2012 年 10 月 北京航空航天大学学报 October 2012
第38卷 第10期 Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics Vol. 38 No. 10

基于以太网器件的高性能工业现场总线 FED

胡 星 郇 极 刘 喆

(北京航空航天大学 机械工程及自动化学院, 北京 100191)

摘 要: 研究一种采用通用以太网物理层元件和 FPGA 器件构成的现场总线 FED (Fieldbus based on Ethernet Devices),在片上系统(SOC,System On Chip)上开发出实用的现场总线通信装置. FED 不需要复杂的驱动程序就可以实现链路层通信,在链路层基础上可以根据控制需要设计应用层通信协议. FED 采用基于带飞读写功能的集总帧结构,使用主从式通讯. FED 系统由 1 个主站和最多 255 个从站组成,实现了 100 Mbit/s 的高速实时通信. 建立了实验系统,验证了 FED 总线可以满足数控机床等工业自动化设备的控制需求.

关 键 词: 以太网物理层元件; 集总帧; 飞读写; 片上系统

中图分类号: TP 273

文献标识码: A **文 章 编 号**: 1001-5965(2012)10-1326-05

FED: high performance industrial fieldbus based on Ethernet devices

Hu Xing Huan Ji Liu Zhe

(School of Mechanical Engineering and Automation, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100191, China)

Abstract: A kind of high-speed real-time fieldbus used in automation equipment named fieldbus based on Ethernet devices(FED) was studied. FED is based on Ethernet components and FPGA chip. System on chip (SOC) technology was used to develop a kind of practical FED device. Without complex driver, media access control layer communication was realized. The application layer protocol can be designed for different control tasks. FED performs at 100 Mbit/s on summation frame and employs "data operation on fly" technology. Master-slave structure is used in FED which supports one master and 255 slaves. The prototype system proves that FED can meet the high-speed and real-time requirement of industrial automation equipment.

Key words: Ethernet devices; summation frame; data operation on fly; system on chip(SOC)

近年来基于以太网的工业现场总线已经成为工业控制设备现场总线的发展方向. 国际电工委员会 IEC 于 2007 年颁布了 10 种基于以太网的现场总线标准,如 EtherCAT,PROFINET,SERCOS Ⅲ等[1]. 这些总线具有丰富的控制功能,能够覆盖从小规模自动化设备到超大规模自动化车间和工厂的应用需求. 但是它们的技术使用难度较大,需要开发大量的驱动程序而且配置过程非常复杂. 在工业自动化领域中,用于设备控制的现场总线占有很大的应用需求比例. 例如:数控机床中数控系统与伺服装置的通信,工业机器人控制系统与伺服装置的通信,它们通常要求很高的通信速度和很高的通信可靠性,但是不要求很复杂的可配置性. 适用于大规模车间和工厂的现场总线对于这些应用来说过于复杂,这类应用需要开发一种配置简便、低成本、高可靠性的现场总线. 以太网在计算机网络领域中获得了广泛应用,强大的市场需求使其核心物理层器件得以大规模生产,在性能和成本方面显示出极大的优越性. 因此本文提出一种基于以太网器件的工业现场总线 FED (Fieldbus based on Ethernet Devices). FED 主要面向工业自动化设备,使用便捷无需复杂驱动程序,自动完成网络的建立和通信的准备工作,能在底层网络透明的情况下实现高速实时通信.

收稿日期: 2012-02-29; **网络出版时间**: 2012-06-15 10:12

网络出版地址: www.cnki.net/kcms/detail/11.2625.V.20120615.1012.014.html

作者简介: 胡 星(1986 -),男,陕西汉中人,博士生,baccchu@163.com.

1　FED 结构和工作原理

工业以太网通常将 ISO/OSI 定义的标准 7 层通信模型简化为 3 层模型,分别为物理层、数据链路层和应用层[1].3 层结构如图 1 所示. FED 采用通用以太网物理层器件(带变压器 trafo 的 RJ45 接头和 PHY 芯片)和专门开发的 FPGA 片上系统(SOC,System On Chip)分别实现物理层和链路层. 应用层可以由设备用户自行定义,也可以采用目前自动化设备常用的通信协议,例如 CANopen, SERCOS 等.

