

文章编号:1671 - 251X(2009)04 - 0039 - 05

EPA 的实时性能分析与计算 *

姜秀柱¹, 冯东芹², 徐 钊¹

(1. 中国矿业大学计算机学院,江苏 徐州 221008; 2. 浙江大学先进控制技术研究,浙江 杭州 310000)

摘要:文章在深入分析 EPA 网络周期数据传输原理的基础上,讨论了周期数据在 EPA 网络的端到端传输过程及在端点的处理过程中的通信延迟构成,并以一个典型的微网段构成的 EPA 网络为例,对 EPA 网络的周期数据通信延迟进行了定量计算,从而得出 EPA 网络所能达到的实时性指标,并指出了改善 EPA 网络实时性能的措施。

关键词:EPA 网络;实时性;周期数据;通信延迟

中图分类号:ID655.9;TP393.11 **文献标识码:**A

Analysis of Real-time Performance of EPA and Its Calculation

JIANG Xiu-zhu¹, FENG Dong-qin², XU Zhao¹

(1. School of Computer Science and Technology of CUMT., Xuzhou 221008, China.

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

Abstract:On the base of analyzing transmission principle of periodic data in EPA network deeply, the paper discussed communication delay composition of periodic data in end-to-end transmission process of EPA network and end treatment process. And it took a typical EPA network composed of micronet segments as an example to do quantitative calculation of communication delay of periodic data of EPA network, so as to get real-time indexes which EPA network could reach. It also pointed out measures to improve real-time performance of EPA network.

Key words:EPA network, real-time, periodic data, communication delay

0 引言

目前,以太网技术在工业控制领域的应用越来越广泛。由于工业控制的最基本要求是实时性,因此,工业以太网技术首先需要解决的问题是改造以太网的传输不确定性。目前,已有的工业以太网技术包括 EtherNet/IP、HSE(High Speed Ethernet)、Profinet、Modbus-IDA 以及我国自主研发的 EPA(Ethernet for Plant Automation),它们都是在破坏以太网工作特征的情况下,或通过令牌技术,或通过时分复用技术,将以太网的 CSMA/CD(带冲突检

测的载波侦听多路访问)改造为 CSMA/CA(带冲突避免的载波侦听多路访问),从而将以太网的不确定通信变为可确定的实时通信。

EPA 通过时分复用的方法,将通信时间划分为一个个通信周期,在通信周期内为每个通信设备分配 1 个时隙,并将工业控制网上传输的信息数据划分为周期数据和非周期数据两大类。周期数据是对传输延时有严格要求的数据,也称为实时数据;非周期数据则是对传输延时无严格要求的数据。通信周期是根据现场 I/O 数据(周期数据)从采集到输出控制的实时性要求在系统初始化时确定的,所有数据的传输都在该通信周期内进行。周期数据传输对通信周期时间的占用取决于周期数据的信息量大小,非周期数据只能在该通信周期内无周期数据传输的空闲时间内传输,因此,非周期数据的传输是无保障的。

本文通过对 EPA 网络中周期数据在端点的

收稿日期:2008 - 11 - 27

* 基金项目:国家创新研究群体科学基金(60421002)

作者简介:姜秀柱(1962 -),男,副教授,中国矿业大学计算机学院在读博士研究生,浙江大学先进控制技术研究访问学者,主要研究方向为计算机网络技术、数据通信技术及其在煤矿生产中的应用,已发表文章十余篇。E-mail:vlid2@163.com

处理及其在端点间的传输过程的分析,讨论了周期数据从产生到作用结束之间的时间构成,并以一个典型的 EPA 网络为例,计算了该时间的大小,从而确定出 EPA 网络的实时性能。

