

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2023.01.016

基于并行协同的多车间协同调度问题研究^{*}

冯润晖,董绍华

(北京科技大学 机械工程学院,北京 100083)

摘要:传统企业实际生产中,其多个关联车间之间的生产计划与调度存在难以协作的问题。为此,针对多车间协同调度问题建立了调度模型,提出了一种多车间协同调度的并行协同进化遗传算法(PCE-GA),并且采用该算法对上述模型进行了求解。首先,以最小化订单完工时间为目标,建立了单目标调度模型;然后,采用了并行协同进化遗传算法,对上述单目标调度模型进行了求解,基于工件、机器、装配关系的三层整数编码的染色体编码方案,提出了一种协同适应度值计算的方法;最后,以某液压缸生产企业为例,针对单目标调度问题,采用该算法与单车间遗传算法(JSP-GA)、并行协同模拟退火算法(PCE-SA)分别进行了求解,并对其结果进行了比较,以验证 PCE-GA 算法的优越性。研究表明:采用 PCE-GA 算法得到的优化率为 13.3%,比单车间作业调度遗传算法求解的数据优化 11.5%,该结果证明了 PCE-GA 算法在解决多车间协同优化问题时的优越性。

关键词:柔性制造系统及柔性制造单元;机械工厂(车间);生产调度模型;多车间协同调度的并行协同进化遗传算法;单车间遗传算法;并行协同模拟退火算法

中图分类号:TH165

文献标识码:A

文章编号:1001-4551(2023)01-0122-07

Multi-shop collaborative scheduling problem based on parallel collaboration

FENG Run-hui, DONG Shao-hua

(School of Mechanical Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China)

Abstract: In the actual production of traditional enterprises, there was a problem that it was difficult to coordinate the production planning and scheduling among its multiple associated workshops. Therefore, a scheduling model was established for the multi-shop collaborative scheduling problem, and a parallel co-evolutionary genetic algorithm (PCE-GA) for multi-shop collaborative scheduling was proposed, and the algorithm was used to solve the above model. Firstly, a single objective scheduling model was established to minimize the maximum order completion time, the parallel cooperative evolutionary genetic algorithm was applied to solve this optimal problem. Then, a chromosome coding scheme of three-layer integer coding based on workpiece, machine and assembly relationship was adopted in the algorithm. Using the mechanism of collaborative evolution, a method for calculating the value of cooperative fitness value was proposed. Finally, a hydraulic cylinder manufacturing enterprise was regarded as a study case. For the single-objective scheduling problem, the parallel cooperative evolutionary genetic algorithm was compared with the single-shop genetic algorithm and the parallel cooperative simulated annealing algorithm. The research results indicate that the optimization rate of the proposed parallel cooperative evolutionary genetic algorithm is 13.3%, which is 11.5% better than that of the single-shop genetic algorithm. The algorithm verifies the feasibility of the proposed model and the effectiveness of the proposed method. It is also concluded that the parallel cooperative evolutionary genetic algorithm performs better in solving the multiple shop collaborative optimization problem.

Key words: flexible manufacturing systems and flexible manufacturing cells; machine shop (workshop); production scheduling model; parallel cooperative evolutionary genetic algorithm (PCE-GA); genetic algorithm for job-shop scheduling problem (JSP-GA); parallel cooperative evolutionary simulated annealing algorithm(PCE-SA)

0 引言

在通常情况下,制造企业的生产过程可以分成加

工和装配两个阶段,再由多个加工车间和装配车间组成一个多车间混合生产系统^[1]。

在以往的研究中,将加工和装配两个阶段独立考

收稿日期:2022-05-18

基金项目:国家自然科学基金资助项目(71301008)

作者简介:冯润晖(1998-),女,内蒙古赤峰人,硕士研究生,主要从事生产调度、智能算法等方面的研究。E-mail:frh9801@163.com

虑,分别考虑每个车间的生产计划和调度。首先加工车间加工零部件,然后将半成品进行仓储,待所有配套零部件就绪后,再进行产成品的装配^[2]。由于生产计划与调度的研究对象是单车间环境,只在车间内部实现了制造资源合理配置,无法兼顾制造系统整体效益,导致了产品生产周期增长和零部件库存费用增加等一系列问题,致使其生产效率较低。因此,对多个有联动的车间进行统一集成优化调度研究十分必要且意义重大,这是生产系统优化的关键问题。

在协同制造环境下,2个或2个以上具有独立生产能力的车间,组成了一个相互配合、目标一致的生产共同体,对其合理安排生产,在满足工艺约束的前提下,协同一致地达到目标函数最优化的过程,称为协同调度^[3]。

