

城市轨道交通信号系统计轴冗余布置技术方案探讨

刘维民 池润田 赵康效 于成奇

天津航智控科技有限公司 天津 300457

DOI:10.32629/ems.v8i3.18735

[摘要] 城市轨道交通信号系统是保障列车安全高效运行的核心,计轴设备作为列车位置检测的关键装置,通过实时采集计轴状态判定轨道区段占用/空闲状态,广泛应用于CBTC模式及后备降级模式中。然而,计轴设备在复杂运营环境下易受电磁干扰、硬件失效、等因素引发故障,故障发生后将导致区段状态信息丢失,触发联锁系统故障-安全保护机制,造成区段锁闭、进路无法办理,尤其是折返区域,直接拉长列车追踪间隔与折返间隔,降低运输性能。常规单套计轴配置难以应对故障对运行连续性的冲击,因此,计轴冗余布置成为必要的解决方案。

[关键词] 城市轨道交通; 信号系统; 计轴冗余配置; 折返区域

引言

计轴故障对城市轨道交通运行间隔的影响具有显著差异性,具体影响程度可分为以下层级:

常规影响: 故障触发区段锁闭、进路无法授权,拉长列车追踪间隔(如CBTC模式下正常2分钟的追踪间隔因故障显著增加)与折返间隔,单点通过能力下降,难以满足高峰期行车间隔要求;

严重影响: 折返区域、道岔区段等关键位置故障时,道岔被“过岔锁闭”锁定,需人工执行解锁命令或手摇道岔,导致折返作业中断,对全线运营间隔造成连锁冲击,甚至引发多列列车晚点;后备模式下故障处置更复杂,进路授权完全受阻,运行间隔延长幅度远超CBTC模式。

极端影响: 多区段故障或处置不及时,可能引发全线运营秩序混乱,形成大面积连锁晚点,显著降低线路运输能力。

1. 计轴冗余方案设计

在运营过程中,道岔轨道区段的安全是信号系统的关键问题。信号系统通过计轴设备判断列车的物理位置,为进路转动转辙机、开放信号提供条件。计轴点(车轮传感器)冗余布置尤为重要。

1.1 计轴冗余需求分析

1.1.1 系统处理分析

目前国内大多数计轴系统的计轴点不是冗余结构,单点故障就会造成一个计轴区段占用,但CBTC系统可通过ZC子系统对故障区段进行处理,从而保证系统的可用性。

ARB判定场景根据延伸区域内有无道岔分为两类:延伸区域内无道岔ARB判定和延伸区域内有道岔ARB判定。延伸区域内有道岔ARB判定,又根据道岔有位置跟无位置两种,当道岔有位置时,跟延伸区域内无岔ARB判定处理相同;道岔没有位置时,需要对3个分支都进行延伸区域的判定。

对于无岔计轴区域故障后ZC将判定为ARB,不影响后续通信列车运行。对于道岔区段的计轴故障将需要考虑多种因素。

1.1.2 间隔要求分析

计轴设备故障对CBTC和后备模式的影响及处理方式追

踪间隔是衡量信号系统性能的重要指标之一。一般来讲,折返间隔是能够影响全线运营间隔的关键因素。折返区域计轴设备故障影响在折返区域,道岔区段受扰将导致联锁系统激活相应道岔的过岔锁闭功能以防止道岔动作,限制道岔转动到相反位置的进路将不能被办理,以避免发生安全问题。在降级模式下,由于道岔被过岔锁闭锁定在计轴受扰前的位置上,进而影响在此折返区域进行折返的列车。

1.1.3 计轴冗余设置分析

通过系统处理分析及间隔要求的分析,折返区域区段计轴点配置复杂,对于这些关键区段实施计轴冗余布置,可提高运行效率。如下图1所示在JZ3、JZ4、JZ5、JZ6、JZ7、JZ8、JZ10、JZ12位置增加计轴设备进行冗余布置。

