



文章编号: 1671-251X(2025)01-0001-10

DOI: 10.13272/j.issn.1671-251x.18229

无线网络化控制系统: 简要介绍及最新进展

刘晚春, 李永会

(悉尼大学 电气与信息工程学院, 澳大利亚 悉尼 2006)

摘要: 无线网络化控制系统(WNCS)将无线通信技术与控制系统深度融合, 成为物联网(IoT)、工业物联网(IIoT)及触觉互联网(TI)的重要组成部分。系统性地讨论了WNCS的基本架构、关键组成和主要性能指标, 并深入分析了应对延迟、数据包丢失和能耗等挑战的先进控制算法, 包括模型预测控制(MPC)、鲁棒控制、自适应控制及基于事件触发的控制(ETC)。总结了WNCS最新研究进展, 如延迟、数据速率和可靠性之间的权衡, 带有可变数据包长度的无线反馈控制, 无编码数据传输, 最优下行-上行调度, 实时远程估计与混合自动重传请求(HARQ), 空中计算与优化, 远程状态估计的稳定性条件, 深度学习联合估计-控制-调度。展望了WNCS未来发展方向, 如5G、边缘计算和人工智能(AI)技术在WNCS中的应用, 包括跨层设计、资源优化和安全性增强。研究旨在提供系统全面的技术指导和设计理念, 以推动WNCS在工业自动化、智能基础设施等领域的广泛应用。

关键词: 无线网络化控制系统; 模型预测控制; 网络物理系统; 工业物联网; 无线通信; 控制系统

中图分类号: TD655

文献标志码: A

Wireless networked control systems: an overview and recent developments

LIU Wanchun, LI Yonghui

(School of Electrical and Computer Engineering, The University of Sydney, Sydney 2006, Australia)

Abstract: Wireless Networked Control Systems (WNCS) integrate wireless communication technologies with control systems, becoming an essential part of the Internet of Things (IoT), Industrial Internet of Things (IIoT), and Tactile Internet (TI). This paper systematically discusses the basic architecture, key components, and main performance metrics of WNCS. It also provides an in-depth analysis of advanced control algorithms developed to address challenges such as latency, packet loss, and energy consumption. These algorithms include Model Predictive Control (MPC), Robust Control, Adaptive Control, and Event-Triggered Control (ETC). Recent advancements in WNCS research are summarized, covering topics such as the trade-offs between latency, data rate, and reliability, wireless feedback control with variable packet lengths, uncoded data transmission, optimal downlink-uplink scheduling, real-time remote estimation, Hybrid Automatic Repeat Request (HARQ), air computing and optimization, stability conditions for remote state estimation, and the integration of deep learning for joint estimation, control, and scheduling. The paper also explores the future directions of WNCS development, including the application of 5G, Edge Computing, and Artificial Intelligence (AI) technologies, with a focus on cross-layer design, resource optimization, and enhanced security. The research provides comprehensive technical guidance and design concepts to drive the widespread adoption of WNCS in industrial automation, smart infrastructure, and beyond.

Key words: wireless networked control systems; model predictive control; cyber-physical system; industrial Internet of things; wireless communication; control system

收稿日期: 2024-11-21; 修回日期: 2024-12-21; 责任编辑: 盛男。

作者简介: 刘晚春(1988—), 女, 江西余干人, 博士, 研究方向为无线通信与无线网络控制系统, E-mail: wanchun.liu@sydney.edu.au。

引用格式: 刘晚春, 李永会. 无线网络化控制系统: 简要介绍及最新进展[J]. 工矿自动化, 2025, 51(1): 1-10.

LIU Wanchun, LI Yonghui. Wireless networked control systems: an overview and recent developments[J]. Journal of Mine Automation, 2025, 51(1): 1-10.



扫码移动阅读

0 引言

无线网络化控制系统 (Wireless Networked Control System, WNCS) 代表了无线通信技术与控制系统的关键交汇点, 使得物理过程能够通过无线网络进行实时监测和控制。随着现代工程系统变得越来越复杂和互联, WNCS 已经在从工业自动化和汽车系统到航空航天、建筑管理和智能基础设施等应用中成为基础性技术。

WNCS 的兴起得益于无线网络、传感器和嵌入式计算的进步, 这些进步共同促进了控制系统与通信网络的无缝集成。在典型的 WNCS 中, 部署在物理环境中的传感器节点收集数据, 并通过无线方式将数据传输到控制器。控制器处理这些数据, 并向执行器发出命令, 执行器随后影响物理系统的动态。这种架构是网络物理系统 (Cyber Physical Systems, CPS)、物联网 (Internet of Things, IoT) 及触觉互联网 (Tactile Internet, TI) 运行的核心, 在这些系统中与物理世界的实时交互至关重要^[1-2]。

随着技术的发展, WNCS 在各个行业领域的重要性逐渐增加。例如, 在工业自动化中, WNCS 提供了灵活、经济高效且可扩展的控制解决方案, 这是实施工业 4.0 计划的关键^[3]。在汽车和航空航天工业中, WNCS 有助于开发高级驾驶辅助系统 (Advanced Driving Assistance System, ADAS) 和线传飞行技术, 从而提高安全性和性能。WNCS 的适应性也使其成为建筑管理系统的理想选择, 在这些系统中, 通过精确的环境控制, WNCS 能够提高能源效率和居住者的舒适度^[4]。

然而, 从传统的有线控制系统过渡到 WNCS 会带来许多挑战, 这需要新的设计方法。与有线控制系统不同, WNCS 必须应对无线通信固有的不可靠性和延迟。传输延迟、数据包丢失和网络拥塞等因素会对控制系统的稳定性和性能产生不利影响, 导致潜在的安全隐患和经济损失^[5]。因此, WNCS 的设计需要在控制性能和通信可靠性之间取得平衡, 特别需要确保数据传输满足严格的延迟和可靠性要求。此外, 由于许多无线设备依赖有限的电池寿命或能量收集技术, 消除传感器和执行器的有线连接还带来了能源效率方面的额外限制^[6]。

