

文章编号: 1001-0920(2009)09-1412-04

## 网络化控制性能与带宽调度协调优化设计及其仿真

牛云, 戴冠中, 康军

(西北工业大学 自动化学院, 西安 710072)

**摘要:** 基于网络化控制系统是具有延迟约束的实时系统, 首先建立了保证网络控制性能的延迟约束模型, 以此为基础提出满足上述延迟约束的带宽调度策略, 以兼顾控制系统控制性能和网络系统服务质量; 利用时间需求分析, 给出在该策略下的周期、偶发与非周期等 3 种网络数据的可调度条件及延迟估计的算法, 给出调度策略与保证网络控制性能的协调优化设计方法; 最后提出一种控制系统与网络调度的集成仿真平台, 并举例说明了策略的有效性。

**关键词:** 网络化控制; 带宽调度; 延迟约束; 时间需求分析; 集成仿真环境

中图分类号: TP316

文献标识码: A

## Co-design and integrated simulation of networked performance and bandwidth schedule

NIU Yun, DAI Guanzhong, KANG Jun

(School of Automation, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China. Correspondent: NIU Yun, E-mail: niuyun03609@gmail.com)

**Abstract:** Networked control system (NCS) is a kind of real-time system with delay constraint. According to this characteristic, a model of NCS with temporal distance constraint is presented. Then, a scheme of bandwidth schedule in accordance with temporal distance constraint is proposed. Moreover, the scheme can cooperate with current networked control algorithms more effectively, guarantee both quality of control (QoC) performance and quality of network service (QoS), and optimize overall performance of NCS. According to temporal demand analysis, the criterion of schedulability is proposed. Finally, an integrated simulation platform based on truetype toolbox is proposed, on which the test results show the effectiveness of the scheme.

**Key words:** Networked control system; Bandwidth schedule; Delay distance constraint; Temporal demand analysis; Integrated simulation platform

### 1 引言

网络化控制系统 (NCS) 具有一定的 QoC (Quality of control) 指标, 根据这些指标并结合所用的控制算法, 系统将对其控制数据传输延迟产生约束 (即对网络 QoS 的一种约束)<sup>[1]</sup>, 而对于资源有限的共享网络, 只有通过合理分配网络资源才能保证提供所需的网络 QoS, 从而满足控制系统实时性要求. NCS 网络带宽调度策略应该能够与 NCS 控制算法协调设计, 根据 NCS 控制算法产生的网络 QoS 约束条件合理分配带宽资源, 既能满足 NCS 控制系统 QoC 要求, 又能高效地利用网络带宽. 目前, 针对 NCS 控制与调度协调设计的研究已成为热点.

Hong 等<sup>[2]</sup>借助“窗口”的概念, 提出针对循环服务的 NCS 多控制闭环采样周期调度算法, 满足系统稳定性, 避免了“空采样”和“数据滤除”. 文献[3, 4]进一步研究了针对周期数据、偶发数据和普通数据等 3 类数据的带宽配置策略. [5]基于时滞系统稳定性的研究, 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. 在上述的带宽调度策略中, 认为闭环延迟时间可以大于采样周期, 且未考虑延迟对控制性能的影响. [6]将网络诱导延迟引入到控制系统离散化方程中, 并讨论了该情况下系统的稳定性. [7]基于[6]设计最优控制器, 保证 NCS 的二次型性能指标. 但上述研究未给出资源调度策略, 保证数据

收稿日期: 2008-10-12; 修回日期: 2009-03-05.

基金项目: 国防基础科研项目 (C2720061361).

作者简介: 牛云 (1980—), 男, 天津人, 博士生, 从事网络化控制、实时系统资源调度的研究; 戴冠中 (1937—), 男, 上海人, 教授, 博士生导师, 从事自动控制、信息安全等研究.

传输的时态特性且未考虑非周期数据对控制性能的影响。

本文首先将延迟引入 NCS 的离散化模型,利用 DLQR (Discrete linear quadratic regulator) 设计控制器,得到延迟约束. 针对该约束,提出一种保证网络 QoS 的带宽调度策略,并利用轮循服务器(PS)<sup>[9]</sup>控制非周期数据对周期数据的影响,使调度策略与控制器能够协调设计,进而优化系统的总体性能. 最后利用 Matlab 下的 Truetime 工具箱设计网络化控制仿真平台,说明了所提出的协调设计策略的正确性和有效性.

