

两级优先级控制轮询系统研究

杨志军^{1,2}, 赵东风¹, 丁洪伟¹, 赵一帆¹

(1. 云南大学通信工程系, 云南昆明 650091; 2 云南省教育厅教科院, 云南昆明 650223)

摘 要: 本文基于区分业务优先级服务的应用需求, 提出了两级优先级控制的轮询系统, 采用门限服务和完全服务的不同服务策略方式实现了基于优先级的控制. 然后, 应用马尔可夫链和概率母函数的方法建立了系统模型, 并精确解析了系统的平均排队队长和信息分组的平均等待时间关键特性, 理论计算和仿真实验的对比分析说明了理论与实验的一致性, 新的轮询系统实现了优先级的控制并提高了系统性能.

关键词: 轮询系统; 优先级控制; 门限服务; 完全服务

中图分类号: TP393 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2009) 07-1452-05

Research on Two-class Priority Based Polling System

YANG Zhi-jun^{1,2}, ZHAO Dong-feng¹, DING Hong-wei¹, ZHAO Yi-fan¹

(1. Department of Communication Engineering, Yunnan University, Kunming, Yunnan 650091, China;

2. Educational and Scientific Institute, Educational Department of Yunnan Province, Kunming, Yunnan 650223, China)

Abstract: In this paper, based on the priority based applications we propose the Two-class Priority Based Polling System, which uses Gated and Exhaustive services to realize the priority-based scheme. The model of the new system is set up by method of imbedded Markov chain theory and generation function and the key system performance characteristics such as mean queue length and information packet waiting time are explicitly analyzed. Theoretical and simulation results are identical and show that the new system efficiently differentiates priorities and meets the practical demands of priority based applications well.

Key words: polling system; priority based scheme; gated service; exhaustive service

1 引言

轮询技术是一类重要的控制技术, 早期更多的被应用于工业过程控制. 随着数据通信与计算机网络的快速发展, 轮询技术有了更广泛的应用, 轮询系统理论成为网络资源分配和 MAC 控制协议中重要的控制理论. 在轮询技术不断发展的同时, 轮询排队理论研究也获得更新的成果^[1~5], 这对计算机系统、通信网络系统、交通运输和工业控制等领域产生了较大的技术推动作用. 近几十年来, 随着对轮询排队服务系统模型理论的深入研究和应用研究, 轮询系统理论在分析系统变化规律、优化系统结构、降低系统耗能等方面, 有有了新的进展, 成为受到重视的一类分析理论模型.

轮询系统的基本数学模型是服务器和排队队列的调度服务控制模型, 服务器按轮询的方式为系统中的排队队列提供服务. 数学模型中的排队顾客的随机到达过程、服务器提供服务时间的随机过程、服务器轮询转移时间的随机过程, 使得分析模型表征出的 N 维概率随

机过程是一个复杂系统. 基本轮询系统可分为门限 (Gated) 服务型、完全 (Exhaustive) 服务型和限定 (Limited k) 服务型三种轮询系统^[6~8]. 随着网络服务质量问题的深入研究和多业务任务的需求提升, 轮询系统的研究也由对称性问题研究发展到非对称性问题研究, 由原来单一业务的分析拓展为对多优先级和多业务任务的分析, 其应用也由工业过程控制、计算机局域网等延伸到 Ad Hoc 网络、传感器网络等无线通信网控制. 分析模型也由单一轮询系统控制发展到两级轮询系统控制^[9], 通过对系统中不同队列设置不同的服务规则, 同时又改变服务秩序, 实现不同队列和不同业务的服务质量控制. 文献[10]提出了工作环和休闲环轮询控制策略, 文献[11]对其进行了系统建模分析. 文献[12]对混合服务的轮询系统进行了研究, 分析了系统的平均循环周期. 本文提出了一种两级轮询系统控制分析模型, 即一般轮询队列采用门限服务, 中心队列采用完全服务, 服务器优先为中心队列服务. 通过设置不同的服务策略和服务秩序, 构建了系统的分析模型, 精确解析了系统的两类平均排

