

制造云服务组合中支持服务关联的 QoS 感知评估模型

谢晓兰^{1,2}, 曾兰英², 翟青海²

(1. 桂林理工大学广西嵌入式技术与智能系统重点实验室, 广西 桂林 541004;
2. 桂林理工大学信息科学与工程学院, 广西 桂林 541004)

摘要: 为了更好地从大量候选云服务集中选出满足制造需求且服务质量较优的制造云服务协同完成制造任务, 针对 QoS 准确性给组合筛选带来的影响, 基于接口关联、业务实体关联、统计关联, 提出了一种支持服务关联的 QoS 感知评估模型。引入企业合作时间、KULC 和 IR 参数, 利用历史信息进行预测对统计关联 QoS 变化量进行动态调整, 保证了时效性。通过算例分析验证了所提方法的可行性, 实验结果表明该方法能为服务需求方提供更切合实际的解决方案。

关键词: 服务关联; 服务组合; QoS 感知; 制造云

中图分类号: TP3-05

文献标识码: A

DOI: 10.11959/j.issn.1000-436x.2021021

QoS aware evaluation model supporting service correlation in manufacturing cloud service composition

XIE Xiaolan^{1,2}, ZENG Lanying², ZHAI Qinghai²

1. Guangxi Key Laboratory of Embedded Technology and Intelligent System, Guilin University of Technology, Guilin 541004, China
2. College of Information Science and Engineering, Guilin University of Technology, Guilin 541004, China

Abstract: In order to select better quality of manufacturing cloud services that meet the demand of manufacture to complete manufacturing tasks in coordination, a QoS aware evaluation model supporting service correlation was proposed based on interface correlation, business entity correlation, and statistics correlation, aiming at the impact of QoS accuracy on combination screening. The cooperation time, KULC and IR parameters were introduced, and the historical information was used to predict and dynamically adjust the statistical association QoS changes to ensure timeliness. The feasibility of the proposed method is verified by an example analysis, and the experimental results show that the method can provide a more realistic solution for the service demander.

Keywords: service correlation, service composition, QoS aware, manufacturing cloud

1 引言

随着制造业的发展, 传统制造模式难以满足客户复杂多样的需求, 制造资源和制造能力未能有效利用, 以至于不少制造企业面临资源瓶颈和资源闲置问题^[1]。基于此, 李伯虎院士提出了“云制造”的概念^[2], 将制造云平台作为云制造系统的中间媒

介连接用户和服务提供商, 改变了制造资源和制造能力的流通方式。但由于制造规模扩张, 单一的服务资源不能完成复杂的制造任务, 因此需将制造云平台中具有不同功能的制造资源服务以组合的方式形成随需求即时变换的松耦合制造云服务应用, 从而满足整个制造生命周期中的各个功能需求^[3]。

服务质量 (QoS, quantity of service) 作为衡量

收稿日期: 2020-09-02; 修回日期: 2020-12-11

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No.61762031); 广西科技重大专项基金资助项目 (No.AA19046004); 广西重点研发计划基金资助项目 (No.AB18126006)

Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China (No.61762031), The Science and Technology Major Project of Guangxi (No.AA19046004), The Key Research and Development Program of Guangxi (No.AB18126006)

服务组合好坏的非功能需求指标，是制造云服务组合的重要筛选方式。在满足功能需求的情况下，如何从海量功能相似但 QoS 不同的制造云服务中挑选出较好的服务组合是首要问题^[4]。通常采用建立 QoS 评估模型并结合群体智能算法等优选方式进行问题求解，得到最佳服务组合。

陈友玲等^[5]建立了服务需求方和服务提供商的双侧约束，通过服务质量计算模型对制造云服务组合进行综合评估，并采用改进的 i-NSGA-II-JG 算法进行求解。Lu 等^[6]提出了一种利用分布式知识进行制造云服务能力评估和推荐的系统框架，并基于 Web 的系统形式实现了该方案。Afshin 等^[7]提出了一种基于 Agent 的混合方式实现服务组合，通过识别 QoS 参数和粒子群算法来选择优质服务，提升了组合资源和等待时间方面的性能。Li 等^[8-9]考虑了服务调用顺序以及服务之间的时间关系，以资源服务链的方式对服务顺序组合进行描述，并提出了资源服务链组成算法进行方案求解。

以上关于制造云服务组合的研究大部分都是在基于服务独立、不存在任何依赖关系的前提下展开的，但在实际制造生产工作流程中，制造云服务之间或多或少存在各种关联关系，如接口关联 (InC, interface correlation)、业务实体关联 (BuC, business-entity correlation) 和统计关联 (StC, statistical correlation) 等。若忽略实际制造过程中关联关系对 QoS 的影响，会过滤掉一些较好的服务组合方案。

有不少学者对服务关联进行了探索。Tao 等^[10]着重研究了 2 个服务间的商业实体关联关系，并阐述了相应的 QoS 描述模型。Lina^[11-12]在分析服务间存在关联的基础上，研究了一种剔除冗余服务的服务选择方法，提高了选择效率。Xu 等^[13]和田思思等^[14]建立了基于关联关系的云制造服务聚合模型 (CMSA-CA, correlation aware cloud manufacturing service aggregation)，并采用改进的离散蜂群算法 (IDBA-Pareto, improved discrete bees algorithm based on Pareto) 得到非劣服务组合解集。Liu 等^[15]建立了含有 3 种关联的综合 QoS 相关性模型，并基于该模型应用了基于案例库的并行最大最小蚂蚁系统 (PMMAS-CL, parallel max-min ant system based on case library) 算法求解。

以上研究对服务组合关联的 QoS 感知时效性未能有良好体现，因此本文在前人的基础上进一步对业务实体关联和统计关联进行研究，提出了支持

服务关联的 QoS 感知评估模型。在业务实体关联中考虑了服务提供商的合作时长，有效区分企业合作的好坏。在统计关联中充分挖掘服务组合历史记录信息，利用“分时有效”的思想预测得到当前时间的 QoS，并结合关联规则评估中相关性度量参数 KULC (kulczynski) 和不平衡因子 (IR, imbalance ratio)^[16]形成动态变化量以保证统计关联的时效性。最后建立了多目标优化模型，使用含有关联分析的 NSGAI (non-dominated sorting genetic algorithm II) 进行求解，筛选出了制造云环境下较优质的服务组合解集。本文的主要工作和贡献如下。

1) 主要分析了业务实体关联和统计关联，并提出了相应的服务描述模型和计算方式。将企业合作时间引入业务实体关联中区分合作优劣；在统计关联中，利用关联规则相关性度量参数 KULC 和 IR 评估服务组合的关联强度，并结合时间衰减函数得到的 QoS 预测值动态调整统计关联的 QoS 变化量，使服务组合 QoS 更能贴合实际制造环境。

2) 建立了支持服务关联的 QoS 感知评估模型，并利用基于 Pareto 最优解的 NSGAI 多目标优化算法进行问题求解。将服务关联分析引入算法中，通过全局约束进行寻优限制，得到非劣服务组合解集，有助于服务需求方做出更合理的决策。

2 问题描述与模型介绍

2.1 制造云服务组合流程

在给出定义之前，对所涉及的部分符号表示及含义进行说明，如表 1 所示。

表 1	符号表示与含义
参数	含义
MCS_i	第 i 个制造云服务
$q_0^k(MCS_i)$	第 i 个制造云服务的第 k 个 QoS 属性的默认值
$QoS(MCS_i)$	第 i 个制造云服务的 QoS 值
$Time(MCS_i)$	第 i 个制造云服务的执行时间
$Cost(MCS_i)$	第 i 个制造云服务的执行费用成本
$Rep(MCS_i)$	第 i 个制造云服务的信誉度
$Rel(MCS_i)$	第 i 个制造云服务的可靠性
$Ava(MCS_i)$	第 i 个制造云服务的可用性
MCSC	某一制造云服务组合

