

DOI:10.13196/j.cims.2015.02.019

# 集团制造多主体外协订单任务制造资源配置

杜百岗, 郭顺生, 彭兆, 李益兵, 唐红涛

(武汉理工大学 机电工程学院, 湖北 武汉 430070)

**摘要:**集团制造企业的外协订单任务制造资源配置过程具有多主体、多任务、多资源、多工序以及协同性的特点,增加了订单制造资源配置过程的复杂性和不确定性。针对这一问题,提出两阶段多主体外协订单任务制造资源配置方法;设计了基于成本—工期—收益的订单任务排序算法和基于 PageRank 的订单任务制造资源排序算法,并建立了多主体外协订单任务制造资源配置模型;运用遗传算法求解多目标下多主体外协订单任务制造资源配置模型的 Pareto 最优解。以某建材装备制造集团的外协订单任务制造资源配置为例,验证了所提理论方法的合理性和有效性。

**关键词:**多主体制造资源配置;集团制造;任务资源排序;遗传算法

**中图分类号:**TP39;F406 **文献标识码:**A

## Multi-agent manufacturing resource allocation of outsourcing order in group manufacturing

DU Bai-gang, GUO Shun-sheng, PENG Zhao, LI Yi-bing, TANG Hong-tao

(School of Mechanical and Electronic Engineering, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China)

**Abstract:**The characteristics such as multi-agent, multi-task, multi-resource, multi-process and collaboration increased the complexity and uncertainty of manufacturing resource allocation for outsourcing order in group manufacturing. Aiming at this problem, a two stage multi-agent manufacturing resource allocation method was presented, which included two stages of agent task and manufacturing resources sorting and multi-agent manufacturing resource allocation for outsourcing order. The task order sorting algorithm based on cost-schedule-gain and the manufacturing resource sorting algorithm based on PageRank were designed, and a multi-agent manufacturing resource allocation model for outsourcing order was built. The Pareto optimal solution of multi-agent manufacturing resource allocation model for outsourcing order was obtained with the genetic algorithm. The proposed model and algorithm were verified by the manufacturing resource allocation of outsourcing order in a building materials and equipment manufacturing group.

**Key words:**multi-agent manufacturing resource allocation; group manufacturing; task and resource sort; genetic algorithms

## 0 引言

随着科学技术的进步和全球化经济的发展,市场竞争日益激烈,制造企业所处的环境发生了巨大变化,企业普遍面临着制造资源与制造能力不均衡、资源闲置与资源短缺并存、加工能力过剩与能力不

足等问题,为此一些制造企业通过合并、重组的模式组建集团制造企业。作为企业的一种高级组织形式,集团制造企业成员通过明确产权和制定契约维持企业的业务运作,同时通过集团制造企业之间资源的共享来提高企业的整体竞争力。由于集团制造企业地理位置分布的差异性以及企业对资源信息描

收稿日期:2014-01-14;修订日期:2014-09-11。Received 14 Jan. 2014; accepted 11 Sep. 2014.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(71171154);中央高校基本科研业务费资助项目(2013-YB-021,2014-IV-104,2014-IV-016)。**Foundation items:**Project supported by the National Natural Science Foundation, China(No. 71171154), and the Fundamental Research Funds for the Central Universities, China(No. 2013-YB-021,2014-IV-104,2014-IV-016).

述的异构性,导致集团制造企业对共享的订单任务制造资源的匹配难度大,这就是本文所要解决的集团企业多主体外协订单任务制造资源配置问题。

目前,有关资源配置的研究主要集中在针对网络化环境下的资源配置领域,可分为建模和求解两部分,主要是对概念<sup>[1-2]</sup>、过程<sup>[3-4]</sup>和博弈<sup>[5]</sup>等模型,以及基于灰色关联度法<sup>[6]</sup>、蚁群算法<sup>[6-8]</sup>和遗传算法(Genetic Algorithm,GA)<sup>[9]</sup>等求解方法的研究。值得借鉴的成果有:康玲等考虑加工资源的功能结构、属性约束和服务状态,提出基于本体语义的加工资源匹配方法并构建了资源发现框架,实现以信息模型与匹配规则集成的资源配置模型<sup>[1]</sup>;杨欣等利用混杂 Petri 网建立了针对混杂系统生产过程中动态资源的配置模型,该模型结合相应的使能和激发规则实现了对混杂系统资源的优化调度<sup>[3]</sup>;陈冰等利用非合作博弈方法引入任务负载竞争下的制造资源配置,通过模糊聚类和 Nash 均衡保证生产设备资源的总体利用率<sup>[5]</sup>;房亚东等为了优化网络化制造环境下的制造资源配置问题,提出一种将灰色关联理论和蚁群算法相结合的资源优化选择求解方法<sup>[6]</sup>;孙卫红等对大规模定制(Mass Customization,MC)网络制造资源的配置方法进行了研究,设计了 MC 外协任务—制造资源模型总体框架和语义匹配算法,并实现了基于蚁群算法的 MC 网络制造资源优化配置<sup>[7]</sup>;王正成等针对网络化制造跨企业资源服务链的构建问题,提出基于时间成本综合最优的网络化制造资源服务链构建的数学模型,并设计了求解该模型的改进蚁群算法<sup>[8]</sup>;WANG 等在考虑半导体终检业务过程复杂性与多资源约束特征的前提下,提出基于模糊商业规则抽取的资源配置知识模型,从大量数据库中挖掘资源配置知识,并运用遗传算法求解出资源配置最佳优先序列,实现资源优化配置<sup>[9]</sup>;JAVIER 等建立了云计算环境下虚拟资源的描述和配置模型,用以解决 SaaS 平台下的多组织资源配置,达到其成本效益的控制目标<sup>[10]</sup>;王时龙等构建了以成本和时间最小化、质量最优化为目标的云制造资源优化配置模型,并采用最大继承法对资源配置模型进行求解<sup>[11]</sup>;李海波等提出基于工作流的多粒度资源组合方法,从过程实例和活动两个层次将物理制造资源转化为逻辑制造资源,通过合并计算得到不同粒度的资源组合<sup>[12]</sup>;王颂等将多色集合引入飞机连接装配工艺规划和资源配置过程,在多色图与多色集合映射的基础上,提出工艺

路径的规划模型和求解算法,并建立与工艺规划模型相匹配的工艺资源模型<sup>[13]</sup>;THIAGARASU 等利用多主体优先级规则及协调机制建立了多主体资源配置(Multi-Agent Resource Allocation, MARA)模型,以实现最小化项目周期的目标<sup>[14]</sup>;LIU 等提出面向工程拼装过程的多主体资源配置方法<sup>[15]</sup>;TREVOR 等考虑主体数和任务数对决策过程的影响<sup>[16]</sup>,研究了多马尔可夫决策过程下的多主体任务配置。

上述研究取得了很多具有借鉴意义的成果,但是针对集团制造模式下,综合考虑订单任务、制造资源及加工工序的研究较少。由于集团制造模式下多主体间的订单任务、制造资源及加工工序相互关联又各具特点,使资源配置的过程更加复杂和不确定。具体表现在:

(1)任务及资源偏好 在实际的任务和资源分配过程中,由于订单收益及多主体的加工能力、资源状况等不同,导致多主体在任务和资源选择中的主观偏好,主要体现在某部分订单任务和制造资源的自主加工。

(2)制造资源的可替换性 在制造加工的过程中,每一种制造资源在功能性、兼容性、价值成本等方面具有差异,使不同制造资源可以在同一任务中使用,如某设计中采用的 10# 钢板可以用 12# 钢板替换。因此,制造资源的可替换性会影响对资源的配置。

(3)工序的外协性 单一主体无法完成全部工序加工,外协过程中外协主体的工序延时、返工、成本等都会影响对外协主体的选择,从而导致配置结果的变化。

基于上述分析,本文在已有研究的基础上<sup>[17-18]</sup>,结合集团制造模式下企业外协订单制造资源的配置需求,提出两个阶段的多主体外协订单任务制造资源配置方法,建立了考虑外协订单任务及制造资源排序、按工序分配的多主体外协订单任务制造资源配置模型,最后运用遗传算法进行求解,并通过应用算例表明了该方法的有效性。

