



云数据中心高性能的虚拟机迁移整合算法研究

李鸿健,代 宇,刘 锐,蒋 溢

(重庆邮电大学计算机科学与技术学院 重庆 400065)

摘 要:基于多资源能效模型,通过改进 CPU 双阈值法提出了多资源双阈值法触发虚拟机迁移,并将基于粒子群算法的虚拟机放置算法应用于虚拟机的能效整合。仿真实验结果表明,与传统的启发式算法相比,该算法有效地减少了物理节点的启用数量和虚拟机迁移次数,使系统资源利用率更加均衡。

关键词:云数据中心;能效;虚拟机;迁移整合

doi: 10.11959/j.issn.1000-0801.2015033

Energy-Efficient Virtual Machine Migration and Consolidation Algorithm in Cloud Data Center

Li Hongjian, Dai Yu, Liu Rui, Jiang Yi

(Department of Computer Sciences and Technology, Chongqing University of
Posts and Telecommunications, Chongqing 400065, China)

Abstract: An energy-efficient virtual machine (VM) migration and consolidation algorithm with multi-resource was proposed. The algorithm was developed based on a multi-resource energy efficiency model. A method of multi-resource utilization double threshold was designed to trigger migration of virtual machine, and the optical particle swarm optimization method was introduced in the consolidation of virtual machine. Compared with traditional heuristic algorithms, the algorithm reduces the number of active physical nodes and the amount of VM's migration effectively, and obtains better energy efficiency in cloud data center.

Key words: cloud data center, energy efficiency, virtual machine, migration and consolidation

1 引言

随着云计算在全世界范围内掀起第3次IT浪潮,数据中心的高能耗成为一个亟待解决的问题。而虚拟化技术因其具有资源利用率高、管理灵活、可扩展性好等优点,且云计算模式快速发展,云计算数据中心已广泛采用虚拟化

技术,以虚拟机的形式为用户提供云服务。探索高性能的云数据中心虚拟机迁移整合方法,为提高云计算数据中心的能效提供了新的解决思路,是一个重要的研究方向。

动态整合基于虚拟技术的计算资源是一种减少能耗、提高资源利用率的有效方案,即以虚拟机的方式为用户提供资源^[1-6],虚拟机的动态管理对于降低数据中心能耗非常

收稿日期:2014-10-22;修回日期:2015-01-06

基金项目:国家发展和改革委员会2012年物联网技术研发及产业化专项基金资助项目(No.1201301),国家工业和信息化部2012年物联网发展专项基金资助项目(No.D2013-47),重庆市教委科学技术研究基金资助项目(No.KJ130514)

Foundation Items: 2012 IOT Project of National Development and Reform Commission (No.1201301), 2012 IOT Project of National Ministry of Industry and Information Technology(No.D2013-47), Scientific and Technological Research Program of Chongqing Municipal Education Commission (No.KJ130514)



有效,通过虚拟技术由单个物理服务器提供多个虚拟机资源。通过关闭空闲的物理节点或者将其设置为低能耗模式减少能耗。虚拟化技术还具有虚拟机动态迁移能力,在几乎零停机的时间内将虚拟机在不同的物理节点间进行迁移。根据物理节点工作负载的波动,虚拟机可以动态整合迁移,从而使物理节点始终保持最低能量消耗。通常虚拟机动态整合包含两个原则:迁出低负载节点上的虚拟机,并减少运行节点的数量;迁出过载节点上的虚拟机,避免性能下降,从而避免服务质量的降低。将空闲节点设置为低能耗模式或者关闭状态,从而降低系统总能耗。当系统需要时,空闲节点会被自动激活并放置新虚拟机。

