

# 一种基于多 $M/M/m/m + M$ 排队系统的分散型云计算建模方法

汪 扬<sup>1,2,3,4</sup>, 曾 鹏<sup>1,3</sup>, 李 栋<sup>1,3,4</sup>, 张华良<sup>1,3</sup>, 于海斌<sup>1,3</sup>

(1. 中国科学院沈阳自动化研究所, 辽宁沈阳 110016; 2. 辽宁石油化工大学, 辽宁抚顺 113001;  
3. 中国科学院网络化控制系统重点实验室, 辽宁沈阳 110016; 4. 中国科学院大学, 北京 100049)

**摘 要:** 基于 Erlang-A 同 Erlang-C 相结合的排队系统模型, 由多云域组成的分散型云计算被抽象为多排队系统. 基于丢弃率参数实现了对延迟敏感服务请求的准入控制, 等待的服务请求以一定的丢弃概率被溢出. 将丢弃概率引入 Riordan 公式, 在 Hayward 近似中提出基于空间随机过程的汇聚溢出流渐近峰度因子, 利用等效随机理论研究了溢出流丢失问题. 通过仿真实验验证了基于丢弃率准入控制下多排队系统的性能提升.

**关键词:** 云计算; 多云域; 丢失性能; 溢出负载; 丢弃率

**中图分类号:** TP393 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2014)10-2055-05

**电子学报 URL:** <http://www.ejournal.org.cn> **DOI:** 10.3969/j.issn.0372-2112.2014.10.029

## A Performance Modeling of Decentralized Cloud Computing Based on Multiple $M/M/m/m + M$ Queuing Systems

WANG Yang<sup>1,2,3,4</sup>, ZENG Peng<sup>1,3</sup>, LI Dong<sup>1,3,4</sup>, ZHANG Hua-liang<sup>1,3</sup>, YU Hai-bin<sup>1,3</sup>

(1. Shenyang Institute of Automation, CAS, Shenyang, Liaoning 110016, China; 2. Liaoning Shihua University, Fushun, Liaoning 113001, China;  
3. Key Laboratory of Networked Control Systems, CAS, Shenyang, Liaoning 110016, China; 4. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

**Abstract:** Based on Erlang-A and Erlang-C, a decentralized cloud computing system composed of multiple cloud domains is simplified to multiple queuing systems. The admission control of delay-sensitive service requests can be implemented based on abandonment rate, since waiting service requests are overflowed at a certain abandonment probability. The abandonment probability is introduced into Riordan Formula, while the asymptotic peakedness factor of aggregate overflow based on spatial stochastic process is introduced into Hayward's approximation. The overflow loss performance is studied using equivalent random theory. The performance improvement of the multiple queuing systems is testified by the numerical simulation under admission control based on abandonment rate.

**Key words:** cloud computing; multiple cloud domains; loss performance; overflow load; abandonment rate

### 1 引言

云计算具有数据汇聚和高性能计算能力, 这促使了 Ethernet 主要服务商和 IEEE 建立了数据中心桥接任务组 (DCB), 制定 Ethernet 接入高性能网络以实现面向数据中心应用标准. 对于 Google Spanner、Amazon EC2、IBM Blue Cloud、Microsoft Azure、Yahoo Sherpa 等分散型云计算的研究表明: 一个分散型云计算系统一般由多个云域组成, 在满足服务延迟需求 (保持、建立、响应) 的约束下, 应对激增流量的跨云域数据转移和服务均衡的网络性能研究是其瓶颈问题<sup>[1,2]</sup>.

目前 Markov 过程是分析云计算性能的基础模型, 为面向服务请求的等待、准入、拒绝等决策提供平均吞吐量、服务延迟、准入概率、阻塞概率、功率能耗等性能

的分析. 文献<sup>[3-8]</sup>的分析模型都是从局部性能分析出发获得全局性能——自底而上方法是对云计算系统全面的分析过程, 然而基于 Markov 过程的状态空间及其状态转换关系会随服务器数量增长导致其复杂性指数增加, 这极大影响云计算性能分析的快速获取能力.

