

基于R-GRA的云制造协同服务主体评价研究

杨涛 蒋芳*

重庆工商大学工商管理学院,重庆,400067

摘要:针对传统云制造模式下协同服务主体评价过程中存在的评价指标选取不全面、评价信息处理不合理等问题,提出了一种基于粗数-灰色关联度分析(R-GRA)的云制造协同服务主体评价新方法。首先,综合考虑云制造服务主体的生产能力、经济能力、组织能力、风险应对能力和可持续发展能力,系统建立了包含多个子指标的云制造协同服务主体评价指标体系,并运用熵权法度量指标权重;然后,考虑到协同服务主体评价过程中评价信息的模糊性与不确定性,构建了基于R-GRA的云制造协同服务主体评价模型,并通过融入上述评价指标权重信息,计算各协同服务主体粗数区间差异系数,输出最优协同服务主体评价结果。最后,以某电子医疗器械云制造为例,验证所提模型的科学性、合理性和有效性。

关键词:云制造;协同服务主体;评价指标;熵权法;粗数-灰色关联度分析

中图分类号:TP391

DOI:10.3969/j.issn.1004-132X.2025.09.022

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Research on Evaluations of Cloud Manufacturing Collaborative Service Entities Based on R-GRA

YANG Tao JIANG Fang*

School of Business Administration, Chongqing Technology and Business University, Chongqing, 400067

Abstract: To address issues such as incomplete selection of evaluation indicators and unreasonable processing of evaluation information in the traditional cloud manufacturing paradigm during the evaluation of collaborative service entities, a novel evaluation method for cloud manufacturing collaborative service entities was proposed based on R-GRA. Firstly, by comprehensively considering the production capacity, economic strength, organizational capability, risk response ability, and sustainable development capability of cloud manufacturing service entities, a systematic evaluation index system with multiple sub-indices was established, and the entropy weight method was used to determine the indicator weights. Secondly, taking into account the fuzziness and uncertainty of evaluation information in the collaborative service entity evaluation processes, an evaluation model for cloud manufacturing collaborative service entities was constructed based on R-GRA. By integrating the weights of the aforementioned evaluation indicators, the rough number interval difference coefficient for each collaborative service entity was calculated to yield the optimal evaluation results. Finally, the proposed model was validated for the scientific validity, reasonableness, and effectiveness through a case study of cloud manufacturing in electronic medical devices.

Key words: cloud manufacturing; collaborative service entity; evaluation index; entropy weight method; rough number-grey relational analysis(R-GRA)

0 引言

为解决更加复杂的制造问题和开展更大规模的协同制造,李伯虎等^[1]在分析网络化制造模式及其应用推广的基础上提出了云制造的概念。云制造是传统网络协同制造的延伸,它能够将分布式的制造资源进行发现、汇聚、优化配置,为不同用户提供服务^[2]。对此,如何选择满足需求的协同服务主体是云制造平台提供优质服务的关键。

一方面,由于产品的复杂性,一个制造任务往往会被分解成多个子服务需求^[3]。在此过程中,基于各服务主体制造能力和资源的差异性,选择资源、能力、成本等匹配度较高的协同服务主体有助于实现云制造协同生产效益的最大化。另一方面,参与云制造协同生产的各服务主体相互制约、紧密关联,任何一方在承接生产任务时发生变化,均可能影响协作方的生产进度和作业计划,进而影响总成本与总工时。因此,如何评价和选择协同服务主体以减少沉没成本和风险损失并提高生产效率,对推动制造企业从传统制造向服务型制造转型升级具有重要意义。

目前国内外学者关于云制造模式下服务主体

收稿日期:2024-05-19

基金项目:国家自然科学基金(71701027);重庆市自然科学基金(CSTB2024NSCQ-MSX0913);重庆工商大学研究生科研创新项目(CYS240543)

评价问题的研究主要包括如下两个方面：

1)评价指标体系方面。陈友玲等^[4]基于时间、成本、质量相似性和合作沟通性等因素建立了供应商评价指标体系；包菊芳等^[5]从生产能力、产品质量、产品竞争力、合作程度及ESG等方面构建了合作伙伴评价体系。周向红等^[6]将相容性、创新能力、技术方案与创新效果纳入协同创新伙伴评价指标；潘燕华等^[7]结合云制造特点及产品生命周期，构建了涵盖成本、时间、质量和服务能力的合作伙伴评价指标体系；HU等^[8]为优化服务提供方决策，建立了包含制造服务活动、声誉、可靠性、合作满意度及服务便利性等指标的评价体系。通过文献梳理发现，尽管现有研究在评价指标体系构建方面取得了较为深入的成果，但对服务主体的经济能力、可持续发展能力和风险应对能力等方面的评价仍存在不足。

2)评价方法方面。冉文学等^[9]结合用户需求偏好与模糊性，提出了基于直觉模糊层次分析法对执行差异化产品生产任务的企业进行评估；TAVAKKOLI-MOGHADDAM等^[10]采用混合多标准决策框架并考虑可持续发展标准，帮助决策者更好地处理云制造供应商选择问题；赵金辉等^[11]提出一种考虑企业心理预期的合作伙伴双向选择方法；唐春华等^[12]构建了基于服务质量多方异质评价与供需双约束的云服务推荐模型；郭伟等^[13]提出粗糙集和层次分析法混合评价方法，建立了科学有效的多主体信用评价体系；ZHENG等^[14]构建了基于设计偏好的云制造QoS描述模型。综上所述，现有云制造服务主体评价方法和模型研究成果虽较为丰富，但存在评价方法难以全面反映评价者对服务主体的真实感知、输出结果不够直观等问题。

1 云制造协同服务主体评价指标体系的构建

云制造实现了分散化制造资源的整合、共享和协同，其服务模式由云制造平台、服务提供方及服务需求方组成。服务需求方在平台发布需求，服务提供方则基于平台提供制造服务。服务主体是指在平台注册、响应市场需求并提供相关制造服务的企业；协同服务主体则指具备制造资源和能力、协作完成生产任务的企业群体。平台根据任务需求对服务提供方进行评价，优选匹配度最高的服务主体参与协同制造。在平台支持下服务需求方、服务提供方及平台方共同参与制造资

源与服务的发布、评估、匹配、组合与执行等全生命周期的关键环节。云制造服务的流程图见图1。

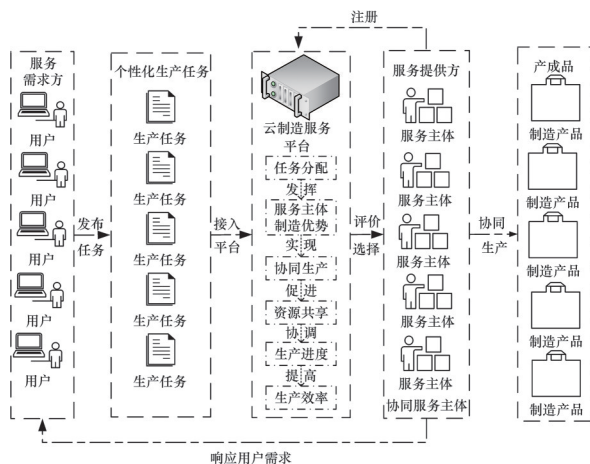


图1 云制造服务流程图

Fig.1 Cloud manufacturing service process diagram

科学构建协同服务主体评价指标体系是云制造平台选择协同制造合作伙伴的关键。通常情况下，衡量服务主体的常见指标包括质量、成本、时效性、服务水平以及生产能力。云制造模式下合作伙伴选择的本质是选择一种云端服务，评价指标体系可参考服务平台的QoS指标，如价格、工期、可靠性、可用性 & 距离等^[6]。同时，评价指标选取还应充分考虑服务质量要求、指标选取的全面性及指标实用性等。

