

## 基于利益相关视角的多维 QoS 云资源调度方法

苏命峰<sup>1</sup>, 王国军<sup>2</sup>, 李仁发<sup>3</sup>

(1. 中南大学计算机学院, 湖南 长沙 410083; 2. 广州大学计算机科学与网络工程学院, 广东 广州 510006;  
3. 湖南大学信息科学与工程学院, 湖南 长沙 410082)

**摘要:** 基于云用户和云服务提供商的利益相关视角, 以低计算成本(如能耗、经济成本和系统可用性等)满足云用户高 QoS 需求(如任务执行时间和任务最终完成时间), 设计多维 QoS 云计算体系结构, 构建多维 QoS 云资源调度模型, 面向二级云资源调度, 提出采用多重 Greedy 算法思想的 MQoS 云资源调度算法。实验结果表明, 在具有无后效性的 4 种云计算应用场景下, MQoS 云资源调度算法相比 FIFO 云资源调度算法、M2EC 多维能耗虚拟机调度算法, 其多维 QoS 度总体提升 206.42%~228.99%、34.26%~56.93%, 其云数据中心负载均衡差平均总体降低 0.48~0.49、0.20~0.27。

**关键词:** 云计算; 资源调度; 多目标优化; 利益相关视角; 多维服务质量

**中图分类号:** TP393

**文献标识码:** A

**doi:** 10.11959/j.issn.1000-436x.2019113

## Multidimensional QoS cloud computing resource scheduling method based on stakeholder perspective

SU Mingfeng<sup>1</sup>, WANG Guojun<sup>2</sup>, LI Renfa<sup>3</sup>

1. School of Computer Science and Engineering, Central South University, Changsha 410083, China  
2. School of Computer Science and Cyber Engineering, Guangzhou University, Guangzhou 510006, China  
3. College of Computer Science and Electronic Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China

**Abstract:** A multidimensional cloud computing architecture is designed and a multidimensional cloud resource scheduling model is constructed based on the stakeholder perspective of cloud users and cloud service providers to meet the high QoS requirements of cloud users (such as task execution time and task completion time) with low computing costs (such as energy consumption, economic costs and system availability). For the second-level cloud resource scheduling, an MQoS cloud resource scheduling algorithm based on multiple Greedy algorithm is proposed. The experimental results show that under the four cloud computing application scenarios with no aftereffects, the MQoS cloud resource scheduling algorithm has an overall increase of 206.42%~228.99% and 34.26%~56.93 in terms of multidimensional QoS degree compared with FIFO and M2EC algorithms. It has an average overall reduction of 0.48~0.49 and 0.20~0.27 in terms of cloud data center load balance difference.

**Key words:** cloud computing, resource scheduling, multi-objective optimization, stakeholder perspective, multidimensional QoS

收稿日期: 2019-01-02; 修回日期: 2019-02-08

通信作者: 王国军, csgjwang@gmail.com

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No.61632009, No.61472451, No.61672217); 湖南省自然科学基金资助项目 (No.2019JJ70057); 广东省自然科学基金资助项目 (No.2017A030308006); 广东省高等教育高层次人才计划基金资助项目 (No.2016ZJ01); 中南大学中央高校基本科研业务费专项资金基金资助项目 (No.2018zzts180)

**Foundation Items:** The National Natural Science Foundation of China (No.61632009, No.61472451, No.61672217), The Natural Science Foundation of Hunan Province (No.2019JJ70057), The Natural Science Foundation of Guangdong Province (No.2017A030308006), The High-Level Talents Program of Higher Education of Guangdong Province (No.2016ZJ01), The Fundamental Research Funds for the Central Universities of Central South University (No.2018zzts180)

## 1 引言

新形势下，人工智能、大数据、物联网的发展如火如荼，云计算的应用越加广泛，对云计算提供海量、高效运算能力的要求越来越超。云计算环境复杂多变，存在节点异构、数量巨大、易于失效、云资源需求动态变化、存在不确定性等特点，如何高效利用云计算资源，充分满足云用户（CU, cloud user）的云计算服务需求，同时考虑云计算服务提供商（CSP, cloud service provider）利益，需要加强云资源管理，优化云任务（CT, cloud task）调度，这成为云计算迫切需要解决的问题。

云计算资源调度问题是 NP 完全问题<sup>[1]</sup>，为解决这一最具挑战的问题，将大规模、动态、不确定的用户应用，以云任务形式调度至物理位置分隔、资源异构、多重约束的云资源环境中，实现云资源的最大效用。为提升云用户和云资源提供商的服务与被服务质量，同时需要对多个目标函数进行优化，比如云用户主要关注云任务执行时间和系统可用性等，云计算服务提供商主要考虑云系统的能耗、经济性、可靠性等。

云计算资源调度多关注单目标优化，文献[2]关注云任务执行时间，面向多用户云计算服务提出 2DFQ（two-dimensional fail queuing）方法，基于长、短云任务队列区别对待，解决 Azure 平台高并发访问下的猝发性调度问题。文献[3]关注云任务最终完成时间，在多资源云集群权衡公平、性能、效率，提出了 altruistic 调度，优先 long-term 云任务暂时让出部分 short-term 云任务的分配资源以取得更高效率和更低任务完成时间。文献[4]关注云任务响应时间，提出 max-min-cloud 云任务调度算法优化云工作量分配，在多租户异构虚拟机的云环境实现高效云资源供给。云系统能耗也是研究热点，文献[5]关注云数据中心能耗，针对提出的 sliding-scheduled 方案，预测云任务资源需求，设计了快速自适应启发式虚拟机配置方案，实现了最大化云资源处理量和最小化能源消耗。文献[6]关注云系统能耗，提出了具有 machine 启动时间感知的虚拟机扩展策略，设计了实时任务调度算法以保障任务完成时间和节能。文献[7]关注系统可用性，提出了一种容错流调度、应用增量聚类算法进行云任务流的快速自动识别与高效调度。文献[8]关注云计算负载均衡，在云计算中采用随机算法进行虚拟机调度，试图解决

组合优化 knapsack 问题。此外，文献[9-10]关注网络虚拟性能优化，分别提出了用户空间的 NF（network function）调度服务链管理架构和非负矩阵分解方法，为网络虚拟化平台提供公平、高效、动态的资源调度。文献[11]关注云计算安全，提出了云计算环境下基于后验概率的隐蔽信道检测方法。

云计算资源调度的多目标优化，文献[12]关注负载均衡和性能，提出了高效流调度解决方案，采用 D-CLAS（discretized coflow-aware least-attained service）方法将任务流分为少量优先级队列。文献[13]提出了一种快速自适应启发式虚拟机配置的 sliding-scheduled 方案，预测云任务资源需求，分配可变化的云资源供给窗口，实现最大化云资源处理量和最小化能源消耗。文献[14]关注云计算系统能耗和性能，在异构云环境调度中提出了一种 memetic 优化方法。文献[15]关注云任务完工时间和经济成本，设计了一种连续合作博弈的 MOG（muliti-objective game）调度算法，并保证云资源效率和公平度。文献[16]关注 CPS（cyber-physical system）任务的响应时间和可靠性，基于遗传算法求解多目标线性规划资源模型最优解。

云计算资源调度可以分为虚拟资源调度和物理资源调度，文献[17-21]关注云数据中心的任务指派、任务回滚、云 workflow 部署等虚拟资源调度问题。文献[22-26]关注云计算环境中虚拟机的调度、合并、放置等物理资源调度问题。

以上研究较多关注单个目标优化，多目标优化主要从用户或者云计算资源提供商的单一视角考虑云计算虚拟或物理资源调度，缺少基于虚拟和物理资源调度，同时从云用户和云计算资源提供者的利益相关角度，综合考虑多个目标统筹优化；较多关注云资源静态调度，缺少云资源动态自适应调度。

基于以上分析，本文研究大规模高并发多任务异构云环境下基于利益相关视角的多维 QoS（quality of service）云资源调度，主要贡献如下。

1) 提出了 MQoS（multidimensional quality of service cloud resource scheduling algorithm）云资源调度算法，综合考虑 minimum  $L$ 、maximum  $S$ 、maximum  $R$ ，基于虚拟和物理资源调度进行云计算任务的合理分配与资源调度，在具备无后效性的 4 种云应用场景取得较高多维 QoS 度。

2) 提出了多维 QoS 云计算体系结构，基于云

用户和云服务提供商的利益相关视角, 综合量化云任务执行时间、云任务最终完成时间、云系统能耗、云系统可用性、云系统经济 5 个指标, 取得云计算系统最大效用。

3) 设计了高任务差高资源差、高任务差低资源差、低任务差高资源差、低资源差低任务差 4 种云计算应用场景, 系统评估 MQoS、FIFO (first in, first out cloud resource scheduling algorithm)、M2EC (multi-metric energy consumption virtual machines scheduling algorithm) 3 种调度算法的多维 QoS 度和云数据中心负载均衡差。

