

EPA 网络三大延迟因素的权重及变化分析

姜秀柱¹, 邓德玖¹, 冯冬芹²

(1. 中国矿业大学 计算机科学与技术学院, 江苏 徐州 221116; 2. 浙江大学 先进控制技术研究所, 浙江 杭州 310000)

摘要: 分析了 EPA 微网段三大延迟因素: 排队延迟、节点信息处理延迟和发送和传播延迟, 讨论了三大延迟因素对实时性能的权重影响, 通过分析节点数量 N 和调度算法因子 α 对延迟的影响, 得出了 2 个结论: 1) $N=8$ 是排队延迟和节点信息处理延迟的“二八”现象的拐点; 2) 当 $\alpha < 0.32$ 时, 排队延迟就会降为影响延迟的次要因素。上述结论为提高 EPA 网络实时性能措施提供了参考方向。

关键词: EPA; 微网段; 排队延迟; 节点信息处理延迟; 调度因子; 节点数量

中图分类号: TP393

文献标识码: B

文章编号: 1000-436X(2012)Z2-0196-05

Analyzing the weights and its variation of the three delays in EPA network

JIANG Xiu-zhu¹, DENG De-jiu¹, FENG Dong-qin²

(1. The School of Computer Science and Technology, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China;

2. Institute of Advanced Control Technology, Zhejiang University, Hangzhou 310000, China)

Abstract: Three delay factors of EPA micro segment: queuing delay, node information processing delay and transmission and propagation delay was analied, and the weight influence of the three major factors of delay on the real-time performance was discussed, through the analysis of the number of nodes in the N and scheduling algorithm factor α on the effects of delay variation, reached two conclusions: 1) $N=8$ is the inflection point of phenomenon of "two eight" between queue delay and node information processing delay; 2) when $\alpha < 0.32$, queuing delay will be reduced to be the secondary factors for the influence of the delay. The conclusions provide EPA network reference directions for measures to improve the real-time performance.

Key words: Ethernet for plant automation; micro segment; queuing delay; processing delay; scheduling factor; number of nodes

1 引言

为了打破国外对工业控制网络标准的垄断, 国家科技部支持, 浙江大学牵头, 组织清华大学、重庆邮电大学、大连理工大学等国内多所大学和中国科学院沈阳自动化所共同研发了中国自己的基于以太网的工业控制网络标准——《用于工业测量与控制系统的 EPA (Ethernet for plant automation) 系统结构与通信规范》^[1], 简称《EPA 标准》, 并于 2007

年 12 月被国际电工委员会 IEC 批准为具有实时以太网特征的第 14 个现场总线行规 CPF14^[2]。

与国外同类工业以太网标准, 如奥地利的贝加莱 (Benecher + Rain) 公司提交的 EPL (Ehernet powerlink)^[3]、日本东芝 (Toshiba) 公司提交的 Tcnet^[4] 和德国西门子 (Siemens) 公司提交的 profinet CBA (component based automation)^[5] 等相比, EPA 在实时性能上还有待进一步提高^[6~8]。本文针对 EPA 网络构成特点, 分析了 EPA 网络延迟的构成, 分解

给出三大因素：排队延迟、节点信息处理延迟、传输和传播延迟。讨论了该三大因素对网络实时性能的影响权重，并对三大延迟因素及其影响权重在网络节点数量发生变化和节点实时调度算法发生变化等情形下的变化趋势分别展开了研究，从理论上讲，为进一步提高 EPA 实时性能，改进 EPA 标准提供了参考方向。

通常网络延迟可分解为节点延迟和线路延迟 2 部分^[9]。在工业以太网中同样有端节点和中继节点 2 类。EPA 网络的端节点通常是指传感器、控制器和执行器节点，中继节点则是网桥和交换机节点（如图 1 所示）。端节点内的延迟包括用户信息处理延迟、协议栈处理延迟和排队延迟；中继节点内的延迟则包含协议栈处理延迟和转发排队延迟。线路延迟则由发送延迟和传播延迟构成。