除上述因素外，服务主体的组织能力、风险应对能力以及可持续发展能力等因素也会影响协同制造的最最终成效。具体而言，组织能力主要包括企业信誉、企业文化和企业环境等方面。对组织能力进行科学评估，有助于提高服务主体间的协调效率与资源配置水平，从而提高协同制造满意度。风险应对能力是保障协同制造持续推进的关键因素。有效的风险管理不仅能够增强合作各方的协作稳定性，还能降低协同制造过程中的不确定性与潜在损失，从而确保任务完成的连续性与可靠性。可持续发展能力反映了服务主体在实现长期生存与发展的过程中保持竞争优势、盈利能力及稳健增长的综合能力。对可持续发展能力的评估有助于全面了解协同服务主体在适应外部环境变化和保障长期发展等方面的稳健性。此外，协同服务主体评价指标体系构建还应充分考虑用户需求和任务特征，确保指标体系的科学性、典型性与全面性。

本文基于已有文献研究成果^[15-18]，以生产能力、经济能力、组织能力、风险应对能力和可持续

发展能力为准则,构建了覆盖生产时间、生产成本 一个二级指标的协同服务主体指标评价体系,如表等 20 个一级指标,运输时间、作业转换时间等 72 1 所示。

表 1 云制造模式下协同服务主体评价指标体系

Tab.1 Collaborative service entity evaluation system under cloud manufacturing model

目标层	准则层	一级指标	二级指标	指标解释	属性
云制造模式下协同服务主体评价指标	生产能力	生产时间 A	运输时间	产品运输时间	定量
			工期	产品制造工期	定量
			作业转换时间	产品工序转换时间	定量
		生产成本 B	直接生产费用	生产环节与物耗等直接相关的费用	定量
			物流费用	产品物流费用	定量
			员工工资	企业支出员工工资	定量
			管理费用	企业管理者支出费用	定量
		产品质量 C	故障率	产品发生故障机率	定量
			粗糙度	产品粗糙度	定量
			尺寸精度	产品尺寸与公差的符合程度	定量
			耐用性	产品平均使用寿命	定量
		生产资源 D	可维修性	产品平均维修时间	定量
			生产资源占有率	企业云制造资源占有率	定量
			生产技术被替代率	企业生产技术被替代率	定量
			生产设备数量	企业制造研发设备数量	定量
		经济能力	资产规模 E	供应商规模	企业供应商规模大小
	资产存量			企业的资产总额	定量
	财务状况 F		净资产	企业的资产净额	定量
			资产负债率	企业资产负债率	定量
			速动比率	企业速动比率	定量
			资本运营能力	企业资本运营能力	定性
	盈利能力 G		净资产收益率	企业净资产收益率	定量
			营业利润率	企业的营业利润率数据	定量
	组织能力	企业信誉 H	资本收益率	企业的资本收益率数据	定量
			信用报告	企业信用报告单	定性
			客户口碑和评价	客户对企业的口碑和评价	定性
			企业诚信经营情况	企业诚信经营的情况	定性
		企业文化 I	品牌知名度和声誉	企业的知名度和企业声誉	定性
			企业文化	企业文化内容	定性
			企业价值观	企业价值观情况	定性
		企业制度 J	社会责任表现	企业履行社会责任情况	定性
			企业奖惩制度	企业奖惩机制	定性
			企业绩效考核	企业绩效考核机制	定性
			薪酬体系设置	企业薪酬体系情况	定性
		企业环境 K	员工开发与培训	企业员工开发与培训情况	定性
			员工招聘	企业员工招聘情况	定性
			企业经济技术环境	企业技术与经济环境	定性
			企业政治法律环境	企业政治与法律环境	定性
		企业人力资源 L	企业社会环境	企业社会关系情况	定性
	企业地理位置		企业地理位置情况	定性	
	员工数量		企业参与产品制造人数	定量	
	管理者数量		企业管理者人数	定量	
	风险应对能力	风险识别能力 M	科学技术人才数量	企业科学技术人才数量	定量
			员工素质	企业员工素质水平	定性
		风险评估能力 N	管理者水平	企业管理者水平	定性
			信息监测搜集能力	企业信息监测与搜集能力	定量
		风险控制能力 O	风险敏锐度	企业的风险敏锐度	定性
风险评估工具			企业使用的风险评估工具	定性	
风险转移能力 P		风险评估报告	企业编制风险评估报告情况	定性	
		风险控制措施	企业风险控制措施情况	定性	
	应急预案与危机管理	企业应急预案与危机管理	定性		
	保险覆盖率	企业的保险覆盖率	定量		
	风险转移成本	企业的风险转移成本	定量		

续表

目标层	准则层	一级指标	二级指标	指标解释	属性
云制造模式下协同服务主体评价指标	可持续发展能力	合作能力 Q	参与云制造合作次数	企业参与云制造合作次数	定量
			合作企业满意度	合作企业对该企业的满意度	定性
			合作目标完成率	企业参与合作目标完成率	定量
			合作柔性化程度	企业合作柔性化程度	定性
			合作广度	企业参与合作的业务范围	定性
			可组合性	企业与其他企业可组合性	定性
			合作深度	企业参与云制造合作深度	定性
		沟通能力 R	沟通响应能力	企业沟通过程中的响应能力	定性
			信息反馈能力	企业沟通过程中的信息反馈能力	定性
			沟通方式	企业常用有效沟通方式	定性
			沟通有效性	企业沟通的有效性	定性
		交付能力 S	产品合格率	产品合格率	定量
			返修退货率	产品返修退货率	定量
			准时交货率	产品准时交货概率	定量
		服务能力 T	顾客流失率	企业顾客流失率	定量
			顾客投诉率	企业顾客投诉率	定量
			服务可持续性	企业提供服务可持续性	定性
			增值服务能力	企业提供增值服务能力	定性
			扩展服务能力	企业提供扩展服务能力	定性

2 云制造协同服务主体评价模型的构建

2.1 基于熵权法的评价指标权重确定

在信息论中,熵用于量化信息的不确定性,其数值与信息的有序程度成反比关系。熵权法是一种基于各指标所包含信息量差异来客观确定指标权重的方法。具体而言,熵反映了评价指标的差异化程度,即熵值越小,指标间差异越大,说明该指标在综合评价中的区分作用越强,权重越大;反之,熵值越大,指标间差异越小,它在综合评价中的作用较弱,对应权重越小^[19]。采用熵权法对协同服务主体评价指标权重系数进行客观赋值能够有效避免人为赋权的主观偏差,从而使评价结果更加客观和真实。由于各项评价指标的数据量纲存在差异,故需要首先对各指标的实际得分进行标准化处理。在此基础上构建标准化矩阵,并应用熵权法计算各指标权重。评价指标权重的具体计算步骤如下。

