

提高 EPA 系统网络时延性能的方法

刘宁¹, 仲崇权², 林瑶瑶²

(1. 河南理工大学 机械与动力工程学院, 河南 焦作 454000; 2. 大连理工大学 控制科学与工程学院, 辽宁 大连 116024)

摘 要: 为了提高 EPA(Ethernet for plant automation)系统的网络诱导时延性能, 研究了系统中功能执行和网络通信的内在运行机理和相互作用机制, 提出了它们的协同方法。该方法通过给执行控制功能的用户层功能块和执行通信功能的链路层分组传输设定相互协同的时间片, 以及对功能块执行时间和次数的确定, 实现了 EPA 系统中控制与通信的协同。当设备巡回扫描周期较小或需要通信的功能块较多时, 能够有效降低 EPA 系统的网络负载, 提高网络诱导时延性能。

关键词: EPA; 网络控制系统; 网络诱导时延; 功能块; 数据传输

中图分类号: TP393.1

文献标识码: A

文章编号: 1000-436X(2014)08-0147-07

Method to improve the performance of network time delay of EPA system

LIU Ning¹, ZHONG Chong-quan², LIN Yao-yao²

(1. School of Mechanical and Power Engineering, Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454000, China;

2. School of Control Science and Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

Abstract: In order to improve the performance of network-induced time delay of EPA (Ethernet for plant automation) networked control systems, the interacting mechanism between the control and the communication in EPA system was studied and EPA-CS (EPA cooperative scheduling) method was presented. Through setting their mutually cooperative time slices for function blocks that executed the control tasks and data transmission that executed the communication tasks, and through determining the executing time and frequencies of control tasks in their time slices, the method could accomplish the cooperation between control tasks and communication tasks in EPA system. When the round scanning cycles of devices are very little or there are many function blocks that need network communication in system, the method can effectively reduce the network load to improve the performance of network-induced time delay of EPA system.

Key words: EPA; networked control system; network-induced time delay; function block; data transmission

1 引言

EPA(Ethernet for plant automation)网络控制系统指的是通过 EPA 实时以太网将传感器、控制器和执行器连接起来形成闭环的控制系统^[1-4]。在网络控制系统中, 由于网络的介入使信息传输产生的网络诱导时延对系统控制性能的影响至关重要^[5,6]。本文从网络服务质量角度研究 EPA 系统网络诱导时

延的部分成果^[7-9]。

作为一种网络控制系统, EPA 系统通过将控制功能下放到现场设备的功能块中来实现分布式测量与控制。构成控制回路的功能块分布在不同设备中, 通过 EPA 通信实现相互连接, 共同完成控制任务。这些功能块之间在执行次序上存在逻辑关系, 后继功能块只有成功接收前驱功能块通过 EPA 通信传来的输出数据才能有效执行。但是在 EPA 系统

收稿日期: 2013-05-07; 修回日期: 2014-03-26

基金项目: 国家高技术研究发展计划(“863”计划)基金资助项目(2013AA040303); 国家科技支撑计划基金资助项目(2012BAH68F02, SQ2015BA0400812); 河南理工大学博士科研启动基金资助项目(B2012-036)

Foundation Items: The National High Technology Research and Development Program of China(863 Program) (2013AA040303); The National Key Technology Research and Development Program of China (2012BAH68F02, SQ2015BA0400812); Research Fund for the Doctoral Program of Henan Polytechnic University (B2012-036)

中，设备的通信只有在预定的时间片内才能实现，这就出现了以下问题。

EPA 系统的通信周期为预设的通信宏周期，功能块的执行周期为设备的巡回扫描周期。由于巡回扫描周期非常小，所以功能块在通信宏周期内会多次执行，每次执行都会产生相应分组进入链路层的发送队列。当通信时间片到达时，队列中的分组会依照先进先出原则发送至后继功能块，造成先发数据被后发数据覆盖而失效，称为数据滤除现象。该现象不必要地增大了网络负载，降低了网络诱导时延性能^[7-9]。此外，在 EPA 系统中，如果周期分组在 N 分组(非周期数据发送声明分组)开始发送之后进入发送队列，就会延迟到下个宏周期发送而降低网络诱导时延性能^[8]。因此，在通信宏周期中，功能块的执行应该先期于 N 分组的发送。