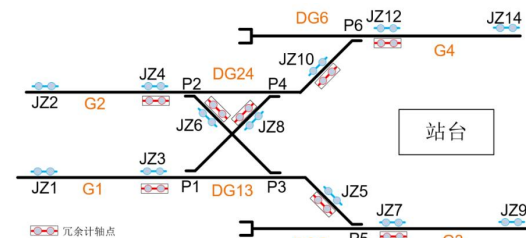


图1 关键位置计轴设备冗余布置图

1.2 计轴冗余布置方式

1.2.1 热备冗余模式

计轴子系统采用双套热备冗余架构,以保障轨道区段列车占用/出清检测的高可靠性与容错能力。

在设备配置层面,室外轨道对应区段同步布置两套独立计轴点,每套计轴点均配置完整的计轴点及信号采集组件;室内端则配套部署两套同构的计轴处理设备,与室外计轴点形成一一对应的信号传输链路。

在运行机制层面,双套计轴设备处于并行工作状态:正常工况下,两套计轴点同步对同一轨道区段的列车占用/出清状态进行检测与逻辑判断,确保采集数据的一致性;数据输出环节则遵循“主用设备优先”原则,由预设主用的一套计轴处理设备对外输出检测结果,并完成与信号系统的交互,备用设备则实时同步检测数据,处于热备待命状态。

以轨道区段G3的冗余配置为例(如下图2所示):区段

G3 的冗余检测由两套独立计轴单元构成, 其中计轴点 JZ3A 与 JZ5A 组成 G3A 检测单元, 计轴点 JZ3B 与 JZ5B 组成 G3B 检测单元, 两套单元并行实现对区段 G3 的状态检测, 共同支撑该轨道区段的安全监控功能。

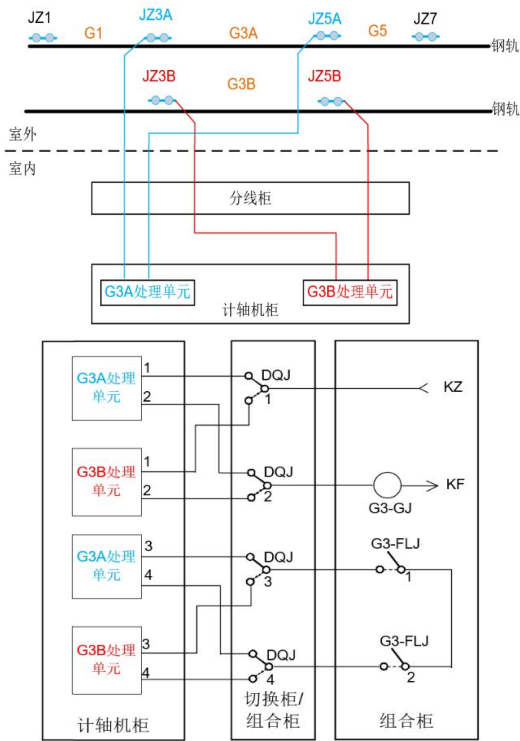


图 2 热备冗余方案室外计轴连接及室内原理示意图 GJ 状态切换

轨道区段占用/出清状态 (GJ 状态) 的输出环节, 需在室内 G3A、G3B 计轴处理单元的信号输出端口 (端口 1、端口 2) 处增设专用切换开关 DQJ。该切换开关可实现两路 GJ 状态的二选一输出, 确保正常工况下仅将主用计轴单元 (G3A 或 G3B) 的状态信息传递至联锁系统, 避免双路信号并行输出导致的逻辑冲突。

计轴复位指令切换

计轴复位控制环节, 需在室内 G3A、G3B 计轴处理单元的复位信号采集端口 (端口 3、端口 4) 处增设切换开关, 且该开关需与区段 G3 的复位继电器 (G3-FLJ) 进行串联配置。当联锁系统判定需要对区段 G3 执行计轴复位操作时, 将驱动 G3-FLJ 继电器动作; 此时复位指令将依据切换开关的当前档位, 传递至对应的 G3A 或 G3B 计轴处理单元, 完成目标单元的复位流程 (如上图所示)。

计轴单元主备切换开关可根据实际项目需求, 选用以下两种配置方式:

1) 旋钮式开关方式

切换开关可选用手动旋钮式开关, 该类开关需单独集成配置于专用切换柜内。切换柜的日常管理、开关操作权限及维护保养工作, 由信号维护部门统一负责, 并需制定专项操作规程与使用台账, 确保操作过程的规范性与可追溯性。

