

[经营·管理]

DOI:10.3969/j.issn.1005-2895.2023.04.013

考虑并行制造的云服务外购件供应商组合优选

周姝含¹, 吉卫喜^{1,2*}, 卢璟钰¹, 崔志鹏¹

(1. 江南大学 机械工程学院, 江苏 无锡 214122;
2. 江南大学 江苏省食品制造装备重点实验室, 江苏 无锡 214122)

摘 要:云制造环境下,为解决并行结构下外购件供应商组合优选难的问题,在考虑并行制造的前提下,课题组以时间、成本、可靠性和灵活性为优化目标,构建了云服务多目标组合优选模型。提出了一种改进的非支配排序遗传算法(NSGA-III-TS)对模型进行求解,该算法采用反向学习策略提高初始解的质量;而后使用融合邻域搜索(采用交换、反转和插入3种方式)和禁忌搜索算法的策略加强局部搜索,提高算法后期局部寻优能力;对得到的一系列优选供应商组合综合评价,在考虑实际需求的基础上为需求方选出了最优供应商组合及备选方案。通过实际案例验证了该模型的有效性和算法的可行性。

关 键 词:云制造服务;组合优选;供应商;外购件;非支配排序遗传算法

中图分类号:TH186;TH165.4 文献标志码:A 文章编号:1005-2895(2023)04-0099-10

Combination Optimization of Cloud Service Outsourcing Parts Suppliers Considering Parallel Manufacturing

ZHOU Shuhan¹, JI Weixi^{1,2*}, LU Jingyu¹, CUI Zhipeng¹

(1. School of Mechanical Engineering, Jiangnan University, Wuxi, Jiangsu 214122, China;

2. Jiangsu Provincial Key Laboratory of Food Manufacturing Equipment, Jiangnan University, Wuxi, Jiangsu 214122, China)

Abstract: In the cloud manufacturing environment, in order to solve the problem of combination optimization of outsourced parts suppliers under the parallel structure, under the premise of considering parallel manufacturing, a cloud service multi-objective combination optimization model was constructed with time, cost, reliability and flexibility as the optimization objectives. An improved non-dominated sorting genetic algorithm (NSGA-III-TS) was proposed to solve the model, the reverse learning strategy was used to improve the quality of the initial solution. A strategy combining neighborhood search (exchange, inversion and insertion) and tabu search to strengthen local search was adopted to enhance the local optimization ability in the later stage of the algorithm. Based on the comprehensive evaluation of the obtained series of preferred supplier combinations, the optimal supplier combinations and alternatives were selected for the demand side on the basis of considering the actual demand. The validity of the model and the feasibility of the algorithm were verified by a practical case.

Keywords: cloud manufacturing service; combination optimization; supplier; purchased parts; NSGA (Non-dominated Sorting Genetic Algorithm)

高新制造技术和互联网技术的高速发展对传统生产方式产生了巨大的挑战,越来越多的企业在资源共享和分配、业务模式及信息传递等领域遇到诸多困难,

其发展受到了严重限制。云制造作为一种制造服务的新模式应运而生^[1-2],通过搭建资源共享平台,在充分利用制造资源的基础上实现制造资源集成共享。云制

收稿日期:2022-11-20;修回日期:2023-03-30

基金项目:山东省重大科技创新工程基金项目(2019JZZY020111)。

第一作者简介:周姝含(1998),女,江苏连云港人,硕士研究生,主要研究方向为智能制造。通信作者:吉卫喜(1961),男,江苏泰州人,博士,教授,博士生导师,主要研究方向为智能制造技术与集成制造技术、数字化制造技术。E-mail:ji_weixi@126.com

造服务组合是云制造环境下实现制造任务的主要方式,如何高效选择最符合实际需求的云服务组合方案是目前面临的难点。

为了强化自身的核心竞争力,越来越多的企业选择对非核心资源从外部供应商采购获得。合理选择外购件供应商对于产品性能的提升及成本的降低起到促进作用,这也使得供应商的选择成为产品制造中的重要决策问题。因此,在云制造环境下,云平台如何实现制造资源的分配共享,为服务需求方寻找最优外购件供应商服务组合成为关键。

现有的云制造供应商组合优选研究可分为优化组合模型研究和优化组合算法研究等。陈友玲等^[3]面向并行架构下的云服务组合优化问题,从协同效应角度建立了多供应商协同生产的任务分配模型。Hu等^[4]构建了一个多目标混合整数非线性规划模型以解决大规模定制的背景下服务商的最优选择难题。陈浩东等^[5]基于供应商选择的动态性和模糊性,对多周期内多渠道多产品供应商选择问题建模,使各周期内的总成本最小。刘桂森等^[6]为解决云制造服务组合多目标问题,提出了一种基于自适应选择方式的改进算法,提升了算法的综合性能。Cui等^[7]建立了一个混合整数规划模型以最大可能优化供应商的总利润,并通过混合约束规划和模拟退火算法求解该模型。Seghir等^[8]针对云服务组合问题将遗传算法与果蝇算法相结合,利用混合算法提高了算法的搜索效率和探索性。

上述研究在服务组合建模方面主要以时间、成本和质量等作为优化参数,较少考虑非功能性参数的影响。供应商组合的实现是一个多分布式资源共同协作的过程,在选择服务组合时有必要多方面考虑参考指标。在算法层面,现有文献在解决多目标优化问题时,大多忽略了解的多样性,追求单一的最优解;在数值实验阶段多数研究较为理想化,不能贴近实际的制造需求。在这种背景下,课题组提出在云制造环境下,考虑时间、成本、可靠性和灵活性的外供应商组合优选模型;采用一种改进的NSGA-III-TS算法求解模型,通过将禁忌搜索融合到精英策略中,加强局部搜索,采用反向学习策略初始化种群以提升初始种群的质量;在外

