

离散时间并行优化门限服务 轮询系统排队特性解析

罗启鹏, 保利勇, 丁洪伟, 官 铮, 何 敏

(云南大学信息学院, 云南昆明 650500)

摘 要: 针对周期式查询门限服务中流水线式调度效率低的问题, 本文提出了一种并行优化门限服务轮询控制的系统服务资源调度策略. 论文构建了轮询排队系统及其数学模型, 先对系统状态变量的概率母函数求偏导得到一阶和二阶特性参数方程组, 联立求解后推导出各个系统参数的完整数学解析表达式. 仿真实验结果和理论计算值相一致. 系统性能分析表明, 该系统的队长和时延特性均得到了较大的提高, 能够更好的适应密集数据环境下时延敏感性数据的服务需求.

关键词: 系统服务调度策略; 轮询; 并行优化门限服务; 平均排队队长; 平均查询周期; 平均等待时延

中图分类号: TP393 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2019)09-1937-06

电子学报 URL: <http://www.ejournal.org.cn> **DOI:** 10.3969/j.issn.0372-2112.2019.09.017

Performance Analysis of Discrete Time Polling Queuing System Based on Parallel Optimization Gated Service

LUO Qi-peng, BAO Li-yong, DING Hong-wei, GUAN Zheng, HE Min

(Information School, Yunnan University, Kunming, Yunnan 650500, China)

Abstract: Aiming at the problem of low efficiency of pipelined scheduling in system of periodic query gated service, this paper proposes a systematic service resource scheduling strategy based on parallel optimization gated service polling control. Firstly, the queuing system and its mathematical model are constructed. Moreover, after deriving the partial derivative of the probability generating function of the system state variables, the first and second order partial differential equations are solved. Finally the complete mathematical analytic expressions of the system performance parameters are derived. In this paper, the system is further verified by computer simulation experiments, and it is found that the statistical analysis results are consistent with the theoretical analysis results. The performance analysis shows that the queuing length and waiting delay characteristics of the polling system have been greatly improved, which can better adapt to the service requirements of delay sensitive data in dense data environment.

Key words: systematic service scheduling strategy; polling; parallel optimization gated service; mean queue length; mean query cycle; mean waiting delay

1 引言

轮询是服务器周而复始地依次为顾客提供系统服务的动态控制方式, 因其无竞争性调度过程的可靠性较高, 在工业控制、公共交通运输、通信网络、物流、经济预测等行业已经得到了广泛的应用^[1]. 基于竞争的服务资源随机调度方式在高负载服务情况下容易产生拥塞, 而轮询所提供的周期性分配和非竞争性访问控制

机制不仅能提高服务资源在高负载情况下的稳定性, 同时也兼具更好的时延特性^[2,3]. 因此, 对轮询系统的理论分析也一直在深入和推广. 目前各行业正处于前所未有的发展时期, 顾客数急剧增长的同时, 业务应用也呈现出更为丰富的多样性. 特别是, 信息通信技术的应用已从目前的人与人通信扩展至人机物之间的深度融合通信, 系统服务除了应对区分业务多样性和实时性保障等变化外, 更强调了面向超大顾客流量、密集站

点接入和超高可靠与低时延服务的系统构建需求^[4].

依据基本轮询系统的控制机理,在轻负载和站点密集的情况下流水线式的控制流程使得系统整体服务效率大大降低^[5-7].因此,如何提高轮询系统服务效率以适应系统服务深入发展的需求是国内外学者的研究重点^[8].目前,进一步提高轮询系统服务效率的研究主要分为两个方向.一是在轮询过程中提前获取到预约和站点忙闲状态信息来减少服务器查询的站点个数,缩小查询周期来提高系统效率^[9-12].二是通过并行优化传统流水线式的查询服务过程来提高系统整体效率^[13,14].前者实现的前提是需要提前获取各个站点的状态信息以备站点动态重组,在周而复始的工作过程中不断调整实际参与查询的站点数往往会开销更多系统资源.而后者一旦确定优化后的系统查询服务流程后,系统可以稳定可靠地完成周期性系统服务.特别是,在文献[13]和[14]中构建了基于限定($k=1$)服务方式和限定($k=1$)完全服务方式的并行调度轮询系统模型,给出了完整地数学解析表达式.

