

基于5G与NCS融合的工业控制系统架构设计与性能优化

王佳

大唐蒲城发电有限责任公司 陕西渭南 715501

【摘要】随着工业4.0的深入推进,传统工业控制系统在应对柔性制造与分布式生产场景时,面临实时性、可靠性与灵活性不足的挑战。本文旨在融合第五代移动通信技术(5G)与网络化控制系统(NCS),构建一种新型工业控制系统架构,以提升其在动态工业环境下的性能。文章首先设计了包含智能感知与执行层、5G通信网络层及云边协同控制层的三层体系结构,leveraging 5G网络切片与移动边缘计算技术为控制业务提供差异化服务。进而,针对网络时延与丢包对控制性能的影响,提出了模糊自适应PID与事件触发机制相结合的复合控制策略,并设计了基于业务预测的动态切片资源调度算法以优化网络资源分配。通过搭建协同仿真平台进行实验验证,结果表明,相较于传统架构,本文所提方案能有效降低关键控制回路的通信时延与数据包丢失率,在面临网络扰动时表现出更强的鲁棒性与稳定性,为5G在工业控制领域的深度应用提供了有价值的理论参考与实践路径。

【关键词】5G; 网络化控制系统(NCS); 工业控制系统; 架构设计

Industrial Control System Architecture Design and Performance Optimization Based on 5G-NCS Integration

Wang Jia

Datang Pucheng Power Generation Co., Ltd. Weinan, Shaanxi 715501

【Abstract】With the deepening implementation of Industry 4.0, traditional industrial control systems face challenges in real-time responsiveness, reliability, and flexibility when addressing flexible manufacturing and distributed production scenarios. This paper aims to integrate fifth-generation mobile communication technology (5G) with networked control systems (NCS) to construct a novel industrial control system architecture that enhances performance in dynamic industrial environments. The paper first designs a three-tier architecture comprising intelligent sensing and execution layers, 5G communication network layers, and cloud-edge collaborative control layers, leveraging 5G network slicing and mobile edge computing technologies to provide differentiated services for control operations. To address the impact of network latency and packet loss on control performance, a composite control strategy combining fuzzy adaptive PID and event-triggered mechanisms is proposed, along with a dynamic slicing resource scheduling algorithm based on service prediction to optimize network resource allocation. Experimental validation through a collaborative simulation platform demonstrates that compared to traditional architectures, the proposed solution effectively reduces communication latency and packet loss rates in critical control loops, exhibits stronger robustness and stability under network disturbances, and provides valuable theoretical references and practical pathways for the deep application of 5G in industrial control fields.

【Key words】5G; Networked Control System (NCS); Industrial Control System; Architecture Design

一、前言

随着工业4.0时代的深入推进,智能制造与工业互联网的快速发展对工业控制系统的实时性、可靠性与灵活性提出了更高要求^[1]。传统工业控制系统多依赖于有线网络与局部控制策略,其在面对大规模分布式生产场景与复杂动态任务时,往往表现出部署成本高、扩展性不足以及响应延迟明显等问题^[2]。尤其在柔性制造、远程运维和跨地域协同作业等新兴应用场景中,现有控制架构已难以满足高精度、低时延和海量连接的需求。为此,探索新型通信技术与控制系统的深度融合,成为提升工业控制系统整体效能的重要路径。近

年来,第五代移动通信技术(5G)凭借其高带宽、低时延、大连接及高可靠性等优势,为工业控制系统的演进提供了关键支撑^[3]。在此背景下,将5G与NCS进行有机融合,构建具有高实时性能和强鲁棒性的工业控制系统架构,已成为当前工业自动化与信息通信技术交叉领域的重要研究方向^[4]。本文旨在提出一种适应高动态工业环境的新型控制体系结构,期望能够为5G技术在工业控制领域的深度应用提供理论参考与实践指导。

二、5G与NCS融合的工业控制系统架构设计

工业控制系统的演进正朝着泛在感知、云边端协同与智能决策的方向发展^[5]。传统分层架构如 Purdue 模型在应对日益增长的无线化和灵活化需求时显得力不从心^[6]。因此，本章旨在构建一个基于 5G 与 NCS 深度融合的新型工业控制系统架构，该架构旨在充分利用 5G 的通信优势与 NCS 的控制理论，实现控制逻辑与物理过程的深度协同。所提出的架构不仅关注于功能的实现，更着重于为系统的性能优化提供底层支撑。

(一) 融合系统总体架构与逻辑层次

本文设计的基于 5G 与 NCS 融合的工业控制系统总体架构可分为智能感知与执行层、5G 通信网络层以及云边协同控制层。智能感知与执行层由部署在工业现场的大量传感器与执行器构成，是系统的“神经末梢”。传感器负责采集如温度、压力、机械臂姿态、图像等物理世界的的数据，而执行器则负责接收控制指令并驱动设备完成特定动作。与传统架构不同，本层中的设备均通过 5G 工业模组或终端接入网络，

