

电气自动化技术在轨道交通系统的应用

桑迪

沈阳地铁集团有限公司运营分公司 辽宁 沈阳 110000

摘要：随着城市化进程的加速和交通需求的持续增长，轨道交通系统作为高效、绿色、大容量的公共交通方式，在现代城市交通体系中扮演着至关重要的角色。电气自动化技术作为融合了电气工程、自动控制、计算机科学、通信技术等多学科的综合技术，已成为推动轨道交通系统智能化、安全化、高效化发展的核心驱动力。本文系统梳理了电气自动化技术的基本内涵与发展脉络，深入探讨其在轨道交通牵引供电、列车运行控制、信号系统、综合监控、智能运维等关键领域的具体应用，分析当前面临的技术挑战，并对未来发展趋势进行展望。研究表明，电气自动化技术不仅显著提升了轨道交通系统的运行效率与安全性，也为构建智慧轨道交通奠定了坚实的技术基础。

关键词：电气自动化；轨道交通；列车自动控制；牵引供电；智能运维；综合监控系统

引言

21世纪，全球城市人口激增，交通拥堵、污染、能耗等问题愈发突出。轨道交通系统凭借运量大、速度快等优势，成为解决大城市交通难题的首选。中国是全球轨道交通建设与运营规模最大、发展最快的国家，截至2024年底，超50个城市开通城市轨道交通，运营里程破万公里，形成世界级网络。轨道交通系统复杂，涵盖多个子系统，其安全高效运行依赖先进控制技术。电气自动化技术是现代工业自动化核心，通过融合多种设备与系统，实现对物理世界的精准感知、智能决策与自动执行。在轨道交通领域，其应用已从简单设备控制拓展至“车-地-网-云”全链条智能化协同控制。本文将全面系统阐述其应用现状、核心技术、挑战及发展方向，为相关人员提供参与与指导。

1 电气自动化技术概述

电气自动化技术是电气工程与自动化技术的交叉融合，其核心目标是利用自动控制理论、电子技术、计算机技术、网络通信技术等手段，对电气设备和系统进行自动监测、控制、优化与管理，以替代或辅助人工操作，提高系统的性能、效率和可靠性。

在轨道交通领域，电气自动化技术主要体现在以下几个层面：①感知层：通过各类传感器（如电流/电压互感器、速度传感器、温度传感器、摄像头、雷达等）实时采集列车、轨道、供电、环境等状态信息。②控制层：基于可编程逻辑控制器（PLC）、远程终端单元（RTU）、列车控制单元（TCU）等硬件，运行控制算法，对牵引、制动、车门、空调等设备进行精确控制。③通信层：依托有线（如光纤以太网、现场总线）和无线（如GSM-R、LTE-M、5G）通信网络，实现各子系统

间以及车地之间的高速、可靠、安全的数据交互。④决策与管理层：利用中央计算机系统、云平台和人工智能算法，对海量运行数据进行处理、分析和挖掘，实现全局调度优化、故障预测与健康管理（PHM）、智能运维等高级功能。

2 电气自动化技术在轨道交通核心子系统的应用

2.1 牵引供电系统的自动化

牵引供电系统是轨道交通的“心脏”，为列车提供动力能源。其自动化水平直接关系到整个系统的能效与稳定性。①变电所综合自动化：现代轨道交通变电所普遍采用综合自动化系统（SAS）。该系统集成了微机保护、自动装置、远动终端（RTU）和后台监控软件。它能实现对主变压器、断路器、隔离开关等设备的遥测、遥信、遥控、遥调（“四遥”）功能。当电网发生故障时，系统能快速定位故障点，自动切除故障区域，并通过备用电源或调整运行方式，最大限度地保证供电连续性。②能量回馈与再生制动：电气自动化技术是实现列车再生制动能量高效利用的关键。当列车制动时，牵引电机转变为发电机，将动能转化为电能回馈至接触网^[1]。自动化控制系统能实时监测网压，智能协调多列车的再生制动与用电负荷，避免网压过高，并通过能量回馈装置将多余电能回馈至城市电网或供站内设备使用，节能效果显著。③智能巡检与状态监测：利用红外热成像、局放检测、在线油色谱分析等自动化传感技术，结合无人机或巡检机器人，对变电所和接触网进行全天候、非接触式智能巡检，及时发现设备过热、绝缘劣化等隐患。

