

基于滚动时域优化策略的柔性作业车间动态调度研究^{*}

宋李俊 赵虎

(重庆理工大学机械工程学院,重庆 400054)

摘要: 根据传统柔性作业车间静态调度模型很难适应实际生产过程中动态性和不确定性的特点,通过对动态环境下柔性作业车间调度问题的研究,构建以生产系统最大完工时间最小为优化目标的数学模型。基于滚动时域优化基本框架,设计一种生产设备出现故障情况下周期和事件混合驱动的动态调度策略。同时,采用一种扩展的基于工序和设备双层染色体编码的遗传算法来对动态调度模型进行求解。最后,通过对某一具体生产车间实例进行仿真求解,验证该动态调度策略的可行性和有效性。

关键词: 柔性作业车间; 动态调度; 滚动时域; 双层遗传算法

中图分类号: TP391 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671—3133(2015)02—0030—07

Dynamic flexible job shop scheduling research based on rolling time domain optimization strategy

Song Lijun Zhao Hu

(College of Mechanical Engineering, Chongqing University of Technology, Chongqing 400054, China)

Abstract: The traditional static scheduling model is difficult to adapt to the dynamic process and the characteristic of uncertainty. Investigated study of the flexible job-shop scheduling problem under dynamic environment, a mathematical model with minimizing the value of makespan as optimization goal is established. Based on the basic framework of the rolling time domain optimization, a dynamic scheduling strategy of periodic and event-driven with machine breakdown is designed. Meanwhile, an extended double chromosomes coding genetic algorithm which combines depicting job sequence and machine assignment is put forward to solve the dynamic scheduling model. The approach was implemented to solve a specific numerical example, and the result verifies the feasibility and effectiveness of the proposed strategy.

Key words: flexible job shop; dynamic scheduling; rolling time domain; dual-layer genetic algorithm

0 引言

如今生产环境下,许多制造企业纷纷从传统的备货式生产方式(Make To Stock, MTS)转变为订货式生产方式(Make To Order, MTO)。与此同时,日益激烈的市场竞争也使生产制造车间充满各式各样的不确定因素。车间调度作为车间生产管理的核心内容,是决定企业能否盈利的重要环节。以往的车间调度模型大多是在静态环境下建立的,然而,生产设备出现故障、产品订单的临时变动等不确定因素的产生,都使得传统的静态调度模型不再适用于实际的生产系统。因此,越来越多的专家学者开始关注动态环境下车间调度问题。

动态环境下车间调度问题具有动态性和不确定性的特点,传统的整数规划法很难对其进行求解。近年来,随着人工智能和计算机仿真技术的发展,人工智能和专家系统法、离散事件仿真实验法以及滚动窗口再调度法等^[1]成为研究动态调度的主要方法。人工智能和专家系统法通过收集操作人员经验构成数据库,以实时的车间加工能力为依据进行在线寻优,但其适应新环境的能力差,很难覆盖所有方面;离散事件仿真实验法能够较为理想地描述复杂制造系统,但该方法的通用性不强。Nelson 和 Holloway^[2]在 1977 年最早提出用滚动窗口再调度法来解决动态环境下动态调度问题,将动态调度过程划分成许多连续的区间,通过对每个区间进行优化,使系统达到整体

^{*} 重庆市科委基础与前沿研究项目(CSTC2013jcyjA0564);重庆市教委科学技术研究项目(KJ130812)

的最优。方剑等人^[3]应用滚动窗口再调度法解决了动态环境下作业车间的调度问题,主要研究如何定义工件窗口,以及采用何种的滚动机制,通过仿真得到较好的调度结果。Chen等人^[4]将具有固定时间间隔的周期性策略和基于任意键编码的遗传算法技术相结合,以生产闲余时间和延迟惩罚最小为目标函数,得到一种调度方案,通过一系列的仿真测试验证该方案可行有效。刘国宝等人^[5]通过对生产设备出现故障情况下作业车间调度问题的研究,基于滚动时域优化策略,设计了一种改进的再调度机制,最后使用改进的蚁群算法进行求解,该机制能够很好地应对生产系统中产生的各种扰动。

