

控制与决策

Control and Decision

考虑可持续性的云制造服务组合优化研究

孙琳, 禹春霞, 陈萌, 李灿灿

引用本文:

孙琳, 禹春霞, 陈萌, 等. 考虑可持续性的云制造服务组合优化研究[J]. *控制与决策*, 2026, 41(5): 1477-1488.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2025.0775>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

[超启发式交叉熵算法求解模糊分布式流水线绿色调度问题](#)

Hyper-heuristic cross-entropy algorithm for green distributed permutation flow-shop scheduling problem with fuzzy processing time
控制与决策. 2021, 36(6): 1387-1396 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.1681>

[基于正态云模型的状态转移算法求解多目标柔性作业车间调度问题](#)

State transition algorithm based on normal cloud model for solving multiobjective flexible job shop scheduling problem
控制与决策. 2021, 36(5): 1181-1190 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.1233>

[基于鲁棒优化的云医疗资源配置问题](#)

Robust optimization based medical resource allocation problem in cloud healthcare system
控制与决策. 2021, 36(2): 469-474 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.0455>

[基于自适应正态云模型的灰狼优化算法](#)

Grey wolf optimization algorithm based on adaptive normal cloud model
控制与决策. 2021, 36(10): 2562-2568 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2020.0233>

[基于改进多目标优化算法的分布式数据中心负载调度](#)

Multi-objective optimization of energy and performance management in distributed data centers
控制与决策. 2021, 36(1): 159-165 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.0702>

考虑可持续性的云制造服务组合优化研究

孙琳, 禹春霞[†], 陈萌, 李灿灿

(中国石油大学(北京)经济管理学院, 北京 102249)

摘要: 在“双碳”目标与工业 5.0 理念的共同驱动下, 面向可持续发展的云制造服务组合策略既契合国家战略, 又满足企业的现实需求. 基于此, 提出考虑可持续性的云制造服务组合决策模型. 首先, 基于三重底线原则和服务生命周期理论构建可持续性评价指标体系, 并采用模糊最优最差法确定指标权重; 其次, 结合任务结构及物流关键因素, 计算服务组合的指标聚合值并构建多目标优化模型; 然后, 提出基于可持续性评价的多目标人工蜂鸟算法(SE-MOAHA)求解模型, 并通过综合评价方法确定最优方案; 最后, 以阿里云制造平台的复杂机械手制造任务为案例, 验证所提决策模型的有效性和优越性, 与初始算法 MOAHA 及经典算法 U-NSGA-III 的对比结果表明, 所提方法在求解质量、效率与稳定性方面均具有优势.

关键词: 云制造; 可持续性; 服务评价; 服务组合; 多目标优化; 多目标人工蜂鸟算法

中图分类号: C935; F274 **文献标志码:** A

DOI: 10.13195/j.kzyjc.2025.0775

引用格式: 孙琳, 禹春霞, 陈萌, 等. 考虑可持续性的云制造服务组合优化研究 [J]. 控制与决策, 2026, 41(5): 1477-1488.

Research on cloud manufacturing service composition and optimal selection

SUN Lin, YU Chun-xia[†], CHEN Meng, LI Can-can

(School of Economics and Management, China University of Petroleum, Beijing 102249, China)

Abstract: In response to the ‘dual-carbon’ goals and the vision of Industry 5.0, sustainable cloud manufacturing service composition aligns with national strategies and enterprise needs. This study proposes a sustainability-oriented service composition decision model. First, a sustainability evaluation index system is developed based on the triple bottom line principle and service lifecycle theory, and indicator weights are determined using the fuzzy best worst method. Next, aggregated sustainability values of service composition are calculated by incorporating task structures and logistics factors, forming a multi-objective optimization model. Then, a sustainability evaluation-based multi-objective artificial hummingbird algorithm (SE-MOAHA) is developed to solve the model, and a comprehensive evaluation method is employed to identify the optimal solution. Finally, a case study of a complex robotic arm task from the Alibaba cloud manufacturing platform validates the model’s effectiveness and superiority. Comparisons with the original MOAHA and the classical U-NSGA-III further show that the proposed method achieves superior solution quality, efficiency, and stability.

Keywords: cloud manufacturing; sustainability; service evaluation; service composition; optimal selection; multi-objective artificial hummingbird algorithm

0 引言

在“双碳”战略与工业 5.0 “人本-循环-韧性”理念的推动下, 制造业正由“规模导向”迈向“可持续导向”. 国家相继出台《工业领域碳达峰碳中和标准体系建设指南》《关于推进绿色低碳转型加强全国碳市场建设的意见》等政策, 要求构建低碳高效的制造

体系, 实现资源最优配置与生产全过程碳减排^[1]. 不同于重视生产效益的工业 4.0, 工业 5.0 更强调经济、环境与社会的系统性融合, 要求制造系统在提升效率的同时兼顾社会福祉与生态阈值^[2]. 在上述背景下, 云制造平台作为数字经济时代的重要基础设施, 需将宏观可持续战略细化为可执行的服务规则, 并

收稿日期: 2025-07-22; 录用日期: 2025-12-04.

基金项目: 国家自然科学基金项目 (72271244).

责任编委: 刘士新.

[†]通信作者. E-mail: cxyu@cup.edu.cn.

本文附带电子附录文件, 可登录本刊官网该文“资源附件”区自行下载阅览.

借助大数据、人工智能等新兴技术实现政策落地^[3]。目前,国内外已相继构建航天云网 INDICS、XCMG 等典型云制造平台,将分布式制造资源虚拟化成为可配置的“云服务”,并通过云服务组合优化这一核心功能,将多个服务提供方组合起来完成需求方的复杂任务,从而实现供需精准匹配与高效协同^[4-5]。在绿色制造和可持续发展要求日益提升的背景下,传统以时间、成本和质量为核心的服务组合优化模式已难以满足低碳与社会责任并重的决策需求。因此,构建面向可持续性的服务组合优化机制,已成为云制造平台在工业 5.0 时代实现高质量发展和低碳化转型的关键路径。

考虑可持续性的云制造服务组合问题具有以下特征:首先,平台需系统构建可持续性指标体系,并处理需求方偏好的不确定性。例如,不同项目经理可能因风险感知差异对社会维度指标设置不同的权重,同一决策者在信息不完备时也可能表现出模糊偏好。因此,需通过有效的权重确定法准确捕获需求方对各指标的重视程度,为后续优化决策提供可靠依据。其次,该问题需权衡多个相互冲突的目标。例如,降低成本与缩短交付周期常导致能耗增加,提升员工福利可能增加运营支出。为此,需构建能有效协调多维目标的服务组合模型和具备全局优化能力的求解算法,以实现方案的整体可持续性最优。最后,服务组合由多个提供方协同执行,受工艺流程、时序依赖与物流条件的共同约束。例如,某子任务延迟可能导致后续工序无法按期启动,并增加物流碳排放与成本。因此,平台在优选服务组合方案时需考虑物流时间、成本与碳排放等关键因素,以提升模型的现实可行性。基于上述特征,本文从考虑可持续性的云制造服务组合模型构建与求解两个方面对现有文献进行综述。

在模型构建方面,现有研究大多仍延续工业 4.0 的“效率优先”范式,聚焦于服务质量 (QoS) 目标,并考虑可靠性、资源利用效率等单维可持续性因素^[4,6],部分研究面向小批量产品定制等特定场景,构建针对性的服务组合模型^[7]。上述研究虽然具备一定的模型适用性,但由于将可持续指标作为后置约束或单目标加权,缺乏对工业 5.0 特征的响应。近年来,面向制造系统的可持续性指标体系构建逐渐从单一经济维度^[8]转向经济、环境与社会三重底线框架^[9-10],部分研究将生命周期视角与多源数据库深度融合,构建全生命周期与三重维度相结合的指标体系^[11],为可持续性服务组合提供了可扩展的指标范式。基于此,本文根据云制造特征及平台数字化工具提供的

实时数据,构建多维可持续性评价指标体系,并进一步结合任务执行顺序和物流因素,构建考虑经济、环境、社会三维可持续性目标的服务组合优化模型。针对指标权重的确定,当前常用方法包括主观赋权法和客观赋权法^[12]。考虑到决策过程具有专家知识依赖度高、部分评价信息难以量化等特点,本文采用模糊最优最差法 (FBWM)^[13]确定各层指标权重。该方法具有较高的计算效率和一致性,通过模糊建模保留专家偏好,最小化信息丢失,更准确地刻画出专家的主观偏好强度,以提升权重分配结果的合理性与稳定性^[14]。

