

# 基于时间敏感技术的异构工业物联网确定性传输方法

张晓玲<sup>1</sup>, 杨亮<sup>1</sup>, 姚菊梅<sup>1</sup>, 杜松远<sup>1</sup>, 于洪霞<sup>1</sup>, 黄易<sup>1,2</sup>

1. 沈阳工业大学人工智能学院, 辽宁 沈阳 110870;

2. 北京东土科技股份有限公司, 北京 100043

基金项目: 国家重点研发计划(2022YFE0114200); 辽宁省应用基础研究计划(2022JH2/101300246)

通信作者: 张晓玲, zhangxiaoling@sut.edu.cn 收稿/录用/修回: 2024-01-09/2024-03-05/2024-04-08

## 摘要

针对智能工厂中异构工业物联网共存下制造、管理等时间敏感数据的精确同步以及可靠传输需求, 提出一种异构工业物联网时间敏感“一网到底”组网架构以及传输方法。采用自主研发的新一代国际工业现场总线 AUTBUS 智能网络系统, 基于“中央网关+边缘控制器”的架构实时汇聚智能工厂中的所有数据, 采用总线虚拟化技术统一发送给时间敏感交换设备进行整流和门控调度。系统测试结果表明, 基于搭载时间敏感技术的 AUTBUS 设备所组成的异构工业物联网架构, 可以保障异构多网共存下的时间敏感数据的确定性传输, 并且具有较好的实时性和可靠性。

## 关键词

时间敏感技术  
异构工业物联网  
多网共存  
AUTBUS  
确定性传输  
中图法分类号: TP391  
文献标志码: A

## A Deterministic Transmission Method for Heterogeneous Industrial IoT Based on Time Sensitive Technology

ZHANG Xiaoling<sup>1</sup>, YANG Liang<sup>1</sup>, YAO Jumei<sup>1</sup>, DU Songyuan<sup>1</sup>, YU Hongxia<sup>1</sup>, HUANG Yi<sup>1,2</sup>

1. School of Artificial Intelligence, Shenyang University of Technology, Shenyang 110870, China;

2. Beijing Kyland Technology Co., Ltd., Beijing 100043, China

## Abstract

Aiming at the precise synchronization and reliable transmission requirements of time sensitive manufacturing and management data under the coexistence of heterogeneous industrial Internet of Thing (IoT) in intelligent factories, a heterogeneous industrial IoT time sensitive “One-to-Bottom” networking architecture and transmission method is proposed. Adopting the self-developed new generation international industrial fieldbus AUTBUS intelligent network system and based on the architecture of “central gateway + edge controller”, all data in the intelligent factory is gathered in real-time, and bus virtualization technology is used to uniformly send it to time sensitive switching devices for rectification and gate control scheduling. The system testing results show that the heterogeneous industrial IoT architecture composed of AUTBUS devices equipped with time sensitive technology can ensure the deterministic transmission of time sensitive data under the coexistence of heterogeneous multiple networks, and has a good real-time performance and reliability.

## Keywords

time sensitive technology  
(TST);  
heterogeneous industrial  
Internet of Thing;  
coexistence of multiple  
networks;  
AUTBUS;  
deterministic transmission

## 0 引言

随着网络技术的飞速发展和计算机技术的信息化和智能化,人们对制造系统和计算设备的需求已不仅仅局限于系统功能的扩充,而是更关注于系统资源的合理有效分配和系统性能/效能的优化以及服务个性化与用户满意度的提升。在这种需求的引导下,信息物理系统(cyber-physical system, CPS)<sup>[1]</sup>作为一种新型智能系统应运而生,并引起了各国政府、学术界和商业界的高度重视。CPS的定义为通过集成先进的感知、计算、通信、控制等信息技术和自动控制技术,构建物理空间与信息空间中人、机、物、环境、信息等相互映射、适时交互、高效协同的复杂系统,实现系统内资源配置和运行的按需响应、快速迭代、动态优化<sup>[2]</sup>。目前,CPS已经引起了国内外学者和研究机构的广泛关注乃至国家层面的重视<sup>[3]</sup>。工业物联网作为CPS在工业领域应用的支撑性基础设施,需要综合考虑“网络+控制”的双向融合需求。随着制造业数字化转型,智能工厂生产现场的设备数量庞大,生产过程中各类设备之间的数据传输主要依赖工业总线技术配置智能物联网设备(传感器、执行器、智能终端等)以及智能控制器(例如边缘控制器、工业服务器等),进而实现对生产运行状态的全面实时感知和优化控制<sup>[4-5]</sup>。到目前为止,全球约有40余种工业总线,包括工业以太网<sup>[6-7]</sup>以及PROFINET、AUTBUS等工业现场总线<sup>[8]</sup>等。各类工业总线技术互补发展、各尽所长,向网络一体化和应用综合化发展。存在的典型问题包括:1)新兴工业场景多、对象多、差异性大,传统数据采集技术能力受限、响应不及时、功能固化,工业数据采集的准确、快速、自适应难题亟需解决。2)工业现场环境复杂,存在遮挡、强电场和强磁场干扰、网络难以架设等复杂状况,亟需解决贫瘠、不稳定的网络资源下采样数据的高可靠、高实时传输难题。3)多维信息由分散、各异的装置采集,导致时间不一致、数据格式不统一、多种模态共存,例如,生产过程数据传输要求的多点低成本网络、质量检测等环节视频/图像传输要求的大带宽快速传输网络等。然而,不同网络之间不仅网络协议不同,其时间同步机制、时间同步精度也不同,因此需要合理设计一种传输架构确保各类异构工业物联网的确定性和传输数据的实时可靠。

为了保障异构工业物联网中所有数据可以满足

工业领域的高实时性、高可靠性以及确定性的要求,结合时间敏感技术和多网共存下的工业物联网互联互通方法目前是新的研究热点和难点<sup>[9]</sup>。现有研究成果以多类工业物联网系统集成并汇聚到时间敏感交换机进行透传为主。龚海杰等<sup>[10]</sup>对如何搭建TSN(时间敏感网络)和CAN(控制器局域网)组成的异构网络提出了一套完整解决方案。王忠诚等<sup>[11]</sup>提出一种Modbus TCP适配时间敏感的系统架构,并对不同的Modbus TCP数据类型进行分类以适配时间敏感网络,通过时间敏感网络的调度机制提高Modbus TCP网络的实时性。缪京霖等<sup>[12]</sup>以工厂网络架构为背景,设计了一种EtherCAT(Ethernet for Control Automation Technology)与TSN网络互通的实现方法,借助TSN的时钟同步机制,将EtherCAT总线网络域分布式时钟与TSN网络域进行时钟同步,并以此为基础实现EtherCAT总线和多总线间的QoS(服务质量)调度策略、隔离,最终实现EtherCAT和TSN的融合。Open Group<sup>[13]</sup>定义了一种融合异构工业物联网的开放敏捷组网新架构,但是并没有具体地实现它,该架构处于设计阶段。综上所述,现有研究主要面向单一工业物联网与TSN<sup>[14]</sup>的融合架构,尚未开展针对多类异构工业物联网时间敏感接入的架构和方法研究。

针对现有研究成果尚未解决异构工业物联网数据的一致确定性问题以及控制数据与视频/图片等大数据无法实现同步融合传输的问题,笔者团队自主研发了一种基于时间敏感技术的宽带工业总线规范AUTBUS系统架构与通信规范<sup>[15]</sup>(IEC 61158 Type 28/IEC 61784 CPF 22 Time-sensitive Technology Based Broadband Industrial Fieldbus Specification AUTBUS-System Architecture and Communication Specification)(简称AUTBUS),获得了德国、意大利、日本和韩国等多个国家技术专家们的支持,并于2021年10月22日以100%的赞成率通过了CDV(委员会投票草案)投票,成为正式国际标准并开始实施。AUTBUS是目前全球唯一基于时间敏感技术可承载IPv6以太网数据业务的两线制宽带总线国际标准,是我国自2008年以来唯一在IEC 61158工业通信网络标准体系中成功立项的国际标准。AUTBUS标准突破了新的物理层技术,实现了工业控制领域“最后一公里”的宽带超高速接入。AUTBUS标准定义的技术体系,一方面可解决现有工业现场通信领域多协议共存的互联互通和互操作问题,另一方面可实现控制数据与视频/图片等大

数据的同步融合宽带同网传输，符合全球网络技术架构向时间敏感化、集约化、宽带化发展的方向。AUTBUS 标准技术可为解决全球工业网络通信瓶颈提供最优解决方案，在满足传统工业控制应用场景的前提下，拓展智能化的新应用场景，为全球工业控制现场网络统一提供了中国自主解决方案。

