

# 控制网络的确定性延迟演算理论研究

王子君, 许维胜, 王中杰, 吴启迪  
(同济大学控制理论与控制工程系, 上海 200092)

**摘要:** 控制网络的服务质量参数, 尤其是数据传输的延迟界限, 对控制系统的分析和设计尤为重要. 网络演算技术能够确定性的建立网络服务质量参数与网络资源之间的映射关系. 针对控制网络的特殊性, 拓展了网络演算理论, 并结合常用的拓扑结构以及调度策略推导出了控制网络服务质量研究中必需的网络演算理论.

**关键词:** 网络控制系统; 网络演算; 到达曲线; 服务曲线; 延时

**中图分类号:** TP13 TP273 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2006) 02-0380-04

## Research on the Deterministic Delay Calculus Theory of Control Networks

WANG Zijun, XU Weisheng, WANG Zhongjie, WU Qidi

(Department of Control Theory and Control Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

**Abstract** QoS (Quality of Service) of control networks especially the deterministic delay plays a decisive part in the performance evaluation and design of the Network Control Systems (NCS). Network calculus gives a method to get the end-to-end QoS parameters such as delay, backlog, etc., from the network resources. We extend the calculus model of computer networks and present a general calculus model which is suitable for control networks better. At last, a deterministic delay of control network with Line and Star topologies is derived.

**Key words** NCS; network calculus; arrive curve; service curve; delay

### 1 引言

在现代分布式网络控制系统的分析和设计中, 由于以太网具有与企业信息系统无缝集成的能力, 因此逐渐进入了现场控制系统. 而现场控制网络对传输线路的服务质量, 尤其是延迟特性有着近乎苛刻的要求, 由于以太网使用了带碰撞检测的载波侦听多路访问 (CSMA/CD) 的媒体访问方式, 造成了信息传输延迟的不确定性, 这是将其用于控制系统的最大困难. 如何获得点对点的确定性延迟界限, 是网络控制系统的控制策略和控制器设计的关键因素. 文献 [1~3] 分析了以太网应用于控制系统的优势和实现途径, 文献 [4] 通过在协议高层限制进入网络的负载来提高信息传输的效率, 降低由于信息拥塞带来的延迟, 提高延迟的确定性; 文献 [5, 6] 使用了基于优先级的信息传输调度策略, 以此来优化和提高信息传输的确定性; 为了更加深入地了解信息传递时延的特征, 文献 [7] 讨论了以太网传输信息时的随机性问题; 文献 [8, 9] 对目前在计算机网络中广泛使用的交换以太网用于 NCS 通信回路的时延确定性进行了初步探讨.

本文在第二节给出了控制网络的研究背景; 在第三节给出了本文必须的网络演算概念和控制网络结构模型; 第四节则从控制网络的特殊性出发, 拓展了网络演算理论; 最后给出了总线型和星型结构网络的点对点延迟上界及本文的结论.

### 2 控制网络应用背景

在现代制造企业中, 企业信息网络自上而下分为三层: 管理信息网络、设备监控网络和现场控制网络. 其中最上层为企业的管理层网络, 为企业的管理人员提供管理与决策所需的信息, 主要由高速以太网组成. 中间层为制造执行层, 用于监控、优化、调度等制造控制信息的传输, 主要由快速以太网组成. 处于最底层的是现场设备层控制子系统, 现场设备层网络主要由低速现场总线组成, 如图 1 所示.



图 1 企业综合自动化系统结构层次示意图

收稿日期: 2005-04-11; 修回日期: 2005-08-01

基金项目: 国家 863 高技术研究发展计划 (No. 2003AA412310); 国家自然科学基金 (No. 70201004); 上海市科研计划基金 (No. 04QMX1429); 上海市高校优秀青年教师后备人选基金 (2004)

### 2.1 网络控制系统

为了有效地沟通企业现场各控制子系统实现资源共享,并能够与上层信息网络有效沟通,文献[13]提出了网络控制的概念,将控制系统的传感器、执行器和控制器等单元通过数据网络连接起来的分布式控制系统(NCS, Network Control Systems),如图2所示。