为此一种轻量计算的启发式模型 Erlang-A 和 Erlang-C 相结合的多排队系统被提出作为分散型云计算丢失性能分析模型. 每个云域都被抽象为一个丢弃率由 0 到  $\infty$  可变的排队系统. 并将跨云域服务抽象为排队系统的溢出流, 传送至其他拥有空闲服务资源的云域, 以均衡云计算系统的资源利用率. 通过自顶向下的反推方法研究了具有跨时空特性的云计算多排队系统的流丢失性能, 降低了计算复杂性.

## 2 基于丢弃率的排队系统

单个云域被抽象为一个基于丢弃率的排队系统如图 1 所示:当一个服务请求到达,由于无法立即获得空闲服务器资源而在排队系统中等待,通过设置丢弃率  $\theta$ ,该服务被“溢出”或者“准入”。

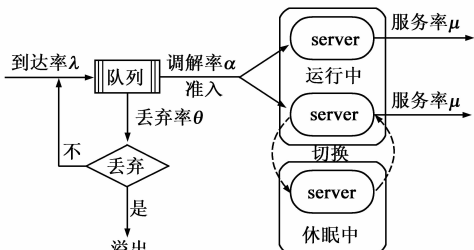


图1  $M/M/m/m+M$  排队系统原理图

### 2.1 服务请求的丢弃率

如图 1 所示一个拥有  $m$  个服务器的系统,以一定的丢弃率  $\theta$  丢弃等待的服务请求,其物理意义也就是说用户的耐心或者超时服从均值为  $1/\theta$  的指数分布。这种以一定概率丢弃服务的  $M/M/m/m+M$  排队问题被很细致的研究过<sup>[9]</sup>:

- $\lambda$  - 到达率平均值(单位时间内的服务请求);
- $\mu$  - 服务率平均值( $1/\mu$  是服务请求的服务时间);
- $\rho$  - 负载平均值( $\rho = \lambda/\mu$ );
- $\beta$  - 服务等级 ( $\beta = (m - \rho)/\sqrt{\rho}$  是服务器冗余指标);
- $\theta$  - 丢弃率( $1/\theta$  是单个服务请求的容忍时间)。

根据经典  $M/M/m/m$  的问题 Erlang-B 公式:

$$B(\rho, m) = \frac{\rho^m}{m!} / \sum_{i=0}^m \frac{\rho^i}{i!} \quad (1)$$

并根据数学理论中下不完全伽马函数:

$$\gamma(x, y) = \int_0^y t^{x-1} e^{-t} dt, x > 0, y \geq 0 \quad (2)$$

定义辅助函数:  $A(x, y) = \frac{x e^y}{y^x} \cdot \gamma(x, y)$

可得到稳态时系统中存在  $m$  个服务的概率:

$$P_m = \frac{B(\rho, m)}{1 + B(\rho, m) [A(m\mu/\theta, \lambda/\theta) - 1]} \quad (3)$$

### 2.2 服务请求的丢弃概率

当到达服务请求发现所有服务器都处于繁忙状态而被迫在排队系统中“等待”的概率是衡量  $M/M/m/m+M$  排队系统性能的重要指标(图 2a):

$$P\{w > 0\} = A(m\mu/\theta, \lambda/\theta) P_m \quad (4)$$

在等待条件下,以丢弃率为  $\theta$  的丢弃概率为:

$$P\{Ab | w > 0\} = \frac{m}{\rho A(m\mu/\theta, \lambda/\theta)} + 1 - \frac{m}{\rho} \quad (5)$$

只有等待下才有丢弃服务的可能,定义 Erlang-A 和 Erlang-C 相结合的排队系统(图 2b):

$$P\{Ab\} = P\{w\} P\{Ab | w > 0\}, \theta \in [0, \infty) \quad (6)$$

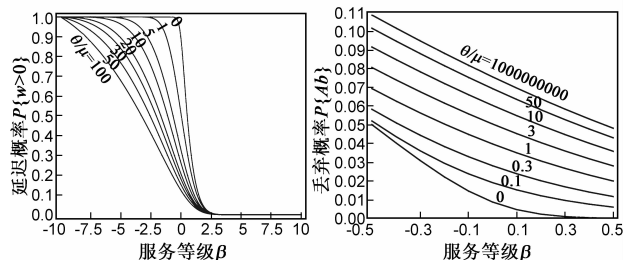


图2 服务等级同延迟概率、丢弃概率的渐进关系

(1) 当  $\theta = 0$ , 全部不丢弃, 这就是一个  $M/M/m$  问题(Erlang-C); 当前服务器的数量完全满足负载的实际需求  $\rho < m$  (非饱和吞吐运行), 此时  $\lim_{\theta \rightarrow 0} P\{Ab\} = 0$ ;