近年来,针对降低云数据中心能耗的研究很多^[1-10]。以节能为目标的虚拟机迁移算法通常只考虑一种系统资源的能耗模型,如多数研究以 CPU 资源构建能耗模型,而忽略了其他系统资源对能耗的影响^[7-11]。参考文献[12]和参考文献[13]发现服务器能耗与 CPU 利用率呈近似线性关系,然而当服务器处于空闲状态时消耗的电能也会达到其处于顶峰负载时的 70%左右,且不同的硬件资源存在不同的能耗特征,如 Srikantiah 等^[7]的研究表明,CPU 的最佳能效是在其利用率达到 70%时,而磁盘的最佳能效是在其利用率达到 50%时。这些研究说明不同的硬件资源具有不同的能耗特征,在不同的应用中,仅以 CPU 的利用率作为服务器的能耗模型可能存在偏差。根据系统负载的变化进行虚拟机的动态整合,对于提高能效有至关重要的作用。目前,虚拟机动态整合使用的算法多为基于贪心算法的启发式算法^[6,7,9],如 Beloglazov 等^[9]提出了 MBFD(modified best fit decrease)算法进行虚拟机整合,主要思想是将需要迁移的虚拟机重新分配在能耗增量最小的物理节点上。基于贪心算法的传统启发式算法能优化虚拟机的分配,但是通常采用单点搜索策略,容易陷入局部最优,并不能实现整体分配效果最优,仍需进一步改进。近年来,粒子群算法^[14,15]由于与遗传算法相似且具有参数少、收敛速度快、更容易实现等优势,得到了越来越多人的关注。改进粒子群算法应用于虚拟机动态整合问题,提出了基于粒子群算法的虚拟机放置算法,改进了虚拟机放置中使用贪心算法的缺陷。虚拟机动态整合问题中分配的虚拟机不是固定不变的,而是由触发虚拟机迁移、虚拟机选择等策略综合决定的,虚拟机所需物理节点的资源大小不是根据虚拟机配置固定设置的,负载连续变化且存在复杂状态,因此对于负载的

过载和低载情况需要量化地判断。

本文基于多种资源的能耗管理模型,并根据能效模型对 CPU 双阈值法^[9]进行改进,设计多资源双阈值法触发虚拟机迁移。将基于粒子群算法的高能效虚拟机放置算法应用于虚拟机整合问题中。并通过仿真实验与 MBFD 启发式虚拟机整合算法进行了对比,实验结果表明,使用该算法整合虚拟机后,系统更接近能效的最佳状态,有效地减少了物理节点的启用数量和虚拟机迁移次数,系统资源利用率更加均衡。

2 多资源的动态能效管理模型

数据中心物理节点的 CPU、内存、带宽、磁盘等资源的综合使用情况对物理节点的能效有重要影响。参考文献[7]通过实验研究了物理节点的能耗、性能和各种系统资源之间的关系。通过 4 个物理节点控制客户端的 k 个应用程序服务,每个物理节点连接一个测定能量的功率计和一个监控资源利用率的跟踪器,将物理节点的 CPU 利用率和磁盘利用率在 10%~90%以 10%的增量变化,测量不同利用率下应用程序的性能和物理节点的能耗。多次实验的测量结果表明,当物理节点的 CPU 利用率为 70%且磁盘利用率为 50%时,物理节点能耗最小且能有效保证任务性能。参考文献[7]将 70%、50%分别作为 CPU 利用率与磁盘利用率的最佳结合点,将虚拟机分配后物理节点的 CPU 利用率、磁盘利用率与最佳结合点的欧氏距离作为能效因子,评价非空闲物理节点能效的优劣,使用所有非空闲物理节点的欧氏距离的总和评价此时系统整体能效的优劣。欧氏距离越小,物理节点或系统能效越好。当物理节点的 CPU 利用率和磁盘利用率均为 0 时,物理节点为空闲节点,由于系统可进一步将其调整为节能或睡眠状态,因此可忽略物理节点对能效的影响,能效因子设置为 0。物理节点和系统的能效因子如下:

$$\delta_h = \sqrt{\sum_{j=1}^d (u_j - ubest_j)^2} \quad (1)$$

$$\delta_s = \sum_{h=1}^n \delta_h \quad (2)$$

式(1)中 u_j 表示物理节点中第 j 种资源的资源利用率,如 CPU 利用率和磁盘利用率等, $ubest_j$ 表示第 j 种资源的最优利用率。 δ_h 表示物理节点的能效因子,当物理节点为非空闲节点时, δ_h 为 CPU 利用率、磁盘利用率与最佳结合点的欧式距离;当物理节点为空闲节点时, δ_h 为 0。