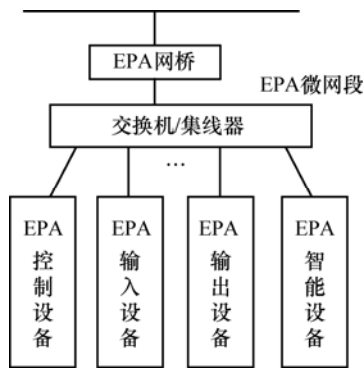


图 1 EPA 网络微网段拓扑结构

在这些导致网络传输延迟的因素中，有可定量计算的静态延迟，如线路延迟和节点的用户信息及协议栈处理延迟。它们完全取决于网络的静态组成，而与网络的运行状态无关，即与网络的负载变化无关。在工业以太网中，只有节点的排队延迟是唯一不随网络的软硬件配置而能确定的因素，在非实时的工业以太网中，节点的排队延迟完全取决于网络运行过程中的传输负载变化。而实时以太网要求所有导致网络延迟的因素都必须是确定的，即是可以预期的。因此实时以太网的核心就是通过一定措施，使得节点的排队延迟是可以确定的。在实时以太网中，排队延迟主要取决于如何调度节点进行负载传输的实时调度算法。

2 EPA 网络延迟分解

在图 1 的 EPA 网络中，中继节点-交换机/集线器的作用只是用来实现节点互连，即其仅是个信息

数据的通道，其对网络的影响可用一个简单的转发延迟表示，简记为 T_{switch} 。

网络的实时性能可用网络对事件的响应时间衡量。在图 1 的 EPA 网络中，实时响应时间就是从传感器数据进入 EPA 输入模块，经过处理后转至 EPA 控制器模块，再经 EPA 控制器模块运算处理后，最后转送到 EPA 输出模块，再经过一定的处理，输出控制信息并驱动执行机构动作。这样整个过程所花费的时间。上述过程经历了 2 段端到端的延迟（输入至控制；控制至执行）和 3 个节点信息处理延迟（输入节点、控制节点和输出节点）。由于信息的 2 次传输都经过交换机节点，因此还应包括 2 次交换机延迟。于是 EPA 网络的实时性能构成可用下式表示：

$$T_{总} = T_{delay1} + T_{delay2} + T_{end1} + T_{end2} + T_{end3} + 2T_{switch} \quad (1)$$

其中， T_{delay} 是节点间的传输延迟，包括排队延迟 T_{queue} 、发送延迟 T_{send} 和传播延迟 T_{trans} 。而排队延迟主要由微网段的宏周期等待时间 $T(\mu s)$ 构成，与调度算法有关，在一个调度周期内，节点的最大排队延迟为 T 。为方便起见，用一个小于 1 的系数因子 α 来表示调度算法的影响；发送延迟由信息量的大小 $M/Mbit$ 和网络的通信速率 $V_b/Mbit/\mu s$ 构成；传播延迟则由传输距离 S/m 和传输速率 $V/m/\mu s$ 决定，即 $T_{queue} = \alpha T, 0 \leq \alpha \leq 1; T_{send} = M/V_b; T_{trans} = S/V$ ，所以有

$$T_{delay} = T_{queue} + T_{send} + T_{trans} = \alpha T + M/V_b + S/V \quad (2)$$

式(2)中， α 称作为调度因子。

式(1)中的 T_{end} 表示端节点信息处理延迟。不失一般性，设端节点操作系统的任务切换所需时间为 δ ，中断任务导致的除任务切换以外还有多增的断点保护及恢复操作所花的时间为 ϵ ，单位均为 μs ；CPU 速度为 I ，单位为每秒兆指令条数。设端节点系统中的独立功能模块有 m 个（其中包括 k 个中断任务），每个功能程序块的指令代码长度分别为 U_i ，单位为条数。考虑目前实际 EPA 通信设备采用的是 UC/OS-II 独占式多任务系统，则节点处理时间可表示为

$$T_{end} = \sum_i^m U_i / I + k\epsilon + \delta m, i=1,2,L,m \quad (3)$$

同样地，作为标准化模块，可设所有 EPA 节点的 EPA 通信功能处理都是一样的，节点间的连

接介质也都是是一样的，将式(2)、式(3)带入式(1)可得

$$T_{\text{总}} = 2 \times (\alpha T + M/V_b + S/V) + 3 \times (\sum_i^m U_i/I + m\delta + k\varepsilon) + 2T_{\text{switch}}$$

$$= 2\alpha T + 2 \times (M/V_b + S/V) + 3 \times (U/I + m\delta + k\varepsilon) + 2T_{\text{switch}} \quad i=1,2,L,m \quad (4)$$

式(4)中，除了 T 是受调度算法因素决定外，其余因素都是由组成网络的软硬件客观决定的。式(4)反映了 EPA 网络及节点设备的设计对实时性能的影响。

进一步将式(4)分解为调度算法决定的排队延迟 T_{queue} 、硬件设计决定的发送和传播延迟 $T_{\text{send-trans}}$ 和软件设计决定的节点信息处理延迟 T_{end} ，则式(4)可归结为三大延迟因素。

$$T_{\text{总}} = 2T_{\text{queue}} + 2T_{\text{send-trans}} + 3T_{\text{end}} \quad (5)$$

