

文章编号: 1006-5911(2007)03-0563-05

以太网工厂自动化协议中确定性调度的研究与实现

孙 攀, 王 平, 谢昊飞

(重庆邮电大学 重庆市网络控制技术与智能仪器仪表重点实验室, 重庆 400065)

摘 要: 工业自动化采用以太网协议, 参考了传输控制协议/网络协议的组织方式, 分为物理层、数据链路层、网络层、应用层, 并在其上层增加了用户层。在数据链路层, 将用户层的报文分为周期报文和非周期报文, 根据设备组态信息, 使周期报文按照固定的时间片发送, 而非周期报文按照报文优先级大小发送, 即确定性调度。运用该技术使以太网工厂自动化网络有效地避免了乱序、丢包、重发报文等情况, 保证了以太网网络中报文传输的确定性和实时性。测试结果表明, 所提出的调度算法完全符合以太网协议规范, 精度可达到微秒级。

关键词: 以太网工厂自动化; 通信调度实体; 确定性调度; 宏周期

中图分类号: TP393

文献标识码: A

Confirmed scheduling in Ethernet for plant automation protocol

SUN Pan, WANG Ping, XIE Hao-fei

(Key Lab of Network Control Tech. & Intelligent Instrum., Chongqing Univ. of P&T, Chongqing 400065, China)

Abstract: According to TCP/IP protocol, Ethernet for Plant Automation (EPA) protocol was divided into physical layer, data link layer, network layer, and application layer, additionally user layer was added above. On the data link layer, packets from user layer were divided into periodic packets and non-periodic packets. In terms of configured information beforehand, the periodic packets would be sent by fixed time block, while the non-periodic packets would be sent by their priorities, which was called confirmed scheduling. The technique mentioned above was applied in EPA network to avoid disordering, missing or resending packets effectively, which insure the confirmation and real-time of the packets. Test result showed that the arithmetic satisfied the EPA protocol and the scheduling precision could reach the microsecond level.

Key words: Ethernet for plant automation; communication scheduling management entity; confirmed scheduling; macro cycle

0 引言

在国家 863 计划的连续滚动支持下, 重庆邮电大学作为核心单位参与制定了国家标准——《用于工业测量与控制系统的 EPA 系统结构和通信标准》^[1] (简称 EPA 标准), 在此基础上形成的 65C/357/NP 以 95.8% 的得票率被国际电工委员会 IEC

发布为 IEC/PAS 62409^[2], 作为第 14 类型已经列入实时以太网国际标准 IEC 61748-2, 并将列入现场总线国际标准 IEC 61158(修订版)。

在控制网络中, 对现场设备进行确定性调度是基本要求, 通信的确定性往往比通信的实时性还重要。确定性调度也是以太网工厂自动化 (Ethernet for Plant Automation, EPA) 标准体系中的核心内

收稿日期: 2006-01-17; 修订日期: 2006-06-26。Received 17 Jan. 2006; accepted 26 June 2006.

基金项目: 国家 863/CIMS 主题资助项目(2004AA412020)。**Foundation item:** Project supported by the National High-Tech. R&D Program for CIMS, China(No. 2004AA412020).

作者简介: 孙 攀(1981-), 男, 河南南阳人, 重庆邮电大学重庆市网络控制技术与智能仪器仪表重点实验室硕士研究生, 主要从事嵌入式系统
的研究与开发。E-mail: basic_sp@126.com.

容之一,关系到整个 EPA 网络能否可靠有序地运行。本文就 EPA 协议实现中的这项关键技术进行探讨,并结合 EPA 协议栈的开发来实现。测试与实际应用表明,本文实现的确定性调度稳定可靠,取得了满意的效果。

1 以太网工厂自动化通信协议模型与调度规程

EPA 通信协议的主要成分分为 4 层,如图 1 所示。其中 EPA 通信调度管理实体用于对 EPA 设备向网络上发送报文的调度管理。EPA 通信调度管理实体采用分时发送机制,按预先组态的调度方案,对 EPA 设备向网络上发送的周期报文与非周期报文发送时间进行控制,保证在任意时刻网络上只有一个报文在传输,以避免碰撞,同时保证了 EPA 周期报文和优先级高的非周期报文的发送,加强了实时性。

