

基于灰色关联度的云计算虚拟机分配方法

何 丽*

(天津财经大学 信息科学与技术系, 天津 300222)

(* 通信作者电子邮箱 renke21@vip.sina.com)

摘 要:针对云计算系统中资源利用率提高和系统能耗降低之间的协调问题,提出了一种新的基于灰色关联度的虚拟机分配方法,应用灰色关联度的基本理论建立了基于服务层协议(SLA)违背率、系统能耗和服务器负载评价函数的虚拟机分配决策模型,构造了基于灰色关联度的虚拟机分配算法,并在 CloudSim 仿真平台上进行了实验。实验结果表明,与传统的基于简单线性权重的多目标优化方法相比,在不同的虚拟机选择策略下,基于灰色关联度的虚拟机分配方法在系统能耗、SLA 违背率和虚拟机迁移次数上平均降低了 6.8%、5.2% 和 15.5%。因此,所提方法在不同的虚拟机选择策略下能够大幅度减少虚拟机迁移次数,较好地满足系统在能耗和 SLA 违背率上的优化需求。

关键词:云计算;虚拟机分配;灰色关联度;多目标决策;虚拟机迁移

中图分类号: TP316 **文献标志码:** A

Virtual machine allocation method based on gray correlation degree in cloud computing

HE Li*

(Department of Information Science and Technology, Tianjin University of Finance and Economics, Tianjin 300222, China)

Abstract: For the balancing problem of improving resource utilization and reducing energy consumption in cloud computing system, a new virtual machine allocation method based on gray correlation degree was proposed. By using the basic theory of gray correlation, the author established an allocation model of virtual machines based on the evaluation functions of Service Level Agreement (SLA) violation rate, system energy consumption and server load, constructed the virtual machine allocation algorithm based on gray correlation degree, and experimented on the platform of CloudSim. The experimental results show that, compared with the traditional multi-objective optimization method based on the simple linear weight, the virtual machine allocation method based on gray correlation degree can achieve average decrease by 6.8%, 5.2% and 15.5% in the system energy consumption, the SLA violation rate and the migrating number of virtual machines under different virtual machine selection strategies. Thus, the proposed method under different virtual machine selection strategies can greatly reduce the migrating number of virtual machines, and meets the demand of system optimization on the energy consumption and SLA violation rate preferably.

Key words: cloud computing; virtual machine allocation; gray correlation degree; multi-objective decision-making; virtual machine migration

0 引言

云计算作为一种新的计算模式,它通过虚拟化技术将系统资源以服务的方式提供给使用者,以实现数据中心的资源共享。随着云计算数据中心规模的不断扩大,越来越多的应用被部署到数据中心,使得虚拟机动态管理的复杂性不断增加。因此,提高云计算系统资源的使用效率,降低虚拟机动态管理的成本成为了云计算系统面临的关键问题。为解决这样的问题,学者们从不同的角度提出了多种不同的虚拟机动态管理方法。目前,虚拟机动态管理方法可分为两种:一种方法是使用虚拟机动态迁移方法;另一种方法是使用自适应的方法动态调整虚拟机的资源配置。前者在满足云计算系统服务质量的前提下,用尽可能少的服务器来支撑虚拟机的运行;后者则根据应用负载的变化,动态调整虚拟机的资源配置,以实现虚拟机动态管理的目标。国内外学者针对云计算环境中的虚拟机动态管理进行了大量的研究。在热迁移方面,基于能

耗感知和最小迁移成本的虚拟机迁移方法能够较好地满足虚拟机动态管理的目标,该方法使用能量效率合作和优化的方法可以有效降低数据中心的能耗^[1-4];文献[5]还提出了一种基于服务转移的能耗控制框架,以达到降低系统运行能耗的目标。在虚拟机资源动态调整方面,文献[6]提出了一种基于神经网络的应用负载预测算法,并根据预测结果决定服务器的状态,实现能耗优化;文献[7]提出一种基于服务级目标的虚拟化资源管理方法,该方法应用反馈控制理论动态调整虚拟机的资源配置;文献[8]构造了具有服务级目标约束的虚拟机分配多目标优化遗传算法,建立了虚拟机分配的自适应管理框架,以实现虚拟机动态管理的目标。

