

面向 6G 演进的确定性信息物理系统架构研究*

高秋悦, 李金艳, 刘 洋

(中国电信股份有限公司研究院, 北京 102209)

摘 要: 确定性技术是满足 6G 新兴业务确定性转发要求的重要研究内容。信息物理系统(Cyber-Physical System, CPS)作为工业 4.0 的核心系统,其确定性保障对于生产的高效稳定和服务的安全可靠至关重要。围绕以工业互联网为代表的 CPS 系统的确定性需求,提出一种基于确定性网络技术的 CPS 系统架构,包括确定性通信网络和确定性系统组件。在此基础上,面向低时延云化控制场景、高可靠移动控制场景和大带宽闭环控制场景三类典型用例对所提的系统架构进行细化设计,并对系统的时延、抖动、可靠性、带宽等指标的确定性进行分析。

关键词: 确定性网络;信息物理系统;工业控制

中图分类号: TN929.5

文献标识码: A

DOI: 10.16157/j.issn.0258-7998.223364

中文引用格式: 高秋悦, 李金艳, 刘洋. 面向 6G 演进的确定性信息物理系统架构研究[J]. 电子技术应用, 2022, 48(12): 11-14.

英文引用格式: Gao Qiuyue, Li Jinyan, Liu Yang. Research on deterministic Cyber-Physical Systems architecture for 6G evolution[J]. Application of Electronic Technique, 2022, 48(12): 11-14.

Research on deterministic Cyber-Physical Systems architecture for 6G evolution

Gao Qiuyue, Li Jinyan, Liu Yang

(China Telecom Corporation Limited Research Institute, Beijing 102209, China)

Abstract: Deterministic technology is an important research content to meet the deterministic forwarding requirements of 6G emerging services. As the kernel system of Industry 4.0, the deterministic guarantee of Cyber-Physical System(CPS) is of vital importance for the efficiency and stability of production and the safety and reliability of service. Focusing on the deterministic requirements of CPS represented by industrial Internet, a CPS system architecture based on deterministic network technology is proposed, including deterministic communication network and deterministic system components. On this basis, the proposed system architecture is detailed designed for three typical use cases: low delay cloud control scenario, high reliability mobile control scenario and large bandwidth closed-loop control scenario, and the determinacy of delay, jitter, reliability and bandwidth is analyzed.

Key words: deterministic network; Cyber-Physical System; industrial control

0 引言

信息物理系统(Cyber-Physical System, CPS)作为第四次工业革命的重要组成部分^[1],实现了网络世界与物理世界的交互与融合。CPS 是一种综合计算、网络和物理环境的多维复杂计算机系统^[2],通过集成 3C 技术,即计算(Computing)、通信(Communication)和控制(Control),来提高传统物理系统的工作效率,实现系统服务和管理的自动化、数字化、智能化^[3]。因此,CPS 被广泛应用于自动驾驶、智能电网、工业物联网等领域,不断助力生产制造的数智化转型。

CPS 对物理环境进行感知和数据采集,并通过海量的数据处理、信息转换、网络传输等来控制生产制造过程,任何环节的故障都会对系统整体的运作效率产生较

大影响。此外,系统海量的信息采集、繁重的数据计算、泛在的业务传输对系统的感知能力、计算能力和网络能力都提出了较高的要求。尤其是工业控制、自动驾驶等对实时性和安全性要求较高的场景,需要毫秒级的超低时延、微秒级的抖动以及 5 个 9 以上的可靠性,高清视频监控类场景由于对视频分辨率、尺寸等具有较高要求,需要网络提供稳定的大带宽传输^[4]。因此,按需提升网络性能,为 CPS 提供高质量的确定性保障是当前工业 4.0 的重要研究方向之一^[5]。

确定性网络改变传统以太网“尽力而为”的数据传输方式,通过流量整形、资源预留、路径冗余、双发选收等机制为各种新兴业务提供准时、准确的高质量服务^[6],大大减少了由于接入设备和数据业务激增所导致的拥塞崩溃、数据延迟、传输抖动,实现网络指标的有界性和确定性保障。确定性技术也是面向 6G 未来网络架构的

