

基于竞争请求的CM上行发送缓冲区大小的计算方法

王沁 潘光荣 杜立国

(北京科技大学信息工程学院 北京 100083)

摘要 基于HFC(Hybrid Fiber Coax)网络的国际标准DOCSIS规范,分析了其网络接入设备CM(Cable Modem)上行带宽分配的竞争请求机制。首先给出了上行信道带宽竞争请求算法的马尔可夫链模型,以此为基础建立了CM端的上行信道数据帧发送过程的M/M/1/K排队模型,并给出了上行信道数据帧发送缓冲区大小的理论估计方法。通过NS-2仿真工具进行仿真,验证了该方法可以较为准确地估计CM上行发送缓冲区的大小与溢出概率的关系,从而证明该方法能够为上行发送缓冲区的大小设置提供理论参考依据。

关键词 DOCSIS, Cable Modem, 马尔可夫链, 排队模型, 缓冲区大小估计

中图分类号 TP393 **文献标识码** A

Method for Calculating the Upstream Buffer Size of the CM Based on Contention Request Mode

WANG Qin PAN Guang-rong DU Li-guo

(School of Information Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China)

Abstract The contention request mode of upstream bandwidth allocation for HFC (Hybrid Fiber Coax) network access device CM (Cable Modem) was discussed based on the international standard specification for HFC, DOCSIS specification. Firstly, this paper proposed a Markov Chain model for the contention request algorithm of the CM upstream channel. Based on this model, we proposed an M/M/1/K queue model for the data frame sending process of the CM upstream channel, and deduced a theoretical method for estimating the data frame sending buffer size of the CM upstream channel. Finally, we simulated the upstream channel by NS-2 simulator. The simulation results show that our method is able to correctly estimate the relationship between the upstream sending buffer size and the buffer overflow probability. Hence our method can offer a theoretical reference to the setup of the CM upstream sending buffer size.

Keywords DOCSIS, Cable modem, Markov chain, Queue model, Buffer size estimation

1 引言

HFC是一种通过有线电视网接入到Internet的网络,具有覆盖范围广、频带宽和持续时间长等优点,因此被认为是综合业务宽带接入向光纤到户(FTTC)过渡的理想方案。和同轴电缆网相比,HFC网损耗小、可靠性高、抗干扰能力强、带宽更宽,为网络多功能综合业务的开发创造了有利条件。HFC网络的3个主要标准是DAVIC/DVB^[1], IEEE802.14^[2], DOCSIS1.1^[3]。其中以DOCSIS1.1应用最为广泛。DOCSIS是由美国有线电视实验室(Cable Labs)制定的技术规范。1998年3月,DOCSIS规范被国际电信联盟(ITU)采纳为HFC网络内进行高速数据传输的国际标准。

本文以HFC网络接入设备CM(Cable Modem)为研究对象,分析了其上行信道竞争请求的接入机制。首先提出了HFC上行信道的竞争请求马尔可夫过程,以此为基础建立了CM端的上行信道排队模型,并给出了上行缓冲区溢出概率

与缓冲区长度的关系式,为设置CM上行缓冲区的大小提供了理论支持。

本文第2节简要分析了DOCSIS上行信道的竞争请求-授权发送的两阶段接入机制;第3节给出了上行信道接入的竞争请求马尔可夫链模型;第4节建立了CM上行信道排队模型,并给出了上行缓冲区大小与数据包溢出概率的关系;第5节为仿真结果验证;最后是全文总结。

2 HFC上行信道接入机制分析

2.1 双向HFC网络的拓扑结构

图1给出了双向HFC网络的拓扑结构。HFC网络传输系统在头端是靠电缆调制解调终端系统(CMTS)实现的,在用户端则依靠电缆调制解调器(CM)实现。一个CMTS可以接入多个CM。CM和CMTS之间的通信通过下行和上行两个信道实现。其中,下行信道是广播的,CMTS将要发送给CM的数据广播到下行信道。因为有多多个CM,上行信道被设

到稿日期:2008-10-27 返修日期:2009-01-07 本文受北京市科技重大项目“面向整机配套及国家标准的SOC芯片研制-双向有限数字电视信道SOC芯片”(D0306008041021)资助。

