

doi: 10.7690/bgzdh.2025.08.006

机械装备行业的 TSN 工业实时控制网络通信技术

谭少飞, 杨银香, 王战孟, 范福基, 郝 亮

(北京和利时智能技术有限公司控制开发部, 北京 100176)

摘要: 针对单一网络访问控制方式下通信效率不高等问题, 提出面向掘进机的机械装备行业的 TSN 工业实时控制网络通信技术。根据基础访问和 CTS 访问方式设计 TSN 工业实时控制网络通信协议, 将多节点组网的模式作为网络拓扑结构, 通过计算网络通信空闲时间获取通信终端地址。对通信发起过程和节点转发过程进行设计, 从而实现 TSN 工业实时控制网络通信。实验结果表明: 该方法对 TSN 工业信息进行传输时的协议转换时延较低, 通信效率较高, 能够满足机械装备行业对实时性和精确时间控制的需求。

关键词: 机械装备行业; TSN; 工业实时控制网络; 通信协议

中图分类号: TN915.02 **文献标志码:** A

TSN Industrial Real-time Control Network Communication Technology in Mechanical Equipment Industry

Tan Shaofei, Yang Yinxiang, Wang Zhanmeng, Fan Fuji, Hao Liang

(Control and Development Department of Beijing Helishi Intelligent Technology Co., Ltd., Beijing 100176, China)

Abstract: In order to solve the problem of low communication efficiency under single network access control mode, the TSN industrial real-time control network communication technology for mechanical equipment industry of roadheader is proposed. The TSN industrial real-time control network communication protocol is designed according to the basic access and CTS access mode. The multi-node networking mode is used as the network topology, and the communication terminal address is obtained by calculating the idle time of network communication. Communication initiation process and node forwarding process are designed to realize TSN industrial real-time control network communication. The experimental results show that the method has low protocol conversion delay and high communication efficiency when transmitting TSN industrial information, which can meet the requirements of real-time and accurate time control in mechanical equipment industry.

Keywords: mechanical equipment industry; TSN; industrial real-time control network; communication protocol

0 引言

掘进机机械装备行业是隧道建设领域的重要组成部分, 在城市地铁、交通基础设施以及水利工程等方面起着关键作用。在这些工程中, 掘进机的运行和控制需要实时、可靠的通信系统来确保安全、高效的施工。受到 TSN 工业实时控制网络复杂环境的影响, 网络通信系统通常在进行网络控制时容易存在多种风险, 例如信号传输通道拥堵、信息丢失或第三方恶意攻击等; 因此, 为保证机械装备行业的通信工程服务质量, 需要对工业控制网络通信技术进行优化, 从而给用户更好的通信体验感。文献[1]以大数据时代作为研究背景, 研究计算机远程网络通信技术的革新路径, 并探讨通信技术的应用场景。文献[2]提出一种基于协程技术的异步网络通信

技术, 对传统的单维通信技术进行了优化与调整。文献[3]以数字签名技术作为研究对象, 探究该技术在网络通信工作中的应用场景及实施方案。文献[4]以数据安全性为研究目的, 对计算机网络通信技术的创新方向进行分析。上述研究均在一定程度上对传统的网络通信技术进行了优化, 但是在网络通信效果上还存在较大的提升空间。由于工业网络通信性能受到多方面因素的影响, 因此在对传统的工业网络通信技术进行优化时, 需要将实时性、可靠性在内的多项指标作为提升目标, 提出一种新型的网络通信技术, 优化 TSN 工业实时控制网络的通信效果。笔者提出一种针对掘进机机械装备行业的 TSN 工业实时控制网络通信技术, 通过对通信网络的组网进行设计, 减少网络通信延时, 从而提高系统的网络通信性能。

收稿日期: 2024-09-15; 修回日期: 2024-10-26

基金项目: 国家重点研发计划(2020YFB1713902)

