.

2 广义粒子群优化算法

2.1 PSO 信息共享机制与广义粒子群优化模型

Kennedy 和 Eberhart 受鸟群觅食行为的启发, 1995 年提出粒子群优化算法(Particle Swarm Optimization: PSO)^[5]. 最初的设想是仿真简单的社会活动, 研究并解释复杂的社会行为, 后来发现该算法可以用于优化问题的求解. 但是, 传统粒子群优化算法局限于速度-位移更新算子, 不能有效拓展到离散及组合优化领域. 针对连续变量优化问题的速度-位移更新模型使用实数编码, 编码的每一维代表独立的变量, 不能反映编码中参数间的顺序或其它约束关系.

针对粒子群优化算法在解决组合优化问题上的局限性, 我们分析了粒子群算法的优化机理, 并在此基础上提出了广义粒子群优化模型(GPSO). 模型中粒子的更新操作仅为抽象概念, 因此基于该模型的算法实现需要设计具体的更新算子. 粒子可以以多种形式从其个体及邻域极值获得更新信息. 以遗传操作为例, 粒子可通过与个体极值及邻域极值进行交叉获得更新信息, 并通过线性下降的变异进行随机扰动并趋于局部搜索. 以此模型为基础, 我们提出采用遗传操作作为粒子更新策略, 并成功解决了 TSP 问题^[6].

2.2 GPSO 信息共享机制的缺陷分析

基于 GPSO 模型的算法(包括传统 PSO 算法), 其信息共享机制中均采用相同的信息流动拓扑结构, 其潜在缺陷在于算法中的每个粒子过于贪婪地获取更新信息, 使得粒子的搜索性能受其个体与邻域极值的影响较大, 种群容易局部收敛. 相对于进化算法, 传统 PSO 算法在连续优化问题显示出较快的收敛速度与较高的收敛精度. 需要指出该优势的获得与 PSO 算法求解问题的解空间分布有关. 对于局部最优解遍布整个解空间的复杂组合优化问题, 该信息拓扑结构将会导致相对进化算法更严重的早熟现象. 针对基于 GPSO 模型的上述缺陷, 本文提出的基于群体智能的信息共享机制, 可作为通用的信息共享机制适用于所有基于种群的元启发式算法.

2.3 基于群体智能的信息共享机制 SISM

2.3.1 记忆信息机制

记忆机制是 PSO、蚁群算法 ACO、禁忌搜索 Tabu Search 等元启发式算法取得成功的关键因素. 此外, 研究发现在其它元启发式算法中引入记忆功能可显著改进算法性能. 例如遗传算法保留精英解的策略本质上属于对迭代过程中种群最优解的记忆. SA 中引入记忆功能可提高算法的收敛稳定性. 因此

记忆依然作为本文信息共享机制中信息的核心来源.

2.3.2 新的信息共享机制

基于 SISM 的算法种群中的核心部分为记忆库. 记忆库保存一定比例的记忆个体, 一般占种群规模的 15% ~ 20%. 新的信息共享机制表达如下: 算法种群保证一定规模的记忆库, 种群中个体的每次迭代均从自身记录的记忆个体及记忆库中随机抽样的记忆个体获得更新信息; 种群的每次更新均同时完成对记忆库的更新, 同时对更新后种群中一定比例的劣质解进行启发式初始化.

对记忆库的更新采用以下原则: (1) 更新种群中最优的记忆个体优于记忆库的最差个体, (2) 为保证记忆库中粒子的分布性, 该更新记忆个体的编码及目标函数在记忆库中唯一, 对于组合优化问题主要是保证个体间海明距离尽量小. 在保证多样性的同时提高计算效率, 本文做了简单处理, 即只通过目标函数的差异性判断多样性, 仿真实验证实了该方法的有效性.

2.3.3 SISM 信息共享机制的改进分析

SISM 信息共享机制中的个体从记忆库而不是邻域极值获得更新信息. 记忆库中的个体为种群中具有分布性的较优记忆信息的集合. 个体不仅依赖自身经验获得的记忆信息, 而且借鉴种群中其他个体的成功经验. 相对于遗传算法的信息共享机制, 个体从记忆库中获得更新信息同时保留了较大的信息流动效率. 另一方面, 记忆库个体为随机抽样选择, 且记忆库本身具有分布性. 因此相对于 GPSO 的信息共享机制, 基于 SISM 算法局部收敛的概率较低.

3 基于粒子群优化的流水车间调度算法

3.1 基于 PFSP 邻域知识的局部搜索

针对问题知识设计的局部搜索是邻域搜索元启发式算法的关键组成部分. 研究表明对于车间调度问题包括 JSP 与 FSP 等, 可行调度的关键块中工序的局部移动是该类问题最有效的更新算子之一. PSO 算法是基于群体智能的元启发式算法. 信息共享机制中更新算子的设计是算法实现的关键步骤. 文献[7]对置换流水车间调度中基于关键路径的邻域结构进行了系统的研究. 本文 PSO 算法中基于 PFSP 邻域知识的局部搜索采用该邻域结构. 基于该邻域结构的局部搜索示意图如图 1 所示.