由此可见，EPA 系统中功能块执行和数据传输的协同对网络诱导时延具有非常重要的影响，本文提出一种 EPA-CS(EPA cooperative scheduling)方法，通过实现它们的协同，能够降低网络负载，提高网络诱导时延性能。

2 EPA-CS 方法

EPA 系统中，每个设备都执行一个控制任务和一个通信任务。控制任务指的是设备中的所有功能块，这些功能块功能不同，所属控制回路不同，但是它们都随着程序顺次往复执行，构成一个调度单元；通信任务指的是周期分组的传输，执行确定性调度策略，也构成一个调度单元。EPA 设备的功能即通过执行这 2 个任务完成。EPA-CS 方法就是对设备中的这 2 个任务进行如下协同：分别为通信任

务和控制任务设定交替往复的通信时间片和控制时间片，保证控制任务在其时间片内只执行一次。

图 1 为 EPA-CS 方法的原理，通信时间片即为预设的周期数据发送时间片，通信宏周期的其余部分则为控制时间片，即控制时间片的开始时刻为通信时间片的截止时刻，控制时间片的截止时刻则为下个通信时间片的开始时刻。由于方法规定控制任务在其时间片内只执行一次，而且产生的周期分组必须在通信时间片内才能发送，因此控制任务具有如下特点：首先，设备对其控制任务和通信任务交替往复执行，且控制任务的执行时间为设备的控制时间片，由此保证在每个通信宏周期中控制任务都在通信任务开始之前执行并将分组放入发送队列；其次，通信任务与控制任务的执行以通信宏周期实现了周期同步，由此避免了控制任务在通信宏周期中无效执行的问题。

3 网络诱导时延分析

图 2 所示为一个 EPA 控制回路，由分布于 3 个设备中的 5 个功能块 FB1~FB5 构成，该回路执行过程如下：①信号检测，即检测设备对被控量的信号进行检测的过程，时延记为 t_1 ；②检测处理，即检测设备中的 FB1 和 FB2 处理检测信号的过程，时延记为 t_2 ；③检测通信，即检测设备将处理结果通过 EPA 通信传输给控制设备的过程，时延记为 t_3 ；④控制处理，即控制设备中的 FB3 和 FB4 处理 FB2 所传数据的过程，时延记为 t_4 ；⑤控制通信，即控制设备将处理结果通过 EPA 通信传输给执行设备的过程，时延记为 t_5 ；⑥执行处理，即执行设备中的 FB5 处理控制设备所传数据的过程，时延记为 t_6 ；