1)设有协同服务主体评价对象 n 个,评价指标为 m 个,将各指标值进行标准化处理为 $x_{ij}, x_{ij} (i=1, 2, \dots, n; j=1, 2, \dots, m)$ 为标准化处理后的第 i 个协同服务主体的第 j 个指标值。运用极差法对数据进行标准化处理。

对于越大越好的正向指标,有

$$y_{ij} = \frac{x_{ij} - \min(x_{ij})}{\max(x_{ij}) - \min(x_{ij})} + D_0 \quad (1)$$

对于越小越好的负向指标,有

$$y_{ij} = \frac{\max(x_{ij}) - x_{ij}}{\max(x_{ij}) - \min(x_{ij})} + D_0 \quad (2)$$

其中, $\max(x_{ij})$ 表示第 j 个指标值最大的协同服务

主体, $\min(x_{ij})$ 表示第 j 个指标值最小的协同服务主体, D_0 为消除负数影响所需的最小平移距离。

2)对各指标进行标准化处理后,计算第 j 个指标下第 i 个样本值所占比重:

$$p_{ij} = y_{ij} / \sum_{i=1}^n y_{ij} \quad (3)$$

3)进一步计算第 j 项指标的信息熵:

$$e_j = -\frac{1}{\ln n} \sum_{i=1}^n p_{ij} \ln p_{ij} \quad (4)$$

4)计算差异性系数:

$$g_j = 1 - e_j \quad (5)$$

5)计算各指标的权重:

$$w_j = g_j / \sum_{j=1}^m g_j \quad (6)$$

6)采用线性加权法确定各评价指标的最终综合权重:

$$v_j = \sum_{j=1}^m (w_j \times y_{ij}) \quad (7)$$

式(3)~式(5)中, $e_j \geq 0, j=1, 2, \dots, m$ 。综上,根据熵的可加性,一级指标的权重可以由二级指标的权重加总得出。

2.2 基于 R-GRA 的云制造协同服务主体评价模型构建

云制造协同服务主体评价旨在确保协同生产过程中实现制造效率最优化、用户满意度最大化及产品质量最佳化。云制造平台有效整合了各类分散的制造资源,为用户提供按需即取的服务。在该平台运行机制中,服务需求方提交制造订单后,平台根据任务属性匹配合适的服务主体。然而,随着制造需求日益呈现的个性化与复杂化趋

势,单一服务主体难以独立承担全部制造任务,多服务主体协同制造模式成为必然选择。与此同时,随着平台汇聚企业的数量持续增长,任务匹配阶段回复往往存在多个服务主体可供选择,如何评估与选择最优的协同服务主体成为亟待解决的关键问题。因此,构建科学合理的评价模型对云制造平台平稳运行具有重要意义。一方面,基于多维指标的综合评价体系能够有效降低协作风险,提高跨企业制造效率,实现平台、用户与企业的多方共赢;另一方面,该评价模型为平台提供候选服务主体的综合信息,支持了平台对各服务主体进行有效的预评估,从而促进高效协同制造目标的实现。云制造协同服务主体评价模型如图2所示。

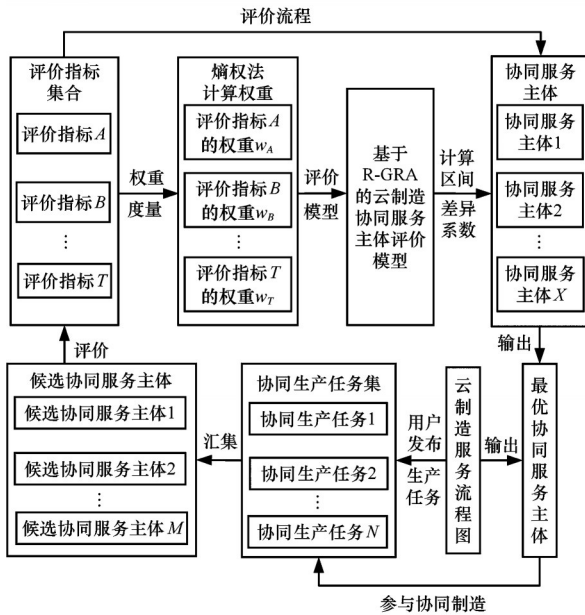


图2 云制造协同服务主体评价模型

Fig.2 Cloud manufacturing collaborative service entities evaluation model

为确保产品在全生命周期各阶段的生产质量,平台需依据任务标准对各服务主体进行科学评估。然而,由于评价指标体系的复杂性和评价过程的主观性,仅依赖单一决策者进行评分难以保证评价结果的合理性与准确性^[20]。粗数(rough number)是ZHAI等^[21-22]基于粗集理论提出的一种新概念。该方法通过统计分析决策者的原始评分数据,以两个可计算的清晰集($[\underline{\text{lim}} X, \overline{\text{lim}} X]$,其中 $\underline{\text{lim}} X$ 为下限, $\overline{\text{lim}} X$ 为上限)来描述决策信息,将单一数值点转化为区间数形式,从而有效避免了评价过程中的模糊性与不确定性。此外,该方法无需额外数据采集,主要依托已有的决策群体评分结果,因此能够更有效且准确地反映

决策者的真实感知^[23]。在此,本文借鉴文献[23]中改进的粗数定义,并结合灰色关联分析方法(grey relation analysis, GRA)的基本原理构建了一个基于粗数-灰色关联度分析(R-GRA)的云制造协同服务主体评价模型,其具体评价步骤如下。

1) f 个评审专家针对候选服务主体 X_i 在评价指标 A_j 下的评价属性值表示为 $b_{ij}(t)$ ($j=1,2,\dots,m;t=1,2,\dots,f$),获得各协同服务主体 X_i 的初始评价矩阵如下:

$$G_i = \begin{bmatrix} b_{i1}(1) & b_{i1}(2) & \dots & b_{i1}(f) \\ b_{i2}(1) & b_{i2}(2) & \dots & b_{i2}(f) \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ b_{im}(1) & b_{im}(2) & \dots & b_{im}(f) \end{bmatrix}_{m \times f} \quad (8)$$

2) 初始评价矩阵的粗数处理。

① 假定论域 U 包含决策表中所有对象(候选协同服务主体 X_i)及其属性(评价指标 A_j)。 U 中描述对象的属性包括 k 类,可记为 $b_{ij} = \{b_{ij}^{(1)}, b_{ij}^{(2)}, \dots, b_{ij}^{(k)}\}$ 。如果 k 类间可以按照 $b_{ij}^{(1)} < b_{ij}^{(2)} < \dots < b_{ij}^{(k)}$ 进行排序,则对于评价指标 A_j 的任意属性类 $b_{ij}^{(s)} \in b_{ij}, 1 \leq s \leq k, b_{ij}^{(s)}$ 的下近似限和上近似限分别表示为

$$\underline{\text{Apr}}(b_{ij}^{(s)}) = \{b_{ij}(t) / b_{ij}(t) \leq b_{ij}^{(s)}\} \quad (9)$$

$$\overline{\text{Apr}}(b_{ij}^{(s)}) = \{b_{ij}(t) / b_{ij}(t) \geq b_{ij}^{(s)}\} \quad (10)$$

