

一种光纤现场总线通讯系统的分析与设计^①

杨国栋^② 梁自泽 李 恩 范长春

(中国科学院自动化研究所复杂系统与智能科学实验室 北京 100190)

摘 要 针对煤矿、机场等特殊工业现场,设计了一种基于复杂可编程逻辑器件(CPLD)和光模块的光纤现场总线通讯系统。在物理层,该系统使用光纤代替双绞线,提高了通讯的速度和抗电磁干扰能力,并通过 CPLD 进行信号的调制解调以及现场设备传输模式的切换,实现光电信号之间的转换,使整个通讯系统形成环形拓扑网络,提高了通讯的可靠性。在应用层,通过定义扩展帧、设置帧号和位图、使用管道技术等,提高了系统的通讯效率和准确性。技术分析表明,该通讯系统具有较实用的兼容性及可扩展性。

关键词 现场总线,复杂可编程逻辑器件(CPLD),光模块,通讯协议

0 引 言

工业现场中的通讯系统是连接监控服务器和各现场检测监控设备的互联网络,对实现现场实时检测监控至关重要。目前,现场通讯系统主要包括各种现场总线控制系统(field-bus control system, FCS)、工业以太网(industrial ethernet, IE)、无线网络(wireless net, WN)等,在不同的应用环境中,现有的系统都有各自的优越性和不足之处。现场总线控制系统是一种数字化的串行双向通信系统,它将专用微处理器置入传统的测量控制仪表和传感器等设备中,使它们各自具有了数字计算和数字通信能力,并采用可进行简单连接的双绞线等作为总线,在远程控制计算机和现场设备之间实现数据传输和信息交换,低成本,效率高。现场总线技术一般采用短帧格式发送报文,通过总线式结构进行信息传输。自 20 世纪 80 年代中期以来,形成了几种代表性的现场总线技术,如基金会现场总线(foundation fieldbus, FF)、Profibus、CAN、DeviceNet 等。工业以太网是应用于工业现场的以太网,具有低价高速、技术成熟等优点,能够向上兼容传统以太网协议,同时又适合于工业现场的特殊环境。它继承了传统以太网的特点,比如采用冲突检测载波监听多路访问(carrier sense multiple access with collision detection, CSMA/CD)的媒介访问方式和总线式传输结构等。典型的工业以太网有德国西门子公司研制的 SIMATIC NET 等。无线

网络是通过无线电波作为传输介质、通过无线射频技术进行通信的,无需铺设通讯线路,数据传输方便、快速。它通过基站和接入点形成通讯系统,具有可变的拓扑结构,使得节点在网络覆盖区域内的任何位置都可以接入网络。目前的无线网络协议主要有 IEEE 802.11 和 HIPERLAN 等。

工业现场环境要求现场通讯系统不仅要具有远距离、高速度和大数据量传输的能力,还要有很强的抗电磁干扰能力及可靠性,现有的系统往往不能满足要求,如:现场总线控制系统的短帧格式传输在面对大数据量时,效率不足,重要信息不能及时发送,同时总线式结构使得所有现场设备都挂接在一条总线上,一旦总线上某点发生故障或者断开,那么整个系统将陷入瘫痪,使得通信系统极不可靠;工业以太网的碰撞式媒介访问方式具有随机性和不确定性,不能保证信息的实时传输,虽然可以通过提高网络速度,减少接入节点,采用网络交换机等方式降低碰撞几率,但是这样通讯系统成本势必大幅增加;无线网络的传输距离有限,高速度的传输也只限在一定的范围内,同时建设无线网络必须设立基站(base station, BS)或者接入点(access point, AP),在一定程度上增加了系统成本。针对这种情况,本文设计了一种适应于煤矿、机场等特殊工业现场的基于光模块和复杂可编程逻辑器件(complex programmable logic device, CPLD)的光纤现场总线通讯系统。系统分为物理层、数据链路层和应用层。物理层使用光纤

^① 863 计划(2007AA041701-1, 2007AA041502)资助项目。

^② 男,1984 年生,博士生;研究方向:机器人控制、现场总线;联系人, E-mail: guodong.yang@ia.ac.cn (收稿日期:2008-09-09)