## 2 系统模型与体系结构

### 2.1 云资源二级调度模型

云计算具有超大规模、资源虚拟化、按需服务、高可靠性、高可扩展等特点。云计算将计算、存储、网络等硬件资源加入资源池, 利用虚拟化技术, 为 CU 提供若干虚拟机 (VM, virtual machine), 接收用户请求的云任务, 将任务执行完毕并返回结果。云计算的资源分为物理资源和虚拟资源, 其中, 物理资源即物理机 (PM, physical machine), 包括计算、存储、网络等硬件设备; 虚拟资源指利用虚拟化技术得到的虚拟机, 以云服务器、云存储、云数据库等呈现给 CU。云计算的资源调度可以分为虚拟资源调度和物理资源调度, 如图 1 所示。虚拟资源调度为一级调度, 将 CU 提交的任務, 根据用户需求, 运用合适的策略调度至满足要求的 VM 上执行; 物理资源调度为二级调度, 根据 VM 的性能要求和 PM 的可用资源等信息, 将 VM 映射至合适的 PM 上运行。通过这两级调度, 需要尽可能满足 CU 需求, 兼顾 CSP 利益, 实现云计算最大效应。本文所用符号及其含义如表 1 所示。

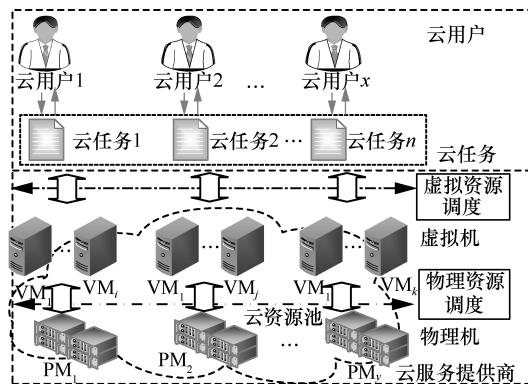


图 1 云资源二级调度模型

表 1 主要符号及其含义

符号	含义
CU	云用户
CT	云任务
PM	物理机
VM	虚拟机
CSP	云服务提供商
CDC	云数据中心
CET	云任务执行时间
CFT	云任务最终完成时间
CEC	云系统能耗
CA	云系统可用性
CE	云系统经济
$CET_{ijk}$	云任务 $j$ 在云数据中心 $k$ 虚拟机 $i$ 的执行时间
$CFT_{ijk}$	云任务 $j$ 在云数据中心 $k$ 虚拟机 $i$ 的最终完成时间
$CEC_{kl}$	云数据中心 $k$ 的物理机 $l$ 的云系统能耗
$CA_{km}$	云数据中心 $k$ 的虚拟机 $m$ 的云系统可用性
$CE_{kl}$	云数据中心 $k$ 的物理机 $l$ 的云系统经济
Qs	多维 QoS 度
LBD	云数据中心负载均衡差

### 2.2 多维 QoS 云计算体系结构

为了实现高效云资源调度, 基于 CU 和 CSP 的利益相关视角, 面向虚拟和物理资源调度提出多维 QoS 云计算体系结构, 如图 2 所示, 分为 4 层, 从下往上依次为硬件资源层、多维 QoS 层、虚拟资源层和云用户层。

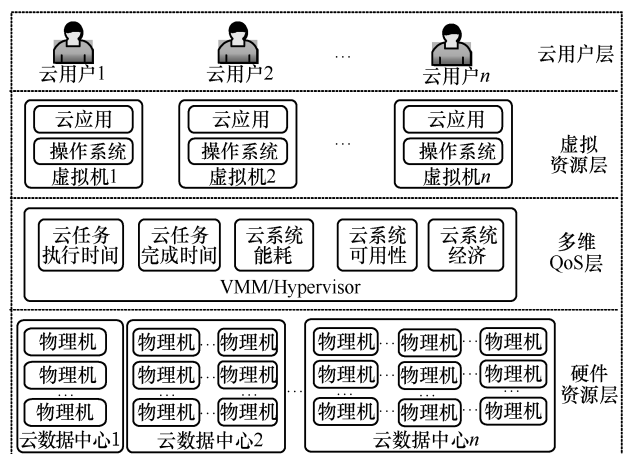


图 2 多维 QoS 云计算体系结构

硬件资源层: 由  $n$  个位于不同地理位置的云数据中心 (CDC, cloud data center) 组成, 每个 CDC 拥有数量、性能不同、同构或异构的物理服务器、

网络设备、存储设备等硬件。CDC 将这些冗余的硬件设备加入云资源池，通过虚拟化技术，可以同时运行性能配置不同、操作系统各异的多个 VM。

**多维 QoS 层：**面向 CU 和 CSP 协调和实现多维 QoS 服务目标，通过云计算的 VMM/Hypervisor 资源调度，优化管理、实时监控，取得最少的云任务执行时间、云任务最终完成时间和云系统能耗，获得最大的云系统可用性、云系统经济，充分满足 CU 和 CSP 的利益。

**虚拟资源层：**CDC 根据 CU 需要，创建若干拥有不同配置、不同操作系统的 VM，可以快速、灵活地实现 VM 的创建、迁移、挂起、停机等操作。每个 VM 可以为多个 CU 服务，但在同一时间只能执行一个 CU 提交的云任务。遇到高并发访问请求时，可以实时增开多个 VM 并行工作；当任务空闲时，可以关闭多余的 VM，以实现可扩展、弹性计算服务。

**云用户层：**用户接入 Internet，可以在任何地点、任何时间，以任何方式访问 CU 申请的 VM，提交云服务请求，就像访问本地物理服务器一样，给 CU 提供同样，甚至更好、便捷的服务体验。

### 3 问题建模与量化

#### 3.1 云资源调度建模

多维 QoS 云资源调度，基于 CU 和 CSP 的利益相关视角，从多个维度合理调度 CU 资源请求，优化虚拟和物理资源调度实现云计算系统的最大效用，包括提高 CU 的云计算体验度，实现最小完成时间；提高 CSP 的效益，实现系统的高可用和高能效。

**定义 1** 多维 QoS 云计算。QoS 在网络中定义为服务质量，用来解决网络时延和拥塞，为用户提供更好的网络通信服务。在云计算中，QoS 指 CSP 为 CU 提供按需定制、按需付费的云服务质量。多维 QoS 云计算定义为基于 CU 和 CSP 的利益相关视角，从 CET(cloud task execution time)、CFT(cloud task final completion time)、CEC (cloud system energy consumption)、CA (cloud system availability)、CE (cloud system economy) 5 个维度，进行云计算任务的合理分配与资源调度，对云计算环境的用户体验、系统能耗、系统经济、可用性等进行客观评价，量化为多维 QoS 度性能指标，以充分满足 CU 和 CSP 的利益。

**定义 2** 多维 QoS 云资源调度模型。该模型是

一个五元组模型  $MQM = (U, C, Q, O, \Theta)$ ，其中， $U = \{u_0, u_1, \dots, u_{n-1}\}$  由  $n$  个 CU 组成的用户集合，每个用户提交的 CT 相互独立，互不干扰，云任务请求总体呈 Poisson 分布； $C = \{dc_0, dc_1, \dots, dc_{n-1}\}$ ，由  $C_n$  个地理位置独立、互不影响的 CDC 组成的云数据中心集合，其中，第  $i$  个云数据中心  $dc_i = \{pm_{i_0}, pm_{i_1}, \dots, pm_{i_{n_i}}\}$ ，其中， $pm_{i_j}$  ( $0 \leq j \leq dc_{n_i}$ ) 是第  $i$  个云数据中心的第  $j$  台物理机； $Q$  是一个多维 QoS 等级，其量化值为多维 QoS 度  $Qs$ ； $O$  是在多维 QoS 云计算环境中定义的目标函数，具体如式(1)所示，通过 CET、CFT、CEC、CA、CE 这 5 个难度进行具体量化； $\Theta$  为实现多维 QoS 云资源调度的优化算法。

$$O = O(CET, CFT, CEC, CA, CE) = \begin{cases} \max(Qs), Qs \in [0, 1] \\ \min(CET), CET \in [0, 1] \\ \min(CFT), CFT \in [0, 1] \\ \min(CEC), CEC \in [0, 1] \\ \max(CA), CA \in [0, 1] \\ \max(CE), CE \in [0, 1] \end{cases} \quad (1)$$

在多维 QoS 云计算环境下，需要将云用户  $U = \{u_0, u_1, \dots, u_{n-1}\}$  提交的  $n$  个相互独立的云任务  $CT = \{CT_0, CT_1, \dots, CT_{n-1}\}$ ，合理分配至  $m$  个虚拟机  $VM = \{vm_0, vm_1, \dots, vm_{m-1}\}$ ，虚拟机最终在 CDC 中的物理机上调度运行，任务执行后 VM 将结果返回给云用户。在大规模高并发多任务云环境下，主要考虑  $n > m$  的情况，在任意时刻，云用户有且只有一个任务  $task_j$ 。在多维 QoS 云计算环境中，云任务  $CT_j = \{CT_j(1), CT_j(2), \dots, CT_j(v)\}$  拥有  $v$  个不同的特征属性。如果  $vm_i$  满足  $CT_j$  多个特征属性需求，可以将  $CT_j$  调度到  $vm_i$  上完成。云任务集与虚拟资源集的映射关系用云资源分配关系矩阵  $X$  表示，如式(2)所示， $x_{ij}$  表示云任务  $CT_j$  与虚拟机  $vm_i$  的映射关系， $x_{ij} \in \{0, 1\}$ ，如果  $CT_j$  在  $vm_i$  上执行，那么  $x_{ij} = 1$ ，否则  $x_{ij} = 0$ ，且  $\sum_{i=1}^m x_{ij} = 1, j \in \{1, 2, \dots, n\}$ 。

$$X = \begin{pmatrix} x_{11} & x_{12} & \cdots & x_{1n} \\ x_{21} & x_{22} & \cdots & x_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ x_{m1} & x_{m2} & \cdots & x_{mn} \end{pmatrix} \quad (2)$$

