

# 网络化控制系统带宽配置的一种新策略<sup>1)</sup>

白涛<sup>1,2</sup> 吴智铭<sup>1</sup> 杨根科<sup>1</sup>

<sup>1</sup>(上海交通大学自动化系 上海 200030)

<sup>2</sup>(太原重型机械学院自动化系 太原 030024)

(E-mail: zhaobait@sjtu.edu.cn)

**摘要** 根据循环服务网的运行特征和三类数据(周期数据、紧急数据和非紧急数据)的不同实时性要求,分析了不同类型数据的网络稳定性条件,提出动态共享时间窗的带宽配置策略.该策略在满足系统实时性和网络稳定性要求的同时,降低了网络化控制系统对缓冲容量的需求并充分地利用了带宽资源.进一步地,通过仿真实验研究了基本周期内非紧急数据带宽配置策略的选择对系统实时性和网络稳定性的影响,说明当非紧急数据带宽选择合理时,两种非紧急数据带宽配置策略均可保证系统良好的总体性能.

**关键词** 网络化控制系统(NCSs),网络时延,带宽,死限

**中图分类号** TP302.1

## A New Scheme of Bandwidth Allocation for Networked Control Systems

BAI Tao<sup>1,2</sup> WU Zhi-Ming<sup>1</sup> YANG Gen-Ke<sup>2</sup>

<sup>1</sup>(Department of Automation, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200030)

<sup>2</sup>(Department of Automation, Tai Yuan Heavy Machinery Institute, Taiyuan 030024)

(E-mail: zhaobait@sjtu.edu.cn)

**Abstract** According to the characteristics of the cyclic-service networks and the real-time requirements of three different kinds of data, periodic data, time-critical data and time-available data, the conditions of network stability are analyzed. A new bandwidth allocation scheme of dynamic sharing the time windows is proposed, which not only satisfies both requirements of real-timeliness and network stability, but also decreases the required buffer capacity and makes full use of the network resources. Furthermore, the effects of the bandwidth allocation of time-available data on the system performances are analyzed by simulation tests. It is shown that by proper choice of the bandwidth of time-available data both two kinds of bandwidth allocation of time-available data could guarantee the better performance of Networked Control Systems (NCSs).

**Key words** Networked control systems (NCSs), network-induced delay, bandwidth, deadline

1) 国家自然科学基金(60074011, 60174009)资助

Supported by National Natural Science Foundation of P.R. China (60074011, 60174009)

收稿日期 2003-03-31 收修改稿日期 2003-12-05

Received March 31, 2003; in revised form December 5, 2003

## 1 引言

网络化控制系统中主要有两种类型的数据信息：周期数据和非周期数据，其中非周期数据根据其实时性要求的不同又可分为紧急数据和非紧急数据。周期数据主要由 NCSs 中各控制闭环的传感器和控制器产生，当其传输所经历的网络时延大于相应控制闭环的采样间隔时，将引起“空采样”和“数据滤除”，造成控制信号的失真，产生高频噪声，从而导致执行器的损耗和控制闭环动态性能的下降<sup>[1,2]</sup>，所以周期数据占有固定的带宽，网络时延须控制在相应控制闭环的采样间隔内。紧急数据主要是报警信号或操作指令信号，其产生具有突发性，典型分布未知且发生概率很低，数据通信量小，传输有严格的时间限制，故其带宽是预留的。非紧急数据主要是用于监控和统计的数据报表文件、控制程序、数据库管理信息等，其产生是随机的，一般符合泊松分布，数据传输是非实时的且通信量较大。因此，非紧急数据占用的是前两类数据的剩余带宽。带宽配置策略就是在满足系统实时性和网络稳定性的条件下，使三种不同类型的数据合理地复用带宽。系统实时性就是确保紧急数据和周期数据在系统最大允许时延（死限）内传输到目的地；而网络稳定性是指存储在缓冲队列中的数据不会溢出，即周期数据不被滤除；在相当长的时段  $t$  内产生的非周期数据所需的传输时间不大于  $t$ <sup>[3]</sup>。

Hong 针对循环服务型 NCSs 提出多控制闭环的带宽配置和采样周期调度算法<sup>[1]</sup>，进而又研究了三类数据的带宽配置策略<sup>[3,4]</sup>，将一个基本周期分为周期数据和非紧急数据两个时段，周期数据和非紧急数据在相应时段内传输，而紧急数据只要其所在节点具有发送权就可传输。Almeida 等<sup>[5]</sup>运用时间轨迹法分析了 WorldFIP 网实时数据的可调度性。Raja 和 Ulloa<sup>[6]</sup>提出优先级循环服务和动态时间窗的带宽配置策略以保证周期数据的实时性要求并提高了带宽利用率。基于时滞系统稳定性的研究，Park<sup>[7]</sup>导出确保系统稳定的最大允许时延的计算方法，并采用与 Hong 类似的方法研究了 WorldFIP 的带宽配置算法，其中周期数据采用 EDF 调度策略。

上述带宽配置策略均采用以数据类型划分时段的方法，其缺点在于：1) 在一个基本周期内具有多类数据的节点将被访问多次，额外服务开销大；2) 非紧急数据的网络时延大，这是系统所允许的，但其负面影响是数据易溢出，难以保证网络的稳定性；3) 没有考虑非紧急数据带宽配置策略对系统实时性和网络稳定性的影响。因此，基于周期数据的窗口模型<sup>[1]</sup>，本文对循环服务型 NCSs 提出以网络节点划分时段，非周期数据动态共享时间窗的带宽资源配置策略（见图 1），进而通过仿真试验研究了非紧急数据带宽配置策略对系统实时性和网络稳定性的影响。

