

# 非平稳自相似业务下自适应动态功耗管理\*

吴琦<sup>†</sup>, 熊光泽

(电子科技大学 计算机科学与工程学院, 四川 成都 610054)

## Adaptive Dynamic Power Management for Non-Stationary Self-Similar Requests

WU Qi<sup>†</sup>, XIONG Guang-Ze

(College of Computer Science and Engineering, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 610054, China)

+ Corresponding author: Phn: +86-10-63325512, E-mail: henrywu@uestc.edu.cn, http://www.uestc.edu.cn

Received 2004-07-23; Accepted 2005-01-07

Wu Q, Xiong GZ. Adaptive dynamic power management for non-stationary self-similar requests. *Journal of Software*, 2005,16(8):1499–1505. DOI: 10.1360/jos161499

**Abstract:** Dynamic power management (DPM) is a design methodology aiming at reducing power consumption of electronic systems. The effectiveness of a power management scheme depends critically on the power management policy and control algorithm. In this work, it is found that the exponential distribution supposition taken by traditional queuing theory is not suitable to DPM, and the timeout policy is enough for DMP. The reason that the simple timeout policy could reduce much energy consumption of computer devices is the self-similarity nature of computer service requests. This paper proposes an adaptive control algorithm for DPM of embedded operating system when the idle time length fits Pareto distribution. It adopts the Trimmed Mean Estimator to realize the robust efficient estimation of the tail index parameter of Pareto distribution for small sample size, and is implemented using window-size-based adaptive control method. Simulation results show that the algorithm presented in this paper is robust. The competitive ratio is reduced to 1.24 and even 1.47 when the delay is smaller than 0.10. Overhead of the adaptive control algorithm is low.

**Key words:** self-similar; Pareto distribution; adaptive control; dynamic power management; parameter estimate

**摘要:** 动态功耗管理(dynamic power management,简称 DPM)是一种优化计算机设备能量消耗的设计技术,优化效果依赖于采用的功耗管理策略和控制算法.研究表明,传统排队论的指数分布假设不适用于 DPM 策略研究,DPM 最优策略是超时策略,超时策略可以获得很好的节能效果的理论原因是计算机系统业务请求具有自相似性.提出了当空闲时间长度服从 Pareto 分布时,基于截尾均值法小样本情况下 Pareto 分布形状参数的稳健有效估计算法和基于窗口大小自适应技术非平稳业务请求下的 DPM 控制算法.实验结果表明,该算法具有很好的稳定性,在不考虑其他条件约束时,竞争率可降到 1.24,在延迟率小于 0.10 的条件下,竞争率可降到 1.47,而且算法计算负荷小.

\* Supported by the National High-Tech Research and Development Plan of China under Grant No.2003AA1Z2210 (国家高技术研究发展计划(863))

作者简介: 吴琦(1969 - ),男,江苏南通人,博士生,主要研究领域为嵌入式实时系统的功耗管理技术;熊光泽(1938 - ),男,教授,博士生导师,CCF 高级会员,主要研究领域为嵌入式实时系统技术.

关键词: 自相似;Pareto 分布;自适应;动态功耗管理;参数估计

中图法分类号: TP316 文献标识码: A

近年来,由于采用容量有限的电池作为电源,嵌入式系统的功耗研究逐渐得到重视,已经成为实时计算的重要研究内容.随着功率可管理部件(power-manageable component,简称 PMC)<sup>[1]</sup>的出现,操作系统层面的功耗管理技术成为研究的新热点,其中动态功耗管理(dynamic power management,简称 DPM)<sup>[2]</sup>就是旨在优化 PMC 空闲时功耗的一种功耗管理技术.在操作系统中,功耗管理器(power manager,简称 PM)作为计算机系统 DPM 的执行模块,它监视系统的运行负荷,利用 PMC 提供的多种休眠机制,在满足系统性能约束的条件下,动态调整 PMC 的休眠深度,达到降低系统整体能量消耗的目的.