EPA 协议将所有报文分优先级,采用基于时间片调度和基于优先级调度相结合的算法,根据优先级链路层调度。

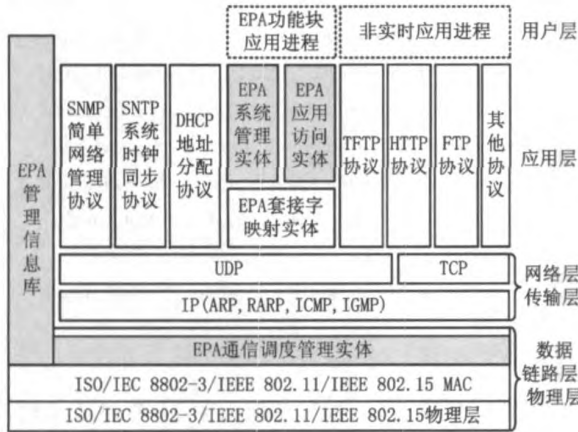


图1 EPA通信协议模型

1.1 报文优先级

EPA 标准中报文的优先级分为 6 级,并规定所有 EPA 报文均高于不符合本协议的其他报文。EPA 标准采用以太网帧格式中长度/类型 (LENGTH /TYPE) 字段,通过向 IEEE 注册分配的特定值(0x88CB)标志 EPA 报文(如图 2)。

1.2 以太网工厂自动化通信调度原理

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 为一个通信宏周期(communucation macro cycle)。

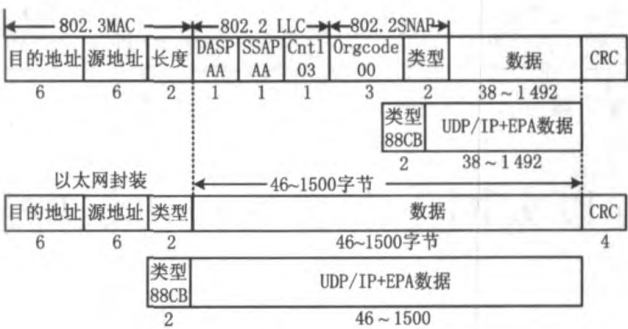


图2 EPA报文标志

为周期报文传输阶段 T_p ,第 2 个阶段为非周期报文传输阶段 T_n (如图 3)。

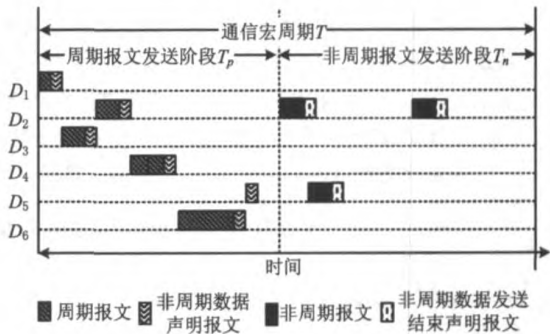


图3 EPA通信调度原理示意图

在周期报文传输阶段 T_p ,每个 EPA 设备向网络上发送的报文是包含周期数据的报文。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和控制值,或功能块输入、输出之间需要按周期更新的数据。周期报文的发送优先级应为最高。

在非周期报文传输阶段 T_n ,每个 EPA 设备向网络上发送的报文是包含非周期数据的报文。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、事件通知和趋势报告等数据,以及诸如逆向地址解析协议 (Reverse Address Resolution Protocol, RARP)、地址解析协议(Address Resolution Protocol, ARP)、超文本传输协议(HyperText Transfer Protocol, HTTP)、文件传输协议(File Transfer Protocol, FTP)、一般文件传输协议(Trivial File Transfer Protocol, TFTP)、因特网信报控制协议(Internet Control Message Protocol, ICMP)、因特网成组消息协议(Internet Group Message Protocol, IGM P)等应用数据。非周期报文按其优先级高低、IP 地址大小及时间有效方式发送。此外,若本

周期内有非周期数据发送, 在发送完周期报文后, 应发送非周期数据声明报文, 在发送完非周期报文后应发送非周期数据结束声明报文。

2 确定性调度的实现方案

2.1 实现原理

EPA 确定性调度以时钟同步为基础, 每个 EPA 设备以网络上的主时钟为基准, 维护本地时间, 使之与主时钟之间的同步误差保持在较小范围内。这样, 网络上所有设备的本地时间也就基本一致, 确保了调度状态转换的一致性, EPA 报文才能按约定的规程发送, 避免了冲突、错序等。

根据 EPA 调度规程, 定义通信调度实体, 用于获取本地时间, 并负责在设备的未调度状态和调度状态 (包括周期报文发送状态和非周期报文发送状态) 之间进行转换, 以便确定何时将报文发送到网络上。此外, EPA 周期和非周期报文也不能直接发送, 而要在链路层进行相应地缓存, 在特定状态的时间段内发送到网络上: 周期报文在固定时间片内发送; 非周期报文在非周期时间段与其他设备的非周期声明的优先级比较, 确认本报文优先级最高后方可发送。对应这两点, 确定性调度实现方案主要涉及通信调度实体的状态转换机制和报文的缓存机制两方面。

