

文章编号:1006-5911(2005)01-0104-05

## 制造系统通用作业计划与蚁群算法优化

胡燕海<sup>1,2</sup>, 马登哲<sup>2</sup>, 叶飞帆<sup>1</sup>

(1. 宁波大学 工学院, 浙江 宁波 315211; 2. 上海交通大学 CIM 研究所, 上海 200030)

**摘 要:**分析了基本作业方式的“通用—特例”关系, 提出了全面研究上述基本作业方式的通用作业计划的概念, 建立了通用作业计划非连接图模型及基于蚁群算法的优化方法。算例研究假定一制造系统包含开放作业、异顺序作业、混杂流水作业三种作业方式, 将其按照通用作业计划方式采用蚁群算法进行优化, 所得的近优加工流程时间显著优于采用穷举法对三种作业方式分别优化所得的最优解。

**关键词:**通用作业计划; 作业排序; 蚁群算法; 生产管理

**中图分类号:**O223; TP182

**文献标识码:**A

## Universal shop scheduling problem for manufacturing system and ant colony optimization

HU Yan-hai<sup>1,2</sup>, MA Deng-zhe<sup>2</sup>, YE Fei-fan<sup>1</sup>

(1. Sch. of Eng., Ningbo Univ., Ningbo 315211, China;

2. Inst. of CIM, Shanghai Jiaotong Univ., Shanghai 200030, China)

**Abstract:** After the relationship of Universal—Special in basic shops was analyzed, the concept of Universal Shop scheduling Problem (USP), which included all basic shop scheduling problems, was put forward. A disjunctive graph model representing USP was established, and the Ant Colony Optimization (ACO) used for USP was demonstrated. A case study assumed that a manufacturing system contained OSP, JSP and HFSP. When the system was treated as USP, the approximately optimal makespan computed by ACO was obviously better than the least makespan by enumerating all the possible solutions as the three shops were scheduled separately.

**Key words:** universal shop scheduling; sequencing; ant colony optimization; production management

## 0 引言

传统的作业计划一般分为开放作业计划(Open Shop scheduling Problem, OSP)<sup>[1]</sup>、异顺序作业计划(Job Shop scheduling Problem, JSP)<sup>[2]</sup>、流水作业计划(permutation Flow Shop scheduling Problem, FSP)<sup>[3]</sup>和混杂流水作业计划(Hybrid Flow Shop scheduling Problem, HFSP)<sup>[4]</sup>。研究作业计划的目标是决定在  $m$  台设备上加工、满足一定约束条件的  $n$  个工件的相互顺序关系, 使制造系统的某

些指标得以优化。对于不同的作业计划类型, 各个工件在  $m$  台设备上的加工约束有所不同。OSP 指每个工件可按任意顺序在各设备上加工, 即每个工件的各次加工之间不存在顺序关系; 而 JSP, FSP, HFSP 指  $n$  个工件按一定的顺序关系在  $m$  台设备上加工。对于 JSP, 至少存在两个工件在  $m$  台设备上的加工顺序不相同; 对于 FSP, 每个工件在  $m$  台设备上的加工顺序相同, 且  $n$  个工件在每台设备上的加工顺序也相同; HFSP 指在 FSP 中至少有一处以上设备存在两台以上平行机。由约束条件可见,

收稿日期: 2004-09-09; 修订日期: 2004-10-15。Received 09 Sep. 2004; accepted 15 Oct. 2004.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(70171042)。Foundation Item: Project supported by the National Natural Science Foundation, China (No. 70171042).

作者简介: 胡燕海(1966—), 男, 浙江舟山人, 宁波大学工学院副教授, 上海交通大学博士研究生, 主要从事大规模定制生产方式、敏捷与可重构制造系统等研究。E-mail: huyanhai@nbu.edu.cn.

