

通信延迟对工业自动化控制系统稳定性的影响及优化

于振

中油国际管道有限公司

DOI:10.32629/acair.v3i4.17899

[摘要] 对于工业自动化控制系统而言,通信网络所有的可靠性以及实时性,对于系统稳定性有着决定性的作用。随着工业互联网以及智能制造的迅速发展,控制系统的分布式特性越较大,通信延迟这一问题也变得日益突出,通信延迟不仅会致使控制信号出现滞后的情况,还可能引发系统震荡,造成性能下降,甚至导致系统不稳定。本文借助理论分析以及模型研究,对通信延迟给工业自动化控制系统动态特性造成的影响机理展开探讨,剖析延迟对系统稳定裕度以及响应性能产生的作用规律,提出涉及控制算法优化、网络调度改进以及系统容错设计的综合优化策略。研究结果显示,合理的延迟补偿以及网络优化技术可有效地减轻延迟带来的不利影响,提升系统的鲁棒性以及实时性,为智能制造环境下的高精度控制给予技术支持。

[关键词] 工业自动化; 通信延迟; 系统稳定性; 网络控制; 优化策略

中图分类号: S972.7+6 **文献标识码:** A

The Influence of Communication Delay on the Stability of Industrial Automation Control System and Its Optimization

Zhen Yu

CNPC International Pipeline Co., Ltd.

[Abstract] In industrial automation control systems, the reliability and real-time performance of communication networks play a decisive role in overall system stability. With the rapid development of the industrial Internet and intelligent manufacturing, the distributed nature of control systems has become increasingly prominent, leading to more significant communication delay issues. Communication delays not only cause lag in control signals but may also induce system oscillations, performance degradation, or even instability. Through theoretical analysis and model-based research, this paper investigates the mechanisms by which communication delays affect the dynamic characteristics of industrial automation control systems, analyzes their impact on system stability margins and response performance, and proposes comprehensive optimization strategies based on control algorithm enhancement, network scheduling improvement, and fault-tolerant system design. The research results indicate that appropriate delay compensation and network optimization techniques can effectively mitigate the adverse effects of communication delays, enhance system robustness and real-time capability, and provide technical support for high-precision control in intelligent manufacturing environments.

[Key words] industrial automation; communication delay; system stability; network control; optimization strategy

引言

随着工业4.0以及智能制造不断向前推进,工业自动化控制系统正渐渐从传统的集中式控制朝着分布式与网络化控制模式转变。在这样的背景下,各类传感器、执行器以及控制器借助工业网络来进行信息交互,网络通信出现的延迟、丢包以及带宽波动成为影响工业自动化控制系统性能的关键要素。通信延迟会影响控制信号的实时传输,还会改变系统的反馈特性,致使稳定

裕度降低以及响应时间变长,在复杂的工业现场,通信链路受到设备负载、网络拥塞以及环境干扰等多方面共同作用,延迟呈现出随机性和不确定性,如何在通信延迟存在的情况下保持系统稳定运行,是当前工业控制理论以及工程应用的关键研究方向。本文依据延迟特性展开,详细分析其对系统稳定性的影响,并且结合现代控制理论,提出可行的优化策略以及改进路径,为工业自动化系统的可靠设计与运行提供理论依据和技术支撑。

1 通信延迟在工业自动化控制系统中的特征分析

在通信延迟的分类以及特性方面,通信延迟主要包括固定延迟和随机延迟这两种类型。固定延迟一般是由物理传输距离、设备处理时间以及网络结构所决定的,而随机延迟则源自网络拥塞、信道干扰以及协议竞争等诸多因素。随机延迟具有时变性以及不可预测性,其对系统稳定性产生的影响更为复杂。随着工业以太网、无线传感网络等技术的投入应用,延迟的动态变化已然成为不容忽视的系统约束条件。

工业控制系统通信延迟产生的主要原因有三个,其一为网络层面的传输延迟,其中涉及信号在物理介质中的传播时间以及路由节点的转发时间,其二是协议处理延迟,像TCP/IP协议堆栈处理、数据打包与解包过程都属于此类,其三是设备层延迟,包含传感器采样与执行器响应时间。不同系统架构下延迟分布特征有所不同,在多层控制系统中,延迟的累积效应更为明显。

