

文章编号: 1002-0411(2003)03-0219-06

工业以太网关键技术初探

冯冬芹 金建祥 褚健

(浙江大学工业控制技术国家重点实验室, 浙江浙大中控技术有限公司 杭州 310027)

摘要: 分析了工业企业综合自动化网络体系结构及其组成现状; 根据以太网技术的优势, 结合工业现场控制的特点, 提出适用于工业以太网的关键技术及其解决方案, 并因此探讨了今后现场总线技术的发展方向.*

关键词: 工业以太网; 现场总线; 工业控制

中图分类号: TP393

文献标识码: B

STUDY ON INDUSTRIAL ETHERNET

FENG Dong-qin JIN Jian-xiang CHU Jian

(National Key Laboratory of Industrial Control Technology, Zhejiang University;

Zhejiang SUPCON Co. Ltd., Hangzhou 310027)

Abstract: The hierarchy of networking-integration automotive information system for industrial enterprise is analyzed firstly. After the description of the Ethernet's advantages, the key techniques of industrial Ethernet are offered in the view of the industrial field control. Finally, the trend of fieldbus is also discussed.

Keywords: industrial Ethernet, fieldbus, industrial control

1 引言 (Introduction)

在现代工业控制中, 由于被控对象、测控装置等物理设备的地域分散性, 以及控制与监控等任务对实时性的要求, 工业控制内在地需要一种分布实时控制系统来实现控制任务. 在分布式实时控制系统中, 不同的计算设备之间的任务交互是通过通信网络, 以信息传递的方式实现的.

一般来讲, 企业信息化网络可分为三个层次, 从下到上依次为现场设备层、过程监控层和信息管理层.

其中, 最上层的是企业信息管理网络, 它主要用于企业的生产调度、计划、销售、库存、财务、人事以及企业的经营管理等方面信息的传输. 管理层上各终端设备之间一般以发送电子邮件、下载网页、数据库查询、打印文档、读取文件服务器上的计算机程序等方式进行信息的交换, 数据报文通常都比较大, 数据吞吐量比较大, 而且数据通信的发起是随机的、无规则的, 因此要求网络必须具有较大的带宽. 目前企业管理网络主要由快速以太网 (100 M、1000 M、10 G

等) 组成.

中间的过程监控网络主要用于将采集到的现场信息置入实时数据库, 进行先进控制与优化计算、集中显示、过程数据的动态趋势与历史数据查询、报表打印. 这部分网络主要由传输速率较高的网段 (如 10 M、100 M 以太网等) 组成.

而最底层的现场设备层网络则主要用于控制系统中大量现场设备之间测量与控制信息以及其他信息 (如变送器的零点漂移、执行机构的阀门开度状态、故障诊断信息等) 的传输. 这些信息报文的长度一般都比较小, 通常仅为几位 (bit) 或几个字节 (byte), 因此对网络传输的吞吐量要求不高, 但对通信响应的实时性和确定性要求较高. 目前现场设备网络主要有现场总线如 FF、Profibus、WorldFIP、DeviceNet、P-NET 等低速网段组成.

今天, 以太网已无可争议地成为管理信息层的主要网络技术, 过程监控网络也由 RS-485、RS232 等串行通信方式逐渐统一到以太网, 而对于底层现场设备网络, 由于技术、经济和政治等方面的原因,

* 收稿日期: 2002-02-15
基金项目: 国家 863/CIMS 主题重点课题 2001 AA413010 资助项目

市场上的各种现场总线没有能够统一到单一的现场总线标准,形成多种现场总线并存的局面.由于不同现场总线之间的技术特点与设计特征都不同,基于不同现场总线的产品之间不能实现透明信息互访.从理论上讲,通过网络互连设备或网关可以将不同现场总线产品连接起来,实现它们之间信息的互相访问,但这样不仅增加了信息传输和系统的复杂性,而且由于所有现场总线网络在从事错误检查、配置等方面都有它们专有的技术规范,信息在不同总线之间传输时仍然会发生丢失,从而增加系统的不可靠性.

因此,虽然现场总线系统具有开放性、可互操作性、分散性等特点,但由于现场总线的多样性和难以统一带来的上述问题,使得现场总线技术难以得到大面积的推广应用,并在一定程度上阻碍了现场总线技术的发展.

随着互联网技术的普及与推广,以太网(Ethernet)通信速率提高,交换技术得到发展,使得它受到了全球的拥护和硬件支持,并迅速发展和普及.目前商用计算机通信领域以及控制系统的上层管理与通信领域已经逐渐被以太网所垄断.

