

面向物联制造车间通信协议研究*

张区委,唐敦兵,张 涛,郑 杜,王盈聪

(南京航空航天大学机电学院,南京 210016)

[摘要] 现场总线和工业以太网在车间层网络应用的特点分析表明,工业以太网在车间底层网络的应用是必然趋势。现有工业以太网通信协议在物联制造车间应用过程中,存在通信过程数据量过大而导致信息实时性难以满足要求的问题。针对物联制造的特点,开发了基于 TCP/IP 的面向物联制造车间的通信协议,用以实现物联制造车间各信息层之间的实时通信。案例分析表明,此协议简化了传统通信协议的复杂性,可明显减少通信过程中的数据量,提高车间通信的效率,满足物联制造的实时通信要求。

关键词: 物联制造; 工业以太网; 通信协议; TCP/IP; 信息帧

DOI: 10.16080/j.issn1671-833x.2018.01/02.068



张区委

硕士研究生,主要研究方向为智能制造。

物联思想是互联网由以人为主要对象向以事物(包括人)为主要对象转变以后产生的一种新的思维方式。随着新一代的 IT 技术以及传感器技术的发展,物联的思想逐步渗透到制造领域。制造企业的研制过程已由传统的“黑箱”模式向“多维度、透明化泛在感知”模式发展^[1],这种以信息感知技术为驱动力的制造系统——物联制造系统(基于物联的制造系统),有力地推动着制造系统向全球化、信息化、智能化和绿色化方向的发展^[2]。物联制造的核心理念就是将车间设备抽象化、信息化,将传统上离散的互不干涉的设备,通过网络技术实现互联与整合。当前的车间信息传递实现联网的方式主要有两种:现场总线和工业以太网。通过现场总线实现车间的联网,一般来说其通信协议比较简单、通信速率比较低。如基金会总线 FF 的 H1 和 Profibus-PA 的传输速率只有 31.25kbps, FF 高速总线 H2 的传

输速度为 1Mbps 或 2.5Mbps,这在有些场合下无法满足车间对信息实时性的要求^[3]。而且现阶段工业底层网络的现场总线协议众多,各协议之间存在严重的技术壁垒,导致不同协议的兼容一直无法有效解决。以太网具有成本低、技术成熟的优点,具有良好的开发环境,支持 Java、Visual C++ 等语言;数据传输速度快,百兆千兆以太网已经广泛应用,是传统现场总线的几十倍^[4];车间底层网络引入以太网不仅使现场层、控制层和管理层(企业的管理网络大多采用以太网)在垂直层面方便集成,更能降低不同厂家设备在水平层面的集成成本。因此,引入以太网技术是车间通信发展的一个必然趋势。

以太网创立之初是应用于办公网络,工业现场要应用以太网,就必须对现有的以太网加以改造升级,以适应复杂工业环境的要求。对于工业控制来说,与一般 IT 网络的重要区别是实时性。工业控制通信时,

*基金项目: 国家自然科学基金项目(U1637211); 航空科学基金项目(20161652015); 江苏省青蓝工程; 中央高校基本科研业务费专项资金项目(56XBA17006)。

数据传输时间不是随机的,而是可事先确定的。一个事件发生后,系统在一个可准确预见的时间范围内做出反应。为此,与工业以太网相适应的通信协议也应具有自身的一些特点:能满足车间通信对于数据的实时性和安全性的要求;具有冗余链路提高可靠性和快速处理故障的能力;能适应工业的环境要求,满足电磁抗干扰性要求;具有良好的可扩展性和兼容性^[5]。原有的商业以太网通信协议难以满足其需求,这就需要在现有协议的基础上再开发一套行之有效的应用层协议来满足特定的工业环境要求。国际上现已有多种工业以太网应用层协议,如 Ethernet/IP、Modbus TCP/IP、ProFiNet 等。其中, Ethernet/IP 网络主要是由以太网协议、TCP/IP 协议、CIP 协议 (Control and Information Protocol) 组成^[4]。应用层采用 CIP 协议创建了为数据访问和设备控制的通用对象库和设备描述库,兼容了大部分厂商的设备^[6]。Modbus TCP/IP 报文服务采用客户端/服务器的模式交换实时信息,该模式基于 4 种类型的报文: Modbus 请求、Modbus 确认、Modbus 指示和 Modbus 响应^[7]。ProFiNet 全称是 Process Field Net,是新一代基于工业以太网技术的自动化总线标准,为自动化通信领域提供了一个完整高性能并可升级的网络解决方案^[8]。