FED 原理如图 2 所示,采用了主从式控制方式,线性拓扑结构,主站与上层的控制器相连,从站与上层的 IO 设备或者伺服电机相连. FED 数据传输率为 100 Mbit/s,站点连接使用 100BASE-TX 标准电缆,最大距离 100 m,主站可以最多挂接 255 个从站. 主从站采用统一的硬件结构,FED 站点可以被配置成为主站或者从站. 主站负责参数设定、指令发送、过程数据采集和状态信息的读取,并且对系统的异常做出处理. 从站负责指令数据提取和状态信息写入.

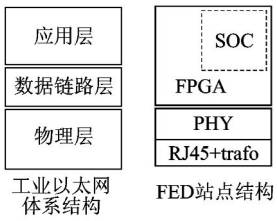


图 1　FED 的体系结构

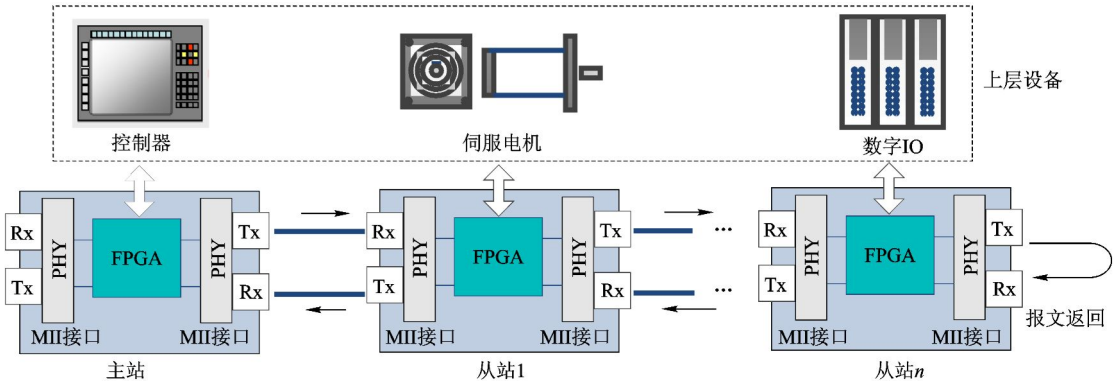


图 2　FED 结构和运行原理

站点的 Rx 为接收端口,Tx 为发送端口. 主站发出下行数据帧,遍历所有从站设备. 每个从站在数据帧经过时交换其中的数据,然后传递报文给下一个从站,最后一个从站把经过完全处理的数据帧作为上行数据帧返回发送给主站,主站收到上行数据帧后,处理返回数据,一次通讯结束.

2　FED 数据帧格式和通信模式

2.1　数据帧格式

在 FED 协议中,主站把给从站发送的所有信息打包到一个数据帧内,这种数据帧称为集总帧.

通用以太网因为考虑到载波侦听的碰撞检测机制的效率问题,规定网络上传输的帧大小不能超过 1 536 Byte. FED 使用的是全双工传输,由于没有冲突检测和回退机制,FED 集总帧的长度可以超过普通以太网规定的标准帧长度.

FED 数据帧的格式如图 3 所示. FED 协议规定了“FED 帧头”包含了“Preamble”,“SFD”和“标识码”3 个字段. “Preamble”和“SFD”是指 IEEE 802.3 标准所规定的前导码和帧起始界定符;“标识码”包含“U/D”、“保留”和“帧类型”3 个字段;“U/D”位用来标记该数据帧是上行还是下行;“保留”是系统保留的扩展功能控制位;“帧类型”是用来区分 FED 不同运行过程中使用的数据帧;“数据区”是指数据帧的具体内容;“FCS”是指采用了 CRC32 的帧校验序列.