现阶段,国内外学者们对协同调度问题的关注度较高。BHATNAGAR R等人^[4]总结了协同调度问题的相关文献,为集成的多车间协同调度生产计划建立了数学模型,以最合适整个组织的方式,确定了所有工厂的生产决策。BEHNAMIAN J等人^[5]将多车间协同调度的文献,根据车间环境进行了整理分类,并对综述文献进行了对比,以确定有效的调度可以提高生产率。NADERI B等人^[6]研究了最小化完工时间的分布式流水车间调度问题,设计了分散搜索算法,并对其进行了求解,结果表明,该算法比现有算法具有更好的效果。XU Ye等人^[7]研究了分布式置换流水车间的调度问题,设计了混合免疫算法,并对其进行了求解,证明了该算法的有效性。NA H等人^[8]研究了加工与装配制造车间投产排序问题,并以总延迟时间最小为目标构建了模型,以便在设定的日期之前完成零件。秦金涛^[9]采用了多代理和规则引擎技术,在制造执行系统中构建了调度协同平台,实现了不同车间生产制造信息共享的目标,提高了制造企业各车间协同生产的效率。董义军^[10]建立了面向客户可承诺(available to promise, ATP)的多工厂生产计划调度数学混合规划模型,设计了基于遗传算法的多工厂协同生产计划模型的求解算法。孙亚南等人^[11]借鉴了面向对象的设计思想,以及基于模糊数学的最大隶属度原则,提出了面向产能瓶颈单元的协同调度问题方法,解决了如何在有限资源的情况下,实现复杂制造系统最优化调度的问题。于晓义等人^[12]为求解多协作车间的计划调度问题,提出了并行协同进化遗传算法,以满足多协作车间并行协同调度的要求。梁迪等人^[13]提出了一种协同奔袭策略的狼群优化算法,将改进后的狼群优化算法应用在双车间协同调度问题上,并对此进行了验证,

证明了该算法具有明显的优势。王艳等人^[14]建立了以制造总成本与提前/延期为优化目标的分布式多工厂调度模型,提出了一种融合决策树的高斯粒子群嵌套寻优算法框架,验证了该算法在寻优性、收敛性和CPU时间方面的优越性。李修琳等人^[15]运用了集成模拟退火算法的混合遗传算法,求解了具有多品种混流生产特征和作业车间,及流水车间集成的混流混合车间协同调度问题。廖不凡等人^[16]提出了一种混合教学优化算法,以完工时间为目标,解决了多车间协作综合调度问题,提高了各车间设备资源的利用率,并缩短了产品加工的总时间。

综上所述,已有的对多车间协同调度的研究文献中,场景大多限定在流水车间,以混合流水车间为原型进行研究的甚少。

混合流水车间一般定义为:流水线上有 N 个工件依次经过 M 个阶段的加工,其中每个阶段至少存在一台机器,并且至少有一个阶段存在多台机器可以进行加工。对同一工件的某个阶段,工件可以选取任意一台并行机来完成相应工序,不同并行机处理时间可能存在差异。混合流水车间调度问题(hybrid flow shop scheduling problem, HFSP)是一般流水车间调度问题的扩展,不仅涉及到工件的排序,也涉及到并行机的分配,且该问题已经被证明是典型的NP难组合优化问题(non-deterministic polynomial problems, NP)。

因此,笔者对多混合流水车间的协同调度问题进行研究,以完成所有订单加工和装配的总时间为优化目标,运用协同进化思想,采用并行协同进化遗传算法对其进行求解,并以某液压缸生产企业作为实验对象,验证所建模型和采用算法的实用性与有效性。

1 多车间协同调度问题建模

1.1 模型描述及假设

笔者研究的问题是以零件加工车间及产品装配车间组成的两阶段生产系统为基础,根据生产数据,建立模型。

s 个相互协作的加工车间以及一个装配车间共同完成 n 种订单产品的生产装配任务:

加工车间集 $S = \{1 \cdots j \cdots s\}$;每个车间的生产阶段集 $P = \{1 \cdots k \cdots p\}$;订单产品集 $O = \{O_1 \cdots O_i \cdots O_n\}$,每个产品由 w 个工件装配而成,每种产品 O_i 的数量 x_i ;每种产品包含的工件 $W = \{1 \cdots a \cdots w\}$;因此 $O_{iajk,x}$ 代表第 x 个产品 O_i 的工件 a 在车间 j 加工工序 k 。

各车间加工的工件各不相同,车间 j 有 M_j 台设备

完成工件加工任务,不同加工阶段之间运送设备 V_j 完成工件运送任务:

加工设备集为 $M_j = \{1 \cdots m \cdots M_{jall}\}$; 运送设备集为 $V_j = \{1 \cdots v \cdots V_{jall}\}$, M_{jk} 为车间 j 阶段 k 的可选加工机器集。

