

Key Technology Analysis of Real-time and Reliability in Automation Control Systems

Yanbo Zhao

Luoyang Kawen Automation Equipment Co., Ltd., Luoyang, Henan, 471000, China

Abstract

With the rapid development of industrial automation and smart manufacturing, the real-time performance and reliability of automation control systems have become key factors in ensuring normal system operation and improving production efficiency. Real-time performance requires the system to complete data acquisition and processing within specified timeframes, while reliability ensures long-term operational stability and fault tolerance. This paper analyzes the key technologies related to real-time performance and reliability in automation control systems, exploring the interrelationship between the two and optimization strategies. Through research on real-time operating systems, redundancy design, fault-tolerant technologies, and data transmission optimization, effective methods for enhancing system real-time performance and reliability are proposed. Additionally, the paper discusses prospects for intelligent control algorithms and technical challenges in the context of Industry 4.0. The optimization and development of these technical approaches can significantly improve the overall performance of automation control systems, providing theoretical support and technical guidance for future industrial automation applications.

Keywords

automation control; real-time performance; reliability; redundancy design; fault-tolerant technology

自动化控制系统实时性与可靠性关键技术分析

赵彦波

洛阳卡文自动化设备有限公司, 中国·河南洛阳 471000

摘要

随着工业自动化和智能制造的迅速发展, 自动化控制系统的实时性与可靠性成为了保障系统正常运行和提高生产效率的关键因素。实时性要求系统能够在规定的时间内完成数据采集与处理, 而可靠性则保证了系统在长期运行中的稳定性和容错能力。本文分析了自动化控制系统中实时性与可靠性的关键技术, 探讨了两者之间的相互关系及其优化策略。通过对实时操作系统、冗余设计、容错技术及数据传输优化的研究, 提出了提升系统实时性与可靠性的有效方法。同时, 本文也对智能控制算法和工业4.0环境下的技术挑战进行了展望。通过这些技术手段的优化与发展, 可以显著提升自动化控制系统的整体性能, 为未来的工业自动化应用提供理论支持与技术指导。

关键词

自动化控制; 实时性; 可靠性; 冗余设计; 容错技术

1 引言

自动化控制系统在现代工业生产中扮演着至关重要的角色, 广泛应用于制造、能源、交通等多个领域。这些系统的实时性与可靠性是保证其正常运行和应对复杂生产环境挑战的基础。实时性要求系统能够迅速响应外部变化并在预定时间内完成任务, 尤其在高精度和高动态的控制场合尤为重要。可靠性则关系到系统在长期运行中的稳定性和抗干扰能力, 是防止系统故障和提高系统生命周期的重要保障。随着技术的不断进步, 传统的控制系统逐渐向更加复杂、智能

化的方向发展, 这对实时性与可靠性提出了更高的要求^[1]。面对这一挑战, 如何通过先进的技术手段提高系统的实时响应能力和容错能力, 成为了当前研究的重点。

2 自动化控制系统实时性与可靠性研究概述

自动化控制系统一般由传感器、控制器、执行器和通信网络构成。传感器用于实时采集被控对象的数据并传输给控制器, 控制器则根据输入信号进行数据处理和分析, 生成控制命令并传递给执行器, 执行器依据控制命令调整被控对象的状态。通信网络在此过程中起到数据传输与信息交换的作用, 确保各部件之间的信息流通。系统运行时, 实时性要求控制器能迅速响应传感器采集到的数据, 并根据变化做出相应的调整; 可靠性则要求系统能够在长时间运行过程中稳

【作者简介】赵彦波(1988-), 本科, 工程师, 从事电气电力拖动与自动化控制研究。

定运作，确保发生故障时能够快速恢复或切换到冗余系统。

3 自动化控制系统实时性影响因素分析

自动化控制系统的实时性高度依赖于数据采集和传输的延迟。传感器采集数据后，需要通过通信网络传输到控制器进行处理，在此过程中，数据的传输延迟会直接影响系统对外部变化的响应速度。在工业控制系统中，传输延迟可能由网络带宽、传输协议、物理距离等因素决定。以 Ethernet 为例，传统非实时以太网因采用 CSMA/CD 机制，其传输延迟不确定，通常在毫秒到百毫秒级。而实时工业以太网如 EtherCAT，通过特定的通信调度机制，可将延迟降低至 1ms 以下。如果传输延迟过长，可能导致控制指令滞后，影响设备的精准调控，从而降低系统的实时响应能力。因此，为保证实时性，自动化系统需采用低延迟、高带宽的通信协议，提升数据传输效率。在一些高动态系统中，控制器可能需要在极短时间内对传感器数据进行计算和调整，如使用 FPGA（现场可编程门阵列）或 GPU 加速计算，通过并行处理加速计算过程，从而实现低延迟、高效的响应^[2]。