② 评价指标 A_j 的评价属性类 $b_{ij}^{(s)}$ 可以用粗数表示,其中 $\underline{\text{lim}}(b_{ij}^{(s)})$ 、 $\overline{\text{lim}}(b_{ij}^{(s)})$ 分别为粗数的下限和上限,其表达式为

$$\underline{\text{lim}}(b_{ij}^{(s)}) = \frac{1}{Z_p} \sum b_{ij}(t) | b_{ij}(t) \in \underline{\text{Apr}}(b_{ij}^{(s)}) \quad (11)$$

$$\overline{\text{lim}}(b_{ij}^{(s)}) = \frac{1}{Z_q} \sum b_{ij}(t) | b_{ij}(t) \in \overline{\text{Apr}}(b_{ij}^{(s)}) \quad (12)$$

式中: Z_p, Z_q 分别为属性类 $b_{ij}^{(s)}$ 的下近似限和上近似限包含属性数。

③ 评价指标 A_j 的评价属性类 $b_{ij}^{(s)}$ 的粗数为

$$V_{\text{CRN}}(b_{ij}^{(s)}) = [\underline{\text{lim}}(b_{ij}^{(s)}), \overline{\text{lim}}(b_{ij}^{(s)})] \quad (13)$$

④ 针对候选协同服务主体 X_i ,评价指标 A_j 的粗数下限、上限及粗数分别为

$$\underline{\text{lim}}(A_j) = \frac{1}{f} \sum \underline{\text{lim}}(b_{ij}^{(s)}) \quad (14)$$

$$\overline{\text{lim}}(A_j) = \frac{1}{f} \sum \overline{\text{lim}}(b_{ij}^{(s)}) \quad (15)$$

$$V_{\text{CRN}}(A_j) = [\underline{\text{lim}}(A_j), \overline{\text{lim}}(A_j)] \quad (16)$$

式(14)表示针对候选协同服务主体 X_i ,将评价指标 A_j 中所有属性对应的类的粗数下限求平均数;式(15)表示针对候选协同服务主体 X_i ,将评价指标 A_j 中所有属性对应的类的粗数上限求平均值。

⑤ 类似地,采用上述方法分别计算评价指标 $A_j(j=1,2,\dots,m)$ 在候选服务主体 X_i 评价中的粗

数,得到各候选协同服务主体 X_i 在评价指标 A_j 下经粗数处理后的评价矩阵 $G'_i = [V_{CRN}(A_j)]_{1 \times m}$ 。

3) 将步骤2)中的评审专家对各候选协同服务主体的评价结果进行集成,建立经过粗数处理后的 n 个候选协同服务主体在 j 个评价指标下的 $n \times m$ 阶综合评价矩阵,其表达式为

$$G = \begin{bmatrix} [f_{11}^-, f_{11}^+] & [f_{12}^-, f_{12}^+] & \cdots & [f_{1m}^-, f_{1m}^+] \\ [f_{21}^-, f_{21}^+] & [f_{22}^-, f_{22}^+] & \cdots & [f_{2m}^-, f_{2m}^+] \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ [f_{n1}^-, f_{n1}^+] & [f_{n2}^-, f_{n2}^+] & \cdots & [f_{nm}^-, f_{nm}^+] \end{bmatrix}_{n \times m} \quad (17)$$

式中: $[f_{ij}^-, f_{ij}^+]$ 表示经过粗数处理后的候选协同服务主体 X_i 在评价指标 A_j 中的评价信息; f_{ij}^- 、 f_{ij}^+ 分别为经粗数处理后的评价信息的粗数下限和粗数上限。

4) 确定参考数列,其表达式为

$$f_0 = (f_0(1), f_0(2), \dots, f_0(n))$$

其中,越大越优型指标 $f_0(j) = \max_{i=1}^n (f_{ij}^+)$, 越小越优型指标 $f_0(j) = \min_{i=1}^n (f_{ij}^-)$, 不失一般性,以下假定所有指标均为越大越优型。

5) 构建差异系数矩阵,其表达式为

$$\gamma = \begin{bmatrix} [\gamma_{11}^-, \gamma_{11}^+] & [\gamma_{12}^-, \gamma_{12}^+] & \cdots & [\gamma_{1m}^-, \gamma_{1m}^+] \\ [\gamma_{21}^-, \gamma_{21}^+] & [\gamma_{22}^-, \gamma_{22}^+] & \cdots & [\gamma_{2m}^-, \gamma_{2m}^+] \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ [\gamma_{n1}^-, \gamma_{n1}^+] & [\gamma_{n2}^-, \gamma_{n2}^+] & \cdots & [\gamma_{nm}^-, \gamma_{nm}^+] \end{bmatrix}_{n \times m} \quad (18)$$

其中,差异系数 γ_{ij}^- 、 γ_{ij}^+ 分别为粗数下限与参考序列之间的距离、粗数上限与参考序列之间的距离,采用区间的形式分别表示为

$$\gamma_{ij}^- = f_0(j) - f_{ij}^+ = \max_{i=1}^n (f_{ij}^+) - f_{ij}^+$$

$$\gamma_{ij}^+ = f_0(j) - f_{ij}^- = \max_{i=1}^n (f_{ij}^-) - f_{ij}^-$$

6) 差异系数矩阵的标准化处理。设 $\mathbf{A} = ([c_1^-, c_1^+], [c_2^-, c_2^+], \dots, [c_n^-, c_n^+])^T$ 为任意粗数区间 $[c_i^-, c_i^+]$ 的列向量, $\|\mathbf{A}\|$ 为粗数区间列向量 \mathbf{A} 的范数,其取值方式如下:

$$\|\mathbf{A}\| = \max(\max(|c_1^-|, |c_1^+|), \max(|c_2^-|, |c_2^+|), \dots, \max(|c_n^-|, |c_n^+|)) \quad (19)$$

设 Δ_{A_j} 为候选协同服务主体 X_i 对应的评价指标 A_j 的范数。经标准化处理后的差异系数 γ'_{ij}^- 、 γ'_{ij}^+ 分别表示为

$$\gamma'_{ij}^- = \frac{\gamma_{ij}^-}{\|\Delta_{A_j}\|} \quad \gamma'_{ij}^+ = \frac{\gamma_{ij}^+}{\|\Delta_{A_j}\|}$$

则经标准化处理后的差异系数矩阵为

$$\gamma' = \begin{bmatrix} [\gamma'_{11}^-, \gamma'_{11}^+] & [\gamma'_{12}^-, \gamma'_{12}^+] & \cdots & [\gamma'_{1m}^-, \gamma'_{1m}^+] \\ [\gamma'_{21}^-, \gamma'_{21}^+] & [\gamma'_{22}^-, \gamma'_{22}^+] & \cdots & [\gamma'_{2m}^-, \gamma'_{2m}^+] \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ [\gamma'_{n1}^-, \gamma'_{n1}^+] & [\gamma'_{n2}^-, \gamma'_{n2}^+] & \cdots & [\gamma'_{nm}^-, \gamma'_{nm}^+] \end{bmatrix}_{n \times m} \quad (20)$$

