

云数据中心虚拟机调度研究综述

胡康立¹, 曾 岚², 石 方¹, 李俊祺¹, 林伟伟¹, 刘 波^{3*}

(1. 华南理工大学 计算机科学与工程学院, 广东广州 510006; 2. 吉林大学 数学学院, 吉林长春 130012;
3. 华南师范大学 计算机学院, 广东广州 510631)

摘要: 现代云数据中心为减少计算成本和能源预算,常使用虚拟化技术来实现对资源高效的管理,而虚拟机调度的优化往往会对资源管理方面有着巨大的影响。文章旨在以一种较为全面的方式来调研分析当前虚拟机调度的发展情况,从虚拟机调度相关技术出发,再从虚拟机调度优化方法维度、虚拟机调度优化目标维度两个角度进行分析,最后对虚拟机调度的研究趋势以及方向进行分析和总结。

关键词: 云计算; 数据中心; 虚拟机; 调度优化

中图分类号: TP 311.13 **文献标志码:** A

An overview of virtual machine scheduling in cloud data center

HU Kang-li¹, ZENG Lan², SHI Fang¹, LI Jun-qi¹, LIN Wei-wei¹, LIU Bo^{3*}

(1. School of Computer Science and Engineering, South China University of Technology, Guangzhou 510006, China;
2. College of Mathematics, Jilin University, Changchun 130012, China;
3. School of Computer Science, South China Normal University, Guangzhou 510631, China)

Abstract: To reduce the costs and energy of cloud data centers, virtualization technology is often used to manage the resources, and the virtual machine scheduling is the key to resource management. In this paper, we aim to investigate and analyze virtual machine scheduling technology in a comprehensive way. We first introduce a type of virtual machine scheduling, and then analyze the optimization method and optimization target of virtual machine scheduling respectively. Finally, we give the research trend and direction of virtual machine scheduling.

Key words: cloud computing; data center; virtual machine; scheduling optimization

1 虚拟机调度相关技术

虚拟机调度就是将云计算数据中心的虚拟机有效地按用户的需求进行分配,并将虚拟机合理地映射到相应的物理节点上,以提高云资源的使用效率和降低消费成本为目标,从而为云计算的广泛应用提供基础。虽然学者们在虚拟机调度方面开展了较多相关研究工作,但是在工业界仍然存在许多实际需要解决的问题,因此,对云数据中

心的虚拟机调度相关研究现状进行分析和总结分类,对虚拟机调度优化的进一步深入研究和应用具有重要意义。本小节将从虚拟机放置、虚拟机迁移以及虚拟机整合3个方面介绍虚拟机调度相关技术背景。

1.1 虚拟机放置

虚拟机放置是根据虚拟机需求和主机可用资源选择目标主机托管虚拟机的决策过程^[1]。虚拟机的放置问题通常分为2种类型:虚拟机的初始化和虚拟机的动态管理。虚拟机的初始化放

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(62072187, 61872084);广东省基础与应用基础研究重大资助项目(2019B030302002);广州市科学研究计划重点资助项目(202007040002)

作者简介: 胡康立(1997—),男,硕士研究生. E-mail:201921042007@mail.scut.edu.cn

*通信作者. E-mail:liugubin530@126.com

引文格式: 胡康立,曾岚,石方,等.云数据中心虚拟机调度研究综述[J].广州大学学报(自然科学版),2021,20(3):59-68.

置主要解决如何在一个没有负载的数据中心中放置若干个虚拟机的问题,其需要同时考虑虚拟机对资源的请求、物理节点的能力、平台所需的电源消耗和用户服务质量等条件。而虚拟机的动态管理主要是针对由于系统条件的改变或应用负载的动态变化所引起的虚拟机重新分配问题。

1.2 虚拟机迁移

将虚拟机从一个主机移动到另一主机的过程称为虚拟机迁移^[2]。虚拟机迁移需要管理程序选出合适的虚拟机,并将其从源主机上移除,然后再放置到其他合适的主机上,以完成整个虚拟机迁移流程。虚拟机迁移过程通过管理程序以非实时和实时方式执行,即静态迁移和动态迁移。静态迁移也称为离线迁移或常规迁移,该方法在迁移过程中需要先将虚拟机暂停,然后将虚拟机完全迁移到目标主机后才能恢复执行。而虚拟机动态迁移则是在保持虚拟机运行的同时,把虚拟机操作系统及其上所运行的服务作为一个迁移单位从源主机迁移到目标主机。

1.3 虚拟机整合

虚拟机整合是一种通过提高主机资源使用效率来减少所需主机数量的技术手段^[3],其主要解决主机工作负载低效的问题。该方法通过对虚拟机的迁入迁出操作,低负载主机中虚拟机迁出到其他开启主机上并关闭该主机,从而提高数据中心的资源利用率,实现对功耗以及资源利用率的有效管理。图 1 展示了虚拟机整合的基本流程。



图 1 虚拟机整合的基本流程

Fig. 1 Flowchart of virtual machine consolidation

2 虚拟机调度优化方法

2.1 基于运筹学的优化方法

为了确定最佳的虚拟机到主机映射关系,常使用数学方法对问题进行建模,并通过设计有效的算法来解决该问题。在现有的几种运筹学方法中,如线性规划、动态规划以及随机规划等常被用

于优化虚拟机调度问题。

基于线性规划,Charitopoulos 等^[4]提出了一种基于混合整数线性规划的方法来求解全局不确定性下的多参数 MILP 问题,并计算出精确的显式解和参数空间的相应区域。Lopez 等^[5]展示了如何将整数线性规划问题公式化来得到测试序列和最佳解决方案,以提供有关虚拟机放置效果的判断。Chen 等^[6]基于线性规划提出了一种虚拟机放置算法,来生成具有最小能耗的虚拟机放置策略。