JSP 和 HFSP 分别是 FSP 的两种通用情况,OSP 是 JSP 的通用情况,可以用研究通用情况的方法研究特例,即当制造系统中同时存在通用情况与特例时,如 JSP 与 FSP 构成的组合系统,可用研究 JSP 的方法研究该组合系统的作业计划。某些文献中提到了同顺序作业方式,即  $n$  个工件以相同的顺序通过  $m$  台设备,且在每台设备上各工件之间的顺序可以变化,其为 JSP 的特例,同时又是 FSP 的通用化<sup>[5]</sup>。因同顺序作业在生产实践中较少出现,国内外文献调研也很少,故不将其列为单独的作业类型。

以往对作业计划的研究一般按四种基本作业方式独立进行,然而生产实践中,制造系统往往包含多种作业方式。有学者对由 OSP 与 GSP(Group shop Scheduling Problem)或 OSP 与 FSP 组成的 GSP<sup>[6]</sup>或 MSP(Mixed Shop scheduling Problem)<sup>[7]</sup>进行了研究,但由于 OSP 为 JSP 与 FSP 的通用情况,故可用研究 OSP 的方法同时对 JSP 或 FSP 进行研究。当系统中存在两种以上相互不构成“通用—特例”关系的作业类型时(如 JSP 与 HFSP),只能对这些作业类型单独研究,此时制造系统目标函数的优化值为其所包含作业类型优化值的累加。如果能建立用于上述四种基本作业方式及其组合系统的通用作业计划(Universal Shop scheduling Problem, USP)模型,则可通过该模型对由四种基本作业方式构成的制造系统作业计划进行整体优化。但对国内外文献的调研结果表明,迄今为止,还未见在 USP 方面的研究。

## 1 通用作业计划模型

在四种基本作业类型中,因为 JSP 和 HFSP 分别是 FSP 的两种通用情况,OSP 是 JSP 的通用情况,所以,USP 应该是 OSP 和 HFSP 的通用化。其相互的“通用—特例”关系如图 1 所示。图 2 是用非连接图描述的简单 USP 模型。为了便于说明工件、设备之间的相互关系,本文采用两阶段双工件描述,以降低非连接图的繁杂程度。图中  $N$  代表非连接图的起点, $F$  代表终点, $i_1+1 \sim i_{m-1}$  代表流水线, $i_{m1} \sim i_{mr}$  代表并行机,其中, $i_m$  表示与加工工艺相对应的设备号, $r$  表示同类设备数量。始于  $N$  点的起始弧可连接任意流水线或并行机,同样,任意流水线或并行机可用结束弧指向终点  $F$ ;同一流水线(并行机)对于不同工件存在双向连接弧,表示各个工件在该流水线(并行机)上的可能顺序关系;对于某一工件,