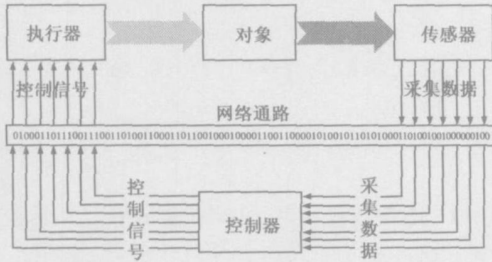


图2 网络控制系统示意图

网络控制系统是计算机网络与控制技术结合的结果。相对于集中式控制系统在成本、维护、可靠性、和灵活性方面优势明显<sup>[14]</sup>,网络除了给控制系统带来上述优势,同时还引入了不确定性延迟,给控制系统的分析和设计提出了新的挑战。因此在研究这一复杂系统时通常从两个角度进行<sup>[15]</sup>:①控制的角度:基于已有网络结构模型、协议以及数据调度固有网络特性,研究和调整控制器的设计方法,重新设计系统的控制律,发挥网络带来的优势,减低不良影响;②从网络的角度:研究控制网络的数据传输延迟、延时抖动和丢包率等 QoS,确定性的分析网络结构、数据传输协议以及数据调度策略等对控制网络的 QoS 的影响,使控制网络的 QoS 能够接近或者满足控制系统的要求。

### 2.2 控制网络技术

由于低速现场总线网络标准化进程异常缓慢,至今仍存在八种总线标准,阻碍了企业网络的系统集成与信息集成,因此需要企业网络的第三层与上两层网络无缝交互,但以太网的传输延时是“不确定”的,对于工业现场控制网络来说这会导致系统控制性能下降、不稳定、系统振荡,甚至引起灾难,近年来随着交换机(Switch)的普遍使用,有效地解决了以太网点对点传输延迟的不确定性问题,本文的理论结果既是建立在交换网络的基础之上的。

## 3 网络模型及网络演算技术

本节主要介绍了网络演算技术和用于理论研究的网络模型,包括传输模式、拓扑结构和数据特性等概念,为下一节展开对控制网络的点对点延迟理论研究打下基础。

### 3.1 网络演算技术

网络演算是在研究计算机网络服务质量(QoS, Quality of Service)的过程中演化出来的一种数学分析方法,是最小加代数在流问题上的应用。从理论上对网络的 QoS 进行确定性分析。提出这种技术的目的是解决网络服务质量(QoS)的资源预留问题,最初的工作来自 Cruz<sup>[10,11]</sup>。

篇幅所限,这里仅列出了本文用的基本概念,其他基本定理:①最小加卷积性质,见[12]之[P105. Properties1~10]、[P109. 定理3.1.5];②串联定理,见[12]之[P28. 定理1.4.6];③输出定理,见[12]之[P23. 定理1.4.3];④延迟上界,见[12]之[P23. 定理1.4.2];⑤缓冲上界,见[12]之[P22. 定理1.4.1]。

定义1 广义增函数集合  $\mathcal{F}$ 、 $\mathcal{F}_0$

$$\mathcal{F} = \{f(x) \mid \forall s, t \in \mathbb{Z}^+, \text{且 } s \leq t, 0 \leq f(s) \leq f(t)\};$$

$$\mathcal{F}_0 = \{f(x) \mid f \in \mathcal{F}, \text{且 } f(0) = 0\}$$

定义2 凸函数. 设  $f$  为定义在区间  $I \in \mathbb{R}$  上的函数,若对  $I$  上任意两点  $x_1, x_2$  和实数  $\lambda \in [0, 1]$  总有  $f(\lambda x_1 + (1 - \lambda)x_2) \geq \lambda f(x_1) + (1 - \lambda)f(x_2)$ , 则称  $f$  为  $I$  上的上凸函数,记为  $f \in \mathcal{S}$ ;反之,如果总有  $f(\lambda x_1 + (1 - \lambda)x_2) \leq \lambda f(x_1) + (1 - \lambda)f(x_2)$ , 则称  $f$  为  $I$  上的下凸函数,记为  $f \in \mathcal{R}$ 。