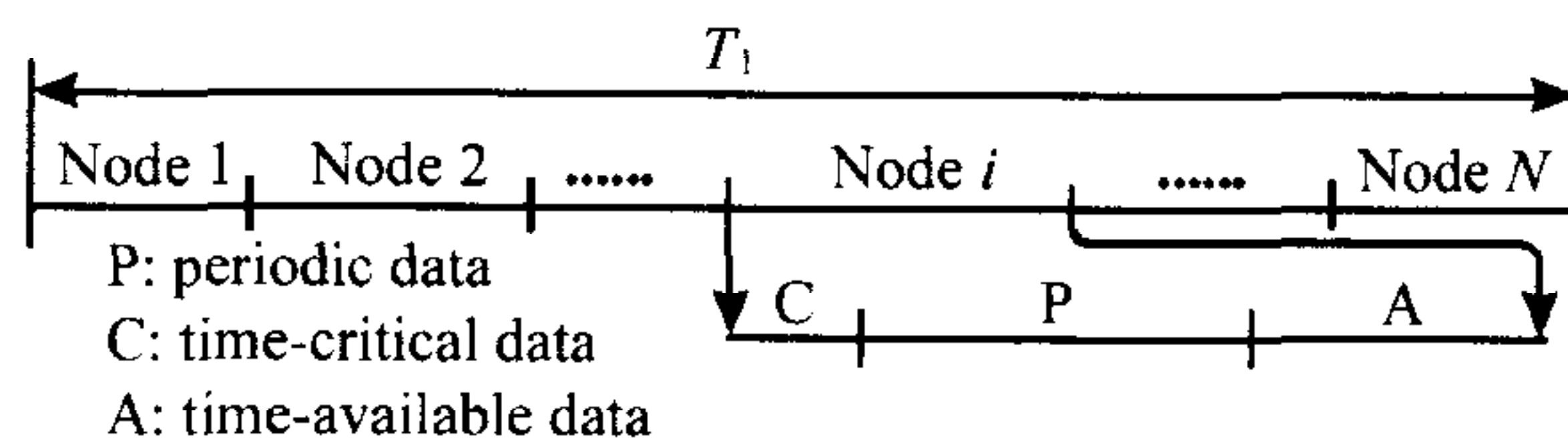


图 1 一个基本周期内的网络带宽配置

Fig. 1 Bandwidth allocation in one basic cycle



## 2 动态共享时间窗的带宽资源配置策略

设某网络化控制系统具有  $N$  个节点, 各节点可产生一类或多类数据, 各类数据拥有各自的缓冲队列. 设紧急数据节点有  $N_c$  个, 其最大允许时延为  $D = [d_1, d_2, \dots, d_{N_c}]$ , 所有紧急数据具有相同的固定包长, 相应传输时间为  $L_c$ . 为研究方便, 设紧急数据的产生符合平均到达时间为  $\lambda_{ic}$  的泊松分布; 周期数据节点有  $N_p$  个, 其采样周期为  $T = [T_1, T_2, \dots, T_{N_p}]$ ,  $T_i \leq T_{i+1}, \forall i$ , 最大允许时延为  $\Phi = [\phi_1, \phi_2, \dots, \phi_{N_p}]$ ,  $\phi_i \leq \phi_{i+1}, \forall i$ , 所有周期数据具有相同的固定包长, 相应传输时间为  $L_p$ ; 非紧急数据节点有  $N_a$  个, 其数据通信量大因而被分割成多个数据包进行传输, 每个数据包对应的传输时间为  $L_{ia}$ , 设平均到达时间为  $\Lambda_{ia}$ , 平均数据长度为  $M_{ia}$ , 则平均数据包的个数为  $p_i = \lceil M_{ia}/L_{ia} \rceil$ .

### 2.1 周期数据的调度及其稳定性条件<sup>[1,3]</sup>

周期数据窗口模型调度算法<sup>[1]</sup>的基本思想是, 通过调整各周期数据节点的采样周期并设定相应的初相位 (第一个数据的产生时刻), 使任意基本周期内产生的周期数据个数为定值  $r$ , 从而将周期数据的网络时延限制为一个基本周期间隔, 以保证系统的实时性要求.

设各节点采样同步, 兼顾紧急数据的实时性要求, 周期数据节点的采样周期  $T_i$  确定如下:

$$T_i = \min(\phi_i, \min(d_i, \forall i)). T_i = k_i T_1, k_i = 2^{\lceil \log_2 \phi_i / T_1 \rceil}, i = 1, 2, \dots, N_p \quad (1)$$

取系统的基本周期时间为  $T_1$ , 则一个基本周期内产生的周期数据个数  $r$  为

$$r = \lceil \alpha \rceil \quad (2)$$

其中  $\alpha = \sum_{i=1}^{N_p} T_1/T_i = \sum_{i=1}^{N_p} 1/k_i$ . 各节点的初相位  $t_i$  确定如下:

$$t_i = \min[A_l \geq A_{l-1} : u^i(A_l) \leq r], i = 1, 2, \dots, N_p, l = 1, 2, \dots, k_{N_p}, A_0 = A_1 \quad (3)$$

其中  $A_l$  是在最小倍周期  $T_{N_p}$  中的第  $l$  个  $T_1$  周期的起始时刻,  $u^i(A_l)$  是在  $A_l$  时刻从节点 1 到节点  $i$  产生的周期数据的个数.

