

## 具备适应性调节服务机制的云资源优化分析\*

张永华, 徐秀丽

(燕山大学 理学院, 河北 秦皇岛 066004)

**摘要:**为了降低云数据中心能量浪费和提高云用户服务质量,并向云计算平台管理者提供合理的顾客收费策略,提出了虚拟机服务模式适应性调节的调度策略。以当前系统请求节点数为依据,动态调整系统服务速率及模式,并对虚拟机进行分区管理。基于工作故障的部分服务台同步休假  $M/M/c+k/d$  排队系统对该服务平台进行建模分析,利用迭代求解的方法求得了系统的稳态分布及性能指标。通过数值分析展示了各参数对性能指标的影响,结果表明:在 II 区增加 12 台虚拟机时,发生溢出故障的概率比 I 区低 7.3%,且该调度策略表现出比较明显的节能效果。此外,通过构造收益函数,求解得到同时满足个人收益均衡和社会最优收益的顾客收费策略。该模型的建立将为云计算平台的优化管理和控制提供参考和依据。

**关键词:**排队系统;云计算;调度策略;节能

**中图分类号:**TP393

**文献标志码:**A

**文章编号:**1672-6693(2023)06-0015-10

自“云计算”这一概念由谷歌公司于 2006 年提出之后,发展至今,受到了广泛关注。云计算中的虚拟化技术至关重要,该技术可以打破服务器之间的物理分割,将不同服务器资源抽象为一个逻辑整体,实现服务器资源的统一调配与使用<sup>[1]</sup>。由于云计算技术的高拓展性、可靠性和优良的性价比,大规模的云计算系统发展非常迅速。但是,随着云用户的爆炸式增长,任务形式愈加复杂,云数据中心所面临的负载压力也变的前所未有,若没有一个合理的调度方案,不仅会导致云平台之间负载失衡,还会造成巨大的资源浪费。对云用户而言,他们所接受的服务质量(QoS)至关重要,这决定着该用户是否会继续使用。调查显示,若用户在访问亚马逊平台时,响应时延每增加 100 ms,该平台就会减少 1%的收入;同样在访问谷歌时,响应时延每增加 0.5 s,该平台就会减少 20%的收入。增加服务器数量可有效缩短响应时延,但若出现调度不合理的情况,不仅会增加云服务商的运营成本,还会增加相当多不必要的能耗。由于任务请求到达的随机性以及现有云计算中心服务器通常保持开启状态,不合理的调度策略有可能会使虚拟机长时间处于空闲状态,而空闲状态下服务器所消耗的功率可以达到服务器运行功率峰值的 50%到 60%<sup>[2]</sup>,且长时间运转的服务器会产生大量热量,导致部分散热不良的服务器频繁出现故障现象。因此,既要使云计算平台保持较高的服务质量,又要使之具有较低能耗是一个 NP 难问题,但相关研究表明二者之间存在最优均衡点<sup>[3]</sup>。

自从 Levy 等人<sup>[4]</sup>提出休假策略以来,许多学者对休假排队模型进行了研究。田乃硕等人<sup>[5]</sup>建立了部分服务台多重休假的  $M/M/c$  排队系统,讨论了 2 种类型的服务策略(空竭服务和半空竭服务),给出了稳态指标的计算方法和条件随机分解结果。Xu 等人<sup>[6]</sup>在  $M/M/c$  排队模型中引入了部分服务台休假策略,研究了带有单重休假和  $(e, d)$  策略的休假排队模型。Lin 等人<sup>[7]</sup>研究了单重工作休假的多服务台排队系统,利用矩阵几何解的方法给出了队长的稳态分布并建立了相关性能指标,通过构造和分析成本函数,得到使预期成本最小化的服务台数量及休假参数。朱翼隽等人<sup>[8]</sup>研究了带有负顾客且部分服务台工作休假的  $M/M/c$  排队系统,以  $N$  策略作为休假终止策略,得到了稳态队长分布以及在服务台全忙条件下的随机分解结构。Kim 等人<sup>[9]</sup>研究了 2 类顾客具有非抢占优先级的同步多重休假  $M/M/m$  排队系统,给出了顾客稳态队长分布母函数,并得到了 2 类顾客均衡收益和社会最优收益的策略。Saffer 等人<sup>[10]</sup>研究了带有闸门规则的同步多重休假  $M/M/c$  排队模型,给出了系统

\* 收稿日期:2023-01-02 修回日期:2023-05-22 网络出版时间:2023-09-25T15:31

资助项目:国家自然科学基金面上项目(No. 62171143)

第一作者简介:张永华,男,研究方向为排队论与随机过程, E-mail: zyh\_ysu@163.com; 通信作者:徐秀丽,女,教授,博士生导师, E-mail: xxl-ysu@163.com

网络出版地址: <https://link.cnki.net/urlid/50.1165.n.20230920.1923.008>

平稳状态下顾客队长分布的母函数及等待时长的 LST 变换,并提供了一些数值算例。

基于休假排队的理论成果,Sahoo 等人<sup>[11]</sup>提出了虚拟机激活与休眠策略,可根据云计算系统运行情况适时调节虚拟机状态,以达到降低能耗的目的。金顺福等人<sup>[12]</sup>提出一种基于备用虚拟机同步休眠的云数据中心节能策略,建立了 1 个批量到达且部分服务台同步多重休假的排队模型,求解出系统模型的稳态分布并给出系统节能率等性能指标表达式。Cheng 等人<sup>[13]</sup>利用空竭服务的休假排队理论对异构云计算系统的任务调度进行建模,求得了请求节点在系统稳态状态下平均逗留时间和能源消耗量,并利用仿真实验对所提调度算法有效性进行验证。Ma 等人<sup>[14]</sup>研究了带不耐烦顾客、可修故障和两阶段服务的排队系统,利用矩阵几何解方法给出了区块链交易的平均等待时间和其他性能指标,并构造了收益函数,得到了均衡收益条件下的数值结果。Thomasian<sup>[15]</sup>利用休假排队模型对 RAID5 磁盘阵列提出一种重建处理策略,利用母函数的方法得到了系统稳定状态下的平均响应时间等性能表达式。Jin 等人<sup>[16]</sup>提出了服务速率可调节,部分服务台同步休眠的云计算排队系统,通过构建二维马尔可夫链,分析了该系统的节能水平和响应性能。

