

基于超图的服务关系网络建模及服务组合优化算法

江凌云, 杨雪薇

(南京邮电大学通信与信息工程学院, 江苏 南京 210003)

摘要: 随着移动网络、云服务等技术的快速发展, 物联网环境下的服务数量逐渐增多, 类型逐渐多样, 服务间的相关性更加复杂。这种相关性会影响服务的服务质量(QoS, quality of service)性能, 因此在服务组合过程中, 考虑服务间的相关性是非常必要的。针对此问题, 使用意图和上下文对服务进行建模, 通过构建超图对服务关系网络进行描述, 利用超边来表示聚类的服务集和服务间的相关性。在此基础上, 采用了第三代非支配排序遗传算法(non-dominated sorting genetic algorithm III, NSGA-III), 考虑超边表示的服务间相关性对QoS性能的影响, 完成服务组合。实验证明, 超图模型可以很好地描述服务及服务间的相关性, 并提高多目标优化算法求解得到的服务组合方案的QoS性能。

关键词: 超图; 服务建模; 相关性; 服务质量; 服务组合

中图分类号: TP393.0

文献标志码: A

doi: 10.11959/j.issn.2096-3750.2025.00393

Service relationship network modeling and service composition optimization algorithm based on hypergraph

JIANG Lingyun, YANG Xuewei

College of Telecommunications and Information Engineering, Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing 210003, China

Abstract: With the rapid development of mobile network, cloud services and other technologies, the number of services in the Internet of Things environment is gradually increasing, the types are gradually diverse, and the correlation between the services is more complex. This correlation will affect the quality of service(QoS) performance of services, so it is necessary to consider the correlation between services in the process of service composition. In order to solve this problem, services were modeled by the intention and the context. The service relationship network was described by constructing the hypergraph. The set of clustered services and the correlation between the services are represented by hyperedges. On this basis, the NSGA-III multi-objective optimization algorithm is used to complete the service composition, which covers the influence of the correlation between the services represented by hyperedges on QoS performance. The experiment proves that the hypergraph model can describe the service and the correlation between the services well, and improve the QoS quality of the service combination solution solved by the multi-objective optimization algorithm.

Key words: hypergraph, service modeling, correlation, QoS, service composition

0 引言

随着万物互联时代的到来, 物联网技术被应用

于各行各业中, 应用场景多变, 用户需求多样, 单一的服务难以满足这些复杂的业务, 而服务组合技术可以根据实际场景来满足用户多元化的需求^[1]。

收稿日期: 2024-01-30; 修回日期: 2024-04-15

通信作者: 江凌云, jiangly@njupt.edu.cn

基金项目: 江苏省重点研发计划项目(No. BE2020084-4)

Foundation Item: The Jiangsu Provincial Key Research and Development Program (No. BE2020084-4)

然而物联网服务数量多、种类杂、服务间相关性复杂等特点,使得服务组合难度增大。一方面提供的使用标准不同,使得服务模型的抽象更加困难^[2];另一方面海量服务间的相关性对服务性能的影响^[3],使得组合过程中服务选择的复杂度提高。因此,如何根据服务模型,考虑服务间的相关性,选择更适合的服务,提高服务组合服务质量(QoS, quality of service),满足用户实际需求仍须进一步的研究。

与传统的Web服务不同,物联网服务异构性强、资源受限、服务间关系复杂,服务管理难度大^[4],若要在满足用户需求的情况下,提高服务组合的QoS性能就必须解决这些问题。如在工业园区内,从基于云的物联网系统结构来看,物联网服务可分为实体服务和云服务^[5],而不同的感知设备、云端资源提供的服务千差万别,但相互之间又存在联系。当工程上进行产量预测时,数据采集设备提供相应的历史数据,通信模块将数据上传至云端,云端资源对其进行分析学习得到预测值。这一过程中数据采集设备和云端资源使用的数据格式是否统一会影响数据处理的响应时间;在使用多个云端资源时,云服务的部署位置会影响网络时延。这些物联网服务在功能上截然不同,组合后满足了用户的需求,但相互之间的相关性影响了服务组合结果的QoS质量。因此,准确描述服务特性以及服务间的相关性是十分必要的。

目前,服务组合技术根据研究内容重点不同可以分为功能属性和非功能属性两个方面^[6],前者关注用户的功能需求,验证服务组合的可行性,后者在满足功能需求的基础上,更关注服务组合的QoS性能。无论是哪一方,都需要根据服务模型的选择来选择合适的服务组合,但现有的模型在描述服务时,大多对服务个体属性进行描述,而忽略服务间的相关性。即使有少数文献考虑这一特性,但对相关性给服务的其他属性带来的影响也并没有详细描述。而图作为表示对象之间关系的有效工具^[7],可以很好地描述服务间的关联。同时,超图作为聚类的工具之一,也常用于服务的聚类^[8],根据服务的功能性描述将功能相似的服务通过算法聚类,用于服务组合。因此,本文选择超图搭建服务关系网,既考虑服务的功能属性,又关注服务间关联对QoS性能带来的影响。

物联网环境下的服务组合多为NP-hard问题,多目标优化算法常被用于解决这类问题^[9]。本文提出一种基于超图的多目标优化算法,通过超图对聚类后的服务集建立关系网,描述相关性给QoS性能带来的影响,利用第三代非支配排序遗传算法(NSGA-III, non-dominated sorting genetic algorithm III)在选择服务时考虑服务间相关性,求解物联网环境下的多目标服务组合问题。本文的主要贡献在于:通过超图构建服务关系网,采用上下文描述服务的非功能属性和服务间相关性,将服务模型、服务间关系映射为超图的顶点和超边;提出基于超图的多目标服务组合算法,对超图聚类后的服务集进行选择,提高服务检索效率,考虑相关性提高组合的QoS。

1 相关工作

目前,服务组合技术方向的研究越来越多,文献[10]考虑服务特征(先验特征、关联特征和相似特征),定义了资源模型来描述候选服务的资源状态,并提出了一种基于服务与资源相互关系分析的资源检查算子将其集成到改进的人工蜂群(ABC, artificial bee colony)算法中,确保服务有足够的资源支持其成功执行。文献[11]强调物联网中传感器设备的重要性,确定了传感器和数据捕获过程的重要特征,为物联网传感器开发了一个基于本体的上下文框架,它允许捕获和建模与传感器相关的上下文属性。文献[12]提出在物联网服务描述中引入意图服务本体的方法,并在意图服务本体中扩展服务上下文和QoS,丰富物联网服务描述的语义,提高服务发现的准确率。上述文献从不同角度出发,通过上下文、意图等来描述服务,但都仅对单个服务进行描述,忽略了服务间的相关性。

文献[13]说明了服务之间动态依赖关系问题的重要性,提出了一种自动分析服务执行数据以发现服务之间动态依赖关系的方案。文献[14]提出了一种基于矢量时钟来提取Web服务之间动态依赖关系的方法。矢量时钟可以用来对分布式环境中的事件进行排序,该研究使用矢量时钟来排序服务执行,并推断服务之间的因果依赖关系。文献[15]提出了一种考虑用户偏好优先级的Web服务选择框架,结合QoS范围设置的搜索机制来识别满足用户QoS约束的服务。在确定了候选服务的基础上,提出了一种基于主成分分析的Web服务选择算法来消除QoS属

性之间的相关性，准确地计算出 Web 服务的整体 QoS。文献[16]考虑服务之间的 QoS 相关性，提出了一种新的服务选择方法，通过修剪非最优候选服务的服务来管理 QoS 相关性。该方法有效地管理服务之间复杂的关联关系。上述文献都考虑了服务间相关性可能会产生的影响，但都没有对这种相关性进行详细描述，并在服务组合时考虑其带来的影响。