DPM 功耗管理策略大体上可分为 3 类:超时策略、预测策略和随机策略.其中,超时策略的基本思想是预先设定一系列超时阈值,一旦持续空闲时间超过某一阈值,就切换到相应休眠模式.阈值可以固定,也可以随系统负荷变化自适应调整<sup>[3-5]</sup>.预测策略<sup>[6-8]</sup>在开始时就对本次空闲时间长度进行预测,一旦预测值足够大,在一开始就将 PMC 切换到相应休眠模式.随机策略将 DPM 看成一个随机优化问题,利用随机决策模型设计 DPM 控制算法<sup>[9-12]</sup>.基于随机策略的控制算法虽然可以达到很好的节能效果,但是算法复杂,时间复杂度高.

在传统排队理论中,往往假设服务请求到达过程为 Poisson 流,服务请求到达时间间隔服从负指数分布.负指数分布由于无记忆性给理论分析带来很大方便,但它无法解释简单的超时策略也可以获得很好的节能效果的现象<sup>[18]</sup>.近年来一系列的实验研究发现,网络业务流量具有明显的自相似特征<sup>[13,14]</sup>,服务时间和空闲时间服从重尾分布<sup>[11]</sup>,相继又发现文件系统<sup>[15]</sup>和进程生命期<sup>[16]</sup>也具有自相似特征,这表明自相似具有一定的普遍性.

自相似序列是指聚集序列与原序列有相似分布,自相关函数  $r(k) = E[(\tau_i - \mu)(\tau_{i+k} - \mu)] / \sigma^2$  具有  $\lim_{k \rightarrow \infty} r(k) \sim k^{-\beta}$  特性,序列呈现长相关特征.由于重尾分布与负指数分布不同具有记忆性,方差和均值不一定存在,数学上研究具有很大难度.近几年,自相似性仅在网络流量建模和进程调度<sup>[17]</sup>方面有些研究.

除了自相似性以外,网络服务请求还具有聚集、波动等非平稳性,如何处理非平稳服务请求是 DPM 算法的又一重要内容.在已发表硬盘 DPM 算法中,Douglis 等人<sup>[3]</sup>是采用按一定比例调整超时阈值方案,Helmbold 等人<sup>[4]</sup>则采用多个预测值加权和确定超时时限,权重根据预测结果动态修正,Lu 等人<sup>[7]</sup>采用指数平滑法预测会话长度.以上算法均没有考虑重尾分布小抽样取值与大抽样取值并存的特点,算法稳定性差.近年来,Chung 等人提出滑动窗口<sup>[12]</sup>方法,采用极大似然法估计状态参数,但算法复杂,本身计算代价高,而且需要事先建立决策表.

当把服务请求看成是一个随机事件时,可以证明最优策略是确定性马尔可夫策略(关于确定性马尔可夫策略是 DPM 最优策略的证明将另文给出),即超时策略,因此算法关键在于如何确定超时阈值.本文将基于已有的研究结果,针对非平稳自相似业务请求,采用超时策略设计 DPM 算法,设计当空闲时间服从重尾分布时的嵌入式操作系统动态功耗管理的自适应控制算法.

## 1 DPM 模型

DPM 的管理对象是具有多种休眠模式的 PMC.PMC 可以抽象地看成是一个状态机,处理一系列空闲事件和 PM 发出的模式切换命令.定义随机变量  $\tau$  为空闲时间长度,其分布函数记为  $F(t)$ ,一系列  $\tau$  构成一个随机变量序列  $T = (\tau_0, \tau_1, \tau_2, \dots)$ ,PMC 在空闲时段的一系列状态变化过程又可以抽象为一个可控随机决策过程,当  $\tau_i$  独立同分布,利用马尔可夫决策过程模型可以证明 DPM 最优策略是确定性马尔可夫策略,即超时策略.设 PMC 具有  $K$  种休眠模式,按保持功率由高到低排列分别由  $z_1, z_2, \dots, z_k$  表示,将 idle 状态记为  $z_0$ ,  $w_k$  为  $z_k$  的功率,  $e_{kl}$ ,  $\lambda_{kl}$  分别表示由  $z_k$  模式切换到  $z_l$  模式的平均能耗和时间;  $e_k$ ,  $\lambda_k$  分别表示由  $z_k$  模式到 active 状态的能耗和时间.设 DPM 确定性马尔可夫决策为:若 PMC 持续空闲时间大于  $\kappa_k$ ,则切换到模式  $z_k$ .若记  $\kappa_0 = 0$ ,  $\kappa_{K+1} = +\infty$ ,则该策略的总能耗期望(下面积分为 Lebesgue 积分)为