与限定($k=1$)服务方式相比较,门限服务方式的轮询系统具有更优的队长和时延特性,在实际应用领域中也被更为广泛采用^[5,15].但是,轮询系统的数学模型是一个由 N 维随机变量组成的复杂随机系统^[8],并行优化的控制策略使得对门限服务轮询系统的求解难度急剧增加.针对提高门限服务轮询系统服务效率的问题,本文提出了并行优化查询转移和服务流程的门限服务轮询系统调度策略,利用排队论和随机过程理论对顾客到达、服务器查询和服务以及转移等过程进行数理建模,使用 N 维随机变量的概率母函数构建出并行优化门限服务轮询系统的系统状态变量方程,并完整解析出平均排队队长、平均查询周期和平均等待时延的数学表达式.通过了计算机仿真实验的统计分析结果与理论计算值相互验证.最后对该轮询系统进行了系统性能评估.

2 系统模型

2.1 排队模型构建

依据排队理论,可以把系统看作是由 N 个终端站点和单个服务器 Server 组成的架构.传统的轮询系统运行过程如下所示,Server 周期性依次查询服务每一个站点,服务规则采用门限服务.服务和查询流程之间的转换衔接方式如图 1 中所示,在 t_{n-1} 时刻 Server 服务 $i-1$ 号站点,经过时间 β_{i-1} 后服务完该站点内的顾客后,再经过转移时间 γ_{i-1} 接着在 t_n 时刻查询服务 i 号站点,按照同样的方式依次对剩下站点进行服务,再回到第一个站点,周而复始的依次进行查询、转移和门限服务.

本文是在门限服务的基础上实现服务和查询转换

时间过程的并行优化调度,控制过程如图 1 中所示, t_{n-1} 时刻 Server 开始服务 $i-1$ 号站点内的顾客,在服务顾客的过程中查询下一个站点(即 i 号站点)中的顾客情况,服务完该站点内的顾客后在 t'_n ($t'_n < t_n$) 时刻接着对 i 号站点内进行门限服务.按照上述并行优化调度方式 Server 周期性的处理系统内的所有终端站点.

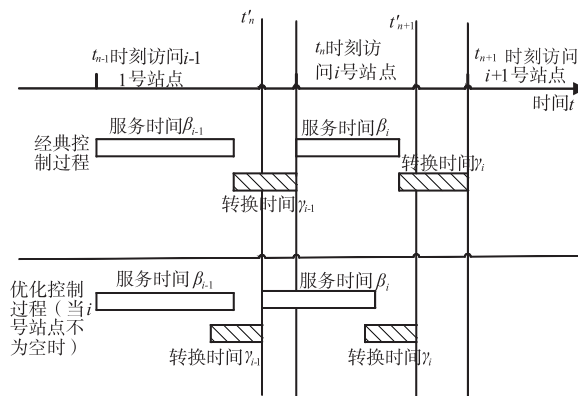


图1 并行优化门限服务轮询系统的控制过程

2.2 系统数学模型构建

系统工作在离散时间状态,站点缓存器容量为足够大且不会产生顾客丢失的现象.从数学分析的角度,可以把该轮询控制系统的到达、转移和服务过程看成是三个 N 维随机过程组成的复合随机系统.

