

文章编号:1001-9081(2009)03-0643-03

## 支持线性拓扑的 EPA 网络研究

姜秀柱<sup>1</sup>,冯冬芹<sup>2</sup>,徐 钊<sup>3</sup>,褚 健<sup>2</sup>

(1. 中国矿业大学 计算机科学与技术学院,江苏 徐州 221008; 2. 浙江大学 信息科学与工程学院,杭州 310013;

3. 中国矿业大学 信息与电气工程学院,江苏 徐州 221008)

(v1d2402@126.com)

**摘 要:** EPA 协议本身支持无冲突共享介质访问。在满足 EPA 规范的前提下,提出了三种支持一线式拓扑的无集中交换 EPA 网络结构形式,给出了实现线性拓扑的无集中交换 EPA 网络的技术措施,并分析了线性拓扑 EPA 网络的实时性能。

**关键词:** 无集中交换;一线式;T 型中继;EPA 网络;微网段

**中图分类号:** TP393.02 **文献标志码:** A

## Research on EPA network without collecting switchers

JIANG Xiu-zhu<sup>1</sup>, FENG Dong-qin<sup>2</sup>, XU Zhao<sup>3</sup>, CHU Jian<sup>2</sup>

(1. School of Computer Science and Technology, China University of Mineral Technology, Xuzhou Jiangsu 221008, China;

2. College of Information Science and Engineering, Zhejiang University, Hangzhou Zhejiang 310013, China;

3. School of Information and Electrical Engineering, China University of Mineral Technology, Xuzhou Jiangsu 221008, China)

**Abstract:** Because EPA protocol realizes accessing media without collision, it supports nodes to share accessing media. Under the specifications of EPA, three EPA network structures were designed without collecting switchers supporting line topology. Methods followed to realize the network form and its real-time property was analyzed.

**Key words:** non-centralized switch; line topology; T pattern repeater; EPA network; micro segment

## 0 引言

网络拓扑结构是实现网络通信的物理基础,是决定网络直径、网络延迟、网络节点数量和网络通信方式的重要因素。网络拓扑有线、星、环、网四大基本结构类型,以及建立在基本结构类型基础上的簇型、树型、多环型和各种复合类型,它们各有特点和优势,分别适合不同网络技术和不同应用领域。通常同一种网络技术仅支持一种基本拓扑结构类型,且与所用传输介质有关。最常用的遵循 IEEE802.3 协议的以太网,依据采用同轴电缆、双绞线和光纤三种不同传输介质,分别支持总线型(同轴电缆)、星型和树型(双绞线和光纤)以及对等连接。由于同轴电缆仅支持 10 Mbps 的传输速率,已经很少再使用,所以目前的以太网多是采用双绞线和光纤两种介质,因而拓扑结构多为星型和树型。

以太网的星型和树型拓扑是通过交换机或集线器(快速和高速以太网主要是用交换机)建立起来的,每个交换机构成一个星型拓扑。交换机是构建现代以太网必须的联网设备。当网络规模比较大节点比较多时,就需要大量的交换机,并通过级联形成树型拓扑。

在工业生产环境中,星型拓扑带来的大量集中布线,给安装调试和使用维护都带来了很大的不便,交换机大量的使用,也大大增加了网络的构建成本,这些因素都严重阻碍了交换式以太网在现场的普及应用。甚至有一些工业应用场合,由于空间限制,根本不允许集中大量布线,如数控机床系统。此外对于节点多而远距离分散的应用,如矿井生产监控系统、人防监控系统、城市地铁监控系统、道路监控系统等,由

于星型拓扑的通信距离有限,也无法应用在这些场合。

因此要将以太网技术成功应用于广泛的工业领域,有必要对以太网的拓扑结构进行改造,要在现有传输介质的支持下,在不改变以太网的核心技术和充分利用现有以太网实现技术的条件下,研究支持线式拓扑结构的工业以太网的实现方法和实现技术。