文献[17]在面向服务的架构 (SOA, service-oriented architecture) 中提出了一种基于超图着色的大规模建模方法。服务、服务使用者、服务提供者和相关组被映射到超图的顶点、超边和颜色。这一方法有助于通过参数查找服务的数量、服务组合模式、服务的调度顺序以及服务组合的约束。文献[18]引入原子服务、抽象服务和集群服务，从不同层次描述 Web 服务，利用超图描述 Web 服务之间的关系，提出了基于超图的服务聚类方法，对云服务平台上的服务进行分层管理。文献[19]提出一种关系聚合超图神经网络模型，旨在更好地描述和应用物理世界中的复杂结构和关系，从而提高信息物理系统服务推荐的管理效率和服务质量。上述文献利用超图对服务进行聚类和管理，很好地反映了服务间的关系，但聚类更多关注服务的功能属性，忽略了服务的非功能属性间的关系。

文献[20]在多云环境中基于 QoS 属性的不确定性，提出了一种改进的粒子群算法 (PSO, particle swarm optimization) 来组合最优服务。文献[21]提出了一种基于多目标元启发式搜索算法的物联网服务组合问题的最优解决方案。该算法用于解决基于服务质量的服务组合问题。文献[22]提出一种融合模糊层次分析法 (FAHP, fuzzy analytic hierarchy process) 与改进自动规划算法的方法。对竞争力较差的服务进行剪枝，在满足功能性需求的前提下选择综合 QoS 最好的服务加入组合中，不仅较好地提高了服务组合的质量，而且显著缩短了程序的执行时间。文献[23]设计了一种新的基于成本优化的多目标服务组合模型。在原有的 ABC 算法基础上，增加了快速非支配排序方法、种群选择策略、精英引导离散解生成策略和多目标适应度计算方法，提出了精英引导多目标人工蜂群算法。文献[24]通过改进哈里斯鹰 (MOHHO, multi-objective harris hawks optimization) 算法的能量迭代曲线、单迭代

坐标，并在鹰的多个迭代坐标相同时初始化坐标，提高了收敛性和多样性，避免了算法陷入局部最优。上述文献采用启发式算法和图搜索，通过改进原有算法更好地求解服务组合问题。

上述文献在服务模型和服务关系网的构建上，大多只考虑服务的功能性描述，忽略了服务间的相关性给非功能属性带来的影响。同时，物联网服务组合作为 NP-hard 问题，采用启发式算法可以更好地完成多目标优化过程。

2 问题描述及定义

2.1 服务管理框架

在物联网环境下，服务组合问题对 QoS 的要求更高，尤其是响应时间、可靠性等。在智能交通系统^[25]中，服务组合需要快速响应请求，以确保交通管理系统能够及时获得最新的数据并做出相应的决策。在电力系统^[26]、水务系统^[27]需要监控关键基础设施运行状态的领域，服务组合需要具有高可靠性和实时性，能够快速检测并响应潜在的问题，确保基础设施的稳定运行。本文先给出一种基于实例化的框架，在此框架基础上建立了基于超图的服务关系网络模型，包括服务资源层、服务实例化层、服务关系网络模型构建，将不同供应商提供的服务在服务实例化模块，通过意图和上下文描述实现服务模型的抽象，便于统一管理，之后服务关系网络模型构建，将完成实例化的服务，通过意图描述的功能属性进行聚类，再根据非功能属性的上下文描述建立服务间相关性，完成服务关系网的搭建。服务管理框架如图 1 所示。

2.1.1 服务资源层

服务供应商提供的所有服务都将通过服务资源层接入服务管理系统，完成服务信息的注册，对服务进行统一标识。

2.1.2 服务实例化层

不同服务供应商提供的服务标准不同，在服务实例化层将这些服务统一抽象建模，转化为可识别的语义模型。当前服务组合的研究方向分为功能属性和非功能属性^[28]，本文也从这两个属性对服务进行描述。意图类语义可以清晰地阐述服务的目的，因此用其对服务的功能属性进行描述；而非功能属性涉及的信息多、环境复杂，所以在描述这一性能时使用上下文语义更合适。

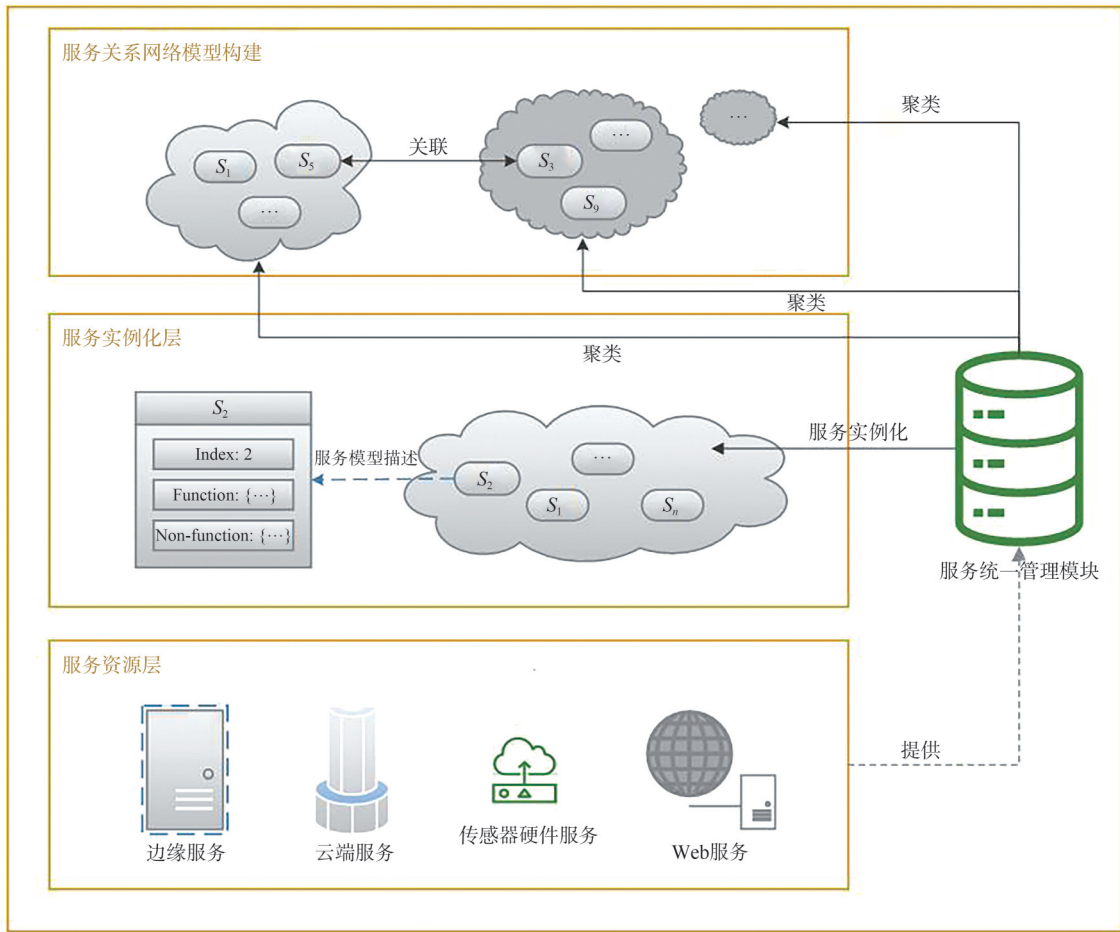


图1 服务管理框架

本文所设计的物联网服务实例化语义模型如下。

$$S_i = \{Index, Function, Non-function\}$$

其中, Index 表示服务的唯一标识, Function 表示服务的功能属性, Non-function 表示服务的非功能属性。

Index 由服务资源层在接入服务管理系统时分配。

Function 通过意图类方法对该服务功能进行描述, 由能够最大限度表达服务功能或用户需求的几个词语或词组组成^[12]。如 Function = {Predict the weather through machine learning}, 服务意图表示为动词 (Predict)、名词 (weather)、参数 (through machine learning), 表示该服务功能为使用机器学习预测天气。

