

文章编号: 1671-251X(2024)S1-0065-05

时间敏感网络在煤矿的应用

魏春贤^{1,2,3,4}, 李涛⁵, 连昶锦^{1,2,3,4}

(1. 煤炭科学技术研究院有限公司, 北京 100013; 2. 煤炭智能开采与岩层控制全国重点实验室, 北京 100013; 3. 煤矿应急避险技术装备工程研究中心, 北京 100013; 4. 北京市煤矿安全工程技术研究中心, 北京 100013; 5. 中国电信股份有限公司 榆林分公司, 陕西 榆林 719000)

摘要: 时间敏感网络(TSN)技术引入了多点接入、多路径传输和冗余配置等功能,极大地提高了煤矿通信网络的可靠性,能够满足智能矿山多元化应用的差异化网络需求。介绍了 TSN 技术原理,详细分析了时间同步技术和数据调度技术,提出了基于 TSN+5G 的 PLC 远程实时控制方案,并结合已有矿用工业环网技术,构建了矿用 TSN 系统架构。TSN 在以太网的基础上引入了时钟同步、流量调度和网络配置等关键特性,可为时间确定性数据提供低时延、低抖动和低丢包率的传输服务,为无人矿卡、远程控制、高清视频传输、定位等场景提供可靠的数据传输网络。

关键词: 智能矿山; 时间敏感网络; TSN; 时间同步技术; 数据调度技术; 远程控制

中图分类号: TD655 文献标志码: A

The application of time sensitive network in coal mine

WEI Chunxian^{1,2,3,4}, LI Tao⁵, LIAN Changjin^{1,2,3,4}

(1. CCTEG China Coal Research Institute, Beijing 100013, China; 2. State Key Laboratory of Intelligent Coal Mining and Strata Control, Beijing 100013, China; 3. Engineering Research Center for Technology Equipment of Emergency Refuge in Coal Mine, Beijing 100013, China; 4. Beijing Engineering and Research Center of Mine Safe, Beijing 100013, China; 5. Yulin Branch, China Telecom Co., Ltd., Yulin 719000, China)

0 引言

煤矿特殊工作环境要求通信网络具备高可靠性和实时性^[1-2]。传统的煤矿通信网络主要采用现场总线和无线通信等单一技术手段,无法满足煤矿通信网络的全部需求^[3-4]。因此,寻找更可靠和高效的通信技术手段成为当务之急。时间敏感网络(Time Sensitive Network, TSN)技术引入了多点接入、多路径传输和冗余配置等功能^[5-8],极大地提高了煤矿通信网络的可靠性。TSN 技术提供了低延迟和低抖动的数据传输服务,可确保数据在确定的时间内准确传输到目的地,提高了矿井监测、生产调度等应用的实时性和准确性。

近年来,业内学者针对矿用 TSN 开展了深入研究。林佳烁等^[9]针对 TSN 流调度问题,提出一种基

于网络周期的在线流调度算法。基于网络周期将调度结果分散到各个网络周期中,以提高网络的可调度性,增加实时流的调度数量;根据每个网络周期的可调度空间,提出重合度指标及基于该指标的离线调度算法,使用禁忌搜索算法扩大可调度空间,有利于后续在线调度功能实现。黄韬等^[10]介绍了 TSN 的应用场景与需求,分析了 TSN 的发展趋势和核心问题。

目前,国内对 TSN 技术在煤矿的应用研究仍在探索阶段。由于引入 TSN 技术的成本相对较高,许多小型煤矿企业在短期内仍将采用传统通信技术。此外,国内煤矿行业的通信网络架构复杂,各种技术和设备的兼容性问题也是限制 TSN 技术推广的主要因素。本文针对矿用 TSN 系统,研究了 TSN 时间同步技术和数据调度技术,探讨了 TSN 在煤矿领

收稿日期: 2024-01-25; 责任编辑: 胡娟。

基金项目: 天地科技股份有限公司科技创新创业资金专项(2023-TD-ZD005-001, 2022-2-TD-ZD001, 2022-TD-ZD001); 煤炭科学技术研究院有限公司新产品新工艺开发项目(2023CG-ZB-01)。

作者简介: 魏春贤(1989—), 男, 河北张家口人, 助理工程师, 本科, 现主要从事煤矿通信技术方面的研究和应用工作, Email: weichunxian@ccrise.cn。