代替双绞线,提高了系统抗电磁干扰能力及通信速率,实现了信息的远距离高速率传输。数据链路层功能由 CAN 控制芯片实现,完成报文的位定时、位同步及总线仲裁。应用层通过对 CAN2.0B 报文的扩展帧进行重定义,使用帐号、位图及管道技术,提高系统的通讯效率。

1 光纤现场总线通讯系统

1.1 光纤现场总线系统的总体构架

光纤现场总线系统分为三层:物理层、数据链路层和应用层,其中:物理层负责将上层协议传来的数字信号转化成光信号并通过光纤进行传输,同时负责系统传输模式的切换,实现整个系统的环形拓扑结构,提高系统的可靠性,其功能主要由 CPLD 及光模块实现;数据链路层负责物理层和应用层之间数据格式的转换和总线仲裁,主要由 CAN 控制器芯片来实现;应用层是现场总线系统的最高层,用来确定用户应用进程之间的通信性质,完成各现场设备之间的实时通讯。光纤现场总线通讯系统的结构如图 1 所示。

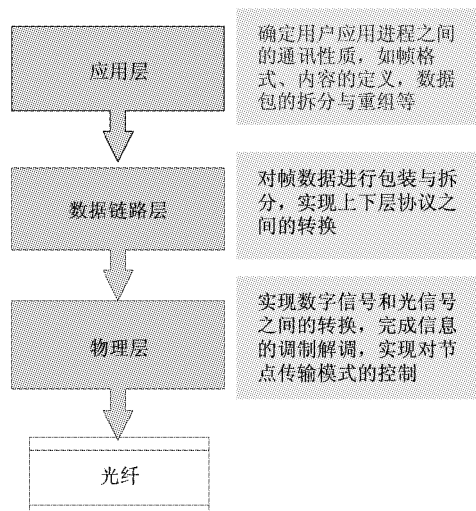


图 1 光纤现场总线通讯系统的结构图

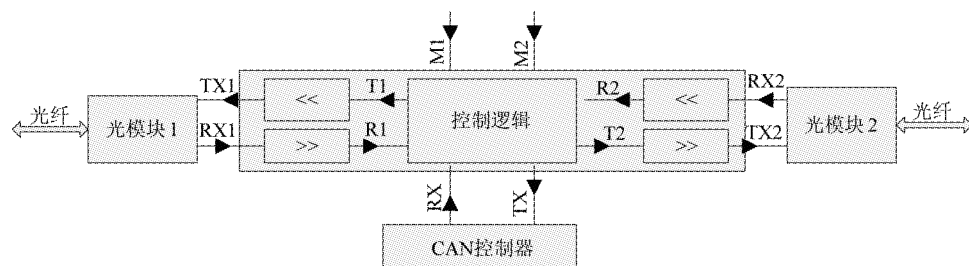


图 2 物理层控制逻辑结构框图

当系统中某个节点接收信息时,光信号经过光模块转换成数字信号,通过 RX1/RX2 接口进入

1.2 光纤现场总线系统的物理层

1.2.1 光纤通信原理

光纤通信是使用光纤作为信息传输介质的通信方式,其原理是由发送端将要传送的信息调制到数字信号载体上,通过光端机将数字信号转化成光信号进行传输;接收端通过光端机将光信号转换成数字信号,经过解调接收方得到相应的信息,从而完成一次通信。光纤通信具有通信容量大、传输距离远、信号串扰小、抗电磁干扰能力强、信号损耗低等优点。所使用的光纤根据传输模态的不同,可分为单模光纤和多模光纤。单模光纤只能传输主模态的光信号,完全避免模态色散问题,因而具有更宽的传输频带、更大的传输容量,适合大容量、远距离的传输,特别是本文所提到的机场、煤矿等特殊环境。本设计使用了 STAROPTO 的 SSTR3121-55-113 高速单模光模块,它采用半双工方式,传输信号的频率从几百 kHz 到几十 MHz,具有很高的带宽。