以摩托车生产装配过程这一实际应用场景为例，如图 1 所示，用户提出装配任务后，首先对

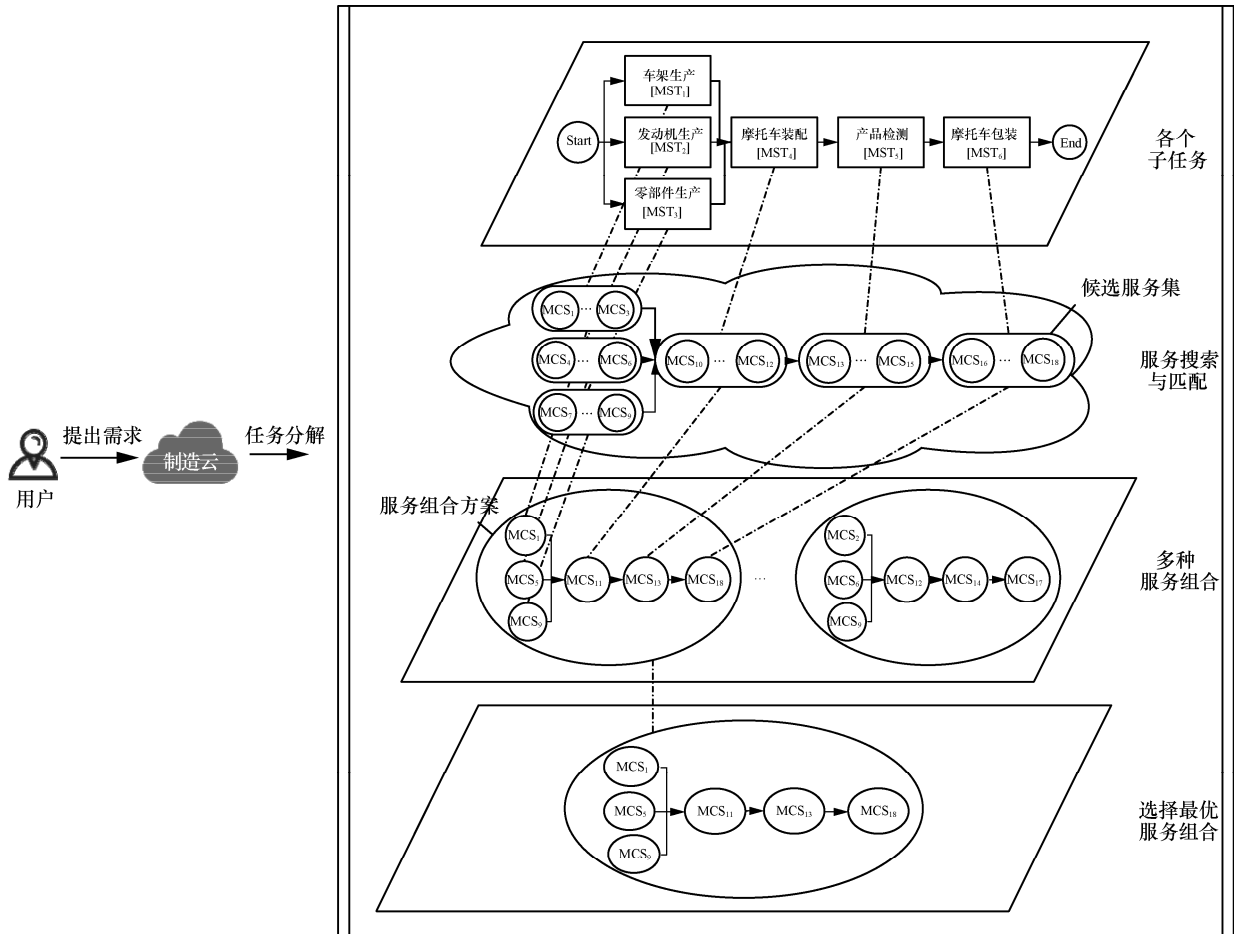


图 1 制造云服务组合流程

服务组合进行设计，将制造任务 (MT, manufacturing task) 分解成 6 个制造子任务 (MST, manufacturing subtask)，分别是车架生产 MST₁、发动机生产 MST₂、零部件生产 MST₃、摩托车装配 MST₄、产品检测 MST₅、摩托车包装 MST₆。然后对制造子任务的功能和流程进行分析，形成抽象的服务组合执行路径。在服务组合部署阶段，分别按照每个子任务的功能需求在制造云平台中对服务进行搜索与匹配形成候选服务集 (如 MCS₁、MCS₂ 等)，并通过 QoS 评估模型从候选服务集中选出对应的单个制造云服务 (MCS, manufacturing cloud service) 形成多种组合方案。最后从中选择优质的服务组合即为最终服务组合执行路径。

2.2 制造云服务描述模型

在制造云平台中，首先根据服务提供商所提供的服务进行基本信息描述完成云服务的注册建模，发布到云服务资源池中供用户使用。基于服务的网

络本体语言 (OWL-S, ontology Web language for service) 对制造云服务的语义描述提供了良好的支持，不少学者在此基础上对其进行了形式化描述。本文引入了文献[17-18]中含有关联关系的形式化描述方式，将制造云服务 MCS 建模为一个六元组，如式(1)所示。

$$MCS = \langle MCS_{basic}, MCS_{category}, MCS_{status}, MCS_{function}, MCS_{QoS}, MCS_{correlation} \rangle \quad (1)$$

其中，MCS_{basic} 为制造云服务的基本信息，如名称、参数等；MCS_{category} 为制造云服务类别，如制造资源、制造能力和制造知识；MCS_{status} 为制造云服务的状态信息，如空闲、未满载、满载和超负载等；MCS_{function} 为制造云服务的功能描述，如输入、输出等；MCS_{QoS} 为制造云服务的服务质量 QoS，是选择选择服务并评估服务组合好坏的标准；MCS_{correlation} 为制造云服务间的关联关系，如接口关联、业务实体关联和统计关联等。

3 制造云服务关联模型

制造云服务描述模型中 $MCS_{\text{correlation}}$ 包含接口关联、业务实体关联和统计关联 3 种服务关联关系，下面将给出相应的定义、描述模型和 QoS 计算方式。

3.1 服务关联关系

3.1.1 接口关联

定义 1 接口关联。在制造云服务组合过程中， MCS_i 为 MCS_j 的前驱服务， MCS_j 为 MCS_i 的后继服务。 MCS_i 的输出与 MCS_j 的输入之间的数据逻辑关系即为接口关联。制造云服务的接口关联可以用式(2)描述。

$$MCS_{\text{inc}}(MCS_i, MCS_j) = \left\{ \begin{array}{l} \text{Out}_i = \text{In}_j, \\ \text{Out}_i \supset \text{In}_j, \\ \text{Out}_i \subset \text{In}_j, \\ \text{Out}_i \cap \text{In}_j \neq \{\text{Out}_i, \text{In}_j\}, \\ \text{Out}_i \cap \text{In}_j \neq \emptyset \end{array} \right\} \quad (2)$$

其中， Out_i 是 MCS_i 的输出， In_j 是 MCS_j 的输入。接口关联关系可分为 5 类，在式(2)中从上至下依次为等价匹配、完全匹配、部分匹配、交叉匹配、无关联匹配。在摩托车生产装配流程中，假设车架生产采用的服务为 MCS_1 ，摩托车装配选择服务为 MCS_{10} ，则可以表示为

$$MCS_{\text{inc}}(MCS_1, MCS_{10}) = \{ \text{车架}, < \text{车架}, \text{发动机}, \text{零部件} > | \text{Out}_i \subset \text{In}_j \}$$

由于车架生产的输出是摩托车装配输入中的一部分，即为部分匹配。在接口关联中 MCS_i 的 QoS 各属性 $q_{\text{inc}}^k(MCS_i)$ 的计算式可表示为

$$q_{\text{inc}}^k(MCS_i) = \text{Sim}_{(i,j)}(q_0^k(MCS_i) + \text{isCor}\Delta q_i^k) \quad (3)$$

其中， $\text{Sim}_{(i,j)}$ 表示 MCS_i 和 MCS_j 的接口关联度，即输入输出的语义相似度，一般从概念、属性和属性值 3 个维度进行度量； isCor 表示 MCS_i 与 MCS_j 之间是否存在接口关联，其值为 0（表示不存在）或 1（表示存在）。