此外,由于动态规划可以求解决策过程的最优化值,常被用于解决虚拟机调度优化问题。如 Zhang 等^[7]基于贪婪算法和动态规划提出了一个虚拟机选择算法,并通过实验证明算法可以在满足 SLA 约束的同时有效降低能耗。Chaisiri 等^[8]基于随机规划提出了一个最优的虚拟机部署算法,并最小化用户的预算。此外,Nandi 等^[9]通过将未知分布的虚拟机部署问题建模为随机规划问题,提出了一种可以优化资源利用率的调度策略。

2.2 基于启发式算法的优化方法

由于虚拟机调度通常被表述为多维装箱问题的一种变体,一些基于贪婪的启发式算法往往被用于解决虚拟机调度问题,比较著名的方法有最初适应递减算法(First Fit Decreasing, FFD)、最优适应递减算法(Best Fit Decreasing, BFD)、最差适应递减算法(Worst Fit Decreasing, WFD)以及轮询算法(Round-Robin, RR)等。

2.2.1 最初适应递减算法

FFD 首先会根据某种评价指标对待调度的虚拟机进行降序排序得到一个排序列表,然后根据这个排序列表中的顺序依次调度虚拟机。对于某一个虚拟机,FFD 会遍历当前所有开启的主机,将虚拟机放在第一个满足要求的主机上,如果未找到可满足要求的主机,则会开启新的主机来放置该虚拟机。基于这种思想,Tang 等^[10]便提出了一种虚拟机动态预测调度算法,采用 FFD 算法最小化主机的数量。Verma 等^[11]给出了一种名为 pMapper 的虚拟机整合算法,基于主机资源分配属性以及电源效率评价指标,采用 FFD 算法来对虚拟机进行放置,以降低主机集群整体的能耗水平。

2.2.2 最优适应递减算法

与 FFD 第一步相同,BFD 也是根据评价指标对待调度的虚拟机进行降序排序得到一个排序列表,但是对于列表中的虚拟机调度,则是从当前开启的主机中选择一个最合适(与目标函数相关)的

进行放置。由此,Beloglazov等^[12]提出了一种改进的BFD算法用于解决虚拟机的静态放置问题,将虚拟机映射到一个功耗增加最少的主机。Abdullah等^[13]提出了一个能效感知的二进制搜索树改进BFD算法,大大降低算法的时间复杂度,并有效减少数据中心的能耗。

2.2.3 最差适应递减算法

WFD与BFD的决策过程十分类似,但是对于如何决策放置的评价标准则是不一样的。BFD是选择一个最合适的主机来放置虚拟机,而WFD则是选择一个最合适的主机(一般为剩余资源空间最大的主机,也可自定义适应度函数)。基于此,Yan等^[14]提出一种经济代价导向以及负载均衡启发因子的改进WFD算法,有效降低了经济代价,提高了负载均衡并减少数据波动。文献[15]提出了一种自适应WFD虚拟机放置算法,能够动态分配数据中心的物理资源,从而以最小的用电量、内存和处理时间获得负载均衡的系统。

2.2.4 轮询算法

RR是一种常用于任务分配的传统启发式算法,算法将虚拟机依次分配给不同主机。RR算法快速简洁,能够使主机之间的负载数量尽可能相近,从而使负载更加的均衡。文献[16]利用一种改良的RR算法,减少了活跃服务器的数量,并降低了服务器集群整体的能耗。

2.3 基于元启发式算法的优化方法

元启发式算法是传统启发式算法的一种改进算法,其通过将随机算法与局部搜索算法相结合,可以较为有效地跳出局部最优解,逼近全局最优解。由于元启发式算法主要通过模仿生物种群的进化或者觅食行为,对问题的解进行搜索,因此,元启发式算法也被称作群智能算法。目前在虚拟机调度方面应用比较广泛的群智能算法主要包括遗传算法(Genetic Algorithm, GA)、差分进化算法(Differential Evolution, DE)、粒子群算法(Particle Swarm Optimization, PSO)、蚁群算法(Ant Colony Optimization, ACO)和人工蜂群算法(Artificial Bee Colony Algorithm, ABC)等。

2.3.1 遗传算法和差分进化算法

遗传算法和差分进化算法分别由Koza^[17]和Storn等^[18]提出。两者都是把问题的解定义为染色体,仿照生物进化过程对解进行搜索。不同的是,GA通过对群体中的染色体进行“选择”“交叉”“变异”生成新的染色体,并从当代的染色体中

选出较优的染色体遗传到下一代。而DE则是通过对每条染色体依次进行“变异”“交叉”“选择”的操作来更新染色体。GA和DE算法的“交叉变异”操作可以增加算法的全局搜索能力,探索更多解空间以获得更好的解,在虚拟机调度问题上被广泛的使用。

Sonklin等^[19]针对GA算法求解时间较长的问题,提出了一种基于减少与征服策略的GA算法,能在较短的时间内找出虚拟机最优放置位置。Sarker等^[20]在虚拟机调度过程中考虑虚拟机迁移总数、放置的能耗以及虚拟机间流量消耗3个指标,提出了一种基于惩罚的GA算法。Dong等^[21]为了提高数据中心的利用率并降低运营成本,最大程度地提高性能并最小化能源成本,提出了一种用于云平台上虚拟机部署的分布式并行遗传算法。而Sui等^[22]结合了GA和DE算法,提出了一种均衡负载的虚拟机调度混合策略,能够有效地降低虚拟机的迁移次数以及数据中心的能耗,同时减少虚拟机迁移后的性能干扰。为提高资源利用率并最小化服务成本,Li等^[23]兼顾服务器的能耗开销和用户的QoS,提出了一种离散化DE虚拟机放置算法,在减少服务器能耗的同时还降低了服务器的超载概率。