为方便确定装配关系,设置加工和搬运批量均为 1,不同批次工件的工序之间没有先后约束。必须在其子项工件加工完成后,装配任务才可以开始进行,每道工序必须在其之前所有工序加工完成后才可开始,每台加工设备同一时间只可同时加工一个工件。各工件的工序间是相互独立的生产任务单元。

1.2 模型建立

相关参数设计如表 1 所示。

表 1 模型参数

参数	含义
P_{iajkm}	产品 O_i 中工件 a 在车间 j 的阶段 k 的机器 m 上的加工时间
$S_{iajkm,x}$	工序 $O_{iaj,k,x}$ 在机器 m 上的开始加工时间
$F_{iajkm,x}$	工序 $O_{iaj,k,x}$ 在机器 m 上的完工时间
MT_{m_1,m_2}	机器 m_1 与 m_2 间的运输时间, $m_1 \in M_j, m_2 \in M_{(j+1)}$
$ST_{iajk(k+1),x,v}$	运送设备 v 将工件 $O_{iaj,x}$ 从阶段 k 运到阶段 $(k+1)$ 的开始运输时间
$FT_{iajk(k+1),x,v}$	运送设备 v 将工件 $O_{iaj,x}$ 从阶段 k 运到阶段 $(k+1)$ 的运输完成时间
A_{ikm}	产品 O_i 在阶段 k 的机器 m 上的装配时间
$SA_{ikm,x}$	产品 $O_{i,x}$ 在阶段 k 的机器 m 上的开始装配时间
$FA_{ikm,x}$	产品 $O_{i,x}$ 在阶段 k 的机器 m 上的结束装配时间
$X_{iajkm,x}$	0—1 决策变量,若为 1,则工件 $O_{iaj,x}$ 在阶段 k 的机器 m 上加工
$T_{iajk(k+1),x,v}$	0—1 决策变量,若为 1,则工件 $O_{iaj,x}$ 由运输工具 v 从阶段 k 运到阶段 $(k+1)$
$Y_{iaj,x}$	0—1 决策变量,若为 1,则工件 $O_{iaj,x}$ 在车间 j 进行加工

笔者研究的问题以最小化订单完工时间为目标的单目标优化问题,因此,其目标函数如下:

$$\min f = \max \{ FA_{ikm,x} \} \quad (1)$$

式中: f —目标函数。

式(1)中,目标为最小化订单完工时间,订单完工时间即为装配结束时间。

约束函数如下:

(1)加工车间约束

任一工件只能在一个车间内进行加工,工序之间不可跨车间加工;

$$\sum_{j=1}^s Y_{iaj,x} = 1 \quad \forall i, a, x \in x_i \quad (2)$$

(2)工件加工时间约束

各工件在各工序的完工时间,为该工序开始加工时间与该工序被加工时间之和;

$$\begin{aligned} F_{iajkm,x} &= S_{iajkm,x} + P_{iajkm,x} \\ &\text{when } X_{iajkm,x} = 1 \\ &\forall i, j, a, k, x \in x_i, m \in M_{jk} \end{aligned} \quad (3)$$

各工序的开始加工时间,为其运输到该阶段的运输完成时间与该阶段加工机器所加工的前一工件的完工时间的较大值;

$$\begin{aligned} S_{iaj(k+1)m,x} &= \max \{ F_{iaj(k+1)m,x_1}, FT_{iajk(k+1),x,v} \} \\ &\text{when } X_{iaj(k+1)m,x}, X_{iaj(k+1)m,x_1}, T_{iajk(k+1),x,v} = 1 \\ &\forall i, i_1, j, a, k, x \in x_i, x_1 \in x_{i_1}, m \in M_{j(k+1)}, v \in V \end{aligned} \quad (4)$$

(3)工序加工顺序约束

任一工件若想进入下阶段进行加工,必须完成上阶段的全部加工任务;

$$\begin{aligned} FT_{iajk(k+1),x,v} + P_{iaj(k+1)m,x} &\leq F_{iaj(k+1)m,x} \\ &\text{when } X_{iaj(k+1)m,x}, T_{iajk(k+1),x,v} = 1 \\ &\forall i, j, a, k, x \in x_i, m \in M_{j(k+1)}, v \in V \end{aligned} \quad (5)$$

(4)搬运设备运送时间约束

开始搬运时间为上一个工件的结束搬运时间与两机器间的运输时间之和;

$$\begin{aligned} ST_{iajk(k+1),x,v} &= FT_{iaj_2k(k+1),x_2,v} + MT_{m_1,m_2} \\ &\text{when } X_{iajkm_2,x}, X_{iaj(k+1)m_1,x}, X_{iaj_2(k+1)m_1,x_2} = 1, \\ &T_{iajk(k+1),x,v}, T_{iaj_2k(k+1),x_2,v} = 1 \\ &\forall i, i_2, j, a, k, x \in x_i, x_2 \in x_{i_2} \\ &m_1 \in M_{j(k+1)}, m_2 \in M_{jk}, v \in V \end{aligned} \quad (6)$$