王沁(1961-),女,博士,教授,博士生导师,CCF高级会员,主要研究方向为无线传感器网络、计算机体系结构、网络与通信、集成电路设计、数字电视SoC;潘光荣(1981-),女,博士研究生,CCF学生会员,主要研究方向为集成电路设计、无线传感器网络仿真模拟与能耗模型、数字电视SoC, E-mail: pennypn, libra@gmail.com;杜立国(1982-),男,硕士研究生,主要研究方向为数字电视SoC。

计为时分复用(TDMA)。

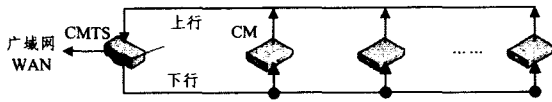


图1 双向 HFC 网络拓扑结构

2.2 HFC 上行信道的竞争请求接入机制分析

DOCSIS 规范^[3]规定 CM 的上行数据帧可以通过竞争请求、捎带请求、单播请求、主动授权获得发送的机会。其中因竞争请求存在碰撞问题,在一般情况下竞争请求的上行接入机制将会造成数据帧较大的堆积。因此本文只研究对于缓冲区大小有较大影响的竞争请求的上行接入机制。HFC 网络的 CM 上行信道的竞争请求接入机制如图 2 所示,CMTS 把 MAP 管理报文通过下行信道广播到各个 CM。MAP 管理报文把上行信道划分为竞争时隙和预留时隙。在竞争时隙,多个 CM 竞争发送带宽请求给 CMTS,竞争过程可能会发生碰撞;在预留时隙,CMTS 为每个 CM 的发送数据保留专用的时隙,CM 在该时隙发送数据,不会发生碰撞。

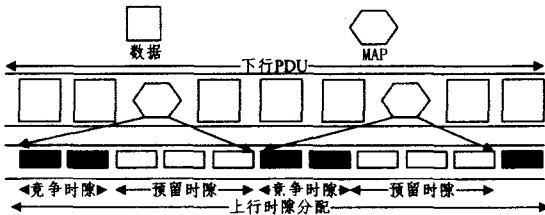


图2 HFC 上行信道分配

为了解决各个 CM 在竞争时隙发送请求发生碰撞的问题,DOCSIS 规范规定采用截断二进制指数回退算法来解决竞争碰撞,该算法使得 CM 成功发送请求的概率相同。CMTS 成功接收到请求后,选取 CM 请求的长度的预留时隙,然后分配给发出带宽请求的 CM。但分配给该 CM 的预留时隙的开始时间是由 CMTS 随机决定的。

这种上行发送的帧需要经过请求带宽的发送方式,导致帧不能实时地通过上行信道发送。为了解决这一问题,必须引入发送缓冲区。但缓冲的引入会带来额外的硬件开销。缓冲容量过小,会严重导致上行帧的丢失;容量过大,又势必造成硬件资源的浪费。因此在 CM 的设计中,必须合理地确定其缓冲区的大小,既要充分降低系统的丢帧率,又要尽可能降低硬件的开销。

3 上行信道竞争接入的马尔可夫链模型

上述部分简要地分析了上行信道的接入过程。为了描述本文的模型,有必要对上行信道的接入过程做详细的分析。上行信道的竞争请求采用截断二进制指数回退算法来解决碰撞问题。DOCSIS 协议规定,回退次数最大为 16 次。我们对 DOCSIS 规范的截断二进制指数回退算法做简要的分析,如图 3 所示。图 3 为截断二进制指数回退算法的流程图。

CM 的回退窗口范围由从 MAP 管理报文中获取的 Data_Backoff_Start 和 Data_Backoff_End 定义。我们用 data_back_off 表示当前的数据回退窗口的大小。CM 将回退计数器设为 k ,每经过一个时隙,回退计数器的值减 1。当回退计数器的值减为 0 时,发送请求报文。然后等待 CMTS 给出数据授权或者数据确认。如果在规定的时间内,CM 收到了数据授

权或者确认,则只需在 CMTS 指定的时隙发送 PDU 即可。否则表示 CM 的请求没有成功,因此需要更新 data_back_off 的值,重新发起请求。如果重试次数超过了协议所规定的 16 次还没有申请到时刻,CM 就丢弃,导致发送请求 PDU。