现有工厂中的各类工业现场总线的优缺点始终存在，对于多网共存下的时间敏感接入、数据传输方式提出了更高的要求，其不同网络之间的组网架构主要目标在于如何传输数据从而实现统一的时间敏感接入，从而显得尤为重要。本文以 AUTBUS 为组网框架，在数据时效性要求差异较大的应用场景下，针对制造中“自动控制-生产管理-决策-优化”等功能要求各异的问题，对于数据的时效性要求差异较大的应用场景，将异构工业物联网时间敏感互联互通的传输方法进行了优化改进。

### 1 异构工业物联网时间敏感“一网到底”整体架构

#### 1.1 AUTBUS 技术原理

当前工业物联网的通信速率以低速为主。例如，HART 协议的通信速率是 1.2 kbps；FF H1 总线和 PROFIBUS PA 协议的通信速率是 31.25 kbps；Modbus RTU 和 PROFIBUS DP 协议的物理层是 RS-

485，其通信速率不会超过 12 Mbps。AUTBUS 是一种超高速的工业通信网络技术，其数据带宽达到 100 Mbps，最大传输距离为 500 m，最小循环周期为 8 ms，最大节点数为 256 个。

AUTBUS 用于过程控制和离散控制等自动化控制工业现场的实时数据和非实时数据的传输与应用，兼容 ISO/IEC/IEEE 802.3 以太网、IPv6 等应用。其物理信号传输基于正交频分复用技术 (orthogonal frequency division multiplexing, OFDM)<sup>[16]</sup>。AUTBUS 采用总线式组网，通过系统预配置或动态申请的方式，提供固定带宽数据服务和支持突发数据的可变带宽数据服务；针对周期性采样数据，突发性的控制、告警以及 ISO/IEC/IEEE 8802-3 以太网格式的 IPv4/IPv6 数据均能提供可靠和确定性的承载。此外，AUTBUS 具有高精度时钟同步的功能，它基于时间触发对时间敏感性和非时间敏感性业务提供了确定性的数据传输服务<sup>[17]</sup>。

#### 1.2 AUTBUS 网络架构

AUTBUS 支持线形总线(如图 1 所示)和环形总线(如图 2 所示)网络拓扑结构。根据 AUTBUS 网络设备在网络运行中承担的角色进行分类，包括控制设备和现场设备。全网中有且仅有一个控制设备，而现场设备可以是成套装备、控制器、传感器、执行器、摄像头、手持等设备。

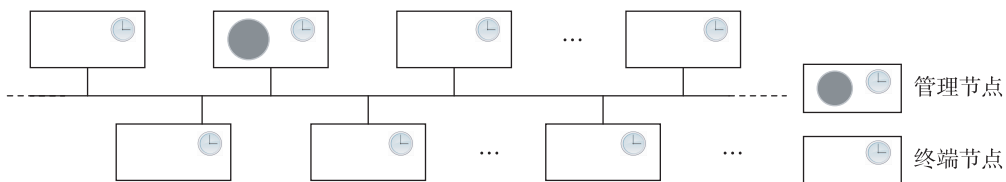


图 1 AUTBUS 线形总线网络拓扑  
Fig.1 AUTBUS linear bus network topology

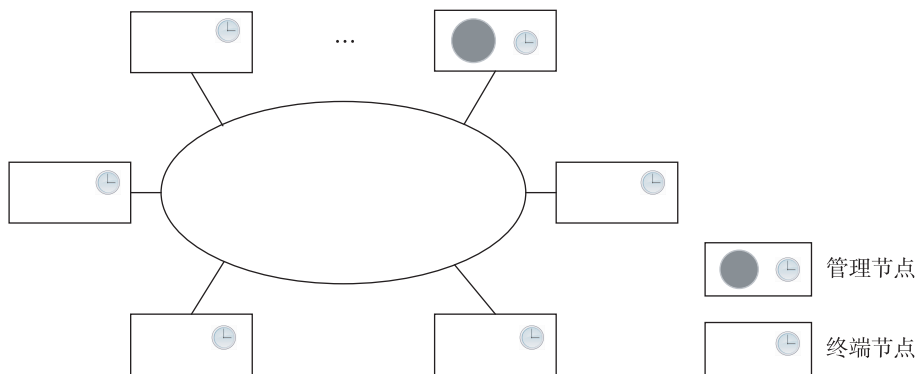


图 2 AUTBUS 环形总线网络拓扑  
Fig.2 AUTBUS ring bus network topology

在每一类 AUTBUS 网络设备中, 定义了 AUTBUS 物理层、数据链路层和应用层。

1) AUTBUS 物理层主要提供系统管理用户灵活组态需求的系统管理服务接口。AUTBUS 物理层基于 OFDM 技术, 采用两线介质传输, 支持全双工传输方式, 通过 RS(Reed-Solomon)码、卷积码和交织技术实现物理信号的编解码, 利用时域及频域上分配的通信资源来提供高可靠同步传输服务。

2) AUTBUS 数据链路层可以向用户提供时钟同步、数据传输和系统管理服务, 可以承载现有工厂中大量使用的基于 GB/T 15629.3 的工业以太网数据传输。

3) AUTBUS 应用层定义满足工业自动化应用需求的通信模型, 提供实时过程数据、实时非周期

报警数据、非实时数据传输服务, 以及应用层时间同步、网络配置、诊断和日志功能; 同时提供总线虚拟化功能, 实现 AUTBUS 总线网络与其他异构总线网络的融合。

### 1.3 基于 AUTBUS 的“一网到底”架构

基于 AUTBUS 实现异构工业物联网时间敏感融合的架构包括 3 层, 如图 3 所示。

1) 现场层。AUTBUS 现场设备实时汇聚由工业现场 DCS/PLC (分布式控制系统/可编程逻辑控制器)、成套设备、智能感知装置等实时采集由智能仪表、传感器执行设备、摄像头或者无线设备等所产生的周期性和非周期性数据, 以及 DCS/PLC 或者智能感知装置自身所产生的数据; 将所有汇聚数据打包后通过 AUTBUS 总线发送给 TSN 交换设备。

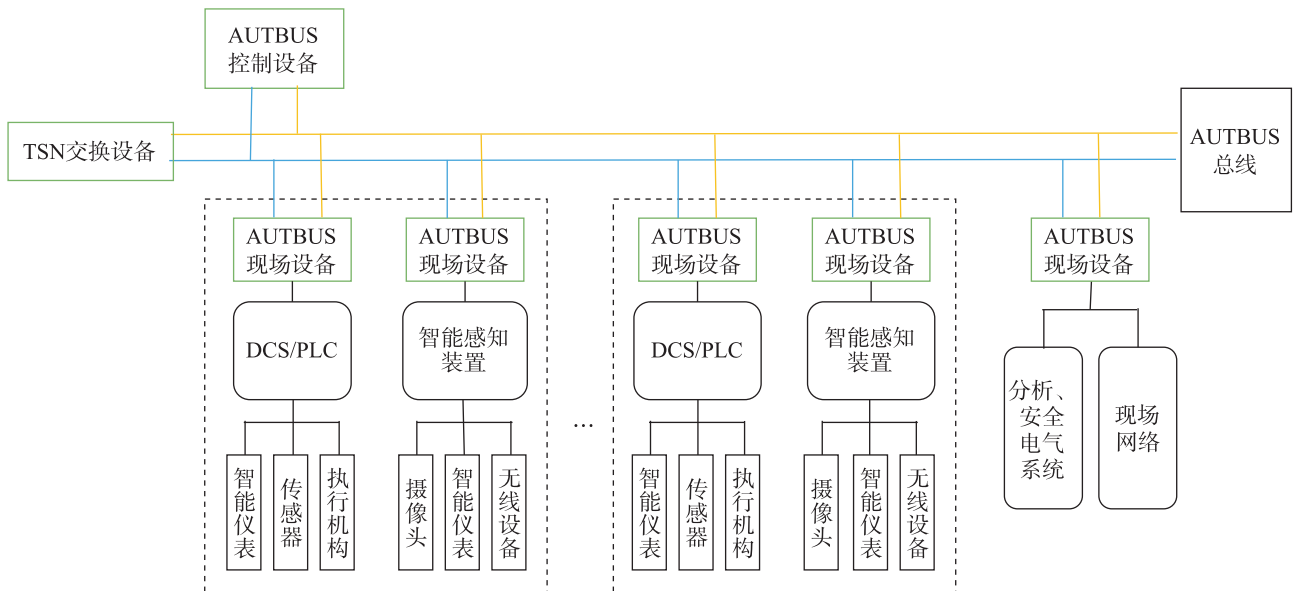


图 3 基于 AUTBUS 的“一网到底”架构

Fig.3 “One-to-Bottom” architecture based on AUTBUS

2) 时间敏感交换层。时间敏感交换设备(即 TSN 交换设备)接收来自 AUTBUS 现场设备的各类异构数据, 对所有数据按照周期特性进行整流和调度后, 通过 AUTBUS 总线在采样周期时间内确定性发送给 AUTBUS 控制设备进行应用层面的处理; AUTBUS 控制设备将计算后的数据通过 TSN 交换设备实时转发给各类 AUTBUS 现场设备, 执行控制功能。