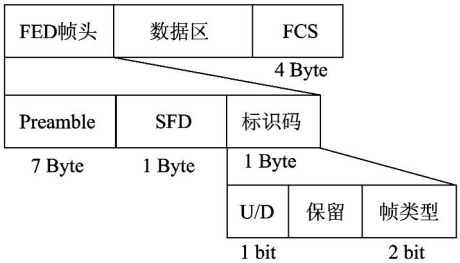


图 3　FED 帧格式

FED 有 3 个运行过程:编码配置过程、读写空间配置过程和周期运行过程. 在这 3 个过程分别使用编码配置帧(帧类型 = 0)、读写空间配置帧(帧类型 = 1)和数据空间帧(帧类型 = 2).

2.2　编码配置过程

FED 从系统上电开始进入编码配置过程,在

编码配置过程中使用编码配置帧. 该配置帧如图 4 所示,“当前站号”是指配置帧从主站发出后每经过一个从站加 1,表明从站在系统中物理位置编号;“从站本地编码区”中是由各从站硬件设定的从站本地编码.

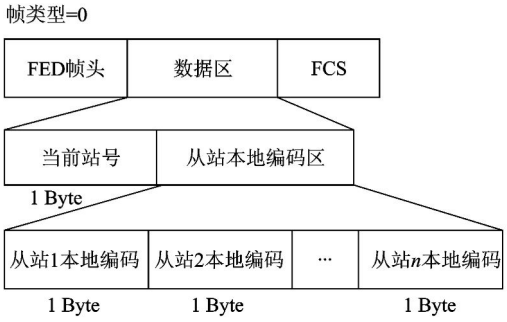


图 4 编码配置帧

主站首先发出编码配置帧,帧的“当前站号”为 0,“从站本地编码区”为空. 配置帧经过第一个从站时从站把“当前站号”加 1,把本地编码顺序填写在“从站本地编码区”中,最后把“帧校验序列”重新计算后发给下一个从站. 帧依次传递,每一个从站都进行上述操作,当配置帧经过最后一个从站返回主站的时候,主站不仅获取了系统中的从站数量,而且获得了各从站的本地编码和物理位置编号的对应关系,本文把这种对应关系称为编码映射. 如果各从站的本地编码没有冲突,这个配置过程只要 1 次通讯就能完成,如果有冲突主站会停止并报警.

2.3 读写空间配置过程

接下来 FED 进入到配置过程的第 2 步——读写空间配置过程,在编码配置过程中使用编码配置帧. 该配置帧如图 5 所示. “当前数据地址指针”是当前从站的读写数据在数据空间中的起始地址,用来给从站建立数据地址映射;“空间申请表”标示各从站读空间大小和写空间大小,反应了各从站申请的读写空间长度的大小.

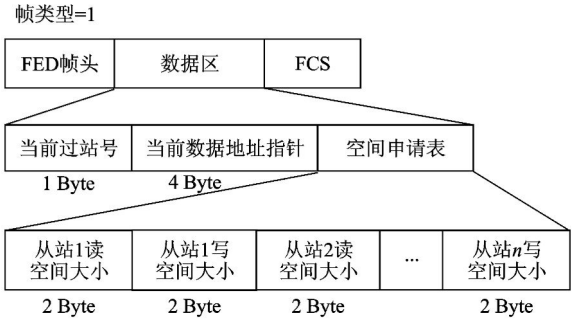


图 5 读写空间配置帧

主站发出读写空间配置帧,帧的“当前站号”为 0,“当前数据地址指针”为 0,“空间申请表”内容为空. 配置帧经过第 1 个从站时从站把当前站号加 1,把需要申请的读写空间大小顺序填入“空间申请表”中,并把“当前数据地址指针”加上该从站所占用的读写空间总长度,最后把“帧校验序列”重新计算后发给下一个从站. 帧依次传递,每一个从站都进行上述操作,当配置帧经过最后一个从站返回主站的时候,主站就能得到所有从站的读写数据空间在数据空间帧中的对应关系. 本文把这种对应关系称为数据映射. 该配置过程 1 次通讯可以完成.