在模型求解方面,服务组合问题具有解空间离散、高维、强约束等特征,且可行解的分布受限于组合规则与任务结构^[8]。现有研究提出了精确方法^[15-16]、基于规则的近似方法^[17]、启发式算法^[11,17]和元启发式算法^[18-20]等多种求解方法。其中,精确方法虽然具有理论最优性,但计算效率低,仅适用于小规模问题;近似与启发式方法的求解效率较高,但在大规模问题中缺乏全局优化能力,易陷入局部最优;元启发式算法,例如被广泛使用和改进的遗传算法,虽然能较快获得可行解,但对参数敏感,不同实例下需重新调整,影响泛化性^[21]。基于服务组合优化模型特征,本文选取多目标人工蜂鸟算法 (MOAHA)^[22]作为求解框架,该算法源于 3 种蜂鸟觅食行为的仿生机理,结合动态拥挤距离消除、非支配排序及访问表机制,在保持解集多样性的同时加速收敛,适用于复杂多目标优化^[19]。基于 MOAHA,本文构建融合服务可持续性评价的改进算法,实现优质解的高效搜索与帕累托前沿的快速逼近。针对服务评价,常用的多属性决策方法包括基于比较、距离、交互和效用的方法^[21]。其中,基于效用的方法能够将决策者偏好与服务的指标表现转换为效用值,并通过多维权衡实现冲突指标的协调。因此,本文采用度量备选方案和根据折衷方案的排序 (MARCOS) 方法^[23]来评价服务的可持续性表现。该方法具有较高的可解释性,且在处理大量指标和备选方案时具有计算稳定性和扩展性,能够有效满足评价决策对灵活性和精度的双重要求^[24]。

本文旨在构建能够系统优化经济、环境与社会三维可持续性要素的云制造服务组合决策模型,以提升平台的资源配置效率与可持续发展能力。主要研究贡献与创新体现在以下几点:1) 从三重底线原则和生命周期理论出发,构建了涵盖可持续性评价、权重确定与多目标优化求解的系统化服务组合决策框架。该框架通过主客观相结合的方法强化了需求

方偏好与组合优化过程的协同,并弥补了现有研究在全生命周期碳排放与社会可持续性方面考量的不足.2)构建了考虑经济、环境与社会可持续性目标的服务组合优化模型.该模型通过多层次指标权重来协调多维目标之间的权衡,突破了以往研究仅将可持续指标作为后置约束或单目标加权的局限,并通过考虑任务结构、物流时间、成本与碳排放等因素,有效提升了模型的现实可行性.3)提出了基于可持续性评价的多目标人工蜂鸟算法(SE-MOAHA)求解模型.该算法基于可持续性评价结果,通过改进的种群初始化策略和引导觅食策略来增强寻优导向,有效提升了求解质量和收敛效率.

1 问题描述

如图1所示,在考虑可持续性的服务组合过程中,针对用户提交的复杂任务 T ,首先,平台将其分解为 I 个子任务,即 $T = \{ST_1, ST_2, \dots, ST_i, \dots, ST_I\}$,其中 ST_i 表示第 i 个子任务, $i = 1, 2, \dots, I$;然后,根据匹配规则在服务池中搜索服务,为每个子任务匹配候选服务,形成候选服务集 $CSS_i = \{CS_{i,1}, CS_{i,2}, \dots, CS_{i,j}, \dots, CS_{i,J_i}\}$,其中 $CS_{i,j}$ 表示子任务 ST_i 的第 j 个候选服务, $j = 1, 2, \dots, J_i$;最后,通过可持续性服务组合优化方法,从每个候选服务集 CSS_i 中选定一个服务来执行子任务 ST_i ,组合形成包含 I 个服务的最优服务组合方案,协同完成复杂任务 T .

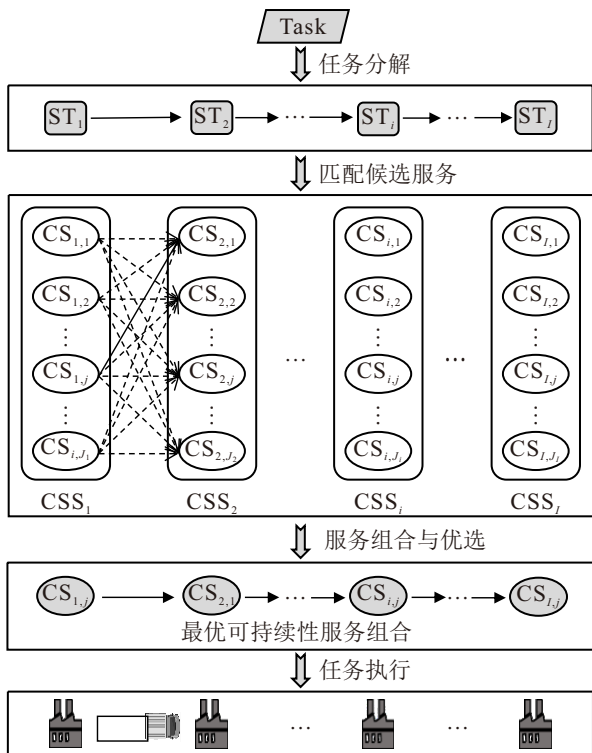


图1 考虑可持续性的云制造服务组合优化问题描述

考虑可持续性的云制造服务组合问题假设:

- 1) 云制造平台已根据工艺规则等标准,将制造任务分解为多个子任务;
- 2) 子任务已在制造服务云池搜索匹配到了相应的候选服务集;
- 3) 不同子任务不能分配给同一云制造服务;
- 4) 一个子任务只能分配给一个服务.

本文涉及的主要符号及其定义如表1所示.

表1 符号及定义表

		定义
索引	i	复杂制造任务分解后的子任务索引, $i = 1, 2, \dots, I$
	j	子任务对应的候选服务索引, $j = 1, 2, \dots, J_i$
	m, n	可持续性评价指标索引, $m = 1, 2, \dots, M, n = 1, 2, \dots, N$
	k	决策者索引, $k = 1, 2, \dots, K$
参数	ST_i	第 i 个子任务
	$CS_{i,j}$	子任务 ST_i 的第 j 个候选服务
	C_n	云制造服务的第 n 个可持续性评价指标
	DM_k	第 k 名决策者
	A_m	第 m 个一级可持续性评价指标
	C_n^m	第 m 个一级指标下的第 n 个二级可持续性评价指标
	C_n	第 n 个二级可持续性评价指标
	W_m	一级可持续性评价指标 A_m 的权重
	w_n^m	一级指标 A_m 维度下,第 n 个二级指标的权重
	$a_{i,j}^n$	候选服务 $CS_{i,j}$ 在二级可持续性指标 C_n 下的评价价值
	$U_{i,j}^{Sus}$	子任务 ST_i 下第 j 个候选服务 $CS_{i,j}$ 的可持续性评价价值
	$rank(CS_{i,j})$	子任务 ST_i 下 $CS_{i,j}$ 的可持续性排序值
	$LT(CS_{i,j}^{t'}, CS_{i,j}^{t''})$	子任务 ST_i 和 $ST_{i'}$ 下的服务 $CS_{i,j}$ 与 $CS_{i',j'}$ 之间的物流时间
	$LC(CS_{i,j}^{t'}, CS_{i,j}^{t''})$	子任务 ST_i 和 $ST_{i'}$ 下的服务 $CS_{i,j}$ 与 $CS_{i',j'}$ 之间的物流成本
	$LE(CS_{i,j}^{t'}, CS_{i,j}^{t''})$	子任务 ST_i 和 $ST_{i'}$ 下的服务 $CS_{i,j}$ 与 $CS_{i',j'}$ 间的物流碳排放
$C1_{max}$	需求方可接受的完成复杂制造任务的最大时间	
$C2_{max}$	需求方可接受的完成复杂制造任务的最大成本	
$C4_{max}$	需求方可接受的最大碳排放量	
决策变量	x_{ij}	0-1变量.将子任务 ST_i 分配给候选服务 $CS_{i,j}$ 时, $x_{ij} = 1$;否则, $x_{ij} = 0$

2 考虑可持续性的云制造服务组合决策模型

如图2所示,本文提出了考虑可持续性的两阶段云制造服务组合决策模型:在模型构建阶段,首先提出多维可持续性评价指标体系,并使用FBWM计算需求方对各指标的偏好权重;然后结合任务结构和物流关键因素,计算服务组合在各指标下的聚合评价价值;最后构建考虑经济、环境、社会三维可持续性优化目标的服务组合模型.在模型求解阶段,首先

使用 MARCOS 方法评价服务的可持续性表现,然后将评价结果融入改进的 MOAHA 框架,提出 SE-MOAHA 求解模型以得到帕累托解集,最后通过综合评价方法确定最优服务组合方案。

