

# EPA 网络控制系统时延特性分析

刘 宁<sup>1</sup>, 仲崇权<sup>2</sup>

LIU Ning<sup>1</sup>, ZHONG Chong-quan<sup>2</sup>

1.大连理工大学 机械工程学院, 辽宁 大连 116023

2.大连理工大学 电信学院 辽宁 大连 116023

1.School of Mechanical Engineering, Dalian University of Technology, Dalian, Liaoning 116023, China

2.School of Electronic and Information Engineering, Dalian University of Technology, Dalian, Liaoning 116023, China

E-mail: lincn05@sina.com.cn

**LIU Ning, ZHONG Chong-quan. Analysis on network delay in NCS based on EPA. Computer Engineering and Applications, 2009, 45(3): 30-34.**

**Abstract:** EPA (Ethernet for Plant Automation) resolves the nondeterministic problem of Ethernet and accomplishes real-time communication through micro-segment topology and deterministic scheduling mechanism. As a type of NCS, network delay is a very important factor that influences the performance of EPA system. On the basis of the analysis on the constitution of EPA messages and the information transmission regularity in a sub-segment, the components of EPA information network delay are studied. The queue delay at EPA-CSME (EPA Communication Schedule Management Entity) that is the most important component of EPA information network delay is studied through analyzing EPA deterministic scheduling mechanism. The formulas for the queue delay of periodic messages and nonperiodic messages are presented and the formulas for the configuration about the time slice for periodic messages and nonperiodic messages are given. At last, an example is presented to validate the analysis on the queue delay of EPA system and the deterministic scheduling mechanism. According to the analysis in this paper, the methods to reduce EPA network delay are proposed.

**Key words:** Ethernet for Plant Automation (EPA) system; Networked Control System (NCS); network delay

**摘 要:** EPA (Ethernet for Plant Automation) 通过微网段划分和确定性调度策略解决了以太网的非确定性问题, 实现了信息的实时传输。作为一种实时网络控制系统, 网络时延特性是影响 EPA 控制性能的关键因素。在分析 EPA 信息结构和信息传输规律的基础上, 研究了 EPA 微网段中信息传输网络时延的构成和各部分时延的特性。通过分析确定性调度策略, 对网络时延各部分中最重要的通信调度管理实体排队时延部分进行了重点研究, 推导了周期报文和非周期报文排队时延的数学表达式, 还建立了确定周期报文发送时间片和非周期报文发送时间片的数学模型。最后通过一个实例对相关分析进行了验证, 找到了制约 EPA 网络时延特性的关键因素并提出了解决方案。

**关键词:** 工业以太网; 网络控制系统; 网络时延

**DOI:** 10.3778/j.issn.1002-8331.2009.03.008 **文章编号:** 1002-8331(2009)03-0030-05 **文献标识码:** A **中图分类号:** TP393

通过计算机网络和总线将传感器、执行器和控制单元作为网络节点连接起来共同完成控制任务的系统被称为网络控制系统(NCS)<sup>[1-2]</sup>。EPA (Ethernet for Plant Automation) 是在国家“863”计划支持下, 由中国自主提出的基于实时以太网的网络控制系统解决方案, 是中国唯一拥有自主知识产权的现场总线国际标准。目前, EPA 已被正式列为现场总线国际标准 IEC61158 第四版中的第十四类型和与 IEC61158 相配套的实时以太网应用行规国际标准 IEC61784-2 中的第十四应用行规族(CommonProfileFamily14, CPF14)<sup>[3]</sup>。在实时网络控制系统中, 设备或者任务之间传输数据必须在一个确定的时间延迟内完

成才能确保平滑控制<sup>[4]</sup>。因此, 工业应用对 EPA 系统的端到端网络时延具有十分严格的要求。

分析 EPA 的确定性通信调度特点, 研究其网络时延特性, 是合理使用 EPA 系统满足工业现场实时要求和性能改进研究的必由之路。目前对 EPA 的研究主要集中在工程应用方面, 包括介绍 EPA 的系统结构、数据链路层协议和确定性调度策略、应用层服务定义以及设备描述规范等<sup>[5]</sup>; 阐述工业以太网和实时以太网的概念、特征和 IEC61784-2 和 IEC61158 中实时以太网标准化现状及其发展趋势<sup>[3, 6-7]</sup>; 分析以太网在工业应用中的实时特性和 EPA 系统的网络体系结构与 EPA 协议栈的工