最近, WNCS 的进展主要集中在通过控制系统设计和无线网络优化的创新来应对这些挑战。例如, 开发能够容忍通信延迟和数据包丢失的自适应控制算法, 显著提高了 WNCS 在动态环境中的鲁棒性^[7]。同样, 诸如 IEEE 802.15.4 标准和新兴的低功

耗广域网络 (Low Power Wide Area Network, LPWAN) 等无线通信协议的进步提高了 WNCS 的可靠性和能源效率, 使其能够在更广泛的应用中部署^[8]。尽管取得了这些进展, 研究人员仍在继续探索新的策略, 以优化 WNCS 中控制系统与通信系统之间的交互, 尤其是在 5G、边缘计算和人工智能 (Artificial Intelligence, AI) 等新兴技术为提升系统性能和可扩展性开辟了新可能性的情况下^[9]。

本文简要介绍了 WNCS, 概述了其基本原理和关键组成部分; 深入探讨了该领域的最新进展, 重点介绍了控制系统设计和无线通信的创新方法如何应对 WNCS 面临的挑战; 通过对最新发展的调查和对新兴趋势的识别, 旨在提供对 WNCS 当前状态及其未来发展方向的全面概述。

1 WNCS 简介

1.1 定义与概述

WNCS 是一类通过无线通信网络闭合控制回路的控制系统。与依赖有线连接的传统控制系统不同, WNCS 使用无线网络在传感器、控制器和执行器之间传输数据。这种架构在系统设计和部署中引入了灵活性, 但也带来了与通信可靠性、延迟和能源效率相关的挑战^[10]。

1.2 历史背景与演进

随着无线通信技术的进步, WNCS 的概念也随之演变。最初, 控制系统完全依赖有线连接, 这提供了可靠的高速通信。然而, 随着 20 世纪后期无线技术的出现, 人们开始探索控制系统的无线替代方案。早期的 WNCS 研究主要集中在理解无线通信对控制性能的影响, 特别是在延迟和数据包丢失方面^[11]。随着无线协议和计算能力的改进, WNCS 逐渐在包括工业自动化、智能电网和自主车辆在内的广泛应用中变得可行^[1]。

1.3 关键应用及行业影响

由于其灵活性、可扩展性和易于安装, WNCS 在各个行业中的部署越来越多。在工业自动化中, WNCS 使制造过程的实时监测和控制成为可能, 从而提高了效率并减少了停机时间^[3]。在汽车领域, WNCS 促进了 ADAS 和车联网 (Vehicle-to-Everything, V2X) 通信的实施, 从而提高了安全性和驾驶体验^[12]。WNCS 的影响还扩展到智能基础设施领域, 如 WNCS 被用于建筑管理系统, 以优化能源使用和环境控制^[13]。WNCS 在这些领域的集成对于推进工业 4.0 和智慧城市的发展具有重要作用^[2]。

2 WNCS 基本概念与架构

2.1 WNCS 基本组成

WNCS 的基本组成可分为 4 个主要部分——传感器、控制器、执行器和无线通信网络, 如图 1 所示。这些组成部分共同构成了闭合控制回路, 支持物理系统的实时监测和控制。传感器负责采集环境数据, 控制器根据数据计算控制命令, 执行器实施相应操作, 而无线通信网络在各部分之间传输信息。这种分布式架构赋予了 WNCS 高度的灵活性和可扩展性, 但也引入了延迟、数据包丢失和能量效率等方面的设计挑战。以下分别对每个组成部分进行详细描述。

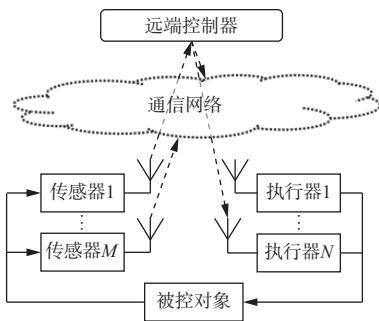


图 1 WNCS 基本架构

Fig. 1 Basic architecture of wireless networked control system(WNCS)

1) 传感器是 WNCS 中的主要信息来源, 负责监测温度、压力、湿度或运动等各种物理参数。这些传感器通常分布在被控环境中。在无线设置中, 传感器配备了无线电收发器, 使其能够通过无线网络将数据传输到控制器。传感器的设计必须高度关注能源效率, 因为传感器通常由电池供电, 需要长时间运行且无需频繁维护^[14]。

2) 控制器是 WNCS 的决策单元。它接收来自传感器的数据, 根据控制算法对其进行处理, 并生成发送到执行器的控制命令。在 WNCS 中, 控制器必须能够处理由无线通信引入的不确定性, 例如可变延迟、数据包丢失和抖动。常见的控制算法包括 PID 控制、模型预测控制 (Model Predictive Control, MPC) 和线性二次调节 (Linear Quadratic Regulator, LQR), 这些方法通常需要调整以减轻通信不完善的影响^[15]。

3) 执行器是控制回路中的最后一个元素, 接收来自控制器的命令并作用于物理系统, 以实现所需的响应。WNCS 中执行器的性能在很大程度上取决于接收命令的可靠性和时效性。延迟或数据包丢失可能导致性能下降甚至系统不稳定, 使执行器在确

保控制过程达到预期规格方面的作用至关重要^[4]。

4) 无线通信网络是 WNCS 的骨干, 促进了传感器、控制器和执行器之间的数据交换。网络设计需要综合考虑延迟、带宽、可靠性和能源效率等因素。常用的无线通信协议包括 IEEE 802.15.4 (ZigBee)、WiFi 和蓝牙, 它们在覆盖范围、功耗和数据速率之间提供了不同的权衡^[16]。