$$E = \int_0^{\kappa_1} w_0 t dF(t) + \sum_{k=1}^K \int_{\kappa_k}^{\kappa_{k+1}} \left\{ w_k (t - \kappa_k) + e_k + \sum_{l=0}^{k-1} [w_l (\kappa_{l+1} - \kappa_l) + e_{l,l+1}] \right\} dF(t).$$

从而,DPM 问题转化为多元函数的极值问题:

$$E = \text{Min}_{0 \leq \kappa_1 \leq \kappa_2 \leq \dots \leq \kappa_K} f(\kappa_1, \kappa_2, \dots, \kappa_K).$$

## 2 自相似业务下的 DPM

实验观察表明,多数计算机业务请求具有自相似特征,空闲时间分布服从重尾分布.重尾分布是指具有以下特征的一类分布簇:

$$\lim_{x \rightarrow \infty} P(X > x) / x^\alpha = c, 0 < \alpha < 2.$$

Pareto 分布是典型的一类重尾分布,其分布函数为  $F(x) = 1 - (c/x)^\alpha$ ,其中刻度参数  $c > 0$ ,形状参数  $\alpha \in (0, 2)$ .Pareto 分布常用于损失、收入、寿命分布研究,利用超阈值(peak over threshold,简称 POT)模型可以证明广义 Pareto 分布是绝大多数分布的超阈值分布.这可能是空闲时间分布服从重尾分布的理论根源,因此,本文假设空闲时间分布就服从 Pareto 分布.

图 1 列出了空闲时间服从负指数分布和 Pareto 分布时  $E$  随  $\kappa_k$  变化的规律.可以发现,负指数分布没有极值点,这一点也可以从理论上证明.显然这无法解释简单的超时策略也可以获得很好的节能效果.而 Pareto 分布则相反,具有明显的极值点,恰好解释超时策略实际效果.

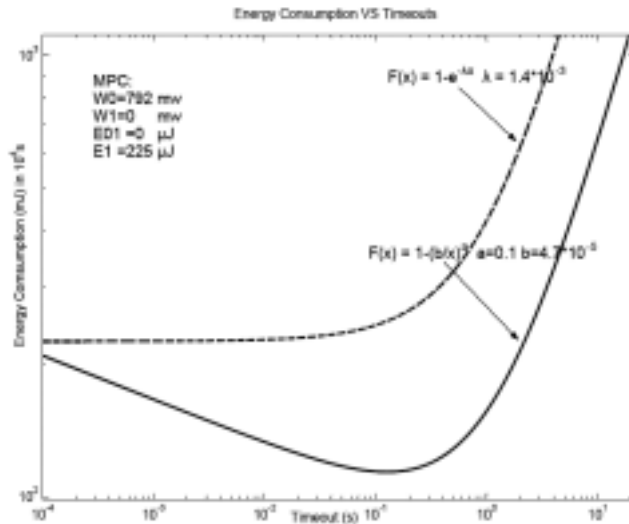


Fig.1 The relationship between switch time and the expectation of the total energy consumption