Non-function 通过上下文描述刻画该服务非功能属性。服务间的非功能属性在一定情况下具有关联, 并会对关联服务的 QoS 性能产生影响, 从而改变服务组合结果的 QoS。在使用同一服务厂商的组件服务时, 可能存在优惠政策使组合成本降低; 通过调用同一服务器的服务, 使得服务信息在同一服务器内进行传输处理, 可以降低传输时延; 使用具有相

同数据格式或标准的服务, 可以避免标准不同造成的误差, 提高可靠性, 同时避免数据格式的转换, 降低了响应时间^[29]。考虑上述情况, 服务实例化语义模型在抽象服务的非功能属性时, 加入语义标识 “Correlated Attribute” 把会对其他服务的 QoS 产生影响的属性单独描述, 说明产生影响的条件和会影响的 QoS; 同时, 在描述服务的 QoS 性能参数时, 也在其中加入语义标识记录对该服务的 QoS 性能产生影响的条件, 并分别记录变化前后的 QoS 属性值。

将服务的非功能属性分为通用属性、相关属性、其他属性和 QoS, 具体描述如下。

$$Non-function = \{General Attribute, Correlated Attribute, other Attribute, QoS\}$$

(1) General Attribute = {provider, method, url, input, output, type}, 用于描述服务的通用属性。其中, provider 表示服务的供应商; method 表示服务的调用方式; url 表示服务的调用路径; input 表示服务所需的输入参数; output 表示服务最终的输出

参数；type表示服务的类型，如云服务、边缘服务、终端服务、通信服务等。

(2) Correlated Attribute= {refer₁, refer₂, ..., refer_n}，用于描述对其他服务QoS产生影响的属性。其中，refer_i= {name, condition, cor-QoS, change}，name表示该属性的名称，condition表示该QoS产生影响的条件，cor-QoS表示影响的QoS属性名，change表示QoS产生的具体变化。

(3) other Attribute表示该服务在上述属性外的其他信息，如服务涉及的物理设备信息、服务所处的网络环境、部署情况等。

(4) QoS= {Response-time, reliability, availability, price, reputation, ..., security}，包括服务的QoS性能指标，如响应时间、可靠性、可用性、价格、声誉、安全性等。其中，Response-time= {update-condition, before, after}，update-condition表示影响该QoS性能的条件，before表示不存在相关联的服务时的参数指标，after表示在该影响条件下的参数指标。

2.1.3 服务关系网络模型构建

由于基于QoS的服务组合需要在满足用户需求的情况下，选择QoS性能指标更好的组合。因此，在进行服务发现和选择时，往往需要对服务集合进行聚类，将功能相似的服务聚在同一服务集中，再从多个服务集中分别选取功能不同的服务进行组合以满足用户需求。

通过聚类可以很好地减少服务搜索空间，提高服务检索速率^[30]，所以本文在构建服务关系网时，不仅考虑服务间的相关性，而且把服务的聚类情况考虑在内，由此构建服务关系网络模型如下。

定义1 本文超图表示为 $H=\{S, E, W\}$ 。

其中， $S=\{S_1, S_2, \dots, S_n\}$ 为超图的顶点集，用于

表示服务的集合。 S_k 是第 k 个服务实例。 $E=E_{sim} \cup E_{cor}$ 为超图的超边集，每个超边都包含两个及以上的顶点。 $E_{sim}=\{e_{sim1}, e_{sim2}, \dots, e_{simt}, \dots, e_{simm}\}$ 为聚类后的服务集的集合，其中 $e_{simt}=\{S_a, S_b, \dots, S_j\}$ 表示第 t 组功能相似的服务顶点集合而成的超边， S_a, S_b, \dots, S_j 为 e_{simt} 中包含的服务顶点。 $E_{cor}=\{e_{cor1}, e_{cor2}, \dots, e_{cort}, \dots, e_{corn}\}$ 所表示的超边仅含有两个顶点，即 $e_{cort}=\{S_i, S_j\}$ ，其中 S_i 和 S_j 具有相关性。

$W=W_{sim} \cup W_{cor}$ 是每个超边的权重。 $W_{sim}=\{w_{sim1}, w_{sim2}, \dots, w_{simt}, \dots, w_{simm}\}$ 表示 E_{sim} 中 m 个超边内服务相似性的集合， $0 < w_{simt} < 1$ ； $W_{cor}=\{w_{cor1}, w_{cor2}, \dots, w_{cort}, \dots, w_{corn}\}$ 表示具有相关性的服务之间的权重， $w_{cort}=1$ 。

定义2 若 S_1 的相关属性Correlated Attribute中的某一个refer_i与 S_2 的某一个refer_j相同，则 S_1 和 S_2 具有相关性，存在超边 $e_{corl}=\{S_i, S_j\} \in E_{cor}$ 。

根据定义2建立相关性后，由相同refer_i中的cor-QoS标识，确定产生影响的QoS属性名。在 S_1 和 S_2 中找到对应的QoS属性，将refer_i中的condition写入对应QoS的unupdate-condition语义中，记录使该属性值变化的条件，再根据refer_i中的change表述对其QoS性能参数进行更新。当进行服务组合时，若同时选中 S_1 和 S_2 ，则使用更新后的QoS性能参数进行组合的QoS计算，即after对应的数值；若仅选中 S_1 或 S_2 ，则使用原有的QoS参数进行计算，即before对应的数值。

图2展示了超图的构建过程。首先，所有服务在聚类后，根据功能相似性将其分为5个服务集，将其映射为超边集合 $E_{sim}=\{e_{sim1}, e_{sim2}, e_{sim3}, e_{sim4}, e_{sim5}\}$ ，每个服务集由该集合的一个超边 e_{simt} 表示，如 $e_1=\{S_1, S_{18}, S_{41}, \dots, S_{85}\}$ ；其次，根据定义2建立服务间的相关性并映射为超边集合 $E_{cor}=\{e_{cor1}, e_{cor2}, \dots, e_{corn}\}$ ，每组具有相关性的服务都有一个超边 e_{cort} 表示，如 $e_{cor3}=\{S_{11}, S_{41}\}$ 。

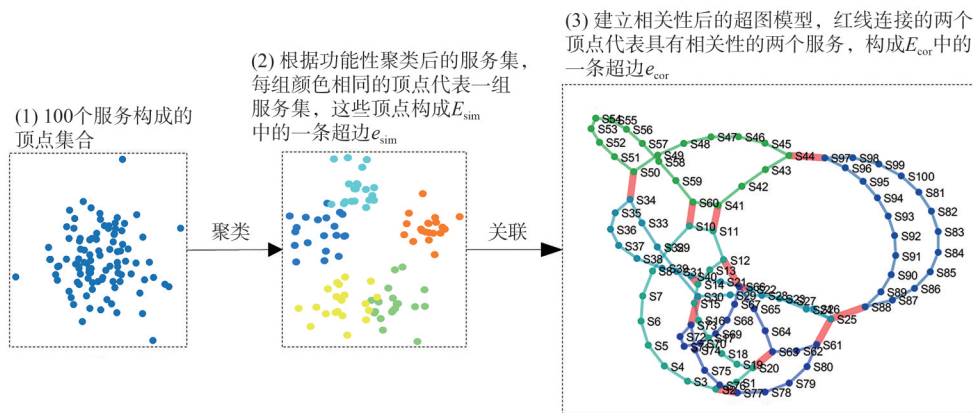


图2 超图的构建过程

2.2 基于 QoS 的服务组合

服务组合是按照用户需求，从候选服务中选出具有相应功能的服务组合起来，组合的 QoS 指标反映服务质量。基于 QoS 的服务组合技术就是在满足用户功能需求的基础上，选取 QoS 更优的组合。而不同供应商提供的服务标准存在差别，使得相互之间无法进行等量运算，因此需要对所有服务的 QoS 值归一化处理^[31]，消除量纲和量纲单位的影响，使其在服务组合过程中可以等量计算。