域的应用场景,形成了端到端 TSN 井下部署架构,可为智能矿山建设提供有力支撑。

1 TSN 技术

1.1 矿用工业环网

煤矿智能化是行业发展的必然趋势,煤矿智能化的演进路径同样是从机械化到自动化、信息化、智能化。煤矿智能化对万兆工业以太环网系统基础设施提出了新要求,需要通过超大带宽工业环网^[11]、Wifi6、5G 等^[12-16]新技术来实现数据传输,进而实现井下少人、无人的目标。矿用工业环网总体架构如图 1 所示。

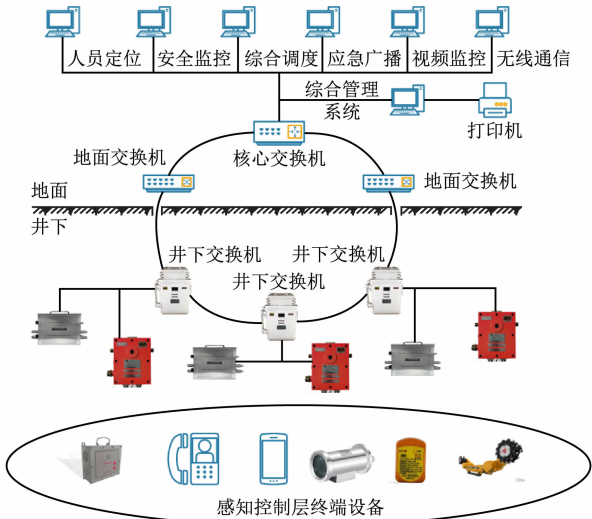


图 1 矿用工业环网总体架构

煤矿万兆工业以太环网系统+煤矿智能化综合管控平台基于微服务架构建设,具有数据采集、数据存储、数据清洗、信息模型库、机理模型库、算法编排、大数据分析等组件,可部署各类应用软件,支持集成管理现有及拟开发的各类子系统。通过标准数据模型及接口标准,为各子系统提供统一的权限管理、工作流、报警、日志、主数据、报表等基础功能。

1.2 时间同步技术

TSN 网络使用 IEEE802.1AS 协议进行时间同步。时间同步一般分为频率同步和相位同步^[17-18]。不同的组网环境需要不同的同步方式。频率同步也称为时钟同步,指 2 个信号的变化频率相同或保持固定比例,信号之间保持恒定相位差。相位同步是指信号之间的频率和相位都保持一致,即信号之间相位差恒定为零。相位同步的前提是频率同步,相位同步也称为时间同步。

基于最佳主时钟(Best Master Clock,BMC)算法确认最优时钟及时钟节点之间的主从关系,主时钟与从时钟之间通过交换 Sync 报文实现频率同步。主时钟周期性地向从时钟发送 Sync 报文,如果不考

虑链路延时变化,且从时钟的频率与主时钟同步,那么在相同的时间间隔内,主时钟和从时钟的累计时间偏差应该相同。

频率同步原理如图 2 所示,设 T'_n 为发送端发送第 n 帧的时刻, T_n 为接收端收到第 n 帧的时刻,则 $T_{n+1} - T_n = T'_{n+1} - T'_n$ 。如果时间偏差不同, $T_{n+1} - T_n > T'_{n+1} - T'_n$,说明从时钟的时间比主时钟慢,频率比主时钟快,则需要调慢从时钟的频率; $T_{n+1} - T_n < T'_{n+1} - T'_n$,说明从时钟的时间比主时钟快,频率比主时钟慢,则需要调快从时钟的频率。从时钟根据频率比调整本机时钟芯片的频率,频率比为 $(T_{n+1} - T_n) / (T'_{n+1} - T'_n)$ 。

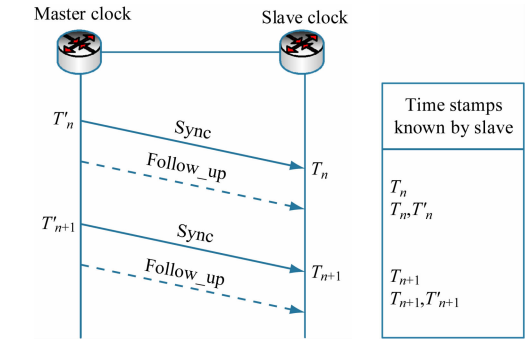


图 2 频率同步原理

确认最优时钟及时钟节点之间的主从关系后,主从时钟之间开始相位同步。主从时钟间周期性交互 PTP 报文,从时钟通过时间戳计算与主时钟当前时间的偏差,并根据时间偏差调整本地时间,使得本地时间和主时钟时间保持一致。相位同步原理如图 3 所示。

