

基于Petri网的柔性制造系统无死锁遗传调度算法

任 磊, 王 峰, 邢科义

(机械制造系统工程国家重点实验室, 西安交通大学系统工程研究所, 陕西 西安 710049)

摘要: 对以最小化加工时间为目标的柔性制造系统无死锁调度问题, 提出了一种遗传调度算法. 算法考虑到同类工件具有预先确定的相同加工路径, 而各工序的处理时间与工件有关. 用Petri网对工序和资源分配进行逻辑建模, 利用遗传算法, 采用工序自然编码方式, 基于系统的最佳避免死锁Petri网控制器, 检测染色体的可行性, 修复不可行染色体使其对应的调度满足资源约束和无死锁控制约束, 从而保证算法所利用的所有染色体都对系统可行调度. 仿真结果表明了算法的可行性和有效性.

关键词: 柔性制造系统; 死锁; 控制器; 调度; 遗传算法

中图分类号: TP278 **文献标识码:** A

A Petri-net-based deadlock-free genetic scheduling for flexible manufacturing systems

REN Lei, WANG Feng, XING Ke-yi

(The State Key Laboratory for Manufacturing Systems Engineering, Systems Engineering Institute,
Xi'an Jiaotong University, Xi'an Shaanxi 710049, China)

Abstract: A deadlock-free genetic scheduling algorithm for flexible manufacturing systems is presented to minimize makespan. This algorithm takes into account the facts that jobs of the same type have the same predetermined processing route, and the processing time is different from different job. The operation sequences of jobs and the allocation of resources are modeled logically by a Petri net. In the proposed genetic algorithm, the operation sequence of all jobs in the system is encoded as a chromosome. By using the deadlock-avoidance Petri net controller for the system, the chromosome is tested and amended so that it can be decoded into a schedule that satisfies the resource constraint and the deadlock-free constraint. Thus, all chromosomes in the algorithm are corresponding to feasible schedules. Experimental results demonstrate the effectiveness and feasibility of the proposed genetic algorithm.

Key words: flexible manufacturing systems; deadlock; controller; scheduling; genetic algorithm

1 前言(Introduction)

在柔性制造系统中, 各种工件按照预先定义的操作顺序进行加工, 竞争利用一组有限的系统资源. 工件与资源的相互作用常常导致系统的死锁, 使得部分或整个系统无法运行. 因此, 无死锁是调度运行自动制造系统所必须的.

针对柔性制造系统死锁问题, 此前人们主要从控制的角度研究死锁避免方法, 提出了多种系统的活性控制策略^[1~8]. 对无死锁调度则研究的相对较少^[9~12]. 控制和调度是对同一系统的两种不同的约束, 两者将同时被施加在系统之上, 它们与系统关系应具有如图1所示的结构. 但目前的研究在综合调度策略时基本上都没有考虑活性控制器对系统的约

束. 文献[9]和文献[10]均是先通过生成可达树, 找出所有无死锁的调度策略, 经过性能比较得到一个最佳的无死锁调度. 对一般系统, 生成可达树本身将遇到状态组合爆炸问题. 文献[12]基于系统的Petri网模型, 在假定缓冲空间无限的条件下, 利用遗传算法求解系统的优化调度策略, 再分析这一调度在实际运行时可能出现的死锁, 用增加缓冲区的方法来保证系统调度的活性. 而文献[11]将工件的加工工艺次序, 资源约束, 以及无死锁要求转化为一组线性不等式约束, 通过求解相应的线性规划问题, 得到系统的一个无死锁调度.

本文研究资源确定的柔性制造系统的无死锁调度问题, 按图1所示系统、控制器和调度策略的关系

结构, 基于制造系统与避免死锁控制器构成闭环系统活性Petri网模型, 建立柔性制造系统的无死锁调度策略. 为获得系统的最优调度, 所依赖的避免死锁控制器也必须是最优的; 其次, 控制约束必须在综合调度策略时是可利用的, 即控制器必须是事先确定的.

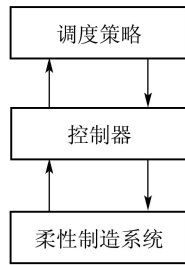


图1 柔性制造系统的控制与调度结构图

Fig. 1 The architecture of control and scheduling of flexible manufacturing systems

本文研究以最小化加工时间为目标的柔性制造系统无死锁调度问题. 利用Petri网对工件工序约束和资源分配进行逻辑建模. 采用最佳Petri网活性控制器对系统进行避免死锁的控制, 建立受控系统最佳活性Petri网模型. 利用遗传算法对受控活性Petri网模型进行调度, 检测和修复染色体使其满足受控模型的资源约束及控制约束. 因此利用本文给出的遗传算法将能得到系统的一个无死锁的可行调度.

