

文章编号: 1001-0920(2005)01-0117-04

## 基于网络演算计算交换式工业以太网中的最大时延

张奇智, 张 彬, 张卫东

(上海交通大学 自动化系, 上海 200030)

**摘 要:** 为保证周期性实时数据在交换式工业以太网中的服务质量, 在交换机中引入非抢占式的优先级调度方法, 并在源节点对进入网络的非周期数据流进行漏桶管制; 基于网络演算理论推导了交换机对不同类型数据的服务曲线; 针对一个树型拓扑的交换式工业以太网模型, 利用所推导出的结论计算了实时数据的最大网络时延

**关键词:** 网络演算; 交换式工业以太网; 实时数据; 最大时延

**中图分类号:** TP393 **文献标识码:** A

## Calculation of maximum delay in switched industrial Ethernet based on network calculus

ZHANG Qi-zhi, ZHANG Bin, ZHANG Wei-dong

(Department of Automation, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200030, China Correspondent: ZHANG Qi-zhi, E-mail: zhangqz@sjtu.edu.cn)

**Abstract:** To guarantee QoS for periodic real-time data in switched industrial Ethernet, non-preemptive priority scheduling method is introduced into switches, and leaky bucket regulator is used at source nodes to constrain aperiodic data entering into the network. Network calculus is used to derive service curves provided by switches for different types of data. For a switched industrial Ethernet model with tree topology, the maximum network delays of real-time data are calculated based on derived results.

**Key words:** network calculus; switched industrial Ethernet; real-time data; maximum delay

### 1 引 言

网络演算是基于最小加代数 (Min-Plus Algebra) 的一系列结论, 利用它可以分析缓冲区调度以及网络时延的一些根本属性。网络演算的主要概念包括到达曲线、服务曲线以及最小加代数下的卷积和反卷积运算。其中到达曲线限制了进入进程, 而服务曲线则限制了网络节点的输入和输出行为。服务的最大时延可由到达曲线和服务曲线之间的水平距离决定<sup>[1-3]</sup>。

以太网是目前应用最为广泛的局域网通信技术, 交换式技术在以太网中的引入为从本质上解决以太网实时通信的确定性提供了可能。当采用全双工微网段通信方式后, 每个站点都具有独立的冲突

域, 不再受限于原有的 CSMA/CD 工作方式, 可以随时发送和接收数据, 大大改进了以太网通信的实时性。近几年兴起的现场总线技术, 如 FF, Profibus 和 DeviceNet 等, 虽然已经为工业过程中遇到的许多通讯问题提供了有效的解决手段, 但它们缺乏一个真正统一的国际标准, 制造商提供的不同现场总线解决方案之间不具备互操作性。一些新的工业应用已显示出现场总线控制系统的局限性, 不仅表现在有限的通信带宽上, 也表现在与外部世界的互联上, 而交换式工业以太网为解决这些问题提供了新的思路<sup>[4]</sup>。

交换式工业以太网中的最大时延计算, 对于评价其是否适合于工业控制具有重要意义。传统分析

收稿日期: 2004-03-11; 修回日期: 2004-05-31

基金项目: 国家 973 计划子课题项目 (2002cd312200-01-1); 国家自然科学基金项目 (60274032)。

作者简介: 张奇智 (1978—), 男, 河南南阳人, 博士生, 从事工业以太网和网络控制系统的研究; 张卫东 (1967—), 男, 黑龙江大庆人, 教授, 博士生导师, 从事现场总线和鲁棒控制等研究

网络时延的排队论方法, 由于采用泊松或贝努力分布代表数据的到达特性, 不符合工业现场设备发送数据的特点(多为周期数据)<sup>[5]</sup>. 采用网络演算分析网络时延的方法已经在多媒体领域获得了成熟应用<sup>[6]</sup>. 此外, Watson 还针对一般实时应用, 基于网络演算给出了星型和线型交换网络中的最大时延计算方法<sup>[7]</sup>; Georges 等也基于网络演算给出了交换式以太网中的最大时延计算方法<sup>[5,8]</sup>, 但不适合具有优先级区分的网络. 本文通过推导交换机对不同类型数据的服务曲线, 给出一种更具适应性的最大时延计算方法, 并给出了具体的应用例子.

## 2 交换式工业以太网中的实时调度

考虑到工业以太网中的各种实时和非实时应用, 网络中一般要传输以下几类数据

1) 周期性实时数据: 用来进行闭环控制, 在典型的现场总线控制系统 FF 和 WordFIP 中, 周期性实时数据被赋予了最高的优先级<sup>[9]</sup>.