在虚拟机动态管理方面,相关研究成果能够在系统性能和能耗之间获得一定的平衡,具有一定的实用性。但是,这些研究大都是从能耗和服务层协议(Service Level Agreement, SLA)的优化出发,忽略了服务器负载对能耗和虚拟机动态管理成本的影响。实际上,由于服务器应用负载的变化和服务

器的异构特征,服务器负载、能耗和 SLA 违背率之间的关系是密切的。因此,本文在借鉴相关文献研究成果的基础上,将服务器负载引入了虚拟机动态管理决策模型中,提出并实现了基于灰色关联度的虚拟机分配算法。

1 灰色关联度的基本理论

灰色系统理论可以解决信息不完全和不确定环境下的多目标决策问题。

1.1 决策矩阵及其初始化

假设多目标决策问题有 m 个候选方案和一个理想方案, n 个评价指标。用 $X = \{x_1, x_2, \dots, x_m\}$ 表示候选方案集,用 x_0 表示理想方案,并用 x_{ij} 表示候选方案 x_i 中的第 j 个指标的值,则称由所有方案和指标值构成的矩阵为决策矩阵。为方便描述,将该决策矩阵用 $A = (x_{ij})_{(m+1) \times n}$ 表示。在灰色系统理论中,指标一般分为效益型指标、成本型指标和适中型指标 3 种类型。其中,效益型指标的值越大越优,成本型指标的值越小越好,适中型指标的值适中为好。若用 x_{0j} 表示理想方案 x_0 中的第 j ($1 \leq j \leq n$) 个指标值,则根据不同的指标类型,将 x_{0j} 的值定义如下:

$$x_{0j} = \begin{cases} \min(x_{1j}, x_{2j}, \dots, x_{mj}), & j \in I_1, 1 \leq i \leq m \\ \max(x_{1j}, x_{2j}, \dots, x_{mj}), & j \in I_2, 1 \leq i \leq m \\ \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m x_{ij}, & j \in I_3, 1 \leq i \leq m \end{cases} \quad (1)$$

其中 I_1 、 I_2 和 I_3 分别表示成本型指标、效益型指标和适中型指标的下标集合。

为了使不同指标值之间具有可比性,一般需要对各指标值进行无量纲化处理。对 A 中的每个指标值 x_{ij} ,用 x'_{ij} 表示 x_{ij} 去量纲后的值,根据灰色理论,令:

$$x'_{ij} = \begin{cases} x_{0j}/x_{ij}, & j \in I_1 \\ x_{ij}/x_{0j}, & j \in I_2 \\ \min(x_{0j}, x_{ij})/\max(x_{0j}, x_{ij}), & j \in I_3 \end{cases} \quad (2)$$

其中: I_1 、 I_2 和 I_3 含义同式(1), $x'_0 = (1, 1, \dots, 1)$ 为理想方案。

1.2 关联度计算

对无量纲化处理后 A 中的理想方案 x'_0 和第 i ($1 \leq i \leq m$) 个候选方案 x'_i ,若用 r_{ij} 表示 x'_0 和 x'_i 在第 j ($1 \leq j \leq n$) 个指标上的关联系数,根据灰色理论将 r_{ij} 的计算模型定义^[9] 如式(3):

$$r_{ij} = \frac{\min_{1 \leq i \leq m} \min_{1 \leq j \leq n} |x'_{ij} - x'_{0j}| + \rho \max_{1 \leq i \leq m} \max_{1 \leq j \leq n} |x'_{ij} - x'_{0j}|}{|x'_{ij} - x'_{0j}| + \rho \max_{1 \leq i \leq m} \max_{1 \leq j \leq n} |x'_{ij} - x'_{0j}|} \quad (3)$$