4 自动化控制系统可靠性影响机制研究

4.1 硬件冗余与容错设计对系统可靠性的保障

硬件冗余设计通过引入备用硬件组件来保障自动化控制系统的可靠性。在重要控制系统中，常见的冗余设计包括双机热备份、N+1 冗余等。这些设计确保了主设备出现故障时，备用设备能够无缝接管，保证系统不受影响。例如，在电力拖动系统中，传感器、执行器以及控制器等关键部件的冗余设计可以有效避免单点故障导致的系统停运。硬件冗余设计常与容错机制结合，利用监控系统实时检测硬件状态并切换到冗余设备。

4.2 软件可靠性建模与容错算法分析

为了提升自动化控制系统的可靠性，软件的可靠性建模与容错算法设计尤为重要。软件可靠性建模通常使用马尔科夫链模型来评估软件的故障概率，帮助分析和预测系统在不同运行状态下的可靠性。例如，采用状态转换模型来模拟系统不同状态下的转移概率，从而评估系统的故障风险。容错算法则能在系统发生错误时进行自动修复，避免故障扩展。例如，基于冗余数据存储（如 RAID 5 技术）和算法切换机制（如冗余控制算法），系统能够在单一软件故障时，迅速切换到备用算法或硬件，保证控制任务的持续执行。

5 提高自动化控制系统实时性与可靠性的关键技术

5.1 基于分布式控制的实时通信与同步技术

分布式控制系统（DCS）在现代自动化控制系统中得到了广泛应用，其实时通信与同步技术是提高系统实时性和可靠性的关键。基于 Ethernet 的实时通信协议，如

EtherCAT 和 Profinet，提供了低延迟和高带宽的数据传输能力，使得系统中的各个控制节点能够实时共享数据，保证协同工作。这些协议支持同步时钟机制，确保分布式控制节点之间的时间同步，降低了因通信延迟引起的误差，分布式控制系统能够实现高效的数据交换和精确的同步控制，保证系统在实时性和可靠性方面的优越性能。

5.2 嵌入式系统优化与实时操作系统（RTOS）应用

嵌入式系统在自动化控制领域中广泛应用，其优化直接影响系统的实时性和可靠性。实时操作系统（RTOS）如 FreeRTOS、VxWorks 和 RTEMS 等，能够确保任务按时执行，通过优先级调度和中断管理来处理多个任务，减少任务之间的干扰，提高系统响应速度。在嵌入式系统中，RTOS 为每个任务分配独立的时间片，并根据任务的重要性和时效性动态调整优先级，确保关键任务优先执行。采用 RTOS 优化嵌入式控制系统，能够减少任务调度延迟，确保实时数据处理和控制指令的准确传递，从而提高自动化系统的响应能力和稳定性。

5.3 智能容错控制与自适应诊断技术集成

智能容错控制技术通过在自动化控制系统中引入冗余设计和自适应诊断功能，显著提升系统的可靠性。容错控制技术通常采用双重或多重冗余机制，确保当系统的某一部分发生故障时，备用部分能够迅速接管并保持系统稳定运行。例如，基于模型的容错控制（MFTC）技术通过对系统的实时监测和故障检测，能够在发生故障时实时调整控制策略，保持系统性能。自适应诊断技术，如基于机器学习的故障诊断算法，通过实时学习系统的正常运行模式，能够快速识别出故障并做出响应。结合人工智能技术，系统可以自动分析故障模式并调整控制策略，减少人工干预，提高系统的容错能力和稳定性。此类技术的集成应用（总结于表 1），能够确保自动化控制系统在面对硬件或软件故障时，仍能保证高效、安全的运行。

6 电力拖动系统中自动化控制实时性与可靠性优化路径

6.1 电机控制系统的实时调度与动态优化策略

在电力拖动系统中，电机控制系统的实时调度至关重要，能够显著影响系统的响应速度和稳定性。采用基于模型预测控制（MPC）的方法，可以实现对电机负载的实时预测与动态调整，从而优化电机的运行效率和响应速度。MPC 通过实时获取电机的工作状态数据并进行预测计算，能够动态调整控制策略，实现电机调速、启停及负载变化时的快速响应。这种控制策略能够根据负载变化自动调整电机的输出功率，从而减少能源浪费，优化电力拖动系统的整体性能。进一步地，采用实时调度算法（如基于优先级的调度算法），能够确保高负荷任务优先得到处理，避免因调度冲突导致的系统延迟，从而提高系统的实时性和可靠性。