搬运结束时间为工件的开始搬运时间与两机器间的运输时间之和;

$$\begin{aligned} FT_{iajk(k+1),x,v} &= ST_{iaj_2k(k+1),x_2,v} + MT_{m_1,m_2} \\ &\text{when } X_{iajkm_2,x}, X_{iaj(k+1)m_1,x}, T_{iajk(k+1),x,v} = 1 \\ &\forall i, j, a, k, x \in x_i, m_1 \in M_{j(k+1)}, m_2 \in M_{jk}, v \in V \end{aligned} \quad (7)$$

(5)机器加工能力约束

在同一时刻,一个工件只能由一台加工机器进行加工;

$$\begin{aligned} \sum_{i=1}^n \sum_{x=1}^{x_i} X_{iajkm,x} &= 1 \\ t \in [S_{iajkm,x}, F_{iajkm,x}], m \in M_{jk}, \forall k, j, a \end{aligned} \quad (8)$$

同一时刻,一台机器只能加工一个工件;

$$\sum_{m \in M_j} X_{iajkm,x} = 1$$

$$t \in [S_{iajkm,x}, F_{iajkm,x}], x \in \{1, 2, \dots, x_i\}, \forall i, k, j, a \quad (9)$$

(6) 运输能力约束

同批工件同一时刻只能由一台运输工具进行运输;

$$\sum_{i=1}^n \sum_{x=1}^{x_i} T_{iajk(k+1),x,v} = 1$$

$$t \in [ST_{iajkm,x,v}, FT_{iajkm,x,v}], \forall i, k, j, a, v, x \in x_i \quad (10)$$

同一台运输工具同一时刻只能运输同一批工件;

$$\sum_{v=1}^{V_{jall}} T_{iajk(k+1),x,v} = 1$$

$$t \in [ST_{iajkm,x,v}, FT_{iajkm,x,v}], \forall i, k, j, a, x \in x_i \quad (11)$$

(7) 加工时间约束

所有阶段的加工时间为正数:

$$P_{iajkm,x} \geq 0, x \in \{1, 2, \dots, x_i\}, m \in M_{jk}, \forall i, k, j, a \quad (12)$$

所有工序在 0 时刻均可被加工,即:

$$S_{iajkm,x} \geq 0, x \in \{1, 2, \dots, x_i\}, m \in M_{jk}, \forall i, k, j, a \quad (13)$$

2 多车间协同调度问题求解

2.1 算法流程

针对上述调度模型,笔者提出了一种多车间协同调度的并行协同进化遗传算法(PCE-GA),并采用该算法对上述模型进行求解。

其算法流程如图 1 所示。

图 1 中的算法流程表明,种群与种群之间存在协作关系,所有种群合并形成一个完整解,种群内有竞争,种群间有协作,各个种群的进化过程并不是相互独立的,而是协同进化,更加符合自然界进化的规律。

2.2 并行协同进化遗传算法

2.2.1 染色体编码

为了同时描述工件的加工顺序、加工机器和装配关系 3 种信息,个体的染色体编码采用三层整数编码方式,每一个三层编码对应一个调度方案,种群初始化采用按工序随机生成原则,终止准则为预先设定的最大迭代次数。

编码第一层为基于工件的编码,工件号出现的次数代表该工件的工序数;第二层为基于机器的编码,代表该工序选择的加工机器的编号;第三层为基于装配的匹配关系的编码,不同种群中装配码相同代表具有装配关系。

