

# 基于可变长工序编码的再制造生产调度优化方法\*

张红宇<sup>1</sup>, 高 阳<sup>1</sup>, 马 华<sup>2</sup>

(1. 中南大学 商学院, 长沙 410083; 2. 湖南涉外经济学院 计算机学部, 长沙 410205)

**摘要:** 回收品质、数量以及拆卸过程中的不确定性因素使再制造生产调度问题更加复杂。针对工件加工路径的可变性特点,建立了再制造生产中的 job-shop 调度模型,提出了一种基于可变长工序编码方法的改进遗传算法,设计了异常染色体的识别和重构方法,以及相应的遗传算子。在参数矩阵的指导下,该算法可以实现随机工序数目和随机工序顺序情况下再制造生产调度问题的优化求解。仿真实验证明了该算法的有效性和可行性。

**关键词:** 再制造; 生产调度; 遗传算法; 可变长工序编码

**中图分类号:** TP278      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1001-3695(2010)03-0871-03

doi:10.3969/j.issn.1001-3695.2010.03.017

## Optimization approach based on variable-length operation encode for remanufacturing production scheduling

ZHANG Hong-yu<sup>1</sup>, GAO Yang<sup>1</sup>, MA Hua<sup>2</sup>

(1. School of Business, Central South University, Changsha 410083, China; 2. Dept. of Computer, Hunan International Economics University, Changsha 410205, China)

**Abstract:** The uncertainties of quality, quantity and disassembly process of returns in remanufacturing cause additional complexity for its production scheduling. According to the variability of job process path, this paper proposed job-shop scheduling model for remanufacturing. In the model, put forward an improved genetic algorithm based on variable-length encode. Designed the GA operators and methods to identify chromosomes validity and reconstruct them. Under the guidance of parameters matrix, the algorithm could achieve the optimization solving for remanufacturing production scheduling with the random processing number and the random processing path of operations. The simulation results show that this algorithm is effective and feasible.

**Key words:** remanufacturing; production scheduling; genetic algorithm; variable-length operation encode

再制造是将耗损的耐用产品经过拆卸分解、清洗检查、整修加工、重新装配、调整测试恢复到既经济又可用状态的全生产过程<sup>[1]</sup>。作为废弃物循环利用的重要途径,再制造对于实现节能减排,发展循环经济,创建环境友好型和资源节约型社会具有重要意义。现有研究已证实,再制造率不确定、拆卸后的部件处理时工艺路线和提前期随机、回收产品数量和时机等因素带来的额外不确定性,大大增加了再制造生产系统的复杂度,使得传统的生产计划与控制方法难以直接应用<sup>[2,3]</sup>。

传统制造系统中的 job-shop 调度问题主要面对确定性信息条件,工件的初始状态相对稳定,加工时间、加工路径和到达时间等参数均相对固定<sup>[4-6]</sup>。考虑到实际生产过程的复杂性,一些离散事件动态系统适宜采用服从指数分布的随机量描述参数<sup>[7]</sup>。文献[8,9]分别对加工时间、加工机器不确定条件下的传统制造生产调度问题进行了研究。然而,再制造中回收品质、数量以及拆卸过程中的额外不确定性因素导致工件的加工路径具有显著的可变性,即同一类工件的处理工序、加工时间和加工机器等参数将因再制造生产过程的具体情况而随机变化,从而加大了再制造生产调度优化的难度。

本文针对再制造生产调度的特点,建立了相应的 job-shop 调度模型,通过设计一种基于可变长工序编码的改进遗传算法对该模型进行优化求解,在参数矩阵的指导下,该算法可以有效处理以动态加工路径为特征的再制造生产调度问题。

### 1 再制造 job-shop 调度问题描述

本文将  $n$  个工件  $m$  台机器的再制造生产 job-shop 调度问题记为  $n/m$ ,它满足以下约束:a)工件要经过多道工序加工,每道工序在特定的不同机器加工;b)工件的加工路径是可变的,即各工件的工序数目和顺序随机变化;c)每台机器每次只能加工一个工件的一道工序;d)不同工件的工序间无先后约束关系;e)工序的加工过程不被中断。

