

Research on Key Technology of Escalator Resistance to Voltage Sags in Urban Rail Transit

Xiangfeng Wu

China Railway Second Survey and Design Institute Engineering Group Co., Ltd., Chengdu, Sichuan, 610031, China

Abstract

Escalators at urban rail transit stations are responsible for continuous passenger transportation under high-capacity conditions, where operational stability directly impacts passenger flow efficiency and station safety. Power quality disturbances such as voltage sags can trigger shutdowns of sensitive equipment, leading to production disruptions and significant economic losses as well as public concerns. This study analyzes operational characteristics of escalators during voltage sag scenarios, examining critical influencing factors including power supply reliability, control coordination, protection system integration, and monitoring mechanisms. By aligning with operational requirements of rail transit electromechanical systems, proposed anti-voltage-sag technical solutions provide actionable references for enhancing escalator continuity performance and improving station electromechanical system resilience.

Keywords

urbanrailtransit; escalator; voltagesags; anti-interference; electromechanical control

城市轨道交通自动扶梯抗电压暂降关键技术研究

吴向峰

中铁二院工程集团有限责任公司，中国·四川成都 610031

摘要

城市轨道交通车站自动扶梯承担大客流条件下的连续输送任务，其运行稳定性直接关系乘客通行秩序与车站运营安全。以电压暂降为代表的电能质量扰动易造成敏感设备跳停，导致生产中断，进而引发巨大的经济损失和社会舆情。围绕自动扶梯在电压暂降工况下的运行特征，从供电保障、控制穿越、保护协同和监测预警等方面分析关键影响因素，并结合轨道交通机电系统运行要求提出抗暂降技术路径，可为提升自动扶梯连续运行能力与车站机电系统韧性提供参考。

关键词

城市轨道交通；自动扶梯；电压暂降；抗扰动；机电控制

1 引言

城市轨道交通车站空间封闭、客流集中，自动扶梯已成为站内客流组织和垂直换乘的重要设备。与一般民用建筑相比，轨道交通供电环境更复杂，负荷波动更频繁，短时电压异常对自动扶梯运行状态影响更直接。电压暂降是电压有效值突然下降至 0.1-0.9p.u.，并短暂维持 10ms-1min 后恢复正常的现象，其是电网运行中不可避免的电能质量问题^[1]。随着车站机电系统对连续性和可靠性要求持续提高，围绕供电适应性、控制稳定性和故障响应效率开展车站自动扶梯抗电压暂降技术研究，已具有较强工程现实意义。

2 城市轨道交通自动扶梯抗电压暂降的基本特征与工程意义

2.1 自动扶梯供电负荷特征与电压暂降影响机理

电压暂降因其随机性与不可避免性而被看作最严重的电能质量问题之一。城市轨道交通自动扶梯属于车站机电系统中的连续运行设备，布设点位多，与客流组织联系紧密。其动力系统由电动机、变频器、控制板、接触器、制动单元及辅助电源组成，供电波动会沿动力回路、控制回路和执行机构逐级传递。与一般建筑自动扶梯相比，轨道交通场景下设备更易受重载运行、多台并行启动等因素影响，短时暂降对运行状态作用更直接。相关技术资料表明，自动扶梯主回路变频器在三相剩余电压处于 40% ~ 85%、电压暂降持续时间不超过 200ms 时，应保持不报故障，说明设备对短时电压波动存在明确适应边界。对常用交流驱动系统而言，在频率基本稳定条件下，电动机电磁转矩与端电压平方近似成正比，可表示为：

【作者简介】吴向峰（1981-），男，中国山东济宁人，本科，高级工程师，从事建筑、装修研究。

$$\frac{T_e}{T_N} \approx \left(\frac{U}{U_N}\right)^2 \quad 1)$$

式中, T_e 为实际电磁转矩, T_N 为额定电磁转矩, U 为实际电压, U_N 为额定电压。电压下降后, 驱动转矩随之衰减, 设备更易出现运行不稳或保护停机, 在换乘节点和高峰时段还可能放大通行组织压力。

2.2 自动扶梯抗电压暂降能力提升的工程应用意义

自动扶梯抗电压暂降能力的提升, 直接关系车站运行连续性和乘客通行秩序。车站空间相对封闭, 换乘节点客流集中, 扶梯在电压波动后频繁停机, 易造成排队积压、通道拥堵和现场组织压力上升, 高峰时段影响更为明显。根据地铁运营统计数据, 自动扶梯引发的客伤占地铁内发生客伤总数的 50%-60%。现场处置中还会增加值守引导、客流分流和设备恢复确认等管理工作量, 影响运行组织衔接。从设备管理看, 反复启停、保护动作和控制复位会加重电机、制动器、接触器及控制元件负担, 长期运行后易缩短设备寿命并提高维护成本。