最坏情况下所有  $N_c$  个紧急数据节点均有数据等待传输, 则周期数据的稳定性条件<sup>[3]</sup>为

$$rL_p + \sum_{i=1}^{N_c} m_{ic} L_c + N\sigma \leq T_1 \quad (4)$$

这里  $\sigma$  是服务开销, 包括服务处理时间等;  $m_{ic}$  是紧急数据节点  $i$  缓冲队列中的数据个数.

在  $T_1$  间隔内, 紧急数据平均到达时间应满足  $((\sum \lambda_{ic})T_1)^{\sum m_{ic}} e^{-\sum \lambda_{ic} T_1} / (\sum m_{ic})! < \delta\%$ , 以保证系统具有  $(1 - \delta\%)$  的可靠性.

### 2.2 非周期数据的稳定性条件

时段  $t$  内紧急数据节点  $i$  产生的紧急数据为  $\lambda_{ic} t$  个, 所需的传输时间为  $(\lambda_{ic} t)L_c$ , 则时段  $t$  内传输所有紧急数据的时间为  $L_c \sum (\lambda_{ic} t)$ . 时段  $t$  内非紧急数据节点  $i$  产生的非紧急数据为  $\Lambda_{ia} t$  个, 每一个数据平均含有  $p_i$  个数据包, 则时段  $t$  内节点  $i$  产生的非紧急数据包为  $p_i \Lambda_{ia} t$  个. 令  $\lambda_{ia} = p_i \Lambda_{ia}$  为非紧急数据包的平均到达率, 所需的传输时间为  $(\lambda_{ia} t)L_{ia}$ , 则时段  $t$  内传输所有非紧急数据的时间为  $\sum (\lambda_{ia} t)L_{ia}$ . 故非周期数据的稳定性条件为

$$(t/T_1)rL_p + L_c \sum_{i=1}^{N_c} (\lambda_{ic} t) + \sum_{i=1}^{N_a} (\lambda_{ia} t)L_{ia} + \max(t/T_1, \lambda_{ia} t)N\sigma \leq t \quad (i = 1, 2, \dots, N_a) \quad (5)$$



### 2.3 动态共享时间窗的带宽配置策略

动态共享时间窗的带宽配置策略的实质就是使所有节点动态地分时复用带宽, 以确保系统实时性和网络稳定性的要求. 该策略包含三个层次的内容: 1) 为保证网络稳定性, 即满足式 (4) 和 (5), 应适当选取网络并合理分配各类数据的传输时间; 2) 为保证系统实时性, 应合理选择周期数据的采样周期及初相并有效控制非紧急数据的传输, 其中非紧急数据的带宽配置 ( $L_{ia}, \forall i$ ) 是关键因素, 详细分析见第四节; 3) 以网络节点划分时段, 非周期数据动态共享时间窗. 由于一个基本周期内的周期数据带宽是确知的, 系统只设一个非周期时间窗, 初始值为  $T_{ca} = T_1 - rL_p - N\sigma$ , 所有非周期数据节点共享该时间窗. 某节点获得发送权后依次传输紧急数据、周期数据和非紧急数据 (见图 1). 紧急数据和周期数据的传输不受任何限制, 但紧急数据的传输 (采用穷尽服务模式) 会缩短时间窗; 非紧急数据的传输受时间窗的限制, 仅当非周期时间窗有足够的服务时间时才被传输. 为实现该策略, 可在主指令或令牌的帧控制域中增加一个用于存储该时间窗的信息域, 在一次新的循环开始时, 该域被设置为初始设定值, 当有非周期数据传输时, 相应节点负责该域值的更新.

## 3 动态共享时间窗带宽资源配置策略的仿真试验

利用文献 [3] 提供的数据对提出的带宽配置策略进行了仿真验证. 设网络化控制系统有  $N=10$  个节点, 其中  $N_p=10$  个,  $N_c=5$  个和  $N_a=5$  个, 各类数据缓冲队列的容量充分大, 周期数据的最大允许时延为  $[\phi_1, \phi_2, \dots, \phi_{10}] = [10, 15, 25, 30, 50, 70, 100, 120, 175, 200]$ ms, 紧急数据的最大允许时延为  $d_i = 10$ ms,  $i = 1, 2, \dots, 5$ . 表 1 给出系统的相关网络参数值.

