

# 基于改进 K-dominance 的服务评价与优选<sup>①</sup>

赵卓<sup>1</sup>, 丁建民<sup>2</sup>

<sup>1</sup>(郑州升达经贸管理学院 信息工程系, 郑州 451191)

<sup>2</sup>(信息工程大学 网络空间安全学院, 郑州 450001)

**摘要:** 在动态、开放的云计算环境中, 越来越多互有竞争关系的服务提供商以不同的服务质量等级提供功能相同或类似的服务, 这使得基于 QoS 的服务优选变得愈加重要. 考虑到传统方法的不足, 提出一个完整的方法解决这一多目标优化问题. 首先, 提出一个新的概念: partial dominance score, 用于针对 skyline 计算得到的最优解 (skyline 服务集合) 实现进一步更为精确的量化评价, 在此基础上重新定义了服务优选问题的优化目标. 随后提出一个基于 BNL 策略的服务优选算法高效地返回 partial dominance score 意义上的 top-k 最优 skyline 服务, 从而为用户的最终决策和优选提供有效的支持. 通过一系列实验验证了所提出算法的效率和有效性.

**关键词:** 云计算; 服务评价; 服务等级协议; 多目标决策; k-dominance; 帕累托优化

## Improved K-dominance Based Approach for Service Ranking and Selection

ZHAO Zhuo<sup>1</sup>, DING Jian-Min<sup>2</sup>

<sup>1</sup>(Department of Information Engineering, Shengda Economics, Trade & Management College of Zhengzhou, Zhengzhou 451191, China)

<sup>2</sup>(College of Network & Space Security, Information Engineering University, Zhengzhou 450001, China)

**Abstract:** In the open, dynamic cloud computing environment, more and more functional-equivalent services are provided with different QoS levels by competing service providers, which makes service selection problem becoming more and more important. Considering main drawbacks of traditional approaches for service selection, a systemic method for this multi-objective optimization problem has been presented in this paper. More specifically, at first a novel concept, i.e. partial dominance score, has been proposed. By combining two kinds of ranking method, i.e. the partial dominance score as well as the skyline computation, the optimization objective for service selection has been redefined. Then, a BNL-based service selection algorithm has been presented to find top-k skyline solutions that have higher partial dominance score. Finally the efficiency and effectiveness of our proposed algorithm was evaluated through a set of experimental studies.

**Key words:** cloud computing; service ranking and selection; SLA; multi-criteria decision making; k-dominance; Pareto optimization

近年来, 随着云计算、普适计算以及物联网等新兴计算理念和技术的提出与演化, 基于互联网的分布式应用不论其技术形式还是商业模式都得到了快速的发展并逐渐成熟, 从而大大推动了互联网环境中上层应用之间的交互与融合. 在此过程中, 面向服务的体系结构(SOA: Service-oriented architecture)作为一种

分布式互操作技术, 由于其成熟而标准化的技术体系而受到广泛的关注和应用, 逐渐成为上述云计算等新兴计算环境的支撑技术. 这一方面意味着用户可以更加便捷地以低廉的价格获取并使用云计算环境中存在业务功能、数据以及计算资源; 同时这也意味着, 可能存在有多个互有竞争关系的不同企业提供功能相同或

① 收稿时间:2013-12-04;收到修改稿时间:2014-01-08

者类似的服务,考虑到云计算环境的动态性和开放性,不同服务提供商提供的相似服务还会具有互不相同的服务质量.因而,对于服务使用方来说,要使用互联网环境中已有的服务实现特定业务功能之前,首先需要在可选的多个功能相同或相似服务之中优选出能够满足其服务质量需求的最优服务.在本文中,这一问题被称为云服务优选问题.

在云计算环境中,实现特定业务功能的服务其所能够支持的服务质量等级通常以 SLA offer<sup>[1]</sup>(SLA: Service Level Agreement)的形式发布并被检索.其中服务质量(QoS: Quality of Services)通常由多个不同的 QoS 维度描述,例如:价格、吞吐量、响应时间、稳定性等等.当能够满足服务使用方所需要功能的所有服务(满足功能需求的服务可以称为候选服务)被检索和收集之后,最优服务根据各个候选服务的 QoS 属性决定.由于每个候选服务的服务质量均由多个 QoS 维度描述,因而云服务优选是一个典型的多目标优化问题.