定义3 函数集  $\mathcal{S}_0 = \{f(x) \mid f \in \mathcal{F} \text{ 且 } f \in \mathcal{S}\}$ ; 函数集  $\mathcal{R}_0 = \{f(x) \mid f \in \mathcal{F}_0 \text{ 且 } f \in \mathcal{R}\}$ 。

定义4 到达曲线. 函数  $h(t) \in \mathcal{F}, t \geq 0$  称为网络流  $R(t)$  的到达曲线,当且仅当满足以下条件:  $R \leq R_0 \otimes h$ , 亦可称  $R$  受限于  $h$  或  $R$  是  $h$  光滑的。

定义5 服务曲线. 函数  $\lambda(t) \in \mathcal{F}_0, t \geq 0$  称为网络节点  $N_e$  的服务曲线,当且仅当  $\lambda$  满足  $R^* \geq \lambda \otimes R$ , 其中  $R(t)$  和  $R^*(t)$  分别为  $N_e$  的输入、输出流函数。

### 3.2 网络传输模式及拓扑

在网络控制中使用交换式网络,即使用交换机代替集线设备来转发信息。当控制网络的设备通过线路直接接入交换机后,单个节点独立与交换机建立物理连接,发送端口与接受端口间建立全双工信道,消除了共享冲突的问题,不再需要侦听总线。这允许所有输入端口同时接收和发送帧,各端口可以并行地工作,支持两个方向上的流量同时进行。

在网络控制中传输的数据不尽相同,数据包大小、调度策略、产生规律以及传输路径等都各有不同的特性。这些在衡量 NCS 的性能以及规约延迟模型时都是至关重要的因素。假设在控制网络中,信息有不同的类型和不同的优先级。这里我们仅考虑常用的两种拓扑结构如图3所示。

定义6 数据流权函数  $\chi(l, u_i, p_i)$ . 控制网络  $N$ , 其信息类型和优先级集合分别为  $u_i$  和  $p_i$ , 数据帧的最大长度为  $l_i$  (bit) (包括成帧间隔位), 此数据流的权记为  $\chi(l_i, u_i, p_i)$ 。

定义7 任意节点距离  $D(i, l; m, k)$ . 给定网络  $N, N$  是由有限交换机  $SW$  和有限终端  $ST$  组成, 则  $D(i, m) =$

$$\theta(ST_i; SW_i) + \sum_{r=1}^m \theta(SW_r; SW_{r+1}) + \theta(SW_m, ST_m).$$

## 4 交换型控制网络模型分析

本节基于第3节网络模型的基础,对这两种拓扑结构

下的控制网络节点之间通信的确定性延迟进行理论推导与证明.不失一般性,由图 3我们仅对其中之一的终端  $ST_1$  与其它各终端通信的延迟进行研究.  $ST_1$  与其他终端的通信有两种: ① $ST_1$  向某终端发出请求, 终端响应并返回给  $ST_1$  相应数据; 某一类数据终端向  $ST_1$  发送数据. 这两种数据传送方式在控制网络中普遍存在, 前者主要是控制网络与上层决策网络的交互, 采用这种传输方式的数据对时间的敏感性比较弱; 而后者主要是控制网络内部的采样信息、控制信息以及故障、报警、管理信息等, 此种信息对实时性要求非常强烈, 也是控制系统设计需要精确预知的数据. 因此我们仅对第二种数据进行延迟分析.