假设其中进入第 i 号站点顾客数的到达过程的概率母函数 $A_i(Z_i)$ 是满足独立泊松分布的条件其均值 $\lambda_i = A'_i(1)$, 方差 $\sigma_{\lambda_i}^2 = A''_i(1) + \lambda_i - \lambda_i^2$. 系统服务完一个站点后通过转移过程开始下一个即 $i+1$ 号站点进行服务,该转移过程的均值和方差分别为: $\gamma = R'(1)$ 、 $(\sigma_\gamma)^2 = R'(1) + \gamma - \gamma^2$, 其概率母函数设为 $R(z)$. 站点的服务过程是均值为 $\beta_i = B'_i(1)$, 方差为 $\sigma_{\beta_i}^2 = B''_i(1) + \beta_i - \beta_i^2$ 的相互独立且服从相同的概率分布其概率母函数设为 $B_i(z_i)$.

从时间轴上剖析该模型,在 t_n 时刻并行轮询系统指向第 i 号站点以门限策略开始对其服务,此时在 i 号站点内等待服务的顾客数设为 $\zeta_i(n)$, 定义 $\zeta_i(n)$ 为 i 号站点 ($i=1,2,3,\dots,N$) 在时间 t_n 站点内等待服务的顾客数,此时整个系统状态为: $\{\zeta_1(n), \zeta_2(n), \zeta_3(n), \dots, \zeta_N(n)\}$, 随后并行查询完 $i+1$ 号站点有顾客数, t_{n+1} 时刻系统开始为第 $i+1$ 号站点进行门限服务,这时系统的状态为: $\{\zeta_1(n+1), \zeta_2(n+1), \zeta_3(n+1), \dots, \zeta_N(n+1)\}$.

2.3 系统状态转移方程和状态变量的概率母函数

根据上述过程中各个站点内等待的顾客数随服务器周期性查询服务的变化规律,论文给出了下列系统的状态转移方程.服务器在 t_{n+1} 时刻开始对 $i+1$ 号站点

服务, t_{n+1} 时刻第 j 号站点和第 i 号站点内的顾客数为:

$$\begin{cases} \xi_j(n+1) = \xi_j(n) + \mu_j(u_i), & \xi_i(n) = 0 \\ \xi_i(n+1) = \mu_i(u_i), \\ \xi_j(n+1) = \eta_j(v_i) + \xi_j(n), & \xi_i(n) \neq 0 \\ \xi_i(n+1) = \eta_i(v_i), \end{cases}$$

其中, 定义 $u_i(n)$ 为服务器从 i 号站点转向下一个站点的查询转换时间; $v_i(n)$ 为服务器对 i 号站点进行服务的时间. $\mu_j(u_i)$ 为在 $u_i(n)$ 时间内进入第 j 号站点的顾客数; $\eta_j(v_i)$ 为在时间 $v_i(n)$ 内进入第 j 号站点的顾客数; $\xi_j(n)$ 为 t_n 时刻第 j 号站点的顾客数; $\xi_j(n+1)$ 为 t_{n+1} 时刻第 j 号站点的顾客数.

当系统处于稳态条件下, 该系统状态是齐次、不可约、非周期的马尔科夫随机过程, 并且具有唯一的稳定分布. 因此, 服务器在 t_{n+1} 时刻开始对 $i+1$ 号站点服务, 稳态下的系统状态变量概率母函数为:

$$\begin{aligned} G_{i+1}(z_1, z_2, z_3, \dots, z_i, \dots, z_N) = \\ G_i(z_1, z_2, z_3, \dots, B_i[\prod_{j=1}^N A_j(z_j)], \dots, z_N) \\ - G_i(z_1, z_2, z_3, \dots, z_i, \dots, z_N) |_{z_i=0} \\ + R_i[\prod_{j=1}^N A_j(z_j)] G_i(z_1, z_2, z_3, \dots, z_i, \dots, z_N) |_{z_i=0} \end{aligned} \quad (1)$$

其中, 定义

$$\begin{aligned} \lim_{n \rightarrow \infty} E[\prod_{j=1}^N z_j^{\eta_j(v_i)}] &= B_i[\prod_{j=1}^N A_j(z_j)], \\ \lim_{n \rightarrow \infty} E[\prod_{j=1}^N z_j^{\mu_j(u_i)}] &= R_i[\prod_{j=1}^N A_j(z_j)]. \end{aligned}$$