* 基金项目:国家重点研发项目“6G 网络架构及关键技术”(2020YFB1806700)

重要研究内容,相关技术的增强有助于大幅提升 6G 性能,满足新兴业务的确信性转发要求。因此,基于确定性技术的 CPS 架构设计和研究对于提升 CPS 系统能力指标、满足系统确定性需求具有重要意义。

本文首先提出了一种基于确定性网络技术的 CPS 系统架构,包括确定性通信网络和确定性系统组件。在此基础上,结合不同场景需求和用例设计了多种确定性 CPS 架构,包括面向低时延云化控制场景、高可靠移动控制场景和大带宽闭环控制场景的系统架构设计。

1 确定性 CPS 系统架构

1.1 CPS 系统架构

如图 1 所示,本文将 CPS 系统在逻辑上划分为如下 5 部分:

(1)传感模块:感知和采集外部物理环境的信息,由各种传感器组成,如光电传感器、接近传感器、光纤传感器、位移传感器、霍尔效应传感器等;

(2)处理模块:对传感模块所感知和采集到的信息进行处理、分析、计算等操作,主要由各种类型的服务器组

成,如视觉服务器、数据库服务器、管理服务器等;

(3)控制模块:综合处理模块的数据信息和分析结果生成系统可识别的控制指令;

(4)执行模块:根据控制模块下发的控制指令对外部物理环境执行相应的操作;

(5)通信链路,实现系统中各模块之间的有线/无线连接和数据传输。

1.2 基于确定性技术的 CPS 系统架构

如图 2 所示,基于确定性技术的 CPS 系统由两部分组成:确定性通信网络和确定性系统组件。

确定性通信网络主要基于确定性网络技术(如 DIP、FlexE、5G LAN、PON 等)为 CPS 系统中的通信链路、处理模块和控制模块提供时延、带宽的确定性,实现从数据采集到控制执行全流程的低时延抖动和高带宽传输。DIP^[7]通过边缘整形、门控调度、周期映射、显式路径保证 DIP 业务流的无拥塞和严格优先传输,消除了突发所造成的时延长尾效应,并将抖动控制在两个转发周期内^[8]。FlexE^[9]通过在 MAC 层与 PHY 层之间插入 Shim 层实现基于 calendar 的时分复用,多种物理通道速率为不同业务流提供灵活的承载网切片,实现带宽按需分配,降低了业务拥塞和传输时延,提高了带宽利用率。5G LAN 通过 L3 层 VPN 服务和 L2 层 LAN 服务的局域移动通信方式,在保证大带宽、低时延的同时,赋予了终端移动性的优势。无源光网络(Passive Optical Network, PON)通过无源光分路器实现一点到多点的光纤接入传输,能实现带宽共享,具有抗干扰能力强、传输带宽高的优势。通过将确定性网络技术与 CPS 系统的传输、计算、控制等结