在一般的单目标优化问题中,候选列表中的候选项的好坏由单个数值决定,因此可以直接进行比较或排序从而完成优选.而云服务优选是多目标优化问题,候选服务的优劣由多个 QoS 维度上的值来决定,因此优选过程中对候选服务所需要的量化评价方法更加复杂和困难.如果直接在候选服务各个 QoS 维度值的基础上进行比较和评价,则不同的 QoS 维度之间可能出现冲突,例如两个候选服务  $s_i$  与  $s_j$ , 其中  $s_i$  在价格上要优于  $s_j$ , 同时  $s_j$  在吞吐量上优于  $s_i$ , 此时仅仅根据定义在各个 QoS 维度上的基本评价标准(例如越小越好)不能判定二者的优劣.因而云服务优选问题的解决首先依赖于有效的量化评价模型对每个候选服务进行高区分度的量化评价,才能在此基础上实现候选服务之间的比较和优劣判定,并进一步选出满足使用方需求的最优服务.

现有的服务优选相关研究中主要有两种方法.一种基于效用函数(utility function),其中效用函数的定义需要用户对各个 QoS 维度提供精确的量化偏好权重,而这是一个非常困难的任务,特别是在所涉及到的 QoS 维度个数较多时.另一种方法无需用户提供偏好权重,而是使用基于帕累托评价模型的 skyline 计算方法完成服务优选.虽然此类方法避免了量化偏好权重的设置困难,但是由于帕累托评价对于候选服务的

评价区分度过低,当候选服务规模增大时,通过 skyline 计算得到的优化结果(称为 skyline 服务)的规模会随之增大,而过多的优化结果对于最终的服务选择很难提供有效的参考.

考虑到现有方法中存在的不足与局限,本文针对云服务的评价和优选问题,在 k-dominance 基础上发展并提出一个新的概念: partial dominance score, 以实现对于 skyline 服务的进一步量化评价.在此基础上,本文重新定义了云服务优选问题的优化目标,即:在 skyline 计算基础上选出 skyline 集合中 top-k 个 partial dominance score 最优的服务作为优选结果.这一基于 partial dominance score 的评价及 top-k 优选方法一方面可以为用户提供了规模灵活可控的结果集,同时又将最终的决策权交给用户,从而在实现对 skyline 服务的进一步高区分度评价的基础上为用户的最终优选决策提供了有效的参考和支持.本文提出一个基于 BNL[8]策略的云服务优选算法实现了上述评价方法,并通过一系列实验验证了所提出评价方法及算法的效率和有效性.

## 1 相关研究工作

为了在多个 QoS 维度基础上实现对候选服务的量化评价,很多研究文献中<sup>[2-4]</sup>基于效用理论在多个 QoS 维度之上定义加权和形式的效用函数,从而将多个 QoS 维度值进行聚合使多目标优化问题转化为单目标优化问题.效用函数的定义需要用户给出明确的量化权重用于表示用户对不同 QoS 维度的偏好程度,优化的结果完全取决于偏好权重的配置.基于效用函数的方法虽然比较简单,但是精确的偏好权重配置对于用户来说是一个非常困难的任务<sup>[5,6]</sup>,特别是在所涉及到的目标维度较多时.另一方面,由于不同的偏好权重配置会导致不同的优化结果,在完整理解候选方案集合的目标维度值分布之前,用户难以理解并控制权重配置对于优化结果的影响.

为了避免量化权重的配置困难,一些研究<sup>[7,8]</sup>引入数据库领域的 skyline computation 方法来解决服务优选问题,其中基于帕累托优于关系实现对候选服务的评价,并将完整的 skyline 服务集合作为优选结果返回给用户.虽然基于 skyline 计算的方法避免了权重配置,但是由于单纯的帕累托优于关系对于候选服务的

评价区分度过低,其最优结果的规模不可控<sup>[9]</sup>,即:作为最优结果的 skyline 集合其规模会随着候选服务集合规模以及 QoS 维度个数的增加而增大.同时,由于基于帕累托优于关系的评价方式对 skyline 服务之间不区分其优劣,因而当 skyline 集合较大时,不能为用户的最终优选提供有意义的参考.

