

DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2012.03.035

面向服务的网络化协同制造资源多目标重组优化调度*

韦 韞 李东波 童一飞

(南京理工大学机械工程学院, 南京 210094)

【摘要】 针对网络化协同制造资源重组优化调度所存在的问题,综合考虑影响网络化协同制造资源重组优化调度的4个主要因素:最小化生产作业时间、最小化生产作业成本、最优化生产加工质量、最优化资源服务质量,建立了网络化协同制造资源多目标优化调度的数学模型。提出了一种基于 Pareto 多目标免疫遗传算法的网络化协同制造资源重组优化调度方法,该算法综合运用了小生境技术、群体排序技术和精英保留策略,并对遗传算子进行改进,自适应地调整交叉和变异算子,结合免疫算法的免疫选择淘汰了相似个体,保证了种群多样性,避免了早熟现象的发生。免疫记忆对近似最优解进行动态邻域搜索,提高了算法的局部搜索能力。实例仿真表明了该算法的有效性。

关键词: 网络化协同制造 多目标优化 调度 免疫遗传算法

中图分类号: F407.67 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2012)03-0193-07

Multi-objective Reconfiguration and Optimal Scheduling of Service-oriented Networked Collaborative Manufacturing Resource

Wei Yun Li Dongbo Tong Yifei

(School of Mechanical Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China)

Abstract

In order to solve reconfiguration and optimal scheduling problems of networked collaborative manufacturing resource, a multi-objective optimization mathematical model was provided with four practical important objectives were considered simultaneously, including minimizing the total production working hours, total production working cost, optimization total production processing quality and resource service quality. A reconfiguration and optimal scheduling method for networked collaborative manufacturing resource was presented based on Pareto multi-objective immune genetic algorithm. In order to ensure the groups variety, prevent the premature convergence problem, some key technologies such as population ranking technique, niche technique, Pareto solution set filter were applied. The genetic operators were improved and self-adaptive crossover and mutation operators were proposed by the algorithm, and immune selection could eliminate semblable individuals. Immune memory was adopted to dynamic search near each approximate optimal solution, so it accelerated search and improved quality of solution. Finally the result of simulation indicated the validity of algorithm.

Key words Networked collaborative manufacturing, Multi-objective optimization, Scheduling, Immune genetic algorithm

引言

面向服务的网络化协同制造资源重组优化配置

是面向用户需求,利用网络优势寻找并充分利用分散在同一企业的不同部门或不同企业之间可利用的具有竞争力的制造资源,实现制造资源的快速重组

收稿日期: 2011-03-31 修回日期: 2011-06-08

* 国家自然科学基金资助项目(61104171)

作者简介: 韦韞, 博士生, 主要从事制造资源优化调度研究, E-mail: rainbowlovebaby@163.com

通讯作者: 李东波, 教授, 博士生导师, 主要从事先进制造技术研究, E-mail: tgnjust@163.com

和优化配置。而如何在网络化协同制造过程中对制造资源进行有效重组的调度,使得制造过程综合效益最大化,是制造企业缩短产品制造时间和降低产品生产所需要解决的重要问题之一。当前,国内外许多学者对制造资源调度进行了大量研究,并取得许多有价值的成果^[1-5]。

但是,目前对面向服务的网络化协同制造资源重组优化调度的研究较少,且重组优化模型大多是以制造过程中的某一个目标进行优化,如时间、成本、质量、服务、环境等,或者通过加权的方法将多目标优化问题转化为单目标问题。但是制造资源优化调度过程中会受到多方面因素的影响,单纯优化某一目标,很难满足面向服务的生产实际需求。且将多目标问题转化为单目标问题时,目标之间的权重难以准确评定,会出现不同量纲相加的现象,很容易导致局部最优解。