式(2)中 n 表示非空闲物理节点的个数, δ_t 表示 t 时刻系统的能效因子,它是所有物理节点能效因子的总和,表示当前时刻系统与最佳状态的偏离程度。

该能效模型根据实际测量结果确定能效最优时 CPU 利用率和磁盘利用率的阈值,更贴近真实的云数据中心环境,对云数据中心的仿真有很大的参考价值。本文在此能效模型基础上,研究动态随机负载下多资源高能效的虚拟机迁移算法,采用云数据中心总能效因子评价运行时间内系统的能效状态。通过周期性地监测系统资源利用率,得到所有周期内系统的能效因子 δ_t , 将其累加即运行时间内云数据中心的总能效因子 δ 如下:

$$\delta = \sum_t \delta_t \quad (3)$$

如图 1 所示,在 IaaS 环境中,设计了一个可扩展的包含 N 个异构物理节点的大规模数据中心虚拟机能效管理模型。当前虚拟机整合模型大多采用集中式模型,由主机节点探测和收集客户机物理节点的负载,并完成目标迁移,其缺点是扩展性受到了限制。本文改进了模型结构,采用分布式和集中式相结合的结构。分布式管理层中在各物理节点独立进行负载预测、迁移条件判断、迁移目标选择等,可以灵活地将新的物理节点加入数据中心,增强其可扩展性;而集中式管理层中,将各物理节点选择的迁移目标虚拟机形成迁移虚拟机队列,引入了粒子群算法进行虚拟机放置,以获得最佳能效管理,并完成虚拟机迁移执行。

3 多资源高能效的虚拟机迁移算法设计

为了满足服务等级协议(service level agreement,SLA)并进一步优化系统能效,需借助虚拟机迁移机制设计虚拟机迁移算法,决策何时进行迁移、迁移哪些虚拟机、迁移的虚拟机重新分配到哪个物理节点上。在每个监测周期末预测下一周期主机利用率,触发虚拟机迁移,进行虚拟机选择和整合。

3.1 虚拟机迁移条件判断

为了防止 SLA 冲突并进一步优化系统能效,根据多资源能效模型设计多资源双阈值法触发虚拟机迁移。首先在每个监测周期末预测下一周期所有主机的利用率,然后由式(4)、式(5)判定下一监测周期的过载主机和低载主机。若存在过载或低载主机,则触发虚拟机迁移。

$$(\sum_j r_j^{\text{CPU}} \times x_h^j > \text{high_threshold} \times c_h^{\text{CPU}}) \cap (\sum_j r_j^{\text{DISK}} \times x_h^j > \text{high_threshold} \times c_h^{\text{DISK}}) \quad (4)$$

$$(\sum_j r_j^{\text{CPU}} \times x_h^j \neq 0) \cap (\sum_j r_j^{\text{DISK}} \times x_h^j \neq 0) \cap (\delta_h < \text{low_threshold}) \quad (5)$$

high_threshold 、 low_threshold 均为常数,分别表示高低阈值, r_j^{CPU} 、 r_j^{DISK} 分别表示虚拟机 j 所需的 CPU 和磁盘大小, c_h^{CPU} 、 c_h^{DISK} 分别表示物理节点 h 的 CPU 和磁盘容量, x_h^j 表示虚拟机 j 是否分配在物理节点 h 上,若是, x_h^j 为 1;否则, x_h^j 为 0。式(4)表示当主机上的虚拟机资源需求无法得到满足时,主机为过载状态,迁移该主机上的部分虚拟机,以防止主机发生 SLA 冲突。式(5)表示当非空闲主机的欧氏距离