第一作者: 谭少飞(1987—), 男, 陕西人。

1 掘进机械装备行业的 TSN 工业实时控制网络通信技术研究

1.1 TSN 工业实时控制网络通信协议设计

通信协议是实现 TSN 工业实时控制网络高效通信的基础。为保证通信效果,笔者通过构建网络协议模型,对通信协议进行设计^[5]。一般工业控制网络的通信协议由链路层和物理层 2 部分组成,通过对 2 层的访问方式进行设计,并将其进行组合,最终构建适用于掘进机机械装备行业的 TSN 工业实时控制网络通信协议。为对设计的通信协议进行说明,首先对协议中的名词进行如下定义:TSN 工业实时控制网络中通信器称之为通信节点;由某通信节点发送给另一个通信节点用于执行命令的操作称之为控制帧;另一个通信节点对于执行命令的响应操作称之为应答帧;由通信节点发出的预警信息为信息帧^[6]。由此构建出的工业控制网络协议模型如图 1 所示。

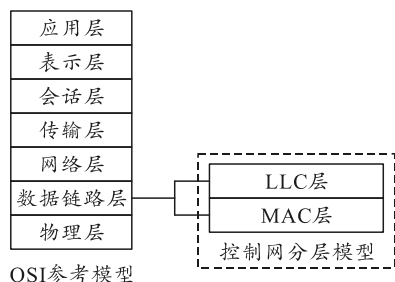


图 1 TSN 工业实时控制网络控制协议模型

图 1 中,物理层主要负责实现通信网络协议在物理链路上的传输,主要传输介质为电缆。通过对电缆的连接方式进行设计,可以有效提高物理链路的传输性能。而数据链路层主要用于实现控制命令方面的传输与响应操作,具体包括 LLC 层以及 MAC 层,笔者主要针对数据链路层的访问方式进行设计。笔者选取了 2 种访问方式用于实现 LLC 层的访问操作,分别为基本访问方式以及 CTS 访问方式^[7]。其中,在基本访问方式下,通信节点首先会对通信信道的状态进行侦听,若此时通信信道处于忙碌状态,则通信节点不会对其发送控制帧。当通信节点侦听到通信信道的空闲状态时,会根据退避时延的大小对发送时长进行调整。退避时延由退避计时器产生,该数值是由通信信道处于忙碌状态和空闲状态下的时间差决定的,具体可以通过指数退避算法进行计算得出,其计算公式为:

$$R_{\text{random_back_time}} = R_{\text{random_Int}}(\text{CW}) \times S_{\text{lot_time}} \quad (1)$$

式中: $R_{\text{random_Int}}(\text{CW})$ 为窗口宽度产生的随机函数;

$S_{\text{lot_time}}$ 为时隙数; $R_{\text{random_back_time}}$ 为退避时延大小。通过上述步骤即可完成对于基本访问方式的设计。不同于基本访问方式,CTS 访问方式主要是由通信网络中的隐藏节点所提出的。隐藏节点是受到电力通信距离的限制所产生的通信中转节点,在隐藏节点的通信范围内,CTS 控制命令可以被所有节点接收到,并且已经接收到控制命令的通信节点将不会对控制命令进行二次转发,防止控制命令的重叠。同时,网络通信节点还会根据所接收到的控制命令对自身的网络分配矢量进行更新,该矢量会对通信信道的访问操作进行限制^[8]。当网络分配矢量值为 0 时,通信节点才被允许向通信信道发送数据,通过上述方式,可以有效防止通信信道出现拥挤的情况,从而避免数据冲突。CTS 的具体访问工作过程如图 2 所示。

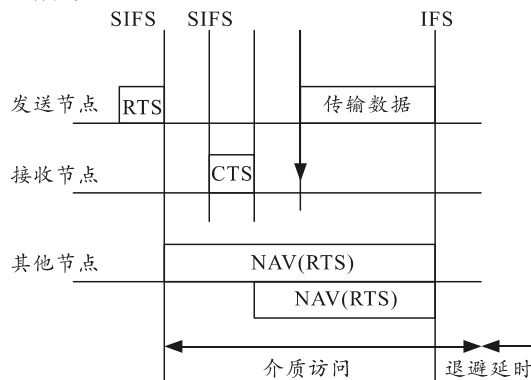


图 2 CTS 访问方式工作过程

通过上述步骤即可完成对于基本访问方式以及 CTS 访问方式的设计。为调节工业控制网络的网络负载,还需对访问方式之间的转换进行设计。当通信节点对于同一控制命令的发送次数大于等于 3 次时,说明该控制命令经由多个隐藏节点转发,此时控制网络的负载较大,系统会自动接入 CTS 控制方式对其进行控制,CTS 控制方式会对网络负载进行调节^[9]。而当检测到该通信节点对于同一控制命令的发送次数小于 3 次时,系统判定网络负载值较低,自动接入基础访问方式,通过判定信道的通信状态从而实现控制命令的发送与接收。通过上述对控制转换方式的调整,可以保证工业网络控制协议能够对网络的负载情况进行自适应调整,优化通信质量。