2.2 WNCS 通信协议

WNCS 可以利用各种无线通信协议, 每种协议都有其自身的特点和权衡。IEEE 802.15.4 (ZigBee) 因其低功耗和网状网络而广泛用于工业应用^[8]。WiFi 提供更高的数据速率和更广的覆盖范围, 但以增加的功耗为代价。蓝牙通常用于数据速率要求较低的短距离应用^[17]。WNCS 需要支持实时数据交换、延迟最小且可靠性高的通信协议。控制系统的实时性要求需要协议能够保证关键数据的及时传输。实时通信通常涵盖时间同步、服务质量 (Quality of Service, QoS) 机制以保障控制消息优先传输, 以及具备处理数据包丢失情况的重传协议, 并且不会引入显著的延迟^[18]。

2.3 WNCS 中的系统模型

WNCS 的系统模型需要同时描述物理过程的动态行为和无线通信网络的特性。这种模型不仅要捕捉控制系统的响应特性, 还要体现通信网络的复杂性及其对控制性能的影响。系统模型通常包括 3 个层次: 控制模型、网络模型和综合模型。这 3 个部分相互联系, 全面反映了 WNCS 中控制信号、物理系统和通信网络的复杂交互关系。

控制模型描述了物理系统在控制输入下的动态行为, 是 WNCS 设计的核心部分。

1) 传统模型的局限性。控制模型通常采用状态空间表示或传递函数的形式, 这些工具擅长描述系统的输入-输出关系^[19]。然而, 在无线环境中, 这些模型需要调整, 以应对由通信网络引发的不确定性。例如, 传输延迟可能导致系统接收到的控制信号过时, 从而降低性能甚至引发不稳定^[20]。

2) 鲁棒性改进。为了增强系统对网络波动的适应性, 可以使用鲁棒控制理论 (如 H_∞ 控制), 通过设计适应网络特性的反馈增益来抵抗延迟和数据丢失。此外, MPC 等预测型算法可以根据估计的未来系统状态, 主动应对网络不确定性。这不仅提高了系统的稳定性, 还能够在延迟环境下保持较高的性能。

3) 动态适应能力。在实际应用中, WNCS 常面临环境的动态变化, 例如车辆速度变化或传感器位

置漂移。为此,控制模型需要融入自适应控制技术,通过实时更新参数应对物理和网络环境的变化。

网络模型用于描述无线通信网络的行为特性,尤其是延迟、数据包丢失和带宽限制等。

1) 随机特性建模。无线网络的固有随机性对控制系统提出了挑战。网络模型通常使用随机过程(如泊松分布)或马尔可夫链来表征数据包丢失的概率分布和延迟行为。例如,马尔可夫链模型可精确反映多路径干扰或动态拓扑变化对通信的影响。

2) 现代建模方法。随着数据驱动方法的发展,基于机器学习的网络模型逐渐兴起。这种方法通过从历史通信数据中学习模式,能够更准确地预测网络性能。特别是在高干扰或低信号环境中,机器学习方法可有效捕捉网络条件的动态变化,从而提高模型的适用性。

3) 协议性能建模。网络模型还需反映通信协议的性能。例如,IEEE 802.15.4 协议的低功耗特性可能导致延迟增加,而 WiFi 协议的高带宽特性则可能带来更高的能耗。通过对协议特性的建模,设计人员可以在性能和资源消耗之间进行权衡。

综合模型将控制模型与网络模型结合^[21],全面捕捉控制系统和通信网络之间的交互关系。

1) 联合分析。综合模型能够量化网络特性对控制性能的影响,例如延迟对系统稳定性的作用或数据包丢失对控制精度的损害。通过综合分析,设计人员可以评估不同网络条件下的系统行为,为性能优化提供理论依据。

2) 优化工具。综合模型支持控制系统和通信系统的协同优化。例如,在带宽受限的场景下,综合模型可以指导控制算法对数据传输率的需求进行压缩,确保关键控制信号能够优先传输。此外,综合模型还可以帮助设计具有实时反馈的调度算法,动态调整通信资源分配。

3) 能耗优化。在资源受限的系统中(如远程传感器节点),综合模型可以量化能源消耗对系统性能的影响,指导控制策略与通信协议的联合设计。通过优化传输频率或调整控制算法的复杂度,可以显著延长系统寿命,同时保持必要的性能。

4) 未来技术的整合。随着 5G、边缘计算和 AI 等新兴技术的引入,综合模型需要进一步发展。例如,5G 提供的超低延迟特性将重新定义网络建模的假设,而边缘计算的引入则需要综合模型在多层级架构中平衡本地计算与云计算资源的分配。

2.4 WNCS 中的性能指标

WNCS 中的性能指标对于评估和确保系统的有

效运行至关重要。这些指标涵盖了通信和控制领域,反映了网络特性与控制系统性能之间的复杂相互作用。

稳定性是任何控制系统的基本要求,包括 WNCS。WNCS 中的稳定性指系统在遇到干扰后能够维持控制操作并返回到其所需状态的能力,即使在通信延迟、数据包丢失或其他网络引起干扰的情况下。稳定性分析通常涉及使用形式化方法,以确保闭环系统在不同条件下保持稳定。采样周期、网络引起的延迟和数据包丢失率等因素可能影响稳定性,因此,设计能够适应这些挑战的控制器至关重要^[22]。

控制系统成本是用于评估控制系统性能的关键指标。它代表了控制系统在实现其目标方面的整体效率。控制系统成本通常通过考虑系统状态偏离所需设定值的程度以及维持或恢复该状态所需的控制输入量来评估。在 WNCS 中,控制系统成本受到网络引起的延迟和数据包丢失的影响,这可能导致偏离设定值的增加,或需要更积极的控制措施来补偿。较低的控制成本表明系统更高效,维持所需性能所需的控制努力较少^[7]。

