

文章编号 :1671-7848(2006)04-0289-05

运动控制网络的研究现状及发展趋势

云利军^{1,2}, 孙鹤旭², 雷兆明², 王 炜²

(1. 云南师范大学 计算机科学系, 云南 昆明 650092; 2. 河北工业大学 自动化系, 天津 300130)



摘 要: 综述了运动控制网络技术的发展历程和研究现状。阐述了工业控制网络的发展历程;重点分析比较了目前几种运动控制网络的性能,并对其中具有代表性的 SSCNET, SERCOS, IEEE 1394, SynqNet 和 Profinet 5 种串行运动控制网络的研究现状及性能特点进行了详细分析;最后展望了运动控制网络技术的未来发展方向,指出基于嵌入式计算的开放式、网络化运动控制系统是今后运动控制技术发展的趋势。

关 键 词: 网络技术;工业控制网络;运动控制网络

中图分类号: TP 273

文献标识码: A

Study Status and Development Trends of Motion Control Network

YUN Li-jun^{1,2}, SUN He-xu², LEI Zhao-ming², WANG Wei²

(1. Department of Computer Science, Yunnan Normal University, Kunming 650092, China;

2. Department of Automation, Hebei University of Technology, Tianjin 300130, China)

Abstract: The development course and status quo of the motion control network technology are summarized. The development course of the industrial control network is expatiated. The performances of several popular motion control networks are emphatically analyzed and compared. Furthermore, the study status and performances of five representative serial motion control networks, SSCNET, SERCOS, IEEE 1394, SynqNet and Profinet, are addressed in details. Finally, the development direction and the prospects of the motion control network are given. And, it is pointed out that the open networked motion control systems based on embedded computing are the developing trends of motion control technology in the future.

Key words: network technology; industrial control network; motion control network

1 引 言

网络技术是 21 世纪影响人类生活型态,甚至改变公司经营决策最重要的一项技术^[1]。随着信息技术的发展,自动化领域也经历了一场由组合式模拟仪表控制系统、集中式数字控制系统(DDC)、集散控制系统(DCS)、现场总线控制系统(FCS)到现在刚刚兴起的工业以太网控制的深层次变革。现在,工业自动化领域的现状是,DCS 仍然在许多行业有着广泛的应用;FCS 已逐渐被大家认可,并以每年 30% 的增长率快速成长;而工业以太网控制系统则刚刚兴起,正处于试用阶段,并有望解决运动控制系统对网络实时性和确定性的要求,实现工业网络控制标准的最终统一。

所谓运动控制网络是指建构在控制器与多轴电

机驱动器之间,能够实时、同步地传送运动命令和接收运动状态的网络系统,目前已成为伺服驱动器发展的趋势^[2]。本文对目前市场上比较流行的各种串行运动控制网络做了深入探讨,对国内运动控制网络技术的发展有所帮助。

2 工业控制网络的发展

由于组合式模拟仪表控制系统和集中式数字控制系统已基本被淘汰,因此本文主要对 DCS, FCS 及工业以太网的发展情况加以叙述。

1) 集散控制系统(DCS) 集散控制系统又称为分布式控制系统,它是一种应用于过程控制的工程化分布式计算机控制系统,它的特点在于可实现硬件积木化、软件模块化、松耦合多处理机系统、控制系统用组态方法生成、可应用通信网络和可靠性

收稿日期: 2005-05-28; 收修定稿日期: 2005-07-04

基金项目: 天津市科技发展计划资助项目(043101811); 国家自然科学基金资助项目(60368001D); 云南省教委资助项目(03Y318D)。

作者简介: 云利军(1973-)男,蒙古族,内蒙古呼和浩特人,博士,主要从事嵌入式系统、运动控制、计算机网络等方面的教学与科研工作。

等,解决了原有计算机集中控制中导致的危险集中和常规模拟仪表控制功能单一的局限性,克服了计算机集中控制双工系统成本高的问题。DCS 控制系统是计算机、通信、CRT 显示和控制技术发展的产物。它采用危险分散、控制分散、操作和管理集中的基本设计思想,多层次、合作自治的结构形式,适应现代的生产和管理要求。