将再制造中的  $n/m$  问题描述如下:

a)  $J = \{J_1, J_2, \dots, J_n\}$ , 表示  $n$  个工件的集合。

b)  $M = \{M_1, M_2, \dots, M_m\}$ , 表示  $m$  台机器的集合。

c)  $O_i = \{O_{i1}, O_{i2}, \dots, O_{ij}\}$ , 表示工件  $J_i$  的第  $j$  道工序记为  $O_{ij}$ ,  $1 \leq i \leq n, 1 \leq j \leq m$ 。

d)  $TS_{ij}^s$  和  $TE_{ij}^k$  分别表示工件  $J_i$  的第  $j$  道工序  $O_{ij}$  的加工开始

收稿日期: 2009-07-23; 修回日期: 2009-09-14      基金项目: 国家自然科学基金资助项目(70572060); 国家教育部高等学校博士点专项科研基金资助项目(20040533057)

作者简介: 张红宇(1979-), 女, 安徽亳州人, 博士, 主要研究方向为再制造生产管理、优化计算(hyzhang@csu.edu.cn); 高阳(1943-), 男, 湖南望城人, 教授, 博导, 主要研究方向为敏捷制造与协同生产管理、经济管理理论与建模; 马华(1979-), 男, 湖南株洲人, 高级工程师, 硕士, 主要研究方向为服务计算、优化计算。

时间和结束时间,  $TS_{ij}^k \geq 0$ 。

e)  $t_{ij}^k$  表示工件  $J_i$  的第  $j$  道工序在机器  $k$  的加工时间,  $t_{ij}^k = TE_{ij}^k - TS_{ij}^k \geq 0$ 。

本文以完工时间最小化为调度目标, 从而得到目标函数为  $\min ft = \min(\max_{1 \leq i \leq n} TE_{im}^k)$ 。

## 2 基于改进遗传算法求解 $n/m$ 问题

### 2.1 可变长工序编码方法

为便于分析, 定义工序顺序矩阵  $O$  和加工时间矩阵  $T$  描述  $n/m$  问题的输入数据。

$$O = \begin{bmatrix} O_{11} & O_{12} & \cdots & O_{1m} \\ O_{21} & O_{22} & \cdots & O_{2m} \\ \ddots & \ddots & & \ddots \\ O_{n1} & O_{n2} & \cdots & O_{nm} \end{bmatrix} \quad T = \begin{bmatrix} t_{11} & t_{12} & \cdots & t_{1m} \\ t_{21} & t_{22} & \cdots & t_{2m} \\ \ddots & \ddots & & \ddots \\ t_{n1} & t_{n2} & \cdots & t_{nm} \end{bmatrix}$$

其中: 矩阵  $O$  描述了各个工件的加工顺序;  $o_{ij}$  表示工件  $i$  在机器  $j$  加工的工序序号,  $1 \leq o_{ij} \leq m$ ; 矩阵  $T$  描述了各个工序的加工时间;  $t_{ij}$  表示工件  $i$  在机器  $j$  所需的加工时间。考虑到再制造生产中工件的加工路径具有可变性, 当工件  $i$  无须进行第  $j$  道工序加工时, 将  $o_{ij}$  称为无效工序, 令  $o_{ij} = 0, t_{ij} = 0$ 。所以, 矩阵  $O$  中各个工件的有效工序总数将表现出可变长的特点。如果采用传统的基于工序的编码方法<sup>[4-6]</sup>, 染色体由  $n \times m$  个基因组成, 其中包含了大量无效基因, 从而增加了染色体的存储冗余和遗传操作的复杂度。

