

DOI: 10.3901/JME.2015.08.178

面向作业车间调度的基于拓扑排序的二级嵌套 蚁群算法研究*

罗亚波

(武汉理工大学机电工程学院 武汉 430070)

摘要: 蚁群算法的出现, 为求解作业车间调度问题提供了新思路。然而, 由于作业车间调度问题的可行域属性非常复杂, 目前, 采用蚁群算法进行求解, 还存在收敛可靠性差和优化程度不高的问题。针对以上两个问题, 在对工序拓扑排序的约束特性进行分析的基础上, 提出基于拓扑排序的二级嵌套蚁群算法, 其基本思想是: 以拓扑排序为基础, 采用受限主路径覆盖可行域, 从而降低搜索的规模和盲目性, 提升收敛可靠性; 将问题分解为工艺路径优化和设备遴选优化两个级别的问题, 从而构造二级优化机制, 采用工艺主路径与设备支路径嵌套递归的方式, 实现工序排序与设备遴选之间的相互干涉, 从而提升解的满意度。比较试验表明, 与目前常用的蚁群算法求解方法相比, 采用基于拓扑排序的二级嵌套蚁群算法求解作业车间调度问题, 具有良好的收敛可靠性、求解效率和寻优能力。

关键词: 作业车间调度问题; 蚁群算法; 拓扑排序; 递归

中图分类号: TP301

Topological Sorting-based Two-stage Nested Ant Colony Algorithm for Job-shop Scheduling Problem

LUO Yabo

(School of Mechanical and Electronic Engineering, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070)

Abstract: Ant colony algorithm is a new approach to solve the job-shop scheduling problem (JSSP). However, there are still some difficulties in solving JSSP by current ant colony algorithm due to the complex attribute of feasible zone, such as the low reliability of convergence and the weak ability of optimization. Facing with the two difficulties above, based on the analysis on the constraints features of machining processes topological sorting, a topological sorting-based two-stage nested ant colony algorithm is proposed. The thinks of the novel methodologies include: the searching range is downsized and the blindness of searching is reduced at a fairly large scale by employing the topological sorting algorithm to limit the majority searching paths, which covers the feasible zone as yet, consequently the reliability of convergence gets improved; The problem is divided into two sub problems of the machining process optimization and the machines selection optimization to construct the mechanism of two-stage optimization. The interaction between the optimization of scheduling and the optimization of machines allocation is realized by two-stage nested recursive algorithm involving majority process flow and branch of machines selection, so that the degree of satisfaction of the solution is effectively improved. The contrastive experiments demonstrate that the novel methodologies used to solve JSSP have higher reliability of convergence, efficiency of searching and the capability for finding better solutions compared to the normal ant colony algorithm.

Key words: job-shop scheduling problem; ant colony algorithm; topological sorting; recursion

0 前言

作业车间调度问题 (Job-shop scheduling problem, JSSP) 是复杂的组合优化问题, 它要在任务

工艺路线和设备资源的双重约束条件下, 制定出使评价指标达到最优的生产计划方案。JSSP 是组合优化的经典问题, 是国内外组合优化领域的研究重点问题之一^[1-4]。由于 JSSP 是典型的 NP-hard 问题, 采用传统的优化方法难以求解。蚁群算法的出现, 为求解 JSSP 提供了新思路, 并成为近年来的研究热点^[5-6], 目前主要的研究包括一阶变量蚁群算法和

* 国家自然科学基金(51375357)和中央高校基本科研业务费专项资金(2012-II-015)资助项目。20140521 收到初稿, 20141030 收到修改稿