DCS 在功能与性能上较模拟仪表及集中式数字控制系统有了很大进步,可在此基础上实现设备级、车间级的优化控制。近年来,为了使 DCS 更加适用于工业生产现场,新一代 DCS 还进一步做了一些改进,比如系统开放化、超大型化和微型化、通信介质多样化、DCS 与 PLC 相互融合以及软件的不断丰富等等。但是,在 DCS 系统形成的过程中,由于受计算机系统早期存在的系统封闭这一缺陷的影响,各厂家的产品自成系统,不同厂家的设备不能互联在一起,难以实现互换与互操作,要组成更大范围信息共享的网络系统存在很多困难。

2) 现场总线控制系统(FCS) 现场总线是 20 世纪 80 年代中期在国际上发展起来的。它作为过程自动化、制造自动化、智能楼宇和交通等领域现场智能设备之间的互联通信网络,沟通了生产现场设备之间及其与更高控制管理网络之间的联系,为彻底打破自动化系统的信息孤岛创造了条件。

现场总线控制系统为网络集成式全分布控制系统,其特点是控制功能由过去的控制室设备变为智能现场仪表承担。由于控制功能的分散化及全数字化,就有可能组成大型的开放式控制系统,进而实现从最高决策层到最低设备层的综合管理和控制。

目前国际上有 40 种现场总线,其中最有力量的有 FF, Profibus, HART, CAN, LonWorks 等。然而,现场总线技术的发展还存在许多问题,最主要的是没有一个统一的国际标准(目前的现场总线国际标准 IEC61158,包含了 8 种不同类型的现场总线,因此可以说没有标准),并且由于支持各总线的集团间利益冲突等原因,近期产生统一的现场总线标准是不可能的。由于现场总线均有自己的协议,要构成一个控制系统,必须采用相应的开发工具、平台、软件包,这需要较昂贵的代价,且实现不同总线产品间的互连非常困难。这使得 FCS 的开放性、分散性和可互操作性等特点难以体现。这时,以太网受到人们的重视。

3) 工业以太网 在工业控制现场,能否将在商业领域应用已相当成熟的以太网用于网络控制系

统的底层,完全替代现场总线,目前还处于研究和讨论阶段。普通以太网向下延伸到工业现场,面临一系列的技术难题,如确定性、实时性、安全性、抗干扰能力,还有现场设备的供电问题、网线物理性能的提高等。总之以太网有其优势,也有其技术上的缺陷,它的研究方向应在尽可能保留原有协议的基础上,加入实时性控制措施。工业以太网是当前工业控制领域新的研究热点,尽管它现在还有许多不成熟的地方,但它巨大的应用前景吸引着众多研究机构和公司进行研究探索。

所谓工业以太网,一般来讲是指技术上与商用以太网兼容,但在产品设计时又能在实时性、材质的选用、产品的强度以及适用性等方面满足工业现场的需要。工业以太网并不是要将所有的工业网络全部改成以太网,而是要将原来工业网络应用层定义的数据信息,封包在以太网的网络层与传输层内。也就是说,工业以太网的重点在于 TCP/UDP/IP,而不在以太网的物理层。以太网技术采用 CS-MA/CD(载波侦听多路访问/碰撞检测)机制,是一种非确定性的通信调度方式。网络每个节点要通过竞争来取得信息的发送权,当网络负荷大时,网络传输不能满足工业控制的实时要求。因此,在本质上以太网并不是一个实时性网络,它只能保证数据可以到达,但不能保证到达的时间。另外,以太网应用于工业环境还存在异质平台整合及是否满足工业环境等问题。

针对以太网应用于工业环境所面临的一些问题,许多现场总线组织和国际知名公司采用了多种方法来对以太网进行改进,以使其满足工业现场应用的要求。如 HSE, Ethernet/IP 和 Modbus/TCP 采用以太网与 TCP/IP 相结合的方法; Powerlink 和 Profinet 采用基于时间槽的分时调度方式等。这些方法都有效地解决了商用以太网应用于工业现场所面临的一些技术难题,并已有了一定的市场应用。但以太网能否在将来完全替代现场总线,实现网络控制系统的大统一,目前还难下定论。

