

文章编号:0253-9993(2009)10-1430-05

# 矿井工业以太网大流量负载实时调度策略

卢 倩, 朱真才, 陈光柱, 周公博

(中国矿业大学 机电工程学院, 江苏 徐州 221008)

**摘 要:** 研究了矿井工业以太网在大流量视频负载下的时延效应和网络通信的实时调度策略。在分析工业以太网系统大流量视频负载下网络时延的理论计算方法的基础上, 建立了矿井工业以太网模型, 通过加载与煤矿现场数据流量近似一致的视频负载方法, 对大流量视频负载分别在 100 Mbps 和 1 000 Mbps 工业以太网平台上的网络时延特性进行仿真试验。仿真结果表明: 1 000 Mbps 工业以太网具有更短的网络通信时延和更好的实时性, 并据此提出了在有限的网络带宽下传输大流量视频负载时, 减少网络时延、实现实时传输与控制的负载调度策略, 其仿真结果表明, 采用权值分配调度能够有效地减小网络通信时延, 实现实时传输与控制。

**关键词:** 工业以太网; 大流量视频负载; 调度策略; 网络时延

**中图分类号:** TP393 **文献标识码:** A

## Real-time load scheduling strategy of mine industrial Ethernet based on massive data flow load

LU Qian, ZHU Zhen-cai, CHEN Guang-zhu, ZHOU Gong-bo

(School of Mechanical and Electrical Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221008, China)

**Abstract:** The time delay effect and real-time scheduling strategy of mine industrial Ethernet network, which is under massive data flow video load, was researched. On the basis of analyzing the theoretic calculation of Ethernet network time delay based on massive data flow video load, the model of mine industrial Ethernet network was built, and the time delay effect of 100 Mbps and 1 000 Mbps industrial Ethernet when they connected video load was simulated by the method of loading data flow, which was approximative with the data flow of coal mine scene. The simulation results show that 1 000 Mbps industrial Ethernet has shorter time delay and better real-time of communication than that of 100 Mbps industrial Ethernet. In order to decrease the delayed time of transmitting massive data flow and transmit the control instruction real-time in limited network bandwidth, the strategy of load scheduling was also given, and the load scheduling strategy simulation results show that distribution scheduling strategy can decrease the time delay effect of network effectively and get the aim of transmitting and controlling in real time.

**Key words:** industrial Ethernet; massive data flow video load; scheduling strategy; network time delay

目前我国煤矿使用的各种监测、监控和通信系统相当复杂, 几乎每一套系统都有一套各自独立的通信传输系统, 没有开放协议及统一的信息交换标准和信息平台, 造成了投资重复浪费, 并带来了一系列的问题<sup>[1]</sup>。为了进一步提高煤矿管控一体化的水平, 必须实现全矿井的生产信息、设备的工况监测信息、控制信息和语音、视频等多媒体信息在一个统一的网络平台上传输。目前采用以太网技术构建的 100 Mbps

收稿日期: 2008-10-28 责任编辑: 许书阁

基金项目: 中国煤炭工业协会 2008 年度科学技术研究指导性计划资助项目 (MTKJ08-300); 中国博士后科学基金资助项目 (20070411065); 江苏省博士后科研资助计划资助项目 (0801028B)

作者简介: 卢倩 (1983—), 男, 江苏盐城人, 硕士研究生。E-mail: luqiancumt@126.com

工业以太网矿井综合业务数字网络虽然已经在煤矿井下投入使用,但由于以太网的时延效应,同时为保证监测数据和控制数据的实时、可靠传输,大流量数据负载的视频负载并没有在监测监控网络平台上并行传输.因此,要构建全矿井综合自动化网络平台,必须研究矿井工业以太网在接入和并行传输大流量视频负载时的网络实时性能,以及在网络发生拥塞时的负载调度策略.