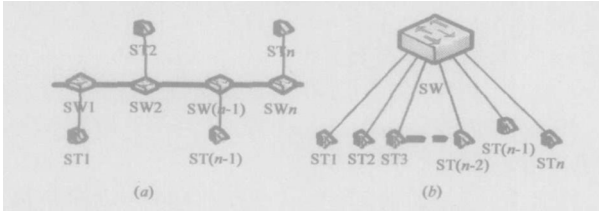


图 3 (a)星型NCS拓扑; (b)总线型NCS拓扑\*

首先定义数据类型子集  $U_p = \{u_i | \Phi(u_i) \geq p\}$ , 假设任何一个数据终端都有可能传输所有类型的数据, 因此我们在考虑数据传输延迟时, 要按照数据类型将所有数据聚流传输, 假设任何数据帧的长度都是有限的, 因此无论是经过还是产生于某终端都存在一个仅与帧长度有关的最小处理时间  $\delta_i$  ( $l$ 为帧长度). 假设交换机和  $ST_i$  的服务曲线分别为  $Ct$  和  $\beta_i(t) \in R_0$ ,  $ST_i$  产生数据是  $\alpha_i(t) \in I_0$  光滑的.

**定理 1** 如果  $f \in I_0$  且  $g \in R_0$ , 记  $h(t) = [g - f]^+(t)$ , 则  $h \in R_0$ .

**证明** 由下凸函数定义可知:

$$f \in I_0, \text{ 则 } f \in I \text{ 可得 } -f \in R. \text{ 事实上: 如果 } y(t) = -f(t) \\ \forall \lambda \in [0, 1], y(\lambda t_1 + (1-\lambda)t_2) = -f(\lambda t_1 + (1-\lambda)t_2) \\ \leq \lambda[-f(t_1)] + (1-\lambda)[-f(t_2)] = \lambda y(t_1) + (1-\lambda)y(t_2)$$

再由下凸函数对加法的封闭性, 显然  $h(t) \in R$ ; 由定义 3 只要证明  $h(0) = 0$  且  $h(t)$  为广义递增函数即可;

事实上:  $\because g(0) = 0, f(0) \geq 0$  因此  $h(0) = [g - f]^+(0) = 0$

$$\forall 0 \leq x \leq y, \exists \lambda \in [0, 1], s. t. x = \lambda y + (1-\lambda) \cdot 0$$

$$\text{则 } h(x) = h[\lambda y + (1-\lambda) \cdot 0] \leq \lambda h(y) + (1-\lambda)h(0) \\ = \lambda h(y) \leq h(y) \quad \text{证毕}$$

**定理 2** 集束流约束. 给定网络节点  $N_E$  以服务曲线  $\lambda(t) \in R_0$  和 FCFS 的方式服务于集束流  $F$ , 而  $F$  由  $f_i$  (其中  $i = 1, 2$ ) 组成; 假设其中某个流 (不妨设为  $f_1$ ) 的到达曲线为  $h \in I_0$ , 记  $\lambda_2 = [\lambda - h]^+(t)$ , 则: ①  $\lambda_2 \in R_0$ ; ②  $\lambda_2$  为  $f_2$  的服务曲线.

**证明** 由定理 1 可以直接推出结论成立;

下面证明结论 ②. 假设流  $f_1$  和  $f_2$  的输入、输出曲线分别为  $R$  和  $R_i^*$ , 其中  $i = 1, 2$

假设  $0 \leq s$  为  $N_E$  最近一次空闲时刻, 即  $t = s$  时  $N_E$  的缓冲区为空, 且处理器空闲, 即此时有  $R_2(s) = R_2^*(s)$ ;  $R_1(s) = R_1^*(s)$ , 因此有:

$$[R_1^*(t) - R_1^*(s)] + [R_2^*(t) - R_2^*(s)] \geq \lambda(t-s) \Rightarrow \\ [R_1^*(t) - R_1^*(s)] \geq \lambda(t-s) - [R_2^*(t) - R_2^*(s)] \\ \text{又 } R_2^*(t) - R_2^*(s) = R_2^*(t) - R_2(s) \leq R_2(t) - R_2(s) \leq \\ h_1(t-s)$$

$$\text{因此有 } R_1^*(t) - R_1(s) = R_1^*(t) - R_1^*(s) \geq (\lambda - h_1)(t-s)$$

$$\text{即 } R_1^*(t) - R_1^*(s) \geq 0 \text{ 即 } R_1^*(t) - R_1(s) \geq [\lambda - h_1]^+(t-s) = \lambda_2 \quad \text{证毕}$$