流水线与并行机之间存在双向连接弧,表示该工件在这两类设备之间的可能顺序关系。

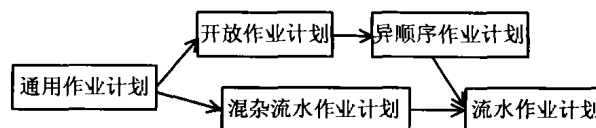


图1 基本作业类型关系图

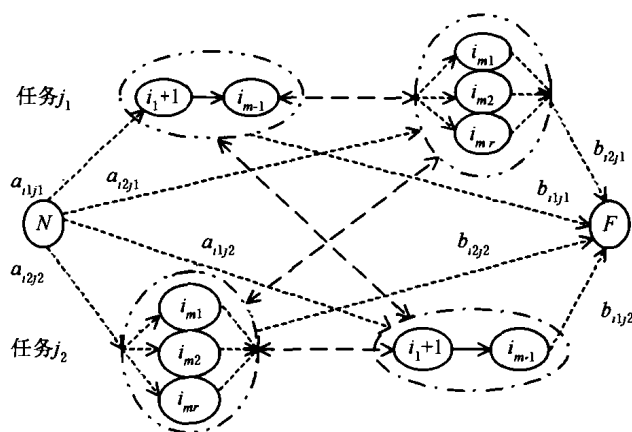


图2 通用作业计划模型

在非连接图中,当始于  $N$  点的起始弧只有  $a_{11j1}, a_{11j2}$  (或  $a_{12j1}, a_{12j2}$ ) 时,终于  $F$  点的结束弧只有  $b_{12j1}, b_{12j2}$  (或  $b_{11j1}, b_{11j2}$ );同类设备之间的双向连接弧均变为从一个工件指向另一个工件的单向连接弧时,对于某一工件各类设备之间的双向连接弧也变为具有确定方向的单向连接弧,则此模型变为 HFSP。在 HFSP 模型中,当并行机取单台设备这一特例时,就变为 FSP;在非连接图中,当流水线和并行机均取单台设备这一特例时,该模型即转化为 OSP。在 OSP 模型中,当始于  $N$  点的起始弧只有  $a_{11j1}, a_{12j2}$ , 终于  $F$  点的结束弧只有  $b_{12j1}, b_{12j2}$  时,此模型变为 JSP。可见,该通用作业计划模型包含了四种基本作业方式。通用作业计划的约束条件与四种基本作业计划的普遍约束条件相同,即假定流水线设备之间存在无限缓冲区,工件在每台设备上的加工不可中断,一台设备同时只能加工一个工件,一个工件同时只能在一台设备上加工,每个工件在某台设备上最多只加工一次,混杂流水线各阶段工件加工顺序不可颠倒等。

## 2 蚁群算法

### 2.1 算法描述

对于最普通的两阶段 HFSP 以及设备数  $m$  大于 2 的 FSP、GSP、OSP,其作业计划的求解均为 NP 完全问题<sup>[1~4]</sup>。据此,拟采用近似算法求解。鉴于

蚁群算法的智能搜索、全局优化、稳健性强等优越特点<sup>[8]</sup>,本文采用蚁群算法求 USP 的近似解。

蚁群算法(Ant Colony Optimization, ACO)是意大利学者 Dorigo Maniezzo 等人受到蚂蚁觅食过程可以找出巢穴到食物源的最短路径启发<sup>[9]</sup>,于 20 世纪 90 年代提出的。目前,已被应用于求解旅行商问题、二次分配问题和车间作业计划等问题,取得了较好的结果。其算法描述如下:

(1)在起点  $N$  放置  $h$  个蚂蚁,在代表从  $i$  节点到  $j$  节点的路径  $(i, j)$  上设置相同的初始信息素  $\tau_{ij}(0)$ 。

(2)用启发式规则确定  $t$  时刻  $k$  蚂蚁( $k=1, 2, \dots, h$ )在路径  $(i, j)$  上的启发信息  $\eta_{ij}(t)$ 。

(3)计算  $t$  时刻  $k$  蚂蚁在  $i$  节点处选择路径  $(i, j)$  的概率(本文称为寻径概率):

$$p_{ij}^k(t) = \begin{cases} \frac{[\tau_{ij}(t)]^\alpha [\eta_{ij}(t)]^\beta}{\sum_{k \in \text{allowed}_k} [\tau_{ik}(t)]^\alpha [\eta_{ik}(t)]^\beta} & j \in \text{allowed}_k \\ 0 & j \notin \text{allowed}_k \end{cases} \quad (1)$$

式中,  $\alpha, \beta$  为控制信息素及启发信息相对重要程度的两个参数,计算前给定。allowed <sub>$k$</sub>  表示由可行路径表决定的  $t$  时刻  $k$  蚂蚁从  $i$  节点出发的所有可能路径。

(4)用轮盘赌方式选择  $i$  节点处  $k$  蚂蚁前进的路径。

(5)当  $i$  节点处  $k$  蚂蚁前进的路径确定后,可能其他节点的某些路径不再可行(如 JSP 中的“死锁”路径),在  $k$  蚂蚁的可行路径表中删除这些不能选择的路径,但仍保留其信息素值,以供其他蚂蚁及后续计算使用。

(6)当所有蚂蚁回到终点  $F$  后,判断是否满足结束条件。若满足,则输出计算结果,计算结束;若不满足,则更新各条路径的信息素,转(2)。信息素更新方式为:

$$\tau(t+1) = \rho \cdot \tau(t) + \sum_{k=1}^h \Delta\tau_{ij}^k \quad (2)$$

式中,  $\rho$  为  $[0, 1]$  之间的常数,  $(1-\rho)$  表示在  $t$  时刻到  $t+1$  时刻信息素的挥发率。

$\Delta\tau_{ij}^k$  为第  $k$  个蚂蚁从  $t$  时刻到  $t+1$  时刻在路径  $(i, j)$  上的信息量增量。其数值计算如下:

$$\Delta\tau_{ij}^k = \begin{cases} Q/L_k & \text{蚂蚁 } k \text{ 经过路径 } (i, j) \\ 0 & \text{蚂蚁 } k \text{ 不经过路径 } (i, j) \end{cases} \quad (3)$$