综合上述现有方法的不足,本文在 k-dominance 概念基础上提出一种新的云服务评价方法,从而在避免权重配置的同时对候选服务给出高区分度的量化评价.在此基础上本文提出了相应的云服务优选算法,高效返回 top-k 个最优服务集合,从而为用户的最终优选和决策提供有效的支持.

## 2 服务评价模型

### 2.1 服务优选问题的形式化定义

考虑服务使用方 SC 需要将其系统中的某特定业务功能外包给第三方服务提供方,或者需要通过集成云计算环境中已有的服务构造其应用.根据其所需服务的功能性属性,通过对服务的发现、检索和初步的筛选后,服务使用方 SC 可以得到一个满足其业务功能的候选服务提供商列表,表示为  $P = \{sp_1, sp_2, \dots, sp_k\}$ .同时,各个服务提供商会根据其所提供服务的资源配置情况提供多个不同的服务质量等级以满足多样化的市场需求,服务质量等级通常以 SLA offer 形式发布并被检索.为了描述方面,本文以下将可选的服务质量等级作为单个服务处理,因而针对可选的服务提供商集合得到一个候选服务列表,列表中每一个服务均可以确定一个服务提供商并且具有特定的服务质量等级,表示为:  $S = \{s_1, s_2, \dots, s_n\}$ .由于服务质量描述中包含多个 QoS 维度,每个服务所能支持的服务质量等级可以表示为一个向量:  $Q(s) = \{q^1(s), q^2(s), \dots, q^r(s)\}$ ,其中  $S$  为特定候选服务,  $q^i(s)$  为该服务第  $i$  个 QoS 维度上所具有的服务质量值.服务使用方需要根据候选服务列表中各个服务的 QoS 等级向量选择并确定能满足其服务质量需求的最优服务,才能进一步与服务提供商之间建立 SLA 合约并完成服务绑定.

在评价与优选时不同的 QoS 维度其基本的评价标准可能不同,有些维度需要最小化,例如价格越低越好,有些维度则需要最大化,例如:吞吐量越高越好.

为了便于描述和处理,首先通过以下方式对候选服务集合的 QoS 等级向量进行规格化.假设规格化后的 QoS 等级向量表示为:  $O(s) = \{o^1(s), o^2(s), \dots, o^r(s)\}$ ,则其中第  $k$  个维度上的规格化向量为:

$$o^k(s) = \begin{cases} \frac{Q_{\max}^k - q^k(s)}{Q_{\max}^k - Q_{\min}^k}, & \text{最大化维度} \\ \frac{q^k(s) - Q_{\min}^k}{Q_{\max}^k - Q_{\min}^k}, & \text{最小化维度} \end{cases} \quad (1)$$

并且:

$$\begin{aligned} Q_{\max}^k &= \max_{s \in S} q^k(s) \\ Q_{\min}^k &= \min_{s \in S} q^k(s) \end{aligned} \quad (2)$$

其中  $S$  为所有候选服务集合,通过规格化每个候选服务的 QoS 等级向量在各个维度上的取值均为  $[0, 1]$  之间,并且所有维度上的基本优化目标均为最小化.针对规格化后的服务等级向量,服务优选问题可以定义为:

$$\min \arg \{o^1(s), o^2(s), \dots, o^r(s)\} \quad (3)$$

其中:

$$\begin{aligned} s &\in S \\ o^k(s) &\leq c_k, \forall k \in [1, r] \end{aligned}$$

式(3)中  $c_k$  为服务提供方在第  $k$  个 QoS 维度上最低需求.由于候选服务其质量等级由多个 QoS 维度描述,在实际中根据各个维度上的基本评价标准(本文规格化为越小越优)可能并不存在单个最优的服务,即:在各个 QoS 维度上均优于其他候选服务.另一方面,候选服务集合中任意两个服务之间进行比较和优劣关系的判定时,在不同 QoS 维度上可能出现矛盾使得不能仅仅根据各个 QoS 维度的基本判定标准确定二者优劣关系.针对此类多目标优化问题,在不考虑用户在各个目标维度上的偏好时通常基于帕累托优于关系实现候选方案的评价并确定其最优解,也称为 skyline 计算.

