

# Ethernet Powerlink 调度机制与实时通信剖析

## Analysis of Scheduling Mechanism and Real-time Communication of Ethernet Powerlink

江 杰<sup>1</sup> 赵凤鸣<sup>1</sup> 陈洪翰<sup>2</sup> 朱高建<sup>1</sup>

(内蒙古科技大学信息工程学院<sup>1</sup>,内蒙古 包头 014010;西南交通大学信息科学与技术学院<sup>2</sup>,四川 成都 610031)

**摘要:** Ethernet Powerlink 是一种基于 IEEE 802.3 的实时以太网。首先从原理、循环周期实现及配置等方面详细分析了 Ethernet Powerlink 的核心调度机制,进而具体介绍了实时数据通信方式的实现及配置。这对 Ethernet Powerlink 的研究具有重要参考价值。下一步工作是要利用 OPNET 网络仿真软件建立一个标准化的 Ethernet Powerlink 通信网络模型,用于不同调度机制的试验及性能分析、评估。

**关键词:** Ethernet Powerlink 实时通信 调度机制 网络模型 过程数据对象(PDO)

**中图分类号:** TP336 **文献标志码:** A

**Abstract:** Ethernet Powerlink is a real-time Ethernet based on IEEE 802.3. The core scheduling mechanism and real-time communication pattern of Ethernet Powerlink are analyzed in depth. Firstly, the scheduling mechanism is analyzed in detail based on principle, cycling period, and configuration, then the implementation and configuration of real-time communication are introduced specifically. These are worth to be referenced in researching Ethernet Powerlink. The next stage of the project is by adopting OPNET network simulation software to establish a standardized Ethernet Powerlink communication network model, for using in experiment, performance analysis and evaluation with different scheduling mechanism.

**Keywords:** Ethernet Powerlink Real-time communication Scheduling mechanism Network model Process data object(PDO)

## 0 引言

随着工业自动化的发展,现场总线已无法满足高速、实时、大容量数据传输的要求。将实时以太网用于工业现场是大势所趋,它在保障实时性的前提下,能够提供大容量、高速率数据传输,从而满足工控领域日益增长的通信要求。目前,实时以太网主要有 EtherCAT、Profinet、Ethernet/IP 及 Ethernet Powerlink (EPL)<sup>[1]</sup>等。

EPL 是近期很流行的实时以太网技术,已有学者及工程技术人员对其进行研究与应用。Gena<sup>[2]</sup>和 Seno<sup>[3]</sup>等建立了 EPL 仿真模型,其报警信息最大延迟低于 10 ms,验证了 EPL 的实时性。Seno<sup>[4]</sup>等对 EPL 的两种调度周期进行了仿真分析。Maestro<sup>[5]</sup>等用 EPL 代替并改造传统以太网,使工业通信能耗降低 70%。许洪华<sup>[6]</sup>等描述了 EPL 的特点。然而目前 EPL 的相关文献及研究仍然较少,有必要对其进行更深入的研究。

下面对 EPL 调度机制和实时数据通信进行分析。

## 1 EPL 调度机制

EPL 完全建立在快速以太网(IEEE 802.3 标准)<sup>[7]</sup>的基础之上。传统以太网以载波监听多路访问/冲突检测方法(carrier sense multiple access/collision detect, CSMA/CD)为基础,发送数据前先侦听信道是否空闲,若空闲则立即发送数据。发送数据时,边发送边继续侦听,若侦听到冲突,则立即停止发送数据,并等待一段随机时间后重发。CSMA/CD 对冲突的处理方式使得以太网传输具有非确定性和非实时性,这对于工业自动化应用是不可接受的。

为了避免数据冲突,并且尽可能有效地利用网络带宽,EPL 在时间上重新组织了网络中节点间的信息交换机制。通过在 CSMA/CD 基础上开通旁路,引入时间槽通信网络管理机制(slot communication network management, SCNM),从而绕过 CSMA/CD,有效地保证了数据通信的实时性、确定性,并能够与快速以太网完全兼容。

