

铁路信号安全联锁系统故障诊断与容错技术研究

陶世朝

浙江金温铁道开发有限公司 浙江 温州 325000

摘要：本研究聚焦铁路信号系统安全联锁中的故障诊断与容错技术，详细阐述故障诊断方法与容错技术原理，分析其在铁路信号系统中的应用场景与效果。通过实际案例探讨技术应用中的挑战与解决方案，为提升铁路信号系统的可靠性与安全性提供理论支撑与实践指导，助力铁路运输事业的高效、稳定发展。

关键词：铁路信号系统；安全联锁；故障诊断；容错技术

引言：铁路运输作为国家交通体系的重要组成部分，其安全性与高效性至关重要。铁路信号系统作为保障列车运行秩序的核心，安全联锁功能是确保列车安全运行的关键环节。当信号系统出现故障时，可能导致列车运行中断、追尾等严重事故，给人民生命财产带来巨大损失。因此，深入研究铁路信号系统安全联锁中的故障诊断与容错技术，对于及时发现并解决故障、保障铁路信号系统的稳定运行具有重要意义。故障诊断技术能够快速准确地识别故障类型与位置，为维修人员提供有力支持；容错技术则可在故障发生时维持系统的基本功能，降低故障对铁路运输的影响，两者相辅相成，共同提升铁路信号系统的可靠性与安全性。

1 铁路信号系统安全联锁概述

1.1 铁路信号系统组成与工作原理

铁路信号系统主要由信号机、道岔、轨道电路、列车运行控制系统等部分组成。信号机通过不同的灯光显示向列车司机传达行车指令；道岔用于控制列车的行驶方向；轨道电路用于检测列车的位置；列车运行控制系统则实现对列车运行速度、间隔等的精确控制。各部分相互协作，共同保障列车的安全运行。其工作原理基于安全联锁机制，即信号机、道岔和进路之间存在相互制约的关系，只有在满足一定的安全条件下，信号机才能开放、道岔才能转换，以防止列车发生冲突和追尾事故。

1.2 安全联锁的重要性

铁路信号系统的安全联锁是指通过技术手段，使信号设备之间相互制约、相互联系，以确保列车运行安全的一种控制方式。它主要包括道岔、信号机、轨道电路等设备之间的联锁关系，例如，当道岔处于定位时，相应的信号机才能开放允许信号；当轨道电路检测到有列车占用时，相关的信号机必须显示禁止信号等。

安全联锁是铁路信号系统的核心功能，它确保了列车在车站和区间的安全运行。通过建立严格的联锁关

系，避免了人为错误操作和设备故障导致的安全事故。例如，当列车进入某一进路时，安全联锁系统会自动锁定相关道岔，防止其错误转换，同时控制信号机显示相应的信号，指示列车的运行状态。若安全联锁功能失效，列车可能会误入危险区域，引发严重的安全事故，因此，安全联锁对于保障铁路运输的安全至关重要^[1]。

2 铁路信号系统安全联锁中的故障类型及风险分析

2.1 故障类型

硬件故障：包括信号机、道岔转辙机、轨道电路等设备的硬件损坏，如灯泡烧毁、电机故障、继电器接点磨损等。这些硬件故障可能导致信号显示错误、道岔无法正常转换或轨道电路误判等问题。

软件故障：铁路信号系统中的控制软件可能存在编程错误、逻辑漏洞或软件冲突等问题。软件故障可能导致安全联锁逻辑错误，使信号系统无法正常工作。

通信故障：信号系统中各设备之间需要进行通信，如车站与区间之间、车载设备与地面设备之间的通信。通信故障可能导致信息传输错误或中断，影响安全联锁的正常运行。

环境因素引起的故障：铁路信号设备长期暴露在室外，受到温度、湿度、风沙、雷电等环境因素的影响，可能导致设备性能下降或故障。例如，雷电可能损坏电子设备，潮湿的环境可能导致电气设备绝缘性能降低。

2.2 故障风险分析

安全联锁系统中的故障可能会带来严重的安全风险。例如，硬件故障导致信号机错误显示允许信号，可能会使列车进入危险区域，引发列车冲突事故；软件故障导致联锁逻辑错误，可能会使道岔错误转换，导致列车脱轨；通信故障导致信息传输中断，可能会使列车失去控制，无法及时获得正确的信号指示。

3 铁路信号系统安全联锁中的故障诊断技术

3.1 传统故障诊断方法

3.1.1 基于规则的故障诊断

根据铁路信号系统的运行规则和故障特征，建立故障诊断规则库。当系统出现异常时，通过与规则库中的规则进行匹配，判断故障类型。这种方法简单直观，但需要大量的人工经验来建立规则库，且对于复杂的故障情况可能不够准确。