## 1 问题描述及多主体外协订单任务制造资源配置

集团制造企业的发展一般经历了这样一个过程:根据企业的发展需要,在不同地域组建分公司,这些分公司独立经营和发展,随着市场竞争的加剧,

这些企业合并起来组建成集团制造企业,集团制造企业与基于信息技术连接的暂时性虚拟企业联盟<sup>[19]</sup>相比,具有更高形式的信息和资源共享。每一个集团制造企业成员均独立进行企业运作,承接客户订单,同时根据企业自身的订单负荷状况,将生产任务外协给集团制造企业成员,在满足自身经济利益的前提下共同完成客户订单的生产,提升集团制造企业的整体效益。

企业集团需要优化成员的制造资源,对分散、闲置的制造资源进行统一控制和集中调配,实现集团制造企业的转型和升级。在结合集团制造企业实际生产过程的基础上,本文对其订单任务制造资源的配置模型进行如下假设:

(1)客户订单以部件的形式划分成不同的订单任务,企业在满足自身加工负荷的前提下,将富余订单生产任务外协给集团制造企业成员。

(2)将每一个外协的订单任务划分为典型的工序段,其加工时间(包含技术准备时间)和加工成本是确定的。

(3)不同外协生产任务在加工上没有先后约束,但在完成时间上有要求。

(4)所有与客户订单相关的产成品(包括外协件)运输到统一的装箱点进行发运,同时所有产品发运到装箱点的运输时间和成本是固定的。

在以上假设的基础上,集团制造企业外协订单任务制造资源配置问题可描述为:设某集团制造企业订单任务制造资源配置过程中,制造主体集合  $B = \{b_1, b_2, \dots, b_a\}$ , 任务集合  $S = \{s_1, s_2, \dots, s_n\}$ , 制造资源集合  $R = \{r_1, r_2, \dots, r_m\}$ , 工序集合  $P = \{p_1, p_2, \dots, p_g\}$ , 在订单任务制造资源的某一配置时刻,待配置的订单任务数为  $N$ 。在这些待配置的订单任务中,一部分订单生产任务由厂内制作,另一部分外协给集团制造企业成员。由于订单任务对制造资源及工序的要求不同,集团制造企业成员协同完成厂内任务和外协任务,加上各制造主体在地理位置、技术水平和资源状况上的差异,导致生产任务在加工时间、加工质量和成本等方面不同。因此,在满足企业自身加工要求的前提下优化集团制造企业的整体效益,需要充分利用分散在各企业的订单任务制造资源,实现订单任务制造资源的优化配置。

在集团制造企业的实际运作过程中,各制造主体的生产任务分企业内部的生产任务和外协给其他集团制造企业成员的订单任务两部分,同时各集团

制造企业主体共享制造资源。为此,结合集团制造企业的实际运作,本文将制造资源的配置过程划分为两个阶段。在网络化环境下,制造资源具有虚拟性、封装性等特点<sup>[20-21]</sup>,其制造资源往往不可见,制造资源配置的过程是基于网络环境下制造资源的全局优化调度。集团制造模式下多主体外协订单任务制造资源的配置是在集团制造企业实际运作过程的基础上提出的,虽然在一定程度上无法保证制造资源配置的全局优化,但是其制造资源的配置过程是针对集团制造企业各制造主体可见、共享程度更高的制造资源配置,配置结果的可实施性和可控性更强。基于以上分析,本文提出针对集团制造模式下的多主体外协订单任务制造资源配置过程模型,如图1所示。

集团制造模式下多主体外协订单任务制造资源的配置总体分为两个阶段,即单主体订单任务及制造资源排序阶段和多主体订单任务制造资源配置阶段,下面是各阶段的详细描述。

(1)第一阶段——单主体订单任务及制造资源排序阶段。

**步骤1** 在  $t$  时刻,制造主体检查待执行订单任务数,当任务数大于给定值时,转步骤2,否则转步骤4。

**步骤2** 利用单主体订单任务优先级函数,对待执行的订单任务进行排序。

**步骤3** 根据步骤2的结果,结合订单任务制造资源排序算法,计算需求订单任务制造资源的排序,转步骤4。

**步骤4** 制造主体发布单主体订单任务及制造资源排序结果,分配厂内及外协的订单任务制造资源,并将结果提交给订单任务决策中心。

(2)第二阶段——多主体订单任务制造资源配置阶段。

**步骤5** 订单任务决策中心检查各制造主体提交的排序结果,判断是否存在外协的订单任务及制造资源,若存在则转步骤6;否则,将制造主体的发布结果作为执行结果返回给制造主体。

**步骤6** 各制造主体提供针对外协订单任务及制造资源的报价等,由订单任务决策中心进行汇总和处理。

**步骤7** 订单任务决策中心根据各制造主体提交的订单任务、制造资源信息及报价信息等建立优化匹配模型,根据模型的求解结果,决定各制造主体

的订单任务及其制造资源外协主体,并返回结果。

返回结果执行订单任务。

**步骤 8 各制造主体根据订单任务决策中心的**

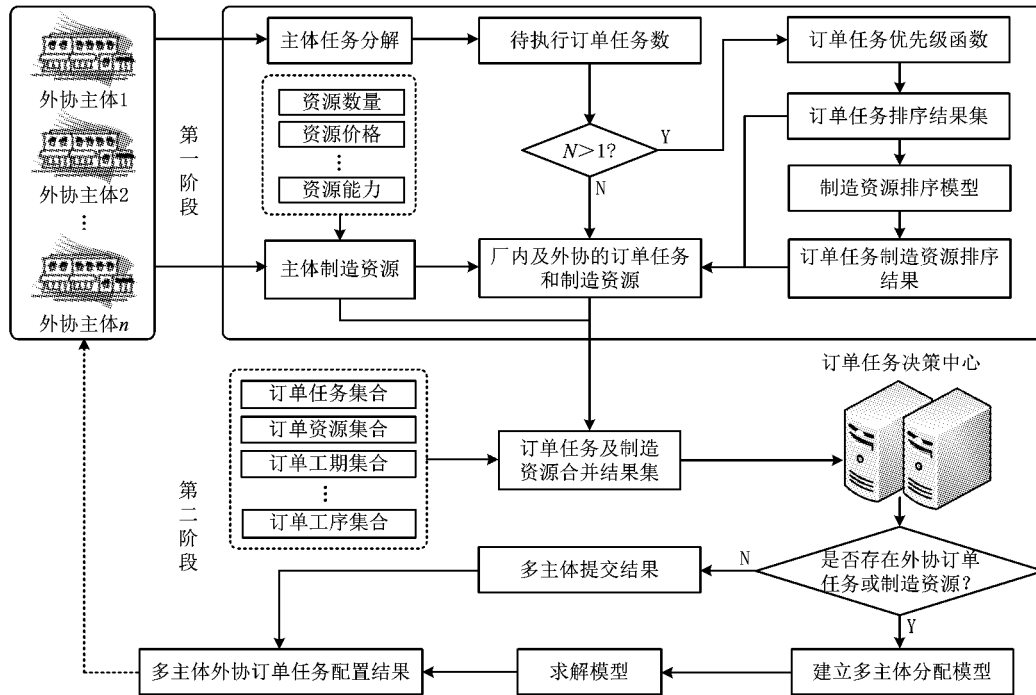


图1 集团制造企业订单任务制造资源多阶段配置模型示意图

**2 单主体订单任务及制造资源排序模型**

单主体订单任务及制造资源排序是制造主体根据其所拥有的订单任务和制造资源,对某时段的订单任务及订单任务制造资源进行排序和匹配,以确定制造主体厂内制作及外协订单任务和制造资源。主要分为制造主体待分配订单任务的排序和制造主体订单任务制造资源排序两个过程。