面向服务的网络化协同制造资源优化调度问题的求解是一个非常复杂的问题,是典型的 NP-hard 组合优化问题,常用的方法主要有整数规划、分支界定、遗传算法 (genetic algorithm, 简称 GA)、蚁群遗传算法、模拟退火算法^[3] (simulated annealing, 简称 SA)、禁忌搜索 (tabu search, 简称 TS) 和 A* 算法等。其中整数规划和分支界定难以解决计算量和存储量巨大的大规模调度问题。GA 和 SA 算法都用来解决优化组合问题,但是 GA 算法容易过早收敛,SA 算法的冷却“温度”不易掌握;TS 算法是一种循环搜索技术,它能够在问题的解空间上记录搜索过的区域,避免了重复搜索,缺点是禁忌列表过于严格,对其初始解有较强的依赖性,而且搜索的过程是串行的。

免疫遗传算法^[6] (immune genetic algorithm, 简称 IGA) 是近年来提出的一种以遗传算法为基础,引入生物学免疫机制的改进遗传算法,将求解问题的目标函数作为抗原,将抗体作为问题的解。由于免疫系统具有学习、记忆、自适应、群体多样性等特点,利用免疫遗传算法既可以使用多种机制求解多目标函数的最优解,又可以克服遗传算法在局部搜索效率低的缺点,在很大程度上避免了算法早熟收敛。

本文综合考虑协同制造资源优化调度的 4 个主要因素:最小化任务执行时间、最小化制造过程生产成本、最优化加工质量、最优化服务质量,建立协同网络化制造多目标优化调度数学模型,运用一种基于 Pareto 多目标免疫遗传算法的方法来解决协同制造资源多目标优化调度问题。

1 面向服务的网络化协同制造资源多目标重组优化调度数学模型

设企业同时存在多个生产任务,经过任务分解后为 n 个子任务,子任务集合为 S , 设子任务 $S_i (i = 1, 2, \dots, n)$ 共有 n_i 个候选资源集合, $C_{ij} (i = 1, 2, \dots, n; j = 1, 2, \dots, n_i)$ 是子任务 S_i 的第 j 个候选资源集合, g_i 是子任务 S_i 的第 i 道工序,且某一时刻每个资源只能处理一道工序。企业生产子任务所需要的资源重组组合的集合为

$$R = \{R_1, R_2, \dots, R_k, \dots, R_{N_C}\} \quad \left(N_C = \prod_{i=1}^n n_i\right) \quad (1)$$

$$\text{其中 } R = \{C_{ij} (1 \leq i \leq n, 1 \leq j \leq n_i)\} \quad (2)$$

式中 N_C ——资源重组组合总数量

R_k ——第 k 条资源重组组合

网络化协同制造资源的重组优化调度问题可以描述为:根据对制造任务分解,针对资源优选的结果(资源候选集),在满足约束条件下,以使得协同制造过程中的生产作业总成本最低、任务执行时间最短、加工质量最优、服务质量最好为目标,确定所有可能的资源重组组合 R_k 。

由于面向服务的网络化协同制造资源多目标优化配置和传统的网络化协同制造资源优化配置有所不同,它面向用户的个性化需求和服务,通过产品和服务的融合,以开放的结构实现分布式制造以及资源的聚集和协作,采用生产性服务共同完成产品的生产。面对竞争激烈的市场,用户服务需求会随时变化,资源也会不断地变更,这就要求制造资源重组优化调度面向用户服务,具有动态响应用户变化需求,使得制造资源的优化配置处于一种局部的动态变化之中。它更符合服务型制造的生产环境,但是也增加了求解的难度和复杂性。

1.1 目标函数

1.1.1 总生产作业时间 T

在协同加工制造过程中,如果等到某个生产任务的某道工序的所有工件都加工完再运输到紧后工序所对应的制造资源,会使得资源等待(空闲)时间过长。因此,为了缩短资源服务总时间,每个生产任务的工件应该不间断的加工。

时间 T 包括两部分:资源服务完成任务的加工时间和资源服务在工序之间的运输时间。因此,资源总的服务时间目标函数可表示为

$$f_1 = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^{g_i} \sum_{k=1}^{N_C} x_{i,j,k} \frac{\mu_i T_{i,j,k}}{\alpha_i} \quad (3)$$

$$T_{i,j,k} = \begin{cases} \mu_i t_{i,j,k_1} + t'_{i,j+1,k_2} & (t_{i,j,k_1} \leq t_{i,j+1,k_2}) \\ \alpha_i (t_{i,j,k} - t_{i,j+1,k_2}) + \mu_i t_{i,j+1,k_2} + t'_{i,j+1,k_2} & (t_{i,j,k_1} > t_{i,j+1,k_2}) \end{cases} \quad (4)$$