(2) 当  $\theta = \infty$ , 全部丢弃, 这就是一个  $M/M/m/m$  问题(Erlang-B); 当前服务器的数量无法满足负载的实际需求  $\rho > m$  (过饱和吞吐运行); 此时丢弃概率在数值上即为 Erlang-B 公式  $\lim_{\theta \rightarrow \infty} P\{Ab\} = B(\rho, m)$ ;

(3) 当  $\theta \in (0, \infty)$ , 以一定的概率丢弃, 这就是一个  $M/M/m/m+M$  问题(Erlang-A)。

### 2.3 服务请求的平均延迟

$$E\{w\} = P\{Ab\} / \theta \quad (7)$$

根据排队论模型——里托 Little 定理:  $Q$  是稳态队列长度, 平均队列长度等于到达率乘以平均等待时间:

$$E\{Q\} = \lambda E\{w\} \quad (8)$$

将式(7)代入式(8)得出, 平均队列长度等于到达率乘以丢弃概率除以丢弃率:  $E\{Q\} = \lambda P\{Ab\} / \theta$

$$\text{单位时间准入并获得调度的平均服务数目:}$$

$$\alpha = \lambda [1 - P\{Ab\}] \quad (10)$$

$$\text{整个系统繁忙的服务器数目为: } \tau = \lceil \alpha / \mu \rceil \quad (11)$$

$$\text{平均繁忙服务器的能耗: } P = m e_1 + \tau (e_2 - e_1) \quad (12)$$

$$\text{单排队系统能耗因子: } \zeta = P / (m e_2) \quad (13)$$

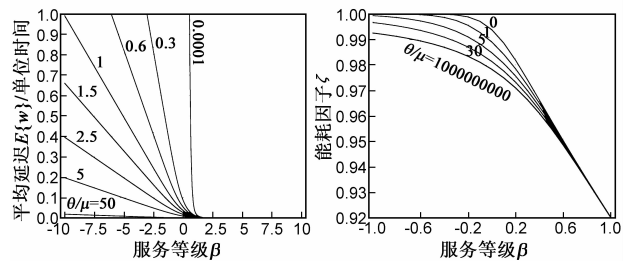


图3 服务等级同平均延迟、能耗因子的渐进关系

$M/M/m/m+M$  排队系统的丢弃率就决定了延迟的容许上界(图 3a), 作为一定服务等级约束下的资源分配和准入控制的有效方法, 可以弹性决定准入的工

作负载(图 3b)。

### 3 多排队系统

分散型云计算系统被抽象为多排队系统(图 4),跨云域服务被抽象为:被一个云域溢出并被传递给其他云域的服务请求。多排队系统使得单排队系统溢出流可以通过其他空闲的排队系统得以准入,以降低延时并均衡负载。多排队系统的核心问题是计算出多溢出流的丢失负载  $L$ 。

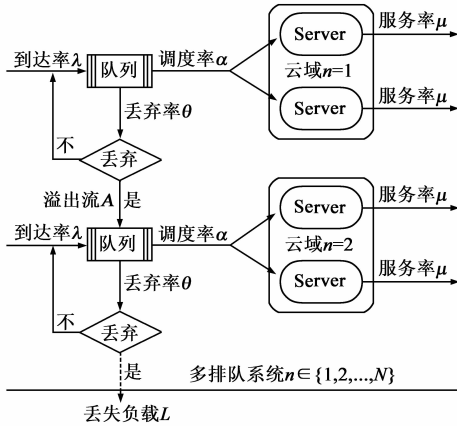


图4 多排队系统原理图

#### 3.1 基于 CTMC 的服务率归一化

为了简化计算丢失负载  $L$  的复杂性,首先必须实现服务器异类设备的归一化管理。分散型云计算的 CTMC 模型<sup>[3]</sup>将物理服务器  $m \in \{1, 2, \dots, M\}$  虚拟化为多个虚拟机,分配给多个排队系统  $n \in \{1, 2, \dots, N\}$ 。定义服务器向量  $m = [m_1, \dots, m_j, \dots, m_N]$ ,每个云域分配  $m_j$  个虚拟服务器。

$$X = \begin{bmatrix} x_{1,1}(t) & x_{1,2}(t) & \dots & x_{1,N}(t) \\ x_{2,1}(t) & x_{2,2}(t) & \dots & x_{2,N}(t) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ x_{M,1}(t) & x_{M,2}(t) & \dots & x_{M,N}(t) \end{bmatrix}_{M \times N}, x_{i,j} \in [0, 1] \quad (14)$$