表 1 网络化控制系统的网络参数表  
Table 1 The network parameters of NCSs

系统参数	参数值	系统参数	参数值
数据传输速率 ( $B$ )	500Kbps	紧急数据平均到达时间 ( $\lambda_{ic}, i = 1, 3, 5, 7, 9$ )	0.001ms
周期数据传输时间 ( $L_p$ )	1ms(500bits)	非紧急数据平均到达时间 ( $\lambda_{ia}, i = 2, 4, 6, 8, 10$ )	0.005ms
紧急数据传输时间 ( $L_c$ )	0.2ms(100bits)	非紧急数据平均数据长度 ( $M_{ia}, i = 2, 4, 6, 8, 10$ )	19.2ms(1.2Kbytes)
非紧急数据传输时间 ( $L_a$ )	0.64ms(320bits)	服务开销 ( $\sigma$ )	0.05ms

据式 (1) 和 (2) 得  $T = [T_1, T_2, \dots, T_{10}] = [10, 10, 20, 20, 40, 40, 80, 80, 160, 160]$ ms,  $\alpha = 3.875, r = 4$ . 由式 (3) 知各周期数据节点的初相为  $[t_1, t_2, \dots, t_{10}] = [0, 0, 0, 0, 10, 10, 30, 30, 70, 70]$ ms. 由表 1 的网络参数可得非紧急数据的平均包到达率为  $\lambda_{ia} = 0.15$ ms<sup>-1</sup>, 可以验证式 (4) 和 (5) 成立, 因此该 NCSs 是稳定的. 通过对该系统的仿真试验 (仿真时间为 30s), 对 Hong 策略<sup>[3]</sup> 与本文的带宽配置策略的系统性能进行了比较, 试验结果如表 2 所示. 可以看出, Hong 策略的紧急数据时延和周期数据时延比本文策略下的结果略小一些, 而非紧急数据时延则比本文的大许多. 这是由于 Hong 策略中每一个基本周期内有两次循环服务, 第一次是传输紧急数据和周期数据, 第二次是传输紧急数据和非紧急数据, 因此紧急数据和周期数据只经历很小的时延, 但非紧急数据要等待至少一次循环服务时间, 因而经历很大的时延; 而本文策略下每一个基本周期内各节点只被访问一次, 且各节点依次传输紧急数据、周期数据和非紧急数据, 因而增大了紧急数据和周期数据的时延而极大地减小了非紧急数据的时延, 使非紧急数据的缓冲容量仅是 Hong 策略的 1/4, 既保证了非紧急



数据 100% 的服务率，又有效地避免了过大网络时延将导致的网络稳定性的下降。两种策略下带宽利用率均为 86.5%，其中  $U_c = 0.1\%$ ,  $U_p = 38.8\%$ ,  $U_a = 47.6\%$ 。

表 2 系统性能比较 (时间单位: ms)  
Table 2 Comparison of system performance (time unit: ms)

系统参数	Hong 策略	本文策略	系统参数	Hong 策略	本文策略
周期数据平均时延	3.621	3.800	非紧急数据平均时延	207.3	11.902
周期数据最大时延	5 823	7 625	非紧急数据最大时延	464.53	91.3
紧急数据平均时延	2 288	2 676	非紧急数据最大队列长度	72	19
紧急数据最大时延	5.300	6.153	非紧急数据的服务率	99.3%	100%
周期数据的服务率	100%	100%	服务开销	12.6%	13%
紧急数据的服务率	100%	100%			

### 4 非紧急数据带宽配置策略的选择及仿真试验

非紧急数据带宽配置策略 (即非紧急数据传输时间  $L_{ia}, \forall_i$ ) 的选择对网络化控制系统的实时性和稳定性有着不可忽视的影响, 图 2~5 所示的是第 3 节的系统模型在不同  $L_{ia} = L_a, \forall_i$  下的仿真试验结果. 当  $L_a$  较小 ( $< 0.3ms$ ) 时, 紧急数据和周期数据的时延较小, 而非紧急数据的时延很大, 其占用的缓冲容量很大, 系统的服务开销也较大; 随着  $L_a$