表 1 典型工业场景下 5G 网络通信性能实测统计

场景类型	平均时延 (ms)	时延抖动 (ms)	数据包丢失率 (%)	适用控制业务示例
极低时延控制场景	12.5	± 2.1	0.005	高精度运动控制、机器人协同作业
常规闭环控制场景	18.3	± 4.7	0.012	PLC 逻辑控制、过程定值调节
海量传感数据上传场景	25.6	± 8.9	0.028	设备状态监测、生产环境感知
非实时监控与配置场景	48.2	± 15.3	0.045	生产数据采集、参数远程下发

然而，这一过程不可避免地会受到网络引入的时延、数据包丢失以及时序错乱等因素的影响。为了量化分析这些非理想因素对系统性能的影响，并为后续优化提供依据，本文对 5G 网络在典型工业场景下的关键性能指标进行了测试与统计。测试模拟了在不同网络负载和移动性场景下，系统端到端时延与数据包丢失率的分布情况，结果如下表所示。这些数据清晰地表明，即使在优化的网络条件下，时延和丢包依然存在，且其统计特性是进行控制器设计和网络配置时必须考虑的关键参数。

三、系统性能优化与实验验证

(一) 面向时延与丢包的控制器优化策略

在构建了 5G 与 NCS 融合的工业控制系统架构之后，如何保障并优化其在实际工业环境中的性能表现成为关键问题^[9]。本章将围绕系统面临的网络不确定性与控制性能之间

实现了从有线到无线的根本性转变，极大地提升了设备部署的灵活性与可移动性。5G 通信网络层是本架构的核心纽带，它并非一个简单的透明传输通道，而是一个具备资源智能调度能力的系统^[7]。该层通过网络切片技术，为工业控制业务创建了一个或多个专用的、虚拟化的、隔离的逻辑网络。

(二) 关键组件与 NCS 建模

在该融合架构中，关键组件的设计至关重要。首先，5G-UCNE 作为核心网元，负责管理控制面功能，并依据业务需求动态调配网络切片资源^[8]。其次，部署于现场的 5G-CPE 为各类工业设备提供统一的无线接入能力。最为关键的是，系统引入了 NCS 建模方法，将整个控制回路抽象为一个受通信网络影响的离散时间系统模型。在此模型中，传感器以固定或事件驱动的方式对受控对象的状态进行采样，采样数据被打包成数据包，通过 5G 网络传输至边缘或云端的控制器。控制器根据接收到的数据计算出控制量，再经由 5G 网络下发至执行器，从而完成闭环控制。

的矛盾，提出针对性的优化策略，并通过构建仿真实验平台，对所提架构及优化方法的有效性进行验证与分析。网络诱导时延与数据包丢失是影响 NCS 稳定性和控制性能的最主要因素。在 5G 网络中，尽管其技术特性能够显著降低这些指标的平均值，但其随机性依然存在，无法完全消除。因此，直接采用传统的确定性控制设计方法难以达到理想效果。为此，本文提出一种基于模糊自适应 PID 与事件触发机制相结合的复合控制策略。

(二) 基于网络切片的资源动态调度

5G 网络切片技术为性能优化提供了底层资源保障，但静态的切片配置难以应对工业现场动态变化的业务需求。为了实现更精细化的资源管理，本文设计了一种基于业务预测与 QoS 感知的动态切片资源调度算法。该算法运行在 MEC 服务器上，通过与上层应用系统的信息交互，能够提前感知生产任务的调度计划。

表 2 动态切片资源调度算法性能仿真结果对比

业务优先级	资源分配策略	平均端到端时延 (ms)	时延抖动 (ms)	数据包丢失率 (%)	吞吐量保障率 (%)
高 (实时控制)	静态切片	16.8	± 5.2	0.018	95.5
	动态调度	14.1	± 3.0	0.007	99.2
中 (状态监控)	静态切片	35.5	± 10.8	0.035	98
	动态调度	28.3	± 9.1	0.025	97.5
低 (数据备份)	静态切片	102.4	± 25.6	0.105	99.8
	动态调度	135.7	± 41.2	0.158	99.5

该动态调度机制的核心是建立一个以时延、丢包率和吞吐量为关键绩效指标的多目标优化函数。算法周期性地监测各业务流的实际 QoS 指标，并与切片建立时承诺的 SLA 进行比对。一旦某个切片的性能指标逼近 SLA 阈值，算法便会触发资源重分配过程，优先从资源利用率较低或业务优先级较低的切片中调剂部分资源给需求迫切的切片。为了验证该算法的有效性，我们在仿真环境中设置了三种不同优先级的业务流共存场景，并对比了采用静态切片与动态调度算法后的性能差异。数据清晰地表明，动态调度算法能够在高负载情况下，显著保障高优先级业务的性能，使其时延和丢包率维持在可接受范围内，而低优先级业务的性能虽有下降但未导致系统拥塞，体现了良好的资源利用效率和业务区分能力。