以云任务执行时间为例，云任务集在虚拟资源集中的虚拟机上执行的时间，可以构成云任务执行时间关系矩阵  $A$ ，具体如式(3)所示，其中， $CET_{ij}$  为云任务  $CT_j$  在虚拟机  $vm_i$  上的执行时间。

$$A = \begin{pmatrix} CET_{11} & CET_{12} & \cdots & CET_{1n} \\ CET_{21} & CET_{22} & \cdots & CET_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ CET_{m1} & CET_{m2} & \cdots & CET_{mn} \end{pmatrix} \quad (3)$$

### 3.2 多维 QoS 性能指标量化

在多维 QoS 云计算环境中，主要选取云任务执行时间 CET、云任务最终完成时间 CFT、云系统能耗 CEC、云系统可用性 CA 和云系统经济 CE，进行具体性能指标量化。

#### 3.2.1 云任务执行时间

一个 CU 提交的  $CT_j$  在第  $k$  个 CDC 的第  $i$  个虚拟机上执行，其执行时间  $CET_{ijk}$  包括虚拟机启动时间  $CET_{ijk}^{up}$ 、云任务运行时间  $CET_{ijk}^{run}$  和虚拟机关机时间  $CET_{ijk}^{down}$ ，如式(4)所示。

$$CET_{ijk} = CET_{ijk}^{up} + CET_{ijk}^{run} + CET_{ijk}^{down} \quad (4)$$

对于同一类型的虚拟机  $vm_i$ ，其  $CET_{ijk}^{up}$  和  $CET_{ijk}^{run}$  是一个固定常量。 $CET_{ijk}^{run} = \frac{L_j}{S_{ik}}$  主要取决于云任务长度  $L$  和虚拟机的平均服务速率  $S^{[14]}$ 。

**定义 3** 云任务执行时间 CET。在时间段  $T$  内，不考虑云任务排队等因素，在多维 QoS 云计算环境中所有虚拟机直接执行 CU 提交云任务的时间总和。一个 CSP 由  $n$  个 CDC 组成，每个 CDC 通过虚拟化技术拥有若干个 VM，其中第  $k$  个数据中心拥有  $m_k$  个 VM，每个 VM 可以运行若干云任务，其中，第  $j$  个 VM 上运行  $n_j$  个云任务。云任务执行时间 CET 如式(5)所示。

$$\begin{aligned} CET &= \sum_{k=0}^{n-1} \sum_{j=0}^{(m-1)_k} \sum_{i=0}^{(n-1)_j} CET_{ijk} \\ &= \sum_{k=0}^{n-1} \sum_{j=0}^{(m-1)_k} \sum_{i=0}^{(n-1)_j} \left( CET_{ijk}^{up} + \frac{L_j}{S_{ik}} + CET_{ijk}^{down} \right) \end{aligned} \quad (5)$$

#### 3.2.2 云任务最终完成时间

$CT_j$  在第  $k$  个 CDC 的第  $i$  个 VM 上执行，其云任务最终完成时间  $CFT_{ijk}$  为其云任务等待时间 (CWT, cloud task wait time) 与其云任务执行时间

$CET_{ijk}$  之和，如式(6)所示。

$$CFT_{ijk} = CWT_{ijk} + CET_{ijk} \quad (6)$$

云任务的 CWT 取决于其虚拟机上运行的云任务数量和每个云任务的执行情况。在大规模高并发多任务云计算环境下，云任务队列的云任务数量越多，云任务的执行处理时间越长，云任务的排队等待时间越长。第  $k$  个 CDC 的第  $i$  个 VM 上执行的云任务等待时间，如式(7)所示，其中， $n_j^i$  为分配到虚拟机  $vm_i$  的  $CT_j$  执行前  $vm_i$  需要处理的云任务数量。

$$CWT_{ijk} = \sum_{i=0}^{n_j^i} \left( CET_{ijk}^{up} + \frac{L_j}{S_{ik}} + CET_{ijk}^{down} \right) \quad (7)$$

结合式(6)，可以得出在第  $k$  个 CDC 的第  $i$  个 VM 上执行的  $CT_j$ ，其云任务最终完成时间为

$$CFT_{ijk} = CET_{ijk} + \sum_{i=0}^{n_j^i} \left( CET_{ijk}^{up} + \frac{L_j}{S_{ik}} + CET_{ijk}^{down} \right)$$

**定义 4** 云任务最终完成时间 CFT。在时间段  $T$  内，在多维 QoS 云计算环境中将所有云任务提交给虚拟机，经过任务排队等因素，最终得到执行所需要的时间总和，主要关注多维 QoS 云计算的用户体验。云计算环境由  $n$  个 CDC 组成，每个 CDC 通过虚拟化技术拥有若干 VM，其中，第  $k$  个数据中心拥有  $m_k$  个 VM，每个 VM 可以运行若干云任务，其中第  $j$  个 VM 上运行  $n_j$  个云任务。其最终完成时间 CFT 如式(8)所示。

$$\begin{aligned} CFT &= \sum_{k=0}^{n-1} \sum_{j=0}^{(m-1)_k} \sum_{i=0}^{(n-1)_j} CFT_{ijk} = \\ &= \sum_{k=0}^{n-1} \sum_{j=0}^{(m-1)_k} \sum_{i=0}^{(n-1)_j} \left( CET_{ijk} + \sum_{i=0}^{n_j^i} \left( CET_{ijk}^{up} + \frac{L_j}{S_{ik}} + CET_{ijk}^{down} \right) \right) \end{aligned} \quad (8)$$

#### 3.2.3 云系统能耗

第  $k$  个 CDC 的第  $l$  个物理机  $pm_{kl}$  的云系统能耗  $CEC_{kl}$ ，可以通过物理机  $pm_{kl}$  在时间段  $T=[T_0-T_{n-1}]$  内的能耗  $PC_{pm_{kl}}(\chi(t))$  累加得到，如式(9)所示。

$$CEC_{kl} = \sum_{t=T_0}^{T_{n-1}} PC_{pm_{kl}}(\chi(t)) \quad (9)$$

其中， $PC_{pm_{kl}}(\chi(t))$  可以细分为基本能耗  $PC_{pm_{kl}}^{basic}(\chi(t))$  和动态能耗  $PC_{pm_{kl}}^{dynamic}(\chi(t))$ ，如式(10)所示。

$$PC_{pm_{kl}}(\chi(t)) = PC_{pm_{kl}}^{basic}(\chi(t)) + PC_{pm_{kl}}^{dynamic}(\chi(t)) \quad (10)$$

基本能耗可以理解物理机的待机能耗，一般来说，同一种类型的物理机的基本能耗是一个固定常量。动态能耗为物理机提供云服务时所需要消耗的电能，根据提供云服务的不同而不同，云服务类型包括 CPU 密集型、数据密集型、I/O 密集型等。物理机的能耗由 CPU、RAM、存储等设备的能耗组成。由于 CPU 是最主要的电能消耗设备，为了简化问题，物理机的待机能耗和动态能耗可以通过 CPU 的电能消耗来计算<sup>[27]</sup>，如式(11)所示。

$$\begin{cases} PC_{pm_{kl}}^{basic}(\chi(t)) = \delta PC_{pm_{kl}}^{cpu}(\max), \delta \in [0,1] \\ PC_{pm_{kl}}^{dynamic}(\chi(t)) = (1-\delta)\chi(t)_{kl} PC_{pm_{kl}}^{cpu}(\max), \chi_{kl}(t) \in [0,1] \end{cases} \quad (11)$$

其中， $PC_{pm_{kl}}^{cpu}(\max)$  为第  $k$  个 CDC 的第  $l$  个物理机在全负荷情况下的最大能耗； $\delta$  为基本能耗和动态能耗的调节参数，由物理机的体系结构决定； $\chi(t)_{kl}$  为第  $k$  个 CDC 的第  $l$  个物理机提供云服务时动态变化的负载因子。

**定义 5** 云系统能耗 CEC。在多维 QoS 云计算环境中全部数据中心的所有物理机在单位时间内的能量消耗之和。云计算环境由  $n$  个 CDC 组成，其中第  $k$  个 CDC 拥有  $n_k^{pm}$  个物理机，整个云计算系统在时间段  $T$  内的云系统能耗 CEC，如式(12)所示。

$$CEC = \sum_{k=0}^{n-1} \sum_{l=0}^{n_k^{pm}} CEC_{kl} \quad (12)$$

结合式(9)~式(12)，可以得出云系统能耗 CEC 为

$$\begin{aligned} CEC &= \sum_{k=0}^{n-1} \sum_{l=0}^{n_k^{pm}} \sum_{t=T_0}^{T-1} (\delta PC_{pm_{kl}}^{cpu}(\max) + (1-\delta)\chi(t)_{kl} PC_{pm_{kl}}^{cpu}(\max)) \\ &= \sum_{k=0}^{n-1} \sum_{l=0}^{n_k^{pm}} \sum_{t=T_0}^{T-1} ((\delta + (1-\delta)\chi(t)_{kl}) PC_{pm_{kl}}^{cpu}(\max)) \end{aligned}$$