针对动态环境下柔性作业车间调度问题的特点,本文基于滚动时域优化策略,以系统最大完工时间最小为目标,设计一种在生产设备出现故障情况下的调度优化策略,采用双层编码遗传算法求解该车间的生产调度问题,最后通过对生产车间实例进行仿真,验证该调度策略能够很好地解决柔性作业车间动态调度问题。

1 柔性作业车间动态调度问题描述

柔性作业车间动态调度问题描述如下。某个生产系统有 M 台生产设备,需要加工 N 个工件,每台生产设备在一个调度优化集内需加工 P 道工序,每个工件包含 Q 道工序,并且工件的工序是预先确定的。其中,每道工序可以在若干台生产设备上加工,工序的加工时间因选择不同的生产设备而不同。同时,每台生产设备也可以加工工件的若干工序。调度目标是为调度优化集内的每道工序选择最合适的生产设备,并确定各生产设备上所有工件的加工顺序以及开工时间,使生产系统的最大完工时间最小。此外,在柔性作业车间动态调度问题中,除技术约束外,加工过程中还需满足以下条件^[6]: 1) 工件在加工过程中,除生产设备故障的原因,中途不能中断任何工序; 2) 不考虑工件之间的优先权; 3) 不同工件的工序之间没有先后约束; 4) 同一时间同一台设备只能加工一道工序; 5) 同一工件的工序之间有先后约束,下一道工序只能在上一道工序完成后才能加工。则柔性作业车间动态调度问题的数学模型为:

$$F = \min(\max C_n \quad n = 1, 2, \dots, N) \quad (1)$$

s. t.

$$S_{n_p q}^m \geq 0 \quad m_q = 1, 2, \dots, M \quad n_p = 1, 2, \dots, N \quad (2)$$

$$S_{n_p q}^m - S_{n_{p-1} q}^m - T_{n_{p-1} q}^m \geq 0 \quad m_q = 1, 2, \dots, M \quad n_p, n_{p-1} = 1, 2, \dots, N \quad (3)$$

$$S_{n_p q}^m - S_{n_{p-1} q}^m - T_{n_{p-1} q}^m \geq 0 \quad m_q = 1, 2, \dots, M \quad n_p = 1, 2, \dots, N \quad (4)$$

式中: n_{p-1}, n_p ($p = 1, 2, \dots, P$) 分别为同一生产设备上相邻两道工序的加工工件; m_q, m_{q-1} ($q = 1, 2, \dots, Q$) 为加工相邻两道工序的生产设备; C_n 为工件 n 的完工时间; $S_{n_p q}^m$ 表示工件 n_p 在设备 m_q 的调度优化集内第 p 道工序的开工时间; $S_{n_p q}^m$ 表示工件 n_p 的第 q 道工序在生产设备 m_q 上的开工时间; $T_{n_{p-1} q}^m$ 表示工件 n_{p-1} 的第 q 道工序在生产设备 m_q 上的加工时间。

式(1)表示目标函数为最大完工时间最小; 式(2)表示工件任一道工序开工时间非负; 式(3)表示工件 n_{p-1} 和 n_p 不能同时被一台生产设备加工; 式(4)表示同一工件下一道工序 q 只能在上一道工序($q-1$)完成后才能开始加工。

2 基于混合驱动的滚动时域优化策略

针对柔性作业车间动态调度优化问题,其动态调度策略目前主要有以下三种: 周期型调度策略、事件驱动型调度策略以及周期和事件混合驱动的滚动时域优化策略^[7]。

周期型调度策略是指生产系统每隔一段固定的周期就进行一次再调度,其周期的长短根据生产的实际情况加以确定^[7]。这种策略主要针对加工任务没有扰动的情况,能够较好地保持生产系统的稳定性。周期型调度策略的模型如图1所示。当系统时钟检测到工件加工时间达到生产调度人员根据经验确定的周期或计数器检测到工件的加工数量达到操作人员根据车间生产能力确定的某一指标,则立即进行再调度。

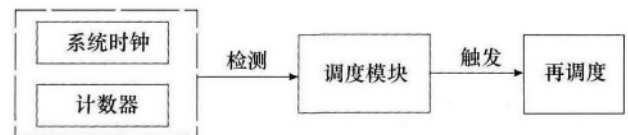


图1 周期型调度策略模型

事件驱动型调度策略是指当一个可以改变生产系统状态的关键事件出现时,立刻触发再调度^[7],主要是针对突发事件所采取的调度策略。例如,当出现系统预定义异常事件(如生产设备出现故障或订单出现紧急变化等不确定因素)时,生产系统就需要根据现场情况,立即进行再调度,以保证生产的稳定有序。事件驱动型调度策略的模型如图2所示。该策略能够及时应对突发事件对生产系统的影响,但过于频繁的