3) 网络管理层。AUTBUS 控制设备作为全网的网络管理者, 对 AUTBUS 网络的的吞吐量、错包数量、信噪比等网络通信质量进行统计评估, 并实时调整带宽等网络参数, 保障数据传输的实时性和可靠性。

## 2 异构工业物联网时间敏感数据确定性传输方法

### 2.1 AUTBUS 网络资源虚拟化分配

AUTBUS 的应用层将总线带宽虚拟化, 实现 AUTBUS 总线与其他异构工业物联网的融合传输。

AUTBUS 物理层信号的基本单元是信号帧(SF), 每个信号帧由 64 个 OFDM 符号组成。每个 OFDM 符号在频域子载波上平均划分为上边带和下边带, 如图 4 所示。其中, 上边带为高频子载波, 其频率范围为 16.896 ~ 32.256 MHz; 下边带为低频子载波, 其频率范围为 1.536 ~ 16.896 MHz。

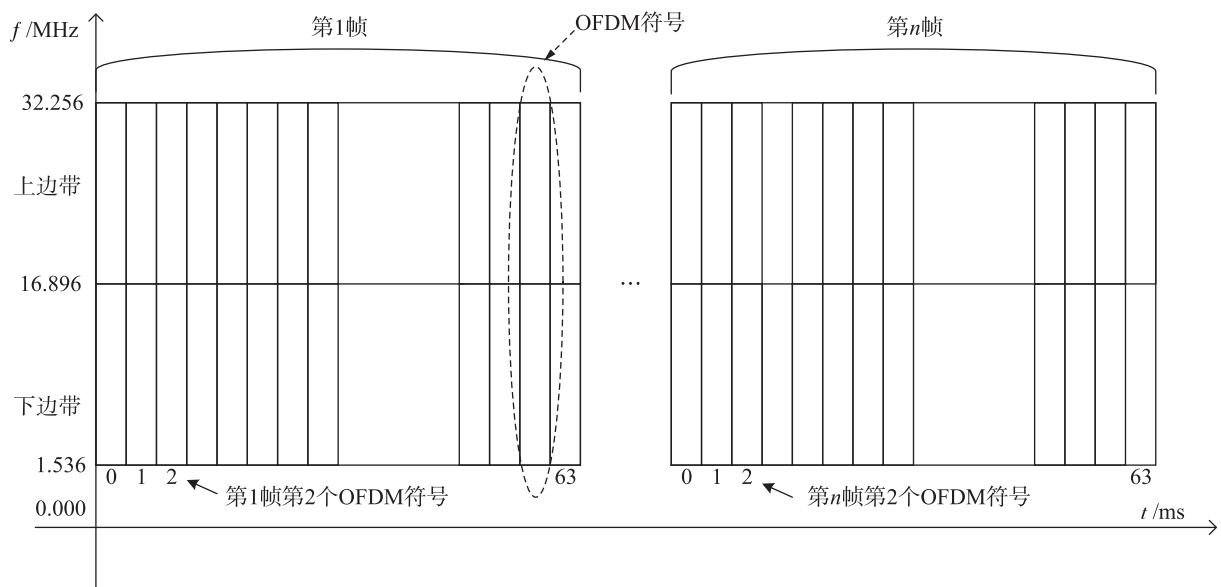


图4 AUTBUS 信号帧结构及 OFDM 符号分布

Fig.4 AUTBUS signal frame structure and OFDM symbol distribution

在 AUTBUS 分配网络资源时, 上边带、下边带可以同时分配给不同的 AUTBUS 网络设备(包括控制设备和现场设备)。如表 1 所示, AUTBUS 物理层在频域上提供 4 种发送模式, 频域宽度为 30.72 MHz, 每个信号帧的 OFDM 符号为 64。AUTBUS 总线的采样间隔最小值可设定为 10.17 ns, 在不同的发送模式中采样间隔都为固定值。用户可以根据实际应用环境的信噪比条件选择不同的发送模式。

表 1 AUTBUS 物理层发送模式参数设置

Tab.1 Parameter settings of AUTBUS physical layer transmission mode

参数	发送模式			
	0	1	2	3
频域范围 /MHz	1.536 ~ 32.256			
下边带频域范围 /MHz	1.536 ~ 16.896			
上边带频域范围 /MHz	16.896 ~ 32.256			
系统带宽 /MHz	30.72			
子载波间隔 $B$ /kHz	24	48	96	192
子载波数 $N$	1280	640	320	160
快速傅里叶点数	4096	2048	1024	512
子载波调制策略	16QAM、64QAM、256QAM			
有效符号长度 /us	41.667	20.833	10.417	5.208
循环前缀长度 /us	20.833	10.417	5.208	2.604
符号长度 /us	62.5	31.25	15.625	7.8125
符号间隔 /ns	10.17	10.17	10.17	10.17
帧传输时长 /ms	4.0	2.0	1.0	0.5
每帧符号数	64	64	64	64
每个符号有效通道数	1 或者 2 1 或者 2 1 或者 2 1 或者 2			

对于短距离实时控制的应用场合, 实时性和确定性的要求较高, 则 AUTBUS 设置较长的子载波间隔; 对于长距离控制的应用场合, 确定性的要求较高而实时性的要求较低, 则 AUTBUS 设置较短的子载波间隔。用户可根据实际应用环境的信噪比条件选择不同的发送模式。

在 AUTBUS 中每个信号帧的传输信号被定义为  $N_{SD}$  个子载波和  $N_{SYM}$  个 OFDM 符号的资源网格, 其中参数  $N_{SD}$  由发送模式决定,  $N_{SYM}$  为 64。AUTBUS 资源网格结构如图 5 所示, 资源网格中的每个元素称为  $l$  个资源元素, 每个资源元素由  $(k, l)$  定义频域和时域, 其中  $k=0, \dots, N_{SD}-1$  和  $l=0, \dots, N_{SYM}-1$ 。资源元素  $(k, l)$  对应复数值  $a_{j,l}$ 。如果资源元素  $(k, l)$  没有物理信号传输, 则  $a_{j,l}$  被置为 0。

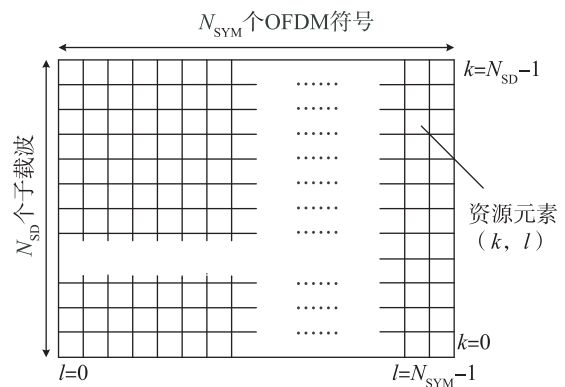


图 5 AUTBUS 资源网格

Fig.5 AUTBUS resource grid

### 2.2 时间敏感确定性接入

异构工业物联网中的业务数据一般包括多周期性数据、突发数据以及视频/管理类非周期性数据。对于多周期性数据要求在采样周期内能够被控制器进行及时处理并且给出反馈; 突发数据一般包括紧急告警类数据, 这种数据对实时性和可靠性的要求较高; 对于非周期性的视频/管理类, 其数据量较大, 对确定性、实时性和可靠性的要求较低。随着智能工厂的发展, 现有制造过程中往往要求多周期性数据与视频等非周期性数据严格时间同步传输, 在风险越来越高的网络中实现安全传输, 保障安全制造过程。因此, 一方面要求严格的全网时间同步, 满足智能工厂中的协同制造功能; 另一方面要求多周期性数据与非周期性大数据同网同步传输, 保障数据的真实性。上述网络化协同制造的过程需要通过时间敏感确定性接入机制进行保障。

#### 2.2.1 基于延时测量的全网时间同步

时间同步是为了保证整个网络中的所有设备的时间保持精确同步。通过对本地时钟的操作, 实现网络统一的时间基准, 可以控制不同设备同步执行操作。AUTBUS 物理层的 OFDM 通信技术, 可实现精准的频率同步, 其数据链路层实现精准的相位同步, 从而在频率和相位上保证整个网络的时钟同步。

