

# 基于蚁群优化算法的绿色云计算虚拟机迁移策略<sup>①</sup>

吕廷勤, 魏 萌

郑州师范学院 信息科学与技术学院, 郑州 450044

**摘要:** 为了提高绿色云计算的能源利用率并降低其能耗, 提出了一种基于蚁群优化算法的虚拟机迁移策略, 该策略的目标是最小化云计算中心能耗的同时保证服务质量. 首先, 通过预设资源利用率阈值, 找出低负载和过载的物理机; 然后通过迁出低负载和过载服务器节点上的虚拟机, 达到节能的目的; 最后, 根据虚拟机迁移列表, 采用蚁群优化算法快速寻找虚拟机迁移最佳物理机. 仿真结果表明, 与其他算法相比, 本文提出的迁移策略的执行时间和能耗最小.

**关键词:** 绿色云计算; 蚁群优化算法; 虚拟机迁移; 能耗优化

**中图分类号:** TP393

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1000-5471(2020)12-0078-07

云计算是一种按需付费的模式, 根据用户需求为用户提供一个由网络、服务器和存储设备等众多资源组成的共享池. 由于网络设备的激增和网络服务需求的日益增长, 使得整体网络数据流量和能耗急剧增加, 因此, 面向可持续发展的低能耗、低成本的绿色云计算模式成为未来发展的方向<sup>[1-2]</sup>. 绿色计算的概念是在 2005 年提出的, 提倡在使用信息技术硬件时考虑到电消耗、热耗散等因素, 达到降低能耗、节能环保的目标<sup>[3]</sup>. 绿色云计算是指在云计算环境中, 通过进行有效的能效管理, 在满足服务质量(Quality of Service, QoS)的同时, 解决云计算带来的环境、能耗及运营成本问题. 因此, 绿色云计算的重点不在于重新研制低能耗的基础设备, 而是从现有资源出发, 做到高效整合利用<sup>[4]</sup>.

近年来, 绿色云计算领域已经引起全球研究人员的广泛关注. 针对云计算的能耗和资源利用问题, 国内外学者取得了一系列重要的研究和应用成果. 文献[5]算法通过采用多租户方式和虚拟机实时迁移技术, 使得程序调度的功耗更低. 文献[6]针对绿色云计算中的能耗问题, 提出了一种基于任务调度的资源感知负载均衡克隆算法. 该算法在负载均衡策略中引入克隆选择原理, 解决了节能资源感知调度问题. 文献[7]提出了一种用于异构云环境的自适应任务分配算法, 该算法通过最小化云系统的完工时间来降低能耗, 促进绿色云计算. 上述方法从任务调度的方法出发, 实现了部分节能的效果, 但是没有考虑数据中心的物理结构. 数据中心的资源管理是一个具有挑战性的问题, 云数据中心接近 26% 的功耗是由物理机(physical machine, PM)或服务器引起的. 而虚拟机(virtual machine, VM)的合理配置和动态管理可以大大降低数据中心的功耗, 提高其吞吐量. 但是, VM 放置过程需要进行 VM 迁移操作, 不正确的 VM 放置可能会启动大量的 VM 迁移过程, 降低云数据中心的性能. 因此, 合理有效的虚拟机迁移也是一种实现绿色云计算节能的重要方式<sup>[8]</sup>. 文献[9]提出了一种基于学习自动机的新算法, 可以提高资源利用率并减少能耗. 所提出的算法考虑了用户需求资源的变化来估计过载现象, 通过避免 PM 过载问题的发生来减少迁移次数, 并

① 收稿日期: 2019-07-16

基金项目: 河南省教育厅青年基金项目(QN2016182).

作者简介: 吕廷勤(1972-), 女, 硕士, 讲师, 主要从事计算机应用、数据挖掘等方面的研究.

关闭了空闲 PM 以减少功耗. 但是, 它不能检测到利用率较低的 PM.