3 运动控制网络的研究现状

随着网络通信技术的日新月异,特别是以太网技术的发展与成功应用,运用串行通讯的方式来解决传统运动控制架构成为必然趋势。然而,串行传输系统的困难在于没有共同遵守的通讯协议标准,以运动控制系统来说,不论在硬件还是通讯协议上,目前都没有统一的标准可依。市场上比较常见的串行运动控制网络的通信协议见表 1。

表 1 常见的运动控制网络通信协议比较表

通信协议	SSCNET II	SERCOS-II	IEEE-1394	SynqNet	Powerlink	Profinet
传输媒介	RS-485	Plastic Fiber	FireWire	Ethernet	Ethernet	Ethernet
制造商	Mitsubishi	Indramat Sanyo	Agile system	MEI	B&R	Siemens
带宽/Mbps	5.6	16	800	100	100	100
通信周期/ μ s	800	250	125 ~ 250	< 25	200	1000
最大传输距离/m	30	40	4.5	100	100	100
传输模式	Half-Duplex	Half-Duplex	Half-Duplex	Full-Duplex	Half-Duplex	Half-Duplex
最大误差/ μ s	1	1	< 1	< 1	1	1
最大节点数	6	254	63	254	254	150

从表中可以看出，传输媒介主要有：RS-485、光纤(optical)、IEEE-1394(FireWire)和以太网(Ethernet)4种。其中，SERCOS是仅有的国际标准(IEC61491)，但美、日等国的伺服大厂仍推出自己的通信协议，使得串行运动控制网络的通信协议呈现出百家争鸣的局面。

本文对常见的串行运动控制网络介绍如下：

1) SSCNET SSCNET(servo system control network)是由日本三菱电机公司开发出来的运动控制网络技术，可实现精密定位控制及多轴同步运动控制^[3]，其特点如下：

①传送32位的绝对位置命令，可满足微精密定位需求；②实现多轴同步技术，可消除集中式控制时因各轴命令传送的时间误差而造成的命令误差；③实时切换驱动器模式，能传送32位的速度命令或16位的转矩命令，满足不同控制需求；④实时修改各轴驱动器伺服参数，作为控制台操作或高级运动控制之用；⑤能接收32位的位置命令，16位的速度及转矩命令，可监控操作台状态或作反馈控制之用；⑥实时取得驱动器异常或警告信息，可用于控制台的异常诊断；⑦能建构出32位精度的绝对位置系统，当系统紧急停机又重开后，不必再从原点开始动作。

SSCNET是为了解决传统电机控制应用中配线过多、精度及抗干扰等问题所开发的新技术，这项技术架构在三菱电机伺服技术上，将传统的脉冲波或电压指令型的输入界面改为串行式传输界面，使用者不必再为每一轴的配线而困扰，每个伺服驱动器只需一条传输线与其他周边设备连接，即可达到快速安装、易于除错的功效。

日本三菱电机自20世纪90年代初期开始发展SSCNET技术，目前主流技术为第二代的SSCNET II。SSCNET传输媒介是类似RS485技术，传输距离最长可达30m，传输速度为5.625Mbps，控制用的通讯周期为0.888ms。控制方式为主从式架构，一块主控IC可控制6个Slave的伺服驱动器，主控IC

间可以实现同步，使得被控伺服轴得以同步。此外，三菱电机已于2004年10月推出新版本SSCNET III，传输媒介改为采用光纤，传输速度为50Mbps，通信周期可达0.44ms(8轴)，最大传输距离可高达800m(16轴)。通过更小的通信周期，将进一步提高位置控制精度。

2) SERCOS SERCOS(Serial Real-time Communication System)串行运动控制网络由德国率先发起，并于1995年获得通过正式成为IEC61491国际标准。SERCOS主要应用在分散式多轴运动控制上，并明确定义了伺服电机位置、速度及转矩等控制命令的通信协议，提供使用者一个实时、抗干扰力强、高解析度、可完全以软件方式规划的串行传输网路。在使用塑料光纤为传输介质时，每节点间的传输距离为40m；若使用玻璃光纤，传输距离可长达200m，整个环状网路的长度可达 $(1 \sim 5) \times 10^4$ m。每个环状网络理论上最多可连接256个辅节点，而实际可连接的节点数取决于传输周期、数据长度及传输速率^[4]。SERCOS是目前国际上惟一成为IEC国际标准的运动控制专用网络，特点如下：