2) 突发性实时数据: 用于传送报警和设备状态信号等, 在 FF 和 WorldFIP 中, 突发性实时数据在周期数据传送的空闲期内进行传输

3) 一般消息: 用于系统和节点初始化、网络监控和诊断以及高层交互操作等, 一般无实时要求

针对网络中 3 类数据的不同服务要求, 在交换机中采用基于 IEEE802.1p 的非抢占式优先级调度方法. 周期性实时数据、突发性实时数据和一般消息的用户优先级分别设为 7, 6 和 5. 在交换机的输出端口, 调度器赋予周期性实时数据最高优先级的信道访问权, 当周期性队列为空时才可以传送突发性实时数据, 仅当前两个队列都为空时才能传送一般消息, 如图 1 所示

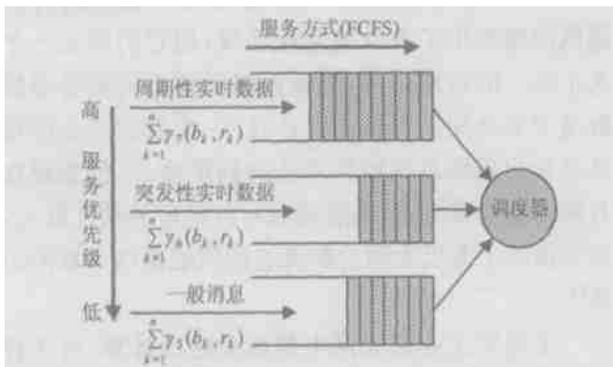


图 1 非抢占式优先级调度方法

为保证周期性实时数据的服务质量, 在每个通信节点对所发送的非周期数据, 采用漏桶管制器对其进行流量控制<sup>[10]</sup>. 经过漏桶管制后, 从每个发送节点进入网络的 3 类数据的到达曲线分别为  $\gamma_7(b_k, r_k)$ ,  $\gamma_6(b_k, r_k)$  和  $\gamma_5(b_k, r_k)$ , 其中  $k$  是发送站的编号.

## 3 交换机对不同类型数据的服务曲线

约定用微数据流代表来自某发送节点的同类型数据的比特流, 用数据流代表到达某交换机的同类型微数据流聚合成的比特流, 用  $p(j)$  代表微数据流和数据流的优先级. 定义  $G_j = \sum_{\{i: p(i)=p(j)\}} F_i$

和  $G_j^H = \sum_{\{i: p(i)>p(j)\}} F_i$  分别为与  $F_j$  流优先级相同, 比  $F_j$  优先级高的微数据流的聚合流  $PG_j$

$= \sum_{\{i: p(i)=p(j)\}} F_i$  由  $G_j$  和  $G_j^H$  再次聚合而成. 定义  $l_{\max} = \max\{l_i: p(i) < p(j)\}$  为比被考察数据流优先级低的最长数据帧. 设优先级为  $p(j)$  的微数据流的到达曲线为  $\alpha_j(t) = r_j t + b_j$ , 则

$$A_j(t) = \sum_{\{i: p(i)=p(j)\}} \alpha_j(t) \text{ 和 } A_j^H(t) = \sum_{\{i: p(i)>p(j)\}} \alpha_j(t)$$

分别为  $G_j$  和  $G_j^H$  的到达曲线

首先以数据流  $G_j$  为考察对象,  $G_j$  和  $G_j^H$  以非抢占式优先级方式接受交换机服务, 推导  $G_j$  的服务曲线. 设交换机的总的服务能力为  $C$ , 即提供给所有数据流的总服务曲线为  $\beta_{R,T}(t) = C[t - 0]^+$ . 由文献[6]推论 6.2.1 的结论 1, 可得到交换机提供给聚合流  $PG_j$  的服务曲线为

$$\beta(PG_j, t) = [\beta_{R,T}(t) - l_{\max}^+ ]^+ = C \left[ t - \frac{l_{\max}}{C} \right]^+ \quad (1)$$