图 1 模式切换时间与期望总能耗的关系

根据上节 DPM 模型可知,DPM 决策是空闲时间分布函数与 PMC 的函数,例如:当 PMC 有两种休眠模式时,将 Pareto 分布代入(1)式可得:

$$E = - \int_c^{\kappa_1} w_0 \alpha c^\alpha t^{-\alpha} dt - \int_{\kappa_1}^{\kappa_2} [w_0 \kappa_1 + e_{01} + w_1(t - \kappa_1) + e_1] \alpha c^\alpha t^{-\alpha-1} dt - \int_{\kappa_1}^{\kappa_2} [w_0 \kappa_1 + e_{01} + w_1(\kappa_1 - \kappa_1) + e_{12} + w_2(t - \kappa_2) + e_2] \alpha c^\alpha t^{-\alpha-1} dt$$

求解  $\begin{cases} \partial E / \partial \kappa_1 = 0 \\ \partial E / \partial \kappa_2 = 0 \end{cases}$ , 当  $\begin{cases} \kappa_1 = \alpha(e_{01} + e_1) / (w_0 - w_1) \\ \kappa_2 = \alpha(e_{12} + e_2 - e_1) / (w_1 - w_2) \end{cases}$  时,  $E$  取最小值.

如此,自相似业务下 DPM 决策问题又转化为参数估计与决策问题.然而为了保证效果,DPM 不能采用适于大样本场合的极大似然估计、距估计等估计方法,而需采用适于小样本场合的估计方法.本文采用文献[19]中描述的稳健、有效且计算复杂度小的截尾均值估计.文献[19]刻度参数  $c$  的估计方法不适应于 DPM 问题,因为服务请求空闲时间最小间隔可能很小,讨论过小(远小于文献[2]中的  $T_{BE}$ )的空闲时间长度无实际意义,因此本文参

照 POT 原理,只讨论长度大于  $T_{BE}/10$  的空闲时间,故取  $c=T_{BE}/10$ .

设窗口大小选为  $n,n$  个  $\tau$  构成顺序随机变量序列  $T'=(\tau_{(1)},\tau_{(2)},\dots,\tau_{(n)})$ ,得到形状参数  $\alpha$  的估计:

$$\hat{\alpha} = \left( \sum_{i=1}^n a_{ni} (\log X_{(i)} - \log c) \right)^{-1},$$

其中,

$$a_{ni} = \begin{cases} 0, & 1 \leq i \leq [n\beta_1] \\ \left[ \sum_{j=[n\beta_1]+1}^{n-[n\beta_2]} \sum_{k=1}^{j-1} (n-k)^{-1} \right]^{-1}, & [n\beta_1]+1 \leq i \leq [n\beta_2], \\ 0, & [n\beta_2]+1 \leq i \leq n \end{cases}$$

$\beta_1, \beta_2$  分别为下截尾指数和上截尾指数.

### 3 非平稳业务下的 DPM

上节讨论了平稳自相似业务下 DPM 控制算法,但网络服务请求具有聚簇、波动等非平稳特性,这时形状参数是一个时变量  $\alpha = \alpha(t)$ ,为跟踪参数变化,窗口不能太大,但另一方面,窗口太小又将影响参数估计的精度,因此恰当选择窗口大小是处理非平稳业务请求的关键.

为此,我们采用自适应控制技术实现非平稳业务下的窗口大小控制,其原理如图 2 和图 3 所示.参数估计器与 DPM 控制器根据选择器确定的窗口大小  $n$  估计 Pareto 分布的形状参数  $\hat{\alpha}$ ,再依此进行设备状态控制.控制结果反馈给选择器,选择器依此结果调整新的窗口大小.