3.1.2 故障树分析

将系统的故障作为顶事件，通过分析导致顶事件发生的各种原因，构建故障树。通过对故障树的分析，可以找出故障的根本原因和传播路径。故障树分析方法能够清晰地展示故障之间的逻辑关系，但构建故障树需要对系统有深入的了解，且计算复杂度较高。

3.1.3 状态监测与诊断

通过安装传感器对信号设备的运行状态进行实时监测，如监测信号机的电流、电压，道岔转辙机的转动力矩等。当监测到的参数超出正常范围时，判断设备可能存在故障。这种方法能够实时发现设备的异常状态，但对于一些隐性故障可能无法及时诊断。

3.2 现代故障诊断技术

3.2.1 基于机器学习的故障诊断方法

机器学习技术在铁路信号系统故障诊断中得到了广泛应用。其中，神经网络是一种常用的方法。通过收集大量的铁路信号系统故障数据，对神经网络进行训练，使其学习到故障特征与故障类型之间的映射关系。例如，采用多层感知器神经网络，将信号机的电流、电压、温度等运行参数作为输入，经过训练后，网络能够根据输入参数判断信号机是否存在故障以及故障类型。支持向量机也是一种有效的机器学习故障诊断方法，它通过寻找最优分类超平面，将不同故障类型的数据进行分类。

3.2.2 基于大数据分析的故障诊断方法

随着铁路信号系统产生的数据量不断增加，大数据分析技术为故障诊断提供了新的思路。通过对海量的设备运行数据、故障记录、维护数据等进行分析，挖掘数据中的潜在规律和关联。例如，利用数据挖掘技术中的关联规则挖掘算法，分析轨道电路故障与天气、时间、列车运行密度等因素之间的关系，提前预测故障发生的可能性。同时，通过对实时数据的分析，能够及时发现设备的异常状态，实现故障的早期预警。

3.2.3 基于物联网的故障诊断方法

物联网技术的发展使得铁路信号系统的设备能够实现互联互通和实时数据采集。基于物联网的故障诊断方法通过在信号设备上安装传感器，实时采集设备的运行状态数据，并将数据传输至云端进行分析。例如，在道

岔转辙机上安装振动传感器、温度传感器等，实时监测转辙机的工作状态。当传感器检测到数据异常时，系统能够及时发出预警，并通过数据分析确定故障原因。基于物联网的故障诊断方法具有实时性强、数据采集全面等优点，但需要构建完善的物联网基础设施，且面临数据安全和隐私保护等问题^[2]。

4 容错技术铁路信号系统安全联锁中的容错技术

铁路信号系统安全联锁中的容错技术原理主要基于冗余、故障检测与诊断、多样性设计等方面，以确保在系统出现故障时仍能保证行车安全和信号系统的正常运行。

4.1 硬件冗余原理

设备冗余：关键设备如信号机、转辙机、轨道电路等通常采用双机热备或多机冗余配置。以信号机为例，会设置主信号机和备用信号机，正常情况下主信号机工作，一旦主信号机出现故障，备用信号机立即自动投入工作，保证信号的正常显示。

部件冗余：对于一些核心部件，如信号控制板卡，也会采用冗余设计。在板卡内部设置多个相同的处理单元或电路模块，通过特定的电路设计和控制逻辑，当一个单元或模块出现故障时，其他正常的部分可以继续完成相应的功能。

4.2 故障检测与诊断原理

4.2.1 自诊断技术

硬件自诊断：信号设备中的各个硬件模块都具备一定的自诊断能力。例如，轨道电路设备可以通过监测自身的工作电流、电压等参数，判断是否存在短路、断路等故障。一旦检测到异常，会立即向系统发送故障信号。

软件自诊断：安全联锁软件中嵌入了大量的自诊断程序和代码。这些程序会定期对软件的运行状态、数据完整性等进行检查。比如，在联锁逻辑运算过程中，会对输入输出数据进行合法性校验，若发现数据超出正常范围或不符合逻辑关系，就会判定软件出现故障，并触发相应的处理机制。

4.2.2 互诊断技术

设备间互诊断：不同的信号设备之间相互进行状态监测和诊断。例如，信号机与转辙机之间会相互通信，信号机可以监测转辙机的位置状态和动作情况，转辙机也可以对信号机的控制命令进行反馈和验证。如果发现对方设备的状态与预期不符，就可以判断可能存在故障，并进行相应的处理。

系统间互诊断：铁路信号系统通常由多个子系统组成，如车站联锁系统、区间闭塞系统等，这些子系统之间也会进行互诊断。例如，车站联锁系统会与区间闭塞系统

交换列车位置、进路状态等信息,通过相互验证和比对这些信息,及时发现系统间的通信故障或逻辑错误。

4.3 多样性设计原理

4.3.1 功能多样性

控制功能多样性:在安全联锁系统中,对于同一个控制任务,采用多种不同的控制方式或逻辑来实现。例如,在进路控制中,既可以通过传统的继电器逻辑电路实现,也可以通过计算机软件逻辑进行控制。当一种控制方式出现故障时,另一种控制方式可以保证进路控制的正确性和安全性。