收稿日期: 2008 10 14; 修回日期: 2009 02 22

基金项目: 国家自然科学基金 (No. 69862001, No. 60362001, No. F0424104)

队队长、平均轮询周期和信息分组的平均等待时间, 并通过仿真实验互为验证了该轮询系统的性能。

2 系统模型

2.1 模型定义

两级优先级控制轮询系统的工作原理为: 服务器对中心站点 h 和 N 个普通站点提供轮询服务, 中心站点采用完全服务策略, 普通站点采用门限服务策略. 服务器对中心站点提供服务, 服务一直进行到中心站点中没有信息分组时结束, 然后服务器轮询转移至 i ($i = 1, 2, \dots, N$) 号普通站点提供服务, 服务结束再转移回中心站点, 对中心站点提供优先级服务, 结束后轮询转移到 $i+1$ 普通站点. 服务器按两种服务策略, 对中心站点提供更多的服务时间, 实现对中心站点的优先级服务; 对普通站点提供一般业务服务. 两级优先级控制轮询系统模型如图 1 所示.

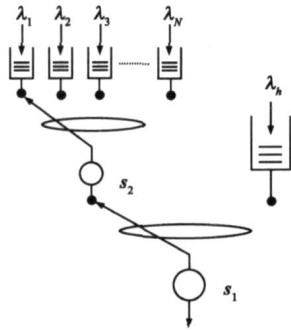


图1 两级优先级控制轮询系统模型

服务器在 t_n 时刻轮询 i ($i = 1, 2, \dots, N$) 号普通站点, i 号普通站点存储器中等待传输的信息分组数为 $\xi_i(n)$, 系统状态变量 $\{\xi_1(n), \xi_2(n), \dots, \xi_N(n), \xi_h(n)\}$. 服务器为 i 号普通站点提供服务的时间是 $\nu_i(n)$, 在此服务时间期内进入到 j ($j = 1, 2, \dots, N, h$) 号站点的信息分组数为 $\eta_j(\nu_i)$. 服务器工作结束后经过一个轮询转移时间, 在 t_n^* 时刻轮询中心站点 h , 中心站点存储器中等待服务的信息分组数为 $\xi_h(n^*)$, 系统状态变量 $\{\xi_1(n^*), \xi_2(n^*), \dots, \xi_N(n^*), \xi_h(n^*)\}$. 服务器为 h 中心站点提供服务的时间是 $\nu_h(n^*)$, 在此服务时间期内进入到 j ($j = 1, 2, \dots, N, h$) 号站点的信息分组数为 $\eta_j(\nu_h)$. 服务器工作结束后经过一个轮询转移时间, 在 t_{n+1} 时刻轮询 $i+1$ 号普通站点, 系统状态变量为 $\{\xi_1(n+1), \xi_2(n+1), \dots, \xi_N(n+1), \xi_h(n+1)\}$. 服务器由 i 号普通站点轮询转移至中心站点, 再由中心站点轮询转移到 $i+1$ 号普通站点的总的转移时间为 $u_i(n)$, 在此转移时间期内进入到 j ($j = 1, 2, \dots, N, h$) 号站点的信息分组数为 $\mu_j(u_i)$. 轮询系统服务过程的状态变量有以下关系式:

$$\begin{cases} \xi_j(n^*) = \xi_j(n) + \mu_j(u_i) + \eta_j(\nu_i), j = 1, 2, \dots, N, h; j \neq i \\ \xi_i(n^*) = \mu_i(u_i) + \eta_i(\nu_i) \\ \xi_j(n+1) = \xi_j(n^*) + \eta_j(\nu_h), j = 1, 2, \dots, N, h; \\ \xi_h(n+1) = 0 \end{cases} \quad (1)$$

2.2 工作条件

(1) 进入 i 号普通站点存储器中的信息分组数服从于一个相互独立、同分布的概率分布, 其概率母函数、均值和二阶特性分别为 $A_i(z_i)$, $\lambda_i = A_i'(1)$ 和 $A_i'' = A_i''(1)$; 进入中心站点 h 存储器中的信息分组数的概率分布的母函数、均值和二阶特性分别为 $A_h(z)$, $\lambda_h = A_h'(1)$, $A_h'' = A_h''(1)$;