在工业以太网的通信实时性、大流量数据的流媒体在网络中的传输特性以及网络拥塞控制方面,国内外很多学者做了相关的研究.张奇智等<sup>[2]</sup>基于网络演算理论对工业以太网端到端最大时延进行了理论计算;王跃飞等<sup>[3]</sup>从以太网实时通信的控制设计的角度对工业以太网实施了仿真实验研究;O. Barana<sup>[4]</sup>研究闭环控制系统网络的实时性;Wan Zhi, Manika Dey<sup>[5-6]</sup>考察了工业以太网远程数据传输的实时性、稳定性,以及对视频信号 QoS 的支持机制;D. Ponce<sup>[7]</sup>对工业以太网数据采集系统的数据传输实时性进行了研究;Young Jun Sona, M. Moallem 等<sup>[8-9]</sup>建立不同的工业现场控制实时数据通信模型,并对模型进行了仿真实验;G. Cena, Kyung Chang Lee 等<sup>[10-11]</sup>重点对交换式以太网的数据实时传输进行了建模与仿真;Wah B. W. 等<sup>[12]</sup>研究了大流量负载的语音、视频信号在因特网上传输的实时特性;Tullio Facchinetti<sup>[13]</sup>对以太网传输大流量数据负载时的网络通信实时性能,以及拥塞控制策略进行了研究.在这些研究中,关于以太网通信实时性的研究都是基于各自特殊的工程背景,与矿井综合自动化网络平台的通信负载流量巨大的现实差别较大;而关于多媒体数据在以太网上并行传输给网络通信性能带来的影响方面的研究,多是侧重于底层协议的分析,缺乏对应用层时延的分析;此外,矿井工业以太网在煤矿现场的应用,多侧重于实时监控系统的集成与设计,对于网络系统平台的通信实时性方面的研究,目前开展的相对较少.本文在对大流量负载下矿井工业以太网网络时延理论分析的基础上,通过仿真试验分析了 100 Mbps 和 1 000 Mbps 工业以太网在大流量视频负载下的通信实时性,并针对仿真结果,提出了相应的实时调度策略.

## 1 大流量视频负载下矿井工业以太网的网络时延分析

目前应用于煤矿现场的工业以太网通常采用环形拓扑设计,地面与井下分别形成网络通信环,因此,矿井工业以太网的时延计算与文献中已有的时延计算方法又有所不同.

根据数据流在矿井工业以太网中传输链路及传输时延的构成分析,定义传感器到客户终端的通信时延

$$T = \sum_{i=1}^{M-1} T_{DE}(i, i+1), \text{ 其中, } M \text{ 为以太环网上朝服务器方向链路的交换机节点数目; } T_{DE} \text{ 为以太环网上相邻 2 台交换机之间的端到端时延; } i \text{ 为该链路上的第 } i \text{ 个交换机节点.}$$

端到端时延  $T_{DE} = T_{ETE} + T_Q$ , 其中,  $T_{ETE}$  为以太环网上端到端的通信时延,  $T_{ETE} = T_S + T_{TRAN}$ ,  $T_S$  为数据帧发送时延,  $T_{TRAN}$  为信号在网络线路上的传输时间;  $T_Q$  为端口排队时延.

如果以太网络中 2 个节点之间没有中继设备,则不会发生端口排队的现象;或者以太网中没有大流量的视频负载,只有控制指令数据在以太网上传输,一般也不会发生端口排队的现象,此时,  $T_Q = 0$ ,  $T_{DE} = T_{ETE}$ . 当视频信号介入后,必然会发生众多的视频信号、甚至是控制信号在中继设备的端口排队的现象,这将对网络通信的实时性产生严重的影响.

假设在一个端口发生  $N$  个数据帧在排队,那么排队时延<sup>[14]</sup>  $T_Q = \sum_{k=1}^{N-1} [T_{FTF} + (L_k + L_h + L_e)T_{1bit}]$ , 其中,  $T_{FTF}$  为两数据帧传输之间的等待时间,在以太网中一般规定为 96 bit 的传输时间;  $L_k$  为第  $k$  个数据帧的数据长度;  $L_h$  为帧头;  $L_e$  为其他字节开销;  $T_{1bit}$  为比特率.