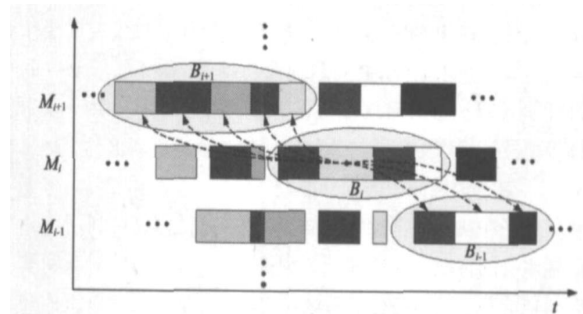


图 1 基于 PFSP 问题知识的邻域搜索

调度问题的邻域结构需要根据问题的具体特点设计. 例如针对 JSP 问题各机器上工件的加工顺序及各工件的工序加工顺序均不相同的特点, 对该问题的编码及邻域结构需要以

工序为单位进行设计. PFSP 问题中, 各工件的工序加工顺序及工件在机器上的加工顺序一致. 而且 PFSP 问题的约束较少, 工件的邻域移动无任何限制即工件以任意方式的移动均不会产生非法解. 因此 PFSP 调度的邻域移动以工件为单位, 无须深入到每道工序.

对车间调度问题的研究表明, 关键路径上工序块内部的移动对调度的质量无任何改进. 因此本文以关键块之间工序的插入作为该类问题的邻域移动策略. 基于任意两个关键块的全邻域结构具有完备的邻域空间, 但是基于该结构的邻域移动, 在待插入的邻域位置离当前工序较远的情况下更倾向于全局搜索. 此外实验证明该邻域结构往往导致算法的冗余搜索甚至迂回搜索. 为提高算法的局部搜索效率, 本文的邻域结构定义为当前关键块中的各工序向其邻接块内移动的集合.

图 1 中的箭头标出移动的位置. 对于块 B_i 上的一道工序 $o_k(k$ 表示整个关键路径中该工序的序号). 设 M_k^p 表示将工序向紧前块中的移动集合, M_k^s 表示将工序向紧后块中的移动集合, $\pi(m)$ 表示经过移动 m 得到的新调度, 则当前调度 π 的邻域可表示为: $N(\pi) = \{\pi(m) | m \in (M_1^p \cup M_1^s) \cup (M_2^p \cup M_2^s) \cup \dots (M_n^p \cup M_n^s)\}$. 算法以 $N(\pi)$ 中 Makespan 最小的邻域调度作为局部搜索的更新调度. 为防止迂回搜索, 算法以一定的概率选择工序的插入位置.

3.2 PFSP 调度算法

本文基于 PSO 的 PFSP 调度算法采用 SISM 信息共享机制. 结合 PSO 算法特点, SISM 信息共享机制中的记忆个体对应于 PSO 的粒子的个体极值, 记忆库即为 PSO 种群中最优的个体极值的集合. 基于 SISM 信息共享机制的 PSO 调度算法在挖掘自身群体智能的同时充分利用 PFSP 邻域知识进行局部搜索, 其详细流程如图 2 所示. 该算法采用基于工件的顺序编码方案, 并选择最大完工时间 Makespan 作为解的评价标准. PSO 算法在初始化过程中使用 NEH, Palmer 与 CDS 生成启发式初始解. 初始种群中的其它粒子使用随机初始化. 若算法以到达最大迭代次数或在指定迭代次数内调度的质量无改进, 则算法停止. 该算法的关键步骤为更新算子的设计与基于调度问题邻域知识的局部搜索.

3.2.1 更新算子的设计

基于 PFSP 的遗传调度算法针对顺序编码设计了大量成功的遗传操作如 PMX, OX, LOX 等. 考虑到基于 PMX 交叉操作的遗传算法在求解 PFSP 问题的成功经验. 本文基于 PSO 的 PFSP 调度算法采用 PMX 交叉作为粒子的更新算子, 用于从个体极值及记忆库中随机选择的记忆粒子获得更新信息.

3.2.2 基于邻域知识的局部搜索

粒子在从算法自身的种群中获得更新信息后, 利用优化问题本身的特征设计的邻域知识进行局部搜索. 针对车间调度问题的基于关键路径的邻域移动已经形成了较为系统的知识体系, 在理论方面已经比较成熟. 大量仿真实验验证了该邻域结构的有效性. 基于该邻域结构设计的模拟退火与禁忌搜索算法已成为求解车间调度问题最有竞争力的元启发式算法. 针对 PFSP 问题的邻域搜索的详细描述见 3.1 节.