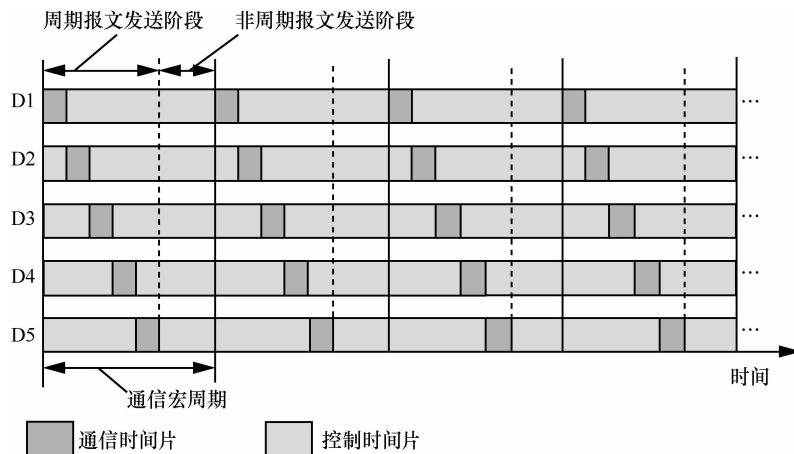


图 1 EPA-CS 方法原理

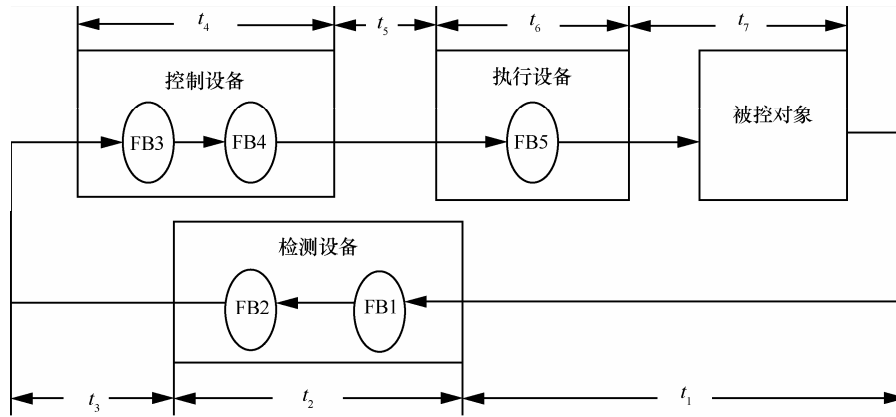


图 2 EPA 控制回路

⑦执行作用，即被控对象对执行设备输出的反应过程，时延记为 t_7 。其中， t_1 和 t_7 由现场环境和被控对象特性决定，而网络诱导时延 τ 由 $t_2 \sim t_6$ 组成，如式(1)所示。

$$\tau = t_2 + t_3 + t_4 + t_5 + t_6 \quad (1)$$

由于 EPA-CS 方法使控制任务在一个控制时间片中只执行一次，所以 2 个连接功能块的执行分为 2 种模式，第一种是 2 个功能块位于同一设备中，它们直接在设备内部完成数据交换，无需 EPA 通信，可以在一个通信宏周期中由设备控制任务的一次执行完成，第二种是 2 个功能块位于不同设备中，它们必须通过 EPA 通信完成数据传输，因此对数据的处理需要在 2 个通信宏周期中由 2 个设备中的控制任务分别执行完成。由此可见，除了所有功能块都集中在一个设备中的情况，控制回路的网络诱导时延必定包含多个通信宏周期。以下根据 EPA 控制回路的执行过程来分析网络诱导时延各个组成部分的特性。

首先，由检测设备产生的时延为 t_2 和 t_3 。由于 FB1 和 FB2 位于同一设备中，它们之间的数据传输不需要 EPA 通信。检测设备的控制任务在一个通信宏周期中一次执行即可将其完成，所以 t_2 为检测设备的控制时间片。将检测设备的发送次序记为 k ，其控制时间片记为 F_k ，则有 $t_2 = F_k$ 。此后，当通信时间片到达时，检测设备将 FB2 的输出数据传输到控制设备；当控制设备的控制时间片到达时，控制设备中的 FB3 和 FB4 依次对其处理。因此， t_3 即为由检测设备传输数据及数据到达控制设备后等待控制时间片所产生的时延。其中，数据等待控制时间片有 2 种模式，第一种模式称为顺站模式，指的是 2 个连接功能块的逻辑次序与其设备的通信次序前后一致。该模式下，数据到达目的设备后，目的