在 AUTBUS 设备所构建的网络中, 以 AUTBUS

控制设备的时钟和频率信息为基准, 所有 AUTBUS 现场设备的时钟和频率信息都应 与 AUTBUS 控制设备进行同步处理。当 AUTBUS 现场设备发起时钟同步服务请求时, AUTBUS 控制设备将当前信号帧起始的时钟信息发送至远端 AUTBUS 现场设备。AUTBUS 现场设备将根据本地保存的与 AUTBUS 控制设备之间的延时信息以及时钟偏差值更新本地的时钟信息, 即可完成与 AUTBUS 控制设备的时钟同步处理。AUTBUS 控制设备应发起时钟同步服务, 将当前信号帧起始的时钟信息发送给对应 AUTBUS 现场设备, 要求其同步本地时钟。

延时测量服务实现管理节点与终端节点之间的传输延迟的测量, 如图 6 所示。在 AUTBUS 总线初始化完毕后, AUTBUS 控制设备和 AUTBUS 现场设备之间只存在时钟偏差和传输时延信息。AUTBUS 控制设备发送广播延时测量服务请求 DLCE-Measurement.req, 各 AUTBUS 现场设备通过 DLCE-Measurement.rsp 应答服务来更新当前延迟信息, DLCE-Measurement.cnf 以及 DLCE-Measurement.ind 用于指示收发双发数据是否发送或者接收成功。在 AUTBUS 现场设备申请延时测量服务时, AUTBUS 控制设备将存储的相关信息发送给对应的 AUTBUS 现场设备。

延时测量过程如图 6 所示。

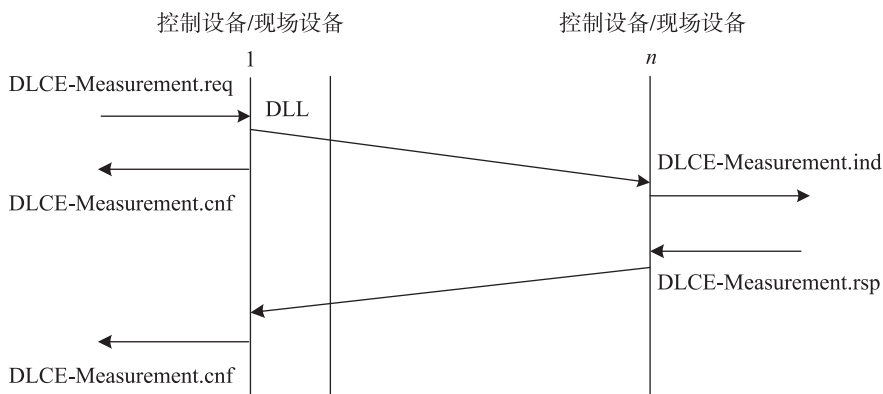


图 6 延时测量过程

Fig.6 Time delay measurement procedure

#### 2.2.2 时间敏感配置

时间敏感配置是实现确定性接入的关键, 针对网络资源管理和用户配置<sup>[18-19]</sup>, AUTBUS 网络模型应用完全集中式模型, 包括集中式用户配置模型以及集中式网络配置模型, 如图 7 所示。

图 7 中, 终端节点分为发送节点和接收节点, 在终端节点和对应连接的交换节点之间建立用户网

络接口 (User Network Interface, UNI); 集中式用户配置模型 (Centralized User Configuration, CUC) 的主要功能是负责发现网络拓扑; 集中网络配置 (Centralized Network Configuration, CNC) 的主要功能是实时收集通信需求。

在完全集中式模型中, AUTBUS 现场设备向 CUC 发送通信请求, CUC 代表 AUTBUS 现场设备向

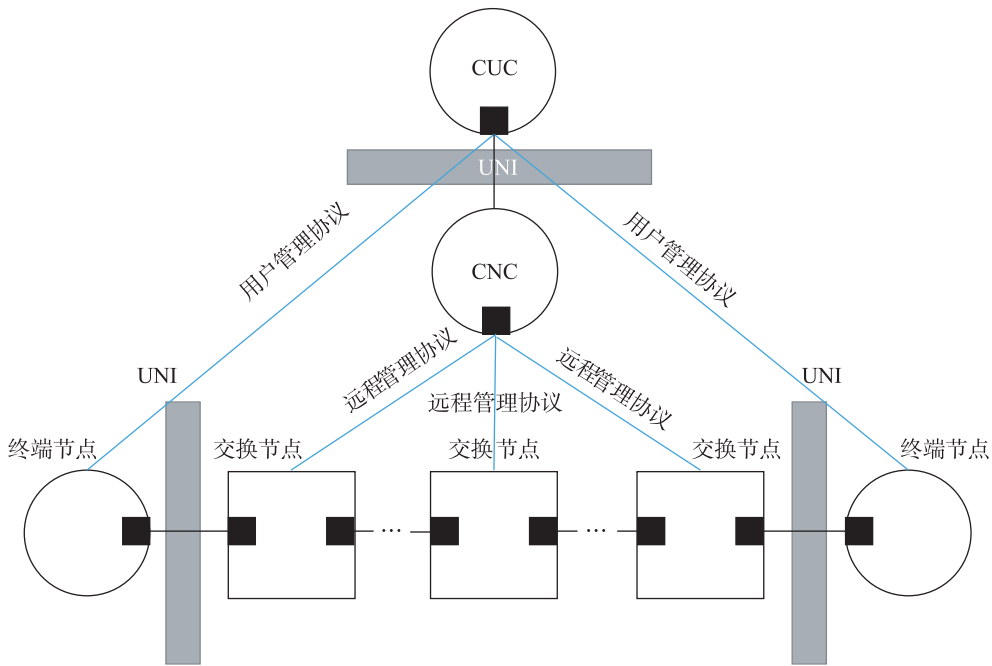


图7 AUTBUS 完全集中式网络模型  
Fig.7 AUTBUS fully centralized network model

集 CNC 模型请求配置更新；CNC 生成新的配置，并将配置信息返回给 CUC，通过 CUC 转发给 AUTBUS 现场设备。该集中式配置方式可实现低于单个设备发生错误情况下的重新配置。

2.2.3 确定性资源调度方法

AUTBUS 将来自异构工业物联网的所有数据划分为 3 类，同步数据、管理数据和制造数据，并根据确定性和实时性要求进行了网络资源调度。资源调度模板如图 8 所示，其中，空白部分均为制造数

据传输范围，AUTBUS 各类网络设备应根据需求申请或配置对应资源并用来传输数据。

为了将来自异构工业物联网不同协议的数据进行周期标定，AUTBUS 将来源于异构工业物联网的制造数据分配给 AUTBUS 控制设备或者 AUTBUS 现场设备后，在数据内插入导频信号(称为符号导频)，实现在截止期内发送到对应的接收端的目标，并可快速/准确解码出对应数据。导频插入制造数据的方式如图 9 所示。