2 制造系统及其Petri网模型(Manufacturing systems and their Petri net models)

Petri网是1个四元组 $N = (P, T, F, M_0)$, 其中 P 是有限位置集, T 是有限变迁集, $F \subseteq (P \times T) \cup (T \times P)$ 是有向弧集. M_0 是 N 的初始标识. 给定节点 $x \in P \cup T$, 记

$$\cdot x = \{y \in P \cup T | (y, x) \in F\},$$

$$x \cdot = \{y \in P \cup T | (x, y) \in F\}.$$

给定标识 M , 称变迁 $t \in T$ 在标识 M 下是使能的, 如果 $\forall p \in \cdot t, M(p) > 0$. 在 M 下使能变迁可以引发, t 的引发使 N 从 M 转移到新标识 M' , 记作 $M[t > M']$. 用 $RM(PN, M_0)$ 表示Petri网 PN 从状态 M_0 可以到达的状态集合.

本文考虑的柔性制造系统由 m 个资源组成. 用 $R = \{r_i, i = 1, 2, \dots, m\}$ 记资源集. 设资源 r_i 处工件的能力为 $\Psi(r_i)$. 系统可以同时处理 n 种不同类型的工件, 工件类型集 $J = \{J_1, J_2, \dots, J_n\}$. 设需要加工的 J_i 类工件数为 $y(i)$. 加工操作所需的资源和时间是事先确定的, 同类工件具有相同的加工路径. 设 J_i 类工件 u 的加工路径用它的操作序列可

表示为 $O_{i1u}O_{i2u} \cdots O_{iL(i)u}$, $u = 1, 2, \dots, y(i)$, 其中, $L(i)$ 为 J_i 型工件所需的加工操作数. 设处理 O_{iju} 所需的时间为 $h(O_{iju})$. 为方便, 增加了两个虚拟操作 O_{i0} 和 O_{is} , 分别表示工件等待加工和已完成加工状态, 其处理时间都为0. 由于 O_{iju} , $u = 1, 2, \dots, y(i)$, 利用同一个资源, 将其记作 $r(O_{ij})$. 为方便后文提到的操作 O_{ij} 是指 O_{iju} , $u = 1, 2, \dots, y(i)$ 之一. 从而, J_i 型工件的加工路径可以简单记为

$$\sigma_i = O_{i0}O_{i1}O_{i2} \cdots O_{iL(i)}O_{is}.$$

本文利用文[1, 2, 6]给出的方法对制造系统进行Petri网建模, 即用位置和变迁组成的有向路径来模拟工件的加工路径, 其中每个位置对应一个操作, 故称之为操作位置. 每个变迁的引发表示工件在机器上的操作完成并转移到下一操作所需要的机器上. 例如, J_i 型工件的加工路径为

$$\sigma_i = O_{i0}O_{i1}O_{i2} \cdots O_{iL(i)}O_{is},$$

对应的加工路径Petri网模型为

$$p_{i0}t_{i1}p_{i1}t_{i2}p_{i2} \cdots t_{iL(i)}p_{iL(i)}t_{i(L(i)+1)}p_{is},$$

其中, p_{ij} 是对应操作 O_{ij} 的操作位置, t_{ij} 为变迁. 记

$$P = \{p_{ij}, i = 1, 2, \dots, n, j = 1, 2, \dots, L(i), s\},$$

$$P_0 = \{p_{i0}, i = 1, 2, \dots, n\},$$

$$T = \{t_{ij}, i = 1, 2, \dots, n, j = 1, 2, \dots, L(i), L(i)+1\}.$$

对每种资源 r_i , 设置一个位置, 称为资源位置. 资源的需求与释放是通过有向弧来模拟的. 如果位置 p_{ij} 对应的操作 O_{ij} 需要资源 r , 记作 $R(p_{ij}) = r$, 则增加一条从资源位置 r 到变迁 t_{ij} 的弧和一条从变迁 t_{ij+1} 到 r 的弧分别来表示资源的需求和释放. 并用 P_R 记资源位置集, 即 $P_R = \{r_i, i = 1, 2, \dots, m\}$. 用 F 和 M_0 分别记所有弧集和初始标识, 则 $M_0(r_i) = \Psi(r_i)$, $M_0(p_{i0}) = y(i)$, 其余位置的初始标识为0. 则系统Petri网模型可以表示为