7) 计算各候选服务主体 X_i 的区间差异系数和粗边界区间,其表达式分别为

$$D_{X_i} = \sum_{j=1}^m w_{A_j} [\gamma'_{ij}^-, \gamma'_{ij}^+] \quad (21)$$

$$V_{\text{Bnd}}(D_{X_i}) = \overline{\text{lim}}(D_{X_i}) - \underline{\text{lim}}(D_{X_i}) \quad (22)$$

其中, D_{X_i} 为候选服务主体 X_i 的区间差异系数,采用粗数形式表示; w_{A_j} 为指标 A_j 的权重值; $V_{\text{Bnd}}(D_{X_i})$ 表示候选协同服务主体 X_i 粗数上下限之间的差值(即粗边界区间),差值越大表明越模糊,反之,差值越小表明越精确,排序时应该将精确性高的结果排在精确性低的结果前面。

8) 将各候选协同服务主体按照式(22)计算的结果进行排序,粗边界区间最小的服务主体即为综合评价最优的协同服务主体 X^* 。

综上,基于 R-GRA 云制造模式下协同服务主体评价与选择流程如图3所示。

3 案例分析

本文以 Z 公司某型号电子医疗器械产品云制造为例来验证评价指标体系的合理性以及评价方法的可行性。云制造领域的新兴企业——Z 公司医疗器械有限公司根据客户需求,计划在五个月内交付一批具有高分辨率成像、实时监测治疗进程以及自动调整激光参数功能的某新型电子医疗器械。该器械产品不仅需要满足严格的临床作业环境,还需要具备高精度成像和实时数据反馈功能,且与企业现有标准化产品相比具有创新性。由于生产涉及多个制造领域,且研制周期短,公司难以依靠自身条件独立完成生产任务,故将制造任务发布到云制造平台。平台通过生产解读和资源搜索,现亟需多个服务主体密切合作,以快速响应用户需求。该平台将制造任务分解为设计研发、零部件制造、组件装配等6个子任务,如表2所示。

协同服务主体可以在其制造能力范围内申请承接多个子任务。平台最终选择各子任务评价结果中区间差异系数最小的服务主体参与协同制造。针对子任务1,经平台初步筛选后,符合质量要求的候选协同服务主体有10家,记为 $X = \{X_1, X_2, \dots, X_{10}\}$, 其信息化统计数据如表3所示。

依据本文提出的云制造模式下协同服务主体评价方法对子任务1下的10家候选协同服务主体进行系统评价,具体评价分析过程如下。

1) 评价指标权重计算。根据式(1)~式(7)计算评价指标体系中的各指标权重,结果如表4所示。

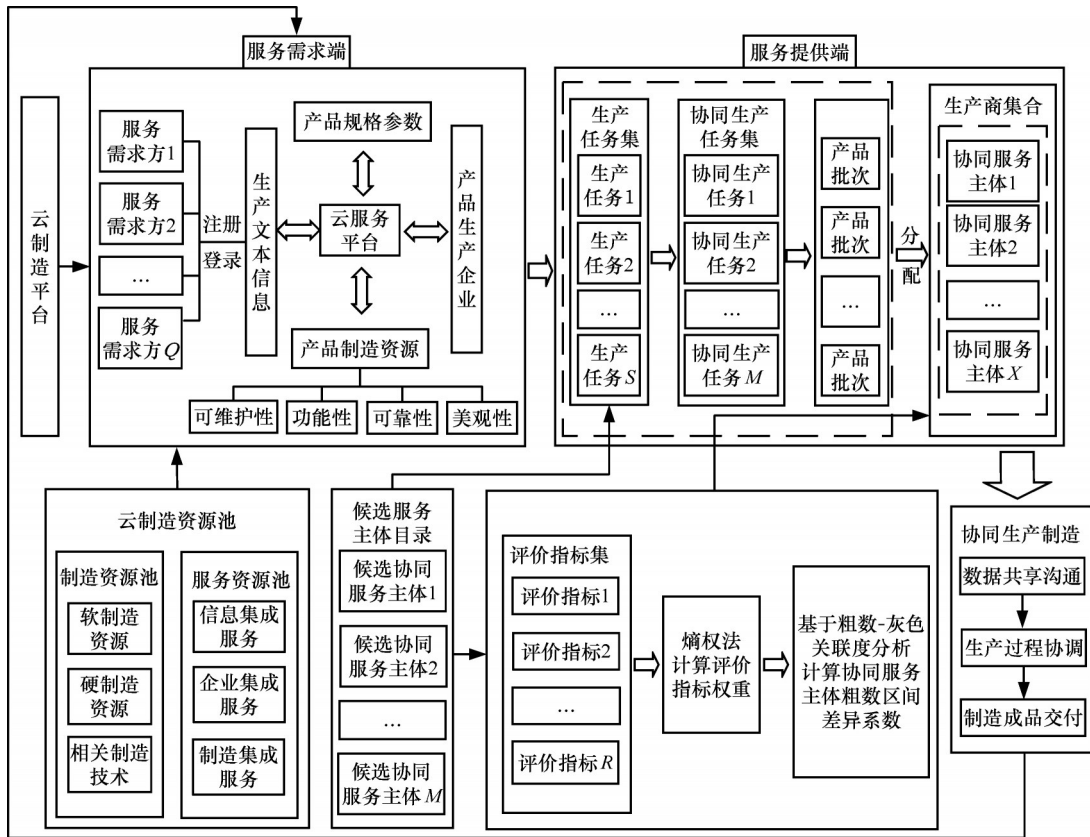


图3 基于R-GRA云制造协同服务主体评价框架

Fig.3 Evaluation framework for collaborative service entities in R-GRA cloud manufacturing

表2 Z公司电子医疗器械子任务统计表

Tab.2 Z Company electronic medical device subtask statistics

序号	子任务	
Y ₁	设计和研发	外观设计
		功能设计
		性能优化
Y ₂	零部件制造	外壳
		电子部件
		传感器
		控制部件
		光源
		光导光纤
		光导手柄
		光导连接器
		光导配件
		手术器械
		控制器
电源		
Y ₃	组件装配	组装
Y ₄	质量控制	产品测试
		质量控制
Y ₅	标识和包装	产品包装
Y ₆	配送和交付	成品交付客户

2)评审专家决策群体由决策者Z₁、Z₂、Z₃、Z₄和Z₅组成,分别采用1、3、5、7、9的评分标准对候

表3 子任务1候选协同服务主体集部分信息化数据

Tab.3 Partial information on the candidate collaborative service entities for subtask 1

协同服务主体编号	企业历史	员工数量	...	平均生产时间	单位制造成本	...
X ₁	5	227	...	8	775	...
X ₂	4	180	...	10	680	...
X ₃	7	470	...	15	845	...
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
X ₈	3	450	...	9	890	...
X ₉	5	528	...	19	730	...
X ₁₀	6	355	...	17	760	...