由文献[6]推论 6.2.1 的结论 2, 可得数据流  $G_j$  的服务曲线为

$$\beta(G_j, t) = [\beta(PG_j, t) - A_j^H(t)]^+ \quad (2)$$

因为

$$A_j^H(t) = \sum_{\{i: p(i)>p(j)\}} \alpha_i(t) = r_i \times t + b_i,$$

代入式(2)有

$$\beta(G_j, t) = \left[ C \left[ t - \frac{l_{\max}}{C} \right] - \sum_{\{i: p(i)>p(j)\}} r_i \times t - b_i \right]^+ = \left[ C - \sum_{\{i: p(i)>p(j)\}} r_i \right] \left[ t - \frac{l_{\max} + \sum_{\{i: p(i)>p(j)\}} b_i}{C - \sum_{\{i: p(i)>p(j)\}} r_i} \right]^+ \quad (3)$$

则数据流  $G_j$  的服务速率和服务时延参数分别为

$$R_j^G = C - \sum_{\{i: p(i)>p(j)\}} r_i, \quad (4)$$

$$T_j^G = \left[ \frac{l_{\max} + \sum_{\{i: p(i)>p(j)\}} b_i}{C - \sum_{\{i: p(i)>p(j)\}} r_i} \right] / R_j^G \quad (5)$$

再以微数据流  $F_j$  为考察对象,  $G_j$  中所有微数据流以

FCFS(先到先服务)方式接受交换机服务(见图 1), 推导  $F_j$  的服务曲线由文献[6]假设  $\alpha \geq 1$ , 可得微数据流  $F_j$  的服务曲线为

$$\beta[F_j, t] = [\beta(G_j, t) - (A_j(t - \Theta) - \alpha(t - \Theta))]^+ \quad (6)$$

由  $\beta_{r_j, T_j^G}(G_j, \Theta) = A_j(0) - b_j$  (等式右面是  $G_j$  中除  $F_j$  外的其他数据流在 0 时刻的积压数据), 可得  $\Theta = T_j^G + (A_j(0) - b_j)/R_j^G$ . 又因为

$$A_j(t) - \alpha(t) = \alpha(t) - \alpha(t) = \left[ \begin{matrix} r_i - r_j \\ \{i: p(i)=p(j)\} \end{matrix} \right] \times t + \left[ \begin{matrix} b_i - b_j \\ \{i: p(i)=p(j)\} \end{matrix} \right],$$

代入式(6)可得

$$\beta(F_j, t) = \left[ R_j^G(t - T_j^G) - \left[ \begin{matrix} r_i - r_j \\ \{i: p(i)=p(j)\} \end{matrix} \right] \times \left[ t - T_j^G - \frac{\{i: p(i)=p(j)\} b_i - b_j}{R_j^G} \right] - \left[ \begin{matrix} b_i - b_j \\ \{i: p(i)=p(j)\} \end{matrix} \right] \right]^+ = \left[ R_j^G - \left[ \begin{matrix} r_i + r_j \\ \{i: p(i)=p(j)\} \end{matrix} \right] \right] \times \left[ t - \frac{R_j^G \times T_j^G + \{i: p(i)=p(j)\} b_i - b_j}{R_j^G} \right]^+ \quad (7)$$

考虑交换机采用存储转发方式时, 只有完全接收到整个数据帧后才能对其进行处理, 相当于在服务节点的输出端加入了一个数据分包器. 数据分包使服务时延增加一个数据帧的传输时间<sup>[6]</sup>, 从而微数据流  $F_j$  的服务速率和服务时延参数分别为

$$R_j = R_j^G - \left[ \begin{matrix} r_i + r_j \\ \{i: p(i)=p(j)\} \end{matrix} \right] \quad (8)$$

$$T_j = T_j^G + \left[ \begin{matrix} b_i - b_j \\ \{i: p(i)=p(j)\} \end{matrix} \right] / R_j^G + l_j/R_j^G \quad (9)$$

## 4 应用例子

### 4.1 交换式工业以太网模型

下面给出一个基于网络演算计算交换式工业以太网中最大网络时延的应用例子. 网络模型采用图 2 所示的两级树型拓扑, 用主站模拟中央控制器, 用从站模拟现场设备(数据采集器和变送器等). 二级交换机的个数设为 10 个, 每个二级交换机连接 16 个从站. 两级交换机的上行端口的速率都设为 100 M bp/s, 均采用存储转发方式. 为了简化分析, 假设每个从站发送数据的规律都相同