### 3.2.4 云系统可用性

第  $k$  个 CDC 的第  $m$  个虚拟机  $vm_{km}$  的云系统可用性  $CA_{km}$ ，可以通过计算虚拟机  $vm_{km}$  在时间段  $T$  内的系统正常运行的概率或时间占用率得到，如式(13)所示。

$$CA_{km} = \frac{MTBF_{vm_{km}}(T)}{MTBF_{vm_{km}}(T) + MTTR_{vm_{km}}(T)} \quad (13)$$

其中， $MTBF_{vm_{km}}(T)$  为虚拟机  $vm_{km}$  在时间段  $T$  内的

平均失效间隔时间， $MTTR_{vm_{km}}(T)$  为虚拟机  $vm_{km}$  在时间段  $T$  内的平均修复时间。对于 CU 来说，PM 越少宕机，VM 越少迁移，其  $MTBF_{vm_{km}}(T)$  数值越大， $MTTR_{vm_{km}}(T)$  数值越小，云系统的可用性越高，CU 的体验越好。

**定义 6** 云系统可用性 CA。为在多维 QoS 云计算环境中所有虚拟机正常提供云服务的平均概率。云计算环境由  $n$  个 CDC 组成，其中第  $k$  个 CDC 拥有  $n_k^{vm}$  个虚拟机，那么，整个云计算环境在时间段  $T$  内的云系统可用性 CA，如式(14)所示。

$$CA = \frac{\sum_{k=0}^{n-1} \sum_{m=0}^{n_k^{vm}} CA_{km}}{\sum_{k=0}^{n-1} n_k^{vm}} \quad (14)$$

结合式(13)和式(14)，可以得到云系统可用性 CA 为

$$CA = \frac{\sum_{k=0}^{n-1} \sum_{m=0}^{n_k^{vm}} \left( \frac{MTBF_{vm_{km}}(T)}{MTBF_{vm_{km}}(T) + MTTR_{vm_{km}}(T)} \right)}{\sum_{k=0}^{n-1} n_k^{vm}}$$

### 3.2.5 云系统经济

第  $k$  个 CDC 的第  $l$  个物理机  $pm_{kl}$  的云系统经济  $CE_{kl}$ ，可以通过物理机  $pm_{kl}$  在时间段  $T$  内的云计算收益 (CCR, cloud computing revenue) 与经济成本 (EC, economic cost) 计算得出，如式(15)所示。

$$CE_{kl} = \frac{CCR_{pm_{kl}}(T)}{EC_{pm_{kl}}(T)} \quad (15)$$

其中， $CCR_{pm_{kl}}(T)$  是第  $k$  个 CDC 的第  $l$  个物理机  $pm_{kl}$  在时间段  $T$  的云计算收益， $EC_{pm_{kl}}(T)$  是第  $k$  个 CDC 的第  $l$  个物理机  $pm_{kl}$  在时间段  $T$  的经济成本。经济成本细分为硬件软件成本 (HSC, hardware and software cost) 和系统运维成本 (SOMC, system operation and maintenance cost)，如式(16)所示。

$$EC_{pm_{kl}}(T) = HSC_{pm_{kl}}(T) + SOMC_{pm_{kl}}(T) \quad (16)$$

其中， $HSC_{pm_{kl}}(T)$  为第  $k$  个 CDC 的第  $l$  个物理机  $pm_{kl}$  在时间段  $T$  的硬件软件成本，包括硬件采购和软件成本； $SOMC_{pm_{kl}}(T)$  为第  $k$  个 CDC 的第  $l$  个物理机  $pm_{kl}$  在时间段  $T$  的系统运维成本，包括服务器能耗、制冷能耗、系统管理等成本。

**定义 7** 云系统经济 CE。在多维 QoS 云计算

环境中所有物理机在单位时间内的平均经济效益。一个云计算环境由  $n$  个 CDC 组成, 其中第  $k$  个 CDC 拥有  $n_k^{\text{pm}}$  个物理机, 那么, 整个云计算环境在时间段  $T$  内的云系统经济 CE 如式(17)所示。

$$CE = \frac{\sum_{k=0}^{n-1} \sum_{m=0}^{n_k^{\text{pm}}} CE_{kl}}{\sum_{k=0}^{n-1} n_k^{\text{pm}}} \quad (17)$$

结合式(15)~式(17), 可以得出云系统经济 CE 为

$$CE = \frac{\sum_{k=0}^{n-1} \sum_{m=0}^{n_k^{\text{pm}}} \left( \frac{CCR_{\text{pm}_{kl}}(T)}{EC_{\text{pm}_{kl}}(T)} \right)}{\sum_{k=0}^{n-1} n_k^{\text{pm}}} = \frac{\sum_{k=0}^{n-1} \sum_{m=0}^{n_k^{\text{pm}}} \left( \frac{CCR_{\text{pm}_{kl}}(T)}{HSC_{\text{pm}_{kl}}(T) + SOMC_{\text{pm}_{kl}}(T)} \right)}{\sum_{k=0}^{n-1} n_k^{\text{pm}}}$$

### 3.3 多维 QoS 度量

#### 3.3.1 数据的归一化

多维 QoS 云计算的 Qs 可以通过 CET、CFT、CEC、CA、CE 这 5 个维度量化得出。这 5 个维度组成五维 QoS 指标向量  $\mathbf{P}=(\text{CET}^{-1}, \text{CFT}^{-1}, \text{CEC}^{-1}, \text{CA}, \text{CE})$ 。对每个 QoS 指标测量  $n$  次, 那么五维 QoS 性能指标向量  $\mathbf{P}$  可以转换为一个  $n$  行 5 列的矩阵  $\mathbf{A}_{n \times 5}=(a_{ij})_{n \times 5}$ 。不失一般性地, 如果有  $m$  维 QoS 性能指标, 就可以得到一个  $n$  行  $m$  列的矩阵  $\mathbf{A}_{n \times m}=(a_{ij})_{n \times m}$ , 其中,  $a_{ij}$  是第  $j$  维性能指标的第  $i$  次测量值。

多维 QoS 云计算的 5 个维度具有不同的量纲和单位, 为了消除不同评价指标的差异, 实现不同量纲和单位的可对比性, 需要对每个维度进行数据标准化处理。首先, 将矩阵  $\mathbf{A}_{n \times m}$  进行 z-score 标准化处理, 利用原始数据的均值和标准差, 处理后的数据将符合标准正态分布, 如式(18)所示。

$$a_{ij}^* = \frac{a_{ij} - \mu_j}{\sigma_j}, i \in \{0, 1, \dots, n-1\}, j \in \{0, 1, \dots, m-1\} \quad (18)$$

其中,  $\mu_j = \frac{1}{n} \sum_{i=0}^{n-1} a_{ij}$  是矩阵  $\mathbf{A}_{n \times m}$  的第  $j$  维性能指标的

均值,  $\sigma_j = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=0}^{n-1} (a_{ij} - \mu_j)^2}$  是矩阵  $\mathbf{A}_{n \times m}$  的第  $j$  维性

能指标的标准差。经过 z-score 标准化处理后, 得到矩阵  $\mathbf{A}_{n \times m}^*=(a_{ij}^*)_{n \times m}$ , 其每个维度的性能指标均值为 0, 标准差为 1。

然后, 将矩阵  $\mathbf{A}_{n \times m}^*$  进行 min-max 标准化处理, 将矩阵  $\mathbf{A}_{n \times m}^*$  的每一个数据的值落到  $[0,1]$  区间。min-max 标准化处理后的矩阵  $\mathbf{A}_{n \times m}^{**}=(a_{ij}^{**})_{n \times m}$ , 其  $a_{ij}^{**}$  如式(19)所示。

$$a_{ij}^{**} = \frac{a_{ij}^* - a_j^*(\min)}{a_j^*(\max) - a_j^*(\min)}, i \in \{0, 1, \dots, n-1\}, j \in \{0, 1, \dots, m-1\} \quad (19)$$

其中,  $a_j^*(\min) = \min(a_{0j}^*, a_{1j}^*, \dots, a_{n-1j}^*)$ ,  $a_j^*(\max) = \max(a_{0j}^*, a_{1j}^*, \dots, a_{n-1j}^*)$ 。

#### 3.3.2 数据的量化

多维 QoS 量化需要为每个维度的性能指标确定合适的权重。在多维 QoS 云计算环境中, 基于 CU 和 CSP 的利益相关视角, 针对 CET、CFT、CEC、CA 和 CE 确定五维性能指标的权重向量  $\mathbf{W}=(w_{\text{CET}}, w_{\text{CFT}}, w_{\text{CEC}}, w_{\text{CA}}, w_{\text{CE}})$ , 其中,  $w_j \in [0,1]$  是第  $j$  维的性能指标权重, 并且  $\sum_{j=0}^{n-1} w_j = 1$ 。将多维 QoS 性能指标矩阵  $\mathbf{A}_{n \times m}^{**}$  与五维性能指标权重向量  $\mathbf{W}^T$  进行乘法计算, 可以得到多维 Qs 度的组合  $\mathbf{Qs}^T$ , 如式(20)所示。

$$\mathbf{Qs}^T = \mathbf{A}_{n \times m}^{**} \mathbf{W}^T \quad (20)$$

多维 QoS 度可表示为 Qs, 有  $\mathbf{Qs}=(\text{Qs}_0, \text{Qs}_1, \dots, \text{Qs}_{n-1})$ ,  $\text{Qs}_i \in [0,1]$ ,  $\text{Qs}_i$  为第  $i$  次多维 QoS 度的计算结果。云计算系统最终的多维 QoS 度 Qs 为这  $n$  次多维 QoS 度的平均值, 如式(21)所示。

$$Qs = \frac{1}{n} \sum_{i=0}^{n-1} \text{Qs}_i \quad (21)$$

## 4 云资源调度算法

### 4.1 FIFO 云资源调度算法

FIFO 云资源调度算法<sup>[8]</sup>按照云任务提交的先后次序, 将任务指派到虚拟机, 然后将虚拟机按顺序依次部署到有空闲资源的物理机上执行。FIFO 云资源调度算法是一种最简单、最基本的调度算法, 没有对云任务调度和虚拟机部署进行任何优化。FIFO 云资源调度算法如算法 1 所示。