### 2.2 帕累托评价与 skyline 服务

帕累托评价根据帕累托优于关系通过对候选服务的两两比较判定其优劣,在比较时仅仅考虑各个 QoS 维度的基本评价标准,其定义如下:

定义 1. 对于任意两个候选服务  $s_i$  和  $s_j$ , 如果  $s_i$  的规格化服务等级向量在所有维度上均优于或者等于  $s_j$ , 并且在至少一个维度上完全优于  $s_j$ , 则  $s_i$  帕累托优于  $s_j$ , 记为  $s_i \prec s_j$ , 即:

$$\begin{aligned} s_i \prec s_j &\Leftrightarrow (\forall k \in [1, r], o^k(s_i) \leq o^k(s_j)) \\ &\wedge (\exists t \in [1, r], o^t(s_i) < o^t(s_j)) \end{aligned}$$

在上述帕累托优于关系的定义基础上,通过对候选服务集中的所有服务进行两两比较,即可确定帕累托意义上最优服务集合,被称为 skyline 服务,其定义为:

定义 2. 对于候选服务集合  $S = \{s_1, s_2, \dots, s_n\}$ , 其中不被任何其他候选服务帕累托优于的服务称为 skyline 服务,针对特定候选服务集合得到的所有 skyline 服务构成 skyline 集合,即:

$$sky^S = \{s_i \in S \mid \nexists s_j \in S, s_j \prec s_i\}$$

根据上述定义可知,基于帕累托评价的服务优选可以将候选集中所有被帕累托优于的服务排除从而得到帕累托意义上的最优服务集合,即: skyline 服务.但是,由于任意两个 skyline 服务之间在不同 QoS 维度之上的优劣关系是互相矛盾的,帕累托评价不能在不同的 skyline 服务之间给出有区别的评价.正是由于这一原因,造成帕累托优选的结果集规模不可控,当 skyline 服务数量较多时(这取决于候选服务集合规模以及各个候选服务 QoS 属性的分布)不能为用户的最终优选决策提供有效的支持.因而需要更为有效的方法实现对 skyline 服务进一步量化评价.

### 2.3 Partial dominance score 以及对 skyline 服务的评价

帕累托优于关系在进行候选方案之间的两两比较时同时考虑所有目标维度,并且仅仅判定其优劣关系而不考虑优劣的程度,造成优化结果集规模会随候选服务数量的增加而增大,而过多的优化结果难以对用户的最终优选决策提供有效的参考. Chee-Yong Chan 等于 2006 年提出的 k-dominance 及其基础上的 k-dominance skyline<sup>[9]</sup>概念在一定程度上缓解了传统帕累托方法的缺点.其基本思想是在进行候选方案的两两比较时,放松二者优于关系的判定,只考虑所有  $r$  个目标维度中的  $k$  个维度.例如在本文中的服务优选场景下,两个候选服务  $s_i$  与  $s_j$ ,如果  $s_i$  在  $k(k < r)$  个 QoS 维度上的服务质量好于或者等于  $s_j$  并且至少在这  $k$  个维度中的一个完全好于  $s_j$ ,则称  $s_i$  k-dominance  $s_j$ .在此基础上,候选集中所有不被其它任意候选服务 k-dominance 的服务被称为 k-dominance 服务.优劣关系判定条件的放松实际上相当于将其反面,即最优方案的判定条件加强了(严格的定义和描述请参考文献[9]),这样用户通过给出不同的  $k$  值,即可以得到

skyline 集合的不同规模子集.虽然 k-dominance skyline 优选可以在一定程度上减小结果集规模,但是 k-dominance 意义上的最优解之间依然是不可比较的.

为了实现对 skyline 服务更为精确并且意义明确的量化评价,本文在 k-dominance 概念基础上进行扩展并提出 Partial Dominance Score(PDS)概念.与 k-dominance skyline 计算中通过排除较差的候选服务从而得到最优解的优选方式不同, PDS 在进行候选服务之间的两两比较时计算二者的相对优劣程度(而不仅仅是优劣关系),通过综合考察 skyline 集合中特定服务与所有其他服务之间的优劣关系得到该服务在整个 skyline 集合中的相对性量化评价.