①SERCOS是全数字化网路；②SERCOS是开放式架构；③SERCOS具有良好的扩充性；④SERCOS具有即插即用(Plug&Play)的特性；⑤SERCOS具有跨厂商相容的特性。

目前市场上使用的产品规格为SERCOS-II，最近已推出SERCOS-III的demo版，其网络拓扑架构采用双环形(double ring)方式。当有任何断点发生时，通信仍然能正常运作。SERCOS-III同时整合了IP通信协议，可通过以太网实时或非实时地传送数据。通过以太网，SERCOS-III可支持Slave-to-Slave通信，允许Slave端直接从另一个Slave端读取资料，而不必通过Master端转接^[5]。

3) IEEE 1394 IEEE 1394接口标准始于1986年，是由IEEE 1394专业委员会主持制订的。从1988年开始，苹果(Apple)公司的Michael Teener着手研究IEEE 1394的基本技术，1992年该公司的提

案被采纳为 IEEE 1394 标准规范, 1994 年 9 月正式成立 IEEE 1394 Trade Association, 以普及 IEEE 1394 为标准的家庭网络规格, 并推出用于保证高质量和兼容性的规范。

IEEE 1394 具有高速通信及同步传输能力, 可以实现运动控制系统的新思维 - 软件运动(Soft-motion)。这样便将原本属于运动控制卡负责的工作, 如运动轨迹规划及伺服控制, 分散到 PC 及各个轴的智能型驱动器上。当然, 这有赖于驱动器之间的高速通讯能力。软件运动的出现, 将使运动控制卡扮演的角色逐渐减弱。

作为一种数据传输的开放式技术标准, IEEE 1394 被应用在众多领域。当然, 目前该技术使用最广的还是数字成像领域, 支持的产品包括数码相机或摄像机等。IEEE 1394 具有以下特点:

①廉价; ②占用空间小; ③速度快; ④开放式标准; ⑤支持热插拔; ⑥可扩展的数据传输速率; ⑦拓扑结构灵活多样; ⑧完全数字兼容; ⑨可建立对等网络; ⑩支持同步和异步两种数据传输模式。

目前, 致力于推广 IEEE 1394 网络技术发展的主要是欧洲的 1394 Automation 和 1394 Trade Association 两个组织, 这两个组织将在今年合并^[5]。此次合并的目的是“形成一个世界范围的组织, 从而更好地推广这个惟一能将运动控制、视觉和 I/O 系统的信号通过一条线缆进行传输的标准”。合并后, 1394 Automation 将作为 1394 Trade Association 内部的一个技术工作组继续开发和推广 IEEE 1394 标准。1394 Automation 的原有成员将成为 1394 Trade Association 的当然会员。1394 Trade Association 在下一阶段的工作重点是运动控制, 相信通过双方资源的整合和共同努力, IEEE 1394 标准将很快在运动控制领域取得巨大进展。

4) SynqNet SynqNet 是 Motion Engineering Inc. (MEI) 公司设计的一个架构在 100Base-T 物理层的运动控制网路, 它采用一种实时、同步数字网络专利技术, 代替(运动控制器与伺服驱动装置之间的)标准 $\pm 10\text{ V}$ 模拟量接口, 从而可在各种复杂应用中显示出非凡的运动性能。该技术特别适合半导体、电子组合装置、工业机器人、FPD、包装以及医疗等 OEM 设备市场中的高性能运动控制应用。

SynqNet 是以以太网为基础的运动网络, 所使用的 100Based-T 物理层与一般商用以太网相同, 是完全根据 IEEE 802.3 的国际标准定义的, 它可以同步连接 32 个轴。其传输方式也由以太网的半双工改为全双工, 网络拓扑也由对等网络改为环形。