3.1.2 业务实体关联

定义 2 业务实体关联。在制造云服务平台中，不同云服务提供商之间的企业利益关系，即合作或竞争。业务实体关联一般用四元组进行表示，如式(4)所示。

$$MCS_i^{\text{BuC}} = \langle MCS_j^{\text{name}}, MCS_j^{\text{comp}}, \text{Cor}_{(i,j)}^{\text{type}}, P_{(i,j)}^{\text{QoS}} \rangle \quad (4)$$

其中， MCS_j^{name} 表示与 MCS_i 有业务实体关联的 MCS_j 的名称； MCS_j^{comp} 表示 MCS_j 的提供商信息； $\text{Cor}_{(i,j)}^{\text{type}}$ 表示 MCS_i 提供商与 MCS_j 提供商的业务关联关系，如合作关系、无关系、竞争关系，分别用 2、1、0.5 量化表示； $P_{(i,j)}^{\text{QoS}}$ 表示 MCS_i 和 MCS_j 含业务实体关联时 QoS 变化量，即 $P_{(i,j)}^{\text{QoS}} = (\Delta q_j^1, \Delta q_j^2, \dots, \Delta q_j^k)$ ， Δq_j^k 表示 MCS_j 对 MCS_i 第 k 个 QoS 属性值的影响，可以为增量或减量，体现服务质量的提升或下降。

在业务实体关联中， MCS_i 各 QoS 属性 $q_{\text{BuC}}^k(MCS_i)$ 的计算式可表示为

$$q_{\text{BuC}}^k(MCS_i) = q_0^k(MCS_i) + \delta \text{Cor}_{(i,j)}^{\text{type}} \Delta q_j^k \quad (5)$$

其中， δ 表示 MCS_j 与 MCS_i 之间是否存在业务实体关联关系，其值为 0 或 1。

3.1.3 统计关联

定义 3 统计关联。制造云平台中，2 个或多个云服务经常被绑定应用于同一服务组合中执行某一制造任务。统计关联常用三元组进行表示，如式(6)所示。

$$MCS_i^{\text{StC}} = \langle MCS_j^{\text{name}}, P_{(i,j)}^{\text{qua}}, P_{(i,j)}^{\text{QoS}} \rangle \quad (6)$$

其中， MCS_j^{name} 表示与 MCS_i 有统计关联的 MCS_j 的名称； $P_{(i,j)}^{\text{qua}}$ 表示 MCS_i 与 MCS_j 合作执行制造任务成功的比例； $P_{(i,j)}^{\text{QoS}}$ 表示 MCS_i 与 MCS_j 含统计关联时 QoS 变化量。其中， $P_{(i,j)}^{\text{qua}}$ 的计算式为

$$P_{(i,j)}^{\text{qua}} = \frac{\gamma}{E} \quad (7)$$

其中， γ 为 MCS_i 与 MCS_j 历史合作执行成功次数； E 为 MCS_i 与 MCS_j 历史合作总次数，包含了任务执行失败情况。式(7)即为服务组合被绑定执行效果好坏的评价标准。

统计关联主要影响制造云服务 QoS 中时间、信誉度、可用性和可靠性 4 个属性值^[17-18]，其 MCS_i 的 QoS 属性计算式可表示为

$$q_{\text{StC}}^k(MCS_i) = q_0^k(MCS_i) + \lambda P_{(i,j)}^{\text{qua}} P_{(i,j)}^{\text{QoS}} \quad (8)$$

其中， λ 表示 MCS_i 与 MCS_j 是否存在统计关联关系，其值为 0 或 1。

式(3)、式(5)和式(8)可将服务之间的关联关系直接作用于 QoS，通过建立基本的 QoS 评估模型对

服务进行选择。

3.2 基本 QoS 评估模型

本文主要将 QoS 中时间 (Time)、成本 (Cost)、信誉度 (Reputation)、可用性 (Availability)、可靠性 (Reliability) 这 5 个属性作为 QoS 评估指标, 单个制造云服务 QoS 可形式化表示为

$$\begin{aligned} \text{QoS}(\text{MCS}_i) &= (q^1, q^2, q^3, q^4, q^5) = \\ &(\text{Time}(\text{MCS}_i), \text{Cost}(\text{MCS}_i), \text{Rep}(\text{MCS}_i), \\ &\text{Ava}(\text{MCS}_i), \text{Rel}(\text{MCS}_i)) \end{aligned} \quad (9)$$

将 3 种关联关系考虑在内后, MCS_i 的 QoS 属性可描述为

$$\begin{aligned} q^k(\text{MCS}_i) &= \{q_0^k : \text{default}; q_1^k : \text{QoS}_{\text{InC}}(\text{MCS}_i); \\ &q_2^k : \text{QoS}_{\text{BuC}}(\text{MCS}_i); q_3^k : \text{QoS}_{\text{StC}}(\text{MCS}_i)\} \end{aligned} \quad (10)$$

其中, q_0^k 为无关联关系时 QoS 的默认值, q_1^k 为存在接口关联时的 QoS, q_2^k 为存在业务实体关联时的 QoS, q_3^k 为存在统计关联时的 QoS。例如, 当无关联时, QoS 取值为 q_0^k ; 当存在统计关联时, QoS 取值为 q_3^k 。

若同时含有 3 种关联, MCS_i 第 k 个 QoS 属性值可利用式(11)计算得到。

$$q^k(\text{MCS}_i) = \omega_1 q_1^k(\text{MCS}_i) + \omega_2 q_2^k(\text{MCS}_i) + \omega_3 q_3^k(\text{MCS}_i) \quad (11)$$

其中, ω_1 、 ω_2 、 ω_3 为 3 种关联关系的权重且 $\omega_1 + \omega_2 + \omega_3 = 1$ 。

制造云服务组合的抽象 workflow 中包含了一种或多种逻辑控制结构, 如顺序结构、并行结构、选择结构和循环结构。不同逻辑控制结构的计算方式也有所不同, 一般计算服务组合的 QoS 会将非顺序结构转换为顺序结构进行计算。本文只讨论顺序结构, 服务组合的 QoS 各属性可通过单个服务 QoS 累加、累乘或求平均的方式计算得到, 如式(12)所示。

$$\left\{ \begin{aligned} Q^1 &= Q^{\text{Time}} = \sum_{k=1}^n q^1 \\ Q^2 &= Q^{\text{Cost}} = \sum_{k=1}^n q^2 \\ Q^3 &= Q^{\text{Rep}} = \frac{\sum_{k=1}^n q^3}{n} \\ Q^4 &= Q^{\text{Ava}} = \prod_{k=1}^n q^4 \\ Q^5 &= Q^{\text{Rel}} = \prod_{k=1}^n q^5 \end{aligned} \right. \quad (12)$$

其中, $Q^1 \sim Q^5$ 分别表示服务组合 QoS 中时间、成本、信誉度、可用性、可靠性 5 个属性, n 表示服务组合中含单个服务的数量。综合考虑以上属性, 则某一制造任务的服务组合 QoS 综合评估值 $Q(\text{MCSC})$ 的计算式为

$$Q(\text{MCSC}) = \sum_{i=1}^5 w_i Q^i(\text{MCSC}) \quad (13)$$

其中, w_i 为第 i 个 QoS 属性的权重, 一般是服务需求方设置, 反映各属性的优先顺序; $Q^i(\text{MCSC})$ 为服务组合第 i 个属性值。

4 支持服务关联的 QoS 感知模型与求解

4.1 支持服务关联的 QoS 感知模型

本文根据制造云服务的特点改进了服务组合关联模型中业务实体关联和统计关联, 考虑了企业合作时长和历史服务组合情况, 提出了合作时间因子和基于预测的 QoS 变化量, 在保证满足制造任务的同时, 最大化服务组合 QoS 水平, 提升服务组合的时效性。

4.1.1 合作时间因子

制造云平台中云服务提供商往往会建立合作关系以达到共赢目的。建立长期的合作关系, 不仅可以充分利用双方资源, 还能更快、更好地实现制造企业降低成本、缩短产品生产周期等战略目标。合作时间越长, 企业之间工作接洽越协调, 合作效果越好; 反之, 合作时间越短, 越容易出现一些合作问题与风险。