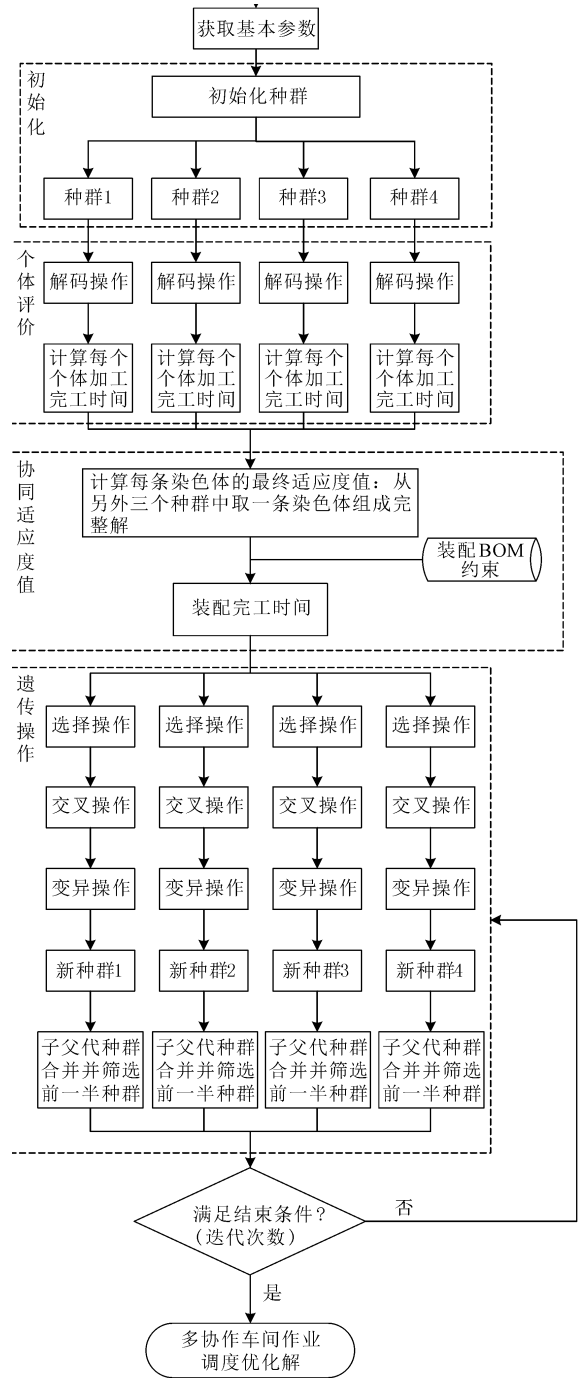


图 1 并行协同进化遗传算法流程图

染色体的编码方式如图 2 所示。

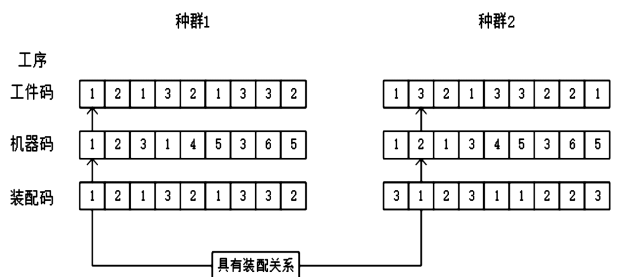


图 2 编码方式

由图 2 可知:种群 1 中某条染色体编码为[1,2,1,3,2,1,3,3,2,1,2,3,1,4,5,3,6,5,1,2,1,3,2,1,3,3,2];其中,前三分之一[1,2,1,3,2,1,3,3,2]为工件码,代表工序 $\{O_{11}, O_{21}, O_{12}, O_{31}, O_{22}, O_{13}, O_{32}, O_{33}, O_{23}\}$;其中, O_{ij} 代表第 i 个工件的第 j 道工序,机器码为中间三分之一部分[1,2,3,1,4,5,3,6,5],代表工件某工序选择的机器号,即工序 O_{11} 选择机器 1,工序 O_{21} 选择机器 2,装配码为最后三分之一部分,如图 2 箭头所示,种群 1 的工件 1 与种群 2 的工件 3 具有相同装配码,因此,具有装配关系,同理种群 1 的工件 2 和种群 2 的工件 2、种群 1 的工件 3 和种群 2 的工件 1 具有装配关系。

2.2.2 协同适应度值计算

采用 PCE-GA 算法计算个体适应度值时,需要计算两次适应度值。

协同适应度值计算流程如图 3 所示。

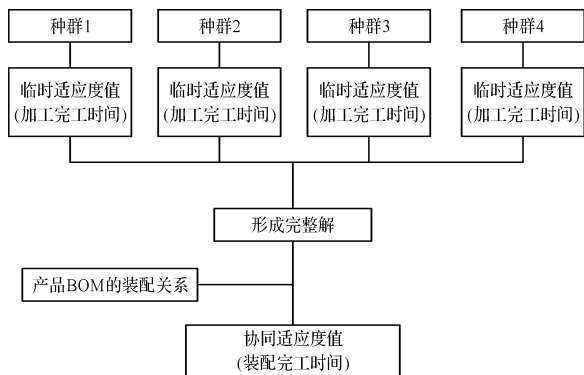


图 3 协同适应度值计算流程

首先,笔者分别单独计算每个种群中每条染色体的适应度值,即每条染色体对应的调度方案的加工完工时间,作为该个体的临时适应度值;然后计算协同适应度值,方法为对于任一种群中的每一条染色体,与其他每个种群中的一条染色体合并作为一个完整解,根据物料清单 (bill of material, BOM) 表中的零件装配关系,计算该完整解的装配完工时间,作为该条染色体的协同适应度值。