1.2.2 信号的调制与解调

在机场、煤矿等环境下,不仅要考虑信息传输的速率,传输的安全性及整个系统的成本也应该引起关注。因此必须以尽量少的通信资源传输尽可能多的数据量,同时要考虑到系统的可扩展性。本设计采用高速光模块来实现数字信号与光信号之间的转换。高速光模块具有很高的带宽,能够传输高频信号,具有高速、高可靠性等优点。但使用光信号传输信息只能以频率作为信息的载体,以光信号频率的高低代表数字信号的显性、隐性电平,本设计中以 25MHz 频率信号代表显性电平‘0’,以 1MHz 频率信号代表隐性电平‘1’。因此必须对数字信号进行调制和解调。系统的物理层控制逻辑由 Xilinx XC9572 型号的 CPLD 实现,使用超高速集成电路硬件描述语言(VHDL)进行逻辑描述。图 2 为系统物理层的结构框图。

CPLD 的控制逻辑,如果 RX1/RX2 接收的信号频率为 25MHz,则相应的寄存器 R1/R2 置为‘0’;如果

RX1/RX2 接收到的信号频率为 1MHz, 则寄存器 R1/R2 置为‘1’, R1/R2 参与 CPLD 内部的逻辑运算, 这样就实现了信息的解调。当节点发送信息时, 通过 CPLD 内部逻辑计算得出 T1/T2, 如果 T1/T2 为‘0’, 则 TX1/TX2 向光模块发送 25MHz 频率的信号; 如果 T1/T2 为‘1’, 则 TX1/TX2 向相应光模块发送 1MHz 频率的信号, 这样就实现了信息的调制。

解调过程中最重要的是如何分析出输入信号的频率, 从而确定 R1/R2 的值。本设计所采用的方法是: 首先将系统时钟(50MHz)分频得到 1MHz 基频, 然后在基频的一个时钟周期内对输入信号的上升沿进行采样并计数, 如果达到或超过 20, 就认为输入是 25MHz 信号(显性信号), R1/R2 赋值为‘0’, 反之则认为是 1MHz 信号(隐性信号), R1/R2 赋值为‘1’。在信号检测过程中如何处理好计数器的计数、清零及锁存之间的时序关系是关键。在控制逻辑设

计中通过对系统时钟进行分频和逻辑运算得到了 4 种时钟信号, 分别是: flagstart, flagen, flaglock 和 flagclr, 其中 flagstart 为 1MHz 基频。flagen 为计数器使能时钟, 其周期是基频的 2 倍, 当为低电平时开始采样输入信号并进行计数, 高电平时进行数据的锁存和清零, 虽然只有半个周期采样输入信号, 但是由于采样频率很高, 因此不会遗漏输入信息。flaglock 为锁存时钟, 只有当 flagstart 和 flagen 同时为高电平时, 它才为高电平, 其他情况为低电平。当 flaglock 为高电平时将计数器内数据打入寄存器, 与设定值进行比较。flagclr 为清零时钟, 当 flagstart 为低电平, flagen 为高电平时, 它为高电平, 其他情况为低电平。当 flagclr 为高电平时将计数器清零, 为下次采样做好准备。4 个时钟信号的时序关系如图 3 所示。通过采样输入信号的频率, 对输入信息电平进行判断, 实现了对输入信息的解调。

