

基于混合蚁群算法的柔性模糊车间作业调度

Hybrid Strategy Based on Ant Colony Algorithm for Flexible Fuzzy Job Shop Scheduling

北京航空制造工程研究所 王晓丽 王永栓 袁力博
中国电子科技集团 54 所 孟祥辉

[摘要] 采用蚁群算法作为全局搜索算法,提出一种混合搜索策略,用于求解柔性模糊 Job Shop 调度问题。根据模糊 Job Shop 调度问题解的特性,提出基于关键工序的邻域选择方法,并将基于邻域选择方法的禁忌搜索算法作为局部搜索算法,加强了蚁群算法局部搜索能力。最后通过仿真试验,验证了该算法的有效性。

关键词: 蚁群算法 禁忌搜索 柔性机器约束 模糊作业调度

[ABSTRACT] A new hybrid strategy is proposed for flexible fuzzy job shop scheduling problems, which adopts ant colony algorithm as the global search algorithm. According to the characteristics of the job shop scheduling solutions, a new method of neighbor selection based on the critical operation is proposed, and a taboo search (TS) algorithm based on the neighbor selection is used as the local search algorithm. The local search ability of ant colony algorithm is enhanced. Finally, the simulation results indicate validity of the method.

Keywords: Ant Colony Algorithms Taboo Search Flexible machines restriction Fuzzy job shop scheduling

Job Shop 调度问题是最困难的组合优化问题之一,而柔性模糊 Job Shop 调度问题又是调度问题中较难解决的问题。

蚁群算法是一种基于种群的模拟进化、用于解决复杂优化问题的全新的启发式算法。它是在对自然界中真实蚁群的集体行为研究的基础上,于 20 世纪 90 年代由意大利学者 Dorigo 等首先提出的。蚁群算法已成功应用于著名的旅行商问题、二次分配问题和作业车间调度问题等。但是蚁群算法存在一些缺陷:首先,算法的正反馈机制不能避免陷入局部最优;其次,搜索时间过长。

禁忌搜索算法是解决车间作业调度的有效方法,但也存在以下缺点:首先,最终解的质量高度依赖于算法的迭代次数;其次,初始解的质量对最优解的影响很大。

本课题提出一种基于蚁群算法和禁忌搜索算法的混合策略来求解柔性模糊作业车间调度问题,采用蚁群算法构造禁忌搜索的初始解,进行全局搜索,利用提出的基于关键工序的并行禁忌搜索算法进行局部搜索,这种混合策略能够提高解的质量。通过算例仿真验证了提出的混合算法在搜索质量上优于单一的并行遗传算法和禁忌搜索算法。

1 问题描述和模糊数操作

1.1 问题描述

柔性作业车间调度问题可以描述为: n 个工件在 m 台机器上加工,每个工件包含一个由多道工序组成的工序集合,所有工件的加工路径(即技术约束条件)预先给定,各工件在各机器上的操作时间已知,这里所说的柔性是指工件的某道工序可能存在多台机器可加工。调度的任务是如何合理安排每台机器上工件的加工次序,使约束条件得到满足,同时使某些性能指标得到优化。此外,还应满足以下 2 个约束:

(1) 工件 i 的第 j 道工序必须在第 $j-1$ 道工序完成之后才能开始。

(2) 同一时刻,某一台机器只能加工一个工件,进行一道工序的操作。

生产过程中由于受诸多随机因素的影响,只能得到工件 i 的第 j 道工序在机器 k 上加工时间的一个大概数据,为此加工时间采用三角模糊数 $\tilde{p}_{ij} = (p_{ij}^1, p_{ij}^2, p_{ij}^3)$ 表示。也就是说模糊加工时间的最可能值为 p_{ij}^2 ,乐观值为 p_{ij}^1 ,悲观值为 p_{ij}^3 ,其隶属度函数 $\mu_{ij}(x)$ 表示机器 j 上的工件 i 在加工时间 x 下的可能性度量,其可能性分布函数定义为

$$\mu_{ij}(x) = \begin{cases} 0 & x \leq p_{ij}^1, x \geq p_{ij}^3 \\ \frac{x - p_{ij}^1}{p_{ij}^2 - p_{ij}^1} & p_{ij}^1 < x \leq p_{ij}^2 \\ \frac{p_{ij}^3 - x}{p_{ij}^3 - p_{ij}^2} & p_{ij}^2 < x \leq p_{ij}^3 \end{cases} \quad (1)$$