为了降低云计算数据中心的能耗, 本文提出了一种虚拟机迁移策略, 用于减少数据中心上的能耗, 平衡不同物理机之间的负载, 实现数据中心的最大效率. 该方法首先根据预设阈值判断物理机的负载情况, 然后根据负载情况, 利用虚拟机迁移技术从指定物理机中迁移虚拟任务, 以实现休眠低负载 PM 和平衡高负载 PM 的目的. 同时, 将蚁群优化算法应用到虚拟机迁移过程中, 用于快速寻找适合迁移的最佳物理机.

### 1 绿色云计算

绿色云计算其实就是云计算和绿色计算相结合的概念. 在云计算模式下, 通过构建低能耗、节约环保的计算机系统来实现云计算的可持续发展, 提高云计算资源的使用效率<sup>[10]</sup>.

#### 1.1 体系架构

绿色云计算的体系架构是在云计算体系结构的基础上, 通过融入绿色节能服务, 加入虚拟服务层能耗优化策略的新型计算模型, 其体系架构示意图如图 1 所示.

在图 1 的体系架构中, 主要包括物理资源层、虚拟服务层、绿色服务分配层和客户端应用层这 4 层. 绿色服务分配层是云计算资源设施和用户进行交互的接口, 主要服务于绿色计算, 通过任务调度和资源分配算法实现云计算资源负载平衡和合理调度, 达到系统能耗节能管理的目的. 虚拟服务层利用引入的虚拟化关键技术动态地关闭或启动虚拟机和实时的迁移虚拟机任务, 使得资源利用率得以提高, 能耗降低, 实现了绿色计算的目标.

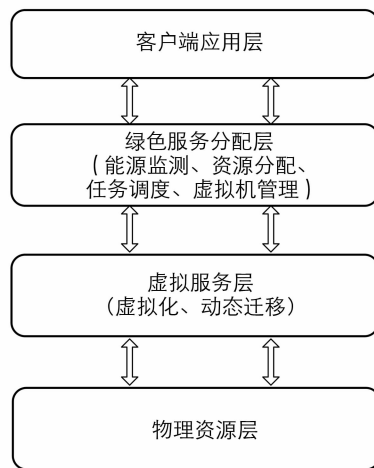


图 1 绿色云计算体系架构示意图

#### 1.2 虚拟机迁移技术

在云数据中心, 虚拟化技术使得数据中心在用户发出服务请求时, 会在物理机中分配出一些虚拟机、内存和 CPU 等资源用于处理这些请求. 物理机为每个虚拟机分配使用资源量, 单个物理机可能对应若干虚拟机. 虚拟机分布结构框架如图 2 所示.

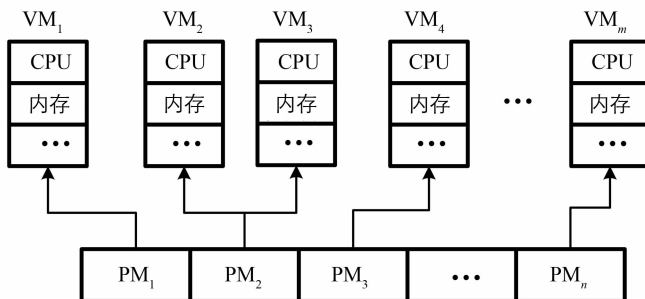


图 2 虚拟机分布结构图

由于物理机与虚拟机松散耦合, 使得虚拟机可以在任何物理机上运行, 也可迁移到其他物理机中. 迁移技术主要分为离线迁移与实时迁移两类, 而实时迁移在迁移过程中, 由于只需短暂停机而不必中止服务的特点成为目前应用最广泛的技术. 实时迁移技术的迁移过程一般包括: 监听、资源预定、预拷贝、停机拷贝和唤醒 5 个阶段. 具体虚拟机的实时迁移技术如图 3 所示.