其中 $\rho \in (0, 1)$ 称为分辨系数,一般在 0.1 至 0.5 取值。 $R = (r_{ij})_{m \times n}$ ($0 \leq i \leq m, 1 \leq j \leq n$) 称为灰色关联矩阵。关联系数反映了候选方案与理想方案在各个指标上的相似程度。若用 r_{0i} 表示候选方案 x'_i 与理想方案 x'_0 之间的关联度,不失一般性,可以用均值法求 r_{0i} ,则有式(4):

$$r_{0i} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n r_{ij} \quad (4)$$

r_{0i} 的值表示 x'_i 与 x'_0 之间的相似程度, r_{0i} 的值越大,表示 x'_i 与 x'_0 之间的相似度也越大。因此,关联度最大的候选方案即为当前决策问题的最优方案。

2 基于灰色关联度的虚拟机分配算法

虚拟机分配的时机有两种:一种是虚拟机的初始分配;另

一种是热迁移过程中的虚拟机分配,本文关注的是后者。热迁移过程中的虚拟机分配应该在满足系统服务质量的前提下,尽可能降低系统能耗和分配成本。实验发现,系统服务质量和能耗不仅与服务器的 CPU 利用率相关,服务器的负载状态也会影响系统能耗和虚拟机的热迁移成本。因此,本文将服务器负载引入了虚拟机分配决策模型中,用 SLA 违背率来描述服务质量,从服务器的 SLA 违背率、能耗和负载 3 个方面来构造热迁移过程中虚拟机分配的决策模型。

2.1 指标评价函数

2.1.1 SLA 违背率评价函数

SLA 违背率定义为服务器上所有虚拟机请求的 MIPS (Million Instructions Per Second) 与实际分配给这些虚拟机的 MIPS 之差除以这些虚拟机请求的 MIPS。SLA 违背率越大,系统的服务质量越差。服务器的 SLA 违背率与其 CPU 利用率密切相关,当 CPU 利用率增大时,SLA 违背率也将随之增加;并且当服务器的 CPU 利用率超过设定的上限阈值时,SLA 违背率会快速上升。若服务器的 CPU 利用率和上限阈值分别用 u_c 和 U_{cmax} 表示,根据 SLA 与 CPU 利用率之间的关系,将 SLA 违背率评价函数定义如式(5) 所示:

$$f_{sla}(u_c) = \ln(2 + u_c - U_{cmax}) \quad (5)$$

f_{sla} 的值会随着 u_c 的增加而增大, u_c 位于区间 $[0, 1]$, f_{sla} 在 0.2 ~ 0.8 变化。

2.1.2 能耗评价函数

服务器在执行指令过程中产生的功率称为服务器的执行功率。CPU 利用率为 1 时服务器的执行功率称为峰值功率, CPU 利用率为 0 时服务器的执行功率称为空闲功率,空闲功率与峰值功率的比值一般在 0.7 左右。服务器的执行功率随着其 CPU 利用率的变化在空闲功率和峰值功率之间动态变化。若用 P_{max} 表示峰值功率,用 u_c 表示 CPU 利用率,用参数 α 表示空闲功率与峰值功率的比值,根据服务器执行功率和能耗之间的关系,将服务器的能耗评价函数定义如式(6) 所示:

$$f_{power}(u_c) = \frac{\alpha \times P_{max} + (1 - \alpha) \times P_{max} \times u_c}{P_{max} \times u_c} \quad (6)$$

f_{power} 的值在 0 ~ 1 变化,并且 f_{power} 随 u_c 的增大而增大。

2.1.3 负载评价函数

服务器负载可以用其 CPU、内存和网络带宽等资源的利用率来衡量,资源的利用率越高,服务器的负载越大。在服务器数量一定的情况下,保持服务器负载的相对均衡可以大幅度减少虚拟机的热迁移次数,降低虚拟机迁移的总成本。本文将服务器负载评价函数定义如式(7) 所示:

$$f_{load}(u_c, u_m, u_b) = 1/((1 - u_c^2) \times (1 - u_m^2) \times (1 - u_b^2)) \quad (7)$$