式中,  $Q$  为常量,表示蚂蚁完成一次完整的路径搜索

所释放的信息素总量;  $L_k$  为蚂蚁  $k$  在路径  $(i, j)$  上的花费占其路径总花费的比例。

## 2.2 可行路径表

在可行路径表中通过节点的路径限制,体现工件加工流程的相互约束关系。在蚂蚁寻径开始前,对每个蚂蚁都有相同的初始化可行路径表,该初始化可行路径表中列出了除各种作业方式交界处节点之间路径以外的其他所有可能路径,包括从起点  $N$  到第一种作业方式各可能节点,最后一个作业方式各可能节点到终点  $F$  的单向路径;各作业方式内部各节点之间的所有可能单、双向路径。两种作业方式交界处节点之间的路径为前一作业方式的最后节点通往下一作业方式所有可能节点的单向路径,需要等到蚂蚁完成前一种作业方式的寻径后方可确定。此时,需在可行路径表中增加前一种作业方式最后节点通往下一作业方式所有可能节点的路径。若下一作业方式为 OSP,则在可行路径表中增加前一种作业方式的最后节点通往 OSP 所有节点的路径;若下一作业方式为 JSP,则在可行路径表中增加前一种作业方式的最后节点通往代表 JSP 各工件第一个工序节点的路径;若下一作业方式为 FSP,则在可行路径表中增加前一种作业方式的最后节点通往代表 FSP 第一个设备节点的路径;若下一作业方式为 HFSP,则在可行路径表中增加前一种作业方式的最后节点通往代表 HFSP 第一个设备或并行机节点的路径。

对于起点  $N$  到第一种作业方式,最后一个作业方式到终点  $F$  的路径以及各种作业方式内部各节点之间的路径,存在如下约定:对于 OSP,若其为第一种作业方式,则始于起点  $N$  的单向路径指向所有节点;若其为最后一种作业方式,则止于终点  $F$  的单向路径源于所有节点。OSP 内部所有节点之间存在双向路径。对于 JSP,若其为第一种作业方式,则始于起点  $N$  的单向路径指向代表各工件第一个工序的节点;若其为最后一种作业方式,则止于终点  $F$  的单向路径源于代表各工件最后一个工序的节点。在初始的可行路径表中,假定 JSP 内部所有节点之间存在双向路径,但 JSP 内部各节点之间可能存在“死锁”路径问题(如图 3),图中圆内数字为设备号。图 3 显示,工件 1 的加工顺序为设备 1, 2, 工件 2 的加工顺序为设备 2, 1, 但若设备 1 上工件 2 先于工件 1 加工,设备 2 上工件 1 先于工件 2 加工,则工件 1, 2 均处于等待状态,此为非法路径,可行路

径表中应避免出现“死锁”路径。因此当  $k$  蚂蚁在 JSP 中开始寻径后,对每个节点,找出构成“死锁”的路径,并将该路径从  $k$  蚂蚁的可行路径表中删除。对于 FSP,若其为第一种作业方式,则始于起点  $N$  的单向路径指向代表第一个设备的节点;若其为最后一种作业方式,则止于终点  $F$  的单向路径源于代表最后一个设备的节点。各设备之间只有符合工艺流程的单向路径。由于所有工件在流水线上的加工顺序一致,可将流水线视为一个虚拟设备。对应每个工件,用一个虚拟节点代表该虚拟设备。可行路径表中虚拟节点之间存在双向路径。对于 HFSP,先将并行机视为单台设备,则变为 FSP,可行路径表中的路径与 FSP 相同。当蚂蚁寻径到某并行机  $i_m$  时,可行路径表中增加通往  $r$  台同类设备的单向路径。