### 1.1 SCNM 机制原理

SCNM 机制由一个具有网络管理功能的设备即管

修改稿收到日期:2012-01-10。

第一作者江杰(1958-),男,1988年毕业于包头钢铁学院自动化专业,获学士学位,教授级高级工程师;研究方向为现场总线、智能仪器仪表以及智能机器人。

理节点 (managing node, MN) 对网络进行管理,其他所有节点作为控制节点 (controlled node, CN) 运行。MN 的作用是协调调度各个 CN、合理分配总线使用权、避免冲突、实现实时通信。网络中所有节点都由 MN 配置。SCNM 机制规定一个 EPL 网络中只允许有一个激活的 MN,如果需要也可以设置冗余的 MN。

SCNM 机制有两种实时通信模式:请求/应答模式 (PReq/Pres 模式) 和定时主动上报模式 (PRC 模式)。其中,请求/应答模式是 EPL 的经典调度模式,本文针对这种模式进行分析。

### ① SCNM 组织节点间通信

SCNM 机制采用调节数据交换定时方式,并融合轮询和时隙对节点间的通信进行组织,使每个节点在一个明确定义的时间间隔内发送数据。SCNM 机制如图 1 所示。

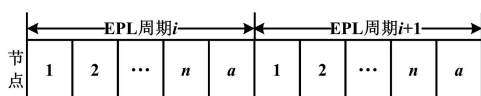


图 1 SCNM 机制

Fig. 1 Principle of SCNM

图 1 中,1~n 为同步时隙,网络中每个被激活的同步 CN 都占用其中的一个固定时隙,并且只能在该时隙中发送数据,确保每一时刻只有一个 CN 能获取网络媒介的访问权,有效地避免了冲突;a 为异步时隙,用于异步数据的传输。

### ② SCNM 组织数据交换定时

SCNM 机制对循环同步和时间进行控制。MN 在固定的时间间隔提供统一的同步信号,所有 CN 都根据该同步标志调整自己内部的任务周期,这样就能保证时间控制精度在  $1 \mu\text{s}^{[8]}$  之内。

## 1.2 EPL 循环周期

EPL 是确定性的实时以太网协议。根据 SCNM 机制,MN 为网络中所有的节点预先规划并组织了一个时隙分配表,这些时隙就组成了 EPL 循环周期,如图 2 所示。

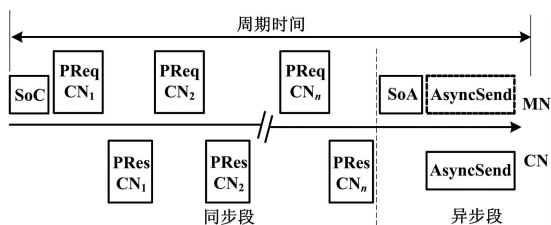


图 2 EPL 循环周期

Fig. 2 Cycle period of Ethernet Powerlink

EPL 循环周期由同步段和异步段组成,其中,同步

段用于调度等时同步传输的实时数据,异步段用于调度实时性要求不高的异步数据。

系统上电后,执行缩减的 EPL 周期(只包含异步段),由 MN 发布配置信息。配置完成后,执行 EPL 循环周期。EPL 循环周期执行过程包含以下两部分。

### ① 同步段

MN 发布 SoC 帧 (start-of-cycle) 同步所有节点,CN 收到 SoC 后进入数据通信等待状态。MN 根据预先设置的时隙分配表轮询各个 CN。首先,MN 发送 PReq 到第一个 CN,该 CN 收到 PReq 后以 Pres 作出响应,并以广播方式发送,允许网络中的其他节点对该帧进行监控并接收;然后发送 PReq 到第二个 CN。依次类推,直至所有被激活的同步 CN 被轮询完毕。

### ② 异步段

MN 发送一个 SoA 帧 (start-of-asynchronous),标志同步传输的结束和异步传输的开始。如果 CN 要发送异步帧,则在它发送的 Pres 帧或 StatusRes 帧中通知 MN。MN 根据优先级,在所有发送异步请求的节点中选择一个节点(包括 MN),并在 MN 发送的 SoA 帧中带上 Requested Service Target 的标志,指出允许哪个节点发送异步帧。