二阶变量蚁群算法两大类^[7]。一阶变量蚁群算法是指将工序排序和设备分配同时作为设计变量, 只启动一次蚁群算法进行求解。由于工序排序和设备分配相互有着复杂的干涉性, 对于规模较大的问题, 这种求解方法往往不收敛, 因此, 主要应用于小规模^[8]或特定约束^[9]的问题。二阶变量蚁群算法, 则是针对 JSSP 中工序排序和设备分配之间的复杂干涉问题, 将工序排序和设备分配作为两阶设计变量, 分别启动两次蚁群算法, 进行两阶段求解, 即: 在先确定其中一方面参数的前提下, 再对另一方面的变量进行求解, 从而达到复杂变量解耦的目的。如 LU 等^[10]采用多语境蚁群算法, 先确定工艺路径, 然后实现了该路径下分布式并行制造单元的遴选优化; HADI 等^[11]针对 JSSP 的多目标优化问题, 采用级联蚁群算法, 首先确定设备优化方案, 然后以该方案为基础, 再次对工艺路线进行优化, 从而, 通过两阶段的蚁群算法, 得到工序排序和设备分配的可行解。采用二阶变量蚁群算法虽然能有效的求得 JSSP 的可行解, 但由于人为的忽略了工序排序与设备分配之间的干涉关系, 所求得解, 还有很大的优化空间^[12]。

综上所述, 可以看出, 工序排序和设备分配两方面的复杂干涉, 导致搜索空间具有复杂性状, 从而降低了搜索效率和收敛的可靠性, 在问题达到一定规模的时候, 甚至得到一个可行解都非常困难, 更难以启动有效的迭代过程。

针对以上难点, 在考虑 JSSP 的工序排序和设备分配存在干涉的前提下, 本研究提出基于拓扑排序的二级嵌套蚁群算法, 以解决寻优机制难以启动和寻优过程不收敛的问题。

1 问题的基本模型

作业车间系统由任务和设备组成, 每一任务由存在并行或串行关联关系的工序构成, 根据加工要求, 每一项任务只能分配到某类设备上。如图 1 所示是一个由 5 项独立任务组成的任务集, 每一任务包含若干并行或串行关系的工序组成, 并可形成更复杂的嵌套关系, 如任务 5 所示。图 2 是工序的属性模型, 其工序关联关系, 以 n 个前序工序来表达, 如工序 103, 其前序工序为 102, 工序 203 的前序工序为 201 和 202, 工序 201 没有前序工序, 其前序工序属性置为 NULL。加工属性指该工序的加工内容所涉及的设备类型, 如车床、铣床等, 在图 1 中用 Q、B、C、D、Z 等字母表示。工序工时, 是指该工序的标准工时, 如图 1 中加工属性后的数字

所示。

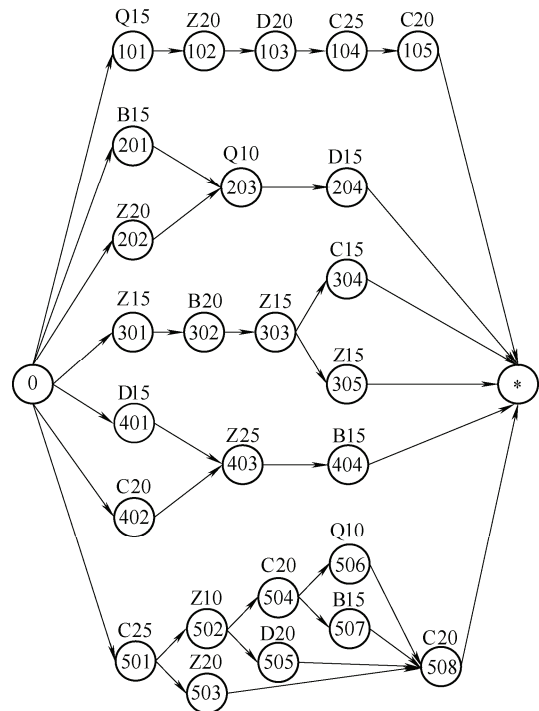


图 1 作业车间任务与工序关联关系示例

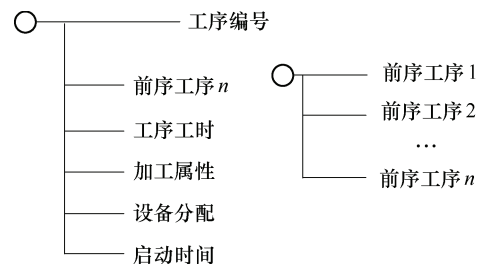


图 2 工序属性模型

可以看出, 只要建立系统中所有工序的属性模型, 就可以表达图 1 所示的关联关系, 从而确定工序之间的先后顺序关系。优化的内容, 是将所有工序合理的分配到若干设备上, 并分配各工序启动的时间, 使得在满足以下约束条件的前提下, 达到某指标的最优。