式中：

$$T_{\text{queue}} = \alpha T;$$

$$T_{\text{send-trans}} = M/V_b + S/V + T_{\text{switch}} = 2(M/V_b) + S/V;$$

$$T_{\text{end}} = U/I + m\delta + k\varepsilon \quad (6)$$

3 EPA 网络延迟三大构成权重分析

在 EPA 微网段中，宏周期 T 的大小，决定了排队等待时间的多少。根据式(5)可知，宏周期 T 至少要大于式中的发送传播延迟，系统才能工作。设微网段内有 N 个节点，并设每个节点都有周期数据传输，则 T 至少应满足

$$T \geq 2NT_{\text{send-trans}} \quad (7)$$

将式(7)、式(6)代入式(5)得

$$T_{\text{总}} \geq 4\alpha NT_{\text{send-trans}} + 2T_{\text{send-trans}} + 3T_{\text{end}} \quad (8)$$

由此可知排队延迟、发送传播延迟和节点信息处理延迟所占总延迟的权重分别为 p_q 、 p_s 、 p_e 。

$$p_q = 2T_{\text{queue}} / T_{\text{总}}$$

$$= 4\alpha NT_{\text{send-trans}} / (4\alpha NT_{\text{send-trans}} + 2T_{\text{send-trans}} + 3T_{\text{end}})$$

$$= 1 / (1 + 1/2\alpha N + 3T_{\text{end}} / 4\alpha NT_{\text{send-trans}}) \quad (9)$$

$$p_s = 2T_{\text{send-trans}} / T_{\text{总}}$$

$$= 2T_{\text{send-trans}} / (4\alpha NT_{\text{send-trans}} + 2T_{\text{send-trans}} + 3T_{\text{end}})$$

$$= 1 / (1 + 2\alpha N + 3T_{\text{end}} / 2T_{\text{send-trans}}) \quad (10)$$

$$p_e = 3T_{\text{end}} / T_{\text{总}}$$

$$= 3T_{\text{end}} / (4\alpha NT_{\text{send-trans}} + 2T_{\text{send-trans}} + 3T_{\text{end}})$$

$$= 1 / (1 + (4\alpha N + 2)T_{\text{send-trans}} / 3T_{\text{end}}) \quad (11)$$

根据目前以太网最常用传输介质均为五类双绞线，网络速率多为 100Mbit/s，节点间允许最大传输距离 100m，考虑目前推出的大部分 EPA 现场设备所用 CPU 多为 ARM7，操作系统为 UC/OS-II^[10]。由文献[10]可知

$$T_{\text{end}} / T_{\text{send-trans}} = (U/I + m\delta + k\varepsilon) / (2(M/V_b) + S/V)$$

$$= 521.4 / 244.71 = 2.13 \quad (12)$$

将式(12)分别代入式(9)、式(10)和式(11)可得

$$\begin{cases} p_q = \alpha N / (\alpha N + 2.1) \\ p_s = 0.5 / (\alpha N + 1.1) \\ p_e = 1.6 / (\alpha N + 2.1) \end{cases} \quad (13)$$

以较常见的 $N=5$ 为例，可得 EPA 微网段具有最大排队延迟时（对应 $\alpha=1$ ），各延迟因素的比重分别为 $p_q=0.70$ ， $p_s=0.07$ ， $p_e=0.23$ 。由此可见排队延迟是 EPA 网络微网段内节点间通信延迟的主要因素，其次是节点信息处理延迟，因此提高 EPA 网络的实时性，主要是设法减少排队延迟和节点信息处理延迟。图 2 是三大延迟因素所占总延迟的比例关系。

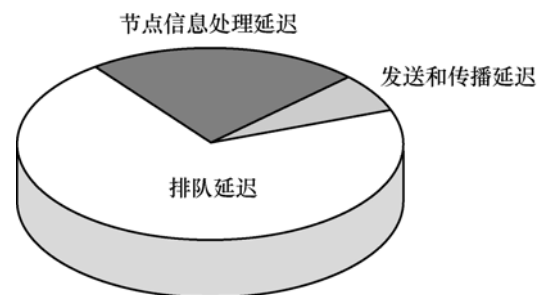


图 2 三大延迟因素权重关系

4 EPA 网络延迟与节点数量的关系分析

根据式(13)可以做出三大延迟因素对实时性能的影响权重随节点数量 N 和调度算法因子 α 变化的情况。分别如图 3 和图 4 所示。

由图 3 可知，当节点数量小于 8 时，排队延迟的权重和节点信息处理延迟的比重都随节点数量的变化陡峭变化，但变化方向相反。排队延迟的权重变化范围从 10% 增长到 80%，节点信息处理延迟权重变化范围从 70% 下降到 20%。图 3 中排队延迟权重与节点信息处理延迟权重的交叉点为 $N=1.5$ ，权重

