

铁路信号计算机联锁控制系统容错技术

曾庆晖

中国铁路武汉局集团有限公司武汉电务段

DOI:10.12238/etd.v6i10.17156

[摘要] 随着铁路运输高速化、智能化发展,对信号系统安全性与可靠性要求愈发严苛。本文聚焦铁路信号计算机联锁控制系统容错技术。首先概述铁路信号计算机联锁控制系统的定义、功能及发展历程,凸显其在铁路运输中的重要性。接着阐述容错技术在该系统中的关键作用,包括保障行车安全、提高系统可靠性与适应复杂环境。随后详细介绍容错技术手段,涵盖硬件冗余、软件冗余、容错控制算法及数据完整性检测等方面。最后展望其未来发展方向,如智能化、开放式系统架构以及综合安全与可靠性保障,为该系统容错技术的进一步发展提供参考。

[关键词] 铁路信号; 计算机联锁; 容错技术; 发展方向

中图分类号: U284.36 **文献标识码:** A

Fault-Tolerant Technology for Railway Signal Computer Interlocking Control Systems

Qinghui Zeng

Wuhan Electric Power Section, China Railway Wuhan Bureau Group Co., Ltd.

[Abstract] With the rapid development of high-speed and intelligent railway transportation, the requirements for the safety and reliability of signal systems have become increasingly stringent. This paper focuses on fault-tolerant technology in railway signal computer interlocking control systems. It begins by outlining the definition, functions, and development history of computer interlocking control systems, highlighting their importance in railway transportation. The critical role of fault-tolerant technology in these systems is then elaborated, including ensuring operational safety, improving system reliability, and adapting to complex environments. Subsequently, specific fault-tolerant technical methods are detailed, covering hardware redundancy, software redundancy, fault-tolerant control algorithms, and data integrity detection. Finally, future development directions are discussed, such as intelligentization, open system architectures, and comprehensive safety and reliability assurance, providing references for the further advancement of fault-tolerant technology in these systems.

[Key words] Railway Signals; Computer Interlocking; Fault-Tolerant Technology; Development Directions

引言

铁路运输作为国家重要的基础设施与国民经济大动脉,其安全与高效运行至关重要。铁路计算机联锁控制系统作为保障列车运行安全与秩序的核心设备,能精准控制设备,实现列车进路的安全排列与高效管理。然而,复杂多变的运行环境、高强度的作业负荷以及多样化的故障因素,对系统可靠性提出严峻挑战。容错技术作为提升系统可靠性的关键手段,通过冗余设计与故障处理机制,确保系统在部分组件故障时仍能正常运行,对保障铁路运输安全、提升运输效率具有不可替代的重要意义。

1 铁路信号计算机联锁控制系统概述

1.1 系统定义与功能

铁路信号计算机联锁控制系统是以计算机为核心,融合电

子、电磁器件与软件协同,实现道岔、进路与信号机联锁控制的实时自动化系统。其核心功能涵盖进路控制(自动办理列车/调车进路)、联锁关系检查、状态监测(实时采集设备状态并故障报警)、信息管理(记录操作与行车数据)及系统接口(与CTC、ATP等外部系统协同)。通过逻辑运算确保行车安全,提升运输效率,是铁路信号系统的关键组成部分。

1.2 系统发展历程

铁路信号计算机联锁技术起源于20世纪70年代,初期以单机控制模式替代传统机械联锁,通过软件编程实现信号设备逻辑管理,但可靠性受限于单一处理单元。80年代后,为提升系统容错能力,双机热备架构逐步普及,采用主备机并行运行与故障自动切换机制,显著降低运行中断风险。90年代,随着安全标准

升级,部分系统引入双通道独立运算与交叉验证技术,强化故障安全性能^[1]。

2 容错技术在铁路信号计算机联锁控制系统中的关键作用

2.1 保障行车安全

在铁路运输中,行车安全是重中之重。铁路信号计算机联锁控制系统一旦出现故障,可能导致信号显示错误、道岔转换异常、进路建立错误,进而引发列车冲突、脱轨等严重事故。《车站计算机联锁技术条件》(Q/CR 931—2022)规定,计算机联锁应可靠并满足故障—安全原则,并符合SIL4级要求。容错技术通过冗余设计与故障处理机制,能在系统部分组件故障时,迅速检测并隔离故障,维持系统正常功能,确保信号机准确指示、道岔正确转换,为列车安全运行提供坚实保障,最大程度降低事故风险。

2.2 提高系统可靠性

铁路信号计算机联锁控制系统需长时间不间断运行,对可靠性要求极高。容错技术采用硬件冗余,如双机热备、三模冗余等,当主设备出现故障时,备用设备能立即接管工作,避免系统瘫痪;软件冗余则通过多版本编程、算法优化等,增强软件容错能力。这些措施有效减少了系统因故障导致的停机时间,提高了系统运行的稳定性和可靠性,保障铁路运输的顺畅进行。

