

地铁基地全自动驾驶列车调度系统的安全冗余设计验证

刘嘉伦

徐州地铁集团有限公司运营分公司

【摘要】随着城市轨道交通的快速发展,全自动驾驶列车已成为未来地铁系统的发展趋势。为确保列车运行的安全性和可靠性,地铁基地全自动驾驶列车调度系统的安全冗余设计显得尤为重要。本文旨在探讨地铁基地全自动驾驶列车调度系统的安全冗余设计验证,通过深入分析传感器冗余、控制单元冗余、通信冗余以及安全监控与预警等关键环节的冗余设计,提出一套完整的验证方法。通过对这些冗余设计的验证,可以有效提升列车调度系统的安全性能和可靠性。

【关键词】地铁基地;全自动驾驶;列车调度系统;安全冗余设计;验证方法

Safety redundancy design verification of fully automatic train dispatching system in subway base

Liu Jialun

Xuzhou Metro Group Co., LTD.Operation branch

【Abstract】 With the rapid development of urban rail transit, fully autonomous trains have become a key trend in future metro systems. To ensure operational safety and reliability, the design of safety redundancy in autonomous train dispatching systems at metro bases has become crucial. This paper explores the verification of safety redundancy design for autonomous train dispatching systems at metro bases. Through in-depth analysis of critical aspects including sensor redundancy, control unit redundancy, communication redundancy, and safety monitoring and early warning mechanisms, a comprehensive verification methodology is proposed. The validation of these redundancy designs can significantly enhance the safety performance and reliability of train dispatching systems.

【Key words】 metro base; fully autonomous; train dispatching system; safety redundancy design; verification method

一、传感器冗余设计

传感器冗余设计是地铁基地全自动驾驶列车调度系统中的关键安全措施。为了确保列车在自动驾驶过程中能够准确感知环境,即使在极端条件下也能维持正常运行,系统通常会采用多传感器融合技术。例如,列车会配备有高精度的激光雷达传感器和摄像头,以实现 360 度无死角的视觉感知。这些传感器会实时监测轨道状况、障碍物、信号灯状态等信息,并通过数据融合算法,减少单一传感器故障对整体感知能力的影响。此外,冗余传感器会定期进行自检和校准,确保在主传感器出现异常时,备用传感器能无缝接管,以达到毫秒级的故障切换,保障列车的行驶安全。

二、控制单元冗余

2.1 双重控制逻辑

双重控制逻辑是指在地铁基地全自动驾驶列车调度系统中,针对关键控制指令采用两套独立且相互验证的逻辑路径。这一设计旨在确保在任何单一逻辑路径发生故障时,另一路径仍能正确执行控制指令,从而维护列车的安全运行。具体而言,第一套逻辑路径负责生成初始控制指令,而第二套逻辑路径则对初始指令进行独立验证。如果两套逻辑路径

的结果一致,则控制指令被执行;若结果不一致,则系统会触发报警机制,并暂停执行指令,直到故障被诊断并修复。这种双重控制逻辑的应用,大大提高了列车调度系统的可靠性和安全性。

2.2 热备份与故障恢复

在全自动驾驶列车调度系统中,热备份与故障恢复是确保系统高可用性和安全性的关键设计。热备份是指在主系统正常工作时,备用系统处于待机状态,一旦主系统出现故障,备用系统能够无缝接管,实现零宕机切换。例如,控制单元可以采用冗余配置,每个控制模块都有一个实时同步的备份模块,两者的状态始终保持一致。在地铁运营中,这种设计可以极大地减少因设备故障导致的运营中断时间,提高乘客的出行效率和满意度。

故障恢复机制则关注于系统在出现异常情况后的自我修复能力。当系统检测到传感器数据异常、通信链路故障或控制指令错误时,会自动启动预设的故障模式。例如,如果车地通信系统中的某一路通道出现故障,系统会自动切换到冗余的备用通道,保证列车与控制中心的信息交换不中断。同时,系统会记录故障详情,以便于后期的故障分析和预防性维护。

2.3 控制指令的并发验证

在全自动驾驶列车调度系统中,控制指令的并发验证是

确保安全性的关键环节。这一部分涉及到在多传感器数据融合的基础上,如何确保在高速运行的列车中,来自不同控制单元的指令能够准确、无冲突地执行。例如,当列车在自动驾驶模式下接收到进站和避让两个指令时,系统需要具备智能分析和优先级分配的能力,以防止控制冲突导致的安全事故。

为实现这一目标,系统采用了先进的并发控制算法。该算法能够实时监测并解析来自各个传感器的数据,以及各个控制单元发出的指令。通过复杂的逻辑判断,算法能够迅速确定指令的优先级和执行顺序,确保列车在任何情况下都能按照最安全、最高效的路径行驶。此外,系统还具备自我学习和优化的能力,能够根据历史数据和实时反馈不断调整并发控制策略,以适应不断变化的运行环境。

