

城市轨道交通信号冗余技术分析探讨

卜升鹏

南宁轨道交通运营有限公司

摘要：随着城市轨道交通的快速发展，安全和可靠性成为系统设计中的重要考虑因素之一。信号系统作为城市轨道交通的关键组成部分，其冗余性直接关系到整个交通系统的安全运营。本文旨在分析并探讨城市轨道交通信号系统冗余技术的重要性、实现方式和设计原则。通过对现有冗余技术的比较研究，探索提高信号系统稳健性和抗故障能力的新方法，并在此基础上，为未来城市轨道交通信号系统的升级和优化提供合理的建议。

关键词：城市轨道交通；信号系统；冗余技术；系统安全；可靠性

【DOI】10.12252/j.issn.2096-6261.2022.09.187

引言

城市轨道交通作为公共交通的重要组成部分，在现代城市的交通运输中扮演着举足轻重的角色。信号系统是确保轨道交通安全顺畅运行的神经中枢，它负责列车的调度、控制和管理。然而，系统故障或失效可能导致严重的运营中断甚至事故。因此，提高信号系统的冗余能力，以增强其抗故障影响和自愈能力，已成为轨道交通领域研究的重点。本文将对城市轨道交通信号系统冗余技术的应用现状进行分析，并探讨其发展趋势和未来展望。

一、冗余技术的必要性

在城市轨道交通信号系统中，冗余技术的必要性是由多个方面决定的。首先，冗余是提高系统可靠性和安全性的重要手段。由于城市轨道交通承载着大量的乘客，且运行频次高、要求准时准点，系统的任何小故障都可能导致重大的运行延误或者事故，冗余技术能够在关键组件出现故障时，通过备用系统或部件快速接管，最小化故障对整个交通系统的影响。例如，如果一个信号控制器发生故障，备用的控制器能够立即接管其职能，确保列车平安运行。其次，冗余技术有助于提高系统的抗风险能力。在面对自然灾害如地震、洪水，或者人为因素如恶劣天气、破坏活动时，城市轨道交通信号系统必须具备足够的弹性来应对这些不可预测的外部冲击。通过冗余设计，即便部分系统因极端事件受损，仍能通过冗余部分维持基本的运营服务，保障运输安全。再者，随着城市轨道交通网络的持续扩展和复杂化，单一的故障往往会对整个网络造成连锁反应，对城市交通造成严重影响。通过实施冗余策略，即使某一部分的轨道线路发生问题，也能迅速通过其他线路或方式进行调度，减少事故对网络的影响。最后，冗余技术还有利于

降低维护和修理期间的服务中断。在进行规划性维护时，可以利用冗余系统继续提供服务，而不需要完全停止某条线路的运营。简而言之，冗余技术是城市轨道交通信号系统设计中不可或缺的部分，它确保了在各种情况下系统的可靠性、稳定性和安全性，对于提升旅客的信心、保障运营效率和应对紧急情况至关重要。

二、城市轨道交通信号系统冗余技术的理论基础

1. 冗余技术的定义和分类

冗余技术在城市轨道交通信号系统中是指在关键的系统组件设计与实施阶段增加额外的资源或能力，用以在主要系统发生故障时提供保障和备份。这种设计理念旨在确保信号系统的可靠性和安全性，即使在某些单元或部分失效的情况下也能保证系统的正常运行。冗余技术通常可以分为几个类别：硬件冗余、软件冗余、信息冗余、时间冗余和空间冗余。硬件冗余涉及备用的物理设备，例如双重备份的信号处理器；软件冗余包括备用的软件系统，可在主系统出错时接管控制；信息冗余指的是相同信息的多处存储，以防单一源头信息丢失；时间冗余则通过增加系统操作的时间余地来避免故障，如在信号处理中增加额外的时间检查点；空间冗余通过分散关键组件的物理位置来降低事故或其他环境因素对整个系统影响的风险。

2. 冗余性对系统可靠性的影响

冗余性对于提升城市轨道交通信号系统的可靠性至关重要。通过冗余技术的实现，系统中的关键功能即使在遇到单个或多个组件故障时，也能继续稳定运行。这种对可靠性的影响体现在两个方面：一是提升了系统的故障容错能力，确保关键操作如列车定位和速度控制在遭受部分系统损坏时仍可维持；二是增加了系统的服务持续性，当发生故障时，冗余组件可以立刻介入，最大