在上述基础上,本文结合云计算服务平台面临的现实问题,以及云服务器的关闭/休眠技术和虚拟机动态迁移技术,基于工作故障的部分服务台同步休假  $M/M/c+k/d$  排队模型提出云服务调度策略。此外,为更符合实际应用场景,在模型中加入了不耐烦的顾客类型,使虚拟机服务速率可根据服务场景的需要进行适应性调节以有效减小云服务平台能耗的同时保证用户接受服务的质量。给出了排队系统稳态分布的迭代公式,构建了平均网络时延和溢出故障率等性能指标,利用 Matlab 进行数值实验,建立了收益函数,进行个人收益和社会最优收益的数值分析,并对服务系统的收费策略进行了研究。

## 1 模型描述

针对云计算平台的实际运行状况,本文提出如下调度策略与假设:

- 1) 云用户请求节点遵循参数为  $\lambda$  的泊松过程进入云计算服务系统,即请求的到达率为  $\lambda$ 。
- 2) 云计算服务系统的虚拟机分别放置在 I 区和 II 区 2 个区域,其中位于 I 区  $c$  个虚拟机时刻保持运转,II 区  $k$  个虚拟机可同步进行活跃/休眠状态的切换。当系统接收到服务请求时,负载均衡器首先将该请求节点分配到 I 区接受服务。当 I 区虚拟机未被占满时,服务时间服从参数为  $\mu_1$  的负指数分布,此时 II 区虚拟机处于休眠状态,休眠时间服从参数为  $\eta$  的负指数分布。当 1 次休眠结束后检测到 I 区被占满,则 II 区虚拟机同步切换为活跃状态,否则进行下一次休眠。
- 3) 当负载均衡器检测到 I 区虚拟机被占满,I 区虚拟机服务速率立即提升,服务时间服从参数为  $\mu_2$  的负指数分布。若此时 II 区虚拟机还未结束休眠,则接下来到达的请求节点留在缓冲区等待,反之,则在缓冲区的请求节点和接下来到达的请求节点转移至 II 区接受服务,服务时间服从参数为  $\mu_2$  的负指数分布。
- 4) 若 II 区处于休眠状态且 I 区虚拟机全被占满,则接下来到达的请求节点在缓冲区排队,缓冲区容量为  $d$  ( $d > k$ ),直到系统中请求节点数达到  $c+d$  时 II 区还未结束休眠,则系统容量已满,随后到达的请求节点将因为溢出故障而被拒绝服务;若 II 区处于活跃状态,则当系统中请求节点数达到  $c+k+d$  时,系统容量已满,随后到达的请求节点将被拒绝服务。
- 5) 当请求节点在缓冲区排队时,请求节点会因为不耐烦而中途退出,不耐烦时间  $T$  服从参数为  $\xi$  的负指数分布。
- 6) I 区和 II 区虚拟机都由同一台物理机通过虚拟化技术所得,该物理机有发生工作故障的可能,当发生工作故障时,会导致所有虚拟机服务速率下降,服务时间服从参数为  $\mu_0$  ( $\mu_0 < \mu_1 < \mu_2$ ) 的负指数分布,出现故障的过程为参数  $\tau$  的泊松过程。发生故障后对物理机立即进行修理,修理时间服从  $\epsilon$  的负指数分布。
- 7) 当系统中请求节点数少于或等于  $c$  时,若 II 区有正在接受服务的请求节点,则全部迁移至 I 区,且 II 区虚拟机进行休眠。

假设云计算平台的服务规则是先到先服务 (first-come first-served),请求节点的到达间隔、服务时间、休眠时间等均相互独立。

云计算平台调度策略的运行机制如图 1 所示。



iv) 当  $i=d, j=0$  时, 为:

$$X_{11}=\tau+\eta+c\mu_2+i\xi, X_{12}=\varepsilon+\eta+c\mu_0+i\xi, X_{13}=\lambda+\tau+(i-k)\xi+(c+k)\mu_2, \\ X_{14}=\lambda+\varepsilon+(i-k)\xi+(c+k)\mu_0.$$

$$2) \quad \mathbf{B}_i = \begin{bmatrix} i\mu_1 & 0 \\ 0 & i\mu_0 \end{bmatrix}, 1 \leq i \leq c-1, \mathbf{B}_c = \begin{bmatrix} c\mu_2 & 0 \\ 0 & c\mu_0 \\ c\mu_2 & 0 \\ 0 & c\mu_0 \end{bmatrix}, \mathbf{B}_{c+i+j} = \begin{bmatrix} X_{31} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & X_{32} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & X_{33} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & X_{34} \end{bmatrix}, \\ \mathbf{B}_{c+d+1} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & (d-k+1)\xi+(c+k)\mu_2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & (d-k+1)\xi+(c+k)\mu_0 \end{bmatrix}, \\ \mathbf{B}_{c+d+i} = \begin{bmatrix} (d+i-k)\xi+(c+k)\mu_2 & 0 \\ 0 & (d+i-k)\xi+(c+k)\mu_0 \end{bmatrix}, 2 \leq i \leq k;$$