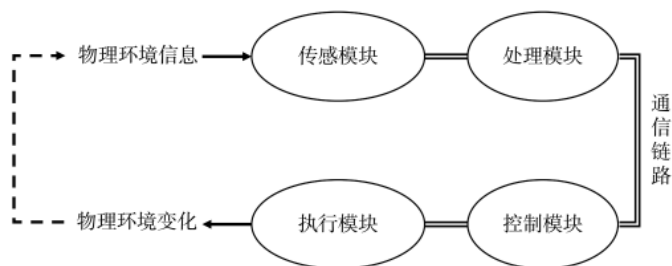


图 1 CPS 系统架构

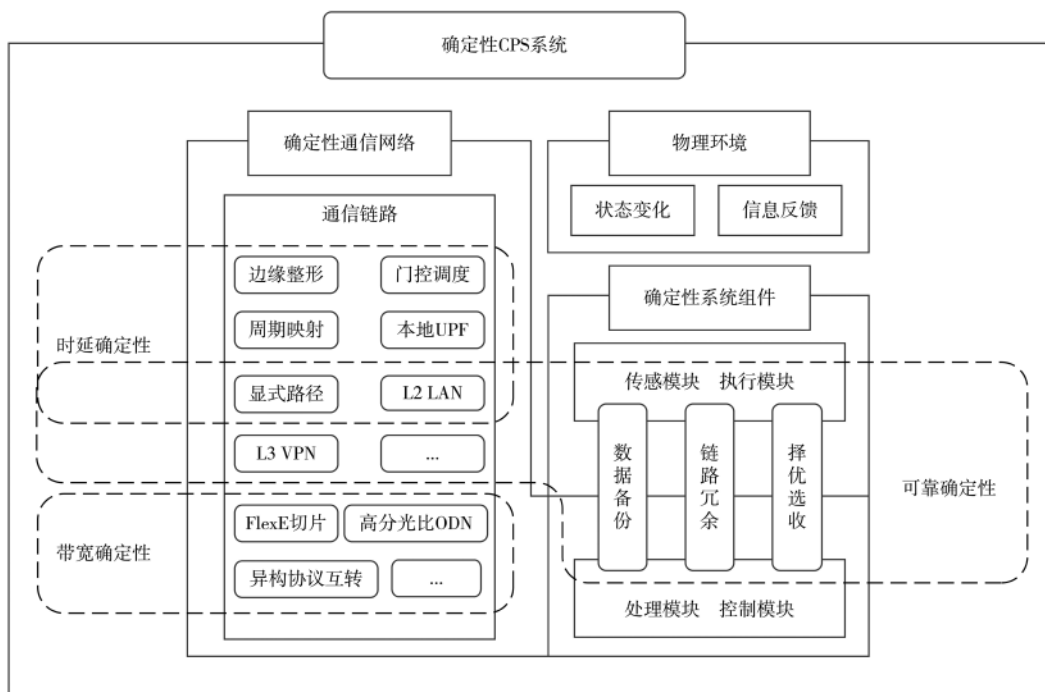


图 2 确定性 CPS 系统

合,能有效降低 CPS 业务时延,提高传输带宽。

确定性系统组件主要基于确定性双发选收技术为 CPS 系统中的传感模块、处理模块、控制模块等提供可靠传输的确定性。双发选收技术^[10]在发送端将报文复制为两份,在两条不同路径上发送,在接收端选择性接收为一份。通过这种数据备份和链路冗余的方式有效预防单发送路径故障所导致的丢包,提高数据传输的可靠性。通过双发选收传感器、双发选收服务器等功能模块的部署,能够提高 CPS 系统业务流和控制指令转发的可靠性,从而有效降低系统的故障率。

2 典型确定性 CPS 用例分析和架构设计

2.1 用例 1:面向低时延云化控制场景的确定性系统架构

PLC(Programmable Logic Controller)在自动化控制系统中发挥着核心的控制作用,但传统 PLC 在不同行业的各自发展使得架构和协议差异性大,在开放性和通用性方面受限。因此,PLC 的云化成为大势所趋,不仅能够降低设备成本,还能够提供更统一、开放的协议和更强大的算力。然而,PLC 的云化为端到端自动化控制带来了更高的时延,为具有低时延需求的云化控制场景带来了一定的挑战。

为了解决上述问题,本文提出了基于 DIP 和 FlexE 技术的确定性系统架构。以图 3 金属件自动化智能机器视觉检测为例,其工作流程可简要描述为:工业相机(传感模块)拍摄金属件照片并发送到视觉检测服务器(处理模块)判断其质量,判断结果发送到边缘云化 PLC(控制模块),PLC 根据结果控制分拣器分拣金属件(执行模块)。整套工序的信息传送速度、工件检测节拍、检测算法选择等都需要云化 PLC 技术和确定性时延技术来保证。除了低时延需求外,不同业务流对带宽的需求也有所不同,如检测照片的像素高,数据量大,需要大带宽;控制信息数据量小,带宽要求较低。因此,不同业务流通过不同的 FlexE 切片进行传输,实现带宽按需灵活分配,提高带宽利用率。对于高实时性的 FlexE 切片流,DIP 路由器则通过优先的确定的转发时间和转发路径来满足其需求。基于 DIP 和 FlexE 技术,可有效克服业务拥塞,保证相机流具有 Gpbs 级传输带宽,并将业务流时延控制在 20 ms 以内,抖动控制在 5 ms 以内。此架构下的云化控制场景能够兼具开放统一控制和确定性低时延的优