$$PN = (P \cup P_0 \cup P_R, T, F, M_0).$$

例1 考虑由3台机器 m_1, m_2, m_3 组成的制造系统. 系统可以加工两种类型的工件 J_1 和 J_2 . J_1 型工件的操作序列为 $O_{11}O_{12}O_{13}$, 而所需的机器序列为 $m_1m_2m_3$. J_2 型工件的操作序列为 $O_{21}O_{22}O_{23}$, 而所需的机器序列为 $m_3m_2m_1$. 当机器 m_1, m_2 , 和 m_3 的加工能力都为2, 所需加工的 J_1 和 J_2 型工件数都为3时, 根据以上的建模方法得到的系统Petri网模型如图2所示.

其中 p_{ij} 代表操作 O_{ij} , $i = 1, 2; j = 1, 2, 3$.

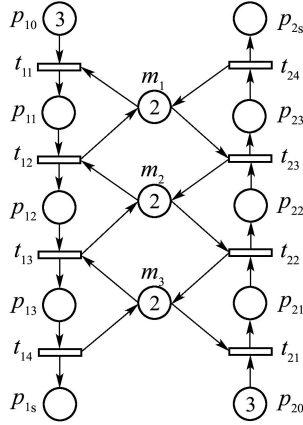


图 2 柔性制造系统的Petri网模型

Fig. 2 Petri net of a flexible manufacturing system

3 避免死锁Petri网控制器(Deadlock avoidance Petri net controllers)

在图1所示的控制调度系统框架下, 调度策略建立在避免死锁策略基础之上. 在Petri网模型下, 文献[7,8]提出了避免死锁控制策略. 这种控制策略不仅性能最佳, 而且具有Petri网实现. 控制器的Petri网实现有利于对受控系统进行分析与调度. 本文将基于这一最佳受控活性Petri网模型, 得到系统的无死锁遗传调度策略. 为此, 这里简单回顾避免死锁Petri网控制器.

文献[7,8]分析了柔性制造系统的死锁问题. 建立了系统死锁与RT-回路之间的关系. RT-回路 θ 是系统Petri网模型 PN 的一条有向回路, 它仅包含资源位置和变迁结点. 用 $T[\theta]$ 和 $R[\theta]$ 分别记 θ 上的所有变迁和资源位置之集. 若 $R_1 = R[\theta]$, 则称 θ 为关于 R_1 的RT-回路. 如果RT-回路 θ 满足 $(T[\theta])^\cdot = T[\theta]$, 则称 θ 是完备的. 完备RT-回路简记为PRT-回路.

设 θ_1 和 θ_2 是关于 R_1 的两条PRT-回路, 如果 θ_2 包含 θ_1 , 即 θ_1 是 θ_2 的子回路, 记作 $\theta_1 \leq \theta_2$. 由于任何两个关于 R_1 的PRT-回路的并仍是关于 R_1 的PRT-回路, 则包含关系 $\leq$ 是定义在全体关于 R_1 的PRT-回路之集上的偏序关系, 且具有唯一的极大元. 简称极大完备RT-回路为MPRT-回路. 用 Ω 记 PN 的所有MPRT-回路之集.

变迁 t 称为 θ 的一个输入(输出)变迁, 如果 t 的引发将增加(减少) $T[\theta]$ 中的标记数. 用 $I(\theta)$ 和 $O(\theta)$ 分别记 θ 的所有输入和输出变迁之集. 给定 PN 的一条MPRT-回路 θ 和可达标识 $M \in RM(PN, M_0)$, 如果 $M(T[\theta]) = \Psi(R[\theta])$, 则称 θ 在 M 下是饱和的.

引理 1^[7,8] 设 θ 是

$$PN = (P \cup P_0 \cup P_R, T, F, M_0)$$

的关于 R_1 的MPRT-回路, $M \in RM(PN, M_0)$, 当 θ

在 M 下达到饱和时, θ 上的变迁都处在 M 下的死锁中.

定义 1^[7,8] 给定系统Petri网模型 $PN = (P \cup P_0 \cup P_R, T, F, M_0)$ 的一个关于资源集 R_1 的PRT-回路 θ , 定义关于 θ 的Petri网控制器为 $N[\theta] = (\{p_\theta\}, T, F_\theta, M_\theta)$, 其中, p_θ 是对应于 θ 的一个控制位置, 它的初始标识为 $M_\theta(p_\theta) = \Psi(R_1) - 1$, $F_\theta = \{(p_\theta, t) | t \in I(\theta)\} \cup \{(t, p_\theta) | t \in O(\theta)\}$.