其中: u_c 、 u_m 和 u_b 分别表示服务器的 CPU 利用率、内存利用率和网络带宽利用率; f_{load} 表示服务器的负载状态, f_{load} 值越大表示服务器的负载也越大。为保持负载平衡,虚拟机分配时应尽可能选择负载小的服务器作为新的宿主。为避免式(7) 中出现分母为 0 的情况,规定 u_c 、 u_m 和 u_b 的值不大于 0.99。

2.2 基于灰色关联度的虚拟机分配算法

2.2.1 决策模型

虚拟机分配是为迁移虚拟机寻找新宿主的过程,提高服务质量和降低系统能耗是虚拟机分配的主要目标,而系统服务质量的提高和能耗降低这两个目标存在一定的冲突。为降低系统能耗,可以选择让服务器在高负载状态下运行,以便让

更多的服务器处于睡眠状态;而高负载会使服务器的 SLA 违背率上升,导致系统服务质量的下降。此外,服务质量和能耗还与服务器的负载状态存在潜在的关联。在虚拟机分配中引入服务器负载评价指标,不仅可以实现服务器的负载均衡,还可以减少虚拟机的热迁移次数,降低虚拟机热迁移过程中服务器的 CPU 利用率损耗。因此,虚拟机分配问题是一个多目标决策问题。应用灰色关联度决策方法解决不确定环境下的多目标决策问题具有样本数据小、使用灵活等优点。对热迁移过程中每个待分配的虚拟机 vm ,可以使用基于灰色关联度的多目标决策方法为 vm 选择新的宿主,实现虚拟机分配的目标。

本文使用虚拟机分配前后服务器的 SLA 违背评价价值的变化量、能耗评价价值的变化量,以及分配前服务器的负载评价价值作为虚拟机分配决策模型的评价指标。为方便描述,分别用 ΔFS 、 ΔFP 和 FL 来表示这些指标,它们的计算公式定义如式(9):

$$\begin{cases} \Delta FS = f_{sla}(u_c') - f_{sla}(u_c) \\ \Delta FP = f_{power}(u_c') - f_{power}(u_c) \\ FL = f_{load}(u_c, u_m, u_b) \end{cases} \quad (9)$$

其中: u_c 、 u_m 和 u_b 分别表示分配前服务器的 CPU 利用率、内存利用率和网络带宽利用率; u_c' 表示分配后服务器的 CPU 利用率。根据灰色系统中成本型指标的定义, ΔFS 、 ΔFP 和 FL 均为成本型指标。根据云计算系统中虚拟机动态管理的目标,将虚拟机分配的决策模型定义如式(10):

$$\begin{aligned} & \min_{i=1}^M w_s \times \Delta FS + w_p \times \Delta FP + w_l \times FL \quad (10) \\ \text{s. t. } & \sum_{j=1}^n vm_j \cdot VCpu \times B_{ij} \leq S_i \cdot SCpu \\ & \sum_{j=1}^n vm_j \cdot VMem \times B_{ij} \leq S_i \cdot SMem \\ & \sum_{j=1}^n vm_j \cdot VBw \times B_{ij} \leq S_i \cdot SBw \\ & \sum_{i=1}^m B_{ij} = 1 \\ & w_s + w_p + w_l = 1 \end{aligned}$$

其中: w_s 、 w_p 和 w_l 分别表示服务器的 SLA 违背率、能耗和负载在决策模型中的权重; $SCpu$ 、 $SMem$ 和 SBw 分别表示服务器 S_i 的 CPU 能力、内存容量和网络带宽; $VCpu$ 、 $VMem$ 和 VBw 分别表示虚拟机 vm_j 申请的 MIPS、内存容量和网络带宽; B_{ij} ($1 \leq i \leq m, 1 \leq j \leq n$) 等于 0 或 1。当 vm_j 在 S_i 上运行时 B_{ij} 等于 1; 否则, B_{ij} 等于 0。