1 EPA 的周期数据传输原理

EPA 将整个网络根据现场环境和检测及控制需要划分为一个个微网段,每个微网段拥有 1 个独立的通信周期,网段内所有的数据传输都在该通信周期内进行。完成 1 个通信周期所需的时间 T 称为 1 个通信宏周期 (Communication Macro Periodic)。 T 的大小应能满足该微网段内最短时间响应要求的周期数据的传输。在 1 个 EPA 微网段内,所有 EPA 设备的通信均周期性地地进行,且所有 EPA 设备的周期数据必须在 1 个 T 周期内传输完毕。每个 EPA 设备分配有 1 个时隙,该时隙的大小由每个 EPA 设备传送的报文大小确定,时隙在通信周期中的位置由初始化时的时间偏移量给定;而 EPA 设备发送周期数据报文的时间偏移量则根据 EPA 设备传送的报文的信息量大小确定。

1 个通信宏周期 T 分为 2 个阶段:周期报文传输阶段 T_p 、非周期报文传输阶段 T_n (如图 1 所示),分别供微网段内的 EPA 设备传输周期数据报文和非周期数据报文。不同 EPA 设备的周期数据报文按预先设定的时间偏移量的大小先后发送,而非周期数据报文按其优先级高低、IP 地址以及时间有效方式发送,因此,非周期数据报文在发送前,要在其周期数据报文发完之后,先发 1 个非周期数据声明报文以判断其优先级。

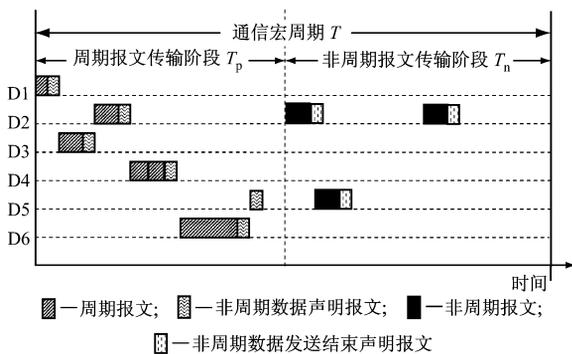


图 1 EPA 通信宏周期组成示意图

由于 T 的大小能够满足微网段内最快响应要求的 EPA 设备,因此, T 能够满足微网段内所有 EPA 设备的实时性要求。此外,微网段内所有 EPA 设备周期数据报文的信息量总和(包括非周期数据声明报文信息量)应能在 1 个通信宏周期 T 内

传输完毕。因此,受通信宏周期 T (也即最快响应 EPA 设备的延时时间要求)的限制,一个微网段内所能容纳的 EPA 设备的数量不能太多。

每个 EPA 设备的非周期报文只能在一个非周期阶段到来时,根据其优先级以及宏周期剩余的时间决定其在本周期内能否发送。如果非周期报文太大,在本周期的非周期报文发送时段不能发送完毕,则应将其分割成多个报文,在随后的一个或紧邻的连续多个或非紧接的非连续多个非周期内继续发送。

2 EPA 的周期数据通信延迟构成

2.1 EPA 网络端到端的通信延迟

EPA 网络中从信息发送到信息接收之间延迟的全部时间,称作端到端的通信延迟,主要包括以下 3 个部分:

(1) 排队延迟:从信息进入排队队列到该信息获取通信网络、接触到通信介质所经历的时间。排队延迟主要由通信网络的媒体存取控制协议和相应的信息调度算法以及缓存空间的大小决定。

(2) 发送延迟:从信息的第一个字节开始发送到信息最后一个字节发送结束所需的时间。发送延迟取决于信息的大小和通信网络的通信速率。

(3) 传输延迟:信息在现场设备间传输所需的时间。传输延迟取决于通信网络在现场设备间的物理长度及传输速率。

设通信延迟、排队延迟、发送延迟和传输延迟分别为 T_{delay} 、 T_{queue} 、 T_{send} 和 T_{trans} , 则:

$$T_{delay} = T_{queue} + T_{send} + T_{trans} \quad (1)$$

端到端的通信延迟是构成整个控制系统响应时间的重要部分,若端到端的通信延迟不能满足实时要求,则无法保证控制系统的实时性。EPA 的周期数据通信可发生在传感器节点、执行器节点、控制器节点任意二者之间。

