

导读：工业以太网是工业互联网的通信部分的实现，是工业互联网的关键的核心技术和智能制造自动化的基石。工业以太网的一些关键技术以及相应推出的芯片和系统，越来越成为工业互联网中的主流。为了促进工业以太网芯片与系统的核心技术交流，《电子技术应用》特推出“工业以太网”主题专栏。本专栏旨在针对工业以太网中的各种现场总线、短距离无线通信、5G 的确定性研究、网络间的互联、软件定义网络、时间敏感网络及工业以太网的应用示范进行研究和讨论。期待对工业以太网技术的研究和应用提供有益的借鉴。

特约主编：



严伟,北京大学软件与微电子学院教授,主要从事工业以太网芯片、人工智能芯片、微处理器芯片、视频编解码芯片的研究和设计。承担了国家重点科技专项及国家自然科学基金项目研究,如“面向智能工厂的双线以太网关键技术研究及芯片研发”“神经网络处理器指令集标准”“基于监控内容感知的高效安全的视频编解码”“功率集成电路芯片与系统电磁干扰可靠性研究”等一批芯片设计和研究课题,在国内外取得具有开创和领先的意义。



汪文勇,电子科技大学计算机学院教授,澳门科技大学特聘教授、博士生导师。主要研究方向为计算机网络、传感器网络与工业互联网、区块链与数据共享技术。主持各类科研项目 60 余项,获国家及省部级奖励 9 次,获国家发明专利 22 项,在国内外知名期刊和国际会议上发表论文 80 余篇。担任中国教育和科研计算机网(CERNET)专家委员会委员、中国下一代互联网(CNGI)专家委员会委员、下一代互联网核心网技术国家工程实验室(清华大学)技术委员会委员、四川省计算机网络工程实验室学术委员会主任、四川省区块链存储与交易技术工程实验室学术委员会主任、四川省云网超融合工程研究中心主任。

工业以太网网络互联技术与发展*

于会群,黄贻海,彭道刚,王宜雪,马 涛

(上海电力大学 自动化工程学院,上海 200090)

摘要：随着信息技术的发展,工业以太网覆盖率日益提高,工业网络互联互通成为现代工厂向智能化、数字化转型的基础。首先对我国工业互联网发展政策、工业网络市场现状和工业以太网协议类型进行阐述,分析了目前工业网络互联的障碍。其次探索新技术推动工业以太网实现网络互联的新方法。最后针对我国工业以太网和工业互联网的发展现状,提出建设性意见,助力我国工业以太网的应用和工业互联网的发展。

关键词：以太网;工业以太网;工业互联网;网络互联

中图分类号：TP273;TP393.11

文献标识码：A

DOI: 10.16157/j.issn.0258-7998.222657

中文引用格式：于会群,黄贻海,彭道刚,等. 工业以太网网络互联技术与发展[J]. 电子技术应用, 2022, 48(4): 1-5, 11.

英文引用格式：Yu Huiqun, Huang Yihai, Peng Daogang, et al. Industrial Ethernet network interconnection technology and development[J]. Application of Electronic Technique, 2022, 48(4): 1-5, 11.

* 基金项目：国家重点研发计划项目(2020YFB1711000)

Industrial Ethernet network interconnection technology and development

Yu Huiqun, Huang Yihai, Peng Daogang, Wang Yixue, Ma Tao

(School of Automation Engineering, Shanghai University of Electric Power, Shanghai 200090, China)

Abstract: With the development of information technology, the coverage of industrial Ethernet is increasing, and the interconnection of industrial networks becomes the basis for the transformation of modern factories to intelligent and digital. Firstly, the paper expounds the development policy of industrial Internet in China, the current situation of the industrial network market and the types of industrial Ethernet protocols to analyze the current obstacles to the interconnection of industrial networks. Secondly, the paper explores new methods for new technologies to promote the interconnection of industrial Ethernet networks. Finally, the paper puts forward constructive suggestions according to the status of industrial Ethernet and industrial Internet to promote the application of industrial Ethernet and the development of industrial Internet.