2.2.3 选择交叉变异操作

为了将最优个体保留,笔者采用精英保留策略,将每一代中最好的个体保留至下一代,不进行交叉变异操作。选择操作采用锦标赛选择策略,每次从种群中取 2 个个体(放回抽样),选择其中完工时间较小的个体进入子代种群。重复该操作直到种群规模和原来的种群规模一样。

交叉操作采用工件层的单点交叉法,父代在工件码中随机选择交叉点,在交叉点前的基因互换,之后比较父子代染色体,将子代中多余的工件号替换成缺失

的工件号,以此保证子代染色体为可行的调度方案,保证子代每道工序所分配的机器与父代一致,最后装配码则根据交叉完的工件码重新生成。

个体交叉示意图如图 4 所示。

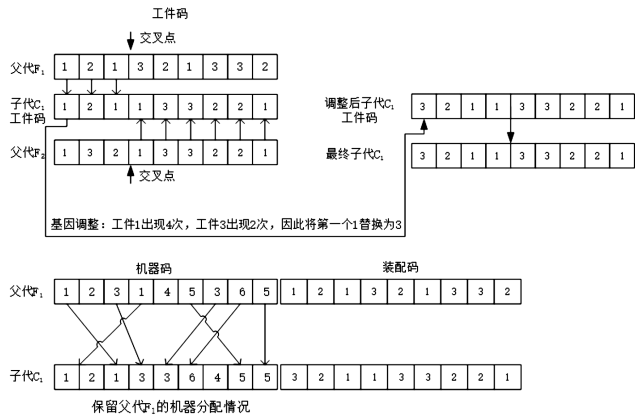


图 4 个体交叉示意图

图 4 中,父代交叉点为第 4 个基因,交叉完成后子代保留父代的机器基因。

变异操作主要针对机器码,随机选取多个变异点,将机器变为该工序机器可选集中的其他机器。

3 实验及结果分析

为了验证 PCE-GA 算法的优越性,笔者以某液压缸制造企业为实验对象,对多车间协同调度算法进行研究。液压缸的加工零部件包含外罩、外缸、缸筒和末级。

各个车间之间的协作关系如图 5 所示。

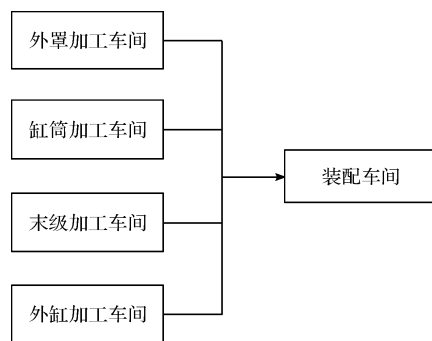


图 5 液压缸生产车间协作关系

图 5 中,液压缸的各个零部件在不同的车间分别进行加工,加工完成后的各个零部件和外购的零件集中在一起进行装配,得到液压缸产品。该企业的每个生产车间可被抽象为混合流水车间。

外缸加工车间的设备如表 2 所示。

不同车间的加工机器不同,根据表 2 可知:该车间共有 26 台加工设备,8 个加工阶段,每个阶段都包含并行机。

表 2 外缸加工车间设备表

机器号	机器名称	加工阶段	加工批量
1~8	外缸下料车间 Z 锯床	1	1
9~12	一车间片面倒角班普车/数控-片面倒角	2	1
13~16	一车间深孔镗班深孔镗/刮滚机	3	1
17~18	一车间外缸班电焊、普车-尾座	4	1
19~20	一车间外缸班普车-中心架	5	1
21~22	一车间外缸班数控-专机-车外缸导向	6	1
23~24	二车间外缸外罩电焊班电焊、钻床	7	1
25~26	二车间压光装配班抛丸机、清洗池	8	6

现对 4 个订单 19 件产品进行排产,产品信息及装配关系如图 6 所示。

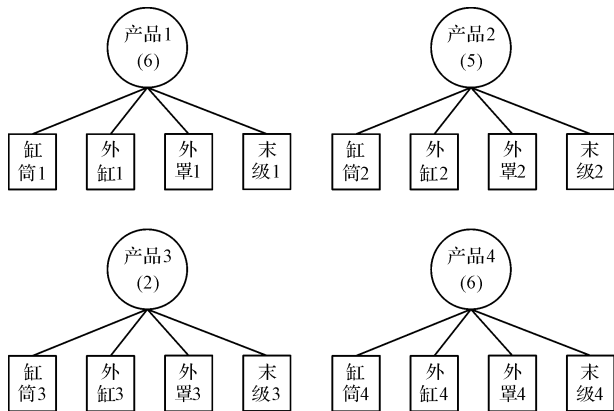


图 6 产品信息及装配关系

圆圈代表装配件,方框代表加工零部件,括号内是订单数量。

因为模型假设中定义的加工批量为 1,因此,每个产品都有不同的装配码,对 19 个产品编号为 1~19,每个零件与所属产品具有相同的装配码编号。不同订单的相同零件因具有不同的装配码编号,因此,是分开依次进行排产的,且不同订单的优先级相同,所有订单

