

# 城市轨道交通站台门系统安全回路问题分析与处理对策

郭庆

天津市政工程设计研究总院有限公司 天津 300392

**摘要：**城市轨道交通作为现代都市公共交通的骨干，其运营安全直接关系到广大乘客的生命财产安全和社会稳定。站台门（Platform Screen Doors, PSD）系统作为连接列车与站台的关键接口设备，是保障乘客候车安全的第一道防线。其中，安全回路（Safety Loop Circuit）作为站台门系统的核心控制逻辑，其可靠性与稳定性至关重要。一旦安全回路出现故障，将直接导致列车无法正常发车或进站，严重扰乱运营秩序，甚至可能引发安全事故。本文旨在系统性地剖析城市轨道交通站台门系统安全回路的工作原理、常见故障模式及其成因，并在此基础上，从设计优化、运维管理、技术升级等多个维度，提出一套科学、有效的处理对策与预防措施，以期提升城市轨道交通系统的整体安全性和可靠性提供理论参考与实践指导。

**关键词：**城市轨道交通；站台门系统；安全回路；故障诊断；处理对策

## 引言

站台门系统自上世纪80年代被引入轨道交通领域以来，已从最初的半高式安全门发展为如今广泛应用的全高式屏蔽门。其主要功能在于物理隔离站台公共区与轨道行车区，有效防止乘客意外跌落轨行区、跳轨自杀等恶性事件的发生，同时还能改善站台环境（如减少活塞风、降低噪音、节约空调能耗），并为实现无人驾驶（GoA4等级）提供了必要的安全保障条件。在站台门系统的诸多子系统中，安全回路扮演着“神经中枢”的角色。它是一个串联了所有滑动门（ASD）、应急门（EED）和端门（MSD）关闭且锁紧状态检测开关的硬线电路。只有当安全回路完整闭合时，信号系统才会收到“站台门关闭且锁紧”的允许信号，进而授权列车启动或进站。因此，安全回路的任何异常断开，都会被信号系统解读为存在安全隐患，从而触发紧急制动或禁止发车指令，造成列车晚点甚至中断运营。近年来，尽管站台门技术不断成熟，但由安全回路故障引发的运营事件仍时有发生。这些故障不仅影响了乘客的出行体验，更对运营组织的可靠性和应急响应能力提出了严峻挑战。本文通过构建一个全面的问题分析框架，并提出综合性的处理对策，为行业同仁提供一套可借鉴、可推广的解决方案。

## 1 站台门系统安全回路的工作原理与架构

### 1.1 安全回路的基本构成

一个典型的城市轨道交通站台门安全回路主要由以下几个部分构成：

#### 1.1.1 状态检测开关

这是安全回路的“感知单元”。每个滑动门、应急门和端门上都安装有至少两个独立的状态检测开关，通常

包括：（1）关门到位开关：用于检测门扇是否完全关闭。（2）锁紧到位开关：用于检测门的机械锁是否已正确合并锁紧。这些开关通常是无源的干接点，如微动开关或接近开关。只有当门扇完全关闭且锁紧机构动作到位后，这两个开关才会同时闭合，形成通路。

#### 1.1.2 安全回路电缆

这是一条专用的、具有高可靠性的硬线电缆，采用串联方式将站台上所有门单元的状态检测开关依次连接起来，形成一个完整的串联回路。

#### 1.1.3 安全继电器

位于站台门控制柜（PSC - Platform Screen Door Controller）内。安全回路电缆的首尾两端接入安全继电器的线圈回路。当整个回路中的所有开关均处于闭合状态时，电流流过线圈，使安全继电器吸合。安全继电器的常开触点（NO Contact）会随之闭合。

#### 1.1.4 信号接口

安全继电器的常开触点被接入信号系统（如CBTC - Communication-Based Train Control）的输入回路。当触点闭合，信号系统即收到一个高电平（或低电平，取决于设计）的“PSD Closed and Locked”信号，表明站台区域安全，可以允许列车运行。

## 1.2 工作逻辑流程

安全回路的工作逻辑遵循严格的“故障-安全”原则，具体流程如下：（1）列车进站/停稳：列车停靠在指定位置后，车载ATC（Automatic Train Control）系统向站台门系统发送开门指令。（2）站台门开启：PSC接收到指令后，驱动所有滑动门同步开启<sup>[1]</sup>。此时，各门单元的关门到位开关和锁紧到位开关均处于断开状态，导致整个安全回

