

INTER-VMM:融合虚拟机选择和放置的虚拟机迁移模型

徐胜超¹, 宋娟², 潘欢²

(1. 广州华商学院数据科学学院, 广州 511300; 2. 宁夏大学物理与电子电气工程学院, 银川 750021)

摘要: 低能量消耗与物理资源的充分利用是绿色云数据中心构造的两个主要目标, 需要采用虚拟机迁移模型来完成优化, 为此提出了融合虚拟机选择和放置的虚拟机迁移模型 INTER-VMM (Interrelation approach in virtual machine migration)。INTER-VMM 设计了云数据中心的基于多维物理资源约束的能量消耗模型, 是一种将主机负载检测、虚拟机选择及放置结合起来考虑的虚拟机迁移策略。在虚拟机选择中采用 HPS (High CPU utilization selection) 选择法, 选择超负载物理主机上 CPU 利用率最高的一个虚拟机, 让其进入候选迁移虚拟机列表中。在虚拟机放置中采用空间感知分配 (Space aware placement, SAP) 放置法, 考虑了充分利用物理主机空闲空间使用效率的方法。仿真结果表明, INTER-VMM 比近几年来常见的虚拟机迁移策略具有更好的性能指标, 对云服务提供商具有很好的参考价值。

关键词: 云数据中心; 能量消耗模型; 虚拟机迁移; 虚拟机放置; 虚拟机选择

中图分类号: TP393.4

文献标志码: A

INTER-VMM: An Interrelation Approach in Virtual Machine Selection and Placement for Virtual Machine Migration

XU Shengchao¹, SONG Juan², PAN Huan²

(1. School of Date Science, Guangzhou HuaShang College, Guangzhou 511300, China; 2. School of Physics and Electronic-Electrical Engineering, Ningxia University, Yinchuan 750021, China)

Abstract: Low energy consumption and full utilization of physical resources are two primary objectives for green cloud data construction, so a virtual machine migration model is required to complete the optimization. An interrelation approach in virtual machine migration (INTER-VMM) is proposed in this paper, which interrelated virtual machine selection and its placement. An energy consumption model based on multi-dimensional physical resources for cloud data centers is designed in INTER-VMM. It is a virtual machine migration strategy combining host detection, virtual machine selection and its placement. The CPU utilization selection (HPS) is adopted in virtual machine selection, which selects the virtual machine with the highest CPU utilization on the overloaded physical host and lets it enter the list of candidate migration virtual machine. The space aware placement (SAP) is adopted in virtual machine placement, considering the method of making full use of the spare time of the physical host. Simulation results show that INTER-VMM has better performance indices than those of common virtual machine migration

基金项目: 国家自然科学基金 (青年基金) (61403219) 资助项目; 广东省高等学校质量工程特色创新基金 (2021KTSCX167) 资助项目; 广州华商学院校内导师制科研基金 (2021HSDS15) 资助项目。

收稿日期: 2020-12-18; **修订日期:** 2021-01-31

strategies in recent years, which is valuable for cloud service providers.

Key words: cloud data center; energy consumption model; virtual machine migration; virtual machine placement; virtual machine selection

引 言

虚拟机迁移是绿色节能云数据中心构造的关键技术,它可以使云数据中心的物理资源充分利用起来,提高云服务提供商的服务质量,降低企业的电力能量消耗,近年来得到了广泛的研究^[1-3]。

虚拟机迁移的过程非常复杂,以 Cloudsim 云模拟器工具包为代表的大部分文献将其划分为物理主机状态检测、虚拟机选择和虚拟机放置等步骤^[4]。物理主机状态检测可以通过物理资源使用边界阈值管理算法等来进行优化^[5-7];虚拟机选择可以通过虚拟机尺寸与粒度、虚拟机映射和虚拟机迁移时间长短等算法进行优化^[8-10];有些文献将虚拟机放置称为多目标优化问题或者装箱问题^[11],该过程有很多智能优化算法,例如贪心算法^[12]、粒子群优化算法^[13]、萤火虫群优化算法^[14]、遗传算法^[15]、蚁群算法^[16]和蛙跳算法^[17]等。这3个步骤中的优化算法还可以组合起来使用,但是最终要看的是虚拟机迁移后云数据中心的节能效果、物理资源利用效果和SLA违规率效果等指标。

目前 Anton Beloglazov 博士的科研团队开发的 Cloudsim 项目在虚拟机迁移策略研究上处于世界领先地位,其不足之处往往都在研究虚拟机选择算法本身和虚拟机放置算法本身等方面,很少研究两者之间的密切关系。事实上虚拟机选择可以影响到虚拟机放置,至少在私有云中虚拟机选择和虚拟机放置都可以由一个机构去控制。

另外虚拟机迁移中云数据中心的能量消耗模型的设计也是值得考虑的,必须设计适合现代云计算系统的考虑多物理资源维度的能量消耗模型,克服早期虚拟机迁移中单一维度资源(CPU利用率大小)的不足。

综上,本文设计了一种融合虚拟机选择和放置的虚拟机迁移模型 INTER-VMM(Interrelation approach in virtual machine migration)。INTER-VMM是一种综合考虑主机负载检测、虚拟机选择及放置的虚拟机迁移策略。它在虚拟机选择中提出了考虑处理器主频最高的方式来选择虚拟机,以形成候选迁移虚拟机列表,将其作为虚拟机放置阶段的输入;在放置阶段提出了考虑放置之后空余资源最小的目标主机放置策略。