定义 2^[7,8] 给定 $PN = (P \cup P_0 \cup P_R, T, F, M_0)$, 定义 PN 的Petri网控制器

$$PC = \bigoplus_{\theta \in \Omega} N[\theta] \equiv (P_c, T_c, F_c, M_{PC0}),$$

其中: $N[\theta] = (\{p_\theta\}, T_\theta, F_\theta, M_\theta)$ 是对应于MPRT-回路 θ 的控制器, P_c 是对应于MPRT-回路的控制位置之集, $P_c = \{p_\theta | \theta \in \Omega\}$, $T_c = \bigcup_{\theta \in \Omega} T_\theta$, $F_c = \bigcup_{\theta \in \Omega} F_\theta$, $M_{PC0}(p_\theta) = M_\theta(p_\theta)$.

则 PN 在 PC 控制之下形成的受控系统的Petri网模型可表示为 $CPN = PC \oplus PN = (P \cup P_0 \cup P_R \cup P_c, T, F \cup F_c, M_{C0})$, 其中, 当 $p \in P \cup P_0 \cup P_R$ 时, $M_{C0}(p) = M_0(p)$, 当 $p \in P_c$ 时, $M_{C0}(p) = M_{PC0}(p)$.

设 $W = \{\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_k\}$ 是MPRT-回路的子集, 其中 $k \geq 2$, 如果 $\Theta = \bigcap_{i=1, \dots, k} R(\theta_i) \neq \emptyset$, 则称 Θ 中加工能力为1的资源为中心资源.

引理 2^[7,8] 当 $PN = (P \cup P_0 \cup P_R, T, F, M_0)$ 不含中心资源时, 由定义2给出的控制器 PC 是 PN 的极大允许避免死锁Petri网控制器.

例 2 对如图2中所示制造系统Petri网模型, 由于所有机器 m_1, m_2, m_3 的加工能力都为2, 故系统不含中心资源, 根据定义2给出系统的最佳活性Petri网控制器及受控系统最佳活性Petri网模型如图3所示.

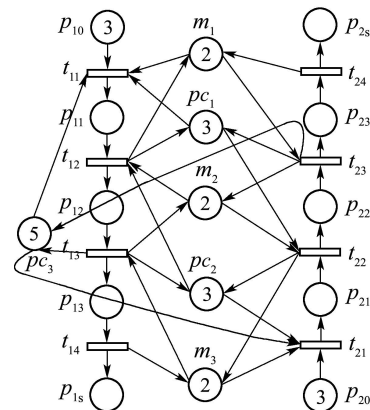


图 3 不含中心资源系统的受控Petri网模型

Fig. 3 Controlled net model for the system without center resources

受引理2的启发,对含有中心资源的系统,本文将先简化系统模型消除中心资源,再对简化系统设计控制器.

定义3^[7,8] 设 $PN = (P \cup P_0 \cup R, T, F, M_0)$ 是一个系统的Petri网模型, r 是 PN 的一个中心资源, PN 关于 r 的简化模型,记为 $PN[r]$,是经以下两步从 PN 得到的Petri网.

- 1) 从 PN 中删除资源位置 r 及其相关的弧;
- 2) 对 PN 的每个变迁 $t_1 \in \cdot r$, 如果 $\exists r_1 \in P_R$ 使得 $(r_1, t_1) \in F$, 则删除弧 (r_1, t_1) , 增加弧 (r_1, t_2) , 其中 $t_2 = \cdot (P \cap \cdot t_1)$.

在 PN 中利用 r 的操作与它的后继操作,在 $PN[r]$ 中利用的是同一资源. 将这两个操作视为同一操作,则 $PN[r]$ 是一个本文所考虑的制造系统的Petri网模型,故当 $PN[r]$ 不含中心资源时, $PN[r]$ 具有最佳避免死锁Petri网控制器,记为 $PC[r]$. 则 $CPN[r] = PC[r] \oplus PN[r]$ 是一个活的Petri网.

$PC[r]$ 实际上没有考虑到 r 对系统的约束,为了体现 r 的约束,将 PN 中资源 r 约束增加到 $CPN[r]$ 中,并将这一Petri网记为 CPN . 由于 r 中的每个变迁在 CPN 中都没有输入资源位置,故 CPN 是活的,可以作为运行原制造系统的活性Petri网模型. 本文将基于这一Petri网模型 CPN , 建立系统的无死锁遗传调度算法.