**2.1 基于成本—工期—收益的订单任务排序**

制造企业生产活动所关注的重点是在满足订单产品质量的前提下,对订单任务成本和工期进行控制,单位成本越低、工期越短的订单任务收益越。为了便于统一描述,利用收益、成本和工期三个主要要素对订单任务的优先级进行权衡,建立数学模型,利用式(1)和式(2)确定订单任务  $s_i$  的排序优先级,排序权值为  $TSR(s_i)$ ,  $TSR(s_i)$  的值越大,说明订单任务  $s_i$  的单位时间成本收益越高。

$$TSR(s_i) = \frac{TSR_i(t)}{\sum_{i=1}^n TSR_i(t)}; \quad (1)$$

$$TSR_i(t) = \lambda_1 EC_i - \lambda_2 DC_i(t) + \lambda_3 TE_i. \quad (2)$$

式中:  $n$  表示订单任务数;  $EC_i$  表示订单任务  $s_i$  的单位工程量收益比率;  $TE_i$  表示  $t$  时刻订单任务  $s_i$  的

时间紧急度;  $DC_i$  表示订单任务  $s_i$  在制造周期内的单位延时成本费用率;  $\lambda_1, \lambda_2$  和  $\lambda_3$  分别表示  $EC_i, DC_i$  和  $TE_i$  的权重,并满足  $\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3 = 1$ 。用式(3)~式(6)进一步描述各变量的函数关系。

$$EC_i = \frac{(e_i - c_i)q_i}{\sum_{j=1}^n (e_j - c_j)q_j}; \quad (3)$$

$$DC_i(t) = \frac{AC_i(t)}{\sum_{i=1}^n AC_i(t)}; \quad (4)$$

$$AC_i(t) = \frac{del_i dc_i}{tend_i - tsta_i},$$

$$del_i = \begin{cases} 0 & tsta_i \geq t \\ t - tsta_i & tsta_i < t \end{cases}; \quad (5)$$

$$TE_i(t) = \frac{\sum_{k=1}^n \frac{2f_{ki}}{d_i}}{\sum_{l=1}^n \sum_{p=1}^n \frac{f_{lp}}{d_l}}. \quad (6)$$

式中:  $e_i$  表示订单任务  $s_i$  的单位期望价值;  $c_i$  表示订单任务  $s_i$  的单位期望成本;  $q_i$  表示订单任务  $s_i$  的工程量;  $AC_i(t)$  表示订单任务  $s_i$  在制造周期内的平均延时成本;  $del_i$  表示订单任务  $s_i$  的可能延时;  $dc_i$  表示单位延时成本;  $tend_i$  表示订单任务  $s_i$  的计划开始时间;  $tsta_i$  表示订单任务  $s_i$  的计划完成时间;  $d_i$  表

示订单任务  $s_i$  的制作难度系数,满足  $d_i \in [0, 1]$ 。为了描述各订单任务加工顺序的关联程度,引入订单任务时间关联矩阵,用  $D_{n \times n}$  表示,矩阵中的元素  $f_{ij}$  表示订单任务  $s_i$  与  $s_j$  的计划时间重叠区域的取值,如订单任务  $s_i$  的计划时间为  $[1, 5]$ , 订单任务  $s_j$  的计划时间为  $[4, 7]$ , 则计划时间的重叠区域为 2; 若无时间重叠,则为 0。在对角线上,  $f_{ii}$  表示订单任务  $s_i$  与自身的重叠区域,由于这一重叠不影响加工进度,规定对角线上的取值为 0。

2.2 基于 PageRank 的订单任务制造资源排序

对订单任务制造资源的利用决定了订单的收益,因此企业有必要对订单任务制造资源进行排序,选择优质的制造资源来满足订单任务的生产。PageRank 算法是用于 Web 页面排序的经典算法之一,本文借鉴 PageRank 算法将网络链接价值作为重要性排序的思想,结合订单任务的排序,提出基于 PageRank 的订单任务的制造资源排序算法,其核心是订单任务制造资源的排序不仅取决于制造资源本身的价值和需求,还与订单任务及其重要程度有关。

在由  $m$  个制造资源节点和  $n$  个订单任务节点构成的复杂任务资源网络中,假定对于某一制造资源节点  $r_j$ , 订单任务节点  $s_1, s_2, \dots, s_n$  赋予其对应的权值  $w(s_i, r_j)$ , 则制造资源节点  $r_j$  的重要性指标  $NR(r_j)$  的计算方法如式(7)~式(9)所示。

$$NR(r_j) = \frac{(1-\sigma)}{n} + \sigma \sum_{i=1}^n \frac{w(s_i, r_j)}{V(s_i)} SR(s_i); \quad (7)$$

$$V(s_i) = \sum_{j=1}^m w(s_i, r_j); \quad (8)$$

$$w(s_i, r_j) = N(s_i, r_j) V(r_j). \quad (9)$$

式中:  $V(s_i)$  为订单任务节点  $s_i$  的出强度;  $N(s_i, r_j)$  表示订单任务节点  $s_i$  对制造资源  $r_j$  的需求量;  $V(r_j)$  为制造资源  $r_j$  的单位价值;  $\sigma (0 < \sigma < 1)$  为阻尼系数。式(7)~式(9)说明,对于某一订单制造资源,订单任务的重要程度越高,需求量越大,对制造资源重要度的贡献就越高。

3 多主体外协订单任务制造资源配置模型

多主体外协订单任务制造资源配置是指订单任务决策中心在接收到集团制造企业中多主体的订单任务及制造资源需求后,根据一定的优化目标和决策函数,合理分配订单任务及其制造资源的过程。

确定优化目标是构建多主体外协订单任务制造

资源配置模型的关键。对集团制造企业而言,其追求的目标是在满足工期和质量要求的前提下,多制造主体以最小成本完成订单任务。本文按照这一原则,设计了以工期( $T$ )、质量( $Q$ )和成本( $C$ )为优化对象的多目标体系。

(1) 工期目标函数

在对订单任务进行分配前,制造主体按各自的生产计划安排生产,如果新分配的订单任务与原有生产任务的工期冲突过多,则可能导致订单延期交付,因此新分配订单任务需要尽可能减少与原生产计划的工期发生冲突。根据这一描述,以工期冲突最小为目标建立的工期目标函数如下:

$$T = \min \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^n \sum_{l=1}^g x(s_i, p_j, b_l) v_l F(s_i, p_j, b_l). \quad (10)$$

$$\text{s. t. } \sum_{i=1}^a x(s_i, p_j, b_l) f(s_i, p_j, b_l) < t(s_i, p_j). \quad (11)$$

式中:  $v_l$  表示订单任务  $s_i$  的工序段  $p_j$  的工期冲突权重,满足  $v_1 + v_2 + \dots + v_g = 1$ , 本文按等权重处理;  $F(s_i, p_j, b_l)$  表示订单任务  $s_i$  的工序段  $p_j$  与制造主体  $b_l$  的工期冲突;  $f(s_i, p_j, b_l)$  表示制造主体  $b_l$  交付订单任务  $s_i$  的工序段  $p_j$  的期限;  $t(s_i, p_j)$  表示订单任务  $s_i$  的工序段  $p_j$  的最大交付期限。

(2) 质量目标函数

以订单任务加工的废品率衡量各制造主体订单任务的加工质量,则质量目标函数可表示为:

$$Q = \min \sum_{i=1}^n \sum_{l=1}^a \sum_{j=1}^g x(s_i, p_j, b_l) [1 - g(s_i, p_j, b_l)] / [1 - g(s_i)]. \quad (12)$$

$$\text{s. t. } \prod_{i=1}^a \prod_{j=1}^g x(s_i, p_j, b_l) g(s_i, p_j, b_l) > g(s_i). \quad (13)$$

式中:  $g(s_i, b_l)$  表示制造主体  $b_l$  加工订单任务  $s_i$  的工序段  $p_j$  的合格率;  $g(s_i)$  表示订单任务  $s_i$  的最低合格率。