再调度会降低生产系统的稳定性,从而影响系统的生产效率。

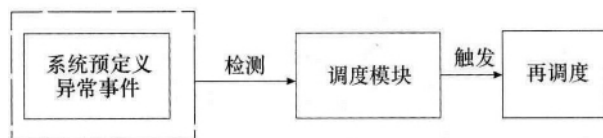


图2 事件驱动型调度策略模型

针对动态环境下柔性作业车间生产调度问题的特点,本文采用基于周期和事件混合驱动的滚动时域优化策略,将设备故障作为突发事件,当突发事件发生时,立即进行再调度,否则采用周期型的调度策略。这样既能较好地应对突发事件的发生,又能保持调度系统的稳定性。

滚动时域优化策略是通过确定多个静态调度时刻,当任一时刻到来时,根据系统当前加工状态以及系统中发生的突发事件等信息立即进行动态再调度的方法^[8]。其中,滚动窗口技术是滚动时域优化策略的主要思想,采用滚动窗口技术进行动态调度优化时,定义完工窗口、调度加工窗口以及等待窗口这三个工件窗口,任务窗口与工件集的关系如图3所示。同时,将滚动窗口中的所有工件分为四个集合:已完成工件集、正在加工工件集、未加工工件集以及待调度工件集^[9]。图3显示了滚动窗口中各工件集的关系。

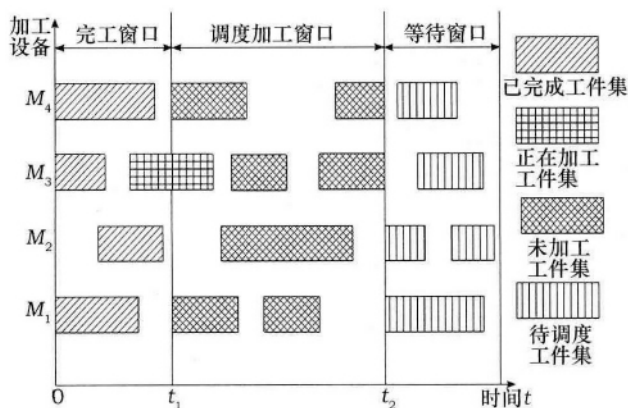


图3 任务窗口与工件集的关系

调度加工窗口包括了正在加工工件集以及未加工工件集。正在加工工件集是已经经过调度并且处于加工过程中的工件集合;未加工工件集是已经经过调度的但还未开始加工的工件集合。

每次滚动调度优化时,从调度加工窗口移去已完成工件集到完工窗口,同时从等待窗口移出一部分待调度工件集至调度加工窗口。工件从等待窗口进入调度加工窗口需根据工件加工的紧迫度值来确定,具

体工件的紧迫度值等于该工件的交货期减去该调度时刻。紧迫度值越小,进入调度加工窗口的优先级就越高,同时每一次调度时,由于系统运行时间、车间生产能力和交货期等的限制,对调度加工窗口中的工件数目有一定的限制,数目的多少可以根据工作人员的经验来确定。滚动窗口中,工件在各个任务窗口的流动示意图如图4所示。

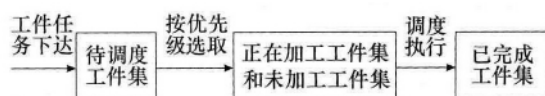


图4 工件在各个任务窗口的流动示意图

运用双层编码遗传算法对调度加工窗口的工件进行优化,直至滚动窗口中所有工件被加工完毕。

3 基于双层编码遗传算法的加工窗口调度优化

3.1 调度问题的编码与解码

对于传统的作业车间调度问题,大多数研究都采用基于工序的编码。但在求解柔性作业车间调度问题时,不仅要针对不同工件工序的加工顺序进行排序,还要为每一道工序选择合适的生产设备,仅采用基于工序编码方式得不到柔性作业车间调度问题的解^[10]。