延迟是指从传感器测量发生或控制命令发出到信息被接收并采取行动之间的延迟。高延迟可能导致使用过时的数据进行控制决策,这可能导致次优或不稳定的行为。在 WNCS 中,最小化延迟至关重要,这通常需要使用能够预测延迟的预测控制策略,或设计能够减少通信延迟的网络协议^[23]。

在 WNCS 中,可靠性是指通信网络能够始终如一地在传感器、控制器和执行器之间无错误地传输数据的能力。干扰、信号强度减弱或网络拥塞导致的数据包丢失可能会降低 WNCS 的性能。高可靠性通过使用冗余、纠错技术和重传协议,以及能够容忍偶尔数据丢失而不会显著降低性能的鲁棒控制算法来实现^[24]。

能源效率在 WNCS 的无线传感器和执行器等组件中尤为重要,因为它们通常由电池供电。通过低功耗通信协议、占空比和能源感知路由算法来优化网络的能源消耗,以实现能源效率。必须仔细管理能源效率与通信或控制性能之间的权衡,以确保系统的长期运行^[5]。

3 WNCS 的设计与实现

WNCS 的设计核心在于开发适应无线通信特性的高效控制算法,同时优化网络资源配置,以确保系统的稳定性、实时性和鲁棒性。在这一节中,重点讨论 WNCS 中应用的主要控制算法,包括 MPC、鲁棒

控制、自适应控制、基于事件触发的控制(Event-Triggered Control, ETC)等算法, 以及针对这些算法的设计与改进。此外, 探讨了控制算法与网络条件之间的动态适配问题。

3.1 MPC 算法

MPC 是一类能够处理通信延迟和数据包丢失等网络不确定性的算法。MPC 基于系统的当前状态和预测的未来行为, 优化控制输入以最大化系统性能。

1) 基本原理。MPC 通过在线解决一个有限时域的最优控制问题, 生成一个未来的控制序列。控制器仅执行序列的第一个输入值, 并在下一时刻根据更新的系统状态重新计算。其目标函数通常由状态偏离目标值的代价与控制输入代价的加权和组成。

2) 针对延迟的改进。WNCS 中的延迟会导致系统接收到的控制信号滞后于实际状态, 从而降低性能甚至引发不稳定。为解决这一问题, 研究者引入预测延迟的扩展 MPC 算法。在优化问题中加入对延迟的预测, 使控制序列能够主动补偿通信延迟。

3) 面向数据包丢失的鲁棒性设计。数据包丢失的存在要求 MPC 能够在部分状态信息缺失的情况下继续运行。常见的方法包括利用状态观测器对丢失的数据进行估计, 或在控制序列中嵌入冗余信息, 以减少数据包丢失对系统的影响。

4) 分布式 MPC 的应用。对于大规模 WNCS, 集中式 MPC 计算负担过重且不具备扩展性。分布式 MPC 将优化问题分解为多个子问题, 由各子系统并行求解。通过在局部子问题中加入协同约束, 分布式 MPC 实现了对全局性能的优化。

3.2 鲁棒控制算法

鲁棒控制算法专注于在存在不确定性和干扰的情况下维持系统的稳定性。H ∞ 控制是最典型的鲁棒控制算法之一, 它通过最小化系统对最坏情况下干扰的增益, 提高了系统的抗干扰能力。

1) H ∞ 控制器设计。在 H ∞ 控制框架下, 系统的性能指标通过一个二次型代价函数衡量, 同时约束系统的增益不超过某一设定值。设计过程通常涉及解一个线性矩阵不等式(Linear Matrix Inequality, LMI)问题, 用以计算最优的控制增益矩阵。

2) 针对随机网络的扩展。在无线网络中, 随机的通信延迟和数据包丢失显著影响控制性能。结合 H ∞ 控制理论的随机控制方法(如随机 Lyapunov 稳定性分析)能够有效应对这些挑战。通过引入网络特性的概率分布, 可以评估控制系统在随机网络条件下的性能, 并优化控制器参数。

3) 抗扰动优化。鲁棒控制还可以与干扰观测器

结合, 实时估计系统所受的外部干扰, 并通过动态调整控制输入进行补偿。这种方法特别适合工业环境中具有高干扰水平的场景。

3.3 自适应控制算法

自适应控制通过实时调整控制器参数, 应对系统动态和网络条件的变化。

1) 参数自适应控制算法。参数自适应控制算法(如模型参考自适应控制)根据实时观测的系统输出和参考模型的差异, 动态更新控制器增益。这一方法在 WNCS 中可以有效应对通信信道质量波动导致的性能退化。

2) 基于学习的自适应控制。近年来, 结合深度学习的自适应控制方法受到关注。通过使用深度神经网络(Deep Neural Network, DNN)预测网络条件的变化, 系统可以提前调整控制策略。例如, DNN 可以根据历史数据预测未来的延迟模式, 从而优化控制器的响应。

3) 应用场景。自适应控制特别适合具有非线性动态或动态变化的系统, 如无人驾驶车辆和移动机器人。这些系统对实时性和鲁棒性要求极高, 自适应控制算法能够根据环境变化及时优化性能。

3.4 ETC 算法

ETC 是一种在满足特定条件时才更新控制信号的策略, 旨在减少数据传输频率以节省网络资源。

1) 触发条件设计。常见的触发条件包括状态误差超过设定阈值或预测控制性能的下降超过预期。通过精心设计触发条件, ETC 能够在维持系统稳定性的同时显著减少通信负载。

2) 分布式 ETC 算法。在分布式 WNCS 中, 各子系统的控制器可以独立运行触发机制, 从而进一步降低全局通信需求。协作式触发机制允许控制器在必要时共享状态信息, 以优化全局性能。

3) 鲁棒性与稳定性分析。ETC 需要确保在触发间隔内系统仍然稳定。通过利用 Lyapunov 函数分析, 可以证明特定触发策略下系统的稳定性, 并优化触发频率。