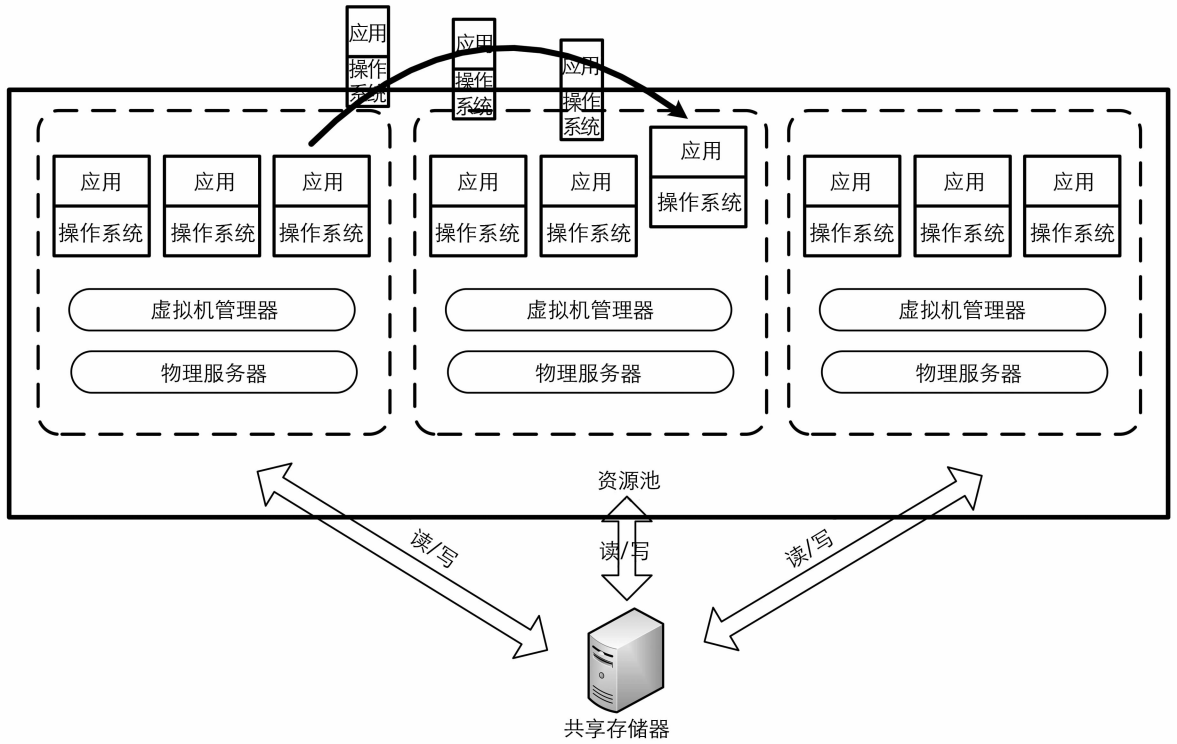


图 3 虚拟机实时迁移技术示意图

## 2 基于蚁群优化算法的迁移技术

### 2.1 蚁群优化算法

蚁群优化算法<sup>[11]</sup> (Ant Colony Optimization, ACO) 的灵感来源于自然界, 是一种元启发式的全局最优化搜索方法. 蚁群在觅食过程中, 会留下一一种称为信息素的化学物质, 在行进时, 蚂蚁总会倾向于选择信息素浓度高的路线. 假若在食物和蚁巢之间存在多条路径, 初始时每条路径上都有蚂蚁爬过, 但是经过一段时间的循环, 单位时间内最短路径上爬过的蚂蚁数量会增多, 释放信息素的量变大, 那么后续蚂蚁都会选择信息素多的路径, 从而找出最短路径.