INTER-VMM策略考虑的物理资源的维度包括处理器、内存、磁盘空间和网络带宽等,在整个虚拟机迁移过程中都有运用到。INTER-VMM虚拟机迁移模型通过 Cloudsim4.0来实现和仿真,仿真结果表明,INTER-VMM虚拟机迁移模型比常见的 BenchMark虚拟机迁移策略可以更好地节省云平台的能量消耗,从而减少虚拟机迁移次数。

1 INTER-VMM 的相关术语

1.1 云数据中心的能量消耗模型

云数据中心主要由大量堆积在一起的物理主机组成,其能量消耗主要由物理主机所有部件的能量消耗组成。文献[18]认为,一个物理主机所消耗的能量由处理器、内存、磁盘及网络带宽组成。基于该思路,INTER-VMM设计的物理主机的能量消耗数学模型如式(1~6)所示,虚拟机迁移模型中的相关符号如表1所示。

$$E(U_{\text{CPU}}) = E_{\text{idle}} + (E_{\text{max}} - E_{\text{idle}})U_{\text{CPU}} \quad (1)$$

表1 INTER-VMM虚拟机迁移策略的相关符号描述
Table 1 Related character description of INTER-VMM

符号	具体含义
$U_{\text{CPU}}(t)$	t 时刻的CPU使用率
$U_{\text{mem}}(t)$	t 时刻的内存使用率
$U_{\text{disk}}(t)$	t 时刻的磁盘使用率
$U_{\text{bw}}(t)$	t 时刻的网络带宽使用率
$E(U_{\text{CPU}})$	物理主机CPU的能耗
$E(U_{\text{mem}})$	物理主机的内存能耗
$E(U_{\text{disk}})$	物理主机的磁盘能耗
$E(U_{\text{bw}})$	物理主机的网络带宽能耗
E_{idle}	物理主机空闲时的整体能耗
E_{host}	物理主机在正常工作的整体能耗
E_{max}	物理主机满负载时的整体能耗
n	云数据中心的虚拟机个数
m	云数据中心的物理主机个数
VM_i	第 i 个虚拟机
PM_j	第 j 个物理主机
E_j	物理主机 j 的能量消耗
E_{total}	整个云数据中心的所有能量消耗
$r_j(t)$	分配到物理主机 PM_j 的虚拟机的索引集合
$\text{mips}_{i,b}$	第 i 个虚拟机 VM_i 的第 b 个处理元素的mips请求
$\text{MIPS}_{j,b}$	第 j 个物理主机 PM_j 的第 b 个处理元素的整体MIPS计算能力。
PE_j	物理主机 PM_j 处理单元的数量
b	物理主机或者虚拟机的元素编号
T_{c_j}	物理主机 j CPU利用率达到100%的时间
T_{a_j}	物理主机 j 处于在线活跃状态的时间
D_{d_i}	由于虚拟机 VM_i 迁移导致的性能下降的估计值
D_{c_i}	请求虚拟机 VM_i 的整个时间段内总的CPU MIPS计算能力
SLATHA	SLA违规在线时间
PDM	迁移后的性能降低
SLAViolation	SLA的违规率

$$U_{\text{CPU}}(t) = \sum_{c=1}^{PE_j} \sum_{i \in r_j(t)} \frac{\text{mips}_{i,b}}{\text{MIPS}_{j,b}} \quad (2)$$

$$E(U_{\text{mem}}) = E_{\text{idle}} + (E_{\text{max}} - E_{\text{idle}})U_{\text{mem}} \quad (3)$$

$$E(U_{\text{disk}}) = E_{\text{idle}} + (E_{\text{max}} - E_{\text{idle}})U_{\text{disk}} \quad (4)$$

$$E(U_{\text{bw}}) = E_{\text{idle}} + (E_{\text{max}} - E_{\text{idle}})U_{\text{bw}} \quad (5)$$

$$E_{\text{host}} = E(U_{\text{CPU}}) + E(U_{\text{mem}}) + E(U_{\text{disk}}) + E(U_{\text{bw}}) \quad (6)$$

式中: $\text{mips}_{j,b}$ 为第 i 个虚拟机 VM_i 的第 b 个处理单元的mips请求情况; $\text{MIPS}_{j,b}$ 为第 j 个物理主机 PM_j 的

第 b 个处理单元的整体 MIPS 计算能力; PE_j 表示物理主机 PM_j 处理单元的数量; $r_j(t)$ 表示分配到物理主机 PM_j 的虚拟机的索引集合。

一个虚拟机请求的 MIPS 数量随着应用程序的变化而变化, 所以物理主机的资源使用率也随着应用程序的变化而变化, 因此统计物理主机的能量消耗必须在一定的时间段内。式(6)可以演化为

$$E_{\text{host}}(t) = E(U_{\text{CPU}}(t)) + E(U_{\text{mem}}(t)) + E(U_{\text{disk}}(t)) + E(U_{\text{bw}}(t)) \quad (7)$$

于是第 j 个物理主机在 $[t_0, t_1]$ 时间段的总体能量消耗 E_j 可按照式(8)来计算。

$$E_j = \int_{t_0}^{t_1} E_{\text{host}}(t) dt \quad (8)$$

整个云数据中心的能量消耗为

$$E_{\text{total}} = \sum_{j=1}^m E_j \quad (9)$$

1.2 物理主机 SLA 违规在线时间

当一个云客户端提交作业到云数据中心的时候, 资源缺少就会出现服务等级协议 (Service level agreement, SLA) 违规。在虚拟机迁移过程中, 一个重要性能指标就是每个物理主机的 SLA 在线时间 (SLA violation time per active host, SLATAH), 它体现了物理主机具有高服务质量的在线时间情况, 即

$$\text{SLATAH} = \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m \frac{T_{s_j}}{T_{a_j}} \quad (10)$$