3 系统解析过程

3.1 平均排队队长

根据队长定义, 对系统状态变量概率母函数求一阶导数后计算可得到系统的平均排队队长^[5]. t_n 时刻服务器对第 i 号站点进行服务时, 此时第 i 号站点的平均排队队长为 $g_i(i)$:

$$g_i(i) = \frac{N\lambda\gamma}{1 - N\lambda\beta + N\lambda\gamma} \quad (2)$$

3.2 平均查询周期

系统的查询周期是服务器对所有站点查询服务一次的时间, 且其平均值反映着系统的响应速度, 由平均排队队长和平均循环周期的数学关系可以得到平均查询周期 $E(\bar{\theta}_i)$:

$$E(\bar{\theta}_i) = \frac{N\gamma}{1 - N\lambda\beta + N\lambda\gamma} \quad (3)$$

3.3 顾客的平均等待时延

在上述推导的基础上, 继续对式(1)求二阶偏导数, 得到下列方程组:

$$g_{i+1}(j, k) = g_i(j, k) + \rho(g_i(i, k) + g_i(i, j))$$

$$+ \rho^2 g_i(i, i) + (B''(1)\lambda^2 + \lambda^2\beta)g_i(i) + (R''(1)\lambda^2 + \lambda^2\gamma)G_i|_{z_i=0} + \lambda(\gamma g_{i0}(j) + g_{i0}(k)) \quad (4)$$

$$\begin{aligned} g_{i+1}(j, j) &= g_i(j, j) + 2\rho g_i(j, i) + \rho^2 g_i(i, i) \\ &+ (B''(1)\lambda^2 + \lambda^2\beta)g_i(i) \\ &+ (R''(1)\lambda^2 + \lambda^2\gamma)G_i|_{z_i=0} + 2\lambda\gamma g_{i0}(j) \end{aligned} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} g_{i+1}(j, i) &= (B''(1)\lambda^2 + A''(1)\beta)g_i(i) \\ &+ (R''(1)\lambda^2 + A''(1)\gamma)G_i|_{z_i=0} \\ &+ \lambda\gamma g_{i0}(j) + \rho g_i(i, j) + \rho^2 g_i(i, i) \end{aligned} \quad (6)$$

$$\begin{aligned} g_{i+1}(i, i) &= (B''(1)\lambda^2 + A''(1)\beta)g_i(i) \\ &+ (R''(1)\lambda^2 + A''(1)\gamma)G_i|_{z_i=0} + \rho^2 g_i(i, i) \end{aligned} \quad (7)$$

其中 $i=1, 2, \dots, N; j=1, 2, \dots, N; k=j=1, 2, \dots, N$;

对上述方程组累加求和化简后得到:

$$\begin{aligned} g_i(i, i) &= \frac{NG_i|_{z_i=0}}{(1+\rho)(1-N\rho)} \{ (1 - (N-1)\rho)A''(1)r \\ &+ (N-1)\lambda^2\gamma\rho + R''(1)\lambda^2 \\ &+ \frac{N(N-1)\lambda\gamma\rho(\lambda\rho - A''(1)\beta) + N\lambda^3\gamma B''(1) + N\lambda\gamma\beta A''(1)}{1 - N\rho} \\ &+ \frac{(N-1)\lambda^2\gamma^2}{1 - N\rho} \} \end{aligned} \quad (8)$$