2.2.2 虚拟机分配算法

假设系统中有 m 个候选服务器,待分配的虚拟机为 vm ,应用灰色关联度决策方法可以将 vm 分配问题描述为一个具有 m 个候选方案和 n ($n = 3$) 个指标的多目标决策问题。在分配过程中,规定 vm 不能放到它迁移前的宿主服务器上,并且规定每个服务器一次只能接收一个虚拟机,算法描述如算法 1。

算法 1 虚拟机分配算法。

Input: 候选方案集 $X = \{x_1, x_2, \dots, x_m\}$ 、评价指标数 n 、指标权重向量 $w = \{w_1, w_2, \dots, w_n\}$ 、 vm 和分辨系数 ρ 。

Output: vm 新的宿主 x_p 。

Steps:

1) $k = vm.getHost()$; // k is the host of vm before migration

```

2) FOR ( $i = 1$  to  $m$ ) && ( $i \neq k$ ) DO
     $u_c = S_i.getUtilizationOfCpuMips()$ ;
     $u_m = S_i.getUtilizationOfRam()$ ;
     $u_b = S_i.getUtilizationOfBw()$ ;
     $vmReqMips = vm.getCurrentRequestedTotalMips()$ ;
     $u_c' = (u_c \times S_i.getTotalMips +$ 
         $vmReqMips) / S_i.getTotalMips$ ;
     $x_{i1} = f_{sla}(u_c') - f_{sla}(u_c)$ ;
     $x_{i2} = f_{power}(u_c') - f_{power}(u_c)$ ;
     $x_{i3} = f_{load}(u_c, u_m, u_b)$ ;
3) FOR  $j = 1$  to  $n$  DO
     $x_{0j} = \min(x_{1j}, x_{2j}, \dots, x_{mj})$ ;
4) FOR ( $i = 1$  to  $m$ ) && ( $j = 1$  to  $n$ ) DO
     $x_{ij} = x_{0j} / x_{ij}$ ;
5)  $x_0 = (1, 1, \dots, 1)$ ;
6)  $\Delta max = \max_{i=1}^m \max_{j=1}^n |x_{ij} - x_{0j}|$ ;
7)  $\Delta min = \min_{i=1}^m \min_{j=1}^n |x_{ij} - x_{0j}|$ ;
8) FOR ( $i = 1$  to  $m$ ) && ( $j = 1$  to  $n$ ) DO
     $dist = \text{abs}(x_{ij} - x_{0j})$ ;
     $r_{ij} = \frac{\Delta min + \rho \Delta max}{dist + \rho \Delta max}$ ;
9) FOR ( $i = 1$  to  $m$ ) && ( $i \neq k$ ) DO
     $r_i = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n w_j \times r_{ij}$ ;
10)  $GR = (r_1, r_2, \dots, r_m)$ ;
11) sort Descending( $GR$ );
12) FOR  $i = 1$  to  $m$  DO
    IF  $S_i.isSuitableForVm(vm)$  THEN
         $x_p = S_i$ ; break;
13) return  $x_p$ ;

```

3 实验

3.1 实验设计

为验证基于灰色关联度虚拟机动态分配算法的有效性,本文在 CloudSim 平台上进行了仿真实验^[10]。仿真系统配置了 50 个服务器,150 个虚拟机。服务器的 MIPS 为 2 000 和 3 000,内存为 4 096 MB,带宽为 1 Gb/s;虚拟机的 MIPS 为 500,750,1 000 和 1 500,内存为 600 MB、1 750 MB、50 MB、850 MB,带宽为 100 Mb/s。服务器的峰值功率设为 250 W,空闲功率与峰值功率的比值设为 0.7,CPU 利用率的上限阈值和下限阈值分别设为 0.8 和 0.2,分辨系数设为 0.5。仿真实验分别使用最少迁移时间 (Minimum Migrating Time, MMT)、最少虚拟机迁移数 (Minimum Migrating Number of Virtual Machines, MMNVM) 和随机选择 (Random Selection, RS) 3 种虚拟机选择策略,并在每种虚拟机选择策略下实现了 5 种虚拟机动态分配算法:基于灰色关联度的多目标优化 (Multiple Objective optimization based on Gray Relation Degree, MO_GRD)、基于最小能耗的单目标优化 (Single Objective optimization based on Minimum Energy Consumption, SO_MEC)、基于最小 SLA 违背率的单目标优化 (Single Objective optimization based on Minimum SLA Violation, SO_SLAV)、基于最小负载的单目标优化 (Single Objective optimization based on Minimum Load, SO_ML) 和基于线性权重的多目标优化 (Multiple Objective optimization based on Linear Weight, MO_LW)。不失一般性,实验中将 MO_LW 的 3 个权重分别设为 1/3、1/3 和 1/3。实验目的是分析虚拟机动态分