$X = [x_1(t), \dots, x_i(t), \dots, x_M(t)]^T$  中的每一行是物理服务器  $m \in \{1, 2, \dots, M\}$  虚拟分配给不同排队系统的权重;  $X = [x_1(t), \dots, x_j(t), \dots, x_N(t)]$  中的每一列是排队系统  $n \in \{1, 2, \dots, N\}$  获取的物理服务器资源。

这个 CTMC 模型的全局稳态概率为

$$P_X = \lim_{t \rightarrow \infty} P\{X(t) = [x_1(t), \dots, x_i(t), \dots, x_M(t)]^T\} \quad (15)$$

二维连续时间 Markov 链(CTMC)<sup>[3]</sup>是云计算性能最理论性的描述,但当服务器数量  $M$  较大时,状态空间尺度的增长会使得基于 CTMC 模型的大规模 Markov 过程线性方程系统求解因为高密度的计算需求而不可行。因此假设对服务资源的虚拟化过程实现服务率的

归一化以简化问题:考虑到不同服务器服务能力的差异,给出每个服务器的 QoS 评价向量  $q = [q_1, q_2, \dots, q_M]$ ,通过评价向量  $q$  为每个虚拟分配因子  $x_{i,j}$  进行基于服务能力的归一化处理—— $qX = m$ ; 此时使得所有的虚拟服务器都具有归一化的服务率  $\mu = 1$ 。

#### 3.2 改进等效随机理论

溢出流丢失问题是一个开放性问题,经典方法主要有 Wilkinson 提出的等效随机理论(ERT 方法)<sup>[10]</sup>和 Kuczura 提出的间歇泊松过程(IPP 方法)<sup>[11]</sup>;考虑到高流量密度下 ERT 比 IPP 计算更加快捷<sup>[12]</sup>,服务率归一化后的分散型云计算多溢出流丢失问题采用 ERT 改进方法:

首先用 Riordan 公式分别计算单个排队系统的溢出负载的均值和方差,然后将所有单排队系统的溢出负载进行汇聚,最后假设溢出流丢失过程为一个无限大溢出排队系统(G/GI/ $\infty$ )阻塞过程,利用 Hayward 近似对丢失负载  $L$  进行估计。

##### 3.2.1 溢出负载

第一步,定义描述多排队系统的各个溢出流的溢出负载向量  $\omega = [\omega_1, \dots, \omega_j, \dots, \omega_N]^T$ 。根据 ERT 方法中 Riordan 公式计算溢出负载向量中各个分量的均值和方差<sup>[10]</sup>。

$$\begin{cases} E\{\omega_j\} = \rho_j P_j(Ab) = \lambda_j P_j(Ab) / \mu_j \\ Var\{\omega_j\} = \omega_j(1 - \omega_j + \rho_j / (m_j + 1 - \rho_j + \omega_j)) \end{cases} \quad (16)$$

**命题 1** Erlang-B 是  $P(Ab)$  在  $\theta$  无限逼近  $\infty$  的情况,所以将原有 Riordan 公式中基于 Erlang-B 公式的阻塞概率  $B(\rho, m)$  替换为丢弃概率  $P(Ab)$ ; 这样丢弃率参数被引入 Riordan 并扩展了 ERT 理论。

##### 3.2.2 汇聚溢出负载

第二步,计算溢出负载向量的 1-范数作为汇聚溢出负载,并计算其均值和方差。

$$\begin{cases} \|\omega\|^1 = \sum_{j=1}^N \omega_j \\ E\{\|\omega\|^1\} = \sum_{j=1}^N E\{\omega_j\} \\ Var\{\|\omega\|^1\} = \sum_{j=1}^N Var\{\omega_j\} + \sum_{i \neq j} Cov\{\omega_i, \omega_j\} \end{cases} \quad (17)$$