式中: m 表示云数据中心的主机数量; T_{s_j} 为物理主机 j 的 CPU 利用率达到 100% 的时间; T_{a_j} 为物理主机 j 处于在线活跃状态的时间。

1.3 虚拟机迁移后的性能降低

一般云数据中心采用两种方法来评价 SLA 违规: 单活动主机 SLA 违规时间和虚拟机迁移后的性能降低情况。式(10)描述了单活动主机 SLA 违规时间, 式(11)中虚拟机迁移后的性能降低 (Performance degradation due to migrations, PDM) 可表示为

$$\text{PDM} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{D_{d_i}}{D_{r_i}} \quad (11)$$

式中: n 表示云数据中心的虚拟机数量; D_{d_i} 为由于虚拟机 VM_i 迁移导致的性能下降的估计值; D_{r_i} 表示请求虚拟机 VM_i 整个时间段内总 CPU 的 MIPS 计算能力。

1.4 能量与 SLA 违规的联合指标

SLA 违规率可通过将式(10)和式(11)相乘获得, 即

$$\text{SLAViolation} = \text{SLATAH} * \text{PDM} \quad (12)$$

能量与 SLA 违规的联合指标 ESV 是体现云服务提供商的高服务质量、低 SLA 违规比率和总体能量消耗平衡的指标, 其值的大小至关重要, 计算公式为

$$\text{ESV} = E_{\text{total}} * \text{SLAViolation} \quad (13)$$

式中 $E_{\text{total}} = \sum_{j=1}^m E_j$ 为云数据中心整体能量消耗。

2 INTER-VMM 的虚拟机迁移模型描述

2.1 INTER-VMM 依托环境

INTER-VMM 属于 Cloudsim 项目的后续研究, 涉及的 Cloudsim 相关模块主要包括: 全局代理

(Global broker)、本地代理(Local broker)和虚拟机管理器(Virtual machine manager)。在 Cloudsim 中每个物理主机上都运行有一个本地代理(Local broker),在此模块中可以实现 INTER-VMM 虚拟机迁移策略,工作环境如图 1 所示。

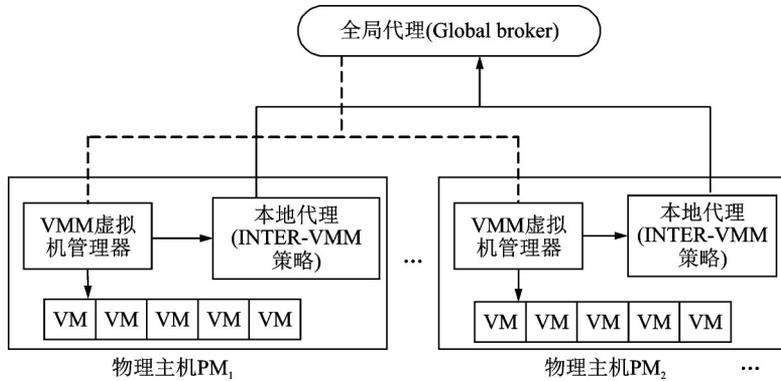


图 1 INTER-VMM 虚拟机迁移模型的依托环境

Fig.1 Working environment of INTER-VMM

本地代理根据物理主机处理器的利用率情况把其划分为 P_{normal} 、 P_{over} 和 P_{under} ,即正常主机、超负载主机和低负载主机。一般 CPU 的利用率低于或者高于一个阈值边界都处于 P_{over} 或 P_{under} 状态,其他的为正常状态 P_{normal} 。可以通过各类阈值管理策略来测试并调整利用率阈值边界的具体取值,例如设置高于 90% 或者低于 10% 是一种静态的阈值策略,也有自适应的动态阈值管理策略。

2.2 INTER-VMM 总体框架

如果把图 1 本地代理中的 INTER-VMM 策略进一步展开,可把 INTER-VMM 划分为 4 个组成部分:监控模块、主机检测模块、决策模块和执行模块,如图 2 所示。

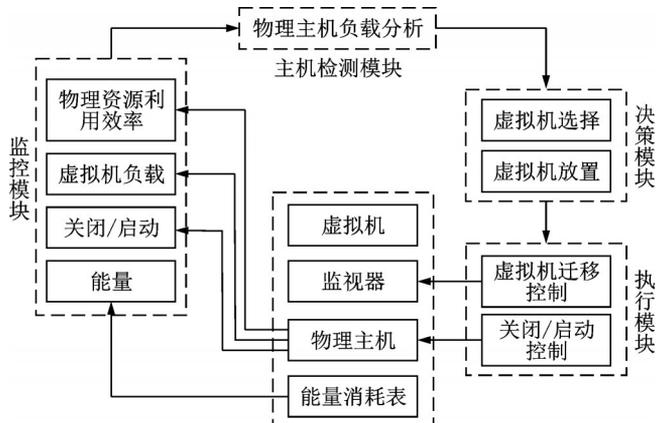


图 2 INTER-VMM 虚拟机迁移模型的模块划分

Fig.2 Module division of INTER-VMM

在监控模块中,系统监视信息包括物理主机的工作负载、资源利用率和能量消耗。在主机检测与负载分析模块中,客户端的负载被搜集和评价分析,完成物理主机负载检测的功能。目前的物理主机负载检测策略可以分为主动法和被动法,其中被动法意味着在物理主机的资源已经超过阈值边界之后