通常异步段只允许一个节点发送一个异步帧。若节点数据量过大,超过了一帧的处理能力,那么发送者可以将数据分配到多个循环周期的异步段进行传输。如果没有异步请求,异步段将以 SoA 终止。由于 EPL 与快速以太网完全兼容,因此异步段允许发送标准以太网帧。

由此可见,在 MN 统一调度下,MN 和 CN 之间,以及 CN 之间的通信周期性地,保证了同步通信和异步通信的同时执行,并且互不影响。因此,实时数据通信和标准的 IP 通信 (TCP、UDP 等) 都可以通过 EPL 网络实现。

## 1.3 多路复用技术

为了提高网络带宽利用率,在节点数目较大的情况下,SCNM 机制采用多路复用技术,如图 3 所示,以同时支持高速设备和低速设备。



图 3 多路复用技术

Fig. 3 Multiplexing technology

高速设备可以在每个等时同步阶段进行数据刷新,低速设备可以每隔 1~n 个周期刷新一次。这样,节点

可以利用多路复用技术在同步段共享时隙,既可以缩短每个 EPL 周期中的时隙数目,更好地利用带宽;又能区别对待实时性强的信号和实时性弱的信号,从而提高整体效率,使 EPL 更灵活、更实用。

## 2 EPL 循环周期配置

在 EPL 循环周期中, CN 被以固定的顺序轮询。因此,在系统初始化阶段,应该对 EPL 循环周期的时隙划分进行配置。

为了描述配置过程,假定一个网络有 5 个同步 CN,其中 Node ID 为 11、12 的 CN 为连续访问节点,Node ID 为 13~15 的 CN 为多路复用节点,那么同步段的时隙分配表如图 4 所示。

		周期 <i>i</i>				周期 <i>i</i> +1			
时隙		1	2	4	5	1	2	4	5
节点		11	12	14		11	12	15	13
		连续访问		多路复用		连续访问		多路复用	

图 4 时隙分配表

Fig. 4 Slot allocation table

EPL 循环周期的配置实现主要涉及 3 个对象。

### ① 对象 NMT\_CycleTiming\_REC

在对象 NMT\_CycleTiming\_REC 中,子索引为 7 的子对象 NMT\_CycleTiming\_REC. MultiplCycleCnt\_U8 用于确定多路复用周期的长度,即一个多路复用周期包含几个 EPL 周期。其默认值为 0,表示网络中没有采用多路复用技术;若值为  $n$ ,表示一个多路复用周期由  $n$  个 EPL 周期组成。 $n$  的最大值受 MN 设备描述入口 D\_NMT\_MNMultiplCycMax\_U8 的限制。

上述网络多路复用周期设置如表 1 所示。每个多路复用周期包含 2 个 EPL 周期。

表 1 多路复用周期设置

Tab. 1 Configuration of multiplexing period

对象索引号	子对象索引号	子对象值
1F98h	7	2

### ② 对象 NMT\_MultiplCycleAssign\_AU8

对象 NMT\_MultiplCycleAssign\_AU8 用于确定同步 CN 的访问方式。同步 CN 既可以被连续访问,又可以以多路复用方式被访问。若子对象的值为 0,则 Node ID 与该子对象索引号相等的 CN 为连续访问;若子对象的值为  $n(n>0)$ ,则 Node ID 与该子对象索引号相等的 CN 以多路复用方式访问,并在多路复用周期中的第  $n$  个 EPL 周期被访问。

上述网络中 CN 的访问方式设置如表 2 所示。

表 2 CN 访问方式设置

Tab. 2 Configuration of access mode of CN

对象索引号	子对象索引号	子对象值
1F9Bh	11	0
	12	0
	13	2
	14	1
	15	2

### ③ 对象 NMT\_IsochrSlotAssign\_AU8

对象 NMT\_IsochrSlotAssign\_AU8 用于给 CN 分配固定时隙,决定 CN 的先后访问顺序。被连续访问的 CN 应被分到该对象较低的子索引中,多路复用时隙应以被访问周期的升序方式映射到通信时隙中。EPL 中允许存在空时隙,不被使用的时隙则跳过。