实际上,这里对于端口排队时延  $T_Q$  的计算,采用了符合数据帧发送过程的简化计算方法,而且这里并没有考虑到数据帧在交换机端口排队的队列等待时延,这是因为队列等待时延具有高度的不确定性;因此试图通过数学建模的方法建立该时延的量化模型是不现实的,而且根本也没有必要,因为在实际应用中,通常采用模型仿真的方法对网络进行性能验证.

### 2 网络模型

在 OPNET 中构建的矿井工业以太网系统仿真模型如图 1 所示. 矿井工业以太网系统由地面光纤环网 I 和井下光纤环网 II 组成, 地面光纤环网与井下光纤环网通过互为冗余的 1 号、2 号核心交换机连接, 从而实现全矿的综合业务的数字交换与传输. 井上井下所有的监测、监控系统都接入相应环网, 接入速度为 10/100/1 000 Mbps 自适应. 客户端通过数据库服务器、视频服务器和 WEB 服务器分别读取在网络中传输的监测监控数据、视频和语音数据以及实现远程访问的功能.

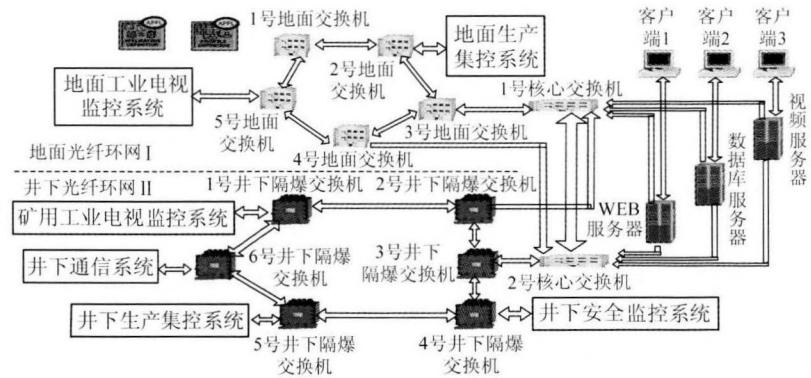


图 1 OPNET 下矿井工业以太网系统模型

Fig. 1 Network model of mine industrial Ethernet on OPNET

接入速度为 10/100/1 000 Mbps 自适应. 客户端通过数据库服务器、视频服务器和 WEB 服务器分别读取在网络中传输的监测监控数据、视频和语音数据以及实现远程访问的功能.

### 3 大流量负载下矿井工业以太网的实时性

为了更好地对矿井工业以太网在大流量负载下的网络性能进行仿真研究, 仿真试验条件按照煤矿现场工矿条件进行设置, 通过加载流量脚本实现数据流量与煤矿现场一致的网络视频负载的导入, 仿真时分别创建了 100 Mbps 和 1 000 Mbps 工业以太网络平台两个场景, 模拟在相同数据流量的视频业务下对网络平均时延和高层应用程序平均时延的影响.

图 2 是在 100 Mbps 和 1 000 Mbps 工业以太网络中同时分别加载 50 Mbps 流量和 70 Mbps 流量的视频业务后网络平均时延的比较. 由图 2 可以看出, 当所加载的视频业务的数据流量为 50 Mbps 时, 100 Mbps 以太网的平均时延是在 800 μs 左右, 1 000 Mbps 以太网的平均时延约为 300 μs; 当所加载的视频业务的数据流量增大到 70 Mbps 时, 100 Mbps 以太网的平均时延也相应地增加到 1 100 μs 左右, 而 1 000 Mbps 以太网的平均时延曲线几乎与在 50 Mbps 流量下的平均时延曲线完全重合. 可见, 在相同的数据流量下 1 000 Mbps 以太网平均时延要比 100 Mbps 以太网的小的多, 即使是在数据流量突变的情况下, 100 Mbps 以太网的时延也比 1 000 Mbps 以太网的时延陡增得厉害, 这说明 1 000 Mbps 工业以太网更利于视频图像的实时传输.