(3) 成本目标函数

订单任务成本由制造资源采购成本、制造加工成本和运输成本三部分构成,成本目标函数可描述为:

$$C = \min \sum_{i=1}^n \sum_{l=1}^a \sum_{j=1}^g \sum_{k=1}^h x(s_i, p_j, b_l) \cdot c_k(s_i, p_j, b_l) / c(s_i). \quad (14)$$

$$\text{s. t. } \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^g \sum_{k=1}^h x(s_i, p_j, b_l) c_k(s_i, p_j, b_l) < c(s_i). \quad (15)$$

式中:  $h=3$ , 当  $k=1, 2, 3$  时,  $c_k(s_i, p_j, b_l)$  分别表示制造主体  $b_l$  对订单任务  $s_i$  的工序段的制造资源采购成本、制造加工成本和运输成本;  $c(s_i)$  表示订单任务  $s_i$  的最大可支付成本。

#### (4) 决策变量约束

决策变量约束具体表述为: 任何一个订单任务的工序段只能外协给一个制造主体进行加工, 用式(16)表示。

$$\begin{aligned} \forall i \in \{1, 2, \dots, n\}, j \in \{1, 2, \dots, g\}, \\ l \in \{1, 2, \dots, a\}, x(s_i, p_j, b_l) \in \{0, 1\}, \\ \sum_{l=1}^a x(s_i, p_j, b_l) = 1, \\ \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^g x(s_i, p_j, b_l) = g. \end{aligned} \quad (16)$$

#### (5) 总体优化目标函数

本文的工期、质量和成本多目标体系是相互关联而又冲突的体系结构, 多个目标无法同时获得最优解, 并且在实际过程中, 用户对工期、质量、成本的要求不同, 侧重的目标也不同。为了便于工程应用, 采用线性加权法构建多目标评价函数对多目标进行转化, 求解 Pareto 最优解, 如式(17)所示。

$$F = \min \sum_{i=1}^u w_i E_i. \quad (17)$$

式中:  $u$  为目标函数的个数, 本文  $u=3$ ,  $E_1=T$ ,  $E_2=Q$ ,  $E_3=C$ ;  $w_i$  为目标体系权重, 满足  $w_1+w_2+\dots+w_u=1$ 。

## 4 基于遗传算法的模型求解

遗传算法是一种模拟自然界生物进化过程的计算模型, 具有较高的并行性和全局寻优能力。本文采用遗传算法求解多主体订单任务制造资源配置, 并利用 MATLAB 求解, 为满足 MATLAB 矩阵式运算逻辑, 对各主要处理参数进行定义。

### 4.1 参数定义

**定义 1** 任务资源关联矩阵  $RA$ 。 $RA$  用于描述订单任务和制造资源间的连接关系, 如果订单任务  $s_i$  存在对制造资源  $r_i$  的需求, 则矩阵元素表示订单任务对制造资源的需求量, 否则矩阵元素为 0。在制造主体提交给订单决策中心的需求中, 包含不需要进行外协加工的制造资源需求, 为了便于描述任务资源关联矩阵, 将这一部分资源需求抽象为虚拟订单任务, 因此  $RA$  由外协订单任务资源关联矩阵  $RAR$  和虚拟订单任务资源关联矩阵  $RAV$  构成, 满

足  $RA=[RAR \ RAV]$ , 其中在  $RAV$  第  $j$  列矩阵元素中只存在一项不为 0。

$$RAR = (rar_{ij})_{n \times m_1} = \begin{cases} N(s_i, r_j) \\ 0 \end{cases}; \quad (18)$$

$$RAV = (rav_{ij})_{n \times m_2} = \begin{cases} N(s_i, r_j) \\ 0 \end{cases}. \quad (19)$$

**定义 2** 可替换资源矩阵  $RR$ 。在任务资源关联矩阵  $RA$  中描述的是与任务关联程度最高的制造资源, 可对这一制造资源进行替换, 以选择优质的制造资源。假定有  $m$  种制造资源, 资源间的替换关系用矩阵  $RR$  表示, 满足  $RR=RR^T=(rr_{ij})_{m \times m}$ ,  $rr_{ij} \in \{0, 1\}$ ; 当  $rr_{ij}=0$  时制造资源  $r_i$  和  $r_j$  不可替换, 当  $rr_{ij}=1$  时制造资源  $r_i$  和  $r_j$  可以替换。

**定义 3** 决策变量矩阵。决策变量矩阵属于 0-1 矩阵, 用于描述两变量之间的归属关系。其中:

(1) 任务资源矩阵  $SR$  用于描述订单任务对应的制造资源, 若订单任务  $s_i$  需要制造资源  $r_j$ , 则矩阵元素为 1, 否则为 0, 满足  $SR=(sr_{ij})_{n \times m}=\{0, 1\}$ 。

(2) 任务工序矩阵  $SP$  用于描述订单任务对应的工序段, 若订单任务  $s_i$  需要进行工序段  $p_j$  的加工, 则矩阵元素为 1, 否则为 0, 满足  $SP=(sp_{ij})_{n \times g}=\{0, 1\}$ 。

(3) 主体资源矩阵  $OR$  用于描述制造主体提供的制造资源, 若制造主体  $b_i$  提供制造资源  $r_j$ , 则矩阵元素为 1, 否则为 0, 满足  $OR=(or_{ij})_{a \times m}=\{0, 1\}$ 。

(4) 主体工序矩阵  $OP$  用于描述制造主体能完成的加工工序段, 若制造主体  $b_i$  能完成工序段  $p_j$  的加工, 则矩阵元素为 1, 否则为 0, 满足  $OP=(op_{ij})_{a \times g}=\{0, 1\}$ 。

**定义 4** 任务工期矩阵  $TS$ 。 $TS$  由两部分构成, 即  $TS=[TSL^T \ TSD^T]$ , 其中:  $TSL$  表示订单任务工序段的加工时间, 满足  $TSL=(ttl_{ij})_{g \times n}$ ;  $TSD$  表示外协订单任务的最大交货期限, 满足  $TSD=(ttd_{ij})_{1 \times n}$ 。在矩阵  $TSL$  和  $TSD$  中, 若订单任务  $s_i$  不存在工序段  $p_j$ , 则对应的矩阵元素为 0。

**定义 5** 闲置时段矩阵  $TU$ 。 $TU$  描述制造主体的闲置加工时段, 加工时段按任务工期矩阵  $TSD$  的最大交货期限划分。假定最大交货期限为  $d$ , 则  $TU=(ut_{ij})_{l \times d}$ , 满足  $ut_{ij} \in \{0, 1\}$ , 其中  $ut_{ij}=0$  表示制造主体  $o_i$  在时段  $j$  忙碌,  $ut_{ij}=1$  表示制造主体  $o_i$  在时段  $j$  空闲。

**定义 6** 工序质量矩阵  $QP$ 。 $QP$  由工序达成质量矩阵及任务最低要求质量矩阵构成, 具体描述为  $QP$

$=[QPGQPR]$ , 满足  $QPG=(qpg_{ij})_{n \times g}, qpg_{ij} \in (0, 1)$ ;  $QPR=(qpr_{ij})_{n \times g}, qpr_{ij} \in (0, 1)$ 。假定制造主体  $b_l$  的工序质量满足矩阵  $QPM(b_l)=(qpm_{lij})_{n \times g}, qpm_{lij}$  表示制造主体  $b_l$  加工订单任务  $s_i$  的工序段  $p_j$  的达成质量要求, 满足  $qpm_{lij} \in (0, 1)$ , 则订单任务  $s_i$  的工序段  $p_j$  的任务达成质量矩阵元素可表示为

$$qpg_{ij} = \sum_{l=1}^a x(s_i, p_j, b_l) qpm_{lij} \quad (20)$$

**定义 7** 资源采购成本矩阵  $CR$ 。 $CR$  描述制造主体  $b_l$  所拥有的制造资源及提供制造资源  $r_j$  的采购成本, 满足  $CR=(cr_{ij})_{a \times m}$ , 若制造主体  $b_l$  不能提供制造资源  $r_j$ , 则对应的矩阵元素  $cr_{ij}=0$ 。