上述工业控制网络的通信协议主要是针对工业自动化网络系统的复杂化、分散化和高速化的特点产生的。但现有的通信协议在通讯过程中存在信息帧格式复杂、数据量大的问题,难以满足物联制造车间中各智能体之间的通信对信息高实时性的要求。根据上述存在的问题,针对物联制造车间的特点,本文设计了一套基于 TCP/IP 的面向物联制造车间的通信协议,解决了车间通信过程数据量大、通信过程复杂的问题,提高了车间各智能体之间的通信效率和信

息的实时性,具有简洁高效的特点。

物联制造系统

在制造过程和产品智能化需求的情况下,大规模个性化定制所产生的用户需求以及在产业链管控和制造环节的深度剥离趋势的需求,促使物联制造蓬勃发展起来。物联制造是在制造业服务化和协同化的发展趋势下,面向产品、用户、企业以及企业间实施的一种新型制造模式和信息服务模式。其通过运用物联网技术、先进制造技术与现代管理技术,构建服务于供应链、制造过程、物流配送、售后服务和再制造等产品全生命周期各阶段的基础性、开放性网络系统,形成对制造资源、制造信息和制造活动的全面感知、精准控制以及透明化与可视化,实现产品智能与价值的提升,进而形成新型的智慧生态制造模式^[5]。

物联制造车间信息层基本架构包括信息采集层、信息执行层和信息管理层。信息采集层通过运用传感器技术,对物体进行识别、对车间状态进行检测,是物联车间底层信息的来源。信息执行层是物联车间执行系统对信息管理层下达的订单信息与信息采集层上传的信息进行解析处理,并表达执行信息的含义。信息管理层管理来自客户的订单信息和车间底层上传的车间信息,实时追踪产品的加工状态,对车间现场进行实时监控。其基本架构如图 1 所示。

物联制造的核心是使车间内设备实现自主互联,一方面是设备主动要求其所需要的信息,另一方面是设备能积极接受其他设备发送的信息并能按照一定规则解析出该信息的含义。物联制造车间的通信主要包括 3 个层面:(1)制造系统各信息层之间的信息传递,信息在制造系统的信息管理层、信息执行层和信息采集层之间传递。(2)制造系统各信息层内部的信息传递,包括信息管理层

内部的云端服务器和本地数据库,信息执行层内部的仓储系统、物流系统和执行系统,以及信息采集层各传感器之间的信息传递。(3)制造系统各智能体之间的信息传递,各智能体之间的协调是实现制造车间智能化的核心所在,是物联制造车间区别于传统自动化车间的一个显著特点,即设备的互联互通。

物联制造系统通信协议

1 概述

解决工业以太网实时性的方式有两种,一是通过对应用层进行扩展,如 Ethernet/IP、ModbusTCP 等;二是一些对 TCP/IP 和以太网都做了的实时性扩展,如 ProFiNet、Powerlink、Ethercat 以及国内提出的标准 EPA 等。

本文设计的通信协议是基于 TCP/IP 协议之上,对以太网应用层进行扩展,应用于物联制造车间。在物联制造车间中,嵌入式工控机作为车间智能体的大脑,其作用包括对协议的解析和对设备的控制。现场设备通过连接嵌入式工控机而具有网络通信功能,现场各智能体之间通信以及车间各层之间通信的信息帧格式必须符合应用层协议的要求^[9]。本文设计的应用层协议考虑到制造系统的可扩展性,采用了面向对象的设计思想,涉及面向对象的概念。协议中的对象与面向对象编程的“对象”是一个概念,都使用属性和行为的组合来描述车间设备所具有的特性。本协议的对象由类(Class)、行为(Behavior)和属性(Attribute) 3 个概念组成^[4]。将车间中具有相同属性和行为的对象设备抽象化成一个类(Class),在系统后续的扩展中,用其对应的类实例化对象即可。