目前已有的国际工业实时以太网标准中,有 EtherCAT 和 Powerlink 两种支持一线式拓扑结构,其他均仅支持星型和树形拓扑。通常支持一线式连接的网络节点还可以支持构成其他拓扑结构,组网十分灵活,非常方便现场布线、设备安装和线路维护。

## 1 现有 EPA 网络的结构

EPA 是完全建立在 802.3 协议基础上的工业实时以太网技术。它仅通过在 MAC 之上增加一个实时调度规范,采用时间片分配的方法,避免了 802.3 协议网络中的冲突,从而实现了确定性通信,满足了工业控制网络的实时性要求。但它并没有对 802.3 协议网络中拓扑结构技术作任何改变,依然沿用了基于双绞线和光纤介质的星型和树型拓扑。EPA 网络的基本拓扑结构如图 1 所示。

图中网桥是 EPA 网络用来隔离独立实时周期网段而设置的,每个网桥内侧(连接 EPA 现场节点的一侧)构成一个 EPA 实时周期域,被称作一个微网段。一个微网段至少包含一个交换机,节点多于一个交换机的端口数时,就要增加一个交换机。

采用交换机的 EPA 网络,每对 EPA 现场节点间的通信实

收稿日期:2008-10-06;修回日期:2008-11-24。 基金项目:国家创新研究群体科学基金资助项目(60421002)。

**作者简介:**姜秀柱(1962-),男,江苏铜山人,副教授,博士研究生,主要研究方向:工业控制网络、并行处理技术; 冯冬芹(1968-),男,江苏泰州人,教授,博士,主要研究方向:工业实时以太网、先进控制技术; 徐钊(1955-),男,江苏淮阴人,教授,博士生导师,主要研究方向:接入网技术、嵌入式系统技术; 褚健(1963-),男,浙江海盐人,教授,博士生导师,主要研究方向:工业自动化、先进控制技术。

际是发生在至少两对点对点(节点 1 到交换机端口 a, 交换机端口 b 到节点 2)之间的, 如果需要通信的两个 EPA 现场节点是跨交换机的, 则通信过程还要增加两对交换机端口间的点对点通信。由于交换机工作过程包括查表等操作, 所以通信线路中每经历一个交换机, 数据传输都会增加一个交换机延迟。也就是说, EPA 网络不仅存在集中布线、交换机成本两大问题, 而且存在较大延迟和时延抖动的问题。

此外, 采用交换机的 EPA 网络中的节点的最远直接传输距离受以太网物理层 PMD 电路驱动能力和双绞线高频衰减的限制, 最长不超过 200 m(双绞线)。因此采用 EPA 技术的工业以太网的节点分布距离只能在 200 m 线缆范围(非地理范围)之内。

所以要进一步改进 EPA 的性能, 拓展 EPA 网络的应用范围, 对 EPA 的拓扑结构展开研究很有必要。

实际上, 高速以太网采用交换式星型拓扑结构的目的是, 为了通过采用点对点的连接方法, 从物理线路上避免存在共享介质, 从而大大减少访问冲突, 提高数据传输速率和传输介质的利用率。而 EPA 网络则已经从协议上解决了访问冲突, 即使存在共享介质也不会发生访问冲突, 因此 EPA 网络完全可以采用总线结构和环型结构等共享介质的拓扑方式, 其优点就是线缆少, 布线简单方便, 无须交换机。

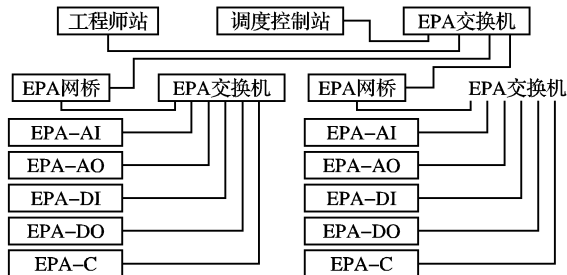


图 1 EPA 网络基本拓扑结构

## 2 非集中交换的 EPA 网络

由参考文献[1-2]知, EtherCAT 和 Powerlink 这两种支持一线式拓扑结构的工业实时以太网的特点就是在它们网络中的每一个节点内都设置有两个网络接口, 一进一出, 节点可以实现串行连接。