EPA 网络的排队延迟主要由宏周期等待时间 T_c (μs) 和缓存空间限制造成的等待时间 T_b (μs) 构成;其发送延迟由信息量的大小 M (Mb) 和网络的通信速率 V_b (Mb/ μs) 构成;其传输速率由传输距离 S (m) 和传输速率 V (m/ μs) 构成。因此,EPA 网络端到端的通信延迟为

$$T_{delay} = T_c + T_b + M/V_b + S/V \quad (2)$$

2.2 EPA 网络信息的端点处理

系统实时性是指系统对某事件响应时间的可预测性;系统的响应时间是指在规定条件下,从信息转

换开始到系统开始作出有效反应的那一瞬时之间的间隔时间。在网络化工业控制系统中,系统的响应时间除了端到端的通信延迟之外,还包括信息在端点的处理时间。以下为 EPA 网络信息在端点的处理过程。

EPA 通信发起方首先根据与所发送的参数对象相对应的链接对象标识,查找与其相对应的 EPA 链接对象,并查找本次通信所需的 EPA 链路信息;然后,EPA 应用进程根据 EPA 服务标识,调用相应的 EPA 应用访问实体或系统管理实体服务,将需要传送的数据编码为 EPA 服务请求原语报文,并对请求报文标识加 1,之后将 EPA 服务请求原语报文传送给 EPA 套接字映射实体;EPA 套接字映射实体将该请求原语报文按 UDP/IP 协议进行封装,并传递给 EPA 通信调度管理实体;EPA 通信调度管理实体按初始化时候的宏周期及其时隙偏移量,在时隙到来时将 EPA 报文发送到网络上。

对于 EPA 证实服务请求原语报文,自报文发送到 EPA 网络上起,启动超时计时器,根据请求原语报文标识建立报文响应维护列表,对响应报文进行维护,并由 EPA 用户应用程序对 EPA 响应报文进行处理。

而在 EPA 通信接收方,EPA 通信控制器从 EPA 网络上接收到报文后,由 EPA 通信调度管理实体直接将报文发送给 EPA 套接字映射实体,由 EPA 套接字映射实体将接收到的报文进行缓冲;由 EPA 套接字映射实体根据服务标识对 EPA 报文过滤,并根据 EPA 应用访问实体或 EPA 网络管理实体报文服务号调用相应的服务对报文进行解码,解码后的数据提交给 EPA 功能块实例进行处理。

EPA 功能块实例对解码后的 EPA 应用访问实体服务报文的处理分 2 种情况:对于无证实 EPA 报文,查找到相应变量并用接收到的数据更新相应变量;对于有证实 EPA 报文,则将本地源信息与相应的响应数据一起发送给 EPA 通信请求发送方。

信息在端点的处理时间主要取决于端点 CPU 的处理速度、执行代码的多少、操作系统对处理器、存储器和 I/O 的管理机制等。

设 EPA 设备采用嵌入式 Linux 操作系统,其平均分时时间片为 $T(\mu s)$,允许最多并行任务数为 N ,CPU 速度为 $I(MIPS)$,相继执行的程序块的指令代码总长度为 $U(MI)$,则 EPA 信息在端点的处理时间 T_{end} 为

$$T_{end} = (N - 1) T + U / I \quad (3)$$

若 EPA 设备采用抢占式多任务操作系统,如 $\mu C/OS$ 等,则任务是按照优先级分配 CPU 资源的,可用平均等待时间 T_w 表示功能程序得到执行前的等待时间,则式(3)变为