2.4 周期运行过程

主站在自动完成编码配置过程和读写空间配置过程后立即通知上层控制器,上层控制器根据编码映射和数据映射控制主站对从站开始周期性数据操作.

主站按照设定好的控制周期,每一个周期发送一个数据空间帧. 数据空间帧如图 6 所示. “索引表”标明了主站决定的每个从站读写数据权限;“周期性数据区”中从站数据按照从站在系统中的物理位置,也就是在配置过程中数据帧经过从站的先后顺序进行排列.

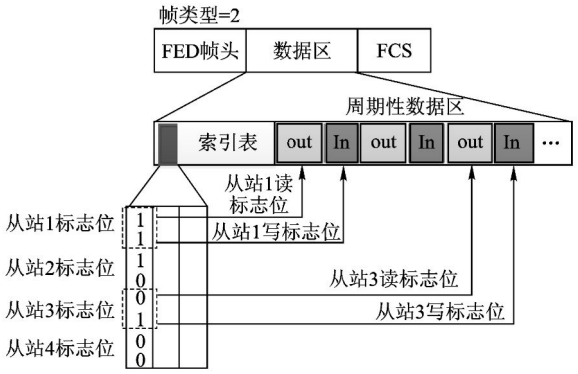


图 6 数据空间帧

从站按照在系统中的物理位置依次占用索引表的 2 位比特,这 2 位比特称为该从站的索引位. 例如索引表的第 1 个字节可以作为从站 1 到从站 4 的索引位. 2 位比特的第 1 位表示从站读权限,第 2 位表示从站写权限. 权限位的值如果为 0 则表示从站没有相应的操作权限,值为 1 则表示从站有相应的操作权限. 数据空间帧经过从站时,从站按照操作权限对本站的周期性数据进行操作,然后反转索引位. 例如从站如果进行了读操作就把读权限位的 1 反转到 0,如果进行了写操作就把写权限位的 1 反转到 0,如果该从站既没有读权限也没有写权限则把索引位的 00 反转到 11. 该操作的意义是提示主站该从站正确操作了权限范围内的周期性数据,同时告知主站从站处于正

常的工作状态,有利于主站对于网络和站点情况的监控和诊断,索引位的反转操作见表 1.

表 1　索引位的反转操作

原始值	操作权限	反转后
00	不可读写	11
01	只可写	10
10	只可读	01
11	可读可写	00

从站在数据空间帧经过时读取控制数据执行指令,同时把状态数据写入帧中,反转索引位. 数据空间帧返回主站后,主站对每个从站的状态数据和索引位进行甄别和处理并且准备开始下一周期的发送. 在系统中运行的数据空间帧实际上就是一个以控制周期为基准定时刷新的数据空间,供主从站交换数据.

3　基于 SOC 的主从站实现方法及实验

3.1　飞读写的实现

飞读写功能可以使 FED 从站在接收的同时处理并转发数据帧. 如图 7 所示,从站一旦探测到数据帧的到来,FPGA 中的飞读写模块(Fly_moudle)就开始工作. 模块监视正在经过从站的数据帧位置,如果该位置是本从站的读地址,那么模块将数据帧中该位置的字节复制出一个副本,同时数据帧不停留直接被发送出该从站. 当数据帧中从站读地址的数据字节被全部复制,副本数据会被组合成为完整的数据供从站上层设备访问;如果模块监视到经过从站的数据帧位置是本从站的写地址,模块会将准备好写入的字节替代当前数据帧中该位置的数据,同时数据帧立即被发送出该从站. 飞读写功能使若干从站可以同时处理集总帧的不同部分,因此保证了通信的快速性和实时性.

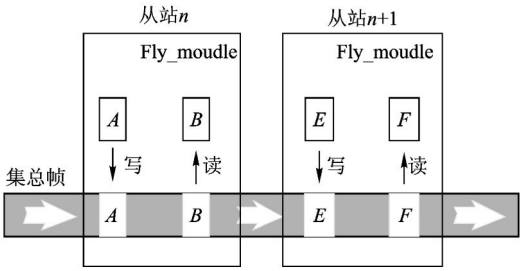


图 7　飞读写功能

3.2　主从站构成

针对 FED 这种易操作的以太网现场总线,主从站使用相同的硬件结构,统一的硬件和接口使安装和匹配更简便. 站点可以使用 FPGA 引脚电平设定站点类型和配置参数,例如主站的主从属性和读写空间.