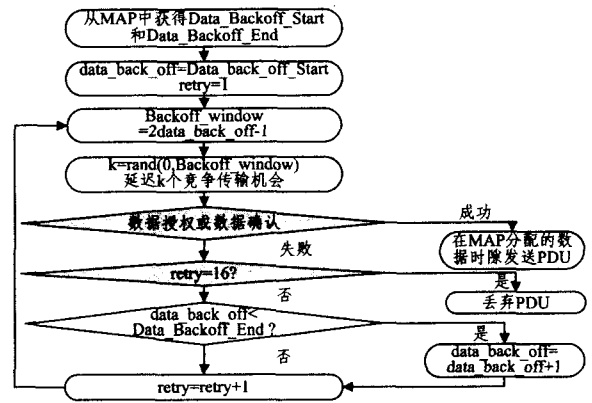


图3 截断二进制指数回退过程

文献[4]建立了 802.11 协议中的截断二进制指数回退的马尔可夫过程模型。在 DOCSIS 协议中采取的截断二进制指数回退机制与 802.11 协议中的截断二进制指数机制是类似的,因此可以用马尔可夫过程来描述这一机制。参照文献[4]的假设,本文忽略信道的传播延时,并且认为信道的传输不会发生错误。假设有固定数目的 n 个 CM,并且每一个总是有 PDU 要发送(或者说每一个 CM 的发送缓冲总是非空的),且每个 CM 在每个请求机会发送请求帧的概率是均等的,设其为 τ ,并假设某个 CM 发送请求时发生碰撞的概率为 p ,MAP 中的请求时隙的平均个数为 N_c 。CM 的最小竞争窗口大小为 W_0 ,其最大竞争窗口为 $2^m W_0$ 。CM 的最大回退次数为 $m+1$,在 DOCSIS 协议中, $m=15$ 。且有 $m \geq m'$ 。文献[7]中指出 CM 发送一个请求后,在下一个竞争时隙到达之前,CM 是不能继续竞争信道的。也就是说,CM 在当前的竞争时隙发送请求后,这个竞争时隙很可能不是该 MAP 的最后一个竞争时隙,于是在该 MAP 所描述的剩余的竞争时隙,CM 只能等待,而不能进入回退过程。针对此问题,提出了适用于 DOCSIS 上行信道特点的竞争请求的马尔可夫链模型,其转移概率如图 4 所示。

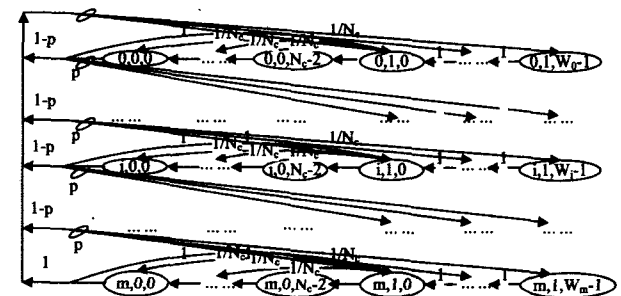


图4 上行竞争的马尔可夫链模型

下面对上述模型的假设做合理性分析。因为本文探讨的是上行缓冲区的大小确定问题,缓冲区的大小一定要满足网络流量较大时的情形,所以我们认为 CM 端始终有上行数据要发送是合理的。同时,因为 CM 的上行信道采用竞争请求的模式,这不可避免地造成了上行数据帧在 CM 的缓冲队列中的长时等待。因此当上行信道进入竞争时隙时,CM 的上行缓冲区不存在数据帧的概率很低。从这一点看,我们的假

设也是合理的。

为了描述这个模型,使用统计量 $s(t)$ 表示在时隙 t 时的 retry 值减 1。 $w(t)=1$ 表示 CM 处于数据回退过程, $w(t)=0$ 表示在时隙 t 时 CM 在等待 CMTS 给出数据授权或者数据确认。统计量 $b(t)$ 有两个方面的含义:若 $w(t)=1$,则表示在时隙 t 时回退计数器的值,否则表示从时隙 t 到 CM 得知发送请求成功或者失败的间隔时隙数。于是建立了一个三维的离散时间马尔可夫链 $\{s(t), w(t), b(t)\}$ 模型来表示上行的竞争请求过程(如图 4 所示)。在这个马尔可夫链中,存在唯一的正常返一步转移概率矩阵:

$$p\{0,1,k|i,0,0\}=\frac{1-p}{W_0} \quad k \in [0, W_0-1] \quad i \in [0, m-1]$$

$$p\{0,1,k|m,0,0\}=\frac{1}{W_0} \quad k \in [0, W_0-1]$$

$$p\{0,1,k|i,1,0\}=\frac{1-p}{W_0 N_c} \quad k \in [0, W_0-1] \quad i \in [0, m-1]$$

$$p\{0,1,k|m,1,0\}=\frac{1}{W_0 N_c} \quad k \in [0, W_0-1]$$

$$p\{i+1,1,k|i,0,0\}=\frac{p}{W_{i+1}} \quad k \in [0, W_{i+1}-1] \quad i \in [0, m-1]$$

$$p\{i+1,1,k|i,1,0\}=\frac{p}{W_{i+1} N_c} \quad k \in [0, W_{i+1}-1]$$

$$i \in [0, m-1]$$

$$p\{i,0,k|i,0,k+1\}=1 \quad k \in [0, N_c-3] \quad i \in [0, m]$$

$$p\{i,0,k|i,1,0\}=\frac{1}{N_c} \quad k \in [0, N_c-2] \quad i \in [0, m]$$

$$p\{i,1,k|i,1,k+1\}=1 \quad k \in [0, W_0-2] \quad i \in [0, m]$$

令 $b_{i,j,k} = \lim_{t \rightarrow \infty} P\{s(t)=i, w(t)=j, b(t)=k\}$ 为该马尔可夫

链的平稳分布,有归一化条件:

$$\sum_i \sum_j \sum_k b_{i,j,k} = 1$$

得到

$$b_{0,1,0} = \frac{2N_c}{N_c W_0 \left[\sum_{i=0}^m (2p)^i + 2^{m'} \sum_{i=m+1}^m p^i \right] + (3N_c - 2) \sum_{i=0}^m p^i}$$

又因

$$\tau = \sum_{i=0}^m b_{i,1,0} = \frac{2N_c \sum_{i=0}^m p^i}{N_c W_0 \left[\sum_{i=0}^m (2p)^i + 2^{m'} \sum_{i=m+1}^m p^i \right] + (3N_c - 2) \sum_{i=0}^m p^i} \quad (1)$$

在平稳状态下,一个 CM 发送一个请求的概率为 τ ,因此可以得到发生碰撞的概率为

$$p = 1 - (1 - \tau)^{n-1} \quad (2)$$

由式(1)、式(2)可以得到 τ, p 的值。

4 CM 上行信道排队模型

假设上行数据帧的平均长度(包括物理层开销)为 L_d (字节),且其到达过程是一个马尔可夫过程,设其到达速率为 λ (帧/秒)。每个到达 CM 的数据帧都必须经过竞争请求和数据发送两个阶段。由第 2 节和第 3 节的分析,数据帧从 CM 发出带宽请求直到离开 CM 的时间可看成是一定范围内的随机值。因此可以认为 CM 的服务时间是服从负指数分布的,其平均服务速率为 μ (帧/秒),每个 CM 的上行缓冲区容量为 K (帧),则每一个 CM 的上行数据帧的发送过程可以看作

一个 M/M/1/K 的排队模型(如图 5 所示), λ, μ, K 为该排队模型的参数。此外,请求帧的大小 L_r (字节)是固定的(包括物理层开销)。设上行信道的发送速率为 R (字节/秒)。

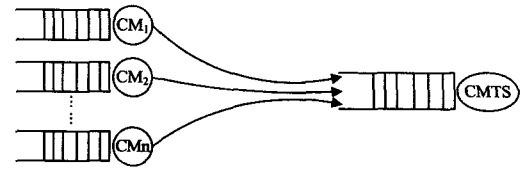


图 5 CM 上行信道排队模型

根据 DOCSIS 规范,当 CMTS 正确收到某个 CM 的带宽请求后,就会分配一个平均时间长度为 L_d/R 的带宽给发送请求的 CM。如果在某个请求机会,CM 的请求报文发生碰撞或者没有请求发送时,CMTS 就不会分配带宽给任何一个 CM。这种映射关系如图 6 所示。