2 基本概念

(1)对象:本协议中将物联制造车间中的设备都看作是一个对象,用对象来定义一类设备中的每个实例。本协议中用对象 ID 来对车间对象设

备进行识别,对象 ID 分配如表 1 所示。其范围是 0x01~0xFF,占用一个字节(可扩展)。

(2)对象的属性和行为:车间设备都具有属性,包括设备的运行时间、功耗、工作能力等。车间设备的行为,用于改变对象的状态、对象之间的协同合作等。

(3)类:物联制造车间内具有相同属性和行为对象的抽象,将其归为一类,以便车间信息管理层对其进行识别与控制,并且便于车间各智能体之间相互通信。本协议中用类 ID 来对车间各类设备进行识别,类 ID 分配如表 2 所示。其范围是 0x01~0xFF,占用一个字节(可扩展)。

(4)设备 ID:设备在车间内的唯一识别,由其类 ID 和对象 ID 拼接而成。

(5)握手:车间各智能体进行通信前先确认一下连接状态,此过程称为握手^[9]。

3 通信协议信息帧格式

本文设计的通信协议采用统一的信息帧格式,便于扩展和识别,其格式为:

帧头	目标设备 ID	源设备 ID	长度	
指令	参数 1	参数 2	...	校验

其中,帧头用于区别信息帧种类,本协议中信息帧分为 4 种:命令帧、响应帧、握手帧以及异常报告帧,分别用 7F、7E、7D 和 7C 表示。命令帧包括状态询问和任务发起,响应帧包括状态反馈和任务接收,握手帧包括握手指令和回复握手指令,异常报告帧用于车间各种异常状态的上传。目标设备 ID 是目标设备在车间内的唯一识别,由其类 ID 和对象 ID 拼接而成。源设备 ID 是源设备在车间内的唯一识别,由其类 ID 和对象 ID 拼接而成。长度为信息帧中所包含的信息字节长度之和。校验位是除校验字节以外所有字节的异或结果,用一个字节表示。指令与参数说明如表 3 所示,其中参数可为空。