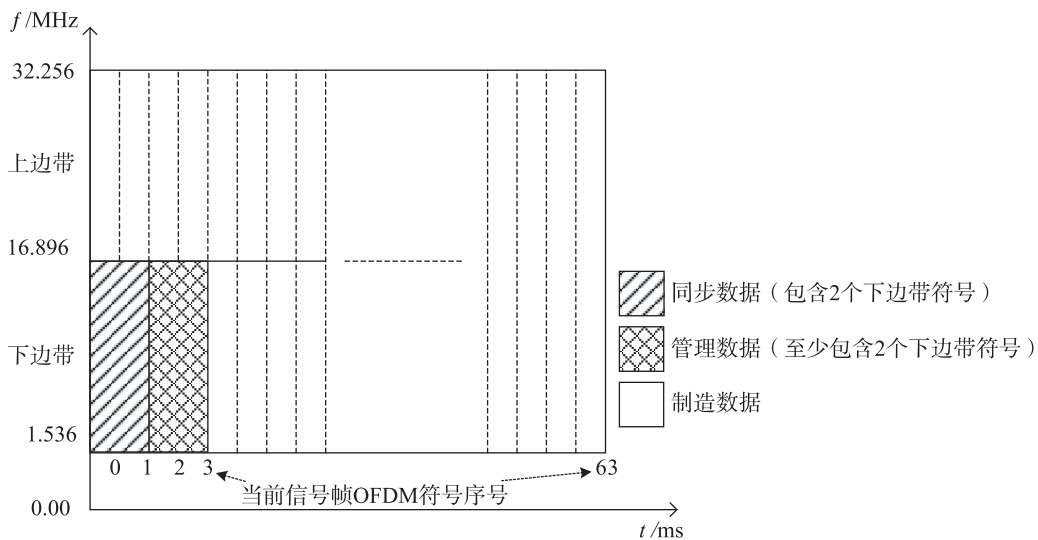


图8 AUTBUS 资源调度模板  
Fig.8 AUTBUS resource scheduling template

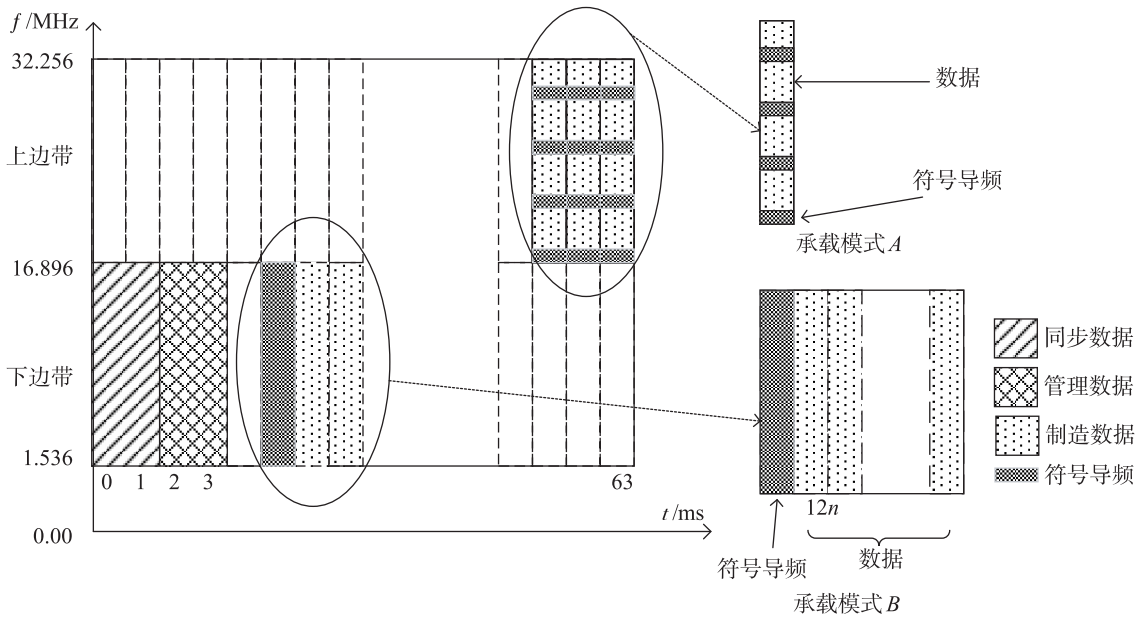


图 9 制造数据与导频融合资源分配

Fig.9 Manufacturing data and pilot fusion resource allocation

根据 OFDM 机制<sup>[16]</sup>, AUTBUS 中 OFDM 符号的时间连续信号表示为

$$s_l(t) = \left[ \sum_{k=N_s}^{N_s+N_{SD}-1} a_{k(-), l} \cdot e^{j2\pi k\Delta f(t-N_{CP}, lT_s)} \right] \quad (1)$$

其中,  $k^{(-)} = k - N_s$ ,  $K$  为数据的长度(以比特为单位),  $\Delta f$  为子载波间隔(以 kHz 为单位),  $N$  为傅里叶变换点数,  $N_{SD}$  为有效子载波数,  $N_{CP}$  为循环前缀长度,  $N_s$  为起始子载波标号,  $T_s$  为采样周期。

对式(1)取实函数, 得到传输函数如下:

$$S_l(t) = \text{Re } s_l(t) \quad (2)$$

AUTBUS 中采用的 64 个 OFDM 符号的传输函数累加, 组合成一个数据帧, 其中  $T_l$  为第  $l$  个 OFDM 符号的采样周期, 按照图 10 所示的 OFDM 符号结构进行发送。

$$S(t) = \sum_{l=0}^{63} S_l(t - T_l) \quad (3)$$

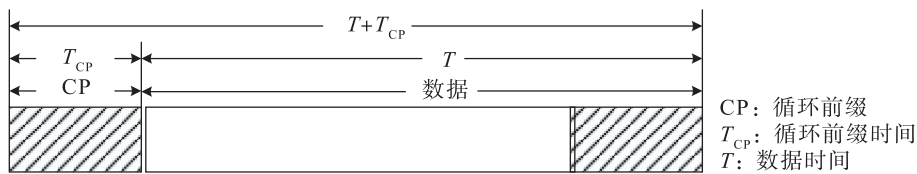


图 10 OFDM 符号结构

Fig.10 OFDM symbol structure

图 11 中 64 个 OFDM 符号组成的数据帧按照采样周期从小到大的顺序排列优先级, 其中采样周期较小的数据具备较高优先级。TSN 交换设备将 AUTBUS 网络设备生成的 OFDM 符号根据采样周期和优先级分别放入对应优先级的发包队列和接收器缓存器中, 完成通信资源与对应数据确定性的关联映射, 如图 11 所示。

### 3 实验结果分析

基于提出的基于时间敏感技术的异构工业物联

网确定性传输架构及方法, 依托北京东土科技股份有限公司与沈阳工业大学联合建设的 AUTBUS 测试平台开展实验验证。测试系统如图 12 所示, 左侧为基于 AUTBUS 芯片 KY3001 研发的全功能评估板 ANY37N1<sup>[20]</sup>, 右侧为 AUTBUS/ETH 转换板卡, 网络管理软件采用自主的 AUTBUS 诊断配置工具。本节将 AUTBUS 在网络配置、资源配置、设备配置等方面进行不同的对比, 通过数据流量的错包率和信道质量等信息<sup>[21]</sup>, 证明 AUTBUS 在不同异构网络中可以实现异构工业物联网周期性/非周期性数