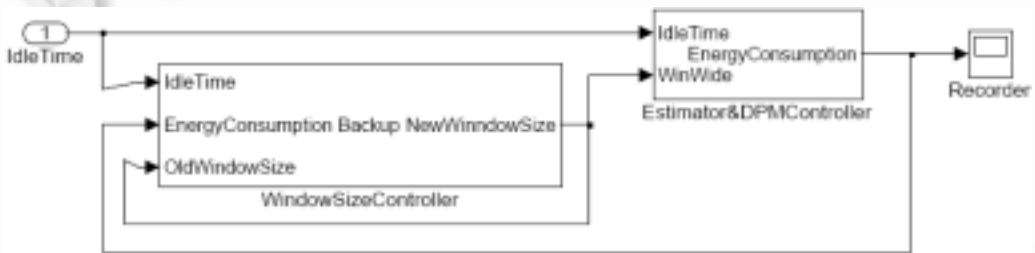


Fig.2 Schematic diagram of adaptive DPM algorithm

图 2 DPM 自适应控制原理图

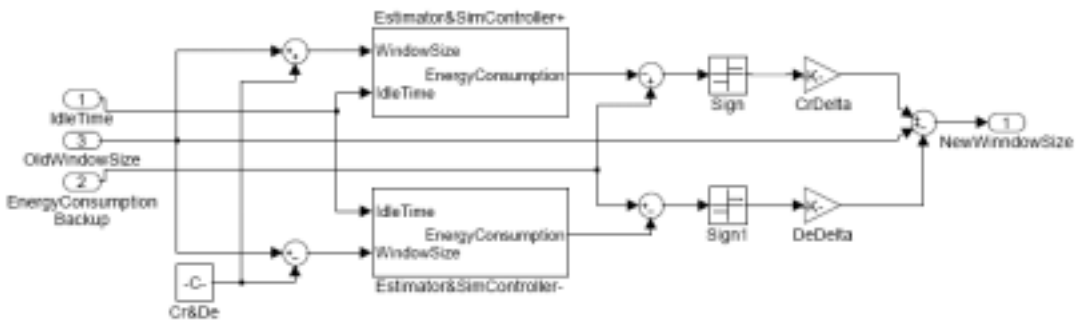


Fig.3 Schematic diagram of calculation window size

图 3 窗口大小选择器原理图

### 4 实验结果

下面以 Agere Wireless LAN USB Client(见 <http://www.agere.com/client/wlan.html>)为例,利用 MatLab 对

DPM 优化算法进行了进一步的实验研究.选用的 USB Client 具有 3 种空闲模式:Idle,Uninit,Standby,其相关特性参数如下:

$$\begin{pmatrix} w_0 \\ w_1 \\ w_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 792 \\ 198 \\ 0 \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} e_0 \\ e_1 \\ e_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0.0 \\ 0.281 \\ 225 \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} \lambda_0 \\ \lambda_1 \\ \lambda_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0.0 \\ 0.75 \\ 600 \end{pmatrix},$$

其中  $w_i, e_i$  和  $\lambda_i$  分别为模式  $i$  的功率(mw)、启动能耗( $\mu$ J)和时间(ms),下标 0,1 和 2 分别表示 Idle,UnInit,Standby.

以 3 种参数  $\alpha = \alpha(t)$  变化规律产生空闲时间随机序列,并分别进行仿真 DPM 控制.  $\alpha$  变化规律如下:

$$\alpha_1(i) = \begin{cases} 0.1 & 100 \times 2n \leq i < 100 \times (2n+1) \\ 1.8 & 100 \times (2n+1) \leq i < 100 \times 2(n+1) \end{cases},$$

$$\alpha_2(i) = \begin{cases} 0.1 & 500 \times 2n \leq i < 500 \times (2n+1) \\ 1.8 & 500 \times (2n+1) \leq i < 500 \times 2(n+1) \end{cases},$$

$$\alpha_3(i) = \begin{cases} 0.1 & 1000 \times 2n \leq i < 1000 \times (2n+1) \\ 1.8 & 1000 \times (2n+1) \leq i < 1000 \times 2(n+1) \end{cases},$$

其中  $n = 0, 1, 2, \dots$

图 4 显示了 3 种情况下分别采用截尾均值估计器 ( $\beta_1 = \beta_2 = 0.05$ )与极大似然估计器时窗口的变化规律.采用截尾均值估计器时,窗口逐渐稳定于适当的大小,而极大似然估计则相反,窗口越来越大,以致无法及时跟踪参数变化,相应的跟踪结果如图 5 所示,其中  $\alpha^T(i)$  和  $\alpha^{ML}(i)$  分别是截尾均值估计和极大似然估计的跟踪曲线.