选协同服务主体进行打分。评分越高表明该服务主体在各评价指标上的表现越优异,其综合评价结果越好。基于专家评分值构建候选协同服务主体的初始评价矩阵。例如,将候选协同服务主体X₁作为评价对象,其初始评价矩阵G₁如表5所示。将表5中的决策信息经粗数处理后得到协同服务主体X₁的粗数评价矩阵:

$$G'_1 = \begin{bmatrix} [4.49, 6.28] & [6.49, 8.28] & [3.72, 5.50] & \dots \\ [4.49, 6.28] & [4.20, 6.06] & [4.64, 5.50] & \dots \end{bmatrix}$$

3)将评审专家对候选协同服务主体经粗数处理后的评价结果进行集成,建立综合评价矩阵G,如表6所示。

表4 评价指标权重信息表

Tab.4 Weight information of evaluation indicators

一级指标	权重	二级指标	权重
A	0.417	A ₁	0.0143
		A ₂	0.0992
		A ₃	0.0897
B	0.245	B ₁	0.0413
		B ₂	0.0355
		B ₃	0.0974
		B ₄	0.0421
C	0.379	C ₁	0.0986
		C ₂	0.0776
		C ₃	0.0974
		C ₄	0.0452
		C ₅	0.1031
⋮	⋮	⋮	⋮
R	0.117	R ₁	0.0244
		R ₂	0.0197
		R ₃	0.0211
		R ₄	0.0317
		R ₅	0.0197
S	0.258	S ₁	0.0966
		S ₂	0.0842
		S ₃	0.0412
		S ₄	0.0427
T	0.336	T ₁	0.0381
		T ₂	0.0416
		T ₃	0.0512
		T ₄	0.0946
		T ₅	0.0725

表5 候选协同服务主体 X_i 的初始评价矩阵 G_i

Tab.5 Initial evaluation matrix G_i for candidate collaborative service entity X_i

评价指标	决策群体				
	Z ₁	Z ₂	Z ₃	Z ₄	Z ₅
A	7	5	3	7	5
B	9	7	7	5	9
C	7	5	5	3	3
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
R	5	5	7	7	3
S	7	7	3	3	5
T	5	7	5	3	3

4)根据越大越优型准则确定参考序列,计算各候选协同服务主体的差异系数,差异系数矩阵如表7所示。

5)计算各候选协同服务主体的区间差异系数 D_{X_i} 及粗边界区间 V_{Bnd}(D_{X_i}),经标准化处理后的差异系数矩阵如表8所示,各候选协同服务主体的区间差异系数 D_{X_i} 的对比如图4所示。图4展示了各候选协同服务主体的粗边界区间,区间值

越小表明综合评价结果越优,其中灰色矩形表示粗边界区间最小的两名候选协同服务主体。

6)根据各候选协同服务主体的粗边界区间 V_{Bnd}(D_{X_i})大小进行排序(越小越好),排序结果为 X₆<X₁₀<X₅<⋯<X₂<X₃<X₈。由此可知,在上述20个一级指标属性条件下,候选协同服务主体 X₆和 X₁₀即为可以承接子任务1生产任务的前两名服务主体。

7)根据上述步骤,同理计算子任务2~子任务6候选协同服务主体的区间差异系数,并选取各子任务中区间差异系数较小的前两位候选协同服务主体进行比较,评价结果如表9所示。一个服务主体可以在其制造能力范围内申请多个生产子任务。最终选择在各个子任务下区间差异系数最小的服务主体参与Z公司某新型电子医疗器械产品的协同制造。子任务1~子任务6各候选协同服务主体区间差异系数 DX_i结果如图5所示,其中,灰色矩形表示各子任务中粗边界最小的候选协同服务主体。

8)基于粗边界区间越小越优原则,从6个子任务的候选协同服务主体中评选出粗边界区间最小的协同服务主体。根据评价结果最终参与协同制造的服务主体为 X₆、X₉、X₁₅和 X₂₂。最终是否参与协同制造的服务主体评价结果如表10所示。

通过步骤1)~步骤8)的评价流程,云制造平台为Z公司医疗器械有限公司遴选了多家合作企业,并高效完成了协同制造任务。案例分析结果表明,本文提出的基于R-GRA的云制造协同服务主体评价方法在实际应用中具有良好的适用性与可靠性。

4 结论

1)建立了云制造协同服务主体评价指标体系。本文综合考虑协同服务主体的生产能力、经济能力、组织能力、风险应对能力和可持续发展能力等因素,构建了包括20个一级指标与72个二级指标的协同服务主体评价指标体系,更好地满足了云制造协同服务主体评价决策的实际需求。

2)构建了基于粗数-灰色关联度分析的协同服务主体评价模型,使协同服务主体评价过程更好地反映了评价者的真实感受,提高了评价结果的准确性,为云制造环境下协同服务主体评价提供了更加科学和可行的解决方案。

3)以Z公司某型号电子医疗器械产品云制造为例,验证了本文所提出的方法与模型在实际应

表6 评审专家综合评价值矩阵

Tab.6 Comprehensive evaluation matrix by review experts

协同服务主体	A	B	C	...	R	S	T
X_1	[4.49,6.28]	[6.49,8.28]	[4.55,5.47]	...	[4.49,6.28]	[4.20,6.06]	[4.64,5.50]
X_2	[5.13,5.64]	[4.54,7.74]	[1.72,3.50]	...	[3.66,5.40]	[3.32,4.28]	[3.93,6.06]
X_3	[6.30,7.70]	[4.49,6.28]	[2.84,5.50]	...	[3.64,5.56]	[3.93,6.06]	[5.32,6.28]
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
X_8	[3.34,5.12]	[4.30,5.64]	[6.49,7.64]	...	[2.96,4.52]	[1.80,4.33]	[2.44,4.36]
X_9	[2.54,5.74]	[1.64,3.56]	[5.34,7.12]	...	[4.88,5.70]	[1.32,2.28]	[1.68,5.24]
X_{10}	[7.08,7.72]	[7.72,8.68]	[4.81,7.64]	...	[1.08,1.44]	[3.16,4.44]	[4.36,7.18]

表7 候选协同服务主体差异系数矩阵

Tab.7 Candidate collaborative service entities difference coefficient matrix

协同服务主体	A	B	C	...	R	S	T
X_1	[1.44,3.23]	[0.40,2.19]	[2.17,3.09]	...	[0.00,1.79]	[0,1.96]	[1.68,2.54]
X_2	[2.08,2.59]	[0.94,4.14]	[4.14,5.92]	...	[0.88,2.62]	[1.78,2.74]	[1.12,3.25]
X_3	[0.02,1.42]	[2.40,4.19]	[2.14,4.80]	...	[0.72,2.64]	[0,2.13]	[0.90,1.86]
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
X_8	[2.60,5.38]	[3.04,4.38]	[0,1.15]	...	[1.76,3.32]	[1.73,4.26]	[2.82,4.74]
X_9	[1.98,5.18]	[5.12,7.04]	[0.52,2.30]	...	[0.58,1.40]	[3.78,4.74]	[1.94,5.50]
X_{10}	[0,0.64]	[0,0.96]	[0,2.83]	...	[4.84,5.20]	[1.62,2.90]	[0,2.82]