再采取动作;主动法是指通过观察资源使用的样本数据在前一阶段的利用率情况,提前预测出可能出现状态异常的物理主机,接着进行虚拟机迁移的后续步骤。因为物理主机资源状态随着时间和应用程序的访问而不断动态变化,这对物理主机负载检测提出了新的要求,又可以分为静态检测法和动态检测法。如果通过温度感知法或者线性归约法进行预测优化,这里应该属于动态的物理主机负载检测法^[19]。

在决策模块中,INTER-VMM是根据监控模块中的物理主机信息来完成决策工作,需要决策的内容主要包括物理主机上的虚拟机选择问题和虚拟机放置问题,这些都是为了完成云数据中心的物理主机的负载均衡、利用率提高和能量消耗的节省。

在执行模块中,INTER-VMM主要是执行虚拟机迁移过程的启动与停止;在物理资源不够的时候,启动新的空余物理主机;或者在物理资源过剩的时候关闭已经空余的物理主机。

在一个超负载 P_{over} 的物理主机的本地代理中,INTER-VMM迁移模型需要执行3个步骤:(1)物理主机过载检测;(2)虚拟机选择步骤,形成候选迁移虚拟机列表;(3)虚拟机放置步骤,完成候选虚拟机到目标物理主机的重新分配。在一个低负载 P_{under} 的物理主机的本地代理中,INTER-VMM迁移模型只需要执行2个步骤,物理主机低负载检测和虚拟机的重新放置,没有虚拟机选择步骤。

物理主机负载分析模块周期性的检测云数据中心的各个主机的负载情况,形成超负载物理列表,在完成虚拟机迁移过程后,这些物理主机都可以恢复到正常 P_{normal} 状态。虚拟机选择策略的功能是针对超负载的物理主机列表中的每一个物理主机形成候选迁移虚拟机列表;然后将这个结果作为虚拟机放置阶段的输入,最后完成虚拟机到目标物理主机的重新分配。物理主机负载检测、虚拟机选择和放置3个步骤循环执行直到所有的物理主机变为正常状态为止,或者指定的虚拟机迁移周期后结束(一般为24 h)。某些低负载物理主机上容纳的虚拟机被迁移走后,即可关闭或者进入睡眠模式,这样的执行行为即可完成电力能量消耗的节省。

INTER-VMM虚拟机迁移模型的整体算法伪代码如算法1所示。算法1的复杂度为 $O(m)$,其中 m 为云数据中心的物理主机的数量。

算法1 Formation of INTER-VMM plan

Input: PHList

Output: vmMigrationMap

- (1) for each PH in PHList do
- (2) if PH overloaded(PH) then
- (3) vmsToMigrate.add(getVmsToMigrate(PH));
- (4) vmMigrationMap.add(getNewPlacement(Vms To Migrate));
- (5) for each PH in PHList do
- (6) if PH underloaded(PH) then
- (7) vmsToMigrate.add(PH.getVmList());
- (8) vmMigrationMap.add(getNewPlacement(Vms To Migrate));
- (9) Return vmMigrationMap

2.3 INTER-VMM 物理主机负载检测

在 Cloudsim 中已提出了一些物理主机负载检测算法,比如局部归约检测方法(Local regression, LR)、鲁棒局部归约检测方法(Local regression robust, LRR)、绝对中位差检测方法(Median absolute deviation, MAD)、静态资源使用效率阈值检测法(Static threshold, ST)和四分位数区间检测方法(Inter quartile range, IQR)。除此之外国内也提出了其他一些物理主机检测策略,在某些文献上被称为物理

资源阈值边界管理策略,例如 K 邻近规约预测法^[19]、线性回归与最小二乘法预测法^[7]、温度感知管理法^[10]和贪心阈值边界管理法等自适应的物理主机负载检测技术^[12]。只要物理主机被检测到为超负载状态,它将进入虚拟机选择阶段,在INTER-VMM虚拟机迁移模型中,继续利用了Cloudsim自带的鲁棒局部归约检测方法。

LRR方法是一种自适应的主机利用效率阈值检测法,它通过检测物理主机最近 j 次CPU的利用率作为评价方法,本文中 j 值设为10。

2.4 INTER-VMM虚拟机选择策略

在Cloudsim中也提出了一些虚拟机选择优化算法,如最大关联(Maximum correlation, MC)选择方法、最小迁移时间(Minimum migration time, MMT)选择方法、最小资源使用效率(Minimum utilization, MU)选择办法和随机选择策略(Random selection, RS)。除此之外国内也提出了其他一些虚拟机选择策略,如数据依赖选择法^[9]、稳定匹配选择法^[10]、任务映射选择法^[8]、贪心算法选择法^[20]和相关系统选择法等^[21]。INTER-VMM虚拟机迁移模型中提出了自己的新型虚拟机选择策略(High CPU utilization selection, HPS)选择法。HPS方法是选择超负载物理主机上CPU利用率最高的一个虚拟机,让其进入候选迁移虚拟机列表中。

即使拥有最高CPU利用率的虚拟机都被选择出去,随着超负载物理主机上的高CPU利用率虚拟机被迁移出,如果该主机还是处于超负载状态,那么INTER-VMM继续执行一次HPS虚拟机选择操作。HPS的虚拟机选择操作一直执行直到物理主机恢复到正常状态 P_{normal} 。图3显示了HPS虚拟机选择策略的过程。物理主机1上面正在运行5个虚拟机,其CPU利用率分别为90%、50%、40%、10%和5%。