国内学者王波^[24]提出一种基于GA算法的调度策略,充分考虑了虚拟机调度中CPU、内存、带宽的资源利用率、调度时间和服务费用等影响因素。石帅^[25]针对数据中心的异构服务器拓扑情况,设计了一种带状区域染色体结构的GA放置算法,将虚拟机的迁移限制在同构服务器之间,实现数据中心节能的目标。

2.3.2 粒子群算法

粒子群算法由Kennedy等^[26]提出,算法仿照鸟群觅食的行为,利用群体中个体信息的共享,使得整个群体的运动在问题求解空间中逐步从无序到有序,最终获得问题的一个较优解。Wang等^[27]提出了一种能量感知的局部适应度优先策略改进PSO调度算法,并设计了新的二维编码模式,有效提高了资源利用率并降低总能耗。Ramezani等^[28]提出了一种基于模糊逻辑的PSO算法,用于解决多目标优化的虚拟机调度问题,实现在多维资源约束下减少能耗和网络流量的目标。

高玉娇^[29]提出一种优化的PSO算法求解云计算系统资源利用率均衡模型,实现负载均衡和资源利用率提高的目标。苏宇等^[30]提出了一种功

耗感知的自适应粒子群优化虚拟机动态调度的方法,利用自适应粒子群优化检测和跟踪云计算资源池中不断变化的最优目标服务器,使得虚拟机放置后功耗增量最小。

2.3.3 蚁群算法

蚁群算法是 Dorigo 等^[31]提出的,其使用蚂蚁的行走路径代表待优化问题的可行解,整个蚂蚁群体的所有路径构成待优化问题的解空间,通过不同蚂蚁在觅食过程中路径上的信息素积累,引导下一代蚂蚁发现更优的解。Liu 等^[32]提出了一种基于蚁群算法的虚拟机放置算法,有效利用物理资源,减少开启的服务器数量。Farahnakian 等^[33]提出了一种基于蚁群算法改良的虚拟机整合方法,在降低服务器能耗的同时,保证 SLA 违约率和虚拟机迁移次数的最小化。为了减少数据中心的总能耗,Alharbi 等^[34]提供了一种蚁群算法用于解决虚拟机放置问题,通过引进一种新的能效感知启发因子,有效更新信息素从而获得最优问题解。

而国内学者葛君伟等^[35]提出了一种兼顾任务最短完成时间、成本和负载均衡的多目标优化的改进蚁群调度算法。黄壮^[36]提出一种融入模拟退火算法的改进蚁群算法,综合考虑多种资源约束,实现虚拟机的节能和均衡负载部署。王亚宁^[37]提出了一种基于多种群蚁群算法的虚拟机整合算法,利用各种群的信息熵来决定蚂蚁群体间的信息交流策略,保证算法收敛性和多样性之间的平衡,有效减少活跃的服务器数量。

2.3.4 人工蜂群算法

人工蜂群算法是 Karaboga^[38]基于蜜蜂采蜜行为提出的,算法通过各个蜜蜂个体的局部寻优行为引导聚合,最终在群体中找出全局最优解。由此,Li 等^[39]提出了一种基于人工蜂群算法和概率模型的虚拟机整合算法,在保证主机超载概率少于某个阈值的情况下,最小化集群总能耗和虚拟机迁移次数。而 Jiang 等^[40]提出了一种基于人工蜂群算法的调度策略,最小化集群能耗和 SLA 违约率。此外,姜建华等^[41]针对数据密集型作业的特点,利用启发式思想改进蜂群优化算法,寻求虚拟机整合的最优解,在满足服务水平的同时,降低数据中心能耗。

2.4 基于强化学习的优化方法

强化学习(Reinforcement Learning, RL)是一种通过智能体(Agent)与环境(Environment)交互,反复试验学习最佳策略以解决问题的一种方法。RL

问题都可以被建模为马尔可夫决策过程(Markov Decision Processes, MDP),并由元组 < 状态空间 S , 动作空间 A , 状态转移矩阵 P , 奖赏函数 R , 折扣因子 γ > 组成。智能体在某种状态(State)下选择一个动作(Action),环境因这个动作的选择而发生状态改变并反馈一个奖赏值(Reward),智能体再依据这个奖赏值和新的环境状态进行下一轮的动作选择,其流程如图 2 所示。由于强化学习算法能够在无任何先验知识的条件下对未知或变化的环境中作出动态决策,是一种较为天然的决策方式。

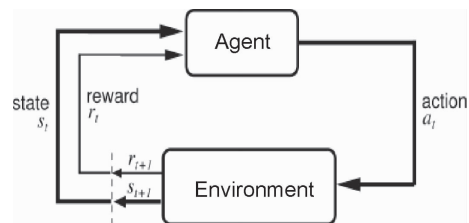


图 2 强化学习交互过程^[42]

Fig. 2 Flowchart of Reinforcement learning

Duggan 等^[42]提出了一种基于强化学习的虚拟机选择策略,该策略通过线性回归预测过载主机,然后使用 Q-Learning 方法来选择需要迁出的虚拟机。Farahnakian 等^[43]提出了一种基于强化学习的动态虚拟机整合方法,通过 Q-learning 方法来学习用于确定主机电源模式的最佳策略。Shaw 等^[44]提出了一种基于 SARSA 策略的强化学习虚拟机放置算法,用于优化虚拟机在整个数据中心的分布,以实现更高的能效。卢海峰等^[45]为了降低数据中心主机的能耗开销,利用强化学习对虚拟机放置问题进行建模,并对状态空间进行了聚合,减少了虚拟机放置问题中状态空间的维度和计算量。而 Chen 等^[46]提出了一个考虑 CPU 以及内存的深度强化学习虚拟机迁移方案,使用经验驱动的方法和深度强化学习来确定每个迁移虚拟机的目标主机,最小化数据中心虚拟机迁移所需要的总时间。