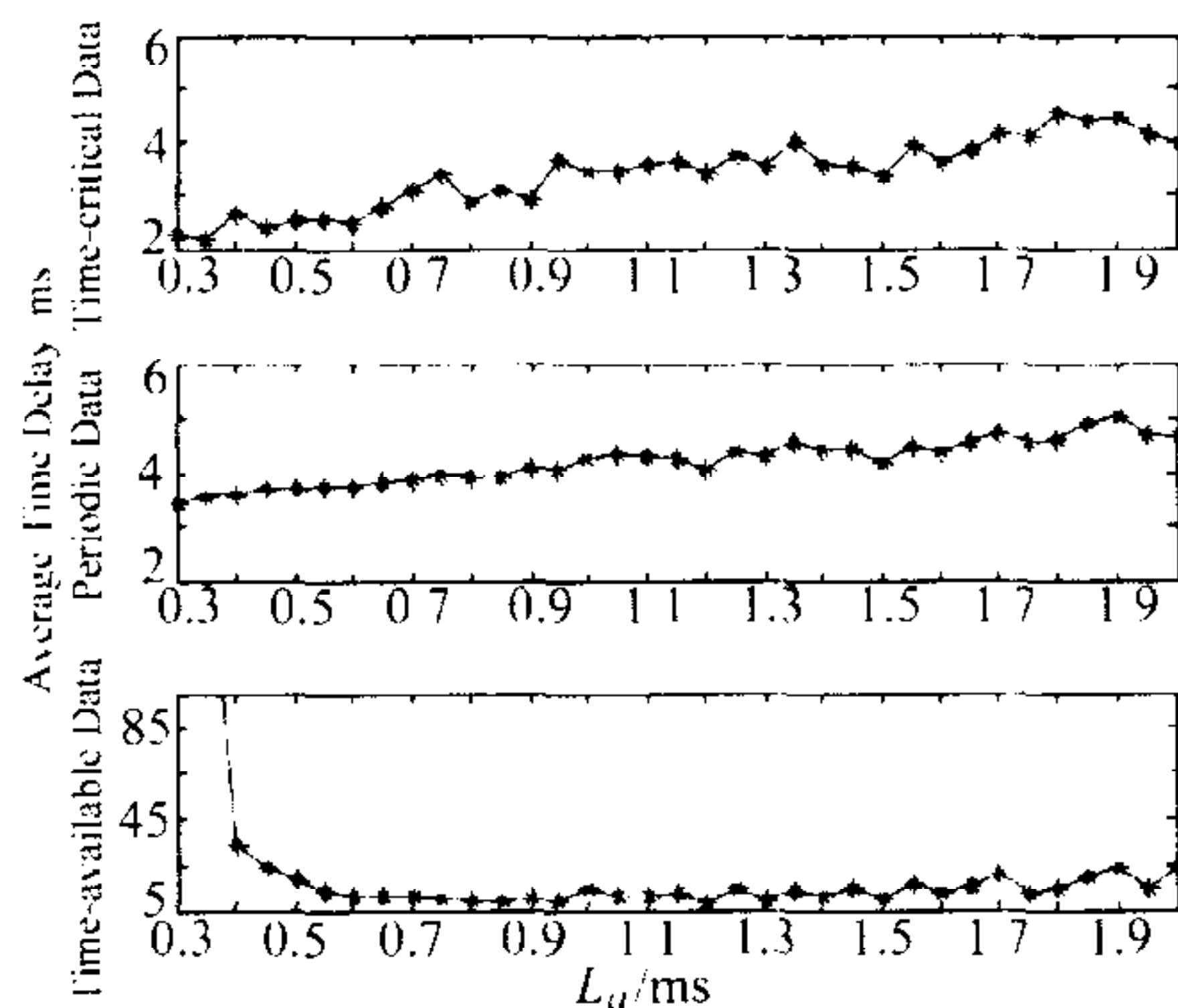


图 2  $L_a$  的选择对数据平均时延的影响

Fig. 2 The effects of  $L_a$  on average delay

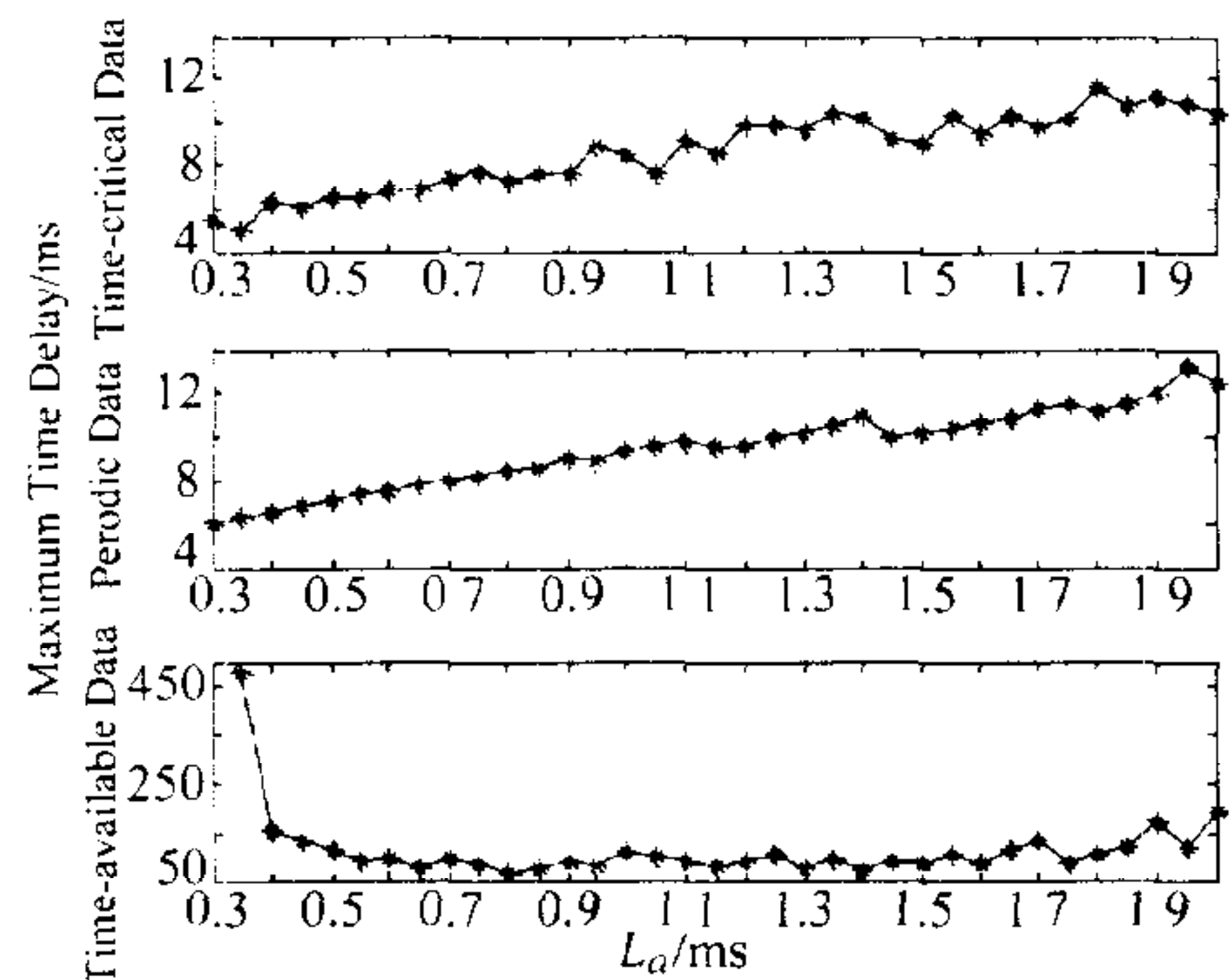


图 3  $L_a$  的选择对数据最大时延的影响

Fig. 3 The effects of  $L_a$  on maximum delay

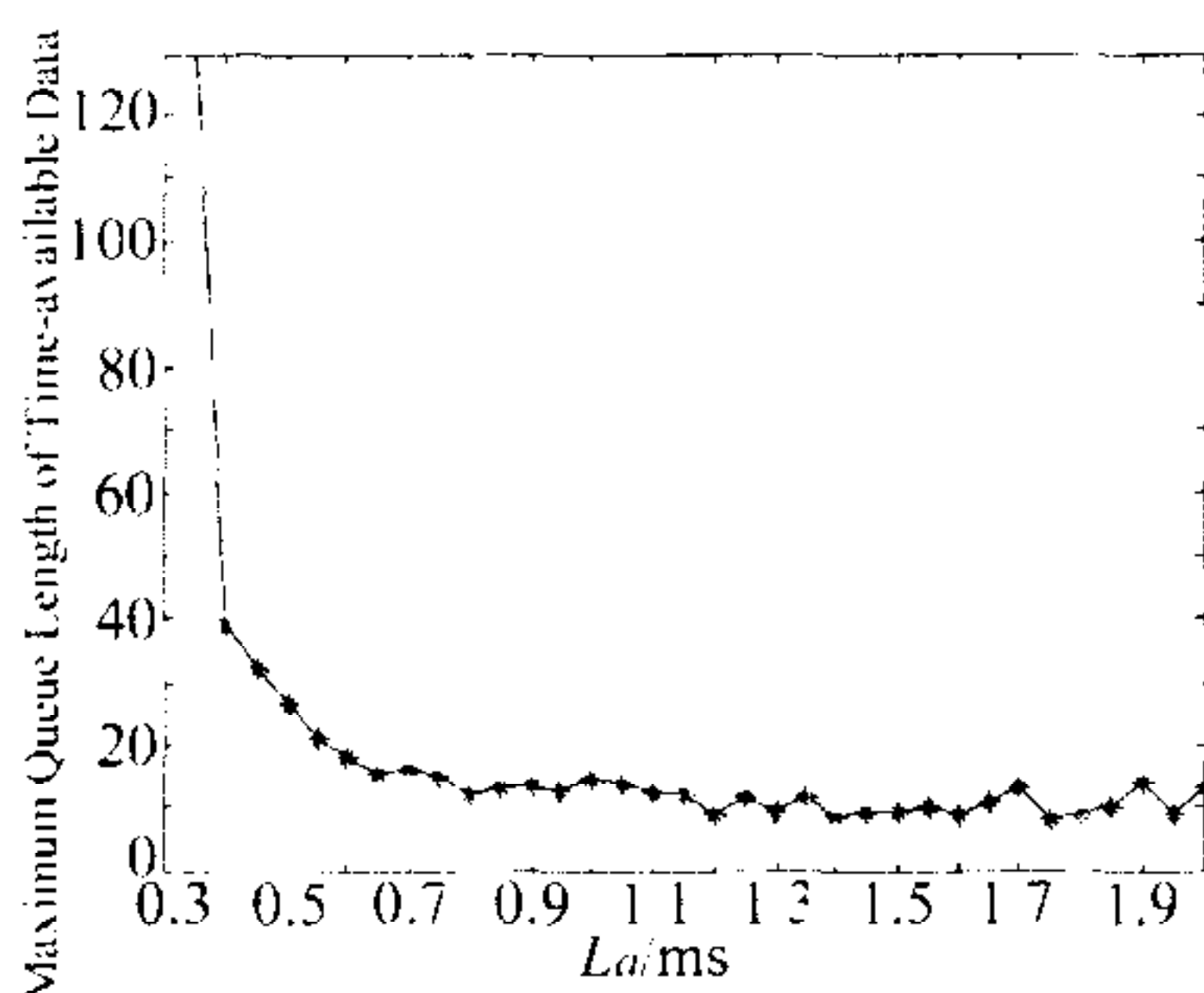


图 4  $L_a$  的选择对非常急救数据缓冲容量的影响

Fig. 4 The effects of  $L_a$  on buffer capacity for time-available data

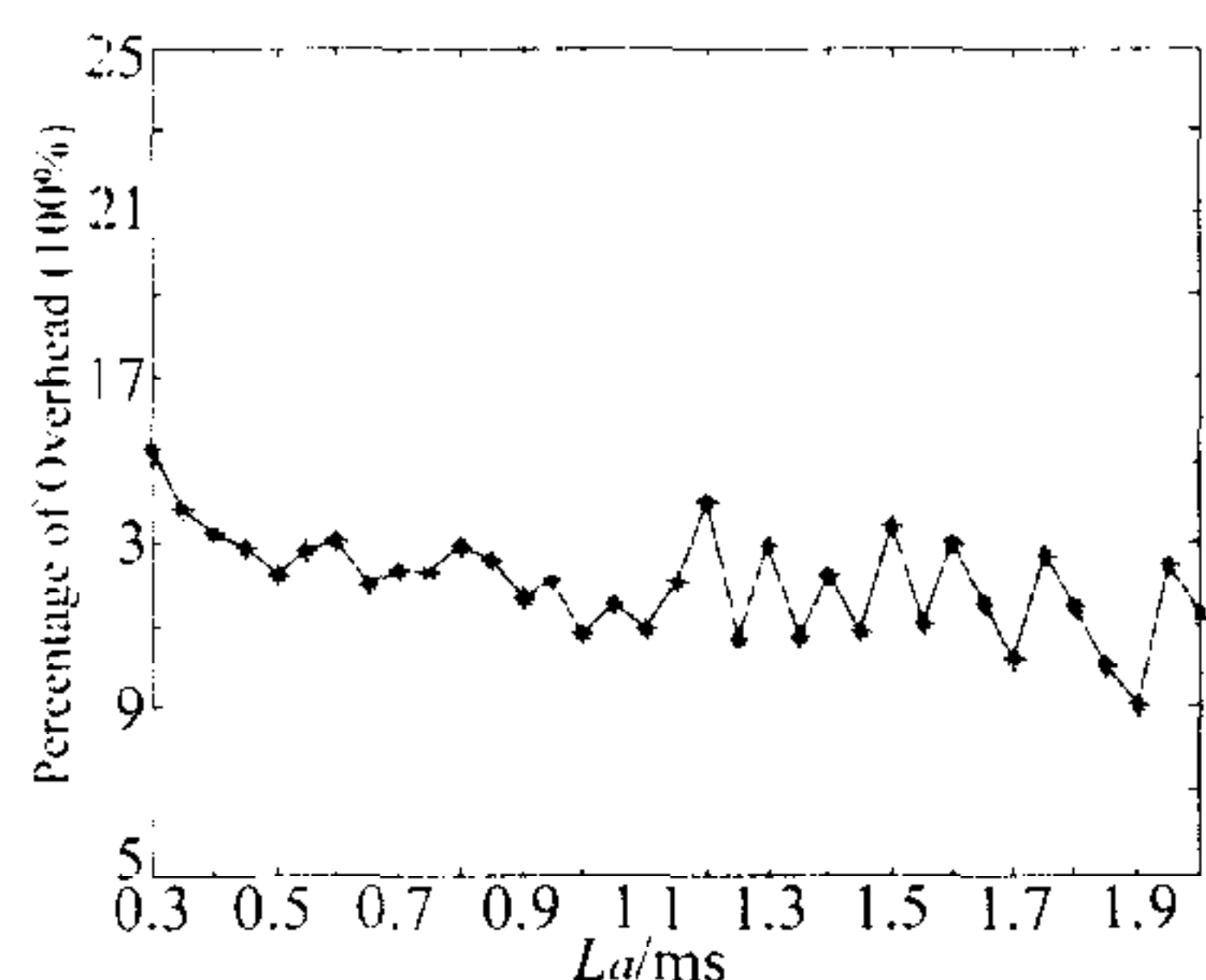


图 5  $L_a$  的选择对系统服务开销的影响