根据HPS算法的规则,CPU利用率为90%的虚拟机将首先被选择出来,CPU利用率为50%的虚拟机2被第二次选择出来,依次类推。该操作是为了快速降低物理主机1的负载,降低虚拟机迁移的次数。VM₁和VM₂将进入候选迁移虚拟机列表VmToMigratedList中,作为后续虚拟机放置阶段的输入。

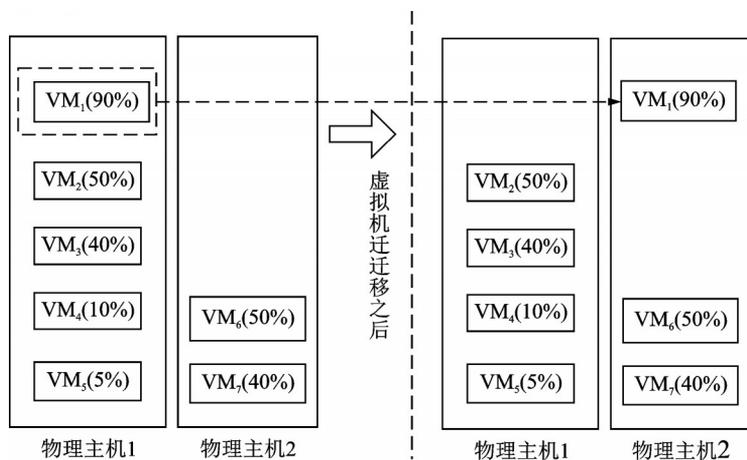


图3 INTER-VMM中的虚拟机选择策略HPS

Fig.3 HPS strategy in INTER-VMM

2.5 INTER-VMM虚拟机放置策略

虚拟机放置策略是INTER-VMM迁移模型的最后一步,它是一种多目标优化问题,即把一定数量

的候选迁移虚拟机重新分配到云数据中心的各个物理主机之上。多目标优化也可以称为物品装箱问题,把物理主机个数比作箱子个数,虚拟机个数比作物品个数,箱子尺寸等指标都比作物理主机的内存、处理器、磁盘空间和网络带宽等指标,箱子的价格可以比作物理主机的能量消耗。虚拟机放置的最终目标是要用最少的物理主机个数和最小的能量消耗完成虚拟机到目标主机的重新放置。

目前已经有大量的智能算法完成虚拟机放置策略的优化,例如强化学习算法^[22]、花授粉算法^[23]、萤火虫群优化算法^[14]和递减最好适用算法^[4]等。INTER-VMM也提出了自己的优化策略,被称为空间感知分配(Space aware placement, SAP)方法。SAP是一种充分考虑利用物理主机空间使用效率的方法。首先根据虚拟机选择阶段HPS的输出VmToMigratedList,把这些虚拟机按照MIPS利用率递减的方式排序,对于那些负载正常的物理主机,陆续把这些虚拟机迁移到上面去。迁移的原则是每个物理主机再容纳了新虚拟机之后,其物理主机CPU的可用MIPS值和其他物理主机比较起来最小,直到所有的候选迁移虚拟机被重新放置完成为止。INTER-VMM的SAP策略可以使物理主机负载均衡、降低虚拟机迁移次数,并间接地减少云数据中心的能量消耗。

例如图4,假设云数据中心有4台物理主机,物理主机1处于超负载状态,其上运行的VM₁的处理器利用率为90%,VM₁通过HPS被选择出来,再通过SAP被放置到物理主机2之上,箭头实线表示实际放置方式,虚线表示可能的放置方式。VM₁之所有把物理主机2作为目标主机,是因为物理主机2再容纳了VM₁之后,其可用的MIPS在物理主机2、3、4中最小。

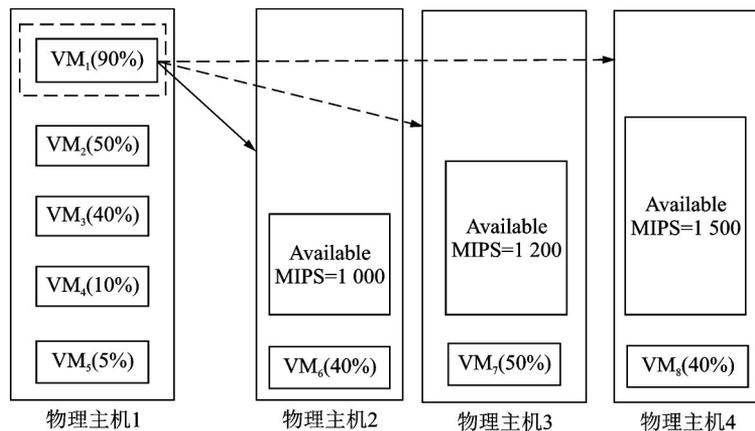


图4 INTER-VMM中的虚拟机放置策略SAP

Fig.4 SAP strategy in INTER-VMM

SAP虚拟机放置策略的整体算法伪代码如算法2所示,算法2的复杂度为 $O(m*n)$,其中 m 为云数据中心物理主机的数量, n 为云数据中心虚拟机的数量。

算法2 SAP policy for VM placement

Input: PHList.vmList

Output: allocation

- (1) MigrationVmList.sortDecreasingUtilization();
- (2) for each VM in MigrationVmList do
minAvailableMips = MAX;
- (3) for each PH in PHList do
- (4) if PH has enough resources for VM then