其中  $X_{21}, X_{22}, X_{23}, X_{24}$  的取值分以下几种情况:

i) 当  $1 \leq i \leq k, j=0$  时, 为:

$$X_{21}=i\xi+c\mu_2, X_{22}=i\xi+c\mu_0, X_{23}=(c+i)\mu_2, X_{24}=(c+i)\mu_0.$$

ii) 当  $i=k, 1 \leq j \leq d-k-1$  时, 为:

$$X_{21}=(i+j)\xi+c\mu_2, X_{22}=(i+j)\xi+c\mu_0, X_{23}=j\xi+(c+i)\mu_2, X_{24}=j\xi+(c+i)\mu_0.$$

iii) 当  $i=d, j=0$  时, 为:

$$X_{21}=i\xi+c\mu_2, X_{22}=i\xi+c\mu_0, X_{23}=(i-k)\xi+(c+k)\mu_2, X_{24}=(i-k)\xi+(c+k)\mu_0.$$

$$3) \quad \mathbf{C}_i = \begin{bmatrix} \lambda & 0 \\ 0 & \lambda \end{bmatrix}, 0 \leq i \leq c-2, c+d+1 \leq i \leq c+d+k-1, \mathbf{C}_{c-1} = \begin{bmatrix} \lambda & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \lambda & 0 & 0 \end{bmatrix}, \\ \mathbf{C}_i = \begin{bmatrix} \lambda & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \lambda & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \lambda & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \lambda \end{bmatrix}, c \leq i \leq c+d-1, \mathbf{C}_{c+d} = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ \lambda & 0 \\ 0 & \lambda \end{bmatrix}.$$

下面对系统稳态进行分析。记系统稳态概率为:

$$\pi_{ij} = \lim_{t \rightarrow \infty} P \{ L(t)=i, J(t)=j \}, (i, j) \in \Omega.$$

系统稳态概率向量为:

$$\boldsymbol{\Pi} = [\boldsymbol{\Pi}_0, \boldsymbol{\Pi}_1, \dots, \boldsymbol{\Pi}_{c+k+d}],$$

其中:

$$\boldsymbol{\Pi}_i = \begin{cases} (\pi_{i0}, \pi_{i1}), & 0 \leq i < c, \\ (\pi_{i0}, \pi_{i1}, \pi_{i2}, \pi_{i3}), & c \leq i \leq c+d, \\ (\pi_{i2}, \pi_{i3}), & c+d+1 \leq i < c+k+d. \end{cases}$$

则由 Markov 过程理论可知系统的平衡方程为:

$$\begin{cases} \boldsymbol{\Pi} \mathbf{Q} = \mathbf{0}, \\ \boldsymbol{\Pi} \mathbf{e} = \mathbf{1}, \end{cases} \quad (1)$$

其中:  $\mathbf{e}$  为  $2(c+k)+4(d+1)$  维的元素全为 1 的列向量。

根据  $\mathbf{Q}$  矩阵的分块结构形式, 方程(1)可写为如下分块形式:

$$\begin{cases} \boldsymbol{\Pi}_0 \mathbf{A}_0 + \boldsymbol{\Pi}_1 \mathbf{B}_1 = \mathbf{0}, \\ \boldsymbol{\Pi}_{n-1} \mathbf{C}_{n-1} + \boldsymbol{\Pi}_n \mathbf{A}_n + \boldsymbol{\Pi}_{n+1} \mathbf{B}_{n+1} = \mathbf{0}, n=1, \dots, c+k+d-1, \\ \boldsymbol{\Pi}_{c+k+d-1} \mathbf{C}_{c+k+d-1} + \boldsymbol{\Pi}_{c+k+d} \mathbf{A}_{c+k+d} = \mathbf{0}, \\ \boldsymbol{\Pi} \mathbf{e} = \mathbf{1}. \end{cases} \quad (2)$$

因为  $\mathbf{A}_0$  是可逆的, 由式(2)中的第 1 个式子得:

$$\boldsymbol{\Pi}_0 = \boldsymbol{\Pi}_1 \boldsymbol{\omega}_1, \quad (3)$$

其中:  $\boldsymbol{\omega}_1 = \mathbf{B}_1(-\mathbf{A}_0)^{-1}$ 。

由式(2)中的第 2 个式子取  $n=1$  可知:

$$\mathbf{\Pi}_0 \mathbf{C}_0 + \mathbf{\Pi}_1 \mathbf{A}_1 + \mathbf{\Pi}_2 \mathbf{B}_2 = \mathbf{0}. \quad (4)$$

将式(3)代入式(4)有:

$$\mathbf{\Pi}_1 \boldsymbol{\omega}_1 \mathbf{C}_0 + \mathbf{\Pi}_1 \mathbf{A}_1 + \mathbf{\Pi}_2 \mathbf{B}_2 = \mathbf{0}.$$

因为  $-(\boldsymbol{\omega}_1 \mathbf{C}_0 + \mathbf{A}_1)$  是可逆的,整理得:

$$\mathbf{\Pi}_1 = \mathbf{\Pi}_2 \boldsymbol{\omega}_2,$$

其中:  $\boldsymbol{\omega}_2 = \mathbf{B}_2 [-(\boldsymbol{\omega}_1 \mathbf{C}_0 + \mathbf{A}_1)]^{-1}$ 。

进而利用式(2)中第 2 个式子递推可知:

$$\mathbf{\Pi}_n = \mathbf{\Pi}_{n+1} \boldsymbol{\omega}_{n+1}, n=1, \dots, c+k+d-1,$$