对于 EPA 网络, 由 EPA 网络协议以及它的基本拓扑结构可知, 网桥是构建 EPA 网络必需的, 不论是怎样的拓扑结构, 都要通过网桥隔离出微网段, 在每一个微网段内实现各节点间的实时传输。考虑到这一点, 将 EPA 网络改造成支持一线式拓扑结构的网络可有以下几种方案。

### 2.1 环网方式

环型 EPA 网络如图 2 所示。

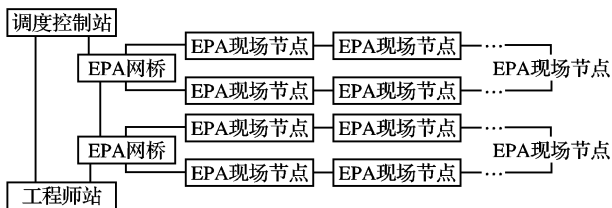


图 2 环型 EPA 网络

其优点是除了支持一线式拓扑连接外, 还具有冗余功能。通过支持以太网生成树协议 STP, 可以实现环路双向传输互为冗余。若要构成这样的拓扑结构, 需要对现行的 EPA 网桥和 EPA 现场节点进行重新设计。每个 EPA 节点都含有两个

以太网接口, 每个接口都能够支持双工通信。这时隔离微网段的网桥变成了多路网桥, 要求具有四个以太网接口, 以便与其他环网相连。如果上层非实时网络节点之间互联不采用环型结构, 也可使用交换机将它们连接起来, 在上层形成一个局部星型拓扑。这时网桥只需三个以太网接口即可, 但仍需重新开发。

### 2.2 菊花链方式

菊花链型 EPA 网络如图 3 所示。若要构成这样的拓扑结构, 同样需要对现行的 EPA 网桥和 EPA 现场节点进行重新设计。除了末端 EPA 节点可用原来设备不用重新设计外, 中间的每个 EPA 节点要含有两个支持双工通信以太网接口。这时隔离微网段的网桥有两种: 一种可以沿用原来的两端口网桥, 用于连接最末端的微网段; 一种要求具有三个以太网接口, 用来连接中间位置的微网段, 同时与其他两个网桥或一个网桥一个控制站相连。如只考虑微网段采用菊花链连接, 也可以在上层非实时微网段使用一个交换机, 用来连接非现场 EPA 节点, 这样可以不用开发新的网桥, 全部使用原来的两端口网桥即可。

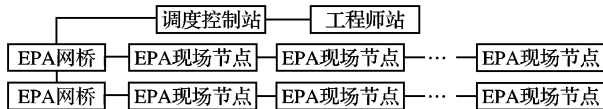


图 3 菊花型 EPA 网络

### 2.3 总线方式

总线型 EPA 网络如图 4 所示。若要构成这样的拓扑结构, 只需开发一个三端口的 T 型中继器, 原来所有 EPA 设备均无须作任何改变, 皆可以直接接入该网络。

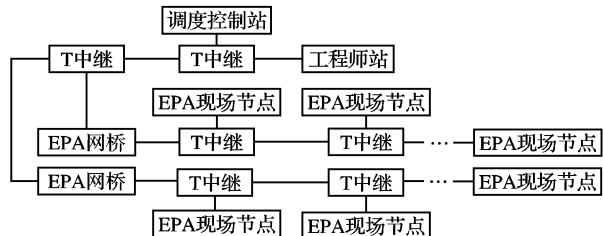


图 4 总线型 EPA 网络

在上述三种支持一线式拓扑的网络结构中, 前两种都需要对 EPA 节点进行重新开发。其思想类似于 EtherCAT 和 Powerlink, 都是要求每个现场网络节点具有两个网络接口。

EtherCAT 是在它的每个从节点中使用支持 EtherCAT 集总帧时间槽映象访问的专用芯片来构成双端以太网物理接口, 支持对同一个以太网帧的负载域中分配给自己的时间槽数据的局部快速读写操作以及读写前后的校验运算, 在进行读写和先后校验的同时, 持续转发以太网帧, 节点几乎不产生任何传输延迟, 并利用双工线路实现逻辑环路传输。它支持环型链接、菊花链链接等一线式连接方式, 也可根据节点分布需要构成各种分支型拓扑结构。