3 虚拟机调度优化目标

3.1 能耗优化

能耗是影响云数据中心发展和应用的一个主要因素。为了改善、优化数据中心能耗,许多学者已经从不同的方面提出了基于虚拟机调度的方案。此外,在优化能耗的同时,往往也会考虑其他优化目标。

Wu 等^[47]也提出了一个基于模拟退火的算法

用于提升虚拟机的部署,减少能源的消耗。Farahnakian 等^[48]为了最小化服务器的工作数量,降低系统的能耗,提出了基于 K 邻近回归的动态整合算法。在文献[49]中,为了更好地实现能耗和性能的平衡,提出了一种稳定的虚拟机整合框架,其主要包含过度使用的主机检测、虚拟机选择以及虚拟机部署 3 个部分。

此外,Hasan 等^[50]也提出一种基于启发式的资源分配和虚拟机调度方法,旨在满足客户服务质量要求(QoS)的同时,最大程度地降低总能耗和运营成本。为了有效提升数据中心的能效,Nguyen 等^[51]提出了一种基于多使用率预测的虚拟机整合算法,在满足 QoS 的前提下,有效减少虚拟机迁移的次数和功耗。Reddi 等^[52]提出一种优化能耗感知的动态虚拟机整合,更好地平衡能耗和违反 QoS 之间的问题。Alboaneen 等^[53]在其虚拟机整合框架中提出了一种新的主机负载分类方案,旨在降低能耗的同时满足用户的 QoS。Gondhi 等^[54]提出了一种基于预测的节能虚拟机整合方案,该方案可加快虚拟机整合,从而提高服务质量和性能,实现降低能耗的目标。

3.2 负载均衡

在云计算中,数据中心负载均衡是一种将额外的活动负载平均分配给多个节点的技术,从而提升系统的性能和保证用户的服务质量。

3.2.1 静态负载均衡

静态负载均衡算法一般根据节点处理新请求的能力将任务分配给节点,其处理过程仅基于节点的属性和功能的先验知识^[55]。较常见的静态负载均衡算法有轮询算法、加权轮询算法、随机算法和源地址哈希算法。

轮询算法是最简单的一种负载均衡算法,算法将请求按顺序轮流地分配到每个节点上,不关心每个节点实际的连接数和当前的系统负载^[56]。加权轮询算法^[57]考虑到服务器性能的差异,给配置高、负载低的机器配置更高的权重,让其处理更多的请求。随机算法是将请求随机分配到各个节点。而源地址哈希算法则是根据客户端的 IP 地址,通过哈希函数计算得到一个数值并取模,得到要分配的节点。虽然静态负载均衡算法可以有效地提升系统的利用率,但是由于负载具有动态性和时变性,这些算法无法动态地适应负载的变化,因此,难以应用于复杂多变的云环境。

3.2.2 动态负载均衡

动态负载均衡算法考虑了节点功能和网络带宽的不同属性。这些算法中的大多数依赖于先前收集的有关云中节点信息知识组合,以及在选定节点处理任务组件时收集的运行时属性^[55]。其优点是在分配任务时可以根据收集和计算的属性动态地将任务重新分配给节点,虽然需要对节点和任务进度进行持续监视,但是它们可以更准确且更有效地达到负载平衡。对于动态负载均衡算法,较常见的包括最小连接数法、最快响应速度法以及观察模式法等。

最小连接数法的原理是根据每个节点当前的连接情况,动态地选取当前积压连接数最少的一个节点处理当前请求,尽可能地提高后端服务的利用效率,将请求合理地分流到每一台服务器。最快响应速度法是根据请求的响应时间,来动态调整每个节点的权重,将响应速度快的服务节点分配更多的请求,响应速度慢的服务节点分配更少的请求。观察模式法则是一种综合了最小连接数法和最快响应速度法的算法,同时考虑连接数目和响应时间,并以这两项的最佳平衡为依据作为新的请求选择服务器。

Tarighi 等^[58]提出了一种多标准决策负载均衡算法,评估每个虚拟机的资源使用情况来检测过度负载的主机,并使用多标准决策方法确定需要转移的虚拟机。Panwar 等^[59]提出了一种动态的负载均衡算法,通过分析所有虚拟机的当前状态以及响应时间,实现在服务器上均匀分配动态负载。Papadopoulos 等^[60]则提出了一种自适应的随机优化方法来均衡数据中心的服务器负载。

3.3 迁移时间优化

在虚拟机动态迁移中,评价迁移好坏的 2 个重要指标是虚拟机的停机时间和总迁移时间。虚拟机停机时间表示的是从源主机暂停虚拟机那一刻开始到目的主机恢复虚拟机执行那一刻的时间;总迁移时间则是从迁移过程开始到迁移完成的时间。在虚拟机的迁移中,对其停机时间和总迁移时间进行优化,是当前一个重要目标。

3.3.1 Pre-copy 算法

Pre-copy 算法是由 Clark 等^[61]提出并实现的虚拟机动态迁移方法,其核心思想是将内存复制分为 3 个阶段:①首次复制阶段,将虚拟机的全部内存页面从源主机复制到目的主机,期间源虚拟

机不间断运行;②迭代复制阶段,不断复制在前一轮复制传送过程中被修改并且本轮未被修改过的虚拟机内存页面;③stop-and-copy 阶段,源主机暂停虚拟机的运行并将最后剩余的虚拟机内存脏页面复制到目的主机。