**算法 1** FIFO 云资源调度算法

输入 CU 队列  $Q_{cus}$ , CT 队列  $Q_{cts}$ , VM 队列  $Q_{vms}$ , PM 队列  $Q_{pms}$ , CDC 队列  $Q_{dcs}$ , 五维性能指标权重向量  $W=(w_{CET}, w_{CFT}, w_{CEC}, w_{CA}, w_{CE})$

输出 多维 QoS 度  $Q_s$

- 1) if  $Q_{cus} \neq 0$  during the period  $T$  then
- 2)  $Q_{cts} \leftarrow Q_{cts} + task, \exists task \in task, task \leftarrow Q_{cus}$
- 3) array [ task ]  $\leftarrow$  array [ task' ], task'  $\in Q_{cts}$  in

order

- 4) end if
- 5) if  $Q_{vms} \neq 0, \exists Q_{vms} \in Q_{pms}, Q_{pms} \in Q_{dcs}$  then
- 6) array [ vm ]  $\leftarrow$  array [ vm' ], vm'  $\in Q_{vms}$  in order
- 7) end if
- 8) for each task  $\in Q_{cts}$  do
- 9) for each vm  $\in Q_{vms}$  do
- 10) if task run vm (pm has available re-

sources for vm,  $\forall pm \in Q_{pms}, Q_{pms} \in Q_{dcs}$ ) then

- 11) assign task to vm
- 12) allocate vm to pm
- 13) update unfinished task,  $\exists task \in Q_{cts}$
- 14) update pm,  $\exists pm \in Q_{pms}, Q_{pms} \in Q_{dcs}$
- 15) end if

16) end for

17) end for

18) calculate CET (5), CFT (8), CEC (12), CA (14), CE (17)

19) calculate  $Q_s$  (21)

20) return  $Q_s$

FIFO 云资源调度算法的输出是多维 QoS 度  $Q_s$ 。步骤 1)~步骤 4)接收 CU 的请求, 将其对应的 CT 按先后次序进行排列, 并加入 CT 队列  $Q_{cts}$ 。步骤 5)~步骤 7)将 CDC 中的虚拟机依次加入 VM 队列  $Q_{vms}$ 。步骤 8)~步骤 17)将 CU 请求的 CT 按先后次序分配至 VM, 并部署到 CDC 的 PM 上依次运行。步骤 18)根据式(5)、式(8)、式(12)、式(14)和式(17), 分别计算 CET、CFT、CEC、CA 和 CE。步骤 19)~步骤 20)计算最终的多维 QoS 度, 并返回  $Q_s$  值。FIFO 云资源调度算法的时间复杂度为  $O(1)$ 。

#### 4.2 MQoS 云资源调度算法

MQoS 云资源调度算法基于多重 Greedy 算法, 综合考虑最小云任务长度 (minimum  $L$ )、VM 最大平均服务速率 (maximum  $S$ ) 和 PM 最多剩余硬件

资源 (maximum  $R$ ), 面向虚拟和物理资源调度进行云计算任务的合理分配与资源调度, 从 5 个维度综合量化云计算系统的多维 QoS 度。在第 5 节中, MQoS 云资源调度算法在具有无后效性的 4 种应用场景下, 相比传统方法具有明显优势。MQoS 云资源调度算法如算法 2 所示。

算法 2 MQoS 云资源调度算法

输入 CU 队列  $Q_{cus}$ , CT 队列  $Q_{cts}$ , VM 队列  $Q_{vms}$ , PM 队列  $Q_{pms}$ , CDC 队列  $Q_{dcs}$ , 五维性能指标权重向量  $W=(w_{CET}, w_{CFT}, w_{CEC}, w_{CA}, w_{CE})$

输出 多维 QoS 度  $Q_s$

- 1) if  $Q_{cus} \neq 0$  during the period  $T$  then
- 2)  $Q_{cts} \leftarrow Q_{cts} + task, \exists task \in task, task \leftarrow Q_{cus}$
- 3) array [ task ]  $\leftarrow$  array [ task' ], sort task'  $\in Q_{cts}$

by task in ascending order; /\*minimum  $L$ \*/

4) end if

5) if  $Q_{vms} \neq 0, \exists Q_{vms} \in Q_{pms}, Q_{pms} \in Q_{dcs}$  then

6) array [ vm ]  $\leftarrow$  array [ vm' ], sort vm'  $\in Q_{vms}$

by performance of VM in descending order

/\*maximum  $S$ \*/

7) end if

8) for each task  $\in Q_{cts}$  do

9) for each vm  $\in Q_{vms}$  do

10) if task run vm (pm has maximum resources for vm,  $\forall pm \in Q_{pms}, Q_{pms} \in Q_{dcs}$ ) then

/\*maximum  $R$ \*/

11) assign task to vm

12) allocate vm to pm

13) update unfinished task,  $\exists task \in Q_{cts}$

14) update pm,  $\exists pm \in Q_{pms}, Q_{pms} \in Q_{dcs}$

15) end if

16) end for

17) end for

18) calculate CET (5), CFT (8), CEC (12), CA (14), CE (17)

19) calculate  $Q_s$  (21)

20) return  $Q_s$

MQoS 云资源调度算法的输出是多维 QoS 度  $Q_s$ ,  $Q_s$  值越大, 云计算系统效用越大。步骤 1)~步骤 4)接收 CU 的请求, 将其对应的 CT 按云任务长度大小进行升序排列, 并加入到 CT 队列  $Q_{cts}$ 。步骤 5)~步骤 7)将 CDC 中 PM 上的虚拟机按平均服务

速率高低进行降序排列, 并加入 VM 队列  $Q_{vms}$ 。步骤 8)~步骤 17)使用多重 Greedy 算法思想, 将每个 CU 请求的云任务分配到 VM 上高效运行, 同时, 将每一个 VM 部署到当时拥有最多剩余硬件资源的 PM 上, 以取得最大多维 QoS 效用。步骤 18)根据式(5)、式(8)、式(12)、式(14)和式(17), 分别计算 CET、CFT、CEC、CA 和 CE。步骤 19)~步骤 20)计算最终的多维 QoS 度, 并返回 Qs 值。MQoS 云资源调度算法的时间复杂度为  $O(nlbn)$ 。

### 5 实验及结果分析

本节搭建云计算实验环境, 设置实验参数, 设计无后效性的 4 种云计算应用场景, 分别在不同云任务数和不同虚拟机数的情况下, 依次运行 MQoS、FIFO、M2EC 这 3 种调度算法, 评估它们在云资源调度中的多维 QoS 度和云数据中心负载均衡差, 并进行具体分析。在 M2EC 多维能耗虚拟机调度算法<sup>[27]</sup>中, 云计算服务提供商将接收的云用户服务请求指派到虚拟机, 然后依次将虚拟机队列按虚拟机性能从高到低排序, 将服务器队列按物理机性能从高到低排序, 再基于改进的首次适合下降 (FFD, first fit decreasing algorithm)算法<sup>[28-30]</sup>将虚拟机优化部署到合适的物理服务器上。M2EC 多维能耗虚拟机调度算法的时间复杂度为  $O(nlbn)$ 。

#### 5.1 实验环境与设置

本文硬件实验平台为一台 x86 服务器, 硬件配置为 Intel Xeon E5-2650v4 CPU, 32 GB DDR4 RAM, 1 TB SAS/SATA 硬盘, 1 Gbit/s 以太网卡; 操作系统为 Windows Server 2012 R2。

软件采用 CloudSim 4.0 云计算仿真平台, 该平台是由澳大利亚墨尔本大学网络实验室推出的云计算仿真软件。CloudSim 4.0 继承了 GridSim 的编程模型, 是在离散事件模拟包 SimJava 上开发的基于 Java 的函数库, 扩展实现了一系列接口, 包括提供虚拟化引擎, 实现基于大型云计算数据中心的虚拟化技术, 以及虚拟化云的建模和仿真功能。本文应用 CloudSim 构建云计算仿真环境, 应用于 MQoS、FIFO、M2EC 这 3 种调度算法, 进行云计算系统的性能测试与分析。