1.2 通信节点动态组网模式设计

在完成了通信协议的设计后,在通信协议控制下,对 TSN 工业实时控制网络节点的组网模式进行设计,实现通信网络拓扑结构的优化。笔者针对掘进机机械装备行业的 TSN 工业实时控制网络通信

性能需求以及网络结构特点,选取多节点组网的模式作为主要拓扑结构,通过对组网参数进行计算,构建出多节点组网模式^[10]。假设常规的 TSN 工业实时控制网络中包含 5 个通信节点,其中包括 4 个从属通信子节点以及 1 个网络调度节点,由此可以得到 TSN 工业实时控制网络的拓扑结构表达式:

$$G=(V, E); \quad (2)$$

$$V=\{N_{ode_1}, N_{ode_2}, N_{ode_3}, N_{ode_4}, N_{ode_5}\}; \quad (3)$$

$$E=\{\langle N_{ode_1}, N_{ode_2} \rangle, \dots, \langle N_{ode_4}, N_{ode_5} \rangle\}。 \quad (4)$$

式中: G 为有向图,即 TSN 工业实时控制网络的多节点组网拓扑结构; V 为网络结构中的通信节点; E 为通信数据的传输方向。在多节点组网拓扑结构中,通信节点之间会进行多次的控制命令传输操作,在传输过程中需要根据通信终端的地址锁定传输目标,因此需要对通信终端的通信地址进行检测^[11]。通信地址的检测需要在网络通信空闲状态下进行,因此通过计算网络通信空闲时间,可以得到通信终端地址的检测时长,具体计算如式(5)所示。

$$t_{idle} = \sum_{i=1}^n t_{space} + t_{free}。 \quad (5)$$

式中: t_{idle} 为多节点组网通信链路的空闲时间; t_{free} 为控制命令的任务空闲时间; t_{space} 为通信节点处理控制命令的间隙时间; n 为通信节点总个数。通过上述公式即可计算出通信链路的空闲时间,从而实现通信终端的地址检测,为多节点通信组网之间的数据传输提供帮助。当 TSN 工业实时控制网络系统完成初始化后,多节点组网首先会对通信终端地址进行检测,然后根据通信终端的地址集合对空闲地址进行筛选。当通信节点接收到目标终端节点所发送出的报文时,说明该目标终端节点的地址已经被占用,因此需要对下一个目标终端地址进行检验,直到得到最终空闲的通信地址。根据上述多节点动态组网的工作流程,构建出的多节点组网拓扑结构如图 3 所示^[12]。

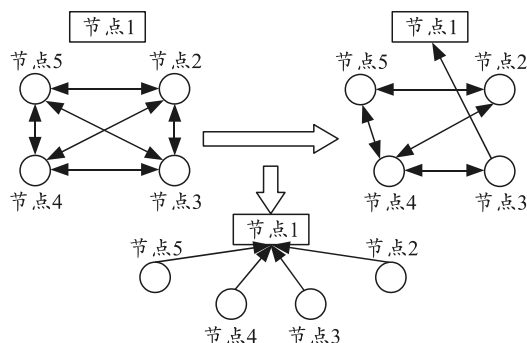


图 3 多节点组网拓扑结构

分析图 3 可知:左上的多节点组网模式 4 个从属通信子节点以及 1 个网络调度节点之间的联系不够密切,通信模式较为复杂,导致资源浪费情况严重。而右上的多节点组网模式较左上有了很大程度的改善,即从属通信子节点 4 能够与网络调度节点 1 建立连接,但是从属通信子节点之间的通信模式较为混乱,导致资源浪费。而最下方的多节点组网模式中所有从属通信子节点均能够与网络调度节点 1 建立连接,通信资源由网络调度节点 1 统一调度与分配,这样的优势在于能够保证通信效率与通信安全性。