为解决以上问题, 本文提出了一种基于界点参数矩阵  $limit$  和解码参数矩阵  $param$  的可变长工序编码方法。该编码方法的主要步骤如下:

a) 按照各个工件的实际工序顺序进行统一编号, 基于加工顺序矩阵  $O$  生成一个重新编排的连续编码矩阵  $sequence$ , 无效工序在  $sequence$  中均编号为 0。

b) 基于连续编码矩阵  $sequence$  生成界点参数矩阵  $limit$ , 以记录  $sequence$  中各工件的最小、最大工序编号值, 从而提高解码的速度。

c) 为便于计算适应度值, 基于连续编码矩阵  $sequence$  和加工时间矩阵  $T$  生成解码参数矩阵  $param$ , 由其记录  $sequence$  中各个工序所对应的工件、机器和加工时间信息。

d) 从连续编码矩阵  $sequence$  中挑选出所有非零元素, 随机生成一条染色体。由于染色体中不包含无效工序, 从而可大大减少染色体的基因位数。

在界点参数矩阵  $limit$  和解码参数矩阵  $param$  的指导下, 可变长工序编码方法可以适应工序顺序、加工时间或加工机器的随机变化情况, 保证染色体的相对稳定性, 从而适应再制造生产调度中工件加工路径随机的特点。同时, 该编码方法可以兼容处理传统制造的生产调度问题中工序数目相等的情形, 因此, 该方法在制造和再制造领域具有普适性。以下面的一个 3/4 job-shop 调度问题为例, 其输入信息如下:

$$O = \begin{bmatrix} 3 & 1 & 0 & 2 \\ 2 & 0 & 1 & 0 \\ 1 & 3 & 4 & 2 \end{bmatrix} \quad T = \begin{bmatrix} 4 & 2 & 0 & 3 \\ 3 & 0 & 1 & 0 \\ 2 & 1 & 5 & 2 \end{bmatrix}$$

由此生成的连续编码矩阵  $sequence$  为

$$sequence = \begin{bmatrix} 3 & 1 & 0 & 2 \\ 5 & 0 & 4 & 0 \\ 6 & 8 & 9 & 7 \end{bmatrix}$$

由  $sequence$  得到的参数矩阵  $limit$  和  $param$  如下:

$$limit = \begin{bmatrix} 1 & 3 \\ 4 & 5 \\ 6 & 9 \end{bmatrix} \quad param = \begin{bmatrix} 1 & 2 & 2 \\ 1 & 4 & 3 \\ 1 & 1 & 4 \\ 2 & 3 & 1 \\ 2 & 1 & 3 \\ 3 & 1 & 2 \\ 3 & 4 & 2 \\ 3 & 2 & 1 \\ 3 & 3 & 5 \end{bmatrix}$$

通过将  $sequence$  中值为 0 的无效工序过滤, 即可得到一个可变长编码的染色体, 如 [4 1 6 5 7 2 8 3 9], 该染色体长度为 9, 而如果使用传统的工序编码方法, 则需要  $3 \times 4$  个基因, 可见, 本文方法更优。

### 2.2 异常染色体的识别及重构

应用遗传算法求解传统制造领域的 job-shop 调度问题时, 若得到了可能死锁的非法解, 可采用拒绝策略<sup>[10]</sup>。但是, 在约束性较强的再制造生产环境中, 这种方法将会压缩可行解的搜索空间, 从而不利于获得最优解。本文的可变长工序编码方法在参数矩阵的指导下可快速识别存在死锁的异常染色体片断, 并对其进行有效重构。异常染色体的识别及重构方法如下:

a) 根据界点参数矩阵  $limit$ , 从给定的染色体中分解出各个工件的染色体片断, 这样可以得到  $n$  个由连续工序编号构成的编码排列。

b) 逐一检查各个工件的染色体片断, 正常染色体片断应该是一个连续递增的编码序列, 如果某个片断出现递减序列, 则应对该染色体片断作“异常”标记。

c) 逐一对“异常”染色体片断执行重构操作, 其方法是: 使用插入排序法或快速排序法逐一对各个片断中的基因进行升序排列, 再将重排后的染色体片段中的基因回填到分解前染色体中的相应基因位, 从而构造出新的正常染色体。