蚁群优化算法的寻优过程大致分成移动概率计算、信息素的局部调整和全局更新几个步骤. 移动概率是指蚂蚁在运动时, 根据每条路径上信息素的量决定转移方向的可能性. 蚂蚁在  $t$  时刻从节点  $i$  移动到节点  $j$  的移动概率  $p_{i,j}(t)$  可表示为

$$p_{i,j}(t) = \begin{cases} \frac{[\tau_{i,j}(t)]^\alpha [\eta_{i,j}(t)]^\beta}{\sum_{k \in C(t)} [\tau_{i,k}(t)]^\alpha [\eta_{i,k}(t)]^\beta} & j \in C(t) \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (1)$$

其中,  $\tau_{i,j}(t)$  表示  $t$  时刻节点  $(i,j)$  上的信息素数量,  $\eta_{i,j}(t)$  表示  $t$  时刻节点  $(i,j)$  上的启发函数,  $\eta_{i,j}(t) = 1/d_{i,j}$ ,  $d_{i,j}$  表示节点  $(i,j)$  之间的欧几里得距离,  $C(t)$  表示第  $k$  只蚂蚁下一步允许选择的目的地集合,  $\alpha, \beta$  表示控制参数.

信息素的局部调整是指每只蚂蚁在建立解的过程中, 需要在经过  $s$  时刻后, 调整节点  $(i,j)$  之间的局部信息素:

$$\tau_{i,j}(t+s) = (1-\xi)\tau_{i,j}(t) + \xi\tau_0 \quad (2)$$

$$\tau_0 = 1/(nd_{\min}) \quad (3)$$

其中,  $\xi \in [0, 1]$  是控制因子,  $d_{\min}$  是最近 2 个节点的距离,  $n$  表示节点数量.

信息素的全局更新是指生成全局最优解的蚂蚁对其信息素的更新:

$$\tau_{i,j}(t+n) = (1-\rho)\tau_{i,j}(t) + \rho\Delta\tau_{i,j}(t) \quad (4)$$

$$\Delta\tau_{i,j}(t) = \sum_{k=1}^m \Delta\tau_{i,j}^k(t) \quad (5)$$

$$\Delta\tau_{i,j}^k(t) = \begin{cases} Q/L_k & \text{第 } k \text{ 只蚂蚁经过节点 } (i, j) \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (6)$$

其中,  $\rho \in [0, 1]$  是挥发系数,  $\Delta\tau_{i,j}^k(t)$  和  $\Delta\tau_{i,j}(t)$  分别表示一次循环第  $k$  只蚂蚁和  $m$  个蚂蚁在节点  $(i, j)$  处的信息素增量.

## 2.2 虚拟机迁移技术

绿色云计算是云计算存储和处理云数据的节能方法. 云计算中心的服务对象是随机选择的, 导致当前服务器节点的负载状态是随机的, 即存在一部分服务器节点负载很高和一部分服务器节点负载较低的现象. 本文虚拟机迁移目标是 minimized 云计算中心能耗的同时保证服务质量: 一方面采取让一部分资源利用率低的服务器节点进入休眠状态, 达到节能的目的; 另一方面为了避免资源过度聚合, 根据虚拟机的动态改变情况, 采用最小迁移时间的方式进行虚拟机迁移.

数据中心有  $n$  台物理机和  $m$  台虚拟机, 在虚拟机资源总和不超过物理机资源上限的前提下, 最小总耗能可以被描述为

$$\begin{aligned} & \arg \min \sum_{i=1}^n p_i \\ & s. t. \quad x_{i,j} = \begin{cases} 1 & h(j) = i \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \\ & \sum_{i=1}^n x_{i,j} = 1 \quad 1 \leq j \leq m \\ & \sum_{j=1}^m x_{i,j} v_{j,l} \leq q_{i,l} \quad 1 \leq i \leq n, 1 \leq l \leq k \end{aligned} \quad (7)$$

其中,  $h(j)$  表示虚拟机  $j$  所在的物理机,  $q_{i,l}$  表示物理机  $i$  的第  $l$  个资源,  $v_{j,l}$  表示虚拟机  $j$  的第  $l$  个资源.  $p_i$  是物理机  $i$  的能耗量, 由于 CPU 是决定物理机电能能耗的主要因素, 因此物理机  $i$  的能耗量可由下式计算得到:

$$p_i = p_{\min} + (p_{\max} - p_{\min}) \times u_i \quad (8)$$

其中,  $u_i$  表示物理机  $i$  的 CPU 利用率,  $p_{\max}$ ,  $p_{\min}$  分别表示物理机  $i$  在  $u_i$  最大和空闲状态下的能耗.