**推论 1** 集束流约束. 给定网络节点  $N_E$  以常速率  $C$  服务于集束流  $F$ , 其中  $F$  是由  $f_i$  (其中  $i = 1, 2$ ) 组成,  $f_i$  的权为  $x_i$  且  $x_1 > x_2$ ; 则:

(1)  $f_1$  的服务曲线为  $\lambda_1 = [Ct - l_2^{max}]^+$ , 其中  $l_2^{max}$  为  $f_2$  最大数据帧长度;

(2) 如果  $f_1$  的到达曲线为  $h \in I_0$ , 则  $\lambda_2 = [C - h]^+(t) \in R_0$  为  $f_2$  的服务曲线;

**证明** (1)的证明非常明显, 事实上, 由于  $x_1 > x_2$ , 当有  $f_1$  的数据帧到达时, 存在三种可能: 网络节点空闲、正在处理  $f_1$  的数据帧、正在处理  $f_2$  的数据帧, 因此对于  $\forall s \in [0, t]$  存在

$$R_1^*(t) - R_1^*(s) \geq C(t-s) - l_2^{max}, \text{ 其中 } R_1^* \text{ 为 } f_1 \text{ 的输出.}$$

从定理 2 可以直接得到 (2) 的结论. **证毕**

**定理 3** 并联交换特性. 设网络  $N$  由并联的  $n$  个处理节点  $N_i$  ( $i = 1, 2, \dots, n$ ) 组成, 其中每个节点的输入、输出流分别为  $R_i, R_i^*$ , 如果  $N_i$  的服务曲线均为  $\lambda$  则  $R(t) = \sum_{i=1}^n R_i$  在经过网络  $N$  时的服务曲线仍为  $\lambda$

**证明** 这里采用归纳法进行证明:

显然当  $n = 1$  时结论成立;

设当  $n = k$  时结论依然成立, 即网络  $N$  的  $k$  个并联节点  $N_i$  为数据流  $R_i$  提供服务曲线, 那么  $N$  为  $R(t) = \sum_{i=1}^k R_i$  提供的服务曲线仍为  $\lambda$

下面我们证明  $n = k + 1$  时结论依然成立.

由  $n = k$  时  $R(t) = \sum_{i=1}^k R_i$ , 我们有  $n = k + 1$  的总数据流  $R'(t) = \sum_{i=1}^k R_i + R_{k+1} = R + R_{k+1}$ , 因此我们只要将  $n = k + 1$  时的总数据流看成由  $R$  和  $R_{k+1}$  两个数据流组成, 而网络  $N$  可以看成前  $k$  个节点并联后组成的整体与第  $k + 1$  个节点并联组成, 所以我们只要证明  $n = 2$  时结论成立即可.

\* 说明: 如图所示, 交换机简称为  $SW$ , 数据终端称为  $ST_i$ , 不失一般性, 这里假设与  $SW_i$  直接相连的终端和交换机分别为  $ST_i, SW_{i-l}, SW_{i+l}$ , 其中  $l = 1, 2, 3, \dots, n$

$\forall \varsigma > 0, \exists x, y \in [0, t]$ , 此时  $R(t) = R_1(t) + R_2(t)$ ,  
 $R^*(t) = R_1^*(t) + R_2^*(t)$

则:  $R_1^*(t) > R_1(t) + \lambda(t-x) - \varsigma; R_2^*(t) > R_2(y) + \lambda(t-y) - \varsigma$

$R^*(t) = R_1^*(t) + R_2^*(t) > R_1(x) + \lambda(t-x) + R_2(y) + \lambda(t-y) - 2\varsigma$

不妨假设  $x \leq y \Rightarrow R_1(x) + R_2(x) + \lambda(t-x) - 2\varsigma = R(x) + \lambda(t-x) - 2\varsigma$  证毕

**定理 4** 如果数据流  $F$  在经过网络节点  $N_E$  时存在延迟界限  $[d, D]$ , 设  $F$  对  $N$  的输入受限于到达曲线  $\tilde{h}(t) \in \mathcal{F}, t \geq 0$ , 则  $F$  在  $N_E$  的输出曲线受限于  $\hat{h}(t) = \tilde{h}(t + D - d)$ .