### 2 NCS 的离散化模型

NCS 控制回路的网络闭环延迟  $\tau(k)$  为

$$\tau(k) = \tau^s(k) + \tau^a(k), \quad (1)$$

其中  $k$  是采样时刻;  $\tau^s(k)$  是反馈包的传输延迟(传感器到控制器);  $\tau^a(k)$  是控制包的传输延迟(控制器到执行器),并将控制器的控制量计算时间归入  $\tau^a(k)$ .

当  $\tau(k)$  小于控制系统采样周期  $h$  时的 NCS 离散化状态空间模型为

$$\begin{aligned} x((k+1)h) &= Ax(kh) + B_0 u(kh) + B_1 u((k-1)h), \\ y(kh) &= Cx(kh). \end{aligned} \quad (2)$$

其中

$$\begin{aligned} A &= e^{Ah}, \\ B_0 &= \int_0^{h-\tau(k)} e^{As} B ds, \\ B_1 &= \int_{h-\tau(k)}^h e^{As} B ds, \end{aligned}$$

$A$  为被控对象状态空间模型中的状态矩阵,  $B$  为控制矩阵,  $\tau(k)$  为网络闭环延迟(简化起见,  $\tau(k)$  表示为  $\tau_k$ ), 定义增广向量为

$$Z(kh) = (x^T(kh), u^T((k-1)h))^T,$$

由此得增广开环模型为

$$Z((k+1)h) = \begin{bmatrix} A & B_0 \\ 0 & I \end{bmatrix} Z(kh) + \begin{bmatrix} B_1 \\ 0 \end{bmatrix} u(kh). \quad (3)$$

设  $u(kh) = -Kz(kh)$ , 其中  $K$  为反馈控制增益矩阵,代入式(3)可得

$$Z((k+1)h) = \begin{bmatrix} A - B_0 K & B_1 \\ -K & 0 \end{bmatrix} Z(kh). \quad (4)$$

则式(4)为原系统的增广闭环离散状态空间模型.

本文基于状态方程(3),根据采样周期和系统延迟将连续方程离散化,然后利用离散 DLQR 方法获得满足性能要求的  $\tau_i(kh_i)$  约束,记为  $d_i$ ,即  $\tau_i(kh_i)$

$< d_i$ .

### 3 针对延迟约束的带宽调度策略

NCS 系统网络传输的数据单元一般包括周期数据、偶发数据和非周期数据. 周期数据主要是控制和采样数据,其延迟直接影响控制性能;偶发数据主要是报警信号或紧急操作指令信号,其产生具有突发性,长度短,带宽占用率较低,但传输有严格的时延限制;非周期数据包括监控和统计的数据报表文件、控制程序、数据库管理信息等,长度较大,其产生是随机的,对时延的要求并不严格. 调度策略目标是保证周期数据和偶发数据的延迟约束的前提下使非周期数据的平均完成时间较短.

#### 3.1 调度策略描述及可调度性验证

为方便分析,设网络带宽为  $B$ ,各控制回路用户数据长度为  $l$  的单包传输,则某种总线下数据包的传输时间为

$$L = (l + \tau) / B, \quad (5)$$

其中  $\tau$  为最大协议开销位,如帧头,校验,填充位等.

周期、偶发、非周期数据传输时间分别记为  $L^p, L^s, L^a$ . 借助 Hong<sup>[2]</sup> 的窗口概念,定义周期数据时间窗口  $w^p$  为 2 个  $L^p$  长度(传感器-控制器-执行器的传输时间),即在一个窗口中有且仅有一组周期数据包传输. 令偶发数据时间窗口  $w^s$  为  $L^s$ ,偶发数据的最小间隔为  $h^s$ . 非周期数据由各节点上的 PS 将分片发送,分片的大小和服务器周期分别记为  $L^a$  和  $h^a$ ,则非周期数据时间窗口  $w^a$  为  $L^a$ ,该值由系统可调度性约束,这样所有的数据发送均可看成是周期性的. 假设网络支持基于优先级的信道竞争机制,如 CAN 总线,基于数据传输的不可间断性,提出不可抢占的延迟约束单调(NPDCM)策略.