例3 对例1中的制造系统,如果机器 m_1, m_2 , 和 m_3 的加工能力分别为2, 1, 2, 则 m_2 是系统的一个中心资源. 此时根据定义2及以上方法给出的系统活性受控Petri网模型如图4所示.

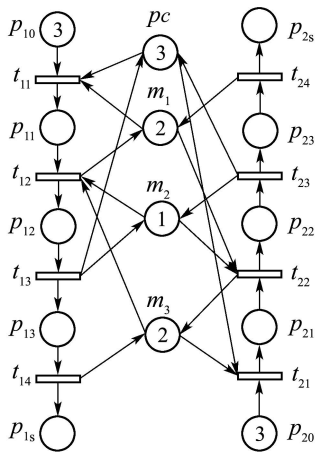


图4 含中心资源系统的受控Petri网模型

Fig. 4 Controlled Net model for the system with center resources

4 无死锁遗传调度算法设计(Design of deadlock avoidance algorithm)

遗传算法是一种具有全局搜索功能的启发式算法. 它利用一组解(种群)通过进化(选择、交叉、变异)得到更好的解.

本文寻求的调度策略不仅要使得调度目标(makespan)极小化,而且要无死锁. 称满足加工次序约束的无死锁调度为可行调度,对应的染色体编码为可行编码. 本文基于系统Petri网模型,利用最佳避免死锁控制器实现遗传算法中编码的可行性.

4.1 编码与解码(Encoding and decoding)

在本文采用的方法中,首先把所有要加工的工件编号为 $q, q = 1, 2, \dots, \sum y(i)$. 问题解的编码是工件号的序列,一个 J_i 型工件号 q 出现的次数为该类工件所需的加工工序数 $L(i)$, 第 k 次出现表示该工件的第 k 个工序. 如图3所示系统,一个可能的编码为 $\pi = (2, 5, 3, 6, 2, 1, 5, 2, 3, 3, 4, 1, 5, 4, 4, 6, 6, 1)$, 其中: 1, 2, 3代表第1类的3个不同工件, 4, 5, 6代表第2类的3个不同工件. 同1个数字 $q (= 1, 2, \dots, 6)$ 出现了3次, 分别代表工件 q 的第1, 2, 3次工序. 由于工序与Petri网模型中的代表这一工序开始的变迁之间有一一对应关系,故一个这样的编码也表示对应工序位置的输入变迁的序列. 如 π 代表的变迁序列为: $T_\pi = t_{11}t_{21}t_{11}t_{21}t_{12}t_{12}t_{11}t_{22}t_{13}t_{12}t_{13}t_{21}t_{12}t_{23}t_{22}t_{23}t_{22}t_{23}t_{13}$. 考虑到 T_π 的可行性,需要考虑工件加工完毕以后离开系统所对应的变迁,即 $t_{i(L(i)+1)}, i = 1, 2, \dots, n$ 的引发. 根据实际,本文假定工件加工完毕则可离开系统,即 $t_{i(L(i)+1)}$ 即可引发.

由于用工件序号的出现顺序代表加工顺序,且每个工序所需的机器是确定的,故上述的一个编码可以直接解码成为一个可能的调度,而且保证了编码所对应的调度一定满足工件工序的顺序约束,但这样的调度要成为可行调度还须满足资源约束和无死锁控制约束. 对不满足上述约束的染色体需要进行修复,将其转换为可行染色体,即对应调度是满足资源约束和无死锁控制约束的. 因此,可行染色体对应于Petri网模型的可行引发变迁序列,它将系统从初始标识转移到终止标识(代表所有工件已加工完毕).

4.2 染色体可行性检测与修复(Checking and amending for chromosome feasibility)

染色体的编码方式保证染色体对应的调度满足加工顺序的约束,但一个可行调度还必须满足资源约束和控制约束. 在最佳受控系统Petri网模型中,一个染色体是可行的必要充分条件是它对应的变迁序列为受控系统Petri网模型的一个可行引发