4 WNCS 的挑战

4.1 通信挑战

无线网络中的延迟可能是 WNCS 中的一个显著挑战, 因为它可能会在控制回路中引入延迟, 从而导致系统失稳。管理延迟需要仔细设计控制算法和通信协议, 以确保及时的数据交换^[25]。

由于干扰、信号衰减或网络拥塞导致的数据包丢失可能会导致控制命令丢失或延迟, 降低 WNCS

的性能。通常采用冗余、重传协议和纠错码等策略来减轻数据包丢失的影响^[26]。

WNCS 必须在无线网络提供的有限带宽内运行, 这可能会限制可以传输的数据量。有效利用带宽至关重要, 这需要压缩传感器数据和优先处理控制消息^[27]。

4.2 控制挑战

在通信不可靠的情况下保持系统稳定性是 WNCS 的核心挑战。控制算法必须足够鲁棒, 能够处理不同程度的延迟和数据包丢失, 而不会影响系统的稳定性^[28]。

WNCS 必须设计得足够有弹性, 以适应网络条件的变化, 例如信号强度波动、干扰水平变化和动态拓扑结构。这需要能够实时适应变化的网络特性的自适应控制策略^[29]。

4.3 能源限制

许多 WNCS 组件, 特别是传感器和执行器, 由电池供电或依赖于能量收集。在确保可靠通信和控制的同时延长电池寿命是一个重大挑战。这通常涉及能源消耗、通信频率和控制性能之间的权衡^[6]。

开发节能的通信协议和控制算法对于 WNCS 的长期运行至关重要。常用的技术包括低功耗监听、自适应占空比和能量感知路由, 以在不牺牲系统性能的情况下减少能源消耗^[30]。

5 前沿研究

WNCS 领域, 尤其是在工业物联网(Industrial Internet of Things, IIoT)背景下, 已经取得了显著的进展。最近的研究主要集中在延迟、数据速率和可靠性之间的关键权衡, 这对 WNCS 的性能至关重要。以下讨论综合了该领域最新和最先进的贡献, 提供了当前最先进技术的全面概述。

5.1 延迟、数据速率和可靠性之间的权衡

延迟、数据速率和可靠性之间的复杂平衡构成了现代 WNCS 的基石, 特别是在实时控制至关重要的工业应用中。该领域的最新研究深入分析了这 3 个关键参数固有的冲突要求所带来的挑战。例如, 一方面, 延迟是控制系统中的关键因素, 因为反馈延迟可能导致系统不稳定或性能下降。另一方面, 数据速率对于确保传输足够的信息以实现精确控制至关重要。然而, 增加数据速率通常会以延迟增加或可靠性降低为代价, 这归因于无线通信信道的限制。

这部分研究提出了一个理论框架, 探讨了延迟、数据速率和可靠性之间的相互作用, 提供了关于如

何管理这些参数以优化系统性能的见解。所提出的模型和算法旨在平衡这些权衡, 确保系统在大规模 IIoT 部署的限制条件下仍保持鲁棒性和效率。通过仔细分析这些相互作用, 研究强调了控制信号的可靠性, 即确保它们准确及时地传输, 对于保持操作效率至关重要。这些研究中的权衡特别适用于控制系统与物理过程之间需要高度同步的场景, 因为任何不一致都会对工业操作产生严重影响^[31]。

5.2 带有可变数据包长度的无线反馈控制

在延迟、数据速率和可靠性权衡的基础上, 进一步研究引入了无线反馈控制系统中可变数据包长度的创新概念。这对 IIoT 应用特别重要, 因为该应用中的通信资源通常受到限制, 网络环境可能高度动态。传统的控制系统依赖于固定的数据包大小, 无法适应无线信道条件的变化。这可能导致效率低(如浪费带宽或增加误码率), 从而最终降低控制系统的性能。

研究提出了一种根据实时网络条件动态调整数据包长度的系统, 从而使控制系统能够更好地适应信道质量的波动。通过改变数据包长度, 系统可以优化传输时间与误码率之间的权衡, 从而提高整体控制性能。这种策略增强了控制系统的鲁棒性, 使其更能抵御无线信道条件不可避免的变化。此外, 通过动态调整数据包长度以优化可用带宽的利用率, 这一策略在通信资源有限的工业环境中尤为适用, 因为这些环境对通信资源的高效利用至关重要。该系统的自适应性不仅提高了反馈控制回路的可靠性, 而且有助于减少延迟, 这对于维持控制系统的稳定性至关重要^[32]。

5.3 无编码数据传输

在偏离传统无线通信方法的显著研究中, 提出了用于 WNCS 的无编码数据传输概念。传统的通信系统通常依赖于复杂的编码方案, 以确保数据完整性和纠错。这些编码技术虽然在提高可靠性方面有效, 但它们也引入了额外的延迟和计算开销, 这可能对实时控制系统不利。在需要即时反馈的场景中, 编码和解码过程引起的延迟可能导致性能下降。

研究提出了一种消除这些复杂编码方案的创新方法, 从而简化了通信过程并减少了相关的延迟。无编码数据传输方法利用先进的错误检测机制, 能够快速识别和减少传输错误, 而无需重传或复杂的解码程序。这种方法允许更快的数据传输, 在时间敏感的工业应用中尤其具有优势, 在这些应用中, 哪怕是最小的延迟都可能产生重大后果。

此外, 取消编码还减少了系统的计算负担, 使其

更适合工业环境中常用的低功耗 IoT 设备。这种无编码策略为提高 WNCS 的效率提供了一种鲁棒的解决方案, 特别是在 IIoT 环境中, 控制信号的及时准确传输至关重要。研究表明, 该方法在不牺牲速度的情况下实现了高可靠性, 使其成为低延迟和高可靠性同时必需的关键应用的理想选择^[33]。