**证明**  $\forall t \geq 0$ , 在时间  $[0, t]$  内, 设  $F$  对  $N_E$  的输入、输出分别为  $f(t), f^*(t)$ ,

由于  $f(t)$  受限于到达曲线  $\tilde{h}(t)$ , 即对  $\forall s \in [0, t]$ , 我们有:

$$f \leq f \otimes \tilde{h} \quad \text{即 } f(t) \leq f(s) + \tilde{h}(t-s)$$

考虑在  $[s, t]$  内  $F$  对  $N_E$  的输出量为  $f^*(t) - f^*(s)$ , 则  $[s - D, t - d]$  内  $F$  输入至  $N_E$  的数据量为  $f(s - D) - f(t - d)$ , 由条件可知经过  $N_E$  的数据包延迟  $\lambda \in [d, D]$ , 因此存在:

$$f^*(t) - f^*(s) \leq f(t - d) - f(s - D) \leq \tilde{h}[(t - d) - (s - D)]$$

$$f^*(t) - f^*(s) \leq \tilde{h}[(t + D - d) - s] = \hat{h}_1(t - s)$$

即  $f^* \leq f^* \otimes \hat{h}_1$  证毕

### 5 结论

基于第四节的定理和推论, 下面我们推导星型拓扑(如图 3)结构下终端  $i$  传输给终端 1 时的确定性延迟, 对于总线型的推导方式类似. 与第四节开始的假设一样: 所有其他终端  $2 \sim n$  同时向 1 发送数据, 且此时的调度策略为 FCFS. 由假设可以知道终端  $ST_i$  的输出和延迟分别为:

$$O_i(t) = \alpha_i(t) \otimes \beta_i(t);$$

$$d(ST_i) \leq d_{\max}(ST_i) = H(\alpha_i(t), \beta_i(t))$$

因此在距离为  $\theta(ST_i; SW)$  上,  $SW$  的第  $i$  端口输入曲线为  $O_i(t)$  光滑的, 由交换机的结构可知,  $SW$  对所有终端的服务曲线均为  $Ct$ , 而  $SW$  的输入为  $I(SW; t) = \sum_2^n O_i(t)$ , 由定理 3 可得数据帧经过  $SW$  的延迟  $d(SW) \leq d_{\max}(SW) = H(I(SW; t), Ct)$ , 又因为任何数据帧都有一定长度, 因此在经过  $SW$  时存在延迟下界  $\delta_i$ , 即  $d(SW) \in [\delta_i, d_{\max}(SW)]$ ;

由定理 4 可得  $SW$  对  $ST_1$  输出曲线即  $ST_1$  的到达曲线是  $R(t) = I(SW; t + d_{\max}(SW) - \delta_i)$  光滑的, 可得在  $ST_1$  的延迟:  $d(ST_1) \leq d_{\max}(ST_1) = H(R(t), \beta_1(t))$

即在星型拓扑结构下, 任意节点  $ST_i$  传输给  $ST_1$  的延迟上界为:

$$d_{\max}(ST_i) + d_{\max}(SW) + d_{\max}(ST_1) = H(\alpha_i(t), \beta_i(t)) + H(I(SW; t), Ct) + H(R(t), \beta_1(t))$$

类似的推导方法由输出定理及定理 1 2和推论 1 可以得出总线型拓扑结构下, 任意节点  $ST_i$  到  $ST_1$  的延迟上界为:  $H(\alpha_i(t), \beta_i(t)) + H(I(SW_n; t), Ct) + H(R(t), \beta_1(t)) + (i - 1)\xi$

其中  $I(SW_n; t) = \sum_2^n [\alpha_i(t) \otimes \beta_i(t)]$ ,  $R(t) = I(SW_n; t) + H(I(SW_n; t), Ct) - \xi$

NCS网络数据传输延迟的确定性问题的研究一直是一个研究热点, 也是普通计算机网络与控制系统真正融合的关键. 本文从控制网络的具体拓扑结构出发, 拓展了确定性网络演算理论, 从理论上分析了两种常用的控制网络拓扑结构中的控制网络演算理论, 并给出了总线和星型拓扑下交换网络点对点延迟上界.