本课题的模糊交货期用半梯形模糊数 \tilde{D}_i 来表示, $\tilde{D}_i = (d_i^a, d_i^b)$, 它对应的实际生产模型是脱期完工不受欢迎的情况。如果工件在交货期窗口 $[0, d_i^a]$ 内完成, 该工件的满意度为 1, 如果工件在交货期窗口外完成, 满意度用线性隶属度函数表示。 x 表示工件 i 的完工时间, $\mu_i(x)$ 表示工件 i 的满意隶属度, 则满意隶属度函数公式为

$$\mu_i(x) = \begin{cases} 1 & x \leq d_i^a \\ \frac{d_i^b - x}{d_i^b - d_i^a} & d_i^a \leq x < d_i^b \\ 0 & x > d_i^b \end{cases} \quad (2)$$

由于加工时间和交货期均为模糊量, 在设计优化目标时不能采用传统的指标, 为此本课题采用极大化最小客户满意度为优化指标。

定义 1: 最小客户满意度。

最小客户满意度为工件模糊完工时间隶属度函数和模糊交货期隶属度函数的交集所围成的面积与模糊完工时间隶属函数形成的三角形面积之比。用公式表示为 $AI = (\text{are } a\tilde{C}_i \cap \tilde{D}_i) / (\text{are } a\tilde{C}_i)$, AI 表示最小客户满意度, 如图 1 所示, 阴影三角形的面积即为 $\text{are } a\tilde{C}_i \cap \tilde{D}_i$ 。

1.2 模糊数操作

研究模糊调度问题, 模糊数的操作是关键。它包括模糊数的求和与取大操作及其比较方法^[4]。

2 个模糊数相加时, 采用模糊加算子, 例如 $\tilde{a} = (p, q, r), \tilde{b} = (d, e, f)$, 则 $\tilde{a} + \tilde{b} = (p + d, q + e, r + f)$ 。

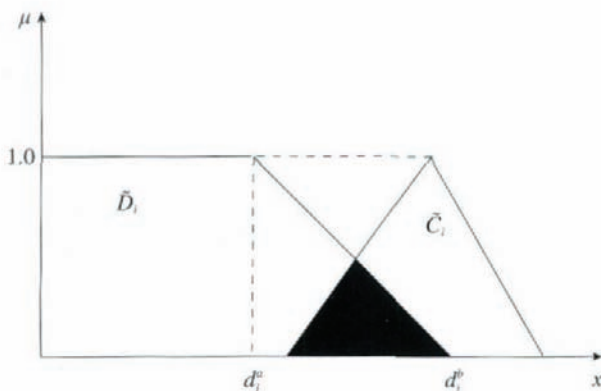


图 1 满意度隶属函数

Fig.1 Membership function for satisfaction

模糊数的取大操作采用

$$\max(\tilde{a}, \tilde{b}) = (\max(p, d), \max(q, e), \max(r, f)) \quad (3)$$

由于模糊完工时间为工件模糊加工时间之和, 它也是一个三角模糊数, 需要对模糊数比较, 采用文献 [4] 提出的 3 条准则。

准则 1: $C_1(\tilde{a}) = \frac{p + 2r + q}{4}$, 根据 C_1 值的大小来

比较 2 个模糊数的大小。

准则 2: $C_2(\tilde{a}) = r$, 如果 2 个模糊数的 C_1 值相等, 则根据 C_2 值的大小来比较。

准则 3: $C_3(\tilde{a}) = q - p$, 如果 2 个模糊数的 C_1 和 C_2 值相等, 则根据 C_3 值来比较。

2 算法设计

2.1 算法混合搜索策略

上述问题为组合优化问题, 传统算法的优化结果不够理想。为此, 提出以下混合搜索策略。本策略用蚁群算法进行全局搜索, 考虑到蚁群算法不适合于在最优解附近搜索, 将禁忌搜索算法(TS)作为局部改进搜索策略。采用混合蚁群搜索策略的基础上对基本蚁群算法和禁忌搜索算法作如下改进:

(1) 将最大最小蚁群算法应用双向收敛策略来提高搜索速度。

(2) 使用基于关键工序的并行 TS 算法作为局部搜索算法, 可改善蚁群算法局部搜索能力; 同时, 可以提高算法跳出局部最优的概率。

当在双向收敛蚁群算法进化过程到一定代数, 信息素值会接近设定的最大值和最小值, 所以在每代进化过程中, 检验收敛因子 cf 。如果收敛因子大于某个固定值, 重新设置信息素值。这样, 能够提高算法的搜索能力, 并且避免早熟问题的出现。 cf 值可以通过

$$cf = 2 \cdot \left(\left(\frac{\sum_{\tau_{ij} \in \tau} \max\{\tau_{\max} - \tau_{ij}, \tau_{ij} - \tau_{\min}\}}{|\tau|(\tau_{\max} - \tau_{\min})} \right) - 0.5 \right) \quad (4)$$

进行计算。

混合搜索过程:

输入: 柔性模糊 job shop 调度问题 P。

输出: 搜索的最优值。

Begin

$S_{bs} = \text{NULL}, S_{rb} = \text{NULL}, S_{ib} = \text{NULL}, p_i = 0.2, \text{iter} = 0, cf = 0$

$N = \text{DetermineNumberOfAnts}(P)$ // 初始化种群个数

$\text{InitializePheromoneValues}(\tau)$ // 初始化信息素

```

While do not satisfy the end condition do
  For j=1 to n do
    ConstructionSolution()// 构造初始种群
  End do
  ApplyLocalSearch()// 局部搜索
  ParallelTabooSearch(PI)// 并行 TS 算法
  Sib=max{AI(S)|S ∈ iter}//Sib 为每代最优解
  Update(Sib, Sbs, Srb)//Srb 为信息素更新后最优解
  ApplyPheromoneUpdate(τ, Srb)// 更新信息素
  cf=ComputeConvergenceFactor(τ)
  if cf > 0.99 then
    ResetPheromoneValues(τ)// 信息素重置
    Srb=NULL
  End if
  iter++
end while
end
    
```

2.2 蚁群算法设计

Giffler&Thompson (G&T)算法是一种生成活动调度的枚举方法,用于构造调度的初始解,但是该算法采用产生随机数的方法来解决冲突,为此本课题在冲突处理上引入了蚁群搜索策略,来提高搜索效率。改进的 G&T 算法如下:

步骤 1:令 C 为所有工件第 1 道操作的集合。如果某工序的第一道操作具有可变的机器约束,则该可变操作亦属于 C 集合。

步骤 2:假定机器在同一时刻可以加工任意多个工件,计算 C 中各操作 O_{ijk} 的模糊完成时间,记作

$$EC(EC_{ijk}^1, EC_{ijk}^2, EC_{ijk}^3)。$$

步骤 3:依据前面三角模糊数的比较准则,确定 C 中模糊完成时间最小的操作 $o_{i^*j^*k^*}$,将 C 中所有在机器 k^* 上加工的操作构成冲突集合 G 。

步骤 4:不同于 G&T 算法的随机选择策略,按照概率公式(5)从集合 G 中选择一个操作 o_{ip,jpk^*} :

$$p(o_n|\tau) = \frac{\tau_{mn}}{\sum_{o_n \in G} \tau_{mn}}。 \quad (5)$$

其中, o_n 表示 G 中的操作。选择出概率最大的操作,并按以下方式更新信息素:

$$\tau_{mn}' = (1-\rho) \times \tau_{mn} + \rho \times \sigma(o_m, o_n), \quad (6)$$

$$\sigma(o_m, o_n) = \begin{cases} 1000 & n \text{ 为所选概率最大操作} \\ -1000 & \text{其他} \end{cases}, \quad (7)$$

$$\tau_{mn} = \begin{cases} \tau_{\min} & \tau_{mn} < \tau_{\min} \\ \tau_{\max} & \tau_{mn} < \tau_{\max} \\ \tau_{mn} & \tau_{\min} < \tau_{mn} < \tau_{\max} \end{cases}。 \quad (8)$$