IEEE802.1p 采用的以太网帧格式的最小帧长为 64 字节, 最大为 1 522 字节. 计算到达曲线时要加

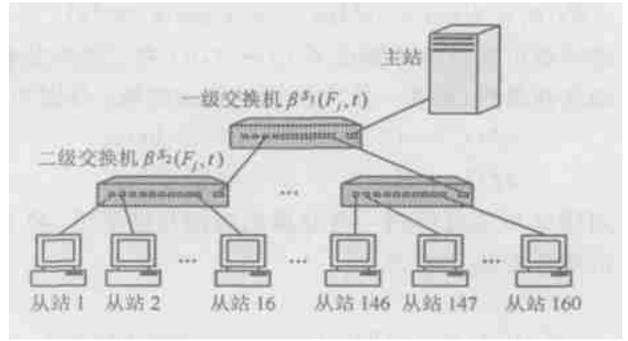


图 2 两级树型拓扑的交换式工业以太网模型

入 8 字节的帧前同步码和 12 字节的帧间隙. 设周期性实时数据每 10 ms 发送一个最小以太网帧, 其到达曲线为  $\alpha_7(t) = (8400t + 84)$  bytes. 使用漏桶管制器对突发性实时数据和一般消息进行流量控制, 使它们的平均发送速率为周期性实时数据的 0.1 倍, 且至多连续发送 10 个数据帧, 则它们的到达曲线分别为  $\alpha_6(t) = (840t + 840)$  bytes,  $\alpha_8(t) = (840t + 15420)$  bytes

### 4.2 最大网络时延的计算

应用第 3 节推导的结论, 计算周期性实时数据和突发性实时数据的最大网络时延. 对于二级交换机, 首先以数据流  $G_j (j = 7, 6)$  为考察对象, 记  $n$  为二级交换机相连的从站个数 ( $n = 16$ ).

利用式(4)和(5), 带入相关参数, 对于周期性实时数据流  $G_7$  有

$$R_7^G = C = 1.049 \times 10^8 \text{ bp/s},$$

$$T_7^G = l_{\max}^G/R_7^G = 1.176 \times 10^{-4} \text{ s}$$

对于突发性实时数据流  $G_6$  有

$$R_6^G = C - n \times r_7 = 1.038 \times 10^8 \text{ bp/s},$$

$$T_6^G = (l_{\max}^G + n \times b_7)/R_6^G = 2.225 \times 10^{-4} \text{ s}$$

再以微数据流  $F_j (j = 7, 6)$  为考察对象, 对于周期性微数据流  $F_7$  有

$$R_7 = R_7^G - (n - 1) \times r_7 = 1.038 \times 10^8 \text{ bp/s},$$

$$T_7 = T_7^G + (n - 1) \times b_7/R_7^G + l_7/R_7^G = 2.202 \times 10^{-4} \text{ s}$$

对于突发性微数据流  $F_6$  有

$$R_6 = R_6^G - (n - 1) \times r_6 = 1.037 \times 10^8 \text{ bp/s},$$

$$T_6 = T_6^G + (n - 1) \times b_6/R_6^G + l_6/R_6^G = 1.200 \times 10^{-3} \text{ s}$$

二级交换机对微数据流  $F_7$  和  $F_6$  的服务曲线分别为

$$\beta^2(F_7, t) = \beta^2(R_7 = 1.038 \times 10^8 \text{ bp/s}, T_7 = 2.202 \times 10^{-4} \text{ s}),$$

$$\beta^2(F_6, t) =$$

$$\beta^2(R_6 = 1.037 \times 10^8 \text{ bps}, T_6 = 1.200 \times 10^{-3} \text{ s}).$$

进一步可求得微数据流  $F_j (j = 7, 6)$  在二级交换机的离开曲线(即在一级交换机的到达曲线)分别为

$$\alpha_7^*(t) = (8400t + 85.850) \text{ bytes},$$

$$\alpha_6^*(t) = (840t + 841.008) \text{ bytes}$$

用同样步骤可得到一级交换机对微数据流  $F_7$  和  $F_6$  的服务曲线分别为

$$\beta^1(F_7, t) =$$

$$\beta^1(R_7 = 9.417 \times 10^7 \text{ bps}, T_7 = 1.165 \times 10^{-3} \text{ s}),$$

$$\beta^1(F_6, t) =$$

$$\beta^1(R_6 = 9.304 \times 10^7 \text{ bps}, T_6 = 1.267 \times 10^{-2} \text{ s}).$$