在 Powerlink 网内, 节点的介质使用权力是由网内专设的管理站点统一进行分配调度的, 网中同一时间内只有一个以太网帧, 不存在冲突, 所以 Powerlink 节点可采用数量不受限制的 HUB 连接。为了连网方便, Powerlink 在每个 Powerlink 节点内设置了两端口的 HUB 接口, 这样它不仅支持菊花链式等一线式拓扑结构, 而且支持其他任意结构连接。

若采用重新设计 EPA 节点方案, 由于 EPA 网络是用类似 Powerlink 一样的方法避免介质访问冲突的, 所以也可以像 Powerlink 一样采用 HUB 方法联网, 即将每个 EPA 节点的单

端口网络接口改造设计为双端口 HUB 接口。与此同时,对 EPA 网桥也要重新设计,使其具有多个端口,可以设计三端口和四端口两种网桥,以构成不同的一线式拓扑结构。EPA 节点具有双端口 HUB 接口以后,可以连接成环型、菊花链型、分支型等任意结构。

需要指出的是,为了支持总线供电,支持一线式拓扑结构的 EPA 节点应该具有供电能力,但由于使用的是统一的双绞线连接,在靠近电源方的双绞线线路将随着连接节点数的增加承担成倍增长的电流负荷,这是无法实现的。所以采用环网方式和菊花链方式的 EPA 网络中的现场节点需要独立供电。

与环网方式和菊花链方式相比,总线方式由于无需对当前 EPA 节点以及 EPA 网桥作任何改变而更具有优势,此外采用 T 型中继除了可实现一线式拓扑外也支持任意拓扑连接。原 EPA 节点的总线供电问题,可以通过 T 型中继供电解决,每个 T 型中继由专用电源线独立供电,EPA 节点的电源直接通过总线方式从 T 型中继中转接。

### 3 非集中交换 EPA 网络的实时性能

无论环网方式和菊花链方式还是总线方式,都需要设计新的多端口以太网连网电路。将这个连网电路集成到原 EPA 节点电路中去,即可实现环网方式和菊花链方式的拓扑;将这个连网电路独立出来,就构成了总线方式。这个连网电路只需要工作在 802.3 协议的物理层,其作用就是实现以太网信号的中继传输,具体而言就是对信号进行输入、放大、整形、重定时和转发。

目前市场上,支持 802.3 协议规范的集成芯片有多种,从原理上可以分为三大类:MAC 类、MAC + PHY 类和 PHY 类,其产品形式也有单端口、双端口、四端口、五端口、八端口和十六端口等系列。其中可用双端口的 MAC + PHY 类芯片来设计嵌入 EPA 节点内的通信电路,支持环网方式和菊花链方式的无交换机 EPA 网络。而用 PHY 类的双端口和四端口的芯片来设计具有独立形式的三通 T 型中继器,用来支持总线方式形式的非集中交换机 EPA 网络。

在 IEEE802.3 协议最新完整版 2005 section two 和 section three 中,有对 100 Mbps 和 1 000 Mbps 中继器功能的最新标准规范。在这个规范中,要求中继器在每个传输端口完成 PCS、PMA、PMD、AUTO-NEG 和 MDI 功能,其协议结构如图 5 所示。

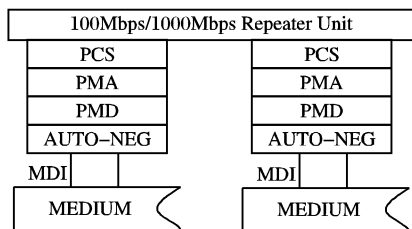


图 5 IEEE802.3 中继器通信模型

图 5 中 PCS(物理编解码)和 AUTO-NEG(速率和极性自动协商)功能在 100 Mbps 中是可选的,而在 1 000 Mbps 中没有 AUTO-NEG 功能要求<sup>[3]</sup>。