(2) 服务器传输服务 i 号普通站点中一个信息分组的服务时间服从于一个相互独立、同分布的概率分布, 其概率母函数、均值和二阶特性分别为 $B_i(z_i)$, $\beta_i = B_i'(1)$ 和 $B_i'' = B_i''(1)$; 服务器传输服务中心站点中一个信息分组的服务时间服从于同一概率分布, 其概率母函数、均值和二阶特性分别为 $B_h(z_h)$, $\beta_h = B_h'(1)$ 和 $B_h'' = B_h''(1)$;

(3) 服务器由 i 号普通站点轮询至中心站点的时间与中心站点轮询至 $i+1$ 号普通站点总的转移时间服从于一个相互独立、且同分布的概率分布, 其分布的概率母函数、均值和二阶特性分别为 $R_i(z_i)$, $\gamma_i = R_i'(1)$ 和 $R_i'' = R_i''(1)$;

(4) 中心站点采用完全服务策略对任一时刻内到达的信息分组进行服务所需的时间^[7]的概率分布的母函数为 $F_h(z_h)$, 并有 $F_h(z_h) = A_h[B_h(z_h F_h(z_h))]$;

(5) 轮询系统中每个站点的存储器容量足够大, 不会产生信息分组丢失;

(6) 服务器服务信息分组的秩序按先到先服务 (FCFS) 的原则服务;

(7) 两级优先控制轮询系统工作在离散时间状态, 时间轴按单位时隙划分.

2.3 概率母函数

轮询系统中服务器在 t_n 时刻轮询服务 i 号普通站点, 在 t_n^* 时刻轮询服务中心站点, 在 t_{n+1} 时刻轮询服务 $i+1$ 号普通站点, 轮询系统的状态变化可以用马尔可夫链来描述, 在 $\sum_{i=1}^N \rho_i + \rho_h = N\rho + \rho_h < 1$ 的条件下 $\left[\rho_i = \lambda_i \beta_i, \rho_h = \lambda_h \beta_h\right]$, 该马尔可夫过程是非周期的、各态历经、系统是稳态的, 轮询系统的概率布为:

$$\lim_{n \rightarrow \infty} P[\xi_j(n) = x_j; j = 1, 2, \dots, N, h] = \pi_i[x_1, \dots, x_i, \dots, x_N, x_h]$$

概率母函数定义为:

$$G_i(z_1, z_2, \dots, z_N, z_h) = \sum_{x_1=0}^{\infty} \dots \sum_{x_i=0}^{\infty} \dots \sum_{x_N=0}^{\infty} \sum_{x_h=0}^{\infty} \mathbb{P}_i \left[x_1, \dots, x_i, \dots, x_N, x_h \right] z_1^{x_1} \dots z_i^{x_i} \dots z_N^{x_N} z_h^{x_h},$$

$$i = 1, 2, \dots, N$$

服务器轮询中心站点时系统状态变量的概率母函数为

$$G_{ih}(z_1, z_2, \dots, z_N, z_h) = \lim_{n \rightarrow \infty} E \left[\prod_{j=1}^N z_j^{\xi_j(n)} z_h^{\xi_h(n)} \right]$$

$$= R_i \left[\prod_{j=1}^N A_j(z_j) A_h(z_h) \right] G_i[z_1, z_2, \dots, B_i \left(\prod_{j=1}^N A_j(z_j) A_h(z_h) \right), z_{i+1}, \dots, z_N, z_h]$$

$$i = 1, 2, \dots, N \quad (2)$$

服务器轮询 $i+1$ 普通站点时系统状态变量的概率母函数为

$$G_{i+1}(z_1, z_2, \dots, z_N, z_h) = \lim_{n \rightarrow \infty} E \left[\prod_{j=1}^N z_j^{\xi_j(n+1)} z_h^{\xi_h(n+1)} \right]$$

$$= G_{ih}(z_1, z_2, \dots, z_N, B_h \left(\prod_{j=1}^N A_j(z_j) F_h \left(\prod_{j=1}^N A_j(z_j) \right) \right))$$

$$i = 1, 2, \dots, N \quad (3)$$

3 模型分析

3.1 平均排队队长

服务器轮询 i 号普通站点, 其存储器中平均存储的信息分组数为 $g_i(i)$, 由式(2)、式(3)求导计算得到平均排队队长:

$$g_i(i) = \frac{N \gamma \lambda}{1 - \rho_h - N \rho}, \quad i = 1, 2, \dots, N \quad (4)$$