顾客进入站点的等待时间指从顾客进入站点等待被服务到服务器对其服务完后的时间段. 依据文献[5]的定义, 带入式(2)和式(8)得到顾客的平均时延 $E(\varpi_c)$ 为:

$$\begin{aligned} E(\varpi_c) &= \frac{(1+\rho)g_i(i, i)}{2\lambda g_i(i)} \\ &= \frac{1}{2\lambda^2\gamma} \{ (1 - (N-1)\rho)A''(1)r + (N-1)\lambda^2\gamma\rho + R''(1)\lambda^2 \\ &+ \frac{N(N-1)\lambda\gamma\rho(\lambda\rho - A''(1)\beta) + N\lambda^3\gamma B''(1) + N\lambda\gamma\beta A''(1)}{1 - N\rho} \\ &+ \frac{(N-1)\lambda^2\gamma^2}{1 - N\rho} \} \end{aligned} \quad (9)$$

4 仿真实验与性能分析

为了对上述理论解析结果进行验证和系统效能评估, 进一步基于 MatlabR2014a 搭建了计算机仿真实验平台. 设定理论模型和仿真实验环境具有同样的条件, 即各个站点的顾客到达都服从参数为 λ 的 Poisson 过程, 系统满足 $N(\rho + \lambda\gamma) < 1$ 的稳定条件. 最后, 再把系统关键性能指标的理论计算值和仿真实验的统计值进行比较来说明系统分析的正确性. 并行优化门限轮询服务系统的理论计算值与仿真实验的统计分析值对比分析结果如下所示:

(1) 图 2 和图 4 是服务系统的一阶特性指标变化曲线, 图 3 是系统的二阶特性指标变化曲线, 三幅图中

均反映出一阶和二阶系统特性指标随顾客到达率递增而不断增加的合理变化趋势. 特别是在整个曲线上, 由理论公式计算得到的曲线和计算机仿真实验的统计分析值基本吻合, 说明了系统关键指标的理论分析与仿真实验结果有较好的合理性和一致性.

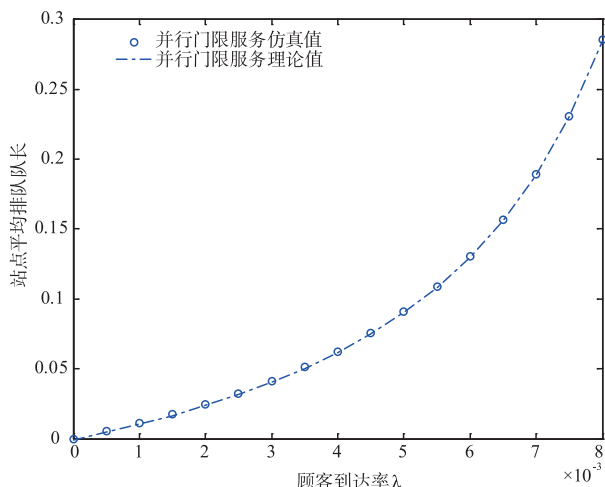


图2 并行优化门限轮询系统的平均排队队长

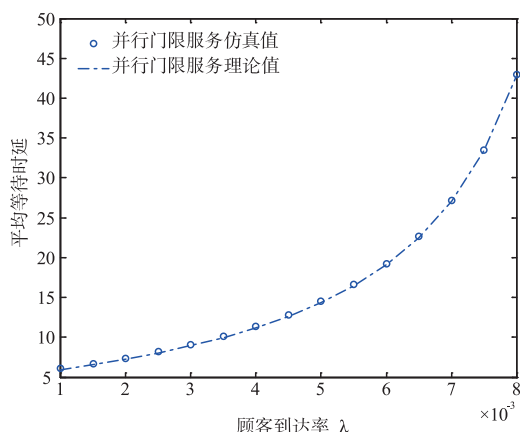


图3 并行优化门限轮询系统顾客的平均等待时延

(2) 如图4所示, 从对比图中曲线的层次划分可看出并行优化后的门限服务轮询系统服务器的平均查询周期 $E(\theta)$ 随着到达率的增大而增大, 其时长和限定 ($k=1$)、门限服务和完全服务三种服务相比较一直处于较小的状态, 特别是顾客到达率较高的高负载情况下增长更加平稳, 这说明了系统响应速度和稳定性有了较大的提高, 符合并行优化改进的初衷. 另外, 从对比图中曲线的整体变化趋势可以看出, 并行优化后的轮询系统同样遵循着平均查询周期大小与服务方式无关的变化规律, 即

$$E(\theta_i)_{\text{Parallel-Gated}} = E(\theta_i)_{\text{Parallel-Limited}(k=1)} < E(\theta_i)_{\text{Exhausted}} = E(\theta_i)_{\text{Gated}} = E(\theta_i)_{\text{Limited}(k=1)}$$

