

# 城市轨道交通机电设备系统管理

杨军华

中国铁路通信信号上海工程局集团有限公司 上海 200436

**摘要：**城市轨道交通机电设备系统涵盖供配电、通风空调、消防联动、环境监控及站台辅助控制等多类技术单元，是支撑线路安全稳定运行的核心基础，而伴随装备体量迅速增长、系统耦合关系愈发紧密、数据规模持续扩张，传统依靠人工经验的管理方式已难以应对复杂运行场景下的安全压力。机电系统在长周期、高负荷与强联动的运行条件下，呈现出链路脆弱点易被放大、局部故障可能触发连锁反应的系统性特征，使风险控制和状态管理愈加依赖精细化的监测手段与体系化的技术架构。围绕系统结构特征、风险机理与安全管理要点，并借助智能监测、预测性维护及综合管理平台的引入，可重塑机电设备系统的管理模式，使运行安全性、协同性与全生命周期管理水平得以整体提升。

**关键词：**城市轨道交通；机电设备系统；系统架构；智能监测；预测性维护；安全管理

## 引言

城市轨道交通机电设备系统在近年来的建设与运营中呈现规模扩大、结构深化与技术更新并行发展的趋势，系统内部的供配电链路、通风空调网络、消防联动逻辑与环境监控模块相互嵌套，彼此依存，使设备运行状态更易受负荷波动、控制链条扰动及外界环境变化影响，管理难度由此显著提升。系统的自动化水平不断提高，设备接口增多、通信链路加密，形成多源数据汇聚与实时控制并置的技术景观，对管理者提出更高要求。伴随运营强度上升、设备老化与运维资源结构性紧缺等因素，管理方式亟需从以往分散、滞后的模式转向结构清晰、边界明确且具备实时判断能力的系统化路径，使设备安全性与系统稳定性在复杂运营条件下仍保持可控。

## 一、城市轨道交通机电设备系统的结构特征与管理基础分析

### （一）机电设备系统的整体架构与运行特性分析

城市轨道交通机电设备系统在长期建设演进中逐渐形成多层次、强耦合的技术架构，供配电链路呈现出主干清晰、分区明确与冗余配置并存的结构特征，通风空调系统依托站厅、站台及区间的空气流动组织构建连续稳定的环境调节网络，消防系统则以探测器、控制主机和执行装置组成闭环式联动链路，环境监控与综合自动化系统穿插其间，使信息采集、指令发布和状态反馈在多子系统间交织流动<sup>[1]</sup>。各设备单元虽各司其职，却因

运行逻辑互相牵引而体现高度协同性，负荷波动、电气扰动或控制链条异常往往会在系统内部产生放大效应，使运行状态呈现出既稳定又敏感的双重特性，而正是这种特性促使设备管理愈加依赖清晰的架构认知与严谨的参数控制，使整体运行在复杂工况下仍能维持可控。

### （二）城市轨道交通机电设备系统管理的现状与管理流程分析

机电设备管理在现阶段仍以分专业运维为主，虽然管理体系较为成熟，但因设备数量增长迅速、数据来源跨系统分散，使条线之间的协同性受到限制。传统管理流程通常依赖预设计划、现场巡视和周期性检修构成主干，状态信息多以人工记录或独立系统呈现，使设备档案难以形成统一逻辑，数据价值无法充分释放，控制链路中的关键节点也因缺乏整合监测而存在一定滞后性。随着通信链路复杂化、控制系统自动化程度提高，管理者愈发需要在原有流程基础上引入结构性调整，使设备台账、运行监测与故障处置之间形成连续、闭合且可溯源的链路，使系统规模扩大带来的管理压力得以缓解，也使运行安全与资源配置的效率获得明显提升<sup>[2]</sup>。

## 二、城市轨道交通机电设备系统的风险特征与系统化安全管理体系构建

### （一）链路脆弱与耦合加深的风险机理分析

城市轨道交通机电设备系统在高密度运行与长周期高负荷条件下呈现出链路脆弱点易被放大、局部扰动可能由点及面的风险特征，供配电系统中的短路电流上升、

母线负荷波动或开关设备老化，会使电气链出现瞬时不稳定，而这一不稳定若未在第一时间被识别与吸收，便可能在下游设备间产生传递效应。通风空调系统在区间阻力变化、风道老化或阀门偏位的情况下，也常出现调节响应迟滞，使温湿度控制与空气流向微幅偏移，在日常运行中尚能维持平衡，但在客流高峰与换乘压力叠加情境下便可能推动整个系统的负荷趋向临界值。消防联动系统的探测器、控制器与执行端构成一条严密而敏感的指令链，任何一个节点出现误报、延迟或信号丢失，都会削弱整体的响应效率。系统耦合加深使风险传播出现跨专业、跨链路的特性，这种跨界蔓延虽不常爆发，却一旦出现便具有明显的放大效应，为安全管理提出全局化与架构化的要求，也促使管理者从设备级认知上升到链路级与系统级追踪，使风险的发现更早、边界更清晰、控制更及时。