三、通信冗余

3.1 车地通信系统设计

车地通信系统设计是地铁基地全自动驾驶列车调度系统中的关键环节,它确保了列车与地面控制中心之间的高效、可靠信息交互。系统通常采用冗余设计,以提高在复杂城市环境中的通信稳定性。例如,通过建立多个无线基站,形成覆盖整个地铁线路的连续无线网络,确保在任何时刻至少有两条独立的通信路径可用。此外,通信协议应具备错误检测和纠正功能,以防止数据在传输过程中发生错误。在极端情况下,如遇到信号干扰或基站故障,系统应能自动切换至备用通信链路,确保列车的正常运行。

为了实现这一目标,车地通信系统设计还采用了先进的加密技术,确保数据传输的安全性。所有敏感信息在传输过程中都会被加密,以防止被未经授权的第三方截获或篡改。此外,系统还具备实时性能监测功能,能够持续跟踪通信链路的延迟、丢包率等关键指标,一旦发现异常情况,立即触发预警机制,通知维护人员进行检查和修复。这种全面的通信冗余设计,不仅提高了系统的通信稳定性和可靠性,还为地铁基地全自动驾驶列车调度系统的安全运行提供了有力保障。

3.2 多路径传输与冗余通道

在地铁基地全自动驾驶列车调度系统中,多路径传输与冗余通道是确保通信可靠性和系统安全的关键技术。通过建立多个独立的通信路径,即使在某一路径出现故障时,也能保证数据的无缝切换和连续传输,从而避免列车运行中断或出现安全隐患。例如,系统可能采用光纤和无线通信的混合架构,一方面利用光纤提供高速、低延迟的有线连接,另一方面利用5G或Wi-Fi等无线技术作为备份,实现车地通信的冗余。在实际设计中,冗余通道的带宽和处理能力往往被设计为与主通道相当,以满足高数据传输需求和实时性要求。此外,通信系统可能还会集成错误检测和纠正编码,以增强数据包在传输过程中的抗干扰能力。

在多路径传输的策略上,可以借鉴网络路由中的负载均衡和动态路径选择算法,根据各路径的实时状况动态调整数据流的分配,确保整体通信效率。例如,当检测到某一路径的信号质量下降时,可以自动将更多的数据流切换到其他健康路径,以保持通信的稳定性。在故障恢复方面,系统应具备快速识别和隔离故障的能力,一旦确定某条路径不可用,应立即激活备用路径,将影响降至最低。

3.3 通信故障的容错机制

在地铁基地全自动驾驶列车调度系统中,通信冗余设计是确保系统高可用性和安全性的关键要素。通信故障的容错机制旨在构建一种即使在通信链路出现异常或中断时也能保证列车正常运行的机制。例如,系统可以采用多路径传输技术,为关键数据如列车位置信息、速度指令等设置冗余通道。当主通道发生故障时,备用通道能够无缝切换,确保数据传输的连续性。此外,容错机制还应包括自动重传请求功能,即在数据包丢失或出错时,发送方会要求接收方重新发送该数据包,直至正确接收为止。这种机制可以有效提高数据传输的可靠性。同时,系统还需具备智能诊断功能,能够自动检测通信故障的类型和位置,为运维人员提供准确的故障信息,以便快速定位并解决问题。通过这些容错机制的设计与实施,地铁基地全自动驾驶列车调度系统的通信冗余能力将得到显著提升,从而确保列车在各种复杂环境下的安全、稳定运行。

四、安全监控与预警

4.1 实时状态监测

实时状态监测是确保地铁基地全自动驾驶列车调度系统安全运行的关键环节。通过集成高精度传感器和数据分析算法,系统能够实时收集列车的速度、位置、动力系统状态以及关键部件的运行参数。例如,利用激光雷达和摄像头的融合数据,可以精确监测列车与周围环境的距离和相对速度,确保在复杂或能见度低的环境下也能安全行驶。同时,系统会将这些数据与预设的安全阈值进行比较,如遇异常,如电机过热或制动性能下降,将立即触发预警机制。此外,实时状态监测系统还能记录列车的历史运行数据,包括故障发生的时间、地点、类型及处理方式等,这些数据对于后续的系统优化和故障预防具有重要意义。通过大数据分析,可以识别出潜在的故障模式,提前采取措施,避免类似故障再次发生。同时,这些数据也为运维人员提供了宝贵的参考信息,帮助他们更好地理解和维护列车调度系统。

4.2 安全阈值与预警策略

在地铁基地全自动驾驶列车调度系统中,安全阈值与预警策略是确保系统安全运行的关键组成部分。安全阈值是指预先设定的性能或状态极限,一旦列车的运行参数接近或超过这个界限,系统将自动触发预警或采取纠正措施。例如,可以设定列车速度、制动距离、电力消耗等参数的安全上限,