以 3/4 调度问题为例, 令染色体为 [4 1 6 5 8 2 7 3 9], 经检查可识别出工件 2 的染色体片断异常, 使用上述方法对该片断进行重构, 从而生成一个新的正常染色体为 [4 1 6 5 7 2 8 3 9]。这样, 通过极小的代价修复了存在死锁的非法解, 从而该染色体可以参与后续的各种遗传操作。

### 2.3 适应度函数

根据再制造生产调度的优化目标, 将最大完工时间作为染色体适应度的衡量指标。首先, 对所有染色体进行解码操作, 计算出由染色体决定的调度方案的最大完工时间  $ft = \max_{1 \leq i \leq n} TE_{im}^k$ , 然后根据式 (1) 对其执行归一化操作, 从而得到各个染色体的适应度函数值。

$$fitness_i = \begin{cases} \frac{ft^{\max} - ft_i}{ft^{\max} - ft^{\min}} & \text{if } ft^{\max} - ft^{\min} \neq 0 \\ 1 & \text{if } ft^{\max} - ft^{\min} = 0 \end{cases} \quad (1)$$

其中:  $ft^{\max} = \max\{ft_i\}$ ,  $ft^{\min} = \min\{ft_i\}$ ,  $1 \leq i \leq n^p$ ,  $0 \leq fitness_i \leq 1$ ;  $fitness_i$  表示第  $i$  个染色体的适应度值,  $ft^{\max}$  和  $ft^{\min}$  分别表示种群中染色体个体的最大完成时间的最大值和最小值。

### 2.4 遗传算子

#### 1) 选择算子

采用传统的轮盘赌法选择个体。染色体  $i$  被选中概率为  $p_i = ft_i / \sum_{j=0}^{num} ft_j$ 。其中:  $num$  表示种群数。

2) 交叉算子

借鉴基于位置的交叉方法(PX)和基于循环的交叉方法(CX)<sup>[11]</sup>,本文采用一种基于工件的工序移位方法进行交叉操作。该方法能够保存父代中的优良基因,并有利于增加种群的多样性。该方法需要先分别对两个待交叉的染色体解码,以得到相应的工件——工序矩阵  $JS_i$ ,如下:

$$JS_i = \begin{bmatrix} js_{11} & js_{12} & \cdots & js_{1max} \\ js_{21} & js_{22} & \cdots & js_{2max} \\ \ddots & \ddots & \ddots & \ddots \\ js_{n1} & js_{n2} & \cdots & js_{nmax} \end{bmatrix}$$

其中: $JS_i$ 表示染色体*i*的工件——工序矩阵; $max$ 代表染色体的基因个数。 $JS_i$ 的行对应*n*个工件,列对应 $max$ 个连续编码的工序。结合参数矩阵,可以完成 $JS_i$ 的填充。方法是将染色体中第*i*个基因代表的工序填充到 $JS_i$ 中第*i*列第*j*行上,*j*为工序所归属的工件编号。对每一对交叉的染色体,生成一个整型随机数 $\zeta \in [1, n]$ ,交换两个染色体中第 $\zeta$ 个工件的所有工序,由于交换后将造成部分列有多个工序并存,此时按照就近安置策略,将发生冲突的工序移位至空缺的列,从而繁衍出新的染色体。

以3/4调度问题为例,当 $\zeta=2$ 时,染色体[4 1 6 5 7 2 8 3 9]和[1 6 2 4 7 8 5 9 3]交叉后生成的两个新的染色体为[8 1 6 4 7 2 5 3 9]和[4 6 2 4 5 8 1 9 3],可见,子代保持了父代的优良特性。