2.2 通信调度实体状态转换

一个 EPA 设备的 EPA 通信调度管理协议状态机是用 4 个状态, 以及它们之间的转换来描述的。图 4 所示为这些状态之间的转换关系。

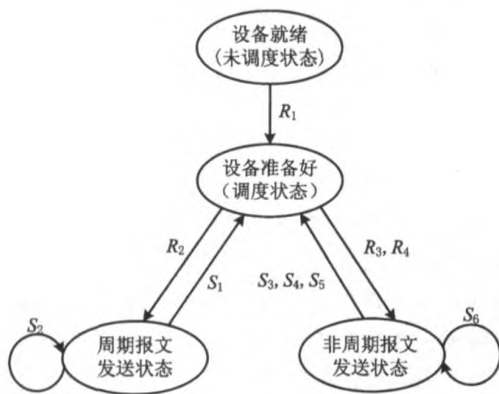


图4 EPA通信调度管理实体状态转换图

EPA 通信调度实体状态转换参考 EPA 通信调度规程执行。如图 4 所示, 具体操作为: EPA 设备上电后, 应检测所有必需的操作参数。如果未经初始化组态, EPA 通信调度管理实体进入设备就绪状态,

直至被用户组态, 否则自动进入设备准备好状态 (R_1)。EPA 通信调度管理实体处于设备准备好状态时, EPA 设备处于通信调度控制状态。

当 EPA 通信调度管理实体检测到本地设备发送周期报文的时间, 即本地当前时间对宏周期取模运算= 周期报文发送时间偏离量时, EPA 通信调度管理实体变为周期报文发送状态 (R_2)。此时, 首先检查有无优先级为 0 的报文 (即周期报文), 如果没有, 则发送非周期数据声明报文; 否则, 先依次发送周期报文 (S_2), 再发送非周期数据声明报文, 并将其改为设备准备好状态 (S_1)。

当 EPA 通信调度管理实体检测到本地设备发送非周期报文的时间, 即本地当前时间对宏周期取模运算= 非周期报文发送时间偏离量时, 如果本设备存在非周期报文, 且优先级高于所有远程设备, 则转为非周期报文发送状态 (R_3), 此时如果剩余时间不够, 则转为设备准备好状态 (S_3), 否则发送非周期报文和非周期结束声明报文 (S_6), 发送完毕转到设备准备好状态 (S_4); 如果仍然存在非周期报文, 且优先级高于所有远程设备, 同上处理, 状态转换依次为 R_4 S_6 S_5 ..., 直到发送完毕或剩余时间不够, 则转为设备准备好状态。此状态转换过程由 uC/OS-II^[3] 任务管理机制实现。

2.3 报文的数据结构和算法

按照 EPA 协议, 网络报文分为 EPA 周期报文、EPA 非周期报文和非周期声明/结束声明报文 3 类。因此, 构造 3 个队列, 分别用于缓存本设备 EPA 周期报文 (简称周期队列)、本设备 EPA 非周期报文 (简称非周期队列) 和本网段其他设备的 EPA 非周期声明/结束声明报文 (简称声明队列)。其中, 第 1 个属于先进先出队列, 后面两个是基于报文优先级或声明报文优先级的队列。涉及队列的生成、节点在队列尾部插入和删除, 以及按节点优先级进行插入和删除等操作^[4]。图 5 描述了链路层报文的收发流程, 反映了报文与队列的关系。

2.3.1 周期队列

如图 6 所示, 周期队列节点的数据结构为

```
typedef struct{
    struct EpaListNode* pNext; //下一节点
    unsigned char * pkt; //缓存报文的首地址
    unsigned int length; //缓存报文的长度
} EpaPeriodicDataNode;
void EpaPeriodicListDelHead ( EpaPeriodicDataNode *
```

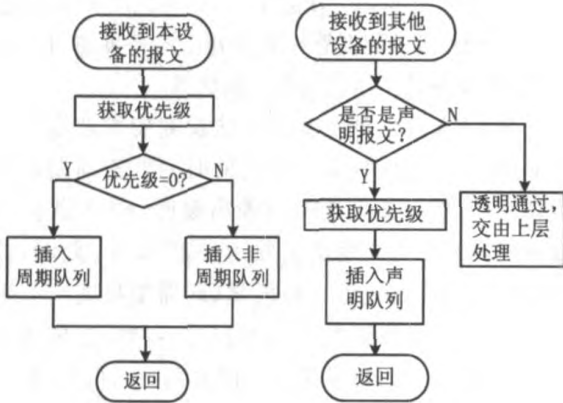


图5 链路层报文收发流程

head); //队列操作: 删除首节点

```
void EpaPeriodicListAddTail ( EpaPeriodicDataNode * head,  
EpaPeriodicDataNode * new node); //队列操作: 在末尾插入新节点
```