其中:  $\boldsymbol{\omega}_{n+1} = \mathbf{B}_{n+1} [-(\boldsymbol{\omega}_n \mathbf{C}_{n-1} + \mathbf{A}_n)]^{-1}, n=1, \dots, c+k+d-1$ 。

特别地,有  $\mathbf{\Pi}_{c+k+d-1} = \mathbf{\Pi}_{c+k+d} \boldsymbol{\omega}_{c+k+d}$ ,将此式代入式(2)中第 3 个式子,有:

$$\mathbf{\Pi}_{c+k+d} [\boldsymbol{\omega}_{c+k+d} \mathbf{C}_{c+k+d-1} + \mathbf{A}_{c+k+d}] = \mathbf{0}.$$

基于上式和式(2)中第 4 个式子,可求解得到  $\mathbf{\Pi}_{c+k+d}$ ,进而得到系统的稳态分布。

下面给出上述求解系统稳态分布迭代算法。

步骤 1,对系统参数定义初始值  $c, k, d, \lambda, \mu_0, \mu_1, \mu_2, \eta, \xi, \tau, \varepsilon$ ;

步骤 2,输入矩阵  $\mathbf{A}_0, \mathbf{C}_0, \mathbf{A}_{c+k+d}, \mathbf{B}_{c+k+d}, \mathbf{A}_i, \mathbf{B}_i, \mathbf{C}_i (i=1, \dots, c+k+d-1)$ ;

步骤 3,计算  $\boldsymbol{\omega}_1 = \mathbf{B}_1 (-\mathbf{A}_0)^{-1}$ 。

定义循环算法:

for  $i=1:c+k+d-1$

$$\boldsymbol{\omega}_{i+1} = \mathbf{B}_{i+1} [-(\boldsymbol{\omega}_i \mathbf{C}_{i-1} + \mathbf{A}_i)]^{-1}$$

end;

步骤 4,定义变量  $\mathbf{\Pi}_{c+k+d}$ ,

利用循环算法将  $\mathbf{\Pi}_0, \dots, \mathbf{\Pi}_{c+k+d-1}$  用  $\mathbf{\Pi}_{c+k+d}$  表达:

for  $i=1:c+k+d-1$

$$\mathbf{\Pi}_i = \mathbf{\Pi}_{i+1} \boldsymbol{\omega}_{i+1}$$

end;

步骤 5,利用 solve() 函数及  $\mathbf{\Pi}_{c+k+d} [\boldsymbol{\omega}_{c+k+d} \mathbf{C}_{c+k+d-1} + \mathbf{A}_{c+k+d}] = \mathbf{0}$  和  $\mathbf{\Pi} \mathbf{e} = \mathbf{1}$  求解变量  $\mathbf{\Pi}_{c+k+d}$ ;

步骤 6,类似步骤 4 中循环算法,将  $\mathbf{\Pi}_{c+k+d}$  数值结果反代入迭代方程求得最终稳态概率向量。

根据上述分析结果可以得到系统的稳态性能指标。

1) 当 II 区虚拟机处于休眠状态时平均等待队长为:

$$L_1 = \sum_{c+1}^{c+d} (i-c) (\pi_{i0} + \pi_{i1}).$$

2) 当 II 区虚拟机处于活跃状态时平均等待队长为:

$$L_2 = \sum_{c+k+1}^{c+k+d} (i-c-k) (\pi_{i2} + \pi_{i3}).$$

3) 云计算服务系统整体平均等待队长为:

$$L = L_1 + L_2.$$

4) 请求节点进入系统时发生溢出故障的概率为:

$$R = \pi_{c+d,0} + \pi_{c+d,1} + \pi_{c+k+d,2} + \pi_{c+k+d,3}.$$

5) 请求节点能够成功进入系统的平均速率为:

$$\bar{\lambda} = \lambda (1-R).$$

6) 请求节点平均网络延时为:

$$E(W) = \frac{L}{\bar{\lambda}}.$$

### 3 数值分析

#### 3.1 系统性能分析

借助上述迭代算法可以得到系统稳态分布的数值解,进而可以求得云计算服务系统的各项性能指标,通过绘制云计算服务系统各项性能指标随参数变化的关系图,可以得出各参数对性能指标的影响。下面假设  $c=6$ ,  $k=15$ ,  $d=50$ ,  $\mu_0=3$ ,  $\mu_1=4$ ,  $\mu_2=10$ ,  $\xi=2$ ,  $\tau=3$ ,  $\epsilon=1$ 。

图 2 反映了到达率、休假参数与平均网络时延关系。当休假参数  $\eta$  一定时,平均网络时延随着到达率的增大先增加后减小,最后再增加,主要原因可分为 3 个阶段进行分析,在第 1 阶段即平均网络时延增加阶段,此阶段请求节点到达率整体处于较低水平,只有 I 区虚拟机低速工作,此时随着到达率升高网络时延必然增加,当到达率升高到一定程度, I 区虚拟机开始高速工作且 II 区虚拟机在休眠结束后转为工作状态,此时转为第 2 阶段即平均网络时延减小阶段,但这种降低趋势不可能持续维持,当请求节点到达率持续升高,导致 I 区和 II 区虚拟机开始饱和工作,此时转入第 3 阶段即平均网络时延重新上升阶段,由于所有虚拟机都高速工作,所以到达率升高之后缓冲区会聚集越来越多的等待节点,因此网络时延重新上升;当到达率  $\lambda$  一定时,平均网络时延随着休假参数的升高而减小,主要原因是,当休假参数增大时,休假时间长度变短,则请求节点在缓冲区排队时间也会随之变短,因此网络时延变短。