Key words: Ethernet networks; industrial Ethernet; industrial Internet; network interconnection

0 引言

随着网络节点设备的不断增加以及对数据传输的时效性要求不断提高,工业通信技术由工业现场总线发展到工业以太网,再到现在的工业无线网络。2013年汉诺威工业展宣告第四次工业革命的开始^[1],其主旨是将互联网融入生产制造,实现开放兼容、多元协同、分布互联的现代化工业控制网络。

在工业4.0和工业互联网的推动下,工业通信技术正从现场层和控制层网络向管理应用层网络延伸的趋势发展,以实现整个工厂网络垂直方向的互联互通。目前,工厂中新增的自动化控制系统主要基于工业以太网,工业现场总线新安装节点在市场占有率增长缓慢甚至下降^[2]。由此预见,未来工业以太网会逐渐替代工业现场总线。

市场上存在着诸多不同标准的工业以太网协议,在实际应用中,实现网络中不同标准的工业以太网协议互联互通,是当前需要解决的主要问题之一。本文对工业网络市场和工业以太网协议进行分析,并结合我国工业以太网和工业互联网的发展现状,提出可行性建议。

1 工业网络发展现状

1.1 工业互联网发展现状

在推进现代工厂向智能化、数字化转型的过程中,世界多个国家提出了各自的工业互联网参考体系架构,例如德国的RAMI4.0(Reference Architecture Model Industry 4.0,工业4.0参考架构)^[3]、美国的IIRA(Industrial Internet Reference Architecture,工业互联网参考架构)以及日本的IVRA(Industrial Value Chain Reference Architecture,工业价值链参考架构)等。

《工业互联网体系架构(版本1.0)》由中国工业互联网产业联盟在2016年发布,提出了工业互联网应包含网络、数据、安全三大体系。其中,“网络”是工业互联网的基础。2020年正式发布的《工业互联网体系架构(版

本2.0)》,在体系架构1.0的基础上对“网络、数据、安全”体系重新整合为现在的“网络、平台、安全”三大体系。工业互联网的网络体系通过构建工业环境下人、设备、车间等主体的全面互联,实现工业制造链各生产要素的泛在互联以及数据的顺畅流通^[4-5]。

中国工业互联网专项工作组在2021年印发《工业互联网创新发展行动计划(2021年—2023年)》^[6],对我国未来3年内工业互联网发展提出了“3+3”行动发展目标,即实施供给质量提升三大行动、产业集群培养三大行动。

1.2 工业网络市场分析

随着工业互联网的发展,工业设备互联的需求不断增加,大量工业设备与工业网络连接是实现现代工厂向智能化、数字化转型的基础,工业以太网和工业无线网络在其巨大的需求下迅速成长。HMS Networks 每年度对工业网络市场进行分析,通过对全球自动化工厂的新配置节点数目统计^[7],估计每一年度现场总线、工业以太网和无线的市场份额。图1为2017年至2021年工业通信技术的市场份额变化图。

通过比较近5年所发布的工业网络市场份额报告,工业以太网保持稳定的增长速度,并在2021年占全球

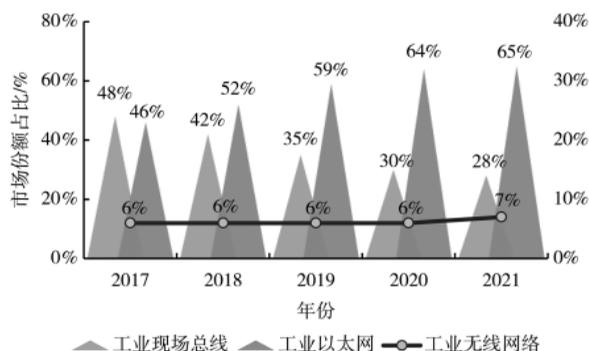


图1 2017年至2021年工业通信技术的市场份额变化图

自动化新安装节点市场的 65%，反观工业现场总线新安装节点市场占有率呈下降趋势，未来工业以太网将继续向工业现场总线中占据更多的市场份额，逐渐替代工业现场总线，成为工业互联网发展的重要技术。