**定义 8** 工序加工时间—成本矩阵  $CP$ 。 $CP=[CPTCPC]$ , 其中:  $CPT$  体现制造主体  $b_l$  完成订单任务  $s_i$  的工序段  $p_j$  所需的加工时间, 满足  $CPT(b_l)=(cpt_{ij})_{n \times g}$ ;  $CPC$  体现制造主体  $b_l$  完成订单任务  $s_i$  的工序段  $p_j$  所需要的加工成本, 满足  $CPC(b_l)=(cpc_{ij})_{n \times g}$ ; 若制造主体  $b_l$  不能进行订单任务  $s_i$  的工序段  $p_j$  的加工, 则对应的矩阵元素  $cpt_{ij}=cpc_{ij}=0$ 。

**定义 9** 运输时间—成本矩阵  $CT$ 。 $CT=[CTTCTC]$ , 制造主体  $b_i$  与  $b_j$  以合同的形式订立单位工程量的运输成本, 组成运输时间矩阵  $CTT$  及运输成本矩阵  $CTC$ , 满足  $CTT=(ctt_{ij})_{a \times a}$ ,  $CTC=(ctc_{ij})_{a \times a}$ , 同时  $CTT$  和  $CTC$  对角线上的矩阵元素为 0。

### 4.2 算法求解

在求解多主体外协订单任务制造资源配置模型时, 需要以单主体订单任务及制造资源排序模型的结果为输出, 文中假定各制造主体已根据式(1)和式(7)分别计算出订单任务单位时间成本收益排序  $TSR$  和制造资源的排序  $NR$ , 并确定了需要外协的订单任务和制造资源, 以下是算法的详细求解步骤:

**步骤 1** 算法参数及编码。算法参数主要包括定义的各项参数矩阵、多目标权重  $W$ 、算法最大迭代次数  $MaxGen$ 、群体规模  $PopSize$ 、交叉概率  $P_c$  和变异概率  $P_m$  等。编码方式包括整数编码、浮点数编码和混合编码等。一个有效的染色体编码方案需要合法、可行、有效地对解空间进行完整地描述。根据多主体外协订单任务制造资源配置模型的特点, 本文采用整数编码方式, 一个完整的染色体编码包括订单任务编码、任务工序编码、多主体编码、制造资源编码、加工工序编码和加工资源编码, 详细编

码方案如表 1 所示。

表 1 染色体编码方案

序号	名称	编码方案
1	订单任务编码	$1, 2, \dots, n$ ; 染色体第 $i$ 个基因位表示第 $i$ 个订单任务
2	工序编码	$1, 2, \dots, g$ ; 染色体第 $j$ 个基因位表示第 $j$ 个工序
3	多主体编码	$1, 2, \dots, a$ ; 染色体第 $l$ 个基因位表示第 $l$ 个制造主体
4	制造资源编码	$1, 2, \dots, m$ ; 染色体第 $k$ 个基因位表示第 $k$ 个制造资源
5	加工工序编码	$MP=(mp_{ij})_{n \times g}$ ; 染色体 $MP$ 上的每一个基因位 $mp_{ij}$ 代表一个制造主体编码
6	加工资源编码	$MR=(mr_{ij})_{n \times m}$ ; 染色体 $MR$ 上的每一个基因位 $mr_{ij}$ 代表一个制造主体编码

**步骤 2** 初始化种群  $PopGen$ 。 $PopGen=[MP\_PopGen MR\_PopGen]$ , 其中:  $MP\_PopGen$  为加工工序种群,  $MR\_PopGen$  为加工资源种群, 在初始化种群时, 既要保证染色体的随机性, 也要保证染色体的合法性。初始化的关键是加工工序编码和加工资源编码, 其初始化规格如表 2 所示, 满足  $MP \in MP\_PopGen, MR \in MR\_PopGen$ 。在群体初始化过程中, 可能产生不满足约束的个体, 采用的方式是重新初始化个体, 直到满足约束条件。

表 2 种群初始化方法

序号	名称	初始化方法
1	加工工序编码 $MP=(mp_{ij})_{n \times g}$	生成随机矩阵 $MPD=(mpd_{ij})_{n \times g}$ , $MPD$ 中每一列元素对应主体工序矩阵 $OP=(op_{ij})_{a \times g}$ 相同列元素中为 1 的制造主体编码, 则 $MP=SP \cdot MPD$
2	加工资源编码 $MR=(mr_{ij})_{n \times m}$	生成随机矩阵 $MRD=(mrd_{ij})_{n \times m}$ , $MRD$ 每一列元素对应主体资源矩阵 $OR=(or_{ij})_{a \times m}$ 相同列元素中为 1 的制造主体编码, 则 $MRD=SR \cdot MRD$

**步骤 3** 算法终止条件。目标函数的最小值难以确定, 为避免算法无限循环, 通过设置合理的最大迭代次数  $MaxGen$  作为终止判断条件, 迭代次数  $gen > MaxGen$  时算法终止。

**步骤 4** 染色体解码与适应度评估, 染色体的解码过程与编码过程相反, 由于一个完整的染色体

编码包括订单任务编码、任务工序编码、多主体编码、制造资源编码、加工工序编码和加工资源编码,在染色体解码时,根据每一个编码反推某一染色体对应的不同订单信息、工序信息和制造资源信息等,从而利用适应度函数进行评估;适应度函数由目标函数转化而来,由于求解模型为最小化多目标问题,对多目标进行标准化无量纲处理,转化后的染色体适应度函数为

$$f(x) = w_1 \frac{T_{\max} - T(x)}{T_{\min}} + w_2 \frac{Q_{\max} - Q(x)}{Q_{\min}} + w_3 \frac{C_{\max} - C(x)}{C_{\min}}, x \in X. \quad (21)$$

式中:  $X$  为染色体群体,  $T_{\min} = \min T(X)$ ,  $Q_{\min} = \min Q(X)$ ,  $C_{\min} = \min C(X)$ ,  $T_{\max} = \max T(X)$ ,  $Q_{\max} = \max Q(X)$ ,  $C_{\max} = \max C(X)$ 。在求解  $\{T_{\min}, Q_{\min}, C_{\min}\}$  和  $\{T_{\max}, Q_{\max}, C_{\max}\}$  时,根据初始种群对其初始值进行初始化,在进化过程中与当前群体的最小、最大目标值进行比较替换。

**步骤 5 最优保存策略。**从  $PopGen$  中选出适应度最高的个体  $CurrentBestPop$  与全局最优个体  $BestPop$  进行比较,若  $f(CurrentBestPop) > f(BestPop)$ ,则用  $CurrentBestPop$  替换  $BestPop$ 。

**步骤 6 聚类分组轮盘赌选择。**采用分组轮盘赌选择方法,将染色体按适应值大小进行分组,再采用轮盘赌方法进行选择,避免超级个体的过多繁殖,保持种群的多样性。

(1)对  $PopSize$  个群体,按其适应度的大小划分聚类数  $K$ ,满足  $PopGen = FS_1 \cup FS_2 \cup \dots \cup FS_K$ ,并随机给定  $K$  个聚类的初始聚类中心  $f_1, f_2, \dots, f_K$ 。

(2)将群体中的每个个体按最小距离原则分配邻近聚类。如果  $f(x_i) - f_k = \min |f(x_i) - f_k|$ ,其中  $f_k \in \{f_1, f_2, \dots, f_K\}$ ,则  $x_i \in FS_k$ 。