定义 3(partial dominance degree). 对于 skyline 集合中任意两个服务和  $s_i, s_j \in sky^S$ , 服务  $s_i$  部分优于  $s_j$  的程度可以定义如下:

$$\text{deg}(s_i, s_j) = \frac{1}{r} \sum_{k=1}^r p(q^k(s_i), q^k(s_j)) \quad (4)$$

$$p(x, y) = \begin{cases} 1 & x \leq y \\ 0 & \text{else} \end{cases} \quad (5)$$

上述定义中  $r$  是所涉及到的 QoS 维度的个数,可见当  $s_i$  在越多的维度上优于  $s_j$  (即 k-dominance 时的  $k$  越大)则  $s_i$  优于  $s_j$  的程度越高.在此基础上可以进一步定义某一个候选方案在整个集合中的优劣程度,即:

定义 4(partial dominance score). 对于 skyline 集合  $sky^S$  中的服务  $s_i$ , 其 PDS 值为:

$$PDS(s) = \frac{1}{M} \sum_{X \neq s \wedge X \in sky^S} \text{deg}(s, X) \quad (6)$$

PDS 是一个定义在特定集合范围内的相对性量化评价指标, PDS 值越高意味着集合内某一个方案在更多的目标维度上优于更多其它的候选方案.由于其中综合考虑了某一个服务优于集合内所有其它服务的程度, PDS 可以对 skyline 服务给出更为精确的有区别的量化评价.并且,由于 PDS 是一个相对性评价指标,当针对整个候选集合而不是针对 skyline 集合计算时, PDS 值最优的服务肯定是 skyline 服务而次优的服务则不一定是 skyline 服务(取决于候选集合 QoS 值的分布情况).由于非 skyline 服务对于用户的最终选择没有价值,在优化过程中没有必要作为优选结果保留,因而本文将传统的 skyline 计算与 PDS 评价相结合,使用 PDS 实现对 skyline 服务的进一步评价,同时将 top-k 个 PDS 最高的 skyline 服务作为优化目标.这样既实现

了高区分度的量化评价与优选同时也为用户提供了在多个 skyline 服务之间进一步权衡和决策的机会。

### 3 服务优选算法

根据上文提出的量化评价方法以及优化目标, 本文实现了一个基于 BNL<sup>[5]</sup>(Block Nested Loop)的服务优选算法. BNL 是一种常用的高效 skyline 计算方法, 在算法执行过程中, 维护一个较小的 block 空间, 其中保存了当前搜索阶段中帕累托评价等级最高并且根据帕累托优于关系互相不可比较的候选服务集合, 当轮询到下一个候选服务时只需将该服务与 block 中保存的各个服务进行比较并判定其帕累托优于关系(而非与候选服务集合中所有其他候选服务进行比较), 根据判定的结果丢弃或者插入 block 空间中, 从而大大降低 skyline 计算的时间复杂度与空间复杂度.

算法包含三个主要的处理步骤: 首先, 基于 BNL 策略针对整个候选服务集合实现 skyline 计算, 得到完整的 skyline 集合; 随后, 针对 skyline 集合根据式(3)、(4)及式(5)为每个 skyline 服务计算其 PDS 值从而得到进一步的量化评价; 最后, 根据 PDS 评价排序并优选出 top-k 个 PDS 最高的 skyline 服务作为优选结果返回.