2) 继电器自动控制方式

可采用切换继电器替代手动开关, 实现主备切换的自动化控制。具体需在组合柜内增设专用切换组合, 由联锁系统直接驱动切换逻辑; 同时在现地控制界面增设对应的切换操作按钮, 并配置二次确认操作机制, 操作人员需完成两次指令确认后方可触发切换动作, 以此规避误操作风险, 保障系统切换过程的安全性。

此外, 针对未倒切接入联锁系统的备用计轴区段, 其运行状态不参与联锁逻辑运算, 但相关设备的异常故障信息可实时上传至信号监测系统。运维人员可通过监测系统, 查看备用区段的设备运行参数、故障告警内容等信息, 为设备状态评估与预防性维护提供数据支撑。

1.2.2 冷备冗余模式

冷备冗余配置方案, 采用“一用一备、主备独立”的架构设计, 以实现轨道区段检测功能的应急保障。

在设备部署层面, 室外对应轨道区段 G3 同步布置两套独立计轴点, 即 JZ3A 与 JZ5A 为一组、JZ3B 与 JZ5B 为另一组。正常运行工况下, 仅启用其中一组计轴点开展轨道区段占用/出清处理, 另一套计轴点则处于断电备用状态; 室内端仅配套部署一套计轴处理设备, 该设备与当前启用的室外计轴点建立唯一的数据传输链路, 完成区段状态的处理。