设备在该通信宏周期的控制时间片到达时对其处理。该模式的时延称为顺站时延。第二种模式称为逆站模式，指的是 2 个连接功能块的逻辑次序与其设备的通信次序前后相反。该模式下，数据到达目的设备时，设备控制任务已开始执行，所以无法更新后继功能块的输入数据，只能等到下个控制时间片才能处理。该模式的时延称为逆站时延。图 3 和图 4 分别为顺站模式和逆站模式控制回路的网络诱导时延。当 FB2 与 FB3 为顺站模式时，将控制设备的发送次序记为 l ，则 $k < l$ ，如图 3 所示， t_3 为发送次序介于检测设备与控制设备之间各设备的通信时间片之和，即 $t_3 = \sum_{i \in [k,l]} S_i$ (S_i 为设备 i 的通信时

间片)， $t_2 + t_3 = F_k + \sum_{i \in [k,l]} S_i = T + \sum_{i \in [k,l]} S_i$ ；逆站模式时， $k > l$ ，如图 4 所示，由于控制设备在下一个通信宏周期的控制时间片到达时，才能处理 FB2 传来的数据，因此 t_3 为通信宏周期减去发送次序介于检测设备与控制设备之间各设备的通信时间片之和，即 $t_3 = T - \sum_{i \in [l,k]} S_i$ ， $t_2 + t_3 = F_k + T - \sum_{i \in [l,k]} S_i = 2T - \sum_{i \in [l,k]} S_i$ 。

其次，由控制设备产生的时延为 t_4 和 t_5 。由于 FB3 与 FB4 都位于控制设备中，所以 t_4 为控制设备的控制时间片 F_l ，即 $t_4 = F_l$ 。此后，控制设备将 FB4 的处理结果通过 EPA 通信传输给执行设备的 FB5，因此 t_5 也分为顺站和逆站 2 种模式。当 FB4 与 FB5 为顺站模式时，将执行设备的通信次序记为 m ，则 $l < m$ ，如图 3 所示， $t_5 = \sum_{i \in [l,m]} S_i$ ， $t_4 + t_5 = F_l + \sum_{i \in [l,m]} S_i = T + \sum_{i \in [l,m]} S_i$ ；当逆站模式时， $l > m$ ，如图 4 所示， $t_5 = T - \sum_{i \in [m,l]} S_i$ ，