上述网络中 CN 的时隙分配设置如表 3 所示。

表 3 CN 时隙分配设置

Tab. 3 Configuration of slot allocation of CN

对象索引号	子对象索引号	子对象值
1F9Ch	0	5
	1	11
	2	12
	3	14
	4	15
	5	13

其中,子对象 0 的值为 5 表示网络中有 5 个同步 CN;子对象 1~5 的值为 CN 的 Node ID,表示该 CN 被分配到对应的时隙。

## 3 实时数据通信解析

上文整体分析了网络中 MN 对 CN 的调度机制及配置实现,本节分析网络中节点间实时通信采用的通信方式。EPL 中实时数据通信是通过过程数据对象 (process data object, PDO)<sup>[9]</sup>执行的。

### 3.1 过程数据对象

EPL 应用层遵循 CANopen<sup>[9]</sup>标准。网络中 MN 和同步 CN 的实时数据传输都采用过程数据对象 (PDO)形式。在 EPL 中,PDO 通信是通过 PReq 和 PRes 在同步段执行的。PRes 以广播方式发送,遵循生产者/消费者模型;PReq 以单播方式发送,遵循主/从方式。

从设备角度看,存在两种类型的 PDO,分别是用于数据发送的 TPDO 和用于数据接收的 RPDO。同步 CN 可支持 1 个有效的 TPDO 通道和 256 个 RPDO 通道。MN 可支持 256 个 TPDO 通道和 256 个 RPDO 通

道。一个 PDO 通道可以由一组参数(即网络参数和映射参数)描述。

网络参数用于描述 PDO 的通信属性,提供映射版本和地址信息;在通信过程中,用于决定接收哪些节点的数据,或将数据发给哪些节点。TPDO 网络参数的索引范围为:0x1400h~0x14FFh;RPDO 网络参数的索引范围为:0x1800h~0x18FFh。

映射参数描述 PDO 有效载荷中的对象到对象字典入口之间的映射,决定如何解析接收到的数据帧,或如何组成要发送的数据帧,即确定对象字典中的对象与数据帧中数据段的对应关系。TPDO 映射参数的索引范围为:0x1600h~0x16FFh;RPDO 映射参数的索引范围为:0x1A00h~0x1AFFh。

网络参数和映射参数成对出现,一一对应。如 0x14XX 与 0x16XX 一一对应,0x18XX 与 0x1AXX 一一对应,其中 XX 范围从 00h 到 FFh。

### 3.2 PDO 参数配置

在 EPL 中,一个 PDO 最大可以传输 1 490 B 数据,突破了 CANopen 最大传输 8 B 数据的限制。若发送方有多个对象要发送,可以将多个对象打包到一个数据帧中,接收方根据自己的需要从数据帧中取出相应的数据。发送方将数据发送到哪些节点、如何将对象打包到一个数据帧中,接收方应接收哪些节点的数据帧、如何解析接收到的数据帧,这些都由网络参数和映射参数的配置决定。

#### ① CN 发送网络参数配置

在 EPL 中,CN 以广播方式上报数据,可将所有要发送的对象打包到一个数据帧中。因此,CN 只需要一个 TPDO 通道即可。此时,CN 发送网络参数 0x1800h 的值应设为 255,由 EPL 协议栈自动设置。

#### ② CN 发送映射参数配置

对于发送,映射参数解决如何打包要发送的对象。通过设置映射参数,将每一个要发送的对象与数据帧中的数据段建立映射关系,把对象的值放到数据帧对应的字段中。CN 发送对象与数据帧映射关系如图 5 所示。