式(17)中归一化后的计算溢出负载向量的 1-范数数值上等同于多排队系统溢出的汇聚溢出率。式(17)中汇聚溢出负载的方差既考虑式(16)中多溢出流方差之和,也考虑到多溢出流之间的相关性。

**命题 2** 分散型云计算的特点是存在多个云域,所以才有基于多个云域空间状态集。溢出流负载向量  $\omega$  表示了单个云域无法及时响应而被溢出的负载,  $\|\omega\|^1$  是所有溢出负载的汇聚溢出负载。通过分散型云计算系统的跨域传输,  $\|\omega\|^1$  中间的一部分

$\|\omega\|^1 - L$  能够获得宝贵的“第二次”的准入机会。

### 3.2.3 Hayward 近似

第三步,首先定义汇聚溢出到达过程的渐进峰度因子  $Z$ ,作为跨云域数据流变量的测度,反映无限大的溢出排队系统( $G/GI/\infty$ )的繁忙服务器稳态数量的方差和平均值的比例;渐进峰度因子被估计为<sup>[7,10,13]</sup>:

$$Z = 1 + (c^2 - 1)\eta \quad (18)$$

在文献[13]的式(1)~(5)中, $c^2$ 原本被定义为在时间间隔 $[0, t]$ 连续到达的汇聚溢出流  $A(t)$  的变异平方系数.多排队系统是一个跨时空的巨系统—— $c^2$ 标注下标  $T$ ,表示变异平方系数的物理意义是以时间随机变量作为状态空间计算的汇聚溢出流的离散程度; $c^2$ 标注下标  $S$ ,表示变异平方系数的物理意义是以空间随机变量作为状态空间计算的汇聚溢出流的离散程度:

$$c^2 = \begin{cases} c_T^2 = \lim_{t \rightarrow \infty} \text{Var}\{A(t)\} / E\{A(t)\}, & c^2 \in \Phi_T \\ c_S^2 = \text{Var}\{\|\omega\|^1\} / E\{\|\omega\|^1\}, & c^2 \in \Phi_S \end{cases} \quad (19)$$

$$\eta \text{ 被定义为: } \eta = \mu \int_0^\infty [1 - G(t)]^2 dt, \eta \in (0, 1] \quad (20)$$

其中  $G(t)$  是均值为  $1/\mu$  的服务时间的累积分布函数,当分布函数为均匀分布时  $\eta = 2/3$ ,当分布函数为指数分布时  $\eta = 1/2$ <sup>[7,10]</sup>.

定义  $\hat{m}$  为多排队系统全部空闲服务器数量,当多排队系统互不相关时有:  $\hat{m} = M - \sum_{j=1}^N \tau_j$  (21)

根据式(18),利用 Hayward 近似将汇聚溢出流在溢出排队系统中的阻塞过程估计为服务器个数为  $\hat{m}/Z$ ,负载为  $\|\omega\|^1/Z$  的 Erlang-B 阻塞概率问题:

$$L = \|\omega\|^1 B(\|\omega\|^1/Z, \hat{m}/Z) \quad (22)$$

**命题 3** 假设云系统拥有近乎无限的计算资源,基于空间随机过程溢出流变量求解出汇聚溢出流的渐进峰度因子,作为分散型云计算资源利用率的均衡指标,将完全均衡于理想值 1. 此时空间随机过程的 Hayward 近似渐进收敛至无丢失负载的理想值 0:

$$\lim_{M \rightarrow \infty} Z = \lim_{M \rightarrow \infty} 1 + (c_S^2 - 1)\eta = 1 \rightarrow \lim_{M \rightarrow \infty} L = 0.$$

最后反推出每个排队系统的丢失负载<sup>[7]</sup>:

$$\begin{cases} L = [L_1, \dots, L_j, \dots, L_N] \\ L_j = L \cdot \text{Var}\{\omega_j\} / \text{Var}\{\|\omega\|^1\} \end{cases} \quad (23)$$

### 3.3 功率因子

为了纵向验证多排队系统对于系统的提升比,根据式(10)~(13),定义每个排队系统的调度率、占用服务器数量以及能耗因子:

$$\begin{cases} \tilde{\alpha}_j = \lambda_j - L_j \mu_j \\ \tilde{\tau}_j = \lceil \tilde{\alpha}_j / \mu_j \rceil \\ \tilde{\zeta}_j = [m_j e_1 + \tilde{\tau}_j (e_2 - e_1)] / [m_j e_2] \end{cases} \quad (24)$$