设一个 NCS 系统由  $N$  条控制回路组成,各回路共享控制器节点;设有  $N_s, N_a$  个节点分别可发送偶发、非周期数据. 假定控制回路的延迟约束小于采样周期,且有若  $h_i < h_j$ ,则  $d_i < d_j$ . 规定按延迟约束的非降顺序为控制回路做索引,即若回路编号  $i < j$ ,则必有  $d_i < d_j$ . 为保证非周期数据有机会执行,轮循服务器的优先级最高,偶发数据次之,周期数据再次. 同类数据延迟约束越小,优先级越高. 数据发送的初相位确定如下:偶发数据和非周期数据分片产生即发送,初相位为 0;周期任务的初相位为  $(i-1)w^p, i = 1, 2, \dots, N$ . 定理 1 给出了本策略的可调度性判据.

**定理 1** 按上述假设条件,当满足下式时, NPDCM 策略可调度,即控制回路满足延迟约束,且偶发数据满足其时限:



$$\frac{N_a w^a}{h^a} + w^s \sum_{j=1}^{N_s} \frac{1}{d_j^s} + w^p \sum_{k=1}^N \frac{1}{d_k^p - \frac{p}{k}} < 1. \quad (6)$$

非周期数据的平均响应时间由下式确定:

$$W = \sum_{i=1}^{N_a} \frac{\frac{a}{i}}{a U_a} + \frac{W_0}{U_a^2 [1 - \dots / U_a]},$$

$$W_0 = \sum_{i=1}^{N_a} \frac{\frac{a E [ \frac{2}{i} ]}{2}}{2}. \quad (7)$$

式(6)中的求和项分别表示非周期数据、偶发数据、周期数据对带宽的占用率需求,因此直观理解,本定理要求各种数据的资源利用率小于1.式(7)等号右边第1项为非周期在不等待情况下所需的平均时间,第2项为平均等待时间.

证明 将上述节点的数据传输抽象为

$$= \{ T_1^p, \dots, T_N^p; T_1^s, \dots, T_{N_s}^s; T_1^a, \dots, T_{N_a}^a \}.$$

其中:周期数据、偶发数据、非周期数据轮番服务器分别表示为

$$T_i^p = \{ \frac{p}{i} w_i^p, h_i^p, d_i^p \}, T_j^s = \{ \frac{s}{j}, w_j^s, h_j^s, d_j^s \},$$

$$T_k^a = \{ \frac{a}{k}, w_k^a, h_k^a \};$$

$w, h, d$  分别表示数据发送初相位、传输时间、周期(或最小间隔)以及延迟约束.基于时间需求分析<sup>[9]</sup>,用反证法证明.

假设任务集满足条件(6),若有偶发任务不可调度,则在本调度策略下,区间  $w^s < t < d^s$  任务时间需求必然大于  $t$ ,即下式成立:

$$t < w^s + [t/h^a] N_a w^a + w^s \sum_{j=1}^{N_s-1} [t/h_j^s] + w^m <$$

$$[t/h^a] N_a w^a + w^s \sum_{j=1}^{N_s-1} [t/d_j^s] + w^m [t/d^m]. \quad (8)$$

其中  $w^m$  表示由于不可抢占,执行时间最长的低优先级的周期任务阻塞偶发任务的时间.

考虑最坏情况,即当  $t = d^s$  时,有

$$\text{式(8)右端} = t(N_a w^a / h^a) + t \sum_{j=1}^{N_s} (w^s / d_j^s) +$$

$$t(w^m / d^m),$$

两边同除以  $t$  有

$$N_a w^a / h^a + w^s \sum_{j=1}^{N_s} (1/d_j^s) + w^m / d^m > 1. \quad (9)$$

同理,若周期任务  $i$  不可调度,则  $w^p < t < d_i^p - \frac{p}{i}$  必使下式成立:

$$t < w^p + [ \frac{t}{h^a} ] N_a w^a + w^s \sum_{j=1}^{N_s} [ \frac{t}{h_j^s} ] +$$

$$w^p \sum_{k=1}^{i-1} [ \frac{t - \frac{p}{k}}{h_k^p} ] + w^m [ \frac{t - \frac{p}{i}}{h^m} ]. \quad (10)$$

与上述推导类似,有

$$\frac{N_a w^a}{h^a} + w^s \sum_{j=1}^{N_s} \frac{1}{d_j^s} + w^p \sum_{k=1}^i \frac{1}{d_k^p - \frac{p}{k}} > 1. \quad (11)$$

显然,式(9)和(11)与假设矛盾.