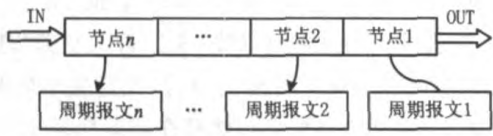


图6 缓存n条报文的周期队列

当本设备产生一条 EPA 周期报文经由链路层发送时, 构造相应的节点, 将其插入队列尾部; 当本设备周期发送时刻到来时, 发送队列首部节点对应的报文; 发送完毕即从本队列中删除节点。

2 3 2 非周期队列

非周期队列与图 6 类似, 但数据结构和操作略有不同, 主要是增加了对优先级的处理(如图 7)。

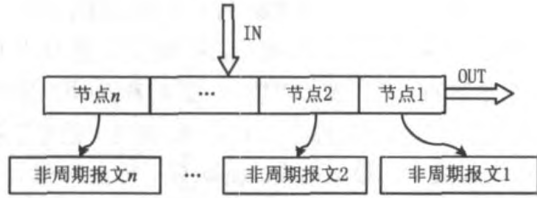


图7 缓存n条报文的非周期队列

非周期队列节点的数据结构为:

```
typedef struct{  
    struct EpaListNode* pNext; //下一节点  
    unsigned char * pkt; //缓存报文的首地址  
    unsigned int length; //缓存报文的长度  
    unsigned char pri; //优先级  
} EpaNonPeriodicDataNode;  
unsigned char GetEpaPktPri(unsigned char * pkt); //报  
文操作: 获取优先级  
void EpaNonPeriodicListDelHead ( EpaNonPeriodicDataNode
```

```
* head); //队列操作: 删除首节点
```

```
void EpaPeriodicListAddNode (EpaNonPeriodicDataNode *  
head, EpaNonPeriodicDataNode * new node); //队列操  
作: 按优先级插入新节点
```

当本设备产生一条 EPA 非周期报文经由链路层发送时, 获取本报文的优先级, 构造相应的节点, 按照优先级大小将其插入队列相应的位置, 优先级小的置于队列首部; 在非周期报文发送时间段内, 判断队列中首节点对应的本设备非周期报文优先级是否最高, 是则发送, 否则不做处理; 发送完毕即从本队列中删除节点。

2 3 3 声明队列

声明队列与图 7 类似, 但声明报文的结构不同, 故获取优先级的方式和数据结构不一样, 它并不需要缓存实际的整个报文(如图 8)。

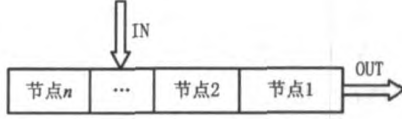


图8 缓存n条报文的声明队列

声明队列的数据结构为:

```
typedef struct{  
    struct EpaListNode* pNext; //下一节点  
    unsigned char pri; //优先级  
    unsigned char hw_addr[6]; //MAC 地址  
    unsigned char u_ip[4]; //IP 地址  
} EpaAnnNode;  
unsigned char GetAnnPktPri(unsigned char * pkt); //报  
文操作: 获取优先级  
void EpaAnnListDelHead (EpaAnnNode * head); //队列  
操作: 删除首节点  
void EpaAnnAddNode ( EpaAnnNode * head, EpaAnnNode  
* newnode); //队列操作: 按优先级插入新节点
```

当收到其他设备发送的非周期声明报文时, 如果表明本周期内无非周期报文则不予处理, 有, 否则, 按照声明的优先级构造相应节点插入队列; 当收到其他设备发送的非周期结束声明报文时, 首先删除本队列中相应的节点, 然后判断本周期内有无非周期报文, 按第 1 条进行处理。

3 确定性调度的测试

本文提出的 EPA 确定性调度实现方法, 于 2005 年 10 月通过了国家 863/CIMS 专家组委托的专家测试, 其 EPA 确定性调度测试平台的系统结构如图 9 所示。该测试系统包括: EPA 测试器, 该