2 通信延迟对控制系统稳定性的影响机理

在闭环控制系统里,反馈信号存在延迟的情况,其作用等同于在系统传递函数中增添了一个时间滞后的项,致使系统的特征方程中出现指数形式。延迟会使系统极点位置发生改变,削弱相位裕度和增益裕度,导致系统稳定性降低。在高阶系统或者非线性系统中,延迟所引发的相位偏移会使系统出现振荡现象,甚至可能导致系统失稳。

(1) 延迟对系统频域特性的影响。从频域角度观察,通信延迟在频率响应中等同于引入了额外的负相移,会使系统的截止频率降低,系统带宽变窄,动态响应速度也随之变慢。延迟程度越大,系统的相位滞后越明显,抗干扰能力也会下降。要是延迟呈现出不可预测的状态,那么系统频率响应便会出现随机扰动现象,这会加大控制的难度。

(2) 延迟与系统稳定裕度存在着紧密的关系。稳定裕度是衡量系统在参数变化以及扰动情况下维持稳定能力的关键指标。当延迟增加时,相位裕度会随之下降,系统便容易趋近于临界稳定状态。有研究显示,一旦延迟时间超过系统固有周期的10%,稳定裕度就会明显降低。在设计控制器时要考虑延迟裕度补偿。

延迟对系统频域与稳定裕度影响的示例数据表

延迟时间(占系统固有周期比例)	相位裕度(°)	增益裕度(dB)	截止频率(rad/s)	系统带宽(Hz)	动态响应速度	稳定性评价
0%(无延迟)	55°	12 dB	18	2.9	最快	稳定
5%	42°	9 dB	15	2.4	略微变慢	较稳定
10%	30°	6 dB	12	1.9	明显变慢	临界稳定趋势
15%	18°	3 dB	8	1.3	变慢、振荡增强	不稳定风险显著
20%	8°	1 dB	5	0.8	响应严重滞后	接近失稳
25%	<0°	<0 dB	3	0.5	持续振荡	不稳定

3 通信延迟环境下的控制系统优化设计

为克服通信延迟带来的不利影响,有基于预测与补偿的控制算法,比如Smith预测控制、模型预测控制等。Smith预估控制会引入系统模型来补偿延迟,以此实现控制信号的实时校正。MPC利用系统动态模型预测未来输出,提前优化控制输入。这两种算法可以在一定程度上恢复系统的动态响应性能。

在多控制节点协同工作的工业系统的分布式控制中,需要构建分布式时钟同步以及延迟均衡机制,以保障各节点信号传输具有时间一致性。利用时间触发调度和优先级控制的方式,可以切实降低网络拥塞产生的随机延迟,实现系统的同步控制。

4 通信网络结构优化与实时性提升

4.1 网络拓扑与通信协议优化

在工业自动化系统中,网络拓扑结构对通信延迟的分布以及系统响应速度起着关键作用。恰当的拓扑设计可以有效减少信号传输节点数量,降低因链路拥堵和数据中转产生的延迟累积。若采用分层星形或总线型拓扑结构,数据传输路径将更简洁,节点间通信也更高效,可减少网络瓶颈问题,提升系统整体通信性能。基于此,对通信协议进行优化成为提升实时性的关键方式,像实时以太网和TSN等协议,可利用时间同步以及带宽预留机制,减少竞争性延迟以及数据冲突,保证关键控制信息可以按时进行传输,凭借拓扑结构优化与协议改进的协同运用,网络可在复杂环境中维持高带宽利用率以及低时延的特性。这种策略提高了系统通信的确定性与稳定性,还为工业控制网络达成高可靠、可预测的实时传输提供了坚实的技术保障。

4.2 带宽分配与流量调度技术

在工业自动化网络中,通信带宽资源存在着一定的局限性,不同类型的数据对于传输时延以及可靠性的要求有着较大的差异,借助带宽动态分配以及优先级调度机制,可以保证关键控制数据在网络中优先进行传输,防止非关键业务占用带宽造成延迟积累以及数据阻塞的情况发生,此策略依据控制任务的关键程度以及实时性需求,为不同的数据流分配不一样的传输优先级,达成网络资源的按需调度以及动态优化。基于QoS的流量控制机制可以对网络状态开展实时监测,并且依据数据类型、传输负载以及链路状态动态调整速率与路由路径,以此保证高优先级控制信号可稳定传递,依靠这种差异化调度以及自适应控制方式,系统在高负载条件下依旧可以维持通信畅通并且响应及时,提升控制回路的稳定性以及执行效率。该方法为工业控制网络达成高可靠、低延迟的实时通信给予了技术支持,也为智能制造系统的稳定运行奠定了基础。