服务器轮询中心站点, 其存储器中平均存储的信息分组数计算采用相同的分析方法得到:

$$g_{ih}(h) = \frac{\gamma \lambda_h (1 - \rho_h)}{1 - \rho_h - N \rho}, \quad i = 1, 2, \dots, N \quad (5)$$

3.2 信息分组的平均等待时间

信息分组的平均等待时间(平均时延)由二阶偏导计算得到.

$$g_i(j, k) = \lim_{z_1, z_2, \dots, z_j, \dots, z_k \rightarrow 1} \frac{\partial^2 G_i(z_1, z_2, \dots, z_N, z_h)}{\partial z_j \partial z_k}$$

$$i = 1, 2, \dots, N; j = 1, 2, \dots, N, h; k = 1, 2, \dots, N, h \quad (6)$$

由式(2)、式(3)计算得:

$$g_{ih}(h, h) = \lambda_h^2 \left\{ R''(1) + [\gamma + \beta g_i(i)] \frac{A''_h(1)}{\lambda_h^2} + g_i(i) B''(1) + 2 \gamma \beta g_i(i) + \beta^2 g_i(i, i) \right\}, \quad i = 1, 2, \dots, N \quad (7)$$

$$g_i(i, i) = \frac{N \gamma \lambda^2}{(1 - \rho_h + \rho)(1 - \rho_h - N \rho)} \left\{ \frac{R''(1)}{\gamma} \right.$$

$$+ \frac{1}{1 - \rho_h - N \rho} \left[(1 - \rho_h)(1 - \rho_h + \rho - N \rho) \frac{A''(1)}{\lambda^2} + \frac{\rho_h^2 A''_h(1)}{\lambda_h^2} + N \lambda B''(1) + \lambda_h B''_h(1) + (N - 1) \cdot (1 - \rho_h)(\gamma + \rho) + 2N \gamma \rho + 2 \rho_h(1 - \rho_h) \right] \Big\}$$

$$i = 1, 2, \dots, N \quad (8)$$

中心队列中信息分组的平均等待时间^[7]为:

$$E(w_h) = \frac{g_{ih}(h, h)}{2 \lambda_h g_{ih}(h)} - \frac{(1 - 2 \rho_h) A''_h(1)}{2 \lambda_h^2 (1 - \rho_h)} + \frac{\lambda_h B''_h(1)}{2(1 - \rho_h)} \quad (9)$$

普通队列中信息分组的平均等待时间^[6]为:

$$E(w_i) = \frac{(1 + \rho) g_i(i, i)}{2 \lambda g_i(i)} - \frac{A''(1)}{2 \lambda^2}$$

$$= \frac{(1 + \rho)}{2(1 - \rho_h + \rho)} \left\{ \frac{R''(1)}{\gamma} + \frac{1}{1 - \rho_h - N \rho} \cdot \left[(1 - \rho_h)(1 - \rho_h + \rho - N \rho) \frac{A''(1)}{\lambda^2} + \frac{\rho_h^2 A''_h(1)}{\lambda_h^2} + N \lambda B''(1) + \lambda_h B''_h(1) + (N - 1)(1 - \rho_h)(\gamma + \rho) + 2N \gamma \rho + 2 \rho_h(1 - \rho_h) \right] \right\} - \frac{A''(1)}{2 \lambda^2}$$

$$i = 1, 2, \dots, N \quad (10)$$

4 仿真实验及性能分析

根据以上所建立的两级优先级控制轮询系统的模型, 并基于下面的工作条件进行数值计算和仿真实验.