2.2.1 QoS 参数处理

由服务实例化层可知，服务的 QoS={Response-time, reliability, price, availability, reputation, ..., security}，包括响应时间、可靠性、价格、可用性、声誉、安全性等^[32]。在进行归一化处理时，将其表示为 QoS={Q₁, Q₂, ..., Q_n}，其中 Q₁, Q₂, ..., Q_n 分别表示对应 QoS 属性。

这些 QoS 属性根据数值大小和服务质量好坏的关系，可以分为成本型指标和效益型指标。像价格和响应时间这类数值越大对应服务质量越差的属性，称为成本型 QoS 属性。反之则称为效益型 QoS 属性^[33]。

将 QoS 属性按成本型和效益型进行归一化处理，使数值映射在 [0, 1]

$$q = \begin{cases} \frac{Q_{\max} - Q_x}{Q_{\max} - Q_{\min}}, & Q_x \text{ 为效益型且 } Q_{\max} \neq Q_{\min} \\ \frac{q_x - Q_{\min}}{Q_{\max} - Q_{\min}}, & Q_x \text{ 为成本型且 } Q_{\max} \neq Q_{\min} \\ 0, & Q_{\max} = Q_{\min} \end{cases} \quad (1)$$

其中，Q_x 为 QoS 中第 x 个要归一化处理的属性，Q_{max} 为该服务集中对应 QoS 属性最大的值，Q_{min} 为该服务集中对应 QoS 属性最小的值。q 为其归一化处理后的 QoS 属性值；q 越小，对应服务的 QoS 越高。

2.2.2 服务组合流程描述

由于单一的服务无法满足用户的复杂需求，因此需要分析用户需求，选取不同的服务进行组合，组合流程描述有很多^[34]，本文描述如图 3 所示。

服务组合按照一定的逻辑将单个服务组合成具有某种功能的复合服务。这些服务之间的关系大多数情况下不是单纯的线性关系，不同的 QoS 属性在不同的服务组合逻辑顺序下得出的值也不相同。常见的服务组合有 4 种基本结构^[35]：顺序结构、循环结构、并行结构和选择结构。其他 3 种都可以转换为顺序结构，因此本文按顺序结构逻辑计算 QoS 属性值，服务组合顺序结构见表 1。

表 1 服务组合顺序结构

组合模型	顺序结构
响应时间 RT	$\sum_{i=1}^n Q_i(RT)$
可用性 A	$\prod_{i=1}^n Q_i(A)$
可靠性 RE	$\prod_{i=1}^n Q_i(RE)$
价格 P	$\sum_{i=1}^n Q_i(P)$
声誉 RD	$\sum_{i=1}^n \frac{Q_i(RD)}{n}$

2.2.3 目标函数构建

由于用户需求的多元化，多目标优化算法成为解决服务组合问题的常用方法。因此，本文构建多目标函数，利用启发式算法来求解具有更好 QoS 的服务组合方案。在实际求解过程中，通过对用户的 QoS 需求分析，将 QoS 性能指标分为多组，根据用户偏好设置每个 QoS 属性对应的权值，构建目标函数

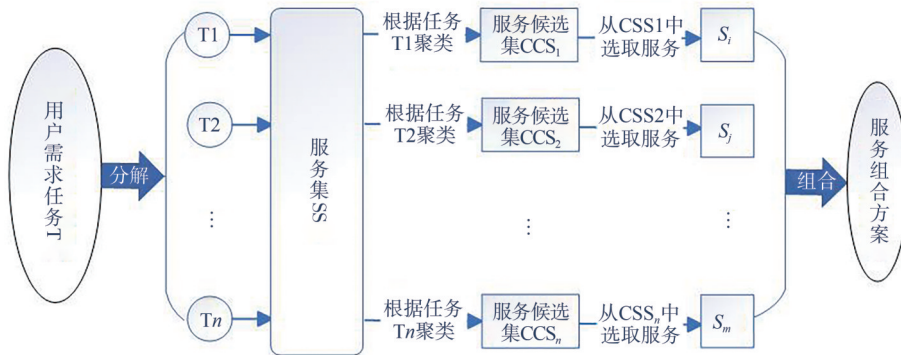


图 3 服务组合流程

$$\begin{cases} f_1 = w_1 q_1^T, i \text{ 为第一组 QoS 属性} \\ f_2 = w_2 q_2^T, j \text{ 为第二组 QoS 属性} \\ \vdots \\ f_m = w_m q_m^T, l \text{ 为第 } M \text{ 组 QoS 属性} \end{cases} \quad (2)$$

其中, $w_1 = \{w_{11}, w_{12}, \dots, w_{1h}\}$, $w_2 = \{w_{21}, w_{22}, \dots, w_{2s}\}$, $w_m = \{w_{m1}, w_{m2}, \dots, w_{mu}\}$ 为每组 QoS 对应的加权系数; f_1, f_2, \dots, f_m 为构建的目标函数。

本文通过 NSGA-III 算法求解多目标服务组合问题, 利用式(2)计算服务组合方案中在顺序结构下的各目标函数值。由于归一化处理后的 q 越小, 服务的质量越好, 该多目标问题为求解目标函数最小值问题。

3 算法设计

3.1 NSGA-III

NSGA-III^[36]是在第二代非支配排序遗传算法的基础上提出的一种新的多目标优化算法, 使用快速的非劣性排序方法、精英策略选择, 并通过定义拥挤距离保持种群的多样性, 来求解多目标问题。但在个体的选择算子设计上, NSGA-III 使用了基于参考点的方法对个体进行选择, 通过计算个体到参考点的最短距离进行优化选择, 在求解多目标问题上, 可以使求解结果更好地收敛到一个均匀分布的 Pareto 面上。本文将 NSGA-III 算法应用于求解考虑服务相关性的服务组合问题上, 种群更新与服务组合问题构成的对应关系见表 2。

表 2 种群更新与服务组合问题构成的对应关系

种群更新	服务组合
种群个体	服务组合方案
个体适应度函数	该服务组合方案的 QoS
种群进化速度	算法优化的速度
适应最好的个体	最优的服务组合方案
目标函数个数	服务组合的 QoS 维度

3.2 具体设计

在服务组合过程中, 利用第 2 中表示服务间关系的超边集合来考虑服务间相关性对 QoS 的影响, 求解具有更好 QoS 的组合方案。在 NSGA-III 算法中, 每次计算个体适应度函数时, 根据超边表示的服务关系判断该个体代表的组合方案中的所有服务之间是否具有相关性, 选取用于计算个体适应度结果的 QoS 数据集, 适应度函数更新流程如图 4 所示。

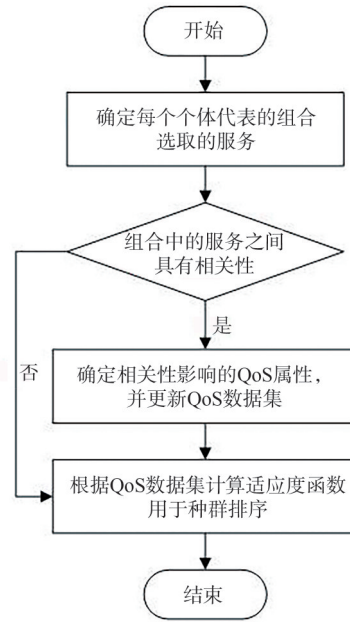


图 4 适应度函数更新流程

在流程中若某个个体代表的组合为 $\{S_2, S_{201}, S_{445}, S_{665}, S_{967}\}$, 代表相关性的超边集为 $\{[S_1, S_{255}], [S_{115}, S_{445}], [S_{665}, S_{967}], \dots, [S_{25}, S_{978}]\}$, 此时个体中 S_{665} 和 S_{967} 之间具有相关性。再确定 S_{665} 和 S_{967} 中受影响的 QoS 属性, 更新用于对应的 QoS 数据集, 最后根据更新的数据集计算以上个体代表的组合的适应度函数值于种群更新。