介于上述情况, 本文从制造云服务描述模型中提取出提供商之间合作时间, 并对合作时间进行归一化处理形成时间因子融入业务实体关联模型中, 即将业务实体关联中 MCS_i 的 QoS 属性计算式(5)调整为

$$q_{\text{BuC}}^k(\text{MCS}_i) = q_0^k(\text{MCS}_i) + \delta \text{Cor}_{(i,j)}^{\text{time}} \text{Cor}_{(i,j)}^{\text{time}} \Delta q_j^k \quad (14)$$

其中, $\text{Cor}_{(i,j)}^{\text{time}}$ 为合作时间因子, 取值范围为 0~1。在使用服务组合方案执行制造任务的过程中, 若 MCS_i 与 MCS_j 之间提供商合作时间越长, 则 $q_{\text{BuC}}^k(\text{MCS}_i)$ 越高; 反之, 若由于争夺资源等情况形成竞争关系, 则会减小 $q_{\text{BuC}}^k(\text{MCS}_i)$ 。

同时, 将业务关联中合作关系、无关系、竞争关系量化表示 2、1、0.5 分别调整为 1、0、-1, 使竞争关系增量增大, 即增加了竞争关系的惩罚。

4.1.2 基于预测的 QoS 变化量

在统计关联中，之前的研究简单地通过服务组合执行制造任务的成功次数与总执行次数的比例来衡量统计关联的好坏，忽略了 2 个服务形成的关联规则的影响。此外，统计关联中 QoS 变化量常为人工随机赋值且固定不变，缺乏客观实际性和动态性，难以发现 2 个服务在近一段时间内组合执行制造任务的效果。针对上述问题，本文考虑了时间因素并结合相关性度量参数 KULC 和 IR 动态生成统计关联的 QoS 变化量。在式(6)的基础上调整了统计关联的描述模型，如式(15)所示。

$$MCS_i^{StC} = \langle MCS_j^{name}, P_{(i,j)}^{qua}, P_{(i,j)}^{kulc}, P_{(i,j)}^{pir}, H_{(i,j)}^{QoS} \rangle \quad (15)$$

其中， $P_{(i,j)}^{kulc}$ 表示 MCS_i 与 MCS_j 的双向置信度； $P_{(i,j)}^{pir}$ 表示 MCS_i 与 MCS_j 的不平衡因子； $H_{(i,j)}^{QoS}$ 表示 MCS_i 与 MCS_j 基于历史组合记录的 QoS 预测值。

$P_{(i,j)}^{kulc}$ 和 $P_{(i,j)}^{pir}$ 的计算式分别为

$$P_{(i,j)}^{kulc} = \frac{Conf_{(MCS_i \rightarrow MCS_j)} + Conf_{(MCS_j \rightarrow MCS_i)}}{2} \quad (16)$$

$$P_{(i,j)}^{pir} = \frac{|\text{Sup}(MCS_i) - \text{Sup}(MCS_j)|}{\text{Sup}(MCS_i) + \text{Sup}(MCS_j) - \text{Sup}(MCS_i \cup MCS_j)} \quad (17)$$

其中， $Conf_{(MCS_i \rightarrow MCS_j)}$ 表示包含 MCS_i 的服务组合中出现 MCS_j 的频繁程度； $Conf_{(MCS_j \rightarrow MCS_i)}$ 表示包含 MCS_j 的服务组合中出现 MCS_i 的频繁程度； $\text{Sup}_{(MCS_i)}$ 表示 MCS_i 的支持度，即 MCS_i 出现次数占服务组合总次数的比例； $\text{Sup}_{(MCS_i \cup MCS_j)}$ 表示 MCS_i 和 MCS_j 绑定出现次数占服务组合总次数的比例。

将 KULC 和 IR 相结合作为 2 个服务之间关联规则的评估指标，是对关联强度的良好度量方式^[16]。KULC 表示 MCS_i 和 MCS_j 的相关性，当 $KULC \geq 0.7$ 时，即 MCS_i 的出现促进了 MCS_j 的出现，称为正相关；当 $KULC \leq 0.3$ 时，称为负相关。KULC 对双向置信度做了一个良好的平均，有效避免了由于历史记录数据的数值大小对关联规则可靠性造成的影响。IR 度量了双向关联规则是否平衡，若 IR 越接近 0，则表明 MCS_i 和 MCS_j 之间的关联规则越平衡，对于双方出现的可能性相同。一般 $IR \leq 0.3$ 为平衡， $IR \geq 0.6$ 为不平衡。

为了保证制造云服务的 QoS 能够更加贴合实

际服务质量信息，受文献[19]的启发，在基于服务组合历史记录进行 QoS 值预测时，采用了“分时有效”的思想，根据历史记录的时间信息对 QoS 进行加权计算，距离越近权重越大，即越可靠，距离越远权重越小，即可靠性越差。这样预测得到的 QoS 更具时效性，也更能反映出近阶段 2 个云服务组合执行制造任务时的服务质量状态。 $H_{(i,j)}^{QoS}$ 的具体计算过程如下。

首先，利用时间衰减函数计算 MCS_i 和 MCS_j 每条历史组合记录信息的时间系数 β ，即历史记录的参考程度。假设有 m 个时间，每一个时间的时间系数的计算式为

$$\beta_m = L + \frac{F - L}{1 + e^{-\partial(\Delta t_m - T)}} \quad (18)$$

其中， L 表示距离最近的时间的权重， F 表示距离最远的时间的权重， ∂ 表示权重增长率， T 表示最大权重所处的时间段。

然后，将时间系数 β 进行归一化处理，使 MCS_i 和 MCS_j 历史组合记录的时间权重之和为 1。最后，加权融合得到 QoS 预测值 $H_{(i,j)}^{QoS}$ 。

针对所提出的统计关联描述模型，其对应 MCS_i 的 QoS 属性计算式为

$$q_{StC}^k(MCS_i) = q_0^k(MCS_i) + \lambda P_{(i,j)}^{qua} \cdot (((1 - P_{(i,j)}^{pir}) P_{(i,j)}^{kulc})(H_{(i,j)}^k - q_0^k(MCS_i))) \quad (19)$$

其中， $H_{(i,j)}^k$ 表示 $H_{(i,j)}^{QoS}$ 中预测得到的第 k 个 QoS 属性值，反映当前时间执行制造任务可能达到的 QoS； $(1 - P_{(i,j)}^{pir}) P_{(i,j)}^{kulc} (H_{(i,j)}^k - q_0^k(MCS_i))$ 表示当前时间第 k 个 QoS 属性的变化量。

服务组合历史记录信息在不同时间内含有的记录个数不同，并且相同服务组合在不同时间的执行效果不一，则 QoS 预测值以及 KULC 和 IR 会随时间波动，从而使云服务 QoS 变化量动态调整。这样不仅能保证统计关联的时效性，还可以对制造云服务统计关联有良好的区分。

4.2 模型求解

QoS 属性中有增量和减量 2 种类型，如成本、时间，其值越小，表示服务质量越好；再如可靠性、可用性和信誉度，其值越大，表示服务质量越好。因此，在计算服务组合加权 QoS 前，需要对 QoS 属性进行无量纲化处理，如式(20)和式(21)所示。

$$Nq_+^k = \frac{q^k - q_{\min}^k}{q_{\max}^k - q_{\min}^k} \quad (20)$$

$$Nq_-^k = \frac{q_{\max}^k - q^k}{q_{\max}^k - q_{\min}^k} \quad (21)$$

其中, Nq_+^k 表示增量类型, Nq_-^k 表示减量类型, q_{\min}^k 表示第 k 个 QoS 属性的最小值, q_{\max}^k 表示第 k 个 QoS 属性的最大值。

制造云服务组合本质上是由一系列候选云服务按照制造工艺流程构成的执行路径。在基于 QoS 对制造云服务组合优选时, 需要平衡 QoS 中如时间、成本等不同属性之间的性能。目前, 大部分研究采用线性加权等方式将多目标转换为单目标进行求解, 所得到的解较单一, 不能有效解决多个子目标带来的冲突, 并且权重依赖过大, 主观性过强。