#### 服务优选算法伪代码

```

input: 候选服务集合: S
output: top-k个PDS最高的skyline服务集合: T
1.  $P \leftarrow \emptyset$ ;
2.  $T \leftarrow \emptyset$ ;
3. for each  $S_i$  in S {
4.   for (j=1; j<=size of(P); j++){
5.     if ( $P_j \prec S_i$ ){
6.       break;
7.     }else if ( $S_i \prec P_j$ ){
8.       remove  $P_j$  from P;
9.     }
10.  }
11.  if (j>size of(P))
12.    { $P \leftarrow S_i$ ;}
13.  }
14.  $P \leftarrow$  calculate PDS for each  $P_i$  in P;
15.  $T \leftarrow$  select top-k skyline services from P according to
    their PDS value;

```

服务优选算法的复杂度由三部分构成, 即: skyline 计算、PDS 评价过程以及排序和 Top-k 最优方案的优选. 其中 skyline 计算主要包含一个嵌套的循环结构, 在最坏的情况下所有候选方案(个数为 N)均为是可以了服务, 此时需要的比较次数为  $(1+2+\dots+(N-1))=N*(N-1)/2$ , 如果每次比较所涉及的 QoS 维度个数为 R, 则计算复杂度为  $o((R*N^2)/2)$ ; 对于 PDS 评价过程, 由于需要对所有帕累托最优解进行两两比较, 在最坏的情况下所有候选方案均为帕累托最优, 因而其计算复杂度为  $o(R*N^2)$ ; 最后排序与 Top-k 最优方案的优选其复杂度不会超过  $o(R*N^2)$ . 因而整个算法计算复杂度为  $o(R*N^2)$ .

### 4 实验与验证

为了验证算法, 本文给出三组不同的实验及其结果. 算法找到 top-k 最优 skyline 服务所需要的执行时间主要取决于问题规模, 根据复杂性分析(见第 3 章)问题的规模主要与两方面因素有关, 即: 候选方案数量(N)以及 QoS 维度个数(R). 在前两组试验中, 通过调整特定参数给出不同的问题规模下算法的执行时间. 候选方案个数 N 的变化范围为  $10^2 \sim 10^5$ , QoS 维度个数 R 的变化范围为 2~9. 当一个参数变化时其他参数保持不变, 默认设定为 ( $N=10^5, R=5$ ). 另外, 由于不同 QoS 维度之间的关联在相同规模候选集合下会导致不同大小的 skyline 集合, 因而也会造成不同的执行时间. 在第三组试验中, 针对不同的 QoS 关联在相同问题规模下考察了算法的执行时间. 由于缺乏可用的真实数据集, 实验数据通过三种方式生成分别对应三种不同的 QoS 关联性<sup>[9]</sup>: 独立数据集(ind): 其中 QoS 等级向量均随机产生, 不同维度值之间没有关联性; 正相关(cor): 其中某一个 QoS 维度值较好则其他维度值也较好; 反相关(anti-cor): 其中某些 QoS 维度值较好则其他维度值较差. 其中独立数据集为默认设置. 算法在 Java 环境下实现, 运行环境为 Windows 7 professional Service Pack 1 操作系统, 硬件环境为 Intel i3-2310M CPU(双核, 2.1GHz)和 2GB RAM 内存.

三组实验的实验结果分别在图 1、图 2 和图 3 中给出, 其中图 1 显示了在不同候选服务集合规模(N)下算法返回 Top-20 最优 skyline 服务所需要的执行时间. 从图中可以看出, 随着候选集合规模的增加算法所需