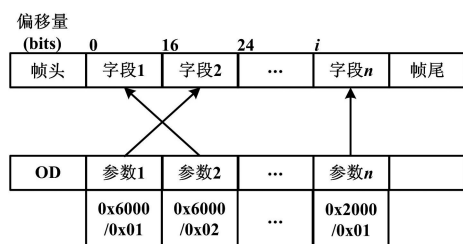


图 5 CN 发送对象与数据帧映射关系

Fig. 5 Mapping between transmitting object of CN and data frame

网络参数和映射参数成对出现,一一对应。因此,如果网络参数配置为 0x1800h,映射参数就必须配置为 0x1A00h。配置如下。

0x1A00/0x01 值:0x 0010 0000 00 02 6000

0x1A00/0x02 值:0x 0008 0010 00 01 6000

映射参数数据解析如图 6 所示。

0x	0010	0000	00	02	6000
	长度 (bits)	偏移量 (bits)	保留	对象 子索引	对象 索引

图 6 映射参数数据解析

Fig. 6 Data parse of mapping parameters

#### ③ CN 接收网络参数配置

EPL 支持直接交叉通信,CN 可接收一个或多个节点的数据,因此,一个 CN 可有多个接收通道。例如,一个 CN 可以接收 MN 和 Node ID 为 2 的 CN 的数据,那么该 CN 有两个接收通道,网络参数配置分别如下。

RPDO1:0x1400/0x01 值为 0,表示接收来自 MN 的数据。

RPDO2:0x1401/0x01 值为 2,表示接收 Node ID 为 2 的 CN 的数据。

#### ④ CN 接收映射参数配置

对于接收,映射参数解决如何解析收到的数据帧。接收到的数据帧包含一个或多个对象,接收方应知道需接收数据帧中的哪些对象,即接收数据帧中的哪几段数据。接收 MN 对象数据与数据帧的映射关系如图 7 所示。

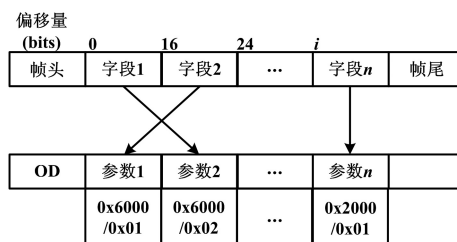


图 7 MN 接收对象与数据帧映射关系

Fig. 7 Mapping between receiving object of MN and data frame

与 CN 接收网络参数配置中 RPDO1 相对应,对 0x1600 的值做如下配置。

0x1600/0x01 值:0x 0010 0000 00 02 6000

0x1600/0x02 值:0x 0008 0010 00 01 6000

#### ⑤ MN 发送、接收参数配置

MN 和 CN 的区别在于:在每个 EPL 循环周期,CN 只需要一个 TPDO;而在每个 EPL 周期中,MN 要向网络中所有的同步 CN 都发送一次 PReq,并接收 CN 响应帧 PRes,因此,MN 在发送时需要多个 TPDO



通道,在接收时需要多个 RPDO 通道。其具体配置方式同 CN。

### 4 结束语

近十年来,以太网技术已广泛引入工业自动化领域,实现远程数据的传输与监控。不同场合对实时性的要求促进了对以太网 CSMA/CD 访问方式的改进,而改进的关键在于网络中节点的调度机制和数据实时通信方式。论文对较新的 EPL 实时以太网调度机制和实时通信原理及配置实现方式进行了深入剖析,对 EPL 实时以太网技术的研究有重要意义。

下一步工作是建立一个标准化的 EPL 通信网络模型。该模型能用于不同调度机制的试验及性能分析、评估。

#### 参考文献

[1] Ethernet Powerlink Standardisation Group. DS301 Ethernet Powerlink communication profile specification version 2.0[S]. 2003.  
 [2] Cena G, Seno L, Valenzano A, et al. Performance analysis of Ethernet Powerlink networks for distributed control and automation systems[J].