因此, 本文将采用基于 Pareto 最优的多目标优化对服务组合问题建模, 将制造时间、制造成本作为 2 个子目标进行求解, 模型如式(22)和式(23)所示。

$$\min f(x) = [f_{\text{time}}(x), f_{\text{cost}}(x)]^T \quad (22)$$

$$\text{s.t.} \begin{cases} \text{Time}_{\max} - \text{Time}_i \geq 0 \\ \text{Cost}_{\max} - \text{Cost}_i \geq 0 \\ \text{Rep}_i - \text{Rep}_{\min} \geq 0 \\ \text{Ava}_i - \text{Ava}_{\min} \geq 0 \\ \text{Rel}_i - \text{Rel}_{\min} \geq 0 \end{cases} \quad (23)$$

其中, 式(22)为需要优化的目标函数, 本文将时间和成本作为制造云服务组合中的主要冲突目标, 尽可能使制造时间和制造成本最小化; 式(23)为全局约束, 制造云服务组合的时间和成本不能高于服务需求方制定的最大可接受值, 信誉度、可用性和可靠性不能低于服务需求方的最低期望值。

本文采用了多目标优化中经典的 NSGAI^[20]对所建模型求解。其算法的主要思想如下。一个解集中由于需要同时优化多个目标函数值, 则无法保证每个目标函数都能取得最优解, 使某些解之间目标冲突, 导致无法进行比较, 对此可利用非支配排序的方式。首先, 对解集中的解进行两两比较, 若不存在任何一个解优于解 x_i , 则 x_i 为非支配解即 Pareto 解, 找出所有 Pareto 解为第一级非支配层, 将剩余支配解按照上述流程找出新的 Pareto 解为下一级非支配层。如此循环, 将解集进行分层, 得到每个解的层级即 Rank, 使每一层内的解均为 Pareto 解。同时, 计算每个解的拥挤度 D , 即衡量解集多

样性指标, 通过 Rank 和 D 区分解的优劣情况。最后结合遗传操作和精英选择策略, 经过不断迭代后, 筛选出 Pareto 最优解集即非劣服务组合解集。

一个服务组合就是一个解也称为个体, n 个个体的集合即为一个种群。在 NSGAI 中, 个体采用实数编码, 其编码位置的数值为对应子任务选择的服务编号, 如服务组合[2, 11, 20, 32, 40]即第一个子任务选择 2 号制造云服务依次类推。将关联分析流程引入 NSGAI 中, 对种群中每个个体进行 3 种关联关系分析, 并返回个体的各个目标函数值, 最后择优选择, 具体流程如图 2 所示。

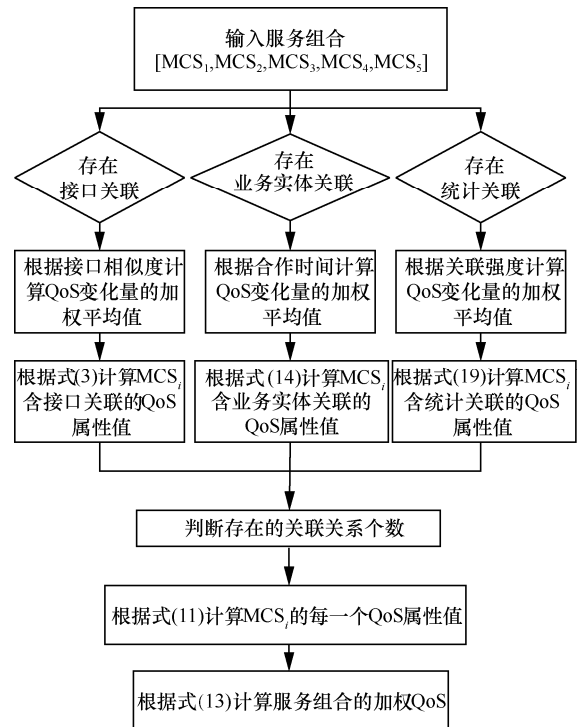


图 2 服务关联分析流程

具体算法流程介绍如下。

- 步骤 1** 随机生成规模为 n 的初始化种群 P_t , 对种群进行关联分析, 返回目标函数值。
- 步骤 2** 对种群 P_t 进行非支配排序, 形成非支配集 Z , 并初始化每个个体的 Rank 值。
- 步骤 3** 进行遗传操作 (选择、交叉、变异), 产生第一代子代种群 Q_t 。
- 步骤 4** 合并种群 P_t 和 Q_t , 形成组合种群 $R_t = P_t + Q_t$ 。
- 步骤 5** 对 R_t 进行快速非支配排序, 计算出每个支配层的个体拥挤度, 结合精英选择策略选出 n 个个体形成性的父代种群 P_{t+1} 。

步骤 6 满足最大迭代次数，得到 Pareto 最优解集合；反之，返回步骤 2。

5 实验与结果分析

本节通过算例实验以及与文献[15]的对比分析，验证本文所提模型的可行性和有效性，并以服务组合排名和 QoS 变化情况说明引入合作时间因子和采用基于预测的 QoS 变化量对服务组合选择的时效性影响。

5.1 实验设计

假设制造云平台中有 15 个服务提供商，每个服务提供商有 3 种不同类型的制造云服务，共 45 个制造云服务。现有一制造任务被分解为由 5 个子任务串联组成的业务流程，如图 3 所示，每个子任务有 3 个服务提供商可提供相应需求的制造云服务，即每个子任务有 9 个候选云服务。

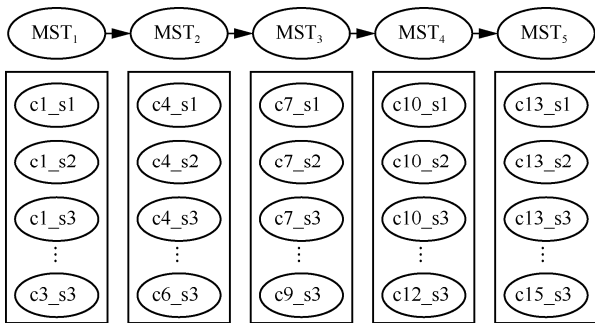


图 3 制造子任务流程

1) 实验数据

按照传统制造业企业的典型运作方式，本文将制造工作流程简化为设计、采购、生产、质检、配送，并分别对应上述划分的 5 个子任务。为保证实验数据的科学性、推测性和一般性，参考了前人实验数据设定并结合制造流程中各子任务制造时间和制造成本的不同，按照如表 2 所示的不同数值范围随机生成了候选服务的 QoS。

表 2 制造云服务 QoS 取值范围

子任务	Time/天	Cost/万元	Rep/Ava/Rel
MST ₁	[1,3]	[5,10]	[0.4,1]
MST ₂	[4,10]	[30,60]	[0.4,1]
MST ₃	[5,9]	[30,50]	[0.4,1]
MST ₄	[4,7]	[10,30]	[0.4,1]
MST ₅	[2,5]	[15,35]	[0.4,1]

在接口关联关系中，相似度 Sim 的取值范围为 [0.7, 1]。在业务实体关联关系中，随机选择一定比例的服务提供商形成合作或竞争关系，并随机生成

数值范围为 [1, 10] 的合作时间。通过多次模拟实验，生成 1 000 条历史服务组合记录。

2) 实验参数设置

3 种关联关系权重 ω 分别为 [0.2, 0.4, 0.4]；关联规则选取中支持度为所有支持度的均值，置信度为所有置信度的均值；NSGAI 中交叉率为 0.9，变异率为 0.3。

3) 实验方案

为检验所提服务关联 QoS 感知模型的可行性和有效性以及关联关系中关联比例和历史记录的影响，基于表 3 中的制造需求参数，本文设计了 3 组实验，每组实验将分别独立运行 30 次并取平均结果进行对比。

表 3 制造需求参数设置

参数	制造需求
Time _{max} /天	140
Cost _{max} /万元	30
Rep _{min}	0.8
Ava _{min}	0.16
Rel _{min}	0.16

5.2 服务关联 QoS 感知模型的验证（实验 1）

指定业务实体关联比例为 20%，当前时间为 2020 年 8 月 1 日，分别按照迭代次数为 200、400、600、800 开展实验。

如图 4 和图 5 所示，以时间和成本作为服务组合的关键性能指标，含关联分析的服务组合平均时间和成本均小于不含关联分析的情况。从时间上看，含关联分析的服务组合平均时间约为 22~23 天，不含关联分析的服务组合平均时间约为 26~27 天，相差约为 4 天；从成本上看，含关联分析的服务组合平均成本约为 117~119 万元，不含关联分析的服务组合平均成本约为 123~124 万元，相差约 6 万元。可见，服务关联降低了制造成本、缩短了制造时间，为服务需求方带来效率和收益上的提升。