式中 $t_{i,j,k}$ ——生产任务 i 的第 j 道工序上所有工件在候选资源 k 处加工所需加工时间
 $t'_{i,j,k}$ ——将生产任务 i 第 j 道工序的工件运输到候选资源 k 处所消耗的时间
 μ_i ——生产任务 i 的最小运输次数
 α_i ——生产任务 i 需要协同制造的工件数量
 $x_{i,j,k}$ ——决策变量

对于生产任务 i 的第 j 道工序,如果选择协同制造资源 k 进行加工,则 $x_{i,j,k}$ 为 0,否则为 1。

1.1.2 总作业生产成本 C

在面向服务的网络化协同制造资源重组优化调度中,不同的重组调度方案往往会对生产过程中的资源设备、夹具、刀具、工装等做出不同的配置,因此不同的组合方案得出的生产成本是不同的。成本 C 包括两部分:完成生产任务的总生产成本和协同制造资源之间的总运输成本,因此,生产成本的目标函数可以表示为

$$f_2 = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^{g_i} \sum_{k=1}^{N_C} x_{i,j,k} \left(C_{i,j,k} + \frac{\alpha_i C'_{i,j,k}}{\mu_i} \right) \quad (5)$$

式中 $C_{i,j,k}$ ——生产任务 i 的第 j 道工序上所有工件在候选资源 k 处协同加工所需成本
 $C'_{i,j,k}$ ——将生产任务 i 的第 j 道工序运输到候选资源 k 处协同加工的运输成本

1.1.3 生产加工质量 Q

协同制造资源组合的加工质量用加工零件的合格率来表示,因此,加工质量目标函数可以表示为

$$f_3 = \sum_{i=1}^n Q'_i \left(1 - \prod_{j=1}^{g_i} \prod_{k=1}^{N_C} x_{i,j,k} Q_{i,j,k} \right) \quad (6)$$

式中 Q'_i ——生产任务 i 的废品率相对于总合格率的修正比例系数
 $Q_{i,j,k}$ ——生产任务 i 的第 j 个工序运输到候选资源 k 处协同加工的废品率

1.1.4 服务质量

用户关心的服务质量包括很多重要因素,而且不同的应用需要不同级别的 QoS (quality of service),需要表示用户从完成任务中获得的 QoS 的满意程度。因此,资源服务质量目标函数可以表示为

$$f_4 = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^{g_i} \sum_{k=1}^{N_C} \xi_i x_{i,j,k} S_{i,j,k} \quad (7)$$

式中 ξ_i ——资源服务满意修正系数
 $S_{i,j,k}$ ——用户对生产任务 i 的第 j 道工序在候选资源 k 处协同加工的满意程度

1.2 约束条件

对于制造任务,有一定的任务完成期限和交货期,有成本约束、加工质量约束和服务质量约束。因此,经分析认为存在以下约束:

(1) 任务的交货期约束

表现为每个生产任务的实际交货期不能大于最迟交货期,即

$$T_{\max} - \sum_{j=1}^{g_i} \sum_{k=1}^{N_C} x_{i,j,k} \mu_i \frac{T_{i,j,k}}{\alpha_i} \geq 0 \quad (i=1,2,\dots,n) \quad (8)$$

式中 T_{\max} ——生产任务 i 允许的最迟交货时间

(2) 任务的顺序约束

假设任务 i 在任务 $i+1$ 之前,则

$$E_i \leq B_{i+1} \quad (9)$$

式中 E_i ——生产任务 i 的结束时间

B_{i+1} ——生产任务 $i+1$ 的开始时间

(3) 任务成本约束

每个生产任务的总加工成本不能大于可支付的最高成本,即

$$C_{\max} - \sum_{j=1}^{g_i} \sum_{k=1}^{N_C} x_{i,j,k} \left(C_{i,j,k} + \frac{\alpha_i C'_{i,j,k}}{\mu_i} \right) \geq 0 \quad (i=1,2,\dots,n) \quad (10)$$