购件供应商决策阶段,基于需求方自身实际需求优选出多组方案进行排序,为选取最终组合方案提供参考。

1 问题描述

为了在云制造环境下,基于需求方自身实际并考虑多种条件进行供应商组合优选,服务需求方在云平台上发布服务需求,云平台对提供的要求依据规则分解,将分解后得到的子任务根据一定的流程规则从云资源库中获取对应每个子任务的候选服务集。资源组合优选阶段,在子任务的匹配选择上,云平台在多目标多约束下在候选资源库中搜索匹配一个服务提供方构成服务优选组合,该组合执行用户提交的总任务,云平台对整个服务组合过程进行跟踪与反馈。云平台运作流程如图1所示。

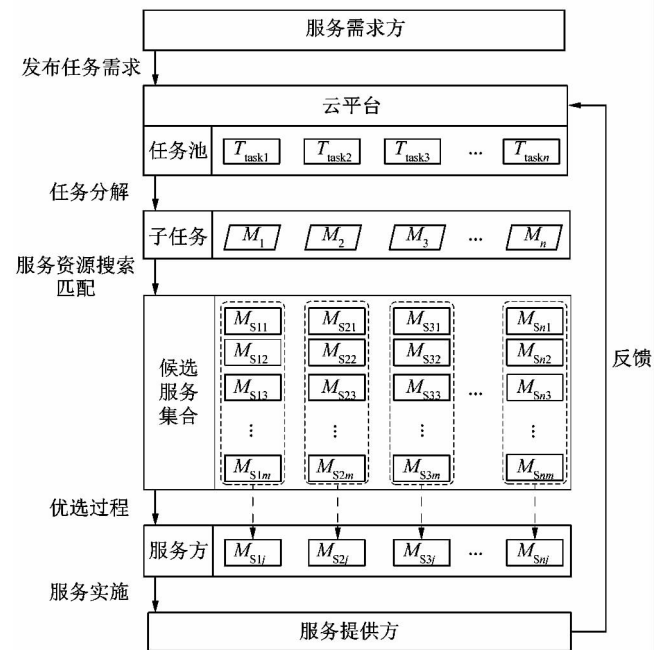


图1 云平台服务组合优选过程

Figure 1 Cloud platform service composition optimization process

云平台将用户发布的任务需求 M 分解为若干个子任务 $M = \{M_i\}, i = 1, 2, \dots, n; n$ 表示子任务数, M_i 表示第 i 个子任务。对于每个子任务,云平台为其搜索匹配符合其要求的制造资源形成需求服务集。资源库中各候选供应商表示为 $\{M_{ssi}\}, i = 1, 2, \dots, n$, 其中 M_{ssi} 表示第 i 个子任务 M_i 对应的候选供应商集。从上述候选供应商集中挑出一个候选供应商 M_{sij} 构成组合

序列,所构成的序列可表示为: $\{M_{Si1}, M_{Si2}, \dots, M_{Sij}, \dots, M_{Sin}\}$, M_{Sij} 为第 i 个候选供应商集 M_{SSi} 中的第 j 个候选供应商, $j=1, 2, \dots, m_i$, m_i 为候选供应商集 M_{SSi} 中候选供应商的个数。其目的是通过为每个子任务选择合适的供应商,使零部件供应商组合方案达到最优。

在云平台服务过程中,每个服务需求到云服务执行结束要经历需求分解、候选云服务资源推荐和服务组合优选等阶段;一个复杂的任务需求通常需要多个资源共同服务。考虑到服务组合过程的多变性及许多不稳定因素,在构建云服务组合模型前,做出如下假设条件:

- 1) 考虑到供应商的任务执行能力有限,一个供应商同时只能承接一个任务属下的子任务;
- 2) 不同供应商完成某一子任务的时间和成本不同,并且是确定的,提前已知;
- 3) 任务完成过程中的物流运输时间和物流运输成本提前已知;
- 4) 每个子任务可选的供应商有多种,但只能由一个供应商承接,且一旦承接不可被打断。

2 云服务供应商组合优选模型

需求方注重任务完成所需的时间、成本和质量等是否满足要求,而云平台考虑的是制造资源的服务能力,供应商的可靠性及灵活性这些指标综合反映了服务方的能力。因此,课题组以时间、成本、可靠性、灵活性为优化目标,在并行模式下构建云服务供应商组合优化模型。

定义决策变量:

$$x_{ij} = \begin{cases} 0, & \text{部件 } i \text{ 不选择供应商 } j; \\ 1, & \text{部件 } i \text{ 选择供应商 } j \text{ 服务。} \end{cases} \quad (1)$$

式中: $\sum_{j=1}^{m_i} x_{ij} = 1, \forall j \in \{1, 2, \dots, m_i\}$ 表示单个外购件只能选择一个相应的供应商为其提供资源服务。

2.1 供应商评价指标

1) 时间 T

时间 T 是指需求方从发布订单需求到供应商完成制造任务所耗费的时间,包括制造加工时间 T_1 、订单需求发布至供应商接收到订单信息的响应时间 T_2 、物流转运所需时间 T_3 (即供应商到需求方之间的物流

时间)。

$$T = T_1 + T_2 + T_3。 \quad (2)$$

2) 成本 C

成本指需求方通过云平台完成外购服务后需支付的费用,包括云平台线上产生的费用 C_1 、线下制造加工成本 C_2 、物流运输成本 C_3 。

$$C = C_1 + C_2 + C_3。 \quad (3)$$

3) 可靠性 R

可靠性表示供应商的可靠程度,表现在提供产品的质量及按时交货的能力等。

$$R = \alpha_1 R_1 + \alpha_2 R_2。 \quad (4)$$

式中: R_1 表示质检合格率; R_2 表示按时交货率; α_1 和 α_2 分别为相应指标的权重系数,且 $\alpha_1 + \alpha_2 = 1$ 。