$$t_4 + t_5 = F_l + T - \sum_{i \in [m,l]} S_i = 2T - \sum_{i \in [m,l]} S_i$$

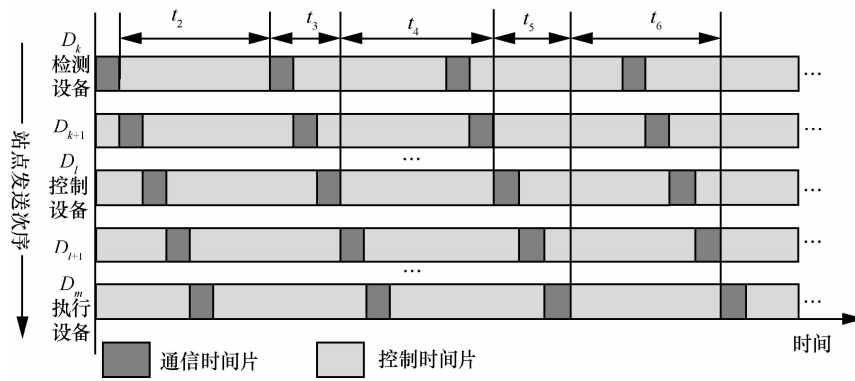


图 3 顺站模式控制回路的时延

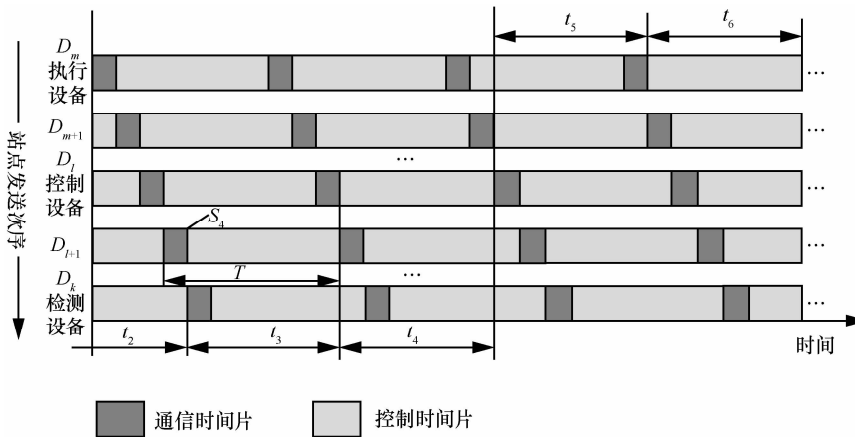


图 4 逆站模式控制回路的时延

最后, t_6 为执行设备的控制时间片 F_m , 即 $t_6=F_m$ 。
 $l < m$ 时, $t_4+t_5+t_6=T+\sum_{i \in (l,m)} S_i+F_m=2T+\sum_{i \in (l,m)} S_i$;
 $l > m$ 时, $t_4+t_5+t_6=2T-\sum_{i \in (m,l)} S_i+F_m=3T-\sum_{i \in (m,l)} S_i$ 。

综合以上内容, 将时延 $t_2 \sim t_6$ 代入式(1), 可得如下关系式。

$$\tau = t_2 + t_3 + t_4 + t_5 + t_6 = 3T + A_1 + A_2 \quad (2)$$

其中, A_1 和 A_2 分别由式(3)、式(4)求得。

$$A_1 = \begin{cases} \sum_{i \in (k,l]} S_i, k < l \\ T - \sum_{i \in (l,k]} S_i, k > l \end{cases} \quad (3)$$

$$A_2 = \begin{cases} \sum_{i \in (l,m)} S_i, l < m \\ T - \sum_{i \in [m,l]} S_i, l > m \end{cases} \quad (4)$$

根据上面的分析结果可得出, 一个控制回路的网络诱导时延主要取决于其功能块连接路径中需要 EPA 通信的最大次数(记为 g)和这些功能块的顺站和逆站情况, 如式(5)所示。

$$\tau = (g+1)T + \sum_{j=1}^g A_j \quad (5)$$

当 $j < g$ 和 $j = g$ 时, A_j 分别由式(6)与式(7)求得。

$$A_j = \begin{cases} \sum_{i \in (l_j, m_j]} S_i, l_j < m_j \\ T - \sum_{i \in (m_j, l_j]} S_i, l_j > m_j \end{cases} \quad (6)$$

$$A_j = \begin{cases} \sum_{i \in (l_j, m_j)} S_i, l_j < m_j \\ T - \sum_{i \in [m_j, l_j]} S_i, l_j > m_j \end{cases} \quad (7)$$

其中, l_j 和 m_j 分别为控制回路需要 EPA 通信次数最大的功能块连接路径中第 j 次通信的源设备和目的设备的通信次序, 当 $l_j < m_j$ 时, 2 个功能块为顺站模式, 否则为逆站模式。

对于控制回路来说, 为了保证控制性能, 其网络诱导时延不能超过所允许的最大值(网络时限 ζ), 即 $\tau \leq \zeta$, 代入式(5)~式(7)即可得到通信宏周期的设置要求。

$$T \leq \min \left(\frac{\zeta_i - \sum_{j=1}^{g_i} A_j}{g_i + 1} \right) \quad (8)$$