(1) 串行关联约束。作业系统的解, 必须满足串行关联约束, 即, 任一工序, 必须在前序工序完成后, 才能启动加工。如工序 203, 配置的启动时间, 必须大于工序 201、202 中最晚的完成时间。

(2) 加工属性约束。将工序分配到某一设备, 设备的加工能力, 必须与工序的加工属性相匹配, 如工序 303, 必须分配到 Z 类型设备上加工。

(3) 设备独占约束。一台设备上同一时间不能同时进行两项工序的加工。

优化的目标, 根据实际情况可以有不同的选择, 如: 任务总完成时间最短、拖期时间最短、设

备空置等待时间最短等。作业系统的设计变量为各工序的设备配置和启动时间。由于存在串行关联约束和工序工时属性, 分配工序在各设备上的排序, 即可确定工序的启动时间, 因此, 也可以将工序的设备配置和工序在所配置设备上的加工排序, 作为设计变量。

设备上的约束包含两方面, 在以下基础模型中: 加工属性约束, 采用 $E_i=C_i$ 来表达, 即, 为工序分配的设备, 功能要与工序待加工属性一致; 设备独占约束, 采用 $B_{Ej(S-1)}+T_{Ej(S-1)}<B_{Ej(S)}$ 来表达, 即, 同一设备上, 任一工序只能在其前续工序完成后, 才能启动加工。

设某作业系统中有 k 项工序, p 台设备, 以系统总完工时间最短作为优化目标, 则其基本优化模型如下。

求 E_k, S_k

// E_k 为各工序分配的设备矢量; S_k 为各工序在所分配设备中的加工排序;

min L ;

s.t $L=\max(B_i+T_i \quad i=1,2,\cdots,k)$

// B_i, T_i 分别为编号为 i 的工序的启动时间和工序工时;

$\max(B_{im}+T_{im} \quad m=1,2,\cdots,n)<B_i \quad i=1,2,\cdots,k$

// B_{im}, T_{im} 分别为为 i 工序第 m 个前序工序的启动时间和工序工时;

$E_i=C_i \quad i=1,2,\cdots,k$

// E_i, C_i 分别为 i 工序所分配的设备 and 加工属性;

$B_{Ej(S-1)}+T_{Ej(S-1)}<B_{Ej(S)}$

$S=1,2,\cdots,E_jS; i=1,2,\cdots,k; j=1,2,\cdots,p$

// $E_j(S)$ 为 j 设备上排序 S 对应的工序, E_jS 为 j 设备上待加工工序总数。

2 基于拓扑排序的约束满足方法

2.1 基于有向无环图的工序拓扑序列

由于随着工序数量的增加, 组合方案数将呈几何级数增加, 因此, 图 1 可能的配置方案数是一个天文数字, 而找到初始的可行解以及缩小搜索范围, 都是困难的工作。由于约束的复杂性, 即使找到了足够的初始可行解集, 也难以实现迭代或搜索过程。采用拓扑排序, 就是要一定程度上限制搜索空间, 以解决这些困难。

一个有向图是由若干点和弧组成, 如果有向图中不存在闭合回路, 则可称为有向无环图。根据定义可以看出, 图 1 的工序关联图, 是典型的以工序

为节点、以工序关系为弧的有向无环图。对于一个有向无环图, 可以根据各个节点的入度进行拓扑排序。根据弧的方向, 弧尾所在的节点的入度为弧头所在节点入度加 1。如果一个节点存在多条弧连接, 则该节点的入度为所有弧所计算的入度中的最大值。如果一个节点不是任何弧的尾, 则该节点的入度为 0。如图 1 中, 工序 103 的入度为 3, 工序 508 的入度为 5。通过入度的计算, 对同一任务而言, 按入度的大小由小到大对图中的节点进行排序, 对不同任务, 在满足同一任务内排序规则的前提下, 随机插入队列, 从而得到有向无环图的拓扑序列。由于任务之间的关系相对独立, 不同任务的工序排序并不需要满足入度大小关系。同时, 同一任务内, 因存在并行的工序关系, 因此其拓扑序列也不是唯一的。仅对图 1 中的任务 1 和任务 2 组成的系统而言, 至少以下三种排列, 都是符合规则的拓扑序列。