当服务节点级联时,可利用最小加代数下的卷积运算得到整个级联系统的服务曲线.假定连接从站、二级交换机、一级交换机和主站之间3段导线的长度都为200m.因为电信号在电缆中的传播速率为  $2.0 \times 10^8 \text{ m/s}$ ,所以传输时延  $\tau = 1.0 \times 10^{-6} \text{ s}$ .由文献[6]可知,具有固定时延  $\tau$  的传输线的服务曲线为

$$\beta(t) = \delta_\tau(t) = \begin{cases} 0, & 0 \leq t < \tau \\ +, & t \geq \tau \end{cases}$$

因此,网络提供给微数据流  $F_j$  的服务曲线为( $\Sigma$ 代表级联系统)

$$\beta^\Sigma(F_j, t) =$$

$$\delta_\tau(t) \otimes \beta^2(F_j, t) \otimes \delta_\tau(t) \otimes$$

$$\beta^1(F_j, t) \otimes \delta_\tau(t) =$$

$$\beta^\Sigma(R_j^\Sigma = \min(R_i, R_i), T_j^\Sigma = T_i + T_i + 3\tau).$$

带入相关参数可得

$$\beta^\Sigma(F_7, t) =$$

$$\beta^\Sigma(R_7^\Sigma = 9.417 \times 10^7 \text{ bps}, T_7^\Sigma = 1.387 \times 10^{-3} \text{ s}),$$

$$\beta^\Sigma(F_6, t) =$$

$$\beta^\Sigma(R_6^\Sigma = 9.304 \times 10^7 \text{ bps}, T_6^\Sigma = 1.387 \times 10^{-2} \text{ s}).$$

由此可以得到周期性实时数据和突发性实时数据的最大网络时延分别为

$$D_7^{\max} = T_7^\Sigma + b_7/R_7^\Sigma = 1.39 \text{ ms},$$

$$D_6^{\max} = T_6^\Sigma + b_6/R_6^\Sigma = 13.94 \text{ ms},$$

## 5 结 语

本文通过优先级服务和在源节点对非周期数据进行流量控制,确保周期性实时数据在交换式工业以太网中的服务质量.基于网络演算理论推导了交换机对不同类型数据的服务曲线,并针对一个树型拓扑的交换式工业以太网模型,计算了实时数据的

最大网络时延,展示了利用网络演算理论分析网络时延的实用性和简捷性

## 参考文献(References)

- [1] Boudec J Y L, Thiran P. A short tutorial on network calculus I: Fundamental bounds in communication networks[A]. *Proc of IEEE Int Symposium on Circuits and Systems*[C]. Geneva, 2000: 93-96
- [2] Boudec J Y L, Thiran P, Giordano S. A short tutorial on network calculus IEM in plus system theory applied to communication networks[A]. *Proc of IEEE Int Symposium on Circuits and Systems*[C]. Geneva, 2000: 97-100
- [3] 张信明, 陈国良, 顾钧. 基于网络演算的流量整形模型[J]. *软件学报*, 2000, 13(12): 2225-2230  
(Zhang X M, Chen G L, Gu J. A traffic shaping framework based on network calculus [J]. *J of Software*, 2000, 13(12): 2225-2230)
- [4] Wang Z, Song Y, Chen J, et al. Real-time characteristics of Ethernet and its improvement[A]. *Proc of the 4th World Congress on Intelligent Control and Automation*[C]. Shanghai, 2002: 1311-1318
- [5] Georges J P, Rondeau E, Divoux T. Evaluation of switched Ethernet in an industrial context by using the network calculus [A]. *4th IEEE Int Workshop on Factory Communication Systems*[C]. Sweden, 2002: 19-26
- [6] Boudec J L, Thiran P. *Network Calculus: A Theory of Deterministic Queuing Systems for the Internet* [M]. Berlin: Springer-Verlag, 2002
- [7] Watson K S. Network calculus in star and line networks with centralized communication [R]. Karlsruhe: Fraunhofer IITB, 2002
- [8] Georges J P, Divoux T, Rondeau E. Comparison of switched Ethernet architectures models[A]. *9th IEEE Int Conf on Emerging Technologies and Factory Automation*[C]. Portugal, 2003: 375-382
- [9] 杨丽曼, 李远华, 袁海斌. 网络控制系统的时延分析及数据传输技术研究[J]. *控制与决策*, 2004, 19(4): 361-366  
(Yang L M, Li Y H, Yuan H B. A analysis of time delay in networked control systems and study of data transmission technology [J]. *Control and Decision*, 2004, 19(4): 361-366)
- [10] 谢希仁. *计算机网络*[M]. 第(4)版. 北京: 电子工业出版社, 2003: 119-120