同时为了将多排队系统的能耗因子与单排队系统进行横向比较,定义多排队系统能耗因子和不考虑跨云域数据的多排队系统能耗因子:

$$\begin{cases} \bar{\zeta} = [Me_1 + \|\bar{\tau}\|^1 (e_2 - e_1)] / Me_2 \\ \zeta = [Me_1 + \sum_{j=1}^N \tau_j (e_2 - e_1)] / Me_2 \end{cases} \quad (25)$$

## 4 多排队系统的数值仿真

以 Google Spanner 存储架构(图 5)作为验证模型,进行过饱和和吞吐实验 1 和饱和和吞吐实验 2 两组类比实验;其中实验 2 在实验 1 的基础上多配置一个 9 号排队系统.

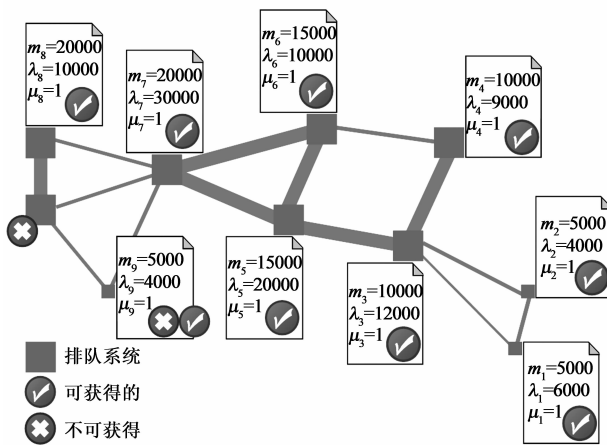


图5 Google Spanner存储架构的多排队系统

用式(24)反推的排队系统能耗因子,与式(13)单排队系统能耗因子相减,得到排队系统能耗因子的提升比——这种提升是溢出流得以“二次”准入的体现.图 6 中过饱和和吞吐的排队系统按提升比从大到小排序为 7、5、1、3 号排队系统,其提升比收敛至 16% 以上. 其中溢出负载大的排队系统也获得了相对大的提升比.

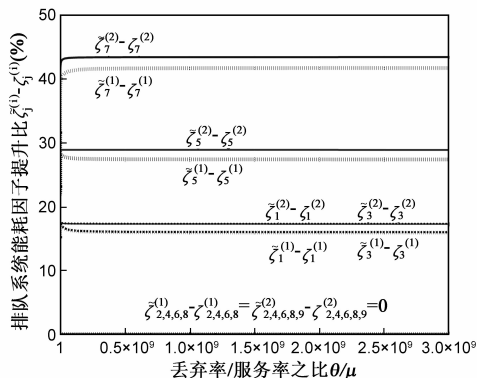


图6 实验1和实验2中单排队系统能耗因子提升比

实验 1 中实际渐进峰度因子收敛至 2.381,丢失负载收敛至 1040.144. 实验 2 中的丢失负载数量渐近收敛至 165.90,无法达到理想值 0. 实验 1 和实验 2 的能耗因子分别收敛至 0.9996675 和 0.9986333. 实验 1 中汇聚溢

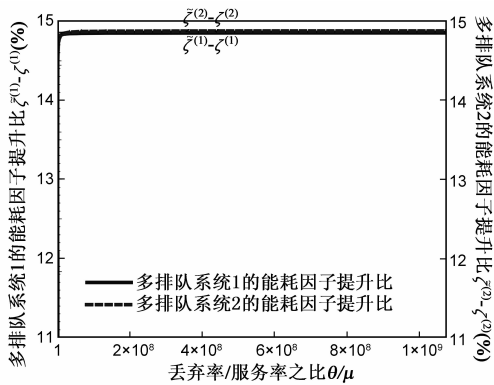


图7 实验1和实验2中多排队系统的能耗因子提升比

出流的准入比收敛至 94.226%，实验 2 中汇聚溢出流的准入比收敛至 99.863%。图 7 中实验 1 提升比收敛至 14.854%，实验 2 多排队系统的能耗因子提升比收敛至 14.875%——实验 2 略高于实验 1 的能耗因子提升比。可以看出多排队系统的空间均衡极大地提升了系统的资源利用率。