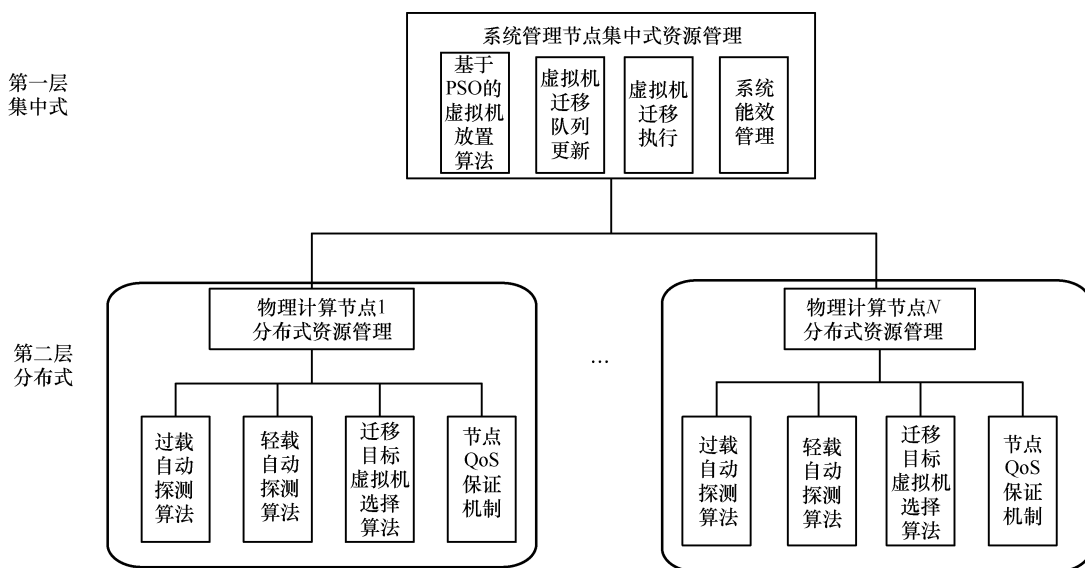


图 1 动态能效管理模型



低于低阈值时,主机为低载状态,迁移该主机上的全部虚拟机,进一步优化系统的能效。

3.2 迁移目标虚拟机选择

当主机为过载状态时,首先判定主机的何种资源无法满足虚拟机的需求,然后将该主机上的虚拟机按照该资源需求降序排列,最后依次从虚拟机队列中选取虚拟机,将其添加到迁移队列,直到主机的资源能满足剩余虚拟机的需求为止;当主机为低载状态时,将该主机上的所有虚拟机添加到迁移队列。

3.3 指数平均法预测负载

指数平均法的时间序列态势具有稳定性和规则性,所以时间序列可被合理地顺势推延。该算法的特征是最近的过去态势在某种程度上会持续到最近的未来,所以将较大的权值赋予最近的状态。算法的特点与系统实际负载变化规律相似,因此采用指数平均法进行周期预测是可行的。

3.4 虚拟机整合算法

基于粒子群算法实现高能效的虚拟机放置和整合。利用粒子群算法实现高能效的虚拟机放置,即确定能耗最低的虚拟机迁移或放置方案。粒子群优化 (particle swarm optimizer, PSO) 算法^[4]是由 Kenney 和 Eberhart 于 1995 年提出的,用于解决连续空间的优化问题。与其他群体演化算法相比,粒子群优化算法具有参数少、收敛速度快且容易实现的优点。

将基于粒子群算法的虚拟机放置算法应用于虚拟机整合问题中,提出了基于粒子群算法的虚拟机整合算法 MPSO(modified particle swarm optimizer)。当需要迁移的虚拟机个数为 1 时,使用 MBFD 算法进行虚拟机重分配;当虚拟机个数大于 1 时,使用 MPSO 算法进行虚拟机整合。

多资源高能效的虚拟机迁移整合算法在触发虚拟机迁移时考虑多资源能效模型,将欧氏距离引入迁移的判定中,进一步优化系统能效。在选择需要迁移的虚拟机时,选择最容易引起主机发生 SLA 冲突的虚拟机进行迁移,有效地减少了虚拟机的迁移次数。基于粒子群算法的虚拟机整合算法采用首次适应算法生成粒子,尽量将粒子放在已使用的物理节点上,这样既满足了粒子资源约束,又有效地保证了物理节点资源的充分利用。采用能效因子评价粒子,使粒子朝高能效方向进化。在更新粒子位置时,更新方法依据改进的二进制离散粒子群算法进行设计,不再通过速度转换得到粒子的新位置,而是通过概率直接确定粒子

新位置,搜索更直接。此外,检测每代新粒子位置是否满足式(4)、式(5)的约束,保留满足约束的粒子新位置,有效保证了进化过程中粒子位置的可行性,确保最终的搜索结果为可行解。