基于此, Ma 等^[62]对 Pre-copy 算法进行了改进,先迁移更新慢的内存页,最后把更新频繁的内页一次性迁移。Hu 等^[63]提出了一种基于次数序列的 Pre-copy 算法,预先复制虚拟机重要信息到目的主机上,减少了内存页面的复制次数,提高算法收敛性。为了减少迁移的冗余数据量, Svård 等在文献[64 - 65]中提出了基于增量压缩技术的 Pre-copy 算法,增大数据传输吞吐量,提高了动态迁移的性能和效率。

3.3.2 Post-copy 算法

Post-copy 算法^[66]先将虚拟机现有的内存中不会进行交换或者移动的内存信息传输到目的服务器,并迅速把虚拟机在目的服务器上启动起来。同时,源服务器也会动态地把剩余的内存信息推送到目的服务器上。当目的服务器上虚拟机调用到还没传输过来的内存信息时,会触发 page-fault 机制。此时,算法会在源服务器中通过文件描述符获得 page-fault 相关内存信息,传输到目的服务器上让虚拟机继续运行。其实现过程如图 3 所示。

在 Post-copy 算法中,内存页面被获取的不同方式产生了不同的 Post-copy 改进方法,每一种都对 Post-copy 产生了改进效果,这些改进方法主要有 3 种:按需取页、主动推送和页面预取。按需取页确保了每一个页面仅通过网络被传送一次,而在 Pre-copy 中脏页要被重复传送多次^[67]。主动推送则是克服 Pre-copy 的不确定性迭代复制,尽可

能地减少了对源主机的依赖性^[68]。而页面预取利用了虚拟机的内存访问方式,来减少网络缺页异常的发生和恢复阶段的时间间隔^[69]。

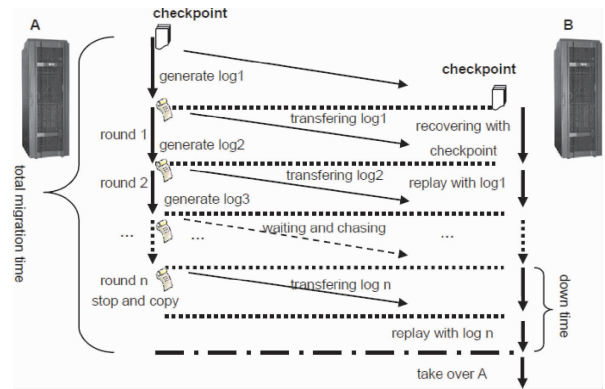


图 3 Post-copy 实现过程^[66]
Fig. 3 Flowchart of Post-copy

3.3.3 基于检查点恢复与日志回訪技术的方法

基于内存复制的虚拟机动态迁移算法,由于传送的数据量过大,因此它在应用上存在一定局限性。所以依赖于内存页面复制的各类动态迁移算法只能确保在一定环境下动态虚拟机迁移时应用和服务的不间断性。为了克服该问题, Liu 等^[70]提出了一种基于检查点恢复与日志回訪技术的动态迁移方法 CR/TR-Motion。与内存复制类算法的内存同步方式不同, CR/TR-Motion 从虚拟机动态迁移本身的动机出发,利用了更多目的端的计算能力,通过两边的计算能力来使虚拟机状态得到同步。具体来说就是,源主机把所有的对内存操作的事件都记录到这个日志文件中,然后复制传送到目的主机上并使用这些日志文件来回放内存事件,进而实现虚拟机内存状态的同步,迁移过程如图 4 所示。

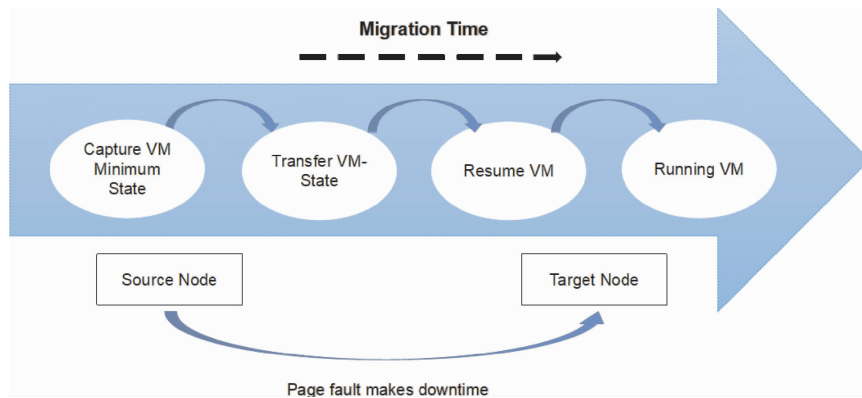


图 4 CR/TR-Motion 迁移过程^[70]
Fig. 4 The migration of CR/TR-Motion

此外,Knauth等^[71]提出了一种基于检查点的冗余数据消除的虚拟机动态迁移方法。该方法在虚拟机迁移过程中会在源主机的磁盘上留有对应的检查点,对比检查点以及被迁移虚拟机内存页的校验和是否一致,当不一致的时候才对内存页进行传输。Yang等^[72]则提出一种分布式云数据中心的虚拟机动态迁移方案,利用虚拟机多个备份快照来加快虚拟机迁移效率,提高了虚拟机实时迁移的效率并减少了对源虚拟机上用户应用程序的影响。

4 未来研究方向

在这一部分,主要是对未来虚拟机调度研究方向的探讨,基于当前的研究现状,给出了4个未来可研究的方向:

(1)结合物理架构特征的虚拟机调度算法

当前云数据中心往往是一个异构环境,切实结合数据中心物理架构特点,合理利用网络拓扑、机架以及制冷设备等信息,有针对性地调度虚拟机,可以有效地提高数据中心的能效。

(2)深度学习的应用

随着算力的提升,深度学习在各个领域内都有较为出色的表现,而将这种方法应用在虚拟机调度上是一个值得研究的方向,特别是深度强化

学习的应用,在决策上有着天然的适合性。

(3)性能干扰检测调度

在调度虚拟机的时候,考虑虚拟机之间的干扰问题,有效避免服务之间的干扰,可以提高虚拟机性能和服务质量。而如何构建一个性能干扰模型,确定虚拟机之间的反亲和性以及亲和性也是一个值得攻关的子课题。