Computer Standards & Interfaces, 2009, 31(3):566-572.  
 [3] Seno L, Vitturi S. A simulation study of Ethernet Powerlink networks[C]// IEEE Conference on Emerging Technologies and Factory Automation, 2007: 740-743.  
 [4] Seno L, Vitturi S, Claudio Z. Analysis of Ethernet Powerlink wireless extensions based on the IEEE 802. 11 WLAN [J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2009, 5(2):86-98.  
 [5] Maestro J, Reviriego P. Energy efficiency in industrial Ethernet: the case of Powerlink[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2010, 57(8):2896-2903.  
 [6] 许洪华, 刘科. 确定性工业以太网 Ethernet Powerlink[J]. 冶金自动化, 2004(4):23-25.  
 [7] IEEE. IEEE 802. 3 standard; carrier sense multiple access with collision detection (CSMA/CD) access method and physical layer specifications[S]. 2000.  
 [8] Ethernet Powerlink 中国用户组织. 实时工业以太网 Ethernet Powerlink 技术基础 V2010. 03 [EB/OL]. [2011-11-21]. http://www.Ethernet-Powerlink.org.  
 [9] CAN in Automation, International Users and Manufacturers Group e. V. CANopen application layer and communication profile, CiA/DS301[S]. 2000.

(上接第 83 页)

表 4 节点联网输出功率等级表  
 Tab. 4 Output power levels networking nodes

等级号	8 位二进制数表示	等级号	8 位二进制数表示
01	00000001H	05	00011111H
02	00000011H	06	00111111H
03	00000111H	07	01111111H
04	00001111H	08	11111111H

采用这样的联网方式能大大降低网络通信能量损耗。节点搜索网络时从最低等级开始,直到联入到它相应的网络;汇聚节点与字节、主节点与汇聚节点联网时也是如此,都是以搜索到网络,或者搜索到最远的节点时所用到的最大等级为该节点的联网等级。即能用低级的输出功率稳定通信,就不会采用更高的功率等级通信。

在一段时间内,随着相关节点的丢失、损坏或者网络群首的更替,每个节点的联网等级可能会相应有所变化,但是不能超出该节点的最大联网等级,也就是最大发射功率<sup>[7-8]</sup>。

### 3 结束语

本文提出了一种新型的基于智能灌溉系统的无线传感器网络设计方案。该方案把无线传感器网络与目

前广泛应用的灌溉技术相结合,利用节点网络的各种传感器实时监测农作物生长的土壤墒情和外部环境,通过监测数据为智能灌溉系统的精准灌溉提供判断依据。该技术的应用可以大幅节省农业生产中生产资料的消耗,缓解水资源紧张问题,具有一定的经济效益和社会效益。

#### 参考文献

[1] 王冉,徐本崇,魏瑞成,等. 基于无线传感网络的畜禽舍环境监控系统的设计与实现[J]. 江苏农业学报, 2010, 26(3):562-566.  
 [2] 曹元军,王新忠. 基于作物冠层温度变化的无线传感器网络灌溉系统的研究[J]. 农机化研究, 2010(9):126-129.  
 [3] Rhee I, Warrier A, Min J. DRAND: distributed randomized TDMA scheduling for wireless Ad-hoc networks[C]//Proceedings of IEEE Transactions on Mobile Computing, 2009, 8(10):1384-1396.  
 [4] 张增林,郁晓庆. 基于无线传感器网络的土壤信息采集系统[J]. 节水灌溉, 2011(12):41-43.  
 [5] 吕涛,周燕媚. 基于 2.4G 的检测数据无线传输模块设计[J]. 仪器仪表学报, 2006(6):2062-2064.  
 [6] 刘卉,汪懋华,王跃宣,等. 基于无线传感器网络的农田土壤温湿度监测系统的设计与开发[J]. 吉林大学学报:工学版, 2008, 38(3):604-608.  
 [7] 王粉花,年忻,郝国梁,等. 物联网技术在生命状态监测系统中应用[J]. 计算机应用研究, 2010, 27(9):3375-3377.  
 [8] 何世钧,陈中华,张雨,等. 基于物联网的海洋环境监测系统的研究[J]. 传感器与微系统, 2011, 30(3):13-15.