4 实验仿真与结果分析

4.1 实验环境设置

Cloudsim 云计算仿真平台是一个开源的云计算仿真器,其主要功能是在云基础设施上对资源调度和分配策略的性能进行评估比较,本文使用 Cloudsim 对 MBFD 虚拟机整合算法和新的 MPSO 虚拟机整合算法进行模拟和评估,分别模拟拥有 10~100 个虚拟机的云数据中心 100 s 的运行情况。比较 MBFD 算法与 MPSO 算法的运行结果,物理节点和虚拟机参数选取参照参考文献[6], MPSO 算法设置粒子群初始种群规模为 20 个,种群迭代次数为 30 次,重复实验 10 次取平均值。

4.2 高低阈值取值

在拥有 50 个虚拟机的云数据中心评估高低阈值对能效的影响,云数据中心的总能效因子越小,运行时间内虚拟机的分配结果越接近系统能效的最佳状态。对于每个非空闲物理节点,为了防止资源无法满足虚拟机需求而引起的 SLA 冲突,应设置参数 $high_threshold$ 。由于本文假设下一个监测周期的利用率可由上一个周期末准确预测,这样避免了预测产生的误差影响虚拟机的调度,更能从运行结果中分析出整合算法的优劣,因此 $high_threshold$ 取值为 1。由于 $\delta_h < low_threshold$ 且 $0 \leq \delta_h \leq 0.86$,因此设置 $low_threshold$ 在 0~0.9 以 0.1 的增量变化,在本文选取的随机负载到达时,采用 MBFD 整合算法初始分配虚拟机,然后分别采用 MBFD 整合算法和 MPSO 整合算法进行虚拟机重分配,测量 100 s 运行时间内云数据中心的总能效因子,如图 2 所示。

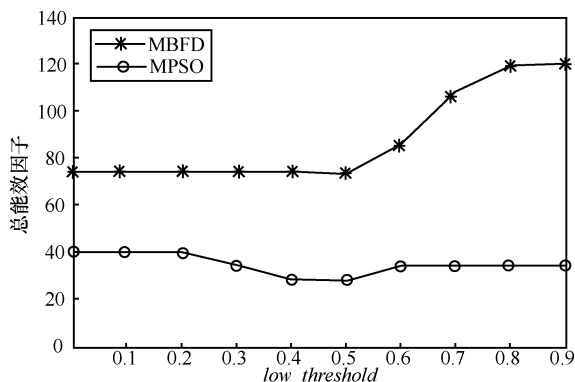


图2 低阈值的选取对总能效的影响

由图 2 可知, 当 $low_threshold$ 为 0.1~0.5 时, 采用 MBFD 整合算法得到的云数据中心总能效因子 δ 基本不变, 而采用 MPSO 整合算法得到的 δ 逐渐减小; 当 $low_threshold$ 从 0.5 增加到 0.9 时, 采用 MBFD 整合算法得到的 δ 逐渐增大并趋于稳定。而采用 MPSO 整合算法得到的总欧式距离逐渐增大并趋于稳定。可见, 对于本文选取的随机负载来说, 当 $low_threshold$ 取 0.5 时触发虚拟机迁移, 云数据中心的总能效因子 δ 最小, 系统的实际能效与最佳能效偏差最小。因此在比较不同虚拟机整合算法时, $low_threshold$ 取 0.5。

4.3 不同整合算法的实验结果分析

4.3.1 云数据中心的总能效因子

云数据中心的总能效因子 δ 为运行时间内所有监测周期测得的系统能效因子的总和, 总能效因子 δ 越小, 说明系统与最佳能效状态的偏差越小。在运行时间内采用不同虚拟机整合算法调度虚拟机所得的总能效因子如图 3 所示。