图 3 反应到达率与溢出故障率关系。溢出故障率随着请求节点到达率的升高变化趋势为前期稳定于 0 附近而后开始迅速上升,主要原因是在请求节点到达率的升高的前期, I 区、II 区虚拟机和缓冲区位置未被请求节点完全占满,因此发生溢出故障的概率很低,但随着到达率的持续升高,所有虚拟机保持忙碌状态,且缓冲区很快被占满,溢出故障率也会随之迅速上升。

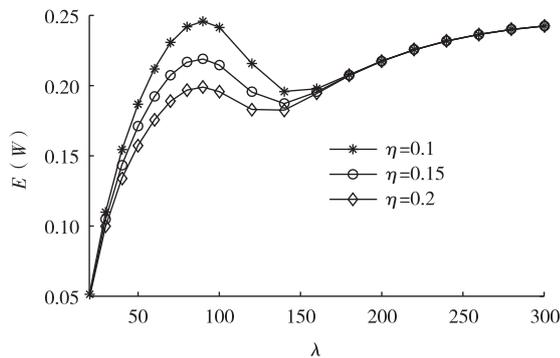


图 2  $E(W)$  与  $\lambda$  和  $\eta$  的关系

Fig. 2 The relationship of  $E(W)$  with  $\lambda$  and  $\eta$

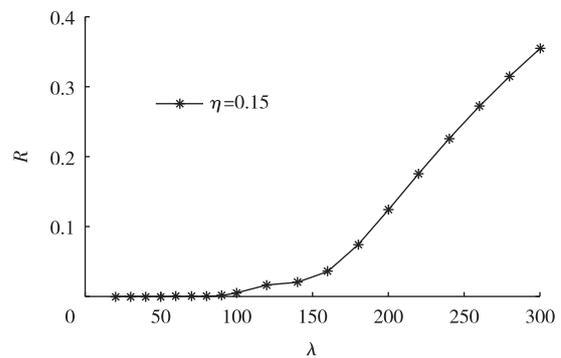


图 3  $R$  与  $\lambda$  的关系

Fig. 3 The relationship of  $R$  with  $\lambda$

当请求节点出现较高到达率时,系统会出现拥堵现象并发生溢出故障,通常可用增加虚拟机的方法来解决该问题,但在本调度策略中虚拟机分属 2 个不同的区——I 区和 II 区,为研究在各区增加相同数量的虚拟机是否对降低溢出故障率有不同的效果,令  $\lambda=250$ ,  $\eta=0.1$ , 计算得出图 4 所示结果,由曲线图可知,增加相同数量虚拟机时,将虚拟机安排在 II 区具有更明显的降低故障率的作用。特别地,如果在 II 区增加 12 台虚拟机,此时 II 区发生溢出故障的概率比 I 区低 7.3%,并且位于 II 区的虚拟机具有休眠功能,在降低能耗方面也具有突出优势。

当  $\lambda=200$  时,图 5 反映了出现故障时间参数、修理时间参数与平均网络时延关系。当修理时间参数  $\epsilon$  一定时,出现故障的时间参数越大,平均网络时延越大,主要原因是出现故障的时间参数越大,则出现故障的时间间隔越小,故障出现的越频繁,系统长期处于低速运行状态,因此平均网络时延会增加;当出现故障的时间参数  $\tau$  一定时,修理时间参数越大,平均网络时延越小,主要原因是修理时间参数越大,则修理的时间越短,即系统处于工作故障状态运行时间短,平均网络时延变小。

#### 3.2 节能分析

为求单位时间内所提虚拟机调度策略下系统节省的总能耗,假设在未经过调度策略调整优化时,  $c+k$  个虚

拟机时刻保持高速  $\mu_2$  运转状态,在出现工作故障后以工作故障速率  $\mu_0$  运转。用  $f(>0)$  表示系统运转时的能耗因子,用  $J_l, J_n$  和  $J_h$  分别表示虚拟机以速率  $\mu_0, \mu_1$  和  $\mu_2$  运行时单位时间的能耗水平,则有  $J_l = f\mu_0, J_n = f\mu_1$  和  $J_h = f\mu_2$ 。在加入调度策略后,则有以下情况:

- 1) 系统水平  $i \leq c-1$  时,物理机处于正常工作情况下,系统节省能量为  $S_1 = c(J_h - J_n) + kJ_h$ ;物理机处于工作故障情况下,系统节省能量为  $S_2 = kJ_l$ ;
- 2) 系统水平  $c \leq i \leq c+d$  时,II 区虚拟机处于休眠状态、物理机处于正常工作情况下,系统节省能量为  $S_3 = kJ_h$ ; II 区虚拟机处于休眠状态、物理机处于工作故障情况下,系统节省能量为  $S_4 = kJ_l$ ;
- 3) 除上述情况外的其他状态,系统节省能量为 0。

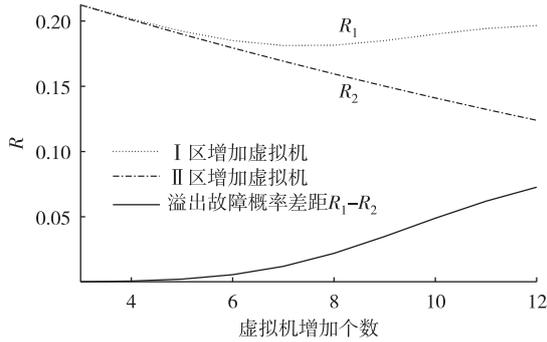


图 4 R 与虚拟机个数的关系

Fig. 4 The relationship of R with the number of virtual machines

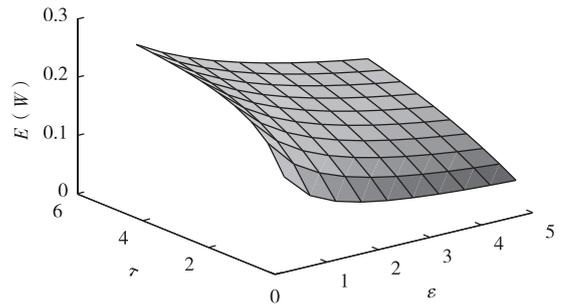


图 5 E(W) 与 tau 和 epsilon 的关系

Fig. 5 The relationship of E(W) with tau and epsilon

因此系统总的节省能量水平为:

$$S = \sum_{i=0}^{c-1} (\pi_{i,0} S_1 + \pi_{i,1} S_2) + \sum_{i=c}^{c+d} (\pi_{i,0} S_3 + \pi_{i,1} S_4)。$$