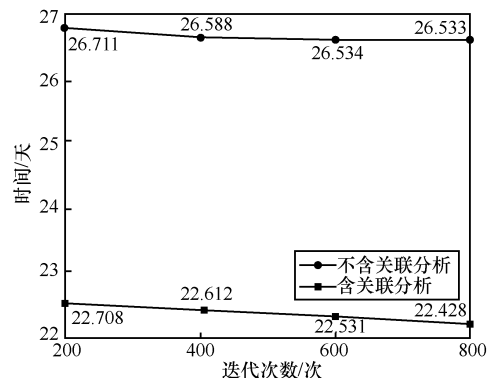


图 4 不含关联分析与含关联分析的时间对比

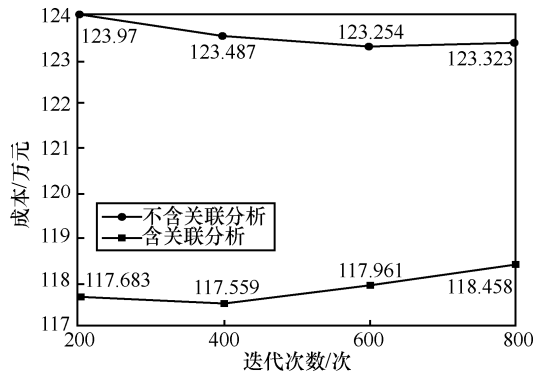


图 5 不含关联分析与含关联分析的成本对比

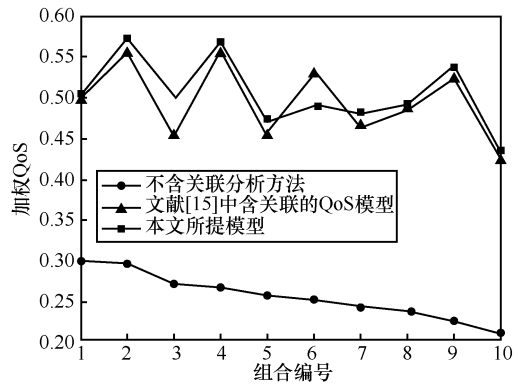


图 6 加权 QoS 对比分析

为了体现本文所提模型对制造云服务组合评估的显著效果，使用不含关联分析方法和文献[15]中含关联的 QoS 模型与本文所提模型进行对比实验。

假设服务需求方设置的 QoS 属性权重 w_i 分别为[0.3, 0.3, 0.2, 0.2, 0.2]，在随机生成的模拟数据上，直接采用式(12)计算 QoS 各属性值，再使用式(13)计算得到不含关联分析时服务组合的加权 QoS₁。并将不含关联分析的服务组合集合进行非支配排序，取排名前 10 的服务组合（如表 4 所示）作为对比验证的服务组合方案。再以文献[15]的计算方式得到加权 QoS₂；按照图 2 中关联分析流程求解得到加权 QoS₃。最终 3 种方式计算得到的加权 QoS 对比分析如图 6 所示，并呈现如表 5 所示的变化。

表 4 服务组合编号及方案

组合编号	MCSC
1	[c2_s2, c4_s3, c9_s2, c10_s1, c13_s2]
2	[c1_s1, c4_s3, c9_s2, c10_s1, c14_s3]
3	[c1_s3, c4_s3, c9_s2, c10_s1, c13_s2]
4	[c2_s2, c6_s1, c9_s2, c10_s1, c14_s3]
5	[c1_s2, c4_s3, c9_s1, c10_s1, c13_s2]
6	[c1_s1, c4_s3, c9_s1, c10_s1, c14_s1]
7	[c2_s2, c4_s3, c9_s1, c10_s1, c13_s2]
8	[c1_s3, c6_s1, c9_s2, c10_s1, c14_s3]
9	[c3_s1, c6_s1, c9_s2, c10_s1, c14_s3]
10	[c3_s1, c4_s3, c9_s2, c11_s3, c14_s3]

如图 6 所示，对于相同的服务组合而言，经过关联分析后服务组合的加权 QoS 都呈现大幅度变化，含服务关联分析的加权 QoS 明显大于不含关联分析的加权 QoS。本文关联分析的平均加权 QoS 为 0.505，大于文献[15]的平均加权 QoS（为 0.496），表明本文所提服务关联 QoS 感知模型有更好的性能。

表 5 服务组合加权 QoS 的排名变化

组合编号	不含关联分析方法		文献[15]中含关联的 QoS 模型		本文所提模型	
	加权 QoS ₁	排名	加权 QoS ₂	排名	加权 QoS ₃	排名
1	0.297	1	0.499	5	0.504	4
2	0.296	2	0.558	2	0.572	1
3	0.271	3	0.455	8	0.499	5
4	0.267	4	0.56	1	0.569	2
5	0.256	5	0.454	9	0.469	9
6	0.25	6	0.531	3	0.491	6
7	0.243	7	0.465	7	0.481	8
8	0.237	8	0.486	6	0.491	7
9	0.224	9	0.524	4	0.539	3
10	0.211	10	0.425	10	0.431	10

在此基础上，分别以加权 QoS 对服务组合进行排名。从表 5 可以看出，采用不同的关联分析模型对不含关联分析的服务组合排名的变化不同。

例如，编号 3 的服务组合不含关联分析时 QoS₁ 为[29.62, 109.95, 0.84, 0.29, 0.23]；利用文献[15]方法时 QoS₂ 为[26.38, 106.5, 0.83, 0.37, 0.39]，排名为 8，下降 5 名；采用本文方法时 QoS₃ 为[25.76, 106.8, 0.88, 0.41, 0.45]，排名为 5，下降 2 名。从整体上看，相较于 QoS₁ 而言，QoS₂ 中属性平均增幅为总体平均增幅的 0.77；QoS₃ 中属性平均增幅为总体平均增幅的 0.91。通过查证服务关联模型可以发现，业务实体关联中存在 2 个合作时间分别为 3 年和 4 年的合作关系；统计关联中存在 8 种常出现的组合，其对应关联规则的 KULC 和 IR 分别为 0.79 和 0.23，即较平衡的正相关，并且近 2 个月各组合 QoS 属性均有轻微的上升趋势。文献[15]中并未考虑服务组合关联规则强度和历史表现的影响，从而对编号 3 的 QoS 属性优化程度相较于本文方法偏低，使排名

下降更多，容易丢失存在关联较强的服务组合。

编号 6 的服务组合不含关联分析时 QoS_1 为 [27.13, 119.08, 0.82, 0.21, 0.31]；利用文献[15]方法时 QoS_2 为 [24.1, 115.23, 0.86, 0.38, 0.45]，排名上升 3 名；采用本文方法时 QoS_3 为 [23.38, 115.55, 0.87, 0.38, 0.48]，排名不变。从整体上看，相较于 QoS_1 而言， QoS_2 中属性平均增幅为总体平均增幅的 1.17，从而排名上升； QoS_3 中属性平均增幅为总体平均增幅的 0.97，排名不变。根据描述模型中的关联关系发现，编号 6 的服务组合的业务实体关联中存在 3 个合作时间分别为 1 年、2 年、5 年的合作关系；统计关联中存在 8 种常出现的组合，其中组合(c1_s1, c14_s1)、(c1_s1, c9_s1)和(c10_s1, c14_s1)的描述模型中 $KULC < 0.5$ 和 $IR > 0.7$ 呈负向、不平衡关联，即关联组合强度弱，在加权 QoS_3 总体呈上升的情况下，使该组合排名靠后，从而避免选择含较差关联规则的服务组合。

由此可见，接口关联、业务实体关联和统计关联在服务组合中 QoS 的直接作用对单个服务选择和服务组合的选取都有较大影响。通过对比，体现了本文所提支持服务关联的 QoS 感知评估模型的可行性和有效性。

5.3 业务实体关联中关联比与合作时间的影响(实验 2)