4) 灵活性 F

活性表征了供应商的反应能力,即在制造过程中能够适当根据需求方的实际需求做出相应调整。

$$F = \beta_1 F_1 + \beta_2 F_2。 \quad (5)$$

式中: F_1 表示完成该任务的时间内成功解决意外发生情况的次数与意外情况发生次数的比值; F_2 表示供应商能够处理不可控情况使制造任务能够顺利完成的能力,由云平台系统测评并结合历史数据得出; β_1 和 β_2 分别为相应指标的权重系数,且 $\beta_1 + \beta_2 = 1$ 。

对于外购件供应商服务流程来说,其服务组合为并行模式^[9],各指标计算方法应考虑并行情况下的外购件供应商组合方案。

并行服务时间:

$$\max T(M_{Sij}) = \max \sum_{j=1}^{m_i} x_{ij} \cdot (T_1^{ij} + T_2^{ij} + T_3^{ij}), \quad i = 1, 2, \dots, n。 \quad (6)$$

并行服务成本:

$$\sum_{i=1}^n C(M_{Sij}) = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^{m_i} x_{ij} \cdot (C_1^{ij} + C_2^{ij} + C_3^{ij})。 \quad (7)$$

并行服务可靠性:

$$\sum_{i=1}^n R(M_{Sij})/n = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^{m_i} x_{ij} \cdot (\alpha_1 R_1^{ij} + \alpha_2 R_2^{ij})/n。 \quad (8)$$

并行服务灵活性:

$$\sum_{i=1}^n F(M_{Sij})/n = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^{m_i} x_{ij} \cdot (\beta_1 F_1^{ij} + \beta_2 F_2^{ij})/n。 \quad (9)$$

以上各式中: $T(M_{S_{ij}})$, $C(M_{S_{ij}})$, $R(M_{S_{ij}})$ 和 $F(M_{S_{ij}})$ 分别代表第 i 个候选供应商服务集 M_{SSi} 中第 j 个候选供应商完成任务所需的时间、成本、可靠性和灵活性; T_1^{ij} , T_2^{ij} 及 T_3^{ij} 分别代表第 i 个候选供应商服务集 M_{SSi} 中第 j 个候选供应商完成任务所需的响应时间、制造加工时间和物流转运时间; C_1^{ij} , C_2^{ij} 及 C_3^{ij} 分别代表第 i 个候选供应商服务集 M_{SSi} 中第 j 个候选供应商完成任务所需的云平台上费用、供应商的制造加工成本及运输所需的物流成本; R_1^{ij} 和 R_2^{ij} 分别代表第 i 个候选供应商服务集 M_{SSi} 中第 j 个候选供应商完成制造加工的质检合格率以及按时交货率; F_1^{ij} 和 F_2^{ij} 分别代表第 i 个候选供应商服务集 M_{SSi} 中第 j 个候选供应商的处理意外情况的能力和对不可预期的变化反应能力。

2.2 约束条件

供应商组合优选模型约束条件如下:

1) 最长交付期限

云平台服务提供方的最长总服务时间 T 不能超过需求方所规定的最长服务期限 $T_{\max}$, 即:

$$\max T(M_{S_{ij}}) \leq T_{\max} \quad (10)$$

2) 最高成本

云平台总服务费用 C 不超过需求方所规定的最高价格 $C_{\max}$, 即:

$$\sum_{i=1}^n C(M_{S_{ij}}) \leq C_{\max} \quad (11)$$

3) 最低可靠性

云平台中平均每个供应商的服务可靠性不低于需求者要求的最低可靠性 $R_{\min}$, 即:

$$\sum_{i=1}^n R(M_{S_{ij}})/n \geq R_{\min} \quad (12)$$

4) 最低灵活性

云平台中平均每个供应商的服务灵活性不低于需求者要求的最低灵活性 $F_{\min}$, 即:

$$\sum_{i=1}^n F(M_{S_{ij}})/n \geq F_{\min} \quad (13)$$

2.3 数学模型

云服务组合的总目标是使整个云制造任务完成的时间最短、成本最低、可靠性最高和灵活性最高。最终选出最合适的供应商组合, 达到需求方的服务要求。因此, 此问题为一个四维优化目标模型, 构建的数学模型

如下:

$$F = (\min f_T(M_S), \min f_C(M_S), \max f_R(M_S), \max f_F(M_S))。$$

其中:

$$\left. \begin{aligned} \min f_T(M_S) &= \max \sum_{j=1}^{m_i} x_{ij} \cdot (T_1^{ij} + T_2^{ij} + T_3^{ij}); \\ \min f_C(M_S) &= \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^{m_i} x_{ij} \cdot (C_1^{ij} + C_2^{ij} + C_3^{ij}); \\ \max f_R(M_S) &= \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^{m_i} x_{ij} \cdot (\alpha_1 R_1^{ij} + \alpha_2 R_2^{ij})/n; \\ \max f_F(M_S) &= \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^{m_i} x_{ij} \cdot (\beta_1 F_1^{ij} + \beta_2 F_2^{ij})/n; \\ i &= 1, 2, \dots, n。 \end{aligned} \right\} \quad (14)$$

$$\text{s. t.} \quad \left. \begin{aligned} f_T(M_S) &\leq T_{\max}; \\ f_C(M_S) &\leq C_{\max}; \\ f_R(M_S) &\geq R_{\min}; \\ f_F(M_S) &\geq F_{\min}。 \end{aligned} \right\} \quad (15)$$

对于上述模型, 定义 $X = \{M_{S_{11}}, M_{S_{12}}, \dots, M_{S_{ij}}, \dots, M_{S_{in}}\}$ 为该模型的可行解的集合。 $x_1, x_2 \in X$ 分别为 2 个外购件供应商组合方案, 当且仅当方案 x_1 对应的适应度函数值均小于等于方案 x_2 对应的适应度函数值, 且 x_1 至少存在一个目标函数值小于 x_2 对应目标函数值, 则称 x_1 帕累托优于 x_2 , 即 x_1 支配 x_2 。当不存在方案帕累托占优方案 x_1 时, 称 x_1 为帕累托最优解即非支配解, 帕累托最优解集由所有帕累托最优解构成。