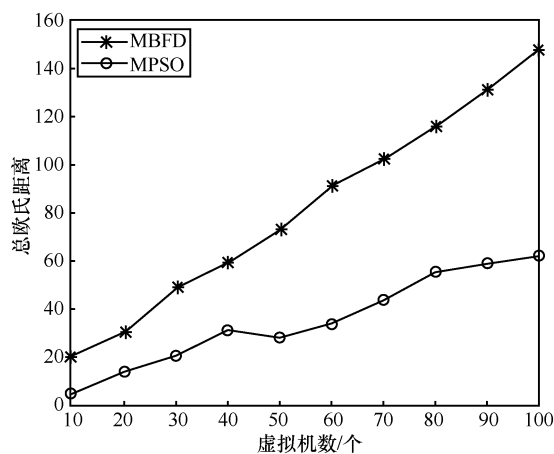


图 3 总能效对比

图 3 描述了在运行时间内当有虚拟机需要迁移重分配时, 分别采用 MBFD 整合算法和 MPSO 整合算法重新分配虚拟机的云数据中心的总能效因子。由图 3 可知, 在不同的虚拟机个数下, MPSO 整合算法比 MBFD 整合算法的总能效因子都小, 尤其在虚拟机个数较多时, MPSO 整合算法的优势更明显。这是由于 MBFD 整合算法分配虚拟机时, 只是找到每个虚拟机当前的最佳分配结果, 没有考虑需要重新分配的所有虚拟机整体的分配结果, 而 MPSO 整合算法通过不同分配结果的比较、进化, 得到整体分配结果最优的方案, 所以 MPSO 整合算法的虚拟机分配结果更接近云数据中心能效的最佳状态。

4.3.2 物理节点的启用数量

物理节点启用数量指的是运行时间内云数据中心启用的物理节点的个数。本文将物理节点启用数量作为评价虚拟机整合优劣的另一个指标。若云数据中心的物理节点没有分配虚拟机, 则可将该物理节点转换成节能模式, 进一步节省能耗, 即云数据中心物理节点启用数量越少, 越有利于节省能耗。图 4 表示各算法整合虚拟机后云数据中心物理节点启用数量的对比。

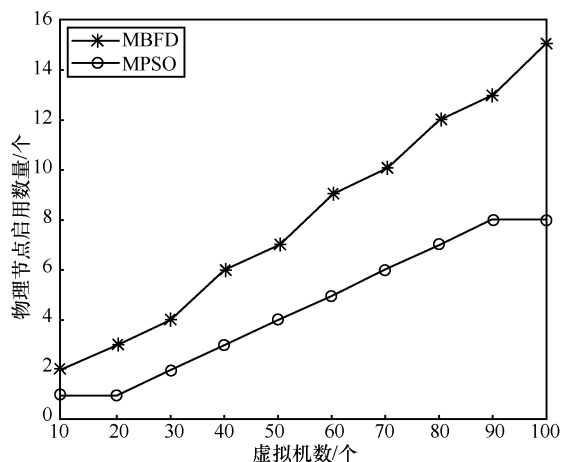


图 4 物理节点启用数量对比

由图 4 可知, 与 MBFD 整合算法相比, MPSO 整合算法有效地减少了云数据中心物理节点的启用数量。由于在初始化粒子时使用 First Fit 算法, 即将虚拟机分配给第一个满足资源约束的物理节点, 这样可尽量充分利用已启用的物理节点资源, 而 MBFD 整合算法是将虚拟机分配给满足资源约束且欧式距离最小的物理节点, 关注的是欧式距离而非物理节点的启用情况。可见本文算法能更充分地利用已开启物理节点的资源, 更能有效地减少启用的物理节点个数。

4.3.3 虚拟机的迁移次数

在每个监测周期末, 根据预测的下一个周期资源使用情况, 对云数据中心的虚拟机进行迁移整合。当虚拟机整合后不在原来的物理节点上时, 虚拟机的迁移次数加 1。由于虚拟机迁移会带来负面影响, 因此在满足绿色节能、保证服务质量等需求的前提下, 应尽量减少虚拟机的迁移次数。虚拟机的迁移是触发虚拟机迁移策略、虚拟机选择策略、虚拟机整合算法综合作用的结果, MPSO 采用了多资源双阈值法触发虚拟机迁移, 在选择迁移虚拟机时又采用了最少迁移策略。图 5 表示当采用 MBFD、MPSO 整合算法重新分配虚拟机时, 在运行时间内测得的虚拟机的迁移次数。