- (5) AvailableMips = estimate mipsAfterAllocation;
 (6) if (mipsAfterAllocation < minAvailableMips)
 minAvailableMips = mipsAfterAllocation;
 (7) allocatedHost = PH;
 (8) return allocation

3 INTER-VMM 仿真与性能分析

3.1 仿真环境设置

3.1.1 创建物理主机

云数据中心的能量消耗模型是在实验中经常采用的 CoMon project,正如前文所描述,它是由 plan-etlab 实验室开发的一个项目,也是目前云数据中心模拟器的典型 BenchMark 模型。测试指标均参考了第 2 节中提到的虚拟机迁移次数、SLA 违规率和能量消耗情况。

在 Cloudsim 项目中设置的云数据中心主要由 4 类物理服务器组成,物理主机总数为 800,物理主机配置如表 2 所示。

表 2 云数据中心物理主机硬件配置

Table 2 Hardware configuration of physical host in cloud data centers

主机个数	CPU 提供能力/MIPS	内存大小/GB	磁盘空间/GB	网络带宽/(GB·s ⁻¹)
200	1 600	4	1 000	1
200	1 600	4	500	1
200	1 600	8	500	1
200	2 200	8	500	1

3.1.2 创建虚拟机

参考普通网络客户端的应用程序访问类型创建了虚拟机,不同的是每个虚拟机的 CPU 能力不同,并且内存也有所改变。总共创建了 4 种虚拟机类型,配置参数如表 3 所示。

虚拟机初始化放置策略使用的是首次适应的方法,即首次为虚拟机寻找宿主机的時候,如果找到了一个拥有足够资源创建这个虚拟机的物理主机,就立即分配给它,而不再考虑后面的主机,即使有更合适的选择。这样做的好处就是在为虚拟机首次寻找目标主机的过程中节约了时间。一周内每天虚拟机请求的个数如表 4 所示。

表 3 INTER-VMM 虚拟机迁移模型配置参数表

Table 3 Configuration parameters of INTER-VMM

配置项 虚拟机类型	CPU 能力/ MIPS	内存/ MB	带宽/ (Mb·s ⁻¹)	镜像大 小/GB
微型虚拟机	500	613	100	2.5
小型虚拟机	1 000	870	100	2.5
中型虚拟机	2 000	1 740	100	2.5
大型虚拟机	2 500	1 740	100	2.5

3.2 性能比较对象

在 Cloudsim 云模拟器中的虚拟机迁移模型称之为 LRR-MMT-BFD 策略,其实现结果在 Anton Beloglazov 博士的相关文献^[4]中都有发表,因此作为本文 INTER-VMM 策略的首要比较对象。

本文还与近年来的其他虚拟机迁移模型进行了比较,例如粒子群优化的虚拟机迁移(Particle swarm optimization-virtual machine migration, PSO-VMM)、遗传算法的虚拟机迁移策略(Genetic algorithm-virtual machine migration, GA-VMM)、稳定匹配(Stable-matching)、考虑关联性(Correlation-based)、蚁群优化的虚拟机迁移(Ant colony solution-virtual machine migration, ACS-VMM)和萤火虫群优化的虚拟机迁移(Glowworm swarm optimization-virtual machine migration, GSO-VMM)等,分析这些智能计算优化方法对云数据中心的性能改变情况。本实验共涉及的8个虚拟机迁移模型及相关说明如表5所示。

表5 INTER-VMM虚拟机迁移策略性能比较对象

Table 5 INTER-VMM performance comparison objects

虚拟机迁移模式	相关说明
INTER-VMM	本文融合虚拟机选择与放置
LRR-MMT-BFD ^[4]	Cloudsim项目原始模型
PSO-VMM ^[13]	粒子群算法优化的虚拟机迁移策略
GA-VMM ^[15]	遗传算法虚拟机放置阶段优化
Stable-matching ^[20]	稳定匹配虚拟机选择优化
Correlation-based ^[21]	考虑关联性虚拟机选择优化
ACS-VMM ^[16]	蚁群算法虚拟机放置阶段优化
GSO-VMM ^[14]	萤火虫群算法虚拟机放置阶段优化

3.3 仿真结果与性能分析

根据前文物理主机和虚拟机的设置情况,给云数据中心分配了1 000个虚拟机,然后让这些虚拟机执行2 000个云任务,每个任务的长度是216 000 000 MI,给CloudSim设定的模拟时间是24 h(86 400 s)。最后,每次保持上述设置不变,在CloudSim模拟器中测试了包括本文算法在内的8种虚拟机迁移模型。

3.3.1 云数据中心的总体能量消耗

基于INTER-VMM的虚拟机迁移模型1周之内的总体能量消耗比较如表6所示。从表6可以看出,有了虚拟机选择及放置阶段融合优化后,INTER-VMM迁移模型比Cloudsim中的

表4 INTER-VMM虚拟机迁移模型运行时间

Table 4 Running time of INTER-VMM

日期	虚拟机个数	物理主机个数	运行时间/h
周一	1 000	800	24
周二	1 000	800	24
周三	1 000	800	24
周四	1 000	800	24
周五	1 000	800	24