利用以上方法计算个体适应度, 将其用于个体的排序和选择, 通过 NSGA-III 算法求解服务组合问题, 具体算法如算法 1 所示。

算法 1 本文算法

输入: 设置初始化参数最大迭代次数 Maxit、种群大小 nPop、交叉概率 pCrossover、变异概率 pMutation; 超边集合 E 、服务实例化模块中的 QoS 数据集

输出: Pareto 前沿解集 F_1

pop=[]/*初始化 pop 存放支配关系的排序结果*/

$F_1=[]$ /*存放本算法 Pareto 前沿解集*/

/*按式(2)构建多目标函数作为本算法的适应度函数, 根据以上流程图计算个体适应度值, 用于种群个体的交叉变异、排序选择等*/

Zr=GenerateReferencePoints(nObj, nDivision);

Params ← Zr; /*生成参考点*/

pop.cost=obj_function(pop,QoS); /*计算初始个体的适应度值*/

[pop, F_1 , params]=SortAndSelectPopulation(pop,

```

params); /*由参考点对总体进行排序并执行选择*/
/*通过以上处理得到初始化种群 pop*/
For it=1 to Maxit
popc/*交叉得到新的个体*/
popm/*变异得到新的个体*/
pop=[pop, popc, popm]/*种群合并*/
pop.cost=objCor_function (pop,E,QoS)/*重新个
体的适应度值*/
[pop, F, params]=SortAndSelectPopulation(pop,
params); /*由参考点对总体进行排序并执行选择*/
F1=pop(F{1})*F1为当前算法得到的非支配解*/
Return F1

```

4 实验仿真

本文使用 MATLAB 实现算法的仿真对比。实验平台的配置如下。

软件环境：Microsoft Windows 11 家庭中文版 (64位)，版本号 MATLAB R2021a。

硬件环境：Intel(R) Core(TM) i5-12500H。

为了验证本文算法的性能，设计实验如下。

4.1 实验数据

4.1.1 服务超图样例

为说明本方法在实际背景下的应用情况，本文举例描述智能交通系统中的服务模型。服务 A 为视

频采集服务，服务 B 为视频处理服务，两者都部署在边缘服务器 K 中且都由供应商 P 提供。服务 A 的抽象模型如图 5 所示。

服务 B 的模型结构与服务 A 相同，但具体属性内容不同。当两者具有相同的 refer 时，由定义 2 可知服务 A 和服务 B 具有相关性。根据图 2 的过程用超图的顶点 S_1 和 S_2 代表服务 A 和 B，超边 $e_{cor1} = \{S_1, S_2\}$ 表示两者具有相关性。此时超图 $H = \{S, E, W\}$ ，其中 $S = \{S_1, S_2\}$ ， $E_{cor} = e_{cor1}$ ，超边 e_{cor1} 的权值 $w_{cor1} = 1$ 。

在智能交通系统中所有服务都以相同的方式完成服务关系网络模型构建来描述服务间的相关性。

4.1.2 仿真数据

由于没有标准的数据集，本文将随机生成一定数量的服务，将其分为多个服务候选集，每个候选集对应一组功能相似的服务，服务之间的相关性是随机生成的。在选择服务时，从每个候选集中选取一个服务实现相应的功能，满足用户需求，计算组合的 QoS 属性值。

实验选择价格、安全性、声誉、可靠性和响应时间作为服务的 QoS 性能指标，用于验证算法的有效性。对应 QoS 属性值范围见表 3。

表 3 QoS 属性值生成范围

价格	安全性	声誉	可靠性	响应时间
[100,500]	[0.1,0.9]	[0.2,0.8]	[0.3,0.7]	[0.1,4.0]

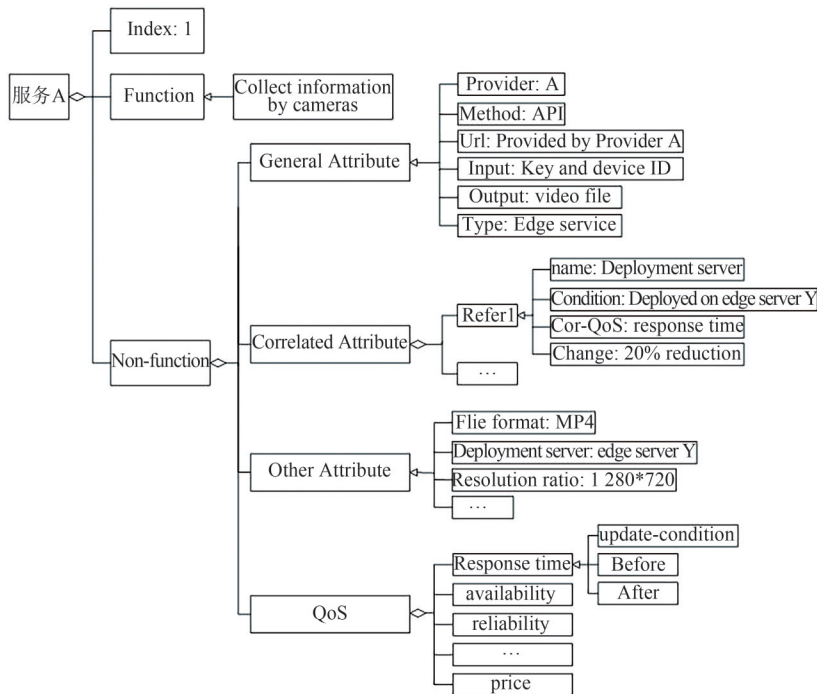


图 5 服务 A 的抽象模型

本次实验用户对价格和可靠性的要求较高，因此将价格和可靠性分别作为两个主要的目标划分在不同函数中，并将其他 QoS 属性分在这两个目标函数中，根据式(3)，构建目标函数如下

$$f_1 = \frac{1}{2}Q_1 + \frac{1}{2}Q_2$$

$$f_2 = \frac{1}{3}Q_3 + \frac{1}{3}Q_4 + \frac{1}{3}Q_5$$

其中， $Q_1 \sim Q_5$ 分别代表价格、安全性、声誉、可靠性、响应时间。

本文考虑4组复杂情况不同的服务集，用 $a \times b$ 表示，其中 a 为服务候选集个数， b 为每个候选集内的服务个数，分别为 5×100 、 5×200 、 10×100 、 10×200 。在选择服务时，从每个候选集中选取一个服务完成组合，即每个组合方案中有 a 个服务。

实验设置价格和可靠性会受服务间相关性影响。使用同一供应商提供的多个服务时，这些服务的价格减少 50%；使用同一数据格式的服务，这些服务的可靠性提高 50%。

4.2 相关性验证

4.2.1 超图模型的应用对组合 QoS 的影响

本文对以上4组规模不同的服务集进行了实验，验证了所提超图模型描述服务间相关性以及提高服务组合的 QoS 的可行性。分别用考虑服务间相关性的本文算法和未考虑相关性的原始 NSGA-III 算法处理这4组服务集，求解得到服务组合问题的帕托累前沿解集。设置具有相关性的服务数量为总数的 20%，有无相关性对应的帕托累前沿解如图6所示，其中横坐标表示目标函数 f_1 ，纵坐标表示目标函数 f_2 ，每个点表示一个帕托累解。

从图6可以看出，在4种情况下，大多数服务间具有相关性的解都位于服务间不具有相关性的解的下方。这说明前者的目标函数值小于后者，即前者解集对应的组合方案的 QoS 属性值小于后者，由此可知该解集对应的组合服务质量优于后者。验证了本文提出的超图模型在复杂情况不同的服务集下都可以很好地描述服务间相关性，并能够应用于多目标优化算法中来提高服务组合方案的 QoS。