表 3 完工时刻表

部件	1/ min	2/ min	3/ min	4/ min	5/ min	6/ min	7/ min	8/ min	9/ min	10/ min	11/ min	12/ min	13/ min	14/ min	15/ min	16/ min	17/ min	18/ min	19/ min
缸筒	155	78	136	70	160	157	71	158	91	33	109	69	72	139	154	161	156	92	159
末级	274	240	277	240	305	304	357	306	275	273	276	292	307	233	355	382	329	343	317
外缸	337	330	329	270	327	336	228	316	269	296	258	317	318	347	328	346	326	297	268
外罩	282	74	293	287	289	288	248	246	286	292	284	285	245	283	291	290	243	244	247
装配	420	402	392	332	378	406	448	346	320	338	318	364	370	434	434	448	384	420	352

由表 3 可以看出:外缸为瓶颈部件,因为 0 时刻为该组订单的开始加工时刻,因此,该组订单的最终完工时间为 $448 - 0 = 448 \text{ min}$ 。

3.2 实验二

接下来,笔者进行 3 种算法求解效果的对比。

按 BOM 表分解后有 76 个零件加工生产任务,19 个组合件装配生产任务。

为了验证上述模型与求解方法的实用性和有效性,笔者设置 2 组实验。

其中,遗传算法的参数为:种群数量为 500,交叉概率为 0.8,变异概率为 0.1,迭代次数为 20。用 QT 4.11.1 进行编程,算法运行环境为 Intel (R) Core (TM) i7-8565U CPU @ 1.80 GHz 1.99 GHz,16.0 GB 运行内存,Window10 64 位操作系统。

3.1 实验一

接下来,笔者进行并行协同进化遗传算法 (PCE-GA) 的求解。

通过运用上述 PCE-GA 算法,在调度起始时间 $t = 0$ 、设备初始能力充足的情况下,对该企业的上述实际订单进行运算。

进化过程中每一代的最优解如图 7 所示。

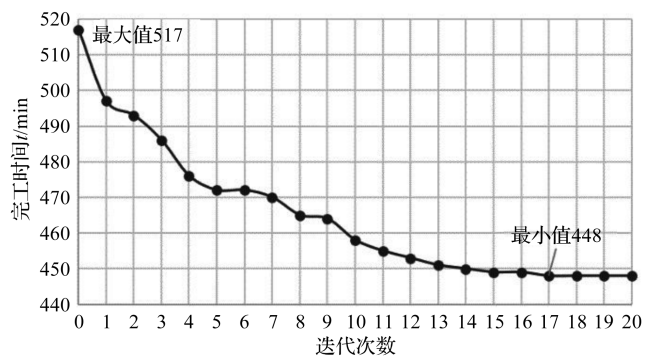


图 7 协同进化收敛曲线

由图 7 可知:在 20 次迭代过程中,最优解的值不断下降,在第 17 代趋于平稳地收敛到最终的优化解。其中,最大值为 517 min,最小值为 448 min,优化率 13.3%。

最优解调度方案对应的订单中,产品的各个部件完工时刻以及装配完工时刻,如表 3 所示。

为了进一步体现算法的优势,笔者将 PCE-GA 算法与单车间作业调度遗传算法 (JSP-GA) 及并行协同进化模拟退火算法 (PCE-SA) 进行比较。

单车间作业调度即分别对每个车间单独进行优化,将最晚完工的车间结束时间作为装配的起始时间,对装

配车间进行优化,得到最终的完整解,即订单完工时间。

PCE-SA 算法也采用并行协同进化思想进行求解(模拟退火算法的参数设置为:初始温度为 500,停止迭代温度为 0.1,降温速度为 0.75,在每个温度下设置内部蒙特卡洛循环迭代次数为 10)。

3 种算法求解结果如表 4 所示。

表 4 3 种算法的求解结果

算法	缸筒车间 完工时间 /min	外罩车间 完工时间 /min	外缸车间 完工时间 /min	末级车间 完工时间 /min	订单完工 时间/min
JSP-GA	147	285	277	310	506
PCE-GA	161	293	347	382	448
PCE-SA	173	343	362	423	498