3) 变异算子

变异操作采用基于机器的工序移位方法进行变异操作,变异前需要先对染色体中解码出机器——工序序列  $MS_i$ 。

$$MS_i = \begin{bmatrix} ms_{11} & ms_{12} & \cdots & ms_{1max} \\ ms_{21} & ms_{22} & \cdots & ms_{2max} \\ \ddots & \ddots & \ddots & \ddots \\ ms_{n1} & ms_{n2} & \cdots & ms_{nmax} \end{bmatrix}$$

其中: $MS_i$ 表示染色体*i*的机器——工序矩阵,它的行对应*m*台机器,列对应 $max$ 个连续编码的工序。结合参数矩阵,可以完成 $MS_i$ 的填充。方法是将染色体中第*i*个基因代表的工序填充到 $MS_i$ 中第*i*列第*j*行上,*j*为工序所位于的机器编号。生成整型随机数 $\zeta \in [1, n]$ ,对染色体中的第 $\zeta$ 台机器的工序进行循环左移或循环右移一位的变换操作,从而繁衍出新的染色体。

以3/4调度问题为例,当 $\zeta=4$ 时,染色体[4 1 6 5 7 2 8 3 9]执行循环左移一位的变异结果为[4 1 6 5 2 7 8 3 9]。

在交叉操作或变异操作完成后,均应对新生成的染色体进行合法性鉴别,并对异常染色体片段执行重构操作。经检查可知,3/4调度问题中交叉操作生成的两个新染色体均需要重构,而变异操作则生成了一个正常染色体。

3 实验仿真与分析

本文在 MATLAB 7.0 环境中对本文方法进行了仿真实验。实验机器配置:CPU Intel E2180 为 2.0 GHz,内存为 2 GB。遗传算法参数设置:种群规模为 70,进化代数为 200,交叉概率  $P_c=0.85$ ,变异概率  $P_m=0.05$ 。

在实验 1 中,本文对经典的 job-shop benchmark 问题 FT06 和 FT10<sup>[11]</sup>进行了实验仿真,取五次仿真结果的平均值。实验结果如表 1 所示。FT06 和 FT10 是本文基于可变量工序编码方法应用的特例,即染色体恰好由  $n \times m$  个基因组成。由表可

知,本文的改进遗传算法能够求出 FT06 的最优解,得到的 FT10 的最好解与其最优解也非常接近,并且,相比于其他传统的基于工序的编码方法,本文方法的计算耗时是可以接受的,从而说明了本文方法是有效和可行的。

表 1 算法仿真结果

| 问题   | 规模      | CPU 时间/s | 平均解    | 最优解 | 最好解 | 最差解 | 平均收敛代数 |
|------|---------|----------|--------|-----|-----|-----|--------|
| FT06 | 6 × 6   | 56.734   | 57.40  | 55  | 55  | 59  | 61.20  |
| FT10 | 10 × 10 | 608.766  | 957.20 | 930 | 933 | 958 | 103.80 |

在实验 2 中,根据再制造生产中加工路径可变性的特点,通过修改 FT10 问题的输入数据,模拟了一个再制造环境下的 job-shop 调度问题,将其记为 FT10'问题。该问题的输入数据如图 1 所示。其中,加工时间为 0 的工序是无效工序。