虚拟机迁移问题可以分成迁移触发、迁移策略和迁移方向 3 个子问题.

1) 迁移触发: 首先设定资源利用率上限和下限阈值  $U_{up}$ ,  $U_{down}$ , 当 CPU 利用率大于  $U_{up}$  时, 表示物理机处于过载状态, 需要迁出部分虚拟机以避免降低用户体验; 当 CPU 利用率小于  $U_{down}$  时, 表示物理机处于低负载状态, 为了关闭物理机, 降低能耗, 需要迁出所有虚拟机. CPU 的性能由单字长定点指令平均执行速度 (Million Instructions Per Second, MIPS) 指标来衡量.

2) 迁移策略: 在低负载情况下, 由于将虚拟机全部迁出, 不需要制定迁移策略; 但是过载情况时, 主机中的虚拟机采用最小迁移时间 (Minimum Migration Time, MMT) 策略进行迁移, 即将总迁移时间最大的虚拟机留在原物理机上:

$$\begin{aligned} & \arg \max \sum_j x_{i,j} m t_j \\ & s. t. \quad \sum_j x_{i,j} u_{i,j} \leq U_{up} \end{aligned} \quad (9)$$

其中,  $mt_j$  表示迁移时间,  $u_{i,j}$  表示虚拟机  $j$  占用的 CPU 与物理机  $i$  的总 CPU 之间的比值.

对于 MMT 问题, 本文采用贪心算法进行求解, 解决步骤为: 首先根据迁移时间和 MIPS 指标的比值, 将虚拟机按非降序排列, 然后依次选择迁出虚拟机, 直到物理机的 CPU 利用率降到  $U_{up}$  之下.

3) 迁移方向: 采用蚁群优化算法来判断虚拟机的迁移方向. 首先, 将虚拟机的状态信息记录到蚂蚁的内存后, 蚂蚁进行移动. 蚂蚁在搜索服务器时根据节点信息素浓度来选择下一个移动的节点. 在以往的蚁群算法文献中, 路径选择的概率大小由信息素决定, 但是在本文的虚拟机迁移问题中, 假设蚂蚁经过的路径节点已经进行了负载均衡优化操作, 为了使蚂蚁可以尽力搜索所有的节点, 确保整体负载均衡, 在利用蚁群优化算法时认为信息素越大的节点被选择移动的概率越小. 因此, 式子(1)和(5)修改为

$$p_{i,j}(t) = \begin{cases} \frac{[1/\tau_{i,j}(t)]^\alpha [\eta_{i,j}(t)]^\beta}{\sum_{k \notin C(t)} [1/\tau_{i,k}(t)]^\alpha [\eta_{i,k}(t)]^\beta} & j \notin C(t) \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (10)$$

$$\Delta\tau_{i,j}(t) = \begin{cases} \frac{1}{[u_{i,j}(t)]^\gamma} + [L_{j,pm}(t)]^\lambda & \text{从 } i \text{ 移向 } j \text{ 节点} \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (11)$$

其中,  $L_{j,pm}(t)$  表示  $t$  时刻节点  $j$  的负载均衡值.

下面给出本文方法的算法伪码:

#### 算法 1. 用于迁移过程的虚拟机和物理机的选择

输入: 主机、虚拟机、虚拟服务器

输出: 迁移策略

- ① 程序启动;
- ② 获取所有物理机上工作的虚拟机列表;
- ③ 获取所有虚拟机的资源利用率和迁移时间;
- ④ 获得低负载和过载的物理机列表;
- ⑤ 调用贪心算法, 寻找过载物理机迁移的最佳虚拟机;
- ⑥ 获取每个过载主机迁移的最佳虚拟机列表;
- ⑦ 在可用于迁移的物理机和需要迁移的虚拟机上建立过渡矩阵;
- ⑧ 重复迁移操作, 直到迁移低负载和过载物理机上的所有虚拟机;
- ⑨ 启动信息素  $\tau_{i,j}$ , 计算每个物理机低负载和过载的概率;
- ⑩ 比较每个物理机和其他物理机低负载和过载的概率, 为下一次迭代更新信息素做准备;
- ⑪ 更新信息素, 直到搜索到执行任务的最佳物理机;
- ⑫ 根据迁移列表, 将虚拟机迁移到最佳物理机;
- ⑬ 如果任何主机的 CPU 利用率超过上限, 转到步骤⑤;
- ⑭ 结束.