我国《工业互联网创新发展成效报告(2018-2021年)》显示^[8]，“工业互联网创新发展工程”已带动实体经济总投资近 700 亿元，连接设备超过 7 600 万台/套，工业数字化装备、工业自动化等与软件相关的核心企业规模年均增长超过 20%，展示了我国工业互联网市场具备庞大的发展潜力。

1.3 工业以太网类型

工业以太网与标准以太网相比，具备更稳定可靠的连接器、电缆，具有确定性的实时数据交换和小于 1 ms 的同步循环时间^[9]，因此工业以太网更符合工业现场各项严苛的要求。一些工业以太网在标准以太网协议的基础上进行适当修改，克服了标准以太网因采用 CSMA/CD (Carrier Sense Multiple Access with Collision Detection, 载波监听多路访问技术)而导致的不确定性和时延，提高了数据在网络中传输的实时性。目前，国际上使用的工业以太网协议按照所使用的原理可以基本分成：基于 TCP/IP 协议、基于标准以太网和基于修改的以太网，图 2 为三种类型的工业以太网协议的本质设计理念。

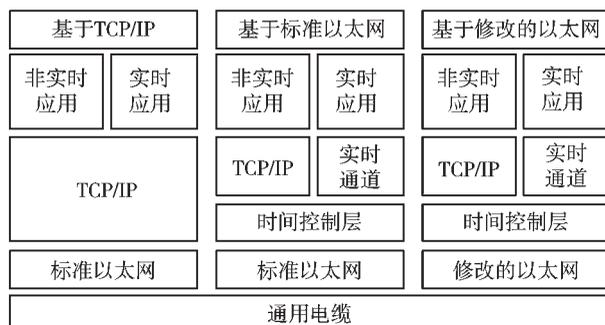


图 2 三种类型工业以太网协议本质设计理念图

其中，Modbus-TCP、EtherNet/IP、POWERLINK、PROFINET、EtherCAT 是当前国际市场 5 种主流的工业以太网协议。

(1) 基于 TCP/IP 协议：Modbus-TCP^[10]、EtherNet/IP 是采用 TCP/IP 协议的工业以太网类型中使用最广泛的。基于 TCP/IP 协议的工业以太网协议处于 OSI 模型(Open System Interconnection, 开放式系统互连模型)的第七层应用层，对实时性的要求不高^[11]，通常采用优先调度策略、修改优先级设定、完善网络拓扑等上层控制手段，是实现工业通信较为简单的协议。

(2) 基于标准以太网：POWERLINK、PROFINET RT 使用标准的以太网硬件，通过在 TCP/IP 协议栈中添加时间控制层控制数据传输过程，有效消除标准以太网的不确定性，从而达到实时可控效果^[12]。因此与基于 TCP/IP

协议的工业以太网协议相比，POWERLINK、PROFINET RT 具有更高的实时性。

(3) 基于修改的以太网：EtherCAT、PROFINET IRT 对标准以太网协议进行了修改并兼容标准以太网，在物理层使用专用的芯片，实现实时通信控制。在三种类型中，基于修改的以太网类型的工业以太网协议是实时性最强的，但成本较高^[13]。

1.4 工业网络互联存在的问题

1.4.1 技术隔离

进入 IEC 国际标准的工业现场总线和工业以太网种类多达数十种，但是因为支持的厂商和开发的组织不同，使得每种网络协议都有不同的物理接口、传输机制和对象要求，各厂商组织为维护自身的利益，优先推广自己的技术而不兼容其他厂商的技术，导致不同网络协议的设备之间数据传输困难。因此大部分协议标准常常自成体系，形成一个个封闭的软硬件系统。