现行以太网通信协议的设计适用于数据量大、

传输频率低、甚至是远距离的传输模式, 这一点与实时运动控制网络所需的数据量不大、传输频率高、短距离传输有所不同。即一个符合 IEEE 802.3 标准的 Ethernet 数据帧, 由 28 个控制位和至少 46 个数据位组成。就一般工业运动应用而言, 这种协议是特大型协议。通常, 一个节点的数据需要量是很小的(小于 46 位)。为了降低周期时间和等待时间, SynqNet 已经在第 2 层(数据链路层)对数据帧进行了优化。一个数据帧由至少 24 位组成, 而不是至少 74 位。这是 SynqNet 胜过以太网的一个主要优点, 可提供更快速、更具预测性的性能^[5~7]。

SynqNet 网络的设计消除了 CSMA/CD 机制固有的不确定性问题。它采用一种同步方法, 以一种规则的预定时间方式, 将数据传送到每一台设备中。使用独立的接收与发送导线对(全双工), 可避免数据冲突, 并可达 $2 \times 100\text{ Mbit}$ 的确定性数据传输速率。其结果是周期时间最短为 $25\ \mu\text{s}$ (4 根轴)。此外, SynqNet 具有一种周期时间最短可达 $10\ \mu\text{s}$ 的可组态包结构。

SynqNet 采用一种以双冗余数据通道为特色的独特容错设计, 从而可实现机器运行的高可靠性。通过一根次级数据电缆, 以新路线发送数据, 可自动对一次数据电缆中的间歇断路或短路进行实时检测、隔离和维修。这一特性对于提高任何运动应用的安全性和可靠性来说都是十分关键的, 可实现机器可用性的最大化, 并降低昂贵的崩溃风险。

SynqNet 运动控制网络还具有以下特点:

①适合控制复杂机器的中央控制体系结构; ②更新至 48 kHz 的高转矩带宽, 最多可支持 32 根协同轴; ③针对噪声抗扰度和电缆短路的电气隔离; ④适合机器可用性最大化的双数据通道容错操作; ⑤真正的即插即用型多卖方互操作性; ⑥电机驱动性能的远程故障诊断; ⑦远程驱动组态及设置; ⑧驱动固件功能的远程更新; ⑨自动网络组态和完整性检验; ⑩每个节点之间电缆布线长度超过 100 m; ⑪开放式、经现场验证的 silicon (IEEE 802.3 ~ 100 baseT 物理层)。

5) Profinet Profinet 是 Profibus 国际组织推出的基于工业以太网的自动化解决方案。该技术为当前用户提供了一套完整、高性能、可伸缩的升级至工业以太网平台的解决方案。它能为 Profibus 及其他现场总线网络系统提供以太网移植服务。

在 Profinet 标准中, 根据不同的应用场合, Profinet 支持以下三种通信方式^[8]:

①使用 TCP/IP 的标准通信 Profinet 使用以太网和 TCP/IP 协议作为通信基础。TCP/IP 是 IT 领域

关于通信协议方面事实上的标准。但 TCP/IP 只提供了基础,用于以太网设备通过传输通道在本地和分布式网络中进行数据交换。在较高层上则需要其他的规范和协议(亦称为应用层协议),而不是 TCP 或 UDP。典型的应用层协议有:SNMP, DHCP 和 HTTP。②实时(RT)通信 绝大多数的工厂自动化应用场合,对响应时间的要求最少在 5~10 ms。为了满足自动控制中的实时要求,在 Profinet 中规定了优化的实时通信(RT)通道,它基于以太网的 Layer2(数据链路层)。这一解决方案极大地减少了通信栈上占用的时间,从而提高了自动化数据的刷新率等性能。③同步实时(IRT)通信 Profinet 被设计成可用于高性能的同步运动控制应用。然而,对上述响应时间在 5~10 ms 的实时通信不足以满足伺服运动控制场合的需求。伺服运动控制是指在 100 个节点下,响应时间低于 1 ms,同步传送和抖动小于 1 μ s 的情况。Profinet 的同步实时 IRT 功能是在 Layer2 上由内嵌的同步实时交换 ASIC 芯片提供的。Profinet 在同步实时(IRT)通信方式下应用在同步运动控制场合。

IRT 的通信特点是,在一个周期内通过分隔时间域来传输实时和非实时数据。循环实时报文通过确定性通道(IRT Channel)来传递;而 TCP/IP 报文则通过标准通道(OPEN Channel)来传递。就如同在高速公路上,预留左车道用于实时通信传递,并且禁止其它使用者(TCP/IP 通信)切换到这个车道。这样一来即使右车道发生通信堵塞,也不会影响到左车道的实时通信传递。