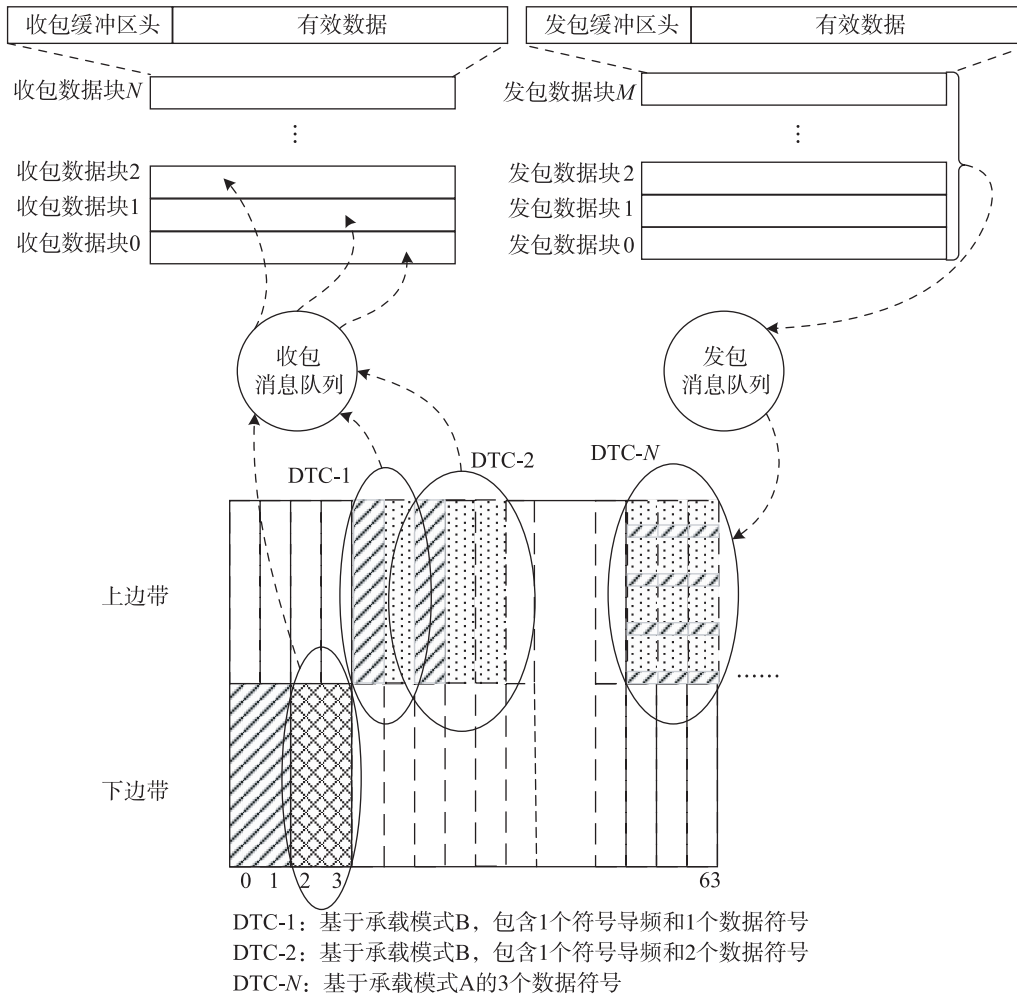


图 11 通信资源与数据确定性的关联映射

Fig.11 Association mapping between communication resources and data determinism

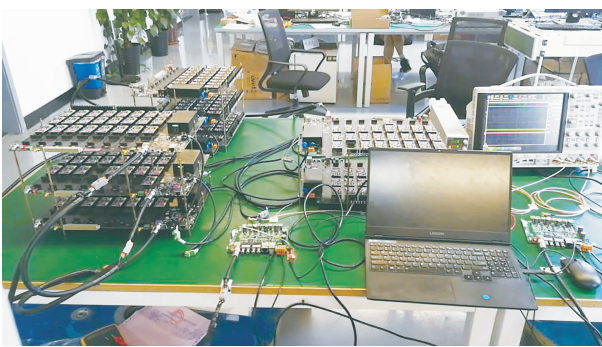


图 12 AUTBUS 测试平台

Fig.12 AUTBUS test platform

据的统一的时间敏感接入, 并且满足数据对工业物联网实时性和可靠性的要求。

### 3.1 AUTBUS 组网及设备配置

AUTBUS 组网及配置系统主要分为网络配置、设备配置和资源配置。

#### 1) AUTBUS 网络配置

如图 13 所示, AUTBUS 网络配置可实现对 AUTBUS 网络系统的发射模式、功率配比、边带调制编码模式等进行配置。



图 13 AUTBUS 网络配置系统

Fig.13 AUTBUS network configuration system

#### 2) AUTBUS 的设备配置与信道监测

如图 14 所示, AUTBUS 的设备配置模块包括

序号、设备名称、设备 ID、角色、App 版本、AUTBUS 版本、设备状态、设备标识, 掉线次数、信道质量、调试数据、运行时长等。其中, 设备名称可以根据具体需求修改, 其余信息在上电通信成功后自动识别出来。

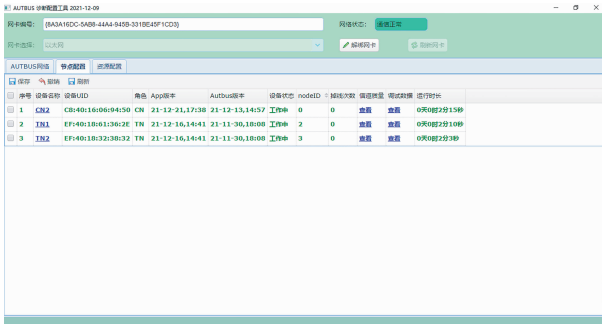


图 14 AUTBUS 设备配置模块

Fig.14 AUTBUS device configuration module

如图 15 所示, 在信道质量监测中, 可以实时观测到各设备在通信过程中信道质量的实时数据, 包括与哪个设备进行通信、通信的总包数、上行/下行错包数、信噪比、幅值、AGC(自动增益控制)值、同步状态等。通过观察并记录相关数据, 掌握不同参数设置对通信状态的影响。

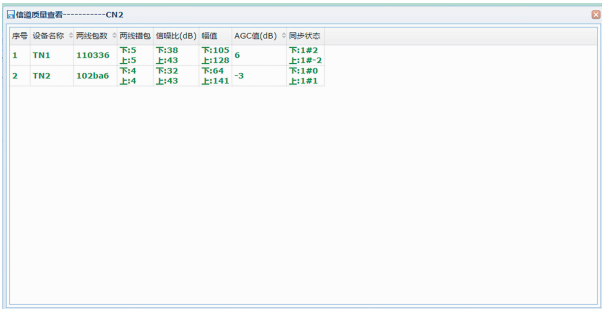


图 15 AUTBUS 信道质量监测模块

Fig.15 AUTBUS channel quality monitoring module

### 3) AUTBUS 资源配置

如图 16 所示, AUTBUS 资源配置包括对每个数据帧的间隔、起始位置、时隙长度、发送设备、接受设备、监听设备、是否广播进行调试。

### 3.2 性能指标

基于 3.1 节的 AUTBUS 测试平台, 设置不同的网络配置(图 13)、设备配置(图 14)、资源配置模块(图 16)中的参数, 运行网络通信过程, 统计和计算信噪比以及错包率 2 个关键的网络性能指标。

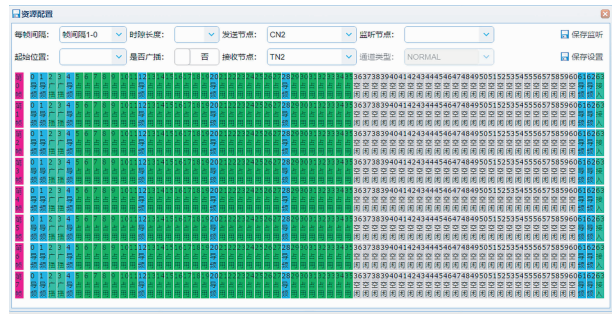


图 16 AUTBUS 资源配置模块

Fig.16 AUTBUS resource allocation module

其中, 信噪比定义为 AUTBUS 网络中信号与噪声的比值。信噪比越高, 代表其信号中的干扰越小, 信号质量越高。

错包率定义为 AUTBUS 网络中单位时间内数据传输中出现错误的数据包数量占全部数据包数量的比例, 计算公式为

$$r_{error} = P_{error} / P_{all} \quad (4)$$

其中,  $r_{error}$  为错包率,  $P_{error}$  为单位时间内数据传输中出现错误的数据包数量,  $P_{all}$  为单位时间内数据传输所有数据包数量。影响错包率变化速度的主要因素为数据传输的带宽和数据包的大小。带宽越大或者数据包越小, 单位时间内传输数据包的数量越多, 错包率变化越快。当相同配置下错包率越低, 说明网络中出现错包的概率越低, 网络越可靠。影响信噪比变化的主要因素包括信号传输路径的长短、信号强度的大小以及噪声强度的大小。在相同配置下信号传输路径越长, 信号强度越小, 噪声强度越大, 信噪比越小, 网络传输的信道质量越差。

### 3.3 测试结果及分析

基于 3.1 节的 AUTBUS 测试平台, 设置不同的网络配置、设备配置、资源配置模块中的参数, 对其错包率、信噪比等信道质量进行分析。测试结果表明 AUTBUS 满足异构工业物联网确定性传输的要求。

图 17 为一个 AUTBUS 控制设备和 2 个 AUTBUS 现场设备情况下的错包率的分布图。由于上电时间的不同导致在初始时产生了部分的错包, 伴随着时间的增加, 错包率持续下降且无波动, 证明 AUTBUS 设备在上线之后没有出现错包。同时信噪比均在 30 dB 以上, 信号质量良好, 网络较为可靠。由于不同资源配置对错包率的影响较小, 对可靠性的影响不大, 所以不在此进行对比分析。