当  $f=2, \eta=1.5$  时,分别进行请求节点具有低到达率  $\lambda=50$  和高到达率  $\lambda=300$  的数值实验,具体结果见表 1 和表 2,以此分析虚拟机服务速率  $\mu_1, \mu_2$  的大小变化对系统节能效果的影响。

由表 1 可知,当请求节点以较低速率到达服务系统时,系统节能效果对虚拟机服务速率  $\mu_1$  和  $\mu_2$  的变化较为敏感,表现为随着  $\mu_1$  的增大系统节能量逐渐下降,但随着  $\mu_2$  的增大系统节能量逐渐上升。由表 2 可知,当请求节点以较高速率到达服务系统时,虚拟机服务速率  $\mu_1$  的增减对系统节能效果变化几乎没有影响,同时系统的节能量随着  $\mu_2$  的增大而逐渐上升。

表 1  $\lambda=50$  时服务速率与系统节能量关系

Tab. 1 The relationship between serving rate and system energy saving during  $\lambda=50$

S	$\mu_2=16$	$\mu_2=17$	$\mu_2=18$	$\mu_2=19$	$\mu_2=20$
$\mu_1=4$	140.722	151.686	162.583	173.426	184.224
$\mu_1=6$	139.674	150.566	161.399	172.182	182.927
$\mu_1=8$	138.140	148.947	159.703	170.419	181.103
$\mu_1=10$	136.093	146.806	157.479	168.121	178.739
$\mu_1=12$	133.553	144.167	154.754	165.320	175.871

表 2  $\lambda=300$  时服务速率与系统节能量关系

Tab. 2 The relationship between serving rate and system energy saving during  $\lambda=300$

S	$\mu_2=16$	$\mu_2=17$	$\mu_2=18$	$\mu_2=19$	$\mu_2=20$
$\mu_1=4$	0.195	0.585	1.442	3.050	5.716
$\mu_1=6$	0.195	0.585	1.442	3.050	5.715
$\mu_1=8$	0.195	0.585	1.441	3.049	5.713
$\mu_1=10$	0.195	0.585	1.441	3.048	5.712
$\mu_1=12$	0.195	0.584	1.440	3.047	5.710

综合对比表 1 和表 2 可知,无论请求节点低速率到达或高速率到达,系统节能效果对  $\mu_2$  的变化更为敏感,且当请求节点以较低到达率到达服务系统时,本文所提调度策略的节能效果更为明显。

### 3.3 收益分析

#### 3.3.1 个人收益与社会最优收益分析

下面建立个人收益函数和社会收益函数,分析社会最优策略。假设 G 表示每个请求节点在接受服务后获得

的收益,  $G_1$  表示请求节点在系统中延迟单位时间的损失,  $G_2$  表示个人被拒绝服务后的潜在损失,  $R$  表示溢出故障率, 则请求节点的个人收益函数定义为:

$$U_e(\lambda) = (1-R)[G - G_1 E(W)] - RG_2。$$

当  $G=26, G_1=100, G_2=8$  时, 图 6 反映了用户的个人收益随请求到达率和休假参数的变化情况。由于各项收入和费用都是固定的, 因此个人收益主要由等待时间决定, 并且与等待时长呈现负相关的趋势。若将个人收益曲线与直线  $U_e(\lambda)=0$  的交点横坐标记为  $\lambda_e$ , 则该点为个人收益的均衡点。当请求节点到达率  $\lambda < \lambda_e$  时, 个人收益为正, 基于个人利益考虑, 会有更多请求节点进入系统, 请求节点到达率将进一步增大; 当请求节点到达率  $\lambda > \lambda_e$  时, 个人收益为负, 为避免个人利益损失, 请求节点将不会再进入系统, 请求节点到达率将减小。因此, 在顾客基于自身利益理智选择的前提下, 用户请求到达率会稳定在均衡点  $\lambda_e$  附近。

接下来讨论系统的社会最优收益问题。记  $G_3$  表示节约单位能耗所获得的收益,  $G_4$  表示发生溢出故障后系统失去单位顾客的潜在损失, 则系统的社会收益  $U_s$  为:

$$U_s(\lambda) = \lambda((1-R)[G - G_1 E(W)] - RG_2) + G_3 S - \lambda G_4 R, \tag{5}$$

通过上式可知, 能使系统达到最大社会收益  $U_s^*$  的最优到达率  $\lambda^*$  为:

$$\lambda^* = \arg \max_{\lambda > 0} \{ \lambda((1-R)[G - G_1 E(W)] - RG_2) + G_3 S - \lambda G_4 R \}。$$