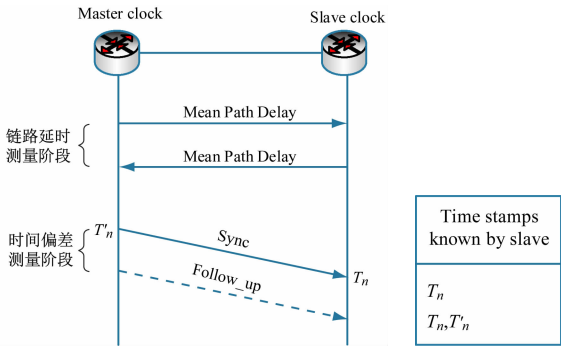


图 3 相位同步原理

从时钟本地准确时间的计算方法是用从时钟本地当前时间减去时间偏差。粗略计算,时间偏差 = $T_n - T'_n$ 。但实际上, $T_n - T'_n$ 中包含了报文在链路中的传输延时,为了提高时间同步精度,时间偏差的测量和计算过程包括以下 2 个阶段。

1) 链路延时测量阶段。该阶段用于确定主时钟与从时钟之间报文传输的延时。主从时钟之间交互同步报文并记录报文的收发时间,通过计算报文往返的时间差来计算主从时钟之间的往返总链路延

时。如果 2 个方向的链路延时相同(也称为网络对称),则往返总链路延时的一半就是单向链路延时。如果网络延时不对称且通过其他方式获知了报文发送方向与接收方向的链路延迟之差,可通过配置非对称延迟来校正链路延时,从而更精确地进行时间同步。

2) 时间偏差测量阶段。该阶段用于测量主时钟与从时钟之间的时间偏差。主时钟按周期向从时钟发送 Sync 报文,并记录发送时间 T'_n 。从时钟接收到 Sync 报文时记录当前时刻 T_n ,主从时钟的时间偏差 = $T_n - T'_n$ - 单向链路延时。

1.3 数据调度技术

数据调度是 TSN 网络实现确定性通信的核心。在 TSN 网络中不仅要保证时间确定性流的到达,还要保证时间确定性流的低延时传输^[19]。通过优化控制设备对时间确定性流、非时间确定性流的调度顺序来保证不同数据流的时间要求,这一过程称之为流量整形。TSN 网络中的数据调度就是流量整形的过程。

TSN 网络使用 IEEE802.1Qbv 协议,通过时间感知整形器(Time Aware Shaper, TAS)实现流量整形。整个数据调度过程分为如下 3 个部分。

1) 流特征映射队列。流特征是 IEEE802.1Qbv 用于区分关键业务流量的依据。IEEE802.1Qbv 支持使用报文中的源 MAC 地址、目的 MAC 地址、CoS 值和 VLAN ID 来匹配关键业务报文。指定的参数越多,匹配越精准。数据流进入 TSN 交换机后,设备根据流特征将 TSN 流、非 TSN 流映射到不同接口的队列中,然后通过 TAS 控制队列中的数据流。

2) 配置门控列表。每个接口有 1 张门控列表,1 张门控列表控制 8 个转发队列,如图 4 所示。门控列表是门操作的有序集合,每个门操作对应 1 个接口上 8 个转发队列的门状态和门状态持续时间。配置门控列表即指编排接口上的门操作编号、门状态和门状态持续时长。交换机支持接口出方向 8 个队列的 TAS,1 个调度周期内最多支持 16 个门操作,每个门操作的门状态持续时长最短为 8 ns,最长为 256 μ s。

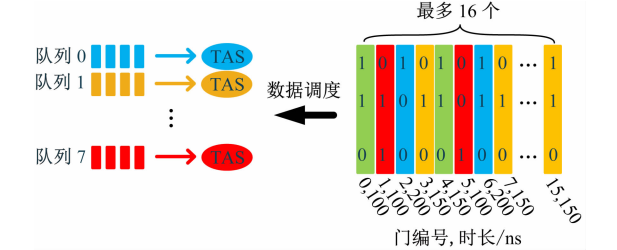


图 4 门控列表

3) 基于门控列表的数据调度。IEEE802.1Qbv

周期性地执行门控列表,按照门控列表中门操作编号从小到大的顺序依次执行门操作,完成接口队列中的数据流调度,实现 TSN 流的低延时传输。

2 TSN 应用场景

2.1 基于 TSN+5G 的 PLC 远程实时控制

PLC 被广泛应用在运动控制、数据处理、工业过程控制、开关量逻辑控制等场景,随着智能化需求的日益增长,传统 PLC 已不能满足工业智能化的需求,存在以下问题:① 协议不统一、开放性低^[20]。② 只能处理传感信号,不能处理视觉、语音等信号。③ 不支持 5G 等无线通信。