(4)跨数据中心的虚拟机调度

随着数据中心的发展,云服务提供商的数据中心分布在各地,打破数据中心的区域限制,跨数据中心放置虚拟机,可以有效打散虚拟机,提高容错性以及服务质量。但是跨数据中心调度往往需要考虑网络、数据中心的差异等现实问题,如何联合多地数据中心合理部署虚拟机,提高经济效益是一个可研究的课题。

5 结论

虚拟机调度对云数据中心资源管理起着重要的作用,对该技术的分析总结可以有效地指导未来资源管理研究方向。本文对当前虚拟机调度领域进行了分析总结,从相关技术、优化方法以及优化目标3个方面进行了较为全面的阐述。此外,基于前面的总结分析,指出了4个未来研究方向,以供相关研究人员参考。

参考文献:

- [1] Gao Y, Guan H, Qi Z, et al. A multi-objective ant colony system algorithm for virtual machine placement in cloud computing[J]. *Journal of Computer and System Sciences*, 2013, 79(8): 1230-1242.
- [2] Silva F M C, Monteiro C C, Inácio P R M, et al. Approaches for optimizing virtual machine placement and migration in cloud environments: A survey[J]. *Journal of Parallel and Distributed Computing*, 2018, 111: 222-250.
- [3] Ho Y, Liu P, Wu J J. Server consolidation algorithms with bounded migration cost and performance guarantees in cloud computing[C]//2011 Fourth IEEE International Conference on Utility and Cloud Computing. Los Alamitos: IEEE Computer Society, 2011: 154-161.
- [4] Charitopoulos V M, Papageorgiou L G, Dua V. Multi-parametric mixed integer linear programming under global uncertainty[J]. *Computers & Chemical Engineering*, 2018, 116: 279-295.
- [5] López J, Kushik N, Zeghlache D. Virtual machine placement quality estimation in cloud infrastructures using integer linear programming[J]. *Software Quality Journal*, 2019, 27(2): 731-755.
- [6] Chen Y, Chen X, Liu W, et al. Stochastic scheduling for variation-aware virtual machine placement in a cloud computing CPS[J]. *Future Generation Computer Systems*, 2020, 105: 779-788.
- [7] Zhang K, Wu T, Chen S, et al. A new energy efficient VM scheduling algorithm for cloud computing based on dynamic programming[C]//2017 IEEE 4th International Conference on Cyber Security and Cloud Computing (CSCloud). Piscataway: IEEE, 2017: 249-254.
- [8] Chaisiri S, Lee B S, Niyato D. Optimal virtual machine placement across multiple cloud providers[C]//2009 IEEE Asia-

- Pacific Services Computing Conference (APSCC). Piscataway: IEEE, 2009: 103-110.
- [9] Nandi B B, Banerjee A, Ghosh S C, et al. Stochastic VM multiplexing for datacenter consolidation[C]//2012 IEEE Ninth International Conference on Services Computing. Piscataway: IEEE, 2012: 114-121.
- [10] Tang Z, Mo Y, Li K, et al. Dynamic forecast scheduling algorithm for virtual machine placement in cloud computing environment[J]. The Journal of Supercomputing, 2014, 70(3): 1279-1296.
- [11] Verma A, Ahuja P, Neogi A. pMapper: Power and migration cost aware application placement in virtualized systems[C]//ACM/IFIP/USENIX International Conference on Distributed Systems Platforms and Open Distributed Processing. New York: ACM, 2008: 243-264.
- [12] 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.
- [13] Abdullah M, Lu K, Wieder P, et al. A heuristic-based approach for dynamic VMs consolidation in cloud data centers[J]. Arabian Journal for Science and Engineering, 2017, 42(8): 3535-3549.
- [14] Yan H, Wang H, Li X, et al. Cost-efficient consolidating service for Aliyun's cloud-scale computing[J]. IEEE Transactions on Services Computing, 2016, 12(1): 117-130.
- [15] Nashaat H, Ashry N, Rizk R. Smart elastic scheduling algorithm for virtual machine migration in cloud computing[J]. The Journal of Supercomputing, 2019, 75(7): 3842-3865.
- [16] Lin C C, Liu P, Wu J J. Energy-aware virtual machine dynamic provision and scheduling for cloud computing[C]//2011 IEEE 4th International Conference on Cloud Computing. Piscataway:IEEE, 2011: 736-737.
- [17] Koza J R. Genetic programming: On the programming of computers by means of natural selection[M]. New York: ACM, 1992.
- [18] Storn R, Price K. Differential evolution – a simple and efficient heuristic for global optimization over continuous spaces[J]. Journal of Global Optimization, 1997, 11(4): 341-359.
- [19] Sonklin C, Tang M, Tian Y C. A decrease-and-conquer genetic algorithm for energy efficient virtual machine placement in data centers[C]//2017 IEEE 15th International Conference on Industrial Informatics (INDIN). Piscataway:IEEE, 2017: 135-140.
- [20] Sarker T K, Tang M. A penalty-based genetic algorithm for the migration cost-aware virtual machine placement problem in cloud data centers[C]//International Conference on Neural Information Processing. Cham:Springer, 2015: 161-169.
- [21] Dong Y S, Xu G C, Fu X D. A distributed parallel genetic algorithm of placement strategy for virtual machines deployment on cloud platform[J/OL]. The Scientific World Journal, 2014, <https://www.hindawi.com/journals/tswj/2014/259139/>.
- [22] Sui X, Liu D, Li L, et al. Virtual machine scheduling strategy based on machine learning algorithms for load balancing[J]. EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking, 2019(1): 160.
- [23] Li Z, Yu X, Yu L, et al. Energy-efficient and quality-aware VM consolidation method[J]. Future Generation Computer Systems, 2020, 102: 789-809.
- [24] 王波. 基于遗传算法的集群虚拟机资源调度研究[J]. 西南师范大学学报(自然科学版), 2016, 41(3): 107-111.
- [25] 石帅. 云计算环境下的虚拟机节能调度算法研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2014.
- [26] Kennedy J, Eberhart R. Particle swarm optimization[C]//Proceedings of ICNN'95-International Conference on Neural Networks. Piscataway:IEEE, 1995, 4: 1942-1948.
- [27] Wang S, Liu Z, Zheng Z, et al. Particle swarm optimization for energy-aware virtual machine placement optimization in virtualized data centers[C]//2013 International Conference on Parallel and Distributed Systems. Piscataway:IEEE, 2013: 102-109.
- [28] Ramezani F, Naderpour M, Lu J. A multi-objective optimization model for virtual machine mapping in cloud data centres [C]//2016 IEEE International Conference on Fuzzy Systems (FUZZ-IEEE). Piscataway:IEEE, 2016: 1259-1265.
- [29] 高玉娇. 基于改进粒子群算法的虚拟机调度策略研究[J]. 现代商贸工业, 2019, 40(4): 176-178.
- [30] 苏宇, 高阳, 秦志光. 功耗感知的自适应粒子群优化虚拟机动态映射[J]. 计算机科学, 2015, 42(12): 26-31.
- [31] Dorigo M, Di Caro G. Ant colony optimization: A new meta-heuristic[C]//Proceedings of the 1999 Congress on Evolutionary Computation-CEC99 (Cat. No. 99TH8406). Piscataway:IEEE, 1999, 2: 1470-1477.
- [32] Liu X F, Zhan Z H, Du K J, et al. Energy aware virtual machine placement scheduling in cloud computing based on ant