式中 C_{\max} ——生产任务 i 可支付的最高成本

(4) 任务质量约束

表现为每个生产任务所生产工件的废品率不能大于最高废品率,即

$$Q_{\max} - \prod_{j=1}^{g_i} \left(\sum_{k=1}^{N_C} x_{i,j,k} Q_{i,j,k} \right) \geq 0 \quad (i=1,2,\dots,n) \quad (11)$$

式中 Q_{\max} ——生产任务中所生产工件的最高废品率

(5) 决策变量约束

一个生产任务的某个工序只能对一个候选协同制造资源进行加工,即对于 $\forall i \in \{1,2,\dots,n\}, j \in \{1,2,\dots,g_i\}$,有

$$\begin{cases} x_{i,j,k} \in \{0,1\} \\ \sum_{k=1}^{N_C} x_{i,j,k} = 1 \end{cases} \quad (12)$$

1.3 多目标优化问题的 Pareto 最优集

一般地,多目标优化问题可以被描述为

$$\max \{g_1 = f_1(\mathbf{x}), g_2 = f_2(\mathbf{x})\}$$

$$\text{s. t. } c_1(\mathbf{x}) \leq a_1, c_2(\mathbf{x}) \leq a_2, \dots, c_m(\mathbf{x}) \leq a_m$$

其中, \mathbf{x} 为决策变量, $f_i(\mathbf{x})$ ($1 \leq i \leq n$) 为目标函数, $c_j(\mathbf{x})$ ($1 \leq j \leq m$) 为约束条件。 $S = \{\mathbf{x} \mid \mathbf{x} \in \mathbf{R}^n, g_i(\mathbf{x}) \leq 0, h_j(\mathbf{x}) = 0; i=1,2,\dots,n; j=1,2,\dots,m\}$ 表示决策空间的可行区域。多目标优化问题通常具有

多个甚至无穷多个解,其最优解通常为—组无法简单进行互相比较的解,可称这种解为 Pareto 最优解,该解的集合通常被称为 Pareto 最优集^[7-8]。

文献[7]对 Pareto 有效解的定义如下:如果对一个解向量 $\tilde{x} \in S$,当且仅当不存在 $x \in S$,使得向量 $F(x) = (f_1(x), f_2(x), \dots, f_q(x))$ 优于 $F(\tilde{x}) = (f_1(\tilde{x}), f_2(\tilde{x}), \dots, f_q(\tilde{x}))$,那么称 \tilde{x} 为多目标问题的 Pareto 非劣解,集合 $P^* = \{\tilde{x}_i \in S\}$ 称为多目标问题的 Pareto 最优解集。

这里以网络化协同制造资源组合优化调度的生产作业时间目标函数 f_1 、生产作业加工成本目标函数 f_2 、生产加工质量目标函数 f_3 和资源服务质量目标函数 f_4 组成多目标优化函数

$$\min F(x) = (f_1(x), f_2(x), f_3(x), f_4(x)) \quad (13)$$

2 多目标免疫遗传算法

2.1 免疫遗传算子

(1) 亲和力

亲和力指两个抗体之间的相似程度,本算法采用信息熵作为度量抗体间亲和力的指标。

(2) 抗体浓度

抗体浓度指抗体在抗体种群中与其相似的抗体所占的比例,用来调节抗体的促进和抑制。

(3) 激励度

激励度是表示抗体种群中抗体被抗原或其他抗体激活的综合能力。

(4) 免疫选择算子^[9-10]