### 参考文献:

- [ 1 ] Behlman O, Walsh G C, Bushnell L G. Predictors for networked control systems[ A ]. Proceedings of the American Control Conference [ C ]. Chicago USA: IEEE Press 2000 2347- 2351.
- [ 2 ] Tanez P G, Parrott J T, Moyné J R, Tibury D M. The implications of ethernet as a control network[ A ]. Gbber Powertain Conference [ C ]. Ann Arbor USA: IEEE Press 2002
- [ 3 ] Kaplan G. Ethernet winning ways[ J]. IEEE Spectrum, 2001, 38(1): 13- 15
- [ 4 ] Furrer Ethernet TCP/IP in Industrial Automation Basics and Practice[M ]. Heidelberg Germany Huthig Verlag 1998
- [ 5 ] Obaidat M S, Donahue D L. A priority ethernet LAN protocol[ A ]. Proceedings of the 1993 ACM conference on Computer Science [ C ]. Indianapolis USA: ACM Press 1993 243- 250
- [ 6 ] Venkatramani C. The design, implementation and evaluation of RETHER: A real-time ethernet protocol[D]. Dissertation at the State Univ. of New York, November 1996
- [ 7 ] Kweon S K, Shin K G, Zheng Q. Statistical real-time communication over ethernet for manufacturing automation systems[ A ]. Proc of RealTime Technology and Applications Symposium Vancouver [ C ]. British Columbia Canada IEEE Press 1999 192- 202
- [ 8 ] Jaspemite J Neumann P. Switched ethernet for factory automation[ A ]. In 8th IEEE International Conference on Engineering Technologies and Factory Automation [ C ]. Nice France IEEE Press 2001 205- 212
- [ 9 ] Jaspemite J Neumann P. How to guarantee real-time behavior using ethernet[ A ]. 11th IFAC Symposium on Information Control Problems in Manufacturing [ C ].

- Salvador Bahia, Brazil IEEE Press April 2004 115 – 140
- [ 10] Cruz R L. A Calculus for network delay, part I network elements in isolation[ J]. IEEE Transactions on Information Theory. 1991, 37( 1): 114– 131.
- [ 11] Cruz R L. A calculus for network delay, part II network analysis[ J]. IEEE Transactions on Information Theory. 1991, 37( 1): 132– 141.
- [ 12] Boudec J-Y L, Thiran P. Network Calculus a Theory of Deterministic Queuing System for the Internet[M]. Heidelberg Germany Springer Verlag, Jan 2004.
- [ 13] G C Walsh, Y Hong, L G Bushnell Stability analysis of networked control systems[ J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2002 10( 3): 438– 446
- [ 14] W Zhang, M S Branicky, S M Phillips Stability of networked control systems[ J]. IEEE Control System Magazine, 2001, 21( 1): 84– 99
- [ 15] G C Walsh. Scheduling of networked control systems [ J]. IEEE Control System s Magazine 2001, 21( 1): 57 – 65.

#### 作者简介:

王子君 男, 1977年生于河北衡水, 博士研究生, 从事网络控制系统及其服务质量控制, 网络演算理论等研究.

Email wangzijun77@ hotmail . com.

许维胜 男, 1966年生于山东德州, 教授, 博士, 从事网络化控制、自动化方面的研究.

王中杰 女, 1973年生于辽宁, 副教授, 博士, 从事过程调度、优化控制网络工业过程等方面的研究.

吴启迪 女, 1947年生于浙江, 教授, 博士生导师, 从事控制理论及应用、自动化、网络化系统等方面的研究.