针对以上问题,本文提出双层染色体编码遗传算法,其示意图如图5所示。染色体(即一种调度问题的解)编码中第一层(即工序码)用来确定不同工件对应工序的加工顺序,第二层(即设备码)用来确定该工序合适的生产设备。

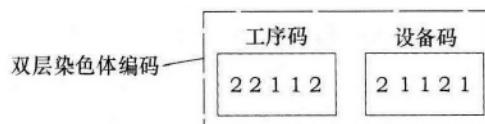


图5 双层染色体编码示意图

其中,工序码中的基因总数等于所有工件的工序数目之和,图5中工序码基因总数为5,每个工件的工序用相应的工件号直接编码,并且某一工件号出现的累计次数等于该工件的工序数目。根据染色体编码中工件号出现的次序进行编译,即对染色体的工序码从左到右进行扫描,对于第 q 次出现的工件号,表示该工件的第 q 道工序。以图5中工序码的基因串[2 2 1 1 2]为例,可知工序的执行顺序为:工件2的第1道工序,工件2的第2道工序,工件1的第1道工序,工件1的第2道工序,工件2的第3道工序。设备码中的基因总数等于所有工件的工序数目之和,如图5中设备

码基因总数为5,设备码中每一个基因代表对应工序中可选生产设备集的顺序号。设所有设备加工的工序的总数为 J ,依次顺序为 $(1, 2, \dots, j, \dots, J)$ 。对于这 J 道工序,存在 J 个可选设备集的集合 $\{M_1, M_2, \dots, M_j, \dots, M_J\}$,其中第 j 个工序的可选生产设备集为 M_j , M_j 中有 U 个元素, U 为某一个可选设备集中所有设备的总数,表示为 $\{m_{j,1}, m_{j,2}, \dots, m_{j,U}\}$ 。基于设备码编码的基因串的长度为 J , $\{m_{1,1}, m_{1,2}, \dots, m_{2,1}, m_{2,2}, \dots, m_{j,1}, \dots, m_{j,U}\}$ 则表示设备码的基因串(即设备码),其中 $m_{j,u}$ ($u=1, 2, \dots, U$)为第 j 道工序所对应的可选设备集 M_j 中某一可选加工设备。根据每道工序的可选设备集,以及生产设备加工顺序的工艺约束,即可确定每个工件各道工序的执行生产设备。以图5中设备码的基因串 $[2, 1, 1, 2, 1]$ 为例,假设工件2的第1道工序有3台设备作为可选设备,则 M_1 中 $U=3$ 。设 $M_1 = \{m_{1,1}, m_{1,2}, m_{1,3}\}$,则工件2的第1道工序有 $m_{1,1}$ 、 $m_{1,2}$ 、 $m_{1,3}$ 这3台设备作为可选设备,根据设备码基因串可选生产设备集的顺序号2,得到工件2的第1道工序的执行生产设备为 $m_{1,2}$ 。

柔性作业车间调度问题的解码是根据染色体的基因串、工艺路线和加工过程所需时间,来共同确定每台生产设备上所有工序的开始加工时间和完成时间。对于任意一个工件 n_p 的第 q 道工序,其开工时间为 $S_{n_p,q}$,加工过程所需时间为 $T_{n_p,q}$,该工序的完工时间为 $(S_{n_p,q} + T_{n_p,q})$ 。 $T_{n_p,p}$ 表示工件 n_p 在其加工设备的调度优化集中第 p 道工序的加工时间,设任意一个工件 n_p 第 q 道工序的工件紧前工序和设备紧前工序分别为 $q-1$ 和 $p-1$ (其中 $q=1$ 时 $S_{n_p,(q-1)}=0$, $S_{n_p,(p-1)}=0$),则工序 q 的开工时间,等于该工件紧前工序和所有可选设备紧前工序中完工时间的最大值。在解码过程中,由于所有生产设备的初始状态均处于空闲,则每个工件的开始加工时间都为零。因此,工件 n_p 第 q 道工序的开工时间 $S_{n_p,q}$ 为:

$$S_{n_p,q} = \max(S_{n_p,(q-1)} + T_{n_p,(q-1)}, S_{n_p,(p-1)} + T_{n_p,(p-1)}) \quad (5)$$