(3)使用每个聚类样本的适应度均值  $f'_k = [f(x_1) + f(x_2) + \dots + f(x_j)]/j$  作为新的聚类中心。

(4)聚类中心与上一聚类中心相同,输出  $K$  个聚类,否则转(2)。

**步骤 7 多点序列交叉。**交叉是以一定的概率  $P_c$  对染色体基因进行重组,生成新的染色体子代。本文根据染色体结构,采用多点序列交叉方式随机生成交叉点,交叉过程如图 2 所示。用亲代替换交叉后不满足约束的个体,作为下一代个体。

**步骤 8 多点随机变异。**变异是以一定的概率

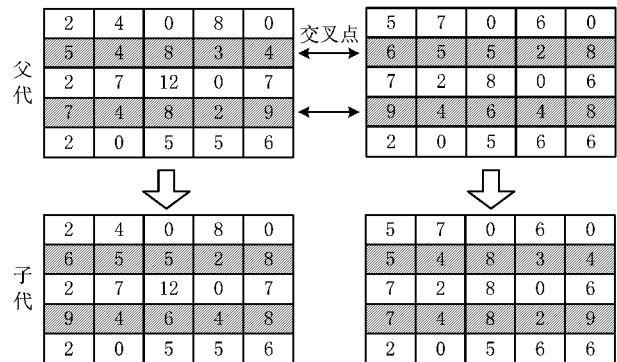


图2 染色体交叉操作

$P_m$  改变染色体中基因位的值,生成新的染色体子代。染色体中为 0 的基因位称为虚拟基因位,不进行变异。在加工工序染色体中,虚拟基因位表示订单任务不包含某工序段;在加工资源染色体中,虚拟基因位表示订单任务不包含某制造资源。在变异时,以染色体的每一行为对象,随机生成变异基因数和基因位,同时保证变异基因位在合法的制造主体编码中,并满足主体资源矩阵  $OR$  和主体工序矩阵  $OP$  的要求。对变异后不满足约束的个体,将变异前的个体作为子代。

**步骤 9 形成下一代群体  $NewPopGen$ , 转步骤 3。**

## 5 应用算例

天津某建材装备制造集团是按专业化分工原则,集旗下全部装备资源组建的从事建材装备产业的高新技术集团制造企业,集团中的各制造主体共享设备、原材料等制造资源,为了合理利用集团各主体的闲置制造资源,订单任务在集团各制造主体进行外协制作。文中以其外协订单任务制造资源的配置为例,对所提出的多主体外协订单任务制造资源配置模型进行验证。假定在某配置时刻  $t$ ,各主体提交的外协订单任务需求序列为  $S_1, S_2, \dots, S_8$ ,对应的工序集合依次为  $\{P_1, P_3, P_4, P_6, P_7, P_8, P_9\}$ ,  $\{P_4, P_5, P_6, P_8, P_9, P_{10}\}$ ,  $\{P_{11}, P_{12}, P_{13}, P_{14}, P_{15}\}$ ,  $\{P_1, P_3, P_4, P_6, P_7, P_9\}$ ,  $\{P_{10}, P_{11}, P_{12}, P_{13}, P_{14}, P_{15}\}$ ,  $\{P_3, P_{14}, P_5, P_9, P_{12}\}$ ,  $\{P_3, P_4, P_5, P_6, P_{13}, P_9\}$ ,  $\{P_2, P_5, P_6, P_4, P_7, P_3, P_{12}\}$ ;外协制造资源需求序列为  $R_1, R_2, R_3, R_4$ ,参与外协订单任务制造资源配置的主体为  $B_1, B_2, B_3, B_4, B_5$ 。各主体的需求集合依次为  $\{S_1, S_2, S_3, R_1\}$ ,  $\{S_4, S_5\}$ ,  $\{S_6, S_7\}$ ,  $\{S_8, R_2\}$ ,  $\{R_3, R_4\}$ ,其他参与配置的制造资源为



$R_5, R_6, \dots, R_{10}$ 。根据以上参数的基本描述定义各主体编号依次为 1, 2, 3, 4, 5, 制造资源编号依次为 1, 2,  $\dots$ , 12, 工序编号依次为 1, 2,  $\dots$ , 15, 具体的实例参数如表 3~表 6 所示。由于算法设置的参数会影响配置结果,主要体现在算法的过早收敛或不收敛,导致无法获取最优解,目前仍无相关的理论对算法的参数进行选取,一般是根据经验,经过反复算法参数试验得到。文本确定遗传算法的相关参数为:最大迭代次数  $MaxGen=500$ , 群体规模  $PopSize=200$ , 交叉概率  $P_c=0.85$ , 变异概率  $P_m=0.05$ ; 多目标权重  $w_1=0.4, w_2=0.3, w_3=0.3$ 。经过 10 次的算法迭代搜索,得到种群中的最优适应度为 1.565, 对应的  $(T, Q, C)$  为  $(20, 47.41, 103.065)$ , 算法运行的平均时间为 23.652 s, 进化曲线如图 3 所示。其中:图 3a 表示最优个体适应度的进化曲线,图 3b~图 3d 分别表示种群平均外协订单任务延时、质量及成本目标的进化曲线。群体进化到 50 代时趋于稳定,表 7 所示为外协订单任务制造资源配置结果。本文算法的一个典型特点就是采用了聚类分组轮盘赌选择,为了分析算法的效率,在所有参数

相同的前提下与基本轮盘赌选择方式进行了比较,经过 10 次运算,基本轮盘赌选择的最优适应度为 1.433, 对应的  $(T, Q, C)$  为  $(21, 47.489, 110.275)$ , 算法运行的平均时间为 23.875 s。算法进化对比曲线如图 4 所示,从图中可以看出,本文所提算法具有更好的收敛性能和求解效率。

表 3 订单任务制造资源相关数据

资源编号	可替换资源编号	提供资源外协主体编号	制造资源单位采购成本/元
1	—	1,2,3,4,5	420,400,390,430,400
2	6,8	1,4	820,800
3	4,6	1,2,3,5	900,820,850,880
4	3,6	2,4,5	900,950,940
5	6,7	1,2,3,4,5	1 000,1 200,980,1 250,1 300
6	2,5,7	2,4,5	850,900,870
7	5,6	1,2,3,4,5	1 200,1 250,1 080,1 350,1 400
8	9	3,5	800,850
9	—	1,2,3,4,5	600,680,740,600,740
10	—	1,2,4,5	400,500,480,440

表 4 工序相关数据

工序编号	提供主体编号	工序成本/元	时间/d	质量/%
1	1,2,3,4,5	300,345,325,420,385	4,5,3,6,6	99,98,99,96,95
2	1,2,4,5	1 200,1 300,1 400,1 420	5,4,5,7	97,96,97,99
3	1,2,3,4,5	800,875,865,880,875	4,5,7,4,7	97,98,96,96,99
4	1,3,4,5	445,385,420,395	2,1,2,3	99,98,96,95
5	1,2,3,4	945,925,925,970	5,4,6,6	97,98,99,96
6	1,2,3,4,5	700,645,625,620,685	3,4,3,5,4	98,98,98,96,98
7	1,2,3,4,5	300,345,325,420,385	4,5,3,6,6	99,98,99,96,95
8	1,2,3,5	800,845,825,820	5,5,4,6	98,98,97,96
9	2,3,4,5	445,425,440,390	2,1,3,2	97,96,98,95
10	1,2,3,4,5	2 300,2 345,2 050,2 420,2 390	8,7,8,6,9	98,98,99,98,99
11	1,2,4	400,445,395	1,2,1	99,98,98
12	1,2,3,4,5	600,645,620,620,635	3,4,3,4,4	99,99,97,98,98
13	1,3,4,5	700,745,725,720	3,4,4,5	98,96,96,96
14	1,2,4,5	4 000,4 350,4 325,4 500	10,8,9,10	99,98,99,95
15	1,2,3,4,5	200,245,225,290,285	2,4,3,2,2	99,98,99,96,95