同为 44%，也即当 $N > 2$ 时，排队延迟的权重就开始远大于节点信息处理延迟。而当节点数量增加到 20 以上，这时排队延迟的权重增加到接近 90% 时，其随节点数 N 的变化趋缓，而与此同时节点信息处理所需时间和信息发送和传播所需的时间占总延迟的比重越来越小。这意味着当节点增加到 20 以上时，节点信息处理延迟和发送传播延迟可以忽略不计。

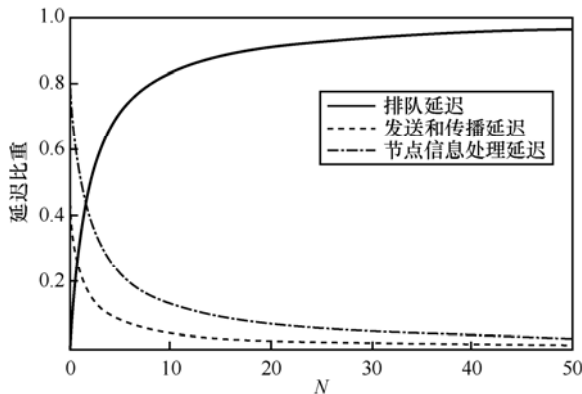


图 3 三大延迟因素权重随节点数量变化关系

反之，当节点数量小于 8 时，节点信息处理延迟所占比例达 20% 以上，是影响 EPA 实时性的重要因素。

注意图 3 中的发送和传播延迟，在 100Mbit/s 的速率下，其所占比重小于 10%，随着吉比特以太网和光纤传输介质的普及，发送和传播延迟对实时性的影响更是越来越小，其中，传播延迟更是微乎其微。也就是说，节点的远距离对实时性的影响可以忽略不计。

图 4 反映了调度算法因子对延迟因素权重的影响。图 4 是在 $N=5$ 时，计算获得的三大延迟因素对总延迟的影响权重随 α 变化的曲线。由式(13)可知， α 和 N 的作用位置和作用方向是一样的，但由于 α 的变化范围小，所以得出来的变化曲线缓和得多。

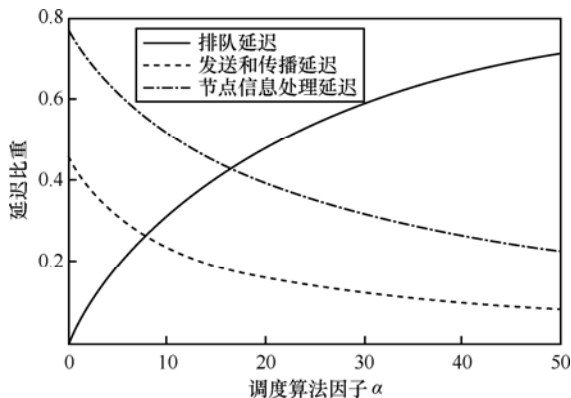


图 4 三大延迟因素权重随调度因子变化关系

与 N 的作用一样，随着 α 值的增加，同样是排队延迟的权重值增加，而节点信息处理延迟和发送传播延迟的权重下降。反之，随着 α 值的减少，排队延迟的权重会减少，而节点信息处理延迟和发送传播延迟的权重会增加。这就意味着在调度算法使得排队延迟很小时，节点信息处理延迟和发送传播延迟成为 EPA 节点间信息通信延迟的主要因素。

图 4 中有 2 个交汇点，一个是排队延迟权重曲线和节点信息处理延迟权重曲线的交汇点 (0.32, 0.432 4)，另一个是排队延迟权重曲线和发送传播延迟权重曲线的交汇点 (0.15, 0.270 3)。也就是说当排队等待延迟的权重低于 43.24% 时，或说 α 的取值小于 0.32 ($\alpha < 0.32$) 时，排队延迟就下降为影响 EPA 实时性的次要因素。且在 $\alpha < 0.15$ 以后，排队延迟权重下降到 30% 以下，而发送和传播延迟对 EPA 实时性的影响作用上升到接近 30% 及以上。这就意味着，在通过改进调度算法，使得排队延迟减少到占总延迟的 30% 以下后，就要转而去研究减少节点信息处理延迟和发送传播延迟的方法，以使得 EPA 的实时性得到进一步的提高。