限度地减少服务中断时间。综合效果就是提高了整个轨道交通网络的韧性，对乘客来说，这直接转化为了更高的服务可靠性和更低的运行风险。

3. 冗余设计原则和策略

在城市轨道交通信号系统的冗余设计中遵循一些基本原则和策略是至关重要的。首先，设计应当坚持“安全至上”的原则，任何冗余方案都应以提高整体系统的安全性作为首要目标。其次，冗余设计应当考虑成本效益比，确保引入的冗余程度与投入的资源相符，避免资源的过度浪费。另外，冗余方案要实现高度的集成和兼容性，以确保在主系统或任何备份系统启动时，都能平滑地过渡，没有性能上的折损。还需要全面评估系统的关键弱点，对于关键弱点实施有针对性的冗余措施。最后，应建立一个全面的监控机制来持续评估冗余系统的状态和效能，确保故障发生时能够迅速检测并切换到备用系统，保持正常运行。通过遵循这些设计原则和策略，冗余技术能够有效提升城市轨道交通信号系统的整体性能和可靠性。

三、冗余技术的实现方式

1. 硬件冗余

硬件冗余是通过在系统中多次部署物理设备来实现关键组件的备份，从而提高整个信号系统的可靠性和稳定性。在城市轨道交通信号系统中，硬件冗余常用来确保关键的信号控制、通信和电力供应等功能的不间断运行。硬件冗余技术可以具体分为几种形式，如N+1冗余、热备份和冷备份等。N+1冗余是指系统中一个关键组件拥有一个以上的备用，例如两台计算机同时工作，任何一台都能独立完成必要的任务；热备份指备用设备实时运行，随时准备在主设备出现故障时立即接管功能；而冷备份系统则通常处于关闭或待机状态，直到检测到故障时才被激活。硬件冗余的设计必须考虑故障检测与切换机制的实时性和准确性，确保在主设备故障时能够尽可能快地切换至备份设备，减少交通系统的中断时间，从而保障乘客的安全及列车的准时运行。

2. 软件冗余

软件冗余相较于硬件冗余而言，注重于通过软件级别的解决方案增加系统的抗故障能力。它的实现通常依赖于代码的多版本编程、容错算法、通过冗余的软件程序和系统数据的多重备份。多版本编程意味着对同一

个功能模块，由不同程序员用不同的算法或编程语言来实现，并同时运行这些不同的版本以保证其中一个出现问题时其他可以顶替。此外，软件容错算法设计用于识别可能出现的错误并提供系统级的纠正措施，例如通过在软件层面实现多数投票系统来确定正确输出的方法。在数据备份方面，则通过数据副本（如配置文件、关键数据库等）的冗余存储来保护信息不受单点故障影响。软件冗余的关键在于能够处理和纠正软件错误和数据损坏，而不需要人工干预，这样可以实现更加稳定的系统操作和更快速的故障恢复能力。这些策略的有效实施，不仅提高了系统的鲁棒性，而且对维护工作和后续升级也非常重要。

3. 信息冗余

信息冗余在城市轨道交通信号系统中的实现通常涉及在系统的关键信息点增设备份或多份相同的数据。这样的设计确保了即便原始数据源出现问题，如被损坏或丢失，系统依然能够通过访问备份数据继续运行。信息冗余的实践形式包括但不限于数据镜像、校验码、数据备份和故障转移。数据镜像是指实时复制存储信息至一个或多个位置，以此确保信息的实时备份。校验码则是在数据传输过程中添加额外的信息，用以在接收端检测数据完整性和正确性。此外，定期的数据备份，如数据库备份，可以保留历史信息，当系统恢复或迁移时使用。故障转移机制则是在数据管理和存储系统中实施的，可在检测到数据源故障时无缝切换到备用数据源。信息冗余不仅能够防止数据损失，还能在系统受到攻击，如网络攻击或病毒感染时，保护关键数据安全。

4. 时间冗余

时间冗余在城市轨道交通信号系统中体现为系统设计中预留额外的时间余量，以保障在出现故障或处理过程中的额外处理需求时系统依然能正常运作。这种冗余方式主要通过增加系统操作的时间缓冲区来实现，允许在完成关键任务的预期时间内有一定的延迟容忍度。例如，在信号处理流程中，如果一系列操作需要在特定时间完成，设计师会故意预留更多时间来处理这些操作，确保即使由于计算延迟或其他问题发生一定程度的延误，系统仍然能够按预定的总时间窗口完成任务。时间冗余也可以是通过引入重试机制实现的，如在数据传输失败时容许系统进行额外的传输尝试，或者当处理器临