#### 5.2 实验参数与设置

在实验过程中, 借鉴亚马逊公开的 AWS (Amazon Web service) 云数据中心数据设置 18 个

CDC, 每个 CDC 根据规模的不同配备 200~500 台 PM (节点), 如表 1 所示, 每个节点拥有性能不等的 CPU、RAM、网络带宽等。根据 CU 的不同需求, 设计了通用型、计算型、内存型、存储型等 4 种类型的虚拟机(VM)模板, 如表 2 所示。

表 1 CDC 配置参数

CDC 序号	节点数/个	CPU/PE	RAM/GB	BW/(Gbit·s <sup>-1</sup> )
DC00~DC02	200	2~4	8~32	1~10
DC03~DC05	250	4~6	8~32	1~10
DC06~DC08	300	4~6	8~64	1~20
DC09~DC11	350	4~8	8~64	1~20
DC12~DC14	400	4~8	16~128	1~40
DC15~DC17	500	4~16	16~128	1~40

表 2 虚拟机模板参数

VM 类型	虚拟 CPU/颗	RAM/GB	Storage/GB	BW/(Gbit·s <sup>-1</sup> )
通用型	2	8	500	1
计算型	8	16	500	2
内存型	4	32	500	4
存储型	2	8	2 000	10

为了充分评估 MQoS、FIFO 和 M2EC 这 3 种调度算法在多维 QoS 云计算环境下的系统性能, 在实验中模拟高资源差高任务差 (HR-HT, difference of high resource and high task)、高资源差低任务差 (HR-LT, difference of high resource and low task)、低资源差高任务差 (LR-HT, difference of low resource and high task)、低资源差低任务差 (LR-LT, difference of low resource and low task) 这 4 种无后效性的云计算应用场景。其中, 高任务差指云任务差达到[1, 500], 表示不同 CU 提交的不同云任务, 其云任务长度的数值差达到 1:500; 低任务差指云任务差为[1, 10], 表示不同 CU 提交的不同云任务差别不大, 其云任务长度的数值差控制在 1:10 以内; 高资源差指虚拟机的平均服务速率差达到[1,100], 表示不同的 CU 租用通用型、计算型、内存型、存储型等虚拟机, 其不同虚拟机的平均服务速率数值差在 100:1 之间; 低资源差指其虚拟机的平均服务速率差为[1,10], 表示不同的 CU 租用通用型、计算型、内存型、存储型等虚拟机, 其不同虚拟机的平均服务速率差值控制在 10:1 以内。具体如表 3 所示。

**表 3** 4 种云计算应用场景设置

应用场景	CU 数/个	资源差	任务差
HR-HT	$1 \times 10^4 \sim 9 \times 10^4$	[100,1]	[1,500]
HR-LT	$1 \times 10^4 \sim 9 \times 10^4$	[10,1]	[1,500]
LR-HT	$1 \times 10^4 \sim 9 \times 10^4$	[100,1]	[1,10]
LR-LT	$1 \times 10^4 \sim 9 \times 10^4$	[10,1]	[1,10]

在实验中，模拟 4 种应用场景中，依次设置  $1 \times 10^4 \sim 9 \times 10^4$  个 CU，分别产生  $1 \times 10^4 \sim 9 \times 10^4$  个云任务，每个 CU 提交的云任务在时间维度服从 Poisson 分布。将云任务交给 CDC，分别运用 MQoS、FIFO、M2EC 这 3 种调度算法，进行任务指派与调度资源，依次计算得到 CET、CFT、CEC、CA、CE 这 5 个 QoS 维度值，最终计算多维 QoS 度。为了提高测量的准确度与稳定性，每个应用场景的每个测试点分别测试 3 次，取结果取平均值。实验的具体参数如表 4 所示。

**表 4** 实验参数设置

参数	参数值	描述
$\delta$	[0.2,0.8]	基于能耗和动态能耗的调节参数
$T$	60	时间段
$W$	[0.2, 0.2, 0.2, 0.2, 0.2]	五维性能指标的权重向量

### 5.3 实验结果与分析

通过多维 QoS 度、云数据中心负载均衡差这 2 个性能指标对 MQoS、FIFO、M2EC 这 3 种调度算法进行云资源调度的性能分析与评估。

#### 5.3.1 多维 QoS 度

多维 QoS 度由 CET、CFT、CEC、CA、CE 这 5 个性能指标与五维性能指标权重向量  $W^T$  进行矩阵乘积计算得出。云计算系统的  $Q_s$  越大，意味着 CU 提交的云任务执行时间越少，云任务最终完成时间越少，给 CSP 带来的云系统能耗越低、产生的云系统经济越高，云系统可用性越高，让 CU 的体验也越好，以实现云计算系统的最大效用，充分满足 CU 和 CSP 的利益。

首先，设计 HR-HT、HR-LT、LR-HT、LR-LT 这 4 种具有无后效性的云计算应用场景，分别在不同 CU 规模下，评测 MQoS、FIFO、M2EC 这 3 种调度算法的多维 QoS 度。MQoS 云资源调度算法基于 CU 和 CSP 的利益相关视角，综合考虑最小云任务长度、最大 VM 平均服务速率和最多 PM 剩余硬件资源等因素合理调度虚拟和物理资源，从多个维

度量云资源使用，优化云任务执行时间、云任务最终完成时间，降低云系统能耗、提高云系统经济、可用性等，在 4 个应用场景中均可以保持比较高的多维 QoS 度， $Q_s$  值大于 0.7。FIFO 云资源调度算法根据 CU 提交的先后顺序，进行最简单、基本的调度，没有进行任何优化，在测试时其多维 QoS 度低， $Q_s$  值小于 0.36。M2EC 多维能耗虚拟机调度算法改进了 FFD 算法，分别对虚拟机队列和物理机队列进行性能的降序排列，对物理资源的调度进行优化，其  $Q_s$  值在 [0.29, 0.80] 区间，相比 FIFO 云资源调度算法有提高；但没有将云任务指派到虚拟资源进行优化，相比 MQoS 云资源调度算法，其云任务等待时间偏高，导致 CFT 偏高，进而影响多维 QoS 度，降低了  $Q_s$  值，在云用户增加多的情况下，其  $Q_s$  值下降明显。从图 3 可以看出，MQoS 云资源调度算法的  $Q_s$  值，比其他调度算法都要高，位于 [0.70, 0.91] 区间，远远高出 FIFO 云资源调度算法，总体提升 228.99%，和 M2EC 多维能耗虚拟机调度算法相比，总体提升 56.93%。

其次，同样在 HR-HT、HR-LT、LR-HT、LR-LT 等 4 种云计算应用场景中，改变 CDC 的 VM 规模，进一步评测 MQoS、FIFO、M2EC 这 3 种调度算法的多维 QoS 度。MQoS 云资源调度算法考虑 CU 和 CSP 的利益，采用多重 Greedy 算法，基于虚拟和物理资源调度综合优化云资源使用。和在不同云用户规模的情况相似，MQoS 云资源调度算法在不同 VM 规模情况下，都取得较高的多维 QoS 度，其  $Q_s$  值相比其他调度算法都有明显优势。没有进行优化的 FIFO 云资源调度算法，其多维 QoS 度始终偏低。M2EC 多维能耗虚拟机调度算法改进了 FFD 算法，对物理资源调度进行优化，其  $Q_s$  值介于 FIFO 和 MQoS 之间。如图 4 所示，MQoS 云资源调度算法在 4 种应用场景的多维 QoS 度，其  $Q_s$  值在 [0.66, 0.92] 区间，远高于 FIFO 云资源调度算法的多维 QoS 度 ( $Q_s$  值在 [0.20, 0.31] 区间)，整体提升 206.42%；相比 M2EC 多维能耗虚拟机调度算法的多维 QoS 度 ( $Q_s$  值在 [0.28, 0.82] 区间)，整体提升 34.26%。

#### 5.3.2 云数据中心负载均衡差

在 CDC 中，不同的虚拟机处理相同的 CU 处理请求，由于处理能力不同，其所承受的云计算负载程度不同。云资源分配，既要考虑 CU 的云任务执行工作量，也要考虑虚拟机执行云任务的处理能力。好的云资源调度必须考虑各数据中心每个节点