1.4.2 必要的资产保留

一方面，工业控制网络往往需要多种网络协议共同运作，从现场层采集的数据传输至管理应用层时，需要协议转换网关将不同的协议类型数据重新包装和转发^[14]，才能使数据在不同协议组成的异构网络内部以及各网络层之间无障碍传输。另一方面，现阶段工厂底层大量的传感器、执行器等终端设备通过工业现场总线与外部系统通信，如果直接弃用原有设备而直接安装新的工业以太网设备，不仅需要大量的成本，还是对原有资产的浪费^[15]，因此仍需要协议转换网关作为新旧设备连接的桥梁。

1.4.3 我国对工业以太网研究尚浅

从我国整体制造业的实力分析，我国制造业信息化程度不高，与工业化融合度不足^[16]，传感器关键技术、工业通信技术等重要技术仍滞后于欧美日等发达国家，并且缺乏足够的资金去储备人才、研发技术、培养企业、宣传产品。在工业互联网的推动下，国内大型企业可以依靠自身的规模和资金，购买新型的工业以太网设备和系统，但是众多中小型企业无法突破成本的限制，因此中小型企业对技术更为成熟的工业现场总线接纳程度仍然较高，长期来看，我国工业以太网技术仍会和工业现场总线并存。

1.4.4 我国工业互联网标准体系不完善

目前我国工业互联网标准体系不完善，是我国与发达国家在实现工厂智能化、数字化目标的巨大差距之一^[17]。虽然在框架、标准、测试、安全等方面取得初步进展，但是与发达国家相比，总体发展水平及显示基础仍不高，产业支撑能力不足，核心技术和产品对外依赖程度较高，关键平台综合能力不强，缺乏龙头企业引领。

2 工业以太网与新技术融合

2.1 工业以太网与双线以太网

在工业互联网的推动下,许多智能制造业企业已经实现从企业层、管理层、监督层到控制层的以太网部署。然而,在工业底层连接大量传感器、控制器和终端设备的工业现场总线,因自身的高度分散性和技术专属性,使得多种不可互操作的总线技术方案应用于现场层。

SPE(Single Pair Ethernet,单对以太网)也叫双线以太网,是采用单对双绞线作为传输介质的以太网技术。相对于传统四对以太网技术,具备更轻的质量、更低廉的成本,以及在1 km的传输距离上提供10 Mb/s的传输速度等优势^[18]。

IEEE802.3以太网工作组早在2016年开始对SPE进行研究,并在2019年通过了IEEE802.3以太网标准,称为10BASE-T1L^[19]。工业以太网标准技术的完善将不断推动SPE的发展,并不断向现场层延伸,逐渐替代高度分散的工业现场总线,SPE是实现以太网“一网到底”和工业网络互联的关键。

2.2 工业以太网与时间敏感网络

理想的工业以太网网络应是既能传输来自OT(Operational Technology,运营技术)网络的实时数据,又能传输IT(Information Technology,信息技术)网络的大吞吐量数据的融合性网络。各工业以太网开发商为保证工业以太网的实时性和确定性,对以太网协议改造的思路和设计不尽相同,因此也造就了目前各工业以太网协议在网络内部难以互联互通,工厂内需要安置大量的协议转换网关解决该问题。

TSN(Time Sensitive Networking,时间敏感网络)是工作在OSI模型的第二层数据链路层的协议,是对第二层实时机制的标准化,能够为工业网络提供时间同步、调度和流量整形以及通信路径的选择、预留和容错等功能^[20-21]。图3展示了TSN在工业网络中的位置。