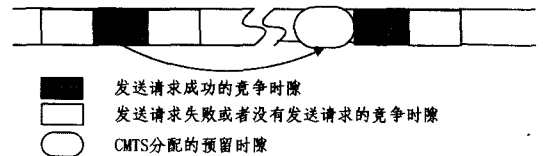


图 6 请求机会与预留时隙的映射关系

设在某个请求机会同时有 i 个请求发出,记其概率为 $q(X=i), i \in \{0, 1, 2, \dots, n\}$, 于是:

$$q(X=i) = C_n^i \tau^i (1-\tau)^{n-i} \quad (3)$$

因此可以得到对应不同的 K 值的请求时隙带宽与预留时隙带宽的对应关系,如表 1 所列。

表 1 请求时隙带宽与预留时隙带宽的对应关系

X	请求时隙带宽	预留时隙带宽
0	L_r/R	0
1	L_r/R	L_d/R
2	L_r/R	0
...	...	...
n	L_r/R	0

从整个上行信道来看,信道被划分成了请求时隙带宽和预留时隙带宽。发送数据的信道带宽占整个信道带宽的比例因子,即信道带宽利用率为

$$A = \frac{q(x=1) \cdot L_d/R}{L_r/R + q(x=1) \cdot L_d/R} = \frac{n\tau(1-\tau)^{n-1} L_d}{L_r + n\tau(1-\tau)^{n-1} L_d} \quad (4)$$

因为每个 CM 竞争信道时都是平等的,所以每个 CM 的平均发送速率可被认为是相等的。故 CM 的平均服务速率为

$$\mu = \frac{A \cdot R}{n \cdot L_d} = \frac{\tau(1-\tau)^{n-1}}{L_r + n\tau(1-\tau)^{n-1} L_d} R \quad (5)$$

经过上述分析,得到了 CM 上行信道模型为一 M/M/1/K 排队模型。在该模型中,首先假定 $\lambda \leq \mu$, 否则不论 K 为多大,CM 的发送缓冲区一定会溢出。

令 $\rho = \frac{\lambda}{\mu}$, 根据文献[5],缓冲区充满的概率为

$$p_{\text{loss}}(K) = \begin{cases} \frac{(1-\rho)\rho^K}{1-\rho^{K+1}} & \rho \neq 1 \\ \frac{1}{K+1} & \rho = 1 \end{cases} \quad (6)$$

假设要使缓冲器在任何瞬间充满的概率不超过 $\alpha \in (0, 1)$, 那么有 $p_K \leq \alpha$ 。结合式(6),可以求得 K 的取值范围:

$$K \geq \begin{cases} \frac{\ln(\alpha) - \ln(1 + \rho\alpha - \rho)}{\ln(\rho)}, & \rho \neq 1 \\ \frac{1-\alpha}{\alpha}, & \rho = 1 \end{cases} \quad (7)$$

5 模型验证

使用 NS-2^[8] 仿真软件对 DOCSIS 上行信道做了仿真,其主要仿真参数^[6]如表 2 所列。

表 2 仿真参数

参数	取值	参数	取值
W_0	2	L_r	16Bytes
m'	7	L_d	500Bytes
m (最大回退次数减 1)	15	n	10
N_c (平均请求时隙个数)	32	λ	10, 20

首先验证通过本模型中接入不同数量的 CM 与 CM 能达到的平均服务速率的关系。计算结果根据式(1)、式(2)、式(5)得出,仿真结果通过 NS-2 仿真软件得出。除 CM 的个数外的参数设置如表 2 所列。计算结果与仿真结果的对比如图 7 所示。

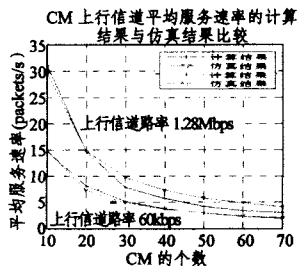


图 7 CM 数量与上行信道平均服务速率关系

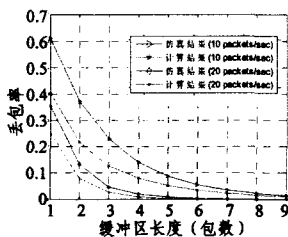


图 8 缓冲区溢出概率

从图中可以得知,本算法能够较为准确地估计上行通道的平均服务速率,而这种平均服务速率的计算精度受 CM 的个数的影响较小。计算结果与仿真结果一致,证明了平均服务速率计算模型是能够合理地反映 DOCSIS 上行信道特性的。