5 结束语

综上所述，通常情况下，在 EPA 网络的三大延迟因素中，EPA 的排队延迟是 EPA 网络延迟的主要因素。排队延迟取决于调度算法的宏周期，而 EPA 宏周期的确定与节点的数量有关。随着 N 的增加，宏周期增加，排队延迟增加，导致总延迟增加，从而影响其他延迟因素所占的比重。上述研究表明，当需要调度时，即 $N > 1$ ，调度算法决定的延迟就是主要延迟，其他延迟因素则随节点 N 的增加而呈现影响减弱， $N=8$ 时，是排队延迟和节点信息处理延迟的“二八”现象的拐点，即此时，排队延迟占比大于 80%，而节点信息处理延迟占比小于 20%。其次，调度因子 α 是决定排队延迟影响作用的关键因素，当 $\alpha < 0.32$ 时，排队延迟就会降为影响延迟的次要因素，因此可通过节点产生数据的上层调度和节点发送偏移量设置之间的配合，减小 α 到最小，从而大幅度地提高 EPA 网络的实时性能。

参考文献：

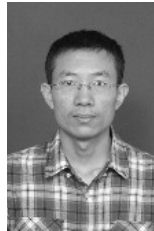
[1] EPA System Architecture and Communication Specification for Industrial Control and Measurement Systems, General Administration

- of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China[S]. GB/T20171-2006, 2006.
- [2] SEITZ B, SAMUELIAN M. A Universal Approach for Implementing Real-Time Industrial Ethernet[R]. 2007.
- [3] 叶莘. Ethernet powerlink-实时的工业以太网[J]. 自动化博览, 2004, (4):43-45.
YE S. Ethernet powerlink-real-time industrial Ethernet[J]. Automation Panorama, 2004, (4):43-45.
- [4] TCnet time-critical information and control network[EB/OL]. <http://www3.toshiba.co.jp/sic/english/seigyo/tcnet/tcnet.htm>, 2009.
- [5] HANZÁLEK Z, BURGET P, SUCHA P. Profinet IO IRT message scheduling with temporal constraints[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, Digital Object Identifier, 2010, 6(3):369-380.
- [6] 缪学勤. 基于国际标准的十一种工业实时以太网体系结构研究[J]. 仪器仪表标准化与计量, 2009,(4):8-9.
MIU X Q. The reearch on the eleven international standard industrial Ethernet architecture[J]. Instrument Standardization & Metrology, 2009, (4):8-9.
- [7] DOYLE P. Introduction to real-time Ethernet[J]. The Extension. Contemporary Control Systems, 2004, 5(3):1-6.
- [8] FELSER M. Real-time Ethernet-industry prospective[J]. IEEE, 2005, 93(6):1118-1128
- [9] 姜秀柱, 冯冬芹, 徐钊等. 基于 EPA 的工业自动化网络延迟分析及改善[J]. 自动化仪表, 2009,7:7-10.
JIANG X Z, FENG D Q, XU Z, *et al.* Analysis on delay in industrial automation EPA network and its improvement[J]. Process Automation Instrumentation, 2009, 7:7-10.
- [10] 姜秀柱, 冯冬芹, 徐钊等. EPA 节点中的并行处理技术[J]. 计算机工程与应用, 2009, (3):87-90.
JIANG X Z, FENG D Q, XU Z, *et al.* Parallel processing technologies in EPA node-device[J]. Computer Engineering and Applications, 2009, (3):87-90.

作者简介:



姜秀柱 (1962-), 男, 江苏铜山人, 博士, 中国矿业大学副教授, 主要研究方向为工业以太网实时性、网络化控制系统、网络传输中的自动控制技术、程序设计方法学、工业控制计算机软件评测技术、电力系统计算机监测技术、变电所智能控制技术。



邓德玖 (1988-), 男, 山东平度人, 中国矿业大学硕士生, 主要研究方向为嵌入式系统设计、工业动画软件开发。



冯冬芹 (1968-), 男, 江苏兴化人, 博士, 浙江大学教授, 主要研究方向为工业通信网络(包括现场总线、工业以太网)、工业控制系统智能仪器仪表等。