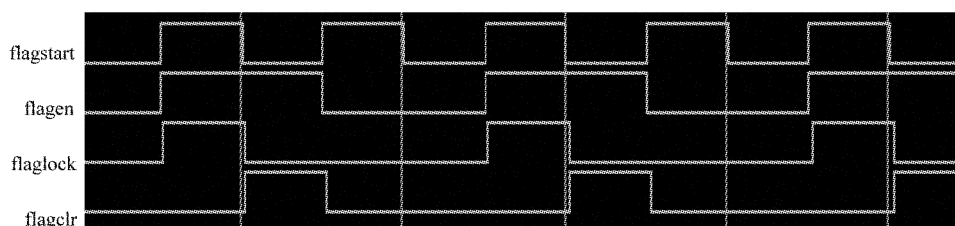


图 3 时钟信号时序关系图

1.2.3 节点传输模式控制

从原理上看, 光纤通信采用的是点对点的传输方式, 只能在接收端和发送端之间进行, 如果要将多个现场设备连接起来, 必须在物理层增加控制逻辑才能实现各现场设备之间以及现场设备与控制主机之间的实时通讯。同时传统的总线式结构将各现场设备全都挂接在一条总线上, 如果总线上某点出现故障, 整个系统的通讯都会受到影响。为了提高系统的可靠性, 本文设计了一种双向环形拓扑网络, 每个现场节点都可以自主选择信号传输模式, 这样即使某个设备出现故障, 也可以通过改变其他节点的信号传输模式来保证整个系统的正常通讯。

图 2 中的 M1、M2 接口用来实现 3 种信号传输模式的切换。其控制逻辑如下:

当 M1 = 0, M2 = 0 时, 为传输模式 1:

$$T1 = RX \& R2$$

$$T2 = RX \& R1$$

$$TX = RX \& R1 \& R2$$

节点可以向两个方向接收和发送信息: 从光模块 1 接收到的信息可以从光模块 2 发送出去; 从光

模块 2 接收到的信息可以从光模块 1 发送出去; 节点本身可以从光模块 1 和光模块 2 接收信息。如果所有节点都以这种方式设置, 可以组成无主式环形总线。

当 M1 = 1, M2 = 0 时, 为传输模式 2:

$$TX = RX \& R1$$

$$T1 = RX$$

$$T2 = 1$$

当 M1 = 0, M2 = 1 时, 为传输模式 3:

$$TX = RX \& R2$$

$$T1 = 1$$

$$T2 = RX$$

这两种传输方式下, 节点只能从一个方向接收信息: 或者从光模块 1 接收, 或者从光模块 2 接收。同样, 节点只能向一个方向发送信息: 或者从光模块 1 向下一节点发送, 或者从光模块 2 向下一节点发送。

光纤现场总线的网络拓扑结构如图 4 所示。如果系统各节点在模式 1 下传输, 其信息传输顺序是 A→B→C→D→A, 或者 A→D→C→B→A, 当节点 1

发生故障或断开时,节点 n 和 2 之间的通讯就会中断,从而整个系统陷入瘫痪。这时,可以将与节点 1 相邻的节点 2 和 n 的传输模式改为模式 2(或模式 3),这样节点 2 的信息以及从 B' 方向传来的信息,可以通过 B 继续传输下去,同样节点 n 的信息以及从 C 传来的信息可以通过 C' 继续传输,从而使得系统中剩余的节点仍然能够连成一个统一的系统,这样大大提高了通讯系统的可靠性。

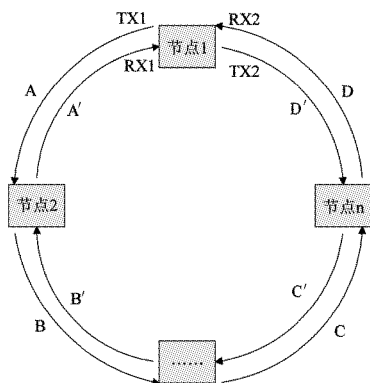


图 4 光纤现场总线网络拓扑结构示意图

1.3 光纤现场总线通讯系统的数据链路层

本设计的数据链路层包括两个子层:逻辑链路控制(logic link control, LLC)子层和介质访问控制(media access control, MAC)子层。LLC 层负责从上层接收信息并制作成帧,进行报文滤波、超载通知及恢复管理等;MAC 层是数据链路层的核心,它描述由 LLC 层接收到的报文和对 LLC 层发送的认可报文,能够响应报文帧、仲裁、应答、错误检测和标定。所有功能都是由 CAN 控制芯片来实现。