表8 标准化处理后的差异化系数

Tab.8 Standardized coefficient of differentiation

主体	A	B	C	...	R	S	T	D_{X_i}	$V_{\text{Bnd}}(D_{X_i})$
	0.417	0.245	0.379	...	0.117	0.258	0.336		
X_1	[0.13,0.37]	[0.04,0.25]	[0.25,0.35]	...	[0,0.20]	[0,0.22]	[0.19,0.29]	[0.482,0.665]	0.183
X_2	[0.23,0.29]	[0.10,0.47]	[0.47,0.68]	...	[0.10,0.30]	[0.21,0.31]	[0.12,0.37]	[0.314,0.591]	0.277
X_3	[0,0.16]	[0.27,0.48]	[0.24,0.55]	...	[0.08,0.30]	[0,0.24]	[0.10,0.21]	[0.206,0.522]	0.316
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
X_8	[0.29,0.61]	[0.35,0.50]	[0,0.13]	...	[0.20,0.38]	[0.19,0.49]	[0.32,0.54]	[0.345,0.751]	0.406
X_9	[0.22,0.59]	[0.58,0.81]	[0.05,0.26]	...	[0.06,0.16]	[0.43,0.54]	[0.22,0.63]	[0.233,0.427]	0.194
X_{10}	[0,0.07]	[0,0.11]	[0,0.32]	...	[0.55,0.59]	[0.15,0.33]	[0,0.32]	[0.306,0.437]	0.131

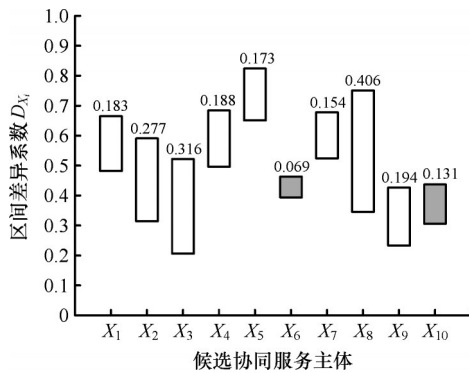


图4 子任务1候选协同服务主体区间差异系数 D_{X_i} 的对比

Fig.4 Comparison of the coefficient of variation D_{X_i} for candidate collaborative service entities in subtask 1

用场景中的适用性。研究表明,该评价决策方法具有较高的直观性与准确性,为云制造系统选择协同服务主体时提供了可靠的决策支持。

本研究仍存在以下不足:首先,在评价指标方

表9 协同服务主体区间差异系数综合矩阵

Tab.9 Collaborative service entities interval difference coefficient composite matrix

子任务	候选协同服务主体	区间差异系数 D_{X_i}	粗边界区间 $V_{\text{Bnd}}(D_{X_i})$
Y_1	X_6	[0.415,0.543]	0.128
	X_{10}	[0.306,0.437]	0.131
Y_2	X_{13}	[0.326,0.552]	0.226
	X_{15}	[0.407,0.621]	0.214
Y_3	X_6	[0.415,0.543]	0.128
	X_{11}	[0.237,0.443]	0.206
Y_4	X_{12}	[0.512,0.751]	0.239
	X_{15}	[0.407,0.621]	0.214
Y_5	X_9	[0.233,0.392]	0.159
	X_{17}	[0.305,0.469]	0.164
Y_6	X_{18}	[0.197,0.425]	0.228
	X_{22}	[0.472,0.629]	0.157

面,未充分考虑评价信息的动态变化特性。其次,所采用的方法在计算复杂度和实时性方面存在一

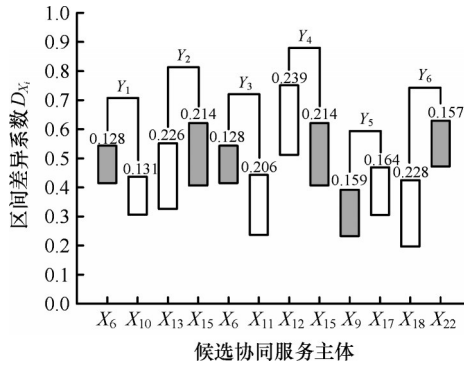


图5 子任务1~子任务6候选协同服务主体区间差异系数 D_{X_i} 比较示意图

Fig.5 Comparison of the differential coefficient D_{X_i} for candidate collaborative service entities from subtask 1 to subtask 6

表10 子任务1~子任务6候选协同服务主体评价结果

Tab.10 Analysis of the evaluation results of the candidate collaborative service entities of subtask 1 to subtask 6

评价结果	子任务					
	Y ₁	Y ₂	Y ₃	Y ₄	Y ₅	Y ₆
参与制造	X ₆	X ₁₅	X ₆	X ₁₅	X ₉	X ₂₂
不参与制造	X ₁₀	X ₁₃	X ₁₁	X ₁₂	X ₁₇	X ₁₈

定的局限性。针对上述问题,未来的研究将重点引入动态数据采集与时序建模,构建面向动态演化的评价体系。同时,将探索R-GRA方法与博弈论、网络分析、系统动力学等其他学科理论与方法融合,为解决云制造环境下的评价决策问题提供新的视角和工具,更好地满足云制造服务主体的选择需求,推动云制造技术的进一步发展。

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[J].计算机集成制造系统,2010,16(1):1-7.
LI Bohu, ZHANG Lin, WANG Shilong, et al. Cloud Manufacturing: a New Service-oriented Networked Manufacturing Model [J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2010, 16(1):1-16.

[2] WU D, ROSEN D W, WANG L, et al. Cloud-based Design and Manufacturing: a New Paradigm in Digital Manufacturing and Design Innovation [J]. Computer-Aided Design, 2015, 59:1-14.

[3] 陆剑峰,韩调娟,俞耀平.基于服务编排的云制造服务协同[J].中国机械工程,2021,32(7):849-859.
LU Jianfeng, HAN Diaojuan, Yu Yaoping. Collaboration of Cloud Manufacturing Service Based on Service Choreography [J]. China Mechanical Engineer-

ing, 2021, 32(7):849-859.

[4] 陈友玲,牛禹霏,刘舰,等.面向云制造的多供应商协同生产任务分配优化[J].计算机集成制造系统,2019,25(7):1806-1816.
CHEN Youling, NIU Yufei, LIU Jian, et al. Task Distribution Optimization for Multi-supplier Collaborative Production in Cloud Manufacturing [J]. Computer Integrated Manufacturing System, 2019, 25(7):1806-1816.

[5] 包菊芳,刘宏程.基于COWA-云模型的可持续供应链合作伙伴选择[J].德州学院学报,2023,39(2):57-62.
BAO Jufang, LIU Hongcheng. COWA-Cloud Model Based Partner Selection under Sustainable Supply Chain [J]. Journal of Dezhou University, 2023, 39(2):57-62.