Initialize the particle population: generate randomly a set of permutation FSP schedules.

Do{

For each particle $s_i(t)$ do {

Evaluate with objective function defined as $C_{\max}(s_i)$

Set individual best schedule $p_i(t)$:

if $C_{\max}(s_i(t)) \leq C_{\max}(p_i(t-1))$

$p_i(t) = s_i(t)$

Update memory information pool

if $rand() \leq p$

Update PFSP schedule through PMX crossover with $p_i(t)$

else

Obtain new PFSP schedule through PMX crossover with $m_i(t)$

Local search procedure:

For each operation in each critical block B_i do {

Insert it before each operation in its previous critical block B_{i-1} or next one B_{i+1}

Output the best neighbor schedule with minimum C_{\max}

}

}

} While stopping criteria are not satisfied

图 2 基于 SISM 信息共享机制的 PSO 调度算法流程

4 实例仿真与结果分析

实验采用 ORLIB 中的 PFSP 实例 (Taillard 系列问题) 进行测试. 实验运行的计算机配置如下: 处理器为 Intel Celeron Coppersmine Processor (0.18 μ m), 主频为 1.0G, 物理内存为 128MB. 实验运行获得的仿真结果如表 1 所示. 为体现本文算法的优势, 选择部分文献中有代表性的 PFSP 调度算法进行比较. 表中 PSO 为本文提出的算法, TA 为历史文献给出的 Taillard 问题的 C_{\max} 上界. EVIS 为文献 [8] 的遗传算法, RSA 代表文献 [9] 的改进模拟退火算法, HSA 为文献 [10] 的混合模拟退火算法, TS 为文献 [11] 的禁忌搜索算法. 需要说明的是所有的计算时间都根据机器类型按照同一标准进行了折算. 图 3 以直方图的形式给出各种算法测试 PFSP 实例得到的相对误差性能比较. 横坐标代表问题类型, 纵坐标代表距离问题已知上界的相对误差. 需要说明的是对于简单的测试实例如 20 \times 5 与 50 \times 5 问题, 以上算法都可收敛到最优解. 因此各种算法

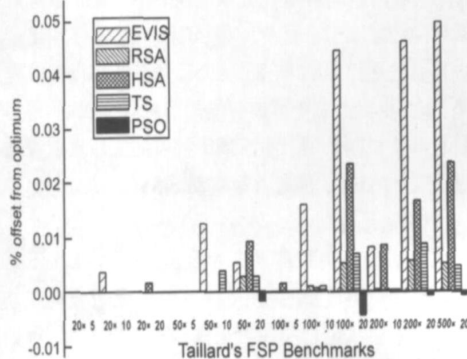


图 3 不同算法求解 FSP 实例的相对误差性能比较

的相对误差未能在图 3 中显示。

由表 1 与图 3 的统计结果可知, 本文基于 SISM 信息共享机制的 PSO 调度算法总体性能优于其它算法。根据表 1 的性能指标, 尽管基于个体搜索的模拟退火与禁忌搜索的计算费用指标在某些实例中略有优势, 但是本文基于 PSO 的 PFSP 算法具有更好的全局收敛性。对于所有 PFSP 测试问题, PSO 产生的最优调度的 C_{\max} 指标最优, 其中 4 个测试实例的 C_{\max} 指标优于历史文献中给出的上界。与基于种群的遗传调度算法 EVIS 比较, PSO 算法的调度质量与计算费用指标均有显著提高。综上所述, 基于 PSO 的调度算法在保证收敛速度的情况下, 提高了调度质量和收敛稳定性。仿真实验的统计结果验证了本文 SISM 信息共享机制与基于邻域知识的局部搜索的有效性。

5 结论

针对基于种群的元启发式算法 PSO 与 GA 信息共享机制的缺陷, 本文提出新的基于群体智能的信息共享机制 SISM。SISM 机制以记忆信息为核心, 并引入记忆库概念, 该模型每次迭代均对记忆库进行更新。通过记忆库中记忆个体的分布性及随机启发式初始化替换种群中的劣质解的策略, 基于 SISM 机制的算法可保持全局搜索与局部搜索之间的良好平衡。

本文将根据问题邻域知识设计的邻域结构引入 PSO 调度算法的局部搜索模块中, 用于指导算法的邻域搜索, 避免了粒子大量盲目的更新操作。基于种群的随机搜索策略与基于知识的邻域搜索的有效融合, 既保证了算法的全局优化特性, 又提高了算法中有效信息的流动效率, 加快了算法收敛速度。实验结果显示, 基于以上策略的 PSO 调度算法可在较短的时间内获得调度问题的满意解, 从而验证了以上策略的有效性。本文的 SISM 信息共享机制和基于问题知识的邻域搜索可以作为通用的策略推广到其它基于种群的元启发式算法及制造领域中的其它调度问题。