通常在求解多目标优化问题时, 某一个目标的优化常伴随其他目标的劣化, 因此不存在解能使得所有目标均达到最优, 即文中构建模型的求解目的在于找到最接近帕累托解集的解集。

3 基于 NSGA-III 算法的模型求解

课题组所提出的模型属于多目标优化问题, 解决方法多采用进化多目标计算。2014 年 Deb 等^[10]在 NSGA-II 的基础上提出了 NSGA-III 算法, 后来被广泛应用于处理多目标优化问题。NSGA-III 采用基于参考点的选择方法, 使选择出的解分布得更加均匀, 更适用于高维目标的优化问题。

尽管 NSGA-III 在处理多目标优化问题中获得了良好效果, 但其优化质量有待提高。NSGA-III 的全局搜

索能力较强,但局部搜索能力有待提高,为平衡算法的全局搜索和局部搜索能力,课题组引入禁忌搜索算法^[11],采用反向学习策略获得更高质量的初始种群。使用改进后的 NSGA-III 算法求解外购件供应商组合模型的具体步骤如图 2 所示。

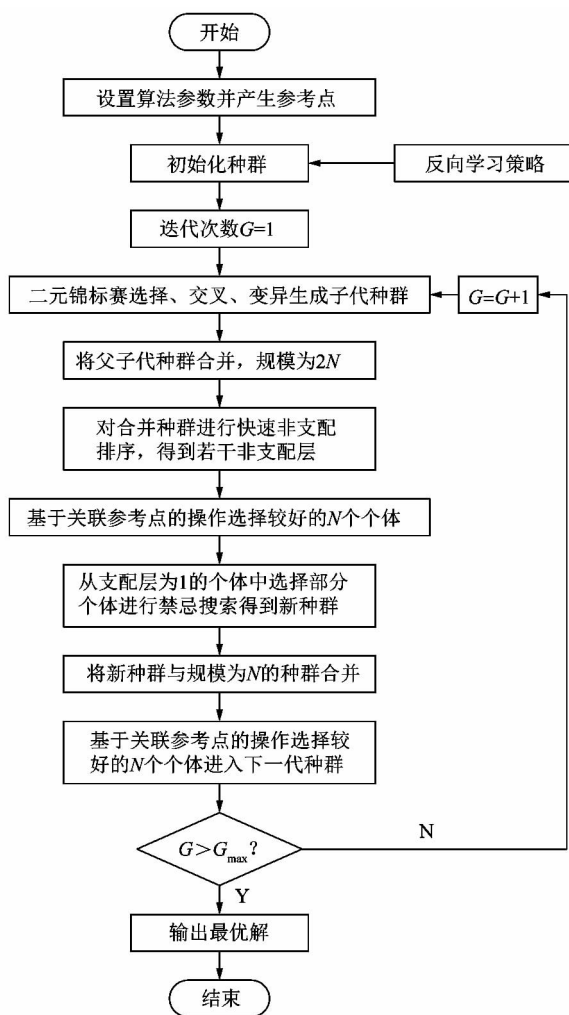


图 2 NSGA-III-TS 算法流程图

Figure 2 NSGA-III-TS algorithm flow chart

各步骤描述如下:

- 1) 初始化变异率、交叉率和迭代次数等参数生成参考点。
- 2) 采用反向学习策略初始化种群 P_t , 种群大小为 N , 计算种群的适应度。
- 3) 采用二元锦标赛法对种群 P_t 中的优秀个体进行均匀交叉和随机变异产生子代种群 Q_t ; 合并种群 P_t 和子代种群 Q_t , 得到规模为 $2N$ 的种群。
- 4) 对合并后的种群进行非支配排序并划分不同

的非支配层 $L_1, L_2, L_3, \dots$ 。

5) 从非支配层 1 开始将上一步骤 4) 中不同层的个体一层层地加入下一代种群, 直到前 L 层的种群规模大于或等于 N ; 若等于 N 则跳转至 7), 否则执行步骤 6)。

6) 对前 L 层的个体归一化, 关联参考点, 根据参考点的最小生境数在层内选择个体成为下一代种群, 使该种群的数量为 N 。

7) 取非支配层为 1 的部分个体进行禁忌搜索得到新种群。

8) 将禁忌搜索后得到的新种群与规模为 N 的种群合并。

9) 对合并后的种群执行步骤 4) 至 6), 使种群规模为 N 。

10) 判断是否运行到最大迭代次数, 若“是”则停止迭代, 若“否”则转步骤 3)。

3.1 编码方式

对云服务外购件供应商组合采用整数编码方式, 外购件表示染色体上的基因, 基因的数量为外购件的个数, 基因值对应该外购件选择的供应商序号。如图 3 所示, 供应商组合方案对应的编码序列为 [4 1 3 6 2], 图中的第 4 个外购件对应选择其候选供应商资源集中的第 6 个供应商为其服务。

4	1	3	6	2
---	---	---	---	---

图 3 供应商组合的染色体编码示意图

Figure 3 Schematic diagram of chromosome coding of supplier combination

3.2 遗传算法

3.2.1 初始化种群

算法初始种群的质量对算法的寻优性和搜索效率都有一定的影响, 随机产生初始种群难以保证种群个体的多样性, 因此课题组在算法的种群初始化阶段采用反向学习策略提高种群的质量, 同时扩大搜索空间。反向学习^[12]的主要思想是指在搜索的过程中同时考虑当前个体和它的反向个体, 通过计算适应度值选取质量更优的个体作为初始种群。

$$x'_i = x_{\max} + x_{\min} - x_i \quad (15)$$

式中: x_i 表示第 i 个初始个体, x'_i 表示根据反向学习生成的反向个体, $x_{\max}$ 和 $x_{\min}$ 分别表示个体向量元素取值的上界和下界。