### （二）节点突出与边界模糊的安全要点聚焦

机电系统在运营结构中形成多层节点，既有牵引供电的主变电所与分区所，也有车站内部的风机、电梯、屏蔽门、消防泵等设备群，这些节点因承担关键负荷与控制逻辑而格外重要，其安全管理既需稳定的技术状态，也需明确的系统边界。供电设备的关键断点在短时过载、瞬态冲击与接触疲劳下最易发生性能衰减，因此对于温升、局放、电弧特征的监测成为保障电气链安全的基础<sup>[3]</sup>；通风空调系统则依赖风量平衡及阀门动作的协调性，一旦某处风道阻力增加或控制信号偏差，整个系统的气流组织便会发生连锁变化，使安全裕度被不断压缩；消防系统架构中，信号完整性是最核心的要素，探测器与联动逻辑之间若出现时间差或地址冲突，指令链便可能被扰动，使防排烟策略出现偏移。边界模糊是另一类隐性风险来源，例如监控系统与自动化系统在数据共享时出现格式差异、指令映射缺失或时间戳轻微偏移，都会使判断依据发生漂移，也促使安全管理必须从点状控制转向基于系统边界与数据规则的整体识别，使关键信息链的连续性不被削弱，使设备间的合作关系保持透明而确定。

### （三）模型驱动与结构闭合的风险评估体系构建

城市轨道交通机电设备系统的安全管理正由经验型向模型型、由分散型向闭环型演进，而风险评估体系的核心是建立结构化、可计算与可追踪的技术框架，使复杂系统在多变量扰动下仍保持可判断性。风险模型的构建需依托运行数据、故障特征与环境变量，使机电设备

的状态呈现规律性与演化性；这一模型一旦稳定，便可作为风险等级划分、趋势评估与参数预警的基础。数据采集层在评估体系中承担着感知网络的角色，传感器的布点策略、信号清洗机制与时序校准方法决定了风险识别的清晰度，而分析决策层则通过特征提取、链路推演与模式识别，使潜在风险的传播路径被提前暴露。体系要实现闭合，必须存在有效的执行控制层，使预警结果与实际操作形成联动，使控制指令与现场行为形成对照，使管理过程保留轨迹。随着技术能力持续增强，全局可视化平台与动态风险地图逐渐成熟，使管理者能够以更宏观的方式理解系统状态，也使风险评估从单次判断走向持续迭代，使城市轨道交通机电设备系统的安全基础不断巩固。

## 三、基于智能化与系统架构优化的机电设备管理提升路径

### （一）感知全面与预测精密的智能监测体系优化

城市轨道交通机电设备系统要在高密度运行环境中保持稳定，离不开一套覆盖全面、响应敏捷且具备趋势判断能力的智能监测体系，而这一体系的核心是对感知层、传输层与决策层的统筹设计，使设备状态从被动呈现转向主动演化，使故障由突变为可预期<sup>[4]</sup>。传感器网络在此结构中承担关键作用，温升、振动、湿度、电流波形等多维数据被持续采集，再由边缘计算节点完成初步筛选，使中心监控系统能够侧重于趋势识别与异常推断，而非被海量原始数据淹没。预测性维护模型便在此基础上获得稳定的数据输入，使其在多变量条件下仍能保持收敛能力与判断精度。

为了呈现监测体系在结构层面的协同性，可见表1所示的功能分配方式，展示感知、处理与控制三层架构在设备运行管理中的定位，表格结构凝练而清晰，反映系统划分的逻辑基础。

表1 城市轨道交通机电设备智能监测体系功能层级示意

层级结构	核心功能	典型技术	管理价值
感知层	数据采集、状态识别	传感器、采集终端	完整获取设备运行特征
分析层	模型计算、趋势判断	边缘计算、机器学习	提升异常识别与预测能力
控制层	指令执行、策略联动	PLC、控制器	快速闭环响应、减少风险扩散