**基金项目:** 国家高技术研究发展计划(863)(the National High-Tech Research and Development Plan of China under Grant No.2006AA040301-4)。

**作者简介:** 刘宁(1977-), 男, 博士生, 主要研究方向为工业控制网络和计算机网络的实时性研究; 仲崇权(1966-), 男, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为工业控制网络技术、检测技术和嵌入式应用技术。

**收稿日期:** 2008-09-26 **修回日期:** 2008-10-27

作原理<sup>[8-9]</sup>;研究 EPA 设备实时性和一致性的测试方案和评判方法<sup>[10-11]</sup>;等等。但 EPA 理论方面的研究才刚刚起步,距离一个完善的体系相去甚远,关于信息传输网络时延方面的分析还是空白。为了进一步提高 EPA 的实时通信能力,对其端到端网络时延特性进行分析十分必要。

### 1 EPA 系统确定性调度策略

由于工业过程中信息通信的多样性和信息实时通信的重要性,为了达到控制与监控等任务的要求,EPA 明确区分周期数据和非周期数据,并分别给出各自不同的控制策略。周期数据是指与过程有关的数据,如需要按控制回路的控制周期传输的测量值、控制值,或功能块输入、输出之间需要按周期更新的数据。非周期数据是指用于以非周期方式在两个通信伙伴间传输的数据,如程序的上下载数据、变量读写数据、事件通知、趋势报告等数据,以及诸如 ARP、RARP、HTTP、FTP 等应用数据<sup>[5]</sup>。

EPA 采用微网段划分和确定性通信调度策略,解决了以太网通信的不确定性问题。根据通信关系,EPA 系统将控制现场划分为若干个微网段,每个微网段通过一个 EPA 网桥互相分隔,将本区域内设备间的通信流量限制在本区域内;不同微网段间的通信由 EPA 网桥进行转发,避免广播风暴的发生。在一个微网段内,EPA 在 MAC 层上增加了一个通信调度管理实体,简称 EPA-CSME (Communication Schedule Management Entity),用于确定性通信调度管理。EPA-CSME 采用分时发送机制,按预先组态的调度方案,对 EPA 设备向网络上发送的周期数据报文与非周期数据报文发送时间进行控制<sup>[5]</sup>。

如图 1 所示,在一个 EPA 微网段内,所有 EPA 设备的通信均按周期进行,完成一个通信周期所需的时间  $T$  称为一个通信宏周期。通信宏周期  $T$  分为两个阶段,第一阶段为周期报文发送阶段  $T_p$ ,第二个阶段为非周期报文发送阶段  $T_n$ 。在阶段  $T_p$ ,每个设备向网络上发送的报文是包含周期数据的报文。EPA 标准中文报文的优先级分为 6 级,即 0~5,周期报文的发送优先级最高,为 0 级。在阶段  $T_n$ ,每个设备向网络上发送的报文是包含非周期数据的报文。

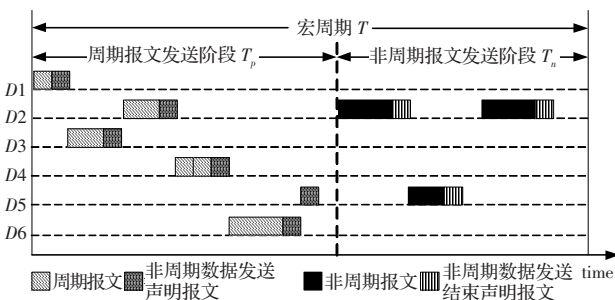


图 1 EPA 通信调度

一个 EPA 设备的确定性通信是通过通信调度管理实体 EPA-CSME 的 4 个状态以及状态之间的转换来实现的,这 4 个状态包括:Standby、Ready、PeriodicDataSending、NonPeriodicDataSending。EPA-CSME 分别在 PeriodicDataSending 状态和 NonPeriodicDataSending 状态发送周期数据报文和非周期数据报文。

当 EPA-CSME 检测到本地设备发送周期报文的时间到时,就将当前状态改变为 PeriodicDataSending 状态。EPA-CSME 处于此状态时,首先检查有无优先级为 0 的报文,如果没有,则