通过上述步骤即可完成对于通信节点组网模式的设计,通过对通信终端的地址进行检测,明确通信节点之间的传输规则,构建多组网拓扑结构,为 TSN 工业实时控制网络通信传输提供良好的拓扑环境。

1.3 TSN 工业实时控制网络自适应通信流程设计

在完成了通信协议的设计以及通信组网模式构建后,笔者通过对通信流程进行设计,实现对 TSN 工业实时控制网络的通信控制。在掘进机械装备行业的 TSN 工业实时控制网络中,通信传输对象是以工业信息为主要参数的工业设备和终端。从工业信息的传输设备来说,TSN 工业实时控制网络通信过程中主要涉及工业信息发送方、工业控制网络通信节点和工业信息接收方^[13] 3 个主体。工业信息由发送方发起,经由网络通信节点进行转发,最终发送给数据接收方。笔者针对工业信息的 3 个周转过程,分别对其进行设计,最终将信息周转阶段进行组合,即可构成工业网络自适应通信流程。首先通信数据的发起流程如图 4 所示。

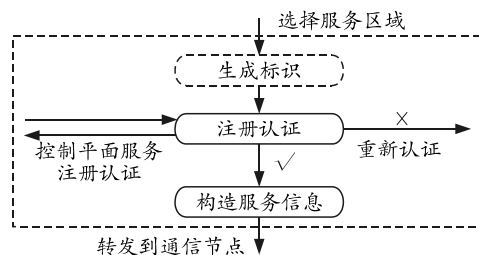


图 4 通信发起过程

通过上述通信数据发起流程可以看出:发送终端首先需要根据所发送的工业信息数据生成空间表示,然后发起服务注册,注册内容包括了信息的发送范围以及控制命令的类型,用于对通信传输内容进行规范。在多节点组网拓扑结构中,数据发送方可以是任意的设备终端,不同内容的通信传输数据

会分配给不同的设备终端进行传输^[14]。当数据发送方成功注册后，可以获得注册标识，即系统允许数据发送方在工业控制网络中进行通信，然后数据发送方可以将工业数据转发给通信节点。通信节点主要负责对工业信息数据进行匹配与转发，根据终端地址，将所接收到的工业信息数据匹配给不同的数据接收方，并实现通信转发，在转发过程中遵循通信协议，具体通信转发过程如图 5 所示。

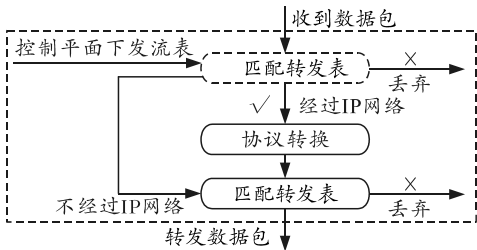


图 5 通信节点转发过程

通过上述通信节点转发过程可以看出：当数据包到达通信转发节点时，节点会根据匹配转发表中的标识对数据包进行判断，若标识匹配成功，则可以不经 IP 网络直接进行数据转发；若标识匹配失败，则需要对通信协议进行转换，将该数据包转发给匹配度更高的通信转发节点，进行二次转发，直到标识匹配成功，最终将数据包转发给目标终端。目标终端接收到数据包后，会对匹配的标识进行检验，待检验无误后，即可对数据内容进行显示，从而完成网络通信^[15]。

通过上述步骤，即可完成对于 TSN 工业实时控制网络通信流程的构建，通过分别对通信发起过程以及通信节点转发过程进行设计，实现工业信息数据的传输。将本节内容与上述设计完成的通信协议以及通信组网结构进行结合，至此，掘进机机械装备行业的 TSN 工业实时控制网络通信技术设计完成。

2 实验论证

2.1 实验说明

为验证笔者提出的 TSN 工业实时控制网络通信技术的有效性，本次实验选取基于轨迹预测和基于机器学习的 2 种常规 TSN 工业实时控制网络通信技术作为对比对象。通过构建实验平台，采用 3 种通信技术对同一组数据包进行传输，对比不同通信技术的实际通信效果。