在动态环境下,某些生产设备在再调度时间内不能中断加工,只有相应工序加工完成后才能进行车间再调度。因此,对于那些未加工工件集中的工件,第一道工序的开始加工时间等于再调度时间 t_q 和设备紧前工序完工时间中的最大值。其非第一道工序的开始加工时间仍可根据式(5)计算。在解码过程中,正在加工工件和未加工工件第一道工序的开始加工时间 $S_{n_p,q}$ 为:

$$S_{n_p,q} = \max[\max(t_q, S_{n_p,(q-1)} + T_{n_p,(q-1)}), S_{n_p,(p-1)} +$$

$$T_{n_p,(p-1)}] \quad (6)$$

同时由于上述解码方式在确定每台生产设备上的工序加工顺序时,只能产生半主动调度,这里使用一种插入式贪婪解码算法^[9],保证染色体经过解码后生成主动调度。

3.2 交叉操作

交叉操作首先根据整数交叉法^[11]从种群中随机选出两个染色体的工序码,然后对工序码的基因串随机选择交叉位置进行交叉。操作方法如下:参与交叉的第一层工序码的基因串在交叉位置前后进行交叉,对交叉后工序码的基因串根据原有的工序数进行局部调整。图6所示为工序码交叉操作示意图,父代1、父代2的染色体的工序码中1、2、3各出现3次,表示有3个工件,每个工件有3道工序的柔性作业车间调度问题,该车间各工序的可选设备表如表1所示。但交叉后,子代1、子代2的染色体工序码中出现有的工件号个数增多或有的工件号个数缺少的问题。这时,从子代染色体工序码中随机抽取一个多余的工件号,使之变成工序缺失的工件号,并按交叉前该工件的可选设备集来调整子代染色体设备码上相应位置的基因,得到子代3(即调整后的子代1)。工序码调整步骤示意图如图7所示。



图6 工序码交叉操作示意图

表1 柔性作业车间各工序的可选设备表

工件	各工序的可选设备		
	工序1	工序2	工序3
工件1	3, 5	2, 5	2, 4
工件2	4, 5	1, 3	2
工件3	1, 4	2, 5	1, 5

3.3 变异操作

改进遗传算法变异操作包括工序码变异和设备码变异两部分,设计方法如下^[11]:首先利用变异算子随机地从种群中选取某一个变异个体,然后在该变异个体的工序码上任意选择两个变异位置,将这两个位

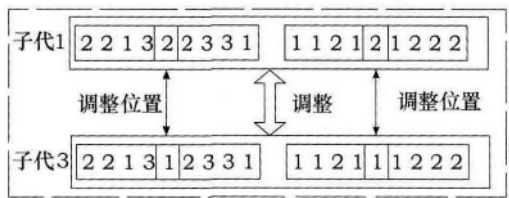


图 7 工序码调整步骤示意图

置上的工序码和设备码进行互换。具体的工序码变异操作示意图如图 8 所示,个体 1 的变异位置为位置 2 和位置 4,经过变异后得到个体 2。

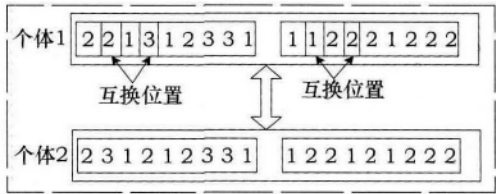


图 8 工序码的变异操作示意图

设备码变异是在第二层设备码的基因串中任意选择一个变异位置,将原设备码替换为该位置对应的可选生产设备序号集中任意一个序号,具体的设备码变异操作示意图如图 9 所示,个体 2 的变异位置为位置 3,经过调整后,得到个体 3。

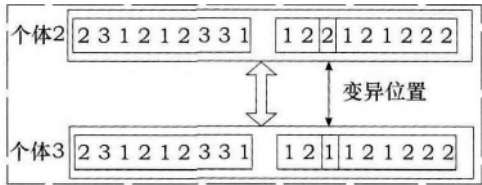


图 9 设备码的变异操作示意图

3.4 选择操作

本文采用轮盘赌算法^[12]根据概率来选择适应度较强的染色体。任意一个染色体 r (即一种调度问题的解) 被选中的概率 $g(r)$ 由适应度函数 $f(r)$ 确定。表达式如下:

$$G(r) = 1/f(r) \tag{7}$$

$$g(r) = G(r) / \sum_{r=1}^R G(r) \tag{8}$$

式中: R 为种群个体数目 (即所有调度问题解的总数); $G(r)$ 为染色体 r 的适应度值; $g(r)$ 为染色体 r 在每次选择操作中被选中的概率。

4 算例仿真与分析

本文基于双层编码遗传算法,对某一生产车间实例进行仿真分析。该调度加工窗口中有 6 个工件和

10 台可选生产设备,各工序可选设备如表 2 所示。其中,每个工件都有 6 道工序,其工序的加工时间各不相同,各工序加工时间如表 3 所示。

表 2 各工序可选设备表

工件	各工序的可选设备					
	工序 1	工序 2	工序 3	工序 4	工序 5	工序 6
工件 1	5	6	4	2, 9	3, 7	5
工件 2	4	2, 9	8	6, 7	5	1, 10
工件 3	3	6, 8	7	1, 2	4, 10	5
工件 4	5	2	4, 7	10	2, 5	3, 6
工件 5	4, 5	5	9, 10	6	2	3, 8
工件 6	2, 6	4	6, 9	7	8	3, 9

表 3 各工序加工时间表

工件	各工序的加工时间/min					
	工序 1	工序 2	工序 3	工序 4	工序 5	工序 6
工件 1	3	10	9	5, 4	3, 3	10
工件 2	6	8, 6	4	2, 6	3	3, 3
工件 3	4	5, 7	7	5, 5	9, 11	1
工件 4	7	3	4, 6	3	1, 7	3, 6
工件 5	6, 4	10	7, 9	8	5	4, 7
工件 6	3, 7	10	8, 7	9	4	9, 4

采用 MATLAB 软件实现上述遗传算法过程,根据本问题的规模和计算复杂度,对遗传算法的运行参数设置如下:种群规模为 100,最大迭代次数为 50,交叉概率为 0.8,变异概率为 0.6,代沟为 0.9。假设工件和生产设备的初始状态为 0 (即工件的开工时间和生产设备的开工时间为 0),对调度加工窗口中的工件进行调度。根据在 MATLAB 软件中生成的甘特图,得到最大完工时间为 48min 的初始调度方案甘特图,如图 10 所示。

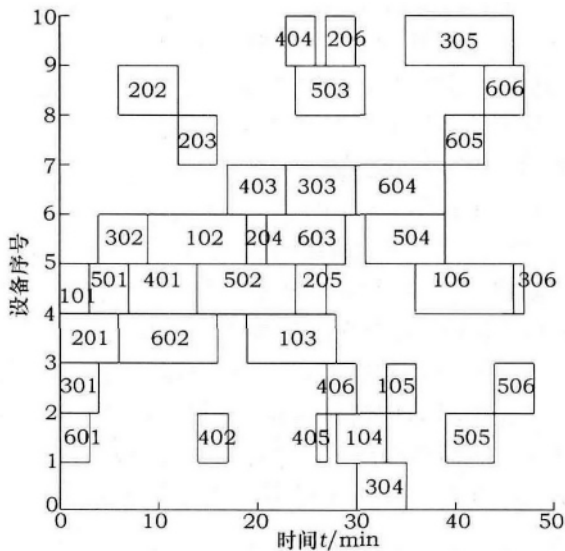


图 10 初始调度方案甘特图

在初始调度方案的甘特图中,用三位数表示工件的加工顺序。比如403,表示工件4的第3道工序。

假设在第14min时(401加工完毕后),编号为9的设备突然出现故障,以致后续的生产过程无法继续,则启动再调度方案。根据本文前述的柔性作业车间动态调度问题的假设条件,生产系统发生扰动后,调度加工窗口中正在加工的工件,除所在生产设备出现故障以外,不能中断该操作,直至该工序加工结束。而剩余的工件工序则需要新的初始条件下,进行再调度。该实例中,9号设备出现故障后,为确保工件加工的连续性,需要工件1的第2道工序、工件2的第3道工序以及工件6的第2道工序加工完成后,根据新的初始条件,进行再调度。