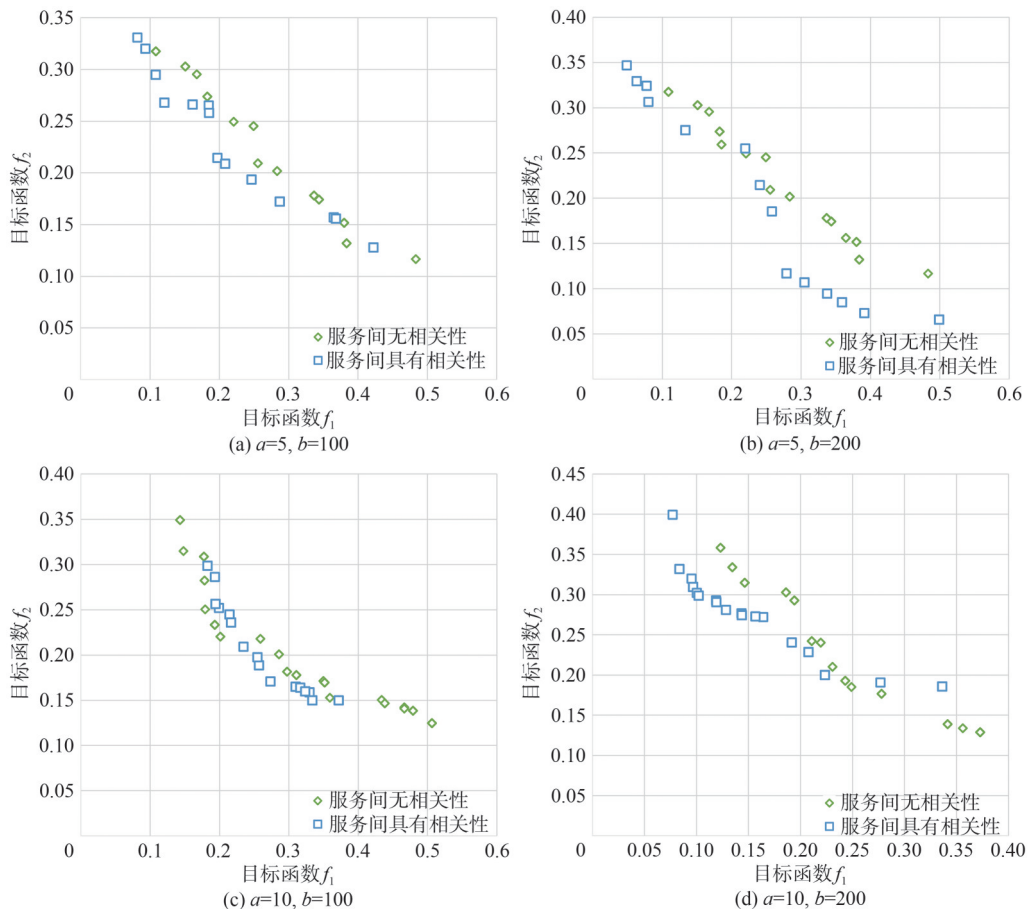


图6 有无相关性对应的帕托累前沿解

4.2.2 具有相关性的服务比例对组合 QoS 的影响

根据每组数据的服务总数，设置不同数量的具有相关性的服务。当服务总数为 $a \times b$ 时，分别设置总数 20%、40%、60% 的具有相关性服务。在 4 组情况下，具有相关性服务不同比例下的帕托累前沿解如图 7 所示。

本文通过随机数来选具有相关性的服务，因此并不是所有组合方案里的服务之间都具有相关性。如组合方案 {S94,S375,S600,S615,S824} 的 5 个服务之间就可能不具有相关性，但由于该组合的 QoS 值较小，在排序时该方案对应的种群个体仍位于帕托累前沿解集中，所以在验证具有相关性的服务比例对组合 QoS 的影响时，不能只从帕托累前沿图来判断。记录服务之间具有相关性的组合方案的解的个数为 m ，求出其占解集总数的比例为 n ，不同比例下，4 组情况对应的 m 和 n 值见表 4。

由表 4 可以看出，在 4 种情况下，随着具有相关性的服务比例的增大， n 的值也在增大。这说明当具有相关性的服务比例增大时，组合选取到具有相关性的服务可能性增大。在 $a=5$ 的两种情况下，尤其是 $b=100$ 时，可以发现 n 随着比例增加的同时，对应的帕托累前沿图中，具有相关性的服务比例越大，其解在图中的位置越靠下，即组合的 QoS 更好。在 $a=10$ 的两种情况下，这一现象并不明显。这是因为随着服务候选集 a 的增加，组合方案里的服务总数增加，具有相关性的服务个数占组合的服务总数的比例减少，对组合的 QoS 的影响变小。同时，服务候选集 a 的增大也使得服务组合方案变多，对应种群个体随机性变大，对应帕托累前沿解随机性也变大，最终使得帕托累前沿图中解集优势不明显。

表 4 不同比例下,4组情况对应的 m 和 n 值

不同情况	20%		40%		60%	
	m	n	m	n	m	n
5×100	5	41.7%	10	55.6%	10	100%
5×200	1	9.1%	5	38.5%	14	100%
10×100	1	5%	16	100%	18	100%
10×200	6	54.5%	8	80%	17	100%

4.3 最新算法对比

为了评价本文算法的优越性，用本文算法与 NSGA-III、多目标粒子群 (MOPSO, multi-objective

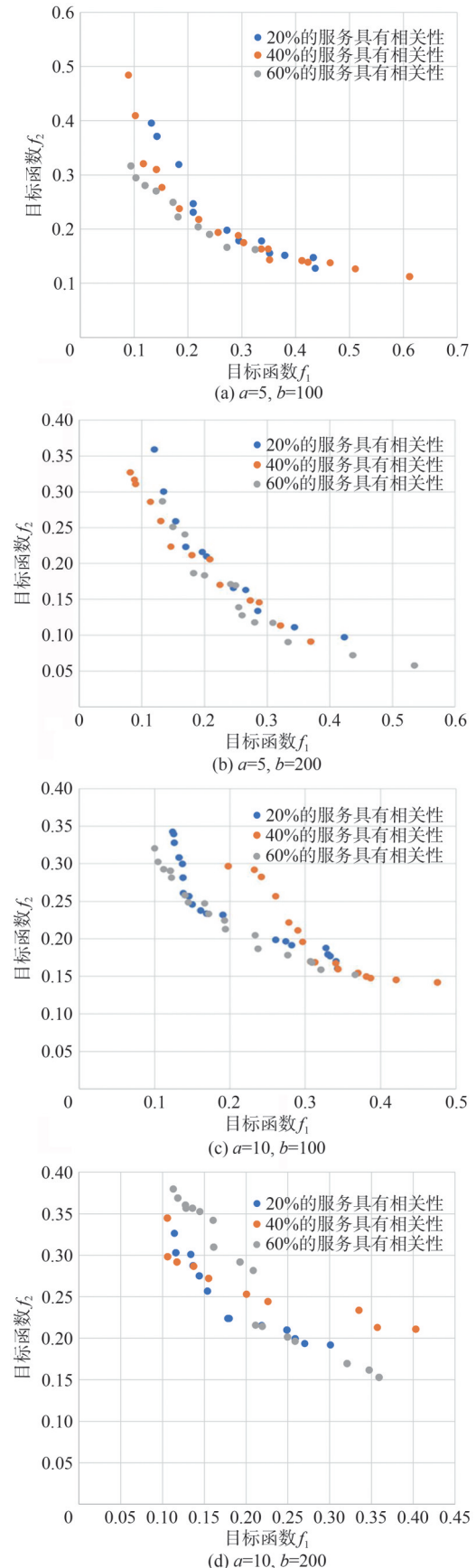


图 7 具有相关性服务不同比例下的帕托累前沿解

particle swarm optimization) 算法、MOHHO算法分别处理上述4组服务集, 得到帕托累前沿解集。说明本文算法利用超图模型对服务间关系的描述, 求解得到的服务组合方案与其他启发式算法相比具有更好的QoS性能。