拓扑序列 1

(101, 201, 202, 102, 203, 103, 204, 104, 105)

拓扑序列 2

(201, 101, 202, 203, 102, 204, 103, 104, 105)

拓扑序列 3

(101, 201, 202, 203, 102, 103, 104, 105, 204)

可以看出, 经过拓扑排序后得到的工序序列, 具有以下特征。

(1) 拓扑序列满足工艺约束要求。即: 按以上规则产生的任一拓扑序列, 都能满足工艺中的关联约束条件。

(2) 调度的可行解必然在该拓扑序列组成的搜索空间内。由于除了满足工艺约束, 还要满足设备属性约束, 因此, 拓扑序列空间并不是可行域。但由于拓扑序列空间包含了可行域, 因此, 可以作为求解的搜索范围。

2.2 工序的设备分配与排序规则

作业系统调度问题的求解, 除了要满足工艺约束外, 还要为各个工序配置设备及确定设备上工序的加工顺序。为了在解的形成过程中满足各类约束, 本研究提出以下工序的设备配置与排序规则。

(1) 如果某功能的设备只有一台, 则根据拓扑序列的次序, 依次将工序排入该设备的工序序列, 采用先进先出的排序模式。

(2) 如果某功能的设备有多台, 则采用随机分配设备, 但依然采用先进先出的排序方法。

由于拓扑序列包含了可行域, 拓扑序列中, 因工序的并行关系或不同任务的独立性而产生的多种序列, 也对应了先进先出的各种工序排序方案。因

此, 以上设备配置规则, 既满足了约束条件, 其搜索范围也覆盖了可行域。

搜索范围覆盖了可行域, 意味着: 所有可行解的工艺序列都能找到对应的拓扑序列, 但由拓扑序列生成的解未必是可行解。产生这一问题的原因是拓扑排序只能保证同一设备上满足工序约束, 在不同设备上, 后分配的工序有可能比非同一设备上但先分配的工序先加工, 这就违反了工序约束。然而, 由于拓扑排序能保证同一设备上满足工序约束, 因此, 对于任一设备上形成的工序序列, 可以通过调整加工的启动时间, 在不调整加工顺序的前提下, 得到满足工艺约束的可行解, 在设备等待时间最小的原则下, 一个拓扑序列对应唯一的可行解。

以图 1 中的 104、105、504、508 为例, (504, 104, 105, 508) 是一个有效的拓扑序列, 在有两台 C 设备的情况下, 该序列对应的如图 3a 所示的解是不可行解。但是, 根据工序约束, 只需要调整工序启动时间, 而不需要调整设备上的工序顺序, 即可得到图 3b 所示的可行解。在设备等待时间最小的前提下, 该拓扑序列对应的可行解是唯一的。

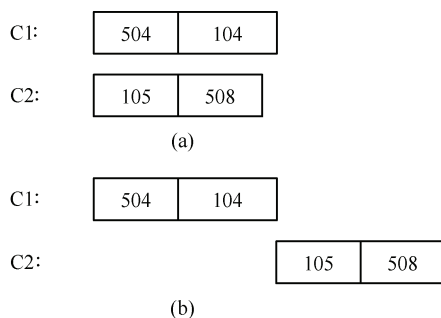


图 3 拓扑序列包含的不可行解排除方法示例

3 基于拓扑序列的二级嵌套蚁群搜索策略

由于组合优化问题是 NP-hard 问题, 无法采用传统的优化方法进行求解。蚁群算法是由意大利学者 DORIGO 于 20 世纪 90 年代提出的一种以模拟蚁群觅食过程为手段的仿生算法, 并很快成为用于求解组合优化问题的热点算法。

蚁群算法被用于求解作业车间调度问题, 是近年来的研究热点。但是对于大规模的调度问题而言, 由于既存在工序顺序选择问题, 又存在设备配置优化问题, 解空间的规模庞大而复杂, 这使得蚁群算法效率下降、甚至不收敛。因此, 目前的主要研究成果还是集中在小规模问题上。