序列. 因此, 染色体的可行性可以通过检查变迁序列能否从初始状态逐一引得到验证, 设 $\alpha = t_1 \cdots t_i t_{i+1} \cdots t_n$ 是一个染色体对应的变迁序列, 如果 $M_0[t_1 \cdots t_i > M_1]$, 但 $M_1[t_{i+1} > \text{无定义}]$, 设 α 上 t_{i+1} 之后的第1个可以在 M_1 下引发的变迁为 t_j , 则将 t_j 移到 t_{i+1} 之前, 而其它变迁的顺序不变, 新变迁序列为 $\alpha_1 = t_1 \cdots t_i t_j t_{i+1} \cdots t_{j-1} t_{j+1} \cdots t_n$, 且 $M_1[t_j > M_2]$. 注意受控Petri网是活的, 则这样的 t_j 一定存在. 类似 α_1 分析的可行性, 由于 $M_0[t_1 \cdots t_i t_j > M_2]$, 故仅需要对子列 $t_{i+1} \cdots t_{j-1} t_{j+1} \cdots t_n$ 进行可行性检查和适当的修正. 根据受控系统Petri网模型的活性, 则一定存在 $t_{i+1} \cdots t_{j-1} t_{j+1} \cdots t_n$ 的一个排列, 设为 $\beta = t_{i+1} \cdots t_{j-1} t_{j+1} \cdots t_n$, $M_2[\beta > M_f]$. 从而, $\alpha_f = t_1 \cdots t_i t_j \beta$ 是一个 M_0 的可行变迁序列, 对应一个可行的染色体.

对于染色体编码 π , 对应的变迁序列 $\alpha = t_{11} t_{21} t_{11} t_{12} t_{22} t_{21} t_{13} t_{12} t_{23} t_{22} t_{13} t_{12} t_{23} t_{22} t_{23} t_{13}$, 系统的初始标识为 $M_0(p_{10}, p_{11}, p_{12}, p_{13}, p_{1s}, p_{20}, p_{21}, p_{22}, p_{23}, p_{2s}, m_1, m_2, m_3, pc_1, pc_2, pc_3) = (3, 0, 0, 0, 0, 3, 0, 0, 0, 0, 2, 2, 2, 3, 3, 5)$, 依次引发变迁序列 $M_0[t_{11} t_{21} t_{11} t_{21} > M_1]$, $M_1 = (1, 2, 0, 0, 0, 1, 2, 0, 0, 0, 0, 2, 0, 1, 1, 1)$, 但 $M_1[t_{11} > \text{无定义}]$, 因其不满足资源 m_1 的约束, 判断后续变迁找到可行变迁 t_{12} , 将其移至 t_{11} 之前, 引发 t_{12} 后状态标识为 $M_2 = (1, 1, 1, 0, 0, 1, 2, 0, 0, 0, 1, 1, 0, 2, 0, 1)$, 再依次处理后续变迁序列, 此时 $M_2[t_{11} t_{22} > M_3]$, $M_3 = (0, 2, 1, 0, 0, 1, 1, 1, 0, 0, 0, 0, 1, 0, 1, 0)$, 但 $M_3[t_{21} > \text{无定义}]$, 因其不满足控制约束 pc_3 的约束, 判断后续变迁找到可行变迁 t_{13} , 将其移至 t_{21} 之前, $M_3[t_{13} > M_4]$, $M_4 = (0, 2, 0, 0, 1, 1, 1, 1, 0, 0, 0, 1, 1, 0, 1, 1)$, 再按照上述方法判断其后续剩余变迁序列, 将变迁序列 α 修正为一个可行的变迁序列 α_f , 使得 $M_0[\alpha_f > M]$, 其中 $M = (0, 0, 0, 0, 3, 0, 0, 0, 0, 3, 2, 2, 2, 3, 3, 5)$, 而修改后对应变迁序列 α_f 的编码 $\pi_f = (2, 5, 3, 6, 2, 1, 5, 2, 4, 3, 5, 4, 3, 1, 4, 6, 6, 1)$ 是一个可行的无死锁染色体.

4.3 生成初始种群(Generating the initial population)

随机生成的一个满足编码条件的染色体, 经过可行性检查与修复成为一个可行染色体. 初始种群是由这样 m 个随机生成的染色体组成.

4.4 适应度函数及其计算(Fitness function)

本文以调度目标(makespan)作为遗传算法的适应度函数 f . 给定可行染色体 $\pi = (v_1, v_2, \cdots, v_n)$, π 所对应的调度从 v_1 所代表的操作开始逐一执行.

$st_{ij}(k)$: 表示变迁 t_{ij} 的第 k 次引发时间, 也就是操作 O_{ij} 第 k 次(共 $y(i)$ 次)开始处理的时间;

$pt_{ij}(k)$: 表示变迁 t_{ij} 的第 k 次引发所产生的托肯在位置 p_{ij} 中至少应该逗留的时间, 这对应操作 O_{ij} 第 k 次需要的加工时间;

$$f(\pi) = \max st_{iL(i)}(y(i)) + pt_{iL(i)}(y(i)), i = 1, \cdots, n.$$

4.5 遗传操作(Genetic operation)

遗传操作包含选择, 交叉和变异.