那么,以太网能否直接应用于工业现场设备间的通信?

2 以太网的优势 (Advantages of Ethernet)

以太网(Ethernet)由于其应用的广泛性和技术的先进性,已逐渐垄断了商用计算机的通讯领域和过程控制领域中上层的信息管理与通信,并且有进一步直接应用到工业现场的趋势.与目前的现场总线相比,以太网具有以下优点:

2.1 应用广泛

以太网是目前应用最为广泛的计算机网络技术,受到广泛的技术支持.几乎所有的编程语言都支持 Ethernet 的应用开发,如 Java、Visual C++、Visual Basic 等.这些编程语言由于使用广泛,并受到软件开发商的高度重视,具有很好的发展前景.因此,如果采用以太网作为现场总线,可以保证多种开发工具、开发环境供选择.

2.2 成本低廉

由于以太网的应用最为广泛,因此受到硬件开发与生产厂商的高度重视与广泛支持,有多种硬件产品供用户选择.而且由于应用广泛,硬件价格也相对低廉.目前以太网网卡的价格只有 Profibus、FF 等现场总线的十分之一,并且随着集成电路技术

的发展,其价格还会进一步下降.

2.3 通信速率高

目前以太网的通信速率为 10M、100M 的快速以太网已开始广泛应用,1000M 以太网技术逐渐成熟,10G 以太网正在研究.其速率比目前的现场总线快得多.以太网可以满足对带宽的更高要求.

2.4 软硬件资源丰富

由于以太网已应用多年,人们对以太网的设计、应用等方面有很多的经验,对其技术也十分熟悉.大量的软件资源和设计经验可以显著降低系统的开发和培训费用,从而可以显著降低系统的整体成本,并大大加快系统的开发和推广速度.

2.5 可持续发展潜力大

由于以太网的广泛应用,使它的发展一直受到广泛的重视和大量的技术投入.并且,在这瞬息万变的时代,企业的生存与发展在很大程度上依赖于一个快速而有效的通信管理网络,信息技术与通信技术的发展将更加迅速,也更加成熟,由此保证了以太网技术不断地持续向前发展.

因此,如果工业控制领域采用以太网作为现场设备之间的通信网络平台,可以避免现场总线技术游离于计算机网络技术的发展主流之外,从而使现场总线技术和一般网络技术互相促进,共同发展,并保证技术上的可持续发展,在技术升级方面无需单独的研究投入.这一点是任何现有现场总线技术所无法比拟的.同时机器人技术、智能技术的发展都要求通信网络有更高的带宽、更好的性能,通信协议有更高的灵活性.这些要求以太网都能很好地满足.

3 工业以太网的关键技术 (Key techniques of industrial Ethernet)

正是由于以太网具有上述优势,使得它受到越来越多的关注.但如何利用 COTS(Commercial off the shelf)技术来满足工业控制需要,是目前迫切需要解决的问题,这些问题包括通信实时性、现场设备的总线供电、本质安全、远距离通信、可互操作性等,这些技术直接影响以太网在现场设备中的应用.

3.1 通信实时性

长期以来,Ethernet 通信响应的“不确定性”是它在工业现场设备中应用的致命弱点和主要障碍之一.

众所周知,以太网采用冲突检测载波监听多点访问(CSMA/CD——Carrier Sense Multiple Access with Collision Detection)机制解决通讯介质层的竞争.其

基本工作原理是:某节点要发送报文时,首先监听网络,如网络忙,则等到其空闲为止,否则将立即发送;如果两个或更多的节点监听到网络空闲并同时发送报文时,它们发送的报文将在网络上发生冲突,因此每个节点在发送时,还必须继续监听网络.当检测到两个或更多个报文之间出现碰撞时,节点立即停止发送,并等待一段随机长度的时间后重新发送.该随机时间将由标准二进制指数补偿算法确定.重发前的时间在 $0 \sim (2^i - 1)$ 之间的时间片中随机选择(此处 i 代表被节点检测到的第 i 次碰撞事件),一个时间片为重发循环所需的最小时间.但是,在 10 次碰撞发生后,该间距将被冻结在最大时间片(即 1023)上,16 次碰撞后,控制器将停止发送并向节点微处理器回报失败信息.