报文滤波技术主要实现数据传输方式的转换,比如点对点、一点对多点及全局广播等。其原理是:事先将设备地址存在验收滤波器中,总线上信息的识别码同验收滤波器的地址进行比较,如果一致,则设备控制器接收总线信息,如果不一致,则当前设备忽略总线信息。同时,使用带优先级的帧结构进行总线仲裁,允许总线上的任一设备在总线空闲时都有一定的机会取得总线控制权向外发送信息,如果有两个或两个以上设备同时向总线发送信息,则按照所传输信息优先级的高低进行仲裁。具体方法如下:各设备在向总线发送信息的同时也对总线上的电平进行读取,并与自身发送的电平进行比较,如果电平相同则发送下一位,如果不同则停止发送,退出竞争。剩余设备继续进行上述过程,直到只剩一个设备向总线发送电平,竞争结束,优先级最高的设备获得总线的控制权。

1.4 光纤现场总线通讯系统的应用层协议

CAN 总线应用层通讯协议采用短帧格式,每帧有效数据长度为 8 位,并采用循环冗余校验(CRC),具有通讯速度快,实时性及可靠性高等优点,广泛应用于现场通讯领域。但是在机场、煤矿等特殊环境中,由于现场范围广,监控检测设备多,现场通讯系统要面对大量数据传输的压力,短帧格式显然不能满足这种现场通讯的需求。为此,本文在 CAN 总线协议基础上,通过使用扩展帧并对扩展帧内容进行重定义、基于帧号和位图对数据包进行拆分和重组、定义管道技术进行多线程通讯等方法设计了光纤现场总线通讯系统的应用层协议,使其在传输大数据量时具有高速可靠的性能。

1.4.1 基于 CAN 总线协议的扩展帧

CAN 总线协议中规定了不同类型的帧,包括数据帧、远程帧、错误帧和超载帧。根据报文标识符的位数不同,可以将数据帧分为标准帧(11 位)和扩展帧(29 位),图 5 为数据帧的格式。图 5 中起始帧存放数据帧的开始标识,仲裁场用来表示信息内容及优先级,控制场用来存放控制信息,数据场用来存放要通讯的数据,CRC 场用来存放校验码,ACK 场用来存放应答信号,结束帧存放数据帧的结束标识。

起始帧	仲裁场	控制场	数据场	CRC场	ACK场	结束帧
-----	-----	-----	-----	------	------	-----

图 5 CAN 总线协议中数据帧格式

当系统通讯的数据量很小时,采用标准帧结构的数据帧能够同时满足高速率、高可靠性的信息传输。但是当进行大数据量传输时,为了满足实时性和可靠性的要求,必须将数据包进行相应的处理,如本文提出的基于帧号和位图的拆分和重组数据包、基于管道技术的多线程通讯等,这样大大增加了数据中的控制信息,标准帧不能达到通讯要求,为此在光纤现场总线通讯系统中采用扩展帧进行数据的传输,并对扩展帧内容和格式进行了定义,以满足大数据量的高速可靠传输。图 6 为光纤现场总线通讯系统中扩展帧结构。其中,紧急标识用来表示当前帧的优先级信息,对于正常的数据及控制命令,该位为 1,对于紧急信息如断电、报警等信息,该位为 0,使其处于更高的优先级,以便这些紧急信息能够更快的传输;目的地址代表当前帧数据应该到达的地址,可以通过点对点方式或者广播方式进行;帧类型表示当前帧传输的是数据还是控制信息;源地址代表

ID28	ID27-ID21	ID20	ID19-ID12	ID12-ID5	ID4-ID1	ID0
紧急标识	目的地址	帧类型	源地址	帧号	管道号	结束标识

图 6 光纤现场总线通讯系统中扩展帧结构

信息的来源;帧号代表将数据包拆分后,当前帧传输信息的帧块的序号;管道号代表不同的虚拟通讯的通道,用于多线程通讯;结束标识代表一帧内容的结束。

1.4.2 基于帧号和位图的数据处理

在 CAN 总线协议中,每个扩展帧只能传送 8 位的数据,当数据量大于 8 位时必须对其进行拆分,相应地,接收端必须对这些数据进行重组,这样才能表达完成的信息。本文设计了基于帧号和位图的数据拆分重组策略,保证了大数据量传输的及时、可靠。