时过负荷时提供延迟处理的能力。在轨道交通信号系统设计中合理布局时间冗余有利于提高运行的灵活性和稳定性，确保各种突发状况下，系统的运作不会受到重大影响。

四、冗余技术面临的挑战与发展趋势

1. 技术挑战和研究方向

冗余技术在提升城市轨道交通信号系统的安全性和可靠性方面虽然发挥了关键作用，但其发展和应用仍面临多方面的技术挑战。首先是如何有效地识别最关键的系统部分并为其设计合适的冗余机制，以最大限度地提升系统整体性能的同时避免不必要的资源浪费。随着系统复杂性的增加，对冗余关键节点的识别和故障切换逻辑的设计需要更加精准和智能。其次，随着技术进步，新的硬件设备、软件工具以及数据处理方式不断涌现，如何将这些新技术融合到现有的冗余系统中，使其更加高效且兼容，也是当前面临的一个重大挑战。此外，如何确保冗余系统本身的可靠性也是一个研究重点，因为冗余系统同样可能出现故障。因此，不断优化监测与维护策略，提升故障检测精度与快速恢复能力成为现代冗余技术研究发展的焦点。研究方向主要集中于自动化与智能化冗余系统、冗余管理算法的优化、以及系统故障预测和健康管理技术的发展。

2. 安全与效率的权衡

在城市轨道交通信号系统的冗余技术设计中，安全和效率之间的权衡始终是一个核心话题。提升冗余水平无疑可以增加系统的安全性，但同时可能会带来成本的上升、维护的复杂度增加以及系统效率的降低。例如，更多的冗余组件意味着更高的初期投资和后期的运维成本，同时过多的冗余也有可能导导致系统的决策时间和响应时间变长，影响系统的整体性能。因此，如何平衡安全与效率，实现最佳的成本效益，是冗余技术设计中需要重点解决的问题。从安全性的角度出发，冗余系统要确保在面对各种可能情况时能够稳定运行；而从效率的角度考虑，设计要尽可能地简洁、高效，以最合理的方式实现资源的有效使用。当前和未来的发展趋势指向采用智能算法和学习机制来动态调整冗余水平，以适应系统的实际运行状况，实现安全与效率的最佳平衡。此外，也在探索使用云计算、物联网和大数据技术等现代技术手段，实现更加灵活和成本效率更高的冗余解决方案。

3. 未来发展的技术趋势

未来的冗余技术发展趋势将朝着智能化、自动化以及集成化方向发展。利用人工智能、机器学习和大数据分析等先进技术，冗余系统能够更加智能地预测故障，动态调整冗余级别，并实时优化资源分配。系统自动化将有助于实现高效的故障检测和快速的切换机制，减少对人工干预的依赖，并提升冗余执行的准确性。同时，集成化的系统设计也将逐渐普及，通过模块化和标准化的部件，不同级别和类型的冗余可以更加灵活地集成到城市轨道交通信号系统当中，使得冗余技术与系统其他技术的结合更为紧密，提高系统整体性能。物联网技术的引入可以增强设备间的互联互通，优化硬件冗余的实现。而云计算则提供了一种有效的软件和数据冗余解决方案，使得系统数据可以在云端进行同步和备份，保证了数据的安全性和可访问性。网络通信技术的发展也将使得远程监控和管理变得更加便捷，进而提高系统运维的效率。总之，未来的冗余技术将更多地融合现代信息技术，形成更加复杂但也更加高效和可靠的系统。

结束语

通过对城市轨道交通信号系统冗余技术的广泛分析与探讨，本文强调了冗余设计在保障系统稳定运行和提高故障应对能力中的重要作用。展示了不同冗余技术的优势与局限性，并对未来的技术创新提出了展望。随着技术的进步和智能化水平的提升，城市轨道交通信号系统的冗余设计将更加复杂和智能，但其核心目标——提升系统的可靠性和安全性，仍将是未来研究和实践的关键。通向安全、高效、智能轨道交通的道路，冗余技术将发挥至关重要的作用。

参考文献

- [1] 许辰然.城市轨道交通信号冗余技术分析[J].城市建设理论研究(电子版), 2021(13): 75-76.
- [2] 龚海文.城市轨道交通信号冗余技术分析[J].电子世界, 2021(20): 25-25.
- [3] 甘勇.城市轨道交通信号系统冗余技术分析[J].城市轨道交通研究, 2019, 15(5): 110-113.
- [4] 张腾.城市轨道交通信号系统冗余技术研究[J].数码设计(下), 2018(9): 215-216.
- [5] 史文彬.城市轨道交通信号系统冗余技术分析[J].工业C, 2022, 0(1): 123.