以太网的这种机制导致了非确定性的产生.因为在一系列碰撞后,报文可能会丢失,节点与节点之间的通信将无法得到保障,从而使控制系统需要的通信确定性和实时性难以保证.

随着互联网技术的发展和大规模推广应用,以太网也得到了迅速的发展,使通信确定性和实时性得到了增强.

首先,在网络拓扑上,采用星型连接代替总线型结构,使用网桥或路由器等设备将网络分割成多个网段(segment).在每个网段上,以一个多口集线器为中心,将若干个设备或节点连接起来.这样,挂接在同一网段上的所有设备形成一个冲突域(collision domain),每个冲突域均采用 CSMA/CD 机制来管理网络冲突.这种分段方法可以使每个冲突域的网络负荷和碰撞几率都大大减小.

其次,使用以太网交换技术,将网络冲突域进一步细化.用交换式集线器代替共享式集线器,使交换机各端口之间可以同时形成多个数据通道,正在工作的端口上的信息流不会在其他端口上广播,端口之间信息报文的输入和输出已不再受到 CSMA/CD 介质访问控制协议的约束.因此,在以太网交换机组成的系统中,每个端口就是一个冲突域,各个冲突域通过交换机实现了隔离.

再次,采用全双工通信技术,可以使设备端口间两对双绞线(或两根光纤)上可以同时接收和发送报文帧,从而也不再受到 CSMA/CD 的约束,这样,任一节点发送报文帧时不会再发生碰撞,冲突域也就不复存在.

总之,采用星型网络结构、以太网交换技术,可以大大减少(半双工方式)或完全避免碰撞(全双工

方式),从而使以太网的通信确定性得到了大大增强,并为以太网技术应用于工业现场控制清除了主要障碍.

此外,通过降低网络负载和提高网络传输速率,可以使传统共享式以太网上的碰撞大大降低.实际应用经验表明,对于共享式以太网来说,当通信负荷在 25% 以下时,可保证通信畅通,当通信负荷在 5% 左右时,网络上碰撞的概率几乎为零.由于工业控制网络与商业网不同,每个节点传送的实时数据量很少,一般仅为几个位或几个字节,而且突发性的大量数据传输也很少发生,因此完全可以通过限制每个网段站点的数目,降低网络流量.同时,使用 UDP 通信协议,可以充分保证报文传输的有效载荷,避免在网络上传输不必要的填充域数据所占用的带宽,使网络保持在轻负荷工作条件下,就可以使网络传输的实时性进一步得到保证.

对于紧急事务信息,则可以根据 IEEE802.3p&q,应用报文优先级技术,使优先级高的报文先进入排队系统先接受服务.通过这种优先级排序,使工业现场中的紧急事务信息能够及时成功地传送到中央控制系统,以便得到及时处理.

3.2 总线供电

所谓“总线供电”或“总线馈电”,是指连接到现场设备的线缆不仅传送数据信号,还能给现场设备提供工作电源.

采用总线供电可以减少网络线缆,降低安装复杂性与费用,提高网络和系统的易维护性.特别是在环境恶劣与危险场合,“总线供电”具有十分重要的意义.由于 Ethernet 以前主要用于商业计算机通信,一般的设备或工作站(如计算机)本身已具备电源供电,没有总线供电的要求,因此传输媒体只用于传输信息.

对现场设备的“总线供电”可采用以下方法:

方法一:在目前 Ethernet 标准的基础上适当地修改物理层的技术规范,将以太网的曼彻斯特信号调制到一个直流或低频交流电源上,在现场设备端再将这两路信号分离出来.

采用这种方法时必须注意:修改协议后的以太网应在物理层上与传统 Ethernet 兼容.

方法二:不改变目前 Ethernet 的物理层结构,即应用于工业现场的以太网仍然使用目前的物理层协议,而通过连接电缆中的空闲线缆为现场设备提供工作电源.

相比而言,第一种方法虽然实现了与传统 DCS

以及 FF、Profibus 等现场总线所采用的“总线供电法”相一致,做到了“一线二用”,节省了现场布线.但由于这种方法与传统以太网在物理介质上传输的信号在形式上已不一致,因此这种修改后的以太网设备与传统以太网设备不再能够直接互连,而必须增加额外的转接设备才能实现与传统以太网设备(如计算机的以太网卡)的连接.

最近刚推出的 IEEE802.3af 标准也对总线供电进行了规范.