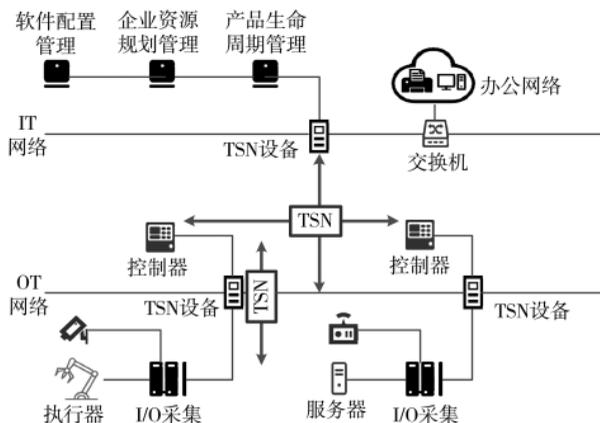


图3 TSN在工业网络中位置示意图

目前,TSN已经在IEEE802.1标准框架下定义了一系列子标准,在确保以太网数据传输实时性和确定性的

同时,使不同的工业以太网协议互通互联成为可能。未来TSN协议可以在标准IEEE硬件上运行,基于TCP/IP和基于标准以太网类型的工业以太网协议可以在标准以太网硬件上实现高精度时间同步、低抖动、带宽预留等功能^[22]。

2.3 工业以太网与语义互操作

网络互联需要做到互联、互通、语义互操作三个层面,工业以太网可以解决互联、互通的问题,但是却无法解决系统语义不统一的问题。

OPC UA(Open Platform Communication Unified Architecture,开放平台通信统一架构)是OSI第七层应用层的协议集,定义了一套通用的数据描述和信息模型,每种系统可以通过OPC UA向其他系统获取和采集实时数据和历史信息^[23-24]。换言之,OPC UA允许使用不同工业以太网协议且在不同操作平台上运行的工业设备相互通信。

目前国外对OPC UA标准的研究更加深入和全面,例如德国Unified Automation公司、波兰自动化设备CAS公司已经完成对OPC UA可视化信息模型设计工具,为实现OPC UA标准的信息建模提供了极大的便利。国内对OPC UA的研究仍在各大学院内进行,还未形成一个完整的成熟体系,一般企业还未将OPC UA应用在现实生产中^[25]。

3 现阶段网络互联发展建议

3.1 推进OPC UA over TSN

OPC UA在机制上已经覆盖了OSI模型的应用层、会话层和表示层,不仅可以在水平方向集成多个品牌的控制器,还可以在垂直方向上将工厂设备连接到云端,可以与工业以太网结合,使数据在多个维度集成。在未来OPC UA可以通过与TSN融合形成新的自动化控制网络,图4展示了OPC UA over TSN的OSI参考模型。

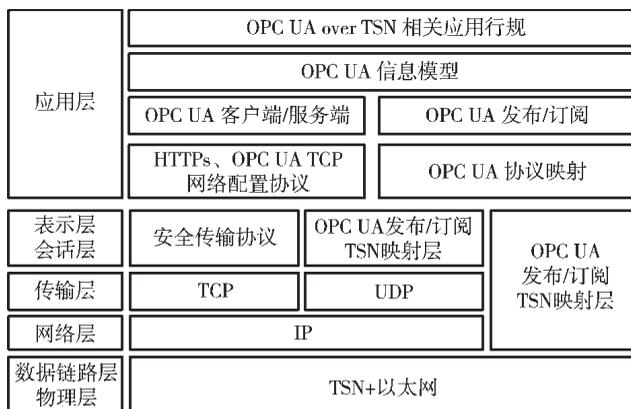


图4 OPC UA over TSN的OSI参考模型

3.2 与工业现场总线结合

目前,工业现场总线技术日益成熟,在国内仍广泛应用于汽车制造、工业控制、机器人网络互联和大型仪

器设备等领域^[26-27],但是整体技术上缺乏统一标准,对数据统一管理较为困难。工业以太网本身兼容标准以太网,具有确定性、实时性等特点,拥有全球统一标准,所以工业以太网在实际应用中能与其他系统衔接与结合,但是应用在工业现场层仍存在一些不足和缺点。因此将工业以太网与工业现场总线相结合是一种非常必要的应用途径^[28],两者优势互补,提高我国工业网络通信的整体效果。