其中, NSGA-III^[36]为本文改进前算法, 文献[20]采用粒子群算法求解服务组合问题, MOPSO算法也是目前求解服务组合问题常用的一种多目标优化算法。MOHHO算法也已经被用于求解服务组合问题^[24]。因此本文选取这几种算法来对比分析。4种算法参数设置见表5。

表5 4种算法参数设置

算法名称	迭代次数	种群大小	其他参数
本文算法	500	80	交叉率0.7、变异率0.5
NSGA-III	500	80	交叉率0.7、变异率0.5
MOPSO	500	80	惯性因子0.8、变异因子0.1、 个体学习因子 $C_1=1$ 、群体学习因子 $C_2=2$
MOHHO	500	80	逃逸能量: $E = 2E_0(1 - (t/t_{max}))$, $E_0 \in [-1, 1]$

设置所有服务集具有相关性的服务个数为 $0.2m$, 具有相关性的服务在价格属性上的折扣为五折, 可靠性的提高率为50%。按照上述实验参数设置情况, 比较4种算法求解服务组合问题得到的帕托累前沿解。不同算法的帕托累前沿解如图8所示。

从帕托累前沿图分析, 可以看出本文算法在4种服务集情况下, 大多数解都位于其他3种算法的下方, 即帕累托前沿解集都明显优于其他3种算法, 验证了与其他3种启发式算法相比, 本文算法利用超图模型对服务间关系的描述, 求解得到的服务组合方案具有更好的QoS性能。

5 结束语

本文考虑服务间相关性给服务QoS性能带来的影响, 建立服务管理框架。通过服务实例化和超图模型, 对服务进行统一管理, 将服务间相关性抽象为数学模型描述, 建立服务超图关系网。同时, 针对基于QoS的服务组合问题, 提出一种基于超图模

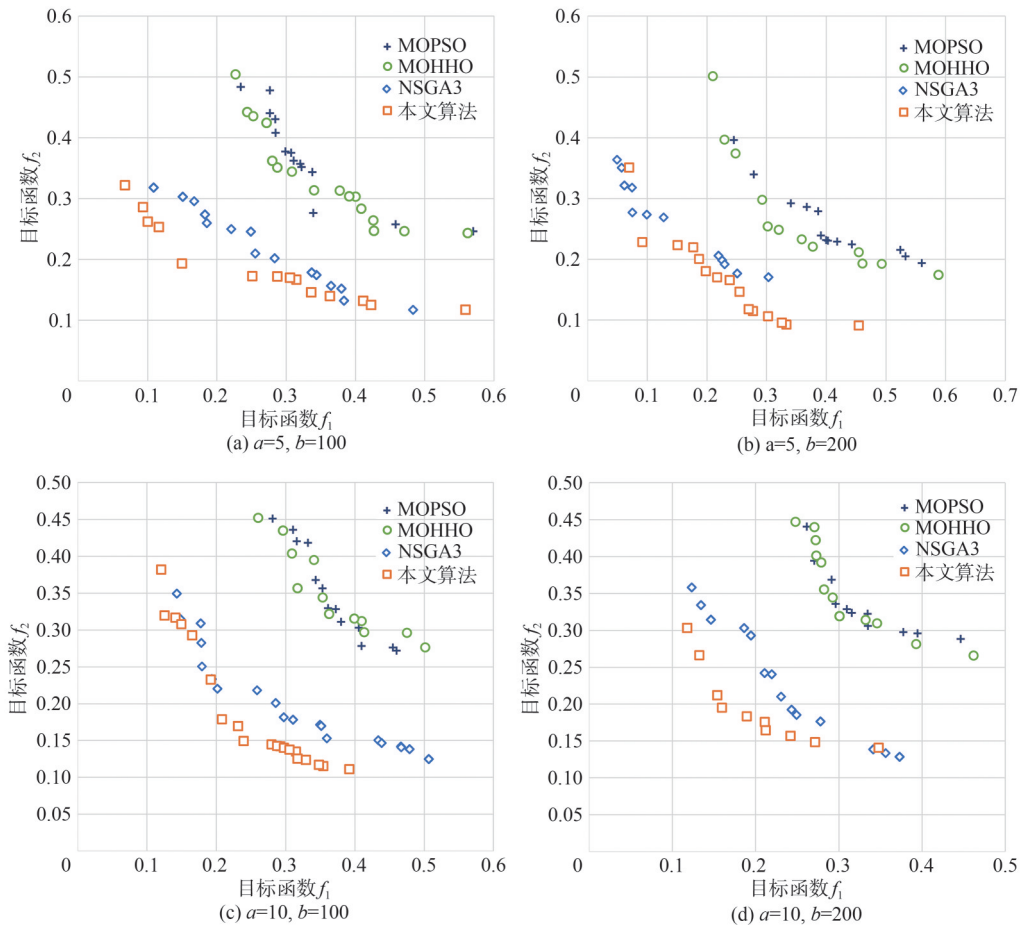


图8 不同算法的帕托累前沿解

型的多目标优化算法。在优化过程中,利用超图模型中表示服务间关系的超边集合来判断服务间相关性对 QoS 的影响,用于更新服务的 QoS 数据集,计算个体适应度函数对种群个体进行排序和选择,求解得到具有更好 QoS 的组合方案。

本文的仿真实验通过对比是否考虑相关性的两种算法,验证了所提超图模型可以应用于 NSGA-III 算法中,很好地描述服务间相关性,提高服务组合的 QoS。实验结果还表明组合方案里的服务总数较少的情况下,具有相关性的服务比例越大,组合的 QoS 越好。与其他启发式算法相比,本文所提算法在求解服务组合问题时,得到的解集同样具有更好 QoS。

但当组合方案里的服务总数较多的情况下,由于组合情况较复杂使得种群个体随机性变大,启发式算法不确定性增强,具有相关性的服务比例增大,组合的 QoS 没有明显提升。因此,下一步工作需要考虑通过降低初始化种群个体随机性,来降低启发式算法的不稳定性,在上述情况下提高组合的 QoS。

参考文献:

- [1] TAHERKORDI A, ELIASSEN F. Scalable modeling of cloud-based IoT services for smart cities[C]//Proceedings of the 2016 IEEE International Conference on Pervasive Computing and Communication Workshops (PerCom Workshops). Piscataway: IEEE Press, 2016: 1-6.
- [2] 王久超, 赵卓峰. 基于实体-数据的物联网服务建模[J]. 计算机系统应用, 2023, 32(6): 70-79.
WANG J C, ZHAO Z F. Entity-data-based modeling for Internet of Things services[J]. Computer Systems and Applications, 2023, 32(6): 70-79.
- [3] JIN H, YAO X F, CHEN Y. Correlation-aware QoS modeling and manufacturing cloud service composition[J]. Journal of Intelligent Manufacturing, 2017, 28(8): 1947-1960.
- [4] HÄSTBACKA D, HALME J, BARNA L, et al. Dynamic edge and cloud service integration for industrial IoT and production monitoring applications of industrial cyber-physical systems[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2022, 18(1): 498-508.
- [5] 张晶, 徐鼎, 刘旭, 等. 物联网与智能制造[M]. 北京: 化学工业出版社, 2019.
ZHANH J, XU D, LIU X, et al. Internet of things and intelligent manufacturing[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2019.
- [6] 齐明皓. IoT 服务组合建模及工具[D]. 北京: 北方工业大学, 2023.
QI M H. IoT service combination modeling methods and tools[D]. Beijing: North China University of Technology, 2023.
- [7] BAEK J, LEE C. Hypergraph based multi-agents representation learning for similarity analysis[C]//Proceedings of the 2021 21st International Conference on Control, Automation and Systems (ICCAS). Piscataway: IEEE Press, 2021: 1686-1689.
- [8] WU L, HE M G, HAN Y Y. Hypergraph clustering-based cloud manufacturing service management method[C]//Proceedings of the 2014 IEEE 18th International Conference on Computer Supported Cooperative Work in Design (CSCWD). Piscataway: IEEE Press, 2014: 220-225.
- [9] NAGHAVIPOUR H, SOON T K, IDRISMohd Yamani Idna Bin, et al. Hybrid metaheuristics for QoS-aware service composition: a systematic mapping study[J]. IEEE Access, 2021, 10: 12678-12701.
- [10] MIN X Y, XU X F, LIU Z Z, et al. An approach to resource and QoS-aware services optimal composition in the big service and Internet of Things[J]. IEEE Access, 2018, 6: 39895-39906.
- [11] PERERA C, ZASLAVSKY A, LIU C H, et al. Sensor search techniques for sensing as a service architecture for the Internet of Things[J]. IEEE Sensors Journal, 2014, 14(2): 406-420.
- [12] 刘星宇, 江凌云. 基于意图的物联网服务描述与发现[J]. 计算机应用研究, 2022, 39(9): 2731-2737, 2756.
LIU X Y, JIANG L Y. Intent-based IoT service description and discovery[J]. Application Research of Computers, 2022, 39(9): 2731-2737, 2756.
- [13] BASU S, CASATI F, DANIEL F. Toward web service dependency discovery for SOA management[C]//Proceedings of the 2008 IEEE International Conference on Services Computing. Piscataway: IEEE Press, 2008: 422-429.
- [14] ROMANO D, PINZGER M, BOUWERS E. Extracting dynamic dependencies between web services using vector clocks[C]//Proceedings of the 2011 IEEE International Conference on Service-Oriented Computing and Applications (SOCA). Piscataway: IEEE Press, 2011: 1-8.
- [15] KANG G S, LIU J X, TANG M D, et al. Web service selection algorithm based on principal component analysis[J]. Journal of Electronics (China), 2013, 30(2): 204-212.
- [16] DENG S G, WU H Y, HU D N, et al. Service selection for composition with QoS correlations[J]. IEEE Transactions on Services Computing, 2016, 9(2): 291-303.
- [17] MISHRA S K, HARATY R A, DEBNATH N C, et al. A hypergraph coloring based modelling of service oriented system[C]//Proceedings of the 2019 IEEE 17th International Conference on Industrial Informatics (INDIN). Piscataway: IEEE Press, 2019: 1349-1350.
- [18] WU L, YANG Z, LIU S J, et al. An approach to web service organization based on hypergraph clustering[C]//Proceedings of the 2018 IEEE 22nd International Conference on Computer Supported Cooperative Work in Design (CSCWD). Piscataway: IEEE Press, 2018: 87-91.
- [19] ZHANG L Y, GUO J F, LI Y, et al. Construction and embedding representation of relational aggregation hypergraphs in cyber-

- physical systems[J]. IEEE Systems Journal, 2023, 17(4): 5216-5227.
- [20] HAYTAMY S, OMARA F. Enhanced QoS-based service composition approach in multi-cloud environment[C]//Proceedings of the 2020 International Conference on Innovative Trends in Communication and Computer Engineering (ITCE). Piscataway: IEEE Press, 2020: 33-38.
- [21] KASHYAP N, KUMARI A C, CHHIKARA R. Multi-objective Optimization using NSGA II for service composition in IoT[J]. Procedia Computer Science, 2020, 167: 1928-1933.
- [22] 范国栋, 祝铭, 李静, 等. 基于FAHP与规划图融合的Web服务组合方法[J]. 计算机科学, 2020, 47(1): 270-275.
FAN G D, ZHU M, LI J, et al. Web service composition by combining FAHP and graphplan[J]. Computer Science, 2020, 47(1): 270-275.
- [23] HUO Y, QIU P, ZHAI J Y, et al. Multi-objective service composition model based on cost-effective optimization[J]. Applied Intelligence, 2018, 48(3): 651-669.
- [24] LIU X Y, JIANG L Y. Service composition in Internet of vehicle environment using multi-objective Harris hawk optimization algorithm[C]//Proceedings of the 2022 IEEE 8th International Conference on Computer and Communications (ICCC). Piscataway: IEEE Press, 2022: 852-861.
- [25] 栾宁, 熊轲, 张煜, 等. 6G: 典型应用、关键技术与面临挑战[J]. 物联网学报, 2022, 6(1): 29-43.
LUAN N, XIONG K, ZHANG Y, et al. 6G: typical applications, key technologies and challenges[J]. Chinese Journal on Internet of Things, 2022, 6(1): 29-43.
- [26] AVRAMIDIS I I, TAKIS-DEFTERAIOS G. Flexicurity: some thoughts about a different smart grid of the future[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2023, 14(2): 1333-1336. .
- [27] R A B, KADAM A S, KULKARNI A, et al. IoT based smart water meter for water management[C]//Proceedings of the 2023 International Conference on Intelligent and Innovative Technologies in Computing, Electrical and Electronics (IITCEE). Piscataway: IEEE Press, 2023: 674-678.
- [28] NEIAT A G, BOUGUETTAYA A, BAHUTAIR M. A deep reinforcement learning approach for composing moving IoT services[J]. IEEE Transactions on Services Computing, 2022, 15(5): 2538-2550.
- [29] LI D W, YE D Y, GAO N, et al. Service selection with QoS correlations in distributed service-based systems[J]. IEEE Access, 2019, 7: 88718-88732.
- [30] YANG D J, HE D. Web service clustering method based on word vector and biterm topic model[C]//Proceedings of the 2021 IEEE 6th International Conference on Cloud Computing and Big Data Analytics (ICCCBDA). Piscataway: IEEE Press, 2021: 299-304.
- [31] 蒋伟进, 周文颖, 李恩, 等. 基于区块链技术的云制造服务架构及共识算法研究[J]. 物联网学报, 2023, 7(1): 159-173.
JIANG W J, ZHOU W Y, LI E, et al. Research on cloud manufacturing service architecture and consensus algorithm based on blockchain technology[J]. Chinese Journal on Internet of Things, 2023, 7(1): 159-173.
- [32] SINGH M, BARANWAL G. Quality of service (QoS) in Internet of Things[C]//Proceedings of the 2018 3rd International Conference on Internet of Things: Smart Innovation and Usages (IoT-SIU). Piscataway: IEEE Press, 2018: 1-6.
- [33] 徐雪敏, 张秀国, 肖媛元, 等. 基于优化的灰狼算法的大规模Web服务组合[J]. 计算机应用, 2022, 42(10): 3162-3169.
XU X M, ZHANG X G, XIAO Y Y, et al. Large-scale Web service composition based on optimized grey wolf optimizer[J]. Journal of Computer Applications, 2022, 42(10): 3162-3169.
- [34] GUO K, LI J J, NIU M Q. Multi-agent interests service composition optimization in cloud manufacturing environment[J]. IEEE Access, 2023, 11: 53760-53771.
- [35] BI X X, YU D, LIU J S, et al. A preference-based multi-objective algorithm for optimal service composition selection in cloud manufacturing[J]. International Journal of Computer Integrated Manufacturing, 2020, 33(8): 751-768.
- [36] DEB K, JAIN H. 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): 577-601.

[作者简介]



江凌云(1971-), 女, 南京邮电大学通信与信息工程学院副教授、硕士生导师, 主要研究方向为下一代网络技术、移动边缘计算、物联网技术等。



杨雪薇(1999-), 女, 南京邮电大学通信与信息工程学院硕士生, 主要研究方向为下一代通信网络技术与物联网技术。