3.3 互操作性

互操作性是指连接到同一网络上不同厂家的设备之间通过统一的应用层协议进行通信与互用,性能类似的设备可以实现互换.作为开放系统的特点之一,互操作性向用户保证了来自不同厂商的设备可以相互通信,并且可以在多厂商产品的集成环境中共同工作.这一方面提高了系统的质量,另一方面为用户提供了更大的市场选择机会.互操作性是决定某一通信技术能否被广大自动化设备制造商和用户接受,并进行大面积推广应用的关键.

由于以太网(IEEE802.3)只映射到 ISO/OSI 参考模型中的物理层和数据链路层,TCP/IP 映射到网络层和传输层,而对较高的层次如会话层、表示层、应用层等没有作技术规定.目前 RFC(Request For Comment)组织文件中的一些应用层协议,如 FTP、HTTP、Telnet、SNMP、SMTP 等,仅仅规定了用户应用程序该如何操作,而以太网设备生产厂家还必须根据这些文件定制专用的应用程序.这样不仅不同生产厂家的以太网设备之间不能互相操作,而且即使是同一厂家开发的不同的以太网设备之间也有可能不可互相操作.究其原因,就是以太网上没有统一的应用层协议,因此这些以太网设备中的应用程序是专有的,而不是开放的,不同应用程序之间的差异非常大,相互之间不能实现透明互访.

要解决基于以太网的工业现场设备之间的互操作性问题,唯一而有效的方法就是在以太网 + TCP(UDP)/IP 协议的基础上,制订统一并适用于工业现场控制的应用层技术规范,同时可参考 IEC 有关标准,在应用层上增加用户层,将工业控制中的功能块 FB(Function Block)进行标准化,通过规定它们各自的输入、输出、算法、事件、参数,并把它们组成为可在某个现场设备中执行的应用进程,便于实现不同制造商设备的混合组态与调用.

这样,不同自动化制造商的工控产品共同遵守标准化的应用层和用户层,这些产品再经过一致性

和互操作性测试,就能实现它们之间的互可操作.

3.4 网络生存性

所谓网络生存性,是指以太网应用于工业现场控制时,必须具备较强的网络可用性.任何一个系统组件发生故障,不管它是否是硬件,都会导致操作系统、网络、控制器和应用程序以致于整个系统的瘫痪,则说明该系统的网络生存能力非常弱.因此,为了使网络正常运行时间最大化,需要以可靠的技术来保证在网络维护和改进时,系统不发生中断.

工业以太网的生存性或高可用性包括以下几个方面内容:

可靠性 工业现场的机械、气候(包括温度、湿度)、尘埃等条件非常恶劣,因此对设备的可靠性提出了更高的要求.

在基于以太网的控制系统中,网络成了相关装置的核心,从 I/O 功能模块到控制器中的任何一部分都是网络的一部分.网络硬件把内部系统总线和外部世界连成一体,同时网络软件驱动程序为程序的应用提供必要的逻辑通道.系统和网络的结合使得可靠性成了自动化设备制造商的设计重点.

可恢复性 所谓可恢复性,是指当以太网系统中任一设备或网段发生故障而不能正常工作时,系统能依靠事先设计的自动恢复程序将断开的网络连接重点链接起来,并将故障进行隔离,以使任一局部故障不会影响整个系统的正常运行,也不会影响生产装置的正常生产.同时,系统能自动定位故障,以使故障能够得到及时修复.

可恢复性不仅仅是网络节点和通讯信道具有的功能,通过网络界面和软件驱动程序,网络可恢复性以各种方式扩展到其子系统.一般来讲,网络系统的可恢复性取决于网络装置和基础组件的组合情况.

可维护性 可维护性是高可用性系统的最受关注的焦点之一.通过对系统和网络的在线管理,可以及时地发现紧急情况,并使得故障能够得到及时的处理.可管理性一般包括性能管理、配置管理、变化管理等内容.

为提高工业以太网的生存能力,提高基于以太网的控制系统的可用性,可采用以下方法:在进行基于以太网的控制系统设计时,通过可靠性设计提高现场设备的可靠性;采用环型冗余以太网结构网络以提高系统的可恢复性;采用智能设备管理系统,对现场设备进行在线监视和诊断、维护管理.