$$T_{end} = T_w + U / I \quad (4)$$

3 EPA 网络的信息数据通信实时延迟计算

图 2 为典型的 EPA 网络的微网段构成图。从实时性角度来说,每个 EPA 微网段拥有完整独立的实时性。在该 EPA 微网段中,实时响应时间是从启动事件信息(传感器数据)进入 EPA 输入模块,经过处理后传送到 EPA 控制器模块,再经 EPA 控制器模块运算处理后传送到 EPA 输出模块,经过一定的处理后,输出控制信息,驱动执行机构动作这一过程所用的时间。该时间包括从 EPA 输入代理到 EPA 控制器,再从 EPA 控制器到 EPA 输出代理这 2 段端到端的延迟,加上参与通信及信息处理的 3 个 EPA 设备的信息处理时间,即

$$T_{总} = T_{delay1} + T_{delay2} + T_{end1} + T_{end2} + T_{end3} \quad (5)$$

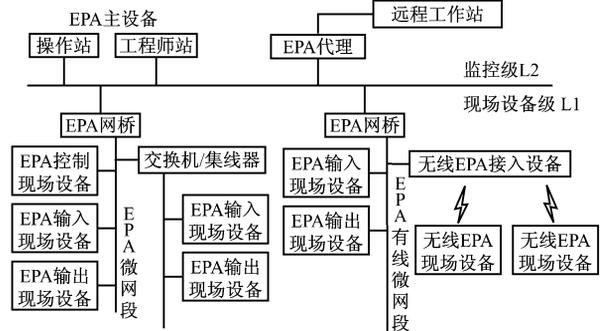


图 2 典型的 EPA 网络的微网段构成图

此外,EPA 网络中还有一个实时响应时间,是指现场传感数据从产生到通过人机交互界面 - 显示器呈现给用户所经历的时间。由于该信息数据的传输经历二级网络,跨过 2 个 EPA 微网段,因此,其实时响应时间比现场的驱动行为响应时间长。通常将该实时响应称为显示实时响应,记作 $T_{响}$,包括从 EPA 输入设备到 EPA 网桥,再从 EPA 网桥到操作站这 2 段端到端的延迟,加上参与通信及信息处理的 3 个 EPA 设备的信息处理时间。该 3 个 EPA 设备(EPA 输入设备、EPA 网桥和操作站)的功能及内部构成各不相同,信息在其中的处理过程也不同,但 $T_{响}$ 的组成成分和微网段内操作实时响应时间的组成成分相同,同样可用式(5)表示。

以图 2 所示的 EPA 网络为例,假设其中所有传输介质均为五类双绞线,双绞线的信号传播速度为

1 000 m/5.5 μs,网络速率为 10 Mbps 或 100 Mbps 自适应,节点间最大传输距离为 100 m。

以太网 MAC 帧中的最大负载允许长度为 1 500 B。为了实现“E 网到底”,目前设计完成的 EPA 网络输入模块均为单点输入,EPA 输出模块均为单点输出。传输 1 个数据,即使是双精度数最大也不过 64 位(8 B),加上 LLC 帧头 4 B,UDP 报头 8 B,IP 报头 20 B,EPA 应用层协议报头固定部分长度 8 B,对于周期数据,其服务说明等有 8 B,对于非周期数据,其服务说明等根据不同情况有多个长度,在此不予讨论。对于周期数据,上述各部分长度之和远小于 1 500 B,因此,用 1 个以太网 MAC 帧即可完成 1 次完整的 EPA 周期数据的传输。1 个以太网 MAC 帧的协议帧头 18 B 加上 7 B 的同步引导序列和 1 B 的起始标志,附加长度总共为 26 B,因此,1 个 EPA 设备每次发往传输线上的数据包最大长度为 1 526 B(注:这里没有考虑 1 Gbps 速率以上的以太网带有扩展字段的 MAC 帧)。