参考文献:

- [1] 高海兵, 周驰, 等. 广义粒子群优化模型[J]. 计算机学报, 2005, 28(12): 1980–1987.
Gao Hai bing, Zhou Chi, et al. General particle swarm optimization model[J]. Chinese Journal of Computers, 2005, 28(12): 1980–1987. (in Chinese)
- [2] Nowicki E, Smutnicki C. A fast tabu search algorithm for the permutation flow shop problem[J]. European Journal of Operational Research, 1996, 91: 160–175.
- [3] Kim G H, George L. Genetic reinforcement learning approach to the heterogeneous machine scheduling problem[J]. IEEE Transaction on Robotics and Automation, 1998, 14(6): 879–893.

表 1 不同调度算法的 PFSP 测试实例仿真结果

| Problem | TA | EVIS | | RSA | | HSA | | TS | PSO | |
|---------|------------|------------|---------|------------|---------|------------|---------|------------|------------|---------|
| | C_{\max} | C_{\max} | $T(s)$ | C_{\max} | $T(s)$ | C_{\max} | $T(s)$ | C_{\max} | C_{\max} | $T(s)$ |
| 20×5 | 1278 | 1278 | 49.01 | 1278 | 12.48 | 1278 | 0.06 | 1278 | 1278 | 0.03 |
| 20×10 | 1582 | 1588 | 89.01 | 1582 | 14.62 | 1582 | 3.06 | 1582 | 1582 | 1.60 |
| 20×20 | 2297 | 2297 | 211.63 | 2297 | 21.46 | 2301 | 3.06 | 2297 | 2297 | 0.03 |
| 50×5 | 2724 | 2724 | 142.96 | 2724 | 2.59 | 2724 | 2.04 | 2724 | 2724 | 0.02 |
| 50×10 | 3025 | 3063 | 390.25 | 3025 | 27.43 | 3025 | 7.14 | 3037 | 3025 | 75.37 |
| 50×20 | 3875 | 3896 | 901.42 | 3886 | 54.82 | 3911 | 211.14 | 3886 | 3868 | 218.43 |
| 100×5 | 5493 | 5493 | 629.33 | 5493 | 11.02 | 5502 | 2.04 | 5493 | 5493 | 0.04 |
| 100×10 | 5770 | 5862 | 1231.42 | 5776 | 66.10 | 5774 | 25.50 | 5776 | 5770 | 58.25 |
| 100×20 | 6286 | 6567 | 2246.58 | 6319 | 188.06 | 6434 | 473.30 | 6330 | 6258 | 354.65 |
| 200×10 | 10868 | 10957 | 126.79 | 10872 | 168.19 | 10961 | 27.54 | 10872 | 10872 | 19.87 |
| 200×20 | 11294 | 11818 | 216.10 | 11359 | 416.54 | 11483 | 435.54 | 11393 | 11286 | 584.27 |
| 500×20 | 26189 | 27496 | 1271.85 | 26325 | 1111.20 | 26814 | 3674.04 | 26316 | 26172 | 2836.02 |

- [4] Low C, Yeh J Y, et al. A robust simulated annealing heuristic for flow shop scheduling problems[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2004, 13: 762–767.
- [5] Nearchou A C. A novel metaheuristic approach for the flow shop scheduling problem[J]. Engineering Applications of Artificial Intelligence, 2004, 17: 289–300.
- [6] Daya M B, Fawzan M A. A tabu search approach for the flow shop scheduling problem[J]. European Journal of Operational Research, 1998, 109: 88–95.
- [7] Nowicki E, Smutnicki C. A fast tabu search algorithm for the permutation flow shop problem[J]. European Journal of Operational Research, 1996, 91: 160–175.
- [8] Kim G H, George L. Genetic reinforcement learning approach to the heterogeneous machine scheduling problem[J]. IEEE Transaction on Robotics and Automation, 1998, 14(6): 879–893.
- [9] Low C, Yeh J Y, et al. A robust simulated annealing heuristic for flow shop scheduling problems[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2004, 13: 762–767.
- [10] Nearchou A C. A novel metaheuristic approach for the flow shop scheduling problem[J]. Engineering Applications of Artificial Intelligence, 2004, 17: 289–300.
- [11] Daya M B, Fawzan M A. A tabu search approach for the flow shop scheduling problem[J]. European Journal of Operational Research, 1998, 109: 88–95.

作者简介:



周 驰 男, 1981 年生于湖北省枣阳市, 华中科技大学工业工程系硕士研究生, 研究方向为计算智能、运筹学与优化。
E-mail: catecheng@163.com