现阶段工业以太网不断提高数据传输的确定性和实时性,并注重与其他技术融合,在不久的将来,工业以太网与工业现场总线的结合会更加紧密。

3.3 自主研发物联网网关

在工业互联网和国家政策的推动下,我国工业以太网市场将飞速增长,对网关的需求量也随之增长。但是我国工业以太网技术研究尚浅,工业现场仍存在大量的基础设施和具有长时间更换周期的硬件,必须通过安装大量的协议转换网关,将控制层工业以太网网络和现场层工业总线进行连接。对于国内大部分中小型企业,工业现场总线遗留的资产通过协议转换网关整合到自动化或企业架构中是非常必要的。

因为工业以太网与工业现场总线的结合仍需要一段时间,这就需要国内大型企业发挥引领作用,对工业以太网技术进行系统研究,开发系列产品^[29]。目前国内宏电和研华的相关网关产品代表国内一线水平,尤其在华为 5G 工业模组技术加持下迅速发展。中小型企业通过研发自己的相关产品,满足相应的市场需求,占据对应的市场份额。

3.4 完善工业互联网体系

工业互联网产业联盟在 2021 年 12 月发布了《工业互联网标准体系(版本 3.0)》,该版本整理了已有工业互联网标准以及未来需要制定的标准,形成统一、综合、开放的工业互联网标准体系。

但是体系的标准化仍无法快速实现工业互联网,我国虽然在上层应用领域有一定的成果,但是缺乏底层技术的自主权。在一些工业特定技术领域,如工业以太网,中国企业的专利布局数量相对落后于欧美企业。虽然我国自主研发的 EPA(Ethernet for Plant Automation)工业以太网协议已经在工厂中应用,但是总体上我国仍缺乏自主研发的技术。未来,我国在继续推进工业互联网建设的过程中,要以国家政策为指导,明确工业互联网发展路线,并催生新产业新业态;以市场需求为牵引,构建和拓展国际和国内的工业互联网市场;以实践为核心,工业互联网并不是简单的“工业+互联网”,需要紧密地与工业制造相结合,满足工业制造的需求,最终实现产业链与供应链的高水平协同发展。

4 结论

综上所述,我国正大力发展工业互联网,随着工业

通信技术和工业需求的不断提高,工业以太网在近些年取得了长足发展。虽然目前工业网络通信仍存在互联互通障碍,但是工业以太网与 SPE、TSN 等新技术的融合,优势互补,在未来各工业以太网协议之间能进行无障碍沟通,实现工业以太网在工业网络中全方面覆盖。当前,我国工业以太网发展程度较低,将工业以太网与技术更加成熟的工业现场总线结合,能满足现阶段工业领域对工业底层控制的网络技术需求。我国将不断完善工业互联网体系,在未来紧随国际新技术发展的脚步,完成现代工厂向智能化、数字化转型的目标。