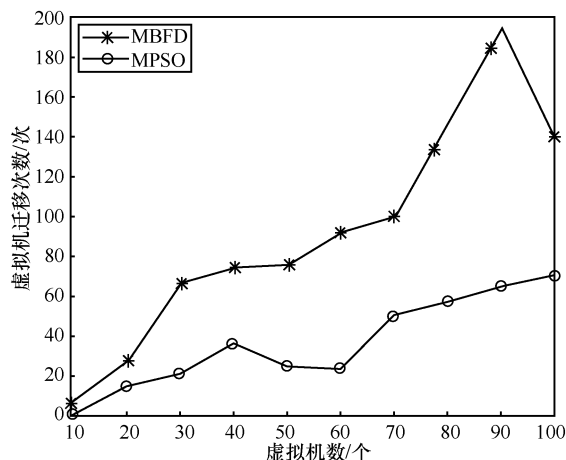


图5 虚拟机迁移次数对比

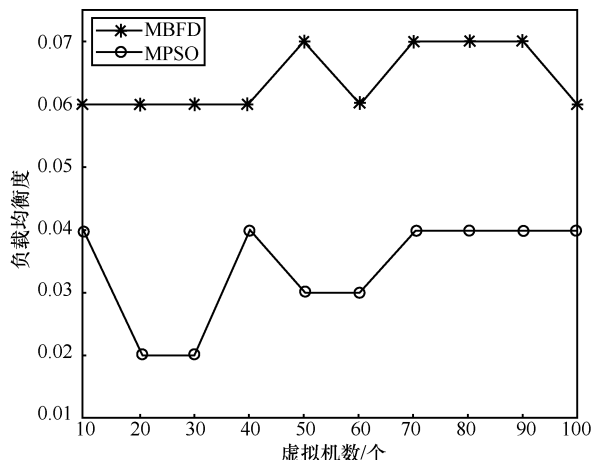


图6 固定运行时间的资源均衡度对比

由图5可知,使用MPSO整合算法比使用MBFD整合算法得到的虚拟机迁移次数少,说明MPSO整合算法在保证高效的同时,能尽量减少虚拟机迁移,促进系统更快完成迁移调整,更稳定地运行云任务。这是因为MPSO整合算法分配虚拟机时,尽量将虚拟机分配在已经开启的满足资源要求的物理节点上,使物理节点上分配足够的虚拟机,预防其下一个周期成为低载物理节点。MPSO整合算法又通过能效因子这一适应度函数均衡系统资源,避免物理节点上分配过多虚拟机,从而避免其下一个周期成为过载物理节点。因此,MPSO整合算法重新分配虚拟机后,更不容易触发虚拟机迁移。而MBFD算法是将虚拟机分配在当前能效因子增量最小的物理节点上,这样可能导致虚拟机分配不紧凑,使某些开启的物理节点在下一个周期处于低载状态,引发迁移。由图5可知,随着物理节点规模的扩大,MPSO整合算法比MBFD整合算法得到的迁移次数的变化幅度更小,说明MPSO整合算法更有利于云数据中心的扩展。

4.3.4 资源均衡度

每个监测周期的资源均衡度是指该周期所有非空闲物理节点的CPU和磁盘两种资源利用率差距的平均值,运行时间内的资源均衡度是所有监测周期资源均衡度的平均值。可见,资源均衡度越小,物理节点资源利用率更均衡,有利于资源更合理地利用,减少因某种资源使用过多而另一种资源使用过少所产生的物理节点资源碎片,减少物理节点资源的浪费。图6为使用MBFD和MPSO两种整合算法在100s运行时间内的资源均衡度。

由图6可知,使用MPSO整合算法比使用MBFD整合算法得到的资源均衡度小,说明MPSO整合算法更有利于资源的充分利用。这是因为MPSO整合算法分配虚拟机时

使用能效因子均衡系统资源。此外,虚拟机迁移次数的对比结果也从侧面验证了采用MPSO算法整合虚拟机后,系统资源更加均衡。

5 结束语

本文提出了动态负载下云数据中心的多资源高效虚拟机迁移整合算法,将CPU双阈值法优化为多资源双阈值法触发虚拟机迁移,将基于粒子群算法的虚拟机放置算法应用于虚拟机整合问题中,有效地解决了整合问题中基于贪心算法的启发式算法的缺陷。仿真实验结果表明,使用MPSO整合算法整合虚拟机后,系统更接近能效的最佳状态,有效地减少了物理节点的启用数量和虚拟机迁移次数,系统资源利用率更加均衡。