调节上述场景中不同的发射模式, 其错包率变化如图 18 所示, 发射模式为 1 的错包率最小, 信噪

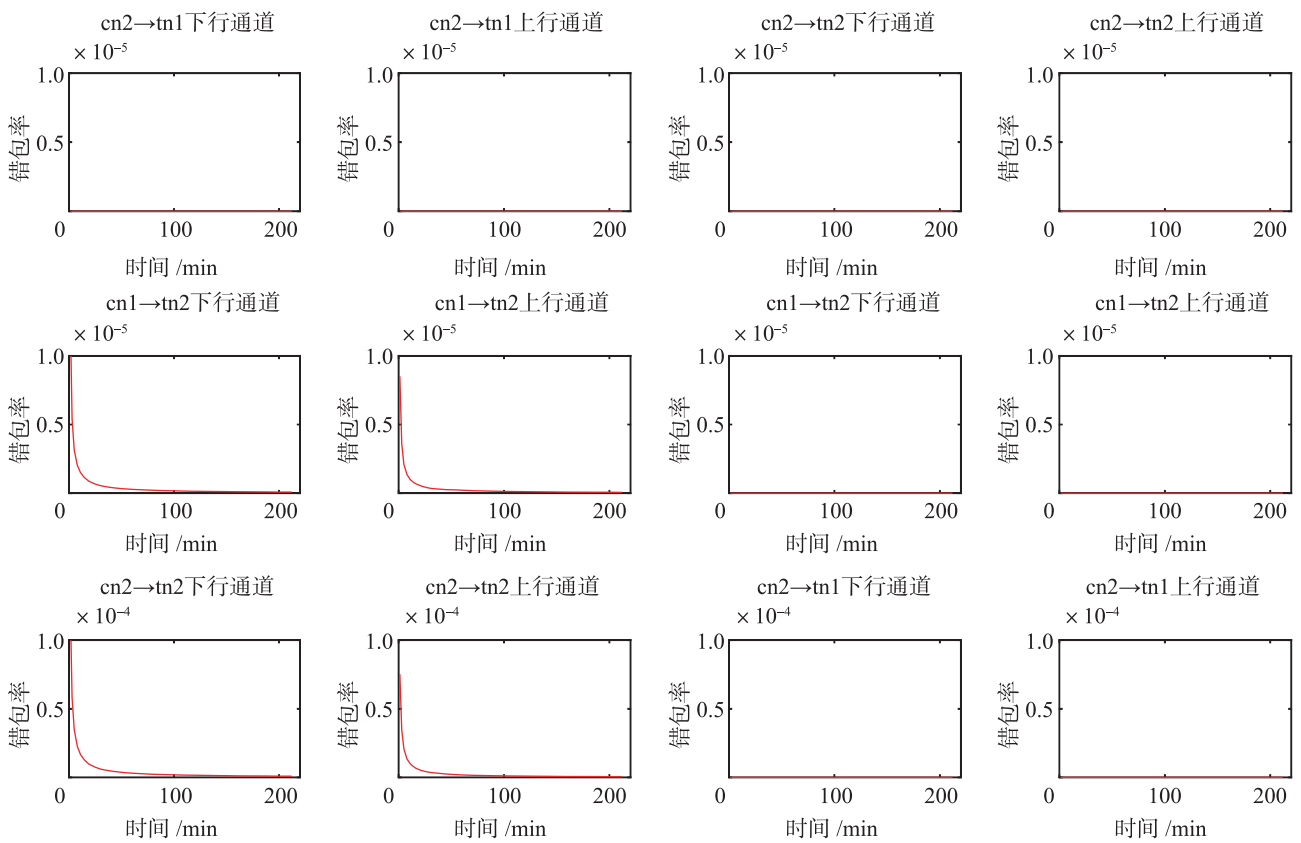


图 17 AUTBUS 连接异构工业物联网的错包率

Fig.17 Error packet rate of AUTBUS connection heterogeneous industrial IOT

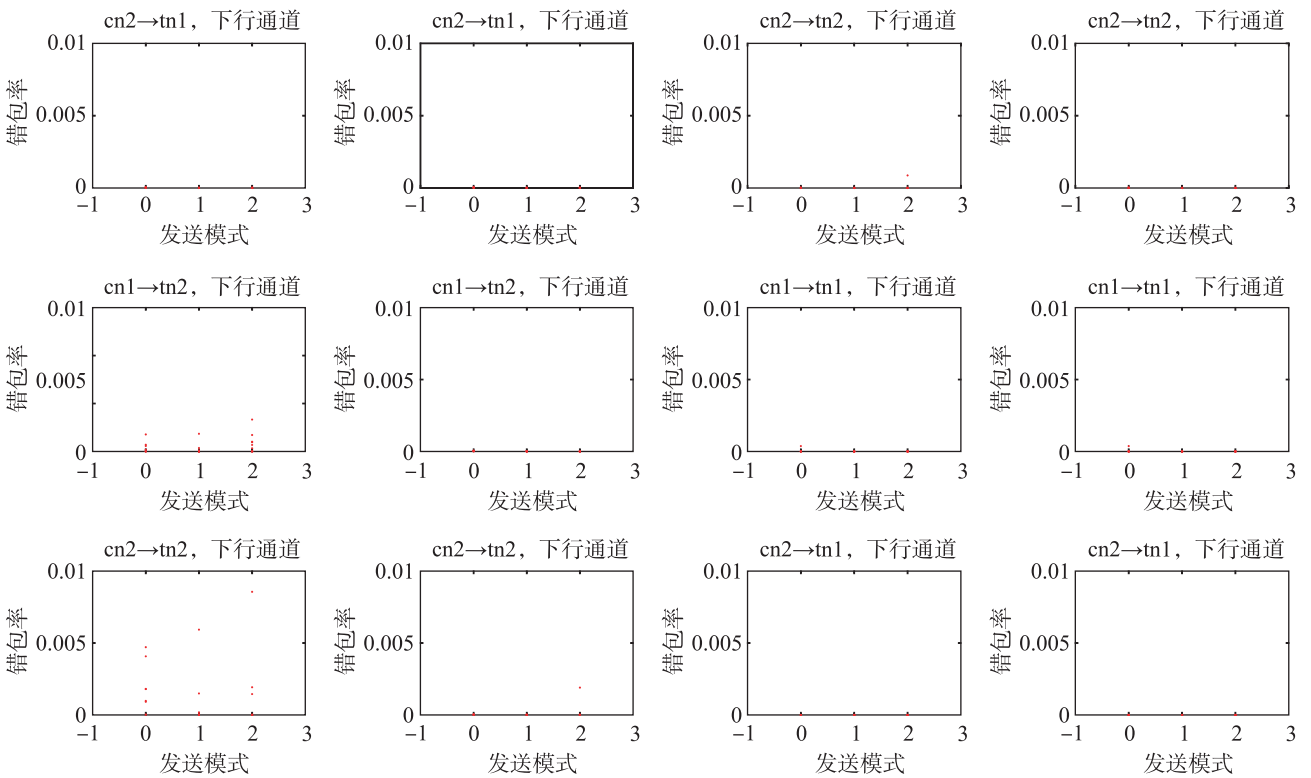


图 18 不同发射模式下的错包率

Fig.18 Error packet rate under different emission modes

比也稳定在 30 dB 以上, 传输距离越短所选的发射模式越大。图 18 的测试结果表明, AUTOBUS 中发射模式的值越大, 子载波间隔越长, 帧的长度越短, 实时响应越快。

相同场景下不同功率配比的错包率如图 19 所示, 以 AUTOBUS 现场设备向 AUTOBUS 管理设备发送的上行通道为例, 功率配比越小, 错包率越小。同时, 不同的功率配比也对信道质量有不同的影响。不同功率配比的信噪比测试结果变化如图 20 和图 21 所示, 在所有的上行通道, 功率配比越大, 信噪比越大。在所有的下行通道, 功率配比越大, 信噪比越小。测试结果表明, 在具体应用过程中需要根据不同场景选择功率配比时要综合信道质量和错包率进行分析。

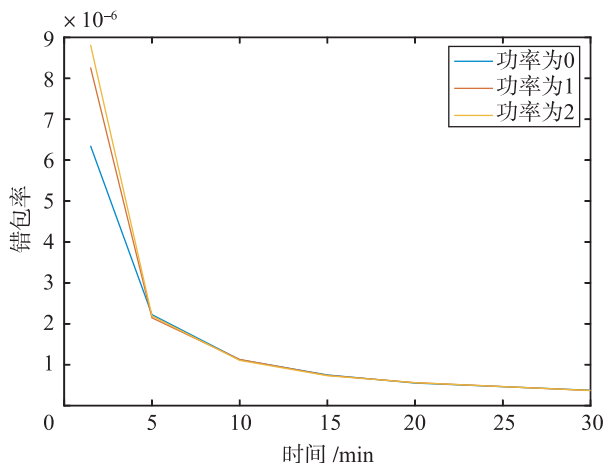


图 19 AUTOBUS 现场设备向控制设备发送的上行通道错包率  
Fig.19 Error packet rate of the uplink channel sent by the AUTOBUS field device to the control device

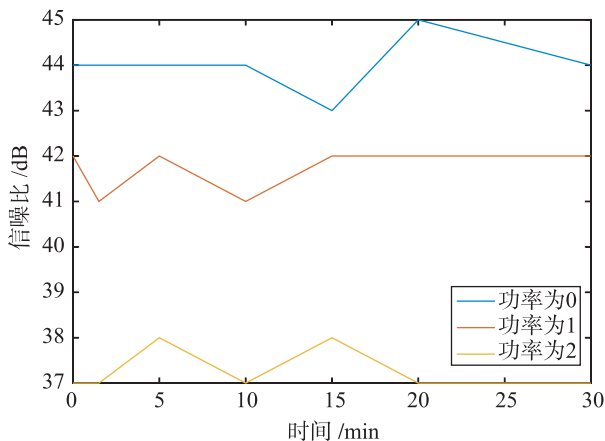


图 20 AUTOBUS 控制设备向现场设备发送的下行通道信噪比  
Fig.20 The downlink channel signal-to-noise ratio sent by the AUTOBUS control device to the field device

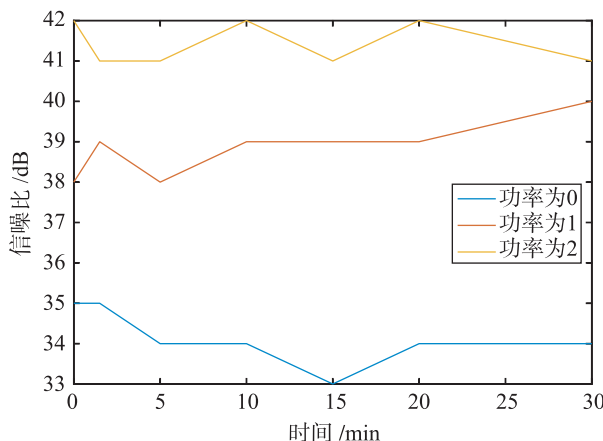


图 21 AUTOBUS 控制设备向现场设备发送的上行通道信噪比  
Fig.21 The uplink channel signal-to-noise ratio sent by the AUTOBUS control device to the field device