云化 PLC 具备软硬件分离、易扩展、处理性能强等优势,实现了工业控制从有线到无线、从本地到云端的转移。但工业控制类业务对时间要求极高(表 1),因此 PLC 的云化部署需要一个能够提供确定性转发能力的网络作为支撑,基于 TSN 和 5G 技术组成的确定性网络可满足需求。

表 1 工业控制类业务对时间要求

业务类型	可靠性指标/%	端到端时延要求	消息大小/byte
煤机控制	99.999~99.999 999	500 μ s~2 ms	20~50
巡检机器人	>99.999 9	1~50 ms	40~250
电液控系统	99.999 9~99.999 999	4~8 ms	40~250

基于 TSN+5G 的 PLC 远程实时控制方案如图 5 所示。将原先位于现场的 PLC 拉远至云端,通过 TSN、5G 网络连接至现场设备,共同完成产线的运动控制、工业过程控制等活动。在 TSN 网络中配置 IEEE802.1AS,使各个设备时间同步。以精确的时间同步为基础,在 TSN 交换机、UE/DS-TT、UPF/NW-TT 上配置基于时间的精确门控管理,实现 PLC 控制报文的低时延、低抖动转发。

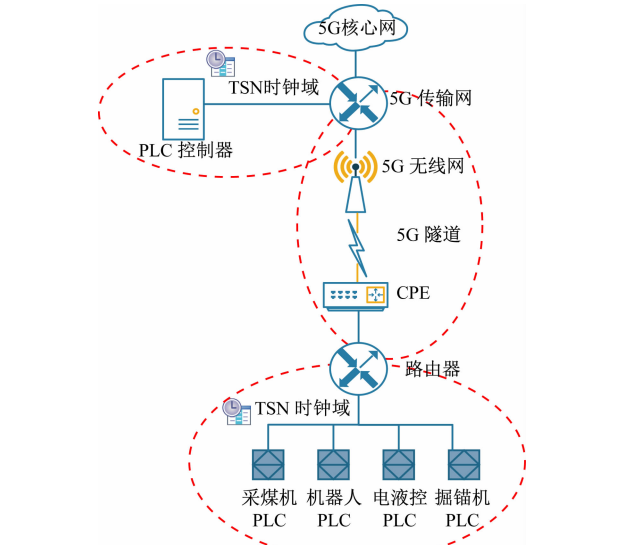


图 5 基于 TSN+5G 的 PLC 远程实时控制方案

该方案具备以下优势:

1) 将 TSN 与 5G 技术结合,可为 PLC 的集中、云化部署提供技术支撑,有利于业务的及时调整及 PLC 统一管理和维护。

2) 通过 CNC 对 TSN 交换机及 5G TSN 网桥进行自动化配置与管理,网络维护工作简单。

3) PLC 云化部署后,减少了对硬件的依赖,企业可灵活地选择供应商,允许用户更换或添加组件,且不影响系统的其他部分,轻松实现 PLC 的可扩展性和系统模块化。

2.2 基于 TSN 的远程控制场景

TSN 在以太网的基础上引入了时钟同步、流量调度和网络配置等关键特性,可为时间确定性数据提供低时延、低抖动和低丢包率的传输服务^[21]。基于 TSN 的远程控制总体方案如图 6 所示。在 RT1-1 与 RT1-2 之间建立 L2 VPN 链路 1,在 RT2-1 与 RT2-2 建立 L2 VPN 链路 2,这种在 TSN 网络下的冗余传输方案可提升数据传输的可靠性。井下和井上 TSN 网络分别执行数据的上传和下载,利用 TSN 特性可达到改善时延、抖动、变无序为有序等目的。