上述证明过程还给出了周期和偶发数据的传输延迟估计方法,即  $t$  第1次不满足式(8)或(10)的值,因为式(8)或(10)是阶梯增加的,只需计算临界离散点,即

$$t_{(j,k)} = j h_k + \frac{p}{k},$$

$$k = 1, 2, \dots, i, j = 1, 2, \dots, [d_i/h_k].$$

### 3.2 非周期数据响应时间估计

本系统非周期数据由 PS 控制,其强度  $U_a$  为  $N_a w^a / h^a$ ,认为网络缓冲无限.设非周期数据节点的作业到来率服从参数为  $\mu_i^a$  的泊松分布,平均服务时间  $i$  服从参数为  $\mu_i^a$  的指数分布  $\frac{a}{i} = \frac{a}{i} / \mu_i^a$ .令

$$a = \sum_{i=1}^{N_a} \frac{a}{i}, \quad a = \sum_{i=1}^{N_a} \frac{a}{i},$$

采用服务台有休假的 M/M/1 排队模型<sup>[10]</sup>分析系统中非周期数据的平均等待时间(见式(7)),这里只考虑  $a < U_a$  的情况,否则作业响应时间会无限增长.

### 4 基于 DLQR 的网络控制优化协调设计

本文使用如下控制回路性能指标:

$$J = \sum_{k=0}^N [x^T(k) Q x(k) + u^T(k) R u(k)]. \quad (12)$$

在交互设计过程中,基于模型(3),根据采样周期和系统延迟将连续方程离散化.然后利用离散 DLQR 方法设计最优控制器,使性能指标(12)满足要求,得到控制回路延迟约束  $d_i^{[6,7]}$ .给定周期包初相位  $i$ ,偶发数据最小到来率,非周期数据 PS 强度,根据式(6)判断带宽的可调度性.若不可调度,则首先在  $a < U_a$  的范围内通过调整非周期数据 PS 的发送窗口或周期减小 PS 强度,其次调整周期数据初相位.若仍然无法调度则需要增加网络带宽或降低性能指标,重新设计控制器.若可调度,则可利用式(7)估算非周期任务的平均响应时间,并通过 Truetime 设计仿真实验,验证调度策略对控制性能的影响.

### 5 仿真模型建立及实验结果

#### 5.1 基于 Truetime 的仿真模型建立

Matlab 环境下的 Truetime 工具箱<sup>[8]</sup>是由 Anton 等设计的全数字实时控制仿真平台.它可以建立由网络模块互连的传感器、控制器、执行器等节点对控制对象进行控制.通过对各节点的二次编程实现网络控制与带宽调度的集成仿真.有3条控制回路,传感器由时间驱动,控制器和执行器由事件驱动.通过设置节点任务的初相位、周期以及数据包优先级可以仿真所提出的调度策略.干扰节点可以模拟发送偶发数据和非周期数据.通过使任务的休眠

期符合一定分布进而使偶发数据和非周期数据流呈现一定的统计特性。

### 5.2 实验结果

仿真实验通过共享网络控制 3 个倒立摆, 被控对象状态空间模型如下:

$$\dot{x}(t) = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ \omega_0^2 & 0 \end{bmatrix} x(t) + \begin{bmatrix} 0 \\ \omega_0 \end{bmatrix} u(t),$$

$$y(t) = [1 \ 0]x(t), \tag{13}$$

其中  $\omega_0$  为倒立摆的自然频率. 表 1 和表 2 列出了实验的相关参数. 以回路 1 为例, 初步设定网络延迟为 50 ms, 根据模型 (1) ~ (3) 将式 (13) 离散化得到

$$z(k+1) = \begin{bmatrix} 1.543 & 0.118 & 0.416 \\ 11.75 & 1.543 & 6.541 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} z(k) + \begin{bmatrix} 0.128 \\ 5.211 \\ 1 \end{bmatrix} u(k).$$
(14)