参考文献

- [1] 贺正楚,潘红玉.德国“工业 4.0”与“中国制造 2025”[J].长沙理工大学学报(社会科学版),2015,30(3):103-110.
- [2] 刘丹.刘丹:工业通信的未来发展趋势[J].自动化博览,2020(5):22.
- [3] 熊检.“中国制造 2025”和德国“工业 4.0”对比研究[J].中国集体经济,2019(10):86-87.
- [4] 吴凯林.发挥工业互联网支撑引领作用 构建“产业大脑+未来工厂”新生态[J].网信军民融合,2021(9):35.
- [5] 彭懿,吕建军,孔宁,等.5G 在船舶制造工业互联网中的应用研究[J].电子技术应用,2021,47(5):14-18,24.
- [6] 《工业互联网创新发展行动计划(2021-2023 年)》解读[J].中国信息化,2021(3):10-14.
- [7] HMS Networks 发布 2020 年工业网络市场份额报告[J].传感器世界,2020,26(6):48.
- [8] 鄒勇志.工业互联网的 2021 年 踩下“油门”,驶入“高速公路”[J].通信世界,2021(24):40.
- [9] 工业以太网协议的历史及其优势[J].世界电子元器件,2020(8):15-17.
- [10] 王玉敏.MODBUS 协议簇简介[J].中国仪器仪表,2019(12):21-26.
- [11] 张国栋,王有春.PROFINET 的实时性及其协议分析[J].计算机测量与控制,2017,25(3):187-190.
- [12] 胡振豪,左小五,万红平.工业以太网 EtherCAT 的实时性研究[J].软件导刊,2018,17(2):179-181,185.
- [13] 兰海春.PROFINET 实时工业以太网通信技术分析[J].探索科学,2018(5):1.
- [14] 工业以太网协助工厂向工业 4.0 时代过渡[J].智慧工厂,2018(10):2.
- [15] 郭翠娟,李中原,荣锋.PROFINET-Modbus 通信网关的设计[J].仪表技术与传感器,2020(9):121-126.
- [16] 2019 年中国工业物联网市场前景研究报告[J].电器工业,2019(10):42-44.
- [17] 工信部:标准体系不完善制约我国工业互联网发展[J].中国标准化,2018(15):40.
- [18] 殷海成,陈凤霞,秦宝祥,等.单对以太网技术发展及其布线标准综述[J].光纤与电缆及其应用技术,2021(2):19-21,29.

(下转第 11 页)

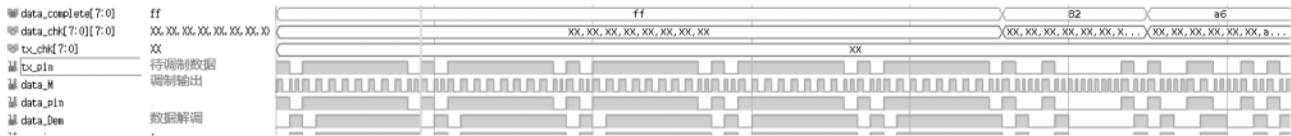


图 14 调制解调硬件仿真图

口设计,通过对比现有的 HART 通信芯片,设计了一款全新的 HART 芯片架构。采用 AXI4 总线的特征,可实现单个 CPU 挂载多个 HART 芯片设备,实现多芯片互联功能,搭配 RAM 存储器,实现数据的缓存处理,实现高速接收 CPU 数据的同时,满足 HART 协议规范传输速度,通过 FPGA 平台设计两个 IP 核,实现两个 IP 的数据交互,由此验证了该设计方案的可行性与合理性,可识别和传输满足 HART 协议规范的数据类型。

参考文献

- [1] 段茂强,杨松,刘志峰,等.一种 HART 模拟芯片解调器的实现[J].微计算机信息,2006(20):273-275.
- [2] 丁颖,盛惠兴.一种新型的 HART 信号解调方法[J].河海大学常州分校学报,2004(1):37-39.
- [3] 于晓绎,杨志家.HART 调制解调芯片的设计[J].微计算机信息,2006(31):10-12.
- [4] 盛惠兴,丁颖.HART 调制解调芯片 HT2012 的系统接口设计[J].河海大学常州分校学报,2005(2):35-37,41.
- [5] 卫敏.HART 调制解调器 HT2012 的原理和应用[J].安徽电子信息职业技术学院学报,2004(Z1):280-277.
- [6] 蔡建新,卢爱明.HART 调制解调器 HT2012 的原理和应用[J].电子技术应用,1999(4):43-44.
- [7] 李军.二线制 HART 总线的设计及物理层测试[J].中国仪器仪表,2021(7):69-72.
- [8] 尹亚兰,李琰,徐天奇,等.基于 TDMA 的 wireless HART 网络多路径重传算法[J].云南民族大学学报(自然科学版),2021,30(4):381-386.
- [9] 周鹏.一种数字 HART 调制解调芯片的设计[J].电子技术与软件工程,2021(13):92-94.
- [10] 钱建康,郑思源.基于无线 HART 协议的蒸汽泄漏监测系统[J].控制工程,2021,28(6):1210-1216.
- [11] 方原柏.WirelessHART 基础无线网络设计[J].石油化工自动化,2021,57(3):81-83.
- [12] Anonymous.ADI eyes HART protocol with low power modem[J].Electronics Weekly,2012(18).
- [13] ANDORKA F.Wireless HART moves manufacturing forward[J].Industry Week,2011,260(7).
- [14] REBECCA S, LESLIE M.HART protocol: practical digital communication tool for analog installations[J].ISHN,2008,42(9):57.
- [15] HELSON R B.The HART protocol an enabler for improved plant performance[J].ISA Transactions,1996,35(2):159-164.