5.4 最优下行-上行调度

WNCS 中下行和上行传输的调度是另一项取得显著进展的重要研究领域。在 WNCS 中, 控制子系统和通信子系统之间的同步对于保持系统的稳定性和性能至关重要。然而, 无线网络的动态性, 加之需要支持多个设备和控制回路, 使得有效调度成为一项复杂的挑战。传统的调度算法通常无法考虑网络条件的变化及控制系统的具体需求, 导致性能次优。

最近的研究集中在开发能够实时适应网络条件变化的最优调度算法上。这些算法旨在最小化控制信号传输的延迟, 同时确保控制和通信子系统保持紧密同步。通过根据当前的网络状态和控制系统的具体需求动态分配通信资源, 这些调度算法能够显著减少控制信号传输和接收之间的延迟。

在保持 WNCS 的稳定性和性能方面, 有效调度的重要性不容低估。在通信延迟可能对系统可靠性产生严重影响的环境中(如高速制造或自动驾驶控制), 这些算法在确保控制系统平稳运行方面发挥了关键作用。研究强调, 最优调度不仅仅是关于最小化延迟, 还涉及确保控制信号在正确的时间传输, 保持控制回路的完整性并防止不稳定^[34]。

5.5 实时远程估计与混合 ARQ

通过创新地整合混合自动重传请求(Hybrid Automatic Repeat Request, HARQ)协议, 研究应对了 WNCS 中的实时远程估计挑战。实时远程估计是 WNCS 的一个关键组成部分, 其目标是基于通过无线信道传输的延迟或噪声观测值, 准确估计远程过程的状态。然而, 无线信道易受错误和数据包丢失的影响, 这可能显著降低状态估计的准确性, 并因此降低控制系统的性能。

研究探讨了使用 HARQ 协议通过结合纠错和重传的优势来提高远程状态估计的可靠性。HARQ 协议在无线信道不可靠的场景中特别有效, 因为其可以自动检测传输错误, 并仅在必要时请求重传, 从而提高接收到的数据的准确性。这种方法在 WNCS 中尤为有价值, 因为对于实时控制, 保持低延迟至关重要。

研究中提供的详细分析展示了使用 HARQ 协议时涉及的权衡, 特别是在延迟和可靠性方面。虽然

HARQ 可以提高远程状态估计的准确性, 但也因重传而引入了额外的延迟。研究仔细探究了这些权衡, 并提出了平衡它们的策略, 确保在不影响控制信号及时性的情况下实现 HARQ 的优势。研究结果强调了 HARQ 在优化 WNCS 性能方面的潜力, 特别是在无线信道频繁受干扰的环境中^[35]。

5.6 空中计算与优化

空中计算代表了 WNCS 设计的一个突破性转变, 提供了一种数据聚合和处理的新方法。传统的 WNCS 数据处理方法涉及从多个传感器收集数据, 将其传输到中央处理器, 然后执行必要的计算。然而, 这种方法可能会引入显著的延迟, 特别是在拥有大量传感器的大规模系统中。另一方面, 空中计算利用无线信道的固有特性, 直接在空中执行计算, 从而减少了集中处理的需求并最小化了延迟。

研究探讨了空中计算系统的优化, 重点研究了影响其性能的扩展规律。通过优化无线信道和计算过程的参数, 所提出的系统可以直接在数据传输过程中执行复杂的计算(如求和或平均)。这种方法不仅减少了与数据处理相关的延迟, 还降低了总体通信开销, 使其成为大规模 IIoT 应用的高效解决方案。

研究还深入探讨了与空中计算相关的挑战, 例如信道噪声和干扰的影响。研究提出了应对这些挑战的策略, 确保即使在嘈杂环境中计算仍然准确可靠。能够直接在空中执行计算为 WNCS 中的实时控制开辟了新可能性, 在 WNCS 中, 及时处理数据对于维持系统稳定性和性能至关重要。这一创新方法代表了该领域的重要进展, 提供了一种可广泛应用于工业的可扩展解决方案^[36]。

5.7 远程状态估计的稳定性条件

在 WNCS 中, 稳定性是一个关键问题, 尤其是在处理多个系统和信道时。在多个系统通过共享无线网络控制的场景中, 保持每个控制回路的稳定性变得非常复杂, 尤其是当无线信道受到衰落或其他形式的干扰时。该领域的研究主要集中在建立多个马尔可夫衰落信道上远程状态估计的稳定性条件。

研究结果提供了一个全面的框架, 用于分析 WNCS 在不同信道条件下的稳定性。研究引入了描述控制系统在通信信道受到衰落时的行为的数学模型, 并推导出了系统可以保持稳定性的条件。这些稳定性条件对于设计能够在不利网络条件下可靠运行的鲁棒控制系统至关重要。

通过解决衰落信道带来的挑战, 这项研究有助于开发更具弹性的 WNCS。研究中推导出的稳定性条件为通信质量与控制性能之间的权衡提供了宝贵

的见解,有助于系统设计者在分配通信资源时做出明智的决策。研究还探讨了这些稳定性条件对WNCS 整体性能的影响,强调了在控制和通信子系统之间保持平衡以确保系统可靠性的重要性^[37]。

5.8 深度学习联合估计-控制-调度

将深度学习技术集成到WNCS 中,开辟了联合估计、控制和调度的新可能性。传统的WNCS 方法通常将估计、控制和调度视为独立的过程,每个过程都有自己的一套优化标准。然而,这种分离可能导致性能次优,因为这些过程之间的相互依赖性没有得到充分利用。最近的研究提出了一种基于深度学习的方法,通过同时优化这3个相互关联的过程来解决这个问题。

该方法利用深度学习的预测能力来提高状态估计和控制的准确性,同时将与数据传输相关的延迟最小化。通过使用深度学习模型预测系统和无线信道的未来状态,框架可以做出更明智的决策,决定何时以及如何传输控制信号,从而优化调度过程。