发送非周期数据声明报文(NPDA 报文)。否则,就将需要在此时发送的 DLS\_User DATA 依次发送到网络上,然后再发送 NPDA 报文,并将其当前状态改变为 Ready<sup>[5]</sup>。

当 EPA\_CSME 检测到一个通信宏周期内非周期报文传输开始时间到,或者本地设备接收到远程设备发送的非周期数据发送结束声明报文(ENPDA 报文)时,EPA 通信调度管理实体 EPA\_CSME 状态改变为 NonPeriodicDataSending 状态<sup>[5]</sup>。当 EPA\_CSME 处于 NonPeriodicDataSending 状态时,则根据其非周期报文的优先级高低、设备 IP 地址大小以及时间有效方式进行竞争发送。每个 EPA 设备都维护一个非周期报文发送管理队列,EPA\_CSME 通过检索这个队列来判断取得发送权的设备,拥有当前最高优先级报文的设备中 IP 地址最小的设备取得发送权。设备取得发送权后,如果宏周期剩余时间足够,则发送报文,如果宏周期剩余时间不够,则直接交出发送权;设备发完报文后,就检查管理队列判断能否保留发送权,如果能保留且宏周期剩余时间足够,则继续发送报文,否则就将发送权交出。设备通过发送 ENPDA 报文来通知其他设备发送权已交出,其他设备 EPA\_CSME 收到后就进入 NonPeriodicDataSending 状态进行下一轮非周期数据发送权的竞争。

### 2 EPA 报文结构分析

EPA 支持 IEC8802-3 和以太网封装(DIX Ethernet V2 标准)两种帧格式,由于 DIX Ethernet V2 标准应用广泛,在此只分析这一种。如图 2 所示,EPA 通过向 IEEE 注册分配的特定值(0x88BC),采用以太网帧格式中长度/类型(LENGTH/TYPE)字段标识其报文。EPA 应用访问实体与系统管理实体的报文均采用 UDP/IP 协议传送,前同步码、目的地址、源地址和类型字段是 DIX Ethernet V2 标准的附加字段。在 EPA 报文中,IP Header 是 IP 首部,长度为 20 个字节;UDP Header 是 UDP 首部,长度为 8 字节;EPA AppDATA 是指 EPA 应用层数据;CRC 是循环冗余校验和(Cyclic Redundancy Check),长度为 4 字节;DATA\_UNIT 是数据单元,最小长度为 46 字节,所以 EPA 系统中不存在以太网最小帧长问题。

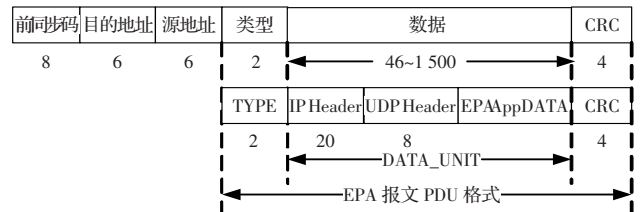


图 2 EPA 采用 DIX Ethernet V2 标准和 UDP/IP 协议的报文格式

由图 2 可见,当采用 DIX Ethernet V2 标准和 UDP/IP 协议时,EPA 报文的附加字段长度  $L_c$  等于字段长度之和:

$$L_c = L_p + L_d + L_s + L_t + L_r + L_l + L_u = 54 \text{ byte} \quad (1)$$

式中  $L_p$ 、 $L_d$ 、 $L_s$ 、 $L_t$ 、 $L_r$ 、 $L_l$  和  $L_u$  分别表示帧的前同步码、目的地址、源地址、类型、IP 首部、UDP 首部和 CRC 字段的长度。

一个 EPA 报文的帧长度  $L$  为 EPA 应用层数据长度  $L_A$  和其协议附加字段  $L_c$  之和,如公式(2)所示:

$$L = L_A + L_c = L_A + 54 \text{ byte} \quad (2)$$

NPDA 报文格式如图 3 所示。NPMA\_TAG 长度为 1 个字节,值为 0x20。PRI 长度为 1 个字节。PAD 是填充字符,长度为 44 个字节,取值全为 0x20。其他字段的意义和长度与 EPA 报