步骤 5: o_m 表示已构成操作队列中的最后一个操作,以操作 o_{ip,jpk^*} 为基准通过模糊取大(对加工开始时间的调整)和模糊加法操作(对加工完成时间的调整)更新冲突集合中其他操作的 $EC_{ijk}^1, EC_{ijk}^2, EC_{ijk}^3$ 值(因为事实上每台机器同一时刻只能加工一个工件,所以必须调整步骤 2 所确定的模糊时间),最后在 C 中移去操作 o_{ip,jpk^*} (如存在对应可选择操作,也将一并移去),将其下一道工序(包括可选择操作)加入 C ,并计算其相应的模糊完成时间。

步骤 6:重复步骤 3、4、5,直到所有工件加工完毕。

2.3 基于关键工序的邻域交换方法

定义 2:关键路径。

所谓关键路径是指一个可行调度中工序间无时间间隔的最长路径。关键路径定义为 $(i_1, i_2, \dots, i_{m-1}, i_m)$:其中 i_1 是所有工序中开工时间最早的工序, i_m 是最晚完工的工序,满足 $t_{m-1} = t_{m-1} + d_{m-1}, t_{m-2} = t_{m-2} + d_{m-2}, \dots, t_{r_2} = t_{r_1} + d_{r_1}, t_{r_1} = 0$ 。如果 i_k 在关键路径上, j_1 是 i_k 的同工件工序, j_2 是 i_k 的同机器工序,并且 $t_{rk} = t_{j_1} + d_{j_1} = t_{j_2} + d_{j_2}$,那么我们就把 j_1 而不是 j_2 作为关键路径上的工序。由于 Job Shop 调度问题的复杂性与多样性,往往存在多条关键路径。可以将关键路径上的工序分解为块的序列。

定义 3:关键路径的块。

所谓块是关键路径上在相同机器上加工的相邻工序的集合。设 $(i_1, i_2, \dots, i_{m-1}, i_m)$ 为关键路径,从 i_m 开始,依次将关键路径上的工序依次划分为若干个块,使得满足 $t_{rk} = t_{rk-1} + d_{rk-1} (1 < k \leq m)$ 并且在同一台机器上加工的关键路径上的工序属于同一块,这样的块我们称为关键路径上的块。

定义 4:可交换邻域。

可交换邻域是指块中的前 2 个工序或后 2 个工序所组成的邻域;当块中的工序少于 2 个工序时,则不存在可交换邻域。

定义 5:关键工序。

令 $Jp(v)$ 表示在同一作业中工序 v 的前一道工序, $Mp(v)$ 表示在同一机器上加工的工序 v 的前一道工序, $St(v)$ 和 $Et(v)$ 表示工序 v 的加工开始时间和结束时间。如果关键路径中工序 v 满足: $St(v) = Et(Mp(v)) = Et(Jp(v))$,则称 v 为关键工序。当关键路径不唯一时,并不是所有的邻域交换都能缩短关键路径,关键工序之前的邻域交换不会缩短关键路径。

这里,基于关键工序的邻域搜索方法为:当关键路径唯一时,将关键路径上的可交换邻域作为邻域选择集合;当关键路径不唯一时,将最后一道关键工序和最后一道工序之间的可交换邻域作为邻域选择集合;TS算法从上述邻域选择集合中选择一个可交换邻域进行交换(通常是邻域中最好的)。当上述邻域选择集合为空时,中止本次TS搜索。

若TS算法的搜索过程经过一定步数之后,仍不能得到改进的解,则TS搜索结束。

3 计算结果与比较

针对柔性模糊作业车间调度,为了验证设计的算法,试验的工件加工时间采用三角模糊数 $\tilde{p}_{ij} = (p_{ij}^1, p_{ij}^2, p_{ij}^3)$,其中 p_{ij}^2 采用了文献[5]给出的JSP典型问题的数据,包括 FT10、LA02、LF19、LA21、LA24、LA25、LA27、LA29、LA36、LA37、LA38、LA39、LA40。然后对其进行模糊化,

$$p_{ij}^1 = p_{ij}^2 - \text{rand}(0, p_{ij}^2 \times 0.2),$$

$$p_{ij}^3 = p_{ij}^2 + \text{rand}(0, p_{ij}^2 \times 0.2)。$$

混合算法的参数如下:TSANT算法中的蚂蚁数为 $|0| \times 30\%$,进化代数为 $|0|$, ρ 是 0 和 1 之间的随机数, $\tau_{\min}=10$, $\tau_{\max}=1\ 000$,信息素初始值均为 500,如果TS的搜索经过工序总数的 1/4 步后,仍得不到更好的解,则结束该搜索过程,PAG种群大小为 200,均进化 200 代,交叉概率为 0.85,变异概率为 0.05,TS采用文献[4]提出的