2.2 实验准备

本次实验通过搭建实验拓扑结构，作为 3 种通

信技术的测试平台。该拓扑结构中包含 5 台 P4 软件交换机，用于实现工业信息的转发，其中 1 台软件交换机用于实现笔者的协议转换操作，数据发送端为计算机，用于接收工业信息；数据接收方为无线终端，用于对数据进行显示以及调用。实验设备的软硬件参数如表 1 所示。

表 1 实验设备参数配置

设备名称	软硬件名称	参数配置
4B Display Kit	操作系统	Paspberry Pi OS 1.10.7 32 bit
	CPU	BCM2711 64 位 4 核 1.5 GHz
	内存/G	8
	GPS 模块	HAT 多频 RTK 差分 GPS 模块
	操作系统	Ubuntu 18.04 LTS
服务器	CPU	Intel Xeon(R) CPU E3-1250 V5
	内存/G	8
	ONOS 控制器版本	2.5.1
	MySQL 数据库版本	7.6.21
	t_{idle}/s	0.25
1 300 M 11ac 双拼无线网卡	$R_{random\ back\ time}/s$	1.005
	网卡驱动	RT
		18812au_linux 驱动

根据上述实验参数，采用 Matlab 软件搭建出仿真实验环境。本次实验为了有效对比出不同通信技术的实际通信性能，选用了 3 种通信信道作为数据传输路径，3 种通信信道均加入了不同程度的干扰操作，以此模拟出工业控制网络通信过程中的波动性。同时，3 种通信信道分别模拟出了近距离通信、远距离通信以及标准距离通信下的通信信道环境，为了简化表述，距离通信信道、远距离通信信道以及标准距离通信信道分别用 A、B、C 表示。

对 3 种通信信道中发送的信号进行捕捉，由此得到信号波形如图 6-8 所示。

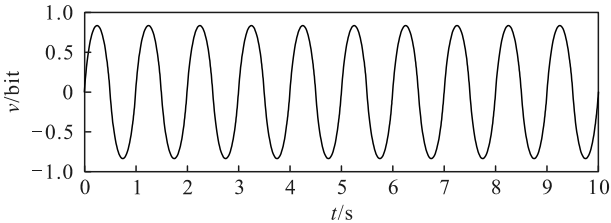


图 6 通信信道 A 的信号波形

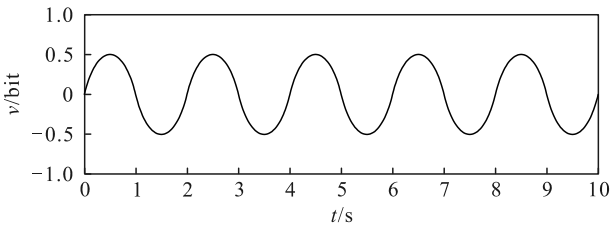


图 7 通信信道 B 的信号波形

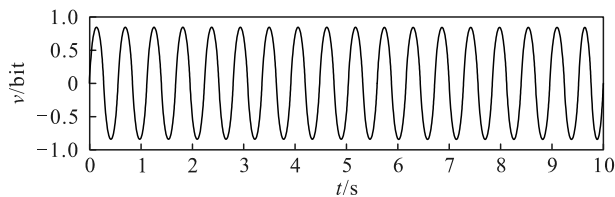


图 8 通信信道 C 的信号波形

针对上述 3 种不同干扰情况的通信信道, 设置 250 个需要进行传输的工业信息数据包, 每个数据包中均映射了超过 3 万条数据。

在实际测试时, 通过采用 3 种不同的通信技术对实验拓扑结构进行调整, 并采用不同通信转发协议对通信终端间的传输方式进行控制。计算数据包从到达数据接收方, 经过节点转换后所发出数据包所需要的时间, 该时间即为协议转换时间。在实际测试时, 随机选取 15 组数据作为测试展示数据, 对比不同干扰模式下, 3 种通信技术的实际通信效率。

2.3 通信效率对比结果

本次对比实验选取的对比指标为 TSN 工业实时控制网络通信技术的通信效率, 具体衡量指标为不同通信技术下的协议转换时延, 该值越低, 代表通信效率越高, 具体实验结果如图 9-11 所示。