免疫选择是指在抗体群中依据抗体的激励度选择抗体的随机映射,抗体 k 的选择概率以激励度为选择抗体的依据,并结合模拟退火算法中的选择规则进行计算。

(5) 变异和交叉算子

交叉的目的是为了能够在下一代产生新的个体,调度问题常见的交叉算子有部分交叉、次序交叉、循环交叉和线性次序交叉等^[11]。本文采用部分交叉重组方法,按照一定的交叉概率 P_c 进行交叉。变异指每一代种群根据变异概率 P_m 使染色体的基因发生改变,常见的变异算子有逆转变异、移位变异、互换变异、插入变异等^[12]。为了增加变异后合法解的数量,本文采用互换变异和平移变异相结合的方式。

(6) 交叉变异概率

本文根据自适应遗传算法原理进行改进得到自适应交叉概率和变异概率

$$P_m^i = \begin{cases} P_m^{i-1} - \frac{(P_m^i - P_m^{i-1})(x_{vmax} - x_v)}{x_{vmax} - x_{vavg}} & (x_v \geq x_{vavg}) \\ P_m^{i-1} & (x_v < x_{vavg}) \end{cases} \quad (14)$$

$$P_c^i = \begin{cases} P_c^{i-1} - \frac{(P_c^i - P_c^{i-1})(x'_v - x_{vavg})}{x_{vmax} - x_{vavg}} & (x'_v \geq x_{vavg}) \\ P_c^{i-1} & (x'_v < x_{vavg}) \end{cases} \quad (15)$$

式中 P_c^i 、 P_m^i ——第 i 代要交叉和变异的个体的交叉率和变异率

x_v ——要交叉和变异的个体抗体和抗原的亲合力

x_{vmax} ——群体中的最大亲合力

x_{vavg} ——群体的平均亲合力

x'_v ——要交叉的两个个体中较大的亲合力值

2.2 小生境技术

小生境技术就是将每一代个体划分为若干类,从每个类中选出适应度较大的个体作为一个优秀种群,再通过杂交和变异产生新一代个体种群。基于这种小生境的免疫遗传算法可以更好地保持解的多样性,同时具有很高的全局寻优能力和收敛速度,适合于多目标函数的优化问题。采用这种方法能获得种群的一个均匀分布的 Pareto 最优解集。

2.3 群体分级方法

多目标并行优化问题的目标函数是一个向量空间,很难对单个个体的适应度进行评价,在 Pareto 最优解中采用群体排序技术对群体进行分级。即首先计算出各个个体的目标函数值,通过比较提取出当前种群中所有非劣解个体,构成当前的非劣解集,并将其划分为同一等级,赋予等级 1。然后将这些个体从种群中剥离出来,在剩余个体中找出新的非劣解,并赋予其等级为 2。重复上述过程,直到种群中所有个体都被分类为止。

2.4 免疫记忆和精英保留策略

随着环境的变化,为使种群在当前较好的区域搜索,引入了免疫记忆策略:将在历史环境中具有较好适应能力的个体记忆下来,在种群中选择亲和力高的抗体进行克隆和变异,然后计算抗体和抗原的亲合力。

精英保留策略是将父代与变异后的子代合并,组成新的种群 F_i ,然后对 F_i 根据所有个体的适应度值进行排序和函数惩罚,选取与原始规模相等的较优个体组成新的父代,进行下一轮的免疫选择、遗传交叉和变异。精英保留策略保证了优良个体能传播到下一代中。

2.5 算法基本流程

基于上述思想,协同制造资源多目标重组优化调度算法流程如图 1 所示。

3 实例仿真

以敏捷总装资源快速 j 重组平台中某航天产品

为例,该产品有部分工段需要利用外部资源进行协同制造,验证本算法的有效性。该企业现在有 4 个子生产任务需要进行协同制造,其相关信息见表 1。经过初步搜索,每个生产任务的各个工序对应的候选资源集合及其相关信息见表 2、3,根据候选资源集合,确定资源重组方案。本实例利用 Matlab 7.0 仿真工具编程实现,具体的参数有:种群规模 40,最