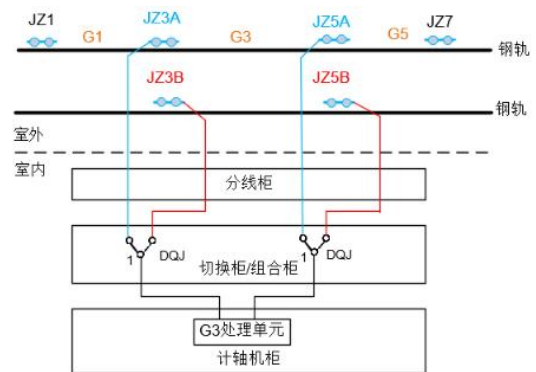


图 3 冷备冗余方案室外计轴连接原理图

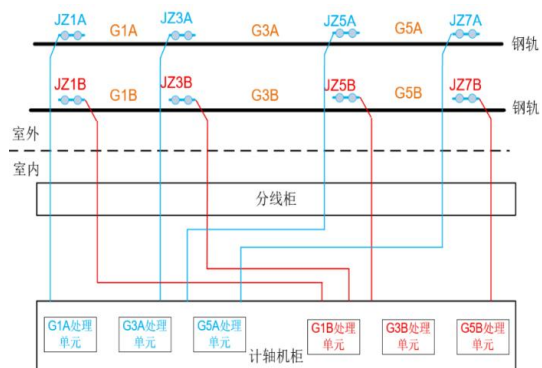


图 4 全冗余方案连接原理图

室内配套设置专用切换开关, 可实现室外在用计轴设备与备用计轴设备的灵活切换。切换开关选取可参考热备冗余模式。

在冷备冗余架构下, 未倒切接入系统的备用车轮传感器, 虽不参与轨道区段的实时检测工作, 但需严格遵照车轮传感器操作维护手册定期检测。检测内容需覆盖传感器的机械安

装紧固性、电磁信号采集精度、传输链路通断状态等关键指标, 确保备用设备始终处于“随时可投用”的完好状态。

运营期间如需执行主备倒切操作, 需严格遵循以下操作前提与流程。

1) 倒切前状态确认

倒切操作实施前, 必须通过信号系统终端及现场人工核查的双重方式, 确认待倒切计轴点所关联的轨道区段处于无车占用状态, 避免在列车运行过程中切换引发检测逻辑紊乱。

2) 倒切后复位要求

主备计轴点切换操作完成后, 需对目标轨道区段执行计轴复位操作。复位前, 需再次确认该区段无车占用, 确认设备恢复正常检测功能, 方可投入运营使用。

冷备冗余模式既支持日常维护状态下的计划性切换, 也可应对突发故障场景下的应急切换, 有效提升计轴子系统的可用性与容错能力。

1.2.3 全冗余模式

全冗余配置方案, 采用“室内外设备双套独立部署”的架构设计, 通过核心设备的“双份”配置, 实现计轴系统全链路的冗余容错, 从根本上提升轨道区段检测的可靠性。

在设备配置层面, 室内部署两套完全独立的计轴处理单元, 室外对应轨道区段同步配置两套独立的计轴点, 室内外设备形成一一对应的独立数据传输链路, 两套系统并行运行

表格 1 模式对比表

方模式/角度	热备冗余模式	冷备冗余模式	全冗余模式
冗余架构	室外双套计轴点+室内双套处理单元, 双套并行运行	室外双套计轴点+室内单套处理单元, 一用一备	室外双套计轴点+室内双套处理单元, 双套独立部署
联锁交互特点	切换过程无感知, 联锁始终接收单路有效数据, 不中断区段检测功能。	切换需人工介入且需复位, 联锁在切换期间暂不采集该区段数据, 复位后恢复。	切换过程无感知, 联锁始终接收单路有效数据, 双套单元独立运行保障容错能力。
适用场景	对可用性要求高、需避免人工干预的核心轨道区段。	对成本控制严格、允许短时人工介入切换的非核心区段。	对安全性和容错能力要求极高的关键轨道区段(如正线道岔区段)成本要求低。

结束语

计轴设备冗余技术作为保障城市轨道交通信号系统可靠性的手段, 其方案设计需紧密结合线路运营需求、场景特性与成本预算, 可采用“混合冗余”模式——如正线折返区域及常用渡线区域采用热备冗余、车辆段咽喉区采用冷备冗余等。

随着城市轨道交通的发展, 计轴冗余方案需更注重“主动预防”与“智能适配”, 在保障安全的同时, 进一步提升系统可用性与运营效率, 为城市轨道交通的高效、可靠运行提供更坚实的技术支撑。

[参考文献]

[1]王向阳. CBTC 系统计轴设备故障处理和关键区段冗余配置方案[J]. 城市轨道交通研究, 2018, 21(06): 40-43. DOI: 10.16037/j.1007-869x.2018.06.011.

且互不干扰。两套室内计轴处理单元分别对各自关联的室外计轴点采集数据进行运算分析, 独立向联锁系统输出对应区段的占用/出清状态信息。

从物理层面来看, G1A 与 G2A 对应同一轨道区段, 两套计轴检测单元针对该物理区段开展并行独立检测, 如图 4 所示。

采用继电器接口时, 计轴全冗余配置需要在室内增加一倍继电器组合及联锁采集设备。

采用通信接口时, 计轴与联锁通过网络接口连接, 需要计轴和联锁进行处理, 将同一物理轨道区段对应的两路计轴状态信息, 以的故障安全原则拟合并通过状态校验与整合规则, 输出唯一的轨道区段占用/出清状态。

全冗余配置虽然理念可行, 但不仅成本高, 维护量大, 而且在取舍同一个系统的两个状态信息时, 需要计轴与联锁系统同时修改接口软件, 此方案仍在研究与尝试阶段。

2. 分析比较

为明确计轴设备热备、冷备、全冗余三种模式下与联锁系统的数据交互逻辑, 确保不同冗余架构均能契合故障安全原则及行车控制需求, 将各模式的核心交互特性进行系统梳理与对比。本对比表聚焦冗余架构、数据采集传输规则、故障切换机制等关键维度, 清晰界定各模式下联锁系统的交互边界与协同逻辑, 为计轴子系统的方案选型、架构设计及运维保障提供核心技术依据, 具体内容如下。

[2]吴炳昊. CBTC 系统中计轴失效处理的研究[J]. 城市轨道交通研究, 2024, 27(10): 220-224.

[3]吕后波. 城市轨道交通计轴系统在列车折返区域的冗余控制方案[J]. 城市轨道交通研究, 2018, 21(S1): 79-82. DOI: 10.16037/j.1007-869x.2018.S1.021.

[4]肖扬. 地铁运营计轴故障处置讨论[J]. 科技风, 2017, (15): 298. DOI: 10.19392/j.cnki.1671-7341.201715263.

[5]岳磊, 徐文婷. 城市轨道交通折返效率优化措施研究[J]. 铁路通信信号工程技术, 2025, 22(12): 93-99.

[6]许阳阳, 朱文才. CBTC 系统中 ARB 判定方法[J]. 铁路通信信号工程技术, 2021, 18(07): 81-85.

作者简介: 刘维民, 出生年月: 19871011, 男, 汉族, 学历: 大学本科, 籍贯: 甘肃张掖, 职称: 工程师, 研究方向: 自动控制。