配后系统的平均 SLA 违背率、能量消耗和虚拟机迁移总数。

3.2 实验结果分析

降低系统能耗和 SLA 违背率是虚拟机动态管理的两个主要目标。从图 1 可以看出,MO_GRD 在能耗优化上的结果明显优于 SO_ML 和 MO_LW,接近 SO_MEC。同时,实验结果还发现,SO_MEC 和 SOM_SLAV 在能耗优化上的结果比较接近,产生该结果主要是因为能耗和 SLA 违背率评价函数的变化趋势与服务器 CPU 利用率的变化趋势相同。对某个服务器来说,CPU 利用率的降低会降低其运行能耗,同时也使其 SLA 违背率降低。

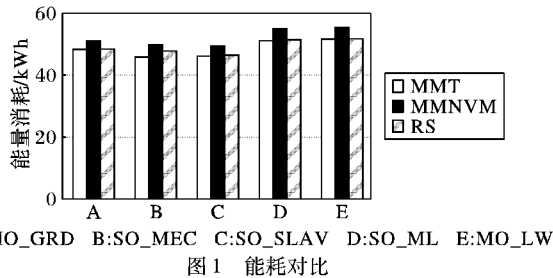


图1 能耗对比

在 SLA 违背率上,本文使用平均 SLA 违背率作为分析目标。平均 SLA 违背率定义为所有虚拟机请求的 MIPS 与实际分配的 MIPS 之差除以所有虚拟机请求的 MIPS。从图 2 中可以看出,MO_GRD 的实验结果与 SO_SLAV 非常相近,比其他虚拟机分配算法在 SLA 指标上的优化效果更好。因此,在 SLA 指标上 MO_GRD 能够获得较好的优化结果。

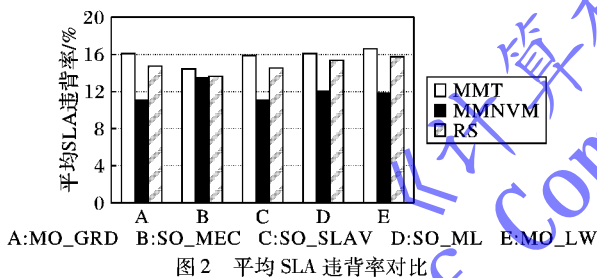


图2 平均 SLA 违背率对比

另外,为了验证不同虚拟机分配策略对虚拟机分配成本的影响,实验还比较了不同虚拟机分配策略下的虚拟机迁移的总次数。虚拟机迁移次数越多,迁移过程中产生的 CPU 利用率损耗会越大,迁移成本也相应增加。因此,减少热迁移过程中的虚拟机迁移次数也是虚拟机动态管理的一个重要目标。从图 3 中可以看出,MO_GRD 在不同的虚拟机选择策略下都能获得最少的虚拟机迁移次数。