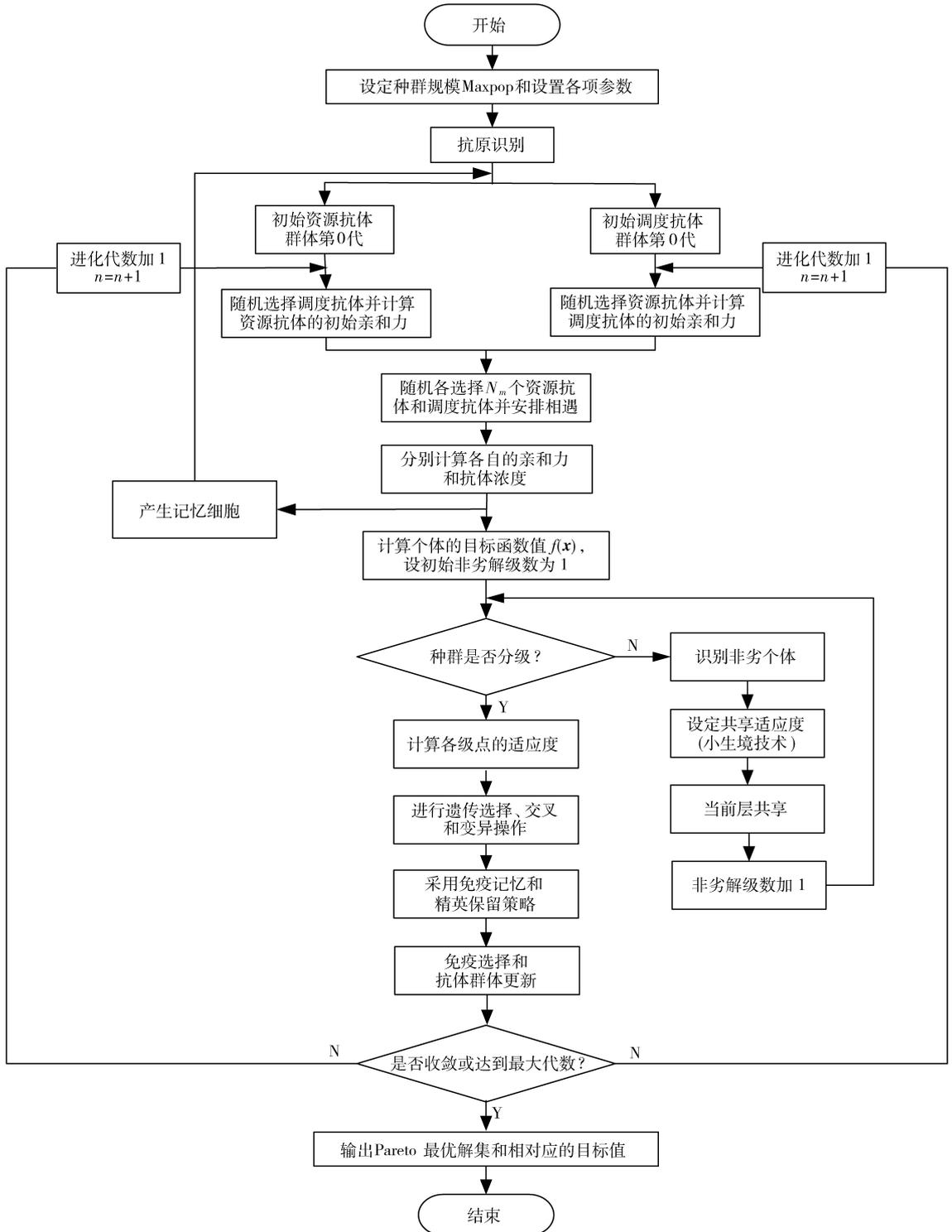


图 1 协同制造资源多目标重组优化调度免疫遗传算法流程图

Fig. 1 Immune genetic arithmetic flow chart of multi-objective reconfiguration and optimal scheduling collaborative manufacturing resource