## 5 结束语

一方面考虑到对于关键实时策略的应用来说延迟的数据不如直接丢弃掉，另一方面对于以数据为中心的应用来说，丢失数据意味着重复进行昂贵的实验，提出了一种基于空间随机过程的分散型云计算溢出流丢失问题分析模型多  $M/M/m/m + M$  排队系统，该模型基于丢弃率参数能够实现延迟敏感的服务请求准入控制。进一步工作将建立权衡丢弃代价及收益的优化方法，以确定服务效率和质量均衡的丢弃率参数。

## 参考文献

- [1] 俞能海, 郝卓, 徐甲甲, 张卫明, 张驰. 云安全研究进展综述[J]. 电子学报, 2013, 41(2): 371 - 381.  
YU Neng-hai, HAO Zhuo, XU Jia-jia, ZHANG Wei-ming, ZHANG Chi. Review of cloud computing security [J]. Acta Electronica Sinica, 2013, 41(2): 371 - 381. (in Chinese)
- [2] 孙勇, 林菲, 王宝军. 面向云计算的键值型分布式存储系统研究[J]. 电子学报, 2013, 41(7): 1406 - 1411.  
SUN Yong, LIN Fei, WANG Bao-jun. Study on the key-value distributed storage system for cloud computing [J]. Acta Electronica Sinica, 2013, 41(7): 1406 - 1411. (in Chinese)
- [3] T V Doa, C Rotterb. Comparison of scheduling schemes for on-demand IaaS requests [J]. The Journal of Systems and Software, 2012, 85(6): 1400 - 1408.
- [4] H Khazaei, et al. Analysis of a pool management scheme for cloud computing centers [J]. IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems, 2013, 24(5): 849 - 861.
- [5] A Beloglazov, R Buyya. Managing overloaded hosts for dynam-

ic consolidation of virtual machines in cloud data centers under quality of service constraints [J]. IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems, 2013, 24(7): 1366 - 1379.

- [6] H Khazaei, J Mistic, V B Mistic. Performance analysis of cloud computing centers using  $M/G/m/m + r$  queuing systems [J]. IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems, 2012, 23(5): 936 - 943.
- [7] M Mazzuccoa, D Dyachuk. Balancing electricity bill and performance in server farms with setup costs [J]. Future Generation Computer Systems, 2012, 28(2): 415 - 426.
- [8] H B Liang, et al. An SMDP-Based service model for interdomain resource allocation in mobile cloud networks [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2012, 61(5): 2222 - 2232.
- [9] A Mandelbaum, et al. Service engineering in action: the Palm/Erlang-A queue, with applications to call centers [A]. Advances in Services Innovations [M]. Berlin: Springer, 2007. 17 - 45.
- [10] R I Wilkinson. Theories for toll traffic engineering in the USA [J]. Bell System Technical Journal, 1956, 35(2): 421 - 514.
- [11] A Kuczura. The interrupted poisson process as an overflow process [J]. Bell System Technical Journal, 1973, 52(3): 437 - 448.
- [12] C G Park, D H Han. Comparison of loss formulas for a circuit group with overflow traffic [J]. Journal of Applied Mathematics and Informatics, 2012, 30(1 - 2): 135 - 145.
- [13] W Whitt. Heavy-traffic approximations for service systems with blocking [J]. AT&T Bell Laboratories Technical Journal, 1984, 6(5): 689 - 708.

## 作者简介



汪 扬 男, 1981 年生于安徽安庆. 2003 年在辽宁石油化工大学获工学学士学位, 2008 年在东北大学获工学硕士学位. 现为中国科学院沈阳自动化研究所博士研究生, 辽宁石油化工大学讲师. 研究方向为工业电子、工业物联网、网络物理系统等.

E-mail: wangyang@sia.ac.cn



曾 鹏 男, 1976 年生于辽宁沈阳. 1998 年在山东大学计算机科学系获工学学士学位, 2005 年在中国科学院沈阳自动化所获机械电子工程专业工学博士学位. 现为中国科学院沈阳自动化研究所研究员, 研究方向为工业通讯及自动化、网络化控制系统、无线传感器网络等.

E-mail: zp@sia.ac.cn