Fig. 5 The effects of  $L_a$  on the system overhead

的增大, 紧急数据和周期数据的时延呈线性增长趋势, 而非紧急数据的时延、缓冲容量和系统服务开销呈递减趋势, 系统的总体性能明显得到改善; 但当  $L_a$  增大到一定程度

(> 1ms) 后, 紧急数据和周期数据时延的线性增长趋势基本未变, 但非紧急数据时延、缓冲容量和系统服务开销趋于稳态, 此时系统性能不但没有改善反而下降, 紧急数据和周期数据实时性被破坏.

造成上述现象的原因在于:  $L_a$  小 (大) 意味着基本周期内分配给非紧急数据节点的带宽小 (大), 而等效的非紧急数据包的平均到达时间  $\lambda_{ia}$  大 (小) 造成非紧急数据较长的等待时间, 相应所需的缓冲容量大 (小) 系统的稳定性能较差 (好); 同时由于非紧急数据总的占用带宽小 (大) 使系统完成一次循环服务所需的时间短 (长), 相应周期数据和紧急数据的等待时间短 (长), 故系统的实时性较好 (差), 但由于循环次数增多 (减少) 使系统服务开销增大 (减少). 因此, 非紧急数据带宽配置策略的选择是平衡系统实时性和稳定性的关键. 可以看到当  $L_a = 0.6\text{ms} \sim 1\text{ms}$  时, 给定系统具有较好的实时性能和稳定性能. 在进行类似的多次试验中可以发现, 为使系统具有较好的整体性能, 系统总的非紧急数据平均带宽应设定为

$$L_a = \frac{T_1 - (rL_p + \sum_{i=1}^{N_c} m_{ic} L_c + N\sigma)}{(0.9 \sim 1.5)N_a} \quad (6)$$

表 3 所示的是各非紧急数据节点的平均数据长度  $M_{ia}$  相同, 数据平均到达时间为  $[\lambda_{2a}, \lambda_{4a}, \lambda_{6a}, \lambda_{8a}, \lambda_{10a}] = [0.003, 0.004, 0.005, 0.005, 0.006]$  (其它参数同表 1) 条件下采用两种