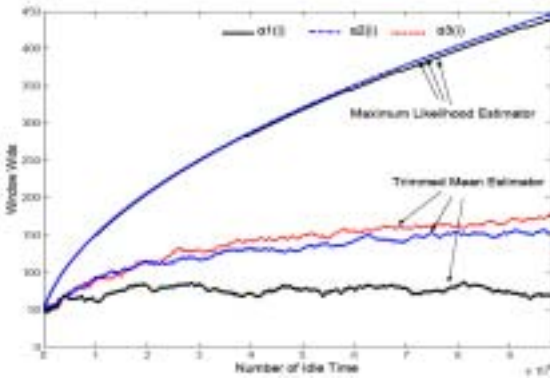


Fig.4 Window size of adaptive DPM algorithm

图 4 DPM 控制过程中窗口大小变化曲线

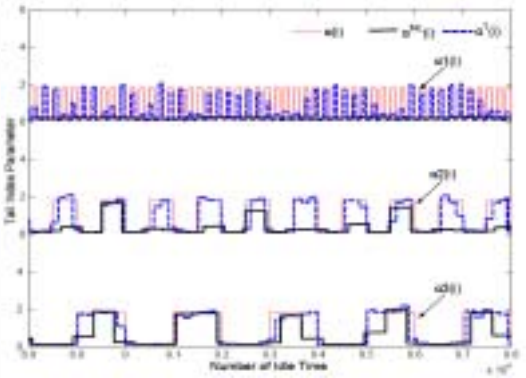


Fig.5 Tail index estimated by adaptive algorithm

图 5 截尾均值估计与极大似然估计跟踪曲线

图 6 是相应的估计方差  $MSE = \sum_{i=1}^N (\hat{\alpha}(i) - \alpha(i))^2 / N$ .实验结果表明,与极大似然估计相比,截尾均值估计器具有更加优越的小样本性能.

由于网络负荷不稳定,很难重复相同实验,因此本文采用基于跟踪的方法进行算法性能分析.利用 TCPDUMP 获得网络传输信息,再利用 Matlab 进行仿真 DPM 控制.本文使用 AWLUC 的 Idle,Standby 两种模式,同时还实现了以下算法(其中  $K_0 = (e_{02} + e_2)/(w_0 - w_2)$ ):

(1) 算法 1<sup>[3]</sup>:考察指标  $\delta_{MAX}/I_{idle}[i]$ 调整超时阈值  $T$ ,以  $K_0$  为初值,调整参数:  $\alpha_m = 1.5, \beta_m = 0.75, \rho = 0.05$ .

(2) 算法 2<sup>[7]</sup>:采用滑动平均法预测下一次空闲时间长度,根据预测结果决定是否转变模式,参数:  $a=0.5, c=2$ .

(3) 算法 3<sup>[8]</sup>:用会话将相邻请求聚在一起,考察指标  $PL_{session}[i]/T_{threshold}$  调整  $T_{threshold}$ ,以  $K_0$  为预测会话长度  $PL$  的初值,调整幅度为  $0.1 K_0$ ,以实际会话长度  $AL$  修正预测会话长度:  $PL_{j+1} = 0.7 \times PL_j + 0.3 \times AL_j$ .

(4) 算法 4<sup>[11]</sup>:以  $0.01 K_0$  间隔设定决策点,采用极大似然法估计各决策点的概率分布,在平均延迟小于 10% 的条件下,利用线性规划方法确定每个决策点的决策函数.

(5) 算法 5:固定以  $K_0$  为超时时限值.