### 4 结束语

面向智能工厂中越来越多的异构工业物联网协同传输的时效性问题, 以及不同类型数据不同周期性要求等数据特性, 本文基于自主研发的新一代工业现场总线技术国际标准, 提出基于时间敏感技术的异构工业物联网统一接入的“一网到底”架构, 设计了基于 OFDM 的时间敏感接入机制, 实验结果表明了所提方法可实现工业现场数据的确定性、实时性和可靠性传输, 为控制器稳定运行以及工厂内信息系统决策等提供符合生产节奏的传输方案。研究得出以下结论:

1) 基于时间敏感技术的异构工业物联网确定性传输架构, 适用于工业场景多、对象多、差异性大的应用场景, 可解决工业数据采集的准确、快速、自适应难题; 针对工业现场环境复杂以及干扰频繁的场景, 可实现不稳定的网络资源下采样数据的高可靠、高实时传输; 可实现同网并行传输生产过程控制类小数据以及视觉/视频/音频等长数据。此外, 可兼容现有常见的工业以太网和工业现场总线。

2) 提出的时间敏感接入方法, 融合了基于延迟测量的时间同步方法、时间敏感接入以及导频注入的确定性调度方法, 覆盖制造过程中涉及到的同步数据、管理数据和制造数据。通过 AUTOBUS 在网络配置、资源配置、设备配置等方面的性能比较, 结果表明 AUTOBUS 在不同异构网络中可以实现异构工业物联网周期性/非周期性数据的统一的时间

敏感接入, 并且满足数据对工业物联网实时性和可靠性的要求。

3) 下一步将基于“信息年龄”这一信息新鲜度

和有效性的指标, 对其进行下限值分析和调度优化, 进一步保障智能工厂中全网数据传输的有效性以及网络化协同控制的匹配性。

## 参考文献

- [ 1 ] KOLODZY P, KOLODZY P, VAN WAZER LAUREN, et al. Spectrum policy task force report[J]. FCC ET Docket, 2002, 40(4): 147 – 158.
- [ 2 ] ESTRIN D, GOVINDAN R, HEIDEMANN J, et al. Next century challenges: Scalable coordination in sensor networks[C]// Annual ACM/IEEE International Conference on Mobile Computing and Networking. New York, USA: ACM, 1999: 263 – 270.
- [ 3 ] ZHANG X Y, SHIN K G. Cooperative carrier signaling: Harmonizing coexisting WPAN and WLAN devices[J]. IEEE/ACM Transactions on Networking, 2013, 21(2): 426 – 439.
- [ 4 ] TAO F, CHENG J F, QI Q L. IIHub: An Industrial Internet-of-things hub toward smart manufacturing based on cyber-physical system[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2018, 14(5): 2271 – 2280.
- [ 5 ] 丁凯, 陈东燊, 王岩, 等. 基于云-边协同的智能工厂工业物联网架构与自治生产管控技术[J]. 计算机集成制造系统, 2019, 25(12): 3127 – 3138.  
DING K, CHEN D S, WANG Y, et al. Industrial Internet of things architecture and autonomous production control technologies for smart factories based on cloud-edge interplay[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2019, 25(12): 3127 – 3138.
- [ 6 ] 张超逸, 钱雪平. 工业以太网在自动化领域中的发展应用分析[J]. 冶金管理, 2023, (1): 18 – 19.  
ZHANG C Y, QIAN X P. Development and application analysis of industrial Ethernet in the field of automation[J]. China Steel Focus, 2023, (1): 18 – 19.
- [ 7 ] 夏继强, 邢春香, 耿春明, 等. 工业现场总线技术的新进展[J]. 北京航空航天大学学报, 2004, 30(4): 358 – 362.  
XIA J Q, XING C X, GENG C M, et al. Development of the fieldbus technology[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2004, 30(4): 358 – 362.
- [ 8 ] 国家市场监督管理总局, 国家标准化管理委员会. 基于时间敏感技术的宽带工业总线 AUTBUS 系统架构与通信规范: GB/T 42019 – 2022[S]. 北京: 中国标准出版社, 2022.  
STATE ADMINISTRATION FOR MARKET REGULATION, STANDARDIZATION ADMINISTRATION. AUTBUS broadband industrial fieldbus based on time-sensitive technology – System architecture and communication specification: GB/T 42019 – 2022 [S]. Beijing: Standards Press of China, 2022.
- [ 9 ] WOLLSCHLAEGER M, SAUTER T, JASPERNEITE J. The future of industrial communication: Automation networks in the era of the Internet of things and industry 4.0[J]. IEEE Industrial Electronics Magazine, 2017, 11(1): 17 – 27.
- [ 10 ] 龚海杰. 车载实时 TSN-CAN 网关设计[D]. 长沙: 湖南大学, 2021.  
GONG H J. Design of vehicle-borne real-time TSN-CAN gateway[D]. Changsha: Hunan University, 2021.
- [ 11 ] 王忠诚. Modbus TCP 适配时间敏感网络的关键技术研究与应用[D]. 重庆: 重庆邮电大学, 2021.  
WANG Z C. Research and implementation of key technologies for Modbus TCP adaptation to time-sensitive networks[D]. Chongqing: Chongqing University of Posts and Telecommunications, 2021.
- [ 12 ] 缪京霖, 李念军. 一种 EtherCAT 与 TSN 网络互通的实现方法[J]. 电子设计工程, 2020, 28(3): 84 – 88.  
MIAO J L, LI N J. A new implementation method of interworking between EtherCAT and TSN network[J]. Electronic Design Engineering, 2020, 28(3): 84 – 88.
- [ 13 ] WEYRICH M, EBERT C. Reference architectures for the Internet of things[J]. IEEE Software, 2016, 33(1): 112 – 116.
- [ 14 ] 刘宝明, 冯振乾. 时间敏感网络关键技术与应用研究[J]. 工业控制计算机, 2021, 34(11): 1 – 4.  
LIU B M, FENG Z Q. Research and application of time-sensitive networking key technique[J]. Industrial Control Computer, 2021, 34(11): 1 – 4.
- [ 15 ] 邵枝晖, 康良川, 黄易, 等. AUTBUS 高速工业现场总线[J]. 仪器仪表标准化与计量, 2020(2): 9 – 12.  
SHAO Z H, KANG L C, HUANG Y, et al. AUTBUS high-speed industrial fieldbus[J]. Instrument Standardization and Metrology, 2020(2): 9 – 12.

- [16] SCHMIDL T M, COX D C. Robust frequency and timing synchronization for OFDM[J]. IEEE Transactions on Communications, 1997, 45(12): 1613 – 1621.
- [17] 李敏, 郭彦蕊. 基于 AUTBUS 的传感器数据采集系统研究与设计[J]. 电子制作, 2023, 31(4): 46 – 49.  
LI M, GUO Y R. Research and design of sensor data acquisition system based on AUTBUS[J]. Practical Electronics, 2023, 31(4): 46 – 49.
- [18] 罗坤. 基于 IEEE 802.1Qcc 的时间敏感网络配置管理研究与实现[D]. 重庆: 重庆邮电大学, 2021.  
LUO K. Research and implementation of time-sensitive network configuration management based on IEEE 802.1Qcc[D]. Chongqing: Chongqing University of Posts and Telecommunications, 2021.
- [19] 杨明亮, 吴春明, 沈丛麒, 等. 基于 IEEE 802.1 的 TSN 交换机队列调度技术研究[J]. 电子学报, 2022, 50(9): 2090 – 2095.  
YANG M L, WU C M, SHEN C Q, et al. Research on queue scheduling strategy on IEEE 802.1 based TSN switch[J]. Acta Electronica Sinica, 2022, 50(9): 2090 – 2095.
- [20] 应海文, 陶莉, 赵海滨, 等. 一种新型的 AUTBUS 车辆智能总线[J]. 车辆与动力技术, 2023(3): 57 – 64.  
YING H W, TAO L, ZHAO H B, et al. A new AUTBUS vehicle intelligent bus[J]. Vehicle & Power Technology, 2023(3): 57 – 64.
- [21] 尹浩, 李峰. 互联网性能测量技术发展研究[J]. 计算机研究与发展, 2016, 53(1): 3 – 14.  
YIN H, LI F. Research on the development of the Internet performance measurement technologies[J]. Journal of Computer Research and Development, 2016, 53(1): 3 – 14.

## 作者简介

张晓玲(1982 –), 女, 博士, 教授。研究领域为工业智能物联网及芯片技术, 智能感知技术, 工业 5G 技术, 智能制造技术标准化。

杨 亮(1996 –), 男, 硕士生。研究领域为工业智能物联网, 智能感知技术, 时间敏感网络。

姚菊梅(1997 –), 女, 硕士生。研究领域为工业智能物联网, 智能感知技术。