同时再调度方案中,将未完成工序涉及9号生产设备的加工时间都改为无穷大,则发生故障后的工序可选设备表和工序加工时间表,如表4和表5所示。

表4 9号设备发生故障后的各工序可选设备表

工件	各工序的可选设备					
	工序1	工序2	工序3	工序4	工序5	工序6
工件1	*	*	4	2,9	3,7	5
工件2	*	*	*	6,7	5	1,10
工件3	*	*	7	2,1	4,10	5
工件4	*	2	4,7	10	2,5	3,6
工件5	*	5	9,10	6	2	3,8
工件6	*	*	6,9	7	8	3,9

表5 9号设备发生故障后的各工序加工时间表

工件	各工序的加工时间/min					
	工序1	工序2	工序3	工序4	工序5	工序6
工件1	*	*	9	5,Inf	3,3	10
工件2	*	*	*	2,6	3	3,3
工件3	*	*	7	5,5	9,11	1
工件4	*	3	4,6	3	1,7	3,6
工件5	*	10	Inf,9	8	5	4,7
工件6	*	*	3,Inf	9	4	9,Inf

表4、表5中,“*”表示动态调度中,不需要考虑工件的工序加工时间及可选设备集。“Inf”表示工件的工序加工时间为无穷大。

根据滚动时域优化策略,当生产系统发生扰动时,采用事件驱动型调度策略。利用MATLAB软件计算后续工件工序的排序,得到最大完工时间为55min的再调度方案甘特图,9号设备出故障后的动态调度方案甘特图如图11所示。

从仿真结果可以看出,基于滚动时域优化策略,通过使用双层编码遗传算法在线优化滚动窗口中的工件,解决了生产设备故障情况下的柔性作业车间

调度问题,使突发事件能够及时得到处理。同时,该方法也可以扩展到其他不确定因素的动态调度问题。

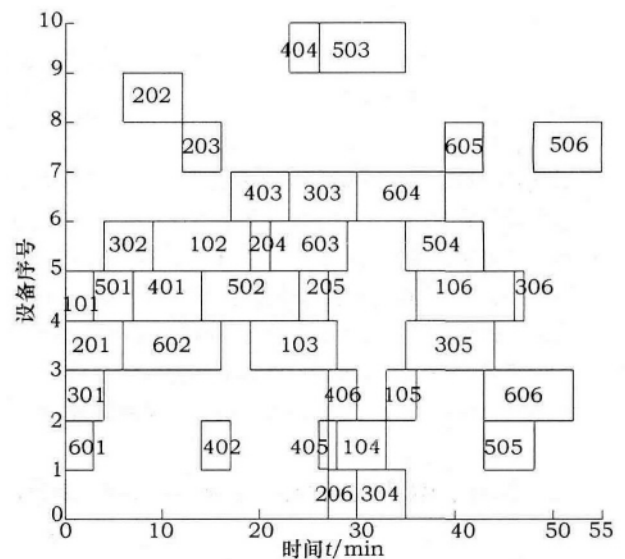


图11 9号设备出故障后的动态调度方案甘特图

5 结语

车间调度问题是先进生产管理的核心内容,本文针对柔性作业车间动态调度问题,提出了详细的基于周期和事件混合驱动的滚动时域优化策略,并采用双层编码遗传算法对柔性作业车间动态调度的数学模型进行求解。最后通过某一具体生产车间实例验证本文所研究的模型、算法以及动态调度策略是可行的、有效的。

参考文献:

- [1] 潘全科,朱剑英. 作业车间动态调度研究[J]. 南京航空航天大学学报, 2005, 37(2): 262-268.
- [2] Nelson R T, Holloway C A, Wong R M. Centralized scheduling and priority implementation heuristics for a dynamic job shop model with due dates and variable processing time[J]. AIIE Transactions, 1977(19): 96-102.
- [3] 方剑,席裕庚. 周期性和事件驱动的Job Shop滚动调度策略[J]. 控制与决策, 1997, 12(2): 159-166.
- [4] Chen K J, Ji P. A genetic algorithm for dynamic advanced planning and scheduling (DAPS) with afrozen interval[J]. Expert Systems with Applications, 2006, 33(4): 1004-1010.
- [5] 刘国宝,张洁. 基于改进滚动时域优化策略的动态调度方法[J]. 机械工程学报, 2013, 49(14): 182-190.