当  $G_3=1, G_4=1$  时, 图 7 反映了系统的社会收益随请求到达率和休假参数的变化情况。当休假参数  $\eta$  一定时, 系统的社会收益  $U_s$  随请求到达率  $\lambda$  的增大先小幅下降后增大最后下降, 其中第 1 阶段下降是因为工作虚拟机数量较少和服务速率较慢导致用户服务体验不佳导致的损失增大, 第 2 阶段社会收益增大是因为增开虚拟机数量和提高服务速率后网络时延变短, 用户服务体验提升且顾客数量增加导致系统收益上升, 第 3 阶段重新下降是因为请求到达率达到较高阶段后, 用户等待时间变长, 系统几乎没有节省的能量, 溢出故障导致的潜在损失变大, 所以随着到达率的增大, 系统的社会收益会逐渐下降; 当请求到达率  $\lambda$  一定时, 系统的社会收益  $U_s$  随休假  $\eta$  的增大而增大, 主要原因是休假期变短导致请求节点等待时间变短, 从而使得系统社会收益增加。

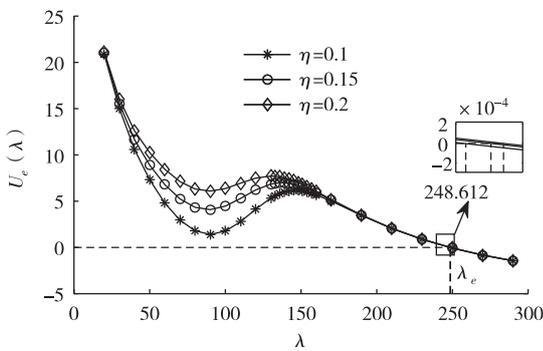


图 6  $U_e(\lambda)$  与  $\lambda$  的关系

Fig. 6 The relationship of  $U_e(\lambda)$  with  $\lambda$

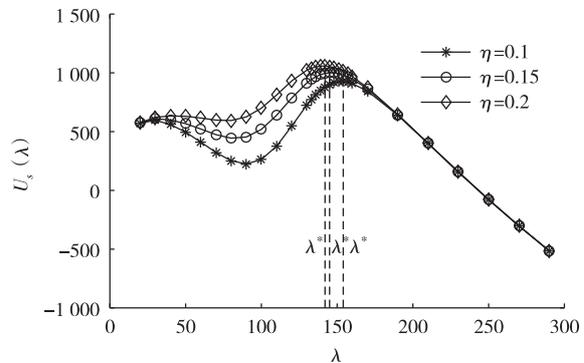


图 7  $U_s(\lambda)$  与  $\lambda$  的关系

Fig. 7 The relationship of  $U_s(\lambda)$  with  $\lambda$

对比图 6 和图 7 可知, 无论  $\eta$  取何值时都有个人均衡收益到达率  $\lambda_e$  大于社会最优收益到达率  $\lambda^*$ 。因此当用户只基于自身利益考虑是否进入系统接受服务时, 导致的结果一般会使系统不能获得最优收益。在这种情况下, 系统管理者可采取一定的收费策略来降低请求节点的到达率, 从而获得社会最优收益。

### 3.3.2 收费策略

为制定合理的收费策略, 需首先计算出社会最优收益到达率  $\lambda^*$ 。由于本文研究的排队模型难以给出求解  $\lambda^*$  的解析式, 因此在各参数取值与上述研究保持一致的基础上, 利用 Matlab 软件进行数值实验, 给出不同休假参数下  $\lambda^*$  的数值结果如表 3。

若对请求进入排队系统的用户进行收费, 用  $F$  表示入场费, 则需对个人收益函数重新进行定义为:

$$U_{e1}(\lambda) = (1-R)[G - G_1 E(W) - F] - RG_2,$$

相应地, 社会收益函数重新定义为:

$$U_{s1}(\lambda) = \lambda((1-R)[G - G_1 E(W) - F] - RG_2) + \lambda(1-R)F + G_3 S - \lambda G_4 R。$$

上式运算后与式(5)对比可知:2 个式子表达形式相同,因此在给定休假参数  $\eta$  的情况下,具有相同的社会最优收益的到达率  $\lambda^*$ 。

表 3 社会最优到达率  $\lambda^*$  数值解  
Tab. 3 Numerical solution of socially optimal reach rate  $\lambda^*$

休假参数 $\eta$	社会最优到达率 $\lambda^*$	社会最优收益 $U_s(\lambda^*)$
0.1	154	923.393
0.15	145	1 000.591
0.2	142	1 058.065

基于上述分析,若使  $\lambda^*$  也成为个人收益均衡条件下的请求到达率,  $F$  应满足  $U_{e1}(\lambda^*)=0$ , 则有:

$$F = [G - G_1 E(W)] - \frac{R}{1-R} G_2, \tag{6}$$

其中:  $E(W)$  和  $R$  分别为社会最优到达率  $\lambda^*$  下的平均网络时延和溢出故障率。

借助式(6)可以计算出在给定社会最优到达率和休假参数下用户需要支付入场费  $F$ , 数值结果见表 4。

表 4 社会最优收益下的收费策略  
Tab. 4 Charging strategy under optimal social benefit

休假参数 $\eta$	社会最优到达率 $\lambda^*$	入场费 $F$
0.1	154	6.166
0.15	145	6.993
0.2	142	7.520

由表 4 不难看出,社会最优到达率随着休假参数  $\eta$  减小而增大,但用户所需交付的入场费随休假参数  $\eta$  减小而减小。由于休假参数较小时,服务系统的平均休假时长变大,用户等待时间相应变长,因此用户的等待成本变高、等待热情下降,用户极有可能会因为不耐烦而退出服务系统。在这种情况下,系统为取得最大收益,需要降低收取的入场费以激励更多的顾客进入排队系统接受服务。

## 4 结论

针对云数据中心能源浪费严重和用户服务体验不佳的问题,本文建立了带工作故障和不耐烦顾客的部分服务台同步多重休假  $M/M/c+k/d$  排队模型。利用拟生灭过程和矩阵分析方法对系统模型进行稳态分析,给出了请求节点的平均网络延时、进入率和溢出故障概率等性能指标表达式。通过数值分析,得出了相关参数对各性能指标的影响。分析结果显示,发生溢出故障概率较大时,相比于 I 区,在 II 区增加相同数量的虚拟机具有更明显的降低故障率的作用,且具有更好的节能效果。此外,还建立了相关收益函数,求解得到同时满足个人收益均衡和社会最优收益的顾客收费策略。

### 参考文献:

[1] HAWILO H, JAMMAL M, SHAMI A. Network function virtualization-aware orchestrator for service function chaining placement in the cloud[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2019, 37(3): 643-655.