根据上述参数,并设 EPA 设备的缓存空间充分够用,可计算出 10 Mbps 的 EPA 网络在传输周期数据时的一段端到端的最大延迟为

$$\begin{aligned} T_{\text{delay}} \mu\text{s} &= T_c + T_b + M/V_b + S/V \\ &= T_c + 0 + (1\,526 \times 8)/10 + 100/(1\,000/5.5) \\ &= T_c + 1\,221.35 \end{aligned} \tag{6}$$

对于 100 Mbps 的 EPA 网络,其端到端的最大延迟为

$$\begin{aligned} T_{\text{delay}} \mu\text{s} &= T_c + 0 + (1\,526 \times 8)/100 + 0.55 \\ &= T_c + 122.63 \end{aligned} \tag{7}$$

式中: T_c 为微网段内的宏周期等待时间,是任何 EPA 设备发送数据前必须等待的最长时间,由微网段内最严格的实时响应要求决定。

图 2 所示的微网段内所有的 EPA 现场设备所用 CPU 均为嵌入式 ARM7,其指令执行速度为 0.9 ×64 MIPS。EPA 全部功能程序编译后占用空间为 200 KB 左右,其中代码所占空间约为 120 KB,ARM7 的指令长度为 4 B,因此,可得出全部 EPA 功能程序指令代码总长度大约为 160 K/4 = 40 K = 0.03 MI(兆条数)。EPA 全部功能程序分为 4 个独立的任务,分别由中断事件触发。程序设计采用非嵌套中断方式,操作系统选用 μC/OS,即任务执行采取排他式(剥夺式占用资源),只对同时发生的中断按照优先级选择响应。EPA 功能程序中最长中断任务的执行时间约为全部功能程序执行时间的 2/3。

根据上述条件,可计算出 EPA 设备的一个端机处理时间为

$$\begin{aligned} T_{\text{end}} \mu\text{s} &= T_w + U/I = (U/I) \times 2/3 + U/I \\ &= 0.03/(0.9 \times 64) \times 5/3 \times 10^6 = 868.1 \end{aligned} \tag{8}$$

对于微网段内周期数据传输,可认为所有 EPA 设备间端到端的延迟是一样的,所有 EPA 设备内的处理时间也是一样的,则可计算出总的延迟为

$$\begin{aligned} T_{\text{总}} \mu\text{s} &= T_{\text{delay1}} + T_{\text{delay2}} + T_{\text{end1}} + T_{\text{end2}} + T_{\text{end3}} \\ &= 2 T_{\text{delay}} + 3 T_{\text{end}} = 2(T_c + 1\,221.35) + 3 \times 868.1 = 2 T_c + 5\,047 \end{aligned} \tag{9}$$

当 EPA 工作在 100 Mbps 时,其周期数据通信总延迟为

$$\begin{aligned} T_{\text{总}} \mu\text{s} &= 2(T_c + 122.63) + 3 \times 868.1 \\ &= 2 T_c + 2\,849.56 \quad 2 T_c + 2\,850 \end{aligned} \tag{10}$$

从式(9)、式(10)可看出,EPA 不论工作在 10 Mbps 还是工作在 100 Mbps,其数据通信延迟都是几个毫秒级的,因此,工作在该 2 种速率下的 EPA 网络的实时性是毫秒级的。

4 结语

EPA 的实时性能取决于 EPA 网络的 MAC 调度机制、EPA 设备的软、硬件构成和传输介质。通过以上分析可看出,目前已经实现的 EPA 网络能够达到的实时性能是毫秒级的,可满足除运动控制之外的大部分工业自动化应用的要求。

该结论是在最极端运行条件下得出的,比如,本文设每次传输的周期数据包均为 1 526 B,实际应用中 EPA 数据可直接调用 MAC 层封装,仅形成几十个字节(大于 64 B)的数据包在 EPA 设备间传输,传输距离也只有几十米。每次 EPA 设备并非全部运行所有可执行代码,仅部分代码被调用执行,所需时间可能在 1 个毫秒以内。因此,上述结论只具有普遍意义,不具有特殊性。也就是说,在某些特殊情况下,可根据控制需要将 EPA 的实时性能提高到毫秒级以下的水平。