4 握手协议

车间内各智能体在上电后都要与服务器进行握手,以确保连接正常。与服务器握手成功后,再与车间各智能体进行握手,两次握手均成功后,才能进行通信工作。

若设备层出现故障,则该设备对

应的嵌入式工控机向信息管理层发送错误报告。车间设备握手状态如图 2 所示。

协议应用与讨论

1 协议应用实例

本文构建了相关物联制造试验

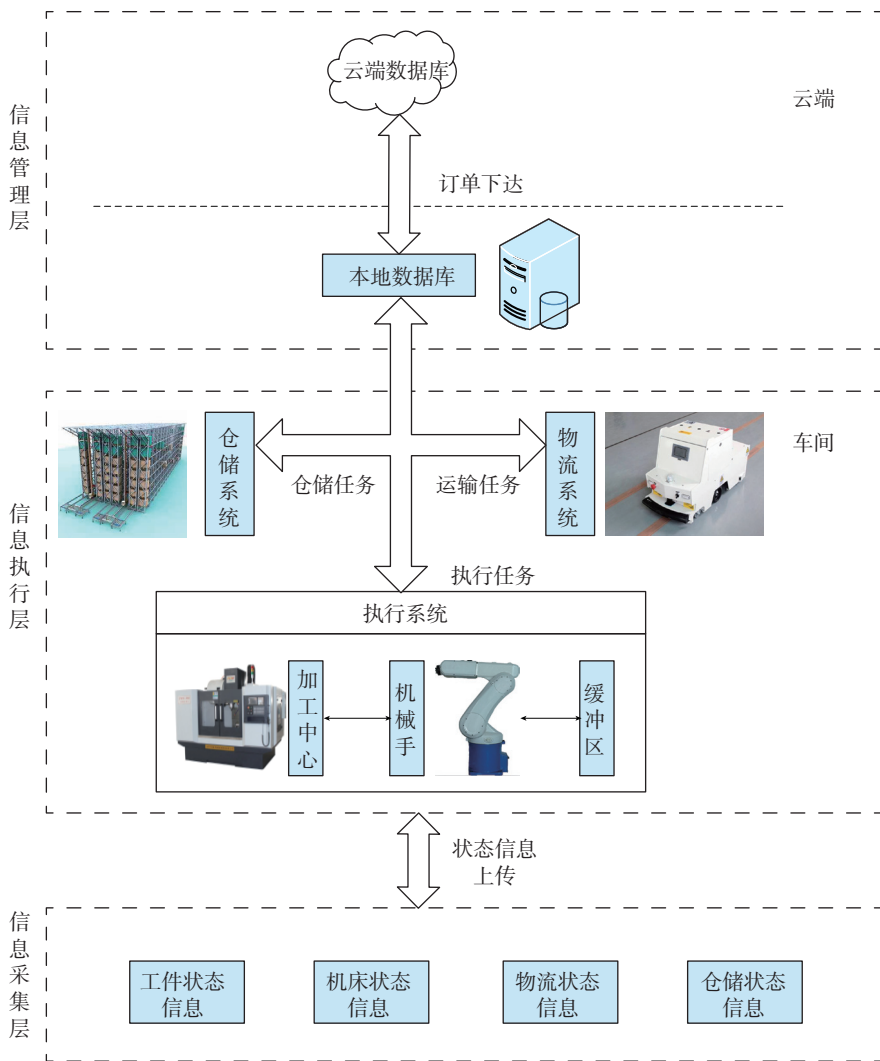


图1 物联制造车间信息层基本架构

Fig.1 Basic structure of the information layer of IoT-based manufacturing workshop

表1 车间对象及ID

对象名	仓储	物流	执行	搬运	服务器	客户端	广播	预留扩展
对象 ID	1~255	1~255	1~255	1~255	1~255	1~255	1~255	...

表2 车间类及ID

类名	仓储类	物流类	执行类	搬运类	服务器类	客户端类	广播类	预留扩展
类 ID	0x01	0x02	0x03	0x04	0x05	0x06	0x07	...

表3 信息帧中指令与参数说明

指令类型	指令编码	含义	参数
询问指令(7F)StateCmd	0x01	询问目标设备状态信息	—
回复询问指令(7E)ResStateCmd	0x02	反馈目标设备状态信息	目标设备工作状态: State; 工作时间: WorkTime; 当前任务剩余时间: RemainTime
任务指令(7F)TaskCmd	0x03	向目标设备发送任务请求	Task=0x01: 运输任务, 工件信息表; Task=0x02: 加工任务, 工件信息表; Task=0x03: 存储任务, 工件信息表; Task=0x04: 搬运任务, 工件信息表
回复任务指令(7E)ResTaskCmd	0x04	反馈目标设备与源设备任务协商结果	State=0x01: 协商成功, 确认执行该任务; State=0x00: 协商失败, 确认放弃该任务
握手指令(7D)	0x05	与目标设备握手互联	—
回复握手指令(7D)	0x06	反馈目标设备与源设备握手互联结果	State=0x01: 握手成功; State=0x00: 握手失败, 发送错误报告
异常报告指令(7C)	0x07	设备出现异常	异常信息