其中， ζ_i 为系统中第 i 个控制回路的网络时限， g_i 为该回路的功能块连接路径中 EPA 通信次数的最大值。

4 效果分析

以下通过对 EPA-CS 方法应用前系统的网络诱导时延性能分析证明其效果。

如前所述，EPA-CS 方法应用前，由于数据滤除现象的存在，功能块的有效执行周期并不是其巡回扫描周期，而是其有效数据到达后继功能块的时间间隔，即通信宏周期，设备的控制时间片也是通信宏周期除去其通信时间片的部分。然而，EPA-CS 方法应用前，控制任务可以在控制时间片多次执行，也可以在通信时间片多次执行。所以，对位于不同设备中的 2 个连接功能块来说，前驱功能块发送的数据到达目的设备时，不论该设备是位于控制时间片还是通信时间片，后继功能块都会在当前通信宏周期处理，但是由于通信必须在通信时间片内进行，所以处理结果必须等到下个通信时间片才能发送。根据以上特性，对式(5)~式(7)进行修正，去掉其中数据等待控制时间片所造成的时延，即可得出 EPA-CS 方法应用前控制回路的网络诱导时延 τ ，如式(9)所示。

$$\tau = (g + 1)T + \sum_{j=1}^g B_j \quad (9)$$

当 $j < g$ 和 $j = g$ 时， B_j 分别由式(10)与式(11)求得。

$$B_j = \begin{cases} \sum_{i \in (l_j, m_j)} S_i, l_j < m_j \\ T - \sum_{i \in [m_j, l_j]} S_i, l_j > m_j \end{cases} \quad (10)$$

$$B_j = \begin{cases} \sum_{i \in (l_j, m_j)} S_i - S_{m_j}, l_j < m_j \\ T - \sum_{i \in [m_j, l_j]} S_i - S_{m_j}, l_j > m_j \end{cases} \quad (11)$$

其中，式(9)~式(11)中各个变量的意义与式(5)~式(7)中相同。

比较式(5)~式(7)和式(9)~式(11)发现，如果设备的巡回扫描周期较大或需要通信的功能块较少，EPA-CS 方法并无优势，由于存在数据等待控制时间片的现象， A_j 比 B_j 还多一个通信时间片。但如果

设备的巡回扫描周期较小或需要通信的功能块较多，由于能够避免功能块的无效执行增大网络负载，EPA-CS 方法对于提高网络诱导时延性能就会效果显著。

5 效果实验

以下为 EPA-CS 方法的效果实验验证。如图 5 所示，实验平台包括 1 个上位机 PC、1 个 EPA 网桥、1 个测试设备 TE、1 个以太网集线器和 4 个 EPA 设备。TE 和 4 个 EPA 设备执行 EPA 确定性调度，组成 EPA 微网段，在 4 个 EPA 设备的通信协议栈中实现了 EPA-CS 方法和文献[9]中的 EPA-TSA 方法。实验原理即通过 EPA-TSA 方法在 EPA-CS 方法应用后对通信时间片的降低证明它降低网络负载，提高网络诱导时延性能的效果。