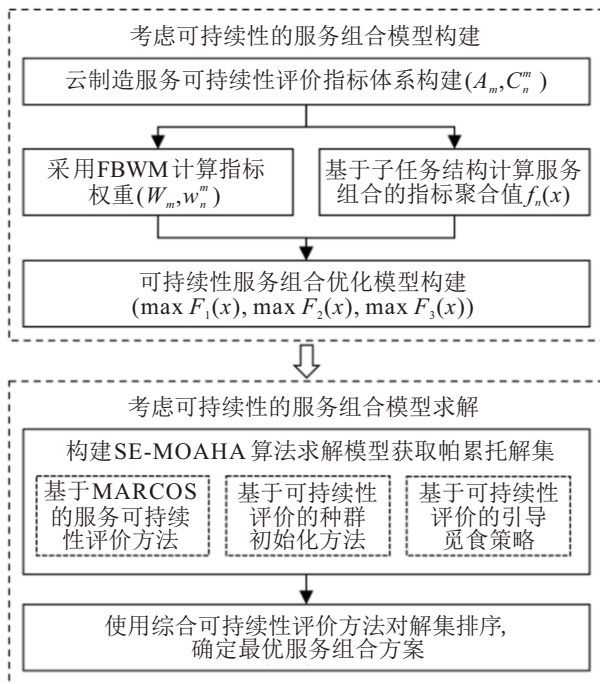


图2 考虑可持续性的云制造服务组合决策模型

2.1 模型构建

2.1.1 可持续性评价指标构建

本文基于三重底线原则和服务生命周期理论,构建可持续性评价指标体系:在经济 (A_1) 维度下,采用交付周期 (C_1)、生命周期成本 (C_2) 和交付可靠性 (C_3) 指标,衡量服务在成本效率与风险等方面的长期可持续性;在环境 (A_2) 维度下,采用碳排放量 (C_4) 作为衡量制造活动碳足迹的关键指标,结合污染处理能力 (C_5) 和可再生能源百分比 (C_6) 指标,综合评估服务对生态系统的负荷与绿色化水平;在社会 (A_3) 维度下,采用职业健康与安全 (C_7)、服务中断影响程度 (C_8) 和低碳数字管理能力 (C_9) 指标,衡量服务提供方在社会认可度、系统鲁棒性及智能化推动企业可持续成长等方面的表现^[1]。

2.1.2 可持续性指标权重确定

本文使用基于群决策的 FBWM 计算可持续性评价指标权重,该方法引入模糊数来表示决策者的不确定偏好,并通过最小化决策者偏好与实际权重之间的最大绝对差异来确定指标最优权重^[13]。设评价指标包括集合 $A = \{A_1, \dots, A_m, \dots, A_M\}$ 和 $C_m = \{C_1^m, \dots, C_n^m, \dots, C_N^m\}$, A_m 和 C_n^m 分别表示第 m 个一级指标和该指标下的第 n 个二级指标, $m =$

$1, 2, \dots, M, n = 1, 2, \dots, N$ 。设决策者集合为 $D = \{DM_1, \dots, DM_k, \dots, DM_K\}$, DM_k 表示第 k 名决策者; $\lambda = (\lambda_1, \dots, \lambda_k, \dots, \lambda_K)^T$ 表示决策者权重向量, $\lambda_k \in [0, 1]$ 且 $\sum_{k=1}^K \lambda_k = 1, k = 1, 2, \dots, K$ 。具体计算步骤如下。

step 1: 选取最优和最差指标。以一级指标为例,根据主观经验,决策者 DM_k 在指标集合 A 中分别选择最优指标 A_B^k 和最差指标 $A_W^k, k = 1, 2, \dots, K$ 。

step 2: 确定模糊比较向量。各决策者使用语言变量,将最优和最差指标与其余指标进行两两比较,并将比较结果转为三角模糊数形式,生成模糊比较向量 \tilde{A}_{Best}^k 和 \tilde{A}_{Worst}^k , 如下所示:

$$\tilde{A}_{Best}^k = \{\tilde{a}_{B1}^k, \dots, \tilde{a}_{Bm}^k, \dots, \tilde{a}_{BM}^k\}, \quad (1)$$

$$\tilde{A}_{Worst}^k = \{\tilde{a}_{1W}^k, \dots, \tilde{a}_{mW}^k, \dots, \tilde{a}_{MW}^k\}. \quad (2)$$

其中: $\tilde{a}_{Bm}^k = (l_{Bm}^k, m_{Bm}^k, u_{Bm}^k)$, 表示 DM_k 给出的最优指标 A_B^k 较指标 A_m 的偏好程度; $\tilde{a}_{mW}^k = (l_{mW}^k, m_{mW}^k, u_{mW}^k)$, 表示 DM_k 给出的指标 A_m 较最差指标 A_W^k 的偏好程度。决策者使用的语言变量与三角模糊数之间的转换关系为:“同等重要 (EI)” : (1, 1, 1); “中等重要 (MI)” : (2/3, 1, 3/2); “相当重要 (FI)” : (3/2, 2, 5/2); “非常重要 (VI)” : (5/2, 3, 7/2); “绝对重要 (AI)” : (7/2, 4, 9/2)。

step 3: 构建非线性模型。对不同层级的指标构建非线性模型,并根据三角模糊数的运算规则^[13] 求解模型得到各层级指标权重,模型如下所示:

$$\begin{aligned} \text{Min } z &= \sum_{k=1}^K \lambda_k \xi_k. \\ \text{s.t. } &|\tilde{w}_B - \tilde{a}_{Bm}^k \tilde{w}_m| \leq \xi_k, \text{ for all } m, \text{ for all } k; \\ &|\tilde{w}_m - \tilde{a}_{mW}^k \tilde{w}_W| \leq \xi_k, \text{ for all } m, \text{ for all } k; \\ &\sum_{m=1}^M R(\tilde{w}_m) = 1, \text{ for all } m; \\ &R(\tilde{w}_m) \geq 0, \text{ for all } m. \end{aligned} \quad (3)$$

其中: \tilde{w}_B 、 \tilde{w}_W 和 \tilde{w}_m 分别表示最优指标、最差指标和指标 A_m 的模糊权重值,即 $\tilde{w}_B = (l_B^w, m_B^w, u_B^w)$, $\tilde{w}_W = (l_W^w, m_W^w, u_W^w)$, $\tilde{w}_m = (l_m^w, m_m^w, u_m^w)$; $\xi_k = (l^\xi, m^\xi, u^\xi)$, 由于 $l^\xi \leq m^\xi \leq u^\xi$, 可设 $\xi_k = (e^*, e^*, e^*), e^* \leq l^\xi$ 。

step 4: 确定指标最优权重。通过求解不同层级下的模型,可获得各一级指标及其子指标的最优模糊权值 \tilde{w}_m , 进一步将 \tilde{w}_m 转化为精确数 w_m , 转化规则如下所示:

$$w_m = R(\tilde{w}_m) = \frac{l_m^w + 4m_m^w + u_m^w}{6}. \quad (4)$$

根据上述转换结果, 获得一级指标 A_m 的最优权重 W_m , 以及一级指标 A_m 下, 第 n 个子指标的权重 $w_n^m, m = 1, 2, \dots, M, n = 1, 2, \dots, N$.

2.1.3 服务组合指标聚合值计算

本文考虑顺序、并行、分支、循环 4 种任务结构^[8], 并兼顾子任务流转过程中的物流时间、成本和

碳排放量, 计算服务组合在各可持续性指标下的聚合评价价值. 其中: 顺序结构表示子任务按照先后顺序依次完成, 并行结构表示多个子任务在某一时间段内可以同时进行, 分支结构表示从多个子任务中选择完成一个即可满足需求, 循环结构表示子任务按照特定逻辑重复执行. 在指标 $C_1 \sim C_4$ 下, 服务组合的指标聚合值计算方式分别为

$$f_1(x) = \begin{cases} \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^{J_i} \sum_{i'=1}^I \sum_{j'=1}^{J_{i'}} \text{LT}(\text{CS}_{i,j}^{i',j'}) \cdot x_{ij} x_{i'j'} + \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^{J_i} a_{i,j}^1 x_{ij}, & \text{顺序结构;} \\ \max_{1 \leq i \leq I} \left(\sum_{j=1}^{J_i} a_{i,j}^1 x_{ij} + \sum_{j=1}^{J_i} \sum_{j'=1}^{J_{i'}} \text{LT}(\text{CS}_{i,j}^{i',j'}) \cdot x_{ij} x_{i'j'} \right), & \text{并行结构;} \\ \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^{J_i} \sum_{i'=1}^I \sum_{j'=1}^{J_{i'}} \text{LT}(\text{CS}_{i,j}^{i',j'}) \cdot x_{ij} x_{i'j'} \theta_i \theta_{i'} + \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^{J_i} a_{i,j}^1 x_{ij} \theta_i, & \text{分支结构;} \\ \sum_{j=1}^{J_i} a_{i,j}^1 x_{ij} l_i + \sum_{j=1}^{J_i} \sum_{j'=1}^{J_{i'}} \text{LT}(\text{CS}_{i,j}^{i',j'}) \cdot x_{ij} x_{i'j'}, & \text{循环结构.} \end{cases} \quad (5)$$