3.2.2 交叉变异

整数编码较常采用的交叉方式有单点交叉、2点交叉和均匀交叉等,课题组对染色体中基因采取均匀交叉方式。变异操作采用随机变异,基于变异概率在编码串中随机选取某个基因进行变异。

3.3 邻域结构与禁忌搜索

课题组将禁忌搜索融合到精英策略中,进行局部搜索。父、子代合并后优选出下一代个体,选择下一代个体中的部分优秀个体进行禁忌搜索,合并将禁忌搜索得到的新个体与之前的下一代个体,再进行优选个体,从而增强解集的多样性。

3.3.1 初始解

课题组采用禁忌搜索进行局部搜索,由于初始解的质量对禁忌搜索的性能有很大的影响,随机生成初始解的可行性不高,因此初始解从支配层级为1的个体中选取。

3.3.2 产生邻域解

禁忌搜索的邻域结构是算法的关键部分,为了获取更优的邻域解,结合供应商组合特征,采用3种邻域搜索方式,分别是交换、插入和反转,如图4所示。

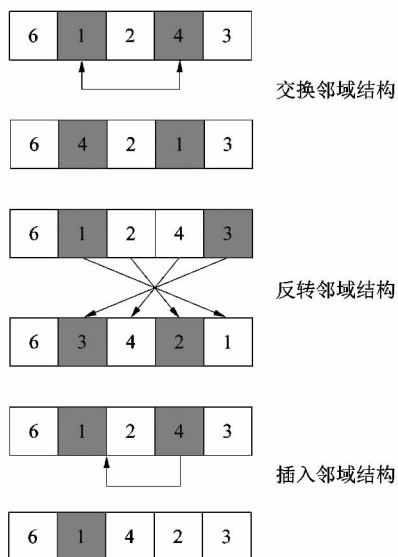


图4 交换、反转和插入的邻域搜索方式

Figure 4 Neighborhood search methods of exchange, inversion and insertion

3.3.3 禁忌表和禁忌长度

禁忌表存储了已经被搜索过的局部最优解,避免搜索陷入死循环,同时记录被优化的过程,避免陷入迂回操作。禁忌对象被禁止访问的次数为禁忌长度,本研究的禁忌长度为固定值。禁忌搜索的具体流程如图5所示。

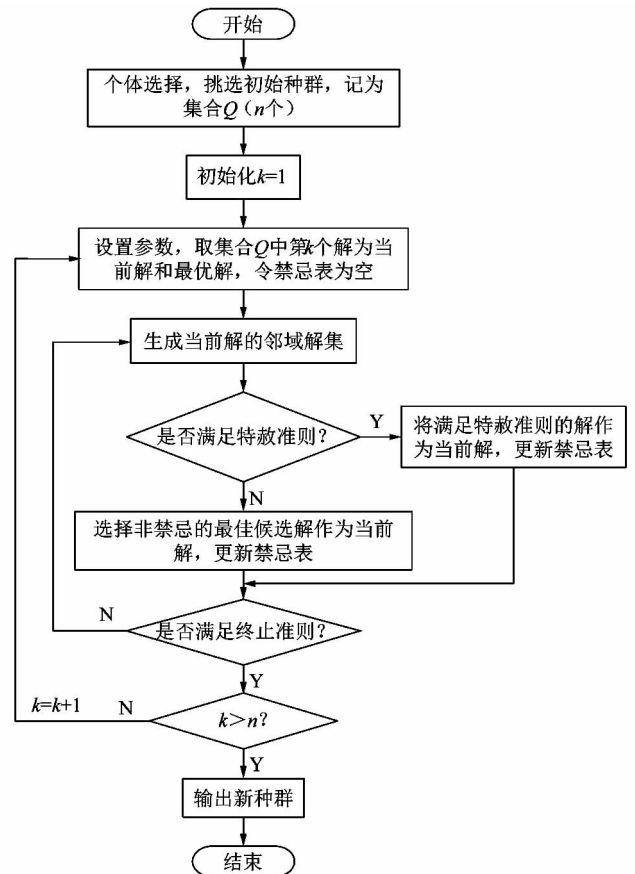


图5 禁忌搜索流程图

Figure 5 Tabu search flow chart

3.3.4 特赦准则

在迭代过程中,迭代的某一步会出现候选集的某个元素被禁忌的情况,为了跳出局部最优解,设置了特赦准则,当满足特赦准则时可以将该元素解除禁忌。本研究的特赦准则为目标函数的适应度函数值,若候选解的适应度值优于记录的最优目标值,则无论其是否被禁忌,都接受该解。

3.4 供应商优选策略

由于外购件供应商不同指标的量纲不同,没有可比性,无法直接计算,需针对其目标特性构建4个目标属性的效用函数以进行比较。效用高即属性值高的属

性为积极属性,反之为消极属性。根据本研究的外购件供应商目标属性特性划分积极属性为可靠性和灵活性,而消极属性则为时间和成本。根据以上分类,外购件供应商组合方案的第 k 个目标属性的效用函数可定义为:

$$U_k(f_k(M_s)) = \begin{cases} 1, & f_k^{\max}(M_s) - f_k^{\min}(M_s) = 1; \\ \frac{f_k(M_s) - f_k^{\min}(M_s)}{f_k^{\max}(M_s) - f_k^{\min}(M_s)}, & k \text{ 为积极属性}; \\ \frac{f_k^{\max}(M_s) - f_k(M_s)}{f_k^{\max}(M_s) - f_k^{\min}(M_s)}, & k \text{ 为消极属性}。 \end{cases} \quad (16)$$

式中: $f_k^{\max}(M_s)$ 和 $f_k^{\min}(M_s)$ 分别为供应商组合方案中在第 k 个目标属性上的最大值和最小值。

文中构建的成本 $f_c(M_s)$ 、时间 $f_T(M_s)$ 为消极目标属性,可靠性 $f_R(M_s)$ 、灵活性 $f_F(M_s)$ 为积极目标属性。