本研究采用二级嵌套蚁群搜索策略, 以解决以

上问题, 其流程如图 4 所示, 即: 将系统分解为工序路径选择和设备路径选择两个层次, 以嵌套和逆向递归的方式, 运用蚁群算法求解。其中, ε 表示蚁群搜索路径的聚集程度判别值。由于一级路径是受限路径, 二级路径选择仅对多台同类设备才会产生, 所以大幅度降低了问题的复杂度, 最大程度地简化了搜索空间。

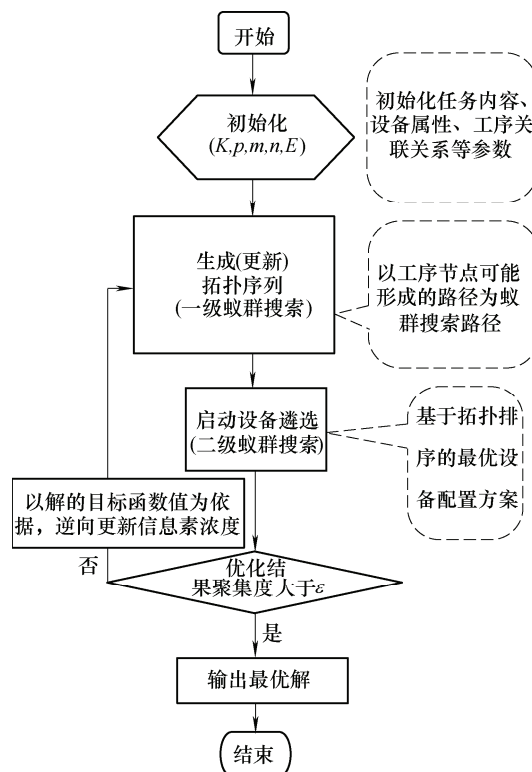


图 4 二级嵌套蚁群算法流程图

首先, 以拓扑序列的选择为目标, 开始一级蚁群搜索, 而暂不考虑设备的配置。为了将方法描述清楚, 仅以图 1 中任务 1 和任务 2 组成的作业系统为例进行说明, 如图 5 所示, 以工序为节点进行路径搜索, 在满足工序前序关联的约束下, 即: 在同一任务内, 满足任一节点的入度大于或等于前序节点的入度, 可以形成数目庞大的不同路径, 图中最上层的路径, 显示的是一条完整的路径。一级蚁群搜索的信息素逆向配置规则如下。

(1) 蚂蚁在走完路径之前, 只依据路径的信息素进行路径选择, 搜索过程中不播洒信息素。

(2) 蚂蚁走完一次完整的路径后, 启动二级蚁群搜索, 根据二级蚁群优化结果, 计算路径应附加的信息素的值, 然后, 逆向进行信息素更新。

当一级搜索中的蚂蚁走完一条完整的路径后, 启动二级蚁群搜索, 即: 以该工艺路径为主路径, 设备的选择为支路径, 针对该路径, 确定设备的最佳配置方案, 称之为二级蚁群搜索策略。

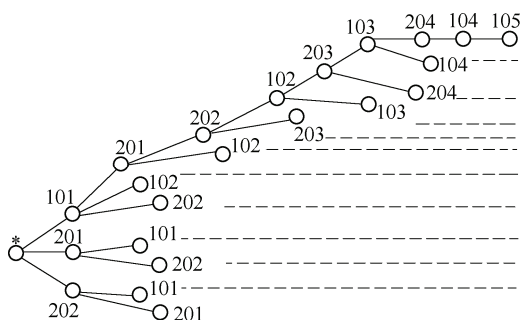


图 5 基于拓扑序列受限的一级蚁群搜索

由以上对于拓扑序列属性的描述可以看出，每一个拓扑序列，再实例化对设备的选择，就可以看作是蚁群系统中的一条觅食路径。如果作业系统中设备的数量如表 1 所示。

表 1 作业车间中的设备配置

设备类型	Q	D	Z	C	B
设备台数	1	2	3	3	1

拓扑序列 1 可能形成如图 6 所示路径。

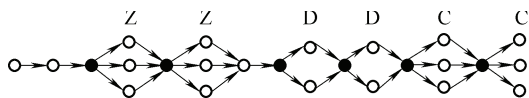


图 6 拓扑序列 1 可能形成的蚁群搜索路径

如果假定蚂蚁确定以拓扑序列 1 为主路径，则存在可选设备的情况下，就需要作出支路径的选择。图 6 中的每一个黑点，代表一次支路径的选择机会。常用的路径选择方法是考虑信息素浓度的前提下进行随机选择，从而确保全局搜索。