2.3 适应复杂环境

铁路运行环境复杂多样,包括高温、低温、潮湿、电磁干扰等恶劣条件,这些因素都可能对铁路信号计算机联锁控制系统造成影响,引发故障。容错技术通过选用抗干扰能力强的硬件设备、优化软件算法以及采用冗余设计等方式,增强系统对复杂环境的适应能力。即使部分组件在恶劣环境下出现性能下降或故障,系统仍能依靠冗余部分维持正常运行,确保铁路信号控制功能的稳定可靠^[2]。

3 铁路信号计算机联锁控制系统容错技术手段

3.1 硬件冗余技术

硬件冗余技术是铁路信号计算机联锁控制系统实现容错的关键基础,通过增加额外的硬件资源,提高系统在面对硬件故障时的可靠性与可用性,其常见方式如下。(1)采用双机或双系热备冗余结构。在系统中配置两套完全相同的计算机设备,一套作为主机正常执行联锁控制任务,另一套作为备机实时同步主机的数据与状态。当主机出现故障时,系统能迅速自动切换至备机,由备机接管控制工作,整个切换过程在极短时间内完成,几乎不影响系统的正常运行,确保铁路信号控制不间断。(2)运用多机冷备冗余。准备多台处于备用状态的计算机设备,平时不参与系统运行。一旦正在运行的计算机出现严重故障且无法通过热备切换恢复时,可手动或自动将冷备设备投入使用。这种冗余方式虽切换时间相对较长,但能应对更为严重的硬件故障情况,为系统提供额外的安全保障。(3)实施模块级冗余。对系统中关键的功能模块,如输入输出模块、通信模块等,采用冗余设计。每个关键模块都配置多个相同模块并行工作,当一个模块出现故障

时,其他正常模块能继续承担其功能,保证数据的准确采集与传输,以及指令的正确执行,避免因单个模块故障导致系统功能失效,增强系统整体的抗干扰与容错能力。

3.2 软件冗余技术

软件冗余技术作为铁路信号计算机联锁控制系统容错的关键环节,通过多重软件设计与策略,有效提升系统面对软件故障时的稳定性与可靠性,为铁路安全运行保驾护航。(1)采用多版本程序设计。针对联锁控制软件的关键功能模块,组织不同开发团队独立编写多个版本。这些版本在算法实现、代码结构上存在差异,但功能逻辑一致。在系统运行时,同时运行多个版本软件,对它们的输出结果进行实时比对。若各版本输出一致,则判定结果正确;若出现不一致,系统能迅速识别并定位可能存在错误的版本,通过预设的容错机制,选择正确结果或切换至备用版本继续运行,避免因单一版本软件漏洞导致系统失控。(2)实施恢复块技术。将软件系统划分为多个功能相对独立的恢复块,每个恢复块包含主处理模块和若干备用处理模块。主处理模块首先执行任务,若检测到执行过程中出现异常或结果不符合预期,系统立即启动备用处理模块,依次尝试直至获得正确结果。这种技术为软件运行提供了多道防线,即使主处理模块因软件错误无法正常工作,备用模块也能及时接管,保证系统功能的连续性。(3)运用N版本编程与投票机制。开发N个不同版本的软件,在系统运行阶段,让这些版本并行执行相同任务,然后通过投票机制决定最终输出。多数版本达成一致的结果将被采纳,这种机制极大地降低了因个别软件版本错误而导致系统错误决策的概率,有效提高了软件系统的容错能力和可靠性,确保铁路信号计算机联锁控制系统稳定运行。

3.3 容错控制算法

容错控制算法是铁路信号计算机联锁控制系统实现容错功能的核心技术之一,它能在系统出现故障时,自动调整控制策略,维持系统的稳定运行,保障铁路信号控制的准确性和可靠性。(1)基于解析冗余的容错控制算法。该算法利用系统内部各变量之间的数学关系,构建解析冗余关系。当系统中的某个传感器或执行器出现故障时,通过其他正常工作的部件所测量的数据,结合解析冗余关系,对故障部件的信息进行估计和补偿。例如,利用系统中不同位置信号设备之间的关系,推算出故障设备本应输出的信号,从而保证系统仍能获取较为准确的信息,继续执行联锁控制功能,避免因局部故障导致整个系统失控。(2)自适应容错控制算法。这种算法具有自我调整和适应的能力,能够根据系统故障的类型和程度,实时改变控制参数和策略。当检测到故障时,算法会自动分析故障对系统性能的影响,然后动态调整控制器的参数,使系统在故障状态下仍能保持较好的动态性能和稳定性。它可以根据不同的故障场景,灵活地优化控制效果,确保铁路信号计算机联锁控制系统在各种复杂情况下都能可靠运行。(3)鲁棒容错控制算法。它着重于提高系统对不确定性和干扰的鲁棒性,即使在存在模型误差、外部干扰以及部件故障等情况下,也能保证系统的稳定性和性能指标。该算法通过设计具有