(3) 如图5和图6结果所示, 随着顾客的到达率增

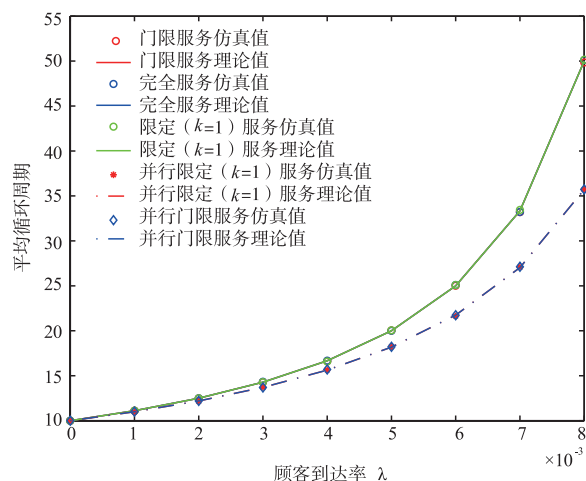


图4 并行优化门限轮询系统与其它轮询服务系统的平均查询周期对比图

大, 系统终端站内的等待人数和顾客等待时间都在不断增加, 完全、门限、限定 ($k=1$)、并行优化门限和并行优化限定 ($k=1$) 服务方式的平均排队队长和平均等待时延数值曲线层次型上下分布, 彼此间无交叉情况, 这种分布特性都符合轮询系统无冲突调度的系统特性.

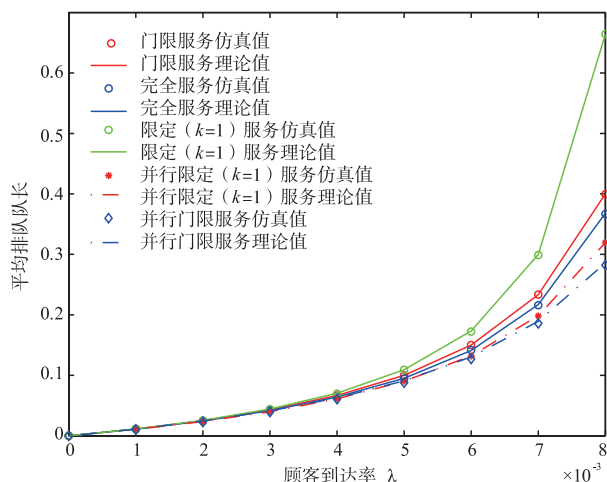


图5 并行优化门限轮询系统与其它轮询服务系统的平均排队队长对比图

(4) 从图5和图6可以看出, 随着顾客到达强度的增加, 并行优化门限服务方式的平均排队队长 $E(g_i)$ 和平均等待时延 $E(W_i)$ 都要比完全、门限、限定 ($k=1$) 和并行优化限定 ($k=1$) 服务方式的数值更小, 说明轮询系统通过并行优化的自身结构性调整使得站点的队长特性和顾客的等待时延特性方面有了较大的改善, 显著提高了轮询系统服务效率. 从对比图中曲线的层次变化趋势可以看出, 各个服务系统的平均排队队长和平均等待时延分别呈现出以下关系:

$$E(g_i)_{\text{Parallel-Gated}} \leq E(g_i)_{\text{Parallel-Limited}(k=1)} \leq E(g_i)_{\text{Exhausted}} \leq E(g_i)_{\text{Gated}} \leq E(g_i)_{\text{Limited}(k=1)}$$