首先将要传输的数据按每帧 8 位进行拆分,对每帧数据按从小到大的顺序分配帧号,帧号总共有 8 位,这样可以传输最多 256 帧数据也就是最大 2K 的数据量。同时,在接收端分配 2K 的区域来接收数据,在这 2K 的区域上建立 256 位的位图并且全部初始化为 0,如果某位为 1,表示位图的该区域已接收到数据。当接收到结束标识时,从帧号为 0 的位图位开始检查,如果在结束标识对应的位之前的各位图位均为 1,则表示数据传输顺利完成,接收端发送完成标志到发送端,双方释放数据传送时所占用的资源;否则接收端发送包含丢失帧的帧号等信息的控制帧到发送端,请求重新发送该帧数据,直至数据全部发送完毕。

1.4.3 基于管道的多线程通讯

在煤矿、机场等特殊现场中,每一时刻的数据传输量都是不同的,有时很大的数据量同时涌向传输设备或者有紧急控制命令、数据等信息需要传送,单线程的通讯往往不能满足传输的实时性要求。为此本文设计了基于管道的多线程通讯,通过多线程通讯提高信息传输的实时性。

对于每个接收设备,发送方都为其设置 16 位的管道标志位,并全部初始化为 0,表明接收设备的所有管道都是空闲的。当发送方有数据传输时,按从低到高的顺序检测相应接收设备的各管道位,当发现某位为 0 时,便将该位对应的数值作为该帧数据的管道位,同时将管道标志位置 1,表明该管道被占用。将管道位存放在扩展帧中 4 位管道号处(ID4-ID1),在传输该帧数据时便按照设定的管道号进行,传输完毕释放相应的管道。

这样,通过定义扩展帧的各位,为各种控制信息提供了传输平台,在对大数据量进行传输时,可以对数据包进行拆分,不同的数据包拥有各自的帧号及管道号。在进行数据传输时,同一数据包的不同部分甚至不同数据包的不同部分可以通过不同的管道进行多线程传输,在达到目标地址时再按照帧号进行数据的重组,这样大大提高了传输的速率,加上原有的数据校验措施,使得本系统同时具有了大数据量高速高可靠性的特点。

2 光纤现场总线的兼容性、扩展性分析及应用实例

2.1 光纤现场总线的兼容性和扩展性

一个通讯系统是否具有实用性,不仅要看它对特定应用环境的适应程度,而且要看它是否具有广泛的应用前景,即它与现有技术的兼容程度。在本系统的应用层协议中我们规定逻辑‘0’为显性电平,逻辑‘1’为隐性电平;在物理层协议中我们定义高频信号(25MHz)为显性电平信号,低频信号(1MHz)为隐性电平信号;在 CPLD 的控制逻辑中,如果检测到高频信号则相应的寄存器置‘0’,如果检测到低频信号则相应寄存器置‘1’,这样应用层的信号逻辑就和物理层的信号逻辑统一起来。

本设计的逻辑链路层使用带优先级的总线仲裁技术,报文的优先级结合在 29 位标识符中,具有最低二进制数的标识符有最高的优先级。节点向总线发送报文,以一个显性电平作为一个帧的开始。总线采用“线与”的方式,因此高位为显性电平的报文在竞争中获胜,即高优先级的报文取得总线的控制权。这样应用层、逻辑链路层和物理层的逻辑电平完全统一起来,能够实现整个系统的正常运作。

本设计采用的光模块拥有从几百 kHz 到几十 MHz 的传输带宽,而设计中所使用的传输频率只取 25MHz 和 1MHz 两种作为显性电平和隐性电平的载体,绝大部分的频率处于空闲状态,可以用来调制诸如语音、图像等高频信号,能够将系统进行方便的改造,应用于其他通讯现场,实现与现有通讯技术的兼容。