大迭代次数为 100,初始 $P_c = 0.75$,初始 $P_m = 0.05$ 。进行优化时,权重分别为 $\omega_1 = 0.3, \omega_2 = 0.3, \omega_3 = 0.2, \omega_4 = 0.2$,质量修正系数 $Q'_1 = 0.3, Q'_2 = 0.3, Q'_3 = 0.2, Q'_4 = 0.2$ 。采用提出的多目标函数及基于 Pareto 的免疫遗传算法对此产品需要协同制造的任务进行优化调度,所求出的 Pareto 非劣解如表 4 所示。将该非劣解集用于协同制造资源重组优化调度过程,决策者可以根据每个目标的重要程度从优化结果中选择合适的调度方案。

表 1 协同制造子生产任务详细信息

Tab.1 Collaborative manufacturing sub-production task particular information

子生产任务	最晚交货期/h	最大生产成本/千元	最大废品率/%	运输数量/个
a_{s1}	200	12	2	2 500
a_{s2}	243	8	2	3 000
a_{s3}	300	5	2	2 000
a_{s4}	280	3	2	1 500

在相同的设置参数的条件下,分别利用遗传算法(GA)、免疫算法(IGA)和本文算法进行对比试验。得到的对比结果如表 5 所示,该结果表明,本文算法所求得非劣解个数要多于 GA、IGA。

表 2 候选资源在加工中承诺的部分数据

Tab.2 Part of data in processing of candidate resources

子生产任务	工序	候选资源	成本/元	交货时间/h	合格率/%
a_{s1}	m_1	r_1	270	22	98
		r_3	240	21	98
		r_4	320	24	98
a_{s2}	m_2	r_3	260	20	98
		r_5	380	28	98
a_{s3}	m_3	r_2	340	27	98
		r_6	258	18	98
a_{s4}	m_4	r_5	300	22	98
		r_4	350	28	98
		r_6	265	21	98

表 3 相邻候选资源之间的运输时间 t' 和运输成本 c'

Tab.3 Transportation time and cost among the proximity candidate resources

候选资源	企业内		r_1		r_2		r_3		r_4		r_5		r_6	
	t'/h	$c'/\text{元}$												
企业内			3	15			5	36	3	12	4.2	25		
r_1					6.4	47			2.4	12	5.4	40		
r_2					3.5	21	4.0	22						
r_3	3.2	18							4.7	31	5.8	43		
r_4	4.8	32			5.3	39			4.4	28	3.4	20		
r_5	2.6	14			3.4	20							3.7	25
r_6	5.2	38												

表 4 Pareto 非劣解集

Tab.4 Non-inferior set of Pareto

非劣解	协同资源重组方案	作业时间/h	作业成本/元	加工质量/%	服务质量/%
1	r_1, r_3, r_6, r_6	92	1 140	97.5	95.0
2	r_3, r_3, r_2, r_5	90	1 208	98.5	96.0
3	r_4, r_5, r_6, r_4	95	1 108	97.0	97.0
4	r_1, r_5, r_2, r_5	94	1 124	98.0	96.5
5	r_3, r_5, r_2, r_5	89	1 290	96.5	98.0

表 5 本文算法与其他算法非劣解个数及占全部非劣解百分数

Tab.5 Numbers and percentage of non-inferior of textual arithmetic and other arithmetic

组合方案	本文算法		GA		IGA	
	个数	比例/%	个数	比例/%	个数	比例/%
r_1, r_3, r_6, r_6	11.4	87.2	9.7	75.2	10.8	83.5
r_1, r_5, r_2, r_5	12.4	83.9	10.3	67.8	11.7	76.3
r_4, r_5, r_6, r_4	14.6	82.5	12.7	70.2	11.6	79.8

4 结论

(1) 针对网络化协同制造资源重组优化调度中存在的问题,综合考虑影响优化调度的 4 个主要因素:生产作业时间、生产作业成本、生产加工质量和资源服务质量,建立了网络化协同制造资源重组多

目标优化调度的数学模型。

(2) 提出了一种基于 Pareto 多目标免疫遗传算法的网络化协同制造资源重组优化调度方法,综合运用了 Pareto 解集、小生境技术、群体分级和免疫机制调整遗传算法种群,并改进交叉概率和变异概率的自适应策略,保证了群体的多样性,避免了算法过