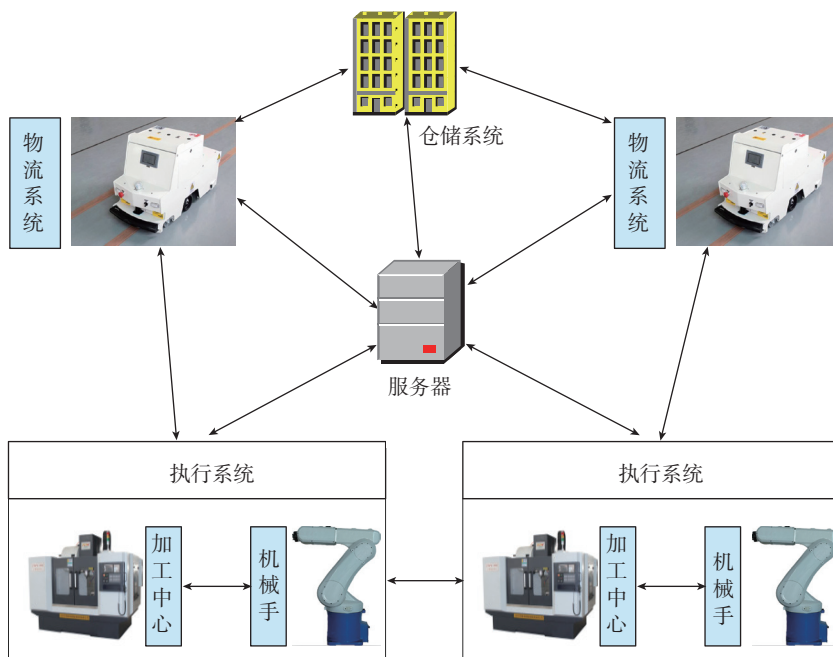


图2 车间设备握手状态

Fig.2 Interaction state of workshop equipments

平台,验证协议的可行性。物联制造系统由仓储系统、物流系统和执行系统构成。每个系统的执行单元都扩展了嵌入式工控机,作为执行单元的中央控制器,与其他系统进行交互。为保证车间通信的可靠性,根据设备接口不同选用不同的物理连接方式完成设备与嵌入式工控机的连接,包括网口、串口和数字/模拟IO口,嵌入式工控机之间采用屏蔽网线进行连接;物流系统与其他系统采取无线通信,其余各系统之间采用屏蔽网

线通信。

试验平台物联制造车间如图3所示。其中,图3(a)是物联制造车间实物图;图3(b)是在应用本文设计的通信协议条件下,对实物图抽象出的逻辑图。根据本协议,车间各智能体ID分配如图3(b)所示。以仓储系统为例,在本协议中,仓储类的类ID为0x01,仓储系统对象ID为01,因此仓储系统ID由其类ID和对象ID拼接而成,为0101。其他设备ID分配过程类似。该逻辑图体现了

车间内各智能体之间的通讯关系,以及车间信息在各智能体之间的流动过程。物联制造车间正是通过智能体之间的互联交互,提高了车间工作的稳定性和容错性。

本部分以传动轴的加工过程为例,详细说明在应用本协议下的制造车间信息流动和设备互联交互过程。工件的工程图如图4所示。完成阶梯轴的加工需要3道工序,每道工序的加工参数如表4所示,本例以加工阶梯轴的第一道工序为例,简化实际加工过程。第一道工序要求车削出阶梯轴的D2、D3、L5、L6 4个尺寸。

表4中信息在通讯过程中以字符串的形式进行传输,其中给出了每个参数的数据量,因此本例中阶梯轴工件信息表的数据量是15个字节。在本例中,阶梯轴的加工需要仓储系统、物流系统和执行系统的参与,具体包括仓库、AGV(自动导引运输车)、车床和机械手等设备。根据协议要求,车间各设备ID分配如表5所示。

阶梯轴的第一道工序的加工涉及多个智能体之间的通信,以仓库智能体与AGV智能体的通信过程为例,说明此协议的具体应用,其他智能体之间的通讯过程与此过程类似。

(1) 仓库向AGV发起询问状态指令:

7F	0201	0101	0x07	0x01	—	校验
----	------	------	------	------	---	----

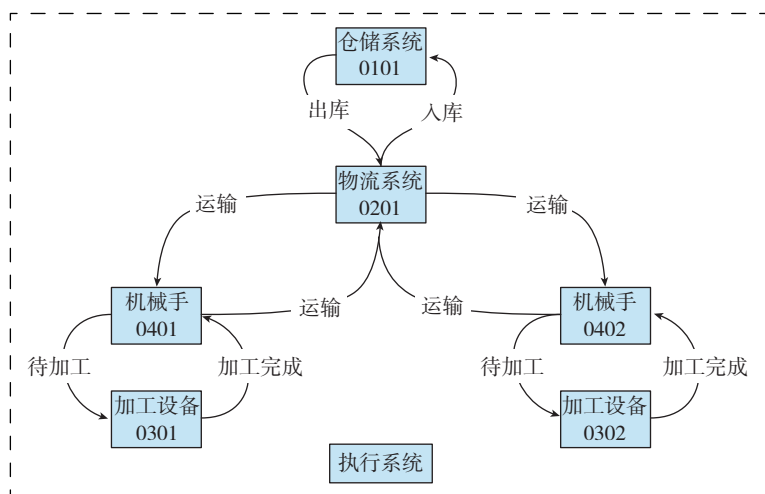
(2) AGV 回复仓库询问状态指令:

7E	0101	0201	0x09	0x02	State
----	------	------	------	------	-------

WorkTime	RemainingTime	校验
----------	---------------	----



(a) 物联制造车间实物图



(b) 物联制造车间逻辑图

图3 物联制造车间

Fig.3 IoT-based manufacturing workshop

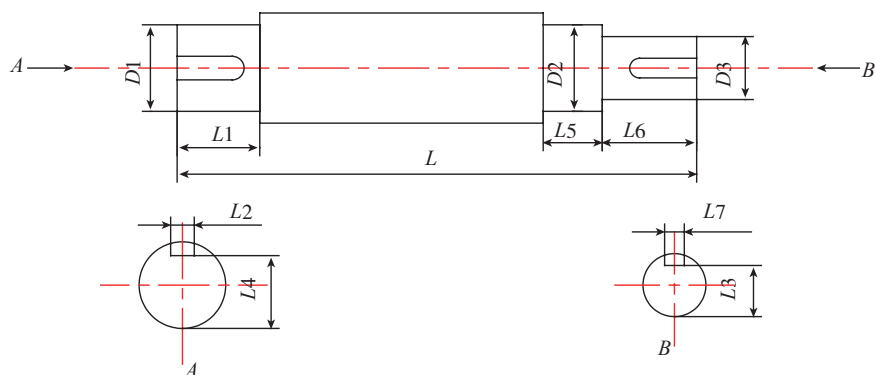


图4 传动轴工程图

Fig.4 Engineering drawing of transmission shaft

(3) 仓库根据车间各 AGV 反馈的状态信息,通过优化算法来选择 AGV,并向 AGV 发送运输任务指令:

7F	0201	0101	0x16	0x03	0x01
----	------	------	------	------	------

工件信息表	校验
-------	----

(4) AGV 根据任务信息与自身状态,根据任务选择算法,决定是否接收该任务,并反馈给仓库,本次假设 AGV 确认接受该运输任务,指令为:

7E	0101	0201	0x07	0x04	0x01	校验
----	------	------	------	------	------	----

2 本文协议与现有协议比较

以阶梯轴加工过程中车床与机械手之间通信为例,本文协议与现有通信协议相比较,现有协议以 ProFiNet 通信协议为例。

2.1 采用本文协议的通信过程

车床向机械手发起询问状态指令:

7F	0401	0301	0x07	0x01	—
----	------	------	------	------	---

校验	数据量 7B
----	--------

机械手回复该车床询问状态指令:

7E	0301	0401	0x09	0x02	State
----	------	------	------	------	-------

WorkTime	Remaining Time	校验	数据量 9B
----------	----------------	----	--------

车床根据车间各机械手反馈的状态信息,通过优化算法选择机械手,并向机械手发送搬运任务指令:

7F	0201	0301	0x16	0x03	0x04
----	------	------	------	------	------

工件信息表	校验	数据量 22B
-------	----	---------

机械手根据任务信息与自身状态,选择算法,决定是否接收该任务,并反馈给车床。假设本机械手确认接受该搬运任务:

7E	0201	0301	0x07	0x04	0x01
----	------	------	------	------	------

校验	数据量 7B
----	--------

由上述通信过程可知,本次通信过程的通讯数据量为每次通信的数据长度之和:7+9+22+7=45 字节。

2.2 采用ProFiNet通信协议的通信过程

其通信信息帧格式^[10]如表6所示。

为方便比较两种协议的通讯数据量,在ProFiNet通信协议信息帧加入数据长度Length,来统计采用ProFiNet协议时通信的数据量。采用ProFiNet通信协议,其通讯过程如下文所述。

车床向机械手发起询问状态指令:

同步	分隔	源 MAC	目的 MAC	类型	应用标识
—	FCS	数据量 28B			

机械手回复车床询问状态指令:

同步	分隔	源 MAC	目的 MAC	类型	应用标识
应用数据	FCS	数据量 31B			
State	WorkTime	RemainingTime			

车床根据车间各机械手反馈的状态信息,通过优化算法选择机械手,并向机械手发送搬运任务指令:

同步	分隔	源 MAC	目的 MAC	类型	应用标识
工件信息表	FCS	数据量 43B			

机械手根据任务信息与自身状态,根据任务选择算法,决定是否接收该任务,并反馈给车床。假设本机

械手确认接受该搬运任务:

同步	分隔	源 MAC	目的 MAC	类型	应用标识
应用数据	FCS	数据量 29B			
0x01	确认接收该搬运				

由上述通信过程可知,本次通信过程的通讯数据量为每次通信的数据长度之和: $28+31+43+29=131$ 字节。

通过上述应用实例可以得出,与ProFiNet、Modbus TCP/IP、Ethernet/IP等工业通信协议相比,本文设计的通信协议具有简单高效、通信数据量小的特点。其次,本协议是对OSI七层网络模型中应用层进行扩展,并未改变OSI七层模型结构,其底层通信仍然遵循TCP/IP协议,因此使用本文设计的通信协议,能满足车间对通信准确性、安全性和稳定性方面的要求。最后,该通信协议具有“面向对象”设计思想的特点,使得应用本协议的车间网络系统具有很强的可扩展性。

现有的工业以太网通信协议,如Modbus TCP/IP、Ethernet/IP等,与ProFiNet协议类似,通信过程中都存在信息帧格式复杂、数据量较大的问题。针对物联制造车间对信息具有较高实时性要求的特点,本文协议大

幅度地降低了通信数据量,解决了物联制造车间通信过程中因数据量过大而导致信息实时性难以满足要求的问题。

结论

物联技术的迅速发展及其在制造业领域的广泛应用,使得物联制造成为当前制造业的发展方向。研究物联制造车间的通信协议,对于提高物联车间的通信效率与信息实时性具有重要意义。针对物联制造车间的特点,本文研究了一套通信过程中信息帧格式简单、通信数据量较小的通信协议,本协议在物联制造系统中得到了应用和检验。实践表明,与现有的通信协议相比较,通过运用该协议,在保证信息通讯的准确性、安全性和稳定性的前提下,简化了现有通信协议的复杂性,降低了通信过程中的数据量,在一定程度上解决了物联制造车间中通信实时性要求的问题。

参考文献

[1] 中国科学院. 中国至2050年先进制造科技发展路线图[M]. 北京: 科学出版社, 2009.

Chinese Academy of Sciences. Advanced manufacturing technology in China: a roadmap to 2050[M]. Beijing: Science Press, 2009.

[2] 张映锋, 赵曦滨, 孙树栋, 等. 一种基于物联技术的制造执行系统实现方法与关键技术[J]. 计算机集成制造系统, 2012, 18(12): 2634-2642.

ZHANG Yingfeng, ZHAO Xibin, SUN Shudong, et al. Implementing method and key technologies for IoT-based manufacturing execution system[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2012, 18(12): 2634-2642.

[3] 沈航, 徐红泉, 蔡慧, 等. 工业以太网和现场总线[J]. 工业仪表与自动化装置, 2005(1): 6-9, 37.

SHEN Hang, XU Hongquan, CAI Hui, et al. Industrial Ethernet and fieldbus[J]. Industrial Instrumentation & Automation, 2005(1): 6-9, 37.

[4] 张宇爽. EtherNet/IP工业以太网的性能研究与应用[D]. 北京: 北京交通大学, 2016.

ZHANG Yushuang. Performance research

表4 工件信息表

工件信息	工件ID	工件名称	工件材料	工序1参数	工序2参数	工序3参数
含义	0x01	传动抽	铝合金	D2、D3、L5、L6	D1、L1	L2、L3、L4、L7、L8、L9
数据量 / Byte	1	1	1	4	2	6

表5 车间设备ID分配表

设备	仓库	AGV	车床	机械手
ID	0101	0201	0301	0401

表6 ProFiNet通信协议信息帧格式

信息帧	同步	分隔	源 MAC	目的 MAC	类型	应用标识	应用数据	FCS	数据长度
数据量 / Byte	7	1	6	6	2	2	—	4	Length

and application of EtherNet/IP industrial EtherNet[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2016.