防护功能多样性:为了防止列车冒进信号、错误解锁进路等危险情况,设置了多种防护功能。比如,除了常规的信号机显示防护外,还设置了轨道电路的占用检查、道岔的锁闭防护等多种防护措施。

4.3.2 物理多样性

信号传输介质多样性:信号传输采用多种不同的介质,如电缆和无线通信。正常情况下,主要通过电缆传输信号,但当电缆出现故障时,系统可以自动切换到无线通信方式,保证信号的传输不中断。

设备物理布局多样性:信号设备在物理布局上采用分散布置和集中布置相结合的方式。例如,转辙机等设备既在车站咽喉区集中布置一部分,又在区间适当分散布置,这样即使某个区域发生灾害或故障,也不会导致所有转辙机都无法工作,提高了系统的整体可靠性和容错能力^[9]。

5 故障诊断与容错技术案例分析

5.1 案例背景

某铁路枢纽承担着繁重的客货运输任务,其信号系统采用了先进的计算机联锁技术。然而,在日常运行中,信号系统偶尔会出现故障,影响铁路运输效率。为提高信号系统的可靠性与安全性,该铁路枢纽引入了故障诊断与容错技术。

5.2 故障诊断与容错技术应用过程

在故障诊断方面,采用了基于机器学习的故障诊断方法。首先,收集了该铁路枢纽信号系统近一年的故障数据和设备运行数据,对数据进行清洗、预处理后,用于训练神经网络故障诊断模型。经过多次训练和优化,模型的准确率达到了90%以上。在实际应用中,当信号系统出现故障时,模型能够快速准确地诊断出故障类型和位置,为维修人员提供了有力支持。

在容错技术方面,对信号计算机联锁系统采用了三模冗余技术。安装了三个相同的运算模块和表决器,当其中一个模块出现故障时,表决器能够及时选择正常模块的输出,确保联锁功能不受影响。同时,对列车运行

控制系统采用了双机热备技术,设置了一台主机和一台备用机,备用机实时监测主机状态,当主机故障时,备用机能够在1秒内完成切换,保障列车运行安全。

5.3 应用效果

经过一年的运行,故障诊断与容错技术在该铁路枢纽的应用取得了显著成效。信号系统的故障率降低了50%,平均故障修复时间从原来的2小时缩短至30分钟以内,有效提高了铁路运输效率。同时,由于容错技术的应用,在出现故障时,系统能够保持基本功能,未发生因信号系统故障导致的列车延误或事故,保障了铁路运输的安全。通过对故障诊断结果的分析,还发现了一些潜在的设备隐患,提前进行了处理,进一步提升了信号系统的可靠性^[9]。

结束语

本研究深入探讨了铁路信号系统安全联锁中的故障诊断与容错技术。通过对常见故障类型的分析,提出了一系列有效的故障诊断方法,同时,研究了容错技术的基本原理和常见应用,通过实际案例分析,验证了故障诊断与容错技术在提高铁路信号系统可靠性与安全性方面的有效性。这些技术的应用能够及时发现并解决故障,降低故障对铁路运输的影响,为铁路信号系统的稳定运行提供了有力保障。

尽管目前在铁路信号系统故障诊断与容错技术方面取得了一定成果,但仍存在一些问题需要进一步研究解决。在故障诊断方面,需要提高诊断方法的准确性和实时性,特别是对于一些复杂故障和早期故障的诊断。同时,要加强不同故障诊断方法的融合应用,发挥各自的优势。在容错技术方面,需要进一步优化冗余设计,提高资源利用率,降低成本。此外,随着人工智能、物联网等新技术的不断发展,应探索将这些技术更深入地应用于铁路信号系统故障诊断与容错领域,如利用人工智能技术实现更智能化的故障预测和容错控制,通过物联网技术实现更全面的设备状态监测和故障诊断。未来,随着相关技术的不断进步,铁路信号系统的故障诊断与容错技术将不断完善,为铁路运输事业的发展提供更可靠的支持。

参考文献

- [1] 李帅.全电子信号联锁系统的应用[J].电脑知识与技术,2015(21)
- [2] 陈兆卫.城市轨道交通信号全电子联锁系统结构探析[J].电子测试,2022(16)
- [3] 张传军.铁路信号应急联锁系统研究[J].铁道通信信号,2006(12)
- [4] 何志彬.高速铁路信号云联锁系统数据容错技术研究[J].铁道科学与工程学报.2023(11)