文 PDU 格式的一样。所以, NPDA 报文的帧长度  $L_{ja}$  如公式(3)所示:

$$L_{ja} = L_c + L_N + L_P + L_D = 100 \text{ byte} \quad (3)$$

式中的  $L_N$ 、 $L_P$ 、 $L_D$  分别表示字段 NPMA\_TAG、PRI 和 PAD 的长度。

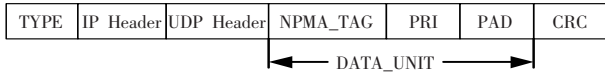


图3 NPDA 报文格式

ENPDA 报文格式如图 4 所示。ENPMTA\_TAG 字段长度为 1 个字节, 值为 0x21。PRI 字段长度为 1 个字节。其他字段与 NPDA 报文格式中一样。根据各字段长度, 可以得到 ENPDA 报文的帧长度  $L_{jc}$ :

$$L_{jc} = L_c + L_E + L_P + L_D = 100 \text{ byte} \quad (4)$$

式中的  $L_E$ 、 $L_P$ 、 $L_A$  分别表示字段 ENPMA\_TAG、PRI 和 PAD 的长度。

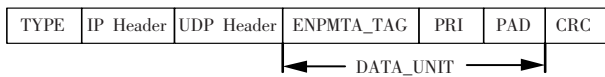


图4 ENPDA 报文格式

### 3 EPA 系统的网络时延分析

在 NCS 中, 信息传输过程的实质是网络上的某设备(节点)由任务产生发送信息, 经过各层协议的封装解析并通过网络达到另一个设备的任务, 网络时延是由这个过程产生的<sup>[2]</sup>。如图 5, EPA 微网段中一个节点的信息到达另一个节点的端到端时延按信息的传输流程分为如下几部分: (1) 处理时延  $t_1$ ; (2) 排队时延  $t_2$ ; (3) 传输时延  $t_3$ ; (4) 接收时延  $t_4$ 。若总时延时间为  $t_d$ , 则  $t_d = t_1 + t_2 + t_3 + t_4$ 。

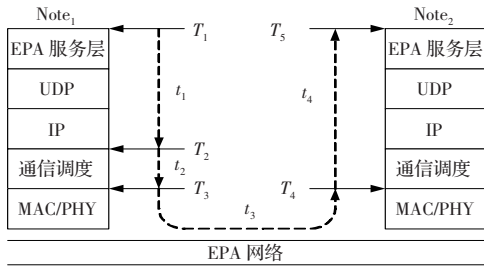


图5 EPA 网络时延组成

处理时延  $t_1$  是发送端产生待发送数据信息及其在协议栈中的处理时延, EPA 协议栈包括 EPA 应用层、UDP 层和 IP 层, 该时延依赖发送端主机的软件和处理器/存储器的速度, 系统给定时是可以预测的。

传输时延  $t_3$  是报文在网络上传输的时延, 可由公式  $t_3 = s_1 + s_2 + s_3 + s_4$  确定。其中  $s_1$  是报文被发送端的 MAC 层和 PHY 层处理的时延;  $s_2$  是报文的发送时延, 可由报文长度  $L$  和网络发送 1 bit 的时间  $\tau$  确定 ( $s_2 = L \cdot 8 \cdot \tau$ );  $s_3$  是电磁波在电缆中传播的时延, 可由电缆长度  $l$  和电磁波在电缆中传播的速度  $v$  确定 ( $s_3 = l/v$ );  $s_4$  是交换机的时延, 可由报文发送端到接收端之间的交换机个数  $n$  和交换机的交换时延确定 ( $s_4 = s_d \cdot n$ )。