之所以在图 5 中出现有 PCS 子层的功能,是因为在 IEEE802.3-2005 规范中除了要求中继器具有信号中继的功能外,还要具有载波和冲突检测、故障隔离、冗长传输中止等功能,这些都需要建立在数据识别的基础上。而在 EPA 网络中,只需要中继器的信号中继的功能,即只需要 PMA(物理介

质访问)、PMD(物理介质关联)和 MDI(介质关联接口)三个子层功能。因此进行 T 型中继器设计时,可选择不含有 PCS 功能的芯片。

在 IEEE802.3-2005 规范中,对每一个子层的延时具有明确的限定,这些延时集合组成了中继器的总传输延迟,也决定了采用 T 型中继的 EPA 网络的总延迟。两种速率中继器内部层间总延迟限制如表 1 所示。

表 1 中继器子层间的延迟限制

中继器速率/Mbps	子功能层	最大延迟/b
100	Unit to MDI	136
	MDI to Unit	192
1 000	Unit to MDI	14
	MDI to Unit	32

除此之外,中继器还有 3 个专有的时间延迟指标,它们分别是:

帧起始转发延迟 SOP 它是从端口收到帧起始信息到该起始信息被转发到另一端所需时间,100 Mbps 中继器要求  $SOP < 46 \text{ BT}$ ,1 000 Mbps 中继器要求  $SOP + SOJ \leq 976 \text{ BT}$ 。

冲突发生堵塞转发延迟 SOJ 它是从有第二个端口收到载波信息,生成堵塞信号到将堵塞信号转发至所有端口所需时间,100 Mbps 中继器要求  $SOJ < 46 \text{ BT}$  (Bit Time, 位时间),1 000Mbps 中继器要求  $SOP + SOJ \leq 976 \text{ BT}$ 。

冲突结束堵塞转发延迟 EOJ 它是从端口收到冲突结束状态信息到堵塞结束信息被转发到所有端口所需时间,要求  $EOJ \leq SOP$ 。

由于 EPA 网络不存在访问冲突,所以上述三个指标中,只有第一个指标有意义。结合表 1 的延迟限制,可以计算出中继电路的最大延迟时间为:

$$Td-100 = 46 \times 1/100 = 0.46 \mu\text{s}$$

$$Td-1000 = \max(136 + 192, 976/2) \times 1/1000 = 0.488 \mu\text{s}$$

即,不论是百兆还是千兆速率,在 EPA 网络中每个中继带来的延迟小于  $0.5 \mu\text{s}$ 。在一个 EPA 微网段内接入 100 个 EPA 节点时,由中继带来的延迟也不过  $50 \mu\text{s}$ ,远远小于  $1000 \mu\text{s}$  (1 ms) 的严格实时性标准,完全满足运动控制系统的实时性要求。

### 4 结语

通过上面的分析研究,可以得出非集中交换式的 EPA 网络不仅是完全可行的,而且能满足运动控制系统的实时要求。

只支持星型拓扑的交换式 EPA 网络,由于拓扑结构的局限性,制约了它的应用推广,削弱了它在工业实时以太网方面的技术优势。将 EPA 发展为支持一线式连接的具有灵活拓扑能力的网络,必将增强 EPA 的技术优势,进一步拓宽 EPA 的应用领域。

#### 参考文献:

- [1] Ether CAT ——以太网现场总线技术介绍及概览[EB/OL]. [2008-09-01]. <http://www.ethercat.org/pdf/cn/EtherCAT-Introduction.pdf>.
- [2] 奚清漪,麦云飞. 基于 Ethernet Powerlink 的伺服通信控制[J]. 工业控制计算机,2006,19(7):23-24.
- [3] 曾祥辉,冯冬芹. 基于 W3100A 的智能仪表以太网接口的设计[J]. 工业仪表与自动化装置,2006(3):58-60.
- [4] IEEE802.3-2005 section2/section3/section4/section5[S/OL]. [2008-09-01]. <http://www.ieee-standard.com/802/802.3.html>.