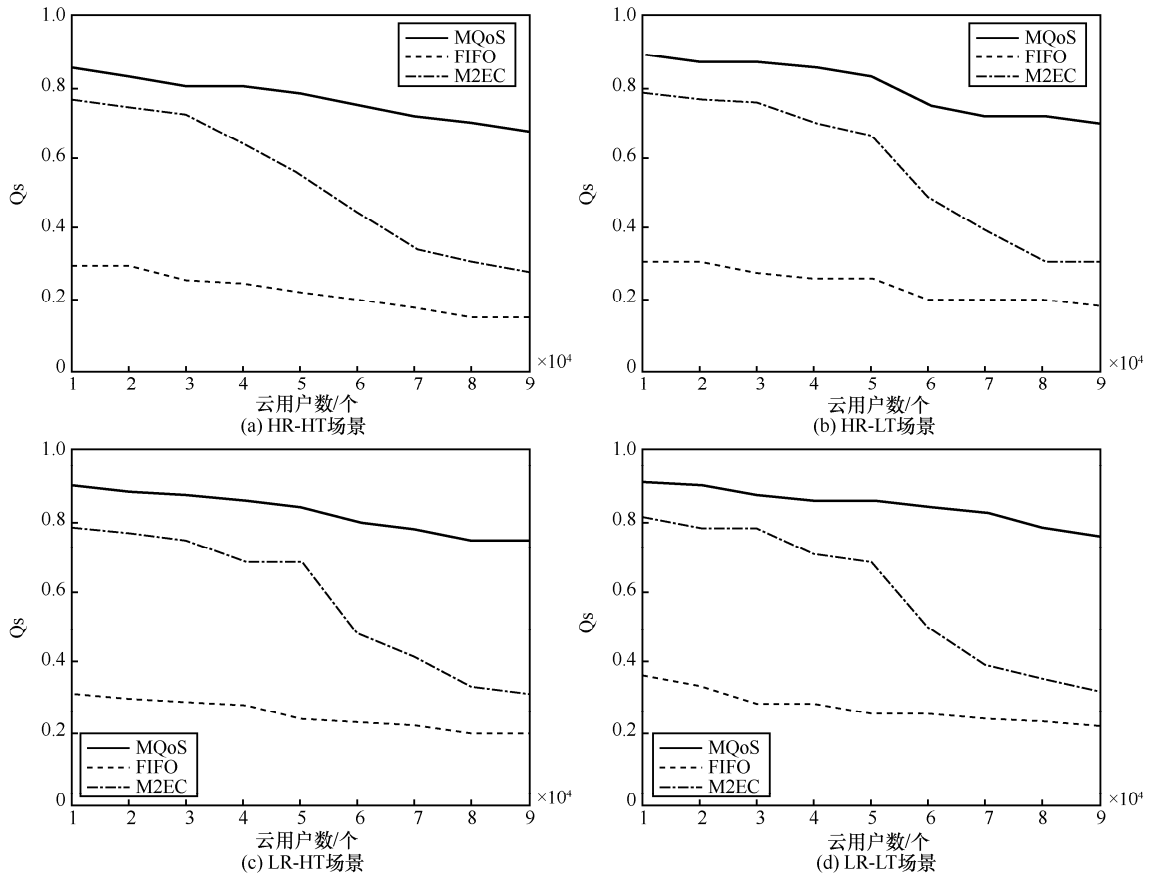


图 3 3 种调度算法在 4 种场景下不同云用户数的多维 QoS 度

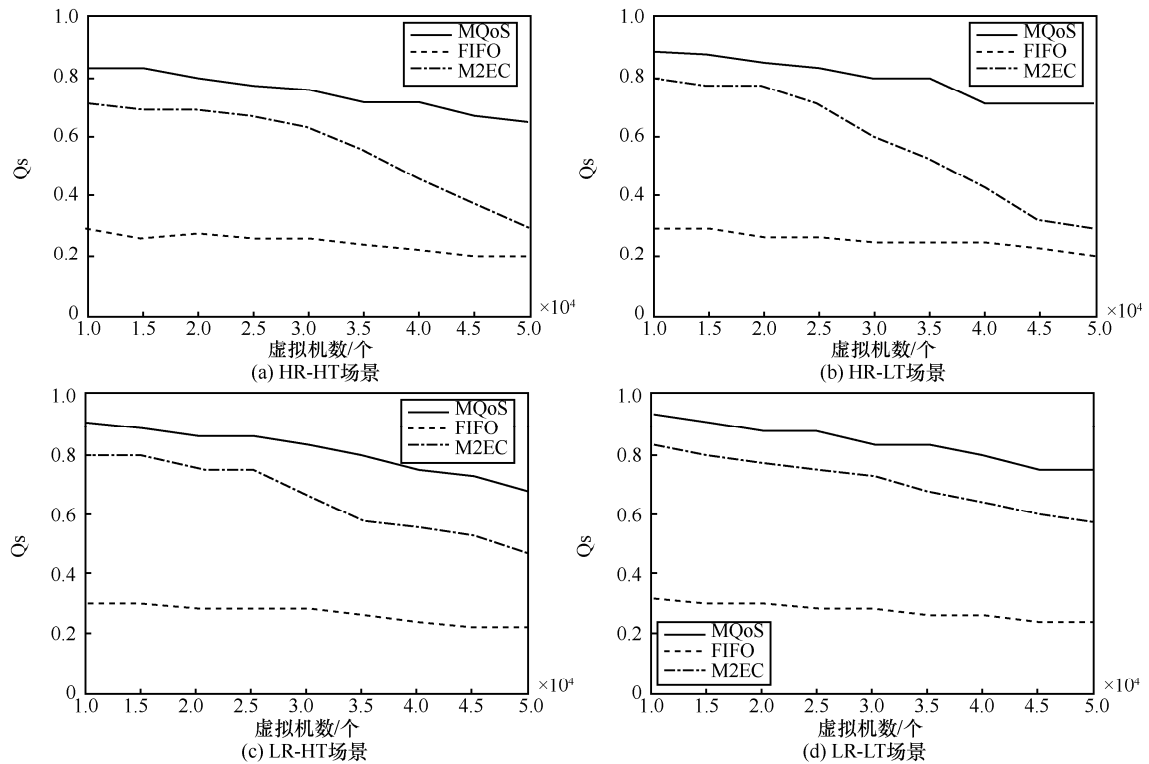


图 4 3 种调度算法在 4 种场景下不同虚拟机的多维 QoS 度

上虚拟机的负载均衡情况。衡量云数据中心负载均衡好坏由云数据中心负载均衡差 (LBD, cloud data center load balance difference) 来度量。云数据中心负载均衡差越小, 说明云计算环境中各数据中心的负载率越均衡, 数据中心的相同虚拟机类型的负载值 (即虚拟机上执行的云任务工作量与其处理能力比值) 越平衡, 越能提高云计算系统的多维 QoS 度。

云数据中心负载均衡差 LBD 为各数据中心负载率的标准差, 如式(22)所示,  $DCL_k$  为数据中心  $k$  的负载率,  $\overline{DCL}$  为 CSP 的  $n$  个 CDC 的平均数据中心负载率。

$$LBD = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{k=0}^{m-1} (DCL_k - \overline{DCL})^2} \quad (22)$$

数据中心负载率  $DCL_k$ , 如式(23)所示, 具体为云计算环境中第  $k$  个 CDC, 其执行云任务的所有虚拟机的总计算能力与 CDC 的所有物理机的总计算能力的比值,  $Cvm_{ik}$  为第  $k$  个 CDC 的第  $i$  台虚拟机的计算能力,  $Cpm_{lk}$  为第  $k$  个 CDC 的第  $l$  台物理机的计算能力。

$$DCL_k = \frac{\sum_{i=0}^{n_k^{vm}} Cvm_{ik}}{\sum_{l=0}^{n_k^{pm}} Cpm_{lk}} \quad (23)$$

在实验中主要考虑大规模多任务高并发高资源差的云计算应用场景。为了更好测试、比较, 分 2 个测试环境, 分别设置不同的 CU 规模和不同的 VM 规模, 评估 MQoS、FIFO、M2EC 这 3 种调度算法的 LBD。在不同 CU 规模下, 如图 5 所示, FIFO 云资源调度算法没有进行算法调度优化, 其数据中心负载均衡差始终偏高, LBD 数值在 0.65 以上。M2EC 多维能耗虚拟机调度算法采用改进 FFD 算法在负载均衡进行一定的调整和完善, 其数值在 [0.32, 0.59] 区间。MQoS 云资源调度算法面向 CU 和 CSP, 采用多重 Greedy 算法同时优化虚拟和物理资源调度, LBD 处于一个比较低的水平, 数值在 0.28 以下, 远优于 FIFO 云资源调度算法, 平均总体降低 0.48; 相比 M2EC 多维能耗虚拟机调度算法也有一定优势, 平均总体降低 0.20。

在不同 VM 规模下, 如图 6 所示, 和在不同 CU 规模下相似, FIFO 云资源调度算法的数据中

心负载均衡差始终偏高, LBD 数值在 0.70 以上。采用改进 FFD 算法对负载均衡有一定优化的 M2EC 多维能耗虚拟机调度算法, 其数值在 [0.41, 0.67] 区间。MQoS 云资源调度算法从多个方面优化物理和资源调度, 其处于一个较低的水平, 数值在 0.32 以下, 与 FIFO 和 M2EC 调度算法相比较, 平均总体降低 0.49 和 0.27, 均具有明显优势。

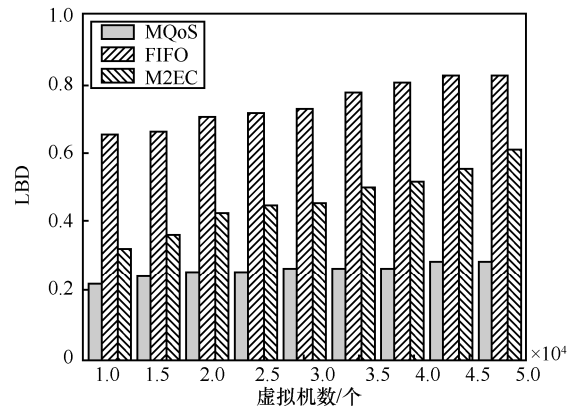


图 5 不同云用户规模, 3 种调度算法的 LBD

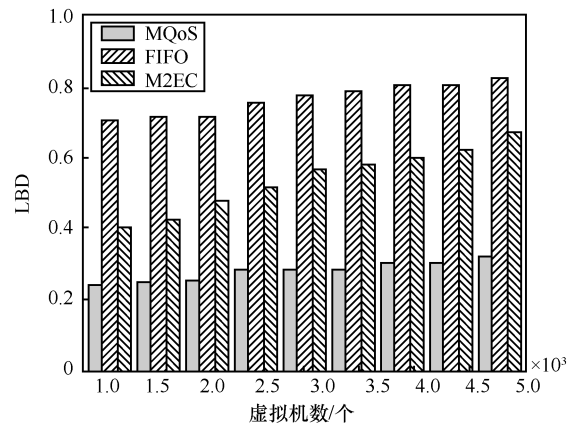


图 6 不同虚拟机规模, 3 种调度算法的 LBD

## 6 结束语

本文在大规模多任务高并发异构云环境下, 基于 CU 和 CSP 的利益相关视角, 构建多维 QoS 云计算体系结构, 建模多维 QoS 云资源调度模型, 基于多重 Greedy 算法思想设计 MQoS 云资源调度算法, 并进行云计算调度仿真实验与结果分析。实验结果表明在 4 种应用场景下 MQoS 云资源调度算法的多维 QoS 度均好于 FIFO 和 M2EC 调度算法, 特别在高任务云计算应用场景优势明显; 同时在大规模多任务高并发高资源差