总体效用函数为:

$$U(M_s) = \sum_{k=1}^4 U_k(f_k(M_s)) \cdot \gamma_k \quad (17)$$

式中, γ_k 为相关指标的权重值,反映需求方在供应商组合优选的需求偏好,因此权重系数由企业根据自身实际需求确定。

4 实例验证与分析

以某玻璃幕墙有限公司的外购件供应商组合为背景,应用所提模型及算法验证其求解外购件供应商组合优选问题的有效性和可行性。

4.1 实例模型

该公司将其任务需求提交至云平台,云平台根据任务解析工具将任务分解。外购件子任务统计表如表1所示,5个子任务分配的候选资源如表2所示,候选外购件供应商和基本参数如表3所示。

表1 外购件子任务统计表

Table 1 Statistics of purchased parts subtasks

名称	序号
镀锌背板	1
铝板	2
玻璃	3
铁架	4
钢铁件	5

表2 候选资源

Table 2 Candidate resources

M_1	M_2	M_3	M_4	M_5
M_{S11}	M_{S21}	M_{S31}	M_{S41}	M_{S51}
M_{S12}	M_{S22}	M_{S32}	M_{S42}	M_{S52}
M_{S13}	M_{S23}	M_{S33}	M_{S43}	M_{S53}
M_{S14}	M_{S24}	M_{S34}	M_{S44}	M_{S54}
M_{S15}	M_{S25}	M_{S35}	M_{S45}	M_{S55}
M_{S16}	M_{S26}	M_{S36}	M_{S46}	M_{S56}

注: M_i 为子任务; M_{Sij} 为候选资源。

根据公司需求和云平台分析确定时间 T 不多于 90 h,总成本 C 不超过 4 200 元,可靠性 R 不低于 90%,灵活性 F 不低于 92%。结合上述要求可得外购件供应商组合优选实例模型,并用 NSGA-III-TS 算法求解。

表3 候选外购件供应商基本参数

Table 3 Basic parameters of outsourced parts candidate suppliers

供应商	T_1/h	T_2/h	T_3/h	$C_1/\text{元}$	$C_2/\text{元}$	$C_3/\text{元}$	$R/\%$	$F/\%$
M_{S11}	41	1	5	647	12	81	92	86
M_{S12}	34	2	4	458	10	67	88	91
M_{S13}	88	1	4	645	22	91	94	86
M_{S14}	56	1	3	528	18	65	88	96
M_{S15}	47	3	1	572	11	77	96	89
M_{S16}	56	1	2	617	12	71	87	90
M_{S21}	85	1	6	421	32	91	87	93
M_{S22}	42	1	3	723	20	91	88	97
M_{S23}	61	2	3	486	35	73	92	90
M_{S24}	64	1	5	515	18	67	88	88
M_{S25}	83	1	4	661	32	87	88	95
M_{S26}	61	4	3	557	11	52	89	93
M_{S31}	48	1	3	772	17	68	90	93
M_{S32}	54	4	4	806	24	64	92	96
M_{S33}	77	1	2	655	19	91	93	96
M_{S34}	91	2	2	875	21	71	94	91
M_{S35}	71	3	5	841	11	68	89	96
M_{S36}	80	1	4	708	25	67	91	92
M_{S41}	52	1	5	884	25	64	94	94
M_{S42}	70	2	5	958	33	80	88	87
M_{S43}	71	1	3	794	9	89	86	90
M_{S44}	84	2	4	862	10	89	89	91
M_{S45}	57	1	4	623	22	75	86	95
M_{S46}	82	1	5	786	17	97	90	92
M_{S51}	87	1	3	1 110	13	50	96	90
M_{S52}	67	2	3	1 169	34	91	91	88
M_{S53}	58	1	4	1 795	21	56	85	94
M_{S54}	96	1	2	1 345	11	94	93	92
M_{S55}	52	4	2	1 460	10	94	88	96
M_{S56}	55	1	4	1 264	35	88	95	93

4.2 算法求解与分析

算法参数设为种群规模 $N_p = 120$, 交叉概率 $P_c = 0.8$, 变异概率 $P_m = 0.2$, 最大迭代次数 $G_{\max} = 200$, 禁忌搜索算法迭代次数为 20, 禁忌表长度为 11。算法通过求解该问题模型得到 4 个评价目标的适应度值迭代曲线, 如图 6 所示。由图 6 可以看出, 在运行 25 代后, 种群的平均适应度值在 4 个目标上均趋于收敛。

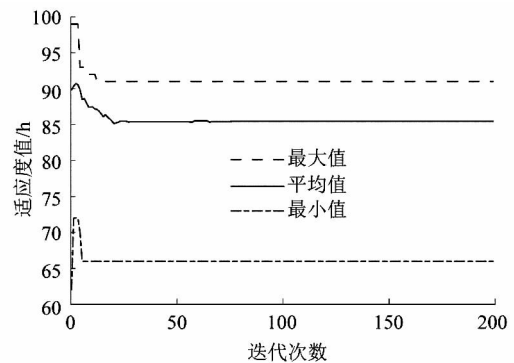
算例在软件 MATLAB R2022a 上运行, 采用 NSGA-III-TS 算法对云服务外购件供应商组合模型进行求解, 充分考虑企业实际需求情况, 4 个子目标时间 T 、成本 C 、可靠性 R 和灵活性 F 的权重 γ 分别取 0.23, 0.37, 0.18 和 0.22。图 7 为经过总体效用函数归一化后的平均效用值收敛过程, 在运行 25 代后, 平均效用值收敛至最优稳定值。通过总体效用函数计算每个候选供应商组合方案的综合效用值, 根据效用值对其排序, 表 4 为部分候选供应商组合方案。