|   |    |   |    |   |    |   |    |   |    |   |    |   |    |   |    |   |   |   |
|---|----|---|----|---|----|---|----|---|----|---|----|---|----|---|----|---|---|---|
| 0 | 29 | 1 | 78 | 2 | 9  | 3 | 36 | 4 | 49 | 5 | 11 | 6 | 62 | 0 | 0  | 0 | 0 | 0 |
| 0 | 43 | 2 | 90 | 4 | 75 | 9 | 11 | 3 | 69 | 1 | 28 | 0 | 0  | 0 | 0  | 0 | 0 | 0 |
| 1 | 91 | 0 | 85 | 3 | 39 | 2 | 74 | 8 | 90 | 5 | 10 | 7 | 12 | 0 | 0  | 0 | 0 | 0 |
| 1 | 81 | 2 | 95 | 0 | 71 | 4 | 99 | 6 | 9  | 8 | 52 | 7 | 85 | 3 | 98 | 0 | 0 | 0 |
| 2 | 14 | 0 | 6  | 1 | 22 | 5 | 61 | 3 | 26 | 4 | 69 | 0 | 0  | 0 | 0  | 0 | 0 | 0 |
| 2 | 84 | 1 | 2  | 5 | 52 | 3 | 95 | 8 | 48 | 9 | 72 | 0 | 47 | 6 | 65 | 4 | 6 | 0 |
| 1 | 46 | 0 | 37 | 3 | 61 | 2 | 3  | 6 | 32 | 5 | 21 | 9 | 32 | 8 | 89 | 0 | 0 | 0 |
| 2 | 31 | 0 | 86 | 1 | 46 | 5 | 74 | 4 | 32 | 0 | 0  | 0 | 0  | 0 | 0  | 0 | 0 | 0 |
| 0 | 76 | 1 | 69 | 3 | 76 | 5 | 51 | 2 | 85 | 9 | 11 | 0 | 0  | 0 | 0  | 0 | 0 | 0 |
| 1 | 85 | 0 | 13 | 2 | 61 | 6 | 7  | 8 | 64 | 9 | 76 | 5 | 47 | 3 | 52 | 0 | 0 | 0 |

图 1 FT10'问题的输入数据

应用本文的可变量编码方法,将机器的起始编号设置为 1,得到 FT10'问题的连续编码矩阵 sequence,即

| sequence= | 1  | 2  | 3  | 4  | 5  | 6  | 7  | 0  | 0  | 0 |
|-----------|----|----|----|----|----|----|----|----|----|---|
| 8         | 13 | 9  | 12 | 10 | 0  | 0  | 0  | 0  | 11 |   |
| 15        | 14 | 17 | 16 | 0  | 19 | 0  | 20 | 18 | 0  |   |
| 23        | 21 | 22 | 28 | 24 | 0  | 25 | 27 | 26 | 0  |   |
| 30        | 31 | 29 | 33 | 34 | 32 | 0  | 0  | 0  | 0  |   |
| 41        | 36 | 35 | 38 | 43 | 37 | 42 | 0  | 39 | 40 |   |
| 45        | 44 | 47 | 46 | 0  | 49 | 48 | 0  | 51 | 50 |   |
| 53        | 54 | 52 | 0  | 56 | 55 | 0  | 0  | 0  | 0  |   |
| 57        | 58 | 61 | 59 | 0  | 60 | 0  | 0  | 0  | 62 |   |
| 64        | 63 | 65 | 70 | 0  | 69 | 66 | 0  | 67 | 68 |   |

FT10'问题的当前最优解为 724,其甘特图如图 2 所示。

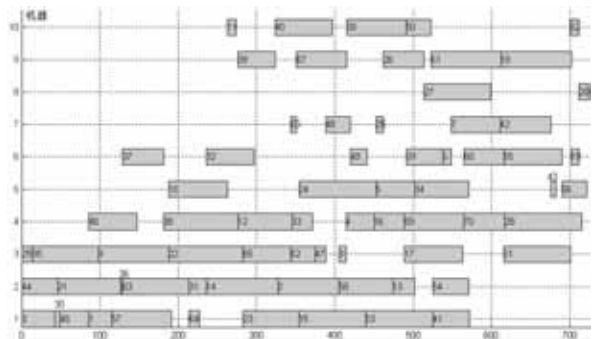


图 2 FT10'问题当前最优解的甘特图

实验 2 的求解过程进化曲线图如图 3 所示。

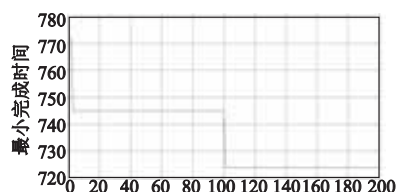


图 3 进化曲线图

仿真实验表明,基于可变量工序编码的改进遗传算法适用于求解复杂的再制造生产调度问题,该算法的编码方法简单,避免了无效工序的存储冗余和计算负担, (下转第 882 页)