[6] 周向红,李丹萍,成鹏飞,等.面向云制造协同创新伙伴选择的多源异构VIKOR群决策方法[J].计算机集成制造系统,2022,28(1):59-72.
ZHOU Xianghong, LI Danping, CHENG Pengfei, et al. Multi-source and Heterogeneous VIKOR Group Decision Making Method for Cloud Manufacturing Collaborative Innovation Partner Selection [J]. Computer Integrated Manufacturing System, 2022, 28(1):59-72.

[7] 潘燕华,王克,王平.云计算环境下复杂产品价值链合作伙伴选择研究[J].计算机集成制造系统,2021,27(12):3651-3658.
PAN Yanhua, WANG Ke, WANG Ping. Partner Selection of Complex Product Value Chain in Cloud Computing [J]. Computer Integrated Manufacturing System, 2021, 27(12):3651-3658.

[8] HU Y, WU L, SHI C, et al. Research on Optimal Decision-making of Cloud Manufacturing Service Provider Based on Grey Correlation Analysis and TOPSIS [J]. International Journal of Production Research, 2020, 58(3):748-757.

[9] 冉文学,王志文,张甜甜.云服务模式下差异化产品的协同制造企业选择研究[J].物流工程与管理,2023,45(2):94-99.
RAN Wenxue, WANG Zhiwen, ZHANG Tiantian. Research on Collaborative Manufacturing Enterprise Selection of Differentiated Products under Cloud Service Mode [J]. Logistics Engineering and Management, 2023, 45(2):94-99.

[10] TAVAKKOLI-MOGHADDAM R, ALIPOUR-VAEZI M, MOHAMMAD-NAZARI Z. A New Application of Coordination Contracts for Supplier Selection in a Cloud Environment [C]// IFIP International Conference on Advances in Production Man-

- agement Systems (APMS). Novi Sad, 2020: 197-205.
- [11] 赵金辉, 关文革, 尹立杰. 云制造环境中考虑心理预期的合作伙伴选择[J]. 计算机工程与科学, 2017, 39(6):1193-1200.
ZHAO Jinhui, GUAN Wenge, YI Lijie. Selection of Partners Considering Psychological Expectation in Cloud Manufacturing Environment [J]. Computer Engineering & Science, 2017, 39(6):1193-1200.
- [12] 唐春华, 赵爽耀, 黄挺, 等. 基于QoS多方异质评价与供需双约束的云制造服务推荐模型[J]. 计算机集成制造系统, 2023, 29(7):2351-2362.
TANG Chunhua, ZHAO Shuangyao, HUANG Ting, et al. Cloud Manufacturing Service Recommendation Model Based on QoS Multi-party Heterogeneous Evaluation and Dual Constraints of Supply and Demand [J]. Computer Integrated Manufacturing System, 2023, 29(7):2351-2362.
- [13] 郭伟, 全克宁, 邵宏宇, 等. 基于RS与AHP的中小企业云制造模式下多服务主体信用评价体系构建[J]. 计算机集成制造系统, 2013, 19(9):2340-2347.
GUO Wei, TONG Kening, SHAO Hongyu, et al. Small and Medium Sized Enterprises Multi-service Agent Credit Rating System Construction under Cloud Manufacturing Mode Based on RS and AHP [J]. Computer Integrated Manufacturing System, 2013, 19(9):2340-2347.
- [14] ZHENG H, FENG Y, TAN J. A Fuzzy QoS-aware Resource Service Selection Considering Design Preference in Cloud Manufacturing System [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2016, 84(1):371-379.
- [15] 周玉娟, 凌端新, 王秀芹, 等. 中小制造企业数字化服务化转型组态路径研究——基于“技术-组织-环境”联动视角[J]. 创新科技, 2025, 25(3):68-81.
ZHOU Yujuan, LING Duanxin, WANG Xiuqin, et al. Research on the Configuration Paths of Digital Service Transformation for Small and Medium-sized Manufacturing Enterprises: a Technology-Organization-Environment Framework Perspective [J]. Innovation Science and Technology, 2025, 25(3):68-81.
- [16] YANG C, PENG T, LAN S, et al. Towards IoT-enabled Dynamic Service Optimal Selection in Multiple Manufacturing Clouds [J]. Journal of Manufacturing Systems, 2020, 56:213-226.
- [17] YANG T, DING Y, JIANG F. Evaluation of Node Importance in Collaborative Network of Traditional Manufacturing Enterprises Based on Multiple Attribute Decision Making [J]. Decision Making: Applications in Management and Engineering, 2024, 7(2): 240-256.
- [18] LAILI Y, LIN S, TANG D. Multi-phase Integrated Scheduling of Hybrid Tasks in Cloud Manufacturing Environment [J]. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 2020, 61:101850.
- [19] 伍度志, 杨帆, 赵静. 基于信息熵的加权基因关联网络融合方法[J]. 电子科技大学学报, 2018, 47(2):286-291.
WU Duzhi, YANG Fan, ZHAO Jin. Integration of Weighted Gene Association Networks Based on Information Entropy [J]. Journal of University of Electronic Science and Technology of China, 2018, 47(2):286-291.
- [20] 杨涛, 杨育, 薛承梦, 等. 考虑客户需求偏好的产品创新设计方案多属性决策评价[J]. 计算机集成制造系统, 2015, 21(2):417-426.
YANG Tao, YANG Yu, XUE Chengmeng, et al. Multi-attribute Decision Making Evaluation Method for Product Innovation Design Scheme with Demand Preferences of Customers [J]. Computer Integrated Manufacturing System, 2015, 21(2):417-426.
- [21] ZHAI L Y, KHOO L P, ZHONG Z W. A Rough Set Enhanced Fuzzy Approach to Quality Function Deployment [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2008, 37(5/6): 613-624.
- [22] ZHAI L Y, KHOO L P, ZHONG Z W. Design Concept Evaluation in Product Development Using Rough Sets and Grey Relation Analysis [J]. Expert Systems with Applications, 2009, 36(3):7072-7079.
- [23] 赵文燕, 张焕高, 何桢, 等. 粗数——一种客户需求分析方法[J]. 计算机集成制造系统, 2011, 17(11):2493-2501.
ZHAO Wenyan, ZHANG Huangao, HE Zhen, et al. Rough Number: Customer Requirements Analytical Method [J]. Computer Integrated Manufacturing System, 2011, 17(11):2493-2501.

(编辑 胡佳慧)

作者简介: 杨涛, 男, 1985年生, 副教授。研究方向为企业管
理、传统制造企业转型、商业模式创新、智能制造。E-mail:
tyangg-mail@ctbu.edu.cn。蒋芳(通信作者), 女, 2000年生,
硕士研究生。研究方向为企业管、智能制造。E-mail: jiang-
fang@ctbu.edu.cn。

本文引用格式:

杨涛, 蒋芳. 基于R-GRA的云制造协同服务主体评价研究[J].
中国机械工程, 2025, 36(9):2097-2107.
YANG Tao, JIANG Fang. Research on Evaluations of Cloud
Manufacturing Collaborative Service Entities Based on R-GRA
[J]. China Mechanical Engineering, 2025, 36(9):2097-2107.