考虑到主从站系统功能的复杂性和可扩展性,主从站 FPGA 内的模块结构如图 8 虚线框内所示. 片上 NiosII 软处理器通过 Avalon MM 和 Avalon DMA 两种片上总线接口连接了各种硬件描述功能模块. 其中主站独有负责帧生成和帧接收的 Control_moudule 模块,而从站独有负责飞读写的 Fly_module 模块和负责帧转发的 Loop_module 模块,其余的 Config,Registers,MII_control,Receive 和 Transmit 5 个模块为主从站通用模块. Config 负责芯片的主从属性和从站本地编码等基本配置,Registers 为功能寄存器模块,MII_control 为管理 PHY 芯片的模块,Receive 和 Transmit 为接收和发送数据流的模块. NiosII 还通过 Avalon MM 接口和片内 DPRAM 相连,主从站的上层设备通过 DPRAM 和 FED 站点进行数据交换.

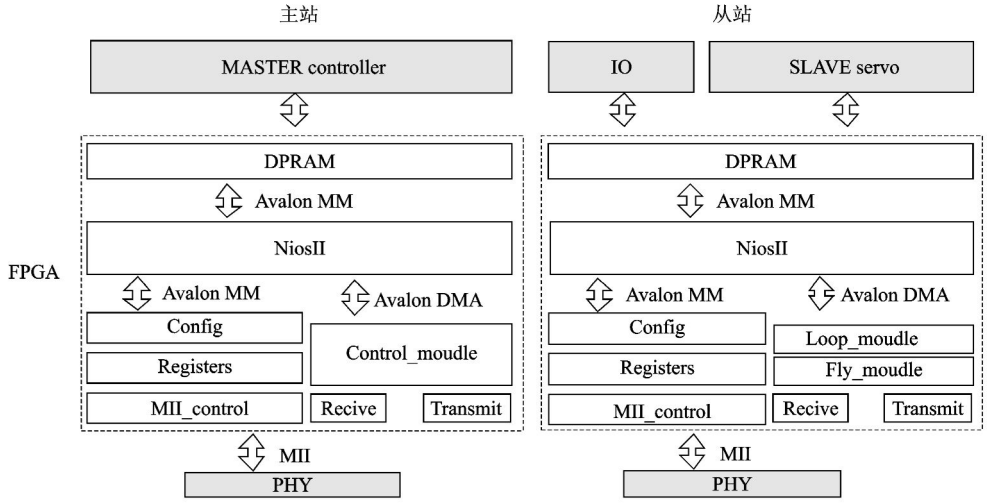


图 8　主从站结构功能图

3.3 实 验

为了测试 FED 主从站性能,如图 9 所示,作者搭建了站点间电缆长度为 15 m 的单主站双从站的测试系统. 数据延迟分析如图 10 所示. SignalTAP 是一款功能强大且极具实用性的 FPGA 片上调试工具. 据 SignalTAP 测量数据,在 FED 从站中数据帧从 PHY 的 MII 接收引脚到 FPGA,经过 FPGA 处理后再到 MII 发送管脚需要的延时 t_f = 760 ns. 根据芯片手册,PHY 芯片接收数据的最大延时 t_r = 110 ns,发送数据的最大延时 t_t = 60 ns,数据帧在 15 m 电缆上传播的延时 t_w = 50 ns,因此经过一个从站的总延时 t_s = 0.98 μs.