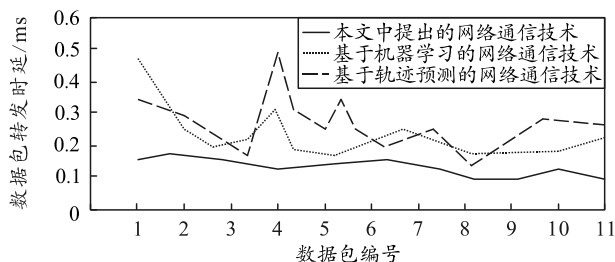


图 9 信道 A 的协议转换时延

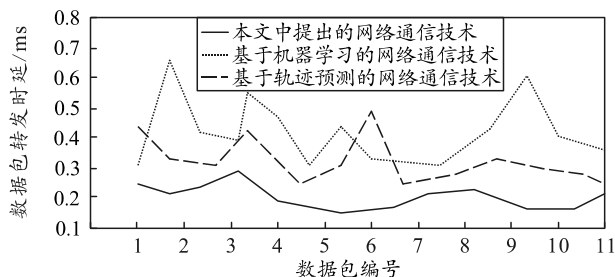


图 10 通信信道 B 的协议转换时延

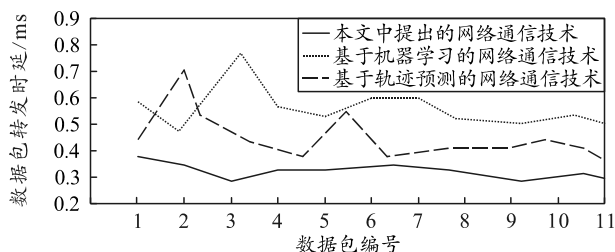


图 11 通信信道 C 的协议转换时延

根据上述实验结果可以看出, 在不同干扰程度下, 不同通信技术的通信效率也会受到干扰。通过观察协议转换时延波动曲线可以看出, 笔者提出的 TSN 工业实时控制网络通信技术的协议转换时延明显低于 2 种传统通信技术下的协议转换时延, 说明笔者提出的网络通信技术在通信效率上优于 2 种常规方法。

3 结束语

1) 笔者针对常规的 TSN 工业实时控制网络通信技术通信效率较低的问题, 通过对通信协议进行优化设计, 提出了一种新型的网络通信方法。

2) 实验结果表明, 采用提出的方法对 TSN 工业信息进行传输时的协议转换时延较低, 通信效率较高, 应用效果好。

3) 通过构建工业控制网络协议模型, 有效减少了协议转换时延, 能够有效提高网络通信效率。

4) 该技术处理能够应用至其他领域。TSN 技术提供了时间同步和低延迟的通信机制, 可以满足兵器工业对实时性的要求。通过使用 TSN 技术, 可以在工业网络中实现精确的数据传送和处理, 确保各个节点之间的数据同步和及时响应。

参考文献:

- [1] 张力影. 大数据时代计算机远程网络通信技术的革新[J]. 网络安全技术与应用, 2023(6): 20-22.
- [2] 颜光伟, 胡炜, 尚松超, 等. 一种基于协议的异步网络通信研究[J]. 中国科技信息, 2023(10): 82-85.
- [3] 周海东, 王三超. 数字签名技术在网络通信安全中的应用[J]. 集成电路应用, 2023, 40(3): 344-345.
- [4] 徐培培. 浅谈大数据时代计算机远程网络通信技术创新[J]. 数字技术与应用, 2023, 41(2): 137-139.
- [5] 黄式敏. 基于改进遗传算法的计算机网络通信数据加密方法[J]. 信息与电脑(理论版), 2023, 35(3): 102-104.
- [6] 张远, 冯楠. 基于 WinPcap 实现发射系统多节点网络通信仿真[J]. 舰船电子工程, 2023, 43(1): 87-90.
- [7] 魏凯明. 数据加密技术在计算机网络通信安全中的应用[J]. 中国新通信, 2022, 24(24): 1-3.
- [8] 束平, 唐晓东. 基于云计算技术的网络通信数据安全传输方法[J]. 长江信息通信, 2022, 35(11): 172-174.
- [9] 张颖莹. 基于数据加密技术的网络通信安全控制系统设计[J]. 信息与电脑(理论版), 2022, 34(17): 33-35.