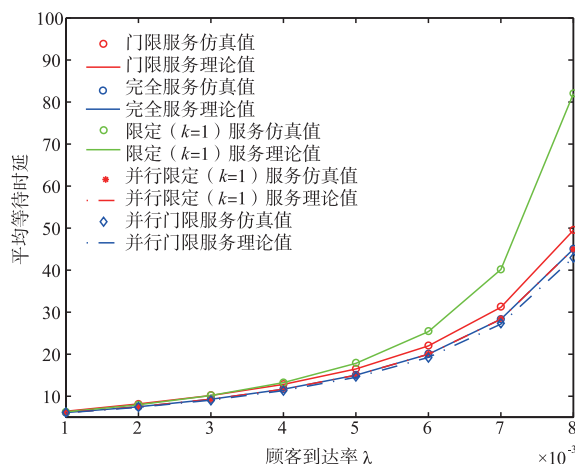


图6 并行优化门限轮询系统与其它轮询服务系统的平均等待时延对比图

和

$$E(W_i)_{\text{Parallel-Gated}} \leq E(W_i)_{\text{Parallel-Limited}(k=1)} \\ = E(W_i)_{\text{Exhausted}} \leq E(W_i)_{\text{Gated}} \leq E(W_i)_{\text{Limited}(k=1)}$$

5 结论

目前,轮询系统理论是服务资源分配和共享使用权管理的重要理论依据.随着信息技术与各行各业更为广泛地交叉融合和泛在化发展对全社会服务领域都会产生较大的影响.特别是,物联网时代即将来临,超大顾客流量、密集站点接入和超高可靠与低时延服务的系统服务需求,对基本轮询系统的服务效率和拓展轮询应用空间提出更高的要求.因此,论文基于对周期式查询门限服务系统控制机理的深入分析,对服务器转移查询和服务处理的流水线式串行调度方式进行并行优化.系统性能分析表明,并行优化门限服务轮询系统在服务过程中降低了系统的排队队长和等待时延,提高了系统服务响应速度,具有更好的系统稳定性,使得轮询系统的控制技术变得更为高效.论文的数理解析过程为轮询服务系统的演进研究和应用拓展了更大空间.