(1) 各普通站点的参数服从相同的概率分布, 并具有对称性;

(2) 两级优先级控制轮询系统的时隙长度为 $10 \mu s$;

(3) 任一时隙期内到达各站点的信息分组数服从 Poisson 分布;

(4) 系统满足 $(\rho_h + N \rho) < 1$ 稳定条件.

从图 2 至图 7 中可以得出理论计算与仿真实验的结果是一致的, 表明所建立的两级轮询系统的数学模型的正确性, 并有如下特性:

(1) 从图 2 反映出了系统平均排队队长分别随系

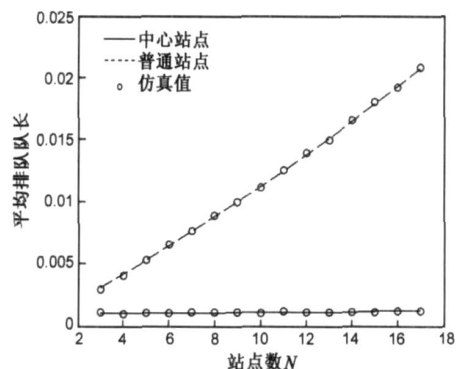


图2 平均排队队长随站点数变化($\lambda=0.001, \lambda_h=0.001, \beta=100, \gamma=10$)

统站点数变化的情况, 可以看到, 中心站点与普通站点的平均排队队长得到了很好的区分, 在普通站点数增加的情况下, 中心站点的平均排队队长仍然比普通站点的小, 得到了明显区分。

(2) 从图 3 可以看到信息分组的平均时延随普通站点数和系统负载变化的趋势, 与平均排队队长类似, 中心站点与普通站点的平均时延得到了明显的区分, 同样在普通站点数增加的情况下, 也能保证中心站点的平均时延比普通站点的小。

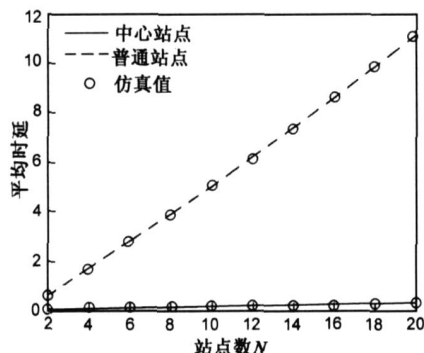


图3 平均时延随站点数变化($\lambda=0.001, \lambda_h=0.002, \beta=\beta_h=50, \gamma=10$)

(3) 图 4 与图 5 分别展示了两级优先级控制轮询系统与同等数量站点下的单一门限服务系统的平均排队队长和平均时延的比较, 如图所示, 随着信息分组到达率的增加, 中心站点比门限服务站点的平均排队队长和平均时延要小, 甚至普通站点也比纯门限服务站点

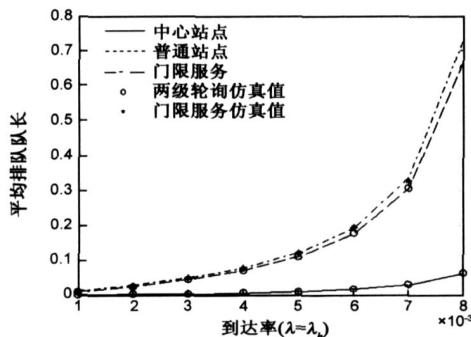


图4 平均排队队长与单一门限服务比较($\beta=\beta_h=100, \gamma=10, N=10$)

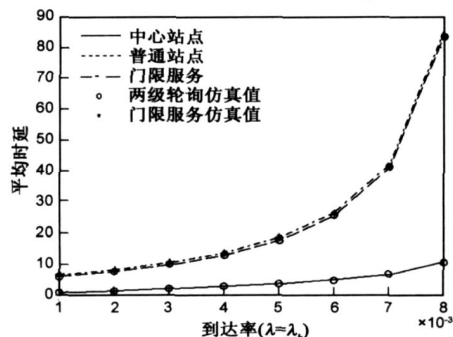


图5 平均时延与单一门限服务比较($\beta=\beta_h=100, \gamma=10, N=10$)