表 4 候选外购件供应商组合方案

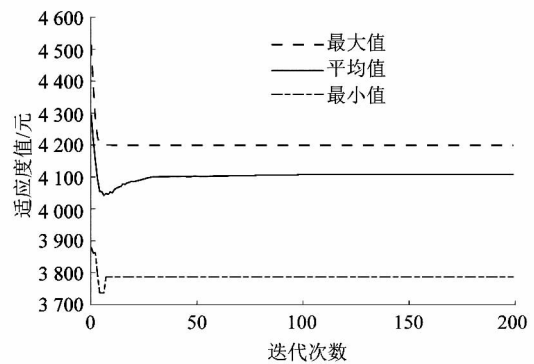
Table 4 Combination scheme of outsourced parts candidate suppliers

序号	组合序列	时间 T/h	成本 $C/\text{元}$	可靠性 $R/\%$	灵活性 $F/\%$	效用 值 U	排序
1	[46356]	80	4103	90.2	94.6	0.428 8	9
2	[56351]	91	3938	92.0	92.6	0.438 9	7
3	[43351]	91	3863	91.0	93.4	0.515 2	2
4	[43356]	80	4077	90.8	94.0	0.441 5	6
5	[53351]	91	3912	92.6	92.0	0.451 6	4
6	[43352]	80	3984	90.0	93.0	0.438 1	8
7	[23156]	66	4093	90.2	92.4	0.433 9	11
8	[23356]	80	4001	90.8	93.0	0.453 7	3
9	[23252]	80	3908	90.0	92.0	0.450 3	5
10	[23352]	91	3787	91.0	92.4	0.527 4	1
11	[43156]	66	4169	90.2	93.4	0.421 7	10
12	[23252]	91	3916	90.8	92.4	0.400 6	14
13	[46156]	68	4195	90.0	94.0	0.407 0	13
14	[43252]	72	4113	90.0	93.0	0.389 5	15
15	[26256]	68	4156	90.0	93.6	0.419 8	12

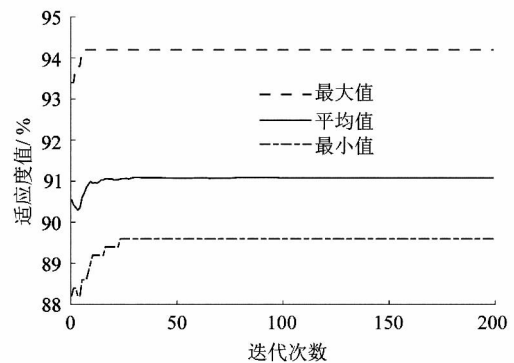
根据表 4 的效用值排序结果, 选择第 10 组供应商组合序列 [2 3 3 5 2], 即 $(M_{S12}, M_{S23}, M_{S33}, M_{S45}, M_{S52})$, 需求方根据自身偏好可重新设定各个指标的权重, 云平台根据用户重新提交的需求对优选出的供应商指标重新赋值进行再次排序, 节约了重新求解的时间, 提高了效率和服务组合的灵活性。



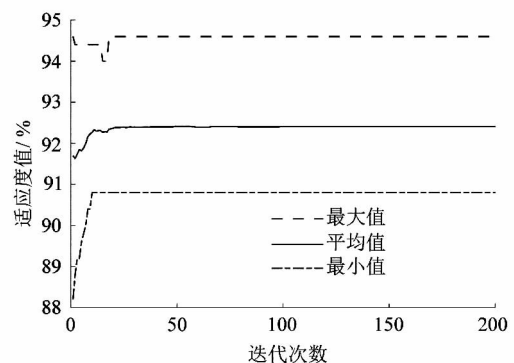
(a) 时间迭代曲线



(b) 成本迭代曲线



(c) 可靠性迭代曲线



(d) 灵活性迭代曲线

图 6 4 个目标的迭代曲线

Figure 6 Iterative curves on four goals

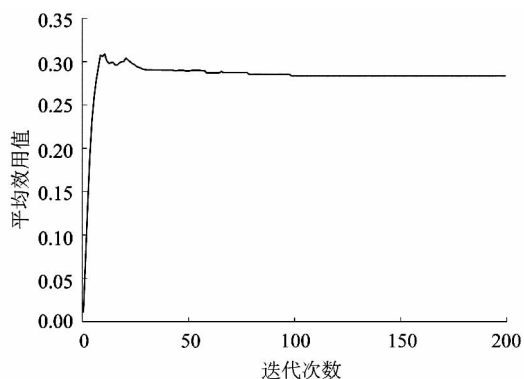


图7 平均效用值的运行迭代

Figure 7 Running iteration of average utility value

为了进一步验证改进算法 NSGA-III-TS 对求解该问题模型的有效性,在相同实验环境及参数的情况下,

表5 算法比较结果

Table 5 Comparison results of algorithms

算法	时间 T/h		成本 $C/元$		可靠性 $R/\%$		灵活性 $F/\%$		平均 效用值	平均迭 代次数
	最优值	平均值	最优值	平均值	最优值	平均值	最优值	平均值		
NSGA-III-TS	66	85.48	3 787	4 105.03	94.2	91.43	94.6	92.41	0.283 7	25
NSGA-III	66	85.67	3 787	4 108.73	94.2	91.30	94.6	92.38	0.278 4	54
NSGA-II	68	85.67	3 787	4 108.78	94.1	91.41	93.0	92.40	0.277 8	68
MOPSO	72	85.68	3 787	4 110.92	93.6	91.25	94.6	92.31	0.264 8	73