一级蚁群搜索公式为式(1)~(4)。

$$\tau_{ij} = \sum_{k=1}^m \tau_{ij}^k(t + T_{path-k}) \quad (1)$$

$$\tau_{ij}^k(t + T_{path-k}) = \rho^* \tau_{ij}^k(t) + \Delta \tau_{ij}^k \quad (2)$$

$$\Delta \tau_{ij}^k = \frac{Q}{T_{path-k}} \quad (3)$$

$$T_{path-k} = \min(L_h, h=1, 2, \dots, p) \quad (4)$$

式中， τ_{ij} 是 ij 边经过 m 只蚂蚁后的信息素更新值； τ_{ij}^k 为第 k 只蚂蚁对 ij 边上信息素的贡献，仅仅在第 k 只蚂蚁完成一次完整的路径后，再经过计算予以赋值； ρ^* 为信息素持久系数； Q 为一设定的恒正常数； L_h 为第 k 只蚂蚁沿某一拓扑序列，选择确定设备后，完成该路径所需的时间； T_{path-k} 为第 k 只蚂蚁经过 ij 边所需的最短时间，其值经过以下二级蚁群搜索计算确定。

$$\tau'_{iejf}(t+n) = \rho^* \tau'_{iejf}(t) + \Delta \tau'_{iejf} \quad (5)$$

$$\Delta \tau'_{iejf} = \sum_{q=1}^p \Delta \tau'_{iejf}^q \quad (6)$$

$$\Delta \tau'_{iejf}^p = \begin{cases} \frac{Q}{L_p} & \text{蚂蚁 } p \text{ 选择设备路径 } ef \\ 0 & \text{蚂蚁 } p \text{ 未选择路径 } ef \end{cases} \quad (7)$$

$$T = \max(T_{pro}, T_{last}) + T_{span} \quad (8)$$

$$L_p = T_{final} \quad (9)$$

式(5)~(7)为二级蚁群搜索策略，其中， τ'_{iejf}

为经过 n 次迭代后，拓扑路径 ij 边上的设备路径 ef 的信息素浓度； $\Delta \tau'_{iejf}$ 是经过 p 只蚂蚁后，设备边 ef 上的信息素更新值。由于蚂蚁运动路径代表的只是工序的分配顺序，而不是加工顺序，如：101 和 201 虽然分配顺序有先后，但因为隶属于不同任务，并且用不同的加工设备，因此可以同时启动加工，所以，针对某一完整路径，还需要以设备为单位来计算完工时间。本研究采用任务中的前序工序和设备中的前续工序逆推的方法，来确定完工时间。即，从最后一个工序开始，以前续工序和前序工序为分支，进行逆向递归。其递归模型如式(8)、(9)所示。其中 T 为某工序的完工时间， T_{pro} 为前序工序完工时间， T_{last} 为前续工序完工时间，如果这两项中有尚未实例化的值，则继续向上回溯。 T_{span} 为工序的标准工时。通过这一递归模型，即可求出任一完整路径的任务总完成时间 T ，从而得到信息素值，形成二级蚁群算法的迭代过程。

经过以上迭代过程，对任一拓扑排序，都可以通过蚁群算法得到针对该主路径的最优解，即：如果拓扑序列是确定的，则可以通过蚁群算法找到该序列对应的最优设备配置，从而得到针对该拓扑序列的最优方案。由于主路径是确定的，只有多同类设备的情况下，才存在支路径选择的问题，因此，二级蚁群搜索有很高的搜索效率。

4 比较试验研究

基于自主研发的算法软件试验平台(软件著作权 2012SR127021：作业车间调度优化系统 JSSS V1.0)，本研究分别采用不分阶段蚁群算法、二阶段蚁群算法、拓扑排序与二级嵌套相结合的蚁群算法，进行了比较试验研究。由于模具加工工艺具有加工精度要求高、批量小、工序多、工序具有复杂关联性等特点，在此，以一模具制造车间的典型工艺为