的小, 说明与单一门限服务系统相比, 两级优先级控制轮询系统的性能得到优化。

(4) 图 6 与图 7 分别展示了两级优先级控制轮询系统与单一完全服务系统的平均排队队长和平均时延在相同系统负载($N\rho$)下的比较, 从图中可以看到, 中心站点的平均排队队长和平均时延比完全服务系统和普通站点的要小, 而且普通站点的也比完全服务的要小, 但随着负载增加, 普通站点与完全服务的时延都在增加并趋于接近, 中心站点的时延也有所增加, 同样说明, 系统整体性能得到优化。

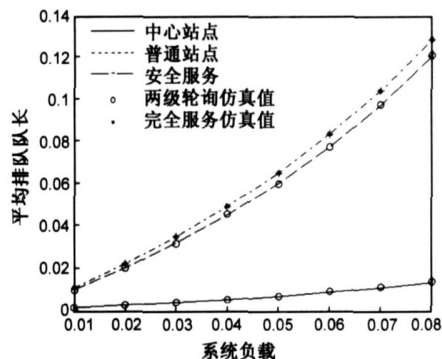


图6 平均排队队长与单一完全服务比较($\beta=\beta_h=50, \gamma=10, N=9$)

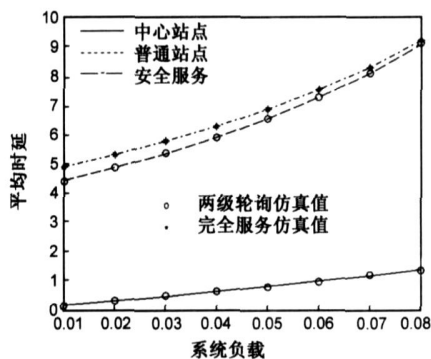


图7 平均时延与单一完全服务比较($\beta=\beta_h=50, \gamma=10, N=9$)

综上所述, 理论计算和仿真实验验证了两级优先级控制轮询系统模型, 并说明了中心站点与普通站点的服务得到了很好的区分, 保证了中心站点的优先级, 与单一的门限和完全服务系统相比, 也说明中心站点有更好的性能。

5 结论

在实际应用中, 经常需要针对不同的业务需求提供区分优先级的服务, 轮询系统区分优先级服务一直是具有挑战性的研究问题。如文献[2]所述, 一般通过查询顺序、服务时间和每个队列中顾客的服务顺序等参数的控制来实现优先级的区分控制。

本文提出了两级优先级控制轮询系统的模型, 即对中心队列采用完全服务而对普通队列采用门限服务

的两级优先级轮询策略,通过不同的服务策略实现区分优先级的控制.然后采用嵌入式马尔可夫链和概率母函数的方法建立了系统模型,并精确解析了系统的平均排队队长和平均等待时间等特性,在理论计算和仿真实验的基础上,验证了解析结果,并充分说明中心队列与普通队列的特性得到了很好的区分,保证了中心队列的优先级.同时与相同负载下单一的门限服务和单一的完全服务系统相比较也说明系统所获得的区分中心队列和普通队列的更好性能.两级优先级控制轮询系统通过不同的服务策略实现了区分优先级的控制,为基于业务优先级的应用奠定了基础.

致谢:衷心感谢电子科技大学查光明教授的支持和帮助!

参考文献:

- [1] Hashida O. Analysis of multiqueue [J]. Rev Elec Commun Lab, 1972, 20(3, 4): 189–199.
- [2] Takagi H. Analysis of Polling Systems[M]. Cambridge, MA: The M. I. T. Press, 1986.
- [3] H Levy and M Sidi. Polling systems: applications, modeling, and optimization [J]. IEEE Transactions on Communications, 1990, 38(10): 1750–1759.
- [4] Hideaki Takagi. Application of polling models to computer networks [J]. Computer Networks, 1991, 22(3): 193–211.
- [5] Hwang L C. An exact analysis of an asymmetric polling system with mixed service discipline and general service order [J]. Computer Communication, 1997, 20(10): 1293–1299.
- [6] 赵东风, 郑苏民. 周期查询式门限服务排队系统中信息分组的延迟分析[J]. 通信学报, 1994, 15(2): 18–23.
Zhao Dongfeng, Zheng Sumin. Message waiting time analysis for a polling system with gated service [J]. Journal of China Institute of Communications, 1994, 15(2): 18–23. (in Chinese)
- [7] 赵东风, 郑苏民. 完全服务排队模型分析[J]. 电子学报, 1994, 22(5): 102–107.
Zhao Dongfeng, Zheng Sumin. Analysis of a polling model with exhaustive service [J]. Acta. Electronica Sinica, 1994, 22(5): 102–107. (in Chinese)
- [8] Zhao Dongfeng. Performance analysis of polling systems with limited service [J]. Journal of Electronics, 1998, 15(1): 43–49.
- [9] 刘强, 张中兆, 张乃通. 排队优先权站点轮询系统的平均周期时间 [J]. 通信学报, 1999, 20(2): 86–91.
Liu qiang, Zhang Zhongzhao, Zhang Naitong. Mean cyclic time of queueing priority station polling system [J]. Journal of China Institute of Communications, 1999, 20(2): 86–91. (in Chinese)
- [10] Oran Sharon, Eitan Altman. An efficient polling MAC for wireless LANs [J]. IEEE/ACM Trans. Networking, 2001, 9(4): 439–451.
- [11] 李剑, 胡波, 赵东风. 一种提供时延 QoS 保障的无线网络 MAC 协议 [J]. 电子学报, 2005, 33(7): 1168–1172.
Li Jian, Hu Bo, Zhao Dongfeng. A medium access control protocol for delay QoS provisioning in wireless network [J]. Acta Electronica Sinica, 2005, 33(7): 1168–1172. (in Chinese)
- [12] 王智, 于海斌, 宋叶琼, 孙优贤. 混合服务方式下的 M1+M2/G/1 轮询系统的平均运行周期 [J]. 通信学报, 2002, 23(7): 8–18.
Zhi Wang, Haibin Yu, Yeqiong Song, Youxian Sun. Characteristics of mean period of M1+M2/G/1 polling system under mixed service [J]. Journal of China Institute of Communications, 2002, 23(7): 8–18. (in Chinese)
- [13] O C Ibe, Xian Cheng. Stability conditions for multiqueue systems with cyclic service [J]. IEEE Tran. Automat Control, 1988, 33(1): 102–103.
- [14] Tao Li Logothetis D, Veeraraghavan M. Analysis of a polling system for telephony traffic with application to wireless LANs [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2006, 5(6): 1284–1293.
- [15] V M Vishnevskii and O V Semenova. Mathematical methods to study the polling systems [J]. Automation and Remote Control, 2006, 67(2): 173–220.
- [16] A Wierman, E M M Winands, and O J Boxma. Scheduling in polling systems [J]. Performance Evaluation, 2007, 64: 1009–1028.
- [17] Mei R D van der, and Winands E M M. Heavy traffic analysis of polling models by mean value analysis [J]. Performance Evaluation, 2008, 65(6–7): 400–416.
- [18] Beekhuizen P, Denteneer D, and Resing J A C. Reduction of a polling network to a single node [J]. Queueing Systems: Theory and Applications, 2008, 58(4): 303–319.
- [19] Boxma O J, Wal J van der, and Yechiali U. Polling with batch service [J]. Stochastic Models, 2008, 24(4): 604–625.

作者简介:



杨志军 男, 1968 年 5 月出生于云南省保山市, 高级工程师, 云南省教育厅教科院副院长. 1990 年毕业于浙江大学计算机科学与工程系, 获工学学士学位, 2002 年于云南大学信息学院获通信与信息系统专业工学硕士学位, 2004 年考入云南大学信息学院通信与信息系统博士研究生. 研究方向: 计算机通信与网络、无线通信和轮询系统.

赵东风 (通信作者) 男, 1957 年 4 月出生于青海省西宁市, 教授, 博士生导师, 云南大学信息学院副院长, 主要研究方向: 计算机通信与网络系统、轮询系统、随机多址通信系统和无线通信工程.

E-mail: zhaodf123@263.net