由表 4 可知:对于单个车间,JSP-GA 算法求解的每个车间的调度方案完工时间,都比 PCE-GA 算法和 PCE-SA 算法求解的完工时间要短,但应用并行协同进化算法求解的订单完工时间却要比单车间调度算法求解的订单完工时间短,即在整体层面上,PCE-GA 算法产生的调度方案,其构成完整解的质量比单车间遗传算法产生的解优越,优化率为 11.5%。

单车间遗传算法仅实现了车间局部的优化,未能实现企业整体最优。虽然 PCE-SA 算法的订单完工时间比 PCE-GA 算法的结果要长,但仍比 JSP-GA 算法求解结果略好,再次证明了 PCE-GA 算法的优越性。

4 结束语

传统企业在实际生产中,其多个关联车间之间的生产计划与调度存在难以协作的问题。为此,针对该多混合流水车间的协同调度问题,笔者以完成所有订单加工和装配的总时间为优化目标,运用协同进化思想,采用并行协同进化遗传算法对其进行了求解,并以某液压缸生产企业作为实验对象,验证所建模型和采用算法的实用性与有效性。

研究结论如下:

(1)在实验一中,采用 PCE-GA 算法求解得到的优化率为 13.3%,说明该算法在解决该类复杂组合优化问题时是有效的;

(2)采用 PCE-GA 算法比 JSP-GA 算法求解的数据优化了 11.5%,该结果表明,运用协同进化思想能够有效地协调各协作车间的生产活动,可以明显提高企业的整体生产效率。

在目前的研究中,笔者所采用的优化目标为订单完工时间。在后续的研究过程中,笔者将会增加研究目标,例如搬运时间等,并且在此基础上,针对不同订单交货期设置优先级。

参考文献(References):

- [1] 李修琳. 混流加工—装配生产调度集成优化研究[D]. 杭州:浙江工业大学机械工程学院,2012.
- [2] 梁艳杰,杨明顺,高新勤,等. 加工与装配车间集成调度的多目标优化模型[J]. 计算机工程与应用,2016,52(10):247-253.
- [3] 孟荣华. 金属结构件制造车间协同调度优化研究与应用[D]. 武汉:华中科技大学机械科学与工程学院,2019.
- [4] BHATNAGAR R, CHANDRA P, GOYAL S K. Models for multi-plant coordination [J]. *European Journal of Operational Research*,1993,67(2):141-160.
- [5] BEHNAMIAN J, GHOMI SMTE. A survey of multi-factory scheduling [J]. *Journal of Intelligent Manufacturing*,2016,27(1):231-249.
- [6] NADERI B, RUIZ R. A scatter search algorithm for the distributed permutation flowshop scheduling problem [J]. *European Journal of Operational Research*,2014,239(2):323-334.
- [7] XU Ye, WANG Ling, WANG Sheng-yao, et al. An effective hybrid immune algorithm for solving the distributed permutation flow shop scheduling problem [J]. *Engineering Optimization*,2013,46(9):1269-1283.
- [8] NA H, PARK J. Multi-level job scheduling in a flexible job shop environment [J]. *International Journal of Production Research*,2014,52(13):3877-3887.
- [9] 秦金涛. 多车间协同调度平台的研究与应用[J]. 成组技术与生产现代化,2014,31(3):14-17,31.
- [10] 董义军. 多工厂协同生产计划与调度方法研究[D]. 上海:上海交通大学机械工程与动力学院,2010.
- [11] 孙亚南,陈友玲,王超,等. 基于属度函数的间协同调度法[J]. 计算机应用研究,2011(10):3739-3942.
- [12] 于晓义,孙树栋,褚 崑. 基于并行协同进化遗传算法的多协作车间计划调度[J]. 计算机集成制造系统,2008(5):991-1000.
- [13] 梁迪,薛健,赵伊诺. 基于协同奔袭自适应狼群算法的双车间优化调度[J]. 沈阳大学学报:自然科学版,2021,33(2):160-166.
- [14] 王艳,蒋天伦. 融合决策树的分布式多工厂协同生产调度法[J]. 系统仿真学报,2019,31(11):2181-2197.
- [15] 李修琳,鲁建厦,柴国钟,等. 基于混合遗传算法的混流混合车间协同调度问题[J]. 中国机械工程,2012,23(8):935-940.
- [16] 廖不凡,雷琦,吴文烈,等. 基于混合教学优化算法的多车间协作综合调度[J]. 中国机械工程,2020,31(16):1940-1949.

[编辑:司红岩]

本文引用格式:

冯润晖,董绍华. 基于并行协同的多车间协同调度问题研究[J]. 机电工程,2023,40(1):122-128.

FENG Run-hui, DONG Shao-hua. Multi-shop collaborative scheduling problem based on parallel collaboration [J]. *Journal of Mechanical & Electrical Engineering*, 2023,40(1):122-128.

《机电工程》杂志: <http://www.meem.com.cn>