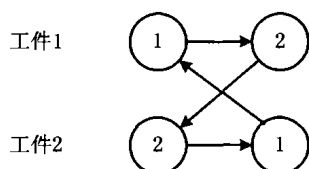


图3 “死锁”路径

### 3 算例研究

本文借用 car7<sup>[10]</sup> 的数据进行研究,car7 为  $7 \times 7$  问题,设设备 1、2 组成 JSP,设备 3、4 组成 OSP,设备 5、6、7 组成 HFSP,其中设备 7 为并行机,包括两台同类设备。各工件在 JSP 的加工顺序为:奇数序的工件(1,3,5,7)是设备 1,2;偶数序的工件是设备 2,1,详见表 1。

表 1 JSP 各任务操作顺序表

	J1	J2	J3	J4	J5	J6	J7
M1	1	2	1	2	1	2	1
M2	2	1	2	1	2	1	2

表 1 中,  $J$  为工件,  $M$  为设备。算例的优化目标为其最大加工流程时间  $C_{\max}$  的最小化。在传统作业计划中, JSP, OSP, HFSP 的  $C_{\max}$  需分别计算,然后进行累加。为了便于对比,用穷举法求得本算例各作业类型的  $C_{\max}$  如下: JSP 的  $C_{\max}$  为 3 267, OSP 的为 3 649, HFSP 的为 4 108, 总的  $C_{\max}$  为 11 024。如果将前一种作业方式各工件的加工完成时间  $C$  以时间窗口(或松弛时间)的形式带入下一作业方式,并采用穷举法对几种作业方式分别优化,算例的  $C_{\max}$  为 7 929。而采用本文提出的通用作业计划方

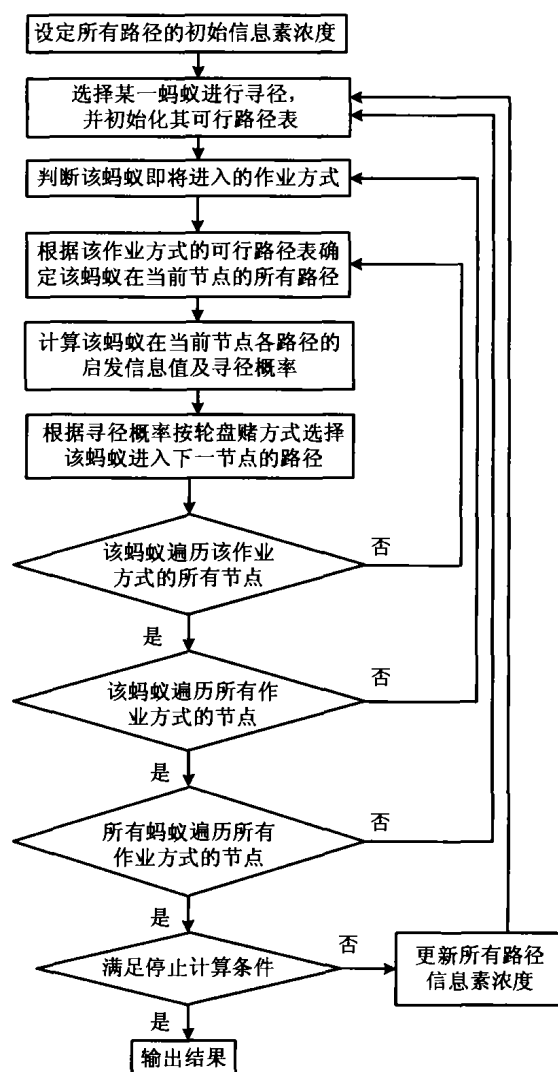


图4 用于JSP的ACO流程

法将上述几种作业方式以一个整体用蚁群算法进行计算,得到  $C_{\max}$  为 6 755,可见其优化结果明显比各作业方式分别优化的结果理想。其算法流程如图 4。通过多次仿真计算,取所有路径初始信息素为 1,蚂蚁数  $h=5$ ,运算结束条件为蚂蚁搜索 50 次循环。路径启发信息通过最长加工时间优先(LPT)启发式规则确定,如  $t$  时刻  $k$  蚂蚁在  $i$  节点处路径  $(i, j)$  的启发信息为:

$$\eta_{ij}(t) = \frac{p_j}{\sum_{j \in \text{allowed}_k} p_j} \quad (5)$$

式中,  $p_j$  为  $j$  节点上工件加工时间;  $\sum_{j \in \text{allowed}_k} p_j$  为  $t$  时刻  $k$  蚂蚁在  $i$  节点处所有可能路径对应的全部后续节点处工件加工时间之和。