鲁棒性的控制器,使系统对故障和干扰具有一定的容忍能力,减少故障对系统输出的影响,维持铁路信号计算机联锁控制系统的正常运行,为铁路运输安全提供坚实保障

3.4 数据完整性检测

数据完整性检测在铁路信号计算机联锁控制系统中至关重要,它确保系统所处理和传输的数据准确无误,为行车安全与系统稳定运行提供坚实的数据基础。(1)校验和检测技术。这是一种常见且有效的数据完整性检测手段。在数据传输或存储前,系统会根据特定的算法对数据计算出一个校验和值,并将该值与数据一同存储或传输。当数据被读取或接收时,再次使用相同的算法对数据进行计算,将得到的新校验和与原始校验和进行比对。若两者一致,则表明数据在传输或存储过程中未发生错误;若不一致,则说明数据可能已损坏,系统会立即采取相应措施,如请求重新传输数据或使用备份数据进行恢复,以此保证数据的完整性。(2)循环冗余校验(CRC)。它通过对数据进行多项式除法运算,生成一个固定长度的校验码。在数据传输过程中,发送方将数据与校验码一起发送,接收方收到后,用同样的多项式对数据进行除法运算,若余数为零,则数据传输正确;若余数不为零,则表明数据在传输过程中出现了错误。CRC技术具有检测能力强、计算效率高的特点,能够快速准确地检测出数据中的错误,广泛应用于铁路信号计算机联锁控制系统的传输环节。(3)数据一致性比对。在系统内部,对于关键数据会在多个存储位置或模块中进行冗余存储。系统应实时对这些冗余数据进行比对,检查它们是否一致。若发现数据不一致的情况,系统会在不产生危险侧输出的基础上,进一步分析原因,确定正确的数据版本,并对错误数据进行修正,从而保证系统内数据的一致性和完整性,确保铁路信号计算机联锁控制系统能够基于准确的数据做出正确的控制决策^[3]。

4 铁路信号计算机联锁控制系统容错技术未来发展方向

4.1 智能化发展

未来,铁路信号计算机联锁控制系统容错技术将迈向智能化新阶段。借助人工智能算法,系统能自主分析海量运行数据,精准预测硬件与软件潜在故障,提前制定应对策略,实现预防性容错。智能算法还能根据实时运行状态,动态调整容错参数与策略,提升容错效率与效果。同时,智能化技术可优化故障诊断流程,快速定位故障点,减少故障排查时间。并且,智能系统具备自

我学习与进化能力,能不断适应新环境与新需求,持续提升铁路信号联锁系统的可靠性与安全性。

4.2 开放式系统架构

开放式系统架构是铁路信号计算机联锁控制系统容错技术的未来趋势之一。这种架构打破传统封闭模式,采用标准化接口与协议,实现不同厂商设备与软件的无缝集成。它便于引入新的容错技术与模块,增强系统的可扩展性与灵活性。当出现新的故障类型或需求时,能快速集成相应的容错解决方案。开放式架构还促进系统间的互联互通与信息共享,提升整体协同容错能力。此外,其开放性降低了系统维护与升级成本,有利于铁路信号联锁技术的持续创新与发展。

4.3 综合安全与可靠性保障

未来,铁路信号计算机联锁控制系统容错技术将聚焦综合安全与可靠性保障,并逐步实现与列车运行控制系统、微机监测系统、CTC系统的融合。一方面,整合多种容错手段,如硬件、软件、算法容错等,形成多层次、全方位的容错体系,提升系统应对各类故障的能力。另一方面,强化安全评估与监测机制,实时评估系统安全状态,及时发现潜在安全风险。同时,建立完善的可靠性模型,对系统可靠性进行精准预测与优化。

5 结束语

铁路信号计算机联锁控制系统容错技术是保障铁路运输安全与高效的关键支撑。从硬件、软件冗余设计,到先进容错控制算法与数据完整性检测手段的应用,再到未来智能化、开放式架构及综合安全可靠性保障的发展方向,每一步都凝聚着技术创新与安全追求。它不仅有效应对了系统运行中的各类故障与干扰,更不断适应铁路事业发展的新需求。展望未来,随着技术的持续进步,容错技术将愈发成熟完善,为铁路信号系统筑牢安全防线,推动铁路运输事业迈向更安全、高效、智能的新阶段^[4]。

[参考文献]

- [1]高庆荣.铁路信号计算机联锁控制系统容错技术探究[J].科技风,2021.69.
- [2]李花宁.探讨铁路信号计算机联锁控制系统容错技术[J].区域治理,2022.135.
- [3]高庆荣.铁路信号计算机联锁控制系统容错技术探究[J].科技风,2022.63.
- [4]王先策.铁路信号计算机联锁控制系统容错技术探析[J].科技经济导刊,2021.19-20.