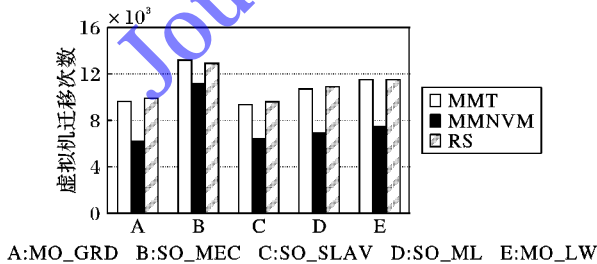


图3 虚拟机迁移次数对比

4 结语

本文从降低系统能耗,提高服务质量和减少迁移次数的虚拟机动态管理目标出发,建立了面向服务器 SLA 违背率、能耗和服务器负载的单目标评价函数,提出了基于灰色关联

度多目标决策的虚拟机分配方法,并在 CloudSim 仿真平台上进行了实验。实验结果证明,本文提出的虚拟机分配方法在 SLA 违背率和能耗优化方面能够获得较好的效果;并且,引入服务器负载评价指标对减少虚拟机迁移次数,降低虚拟机迁移过程中 CPU 利用率损耗具有明显的效果。

参考文献:

- [1] VERMA A, AHUJA P, NEOGI A. pMapper: power and migration cost aware application allocation in virtualized systems [C]// Proceedings of the 9th ACM/IFIP/USENIX International Conference on Middleware. Berlin: Springer, 2008: 243–264.
- [2] BELOGLAZOV A, BUYYA R. Optimal online deterministic algorithms and adaptive heuristics for energy and performance efficient dynamic consolidation of virtual machines in cloud data centers [J]. Concurrency and Computation: Practice and Experience, 2012, 24 (13): 1397–1420.
- [3] CARDOSA M, KORUPOLU M R, SINGH A. Shares and utilities based power consolidation in virtualized server environments [C]// IM'09: Proceedings of the 2009 IFIP/IEEE International Symposium on Integrated Network Management. Piscataway: IEEE Press, 2009: 327–334.
- [4] BELOGLAZOV A, ABAWAJY J, BUYYA R. Energy-aware resource allocation heuristics for efficient management of data centers for cloud computing [J]. Future Generation Computer Systems, 2012, 28(5): 755–768.
- [5] PHAN D H, SUZUKI J, CARROLL R, et al. Evolutionary multi-objective optimization for green clouds [C]// GECCO'12: Proceedings of the 14th Annual Conference Companion on Genetic and Evolutionary Computation. New York: ACM Press, 2012: 19–26.
- [6] DUY T V T, SATO Y, INOUCHI Y. Performance evaluation of a green scheduling algorithm for energy savings in cloud computing [C]// IPDPSW 2010: Proceedings of the 2010 IEEE International Symposium on Parallel and Distributed Processing, Workshops and Phd Forum. Piscataway: IEEE Press, 2010: 1–8.
- [7] WEN Y, MENG D, ZHAN J. Adaptive virtualized resource management for application's SLO guarantees [J]. Journal of Software, 2013, 24(2): 358–377. (文雨, 孟丹, 詹剑锋. 面向应用服务级目标的虚拟化资源管理[J]. 软件学报, 2013, 24(2): 358–377.)
- [8] SONG J, LI T, YAN Z, et al. Energy-efficiency model and measuring approach for cloud computing [J]. Journal of Software, 2012, 23(2): 200–214. (宋杰, 李甜甜, 闫振兴, 等. 一种云计算环境下的能效模型和度量方法[J]. 软件学报, 2012, 23(2): 200–214.)
- [9] DENG J. Grey theory base [M]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology Press, 2003. (邓聚龙. 灰理论基础[M]. 武汉: 华中科技大学出版社, 2003.)
- [10] Cloud Computing and Distributed Systems (CLOUDS) Laboratory. CloudSim: a framework for modeling and simulation of cloud computing infrastructures and services [EB/OL]. [2013-12-20]. <http://www.cloudbus.org/cloudsim/>.
- [11] GOIRI Í, BERRAL J L, FITO J O, et al. Energy-efficient and multifaceted resource management for profit-driven virtualized data centers [J]. Future Generation Computer Systems, 2012, 28(5): 718–731.
- [12] BELOGLAZOV A, BUYYA R. Energy efficient resource management in virtualized cloud data centers [C]// Proceedings of the 2010 10th IEEE/ACM International Conference on Cluster, Cloud and Grid Computing. Washington, DC: IEEE Computer Society, 2010: 826–831.