3 城市轨道交通自动扶梯抗电压暂降面临的主要问题

3.1 城市轨道交通供电环境复杂与电压暂降诱因多样

在城市轨道交通车站运营过程中, 随着运营时间的增长, 设备将出现效能下降甚至失效的情况, 同时电压波动、使用负荷变化、系统控制异常等外部因素可能导致设备故障停机。电压暂降并非偶发的单一现象, 绝大多数是电网短路故障而引发的, 而其本质原因可归结为电网故障期间突然产生的大电流流经系统阻抗所致。GB/T 17626.11—2023 明确适用于连接至 50 Hz 交流低压供电网、每相输入电流不大于 16 A 的电气电子设备, 并将电压暂降、短时中断和电压变化作为需要专门评价的抗扰度对象, 这说明短时电压波动本身已是工程设计和设备选型中需要面对的现实边界^[2]。对城市轨道交通车站而言, 上级电网故障、大容量负荷投切、牵引供电波动、变压器切换及车站内部设备集中启动等因素相互叠加, 更易使末端设备承受复杂暂降工况。

3.2 自动扶梯控制驱动系统抗扰能力不足

自动扶梯的驱动与控制系统是抵御电压暂降影响的关键环节, 但现有设备中仍存在抗扰能力不足的问题。公开技术资料表明, 自动扶梯控制驱动系统对电压暂降具有较明确的工程适应边界, 说明其抗扰能力并非无限承受, 而是受控制电源稳定性、保护阈值设定和联锁响应逻辑等因素共同制约。现实运行中, 部分设备欠压阈值设置偏保守, 控制电源、联锁单元和通信模块抗跌落能力不足, 短时波动尚未达到危险边界时系统已提前停机, 易出现“可维持运行而未维持”的情况。

现场故障处理中, 这类问题常表现为主回路未见明显异常, 但控制柜已先报码或联锁退出, 值守人员完成复位后

设备又可短时恢复运行, 导致故障呈现间歇性、重复性特征, 不仅增加排查难度, 也易造成误判。对运营单位而言, 这类问题若长期依赖临时复位和人工盯守处理, 难以真正提高设备连续运行能力, 反而会在高峰期放大运行保障压力。

3.3 监测预警与故障溯源机制不完善

自动扶梯抗电压暂降不仅取决于设备本体, 也与监测、判定和维护体系是否完备密切相关。相关编制说明明确指出, 目前国内暂无标准对自动扶梯电压暂降保护装置在设计、验收、检验与维护等方面做出统领性指导, 这表明行业在故障判定口径、试验验证方法和后期维护要求上仍存在一定空白。当前一些车站数据采集仍停留在启停状态和报码层面, 难以完整还原“暂降发生—控制响应—停梯结果”的事件链, 系统性治理基础因此相对薄弱。

实际工作中, 值班人员往往只能依据监控画面、现场报码和维修经验进行初步判断, 难以同步掌握暂降发生时刻、持续时间、控制回路状态及保护动作先后顺序, 结果是同类故障反复出现, 原因却长期停留在“外部波动”或“设备瞬时异常”的笼统结论上。缺少统一的数据留存、事件比对和分级分析机制, 也使后续参数优化、部件更换和回路治理缺乏直接依据, 落实到运维层面时易出现处置被动、整改分散和改进闭环不足的问题。

4 城市轨道交通自动扶梯抗电压暂降关键技术路径

4.1 供电侧暂降抑制与稳压保障技术

提升自动扶梯抗电压暂降能力, 应先从供电侧降低暂降传递到设备端的概率和强度^[3]。

在车站配电设计阶段, 应结合负荷性质、回路容量和设备分布优化自动扶梯电源接入方式, 减少长距离供电、集中启动和共用回路干扰带来的附加压降; 对换乘站、大客流站和重点疏散通道内的自动扶梯, 可优先采用独立性和稳定性更强的供电回路。

在自动扶梯设备选型阶段, 可配置 SPWM 快速电压补偿、超级电容短时储能等装置, 对控制回路与安全回路实现毫秒级稳压, 提高短时暂降条件下的电源保持能力。

供电侧治理重点应放在 0.2 s 以内短时暂降工况的抑制与支撑上, 可在相关回路中配置稳压补偿、动态电压恢复或控制电源短时支撑单元, 将波动控制在设备可承受范围内, 为后续穿越运行创造条件。在工程检验验收中, 还应重点核查自动扶梯主回路变频器在三相剩余电压 40% ~ 85%、电压暂降持续时间不超过 200 ms 条件下的不报故障能力及电压恢复后的正常工作能力, 使设计、选型与验收要求形成统一闭环。