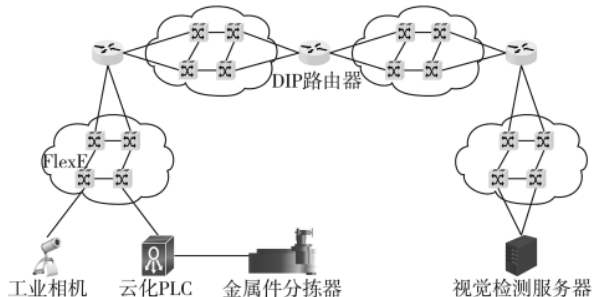


图 3 面向低时延云化控制场景的确定性系统架构

势,并保证了不同专用硬管道业务的安全隔离。

2.2 用例 2:面向高可靠移动控制场景的确定性系统架构

对于移动性较高的仓储物流行业来说,有线通信部署困难,故障率较高。此外,各设备所处的环境复杂恶劣,信号稳定性差,可靠性较低。因此,本文提出了如图 4 所示的确定性系统架构,基于 5G LAN 和双发选收提高移动场景下的传输可靠性。

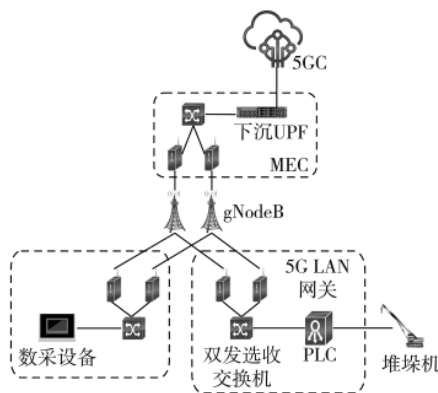


图 4 面向高可靠移动控制场景的确定性系统架构

以堆垛机的移动远程控制为例,其工作流程可简要描述为:数采设备(传感模块)采集货物信息并发送给 MEC(处理模块)进行识别和分析,MEC 计算需要装/卸的位置并经由就近的 UPF 转发给堆垛机 PLC(控制模块),PLC 控制堆垛机进行货物的装卸(执行模块)。在货物信息和控制信息的远程传输过程中,需要移动性和可靠性的保障。通过将 5G LAN 双网关和双发选收交换机集成在系统的传感模块、处理模块和控制模块,赋予系统原生的二层冗余传输能力,预计可提供 4 个 9 以上的高可靠确定性保障。同时,5G LAN 的局域移动通信和确定性 UPF 的下沉可将端到端时延控制在 10 ms~20 ms 范围内。

2.3 用例 3:面向大带宽闭环控制场景的确定性系统架构

闭环控制类场景尤其是依赖于高清监控的业务具有传输数据量大的特征,对视频传输的带宽和控制信号的实时稳定有确定性需求,但传统的工业以太网只有百兆带宽,无法满足上述带宽和时延的确定性需求。此外,在多类业务并存的情况下,需要一种融合归一化的网络底座,实现厂内办公区、生产区域的有线网络全覆盖,以及各业务的融合统一承载,降低网络复杂度。因此,本文提出了如图 5 所示的基于无源光网络的确定性系统架构,以满足网络底座融合归一化需求,其千兆光网及扁平化网络结构可提供大带宽和低时延等确定性能力。

以镁炉冶炼金属为例,其工作流程可简要描述为:摄像头和电流传感器(传感模块)分别采集炉况信息和电流信息,由具备边缘算力的网关、服务器等(处理模块)对镁炉的温度、电流等状态信息进行处理分析,当检测到异常情况时则通知 PLC(控制模块),由 PLC 下发控制信息调整镁炉(执行模块)状态,当前状态则被传感模块