$$f_2(x) = \begin{cases} \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^{J_i} \sum_{i'=1}^I \sum_{j'=1}^{J_{i'}} \text{LC}(\text{CS}_{i,j}^{i',j'}) \cdot x_{ij} x_{i'j'} + \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^{J_i} a_{i,j}^2 x_{ij}, & \text{顺序结构;} \\ \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^{J_i} \sum_{i'=1}^I \sum_{j'=1}^{J_{i'}} \text{LC}(\text{CS}_{i,j}^{i',j'}) \cdot x_{ij} x_{i'j'} + \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^{J_i} a_{i,j}^2 x_{ij}, & \text{并行结构;} \\ \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^{J_i} \sum_{i'=1}^I \sum_{j'=1}^{J_{i'}} \text{LC}(\text{CS}_{i,j}^{i',j'}) \cdot x_{ij} x_{i'j'} \theta_i \theta_{i'} + \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^{J_i} a_{i,j}^2 x_{ij} \theta_i, & \text{分支结构;} \\ \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^{J_i} \sum_{i'=1}^I \sum_{j'=1}^{J_{i'}} \text{LC}(\text{CS}_{i,j}^{i',j'}) \cdot x_{ij} x_{i'j'} \theta_i \theta_{i'} + \sum_{j=1}^{J_i} a_{i,j}^2 x_{ij} l_i, & \text{循环结构.} \end{cases} \quad (6)$$

$$f_3(x) = \begin{cases} \prod_{i=1}^I \sum_{j=1}^{J_i} a_{i,j}^3 x_{ij}, & \text{顺序结构;} \\ \prod_{i=1}^I \sum_{j=1}^{J_i} a_{i,j}^3 x_{ij}, & \text{并行结构;} \\ \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^{J_i} a_{i,j}^3 x_{ij} \theta_i, & \text{分支结构;} \\ \left(\sum_{j=1}^{J_i} a_{i,j}^3 x_{ij} \right)^{l_i}, & \text{循环结构.} \end{cases} \quad (7)$$

$$f_4(x) = \begin{cases} \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^{J_i} \sum_{i'=1}^I \sum_{j'=1}^{J_{i'}} \text{LE}(\text{CS}_{i,j}^{i',j'}) \cdot x_{ij} x_{i'j'} + \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^{J_i} a_{i,j}^4 x_{ij}, & \text{顺序结构;} \\ \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^{J_i} \sum_{i'=1}^I \sum_{j'=1}^{J_{i'}} \text{LE}(\text{CS}_{i,j}^{i',j'}) \cdot x_{ij} x_{i'j'} + \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^{J_i} a_{i,j}^4 x_{ij}, & \text{并行结构;} \\ \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^{J_i} \sum_{i'=1}^I \sum_{j'=1}^{J_{i'}} \text{LE}(\text{CS}_{i,j}^{i',j'}) \cdot x_{ij} x_{i'j'} \theta_i \theta_{i'} + \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^{J_i} a_{i,j}^4 x_{ij} \theta_i, & \text{分支结构;} \\ \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^{J_i} \sum_{i'=1}^I \sum_{j'=1}^{J_{i'}} \text{LE}(\text{CS}_{i,j}^{i',j'}) \cdot x_{ij} x_{i'j'} \theta_i \theta_{i'} + \sum_{j=1}^{J_i} a_{i,j}^4 x_{ij} l_i, & \text{循环结构.} \end{cases} \quad (8)$$

$C_5 \sim C_9$ 下的指标聚合值 $f_n(x)$ 的计算方式为

$$f_n(x) = \begin{cases} \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^{J_i} a_{i,j}^n x_{ij} / I, & \text{顺序结构;} \\ \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^{J_i} a_{i,j}^n x_{ij} / I, & \text{并行结构;} \\ \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^{J_i} a_{i,j}^n x_{ij} \theta_i, & \text{分支结构;} \\ \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^{J_i} a_{i,j}^n x_{ij} / I, & \text{循环结构.} \end{cases} \quad (9)$$

其中： $a_{i,j}^n$ 表示候选服务 $CS_{i,j}$ 在指标 C_n 下的评价价值； $LT(CS_{i,j}^{i',j'})$ 、 $LC(CS_{i,j}^{i',j'})$ 和 $LE(CS_{i,j}^{i',j'})$ 分别表示子任务 ST_i 和 $ST_{i'}$ 下的服务 $CS_{i,j}$ 与 $CS_{i',j'}$ 之间的物流时间、成本和碳排放； θ_i 表示选择子任务 ST_i 的概率， $\sum_{i=1}^I \theta_i = 1$ ； l_i 表示子任务 ST_i 的循环次数。

2.1.4 服务组合优化模型构建

本文从需求方角度出发，以服务组合在经济、环境、社会3个维度下的效用值最大化为优化目标，兼顾需求方的实际生产约束，构建考虑可持续性的云制造服务组合优化模型。

模型的目标函数如下所示：

$$\max F_1 = w_1^1 \times \bar{f}_1(x) + w_2^1 \times \bar{f}_2(x) + w_3^1 \times \bar{f}_3(x), \quad (10)$$

$$\max F_2 = w_4^2 \times \bar{f}_4(x) + w_5^2 \times \bar{f}_5(x) + w_6^2 \times \bar{f}_6(x), \quad (11)$$

$$\max F_3 = w_7^3 \times \bar{f}_7(x) + w_8^3 \times \bar{f}_8(x) + w_9^3 \times \bar{f}_9(x). \quad (12)$$

其中：式(10)~(12)分别表示服务组合在经济、环境、社会维度下的可持续性效用值最大化目标函数。 $w_1^1 \sim w_3^1$ 、 $w_4^2 \sim w_6^2$ 、 $w_7^3 \sim w_9^3$ 分别表示3个维度下各二级指标的权重， $w_1^1, w_2^1, \dots, w_9^3 \in [0, 1]$ ，且 $w_1^1 + w_2^1 + w_3^1 = 1$ ， $w_4^2 + w_5^2 + w_6^2 = 1$ ， $w_7^3 + w_8^3 + w_9^3 = 1$ 。 $\bar{f}_n(x)$ 表示服务组合在各指标下的标准化聚合评价价值，计算方式为

$$\bar{f}_n(x) = \begin{cases} \frac{f_n(x) - f_n^{\min}(x)}{f_n^{\max}(x) - f_n^{\min}(x)}, & \text{收益型指标;} \\ \frac{f_n^{\max}(x) - f_n(x)}{f_n^{\max}(x) - f_n^{\min}(x)}, & \text{成本型指标.} \end{cases} \quad (13)$$

$f_n(x)$ 表示服务组合在指标 C_n 下的聚合评价价值， $f_n^{\max}(x)$ 和 $f_n^{\min}(x)$ 分别表示指标聚合值的理想最大值和最小值。

模型的约束条件如下所示：

$$f1 \leq C1_{\max}, \quad (14)$$

$$f2 \leq C2_{\max}, \quad (15)$$

$$f4 \leq C4_{\max}, \quad (16)$$

$$\sum_{n=1}^N x_{mn} = 1. \quad (17)$$

其中：式(14)~(16)分别表示服务组合在时间、成本和碳排放量指标下的总值不可超出需求方的可接受范围，式(17)为决策变量取值约束。

2.2 模型求解

2.2.1 服务可持续性评价

本文采用MARCOS方法评价各候选服务的可持续性表现^[23]。设 $C = \{C_1, \dots, C_n, \dots, C_N\}$ 为二级可持续性评价指标集合，其中 C_n 表示第 n 个评价指标， $n = 1, 2, \dots, N$ ； $CSS_i = \{CS_{i,1}, \dots, CS_{i,j}, \dots, CS_{i,J_i}\}$ 为子任务 ST_i 的候选服务集，其中 $CS_{i,j}$ 表示 ST_i 的第 j 个候选服务， $j = 1, 2, \dots, J_i$ 。具体计算步骤如下。

step 1: 构建扩展的决策矩阵。在子任务 ST_i 下，根据各候选服务的可持续性指标评价价值构建初始决策矩阵 X_i ，并通过定义理想解(AI)和非理想解(AAI)，得到扩展的决策矩阵 X'_i ，如下所示：

$$X'_i = \begin{matrix} \text{AAI} \\ \text{CS}_{i,1} \\ \vdots \\ \text{CS}_{i,j} \\ \vdots \\ \text{CS}_{i,J_i} \\ \text{AI} \end{matrix} \begin{bmatrix} a_{\text{aai}}^1 & \dots & a_{\text{aai}}^n & \dots & a_{\text{aai}}^N \\ a_{i,1}^1 & \dots & a_{i,1}^m & \dots & a_{i,1}^M \\ \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{i,j}^1 & \dots & a_{i,j}^n & \dots & a_{i,j}^M \\ \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{i,J_i}^1 & \dots & a_{i,J_i}^m & \dots & a_{i,J_i}^M \\ a_{\text{ai}}^1 & \dots & a_{\text{ai}}^n & \dots & a_{\text{ai}}^N \end{bmatrix}. \quad (18)$$