3.5 网络安全性

目前工业以太网已经把传统的三层网络系统

(即信息管理层、过程监控层、现场设备层)合成一体,使数据的传输速率更快、实时性更高,同时它可以接入 INTERNET,实现了数据的共享,使工厂高效率的运作,但与此同时也引入了一系列的网络安全问题。

对此,一般可采用网络隔离(如网关隔离)的办法,如采用具有包过滤功能的交换机将内部控制网络与外部网络系统分开。该交换机除了实现正常的以太网交换功能外,还作为控制网络与外界的唯一接口,在网络层中对数据包实施有选择的通过(即所谓的包过滤技术),也就是说,该交换机可以依据系统内事先设定的过滤逻辑,检查数据流中每个数据包的部分内容后,根据数据包的源地址、目的地址、所用的 TCP 端口与 TCP 链路状态等因素来确定是否允许数据包通过。只有完全满足包过滤逻辑要求的报文才能访问内部控制网络。

此外,还可以通过引进防火墙机制,进一步实现对内部控制网络访问进行限制、防止非授权用户得到网络的访问权、强制流量只能从特定的安全点去向外界、防止服务拒绝攻击以及限制外部用户在其中的行为等效果。

3.6 本质安全与安全防爆技术

在生产过程中,很多工业现场不可避免地存在易燃、易爆与有毒等场合。对应于这些工业现场的智能装备以及通信设备,都必须采取一定的防爆技术措施来保证工业现场的安全生产。

现场设备的防爆技术包括两类,即隔爆型(如增安、气密、浇封等)和本质安全型。与隔爆型技术相比,本质安全技术采取抑制点火源能量作为防爆手段,可以带来以下技术和经济上的优点:结构简单,体积小,重量轻,造价低;可在带电情况下进行维护和更换;安全可靠,适用范围广。实现本质安全的关键技术为低功耗技术和本安防爆技术。

以太网系统的本质安全包括几个方面,即工业现场以太网交换机、传输媒体以及基于以太网的变送器和执行机构等现场设备。由于目前以太网收发器本身的功耗都比较大,一般都在六、七十毫安(5伏工作电源),因此相对而言,基于以太网的低功耗现场设备和交换机设计比较困难。

在目前的技术条件下,对以太网系统采用隔爆防爆的措施比较可行,即通过对以太网现场设备(包括安装在现场的以太网交换机)采取增安、气密、浇封等隔爆措施,使设备本身的故障产生的电火能量不会外泄,以保证系统使用的安全性。

另一方面,对于没有严格的本安要求的非危险场合,则可以不考虑复杂的防爆措施。

同时,还需进一步研究与发展本安理论,使之在理论与技术上有所突破,以适应当前形势下复杂设备的开发与应用,同时也可以使目前的以太网产品与元器件尽可能直接应用于过程工业。

3.7 远距离传输

由于通用 Ethernet 的传输速率比较高(如 10 M bps、100 M bps、1000 M bps),考虑到信号沿总线传播时的衰减与失真等因素, Ethernet 协议(IEEE802.3 协议)对传输系统的要求作了详细的规定,如每一段双绞线(10BASE-T)的长度不得超过 100 m;使用细同轴电缆(10BASE-2)时每段的最大长度为 185 m;而使用粗同轴电缆(10BASE-5)时每段的最大长度也仅为 500 m,对于距离较长的终端设备,可使用中继器(但不超过 4 个)或者光纤通信介质进行连接。

然而,在工业生产现场,由于生产装置一般都比较复杂,各种测量和控制仪表的空间分布比较分散,彼此间的距离较远,有时设备与设备之间的距离长达数公里。对于这种情况,如遵照传输的方法设计以太网络,使用 10BASE-T 双绞线就显得远远不够,而使用 10BASE2 或 10BASE5 同轴电缆则不能进行全双工通信,而且布线成本也比较高。同样,如果在现场都采用光纤传输介质,布线成本可能会比较高,但随着互联网和以太网技术的大范围应用,光纤成本肯定会大大降低。

此外,在设计应用于工业现场的以太网络时,将控制室与各个控制域之间用光纤连接成骨干网,这样不仅可以解决骨干网的远距离通信问题,而且由于光纤具有较好的电磁兼容性,因此可以大大提高骨干网的抗干扰能力和可靠性。通过光纤连接,骨干网具有较大的带宽,为将来网络的扩充、速度的提升留下了很大的空间。各控制域的主交换机到现场设备之间可采用屏蔽双绞线,而各控制域交换机的安装位置可选择在靠近现场设备的地方。

4 结束语 (Conclusion)

美国权威调查机构 ARC 的报告指出,今后以太网不仅继续垄断商业计算机网络通信和工业控制系统的上层网络通信市场,也可能领导未来现场总线的发展,并有可能取代目前各种现场总线成为唯一的工业控制网络标准。同时,美国 VDC 调查报告也指出,以太网在工业控制领域中的应用将越来越广泛,市场占有率的增长也越来越快,市场占有率将从

2000 年的 11 % 增加到 2005 年的 23 % .