### 3 实验结果与分析

为了验证本文方法的有效性, 采用云仿真平台 CloudSim 作为实验仿真工具进行测试. 为了验证提出算法的优越性, 本文将与其他优秀绿色云计算环境中虚拟机迁移算法进行对比: 绿色云调度算法(GCS)<sup>[6]</sup>、基于学习自动机的过载检测算法(LAOD)<sup>[9]</sup>、和基于人工蜂群—蝙蝠算法的虚拟机迁移算法(ABC-BA)<sup>[13]</sup>.

首先, 给出仿真系统的基本性能设置, 如表 1 所示. 系统中虚拟机数量范围设置在 10~80, 步长增加为 10, 将资源利用率设置为  $U_{down} = 0.2$ ,  $U_{up} = 0.8$ .

表 1 基本性能设置

物理机数量	299
物理机内存	16GB
物理机处理器	Xenon
应用数量	99
数据中心数量	5
VM 尺寸	2500 Mb

图 4 和图 5 给出了不同迁移算法的执行时间和能耗对比. 从图中可以看出, 本文提出的算法在能耗和执行时间方面优于其他算法. 除此之外, 还可以发现, 随着虚拟机数量的增加, 执行时间和能耗也在稳步增加.

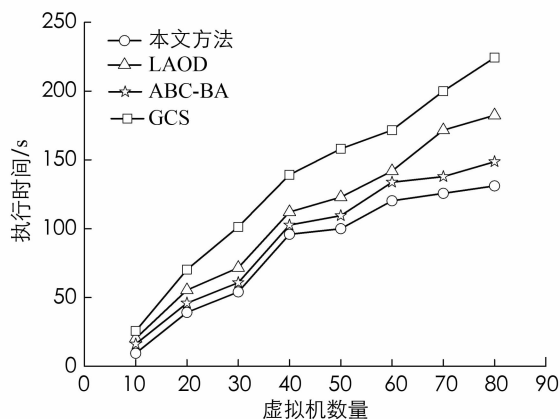


图 4 不同迁移算法的执行时间对比

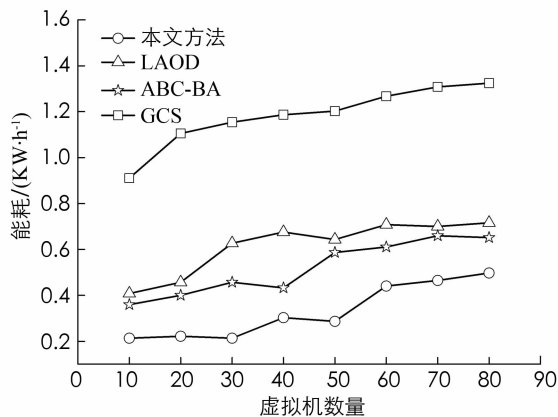


图 5 不同迁移算法的能耗对比

## 4 结 论

为了实现绿色云计算, 降低数据中心的能耗, 提出了一种基于蚁群优化算法的虚拟机迁移策略, 该策略的目标是使云计算中心的能耗最小化. 基于此思路, 一方面将资源利用率低的服务器节点进入休眠状态, 达到节能的目的, 另一方面以最小迁移时间的方式迁移虚拟机, 以避免资源过度聚合时的时间和能量消耗. 根据虚拟机迁移列表, 采用蚁群优化算法快速寻找虚拟机迁移最佳方式. 实验结果表明, 本文提出的迁移策略在能耗和执行时间方面明显优于其他算法.