其中： $a_{i,j}^n$ 表示服务 $CS_{i,j}$ 在指标 C_n 下的评价价值， $j = 1, 2, \dots, J_i$ ， $n = 1, 2, \dots, N$ 。子任务 ST_i 在 C_n 下的理想与非理想评价价值的定义为

$$a_{\text{ai}}^n = \begin{cases} \max_j a_{i,j}^n, & C_n \text{为收益型指标;} \\ \min_j a_{i,j}^n, & C_n \text{为成本型指标.} \end{cases} \quad (19)$$

$$a_{\text{aai}}^n = \begin{cases} \min_j a_{i,j}^n, & C_n \text{为收益型指标;} \\ \max_j a_{i,j}^n, & C_n \text{为成本型指标.} \end{cases} \quad (20)$$

step 2: 确定二级可持续性指标的最终权重。基于式(4)得到的一级指标及其子指标的最优权重，计算二级指标权重 ω_n ，计算方式如下：

$$\omega_n = W_m \times w_n^m. \quad (21)$$

其中： W_m 和 w_n^m 分别表示一级指标 A_m 及其子指标 C_n^m 的最优权重， $m = 1, 2, \dots, M$ ， $n = 1, 2, \dots, N$ 。

step 3: 获取加权标准化决策矩阵。结合指标最终权重，构建加权标准化决策矩阵 V_i ，矩阵元素

$v_{i,j}^n$ 的计算方式如下所示:

$$v_{i,j}^n = \begin{cases} \omega_n \times \frac{a_{ai}^n}{a_{i,j}^n}, & C_n \text{ 为成本型指标;} \\ \omega_n \times \frac{a_{i,j}^n}{a_{ai}^n}, & C_n \text{ 为收益型指标.} \end{cases} \quad (22)$$

其中 $v_{i,j}^n$ 表示 $CS_{i,j}$ 在指标 C_n 下的加权标准化评价价值.

step 4: 计算云制造服务的效用度. 通过理想与非理想评价值, 计算子任务 ST_i 下各候选服务的两个效用度值 U_j^+ 和 U_j^- , 如下所示:

$$U_j^+ = \sum_{n=1}^N v_{i,j}^n / \sum_{n=1}^N a_{ai}^n, \quad (23)$$

$$U_j^- = \sum_{n=1}^N v_{i,j}^n / \sum_{n=1}^N a_{ai}^n. \quad (24)$$

step 5: 确定服务的效用函数. 候选服务 $CS_{i,j}$ 的效用函数 $f(U_j)$ 是 $CS_{i,j}$ 相对于其理想和非理想服务的折中结果, 计算方式如下:

$$f(U_j) = \frac{U_j^+ + U_j^-}{1 + \frac{1 - f(U_j^+)}{f(U_j^+)} + \frac{1 - f(U_j^-)}{f(U_j^-)}}. \quad (25)$$

其中: $f(U_j^+)$ 和 $f(U_j^-)$ 分别表示候选服务 $CS_{i,j}$ 相对于理想服务和非理想服务的效用函数, 计算方式为

$$f(U_j^+) = \frac{U_j^-}{U_j^+ + U_j^-}, \quad (26)$$

$$f(U_j^-) = \frac{U_j^+}{U_j^+ + U_j^-}. \quad (27)$$

根据效用函数得分, 得到子任务 ST_i 下候选服务 $CS_{i,j}$ 的可持续性评价值 $U_{i,j}^{Sus}$ 及排序结果 $rank(CS_{i,j})$.

2.2.2 帕累托最优解集生成

本文在初始 MOAHA 的基础上, 引入整数编码机制、基于服务可持续性评价的种群初始化策略和引导觅食策略, 构建了 SE-MOAHA 来求解模型, 算法流程如图 3 所示.

1) 整数编码机制.

本文采用整数编码机制对解决方案进行编码, 该机制将子任务映射为编码的位置向量, 向量段内的元素值为整数, 表示该子任务所选服务的索引值. 如图 4 所示, 在子任务和候选服务数量均为 5 的服务组合编码示例中, 子任务 ST_1 被分配至第 3 个候选服务 $CS_{1,3}$, ST_2 被分配至 $CS_{2,2}$, ST_3 被分配至 $CS_{3,4}$, ST_4 被分配至 $CS_{4,1}$, ST_5 被分配至 $CS_{5,5}$.

2) 基于可持续性评价的种群初始化策略.

在 MOAHA 的随机种群初始化策略中, I 只蜂

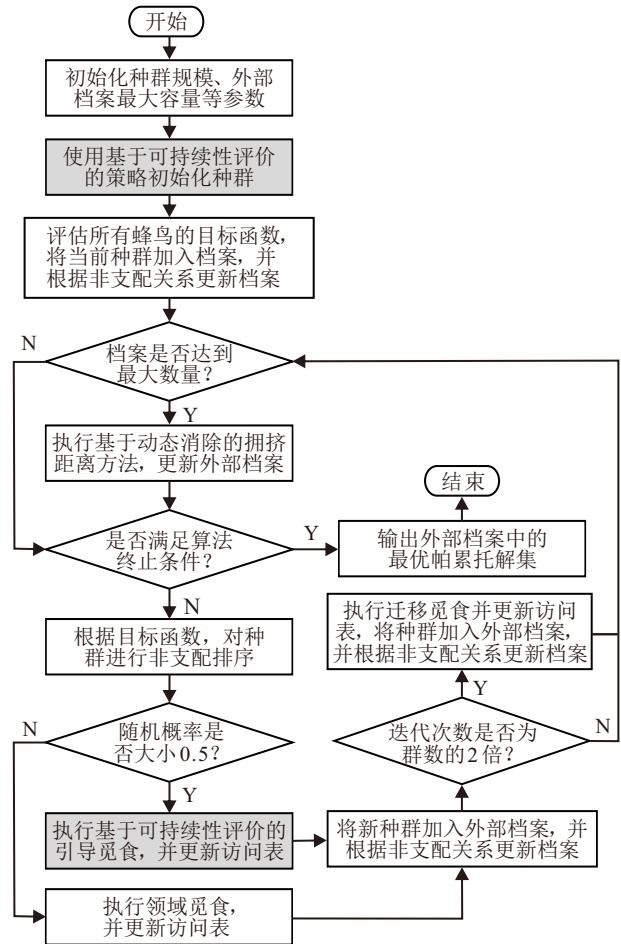


图3 SE-MOAHA 的算法流程

子任务	ST_1	ST_2	ST_3	ST_4	ST_5
候选服务	$CS_{1,1}$ $CS_{1,2}$ $CS_{1,3}$ $CS_{1,4}$ $CS_{1,5}$	$CS_{2,1}$ $CS_{2,2}$ $CS_{2,3}$ $CS_{2,4}$ $CS_{2,5}$	$CS_{3,1}$ $CS_{3,2}$ $CS_{3,3}$ $CS_{3,4}$ $CS_{3,5}$	$CS_{4,1}$ $CS_{4,2}$ $CS_{4,3}$ $CS_{4,4}$ $CS_{4,5}$	$CS_{5,1}$ $CS_{5,2}$ $CS_{5,3}$ $CS_{5,4}$ $CS_{5,5}$
服务组合	$CS_{1,3}$	$CS_{2,2}$	$CS_{3,4}$	$CS_{4,1}$	$CS_{5,5}$
决策变量	x_{i1}	x_{i2}	x_{i3}	x_{i4}	x_{i5}
变量取值	0 0 1 0 0	0 1 0 0 0	0 0 0 1 0	1 0 0 0 0	0 0 0 0 1
方案编码	3	2	4	1	5

图4 整数编码机制示例图

鸟被放置在 I 个食物源上, 每个食物源位置的随机初始化方式如下所示:

$$x_i = \mu \times (d^U - d^L) + d^L. \quad (28)$$

其中: x_i 表示第*i*个食物源位置; μ 为随机实数, $\mu \in [0, 1]$; d^U 和 d^L 分别表示决策变量最大值和最小值.

上述随机策略可能导致初始种群质量低、多样性差等问题,进而影响算法的求解效率^[19].为解决该问题,本文基于式(25)得到的服务可持续性评价结果,在种群初始化过程中,将解决方案中每个变量设置为可持续性排序为前 $\lfloor J_i/2 \rfloor$ 位的随机服务编码,从而提高初始种群的质量.改进后的食物源位置初始化方式如下所示:

$$x_i \sim \text{Uniform}\left(\left\{j \in S_i \mid \text{rank}(\text{CS}_{i,j}) \leq \frac{J_i}{2}\right\}\right). \quad (29)$$

其中: $S_i = \{1, 2, \dots, J_i\}$,表示子任务 ST_i 的候选服务的索引值; $\text{rank}(\text{CS}_{i,j})$ 表示 $\text{CS}_{i,j}$ 的可持续性排序值.