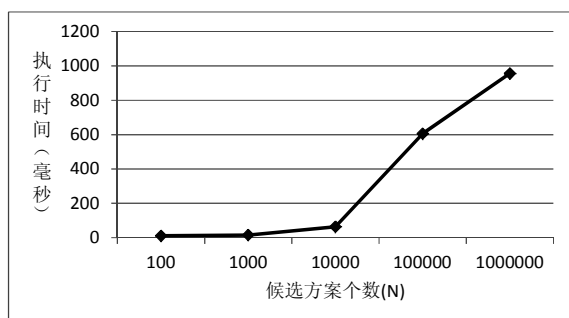


图1 候选方案个数对算法执行时间的影响

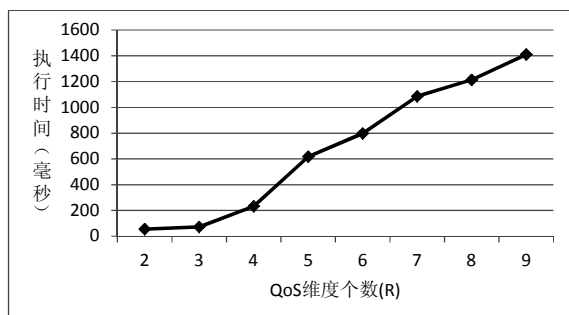


图2 QoS 维度个数对算法执行时间的影响

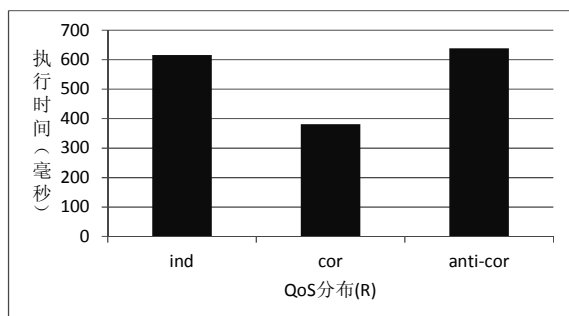


图3 QoS 分布对算法执行时间的影响

要的执行时间快速增加(这是由于试验中候选集合的规模呈十倍增加),但是即使是针对规模达到十万个候选服务(在实际中很难达到如此大的规模)的候选集合,算法的执行时间也小于1秒,这充分说明了算法具有较高的效率可以满足实际需要.图2给出了QoS维度增加时算法所需要的执行时间,可以看到算法所需要的执行时间整体上以较小的同等比例线性增长,这主要是因为更多的QoS维度使两两比较以进行帕累托优于关系判定以及进行PDS计算时需要更多的时间.图3给出了针对不同QoS关联的相同规模数据集所需要的执行时间.可以看到anti-cor类型的数据集所需要的执行时间最大,ind类型次之,cor类型最小.这是因为与ind类型数据集相比,anti-cor类型的QoS关联会导

致帕累托比较时不同QoS维度优劣关系出现矛盾的几率增加,即:增加出现不可比较关系的可能性,从而导致帕累托最优解规模的增加,并进一步导致执行时间的增加.从整体上看,三组实验结果均说明所提出的服务优选算法可以高效地返回PDS意义上已排序的Top-k最优skyline服务集合.

## 5 结语

随着云计算理念及技术的发展与推动,互联网环境中出现越来越多功能相同或类似但服务质量属性不同的服务,对于服务使用方来说需要有效的评价模型和服务优选算法从而高效地选出符合自身服务质量需求的最优服务.针对这一多目标优化问题,本文充分考虑到传统方法的不足并提出了一个系统的量化评价和服务优选方法.首先,本文在skyline计算的基础上通过一个新的量化评价指标实现了针对skyline服务的更为精确和高区分度的量化评价;随后根据所提出评价模型本文提出了一个基于BNL策略的服务优选算法;一系列实验结果表明所提出的服务优选算法可以高效地返回PDS意义上已排序的top-k最优skyline服务集合,从而为服务使用方的最终权衡和决策提供了有效的支持.

## 参考文献

- 1 Menascé DA, Dubey VK. Utility-based QoS Brokering in Service Oriented Architectures. ICWS 2007. 422-430.
- 2 Châtel P, Malenfant J, Truck I. QoS-based late-binding of service invocations in adaptive business processes. ICWS 2010. 227-234.
- 3 Dan A, Davis D, Kearney R, et al. Web services on demand: WSLA-driven automated management. IBM Systems Journal, 2004, 43(1): 136-158.
- 4 Alrifai M, Skoutas D, Risse T. Selecting skyline services for QoS-based web service composition. WWW 2010. 11-20.
- 5 Zeleny M. Multiple criteria decision making. New York: McGraw-Hill 1982.
- 6 Yu Q. Athman Bouguettaya: Computing Service Skylines over Sets of Services. ICWS2010. 2010. 481-488.
- 7 Papadias D, Tao YF, et al. Progressive skyline computation in database systems. ACM Trans. Database Syst, 2005, 30 (1): 41-82.
- 8 Brans JP, Vincke PH, Mareschall B. How to select and how to rank projects: The PROMETHEE method. European Journal of Operational Research, 1986, 14:228-238.
- 9 Chan CY, Jagadish HV, et al. Finding k-dominant skylines in high dimensional space. SIGMOD Conference 2006. 503-514.