## 参考文献:

- [1] MORENS, INGLE R. Challenges in Green Computing for Energy Saving Techniques [C] //2017 International Conference on Emerging Trends & Innovation in ICT (ICED). Beijing, China: IEEE, 2017: 73-76.
- [2] BATALLA J M, VASILAKOS A, GAJEWSKI M. Saving Techniques Secure Smart Homes: Opportunities and Challenges [J]. ACM Computing Surveys (CSUR), 2017, 50(5): 75.
- [3] ZHOU R T, LI Z P, WU C. A Truthful Online Mechanism for Location-Aware Tasks in Mobile Crowd Sensing [J]. IEEE Transactions on Mobile Computing, 2018, 17(8): 1737-1749.
- [4] TIAN J, MA Y. Load Balancing Method Based on a Performance and Power Ratio [C]//2018 13th Asia Joint Conference on Information Security (AsiaJCIS). Guilin, China: IEEE, 2018: 75-82.
- [5] 王以伍, 陈跃辉. 数据中心中能量与 QoS 保障的虚拟机部署 [J]. 计算机应用与软件, 2019, 36(5): 51-57.
- [6] RAO G J, BABU G S. Energy Analysis of Task Scheduling Algorithms in Green Cloud [C]//2017 International Conference on Innovative Mechanisms for Industry Applications (ICIMIA). Bangalore, India: IEEE, 2017: 302-305.
- [7] LU Y, SUN N. An Effective Task Scheduling Algorithm Based on Dynamic Energy Management and Efficient Resource Utilization in Green Cloud Computing Environment [J]. Cluster Computing, 2019, 22(1): 513-520.

- [8] MISHRA S K, PUTHAL D, SAHOO B, et al. An Adaptive Task Allocation Technique for Green Cloud Computing [J]. *The Journal of Supercomputing*, 2018, 74(1): 370-385.
- [9] RANJBARI M, AKBARIT J. A Learning Automata-based Algorithm for Energy and SLA Efficient Consolidation of Virtual Machines in Cloud Data Centers [J]. *Journal of Parallel and Distributed Computing*, 2018, 113: 55-62.
- [10] 吴小东, 韩建军. 云数据中心基于阈值的虚拟机迁移节能调度算法 [J]. *华中科技大学学报(自然科学版)*, 2018, 46(9): 30-34.
- [11] ZHANG Y, YU Y L, ZHANG S L, et al. Ant Colony Optimization for Cuckoo Search Algorithm for Permutation Flow Shop Scheduling Problem [J]. *Systems Science & Control Engineering*, 2019, 7(1): 20-27.
- [12] KARTHIKEYAN K, SUNDER R, SHANKAR K, et al. Energy Consumption Analysis of Virtual Machine Migration in Cloud Using Hybrid Swarm Optimization (ABC-BA) [J]. *The Journal of Supercomputing*, 2020, 76(5): 3374-3390.

## Migration Strategy of Green Cloud Computing Virtual Machine Based on Ant Colony Optimization Algorithm

LÜ Ting-qin, WEI Meng

*School of Information Science and Technology, Zhengzhou Normal University, Zhengzhou 450044, China*

**Abstract:** In order to improve the energy efficiency of green cloud computing and reduce its energy consumption, a virtual machine migration strategy based on ant colony optimization algorithm has been proposed. The goal of this strategy is to minimize the energy consumption of cloud computing center while ensuring service quality. Firstly, low-load and overloaded physical machines are identified by presupposing resource utilization threshold; then, energy-saving is achieved by moving out virtual machines on low-load and overloaded server nodes; and finally, according to the virtual machine migration list, ant colony optimization algorithm is used to quickly find the best physical machines for virtual machine migration. The simulation results show that compared with other algorithms, the proposed migration strategy has the least execution time and energy consumption.

**Key words:** green cloud computing; ant colony optimization; virtual machine migration; energy optimization

责任编辑 崔玉洁