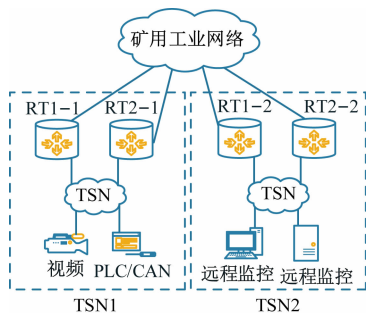


图 6 基于 TSN 的远程控制总体方案

视频流、PLC/CAN 的控制信息流通过不同端口进入 TSN 网关的交换模块,PLC/CAN 的控制信息流为时间确定性的数据流。时间确定性数据流和时间非敏感数据流在 TSN 网关处融合,TSN 进行数据转发时,可针对工业互联网不同优先级的业务数据进行队列调度,以保证差异化。在这种应用场景下,TSN 可针对各类工业应用涉及的业务流特性进行建模和定义,如视频流和 PLC 远程控制流,以提供相匹配的优先级与调度机制。

在无人矿卡场景中,远程控制信息对 TSN 网络下不同设备的同步提出了较高要求。结合 TSN 网络的时钟同步特性,可实现对无人矿卡的远程控制,降低因网络造成的信号传输时延的影响。

无人矿卡、远程控制、高清视频传输、定位等场景都可通过时分复用或频分复用机制实现不同优先级数据流的传输。TSN 网络虽然支持井上和井下

使用一张网,但考虑到井上、井下传输环境不同,在同属于一张网的情况下,根据信号的可靠性、时延等要求,对 2 种不同网络进行参数配置。TSN 网络通过帧复制和帧消除技术及增加冗余的方式保证井上、井下各类终端设备之间控制信息的可靠传输。

3 TSN 技术优势

高效率:TSN 可提供具有确定性和低延迟的数据传输,使得采煤机可更加高效地运行。通过精确的时间同步和流量控制,可确保数据在特定时间内传输到控制中心,以便及时作出决策。

安全性:TSN 可提供更安全的数据传输,因为具有优先级控制和确定性,可确保实时数据和时间确定性数据的优先传输,避免数据丢失或延迟传输导致的安全事故。

可扩展性:TSN 可根据不同应用场景和需求进行配置和扩展,具有很高的灵活性和可扩展性。这意味着在采煤机控制中可根据实际需求添加或减少功能,以满足特定的采煤需求。

兼容性:TSN 可与现有工业以太网兼容,使得采煤机可与现有控制系统无缝集成,降低改造成本。

可靠性:TSN 具有较高的可靠性和稳定性,可适应采煤机运行过程中的复杂环境和恶劣条件。

总之,TSN 在煤矿工业环网中的应用可促进设备之间的相互协作和信息共享,提高生产效率和质量,降低生产成本,推动煤炭工业智能化技术发展。

4 结语

介绍了 TSN 技术原理及其在煤矿中的应用场景和设计方案,TSN 利用时间同步技术和数据调度技术实现传输网的资源分配及业务隔离,从而在同一网络基础设施上构建多个按需定制的专用逻辑网络,满足不同类型业务系统的差异化需求。将 TSN 引入矿用工业环网,结合 5G 网络技术,可为工业 PLC 控制、无人矿卡、高清视频传输等技术的发展提供网络支持。

参考文献:

- [1] 孙继平. 煤矿智能化与矿用 5G 和网络硬切片技术[J]. 工矿自动化,2021,47(8):1-6.
- [2] 葛世荣,胡而已,李允旺. 煤矿机器人技术新进展及新方向[J]. 煤炭学报,2023,48(1):54-73.
- [3] 王晓军. 关于常见煤矿通信联络技术的研究[J]. 中国高新技术企业,2014(2):17-18.
- [4] 秦佳丽. 无线以太网技术在煤矿通信系统中的应用[J]. 中国高新科技,2021(5):129-130.

次性质,或存在大量细分的指标导致权重分配极为微小时,实施多级综合预警模型成为必要。这种多层次的预警方法建立在单一层次预警的框架之上,并采取类似的计算策略。在此体系中,来自第二层级的评价结果构建了第一层级评估所需的矩阵 K_1 。将第一层级评估中各个因素的权重系数 L 纳入考虑,并将其与综合关系度矩阵结合,以此生成最终的预警结果矩阵。

$$K=L\cdot K_1$$

(9)

4 结语

采用机器学习方法中的随机森林模型,结合煤层温度、特征气体含量、压力等关键监测指标,建立了基于随机森林模型的火灾预警模型。该模型不仅能够准确预测潜在的火灾风险,且在发现高风险情况时能够提供及时有效的预警。通过实验数据的验证,发现该模型具有较高的准确性和鲁棒性,能够在复杂煤层工作面环境中准确预测火灾风险,为煤矿安全提供了重要的技术支持。

参考文献:

[1] 王礼,王明远,闫红波,等.“三软”煤层采动覆岩下沉模式及机理研究[J].煤炭技术,2023,42(8):28-31.