TSAB算法,若搜索过程经过 3 000 步后,仍不能得到更好的解,则结束TS。3种算法各运行 10 次,结果见表 1。

从表 1 中可看出,采用本课题的TSNAT算法得到的平均满意度较并行遗传算法(PGA)提高 5.54%,较TSAB算法提高 5.85%;特别是对于 5 个难解的 15×15 benchmark 问题,TSNAT算法的平均满意度分别提高了 8.01% 和 9.24%。这充分说明,TSNAT算法有效地改善了单一TS对初始解和求解次数的依赖,同时提高了蚁群算法的局部搜索能力。另外,在PGA和TSAB算法求解质量较好的情况下,采用TSANT混合算法的 10 次求解平均值有进一步提高,表明了混合蚁群搜索策略对提高求解质量的有效性。

4 结束语

随着模糊环境下 Job Shop 调度问题研究的不断深入,传统的单一算法优化结果往往不够理想,算法理论研究的落后也导致了单一算法性能改进程度有限,如何在有效的时间内提高算法的求解质量,是柔性(可变机器约束)模糊作业调度问题研究的热点。本课题在考虑模糊加工时间和模糊交货期的情况下,采用极大化最小满意度作为优化指标,成功地将禁忌搜索策略结合到蚁群算法中,提出了基于关键工序的局部搜索方法,扩大了搜索范围,提高了算法的局部搜索速度,引入了双向收敛信息素更新机制,将G&T算法加以改进,提高了全局搜索速度,并通过试验验证了混合算法的有效性。

参 考 文 献

- [1] Christoph S T. Job shop scheduling with alternative process plans. International Journal of Production Economics, 2001, 74 (1):125-134.
- [2] Heinonen J, Pettersson F. Hybrid ant colony optimization and visibility studies applied to a job-shop scheduling problem. Applied Mathematics and Computation, 2006, 9 (23) :116-126.
- [3] Sakawa M, Kubota R. Fuzzy programming for multi-objective job shop scheduling with fuzzy processing time and fuzzy due date through genetic algorithms. European Journal of Operational Research, 2000 (120): 393-407.
- [4] Ishibuchi H, Yamamoto N, Murata T. Genetic algorithms and neighborhood search algorithm for fuzzy flowshop scheduling problem. Fuzzy Sets and Systems, 1999, 67 (1) : 81-100.
- [5] 李富明,朱云龙. 可变机器约束的模糊作业车间模糊调度问题研究. 计算机集成制造系统, 2006, 2: 169-173.
- [6] 曾立平,黄文奇. 一种求解车间作业调度问题的混合邻域结构搜索算法. 计算机科学, 2005, 32 (35) : 177-180.

(责编 依然 淡蓝)

表 1 3 种算法的优化结果

调度问题	满意度平均值			时间 /s
	TSANT	PGA	TSAB	
FT10 (10×10)	0.886	0.832	0.823	48.23
LA02 (10×5)	0.883	0.851	0.856	13.32
LA19 (10×10)	0.875	0.862	0.858	52.34
LA21 (15×10)	0.855	0.802	0.796	155.23
LA24 (15×10)	0.852	0.812	0.792	150.33
LA25 (15×10)	0.892	0.868	0.869	149.36
LA27 (20×10)	0.762	0.728	0.748	288.96
LA29 (20×10)	0.776	0.743	0.766	296.33
LA36 (15×15)	0.732	0.688	0.654	300.26
LA37 (15×15)	0.710	0.658	0.636	296.36
LA38 (15×15)	0.856	0.798	0.826	302.88
LA39 (15×15)	0.698	0.623	0.625	287.25
LA40 (15×15)	0.756	0.715	0.702	294.26