接下来,将对于缓冲区的大小计算结果进行验证。对平

均到达速率是 10 packets/sec 及 20 packets/sec 的模型的缓冲区大小与丢包概率的关系进行了验证。通过仿真结果(如图 8 所示)可以看出,我们的算法可以较为准确地反映 DOCSIS 上行信道中缓冲区大小和丢包率之间的关系,尤其是能够反映较低丢包率下对缓冲区大小的要求,具有合理的应用价值。

结束语 本文基于 DOCSIS 规范,分析了 CM(Cable Modem)的上行带宽分配的竞争请求机制,提出了上行信道的马尔可夫链模型,以此为基础建立了 CM 端的上行信道排队模型,给出了其发送缓冲区大小的估计方法,并给出了本文模型的准确性验证。通过 NS-2 仿真验证,本文方法可以较为准确地估计上行缓冲区的大小与溢出概率的关系,从而能够为上行缓冲区的大小设置提供理论参考依据。

参考文献

(上接第 10 页)

- [12] Jefferson D, Beckman B, Wieland F, et al. Time warp operating system[C]//Proceedings of the 11th ACM Symposium on Operating System Principles, 1987:77-93
- [13] Steinman J S. Breathing time warp[C]//Proceedings of the 7th Workshop on Parallel and Distributed Simulation, ACM Press, 1993:109-118
- [14] Saboo N, Singla A K, Unger J M, et al. Emulating petaflops machines and blue gene[C]//Workshop on Massively Parallel Processing (IPDPS'01), San Francisco, CA, 2001
- [15] Zheng Gengbin, Kakulapati G, Kal'e L V. BigSim: A parallel simulator for performance prediction of extremely large parallel machines[C]//18th International Parallel and Distributed Processing Symposium (IPDPS), Santa Fe, New Mexico, April 2004
- [16] Rosenblum M, Herrod S A, Witchel E, et al. Complete computer system simulation; The SimOS approach[J]. IEEE Parallel and Distributed Technology, Systems and Applications, 1995, 3(4): 34-43

- [1] ETSI [S]. EN 300429 V1.2.1; Digital Video Broadcasting (DVB)—Framing structure, channel coding and modulation for cable systems, April 1998
- [2] Reede I, Brandt M, Karaoguz J, et al. IEEE Project 802. 14/a draft 3 revision 3; Cable-TV access method and physical layer specification[S]. Unapproved IEEE 802. 14 Project Draft Specification, Oct. 1998
- [3] CableLabs, Data-Over-Cable Service Interface Specifications Radio Frequency Interface Specification[S]. CM-SP-RFv1. 1-C01-050907, September 2005
- [4] Wu H, Peng Y, Long K, et al. Performance of reliable transport protocol over IEEE 802. 11 wireless LAN; Analysis and enhancement. IEEE Infocom'2002, New York, June 2002
- [5] 唐应辉, 唐小我. 排队论——基础与分析技术[M]. 北京: 科学出版社, 2006: 59
- [6] Murphy R. A Simulation study of DOCSIS Upstream Channel Bandwidth Allocation Strategies for Minimal User Response Time[D]. San Antonio: University of Texas, Dec. 2004
- [7] 孙晓东, 冯振明, 陆明泉. HFC 网络上行信道的 MAC 层协议性能分析[J]. 电子学报, 2002(2): 187-190
- [8] <http://www.isi.edu/nsnam/ns/>

- [17] Top 500 supercomputers site[EB/OL]. <http://www.top500.org/>, 2008
- [18] Zheng Gengbin, Wilmarth T, Jagadishprasad P, et al. Simulation-based performance prediction for large parallel machines[J]. International Journal of Parallel Programming, 2005, 33: 183-207
- [19] Zheng Gengbin. Achieving high performance on extremely large parallel machines: performance prediction and load balancing [D]. Urbana-Champaign: Department of Computer Science, University of Illinois, 2005
- [20] Dickens P M, Heidelberger P, Nicol D M. A distributed memory lapse: parallel simulation of message-passing programs[J]. SIGSIM Simul. Dig., 1994, 24(1): 32-38
- [21] Reinhardt S K, Hill M D, Larus J R, et al. The wisconsin wind tunnel: Virtual prototyping of parallel computers[M]. Measurement and Modeling of Computer Systems, 1993: 48-60
- [22] 喻之斌, 金海, 邹南海. 计算机体系结构软件模拟技术研究[J]. 软件学报, 2008, 19(4): 1051-1068