接收时延  $t_4$  是接收端对报文进行解析还原并传递给目的

任务的时延, 其值取决于接收站的软件和处理器/存储器的速度以及处理中断的时间, 其值在系统给定时也是可以预测的。

以上几个时延也存在于其他现场总线中并且现场总线间差别不大, 主要由现场设备和网络设备的软硬件性能决定, 具有可预测性。网络时延各部分中比较特殊的是排队时延  $t_2$ , 即报文在链路层中等待发送的时延, 该时延由链路层调度策略和网络负载决定, 由于各种现场总线的链路层调度机制不同, 不同现场总线间存在较大差异。在普通以太网中由于采用 CSMA/CD 进行总线访问并且用 1 坚持 BEB 算法处理冲突, 使  $t_2$  带有很大不确定性, 基于普通以太网的网络控制系统时延的不确定性主要来自链路层的等待时延。但是在 EPA 系统中, 由于通过确定性通信调度策略来调度微网段中的报文发送, 能够避免冲突, 所以能够实现传输的确定性和实时性。针对特定系统的软硬件性能, 根据确定的网络负载情况对确定性调度策略进行分析, 就可以预测微网段中报文传输的 EPA\_CSME 排队时延  $t_2$ 。由此可见, 分析 EPA 确定性调度策略, 研究排队时延  $t_2$  的产生机理和变化规律, 是研究 EPA 系统网络时延的关键环节。

### 4 EPA 系统的排队时延分析

设备检测本地设备周期数据传输和非周期数据传输开始时间是根据公式  $\text{MOD}(T_c, T) = ST$  和  $\text{MOD}(T_c, T) = NPT$  实现的, 其中  $T_c$  为本地当前时间,  $ST$  和  $NPT$  分别为周期报文发送时间偏离量和非周期报文发送时间偏离量。在一个确定的微网段中, 周期数据报文的发送具有时间确定性。因为非周期数据如报警信息、事件通知等都具有随机性, 所以非周期数据的网络负载是不能准确确定的。假设一个微网段中有  $n$  个站, 在一个宏周期中第  $i$  个站发送的周期数据报文数为  $p_i$ , 非周期数据报文为  $q_i$ , 非周期数据发送声明报文为  $a_i$ , ENPDA 报文数为  $b_i$ 。则根据第 1 章所述, 第  $i$  个站发送的非周期数据发送声明报文数为:  $a_i = 1$ 。

在  $T_p$  阶段, 设备发送的周期数据网络负载确定, 那么该设备  $T_p$  阶段所占用的时间  $T_{pi}$  就可以根据确定性调度策略和发送周期数据的信息量确定, 有如下关系式:

$$T_{pi} = \sum_{j=1}^{p_i} L_j \cdot 8 \cdot \tau + p_i \cdot \tau_0 + p_i \cdot l/v + a_i \cdot L_{ja} \cdot 8 \cdot \tau + a_i \cdot \tau_0 + a_i \cdot l/v \quad (5)$$

式中  $L_j$  为第  $i$  个发送的设备所发送的第  $j$  个周期数据报文的帧长度;  $\tau_0$  为帧间隙时间。

同理, 一个设备  $T_n$  阶段占用的时间  $T_{ni}$  也可以根据其非周期数据调度策略和信息量得出, 如下式:

$$T_{ni} = \sum_{j=1}^{p_i} L_j \cdot 8 \cdot \tau + q_i \cdot \tau_0 + q_i \cdot l/v + b_i \cdot L_{jc} \cdot 8 \cdot \tau + b_i \cdot \tau_0 + b_i \cdot l/v \quad (6)$$

式中  $L_j$  为该设备所发送的第  $j$  个非周期数据报文的帧长度。

一个通信宏周期中  $T_p$  阶段的占用时间  $T_{pi}$  最小应该等于微网段中各个设备在  $T_p$  阶段需用的时间之和, 即:  $T_{pi} = \sum_{i=1}^n T_{pi}$ 。  $T_n$  阶段占用时间  $T_{ni}$  最小应等于微网段中所有设备在  $T_n$  阶段占用时间之和, 即:  $T_{ni} = \sum_{i=1}^n T_{ni}$ 。组态时  $NPT$  的确定应以  $T_{pi}$  为依据, 其值应不小于  $T_{pi}$ , 否则非周期数据的发送就会与周期数据的发送产生冲突; 而通信宏周期的确定应以  $T_{pi}$  和  $T_{ni}$  为依据, 即:

$T \geq T_{pi} + T_{nl}$ , 否则就不能保证微网段内报文的实时发送。

EPA 微网段内设备开始发送周期数据报文是由预先组态的时间偏离量来确定的。在设定时,第  $i$  个发送设备的组态时间偏离量  $ST_i$  必须保证前一个设备将其全部周期数据报文和 NPDA 报文发送完毕。 $ST_i$  的设定原则如下式所示:

$$ST_i \geq \begin{cases} ST_{i-1} + T_{pi-1} & i > 1 \\ 0 & i = 1 \end{cases} \quad (7)$$