根据优化结果,各工件在每台设备上的加工开始时间  $t$  和完成时间  $C$  如表 2 所示。

表 2 各工件在每台设备上的加工开始时间  $t$  和完成时间  $C$ 

作业类型	JSP				OSP				HFSP					
设备	1		2		3		4		5		6		7	
工件	$t$	$C$	$t$	$C$	$t$	$C$	$t$	$C$	$t$	$C$	$t$	$C$	$t$	$C$
1	2 773	3 465	3 465	3 775	3 815	4 647	4 647	5 277	5 553	5 811	6 353	6 500	6 500	6 755
2	852	1 433	196	778	2 329	2 343	3 030	3 244	3 244	3 391	3 836	4 589	4 589	5 395
3	377	852	1 977	2 452	3 030	3 815	2 452	3 030	4 376	5 228	5 487	5 489	5 489	6 188
4	196	219	0	196	1 633	2 329	219	433	2 329	2 915	2 915	3 271	3 271	4 148
5	219	377	778	1 103	1 103	1 633	1 633	2 418	2 915	3 240	3 271	3 836	3 836	4 248
6	1 977	2 773	1 103	1 977	2 773	2 987	3 244	3 480	3 480	4 376	4 589	5 487	5 487	5 789
7	1 433	1 975	2 452	2 657	4 647	5 225	3 480	4 443	5 228	5 553	5 553	6 353	6 353	6 473

#### 4 结束语

在实际生产中,制造系统既有生产线又有单台设备,生产线中经常出现并行机,工件通过单台设备时,又有开放作业和异顺序作业的区别。在传统的作业计划中,上述作业方式被定义为四种基本作业方式分别进行优化。本文提出的制造系统通用作业计划方法将上述基本作业方式进行统一优化。从算例研究可见,该方法较传统的方法具有更佳的优化效果。对于 JSP 中单个设备被并行机取代的情形,也可用本文提出的方法进行研究。本文提出的通用作业计划方法也可应用于制造系统之外其他领域的作业计划。

#### 参考文献:

- [1] LIAW C F. Scheduling two-machine preemptive open shops to minimize total completion time[J]. Computers and Operations Research, 2004, 31(8): 1349-1363.
- [2] LIU N, ABDELRAHMAN M A, RAMASWAMY S. A multi-agent model for reactive job shop scheduling[A]. Proceedings of the 36th Southeastern Symposium[C]. 2004. 241-245.
- [3] GLADKY A A, SHAFRANSKY Y M. Flow shop scheduling problems under machine-dependent precedence constraints[J]. Journal of Combinatorial Optimization, 2004, (8): 13-28.
- [4] LINA H T, LIAO C J. A case study in a two-stage hybrid flow shop with setup time and dedicated machines[J]. International Journal of Production Economics, 2003, 86: 133-143.
- [5] TANG Hengyong, ZHAO Chuanli. An introduction about sequencing [M]. Beijing: Science Press, 2002 (in Chinese). [唐恒永, 赵传立. 排序引论[M]. 北京: 科学出版社, 2002.]
- [6] SAMPLES M, BLUM C, MASTROLILLI M, et al. Meta-heuristics for group shop scheduling[R]. PPSN VII, LNCS, 2002. 631-640.
- [7] FERRELL W, SALE J, SAMS J, et al. Evaluating simple scheduling rules in a mixed shop environment[J]. Computers and Industrial Engineering, 2000, 38(1): 39-66.
- [8] COLEMAN C M, ROTHWELL E J, ROSS J E. Investigation of simulated annealing, ant-colony optimization, and genetic algorithms for self-structuring antennas[J]. IEEE Transactions, Antennas and Propagation, 2004, 52(4): 1007-1014.
- [9] DORIGO M, MANIEZZO V, COLORNI A. Ant system: optimization by a colony of cooperating agents systems[J]. IEEE Transactions, Man and Cybernetics (Part B), 1996, 26(1): 29-41.
- [10] BEASLEY J E. Flowshop1[EB/OL]. <http://www.brunel.ac.uk/depts/ma/research/jeb/orlib/files/flowshop1.txt>, 20-04-09.