案例进行详解。有 4 个待加工的项目要在给定的设备条件下加工,每个项目中包含的信息如表 2 所示,设备信息如表 3 所示。以完工总时间最小为目标函数指标,以工艺路线、避免设备时间重叠、避免任务时间重叠等为约束条件进行求解。

表 2 作业车间中的设备配置

任务编号	所属项目	所需设备类型	加工时间	前序工序
101	1	C	15	—
102	1	Z	25	101
103	1	D	30	102
104	1	Z	25	103
105	1	D	10	104
201	2	C	14	—
202	2	B	20	201
203	2	D	14	202
204	2	Z	15	203
205	2	C	15	203
301	3	D	15	—
302	3	C	20	—
303	3	Z	10	301,302
304	3	B	25	303
305	3	Q	15	304
401	4	C	20	—
402	4	Z	25	401
403	4	B	20	402
404	4	Q	10	403

表 3 作业车间中的设备配置

设备编号	1	2	3	4	5	6	7
设备类型	C	C	Q	B	D	Z	Z
设备功能	车	车	磨	铣	镗	钻	钻

根据以上所给的条件,可以得到该实例的有向无环图,如图 7 所示。有向无环图中“0”和“*”分别表示任务的开始和任务的结束。

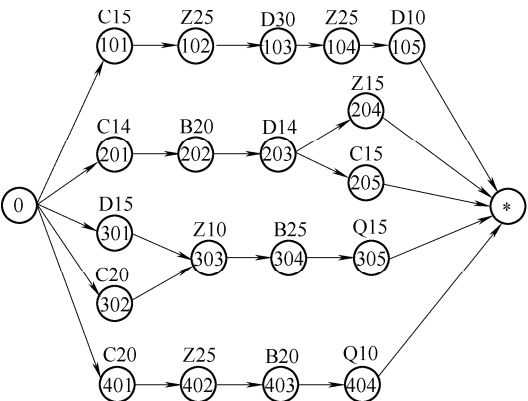


图 7 试验案例的有向无环图

因选取的初始可行解集不同,从而形成 10 次试验。比较试验结果,如表 4 所示。

从表 4 可以看出,采用一阶变量蚁群算法,大部分情况下不收敛,偶尔收敛的情况,也会陷入局部最优;采用二阶变量蚁群算法,即:先独立的求

解工艺路径,然后依据所得工艺路径进行设备优选,在较少的迭代次数内,就能获得可行解,偶尔会得到有一定满意度的可行解;采用基于拓扑排序的二级嵌套蚁群算法,在较少的迭代次数内,就能获得满意解。

表 4 比较试验结果

试验次数	性能指标	一阶变量 蚁群算法	二阶变量 蚁群算法	二级嵌套 蚁群算法
1	迭代次数	不收敛	190/65	212
	最优解	—	175	113
2	迭代次数	不收敛	199/57	201
	最优解	—	210	113
3	迭代次数	不收敛	201/39	196
	最优解	—	222	113
4	迭代次数	755	189/55	211
	最优解	218	178	113
5	迭代次数	不收敛	178/45	179
	最优解	—	181	124
6	迭代次数	1009	202/71	220
	最优解	221	179	119
7	迭代次数	不收敛	169/97	190
	最优解	—	189	113
8	迭代次数	不收敛	232/59	205
	最优解	—	189	113
9	迭代次数	不收敛	191/76	197
	最优解	—	178	113
10	迭代次数	不收敛	206/49	188
	最优解	—	201	113
平均值	平均迭代次数	—	257	199.9
	平均最优解	—	190.2	114.7

自主研发的算法软件试验平台“作业车间调度优化系统”,实现了交互式仿真功能,即:输入任意合理的任务内容、工序关联关系、设备属性,即可实现调度优化过程仿真,反映收敛特性和优化结果。基于该仿真平台,本研究进行了大量与以上案例相同的比较试验研究,比较试验结果一致:对于复杂关联的作业车间调度问题而言,一阶变量蚁群算法收敛可靠性差,并且容易陷入局部最优;二阶变量蚁群算法收敛效率较高,并能获得可行解,但解的满意度还有很大的提升空间;与二阶变量蚁群算法相比,采用基于拓扑排序的二级嵌套蚁群算法,收敛效率提升 22%左右,解的优化程度提升 45%左右。