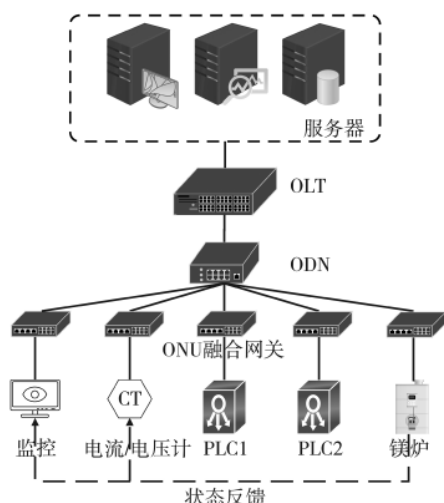


图 5 面向大带宽闭环控制场景的确定性系统架构

采集用于整个闭环控制过程。基于 GPON 全光网络底座,可提供 OLT 单个用户端口 Gbps 级的高速稳定接入,高分光比能够满足更多的业务接入需求。ONU 融合网关除了能够提供常规的接入能力外,还可通过额外内置模型分析能力和边缘计算能力,为闭环控制过程提供实时的信息处理计算、模型预测分析,有效降低业务时延,提升生产效率。基于此架构,网络可为每个用户端口提供 1 Gbps 及以上的大带宽接入,并为各类实时闭环控制业务提供低于 1 ms 的时延和低于 200 μ s 的抖动。

3 结论

本文从工业 4.0 核心系统 CPS 的需求出发,分析了将确定性技术应用于 CPS 的优势,提出了基于确定性技术的 CPS 系统架构,进一步面向不同确定性需求的场景和用例分别设计了适配的确定性系统架构,并对时延、带宽、可靠性等性能的提升进行分析,有助于满足 6G 新兴业务的确定性需求。工业 4.0 时代的业务量激增、业务类型复杂,对确定性指标的要求势必会不断提升。面向各种不同的个性化场景和业务需求,需要设计灵活按需服务的确定性系统架构,同时注重产业内和产业间的规范化和归一化,保证整个社会系统工程的开放融合、互通互利。

参考文献

[1] 中国电子技术标准化研究院.信息物理系统白皮书[R].

2018.

- [2] PLAKHOTNIKOV D P, KOTOVA E E. Design and analysis of Cyber-Physical Systems[C]//2021 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering(ElConRus), 2021: 589-593.
- [3] 司志亮,黄慧颖,董佳琪.信息物理系统的体系结构与安全技术研究[J].微型电脑应用,2019,35(10):132-134.
- [4] IMT-2020(5G)推进组.5G 确定性承载网络 SLA 指标体系白皮书[R].2021.
- [5] GUNDALL M, STRUFE M, SCHOTTEN H D, et al. Introduction of a 5G-enabled architecture for the realization of industry 4.0 use cases[J].IEEE Access, 2021, 9: 25508-25521.
- [6] 黄韬,汪硕,黄玉栋,等.确定性网络研究综述[J].通信学报,2019,40(6):160-176.
- [7] BADAR A, LOU D Z, GRAF U, et al. Intelligent edge control with deterministic-IP based industrial communication in process automation[C]//2019 15th International Conference on Network and Service Management(CNSM), 2019: 1-7.
- [8] PENG G, WANG S, HUANG Y, et al. Traffic shaping at the edge: enabling bounded latency for large-scale deterministic networks[C]//2021 IEEE International Conference on Communications Workshops (ICC Workshops), 2021: 1-6.
- [9] DING Z, LI W, CHENG Y, et al. Slice network framework and use cases based on FlexE technology for power services[C]//2021 International Wireless Communications and Mobile Computing(IWCMC), 2021: 57-62.
- [10] 郑晓亮,邵蔚.确定性 IP 网络[DB/OL].(2021-11-11)[2022-09-15].https://support.huawei.com/enterprise/zh/doc/EDOC1100209090.

(收稿日期:2022-09-15)

作者简介:

高秋悦(1997-),女,硕士,主要研究方向:移动通信网络架构和关键技术、确定性网络。

李金艳(1977-),女,硕士,教授级高工,主要研究方向:移动通信网络架构及关键技术演进。

刘洋(1983-),女,博士,高级工程师,主要研究方向:6G 网络架构及关键技术。



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