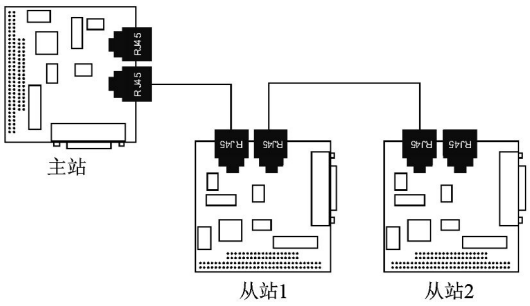
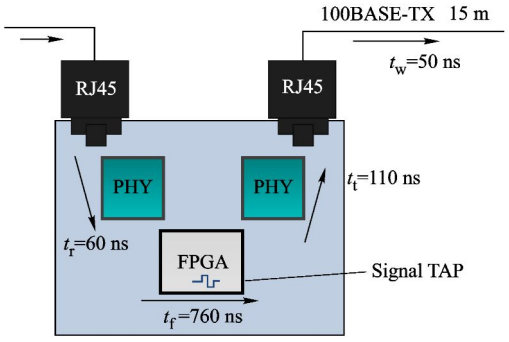


图 9 实验验证系统



$$t_s = t_r + t_f + t_t + t_w = 0.98\ \mu s$$

图 10 数据帧延迟分析

4 结 论

在线性拓扑中每个数据帧会 2 次经过同一个从站,在本实验系统中 2 个从站会带来 4 μs 的延迟. 根据主站的 SignalTAP 测量结果,主站发出数据帧和收到数据帧的间隔为 4 μs,与计算数据一致. 根据实验结果可知在系统挂载最多 255 个从站,每个从站为 2 Byte 输入 2 Byte 输出数据时,系统的最小控制周期可以达到 0.51 ms. 其实时通信能力远远超过目前流行的现场总线 RS485 和 CAN. 因此 FED 完全满足 CNC、工业机器人等自动化设备对于高速实时通信的需求.

参考文献(References)

[1] 郇极,刘艳强. 工业以太网现场总线 EtherCAT 驱动程序设计及应用[M]. 北京:北京航空航天大学出版社,2010:1 - 28,115 - 120
Huan Ji, Liu Yanqiang. Design and application of industrial Ethernet fieldbus EtherCAT drivers[M]. Beijing: Beijing University of Aeronautics and Astronautics Press, 2010: 1 - 28, 115 - 120 (in Chinese)

[2] 郇极,尹旭峰. 数字伺服通讯协议 SERCOS 驱动程序设计及应用[M]. 北京:北京航空航天大学出版社,2005:19 - 27
Huan Ji, Yin Xufeng. Design and application of digital servo communications protocol SERCOS drivers[M]. Beijing: Beijing University of Aeronautics and Astronautics Press, 2005: 19 - 27 (in Chinese)

[3] 张凤登. 从 MAC 角度分析现场总线的多样性[J]. 自动化仪表,2009,30(7):1 - 5
Zhang Fengdeng. Analyzing the diversificationn of fieldbus standards from the viewpoint of media access control[J]. Process Automation Instrumentation, 2009, 30(7): 1 - 5 (in Chinese)

[4] Bechhoff Information System. Products & solution CD [EB/CD]. Eiserstraβe: Beckhoff Inc, 2007[2012-02-03]

[5] EtherCAT Technology Group. EtherCAT_SoE_specification_V1.01. pdf, version 1.01[EB/OL]. Nuremberg: EtherCAT Technology Group, 2010[2012-02-03]. http://www.ethercat.org/cn/publications.html#logo

[6] Rafal C, Lukasz H. Field level industrial Ethernet network data analysis[J]. Communications in Computer and Information Science, 2011, 160: 358 - 366

[7] Xiong Jianqiao, Xiong Xiaosong. The research of CNC communication based on industrial Ethernet[J]. Electrical Engineering and Control, 2011, 98: 689 - 694

[8] 刘喆,郇极,刘艳强. 基于 XML 的 EtherCAT 工业以太网协议解析技术[J]. 北京航空航天大学学报,2011,37(9):1086 - 1090
Liu Zhe, Huan Ji, Liu Yanqing. Parser of industrial Ethernet EtherCAT bassed on XML[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2011, 37(9): 1086 - 1090 (in Chinese)

(编 辑:文丽芳)