(收稿日期:2021-03-23)

作者简介:

张立国(1978-),男,博士,副教授,主要研究方向:机器视觉、虚拟现实、智能机器人、仪器仪表。

李福昆(1996-),通信作者,男,硕士,主要研究方向:工业以太网芯片与系统设计,E-mail:ysulifukun@163.com。

严伟(1966-),男,博士,教授,主要研究方向:集成电路与智能系统、数字集成电路芯片设计、工业以太网芯片与系统、视频编解码芯片设计。



扫码下载电子文档

(上接第 5 页)

- [19] 彭瑜.先进物理层——一网到底的最后突破[J].自动化仪表,2020,41(4):1-5,10.
- [20] 宋华振.时间敏感型网络技术综述[J].自动化仪表,2020,41(2):1-9.
- [21] 吴欣泽,信金灿,张化.面向 5G TSN 的网络架构演进及增强技术研究[J].电子技术应用,2020,46(10):8-13.
- [22] 关于 TSN,这些内容先了解一下[J].中国仪器仪表,2020(12):41-43.
- [23] 熊伟.OPC UA over TSN 技术路线及分析[J].工业控制计算机,2020,33(2):22-25.
- [24] 苏畅,龚钢军,罗安琴,等.发电系统动态仿真监控平台研究[J].电子技术应用,2017,43(12):65-68.
- [25] 万浩.边缘网节点中的 OPC UA-TSN 融合技术研究[D].武汉:华中科技大学,2019.
- [26] 李娜.基于 CAN 总线的汽车仪表研究[J].内燃机与配件,2022(1):10-12.
- [27] 郭际航.现场总线及其传输介质技术概述[J].光纤与电缆及其应用技术,2020(6):1-6.
- [28] 张奇.在煤矿自动化建设中工业以太网与现场总线技术的运用分析[J].矿业装备,2020(5):126-127.
- [29] 荀庆来,袁韬.工业以太网技术的应用分析[J].科学技术创新,2019(12):72-73.

(收稿日期:2022-02-19)

作者简介:

于会群(1978-),女,博士,副教授,主要研究方向:智能发电自动化、能源互联网。

黄贻海(1997-),男,硕士研究生,主要研究方向:工业通信技术、智能发电技术。

彭道刚(1977-),男,博士,教授,主要研究方向:发电过程自动化、新能源微电网与能源互联网。



扫码下载电子文档

版权声明

经作者授权，本论文版权和信息网络传播权归属于《电子技术应用》杂志，凡未经本刊书面同意任何机构、组织和个人不得擅自复印、汇编、翻译和进行信息网络传播。未经本刊书面同意，禁止一切互联网论文资源平台非法上传、收录本论文。

截至目前，本论文已经授权被中国期刊全文数据库（CNKI）、万方数据知识服务平台、中文科技期刊数据库（维普网）、DOAJ、美国《乌利希期刊指南》、JST 日本科技技术振兴机构数据库等数据库全文收录。

对于违反上述禁止行为并违法使用本论文的机构、组织和个人，本刊将采取一切必要法律行动来维护正当权益。

特此声明！

《电子技术应用》编辑部

中国电子信息产业集团有限公司第六研究所