- colony optimization approach[C]//Proceedings of the 2014 Annual Conference on Genetic and Evolutionary Computation. New York: ACM, 2014: 41-48.
- [33] Farahnakian F, Ashraf A, Pahikkala T, et al. Using ant colony system to consolidate VMs for green cloud computing[J]. IEEE Transactions on Services Computing, 2014, 8(2): 187-198.
- [34] Alharbi F, Tian Y C, Tang M, et al. Profile-based ant colony optimization for energy-efficient virtual machine placement [C]//International Conference on Neural Information Processing. Berlin: Springer, 2017: 863-871.
- [35] 葛君伟, 郭强, 方义秋. 一种基于改进蚁群算法的多目标优化云计算任务调度策略[J]. 微电子学与计算机, 2017, 34(11): 63-67.
- [36] 黄壮. 云计算中面向能耗优化的虚拟机部署方法研究[D]. 长沙:湖南大学, 2018.
- [37] 王亚宁. 面向数据中心的虚拟机整合优化算法研究[D]. 天津:天津工业大学, 2017.
- [38] Karaboga D. An idea based on honey bee swarm for numerical optimization[R]. Turkey: Engineering Faculty, Computer Engineering Department, Erciyes University, 2005:1-10.
- [39] Li Z, Yan C, Yu L, et al. Energy-aware and multi-resource overload probability constraint-based virtual machine dynamic consolidation method[J]. Future Generation Computer Systems, 2018, 80: 139-156.
- [40] Jiang J, Feng Y, Zhao J, et al. DataABC: A fast ABC based energy-efficient live VM consolidation policy with data-intensive energy evaluation model[J]. Future Generation Computer Systems, 2017, 74: 132-141.
- [41] 姜建华, 冯云钊, 吴迪, 等. 数据中心启发式反向人工蜂群虚拟机整合节能策略[J]. 吉林大学学报(理学版), 2016, 54(3): 597-602.
- [42] Duggan M, Flesk K, Duggan J, et al. A reinforcement learning approach for dynamic selection of virtual machines in cloud data centres [C] // 2016 Sixth International Conference on Innovative Computing Technology (INTECH). Piscataway: IEEE, 2016: 92-97.
- [43] Farahnakian F, Liljeberg P, Plosila J. Energy-efficient virtual machines consolidation in cloud data centers using reinforcement learning[C]//2014 22nd Euromicro International Conference on Parallel, Distributed, and Network-Based Processing. Piscataway: IEEE, 2014: 500-507.
- [44] Shaw R, Howley E, Barrett E. An advanced reinforcement learning approach for energy-aware virtual machine consolidation in cloud data centers[C]//2017 12th International Conference for Internet Technology and Secured Transactions (ICITST). Piscataway: IEEE, 2017: 61-66.
- [45] 卢海峰, 顾春华, 罗飞, 等. 强化学习下能耗优化的虚拟机放置策略[J]. 计算机科学, 2019(9): 291-297.
- [46] Ying C, Li B, Ke X, et al. Raven: Scheduling virtual machine migration during datacenter upgrades with reinforcement learning[J/OL]. Mobile Networks and Applications, 2020. doi:https://doi.org/10.1007/s11036-020-01632-1.
- [47] Wu Y, Tang M, Fraser W. A simulated annealing algorithm for energy efficient virtual machine placement [C]//2012 IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics (SMC). Piscataway: IEEE, 2012: 1245-1250.
- [48] Farahnakian F, Pahikkala T, Liljeberg P, et al. Energy aware consolidation algorithm based on k-nearest neighbor regression for cloud data centers[C]//2013 IEEE/ACM 6th International Conference on Utility and Cloud Computing. Piscataway: IEEE, 2013: 256-259.
- [49] Takouna I, Alzaghoul E, Meinel C. Robust virtual machine consolidation for efficient energy and performance in virtualized data centers[C]//2014 IEEE International Conference on Internet of Things (iThings), and IEEE Green Computing and Communications (GreenCom) and IEEE Cyber, Physical and Social Computing (CPSCom). Piscataway: IEEE, 2014: 470-477.
- [50] Hasan S, Huh E N. Heuristic based energy-aware resource allocation by dynamic consolidation of virtual machines in cloud data center[J]. KSII Transactions on Internet & Information Systems, 2013, 7(8): 1825-1842.
- [51] Nguyen T H, Di Francesco M, Yla-Jaaski A. Virtual machine consolidation with multiple usage prediction for energy-efficient cloud data centers[J]. IEEE Transactions on Services Computing, 2017, 13(1): 186-199.
- [52] Reddi K S, Pasupuleti S K. Optimal energy aware dynamic virtual machine consolidation in cloud data centers[C]//2019 IEEE 16th India Council International Conference (INDICON). Piscataway: IEEE, 2019: 1-4.
- [53] Alboaneen D A, Pranggono B, Tianfield H. Energy-aware virtual machine consolidation for cloud data centers[C]//2014 IEEE/ACM 7th International Conference on Utility and Cloud Computing. Piscataway: IEEE, 2014: 1010-1015.