这种方法代表了该领域的显著进展,提供了一个强大的工具,用于管理WNCS 在动态和不可预测环境中的复杂性。研究表明,通过考虑估计、控制和调度之间的相互作用,系统的整体性能可以显著提高。框架中使用的深度学习模型是在大数据集上训练的,使它们能够学习系统不同组件之间的复杂关系,并实时适应变化的条件。

将深度学习集成到WNCS 中,尤其是在环境高度动态的应用中(如自动驾驶车辆或智能工厂)前景广阔。通过优化从估计到调度的整个控制回路,该方法可以实现更高的效率和可靠性,成为WNCS 设计人员工具箱中的一个有价值的补充^[38]。

本文讨论的WNCS 进展代表了该领域的前沿研究,为应对IIoT 应用中延迟、可靠性和资源限制等挑战提供了创新解决方案。通过采用可变数据包长度、无编码数据传输和空中计算等新方法,研究人员正在为下一代WNCS 铺平道路,这些系统具有更高的效率、鲁棒性和可扩展性。这些贡献不仅改善了现有系统的性能,还为未来的工业自动化发展奠定了基础。

6 未来工作

WNCS 领域正在迅速发展,驱动其发展的动力是日益复杂和互联的工业环境的需求。尽管取得了显著的进展,但仍有若干关键研究领域有待进一步探索和创新。

未来研究的一个有前景方向是将WNCS 与5G、

边缘计算和AI 等新兴技术结合起来。5G 网络提供的超低延迟和高可靠性有可能显著提高WNCS 的性能,特别是在需要实时控制和数据密集操作的应用中。未来的工作可以集中于开发针对5G 支持的WNCS 优化的新控制算法和通信协议,利用网络的能力来改善系统响应和可靠性。

边缘计算是另一个具有巨大潜力来变革WNCS 的领域。通过将计算分布到更接近传感器和执行器的地方,边缘计算可以减少数据传输和处理相关的延迟,从而实现更快的控制回路。研究可以探讨如何将基于边缘的架构集成到现有的WNCS 框架中,可能会带来更具可扩展性和效率的系统。此外,在WNCS 中使用AI 和机器学习技术为自适应控制和决策提供了新机会。未来的研究可以探讨如何将AI 应用于基于实时网络条件和系统性能指标动态优化控制策略。

未来工作的另一个关键领域是开发更加鲁棒和节能的WNCS。随着WNCS 越来越多地部署在恶劣和资源受限的环境中(如远程工业站点或自动驾驶车辆),确保可靠运行且能源消耗最小变得至关重要。研究可以集中于增强WNCS 抵御网络故障、干扰和其他不利条件的能力,以及开发低功耗通信协议和能量收集技术,以延长无线设备的工作寿命。

安全性也是WNCS 中一个新兴的关注点,特别是随着这些系统成为关键基础设施和工业流程中不可或缺的一部分。未来研究可以解决WNCS 无线性质带来的独特安全挑战,例如窃听、篡改和拒绝服务攻击的风险。开发针对WNCS 特定需求的安全通信协议和入侵检测系统,将对于在不断演变的网络威胁下确保这些系统的安全性和可靠性至关重要。

控制和通信系统的协同设计仍存在广阔的创新空间。随着WNCS 的日益复杂,传统的控制算法和通信协议分开设计的方法可能已不再足够。未来可以探讨更集成的协同设计方法,从一开始就考虑控制和通信之间的相互依赖性,从而设计出更高效和鲁棒的系统。

7 结论

1) WNCS 已成为现代工程中的一项关键技术,使物理过程能够通过无线网络进行实时监测和控制。WNCS 的进展,特别是在IIoT 背景下,解决了从有线到无线控制系统过渡带来的许多挑战。通过关注延迟、数据速率和可靠性之间的关键权衡,最近的研究开发了增强WNCS 鲁棒性、效率和可扩展性的创新解决方案。

2) 可变数据包长度、无编码数据传输和最优调度算法的探索为如何优化动态和资源受限环境中的WNCS提供了新见解。此外, HARQ、空中计算和深度学习在联合估计-控制-调度中的集成成为提高系统性能和弹性开辟了新途径。

3) 随着WNCS的不断发展,新兴技术如5G、边缘计算和AI的集成,以及更节能和安全的系统的开发,将在塑造这一领域的未来中发挥关键作用。WNCS中的持续研究和创新不仅提高了现有系统的性能,还为下一代工业自动化、智能基础设施等领域的发展奠定了基础。

4) WNCS是一个迅速发展的领域,对广泛的行业有着重要影响。继续探索新技术和方法将是克服剩余挑战和释放WNCS未来几年全部潜力的关键。

参考文献(References):