Profinet 采用“以太网+TCP/IP”作为低层的通信模型,采用 TCP/IP 协议加上应用层的 RPC/DCOM 来完成节点之间的通信和网络寻址。它可以同时挂接传统 Profibus 系统和新型的智能现场设备。现有的 Profibus 网段可以通过一个代理设备连接到 Profinet 网络当中,使整套 Profibus 设备和协议能够原封不动地在 Profinet 中使用。

4 运动控制网络的发展趋势

国内外现有的运动控制器产品,主要包括 4 种类型:基于 PC 机的运动控制器、PLC 型运动控制器、“PC 机+运动控制卡”型运动控制器和基于嵌入式计算的运动控制器。其中基于嵌入式计算的运动控制器是今后运动控制器发展的方向,它使用了一个嵌入式计算机系统来代替传统的 PC 机,而且它通过串行运动网络实现了运动控制系统的网络化控制,是今后运动控制系统发展的趋势。

总之,运动控制器已经从以单片机或微处理器

作为核心的运动控制器和以专用芯片(ASIC)作为核心处理器的运动控制器,发展到了基于嵌入式计算的开放式、网络化运动控制器。运动控制技术也由面向传统的数控加工行业专用运动控制技术而发展为具有开放结构、能结合具体应用要求而快速重组的先进运动控制技术。基于网络的开放式结构和嵌入式结构的通用运动控制器逐步成为自动化控制领域里的主导产品之一。这其中的串行运动控制网络发挥了至关重要的作用。运动控制网络将进一步向速度更快、抖动更小、容错性更好、传输距离更远和高可靠性的方向发展,以求实现在网络化控制的情况下仍能进行复杂的运动规划、高速实时多轴插补、误差补偿和更复杂的运动学、动力学计算,使得运动控制精度更高、速度更快、运动更加平稳;并使系统的结构更加开放,能根据用户的应用要求进行定制化的重组,设计出个性化的运动控制器。这将是今后运动控制网络技术发展的方向。

5 结 语

目前,使运动控制技术与网络技术有机结合,即基于因特网的运动控制技术研究,在国内外尚处于起步阶段^[9]。通过对基于因特网的运动控制技术进一步深入研究和开发应用,以形成在网络环境下的运动控制所需的开放性、同步性、可重构性、可移植性、可裁减性、实时网络性以及高可靠性的控制系统,将有助于充分利用现有丰富的 PC 软/硬件资源、低成本且可共享的因特网资源,改造传统数控装备制造业,并为许多高科技产品的开发奠定关键技术基础。

参考文献:

- [1] 施浩仁. 网络技术在马达驱动器的应用[J]. 机械工业杂志, 2004, (253): 197-203.
- [2] Lin S Y, Ho C Y, Tzou Y Y. Distributed motion control using real-time network communication techniques[C]. Beijing: IEEE IPEMC, 2000.
- [3] 黄怡敏. PC-Based SSCNET 运动控制系统与发展趋势[J]. 工业控制计算机, 2003, 16(7): 62-64.
- [4] IGS E. V. SERCOS-III innovation by combining SERCOS interface(tm) and Etherne[R]. Florida: SERCOS N A, White Paper, SERCOS-III V1.2, 2004.
- [5] Zheng Z W, Yang X S, Zeng J T. The study of the PC-based motion control network controller[J]. Journal of the Mechatronic Industry, 2005 (263): 173-185.
- [6] Erol N A, Altintas Y, Ito M R. Open system architecture modular tool kit for motion and machining process control[J]. ASME Transactions On Mechatronics, 2000, 5(3): 281-291.
- [7] Kaplan G. Ethernet's winning ways[J]. IEEE Spectrum, 2001, 38(5): 113-115.
- [8] 张研. 工业以太网及其实时特性的研究[D]. 天津: 河北工业大学, 2005.
- [9] 王家军, 齐冬莲. 运动控制系统的发展与展望[J]. 电气时代, 2004, (10): 54-56.