表 1 控制回路参数

	loop 1	loop 2	loop 3
倒立摆自然频率	10	8.4	7.3
初始状态	(0, 3, 0)	(0, 3, 0)	(0, 3, 0)
系统期望性能指标	< 3	< 4	< 6
采样周期 $h$	100 ms		
性能参数	$Q = I, R = I$		

表 2 网络参数

参数名称	数值
网络带宽 $B$	500 Kbps
偶发数据包长度 $l_p$	64 bytes
周期数据包长度 $l_c$	256 bytes
非周期数据平均数据长度	3.8 Kbytes
非周期数据平均到达速率	$1 \text{ s}^{-1}$
PS 预算 / 周期 / 强度	500 bits / 0.01 / 0.3

以 DLQR 法得到最优控制器

$$K = [2.3007 \ 0.2632 \ 1.0780],$$

此时回路的控制性能指标为  $2.51 < 3$ , 满足要求, 否则调整延迟约束重新设计控制器. 同上, 为满足性能指标, 得到 3 个回路的延迟约束为  $[D_1, D_2, D_3] = [50 \text{ ms}, 60 \text{ ms}, 80 \text{ ms}]$ . 设偶发数据的时限为 20 ms, 带入式 (6) 得任务密度为  $0.942 < 1$ , 系统可调度. 3 个回路脉冲响应性能指标如图 1 所示, 图 2 给出了回路 1 的阶跃响应. 带宽调度结果如表 3 所示, 表中计算值表示在调度策略下根据式 (8) 和 (10) 迭代或根据 (7) 估算的周期数据、偶发数据最坏延迟或非周期任务平均延迟.

通过测试结果可知, 本文所提的带宽调度策略

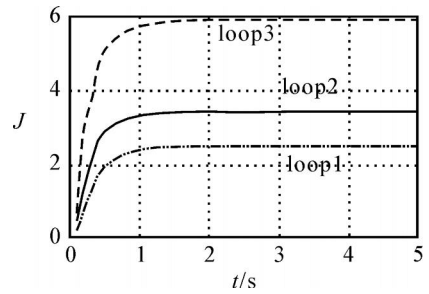


图 1 回路控制性能

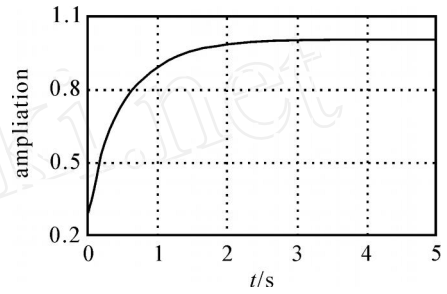


图 2 回路 1 阶跃响应

表 3 系统带宽调度结果

参数名称	测试结果	
	计算值	测试值
1 号控制回路闭环传输延迟	0.0144	0.0122
2 号控制回路闭环传输延迟	0.0245	0.0223
3 号控制回路闭环传输延迟	0.0346	0.0341
偶发数据传输延迟	0.0144	0.0136
非周期数据传输延迟	0.526	0.518

能够保证各控制回路的闭环传输延迟具有确定上界, 且均小于其各自的时间距离约束, 与理论分析结果一致. 同时, 此 NCS 系统的控制性能也均满足期望性能指标要求.

## 6 结 论

本文提出了针对延迟约束的网络带宽调度策略与控制性能的协调设计方法, 以保证控制系统的延迟约束为调度目标. 在使网络具有高的带宽资源利用率的条件下, 能够满足各个控制回路对网络 QoS 的要求, 从而进一步保证了控制系统 QoC 的要求, 为优化 NCS 系统总体性能提供了实现方法. 最后基于 Truetime 设计仿真实验, 说明了所提出调度策略的有效性.

### 参考文献 (References)

[1] Nilsson J. Real-time control systems with delays [D]. Sweden: Department Automation Control, 1998: 32-34.

[2] Hong Seong Park, Yu Chul Kim. Bandwidth allocation scheme in CAN protocol[J]. IEEE Proc Control Theory and Applications, 2000, 147(1): 37-44.

(下转第 1420 页)

看出,该故障诊断方法能够有效地去掉冗余和无关特征,减少了特征数量,结合优化的参数可以提高比 PSO-SVM 方法更好的故障诊断正确率和更快的诊断速度;相比 GA-SVM 方法可以用较少的诊断时间达到相近的优化诊断结果.将特征选择方法与重采样技术、分类器集成等方法相结合用于模拟电路故障诊断是进一步的研究内容.