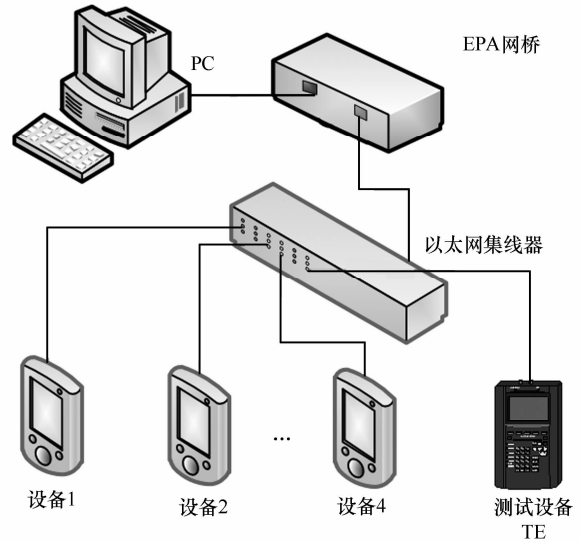


图 5 实验平台

如图 6 所示，实验系统中，构成 4 个控制回路的 16 个功能块分别位于 4 个 EPA 设备中。根据功能块逻辑关系可知，EPA-CS 方法应用时，设备 1 发送 2 个周期分组，设备 2 发送 1 个周期分组，设备 3 发送 3 个周期分组，设备 4 发送 1 个周期分组。而未用 EPA-CS 方法时，由于设备在通信宏周期中发送的分组取决于其扫描次数，因此无法确定。各设备的周期数据发送时间偏离量 S_T ，通信时间片调整最小值 P_A 和最大值 P_B ，非周期数据发送时间偏离量 S_N ，非周期数据发送时间片的调整最大值 N_A 和最小值 N_B ，以及通信宏周期 T 的设置如表 1 所示。

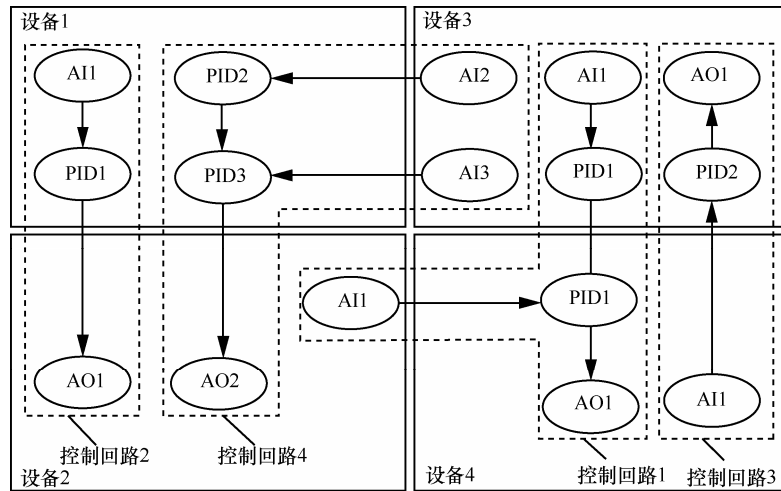


图 6 实验系统控制回路

表 1 通信时间片及调整范围设置

设备	S_T/ms	P_A/ms	P_B/ms	S_N/ms	N_A/ms	N_B/ms	T/ms
1	0	0.2	2				
2	2	0.2	2				
3	4	0.2	2	9	1	1	10
4	6	0.2	2				
TE	8	0.5	0.5				
端口	8.5	0.5	0.5				

表 2 时间片调整

设备	应用前 S/ms	应用后 S/ms	应用前 Q/ms	应用后 Q/ms	应用前 T/ms	应用后 T/ms
1	2.000	0.648				
2	1.274	0.482				
3	2.000	0.764				
4	1.263	0.437	1.000	1.000	8.537	4.367
TE	0.500	0.500				
端口	0.500	0.500				

由表 1 可见，TE 和测试端口的通信时间片以及非周期数据发送时间片都被锁定，保证通信宏周期的调整只与 EPA 设备的功能块通信网络负载相关。TE 通过接收 N 分组中的信息得到每个宏周期中各设备的通信时间片和非周期数据发送时间片，并通过 EPA 网桥转发给 PC 进行显示和存储。在 EPA-CS 方法应用前后各取 100 个宏周期的数据得出平均值，即可得到如表 2 所示的 EPA-TSA 方法调整结果。

如表 2 所示，EPA-CS 方法应用后设备 1~设备 4 的通信时间片相较于应用前分别降低了 67.6%、

61.2%、61.8%和 65.4%，通信宏周期降低了 48.8%。设备需要通信的次数越多，其通信时间片降低幅度越大。由于 EPA-TSA 方法对通信时间片的降低反映网络负载的降低，因此实验结果能够证明 EPA-CS 方法有效降低网络负载的效果。

根据表 2 中的数据，由式(5)~式(7)和式(9)~式(11)可得出 EPA-CS 方法应用前后各回路的网络诱导时延。如图 7 所示，方法应用后，控制回路 1~回路 4 的网络诱导时延分别降低了 46.7%、44.8%、41.6%和 41.2%。由此可见，EPA-CS 方法的应用使 EPA 系统的功能块执行和数据通信实现了协同调