虽然目前以太网在应用于流程工业过程控制领域时仍面临很多困难,但随着以太网通信技术的发展与完善,这些问题都将得到解决.有理由相信,在不远的将来,Ethernet 将可以直接应用于工业现场控制,并将在工业现场控制系统中起着非常重要的作用.

参 考 文 献 (References)

- 1 Hirschmann network systems , white paper of distributed communication architecture[M] .2000
- 2 Krishna M, Kang G S. Real Time Systems[M]. USA: McGraw Hill Company, 1997 \ =3 Sharon O, Spratt M. A CSMA/ CD compatible MAC for real-time transmissions based on varying collision intervals[J]. Computer Communications , 2001 .117 ~ 142 \ =4 Somogyi A. A flexible future for industrial automation[J/ OL]. Industry Ethernet Book , Issue 1 . <http://ethernet.industrial-networking.com>
- 5 Berge J. Ethernet in process control[J/ OL]. Industry Ethernet Book , Issue 3 .<http://ethernet.industrial-networking.com>
- 6 Volz M. Quo vadis Layer 7 ? [J/ OL]. Industry Ethernet Book , Issue 5<http://ethernet.industrial-networking.com>
- 7 LeBlanc C. The future of industrial networking and connectivity[J/ OL]. Industry Ethernet Book , Issue 2 . <http://ethernet.industrial-networking.com>
- 8 Jim Montague . What's Left to Say About Industrial Ethernet ? [J/ OL]. Control Engineering . <http://www.manufacturing.net>
- 9 Thomas G. Looking deeper into Ethernet[J/ OL]. Industry Ethernet Book , Issue 1 . <http://ethernet.industrial-networking.com>
- 10 Turnbull G. Is Ethernet the answer to the Fieldbus dilemma ? [J/ OL]. Industry Ethernet Book , Issue 2 . <http://ethernet.industrial-networking.com>
- 11 Thomas G. Improving the performance of Ethernet networks[J/ OL]. Industry Ethernet Book , Issue 6 . <http://ethernet.industrial-networking.com>
- 12 IAONA Industrial Automation Networking Alliance , USA . <http://www.iaona.com>
- 13 IAONA Europe - Industrial Automation Networking Alliance , Europe . <http://www.iaona-eu.com>
- 14 龙姿平. 以太网:现场总线之争的解决方案[J]. 国内外机电一体化技术,1999,2(4) :64 ~ 66
- 15 夏德海等. 国际仪表与自动化的盛会——INTERKAMA' 99 简记[J]. 世界仪表与自动化,2000,4(2) :34 ~ 38
- 16 Anon. 各种现场总线在世界市场中的占有率——VDC 的最新研究报告[J]. 国内外机电一体化,1999,2(2) :61
- 17 徐皓冬,王宏,杨志家. 基于以太网的工业控制网络[J]. 信息与控制,2000,29(2) :182 ~ 186
- 18 李嘉,杨佃福. 引入以太网技术是现场总线技术发展的一个必然趋势[J]. 自动化仪表,2001,22(5) :1 ~ 4
- 19 郑萍等. 基于 Ethernet 的全开放工业控制网络[J]. 工业仪表与自动化装置,2001,(3) :6 ~ 9
- 20 唐鸿儒,丁伟,褚健. 用 Ethernet + TCP/ IP 构建现场实时通信网络平台[J]. 计算机应用研究,2001,18(3) :45 ~ 48
- 21 陈积明等. 工业以太网的研究现状及展望[J]. 化工自动化及仪表,2001,28(6) :1 ~ 4

作者简介

冯冬芹(1968 -) ,男,工业自动化专业博士,副教授.研究领域为现场总线、工业以太网、分布式网络控制系统等.

金建祥(1962 -) ,男,研究员,浙江浙大中控技术有限公司常务副总裁.研究领域为现场总线、集散控制系统、仪器仪表等.

褚健(1963 -) ,男,教授、博士生导师,“长江学者”特聘教授,浙江大学工业控制技术国家重点实验室主任.研究领域为鲁棒控制、预测控制、现场总线、分布式网络控制系统等.