### 参考文献(References)

- [1] Wang A, Liu J, Wang H, et al. A novel fault diagnosis of analog circuit algorithm based on incomplete wavelet packet transform and improved balanced binary-tree SVMs[J]. *Bio-Inspired Computational Intelligence and Applications*, 2007: 482-493.
- [2] 孙永奎, 陈光福, 李辉. 基于可测性分析和支持向量机的模拟电路故障诊断[J]. *仪器仪表学报*, 2008, 29(6): 1182-1186.  
(Sun Y K, Chen G J, Li H. Fault diagnosis method for analog circuit based on testability analysis and support vector machine[J]. *Chinese J of Scientific Instrument*, 2008, 29(6): 1182-1186.)
- [3] Rubinstein R Y, Kroese D P. The cross-entropy method: A unified approach to combinatorial optimization[M]. *Monte-Carlo simulation and machine learning*. New York: Springer, 2004.
- [4] Rubinstein R Y. The cross-entropy method and rare events for maximal cut and bipartition problems [J]. *ACM Trans on Modeling and Computer Simulation*, 2002, 12(1): 27-53.
- [5] Alon G, Kroese D P, Raviv T. Application of the cross-entropy method to the buffer allocation problem in a simulation-based environment[J]. *Annals of Operations Research*, 2005, 134(1): 137-151.
- [6] Kroese D P, Sergey P, Rubinstein R Y. The cross-entropy method for continuous multi-extremal optimization [J]. *Methodology and Computing in Applied Probability*, 2006, 8(3): 383-407.
- [7] Barzilay O, Brailovsky V L. On domain knowledge and feature selection using a support vector machines[J]. *Pattern Recognition Letters*, 1999, 20(5): 475-484.
- [8] Mao Yong, Zhou X B, Pi D Y, et al. Parameters selection in gene selection using gaussian kernel support vector machine by genetic algorithm[J]. *J of Zhejiang University Science*, 2005, 6(10): 961-973.
- [9] Tu C J, Chuang L Y, Chang J Y, et al. Feature selection using PSO-SVM [J]. *Int J of Computer Science*, 2007, 33(1): 111-116.
- [10] Kaminska B, Arabi K, Bell I, et al. Analog and mixed-signal benchmark circuits: First release [C]. *Proc of the Int Test Conf*. Washington DC, 1997:183-190.
- [11] Roh J, Abraham J A. Sub-band filtering for time and frequency analysis of mixed-signal circuit testing[J]. *IEEE Trans on Instrumentation Measurement*, 2004, 53(2): 602-611.
- [3] Hong Seong Park. Bandwidth allocation scheme for cyclic-service fieldbus networks [J]. *IEEE Trans on Machatronics*, 2001, 6(2): 197-204.
- [4] Hong Seong Park, Yu Chul Kim. Implementation of a bandwidth allocation scheme in a token-passing fieldbus network [J]. *IEEE Trans on Instrumentation and Measurement*, 2002, 51(2): 246-251.
- [5] Park H S, Kim Y H, Kim D-S, et al. A scheduling method for network-based control systems [J]. *IEEE Trans on Control Systems Technology*, 2002, 10(3): 318-330.
- [6] Zhang W, Branickym S, Philips S M. Stability of networked control system [J]. *IEEE Control Systems Magazine*, 2001, 21(1): 84-99.
- [7] 彭晨, 岳东. 网络环境下基于网络 QoS 的网络控制器优化设计[J]. *自动化学报*, 2007, 2(33): 214-217.  
(Peng C, Yue D. Network-based optimal controller design based on QoS[J]. *Acta Automatica Sinica*, 2007, 2(33): 214-217.)
- [8] Martin Andersson, Dan Henriksson, Anton Cervin. True-time 1. 4 reference manual [EB/OL]. <http://www.control.lth.se/dan/truetime/>, 2006-07.
- [9] Jane W S Liu. Real-time systems[M]. Beijing: Higher Education Press Arrangement with the Original Publisher, 2002: 195-218.
- [10] 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: 57-61.  
(Tang Y H, Tang X W. Analysis technical of queue theory[M]. Beijing: Press of Science, 2006: 57-61.)

(上接第 1415 页)