度, 提高了网络诱导时延性能。设备巡回扫描周期越小, 需要通信的功能块越多, 方法效果越明显。

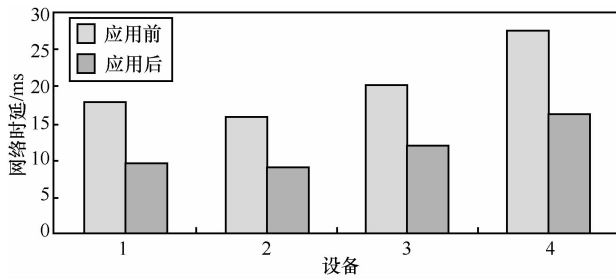


图 7 控制回路的网络诱导时延

6 结束语

本文提出了一种基于功能块执行与确定性通信协同调度的 EPA-CS 方法, 当 EPA 系统中设备巡回扫描周期较小或需要 EPA 通信的功能块较多时, 能够有效提高系统网络诱导时延性能。如果再采用性能更高的吉比特以太网或 10 吉比特以太网, 网络诱导时延性能还会有较大提高。

参考文献:

- [1] ZENG W T, CHOW M Y. Modeling and optimizing the performance-security tradeoff on D-NCS using the coevolutionary paradigm[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2013, 9(1): 394-402.
- [2] GUPTA R A. Networked control system: overview and research trends[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2010, 57(7): 2527- 2535.
- [3] IEC/PAS 62409. Real-time Ethernet for Plant Automation (EPA) (R) 14[S].
- [4] IEC 61784-2. Industrial Communication Networks-Profiles-Part 2: Additional Fieldbus Profiles for Real-time Networks Based on ISO/IEC 8802-3 [S].
- [5] 王占丰, 陈鸣, 邢长友等. 因特网时延空间建模的研究[J]. 通信学报, 2012, 33(7): 164-176.
WANG Z F, CHEN M, XING C Y, *et al.* Research on the modeling of the Internet delay space[J]. Journal on Communications, 2012, 33(7): 164-176.

- [6] HOKAYEM P, CHATTERJEE D, RAMPONI F A, *et al.* Stable networked control systems with bounded control authority[J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 2012, 57(12):3153-3157.
- [7] 鲁立, 冯冬芹, 褚健. EPA 网络控制系统丢包分析[J]. 控制与决策, 2011, 26(2): 248-252.
LU L, FENG D Q, CHU J. Analysis of packet dropouts in EPA based networked control systems [J]. Control and Decision, 2011, 26(2): 248- 252.
- [8] LIU N, ZHONG C Q, BAI Y Q. Real-time performance study of information transmission in EPA industrial Ethernet [J]. Chinese Journal of Electronics, 2012, 21(1): 125-130.
- [9] 刘宁, 仲崇权, 滕弘飞. EPA 系统数据发送时间片的自适应调整方法研究[J]. 仪器仪表学报, 2009, 30(11):2298-2304.
LIU N, ZHONG C Q, TENG H F. Self-adaptive adjustment method of the data transmission timeslice in EPA system [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2009, 30(11): 2298-2304.

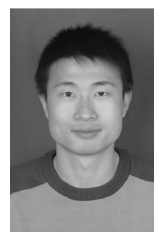
作者简介:



刘宁 (1977-), 男, 山东青州人, 博士, 河南理工大学讲师, 主要研究方向为工业控制网络技术。



仲崇权 (1966-), 男, 黑龙江哈尔滨人, 博士, 大连理工大学教授、博士生导师, 主要研究方向为工业控制网络技术和检测技术。



林瑶瑶 (1982-), 男, 山西大同人, 大连理工大学博士生, 主要研究方向为运动控制技术和工业控制网络技术。