- [54] Gondhi N K, Kailu P. Prediction based energy efficient virtual machine consolidation in cloud computing[C]//2015 Second International Conference on Advances in Computing and Communication Engineering. Piscataway: IEEE, 2015: 437-441.
- [55] Al Nuaimi K, Mohamed N, Al Nuaimi M, et al. A survey of load balancing in cloud computing: Challenges and algorithms [C]//2012 Second Symposium on Network Cloud Computing and Applications. Piscataway: IEEE, 2012: 137-142.
- [56] Sotomayor B, Montero R S, Llorente I M, et al. Virtual infrastructure management in private and hybrid clouds[J]. IEEE Internet Computing, 2009, 13(5): 14-22.
- [57] Devi D C, Uthariaraj V R. Load balancing in cloud computing environment using improved weighted round robin algorithm for nonpreemptive dependent tasks[J/OL]. The Scientific World Journal, 2016. doi: <https://www.hindawi/journals/tswj/2016/389605/>.
- [58] Tarighi M, Motamedi S A, Arianyan E. Performance improvement of virtualized cluster computing system using TOPSIS algorithm[C]//The 40th International Conference on Computers & Industrial Engineering. Piscataway: IEEE, 2010: 1-6.
- [59] Panwar R, Mallick B. Load balancing in cloud computing using dynamic load management algorithm[C]//2015 International Conference on Green Computing and Internet of Things (ICGCIoT). Piscataway: IEEE, 2015: 773-778.
- [60] Papadopoulos A V, Klein C, Maggio M, et al. Control-based load-balancing techniques: Analysis and performance evaluation via a randomized optimization approach[J]. Control Engineering Practice, 2016, 52: 24-34.
- [61] Clark C, Fraser K, Hand S, Hansen J, et al. Live migration of virtual machines[C]//Proceedings of the 2nd Conference on Symposium on Networked Systems Design & Implementation (NSDI'05). New York: ACM, 2005: 273-286.
- [62] Ma F, Liu F, Liu Z. Live virtual machine migration based on improved pre-copy approach[C]//Proceedings of 2010 IEEE International Conference on Software Engineering and Service Sciences (ICSESS). Piscataway: IEEE, 2010: 230-233.
- [63] Hu B, Lei Z, Lei Y, et al. A time-series based precopy approach for live migration of virtual machines[C]//Proceedings of 2011 IEEE 17th International Conference on Parallel and Distributed Systems (ICPADS). Piscataway: IEEE, 2011: 947-952.
- [64] Svärd P, Tordsson J, Hudzia B, et al. High performance live migration through dynamic page transfer reordering and compression[C]//Proceedings of 2011 3rd IEEE International Conference on Cloud Computing Technology and Science. Piscataway: IEEE, 2011: 542-548.
- [65] Svärd P, Hudzia B, Tordsson J, Elmroth E. Evaluation of delta compression techniques for efficient live migration of large virtual machines[C]//Proceedings of the 7th ACM SIGPLAN/SIGOPS International Conference on Virtual Execution Environments. New York: ACM, 2011: 111-120.
- [66] Hines M R, Deshpande U, Gopalan K. Post-copy live migration of virtual machines[J]. ACM SIGOPS Operating Systems Review, 2009, 43(3): 14-26.
- [67] Trivedi K S. An analysis of prepagging[J]. Computing, 1979, 22(3): 191-210.
- [68] Trivedi K S. Prepagging and applications to array algorithms[J]. IEEE Transactions on Computers, 1976 (9): 915-921.
- [69] Ho R S C, Wang C L, Lau F C M. Lightweight process migration and memory prefetching in OpenMosix[C]//2008 IEEE International Symposium on Parallel and Distributed Processing. Piscataway: IEEE, 2008: 1-12.
- [70] Liu H, Jin H, Liao X, et al. Live migration of virtual machine based on full system trace and replay[C]//Proceedings of the 18th ACM International Symposium on High Performance Distributed Computing. New York: ACM, 2009: 101-110.
- [71] Knauth T, Fetzer C. Vecycle: Recycling VM checkpoints for faster migrations[C]//Proceedings of the 16th Annual Middleware Conference. Vancouver: ACM, 2015: 210-221.
- [72] Yang Y, Mao B, Jiang H, et al. Snapmig: Accelerating VM live storage migration by leveraging the existing VM snapshots in the cloud[J]. IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems, 2018, 29(6): 1416-1427.

【责任编辑: 陈 钢】