表6 云数据中心总体能量消耗性能比较

Table 6 Total energy consumption comparison in cloud data centers kWh

迁移策略	周一	周二	周三	周四	周五
INTER-VMM	118	98	115	114	122
LRR-MMT-BFD	155	122	135	175	145
PSO-VMM	131	128	133	121	141
GA-VMM	123	116	120	115	121
Stable-matching	135	100	115	150	131
Correlation-based	126	126	127	128	124
ACS-VMM	131	128	133	121	141
GSO-VMM	122	131	121	122	126

LRR-MMT-BFD迁移策略在总体能量消耗上要节约25%到30%,比其他迁移模型能耗都低。分析原因是通过INTER-VMM在整个虚拟机迁移阶段都有优化,反复迭代后,反复提高物理主机的利用效率,

所有物理服务器的总体能量消耗自然减少。

3.3.2 虚拟机迁移次数

表7显示了在1周5天之内INTER-VMM虚拟机迁移次数都低于其他策略。原因是INTER-VMM策略中设计了HPS选择策略和SAP放置策略,考虑的资源维度包括处理器、内存、磁盘和网络带宽,这样使得负载基本均衡,因此虚拟机迁移次数随之降低。

表7 各类虚拟机迁移策略的迁移次数比较

Table 7 Migration times of different virtual machine migration strategies

迁移策略	周一	周二	周三	周四	周五
INTER-VMM	8 800	9 200	9 300	9 000	9 600
LRR-MMT-BFD	11 000	12 000	11 000	11 000	11 500
PSO-VMM	12 000	12 000	13 000	19 000	16 000
GA-VMM	10 000	12 000	11 000	12 000	14 000
Stable-matching	11 000	9 000	11 000	11 000	10 000
Correlation-based	10 147	9 546	9 546	9 792	9 792
ACS-VMM	10 000	11 800	10 500	11 000	10 000
GSO-VMM	11 000	11 000	11 000	12 000	11 000

3.3.3 SLA 违规率分析

从表8可以看出,从周一到周五,INTER-VMM迁移策略的SLA违规率比LRR-MMT-BFD迁移策略要低,其原因是SAP策略比递减装箱办法的优化能力要强。其他策略采用另外的优化算法,其SLA违规率在有些时候还优于INTER-VMM策略。

表8 各类虚拟机迁移策略的SLA违规率比较

Table 8 SLA violation comparison of different virtual machine migration strategies

迁移策略	周一	周二	周三	周四	周五
INTER-VMM	0.000 8	0.000 9	0.000 8	0.001 1	0.001 0
LRR-MMT-BFD	0.001 8	0.001 4	0.002 3	0.001 9	0.001 8
PSO-VMM	0.001 2	0.001 4	0.002 1	0.001 8	0.001 5
GA-VMM	0.001 5	0.001 2	0.001 3	0.001 5	0.001 4
Stable-matching	0.001 4	0.001 1	0.002 0	0.002 0	0.001 2
Correlation-based	0.001 1	0.000 9	0.001 3	0.001 0	0.000 9
ACS-VMM	0.001 2	0.001 4	0.002 1	0.001 8	0.000 7
GSO-VMM	0.000 9	0.000 9	0.000 9	0.001 1	0.000 9

3.3.4 能量与SLA违规的联合指标ESV

从表9可以看出,INTER-VMM迁移策略的ESV也要低于LRR-MMT-BFD迁移策略,表明在虚拟机放置阶段中智能算法优化对云数据中心的物理资源利用效率提高的重要性,ACS-VMM迁移策略的ESV最低,在综合性能上最好,但是它是牺牲其他方面的指标为代价的,而INTER-VMM在能量消耗上性能上最好。

表 9 各类虚拟机迁移策略的联合指标 ESV

Table 9 Joint indicator ESV of different virtual machine migration strategies

迁移策略	周一	周二	周三	周四	周五
INTER-VMM	0.08	0.04	0.06	0.04	0.07
LRR-MMT-BFD	0.23	0.18	0.32	0.34	0.27
PSO-VMM	0.06	0.07	0.05	0.04	0.04
GA-VMM	0.08	0.11	0.13	0.12	0.13
Stable-matching	0.13	0.09	0.25	0.19	0.15
Correlation-based	0.07	0.09	0.14	0.13	0.14
ACS-VMM	0.04	0.05	0.05	0.04	0.04
GSO-VMM	0.21	0.19	0.28	0.25	0.21

4 结束语

低能量消耗与高服务质量是云数据中心的构造的主要目标,目前国内外的研究主要采用虚拟机迁移技术来达到这两个目标。在物理主机负载检测过程,虚拟机选择过程,虚拟机放置过程都可以提出相对应的优化策略,但是最终要把它们放到云数据中心的各个指标中测试。本文提出了一种融合虚拟机选择和放置的迁移模型 INTER-VMM。INTER-VMM 可以运用到私用云中,采用 HPS 虚拟机选择算法和 SAP 虚拟机放置算法互相融合,仿真实验表明,INTER-VMM 比近几年来常见的大部分虚拟机迁移策略具有更好的性能指标。本文采用的 HPS 和 SAP 是比较简单的优化策略,下一步将针对虚拟机选择和放置中采用更加先进的智能算法来完成优化,例如花授粉算法和强化学习法等,以最终提高云数据中心的物理资源利用效率。

参考文献:

- [1] SHI T, MA H, CHEN G. Energy-aware container consolidation based on PSO in cloud data centers[C]//Proceedings of IEEE Congress on Evolutionary Computation. [S.l.]: IEEE, 2018.
- [2] LEI Z, SUN E, CHEN S, et al. A novel hybrid-copy algorithm for live migration of virtual machine[J]. Future Internet, 2017, 9(3):1-13.
- [3] AHAMED F, SHAHRESTANI S A, JAVADI B. Security aware and energy-efficient virtual machine consolidation in cloud computing systems[C]// Proceedings of 2016 IEEE TrustCom/ISPA/BigDataSE Conference. [S.l.]: IEEE, 2017:1-8.
- [4] 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.
- [5] ZHOU Zhou, HU Zhigang, LI Keqin. Virtual machine placement algorithm for both energy-awareness and SLA violation reduction in cloud data centers[J]. Scientific Programming, 2016(1):1-11.
- [6] KHOSHKHOLGHI M A, DERAHMAN M N, ABDULLAH A, et al. Energy-efficient algorithms for dynamic virtual machine consolidation in cloud data centers[J]. IEEE Access, 2017:10709-10722.
- [7] FARAHNAKIAN F, LILJEBERG P, PLOSILA J. LiRCUP: Linear regression based CPU usage prediction algorithm for live migration of virtual machines in data centers[C]//Proceedings of the 2013 39th Euromicro Conference on Software Engineering and Advanced Applications. [S.l.]:IEEE Computer Society, 2013.
- [8] MANN Z A. Interplay of virtual machine selection and virtual machine placement[C]//Proceedings of European Conference on

- Service-Oriented and Cloud Computing. [S.l.]: Springer, 2016: 137-151.
- [9] JOSEPH C T, MARTIN J P. Task dependency aware selection (TDAS) in cloud[J]. *Procedia Computer Science*, 2016, 93: 269-275.
- [10] WANG J V, CHENG C T, TSE C K. A power and thermal-aware virtual machine allocation mechanism for cloud data centers [C]//*Proceedings of IEEE International Conference on Communication Workshop*. [S.l.]: IEEE, 2015.
- [11] KAAOUACHE M A, BOUAMAMA S. Solving bin packing problem with a hybrid genetic algorithm for VM placement in cloud[J]. *Procedia Computer Science*, 2015, 60(1):1061-1069.
- [12] BEIK R. Green cloud computing: Greedy algorithms for virtual machines migration and consolidation to optimize energy consumption in a data center[J]. *International Journal of Digital Application & Contemporary research*, 2014, 2(9):1-9.
- [13] XIONG A P, XU C X. Energy efficient multiresource allocation of virtual machine based on PSO in cloud data center[J]. *Mathematical Problems in Engineering*, 2014, 2014:1-8.
- [14] ALBOANEEN D A, TIANFIELD H, ZHANG Y. Glowworm swarm optimisation algorithm for virtual machine placement in cloud computing[C]//*Proceedings of 2016 International IEEE Conferences on Ubiquitous Intelligence & Computing, Advanced and Trusted Computing, Scalable Computing and Communications, Cloud and Big Data Computing, Internet of People, and Smart World Congress*. [S.l.]: IEEE, 2016.
- [15] VASUDEVAN M, TIAN Y C, TANG M L, et al. Energy-efficient application assignment in profile-based data center management through a repairing genetic algorithm[J]. *Applied Soft Computing*, 2018, 67(1):1-10.
- [16] LIU X F, ZHAN Z H, DENG J D, et al. An energy efficient ant colony system for virtual machine placement in cloud computing[J]. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, 2018, 22(1):113-128.
- [17] LUO J P, LI X, CHEN M R. Hybrid shuffled frog leaping algorithm for energy-efficient dynamic consolidation of virtual machines in cloud data centers[J]. *Expert Systems with Applications*, 2014, 41(13):5804-5816.
- [18] FAN X B, WEBER W D, BARROSO L A. Power provisioning for a warehouse-sized computer[C]//*Proceedings of the ACM International Symposium on Computer Architecture*. San Diego, CA: ACM, 2007:13-23.
- [19] FARAHNAKIAN F, PAHIKKALA T, LILJEBERG P, et al. Energy aware consolidation algorithm based on K -nearest neighbor regression for cloud data centers[C]//*Proceedings of IEEE/ACM International Conference on Utility & Cloud Computing*. [S.l.]: ACM, 2013.
- [20] WANG J V, FOK K Y, CHENG C T, et al. A stable matching-based virtual machine allocation mechanism for cloud data centers[C]//*Proceedings of 2016 IEEE World Congress on Services (SERVICES)*. [S.l.]: IEEE, 2016:103-106.
- [21] WANG J V, CHENG C T, TSE C K. Effects of correlation-based VM allocation criteria to cloud data centers[C]//*Proceedings of International Conference on Cyber-enabled Distributed Computing & Knowledge Discovery*. [S.l.]: IEEE, 2017.
- [22] DUGGAN M, FLESK K, DUGGAN J, et al. A reinforcement learning approach for dynamic selection of virtual machines in cloud data centres[C]//*Proceedings of the 6th International Conference on Innovative Computing Technology (INTECH)*. [S.l.]: IEEE, 2016.
- [23] USMAN M J, ISMAIL A S, CHIZARI H, et al. Energy-efficient virtual machine allocation technique using flower pollination algorithm in cloud datacenter: A panacea to green computing[J]. *Journal of Bionic Engineering*, 2019, 16(2):354-366.

作者简介:



徐胜超(1980-),通信作者,男,硕士,讲师,研究方向:并行分布式处理软件,E-mail: isdooropen@126.com.



宋娟(1980-),女,硕士,副教授,研究方向:智能计算、数据挖掘。



潘欢(1983-),男,博士,副教授,研究方向:智能体协调控制、系统优化分析。

(编辑:王静)