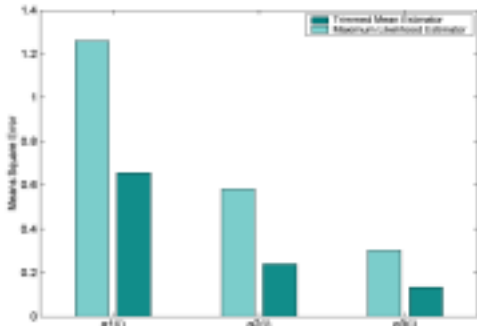


Fig.6 Mean square error of tail index

图 6 截尾均值估计与极大似然估计方差比较

可以获得最佳的节能效果,而且算法本身代价小.

本文选用竞争率、延迟率和切换成功率 3 个量化指标进行算法性能评价,其定义如下:

$$\text{竞争率 } \zeta = \frac{\text{online算法的能耗}}{\text{offline算法的能耗}}$$

$$\text{延迟率 } \delta = \frac{\text{延迟时间}}{\text{空闲时间}}$$

$$\text{切换成功率 } \eta_k = \frac{\text{切换成功次数}}{\text{总切换次数}}$$

表 1 列出不同算法的控制结果和运算时间.可以看出,算法 1 和算法 2 没有考虑自相似业务下,空闲时间小取值与大取值并存的特点,效果较差.算法 4 可以获得不错的节能效果,但算法本身计算代价大.本文提出的算法

Table 1 Experimental result of adaptive DPM algorithm

表 1 DPM 算法仿真控制的结果和运算时间

Algorithm	Competitive ratio	Delay ratio	Success ratio	Algorithm overhead
This paper	1.24	0.45	0.72	84 s
Algorithm 1	2.21	0.007	0.85	27 s
Algorithm 2	2.66	1.71	0.35	38 s
Algorithm 3	2.04	1.08	0.32	54 s
Algorithm 4	1.67	0.074	0.85	2768 s
Algorithm 5	1.92	0.085	0.84	5.7 s

本文算法仿真控制没有考虑性能约束,为了降低算法对系统响应时间等性能影响,可适当增大超时阈值.图 7 显示了超时阈值扩大时竞争率、延迟率的变化规律,当超时阈值扩大 5 倍时,竞争率为 1.47,延迟率为 0.09,可见简单调整超时阈值可以很好地实现节能和性能损失的折衷.

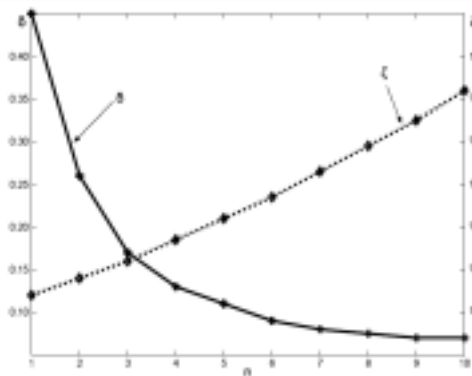


Fig.7 Competition ratio and delay ratio with different multiple of thresholds

图 7 竞争率和延迟率随超时阈值倍数变化曲线

### 5 结 论

本文的研究表明,传统排队论的指数分布假设不适用于 DPM 策略研究,DPM 最优策略是超时策略.超时策略可以获得很好的节能效果的理论原因是计算机系统业务请求具有自相似性.当空闲时间长度服从 Pareto 分布时,采用截尾均值估计法和基于窗口大小的自适应技术可以实现非平稳自相似业务下稳定的 DPM 控制算法.实验结果表明,本文提出的自适应控制算法可以获得很好的节能效果,而且算法本身计算代价小.