式中,  $ST_{i-1}$  是前一个设备的组态时间偏离量;  $T_{pi-1}$  是前一个设备占用的时间。如果现场组态时设备的时间偏离量小于式中计算出的结果,就会与其它设备的发送产生冲突。

在  $T_p$  阶段,第  $i$  个发送的设备发送的第  $m$  个周期数据报文报文的排队时延  $t_{2p}$  等于从其进入队列到开始发送在队列中等待的时间,这个时延取决于其进队时间  $T_r$ 、该设备的组态时间偏离量  $ST_i$  和该设备中先与它发送的周期数据的信息量。如下式所示:

$$t_{2p} = \begin{cases} D_p + T_i \\ D_p \end{cases} \quad (8)$$

式中  $T_i$  为设备中先于报文  $m$  发送的报文所占用的时间:

$$T_i = \begin{cases} \sum_{j=1}^{m-1} (L_j \cdot 8 \cdot \tau) + (m-1) \cdot (llv + \tau_0) & m > 1 \\ 0 & m = 1 \end{cases}$$

$D_p$  为报文等待本设备周期报文发送时段所造成的时延值:

$$D_p = \begin{cases} ST_i - \text{MOD}(T_r, T) & \text{MOD}(T_r, T) \leq ST_i + T_i \\ T + ST_i - \text{MOD}(T_r, T) & \text{MOD}(T_r, T) > ST_i + T_i \end{cases}$$

由公式(8)可见,设备的周期数据报文如果错过了组态发送时间,就必须延迟到下一宏周期发送,产生较大的排队时延。

非周期数据报文的排队时延是由该报文的优先级、IP 地址大小和时间有效性决定的。如果不考虑时间有效性因素,一个报文的排队时延就等于它进入队列后在  $T_p$  阶段等待的时间和在  $T_n$  非周期报文发送阶段先于它发送的非周期数据报文和 ENPDA 报文占用时间。如果考虑时间有效性问题,还要考虑由于时间有效性导致的时延。假设在  $T_n$  阶段,一个非周期数据报文在发送之前微网段内已经发送了  $p$  个非周期数据报文和  $q$  个 ENPDA 报文,那么该报文的排队时延  $t_{2n}$  就如下式所示:

$$t_{2n} = D_p + \sum_{j=1}^p L_j \cdot 8 \cdot \tau + p \cdot \tau_0 + p \cdot llv + q \cdot L_{fc} \cdot 8 \cdot \tau + q \cdot \tau_0 + q \cdot llv \quad (9)$$

$$D_p = k \cdot T + NPT - \text{MOD}(T_r, T) \quad (k \in \text{整数})$$

式中  $L_j$  为本宏周期第  $j$  个发送的非周期数据报文的长度。 $k$  为由于时间有效性而推迟发送的宏周期的数目;  $T_r$  为进队时间;  $T$  为宏周期。由公式(9)可见,如果发送非周期数据报文的时间有效性不能满足,将延迟到下一宏周期而产生较大时延。

### 5 实例分析

以下通过一个实例来对 EPA 确定性调度策略和网络时延分析进行说明,可以反映 EPA 调度策略对其信息发送排队时延的影响。

在网络负载情况已经确知的一个微网段中,有 4 台现场设备。假设微网段以太网速度为 10 M/s,帧间隙时间  $\tau_0$  取最小值为 9.6  $\mu$ s。每台设备中在  $\text{MOD}(T_c, T) = 0$  时,每隔 2 ms 产生一

个应用层数据长度为 74 字节的周期数据报文进入发送队列(由公式(2)可知帧长为 128 字节)。由于电磁波在 1 km 的电缆的传播时延约为 5  $\mu$ s,设备间传输距离  $l$  在 10 M 以太网段上最大距离不超过 200 m,这样传播时延( $l/v$ )可以近似取值为 1  $\mu$ s。在一个宏周期中,每个设备产生的周期数据报文数为 15 个,由公式(5)可以得出各现场设备周期数据报文发送占用时间为 1.77 ms,应用公式(8)可以得出周期数据报文的排队时延。表 1、表 2 分别列出了实例中微网段设备报文和实时参数组态情况跟计算得出的周期数据报文排队时延。