四、研究结论

本文围绕工业控制系统在迈向智能化、柔性化进程中所面临的实际挑战，系统性地探讨了 5G 通信技术与网络化控制系统 (NCS) 深度融合的架构设计与性能优化问题。当前，工业互联网的快速发展对控制系统的实时性、可靠性及动态重构能力提出了更高要求，而传统控制网络在带宽、时延及连接灵活性方面存在明显瓶颈。为此，本研究构建了一个包含智能感知与执行层、5G 通信网络层及云边协同控制层的三层融合架构，旨在从系统层面统一协调感知、通信与控制资源，以支撑高动态、高并发的工业应用场景。

在架构设计层面，本文提出的融合模型以 5G 网络为核心通信基础设施，重点整合了网络切片与移动边缘计算 (MEC) 两大关键技术。智能感知与执行层部署具备一定计算能力的智能节点，除完成基本的数据采集与指令执行外，还能实现本地预处理与轻量化智能分析，从而减轻上行数据传输压力。5G 通信网络层通过端到端网络切片技术，为不同类型的工业业务——如运动控制、机器视觉、远程监控等

——提供可定制、可隔离且服务质量 (QoS) 可保障的虚拟专网，有效解决了异构业务流在共享网络中共存时的资源竞争与干扰问题。云边协同控制层则依托 MEC 设备部署边缘控制器，实现部分关键控制功能的就近处理，降低端到端时延，并与云端平台协同完成大规模数据的存储、建模与优化决策，形成“边缘实时控制+云端全局优化”的一体化控制模式。

在控制策略方面，针对 5G 网络中难以完全避免的时延抖动、丢包等非理想传输条件对控制品质造成的影响，本文将网络不确定性因素纳入 NCS 的建模与设计框架，提出了模糊自适应 PID 控制与事件触发机制相结合的复合控制策略。该策略一方面借助模糊推理实时调整 PID 参数，以适应网络动态变化；另一方面通过设计合理的事件触发条件，减少非必要的数据传输，在保证系统稳定的同时显著降低通信资源消耗。仿真结果表明，该策略在时变时延与随机丢包场景下仍能维持良好的控制精度与系统稳定性。

在资源管理层面，为提升网络资源配置与工业控制需求之间的匹配效率，本文进一步提出了基于业务预测的动态切片资源调度算法。该算法通过分析控制业务的周期特征与流量模式，预测未来一段时间内的资源需求，并据此对网络切片带宽和计算资源进行动态调整，从而实现按需分配与弹性伸缩，提高整体资源利用效率，尤其适用于具有间歇性高负载特征的多任务工业场景。

综上所述，本研究通过架构、控制与资源调度三个层面的协同设计，构建了一套适应 5G 环境的网络化控制解决方案。仿真实验验证表明，所提方法在时延敏感性与资源受限条件下均能有效提升系统的控制品质与鲁棒性，为工业控制系统向智能化、柔性化演进提供了有价值的理论支撑与技术路径。未来的研究工作将聚焦于在真实工业环境中部署试验平台，进一步验证架构的可行性，并探索引入人工智能方法以实现更精准的网络状态感知与控制参数自整定。

参考文献

- [1] 连建奎. 网络化控制下的化工工业自动化系统安全管理研究[J]. 天津化工, 2025, 39 (04): 157-159.
 - [2] 王姝婷. DoS 攻击下网络化饱和系统动态记忆事件触发控制[D]. 大连交通大学, 2025.
 - [3] 胡阳阳. 面向网络化系统的自适应事件触发模糊控制研究[D]. 烟台大学, 2025.
 - [4] 丁彤彤. DoS 攻击下网络化控制系统的故障检测[D]. 曲阜师范大学, 2025.
 - [5] 邵林芳. 欺骗攻击下非线性网络化系统的自适应跟踪控制[D]. 曲阜师范大学, 2025.
 - [6] 吴永伟. DoS 攻击下网络化切换系统的事件触发安全控制[D]. 曲阜师范大学, 2025.
 - [7] 卫昭新. 基于网络化控制的化工工业自动化系统安全研究[J]. 自动化与仪器仪表, 2024, (08): 159-162.
 - [8] 付祥夫; 李荣义; 程耀楠; 张为. 工业网络化制造及应用[M]. 化学工业出版社: 202308. 229.
 - [9] 陈雪雅, 殷明明, 张晓海, 王琰琳. 基于云端架构的工业控制系统网络化的研究[J]. 电子制作, 2020, (18): 8-9.
- 作者简介: 王佳, 1990.5, 男, 汉族, 陕西韩城人, 本科, 工程师, 研究方向: 电气工程。