参考文献

- [1] Levy H. Polling systems; applications, modeling, and optimization [J]. IEEE Transactions on Communications, 1990, 38(10): 1750–1760.
- [2] Murtuza Ali Abidini, Jan-Pieter Dorsman, Jacques Resing. Heavy traffic analysis of a polling model with retrials and glue periods [J]. Stochastic Models, 2018, 34(4): 464–503.
- [3] Hideaki Takagi. Analysis of Polling Systems [M]. Cambridge MA: The MIT Press, 1986.
- [4] 李正茂. 通信 4.0 [M]. 北京: 中信出版社, 2016.
- [5] 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 Dong-feng, Zheng Su-min. 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)
- [6] 赵东风, 郑苏民. 查询式完全服务排队模型分析 [J]. 电子学报, 1994, 22(5): 102–107.
Zhao Dong-feng, Zheng Su-min. Analysis of a polling system with exhaustive service [J]. Acta Electronica Sinica, 1994, 22(5): 102–107. (in Chinese)
- [7] 赵东风, 李必海, 郑苏民. 周期查询式限定服务排队系统研究 [J]. 电子科学学刊, 1998, 15(1): 43–49.
Zhao Dong-feng, Li Bi-hai. Performance analysis of a polling system with limited service [J]. Journal of Electronics, 1998, 15(1): 43–49. (in Chinese)
- [8] 木文浩, 保利勇, 丁洪伟, 赵一帆. 离散时间闸门式多级门限服务的两级优先级轮询排队系统分析 [J]. 电子学报, 2018, 46(2): 276–280.
MU Wen-hao, BAO Li-yong. An exact analysis of discrete time two-level priority polling system based on multi-times gated service policy [J]. Acta Electronica Sinica, 2018, 46(2): 276–280. (in Chinese)
- [9] 杜银霞, 牛刚, 高婕. 基于优先权的分布式网络设备智能轮询策略研究 [J]. 火力与指挥控制, 2016, 41(5): 43–46.
DU Yin-xia, NIU Gang, GAO Jie. Study on distributed intelligent polling strategy for network devices based on priority [J]. Fire Control & Command Control, 2016, 41(5): 43–46. (in Chinese)
- [10] 张德升, 李金宝, 郭龙江. 基于多信道预约的传感器网络协议研究 [J]. 通信学报, 2011, 32(4): 126–137.
ZHANG De-sheng, LI Jin-bao, GUO Long-jiang. Study on multi-channel reservation based MAC protocol for sensor networks [J]. Journal on Communications, 2011, 32(4): 126–137. (in Chinese)
- [11] 官铮, 杨志军, 何敏, 钱文华. 依托站点状态的两级轮询控制系统时延特性分析 [J]. 自动化学报, 2016, 42(8): 1207–1214.
GUAN Zheng, YANG Zhi-jun, HE-min, QIAN Wen-hua. Study on the delay performance of station dependent two-level polling systems [J]. Acta Automatica Sinica, 2016, 42(8): 1207–1214. (in Chinese)
- [12] Kim J, Kim B. Stability of a cyclic polling system with an adaptive mechanism [J]. Journal of Industrial and Management Optimization, 2014, 11(3): 763–777.
- [13] 刘春花, 赵东风, 丁洪伟. 周期查询系统并行调度策略研

究[J]. 云南大学学报自然科学版, 2003, 25(5): 401 – 404.

LIU Chun-hua, ZHAO Dong-feng, DING Hong-wei. Study of parallel schedules for polling systems with limited service[J]. Journal of Yunnan University (Natural Science Edition), 2003, 25(5): 401 – 404. (in Chinese)

- [14] 官铮, 邹丹, 丁洪伟, 钱文华. 并行调度两级轮询控制传感器网络协议分析[J]. 智能系统学报, 2014, 9(4): 438 – 443.

GUAN Zheng, ZOU Dan, DING Hong-wei. Study on par-

allel two-level polling control based mac protocol for wireless sensor networks[J]. CAAI Transactions on Intelligent Systems, 2014, 9(4): 438 – 443. (in Chinese)

- [15] 赵东风, 丁洪伟, 赵一帆. 多级门限服务轮询系统离散时间控制协议模型分析[J]. 电子学报, 2010, 38(7): 1495 – 1499.

ZHAO Dong-feng, DING Hong-wei, ZHAO Yi-fan. An analytical model of a discrete-time polling mac protocol for wireless lans using m-gated services[J]. Acta Electronica Sinica, 2010, 38(7): 1495 – 1499. (in Chinese)

作者简介



罗启鹏 男, 1992 年生于湖南衡阳. 云南大学硕士研究生. 研究方向为轮询多址接入理论.

E-mail: a459245634@qq.com



保利勇 (通信作者) 男, 1975 年生于云南楚雄. 云南大学信息学院副教授, 硕士生导师. 2011 年获得博士学位. 研究方向为通信网络 MAC 层多址接入理论、冲突分解和混沌扩频通信等.

E-mail: bly.yx@163.com



丁洪伟 男, 1964 年生于云南景洪. 云南大学信息学院教授, 博士生导师. 研究方向为轮询系统、随机多址通信系统.

官铮 女, 1982 年生云南普洱. 云南大学信息学院副教授, 硕士生导师. 主要研究方向为无线传感器网络、网络接入技术、系统性能分析和优化等.

何敏 女, 1975 年生云南普洱. 云南大学信息学院副教授, 硕士生导师. 主要研究方向为无线传感器网络及应用、轮询系统理论、嵌入式系统应用等.