同时,在进行系统的硬件实现时,共设计了两个

相对独立的数据链路层设备,由两块 CAN 控制器芯片组成。其中一块用来实现应用层与光模块之间的信号传输,这一部分系统使用光纤进行通讯;另一块实现应用层与普通双绞线总线之间的信号传输,这部分系统使用双绞线进行通讯,这样系统便具有了同时连接光纤和双绞线进行现场通讯的能力,方便对传统现场总线通讯系统的改造,同时提高了系统的可扩展性,开阔了系统的适用领域。

2.2 应用实例

在煤矿安全监控系统中,我们采用分布式控制方式构建了光纤现场总线通讯系统,用来实现对遍布在煤矿各处的传感器及控制器节点的实时监控与控制功能。系统有 50 个通讯终端和一个监控服务器,各个通讯终端都采用模式 1 进行传输,监控服务器也采用模式 1 进行传输,以光信号衰减仪模拟长距离的光纤信道。经实际测试,在最大传输距离 10km 的情况下,通讯速率可达 400kbps,大大提高了现场通讯速率及整个系统的实时性和可靠性。在光纤单点断开的情况下,只需将与断开点相邻的节点传输模式分别设为模式 2 和模式 3,整个通讯系统仍然能够继续稳定工作,除断开点外,各种控制信息及数据仍能到达整个现场,并且仍然能够保证通讯的实时性及可靠性。

3 结 论

设计的基于光模块和 CPLD 的光纤现场总线通讯系统,使用光纤作为信息传输的介质,提高了通讯

的抗干扰能力;使用 CPLD 实现光信号和数字信号之间的调制解调及系统传输模式之间的切换,提高了系统的可靠性;通过对 CAN 协议扩展帧进行重定义,设置位图、帧号,使用管道技术等,解决了短帧格式不能进行大数据量传输的问题,提高了信息传输的效率和准确性。

这种光纤现场总线的传输距离远,通讯速率较高,抗干扰能力强,具有很高的实时性及可靠性,能够满足实时监控系统和远程控制系统的要求,可应用在煤矿、机场等大型工业现场。同时系统具有良好的兼容性和可扩展性,既能对现有的现场总线通讯系统进行方便的改造,又能用于音频、视频信号的通讯现场,具有广阔的应用前景。

参考文献

- [1] 史久根,张培仁,陈真勇. CAN 现场总线系统设计技术. 北京:国防工业出版社,2004
- [2] 郭宽明主编. 现场总线技术应用选编 2. 北京:北京航空航天大学出版社,2004
- [3] 宋文主编. 无线传感器网络技术与应用. 北京:电子工业出版社,2007
- [4] Armstrong J R, Gray F G. VHDL 设计表示和综合. 第 2 版. 李宗伯,王蓉晖译. 北京:机械工业出版社,2003
- [5] 李殊晓,王晓玲,郝赤. 基于可编程逻辑器件的等精度频率计. 微计算机信息,2005,22(07):113-114
- [6] 李恩,蔡丽,梁自泽等. 一种适应于煤矿安全监控系统的 CAN 总线应用层协议. 计算机应用,2006,26(9):2178-2181
- [7] 蒋健文,林勇,韩江洪. CAN 总线通信协议的分析 and 实现. 计算机工程,2002,28(02):219-220

Design and analysis of a fiber field-bus communication system

Yang Guodong, Liang Zize, Li En, Fan Changchun

(Laboratory of Complex System and Intelligent Science, Institute of Automation,
Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190)

Abstract

A fiber field-bus communication system based on complex programmable logic devices (CPLD) and optical transceiver was designed for some special industrial fields such as colliery and airfields. In the physical layer of the system, fiber instead of twisted-pair was used to improve the communication efficiency and the capability of anti-electromagnetic interference, and the CPLD was used to modulate and demodulate signals, to translate digital signals to optical signals, and to switch the transmission modes of the field devices to connect the whole communication system into an annular topology, thus the communication reliability was improved. In the application layer, the extended data frame definition, the frame number and the multi-pipe technology were used to improve the communication speed and data accuracy. The technical analysis showed the compatibility and expansibility of the communication system.

Key words: field-bus, complex programmable logic devices (CPLD), optical transceiver, communication protocol