3) 基于可持续性评价的引导觅食策略.

MOAHA 模拟蜂鸟在自然界中的行为,采用引导觅食、领域觅食和迁移觅食 3 种策略实现算法对解空间的探索与开发.在执行引导觅食策略时,当存在多个长时间未被访问的食物源时,MOAHA 选取非支配排序较优的食物源,若同一前沿中仍然存在多个解决方案,则随机选择一个.生成新的候选解后,与当前解进行比较,优者替代并更新访问表.引导觅食的数学模型如下所示:

$$v_i(t+1) = x_{i,\text{tar}}(t) + D \cdot a \cdot (x_i(t) - x_{i,\text{tar}}(t)). \quad (30)$$

其中: $x_i(t)$ 表示第*t*次迭代时第*i*个食物源位置, $x_{i,\text{tar}}(t)$ 表示第*i*只蜂鸟打算访问的目标食物源的位置, D 表示飞行方向向量, a 是服从标准正态分布 $N(0, 1)$ 的引导因子.

基于此,本文在引导觅食中引入服务可持续性评价结果,当同一较优前沿中存在多个解时,根据评价排序结果选择更优的方案来替换初始算法中的随机选择机制,以避免算法过早收敛至局部最优.改进后引导觅食的数学模型如下所示:

$$v_i(t+1) = x_{i,\text{tar}}(t) + D \cdot a \cdot \left(x_i(t) - \arg \min_{j \in \Omega} \sum_{i=1}^l \text{rank}(\text{CS}_{i,j})\right), \quad (31)$$

其中 $\text{rank}(\text{CS}_{i,j})$ 表示服务 $\text{CS}_{i,j}$ 的可持续性排序值.

2.2.3 服务组合综合评价

在算法求解模型得到帕累托解集后,本文对解集进行综合可持续性评价,以确定最优服务组合方案,具体评价方法如下所示:

$$V_d^{\text{Sus}} = \sum_{m=1}^3 W_m F_d^m. \quad (32)$$

其中: V_d^{Sus} 表示第*d*个帕累托解的综合可持续性评价价值; W_m 表示一级评价指标 A_m 的权重; F_d^m 表示第*d*个帕累托解在第*m*个一级指标下的表现,即第*m*个目标函数的取值.根据总可持续性评价价值 V^{Sus} 对解集进行排序,获得最优可持续性服务组合方案.

3 实验分析

本文采用算例实验和对比分析方法验证所提出的可持续性服务组合决策模型的有效性.所涉及的实验均使用 Matlab 语言编程实现,实验运行环境为配置了 Apple M1 Pro 芯片和 16 GB RAM 的 macOS Sonoma 14 操作系统.

3.1 案例描述

阿里云制造平台收到 A 公司提交的一项“柔性智能机械手”制造任务. A 公司是一家专注于精密自动化设备研发与制造的企业.近年来,公司启动绿色产品战略,致力于在其生产过程中持续减少碳足迹与资源消耗.此次,该公司计划开发一款新型机械手,但其本身并无完整制造资源与绿色能力储备.考虑到阿里云制造平台已配备完整的绿色解决方案,并提供能耗监测、碳排放核算与优化能力. A 公司选择对接阿里云制造平台进行服务协同与能力获取,并要求任务总成本不超过 400 万元,总交付周期不超过 40 天,总碳排放量不超过 240 kg CO₂e.平台依据可执行性、模块独立性等原则,将任务分解为机械手设计、外壳生产、电板生产、电机生产、集成与测试 5 个子任务,构成子任务集 $T = \{\text{ST}_1, \text{ST}_2, \text{ST}_3, \text{ST}_4, \text{ST}_5\}$,执行流程如图 5 所示.



图5 机械手制造任务执行结构

通过对接工业设计、电机加工与组装测试等多类供应商,阿里云平台从服务池中为每个子任务匹配了 9 个候选服务,并获取各候选服务在可持续性指标下的评价信息,以及候选服务间的物流时间、成本和碳排放量.为确定和满足需求方偏好,平台组织了 A 公司内部 4 位具有代表性的决策者参与可持续性指标权重确定,分别为产品开发部主管、运营与供应链总监、企业战略与可持续发展部负责人、财务与成本控制主管.

3.2 可行性分析

根据上述案例信息,本文调用提出的决策模型来选取最优可持续性服务组合方案,实现过程如下.

1) 可持续性评价指标权重确定.

基于 2.1.1 节和 2.1.2 节提出的可持续性评价指标及指标权重确定方法,4 名决策者分别从一级指标和各维度二级指标中选出最优、最差指标,并使用语言变量给出指标间的对比关系.根据决策者的意见,按照式 (3) 构建最优模糊权值的约束规划模型,求解模型获得一级指标 $A_1 \sim A_3$ 的权重 W_m 为 $\{0.5556, 0.2778, 0.1667\}$; A_1 下二级指标 $C_1 \sim C_3$ 的权重为 $\{0.1429, 0.4018, 0.4554\}$; A_2 下各二级指标权重 w_n^2 为 $\{0.5676, 0.2432, 0.1892\}$; A_3 下各二级指标权重 w_n^3 为 $\{0.5, 0.2083, 0.2917\}$.

2) 云制造服务可持续性评价.

基于指标权重和候选服务的指标评价信息,采用 2.2.1 节的方法获得各子任务下所有候选服务的可持续性评价排序结果,如表 2 所示.

表2 各候选服务的可持续排序结果

rank($CS_{i,j}$)	ST ₁	ST ₂	ST ₃	ST ₄	ST ₅
CS _{i,1}	9	6	3	4	4
CS _{i,2}	5	3	2	2	8
CS _{i,3}	7	8	9	8	3
CS _{i,4}	8	1	8	3	5
CS _{i,5}	4	9	4	1	9
CS _{i,6}	1	4	7	6	2
CS _{i,7}	6	7	6	5	6
CS _{i,8}	2	2	1	9	7
CS _{i,9}	3	5	5	7	1

3) 帕累托最优解集生成.

基于上述指标权重和服务可持续性评价结果,调用 2.2.2 节的 SE-MOAHA 求解 2.1.4 节构建的服务组合模型.算法关键参数设置如下:种群规模为 100,最大迭代次数为 500,外部档案最大容量为 50.算法所得解集的帕累托前沿如图 6 所示.

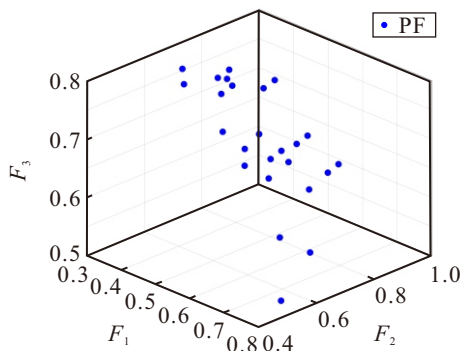


图6 帕累托解集分布图

图 6 中的 3 个坐标轴分别表示模型的 3 个目标函数值.每个圆点代表一个非支配解,这些点分布在三维空间中,反映解在各维度目标上的权衡与分布特征.首先,该解集整体呈现出较为均匀且连续的分布,未出现显著聚集或空缺区域,表明算法探索能力较强、分布均匀性良好,能有效覆盖解空间.其次,从分布形态来看,经济、环境和社会可持续性维度下的解点分别集中在 $[0.5, 0.8]$ 、 $[0.55, 0.75]$ 、 $[0.4, 0.8]$ 的范围内,沿三维坐标轴呈“斜面”状分布,表明各优化目标间存在显著的竞争与约束性,这与实际云制造环境中经济效益、碳减排与社会责任之间的权衡特性一致.最后,从解集密度来看,经济与环境维度中部的解点较为密集,说明算法在该区域形成了较强的收敛趋势,能够有效逼近多维帕累托前沿的高质量区域.同时,社会维度下的解点分布较宽,说明模型在该目标下仍保持较高的解集分散性.综上所述,本文提出的服务组合模型能够在多维可持续性目标之间实现较好的均衡优化;所得帕累托解集覆盖范围广、分布均匀、收敛性强,能够为决策者提供丰富的可选解集.

4) 最优可持续性服务组合方案确定.

算法所得解集包含 35 个解 ($A1 \sim A35$),采用 2.2.3 节的服务组合综合评价方法对解集进行排序,得到结果为:方案 A33 的总可持续性最优,平台选择 $\{CS_{1,5}, CS_{2,4}, CS_{3,8}, CS_{4,5}, CS_{5,6}\}$ 构成组合路径,完成需求方提交的机械手制造任务.