[2] BARROSO L A, HÖLZLE U. The case for energy-proportional computing[J]. Computer, 2007, 40(12): 33-37.

[3] SRIKANTAIAH S, KANSAL A, ZHAO F. Energy aware consolidation for cloud computing[J]. Cluster Computing, 2008, 12(1): 10-14.

[4] LEVY Y, YECHIALI U. Utilization of idle time in an  $M/G/1$  queueing system[J]. Management Science, 1975, 22(2): 202-211.

[5] 田乃硕,徐秀丽,马振友,等.部分服务台同步多重休假的  $M/M/c$  排队[J].运筹学学报, 2001, 5(3): 85-94.  
TIAN N S, XU X L, MA Z Y, et al. The  $M/M/c$  queue with multiple synchronous vacations of partial servers[J]. Operations Research Transactions, 2001, 5(3): 85-94.

[6] XU X L, ZHANG Z G. Analysis of multi-server queue with a single vacation  $(e, d)$ -policy[J]. Performance Evaluation, 2006, 63(8): 825-838.

- [7] LIN C H, KE J C. Multi-server system with single working vacation[J]. Applied Mathematical Modelling, 2009, 33(7): 2967-2977.
- [8] 朱翼隼, 徐鸿洋.  $N$ -策略带负顾客的  $M/M/c$  部分工作休假排队[J]. 江苏大学学报(自然科学版), 2013, 34(3): 367-372.  
ZHU Y J, XU H Y.  $M/M/c$  queue of partial working vacation with  $N$ -policy and negative customer[J]. Journal of Jiangsu University (Natural Science Edition), 2013, 34(3): 367-372.
- [9] KIM B, KIM J, BUEKER O. Non-preemptive priority  $M/M/m$  queue with servers' vacations[J]. Computers & Industrial Engineering, 2021, 160: 107390-107434.
- [10] SAFFER Z, YUE W Y.  $M/M/c$  multiple synchronous vacation model with gated discipline[J]. Journal of Industrial and Management Optimization, 2012, 8(4): 939-968.
- [11] SAHOO C N, GOSWAMI V. Cost and energy optimisation of cloud data centres through dual VM modes-activation and passivation[J]. International Journal of Communication Networks and Distributed Systems, 2017, 18: 371-389.
- [12] 金顺福, 王宝帅, 郝闪闪, 等. 基于备用虚拟机同步休眠的云数据中心节能策略及性能[J]. 吉林大学学报(工学版), 2018, 48(6): 1859-1866.  
JIN S F, WANG B S, HAO S S, et al. Synchronous sleeping based energy saving strategy of reservation virtual machines in cloud data centers and its performance research[J]. Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition), 2018, 48(6): 1859-1866.
- [13] CHENG C L, LI J, WANG Y. An energy-saving task scheduling strategy based on vacation queuing theory in cloud computing [J]. Tsinghua Science and Technology, 2015, 20(1): 28-39.
- [14] MA Z Y, FAN J Q, ZHANG Y, et al. Performance analysis of blockchain consensus system with interference factors and sleep stage[J]. IEEE Access, 2020, 8: 119010-119019.
- [15] THOMASIAN A. Vacationing server model for  $M/G/1$  queues for rebuild processing in RAID5 and threshold scheduling for readers and writers[J]. Information Processing Letters, 2018, 135: 41-46.
- [16] JIN S F, Hao S S, Qie X C, et al. A virtual machine scheduling strategy with a speed switch and a multisleep mode in cloud data centers[J]. Journal of Systems Science and Systems Engineering, 2019, 28: 194-210.

## Operations Research and Cybernetics

### Cloud Resource Optimization Analysis with Adaptive Adjustment Service Mechanism

ZHANG Yonghua, XU Xiuli

(School of Science, Yanshan University, Qinhuangdao Hebei 066004, China)

**Abstract:** In order to reduce the energy waste of cloud data center and improve the Quality of Service(QoS), a adaptive scheduling policy of virtual machine(VM) service mode is proposed. Based on this policy, a reasonable customer charge scheme is developed for the cloud computing platform manager. According to the current number of system request nodes, the service rate and service mode of the system are dynamically adjusted in order that VMs can be managed by partitions. The service platform is modeled based on the  $M/M/c + k/d$  queueing system with partial servers synchronous vacation and working breakdowns, then the stationary distribution and performance indices of the system is obtained by using the iterative method. The numerical analysis demonstrates the influence of system parameter on the performance indices. The results show that the overflow probability of adding 12 VMs in zone II is 7.3% lower than that of adding 12 VMs in zone I. Meanwhile, the scheduling policy has a significant energy conservation effect. Furthermore, by constructing the benefit function, the customer charging strategy that modulates individual profit and social profit is derived. The establishment of this model will provide theory basis and tool for the optimization management and control of the cloud computing platform.

**Keywords:** queueing system; cloud computing; scheduling strategy; energy conservation

(责任编辑 黄 颖)