路断开。(3) 乘客上下车: 在乘客上下车期间, 安全回路持续处于断开状态, 信号系统收不到允许信号, 列车保持制动状态, 无法启动。(4) 站台门关闭: 司机(或ATO系统)操作关门按钮, PSC驱动滑动门关闭。门扇在关闭过程中, 首先触发关门到位开关, 随后锁紧机构动作, 触发锁紧到位开关。(5) 安全回路闭合: 当且仅当所有门单元的两个开关都成功闭合后, 安全回路才形成完整通路。电流流过安全继电器线圈, 使其吸合。(6) 信号授权: 安全继电器的触点闭合, 向信号系统发送“PSD Closed and Locked”信号。信号系统验证此信号后, 解除对列车的制动, 允许其发车。这个过程清晰地表明, 安全回路是一个“与”逻辑的硬线实现——任何一个门单元的状态异常, 都会导致整个回路失效, 从而阻止列车运行, 最大限度地保障了安全。

## 2 安全回路常见故障模式及成因分析

### 2.1 机械类故障

机械类故障是导致安全回路断开的最主要原因。(1) 异物卡阻: 乘客携带的行李、衣物、小件物品等被夹在门缝中, 导致门扇无法完全关闭, 关门到位开关无法触发。尤其是在早晚高峰时段, 人流密集, 此类故障尤为常见。(2) 门体变形或轨道磨损: 长期使用后, 滑动门的吊挂轮、导轨等部件会出现磨损、变形或松动, 导致门扇在运行过程中产生晃动、倾斜甚至脱轨, 无法精准定位, 使得开关无法被可靠触发。(3) 锁紧机构失效: 锁紧电机、电磁铁或机械连杆因老化、疲劳、润滑不足等原因, 无法完成锁紧动作, 或者锁紧后未能有效触发锁紧到位开关。

### 2.2 电气类故障

电气类故障直接破坏了安全回路的物理完整性或信号传递。(1) 开关本体故障: 微动开关或接近开关本身存在质量问题, 如触点氧化、簧片疲劳、内部元件损坏等, 导致在门体状态正常的情况下, 开关无法正常闭合或断开。(2) 接线松动或虚接: 由于列车运行产生的振动、温湿度变化或施工工艺不佳, 安全回路中的接线端子可能出现松动、脱落或接触不良, 造成回路时通时断, 极难排查<sup>[2]</sup>。(3) 电缆损伤: 安全回路电缆在敷设过程中若受到挤压、弯折过度, 或在后期维护中被意外损伤, 可能导致内部导线断裂或绝缘层破损, 引起短路或断路。(4) 安全继电器故障: 作为核心执行元件, 安全继电器若出现线圈烧毁、触点粘连或老化失灵, 将直接导致信号误报。

### 2.3 环境与外部因素

恶劣的运营环境也会对安全回路的稳定性构成威胁。

(1) 温湿度影响: 地下车站虽然环境相对稳定, 但高湿度环境仍可能导致开关触点氧化、腐蚀, 增加接触电阻, 甚至形成绝缘层, 阻碍信号导通。地面或高架车站则面临更极端的温度变化, 热胀冷缩效应可能影响机械部件的配合精度。(2) 灰尘与油污: 站台环境中的灰尘、乘客丢弃的烟灰、食物残渣以及设备维护时残留的润滑油等污染物, 可能积聚在开关触点或锁紧机构内部, 阻碍其正常动作。(3) 人为误操作: 乘客强行扒门、倚靠站台门, 或工作人员在应急处置后未将应急门/端门正确复位并锁紧, 都会直接导致相关开关无法闭合。

## 2.4 系统设计与兼容性问题

深层次的原因往往源于系统设计阶段。(1) 开关选型不当: 选用的开关防护等级(IP Rating)不足, 无法适应地铁环境; 或其机械寿命、电气寿命低于实际需求。(2) 冗余设计不足: 部分早期线路的安全回路采用单开关设计(仅关门到位或仅锁紧到位), 缺乏双重确认机制, 可靠性较低。即使采用双开关, 若其安装位置过于接近, 可能因同一故障源(如局部变形)同时失效, 失去冗余意义。(3) 接口协议不匹配: 站台门系统与信号系统来自不同供应商时, 若双方对“允许信号”的定义(如电平高低、脉冲宽度、滤波时间)理解不一致, 可能导致信号系统误判安全回路状态。

## 3 安全回路故障的处理对策与预防措施

针对上述复杂多样的故障成因, 必须采取系统化、多层次的对策, 从事前预防、事中诊断到事后处理, 构建一个完整的闭环管理体系。

### 3.1 优化系统设计, 提升固有可靠性

设计是安全的源头。应在新线建设和既有线改造中, 着力提升安全回路的内在可靠性。(1) 强化冗余与多样性设计: 全面推行“关门到位+锁紧到位”双开关串联的设计模式。更重要的是, 应考虑采用不同原理的开关(如机械微动开关+磁性接近开关)进行组合, 避免共因失效(Common Cause Failure)。同时, 在关键节点可考虑设置回路监测点, 便于分段定位故障。(2) 选用高可靠性元器件: 严格筛选供应商, 选用工业级、高防护等级(如IP65以上)、长寿命的开关和继电器<sup>[3]</sup>。对于安全继电器, 应选用经过SIL(Safety Integrity Level)认证的产品。(3) 标准化接口与协议: 在项目初期, 明确站台门与信号系统之间的接口规范, 包括信号类型、电气参数、时序要求等, 并进行充分的联合调试(Integration Testing), 确保无缝对接。