数大于 800 后,其运算时间呈递减趋势。出现这种现象的原因是:由于算法  $Q$  中约简机制的存在,当矩阵行数增加到某个极限值后,各行之间相互约简的可能性也在增加,这反而使得非冗余析取项个数减少,从而使得算法  $Q$  运行时的初始数据被大大地消减了,进而使得算法  $Q$  的运算时间在矩阵行数大于某个值后会逐渐减少。

表 5 算法  $Q$  的性能指标

| 数据模式     | 运算时间 /ms | 产生的合取项个数 | 数据模式        | 运算时间 /ms | 产生的合取项个数 |
|----------|----------|----------|-------------|----------|----------|
| 100 × 16 | 6 877.7  | 696      | 800 × 16    | 62 131.1 | 1 021    |
| 200 × 16 | 23 433.1 | 897      | 1 000 × 16  | 3 890.7  | 888      |
| 400 × 16 | 33 670.4 | 983      | 4 000 × 16  | 3 310.6  | 357      |
| 600 × 16 | 54 722.4 | 1 075    | 10 000 × 16 | 780.4    | 195      |

由此可推知,假设固定条件属性的个数,决策表分辨矩阵中非冗余析取项个数存在一个极大值,算法  $Q$  在此处获得运算时间的最大值。在达到最大值后,决策表规模的增大反而会减少其分辨矩阵中析取项的个数。事实上,当用所有的属性组合构造一个分辨矩阵后,会发现约简后获得的析取项个数正好等于全部条件属性的个数,其对应的约简是所有条件属性组成的集合。

3.3 实验 3

由于算法  $Q$  的时间复杂度取决于两个参数:条件属性的个数、合取范式中的析取项个数,为观察在两个参数同时变化时算法  $Q$  的各项性能指标,本文选择 25 × 14、50 × 16、75 × 18、100 × 20 四个合取矩阵作为实验数据。实验结果如表 6 所示。

表 6 算法  $Q$  的性能指标

| 数据模式    | 运算时间 /ms | 产生的合取项个数 | 数据模式     | 运算时间 /ms | 产生的合取项个数 |
|---------|----------|----------|----------|----------|----------|
| 25 × 14 | 64       | 148      | 75 × 18  | 52 747   | 1 432    |
| 50 × 16 | 1 602    | 480      | 100 × 20 | 651 380  | 3 597    |

从表 6 可以看出,随着条件属性的个数和合取范式中析取项个数的增加,算法  $Q$  的运算时间量也以更大的增长率增加,这与算法  $Q$  的时间复杂度是指数级的相关。同时也看到,当属性个数和析取项个数增加时,合取项的个数也增加得很快,这也说明算法产生的合取项个数与算法的运行时间之间存在

在直接的联系。

4 结束语

尽管范式转换算法的时间复杂度是指数级的,但是仍然可以通过设计合理实用的转换算法来获得高效的转换效率,以快速地获取决策表所有约简。本文通过模拟人工范式转换的原理,基于队列结构,提出了一个基于直接搜索的分辨函数范式转换算法,UCI 数据和仿真数据上的仿真实验显示算法是有效可行的。应该指出的是,尽管本文算法在一定数据规模(如属性个数不是很多时)内可以高效地进行范式转换,但在属性个数较多时其实用性将大大降低,此时采用启发式的属性约简算法是一种现实的选择。

参考文献:

- [1] PAWLAK Z. Rough set[J]. *International Journal of Computer and Information Sciences*, 1982,11(5):341-356.
- [2] PAWLAK Z. Rough sets and intelligent data analysis[J]. *Information Sciences*, 2002,147(1-4):1-12.
- [3] 徐章艳. 一个复杂度为  $\max(O(|C||U|), O(|C| \sim 2|U/C|))$  的快速属性约简算法[J]. *计算机学报*, 2006,29(3):391-399.
- [4] 王国胤,于洪,杨大春. 基于条件信息熵的决策表约简[J]. *计算机学报*, 2002,25(7):759-766.
- [5] SKOWRON A, RAUSZER C. The discernibility matrices and functions in information systems[M]//SLOWINSKI R. *Intelligent decision support: handbook of applications and advance of the rough sets theory*. [S.l.]: Kluwer Academic Publishers, 1992: 331-362.
- [6] KRYSZKIEWICZ M. Rough set approach to incomplete information systems[J]. *Information Science*, 1998,112(1-4): 39-49.
- [7] 杨明. 一种基于改进差别矩阵的属性约简增量式更新算法[J]. *计算机学报*, 2007,30(5):815-822.
- [8] 周创德,田卫东. 基于约束函数的差别矩阵及其求核算法[J]. *计算机工程*, 2008,34(15):60-63.
- [9] 赵荣泳,张浩,李翠玲,等. 粗糙集理论中分辨函数的析取范式生成算法[J]. *计算机工程*, 2006,32(2):183-185.
- [10] 王元珍,裴小兵. 基于 Skowron 分明矩阵的快速约简算法[J]. *计算机科学*, 2005,32(4):42-44.

(上接第 873 页) 遗传算子设计合理,可以确保继承父代的优良特性和保持种群的多样性,从而能够较快找到理想解。

4 结束语

回收品质量、数量和拆卸过程中的不确定性使得再制造生产中工件的加工路径具有显著的可变性特点。为此,本文提出了一种可变长工序编码方法,设计了相应的异常染色体的识别、重构方法以及遗传算子的实现方法。这种改进的遗传算法在参数矩阵的指导下,可以实现随机工序数目和随机工序顺序情况下再制造生产调度问题的优化求解,仿真实验证明了该算法的有效性和可行性。

参考文献:

- [1] LUND R T. Remanufacturing[J]. *Technology Review*, 1984, 87(2): 18-23.
- [2] JAYARAMAN V. Production planning for closed-loop supply chains with product recovery and reuse: an analytical approach[J]. *International Journal of Production Research*, 2006,44(5): 981-998.
- [3] Jr GUIDE V D R, JAYARAMAN V, LINTON J D. Building contingency planning for closed-loop supply chains with product recovery

- [J]. *Journal of Operations Management*, 2003,21(3): 259-279.
- [4] 杨晓梅,曾建潮. 基于主动调度的编码方法及其在 JSP 中的应用[J]. *系统工程理论与实践*, 2004,24(6): 55-60.
- [5] 闫利军,李宗斌,卫军胡,等. 一种新的混合优化算法及其在车间调度中的应用[J]. *自动化学报*, 2008, 34(5): 604-608.
- [6] 王万良,吴启迪,宋毅. 基于求解作业车间调度问题的改进自适应遗传算法[J]. *系统工程理论与实践*, 2004,24(2): 58-62.
- [7] 朱海平,邵新宇,张国军. 不确定信息条件下的车间调度策略研究[J]. *计算机集成制造系统*, 2006,12(10): 1637-1642.
- [8] 乔威,王冰,孙洁. 用遗传算法求解一类不确定性作业车间调度问题[J]. *计算机集成制造系统*, 2007,13(12): 2452-2455, 2468.
- [9] 张维存,郑丕谔,吴晓丹. 蚁群遗传算法求解能力约束的柔性作业车间调度问题[J]. *计算机集成制造系统*, 2007,13(2): 333-337, 362.
- [10] WU Chun-guo, XING X L, LEE H P, et al. Genetic algorithm application on the job shop scheduling problem[C]//Proc of the 3rd International Conference on Machine Learning and Cybernetics. Shanghai: [s.n.], 2004: 2102-2106.
- [11] 王凌. 车间调度及其遗传算法[M]. 北京: 清华大学出版社, 2003.