5 延迟条件下系统稳定性的综合优化策略

5.1 延迟容忍控制设计

在工业自动化控制系统里,通信延迟属于影响系统响应速度以及稳定性的关键要素,为了减轻延迟所带来的不确定性,可以在控制算法当中引入延迟容忍机制,让系统在一定的延迟范围之内依旧可以维持稳定运行,此方法借助在控制模型里显式考虑延迟特性,针对系统反馈信号开展动态补偿以及预测修正,

有效抑制延迟引发的振荡以及性能退化。依据鲁棒控制理论,可设计 H_{∞} 控制器或者滑模控制器,使得系统在参数扰动以及延迟变化的情况下仍然有较高的稳定裕度以及抗干扰能力, H_{∞} 控制器借助优化系统能量增益达成最优鲁棒性,而滑模控制依赖切换控制律实现快速响应以及稳定收敛,凭借延迟容忍与鲁棒控制的结合,控制系统可在复杂网络环境中维持高可靠性以及实时性,为工业自动化过程给予稳定、高效且安全的控制支持,推动智能制造系统朝着自主化与智能化的方向发展。

5.2 系统冗余与容错机制

在工业自动化控制系统中,通信延迟或者链路中断有可能致使控制信号传输出现异常状况,造成系统失稳或者功能失效,要保证系统在复杂网络环境下持续运行,可以设计冗余通信通道以及备份控制模块,构建多层次的安全防护机制,要是主通信通道出现延迟异常或者数据丢包的情况,系统可借助实时监测与自动判定机制,快速切换到备用路径,保证控制指令及时传递且执行不中断。备份控制模块可和主模块维持数据同步,达成控制逻辑与参数的实时更新,避免在切换过程中出现信息滞后或者指令冲突,凭借引入冗余设计,系统整体的可靠性、抗干扰能力以及运行稳定性都有了明显提升。

6 结论

综上所述,通信延迟作为工业自动化控制系统中不可忽视的关键因素,其产生机制复杂、影响范围广泛,对系统的稳定性、实时性与控制精度均具有显著影响。随着工业网络架构逐渐从传统有线通信向工业以太网、无线传感网络以及多节点协同的分布式控制系统演变,延迟呈现出更加动态、多源且难以预测的

特征,使得控制系统在分析与设计时必须将延迟作为核心约束条件予以考虑。

从本文的分析来看,延迟对系统频域特性、稳定裕度以及动态响应能力均会造成不同程度的削弱,其带来的相位滞后与增益变化往往成为系统振荡与失稳的直接诱因。因此,在控制算法层面引入预测补偿、延迟容忍与鲁棒控制等机制,在网络架构层面实施拓扑优化、协议升级与带宽调度,在系统运行层面构建冗余保障与容错机制,成为延迟条件下确保系统安全可靠运行的必然选择。未来,人工智能与数据驱动控制的广泛应用,也将使延迟的建模、预测与补偿策略更加精细化、智能化。总体而言,通过控制理论、通信技术与网络工程的深度融合,工业控制系统将在复杂通信延迟环境下逐步实现高稳定、高性能与高可靠的运行,为智能制造、智慧工厂与工业4.0的发展提供坚实支撑。

[参考文献]

- [1]李志伟.通信延迟对工业控制系统稳定性的影响及补偿策略研究[J].自动化技术与应用,2023,42(5):76-82.
- [2]王宏宇.工业自动化系统通信延迟建模与控制优化研究[J].控制与决策,2022,37(9):145-152.
- [3]陈建东.基于网络控制的工业自动化系统稳定性分析与改进[J].计算机工程与应用,2024,60(3):94-101.

作者简介:

于振(1987-),男,汉族,吉林省白城市人,本科,职称:副高级,论文研究方向(具体):通信、自动化。