参考文献

- 1 Nguyen Q, Nam T, Nguyen T. Epobf: energy efficient allocation of virtual machines in high performance computing cloud. *Journal of Science and Technology*, 2013, 51 (4B): 173~182
- 2 Atefeh K, Saurabh K, Rajkumar B. Energy and carbon-efficient placement of virtual machines in distributed cloud data centers. *Proceedings of the 19th International European Conference on Parallel and Distributed Computing*, Aachen, Germany, 2013
- 3 Liu H, Jin H, Xu C, *et al.* Performance and energy modeling for live migration of virtual machines. *Cluster Computing*, 2013, 16(2): 249~264
- 4 Nakku K, Jungwook C, Euseong S. Energy-credit scheduler: an energy-aware virtual machine scheduler for cloud systems. *Future Generation Computer Systems*, 2014, 32(1): 128~137
- 5 Liao X, Jin H, Liu H. Towards a green cluster through dynamic remapping of virtual machines. *Future Generation Computer Systems*, 2012, 28(2): 469~477

6 Beloglazov A, Abawajy J, Buyya R. Energy-aware resource allocation heuristics for efficient management of data centers for cloud computing. *Future Generation Computer Systems*, 2012, 28(5): 755~768

7 Srikantaiah S, Kansal A, Zhao F. Energy aware consolidation for cloud computing. *Proceedings of the 2008 Conference on Power Aware Computing and Systems*, Berkeley, USA, 2008: 1~5

8 Mazzucco M, Dyaehuk D, Deters R. Maximizing cloud providers' revenues via energy aware allocation policies. *Proceedings of the 3rd International Conference on Cloud Computing*, Washington, USA, 2010: 131~138

9 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. *Concurrency and Computation: Practice and Experience*, 2012, 24(13): 1397~1420

10 Gandhi A, Harchol M, Das R, *et al.* Optimal power allocation in sever farms. *Proceedings of the 11th International Joint Conference on Measurement and Modeling of Computer Systems*, New York, USA, 2009: 157~168

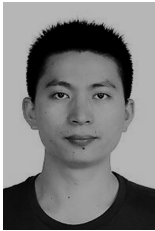
11 Chen G, He W, Liu J, *et al.* Energy-aware server provisioning and load dispatching for connection-intensive internet services. *Proceedings of Symposium on Networked Systems Design and Implementation*, California, USA, 2008: 337~350

12 Verma A, Ahuja P, Neogi A. Mapper: Power and Migration Cost Aware Application Placement in Virtualized Systems. Berlin: Springer, 2008

13 Eberhart R, Kennedy J. A new optimizer using particle swarm theory. *Proceedings of the 6th International Symposium on Micro Machine and Human Science*, Nagoya, Japan, 1995: 39~43

14 Kennedy J, Eberhart R C. A discrete binary version of the particle swarm algorithm. *Proceedings of IEEE International Conference on Computational Cybernetics and Simulation*, Piscataway, USA, 1997: 4104~4108

[作者简介]



李鸿健,男,博士,重庆邮电大学计算机学院副教授,主要研究方向为网络与高性能计算、云计算与大数据处理等。



代宇,男,重庆邮电大学计算机学院讲师,主要研究方向为神经网络、图像处理等。



刘锐,男,重庆邮电大学计算机学院讲师,主要研究方向为云计算与虚拟化。



蒋溢,男,重庆邮电大学计算机学院教授,主要研究方向为商业智能、数据挖掘等。

2015033-7

2014 年 10 月通信业主要指标完成情况(二)

指标名称	单位	本月末到达	比上年末净增	本月净增
固定电话用户合计	万户	25 215.8	-1 482.7	-143.0
公用电话用户	万部	2 095.2	-138.2	-7.2
城市电话用户	万户	17 739.9	-716.9	-55.4
住宅电话用户	万户	9 974.9	-499.3	-38.3
农村电话用户	万户	7 475.9	-765.8	-87.3
住宅电话用户	万户	5 915.2	-728.3	-76.8
移动电话用户合计	万户	127 666.1	4 754.8	407.8
其中:3G 用户	万户	48 157.5	7 996.3	-85.0
互联网拨号用户	万户	445.7	-39.4	-0.3
互联网宽带接入用户	万户	20 039.9	1 149.0	63.2
其中:xDSL 用户	万户	9 455.6	-1 260.9	-200.6
移动互联网用户	万户	87 412.6	6 656.4	285.9
固定电话普及率	部/百人	18.6		
移动电话普及率	部/百人	93.5		