测试器完成包括系统管理服务测试、应用访问实体服务测试、时间同步测试、确定性调度测试、对象属性测试和协议状态机测试等测试内容,在测试时间同步和确定性调度时,进行数据分析、图形显示和测试信息统计,并形成测试报告等;网络监听设备用于实时捕获EPA网络上传送的所有数据报文,并打上接收到的时间戳,把相应报文传送给EPA测试器,或发送EPA测试器的测试报文到EPA网络;时间同步服务器用于为EPA网络提供标准时钟;EPA标准设备1和EPA标准设备2用于为时间同步测试和确定性调度测试提供标准的EPA报文;被测EPA设备用于提供被测EPA协议实现,在进行服务测试、对象属性测试和协议状态机测试时,需要加上测试器代理,在被测设备上加入软件来实现。

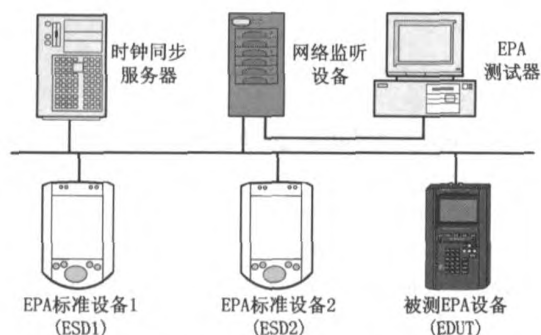


图9 确定性调度测试系统结构图

测试原理是:网络监听设备的网卡截取EPA网络上发送和接收的报文,打上接收报文的时间戳,抽取相关信息组成调度测试报文,然后传送给EPA测试器。EPA测试器通过分析所记录的报文的接收时间、优先级、IP地址、报文长度等参数,以及一个宏周期内所有报文的先后顺序,来判断该系统的通信调度管理实体是否按标准进行工作。

4 结束语

笔者利用本文提出的EPA协议中数据链路层确定性调度方法及其实现技术,开发了基于Cygnal公司C8051F120单片机的EPA I/O模块,已通过了国家863/CIMS专家组委托的专家,运用图9所示的确定性调度测试系统的测试。测试结果表明,该算法在每个设备周期报文发送时间只分配1ms的情况下工作正常,未出现报文乱序、丢包、多发报文等情况,完全符合EPA协议规范,调度的精度也达到了理想的要求(如图10)。

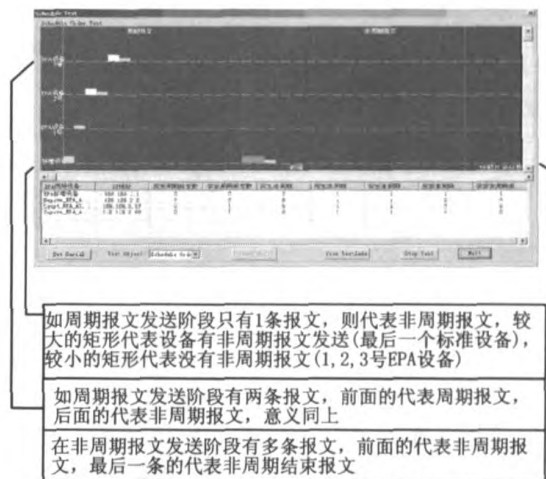


图10 EPA确定性调度规程(顺序)测试

该EPA I/O模块已应用于重庆四联集团阀门定位器、智能电磁流量计、超声波物位计和温度变送器中,使这些设备能够接入EPA网络,上位机工作站能够很好地监视和控制这些设备的运行,达到了预期的效果。

参考文献:

- [1] General Administration of Quality Supervision Inspection and Quarantine of the People's Republic of China. GB/T 2071 - 2006 EPA System architecture and communication specification for use in industrial control and measurement systems[S]. Beijing: Standards Press of China, 2006(in Chinese). [国家质量技术监督局. GB/T2071 - 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.]
- [2] IEC. IEC/PAS 62409 Real time Ethernet EPA (Ethernet for Plant Automation) [S]. Geneva, Switzerland: IEC, 2005.
- [3] LABROSSE J J. Embedded real time operation system uC / OS-II[M]. SHAO Beibei, transl. 2nd ed. Beijing: Beihang University Press, 2003(in Chinese). [LABROSSE J J. 嵌入式实时操作系统 uC / OS-II[M]. 邵贝贝, 译. 第二版. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2003.]
- [4] ALESSANDRO R, JONATHAN C. Linux device drivers [M]. WEI Yongming, transl. 2nd ed. Beijing: Chinese Electric Power Press, 2002(in Chinese). [A LESSANDRO R, JONATHAN C. Linux 设备驱动程序[M]. 魏永明, 译. 第二版. 北京: 中国电力出版社, 2002.]