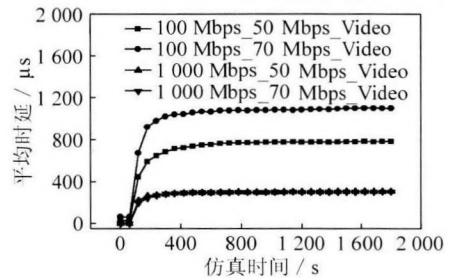


图 2 100 Mbps 与 1 000 Mbps 以太网平均时延比较

Fig. 2 Comparison of average time delay on 100 Mbps and 1 000 Mbps Ethernet

由图 3 可以看出, 在加入 50 Mbps 流量的视频业务后, 100 Mbps 以太网的数据库服务器的响应平均时延约为 700 μs, Web 服务器的页面响应平均时延约为 250 μs 左右; 而 1 000 Mbps 以太网的数据库服务器的响应平均时延

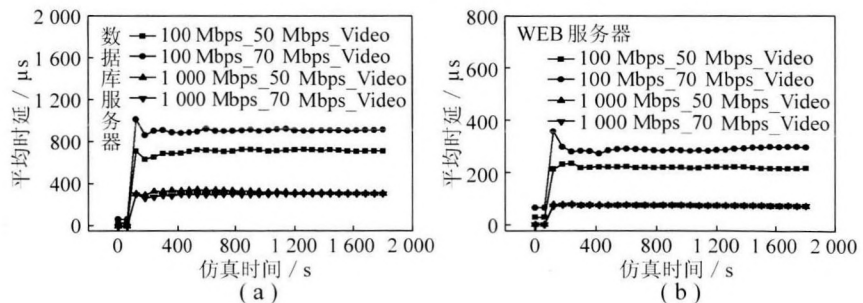


图 3 100 Mbps 与 1 000 Mbps 以太网高层应用程序平均时延比较

Fig. 3 Comparison of upper application program's average time delay on 100 Mbps and 1 000 Mbps Ethernet

约为  $300\ \mu\text{s}$ , Web 服务器的页面响应平均时延约为  $80\ \mu\text{s}$ ; 当视频业务的数据流量增加到  $70\ \text{Mbps}$  时,  $100\ \text{Mbps}$  以太网的数据库服务器的响应平均时延增加到  $900\ \mu\text{s}$  左右, 并且在数据流量流通的初始阶段增加更为迅速, 这是由于所有的数据涌向同一个网络端口所致; Web 服务器的页面响应平均时延增加到  $300\ \mu\text{s}$  左右; 而  $1\ 000\ \text{Mbps}$  以太网的数据库服务器和 Web 服务器的响应平均时延基本没有变化, 可见,  $1\ 000\ \text{Mbps}$  以太网更能够适应大型复杂的工业现场控制的需求。

#### 4 大流量负载下矿井工业以太网的实时调度

首先, 采用优先级排队机制. 优先级排队算法是最先处理优先级最高的数据包, 然后是次高级, 依次向下, 直到没有比  $X$  级高的包在排队, 才处理  $X$  级. 为此, 图 1 中的客户端 1, 2, 3 的负载类型分别为控制指令, 传感器监测量, 生产视频画面; 优先级别分别为 2 (最高), 1, 0 (最低)。

按照负载类型的优先级进行传输, 实时性要求较高的控制指令的传输时延不会很大, 但在实际传输中, 大流量的视频负载会长时间地占据带宽, 当优先级高的控制指令和传感器监测量需要传输通信时, 尽管网络会优先处理级别较高的控制指令和传感器监测量, 但是在移出带宽给优先级高的负载类型传输的过程中无疑造成了网络