选择是从群体中选择优良个体, 淘汰劣质个体的操作. 本文采用的是最优个体保存法, 即选择父代中适应度最优的个体直接复制到子代中.

交叉是遗传算法中重要的一个操作类型. 具体的交叉操作为: 随机选择两个父代染色体 PA 和 PB , 在其上分别随机选取一个交叉点 A 和 B , 以任意整数 $l_A(l_B)$ 作为交叉长度, 以 $PA(PB)$ 上 $A(B)$ 点向右长度为 $l_A(l_B)$ 的基因作为交叉段, 在 $PA(PB)$ 上将对应 $PB(PA)$ 交叉段的基因置零, 把置零的基因提前, 用相应的 $PB(PA)$ 基因段将其替换, 从而生成 $CA(CB)$.

变异操作使种群中的个体得以突变来产生新的基因, 防止早熟现象的产生, 从而搜索到更好的结果. 本文中采取的变异操作为: 随机选取一个父代染色体, 在此染色体中随机产生两个位置, 然后颠倒两个位置之间的基因产生新的染色体.

经过上述交叉和变异操作产生的染色体一定满足加工工序约束, 但是不一定满足资源和控制约束条件. 所以需要对其进行可行性检测与修复操作, 从而保证经过进化操作产生的子代均为可行染色体.

根据上面的介绍, 基于染色体检测与修复操作的遗传算法步骤如下:

- 1) 输入已知信息: 工件信息, 系统资源约束; 2) 根据死锁避免控制策略添加控制约束; 3) 确定遗传算法的参数; 4) 生成初始化种群, 初始化遗传代数 $gen = 0$; 5) 对种群进行选择、交叉、变异操作; 6) 根据资源和控制约束检测和修复初始种群; 7) 计算种群中每个染色体的适应度函数, $gen = gen + 1$; 8) 判断是否满足终止条件, 即 $gen > gen_max$, 如否, 返回5); 9) 输出调度方案.

5 实例仿真(Simulation example)

例4 考虑图3和图4所示的受控活性系统, 第1类工件的3个工件编号为1, 2, 3, 第2类的3个工件分别编号为4, 5, 6. 其加工机器和加工时间信息由表1给出.

对其分别利用遗传算法计算50次得到的结果如表2所示, 其中 p_c 为交叉概率, p_m 为变异概率, 遗传代数为100. 用Ma-ms, Mi-ms和Av-ms分别表示在50次计算中得到的最差结果, 最好结果以及平均结果, Mtime表示程序运行平均时间(s)(AMD3600+,

512 M内存). 表中C1表示不含中心资源, C2表示含中心资源.

表1 工件加工信息
Table 1 Job information

1	2	3	4	5	6
m_1 : 40	m_1 : 45	m_1 : 53	m_3 : 35	m_3 : 62	m_3 : 73
m_2 : 55	m_2 : 10	m_2 : 24	m_2 : 21	m_2 : 31	m_2 : 56
m_3 : 50	m_3 : 20	m_3 : 25	m_1 : 33	m_1 : 35	m_1 : 44

表2 调度结果
Table 2 Scheduling results

	Ma-ms	Mi-ms	Av-ms	Mtime
$p_c = 0.8, p_m = 0.05$	201	194	197.0	1.592
C1 $p_c = 0.8, p_m = 0.10$	198	193	196.0	1.603
$p_c = 0.8, p_m = 0.15$	201	193	196.2	1.614
$p_c = 0.7, p_m = 0.10$	288	257	268.4	1.596
C2 $p_c = 0.8, p_m = 0.10$	279	257	266.5	1.599
$p_c = 0.9, p_m = 0.10$	287	257	270.2	1.628

根据表2的结果可以看出在交叉概率 $p_c = 0.80$, 变异概率 $p_m = 0.10$ 时, 调度的结果相对较好. 另外, 图5和图6是对图3和图4所示的受控系统进行调度得到的一个优秀结果的甘特图.