的应用场景中, 分别在不同 CU 规模和不同虚拟机规模情况下, MQoS 云资源调度算法的 LBD 均优于 FIFO 和 M2EC 调度算法, 取得很好的云计算系统效用, 充分满足 CU 和 CSP 的利益。在未来的研究中, 将深入研究在大规模多用户高并发异构云计算环境中动态调整多维性能指标权重, 并考虑更细粒度虚拟机等情况下的云资源调度策略与应用。

### 参考文献:

- [1] TOPCUOGLU H, HARIRI S, WU M Y. Performance-effective and low-complexity task scheduling for heterogeneous computing[J]. *IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems*, 2002, 13(3): 260-274.
- [2] MACE J, BODIK P, MUSUVATHI M, et al. 2DFQ: two-dimensional fair queuing for multi-tenant cloud services[C] // *The ACM Special Interest Group on Data Communication*. ACM, 2016: 144-159.
- [3] GRANDL R, CHOWDHURY M, AKELLA A, et al. Altruistic scheduling in multi-resource clusters[C] // *The USENIX Symposium on Operating Systems Design and Implementation*. USENIX, 2016: 65-80.
- [4] WANG Z, HAYAT M, GHANI N, et al. Optimizing cloud-service performance: efficient resource provisioning via optimal workload allocation[J]. *IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems*, 2017, 28(6): 1689-1702.
- [5] DALVANDI A, GURUSAMY M, CHUA K. Application scheduling, placement, and routing for power efficiency in cloud data centers[J]. *IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems*, 2017, 28(4): 947-960.
- [6] 陈黄科, 祝江汉, 朱晓敏, 等. 云计算中资源延迟感知的实时任务调度方法[J]. *计算机研究与发展*, 2017, 54(2):446-456.  
CHEN H K, ZHU J H, ZHU X M, et al. Resource-delay-aware scheduling for real-time tasks in clouds[J]. *Journal of Computer Research and Development*, 2017, 54(2):446-456.
- [7] ZHANG H, CHEN L, YI B, et al. CODA: toward automatically identifying and scheduling coflows in the dark[C] // *The Conference of the ACM Special Interest Group on Data Communication*. ACM, 2016: 160-173.
- [8] GHADERI J. Randomized algorithms for scheduling vms in the cloud[C] // *The Annual IEEE International Conference on Computer Communications*. IEEE, 2016:1-9.
- [9] KULKARNI S G, ZHANG W, HWANG J, et al. NFVnice: dynamic backpressure and scheduling for NFV service chains[C] // *The Conference of the ACM Special Interest Group on Data Communication*. ACM, 2017:71-84.
- [10] GONG Y, HE B, LI D. Network performance aware optimizations on IaaS clouds[J]. *IEEE Transactions on Computers*, 2017, 66(4): 672-687.
- [11] 刘维杰, 王丽娜, 王丹磊, 等. 面向云计算平台的虚拟机同驻方法[J]. *通信学报*, 2018, 39(11):116-128.  
LIU W J, WANG L N, WANG D L, et al. Virtual machine co-residency method on cloud computing platform [J]. *Journal on Communications*, 2018, 39(11):116-128.
- [12] CHOWDHURY M, STOICA I. Efficient coflow scheduling without prior knowledge[C] // *The Conference of the ACM Special Interest Group on Data Communication*. ACM, 2015: 393-406.
- [13] DALVANDI A, GURUSAMY M, CHUA K C. Application scheduling, placement, and routing for power efficiency in cloud data centers[J]. *IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems*, 2017, 28(4): 947-960.
- [14] 李智勇, 陈少森, 杨波, 等. 异构云环境多目标 memetic 优化任务调度方法[J]. *计算机学报*, 2016, 39(2):377-390.  
LI Z Y, CHEN S M, YANG B, et al. Multi-objective memetic algorithm for task scheduling on heterogeneous cloud[J]. *Chinese Journal of Computers*, 2016, 39(2):377-390.
- [15] 沈尧, 秦小麟, 鲍芝峰. 一种云环境中数据流的高效多目标调度方法[J]. *软件学报*, 2017, 28(3): 579-597.  
SHEN Y, QIN X L, BAO Z F. Effective multi-objective scheduling strategy of dataflow in cloud[J]. *Journal of Software*, 2017, 28(3):579-597.
- [16] 徐久强, 郭雪静, 王进法, 等. CPS 资源服务模型和资源调度研究[J]. *计算机学报*, 2018, 41(10): 2330-2343.  
XU J Q, GUO X J, WANG J F, et al. Research on CPS resource service model and resource scheduling[J]. *Chinese Journal of Computers*, 2018, 41(10): 2330-2343.
- [17] REN X, ANANTHANARAYANAN G, WIERMAN A, et al. Hopper: decentralized speculation-aware cluster scheduling at scale[C] // *The ACM Special Interest Group on Data Communication*. ACM, 2015: 379-392.
- [18] CUI L, HAO Z, PENG Y, et al. Piccolo: a fast and efficient rollback system for virtual machine clusters[J]. *IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems*, 2017, 28(8): 2328-2341.
- [19] HOMSI S, LIU S, CHAPARRO-BAQUERO G A, et al. Workload consolidation for cloud data centers with guaranteed qos using request renegeing[J]. *IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems*, 2017, 28(7): 2103-2116.
- [20] CHENG D Z H, ZHOU X B, LAMA P, et al. Energy efficiency aware task assignment with DVFS in heterogeneous hadoop clusters [J]. *IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems*, 2018, 29(1):70-82.
- [21] HU Z, LI B, LUO J, et al. Time-and cost-efficient task scheduling across geo-distributed data centers[J]. *IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems*, 2018, 29(3):705-718.
- [22] DU Y, VECIANA G D. Scheduling for cloud-based computing systems to support soft real-time applications[C] // *The Conference of the ACM Special Interest Group on Data Communication*. ACM,

2016:1-9.

- [23] CUI L, CZIVA R, TSO F P, et al. Synergistic policy and virtual machine consolidation in cloud data centers[C] //The Annual IEEE International Conference on Computer Communications. IEEE, 2016:1-9.
- [24] YANG S, WIEDER P, YAHYAPOUR R, et al. Reliable virtual machine placement and routing in clouds[J]. IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems, 2017, 28(10): 2965-2978.
- [25] ADAM O, LEE Y C, ZOMAYA A Y. Stochastic resource provisioning for containerized multi-tier Web services in clouds[J]. IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems, 2017, 28(7): 2060-2073.
- [26] RAMPERSAUD S, GROSU D. Sharing-aware online virtual machine packing in heterogeneous resource clouds[J]. IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems, 2017, 28(7): 2046-2059.
- [27] 孙大为, 常桂然, 陈东, 等. 云计算环境中绿色服务级目标的分析、量化、建模及评价[J]. 计算机学报, 2013, 36(7):1509-1525.
- SUN D W, CHANG G R, CHEN D, et al. Profiling, quantifying, modeling and evaluating green service level objectives in cloud computing environments[J]. Chinese Journal of Computers, 2013, 36(7): 1509-1525.
- [28] ADDYA S K, TURUK A K, SAHOO B, et al. A game theoretic approach to estimate fair cost of VM Placement in cloud data center [J]. IEEE System Journal, 2018, 12(4):3509-3518.
- [29] ALHARBI F, TIAN Y C, TANG M L, et al. An ant colony system for energy-efficient dynamic virtual machine placement in data centers[J]. Expert System with Applications, 2019(120): 228-239.
- [30] LEBRE A, PASTOR J, SIMONET A, et al. Putting the next 500 VM

placement algorithms to the acid test: the infrastructure provider viewpoint[J]. IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems, 2019, 30(1): 204-217.

#### [作者简介]



**苏命峰** (1980- )，男，湖南宁乡人，中南大学博士生，主要研究方向为云计算、边缘计算、云-端协同计算等。



**王国军** (1970- )，男，湖南长沙人，博士，广州大学教授、博士生导师，主要研究方向为云计算、边缘计算、云-端协同计算等。



**李仁发** (1957- )，男，湖南宜章人，博士，湖南大学教授、博士生导师，主要研究方向为云计算、嵌入式系统、无线传感网等。