[5] 侯瑞春, 丁香乾, 陶冶, 等. 制造物联及相关技术架构研究[J]. 计算机集成制造系统, 2014, 20(1): 11-20.

HOU Ruichun, DING Xiangqian, TAO Ye, et al. Internet of manufacturing things and relevant technical architecture[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2014, 20(1): 11-20.

[6] 吴爱国, 李长滨. 工业以太网协议 EtherNet/IP[J]. 计算机应用, 2003(11): 9-11.

WU Aiguo, LI Changbin. EtherNet/IP industry protocol[J]. Computer Applications,

2003(11): 9-11.

[7] 王可鹏. 基于 Modbus TCP/IP 通信的实现[J]. 电脑知识与技术, 2008(30): 553-554,764.

WANG Kepeng. Based on the Modbus TCP/IP protocol realization[J]. Computer Knowledge and Technology, 2008(30): 553-554,764.

[8] 蓝丽, 李红星. PROFInet 与现场总线的集成应用[J]. 微计算机信息, 2007(22): 23-24,34.

LAN Li, LI Hongxing. The application of PROFInet and field bus integration[J]. Microcomputer Information, 2007(22): 23-24,34.

[9] 朱雍杰, 王成, 杨新志. 基于工业以太网的控制系统及其应用层协议的设计[J].

微计算机信息, 2006(13): 74-76.

ZHU Yongjie, WANG Cheng, YANG Xinzhi. Design of control system and application layer protocol based on industrial Ethernet[J]. Microcomputer Information, 2006(13): 74-76.

[10] 郑欢, 陈程. ProFiNet 以太网协议分析[J]. 电气应用, 2013, 32(4): 34-38.

ZHENG Huan, CHEN Cheng. The analysis of the protocol in ProFiNet[J]. Electrotechnical Application, 2013, 32(4): 34-38.

通讯作者: 唐敦兵, 教授、博士生导师, 研究方向为现代集成与柔性制造技术、智能制造系统、制造系统与自动化、数字化设计, E-mail: d.tang@nuaa.edu.cn.

Research of Communication Protocol for IoT-Based Manufacturing Workshops

ZHANG Quwei, TANG Dunbing, ZHANG Tao, ZHENG Du, WANG Yingcong

(College of Mechanical and Electronic Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

[ABSTRACT] This paper analyzes the characteristics of fieldbus and industrial Ethernet in the shop floor network, and draws the conclusion that the application of industrial Ethernet in the shop floor network is inevitable. Based on the analysis of the existing industrial Ethernet communication protocols, the amount of data is too large in the communication process. This problem causes that the real-time of information is difficult to be met. The protocol which is based on TCP/IP is developed for characteristics of the IoT-based manufacturing and used to achieve real-time communication among information layers in IoT-based manufacturing workshops. The case analysis indicates that this protocol simplifies complexity of traditional communication protocols, reduces the amount of data obviously in the communication process, improves efficiency of the communication and satisfies the real-time communication requirements in IoT-based manufacturing.

Keywords: IoT-based manufacturing; Industrial Ethernet; Communication protocol; TCP/IP; Information frame

(责编 逸飞)

(上接第47页)

[ABSTRACT] Adaptive NC machining technology has obvious advantages in the machining of high-powered Aero-engine products and prolonging life overhaul machine products, which is based on flexible manufacturing and adaptive control. Adaptive control factors include stock, error, precision, cutting speed, feed speed, cutting force and so on, in the course of NC machining, which mostly embody four aspects: adaptive control for space geometrical position of workpiece, adaptive control for clamping position of parts, adaptive control for cutting load and adaptive control for machine tool production operation. In the paper, the aero-engine product adaptability processing technology and its key technologies are comprehensively elaborated, and the application of adaptive numerical control processing and control elements are discussed. Finally, it is pointed out that adaptive NC machining technology is an effective method to improve the machining efficiency and accuracy of NC machining, and the adaptive NC machining technology of intelligent control will become an important development direction of intelligent manufacturing.

Keywords: Adaptive control; Aero-engine; NC machining; Clamp positioning; Margin optimization; Intelligent manufacturing

(责编 逸飞)