进一步提高 EPA 实时性能的直接措施是采用速度更快的嵌入式系统用 CPU,进一步减少 EPA 功能程序中的冗余,或进一步细化 EPA 的功能程序模块,供用户进一步选择配置,使实际运行的程序代码数量减少,从而大大降低信息数据在 EPA 设备中的处理时间;另一个有效措施是 EPA 通信接口采用 1 Gbps 或 10 Gbps 的以太网芯片,让 EPA 工作在 1 Gbps 或 10 Gbps 的速率上;最后一个有效措施就是在传输周期数据时,EPA 应用层直接调用 MAC

文章编号:1671 - 251X(2009)04 - 0043 - 03

无线传感器网络拓扑控制算法研究进展

朱晓颖, 刘晓文, 胡 明

(中国矿业大学信电学院, 江苏 徐州 221008)

摘要:对于无线传感器网络而言,拓扑控制是一个基本问题,对网络性能的影响很大,其目标是用最小的能量维持网络拓扑。文章较为详细地介绍了现有的无线传感器网络拓扑控制算法,并分析了各种控制算法的优缺点,探讨了拓扑控制算法今后的重点研究方向。

关键词:无线传感器网络; 拓扑控制算法; 启发机制; 能量高效

中图分类号: TN925.93; TP212 **文献标识码:** A

Research Progress of Topology Control Algorithm of Wireless Sensor Networks

ZHU Xiao-ying, LIU Xiao-wen, HU Ming

(School of Information and Electrical Engineering of CUMT., Xuzhou 221008, China)

Abstract: For wireless sensor networks, topology control is a basic problem and has great influence on performance of the networks, its object is to keep network topology by using the minimum energy. The paper introduced existing topology control algorithms of wireless sensor networks in details and analyzed their advantages and disadvantages. It also studied main research directions of topology control algorithms in the future.

Key words: wireless sensor networks, topology control algorithm, mechanism of enlightenment, energy efficient

0 引言

无线传感器网络(Wireless Sensor Networks, WSN)是由部署在监测区域内大量的廉价微型传感器节点组成,通过无线通信方式形成的一个多跳的

自组织网络系统。虽然 WSN 和移动 ad-hoc 网络(MANETs)一样,都采用多跳通信模式,但二者也存在很大差别:传统网络的首要设计目标是提高服务质量和高效利用带宽,其次才考虑节约能源;而由于组成 WSN 的传感器节点通常体积微小,携带能量十分有限的电池,且个数多,分布区域广,要通过及时更换电池的方式为节点补充能源是不现实的。因此,如何高效使用能量成为 WSN 的首要设计

收稿日期:2008 - 11 - 10

作者简介:朱晓颖(1984 -),女,中国矿业大学在读硕士研究生,研究方向为无线传感器网络。E-mail:huzhucumt@163.com

层,甩掉中间层次,甚至还可进一步压缩 MAC 层的帧头,只留下必要的字段,将在微网段传输的周期数据帧的大小压缩到最小程度。

通过上述措施可将 EPA 的实时性能至少提高百倍以上,达到微秒级的实时速度。若进一步结合高速单模光纤的使用,在短距离内还可将 EPA 的实时性能提高到微秒级以下(小于 1 μ s)。

参考文献:

[1] 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(报批稿)[S],2005.

[2] 冯东芹,金建祥,褚健.基于 EPA 的分布式网络控制系统结构[J].自动化仪表,2003,24(9):68~70.

[3] 冯东芹,金建祥,褚健.智能工厂核心技术——EPA 实时以太网[J].国内外机电一体化技术,2004,7(6):47~50.

[4] 姜秀柱.基于 CAN 总线的煤矿井下安全监控系统数据传输技术研究[D].徐州:中国矿业大学档案馆,2004.