表 1 报文发送和相关组态情况

设备	IP 地址	ST/ms	组态时间 B/ms	NPT/ms	宏周期/ms
1	192.168.0.1	0	5		
2	192.168.0.2	5	5	20	30
3	192.168.0.3	10	5		
4	192.168.0.4	15	5		

表 2 周期数据报文排队时延

报文	设备 1/ms	设备 2/ms	设备 3/ms	设备 4/ms
1	1.568	6.232	11.008	15.672
2	28.000	4.344	9.120	13.784
3	26.112	2.456	7.232	11.896
4	24.224	0.568	5.344	10.008
5	22.336	27.000	3.456	8.120
6	20.448	25.112	1.568	6.232
7	18.560	23.224	28.000	4.344
8	16.672	21.336	26.112	2.456
9	14.784	19.448	24.224	0.568
10	12.896	17.560	22.336	27.000
11	11.008	15.672	20.448	25.112
12	9.120	13.784	18.560	23.224
13	7.232	11.896	16.672	21.336
14	5.344	10.008	14.784	19.448
15	3.456	8.120	12.896	17.560

假设该微网段中的非周期数据报文是在  $\text{MOD}(T_c, T) = 0$  时进队,报文应用层长度与周期数据报文长度一样为 74 字节,那么根据公式(9)就可以得出非周期数据报文的排队时延。微网段中产生的非周期数据报文的排队时延如表 3 所示。

表 3 非周期数据报文排队时延

报文	设备	优先级	排队延迟/ms
1	1	1	20.000 0
2	1	1	20.112 0
ENPDA 报文	1		
3	4	1	20.313 6
ENPDA 报文	4		
4	2	2	20.515 2
ENPDA 报文	2		
5	3	2	20.716 8
ENPDA 报文	3		
6	2	3	20.918 4
ENPDA 报文	2		
7	3	3	21.120 0
ENPDA 报文	3		
8	2	4	21.321 6
ENPDA 报文	2		

由表 2 可见,周期数据报文和非周期数据报文的排队时延由报文进队时间,确定性调度策略和网络负载决定。设备周期数据发送开始以后进队的报文排队时延有一个跃迁,然后再递减。这是因为设备到达周期数据发送时间时,EPA\_CSME 变为 PeriodicDataSending,发送队列中的待发送报文,发完后发送 NPDA 报文并变为 ready 状态。此后即便组态时间片没用完也不再发送,再进队的报文必须延迟到下一宏周期发送,这样就导致较大排队时延的产生。由表 3 可见,优先级高,IP 地址小的非周期数据报文可以优先发送,所以其排队时延就要比同时进队的其他报文要小,但其主要时延也来自于等待非周期数据发送时间片到来造成的时延。所以发送时间片的组态情况对 EPA 报文发送网络时延影响较大,在本实例中,周期数据发送占用时间只有 1.77 ms,而非周期数据发送占用时间为 1.523 2 ms,都远小于组态时间片。

由此可以得出结论,EPA 微网段中周期数据报文和非周期数据报文等待组态发送时间片到来的时延是产生较大网络时延的关键原因,该时延受周期数据和非周期数据组态时间片偏量的影响。

## 6 结束语

研究了 EPA 报文传输的网络时延,在对 EPA 系统的报文结构和微网段内信息发送规律进行探讨的基础上,对其数据发送的网络时延特别是通信调度管理实体的排队时延进行了分析,建立了数学模型,还建立了确定周期数据报文和非周期数据报文发送时间片偏量的原理以及周期报文发送阶段、非周期报文发送阶段占用时间等重要实时性能参数的数学表达式,找到了制约 EPA 网络时延特性的瓶颈。提高 EPA 网络时延特性,可以从两个角度来进行改进。

一方面应该保证报文在其发送时间片到来之前进入队列,使报文能在本宏周期得到发送。此方法对于周期数据报文非常有效,由于周期数据报文大多是对用户层功能块服务的,承载的是功能块的输出数据。只要保证功能块输出数据能够先于周期数据发送时间片到来之前形成报文进入队列,就能使报文在本周期得到发送。这样仅仅对 EPA 链路层报文发送进行调度是不够的,还应该明确用户层功能块执行开始时间的调度方案,使功能块的执行调度和链路层的报文发送调度能够协同进行。