(下转第42页)

参考文献:

- [1] 赵俊伟. 串并联机床精度理论及检测装置研究[D]. 武汉: 华中科技大学 2001.
- [2] 刘辛军, 吴超, 汪劲松, 等. [PP]S 类并联机器人机构姿态描述方法[J]. 机械工程学报, 2008, 44(10): 19 – 23.
- [3] Tsai Meng-Shiun, Yuan Wei-Hsiang. Dynamic modeling and decentralized control of a 3 PRS parallel mechanism based on constrained robotic analysis[J]. Journal of Intelligent and Robotic Systems: Theory and Applications 2011, 63(3 – 4): 525 – 545.
- [4] Tsai Meng-Shiun, Yuan Wei-Hsiang. Inverse dynamics analysis for a 3-PRS parallel mechanism based on a special decomposition of the reaction forces[J]. Mechanism and Machine Theory 2010, 45(11): 1491 – 1508.
- [5] Abbasnejad Ghasem, Zarkandi Soheil, Jmani Misagh. Forward kinematics analysis of a 3-PRS parallel manipulator[J]. World Academy of Science, Engineering and Technology, 2010, 37(Jan.): 329 – 335.
- [6] Wang Hai, Fan Kuang-Chao. Identification of strut and assembly errors of a 3-PRS serial-parallel machine tool[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture 2004, 44(11): 1171 – 1178.
- [7] Fan Kuang-Chao, Wang Hai, Zhao Jun-Wei, et al. Sensitivity analysis of the 3-PRS parallel kinematic spindle platform of a serial-parallel machine tool[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture 2003, 43(15): 1561 – 1569.
- [8] Tsai Meng-Shiun, Shiau Ting-Nung, Tsai Yi-Jeng, et al. Direct kinematic analysis of a 3-PRS parallel mechanism[J]. Mechanism and Machine Theory, 2003, 38 (1): 71 – 83.
- [9] 黄俊杰, 陈素燕, 赵俊伟. 3-PRS 并联机器人位置正解分析研究[J]. 现代制造工程 2008 (10): 87 – 90.
- [10] 赵俊伟, 房勋, 黄俊杰. 基于 Matlab 和数据库的 3-PRS 串并联机构位置正解[J]. 现代制造工程, 2007 (11): 106 – 109.
- [11] 黄俊杰, 赵俊伟. 3-PRS 并联机构位置正解分析[J]. 河南理工大学学报: 自然科学版 2013, 31(4): 434 – 437.
- 作者简介: 陈国强, 通讯作者, 博士, 副教授, 硕士研究生导师, 主要从事机器人技术、测控技术方面的教学与科研工作, 已发表论文五十余篇, 被 SCI/EI 收录 27 篇。
康件丽, 硕士, 讲师, 主要从事计算机应用技术、计算机辅助设计方面的教学和科研工作。
赵俊伟, 博士, 教授, 博士研究生导师, 主要从事机器人技术、CAD/CAPP 方面的教学与科研工作。
- E-mail: jz97cgg@sina.com
收稿日期: 2013-08-01

(上接第 35 页)

- [6] 张国辉, 高亮, 李培根, 等. 改进遗传算法求解柔性作业车间调度问题[J]. 机械工程学报, 2007, 43(7): 145 – 151.
- [7] Fang J, Xi Y. A rolling horizon job shop rescheduling strategy in the dynamic environment[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 1997, 13(3): 227 – 232.
- [8] 张洁, 陆轶. 基于事件及变周期驱动的作业车间动态调度[J]. 控制工程 2007, 14(3): 209 – 213.
- [9] 张超勇, 李新宇, 王晓娟, 等. 基于滚动窗口的多目标动态调度优化研究[J]. 中国机械工程 2009, 20(18): 2190 – 2197.
- [10] 张超勇, 饶运清, 李培根, 等. 柔性作业车间调度问题的两级遗传算法[J]. 机械工程学报 2007, 43(4): 119 – 124.
- [11] 蒋丽雯. 基于遗传算法的车间作业调度问题研究[D]. 上海: 上海交通大学 2006.
- [12] 金志勇. 基于遗传算法的车间调度系统研究[D]. 武汉: 武汉理工大学 2006.
- 作者简介: 宋李俊, 副教授, 博士, 主要从事制造业信息化、工业工程等方面的研究。
赵虎, 硕士研究生, 主要从事生产调度智能化的研究。
- E-mail: zhaohuf-2008@163.com
收稿日期: 2014-04-28