**References:**

- [1] Benini L, De Micheli G. System-Level power optimization: Techniques and tools. *ACM Trans. on Design Automation of Electronic Systems*, 2000,5(2):115–192.
- [2] Benini L, Bogliolo A, De Micheli G. A survey of design techniques for system-level dynamic power management. *IEEE Trans. on Very Large Scale Integration (VLSI) Systems*, 2000,8(3):299–316.
- [3] Douglass F, Krishnan P, Bershad B. Adaptive disk spin-down policies for mobile computers. In: Arbor A, ed. *Proc. of the 2nd Usenix Symp. on Mobile and Location-Independent Computing (MOBLIC)*. Berkeley: USENIX Association, 1995. 121–137.
- [4] Helmbold DP, Long DDE, Sherrod B. A dynamic disk spin-down technique for mobile computing. In: Akyildiz IF, Haas ZJ, eds. *Proc. of the 2nd Annual ACM Int'l Conf. on Mobile Computing and Networking*. New York: ACM Press, 1996. 130–142.
- [5] Douglass F, Killian T. Adaptive modem connection lifetimes. In: Robin A, ed. *Proc. of the 1999 USENIX Annual Technical Conf.* Monterey, California: USENIX Association, 1999. 27–41.
- [6] Srivastava MB, Chandrakasan AP, Brodersen RW. Predictive system shutdown and other architectural techniques for energy efficient programmable computation. *IEEE Trans. on Very Large Scale Integration (VLSI) Systems*, 1996,4(1):42–55.
- [7] Hwang C-H, Wu AC-H. A predictive system shutdown method for energy saving of event-driven computation. In: Otten RHJM, Yasuura H, eds. *Proc. of the IEEE/ACM Int'l Conf. on Computer-Aided Design*. San Jose: IEEE Computer Society, 1997. 28–32.
- [8] Lu Y-H, De Micheli G. Adaptive hard disk power management on personal computers. In: *Proc. of the IEEE Great Lakes Symp. on VLSI*. 1999. 50–53.
- [9] Benini L, Bogliolo A, Paleologo GA, De Micheli G. Policy optimization for dynamic power management. *IEEE Trans. on Computer-Aided Design of Integrated Circuits and Systems*, 1999,18(6):813–833.
- [10] Qiu Q, Pedram M. Dynamic power management based on continuous-time Markov decision processes. In: Irwin MJ, ed. *Proc. of the Design Automation Conf.* New Orleans: ACM Press, 1999. 555–561.
- [11] Simunic T, Benini L, Glynn P, De Micheli G. Event-Driven power management. *IEEE Trans. on Computer-Aided Design of Integrated Circuits and Systems*, 2001,20(7):840–856.
- [12] Chung E-Y, Benini L, Bogliolo A, Lu Y-H, De Micheli G. Dynamic power management for nonstationary service requests. *IEEE Trans. on Computers*, 2002,51(11):1345–1360.
- [13] Crovella ME, Bestavros A. Self-Similarity in World Wide Web traffic: Evidence and possible causes. *IEEE/ACM Trans. on Networking*, 1997,5(6):835–846.
- [14] Taqqu MS, Willinger W, Sherman R. Proof of a fundamental result in self-similar traffic modeling. *ACM Computer Communications Review*, 1997. 5–23.
- [15] Gribble SD, Manku GS, Roselli D, Brewer EA, Gibson TJ, Miller EL. Self-Similarity in file systems. In: Gibson TJ, Gribble SD, eds. *Proc. of the ACM Conf. on Measurement and Modeling of Computer Systems (SIGMETRICS)*. Madison: ACM Press, 1998. 141–150.
- [16] Harchol-Balter M, Downey AB. Exploiting process lifetime distributions for dynamic load balancing. *ACM Trans. on Computer Systems*, 1997,15(3):253–285.
- [17] Harchol-Balter M. The effect of heavy-tailed job size distributions on computer system design. In: Nolan JP, Swami A, eds. *Proc. of the ASA-IMS Conf. on Applications of Heavy Tailed Distributions in Economics*. 1999.
- [18] Greenawalt P. Modeling power management for hard disks. In: Madisetti VK, Gelenbe E, Walrand JC, eds. *Proc. of the Conf. on Modeling, Analysis, and Simulation of Computer and Telecommunication Systems*. Durham North Carolina: IEEE, 1994. 62–66.
- [19] Barzauskas V, Serfling R. Small sample performance of robust estimators of tail parameters for Pareto and exponential models. *Journal of Statistical Computation and Simulation*, 2001,70(1):1–19.