时延的加剧. 图 4 (a), 是网络带宽被大流量视频负载占据后的采用优先级排队机制的仿真结果, 当优先级较低的视频负载流量较大时, 客户端 3 的平均时延已经达到  $100\ \text{ms}$ , 最大时延已

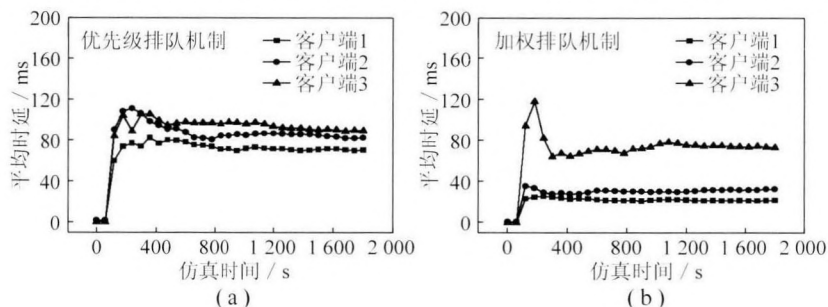


图 4 不同排队机制网络客户端平均时延比较

Fig. 4 Comparison of network clients' average-time based on priority and distribution

经接近  $120\ \text{ms}$ , 此时, 尽管控制指令负载和传感器监测的数据负载拥有较高的优先级, 但是在网络带宽有限并被大流量视频负载所占用情形下, 优先处理客户端 1 和客户端 2 的负载传输, 其时延仍然较大, 尤其是控制指令的传输, 其时延在  $70\sim 80\ \text{ms}$  之间, 倘若由于网络通信设备的接口处缓冲设置较小, 相信还会有相当一部分数据包被丢弃, 这对于煤矿安全生产构成了一定的威胁。

其次, 采用加权排队机制. 加权排队的算法是比较每个子列的权值, 优先处理权值最高的队列, 但不把全部带宽分给它, 而是按照它的权值要求分配带宽. 为此, 图 1 中客户端 1, 2, 3 的负载类型分别为控制指令, 传感器监测量, 生产视频画面, 其权值分配分别为  $50\%$  (最多),  $30\%$ ,  $20\%$  (最少)。

加权排队不会发生由权值较大的队列独自占用带宽、而使其他所有队列等待的情况. 从仿真结果 (图 4 (b)) 中的时延情况来看, 客户端 3 由于权值较小, 出现了时延情况, 并且其最大时延甚至比优先级机制下的最大时延更加严重, 但是由于视频负载始终享有  $20\%$  的带宽, 因此其平均时延相对于优先级机制下的平均时延有明显的下降; 另一方面, 当网络中有控制指令信号和传感器监测量需要实时传输时, 由于分配了更多权值的关系, 它能够优先为权值分配最多的控制指令负载分配较多的带宽资源, 同时保证权值分配较少的视频负载也能够获得一定的网络带宽资源而无需等待. 从图 4 (b) 中可以看出, 控制指令和传感监测数据的传输时延大为下降, 其平均时延在  $20\sim 30\ \text{ms}$  之间, 网络通信的实时性有了很大程度的提升, 这就保证了重要的控制指令及传感监测数据实时传输的要求。

#### 5 结 论

(1) 定义了煤矿现场基于环型网络拓扑结构的从底层传感器到上层客户终端的通信时延计算方法, 建立了矿井工业以太网综合业务网络模型, 并采用加载与现场实际流量负载一致的试验方法进行性能仿真

试验, 仿真试验的结果表明: 随着网络流量的增大, 1 000 Mbps 工业以太网的网络平均时延及应用程序的时延明显优于 100 Mbps 矿井工业以太网, 1 000 Mbps 工业以太网更适用于构建全矿井综合业务网络平台, 从而保障大流量视频负载下网络通信的高实时性.