当实时数据接近阈值时,系统需能及时识别并做出反应。

预警策略则基于数据分析模型,通过实时监测列车的运行状态和环境信息,对可能影响安全的异常情况进行预测。例如,结合历史数据和天气预报,系统可以预测湿滑轨道可能导致的制动距离增加,提前调整列车速度,防止发生事故。此外,预警系统还可以集成人工智能算法,学习和适应不断变化的运行条件,提高预警的准确性和及时性。

4.3 故障隔离与应急响应

在地铁基地全自动驾驶列车调度系统中,故障隔离与应急响应是确保系统安全运行的关键组成部分。故障隔离旨在快速识别并隔绝潜在的故障源,防止小问题演变成大故障,影响列车的正常运行。例如,当列车的传感器检测到异常数据,系统应立即启动隔离机制,切换至冗余传感器,同时封锁故障传感器的数据,以避免错误信息误导控制单元。

应急响应则要求系统具备快速决策和执行应急预案的能力。在控制单元层面,一旦主控制逻辑检测到异常工况,如列车失去牵引力或制动故障,热备份控制单元应无缝接管,执行预设的应急驾驶模式,如限速运行或自动停车。同时,系统应能实时向地铁调度中心发送警报,以便专业人员介入处理。

在通信冗余设计中,通信故障的容错机制确保在通信链路出现故障时,如无线信号丢失,系统能自动切换至备用有线通道,保证指令的准确传输。同时,通过历史通信数据的分析,系统能预测通信故障趋势,提前采取预防措施,降低因通信问题引发的安全风险。

五、调度系统验证方法

5.1 模拟仿真验证

在地铁基地全自动驾驶列车调度系统的安全冗余设计验证中,模拟仿真验证扮演着至关重要的角色。通过构建高保真度的系统模型,可以模拟各种实际运行条件和潜在故障场景,以测试冗余设计的效能。利用先进的仿真软件,我们能够模拟列车在不同环境下的运行状态,包括正常操作、单一故障以及多重故障情况。这种全面的模拟不仅帮助我们评估系统在正常情况下的性能,还能揭示潜在的设计缺陷,特别是在面对复杂故障场景时的响应能力。此外,模拟仿真验证还能提供详尽的数据记录,供后续分析和优化使用,从而不断迭代设计。

参考文献

- [1]程晟涵.地铁列车自动驾驶系统安全冗余设计研究[J].城市轨道交通研究, 2022, 25(3)
- [2]邓金柱.全自动运行系统行车调度指挥功能提升探讨.技术与市场, 2023(09)
- [3]李鹏.车辆调度系统在城市轨道交通中的应用分析[J].工程建设与设计, 2020(20)

5.2 试验台验证流程

在试验台验证流程中,首先会进行的是模拟仿真验证。这一阶段,地铁基地全自动驾驶列车调度系统的各种可能场景会被编程模拟,包括正常运行情况、通信干扰、传感器故障等多种复杂条件。随后,进入硬件在环测试环节。在此阶段,实际的物理组件,如传感器、控制器和通信模块,将被集成到仿真环境中。通过这种方式,可以模拟真实世界的交互,同时保持对测试条件的严格控制。硬件在环测试不仅验证了硬件组件的性能,还确保了它们与软件系统的无缝集成。此外,该流程还包括故障注入测试,即人为引入预设的故障,以评估系统在突发情况下的反应和恢复能力。

5.3 线上测试与评估

在线上测试与评估阶段,地铁基地全自动驾驶列车调度系统将在实际运营环境中接受全面的考验。这一环节至关重要,因为它直接关系到系统在实际应用中的性能和可靠性。线上测试不仅涵盖了模拟仿真验证和试验台验证中已验证过的场景,还引入了更多真实运营中可能出现的复杂情况,如乘客行为、环境变化等动态因素。

评估过程则侧重于收集和分析系统在实际运营中的表现数据,包括响应时间、故障率、系统稳定性等关键指标。通过对比分析,可以进一步验证和优化调度系统的性能,确保其在实际运营中能够持续、稳定、高效地运行。此外,线上测试与评估还为后续的维护和升级提供了宝贵的数据支持,有助于不断提升系统的整体性能和安全性。

结语

随着地铁基地全自动驾驶列车调度系统安全冗余设计的验证工作逐步深入,我们不仅在技术层面取得了显著进展,也为未来城市轨道交通的智能化、自动化发展奠定了坚实基础。通过传感器冗余、控制单元冗余、通信冗余以及安全监控与预警等多方面的设计,系统展现了卓越的安全性和可靠性。线上测试与评估阶段的成功实施,更是进一步验证了调度系统在实际运营环境中的稳定性和高效性。未来,随着技术的不断进步和需求的日益增长,地铁基地全自动驾驶列车调度系统将继续优化升级,以更加智能、高效、安全的方式服务于广大乘客。同时,我们也期待更多的科研机构和企业能够加入到这一领域的研究和探索中来,共同推动城市轨道交通事业的蓬勃发展。