[2] 邹栓营,张贵平,侯跃峰.大倾角“三软”煤层综放工作面覆岩运动规律研究[J].能源技术与管理,2022,47(4):68-70.

[5] 李红艳,张焘,张靖乾,.基于时变图的天地一体化网络时间确定性路由算法与协议[J].通信学报,2020,41(10):116-129.

[6] 李劲.分布式多点接入IP电话信息系统[D].武汉:武汉大学,2004.

[7] 许勇,倪宏,朱小勇.信息中心网络多路径传输技术研究综述[J].网络新媒体技术,2023,12(6):1-9,20.

[8] 宋宇鑫.时间确定性网络调度算法设计[D].西安:西安电子科技大学,2020.

[9] 林佳烁,王涛,王卓薇,等.TSN网络下基于网络周期的流调度方法[J].计算机工程与设计,2023,44(11):214-3221.

[10] 黄韬,汪硕,玉栋,等.确定性网络研究综述[J].通信学报,2019,40(6):160-176.

[11] 史召.5G业务环境下的传输网络优化方案[J].数字通信世界,2019(4):80,195.

[12] 白雪峰,舒晓军.煤矿井下无线通信技术演进[J].矿自动化,2023,49(7):14-18.

[13] 李晨鑫.基于5G的矿用装备远程控制技术研究[J].

[3] 撒书一.三软煤层沿空留巷巷道围岩变形控制研究[J].山东煤炭科技,2022,40(5):72-74,77.

[4] 成龙,刘保菊.火灾预警系统的设计与实现[J].工业控制计算机,2023,36(3):144-146.

[5] 龙兴林,俞鉴锋,刘学勇,等.一种新型电气火灾预警系统研究[J].自动化应用,2023,64(3):128-130,133.

[6] CUI Feng, ZHANG Tinghui, CHENG Xiaoqiang. Research on control of rib spalling disaster in the three-soft coal seam[J]. Shock and Vibration, 2021, 2021(11):1-15.

[7] LI Pu, ZHANG Xiaodong, LI Hui. Technology of coupled permeability enhancement of hydraulic punching and deep-hole per-splitting blasting in a ‘three-soft’ coal mine [J]. Materiali in Tehnologije, 2021,55(1):89-96.

[8] ZHANG Qi, LIU Qinzhi, LOU Yahui. Deviation principles of gas drainage drilling in three-soft outburst coal seams[J]. Geotechnical & Geological Engineering,2022,40(6):3147-3168.

[9] QIU Dandan, WU Yanling, LI Li. Evaluation of the gas drainage effect in deep loose coal seams based on the cloud model[J]. Sustainability,2022,14(19).

[10] ZHANG Bingchen, BAI Long, CHEN Xiaohong. Research on the design of fire alarm and pretreatment robot system [J]. Journal of Physics: Conference Series,2021,1865.

工矿自动化,2023,49(9):90-97.

[14] 姜琳,孙超,付恩三.基于云计算的矿用设备监察管理系统设计[J].中国煤炭,2021,47(3):87-95.

[15] 杨传印.基于煤矿视频AI识别技术应用研究[J].山东煤炭科技,2022,40(1):181-183,186.

[16] 胡燕儒.浅析5GV2X通信应用现状及其侧链路标识符更新技术[J].中国设备工程,2023(16):101-102.

[17] 朱海龙,严园园,张华宇.基于驻留时间补偿的5G-TSN系统高精度时间同步方法[J].北京邮电大学学报,2023,46(6):89-94.

[18] 吴振毅.TSN网络技术在采掘装备电控系统中的应用[J].电子技术,2023,52(8):384-385.

[19] 周飞飞,何迎利,程程,等.一种基于TSN特性的以太网组网在智能变电站中的设计方案[J].电力信息与通信技术,2021,19(10):100-106.

[20] 杨利彬,陈少波,郑志丹.分布式电梯监控系统设计[J].信息技术,2009(7):184-186.

[21] 徐晓麟.间敏感网络技术及其在工业互联网中的应用[J].电信网技术,2018(5):1-5.