(2) 采用权值分配调度策略能够在有限的网络带宽下传输大流量视频负载时有效地保障网络通信的实时性, 负载调度策略的仿真结果表明, 为不同的负载类型分配不同的权值, 能够有效地减少网络拥塞的机率, 减小网络通信时延, 实现实时传输与控制.

#### 参考文献:

- [1] 刘富强. 矿井多媒体综合业务数字网 (MISDN) 网络结构研究 [J]. 煤炭学报, 2003, 28 (3): 307-310.  
Liu Fuqiang. Research on network structure of multimedia integrated services digital network in mine (MISDN) [J]. Journal of China Coal Society, 2003, 28 (3): 307-310.
- [2] 张奇智, 张 彬, 张卫东. 基于网络演算计算交换式工业以太网中的最大时延 [J]. 控制与决策, 2005, 20 (1): 117-120.  
Zhang Qizhi, Zhang Bin, Zhang Weidong. Calculation of maximum delay in switched industrial Ethernet based on network calculus [J]. Control and Decision, 2005, 20 (1): 117-120.
- [3] 王跃飞, 韩江洪, 胡庆新. 基于负载分析与遗传算法的工业以太网控制系统设计 [J]. 系统仿真学报, 2006, 18 (12): 3 495-3 498.  
Wang Yuefei, Han Jianghong, Hu Qingxin. Design of industrial Ethernet network system with load analysis and GA [J]. Journal of System Simulation, 2006, 18 (12): 3 495-3 498.
- [4] Barana O, Luchetta A, Manduchi G, et al. Progress in real-time feedback control systems in RFX [J]. Fusion Engineering and Design, 2004, 71 (1-4): 35-40.
- [5] Wan Zhi, Song Yeqiong, Chen Jiming, et al. Real time characteristics of Ethernet and its improvement [A]. Intelligent Control and Automation, Proceedings of the 4th World Congress [C]. 2002: 1 311-1 318.
- [6] Dey Manika, Pujara H D. Real-time acquisition and remote monitoring of steady state tokamak (SST-1) diagnostics data [J]. Fusion Engineering and Design, 2007, 82 (5-14): 1 198-1 202.
- [7] Ponce D, Gorelov I A, Chiu H K, et al. Real-time multiple networked viewer capability of the DIII-D EC data acquisition system [J]. Fusion Engineering and Design, 2005, 74 (74): 891-895.
- [8] Young Jun Sona, Richard A Wysk. Automatic simulation model generation for simulation-based, real-time shop floor control [J]. Computers in Industry, 2001, 45 (3): 291-308.
- [9] Moallem M. Distributed real-time control and data acquisition of free-electron laser beams [J]. Computing & Control Engineering Journal, 2001, 12 (4): 179-187.
- [10] Cena G, Seno L, Valenzano A, et al. Performance analysis of Ethernet powerlink networks for distributed control and automation systems [J]. Computer Standards & Interfaces, 2008, 19 (3): 22-38.
- [11] Lee Kyung Chang, Lee Suk. Performance evaluation of switched Ethernet for real-time industrial communications [J]. Computer Standards & Interfaces, 2002, 24 (5): 411-423.
- [12] Wah B W, Su X, L In D. A survey of error concealment schemes for real-time audio and video transmission over the internet [A]. Proceedings of International Symposium on Multimedia Software Engineer [C]. IEEE, 2000: 17-24.
- [13] Tullio Facchinetti, Gianluca Franchino, Paulo Pedreiras. An Ethernet layer for supporting enhanced real-time communication services [A]. Information Control Problems in Manufacturing, the 12th IFAC Conference [C]. Saint-Etienne, France, 2006: 117-122.
- [14] Lu Qian, Zhu Zhencai, Chen Guangzhu, et al. Real-time research of mine industrial Ethernet network based on massive data flow video load [A]. Asia Simulation Conference 2008/the 7th International Conference on System Simulation and Scientific Computing [C]. Beijing, 2008: 330-335.