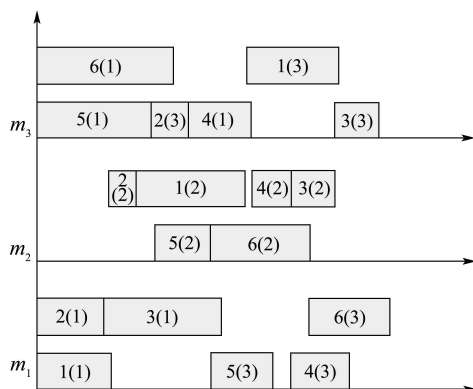


图5 无中心资源系统无死锁调度的甘特图

Fig. 5 Gantt chart of deadlock-free scheduling for the system without center resources

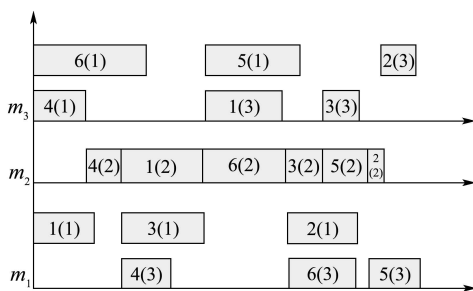


图6 含中心资源系统无死锁调度的甘特图

Fig. 6 Gantt chart of deadlock-free scheduling for the system with center resources

上述仿真结果说明对于路径确定, 同种类型工件数为多个, 系统资源容量也可不为1的柔性制造系统, 本文提出的遗传算法能有效地对其进行无死锁调度.

6 结论(Conclusion)

本文研究了柔性制造系统无死锁调度问题, 针对同类工件路径相同的多品种批量加工系统, 提出了一个新的无死锁遗传调度算法. 算法采用工序自然编码方式, 基于受控活性Petri网模型, 检测和修复遗传操作产生的染色体使其对应的调度满足资源约束和无死锁要求. 由于遗传算法中所有的染色体均可被修复并解码为可行调度, 故在很大程度上改善了遗传算法得到的调度结果.

参考文献(References):

- [1] BANASZAK Z A, KROGH B H. Deadlock avoidance in flexible manufacturing systems with concurrently competing process flows[J]. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, 1990, 6(6): 724 – 734.
- [2] EZPELETA J, COLOM J M, MARTINEZ J. A petri net-based deadlock prevention policy for flexible manufacturing system[J]. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, 1995, 11(2): 173 – 184.
- [3] FANTI M P, ZHOU M C. Deadlock control methods in automated manufacturing systems[J]. *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics, A*, 2004, 34(1): 5 – 22.
- [4] HUANG Y, JENG M, XIE X, et al. Deadlock prevention policy based on Petri nets and siphons[J]. *International Journal of Production Research*, 2001, 39(2): 283 – 305.
- [5] REVELIOTIS S A, LAWLEY M A, FERREIRA P M. Polynomial-complexity deadlock avoidance policies for sequential resource allocation systems[J]. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 1997, 42(10): 1344 – 1357.
- [6] XING K Y, HU B S, CHEN H X. Deadlock avoidance policy for petri net modeling of flexible manufacturing systems with shared resources[J]. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 1996, 41(2): 289 – 295.
- [7] XING K Y, TIAN F, YANG X J. Optimal deadlock avoidance petri net supervisors for automatic manufacturing systems[J]. *Journal of Control Theory and Applications*, 2007, 5(2): 152 – 158.
- [8] XING K Y, ZHOU M C, LIU H X, et al. Optimal petri-net-based polynomial-complexity deadlock-avoidance policies for automated manufacturing systems[J]. *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics, A*, 2009, 39(1): 188 – 199.
- [9] ABDALLAH I B, ELMARAGHY H A, ELMEEKAWY T. Deadlock-free scheduling in flexible manufacturing systems using petri nets[J]. *International Journal of Production Research*, 2002, 40(12): 2733 – 2756.
- [10] LEE D Y, DICESARE E. Scheduling flexible manufacturing systems using petri nets and heuristic search[J]. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, 1994, 10(2): 123 – 132.
- [11] RAMAWAMY S E, JOSHI S B. Deadlock-free schedules for automated manufacturing workstations[J]. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, 1996, 12(3): 391 – 400.
- [12] XU G, WU Z M. Deadlock-free scheduling strategy for automated production cell[J]. *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics, A*, 2004, 34(1): 113 – 122.

作者简介:

任 磊 (1985—), 女, 硕士研究生, 目前研究方向自动制造系统的建模、控制和优化调度, E-mail: xjtujoy@stu.xjtu.edu.cn;

王 峰 (1972—), 女, 博士研究生, 目前研究方向为优化方法、离散事件系统、系统辨识, E-mail: wangf@mail.xjtu.edu.cn;

邢科义 (1957—), 男, 教授, 博士生导师, 目前研究方向为混合系统建模、控制和优化, E-mail: kyxing@sei.xjtu.edu.cn.