表 1 自动化控制系统实时性与可靠性关键技术分析

技术领域	技术名称	应用领域	技术优势	关键参数
分布式控制的实时通信与同步技术	EtherCAT,Profinet,IEEE 1588	分布式控制系统	低延迟, 高带宽, 实时同步	数据传输延迟, 时钟同步精度
嵌入式系统优化与实时操作系统 (RTOS) 应用	FreeRTOS,VxWorks,RTEMS	嵌入式系统	多任务调度, 优先级调整	任务调度时间, 响应时间
智能容错控制与自适应诊断技术集成	基于模型的容错控制 (MFTC), 机器学习算法	自动化控制系统的容错与诊断	自动故障检测, 快速恢复	容错恢复时间, 故障识别率
电机控制系统的实时调度与动态优化策略	基于模型预测控制 (MPC), 优先级调度算法	电机控制系统	动态负载预测, 响应优化	电机负载预测精度, 调度延迟
电力电子装置可靠运行的智能控制方案	自适应控制, 故障预测	电力电子装置	预测故障, 减少停机	温度、负载、功率监测, 故障预测精度
自动化控制系统综合性能评估与优化设计模型	遗传算法, 粒子群优化	自动化控制系统的性能优化	多目标优化, 全面性能提升	性能评估指标, 优化速度

6.2 电力电子装置可靠运行的智能控制方案

电力电子装置是电力拖动系统中的核心部件, 其可靠性直接影响系统的稳定运行。为了确保电力电子装置的可靠性, 可采用智能控制技术, 如自适应控制和故障预测技术。通过引入实时监测系统, 利用温度、负载、功率等参数, 智能控制系统能够实时分析电力电子装置的工作状态, 并在设备接近故障时发出预警。基于这种智能控制方案, 电力电子装置能够在最优工作状态下运行, 确保系统在高负载、极端环境下的稳定性与高效性。此外, 采用冗余设计和热备份机制可以在出现故障时迅速切换备用系统, 确保电力电子装置的连续运行^[3]。

6.3 自动化控制系统综合性能评估与优化设计模型

为了实现自动化控制系统的实时性与可靠性优化, 必须建立一套完善的综合性能评估与优化设计模型。该模型可以通过综合考虑系统的实时性、可靠性、能效和安全性等多个维度, 评估不同设计方案的优缺点。例如, 在电力拖动系统中, 采用这种优化设计模型可以同时优化电机的控制算法和电力电子装置的配置, 减少能量损失, 提高系统的实时性和可靠性。通过这种综合评估与优化, 系统设计能够实现全面的性能提升, 确保系统在各种工况下稳定运行, 并满足现代工业对自动化控制系统的高要求^[4]。

7 结语

自动化控制系统的实时性与可靠性是现代工业生产中至关重要的技术要求。随着技术的发展, 分布式控制、嵌入式系统、智能容错控制等关键技术的应用为提高系统性能提供了有力支持。通过实时通信与同步技术、实时操作系统的优化以及智能诊断与容错机制的集成, 自动化控制系统能够在复杂多变的环境中高效稳定地运行。尤其是在电力拖动系统中, 通过动态优化与智能控制, 系统能够在负载变化、故障发生等情况下做出快速反应, 从而保障生产的安全与高效。未来, 随着工业 4.0 和数字孪生技术的发展, 自动化控制系统的实时性与可靠性研究将与大数据分析、云端协同控制深度融合。利用数字孪生模型进行预测性维护和超前仿真, 将进一步提升系统的可靠性和智能水平。

参考文献

- [1] 徐青林.基于物联网技术的实验室自动化控制系统研究[J].信息记录材料,2025,26(11):206-208.
- [2] 万茸,程丽琴.融合PLC与工业互联网的模具生产线自动化控制系统开发与应用[J].模具技术,2025, 10, 30
- [3] 王苏娅.基于模糊逻辑的有源电网电压无功时序自动化控制系统[J].自动化与仪器仪表,2025,(10):133-137.
- [4] 王子如.基于在线分析仪表的工业自动化控制系统优化[J].自动化应用,2025,66(19):9-11.