### 3.2 构建智能化运维体系, 实现精准诊断

传统的“盲人摸象”式故障排查效率低下。应充分

利用现代信息技术,打造智慧化的运维平台。(1)部署在线监测与诊断系统:在PSC中集成高精度的数据采集模块,实时监测安全回路的电压、电流等参数。通过分析回路阻抗的细微变化,可以提前预警接线松动、触点氧化等潜在隐患。(2)建立门单元级状态感知网络:为每个门单元配置独立的地址编码和状态反馈模块。一旦安全回路断开,系统能立即精确定位到具体的故障门号,甚至能区分是关门开关还是锁紧开关的问题,将故障排查时间从数十分钟缩短至几分钟。(3)应用大数据与AI分析:收集历史故障数据、设备运行参数、环境数据等,利用机器学习算法建立故障预测模型。例如,通过分析某扇门的关门力、运行时间等趋势,可以预测其导轨磨损程度,实现从“被动维修”到“预测性维护”的转变。

### 3.3 完善精细化管理制度,夯实运维基础

再先进的技术也需要人来执行。必须建立一套科学、严谨的运维管理制度。(1)制定标准化作业流程(SOP):针对日常巡检、定期保养、故障应急处置等场景,编制详细、图文并茂的操作手册。特别是对安全回路相关部件的检查,要明确检查项点、方法和标准<sup>[4]</sup>。(2)加强人员培训与考核:定期对维保人员进行专业技能培训和安全教育,使其熟练掌握安全回路的原理、故障诊断技巧和应急处置流程。通过实操考核,确保人人过关。(3)实施全生命周期管理:建立设备履历档案,记录每个关键部件(如开关、继电器)的安装日期、维修记录、更换周期等信息。根据其寿命周期,主动安排预防性更换,避免“带病运行”。

### 3.4 创新应急处置机制,最小化运营影响

当故障不可避免地发生时,高效的应急处置是减少对运营干扰的关键。(1)推广“互锁解除”与“单门旁路”的规范使用:在确保现场安全的前提下,授权经过严格培训的站务员或司机,在信号系统侧操作“互锁解除”(Bypass),或在站台门本地控制盒(LCB)上将故

障门置于“手动关”或“隔离”位,实现单门旁路。这能在不影响其他门 ze 常工作的情况下,快速恢复列车运行。但必须配套严格的授权、监护和复位流程,防止滥用。(2)建立快速联动响应机制:一旦发生安全回路故障,应自动触发多部门联动。信号系统、站台门系统、车站控制室、调度中心和维保团队应能实时共享故障信息,协同制定最优处置方案,压缩信息传递和决策链条。

## 4 结语

城市轨道交通站台门系统安全回路虽是一个看似简单的硬线电路,但其背后却承载着关乎千万乘客安全的千钧重担。本文通过对安全回路工作原理的阐述,系统梳理了其常见的机械、电气、环境及设计层面的故障模式与深层成因。在此基础上,提出了一套涵盖“优化设计、智能运维、精细管理、创新应急”四个维度的综合性处理对策。未来的城市轨道交通将朝着更高自动化、智能化的方向发展。站台门安全回路作为保障全自动运行(FAO)安全的核心环节,其可靠性要求只会越来越高。我们应当摒弃“头痛医头、脚痛医脚”的传统思维,转而拥抱系统工程的理念,将安全回路的可靠性管理融入轨道交通全生命周期的每一个环节。唯有如此,才能真正筑牢城市轨道交通的安全基石,为市民提供更加安全、便捷、可靠的出行服务。

## 参考文献

- [1]金鑫.轨道交通站台门安全回路的问题及处理[J].中国高新科技,2025,(07):127-128+131.
- [2]林晓光,官建光,闻典,等.地铁站台门安全回路应急保障装置[J].铁道运营技术,2026,32(01):55-58.
- [3]吕征,康慧太,王骞,等.地铁站台门安全回路风险分析及改进方案[J].郑州铁路职业技术学院学报,2024,36(03):21-23.
- [4]唐智金,田恒.地铁车站站台门安全回路研究与分析[J].现代城市轨道交通,2023,(S1):36-39+49.