为检验业务实体关联中关联比对制造云服务组合加权 QoS 的影响，在当前时间为 2020 年 8 月 1 日的条件下，分别对关联比例为 20%、40%、60%、80%进行 600 次迭代，发现得到 Pareto 解的平均个数呈现如图 7 所示的趋势。

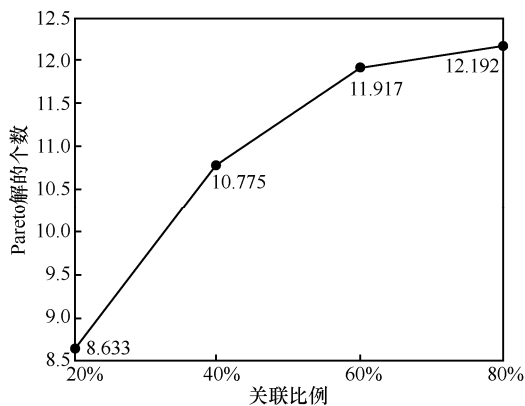


图 7 不同关联比例下的 Pareto 解的个数

从图 7 中可以看出，随业务实体关联比例的变化，Pareto 解的平均个数逐渐增加。主要原因在于，

关联比例的上升使满足约束条件的服务组合个数增多，即可行解的数量变多，从而使实验所得到 Pareto 解的个数增加。

针对业务实体关联模型中合作时间对服务组合选择的影响，在实验 1 的基础上进一步探讨。如图 8 所示，由于合作时间形成的时间因子作用，含合作时间的加权 QoS 相较于不含合作时间的加权 QoS 都有不同幅度的增长。以服务组合各 QoS 属性的均值来看，从不含合作时间的 [24.23, 114.27, 0.86, 0.41, 0.42] 优化为含合作时间的 [23.72, 113.26, 0.87, 0.44, 0.46]，各个属性值都得到提升。

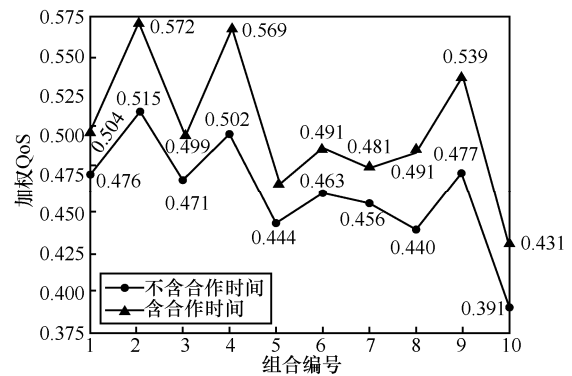


图 8 不含合作时间与含合作时间的加权 QoS

将 2 种方案的加权 QoS 进行排名，如表 6 所示。从表 6 中可以看出，编号 5、7、8 的服务组合在业务实体关联模型中在不含合作时间和含合作时间的 2 种情况下排名增幅发生了变化。

表 6 不含合作时间与含合作时间的排名变化

组合编号	不含合作时间			含合作时间		
	加权 QoS	排名	变化	加权 QoS	排名	变化
1	0.476	4	-3	0.504	4	-3
2	0.515	1	1	0.572	1	1
3	0.471	5	-2	0.499	5	-2
4	0.502	2	2	0.569	2	2
5	0.444	8	-3	0.469	9	-4
6	0.463	6	0	0.491	6	0
7	0.456	7	0	0.481	8	-1
8	0.44	9	-1	0.491	6	2
9	0.477	3	6	0.539	3	6
10	0.391	10	0	0.431	10	0

根据各个服务的业务实体关联描述模型发现编号为 8 的组合方案包含 2 个 4 年的合作关系(c6_s1,

c14_s3)、(c6_s1, c10_s1)和一个 6 年的合作关系 (c9_s2, c14_s3)。在不考虑合作时间时编号为 8 的服务组合排名为第 9 名, 当引入合作时间后上升到第 6 名。由于合作时间较长, 因此该方案服务提供商之间合作效率和成本具有更大优势。可见, 含合作时间的业务实体关联模型能够有效地为服务需求方识别出合作时间相对较长、合作效果更好的服务组合, 表明了业务实体关联模型中引入合作时间的可行性。

5.4 统计关联中不同时间的影响 (实验 3)

为验证本文在统计关联中利用服务组合历史记录信息动态调整 QoS 变化量的有效性, 将在不同时间 (2020 年 6 月 1 日、2020 年 7 月 1 日和 2020 年 8 月 1 日) 进行服务组合寻优, 并对所有时间得到 Pareto 解集合并去重, 再次进行非支配排序, 可以防止 Pareto 解集的随机性, 使某一时间未能找到某个 Pareto 解所导致的结果不一致现象。表 7 为各个时间得到的 Pareto 解集。

如表 7 所示, 不同时间段得到加权 QoS 排名前 10 的服务组合解集相似, 但由于个别服务组合加权 QoS 不同, 使排名有一定的变化。例如, 服务组合 (c1_s2, c4_s3, c9_s1, c11_s2, c13_s2) 在 6 月 1 日时加权 QoS 为 0.542, 排名第 4, 查证历史组合记录发现, 6 月期间组合 (c1_s2, c4_s3) 和 (c1_s2, c9_s1) 绑定执行时 QoS 呈下降趋势。(c1_s2, c4_s3) 中 c1_s2 的 QoS 从 [1.5, 0.85, 0.88, 0.91] 至 [1.59, 0.84, 0.88, 0.88], c4_s3 的 QoS 从 [8.36, 0.95, 0.84, 0.63] 至 [8.37, 0.93, 0.76, 0.63]; (c1_s2, c9_s1) 中 c1_s2 的 QoS 从 [1.71, 0.85, 0.85, 0.93] 至 [1.74, 0.85, 0.82, 0.92],

c9_s1 的 QoS 从 [4.95, 0.87, 0.73, 0.93] 至 [5.06, 0.76, 0.6, 0.90]。其中第一个值为时间, 越小越好, 其余值为信誉度、可用性和可靠性, 越大越好。由此可以看出, 在 6 月这 2 种组合的执行效果欠佳, 并且组合 (c1_s2, c13_s2) 和 (c10_s1, c13_s2) 的 KULC 分别从 0.87、0.89 下降至 0.85、0.84, 即组合关联性减弱, 总体效果变差, 从而使 (c1_s2, c4_s3, c9_s1, c11_s2, c13_s2) 组合方案在 7 月 1 日时加权 QoS 变小为 0.538, 排名下降到第 5 名。

此外, 7 月期间组合 (c4_s3, c9_s2)、(c9_s2, c12_s1) 和 (c12_s1, c14_s3) 绑定频次增多且执行效果较好: (c4_s3, c9_s2) 绑定执行次数增加 3 次, 且服务 QoS 中时间的均值相较于 6 月分别从 8.84、6.87 减少至 8.25、6.01; (c9_s2, c12_s1) 绑定执行次数增加 2 次, 且服务对应 QoS 中时间的均值相较于 6 月分别从 6.75、5.92 下降至 6.70、5.83; (c12_s1, c14_s3) 绑定执行次数增加 1 次, 且该服务 QoS 在 4 个属性上都有提升。c12_s1 从 [5.98, 0.72, 0.48, 0.73] 优化至 [5.52, 0.74, 0.49, 0.81]; c14_s3 从 [4.05, 0.8, 0.95, 0.69] 优化至 [3.51, 0.75, 0.96, 0.74]。从而在 8 月 1 日时出现了新的优质服务组合 (c1_s1, c4_s3, c9_s2, c12_s1, c14_s3)。