上述实验结果表明,本研究提出的可持续性服务组合决策模型,能够有效衡量多维度评价指标的权重,并在服务可持续性评价结果引导下,综合优化经济、环境和社会目标,为云制造平台提供高稳定性和可持续性的最优服务组合方案.

3.3 对比分析

3.3.1 考虑不同可持续性维度的模型对比分析

由于现有的服务组合模型大多考虑成本、质量等经济维度下的优化目标,部分研究额外考虑了资源利用效率、可靠度等环境或社会维度下的因素^[4,6,25].为了分析环境与社会维度目标对最终服务组合优选方案的影响,本文通过设置不同的目标组合,对比不同服务组合模型的决策结果.对比实验包含 4 种情景:情景 1 下的模型仅考虑经济可持续性优化维度;在此基础上,情景 2 和情景 3 分别额外考虑了环境和社会可持续性最大化目标;情景 4 综合考虑了三维目标,即本文构建的服务组合模型.调用初始 MOAHA 求解各情景下的模型后,本文采用解

数量、各目标下的适应度均值 (MFV) 和标准差 (SD) 指标, 对比得到的解集分布情况, 对比结果如图 7 所示。

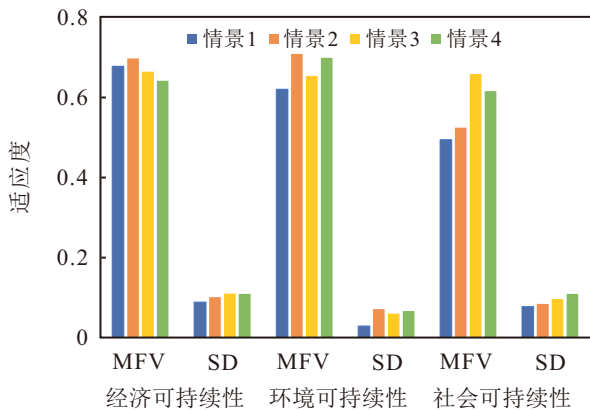


图7 不同情景下模型所得解集的适应度对比结果

图 7 展示了 4 种服务组合模型所得解集在各维度目标下的 MFV 和 SD 值条形图。从解集分布情况来看, 情景 4 下模型获得的解数量最多, 为 35 个, 且分布范围广, SD 值均达到 0.09 以上; 相比之下, 情景 1 模型的解数量较少 (22 个), 分布区间也更集中, 而情景 2 与情景 3 下模型的解数量最少, 分别为 16 和 11 个。这是由于环境和社会可持续性目标与经济目标之间存在较强的冲突性, 压缩了可行解空间; 而情景 4 虽然通过引入三维目标增加了模型的复杂性, 但由于各目标之间存在一定的互补性, 从而扩展了解空间范围。上述结果表明, 所提模型具备较强的解空间覆盖能力和解集多样性, 能够提供更丰富的可选方案。

从可持续性优化效果来看, 情景 1 下的模型在以经济目标为主的场景中表现较好, 但在环境与社会维度欠缺平衡且解集多样性表现最差; 情景 2 和情景 3 下的模型分别在经济和环境可持续性方面表现突出, 但解数量有限, 且在其他维度目标下显著弱化, 尤其是情景 2 的模型大幅牺牲了社会维度的优化性能, 其 MFV 值低于 0.6; 相比之下, 情景 4 模型在三维可持续性目标上均保持较高的适应度水平, 且更具多样性。上述结果说明, 本文所提模型能够有效权衡多维目标之间的冲突, 兼顾优化效果与解的均衡性。

综上所述, 与传统聚焦于经济维度目标的模型相比, 本文所提模型更全面地展现了各维可持续目标之间的权衡关系, 且具有更强的适用性和扩展性。

3.3.2 SE-MOAHA 与典型优化算法的对比分析

为了验证所提算法改进项在提升求解质量和优化性能方面的有效性, 本文在相同算例与参数设置

下, 将 SE-MOAHA 与初始算法 MOAHA 以及经典多目标进化算法 U-NSGA-III (unified non-dominated sorting genetic algorithm III)^[26] 进行对比。作为遗传算法中最具代表性的优化算法之一, U-NSGA-III 适用于解决三目标及高维问题, 且无需设置过多参数^[21]。本文采用算法运行时间 (RT)、初始种群中的 MFV 和 SD 指标, 以及算法迭代过程中的 MFV 变化趋势来评估算法性能。3 种算法的性能指标评估结果如表 3 所示, MFV 变化趋势的对比结果如图 8 所示。

表3 不同算法的性能评估结果

算法	RT / s	MFV	SD
U-NSGA-III	44.12	[-9.20, -9.19, -9.20]	[2.78, 2.83, 2.78]
MOAHA	36.09	[-8.49, -8.47, -8.50]	[4.51, 4.57, 4.52]
SE-MOAHA	40.44	[-8.12, -8.15, -8.10]	[4.62, 4.71, 4.65]

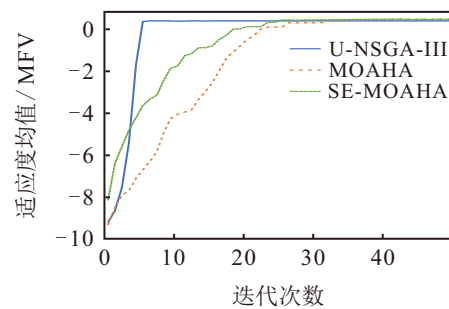


图8 不同算法迭代过程中的 MFV 变化趋势对比结果

分析表 3 和图 8 的对比结果, 可以看出: 在迭代初期, SE-MOAHA 的初始 MFV 显著高于其他算法, 这是由于可持续评价结果引导的初始化策略优先选择了高潜力、多目标优势解, 使搜索从优质区域出发。同时, SE-MOAHA 与 MOAHA 的初始 SD 均高于 U-NSGA-III, 表明人工蜂鸟算法在多样性保持方面更具优势, 而 U-NSGA-III 的初始解集分布集中, 种群多样性不足, 降低了算法对解空间的探索能力。由此可见, 本文所提初始化策略不仅提升了初代解的质量, 也兼顾了种群的多样性, 更有利于全局搜索。

在迭代中期, U-NSGA-III 收敛最快, 曲线在极低代数内迅速逼近其帕累托前沿, 这是由于该算法使用基于参考点和拥挤距离的排序机制, 在早期对解集施加收敛压力, 使其快速聚集于最优解附近, 但该策略牺牲了多样性, 导致后期难以跳出局部最优。MOAHA 的收敛速度较慢, 曲线提升平稳, 与之相比, SE-MOAHA 收敛速度明显加快。上述结果表明, 本文所提基于可持续性评价的觅食策略有效弥补了初始 MOAHA 迭代效率不足的局限, 这种可持续性引导而非强约束的搜索方式, 使 SE-MOAHA 在保证解空间探索能力的同时, 提升了求解速度。

在迭代后期, U-NSGA-III 的运行时间最长, 且 MFV 值低于其他算法, 陷入局部最优, 主要原因在于其解集多样性不足和过快收敛, 导致高维约束下部分参考点区域缺乏可行解或仅得到低质量解, 从而限制了解空间覆盖能力. 与 U-NSGA-III 相比, MOAHA 和 SE-MOAHA 在快速收敛后, MFV 值稳定于 0.65 以上, 这进一步验证了动态拥挤距离消除方法和访问表机制对解质量与效率的提升作用. 此外, 由于可持续性评价引导策略增加了少量计算开销, SE-MOAHA 的总体运行时间略长于初始 MOAHA, 但该算法能够在更少代数内收敛至高质量解集, 展现出更强的稳定性与适用性.

综上所述, 与传统优化算法 U-NSGA-III 相比, 本文所提 SE-MOAHA 具备更强的全局搜索与局部开发平衡能力, 在求解效率、解集质量与多样性方面均表现更优; 与初始 MOAHA 相比, SE-MOAHA 通过可持续性评价引导, 将领域知识与搜索过程结合, 进一步提升了收敛效率与求解稳定性.

4 结论

本文以可持续性为导向, 系统构建了包含指标构建与评价、多目标优化模型构建与求解的服务组合决策模型, 增强了模型在绿色智能制造场景中的可行性与扩展性. 1) 本文所提决策模型通过将需求方偏好不确定性、多目标冲突、碳减排约束等现实因素纳入服务组合优化过程, 有效提升了解决方案对云制造任务多维可持续性诉求的响应能力, 增强了其在绿色制造实践中的适应性. 2) 本文构建了覆盖多维指标与多层次权重, 并融合主客观信息的服务可持续性评价机制. 该机制不仅实现了对单个服务与服务组合可持续性的系统性评价, 还在增强评价结果稳定性与可解释性的同时, 实现了用户偏好与优化过程的有效耦合. 3) 本文提出的 SE-MOAHA 有效融合了服务可持续性评价引导的改进策略, 在整体性能上的表现优于初始算法和传统多目标优化算法, 展现出更高的求解质量、收敛效率和稳定性.