另一方面应该对报文发送组态时间片的划分进行优化,提高组态时间片的利用率,减小报文在 EPA\_CSME 的排队等待时间。根据报文的信息量,精确计算出各个设备周期报文发送

的需求时间和微网段中非周期数据发送的需求时间,以此为依据进行各个设备周期数据发送时间偏离量的组态和微网段非周期数据发送时间偏离量的组态。对于周期数据,由于 EPA 系统周期数据发送的信息量由用户层功能块的组态情况确定,当功能块组态确定后,周期数据信息量即可确定;但是对于非周期数据,由于非周期数据的信息量具有随机性,对于非周期数据发送需求时间难以确定。所以最好的方案是利用动态统计优化配置机制实现周期数据报文和非周期数据报文发送时间片的自动优化调整来提高时间片的利用率。该方案中每个设备自动检测该设备组态周期数据发送时间片和微网段中组态非周期数据发送时间片的利用率,再通过各个设备的协调来进行,使时间片的划分能够实现自动优化。

本文的工作为 EPA 系统实时性能的进一步研究打下理论基础,也可以为现场中 EPA 系统的选择和组态提供参考,具有一定的现实意义。

## 参考文献:

- [1] Zhang W, Branicky M S, Phillips S M. Stability of networked control systems[J]. Control Systems Magazine, 2001, 21(1): 84-99.
- [2] 杨丽曼, 李运华, 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.
- [3] Karlsruhe W L. Real-time Ethernet in IEC 61784-2 and IEC 61158 series[C]//IEEE International Conference on Industrial Informatics, Singapore, 2006: 246-250.
- [4] Feng Dong-qin, Huang Wen-jun, Jin Jian-xiang, et al. EPA-based open network control system[C]//The 4th International Conference on Control and Automation, Dalian, China, 2003: 976-980.
- [5] 国家质量技术监督局. GB/T 20171-2006 用于工业测量与控制系统的 EPA 系统结构与通信规范[S]. 北京: 中国标准出版社, 2006.
- [6] Felser M. Real-time Ethernet-industry prospective[J]. Proceedings of the IEEE, 2005, 93(6): 1118-1129.
- [7] 缪学勤. 论六种实时以太网的通信协议[J]. 自动化仪表, 2005, 26(4): 1-6.
- [8] 高路, 于海斌, 王宏, 等. EPA 网络体系结构[J]. 计算机工程, 2004, 30(17): 81-82.
- [9] 陈磊, 冯冬芹, 金建祥, 等. 以太网在工业应用中的实时特性研究[J]. 浙江大学学报: 工学版, 2004, 38(6): 670-675.
- [10] 李卓函, 仲崇权. 工业以太网 EPA 实时性测试方法研究[J]. 自动化仪表, 2006, 27(10): 4-6.
- [11] 王平, 王浩文, 易明华, 等. EPA 协议状态机的一致性测试方法及实现[J]. 计算机集成制造系统, 2007, 14(3): 621-624.

(上接 29 页)

获得了较好的求解结果与快速的收敛速度。下一步的工作将考虑如何选择算法中的各类参数为算法的实际工程奠定基础。

## 参考文献:

- [1] Eberhart R C, Kennedy J A. A new optimizer using particle swarm theory[C]//Proceedings of the 6th International Symposium on Micro-machine and Human Science, Nagoya, Japan, 1995: 39-43.
- [2] Krink T, Løvbjerg M. The life cycle model: combining particle swarm optimisation, genetic algorithms and hillClimbers[C]//LNCS 2439: Proc of the 7th ICPPS, 2002, 2439: 621-630.
- [3] Silva A, Costa E, Neves A. An empirical comparison of particle swarm and predator prey optimization[C]//LNCS 2464: Proc of the 13th I-ICAICS, 2002: 103-110.
- [4] He S, Wu Q H, Wen J Y, et al. A particle swarm optimizer with passive congregation[J]. BioSystems, 2004, 78: 135-147.
- [5] Niu B, Zhu Y L, He X X, et al. MCPSO: a multi-swarm cooperative particle swarm optimizer[J]. Applied Mathematics and Computation, 2007, 185(2): 1050-1062.
- [6] Angeline P J. Evolutionary optimization versus particle swarm optimization: philosophy and performance difference[C]//Proceedings of 7th Annual Conference on Evolutionary Programming, San Diego, USA, 1998: 601-610.