由此可见, 利用本文所提统计关联模型可以有效地识别出近期执行较好的服务组合, 通过动态调整 QoS 变化量, 使最终得到的服务组合方案时效性更强, 更符合实际。

6 结束语

制造业生产过程复杂多变, 服务质量会随时间

表 7 不同时间加权 QoS 排名前 10 的 Pareto 解集

2020 年 6 月 1 日			2020 年 7 月 1 日			2020 年 8 月 1 日		
服务组合	加权 QoS	排名	服务组合	加权 QoS	排名	服务组合	加权 QoS	排名
[c1_s1,c4_s3,c9_s2,c10_s1,c14_s3]	0.569	1	[c1_s1,c4_s3,c9_s2,c10_s1,c14_s3]	0.569	1	[c1_s1,c4_s3,c9_s2,c10_s1,c14_s3]	0.569	1
[c3_s1,c4_s2,c9_s2,c10_s1,c14_s3]	0.56	2	[c3_s1,c4_s2,c9_s2,c10_s1,c14_s3]	0.562	2	[c3_s1,c4_s2,c9_s2,c10_s1,c14_s3]	0.562	2
[c1_s1,c4_s3,c9_s2,c11_s2,c14_s3]	0.551	3	[c1_s1,c4_s3,c9_s2,c11_s2,c14_s3]	0.551	3	[c1_s1,c4_s3,c9_s2,c11_s2,c14_s3]	0.551	3
[c1_s2,c4_s3,c9_s1,c11_s2,c13_s2]	0.542	4	[c2_s2,c4_s3,c9_s2,c12_s1,c14_s3]	0.54	4	[c2_s2,c4_s3,c9_s2,c12_s1,c14_s3]	0.54	4
[c2_s2,c4_s3,c9_s2,c12_s1,c14_s3]	0.54	5	[c1_s2,c4_s3,c9_s1,c11_s2,c13_s2]	0.538	5	[c1_s2,c4_s3,c9_s1,c11_s2,c13_s2]	0.538	5
[c1_s2,c4_s2,c9_s1,c11_s2,c14_s3]	0.533	6	[c1_s2,c4_s2,c9_s1,c11_s2,c14_s3]	0.532	6	[c1_s1,c4_s3,c9_s2,c12_s1,c14_s3]	0.537	6
[c1_s1,c4_s3,c9_s1,c11_s2,c13_s3]	0.528	7	[c1_s1,c4_s3,c9_s1,c11_s2,c13_s3]	0.526	7	[c1_s2,c4_s2,c9_s1,c11_s2,c14_s3]	0.532	7
[c1_s2,c6_s1,c9_s1,c11_s2,c14_s3]	0.524	8	[c1_s2,c6_s1,c9_s1,c11_s2,c14_s3]	0.522	8	[c1_s1,c4_s3,c9_s1,c11_s2,c13_s3]	0.526	8
[c3_s1,c4_s2,c9_s1,c10_s1,c14_s3]	0.518	9	[c3_s1,c4_s2,c9_s1,c10_s1,c14_s3]	0.518	9	[c1_s2,c6_s1,c9_s1,c11_s2,c14_s3]	0.522	9
[c2_s2,c4_s2,c9_s1,c11_s2,c14_s3]	0.513	10	[c2_s2,c4_s2,c9_s1,c11_s2,c14_s3]	0.513	10	[c3_s1,c4_s2,c9_s1,c10_s1,c14_s3]	0.518	10

和应用的动态发生变化, 因此服务需求方往往需要更加切实有效的服务组合方案。因此, 本文研究了制造云平台中服务组合的 3 种关联关系, 提出了支持服务关联的 QoS 感知评估模型。下一步工作将对多目标优化算法进行对比选择并做出相应的改进, 提升算法性能, 以适应制造云服务组合问题, 得到更优质的解集。此外, 进一步探索制造云服务关联的自适应调整, 提升服务质量真实性。

参考文献:

- [1] 尹胜, 尹超, 刘飞, 等. 云制造环境下外协加工资源集成服务模式及语义描述[J]. 计算机集成制造系统, 2011, 17(3): 525-532.
YIN S, YIN C, LIU F, et al. Outsourcing resources integration service mode and semantic description in cloud manufacturing environment[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2011, 17(3): 525-532.
- [2] 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 B H, ZHANG L, WANG S L, et al. Cloud manufacturing: a new service-oriented networked manufacturing model[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2010, 16(1): 1-7.
- [3] 陶飞, 张霖, 郭华, 等. 云制造特征及云服务组合关键问题研究[J]. 计算机集成制造系统, 2011, 17(3): 477-486.
TAO F, ZHANG L, GUO H, et al. Typical characteristics of cloud manufacturing and several key issues of cloud service composition[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2011, 17(3): 477-486.
- [4] 赵金辉, 王学慧. 基于服务质量的云制造服务双向匹配模型[J]. 计算机集成制造系统, 2016, 22(1): 104-112.
ZHAO J H, WANG X H. Two-sided matching model of cloud service based on QoS in cloud manufacturing environment[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2016, 22(1): 104-112.
- [5] 陈友玲, 王龙, 刘舰, 等. 基于 i-NSGA-II-JG 算法的云制造资源服务组合优选[J]. 计算机集成制造系统, 2019, 25(11): 2892-2904.
CHEN Y L, WANG L, LIU J, et al. Resource service composition optimization based on i-NSGA-II-JG algorithm for cloud manufacturing[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2019, 25(11): 2892-2904.
- [6] LU Y Q, XU X. A semantic Web-based framework for service composition in a cloud manufacturing environment[J]. Journal of Manufacturing Systems, 2017, 42: 69-81.
- [7] AFSHIN N, NAVIMPOUR N J. A new agent-based method for QoS-aware cloud service composition using particle swarm optimization algorithm[J]. Journal of Ambient Intelligence and Humanized Computing, 2018, 10(5): 1851-1864.
- [8] LI H B, CHAN K, LIANG M X, et al. Composition of resource-service chain for cloud manufacturing[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2015, 12(1): 211-219.
- [9] LI H B, WENG S Y, TONG J C, et al. Composition of resource-service chain based on evolutionary algorithm in distributed cloud manufacturing systems[J]. IEEE Access, 2020, 8: 19911-19920.
- [10] TAO F, ZHAO D M, HU Y F, et al. Correlation-aware resource service composition and optimal-selection in manufacturing grid[J]. European Journal of Operational Research, 2010, 201(1): 129-143.
- [11] LINA B, SIMON M, LUCK M. Efficient correlation-aware service selection[C]//2012 IEEE 19th International Conference on Web Services. Piscataway: IEEE Press, 2012: 1-8.
- [12] LINA B, SIMON M, IMAN P, et al., Efficient multi-granularity service composition[C]//IEEE International Conference on Web Services. Piscataway: IEEE Press, 2011: 227-234.
- [13] XU W J, TIAN S S, LIU Q, et al. An improved discrete bees algorithm for correlation-aware service aggregation optimization in cloud manufacturing[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2015, 84(1-4): 17-28.
- [14] 田思思. 基于关联模型的云制造服务聚合优化方法研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2015.
TIAN S S. Research on the cloud manufacturing service aggregation optimization method based on correlation model[D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2015.
- [15] LIU J, CHEN Y L, WANG L, et al. An approach for service composition optimisation considering service correlation via a parallel max-min ant system based on the case library[J]. International Journal of Computer Integrated Manufacturing, 2018, 31(12): 1174-1188.
- [16] ALANGARI N, ALTURKI R. Association rule mining in higher education: a case study of computer science students[C]//Smart Infrastructure and Applications. Berlin: Springer, 2020: 311-328.
- [17] LI H F, ZHAO L, ZHANG B H, et al., Service matching and composition considering correlations among cloud services[C]//IEEE International Conference on Systems. Piscataway: IEEE Press, 2015: 509-514.
- [18] 赵雷. 关联关系感知的制造云服务匹配与组合方法研究[D]. 北京: 北京理工大学, 2016.
ZHAO L. Research on correlation-aware manufacturing cloud service matching & composition approach[D]. Beijing: Beijing Institute of Technology, 2016.
- [19] 万焯民. 基于 QoS 历史数据的改进云服务选择算法研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2016.
WAN S M. Study on improved cloud service selection based on QoS historical data[D]. Chongqing: Chongqing University, 2016.
- [20] KALYANMOY D, AMRIT P, SAMEER A, et al. A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: NSGA-II[J]. IEEE Transactions on Evolutionary Computation-TEC, 2002, 6(2): 182-197.

[作者简介]



谢晓兰 (1974-), 女, 广西桂林人, 博士, 桂林理工大学教授、博士生导师, 主要研究方向为云计算、并行计算、大数据、地球物理勘查与信息技术等。

曾兰英 (1995-), 女, 重庆人, 桂林理工大学硕士生, 主要研究方向为云计算、大数据。

翟青海 (1997-), 男, 安徽合肥人, 桂林理工大学硕士生, 主要研究方向为云计算、大数据。