5 结论

(1) 分析得出了工序拓扑排序的约束特性:工序拓扑排序覆盖了 Job-shop 问题的可行域,同时大幅度压缩了搜索空间。因而,基于拓扑排序的搜索策略,在确保覆盖可行域的前提下,大幅度降低了求解的复杂度,从而提升了收敛的可靠性与效率。

(2) 将问题分解为工艺路径优化和设备遴选优化两个级别的问题,从而构造了二级优化机制,采用工艺主路径与设备支路径嵌套递归的方式,充分考虑了工序排序与设备分配之间的干涉属性,有效地提升了解的优化程度。

(3) 比较试验表明,与目前常用的蚁群算法求解方法相比,采用基于拓扑排序的二级嵌套蚁群算法求解 JSSP,具有良好的收敛可靠性、求解效率和寻优能力。

(4) 因为 Job-shop 问题是 NP-hard 问题,尚为数学领域的难题,目前尚无针对 Job-shop 的通过严格数学证明的求解方法。本研究提出的方法同样不能确保对任何问题都必然收敛,但所提出的方法和研发的软件所得出的调度方案,对进一步的调度工作有很好的参考价值,能有效提升调度工作的效率。

参 考 文 献

- [1] 赵诗奎,方水良. 基于工序编码和邻域搜索策略的遗传算法优化作业车间调度[J]. 机械工程学报, 2013, 49(16): 160-169.
ZHAO Shikui, FANG Shuiliang. Operation-based encoding and neighborhood search genetic algorithm for job shop scheduling optimization[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2013, 49(16): 160-169.
- [2] NASAB M K, SEYEDHOSEINI S M. Multi-level lot sizing and job shop scheduling with compressible process times: A cutting plane approach[J]. European Journal of Operational Research, 2013, 231(3): 598-616.
- [3] RAHMATI S H A, ZANDIEH M, YAZDANI M. Developing two multi-objective evolutionary algorithms for the multi-objective flexible job shop scheduling problem[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2013, 64(5-8): 915-932.
- [4] ZHAO Ning, CHEN Siyu, DU Yanhua. Emergency local searching approach for job shop scheduling[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2013, 26(5): 918-927.
- [5] 于嘉鹏,王成恩,王健熙. 基于最大-最小蚁群系统的装配序列规划[J]. 机械工程学报, 2012, 48(23): 152-166.
YU Jiapeng, WANG Chengen, WANG Jianxi. Assembly sequence planning based on max-min ant colony system[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2012, 48(23): 152-166.
- [6] KORYTKOWSKI P, RYMASZEWSKI S, TOMASZ W. Ant colony optimization for job shop scheduling using multi-attribute dispatching rules[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2013, 67(1-4): 231-241.
- [7] SEOA M, KIMB D. Ant colony optimisation with parameterised search space for the job shop scheduling problem[J]. International Journal of Production Research, 2010, 48(4): 1143-1154.
- [8] FIGLALI N, CELAL O, ORHAN E, et al. Investigation of ant system parameter interactions by using design of experiments for job-shop scheduling problems[J]. Computers & Industrial Engineering, 2009, 56(2): 538-559.
- [9] GIRISHA S, JAWAHARA N. Scheduling job shop associated with multiple routings with genetic and ant colony heuristics[J]. International Journal of Production Research, 2009, 47(14): 3891-3917.
- [10] LU Ming, RICHARD R. Multi-contextual ant colony optimization of intermediate dynamic job shop problems[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2012, 60(5-8): 667-681.
- [11] HADI P, REZA T M. Solving a multi-objective open shop scheduling problem by a novel hybrid ant colony optimization[J]. Expert Systems with Applications, 2011, 38(3): 2817-2822.
- [12] AHMED K, BRAHIM B. Multi-agent job shop scheduling system based on co-operative approach of idle time minimisation[J]. International Journal of Production Research, 2012, 50(2): 409-424.

作者简介: 罗亚波(通信作者),男,1973年出生,博士,教授,博士研究生导师。主要研究方向为生产系统仿真与优化。

E-mail: luoyabo1973@163.com