早收敛,增强了算法全局寻优的能力。

(3)以某企业的几种产品协同制造加工为例,进行了仿真实验,并与其他算法进行了对比,仿真

结果表明该算法求出的 Pareto 非劣解集数量多于 GA 和 IGA,从而验证了该算法的有效性和可行性。

参 考 文 献

- 1 王世进,周炳海,奚立峰. 基于过滤定向搜索的柔性制造系统动态调度优化[J]. 上海交通大学学报,2007,41(1):94~99.
Wang Shijin, Zhou Binghai, Xi Lifeng. A filtered-beam-search based approach for FMS dynamic scheduling[J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 2007,41(1):94~99. (in Chinese)
- 2 Laguna M, Barnes J W, Glover F. Intelligent scheduling with tabu search an application to jobs with linear delay penalties and sequence-dependent setup coats and times [J]. Journal of Applied Intelligence,1993, 3(2):159~172.
- 3 Taillard E D. Parallel taboo search techniques for the job-shop scheduling problem [J]. ORSA Journal on Computing,1994, 16(2):108~117.
- 4 廖莉莉. 遗传算法在制造网格资源调度中的应用[J]. 武汉理工大学学报,2007,29(12):123~128.
Liao Lili. Application of genetic algorithms in manufacturing grid resource scheduling [J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2007, 29 (12):123~128. (in Chinese)
- 5 王云,冯毅雄,谭建荣,等. 基于多目标粒子群算法的柔性作业车间调度优化方法[J]. 农业机械学报,2011,42(2):190~196.
Wang Yun, Feng Yixiong, Tan Jianrong, et al. Optimization method of flexible job-shop scheduling based on multiobjective particle swarm optimization algorithm [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011,42(2):190~196. (in Chinese)
- 6 莫宏伟. 人工免疫系统原理与应用[M]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学出版社,2002:6~7.
- 7 Khalid K, Henri P, Nasser M. Using multi-agent architecture in FMS for dynamic scheduling [J]. Journal of Intelligent Manufacturing, 1997, 8(1):41~47.
- 8 Zitzler E, Thiele L. Evolution algorithms for multi-objective optimization. methods and application [D]. Zurich: Swiss Federal Institute of Technology, 1999.
- 9 孟红云,刘三阳. 基于自适应领域选择的多目标免疫进化算法[J]. 系统工程与电子技术,2004,26(8):1107~1111.
Meng Hongyun, Liu Sanyang. Adaptive neighborhood-based selection for multi-objective immunity genetic algorithm [J]. Systems Engineering and Electronics, 2004, 26(8):1107~1111. (in Chinese)
- 10 漆安慎. 免疫系统的非线性模型[M]. 上海:上海科学教育出版社,1998.
- 11 谢胜利,黄强,董金祥. 求解 JSP 的遗传算法中不可行调度的方案[J]. 计算机集成制造系统, 2002,8(11):902~906.
Xie Shengli, Huang Qiang, Dong Jinxiang. A method to resolve unfeasible scheduling of JSP by GA[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2002, 8(11):902~906. (in Chinese)
- 12 王凌. 车间调度及其遗传算法[M]. 北京:清华大学出版社,2003.

(上接第 212 页)

- 10 黄真,李秦川. 少自由度并联机器人机构的型综合原理[J]. 中国科学: E 辑,2003,33(9):813~819.
- 11 伞红军,钟诗胜,王知行. 新型 2-TPR/2-TPS 空间 4 自由度并联机构[J]. 机械工程学报,2008,44(11):298~303.
San Hongjun, Zhong Shisheng, Wang Zhixing. Novel 2-TPR/2-TPS spacial 4-DOF parallel mechanism [J]. China Journal of Mechanism Engineering, 2008, 44(11):298~303. (in Chinese)
- 12 赵铁石,黄真. 欠秩空间并联机器人输入选取的理论与应用[J]. 机械工程学报,2000,36(10):81~85.
Zhao Tieshi, Huang Zhen. Theory and application of selecting actuating components of spatial parallel mechanisms [J]. China Journal of Mechanism Engineering, 2000, 36(10):81~85. (in Chinese)