- [1] WALSH G C, YE Hong, BUSHNELL L G. Stability analysis of networked control systems[J]. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 2002, 10(3): 438-446.
- [2] MONTESTRUQUE L A, ANTSAKLIS P J. Networked control systems: a model-based approach[C]. Mediterranean Conference on Control and Automation, Kusadasi, 2004: 1-6.
- [3] MENG M, DEL POBIL A P. Wireless networked control systems: a survey of recent trends[J]. *IEEE Industrial Electronics Magazine*, 2015, 9(3): 49-58.
- [4] PARK P, COLERI ERGEN S, FISCHIONE C, et al. Wireless network design for control systems: a survey[J]. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 2018, 20(2): 978-1013.
- [5] BAILLIEUL J, ANTSAKLIS P J. Control and communication challenges in networked real-time systems[J]. *Proceedings of the IEEE*, 2007, 95(1): 9-28.
- [6] GOLDSMITH A J, WICKER S B. Design challenges for energy-constrained ad hoc wireless networks[J]. *IEEE Wireless Communications*, 2002, 9(4): 8-27.
- [7] HESPANHA J P, NAGHSHTABRIZI P, XU Yonggang. A survey of recent results in networked control systems[J]. *Proceedings of the IEEE*, 2007, 95(1): 138-162.
- [8] CENA G, VALENZANO A. Industrial wired and wireless sensor networks: a survey[J]. *Journal of The Franklin Institute*, 2011, 348(1): 246-262.
- [9] SUN Yaohua, PENG Mugen, ZHOU Yangcheng, et al. Application of machine learning in wireless networks: key techniques and open issues[J]. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 2019, 21(4): 3072-3108.
- [10] BEMPORAD A, HEEMELS M. Networked control systems: introduction[J]. *European Journal of Control*, 2007, 13(2/3): 93-94.
- [11] ZHANG Wei, BRANICKY M S, PHILLIPS S M. Stability of networked control systems[J]. *IEEE Control Systems Magazine*, 2001, 21(1): 84-99.
- [12] ZHANG L M, ISHII H. Fault-tolerant control systems in the presence of wireless network-induced delays and packet losses[J]. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 2008, 16(5): 1023-1034.
- [13] WILLIG A. Recent and emerging topics in wireless industrial communications: a selection[J]. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 2008, 4(2): 102-124.
- [14] AKYILDIZ I F, SU Weilian, SANKARASUBRAMANIAM Y, et al. A survey on sensor networks[J]. *IEEE Communications Magazine*, 2002, 40(8): 102-114.
- [15] SENESKY M G, PAPEN G C, SASTRY S S. Multivariable adaptive control of MEMS gyroscopes[J]. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 2005, 13(1): 73-79.
- [16] VITTURI S, ZUNINO C, VALENZANO A. On the use of Ethernet at low speed levels: the EtherCAT case[J]. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 2006, 2(2): 75-81.
- [17] PALATTELLA M R, ACCETTURA N, VILAJOSANA X, et al. Standardized protocol stack for the Internet of (important) things[J]. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 2013, 15(3): 1389-1406.
- [18] STANKOVIC J A. Wireless sensor networks: From research to reality[J]. *ACM SIGBED Review*, 2004, 1(4): 1-6.
- [19] SCHENATO L, SINOPOLI B, FRANCESCHETTI M, et al. Foundations of control and estimation over lossy networks[J]. *Proceedings of the IEEE*, 2007, 95(1): 163-187.
- [20] ISHII H, BAŞAR T. Remote control of LTI systems over networks with state quantization[J]. *Systems & Control Letters*, 2005, 54(1): 15-31.
- [21] FU Minyue, XIE Lihua. The sector bound approach to quantized feedback control[J]. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2005, 50(11): 1698-1711.
- [22] ZHANG W, BRANICKY M S. Stability of networked control systems with time-varying transmission times[C]. American Control Conference, Arlington, 2001: 4926-4931.
- [23] LEONG A S, DEY S, QUEVEDO D E. Power allocation for error-prone multi-loop networked control systems with packet dropping links[J]. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2016, 61(8): 2067-2081.

- [24] FERRARI P, FLAMMINI A, RINALDI S, et al. A distributed synchronization and control technique for smart grid wide-area monitoring systems[J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2012, 61(5): 1074-1083.
- [25] VITTURI S, ZUNINO C, SAUTER T. Industrial communication systems and their future challenges: next-generation Ethernet, IIoT, and 5G[J]. *Proceedings of the IEEE*, 2019, 107(6): 944-961.
- [26] BRANICKY M S, PHILLIPS S M, ZHANG Wei. Stability of networked control systems: explicit analysis of delay[C]. American Control Conference, Chicago, 2002: 2352-2357.
- [27] ANTSAKLIS P, BAILLIEUL J. Special issue on technology of networked control systems[J]. *Proceedings of the IEEE*, 2007, 95(1): 5-8.
- [28] LI H, DOWER P M, KELLETT C M. Control design with communication constraints: a robust control framework[J]. *Automatica*, 2011, 47(9): 2047-2053.
- [29] FRANCESCHETTI M, COOK M, MEESTER R. Quantization and stabilization in large-scale networked control systems[J]. *Proceedings of the IEEE*, 2007, 95(1): 127-144.
- [30] ÅSTRÖM K J, WITTENMARK B. Computer-controlled systems: theory and design[M]. 3rd ed. Upper Saddle River: Prentice Hall, 1997.
- [31] LIU Wanchun, NAIR G, LI Yonghui, et al. On the latency, rate, and reliability tradeoff in wireless networked control systems for IIoT[J]. *IEEE Internet of Things Journal*, 2021, 8(2): 723-733.
- [32] HUANG Kang, LIU Wanchun, LI Yonghui, et al. Wireless feedback control with variable packet length for industrial IoT[J]. *IEEE Wireless Communications Letters*, 2020, 9(9): 1586-1590.
- [33] LIU Wanchun, POPOVSKI P, LI Yonghui, et al. Wireless networked control systems with coding-free data transmission for industrial IoT[J]. *IEEE Internet of Things Journal*, 2020, 7(3): 1788-1801.
- [34] HUANG Kang, LIU Wanchun, LI Yonghui, et al. Optimal downlink-uplink scheduling of wireless networked control for industrial IoT[J]. *IEEE Internet of Things Journal*, 2020, 7(3): 1756-1772.
- [35] HUANG Kang, LIU Wanchun, SHIRVANIMOGHADDAM M, et al. Real-time remote estimation with hybrid ARQ in wireless networked control[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2020, 19(5): 3490-3504.
- [36] LIU Wanchun, ZANG Xin, LI Yonghui, et al. Over-the-air computation systems: optimization, analysis and scaling laws[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2020, 19(8): 5488-5502.
- [37] LIU Wanchun, QUEVEDO D E, JOHANSSON K H, et al. Stability conditions for remote state estimation of multiple systems over multiple Markov fading channels[J]. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2023, 68(7): 4273-4280.
- [38] ZHAO Zihuai, LIU Wanchun, QUEVEDO D E, et al. Deep learning for wireless-networked systems: a joint estimation-control-scheduling approach[J]. *IEEE Internet of Things Journal*, 2024, 11(3): 4535-4550.