基于上述研究结果, 可得到以下管理启示: 1) 构建可持续性导向的服务评价体系是平台实现差异化竞争的关键. 云制造平台可根据本文提出的评价体系和指标权重确定方法, 引导服务提供方根据需求方的实际偏好来提升其经济、环境与社会属性, 从而在服务组合过程中获得优先选择, 提高整体服务生态的可持续性水平. 2) 通过优化服务组合结构, 可有效提升资源协同与排程效率. 本文的服务组合模型充分考虑了任务结构与运输路径中的碳排放、成本

和时间, 能够为平台提供结构化的服务匹配策略, 减少资源冗余与环境负担, 增强排程与供应链响应效率. 3) 融合智能算法工具, 可推动平台决策的自动化与智能化升级. 通过将 SE-MOAHA 嵌入平台运营流程, 可实现面向大规模、多目标服务组合问题的快速响应, 为复杂制造环境下的资源配置与决策优化提供技术支撑.

尽管本文提出了一个较为完整的可持续性服务组合优化体系, 但仍存在未考虑服务可持续性动态指标, 服务组合方案的鲁棒性较低等不足之处. 因此, 未来的研究将考虑供需波动等不确定情形, 通过引入鲁棒优化或强化学习等方法, 构建面向动态可持续性的服务组合优化方法.

参考文献 (References)

- [1] Vrignat P, Kratz F, Avila M. Sustainable manufacturing, maintenance policies, prognostics and health management: A literature review[J]. *Reliability Engineering & System Safety*, 2022, 218: 108140.
- [2] Ghobakhloo M, Fathi M, Okwir S, et al. Adaptive social manufacturing: A human-centric, resilient, and sustainable framework for advancing Industry 5.0[J]. *International Journal of Production Research*, 2025: 1-34.
- [3] Kannikaklang N, Thamviset W, Wongthanasu S. BiGCAN: A novel SRS-based bidirectional graph convolution attention network for dynamic user preference and next-item recommendation[J]. *Expert Systems with Applications*, 2025, 265: 126016.
- [4] Tang C, Zhang Q, Ding J, et al. A two-phase approach for benefit-driven and correlation-aware service composition allocation in cloud manufacturing[J]. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 2025, 95: 103007.
- [5] 张晓冬, 燕洁晨, 孙家正. 动态扰动下云制造服务组合的区间多目标优化方法[J]. *控制与决策*, 2026, 41(1): 19-30.
(Zhang X D, Yan X C, Sun J Z. Interval multi-objective optimization for cloud manufacturing service composition under dynamic disturbances[J]. *Control and Decision*, 2026, 41(1): 19-30.)
- [6] Gao Y, Yang B, Wang S, et al. Bi-objective service composition and optimal selection for cloud manufacturing with QoS and robustness criteria[J]. *Applied Soft Computing*, 2022, 128: 109530.
- [7] 袁伟, 郭伟, 王磊, 等. 云制造下小批量定制产品的服务组合双层优选方法[J]. *计算机集成制造系统*, 2024, 30(1): 253-268.
(Yuan W, Guo W, Wang L, et al. Bi-layer optimization method of service composition for small batch customized products under cloud manufacturing[J]. *Computer Integrated Manufacturing Systems*, 2024, 30(1): 253-268.)

- [8] Liu Z, Wang L, Li X, et al. A multi-attribute personalized recommendation method for manufacturing service composition with combining collaborative filtering and genetic algorithm[J]. *Journal of Manufacturing Systems*, 2021, 58: 348-364.
- [9] Tang C, Zhao S, Su H, et al. A QoS and sustainability-driven two-stage service composition method in cloud manufacturing: combining clustering and bi-objective optimization[J]. *Journal of Global Optimization*, DOI: 10.1007/s10898-024-01430-z.
- [10] Ahmed W, Sarkar B. Management of next-generation energy using a triple bottom line approach under a supply chain framework[J]. *Resources, Conservation and Recycling*, 2019, 150: 104431.
- [11] Jiang P, Guo S, Du B, et al. Two-sided matching decision-making model for complex product system based on life-cycle sustainability assessment[J]. *Expert Systems with Applications*, 2022, 208: 118184.
- [12] Haseli G, Sheikh R, Sana S S. Base-criterion on multi-criteria decision-making method and its applications[J]. *International Journal of Management Science and Engineering Management*, 2020, 15(2): 79-88.
- [13] Hafezalkotob A, Hafezalkotob A. A novel approach for combination of individual and group decisions based on fuzzy best-worst method[J]. *Applied Soft Computing*, 2017, 59: 316-325.
- [14] Rahimi S, Hafezalkotob A, Monavari S M, et al. Sustainable landfill site selection for municipal solid waste based on a hybrid decision-making approach: Fuzzy group BWM-MULTIMOORA-GIS[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2020, 248: 119186.
- [15] Pu D, Yuan G. Two-sided matching model considering multi-information fusion of stakeholders[J]. *Expert Systems with Applications*, 2023, 212: 118784.
- [16] 王莉静, 马志鑫, 徐梦杰. 考虑企业多种属性的共享制造平台供需双边匹配模型研究[J]. *计算机集成制造系统*, 2024, 30(9): 3299-3309.
(Wang L J, Ma Z X, Xu M J. Supply-demand matching model of shared manufacturing platform considering multiple enterprise attributes[J]. *Computer Integrated Manufacturing Systems*, 2024, 30(9): 3299-3309.)
- [17] Li Y, Côté J F, Coelho L C, et al. Order assignment and scheduling under processing and distribution time uncertainty[J]. *European Journal of Operational Research*, 2023, 305(1): 148-163.
- [18] Yin H, Huang X, Cao E. A cloud-edge-based multi-objective task scheduling approach for smart manufacturing lines[J]. *Journal of Grid Computing*, 2024, 22(1): 9.
- [19] Zhang Q, Li S, Pu R, et al. An adaptive robust service composition and optimal selection method for cloud manufacturing based on the enhanced multi-objective artificial hummingbird algorithm[J]. *Expert Systems with Applications*, 2024, 244: 122823.
- [20] 张丽园, 刘建昌, 刘圆超, 等. 基于自适应响应选择的动态多目标进化算法[J]. *控制与决策*, 2025, 40(12): 3689-3703.
(Zhang L Y, Liu J C, Liu Y C, et al. A dynamic multi-objective optimization algorithm based on adaptive response selection[J]. *Control and Decision*, 2025, 40(12): 3689-3703.)
- [21] 孙琳, 禹春霞. 考虑调度约束的产能共享平台供需匹配[J]. *计算机集成制造系统*, 2025, 31(7): 2659-2678.
(Sun L, Yu C X. Supply-demand matching of capacity sharing platform considering scheduling constraints[J]. *Computer Integrated Manufacturing Systems*, 2025, 31(7): 2659-2678.)
- [22] Zhao W, Zhang Z, Mirjalili S, et al. An effective multi-objective artificial hummingbird algorithm with dynamic elimination-based crowding distance for solving engineering design problems[J]. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 2022, 398: 115223.
- [23] Stević Ž, Pamučar D, Puška A, et al. Sustainable supplier selection in healthcare industries using a new MCDM method: Measurement of alternatives and ranking according to compromise solution (MARCOS)[J]. *Computers & Industrial Engineering*, 2020, 140: 106231.
- [24] Hosseini D S S, Firoozabadi B. A new application of measurement of alternatives and ranking according to compromise solution (MARCOS) in solar site location for electricity and hydrogen production: A case study in the southern climate of Iran[J]. *Energy*, 2022, 261: 125376.
- [25] 尹超, 许加晟, 李孝斌. 基于 NSGA-III 算法的云制造服务组合优选方法[J]. *计算机集成制造系统*, 2022, 28(4): 1164-1176.
(Yin C, Xu J S, Li X B. NSGA-III based service composition optimization method in cloud manufacturing[J]. *Computer Integrated Manufacturing Systems*, 2022, 28(4): 1164-1176.)
- [26] Seada H, Deb K. A unified evolutionary optimization procedure for single, multiple, and many objectives[J]. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, 2016, 20(3): 358-369.

作者简介

孙琳 (1997-), 女, 博士生, 主要研究方向为平台运营管理与智能决策, E-mail: sunlin7737@163.com;

禹春霞 (1983-), 女, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为平台运营管理、决策理论与方法, E-mail: cxyu@cup.edu.cn;

陈萌 (1998-), 女, 硕士生, 主要研究方向为信息管理与智能决策, E-mail: 2106338129@qq.com;

李灿灿 (2002-), 女, 硕士生, 主要研究方向为信息管理与智能决策, E-mail: 2964532374@qq.com.