4.2 控制系统穿越控制与保护协同技术

自动扶梯在电压暂降工况下能否维持运行, 关键在于控制系统穿越能力与保护逻辑的协调水平。现行抗扰度试验

标准通常将 40% 电压持续 10 周期、70% 电压持续 25 周期作为典型暂降工况，按 50 Hz 折算约为 200 ms 和 500 ms，这说明短时暂降已是设备控制设计中需要重点应对的现实场景。结合自动扶梯控制柜运行特征可见，暂降风险不仅体现在主驱动回路，还可能先作用于控制电源、保护单元和连锁回路，因此控制系统是否具备稳定的短时穿越能力，直接影响设备能否避免非必要停机。

保护设计不宜采取“一旦欠压立即停机”的刚性方式，而应根据暂降深度、持续时间和负载状态进行分层响应^[4]。对短时轻中度暂降，可通过延时欠压保护、增强母线支撑和稳定控制电源保持基本运行；当暂降超过安全边界时，再进入受控停机状态，以减少误停和冲击停梯。为提高不同暂降工况下控制响应的针对性，可将自动扶梯电压暂降典型工况与响应措施整理如表 1。

表 1 自动扶梯电压暂降典型工况与响应措施

暂降工况	主要响应	建议措施
剩余电压 40% ~ 85%，持续时间 ≤200 ms	保持基本运行	优化欠压阈值，增强控制电源支撑
40% 电压持续 10 周期	延时保护，避免误停	完善穿越控制逻辑
70% 电压持续 25 周期	分层响应，必要时受控停机	优化保护时限与恢复策略

由表 1 可见，自动扶梯抗电压暂降的关键不在于单一保护动作，而在于根据暂降程度采取差异化响应。模拟测试表明，优化欠压阈值和控制电源支撑后，典型工况下误停次数由 3 次降至 1 次，平均恢复时间缩短约 30%，控制响应稳定性有所改善。

4.3 智能监测预警与运维管理技术

自动扶梯状态检测与智能预警诊断系统能实时监控自动扶梯运行状态，通过各项运行参数预测潜在故障，制定预防性维修计划。抗电压暂降能力建设不能只依赖硬件和保护整定，还应配套完善的智能监测与运维体系。

在预警应用中，可围绕电压跌落频次、持续时间、控制器复位次数和异常停机记录构建状态评价指标，对设备抗扰能力进行分级管理。为便于衡量自动扶梯在暂降工况下的连续运行水平，可引入抗暂降运行保持率指标：

$$K = \frac{N_s}{N} \times 100\% \quad 2)$$

式中，K 为抗暂降运行保持率，N_s 为电压暂降事件中保持正常运行的次数，N 为电压暂降事件总次数。K 值越高，说明设备在短时电压波动条件下的运行保持能力越强。以某换乘站 3 个月运维记录为例，识别相关事件 26 次，连续运行 19 次，运行保持率为 73.08%；控制器复位 5 次，异常停机 2 次，平均恢复时间 3 ~ 6 min。由此可更直观识别高风险

险点位，并为元件检测、回路治理和运维优化提供依据。通过建立站点级事件数据库和设备级运行档案，可持续支撑分级管理与系统性优化。

5 结语

城市轨道交通自动扶梯的稳定运行，不仅取决于单台设备的机械性能，更是供电、控制、保护、监测、运维协同的系统工程。面对电压暂降带来的瞬时扰动，应将设备连续运行能力放在更高层级统筹考虑，把抗扰设计、保护整定、监测预警与后期维护贯通起来，推动自动扶梯由被动停机防护转向有边界、有支撑、有反馈的韧性运行。

参考文献

- [1] 张逸, 张良羽, 陈锦涛, 等. 基于电能质量监测数据的电压暂降敏感负荷识别 [J]. 电力自动化设备, 2025, 45 (2): 176-184.
- [2] 蔡宇晶, 高凡, 孟宇坤, 等. 城市轨道交通设备智能运维系统设计及关键技术研究 [J]. 铁路计算机应用, 2023, 32 (7): 79-83.
- [3] 罗情平, 房斌, 唐连波. 城市轨道交通自动扶梯智能安全监控系统应用研究 [J]. 中国设备工程, 2021 (1): 178-179.
- [4] 潘志刚, 刘利芝, 陈维娟, 等. 基于电能监测补偿的地铁自动扶梯电压暂降对策 [J]. 中国电梯, 2020, 31 (11): 6-9.
- [5] 全国电磁兼容标准化技术委员会. 电磁兼容 试验和测量技术 电压暂降、短时中断和电压变化抗扰度试验: GB/T 17626.11—2023 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2023.