表 5 订单任务相关数据

任务编号	最晚交货期/天	最大成本/元	最小合格率/%	工程量/t	资源编码序列及数量	工序编码序列
1	35	16 000	99	3.0	1,3,4,6,7,8,10;2,4,3,1,3,4,5	1,3,4,6,7,8,9
2	30	12 000	98	2.0	1,5,6,7;2,6,10,4	4,5,6,8,9,10
3	24	13 000	97	1.0	3,4,5,6,7;1,3,4,4,1	11,12,13,14,15
4	25	9 500	98	0.5	1,3,5,7,9;3,9,5,1,2	1,3,4,6,7,9
5	30	18 500	99	3.0	4,5,7,8;2,1,2,4	10,11,12,13,14,15
6	30	15 000	99	2.0	1,3,5,6,7;3,5,2,1,3	3,14,5,9,12
7	25	13 500	99	4.0	7,8,9;2,1,3	3,4,5,6,13,9
8	35	13 500	99	1.5	2,3,5,6,8,9;4,3,1,2,2,1	2,5,6,4,7,3,12
9	6	600	99	3.0	1;1	—
10	5	1 000	99	1.0	2;1	—
11	8	1 200	98	3.0	3;1	—
12	2	1 500	96	2.0	4;1	—

表 6 外协主体相关数据

主体编号	忙碌时段	运输时间/d	单位工程量运输费用/元
1	1,12,14,16	0,1,3,4,4	0,100,200,400,450
2	1,2,3,5,7,14,16	1,0,1,2,1	100,0,300,200,350
3	9,12,14	3,1,0,4,2	200,300,0,300,200
4	2,4,6,7,8,9,10,11,12,13,15,17,18,19,20	4,2,4,0,3	400,200,300,0,100
5	3,4,7	4,1,2,3,0	450,350,200,100,0

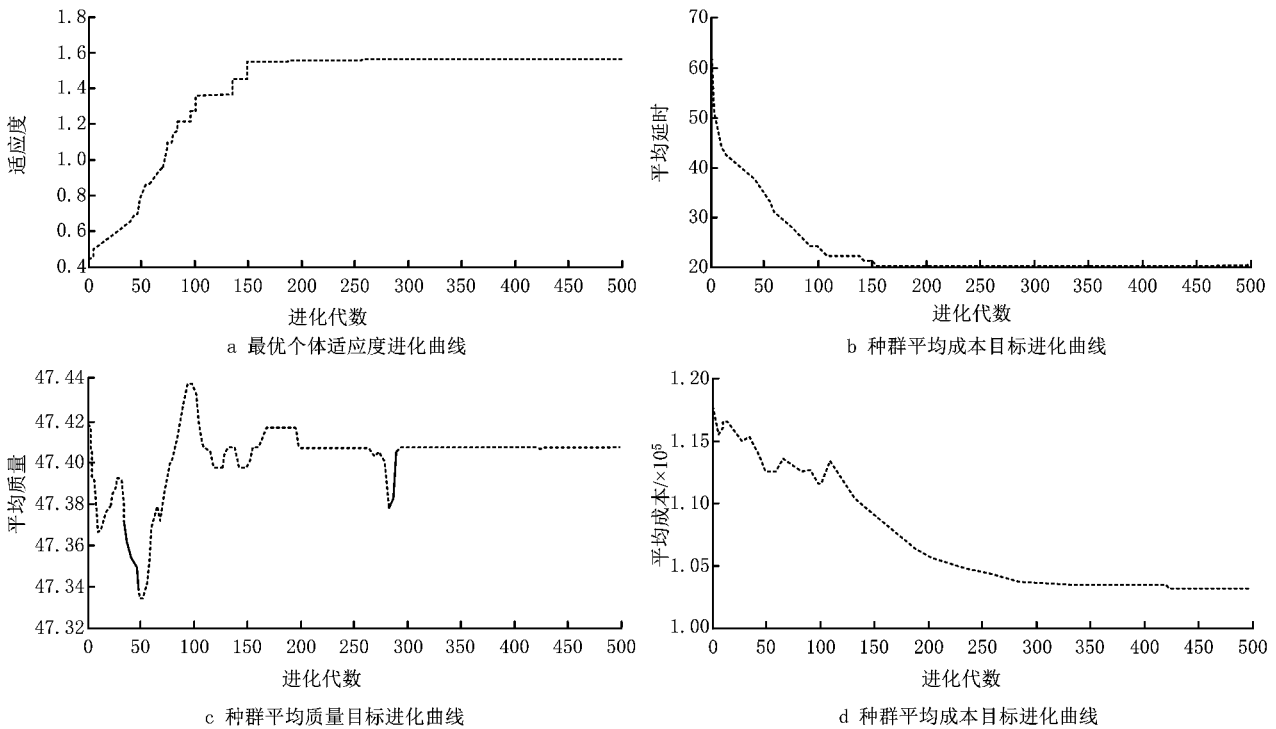


图3 遗传算法进化曲线

表 7 多主体外协订单制造资源配置结果

任务编号	工序配置结果(工序编号,主体编号)	资源配置结果(资源编号,主体编号)	T/d	Q/%	C/元
1	(1,3)(3,4)(4,3)(6,3)(7,3)(8,3)(9,5)	(1,3)(3,1)(4,3)(6,2)(7,3)(8,5)(10,1)	0	6.90	13 850
2	(4,3)(5,2)(6,3)(8,3)(9,3)(10,4)	(1,2)(5,2)(6,4)(7,2)	0	5.94	11 765
3	(11,4)(12,3)(13,5)(14,5)(15,4)	(3,2)(4,2)(5,3)(6,4)(7,5)	0	4.99	12 870
4	(1,3)(3,4)(4,3)(6,5)(7,3)(9,5)	(1,2)(3,2)(5,1)(7,4)(9,1)	0	5.97	7 805
5	(10,4)(11,4)(12,1)(13,1)(14,2)(15,1)	(4,2)(5,1)(7,2)(8,3)	0	5.89	16 290
6	(3,5)(5,2)(9,5)(12,1)(14,2)	(1,4)(3,2)(5,3)(6,2)(7,3)	0	4.92	13 550
7	(3,1)(4,3)(5,1)(6,1)(9,3)(13,1)	(7,3)(8,3)(9,5)	3	5.91	10 880
8	(2,1)(3,4)(4,3)(5,2)(6,1)(7,3)(12,1)	(2,1)(3,3)(5,1)(6,5)(8,5)(9,4)	17	6.90	13 015
9	—	(1,1)	0	0	420
10	—	(2,4)	0	0	800
11	—	(3,5)	0	0	880
12	—	(4,5)	0	0	940

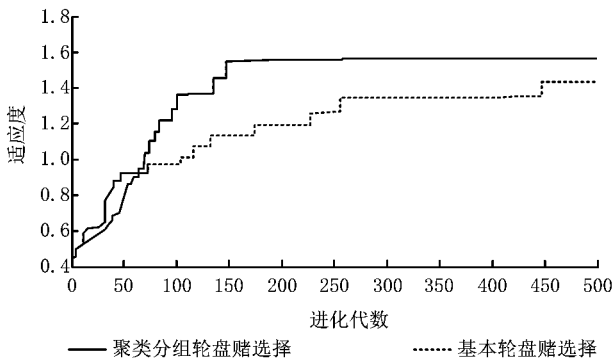


图4 算法对比曲线

## 6 结束语

本文针对集团制造企业的制造资源配置要求,提出面向多主体的外协订单任务制造资源配置模型,该模型将整个配置过程划分为单主体订单任务及制造资源排序阶段和多主体订单任务制造资源配置阶段。同时,提出了基于成本—工期—收益的订单任务排序方法,在此基础上,结合 PageRank 算法对订单任务制造资源进行排序,作为多主体外协订单任务制造资源配置的依据,构建了一套基于工期质量成本(Time-Quality-Cost, TQC)目标体系的多主体外协订单任务制造资源配置模型及其求解算法,将订单任务制造资源的排序及制造资源配置相结合。该理论模型和方法具有以下特点和优势:

(1)结合集团制造企业多主体订单任务管理的特点,针对多主体外协订单任务制造资源配置,提出两阶段的外协订单任务制造资源配置方法。

(2)考虑外协订单任务及制造资源的排序匹配度,体现制造资源在使用过程中的差异性和可替换性,更加全面地对订单任务制造资源进行优化配置。

(3)在配置模型中,外协订单任务以部件为对象,以工序向下细分,同时将外协订单任务虚拟为外协订单任务,可有效解决多主体间复杂产品的制造资源配置问题。

由于本文所提模型和方法仅适用于集团制造企业中多主体在某一时刻的外协订单任务和制造资源的配置,属于静态的制造资源配置方法,在外协订单任务及制造资源的配置过程中,不可避免地会出现冲突和变更,下一步的工作是考虑满足集团制造企业多主体外协订单任务制造资源配置的动态性和变更性,并对配置的结果进行评价。

## 参考文献:

[1] KANG Ling, CHEN Guisong, WANG Shilong, et al. Ontology based process resource discovery for cloud manufacturing [J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2013, 19 (9): 2325-2331 (in Chinese). [康玲, 陈桂松, 王时龙, 等. 云制造环境下基于本体的加工资源发现[J]. 计算机集成制造系统, 2013, 19(9): 2325-2331.]