在某地铁线路的更新项目中，管理团队在屏蔽门系统上增设了分布式振动采集装置，并借助局部模型推断

门体的开闭偏差，既减少人工巡检与误判，也实现对高频动作部件的寿命评估。这一案例表明，当监测链路足够细致且模型得以动态更新时，设备状态的管理就具备了前瞻性，使长期运行的可靠基础得到强化。

### （二）架构统一与业务贯通的综合管理平台构建

系统架构要实现优化，必须形成一个能够整合数据资源、协调业务流程并支持跨系统联动的综合管理平台，使机电设备管理从分散走向集中，从人工经验走向模型驱动。综合平台的本质是一种结构性的治理工具，其中台账、能耗、报警、维护、备品管理等模块相互编织，使供电、通风空调、消防控制与环境监测之间能够建立统一接口，避免因数据格式断裂、时间戳不一致或控制映射缺失所引发的判断偏差。平台的指令链路愈加顺畅，系统运行的透明度便愈加提高<sup>[5]</sup>。

在阐述该平台价值时，不难指出其对实际场景的改造效果。以某市轨道交通运营公司的综合设备平台升级工程为例，管理人员将通风空调系统与能耗管理模块进行深度耦合，使风机启停策略能够依客流热负荷自动调节，并建立与变电所负荷曲线联动的节能算法，使站区内的能耗峰谷得以均衡。系统上线后，管理界面中的能耗趋势、设备状态和报警记录被整合在同一视域中，使维护人员不再依赖多终端切换即可掌握全局状态，为复杂系统在高峰运营下实现更优调度提供了实际路径。

### （三）周期贯穿与结构闭合的全生命周期管理体系

机电设备系统在城市轨道交通中运行周期长、种类繁多，其管理方式要真正实现可持续，必须形成完整的全生命周期架构，使设备从设计、制造、安装、验收到运行、更新的每一阶段都具有可追溯性与可验证性。生命周期管理的核心不在于记录本身，而在于使记录成为决策依据，使设备在长期使用过程中不陷入信息断裂的困境。设计阶段若能明确设备接口标准与控制逻辑，施工阶段若能完成质量链路的数字化固化，运行阶段若能依托监测模型形成评估曲线，那么更新阶段的选择便不会停留在经验判断，而是建立在清晰的数据轨迹之上。

有益的经验也来自实践。某城市在车辆段空调系统

改造中采用了“资产—状态—模型”三位一体的管理方式，将设备出厂参数、安装记录、运行状态与能效评估统一纳入资产管理平台，并借助模型推算不同维护策略的效果差异，使本应在五年后更换的风机组得以在监测模型支撑下延长使用周期，既减少了初期投入，又在能源消耗与系统稳定性之间找到较优平衡。此类案例说明生命周期体系一旦形成闭环，设备管理便具备更强的规划能力与经济优势，使资源配置不再被动，使系统性能始终保持在可控区间。

### 结语

城市轨道交通机电设备系统在不断扩展的运营格局中日益显露其战略性与基础性地位，系统结构愈加精密、负荷特征愈加动态，使管理从经验驱动迈向模型支撑、从局部维护迈向整体统筹已成必然趋势。随着智能监测的普及、数据体系的完善与平台架构的成型，设备状态的透明度显著提高，系统联动的协调性亦被持续强化，风险边界开始呈现可量化、可验证的特征，使主动管理成为可能。未来若能在生命周期视角下持续优化技术路径，使数字化能力与工程经验共同沉淀为可复制的方法体系，则机电系统的安全韧性、运营效率与长期经济性都将形成稳固的增长支点，为城市轨道交通在复杂环境中保持可靠运行提供更坚实的技术基础与发展动力。

### 参考文献

- [1] 宋梦娇. 现代城市轨道交通系统的设备管理思路分析[J]. 中国设备工程, 2025, (23): 67-69.
- [2] 李昂. 城市轨道交通机电设备运行状态在线监测系统[J]. 工程机械与维修, 2024, (06): 17-19.
- [3] 余刚. 城市轨道交通系统设备施工总承包管理研究[J]. 交通科技与管理, 2023, 4(07): 151-153.
- [4] 周志林. 城市轨道交通机电设备运维智能管控系统研究[J]. 中国设备工程, 2022, (12): 67-69.
- [5] 李光. 城市轨道交通供电系统安全管理及设备维护措施分析[J]. 运输经理世界, 2023, (30): 1-3.