表 3 两种非紧急带宽配置策略的系统性能 (时间单位: ms)

Table 3 System performance by two bandwidth allocation schemes of time-available data (time unit: ms)

系统参数	$\lambda_{ia} = 0.15, i = 2, 4, 6, 8, 10$				
	$L_{i2} = 0.4$	$L_{i4} = 0.5$	$L_{i6} = 0.6$	$L_{i8} = 0.7$	$L_{i10} = 0.8$
非紧急数据平均时延	7.057	6.267	6.922	7.647	8.409
非紧急数据最大时延	57.856	43.750	55.132	53.135	54.293
最大缓冲容量	12	9	12	12	13
非紧急数据服务率	100%	100%	100%	100%	99.9%
周期数据平均时延			3.680		
周期数据最大时延			7.435		
紧急数据平均时延			2.822		
紧急数据最大时延			6.297		
周期数据服务率			100%		
紧急数据服务率			100%		
服务开销			15.8%		

系统参数	$L_{ia} = 0.6, i = 2, 4, 6, 8, 10$				
	$\lambda_{i2} = 0.1$	$\lambda_{i4} = 0.125$	$\lambda_{i6} = 0.15$	$\lambda_{i8} = 0.175$	$\lambda_{i10} = 0.2$
非紧急数据平均时延	4.297	5.088	6.330	7.539	9.860
非紧急数据最大时延	32.474	37.296	64.263	60.015	67.800
最大缓冲容量	7	8	15	13	16
非紧急数据服务率	100%	100%	100%	100%	100%
周期数据平均时延			3.608		
周期数据最大时延			7.475		
紧急数据平均时延			2.439		
紧急数据最大时延			5.831		
周期数据服务率			100%		
紧急数据服务率			100%		
服务开销			16.5%		



不同的非紧急数据带宽配置策略的试验结果, 两种策略下系统总的非紧急数据平均传输时间均为  $L_a = 0.6\text{ms}$ , 相应的平均包到达率为  $\lambda_a = 0.15$ 。策略一是使各非紧急数据节点的平均包到达率为系统总的平均到达率, 即使平均到达率高(低)的非紧急数据节点占有高(低)带宽; 策略二是使各非紧急数据节点平均占有带宽, 相应等效的平均包到达率不同。在  $L_a$  合理选取时两种策略均可保证系统较好的整体性能, 但当  $L_a$  选择不当时, 两种策略不能保证较好的系统性能。

## 5 结论

如何合理配置网络有限的带宽资源, 调度各种类型数据的传输以尽可能地降低网络对于控制系统的影响, 从而满足控制系统实时性和网络稳定性的要求是网络化控制领域亟须解决的关键问题。仿真试验证明本文提出的动态共享时间窗的带宽配置策略在满足系统实时性和稳定性的同时, 降低了系统对于非紧急数据缓冲容量的要求, 并具有较高的网络资源利用率, 因而具有一定的优越性。进一步地, 作者研究了基本周期内非紧急数据的带宽配置策略 ( $L_a$ ) 的选择对系统实时性和稳定性的影响, 并给出了  $L_a$  的经验计算公式。

## References

- 1 Hong S H. Scheduling Algorithm of Data Sampling Times in The Integrated Communication and Control Systems. *IEEE Transactions On Control System Technology*, 1995, **3**(2): 225~231
- 2 Ray A, Halevi Y. Integrated Communication and Control Systems: Part I-Analysis and Part II-Design Consideration. *ASME Journal of Dynamic System Measurement & Control*, 1988, **110**: 367~381
- 3 Hong S H. Bandwidth Allocation Scheme for Cyclic-Service Fieldbus Networks. *IEEE Transactions On Mechatronics*, 2001, **6**(2): 197~204
- 4 Hong S H. Implementation of a Bandwidth Allocation Scheme in a Token-Passing Fieldbus Network. *IEEE Transactions On Industry and Measurement*, 2002, **51**(2): 246~251
- 5 Almeida L, Tovar E, Fonseca J A, Vasques F. Schedulability analysis of real-time traffic in WorldFIP networks: an integrated approach. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2002, **49**(5): 1165~1174
- 6 Raja P, Ulloa G. Priority polling and dynamic time-window mechanisms in a multi-cycle Fieldbus. In: *Proceedings of Computers in Design, Manufacturing, and Production (CompEuro 93)* Los Alamitos. Calif.: IEEE Computer Society Press, 1993. 452~460
- 7 Park H S, Kim Y H, Kim D-S, Kwon W H. A Scheduling Method for Network-based Control Systems. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 2002, **10**(3): 318~330

白 涛 讲师, 博士研究生。研究方向为网络化控制系统, 系统仿真。

(BAI Tao Lecturer, Ph.D. Candidate. Her research interests include NCSs and system modeling and simulation.)

吴智铭 教授, 博士生导师。研究方向为复杂系统, CIMS, 计算机软件技术等。

(WU Zhi-Ming Professor, Ph.D. director. His research interests include complex system, CIMS and computer software technology etc.)

杨根科 教授, 博士生导师。研究方向为复杂系统, 通讯网络控制和供应链管理等。

(YANG Gen-Ke Professor, Ph.D. director. His research interests include complex system, communication network control and supply chain management etc.)