5 结语

课题组分析了云制造供应商服务组合的重要性和优选流程,基于任务并行结构,提出了一种以时间最短、成本最低、可靠性最高和灵活性最高的云服务外购件供应商组合优选模型,设计了改进的 NSGA-III-TS 算法对多目标模型求解,其中采用反向学习策略初始化种群提高了初始解的质量,使用禁忌搜索提高了算法的局部搜索能力。通过实例对比结果分析表明改进的 NSGA-III-TS 算法在各目标上的平均值、最优值以及迭代次数均有优化提升,验证了算法的有效性,证明了模型在云制造环境下外购件供应商组合问题上的可行性。在算法求解出候选供应商组合方案之后,可根据实际需求变换组合方案,并为需求方预留备选方案,满足企业的个性化需求。在下一步研究中应注重于算法支配原则的改进策略,在考虑不同零件的组合结构及组合关系的情况下,解决云服务组合优化问题。

参考文献:

[1] 李伯虎,张霖,王时龙,等.云制造:面向服务的网络化制造新模式

采用 NSGA-III 算法、NSGA-II 算法和多目标粒子群优化算法 MOPSO^[13-15] 对本实例求解并进行对比分析。

算法参数设置:种群规模为 120,最大迭代次数为 200,交叉概率为 0.8,变异概率为 0.2,运行 50 次。试验后的算法对比结果如表 5 所示。

由表 5 可以看出,从算法求解结果上看,NSGA-III-TS 算法在各指标上的求解值及综合效用值均优于其他算法,呈现出较好的求解质量,说明其求解性能较好;从算法性能上看 NSGA-III-TS 算法收敛时的平均遗传代数更少,说明算法收敛性更高。从求解结果和算法性能方面综合来看 NSGA-III-TS 算法具有较显著的优越性。

[J]. 计算机集成制造系统,2010,16(1):1-7.

- [2] 李伯虎,张霖,任磊,等.再论云制造[J]. 计算机集成制造系统,2011,17(3):449-457.
- [3] 陈友玲,刘舰,凌磊,等.基于协同效应的并行制造云服务组合算法[J]. 计算机集成制造系统,2019,25(1):137-146.
- [4] HU X J, WANG G X, LI X Z, et al. Joint decision model of supplier selection and order allocation for the mass customization of logistics services [J]. Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review, 2018, 120: 76-95.
- [5] 陈浩东,王志平,陈燕.模糊环境下动态供应商选择的混合整数非线性规划模型[J]. 运筹与管理,2015,24(4):128-136.
- [6] 刘桂森,贾兆红.质量感知的多目标云制造服务组合优化算法[J/OL]. 计算机集成制造系统:1-21 [2022-06-18]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.5946.TP.20220119.1721.024.html>.
- [7] CUI L X, MAK K L, NEWMAN S T. Optimal supplier selection and order allocation for multi-product manufacturing featuring customer flexibility [J]. International Journal of Computer Integrated Manufacturing, 2015, 28(7): 729-744.
- [8] SEGHIR F, KHABABA A. A hybrid approach using genetic and fruit fly optimization algorithms for QoS-aware cloud service composition [J]. Journal of Intelligent Manufacturing, 2017, 29: 1773-1792.

- [9] ZHOU J J, YAO X F, LIN Y Z, et al. An adaptive multi-population differential artificial bee colony algorithm for many-objective service composition in cloud manufacturing[J]. Information Sciences, 2018, 456:50–82.
- [10] JAIN H, DEB K C. An evolutionary many-objective optimization algorithm using reference-point based nondominated sorting approach, part I: solving problems with box constraints[J]. IEEE Transactions on Evolutionary Computation, 2014, 18(4):602–622.
- [11] 王飞, 孟凡超, 郑宏珍. 基于禁忌搜索和遗传算法的云仓储分配优化[J]. 计算机集成制造系统, 2022, 28(1):208–216.
- [12] YUAN Q, DAI G M. The improved NSGA-Ⅱ based on reverse learning mechanism[C]//2015 International Industrial Informatics and Computer Engineering Conference. Xi'an: Atlantis Press, 2015: 589–593.
- [13] GADHVI B, SAVSANI V, PATEL V. Multi-objective optimization of vehicle passive suspension system using NSGA-Ⅱ, SPEA2 and PESA-Ⅱ[J]. Procedia Technology, 2016, 23:361–368.
- [14] 李飞, 刘建昌, 石怀涛, 等. 基于分解和差分进化的多目标粒子群优化算法[J]. 控制与决策, 2017, 32(3):403–410.
- [15] 陈立芳, 晏资文, 李栋, 等. 一种基于粒子群优化的无键相虚拟动平衡算法研究[J]. 机电工程, 2021, 38(4):421–427.

《轻工机械》征订启事

《轻工机械》杂志(刊号:CN 33-1180/TH, ISSN 1005-2895),创刊于1983年,由中国轻工机械协会、中国联合装备集团有限公司与轻工业杭州机电设计研究院有限公司联合主办,是一份在国内有较高影响力、历史悠久的轻工机械领域的专业性科技期刊。以报道轻工机械、自动化技术、机电一体化、工艺设计及其应用为特色。

- 双月刊,大16开,每册定价10.00元,全年60.00元。
- 邮局订阅(代号32-39),也可直接向本编辑部邮购(另加邮费2元/本)。
- 编辑部地址:杭州市余杭区高教路970号西溪联合科技广场4号楼711 邮编:311121
- 电话:(0571)85186130 85187520 E-mail: qgjxzz@126.com
- 网址:www. qgjxzz. com
- 开户银行:工行杭州建国北路支行
- 户头:轻工业杭州机电设计研究院 帐号:1202022209014428297
- 税号:913300007236292912

本刊系中国科技论文统计源期刊(中国科技核心期刊),已加入《中国学术期刊(光盘版)》和“中国期刊网”、“万方数据资源系统”、“中文科技期刊数据库”,并被英国《科学文摘》(SA, INSPEC)、美国化学文摘(CA)、美国剑桥科学文摘(CSA)、美国EBSCO数据库、美国乌利希期刊指南(Ulrich)、《中国学术期刊文摘》等收录

欢迎订阅 ● 欢迎刊登广告 ● 欢迎赐稿