[2] LI H, YANG W, ZHOU Z X, et al. Resource allocation models' construction for the reduction of undesirable outputs based on DEA methods [J]. Mathematical and Computer Modelling, 2013, 58(5/6): 907-1488.

[3] YANG Xin, CHEN Mou, FEI Shumin. Dynamic scheduling of production process of hybrid systems based on resource distribution in hybrid Petri nets [J]. Control Theory & Applications, 2011, 28(2): 173-178 (in Chinese). [杨欣, 陈谋, 费树岷. 资源配置混杂 Petri 网的混杂系统生产过程动态调度[J]. 控制理论与应用, 2011, 28(2): 173-178.]

[4] LIU Jianhua, TONG Weiqin. Service-oriented dynamic resource configuration optimization scheme in RFID system [J]. Journal on Communications, 2012, 33 (8): 93-105 (in Chinese). [刘建华, 童维勤. RFID 系统中面向服务的动态资源配

- 置优化机制[J]. 通信学报, 2012, 33(8): 93-105. ]
- [5] CHEN Bing, LIU Kai, YANG Ting. Non-cooperative game for manufacturing resources configuration driven by job load competition[J]. China Mechanical Engineering, 2013, 24(2): 233-239(in Chinese). [陈冰, 刘凯, 杨挺. 任务负载竞争下制造资源配置的非合作博弈方法[J]. 中国机械工程, 2013, 24(2): 233-239. ]
- [6] FANG Yadong, DU Laihong, HE Yanli. Application of ant colony algorithm and grey relation theory in manufacturing resource optimization configuration [J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2009, 15(4): 705-711 (in Chinese). [房亚东, 杜来红, 和延立. 蚁群算法及灰色理论在制造资源配置中的应用[J]. 计算机集成制造系统, 2009, 15(4): 705-711. ]
- [7] SUN Weihong, FENG Yixiong. Networked manufacturing resource optimized allocation for mass customization[J]. Journal of Nanjing University of Science and Technology: Natural Science, 2010, 34(2): 238-247 (in Chinese). [孙卫红, 冯毅雄. 面向大规模定制的网络制造资源优化配置[J]. 南京理工大学学报: 自然科学版, 2010, 34(2): 238-247. ]
- [8] WANG Zhengcheng, PAN Xiaohong, PAN Xuwei. Resource service chain construction for networked manufacturing based on antcolony algorithm[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2010, 26(1): 174-181 (in Chinese). [王正成, 潘晓弘, 潘旭伟. 基于蚁群算法的网络化制造资源服务链构建[J]. 计算机集成制造系统, 2010, 26(1): 174-181. ]
- [9] WANG K J, LIN Y S, CHEN F C, et al. A fuzzy knowledge resource allocation model of the semiconductor final test industry[J]. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 2009, 25(1): 32-41.
- [10] JAVIER E, ARTURO M, GUILLERMO J, et al. A tenant-based resource allocation model for scaling software-as-a-service applications over cloud computing infrastructures[J]. Future Generation Computer Systems, 2013, 29(1): 273-286.
- [11] WANG Shilong, SONG Wenyan, KANG Ling, et al. Manufacturing resource allocation based on cloud manufacturing [J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2012, 18(7): 1396-1405 (in Chinese). [王时龙, 宋文艳, 康玲, 等. 云制造环境下的制造资源优化配置研究[J]. 计算机集成制造系统, 2012, 18(7): 1396-1405. ]
- [12] LI Haibo. Approach to multi-granularity resource composition based on workflow in cloud manufacturing[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2013, 19(1): 210-216 (in Chinese). [李海波. 云制造环境下基于工作流的多粒度资源组合方法[J]. 计算机集成制造系统, 2013, 19(1): 210-216. ]
- [13] WANG Song, LI Yunlong, CHEN Fumin. Process planning and resource allocation in aircraft connection assembly based on polychromatic set[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2013, 19(2): 411-420 (in Chinese). [王颂, 李云龙, 陈富民. 基于多色集合的飞机连接装配工艺规划与资源配置[J]. 计算机集成制造系统, 2013, 19(2): 411-420. ]
- [14] THIAGARASU V, DEVI T. Multi-agent coordination in project scheduling: priority rules based resource allocation [J]. International Journal of Recent Trends in Engineering, 2009, 1(2): 42-46.
- [15] LIU Y, MOHAMED Y. Multi-agent resource allocation (MARA) for modeling construction process [C]//Proceedings of the 40th Conference on Winter Simulation. Washington, D. C., USA: IEEE, 2008: 2361-2369.
- [16] TREVOR C, LUKE J, JONATHAN P H. Multi-agent allocation of markov decision process tasks [C]//Proceedings of 2013 American Control Conference. Washington, D. C., USA: IEEE, 2013: 236-2361.
- [17] LI Yingzi, ZHANG Shuo, ZHANG Xiaodong. Multi-agent resource allocation in collaborative product development process [J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2013, 19(9): 2141-2147 (in Chinese). [李英姿, 张硕, 张晓冬. 面向协同产品开发过程的多主体资源配置[J]. 计算机集成制造系统, 2013, 19(9): 2141-2147. ]
- [18] YIN Sheng, YIN Chao, LIU Fei, et al. Optimal allocation model and its genetic algorithms of outsourcing production resources in multi-task [J]. Journal of Chongqing University, 2010, 33(3): 50-55 (in Chinese). [尹胜, 尹超, 刘飞, 等. 多任务外协加工资源优化配置模型及遗传算法求解[J]. 重庆大学学报, 2010, 33(3): 50-55. ]
- [19] LIU Dongbo, CHEN Yujuan, ZHANG Ziqiang, et al. Virtual enterprise dynamic supervision mechanism based on the third supervisory organization [J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2009, 15(10): 2073-2079 (in Chinese). [刘东波, 陈玉娟, 张自强, 等. 基于第三方监理组织的虚拟企业动态监督机制[J]. 计算机集成制造系统, 2009, 15(10): 2073-2079. ]
- [20] BUYYA R, YEO C S, VENUGOPAL S, et al. Cloud computing and emerging IT platforms: vision, hype, and reality for delivering computing as the 5th utility [J]. Future Generation Computer Systems, 2009, 25(6): 599-616.
- [21] TAO F, HU Y F, ZHOU Z D. Study on manufacturing grid & its resource service optimal-selection system [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2008, 37(9/10): 1022-1041.

### 作者简介:

杜百岗(1987—),男,湖南桃源人,博士研究生,研究方向:制造资源配置、企业信息化, E-mail: dbg767@163.com;  
 郭顺生(1963—),男,湖北武汉人,教授,博士生导师,研究方向:智能制造、制造业信息智能决策技术;  
 彭兆(1982—),男,湖北宜昌人,博士研究生,研究方向:制造业信息化关键技术、智能决策系统;  
 李益兵(1978—),男,安徽桐城人,副教授,博士,研究方向:企业信息化;  
 唐红涛(1987—),男,湖北荆州人,讲师,博士,研究方向:制造业信息化。