2.2 列车运行控制系统的自动化

列车运行控制系统（ATC）是保障行车安全、提高运输效率的核心，其自动化程度是衡量轨道交通技术水平

的重要标志。①列车自动防护（ATP）：ATP系统是列车的“安全卫士”。它通过车载设备与地面设备（如应答器、轨道电路、无线闭塞中心）的实时通信，连续获取列车位置、速度、线路限速等信息。一旦列车速度超过安全允许值或冒进信号，ATP系统会立即自动施加紧急制动，确保列车在安全距离内停车，从根本上防止追尾、冲突等重大事故。②列车自动驾驶（ATO）：ATO系统是列车的“智能司机”。在ATP系统的安全防护下，ATO根据运行图、线路数据和实时运行状态，自动控制列车的启动、加速、巡航、惰行、减速和精确停车。它能实现最优的运行曲线，不仅保证了高准点率，还通过平滑的加减速控制，极大提升了乘客的舒适度，并有效降低了能耗。③列车自动监控（ATS）：ATS系统是轨道交通的“大脑”。它位于控制中心，负责对全列车进行集中监控和调度指挥。ATS能自动追踪列车位置，根据客流、突发事件等情况动态调整列车运行计划（如临时加开、跳停、调整间隔），并能自动生成运行报表，为运营决策提供数据支持。

2.3 信号系统的自动化

信号系统是轨道交通的“神经系统”，负责指挥列车有序运行。现代信号系统已全面实现自动化和数字化。①基于通信的列车控制（CBTC）：CBTC是当前主流的信号系统技术。它摒弃了传统的轨道电路，采用高精度的列车定位（如应答器+速度传感器+雷达/视觉融合）和连续、双向、大容量的车-地无线通信（如WLAN或LTE-M），实现了移动闭塞。这使得列车追踪间隔可以缩短至90秒甚至更短，极大地提升了线路的通过能力。②全自动运行系统（FAO）：FAO（或称GoA4级）是信号系统自动化的最高形态^[2]。在FAO模式下，从列车唤醒、自检、出库、正线运行、停站开关门、折返回回库休眠，全过程均无需司机干预。系统具备完善的故障诊断、应急处置和远程控制能力，是未来智慧城轨的发展方向。

2.4 综合监控系统（ISCS）的集成自动化

综合监控系统（ISCS）是轨道交通的“信息中枢”，它将原本分散的各个机电系统（如电力监控PSCADA、环境与设备监控BAS、火灾报警FAS、门禁ACS、视频监控CCTV、广播PA、乘客信息PIS等）进行深度集成。①统一平台与信息共享：ISCS基于统一的软硬件平台和开放的通信协议（如Modbus, IEC61850, BACnet），打破了各子系统之间的信息孤岛。调度员可以在一个工作站上，直观地监控全线所有设备的运行状态，并进行跨系统的联动控制。例如，当FAS系统探测到火灾时，ISCS能自动联动BAS系

统启动排烟风机、关闭防火阀，并联动PA/PIS系统发布疏散广播和信息。②智能联动与应急处置：通过预设的自动化联动逻辑，ISCS能在突发事件中快速响应，自动执行一系列复杂的应急操作流程，大大缩短了应急响应时间，提高了处置效率。

2.5 智能运维与健康管理（PHM）

随着大数据、物联网和人工智能技术的发展，电气自动化技术正推动轨道交通运维模式从“计划修”、“故障修”向“状态修”、“预测修”转变。①设备状态全面感知：在关键设备上部署大量传感器，构建覆盖车辆、信号、供电等核心系统的物联网，实现设备运行状态的全息感知。②大数据分析故障预测：将海量的实时运行数据和历史维修数据汇聚到大数据平台，利用机器学习算法（如支持向量机、神经网络、深度学习）建立设备的健康评估模型和故障预测模型。系统可以提前数天甚至数周预警潜在的故障风险，如转向架轴承异常、牵引逆变器IGBT老化等^[3]。③智能运维决策支持：基于预测结果，系统能自动生成最优的维修工单，精准定位故障部件，推荐维修方案，并动态优化备件库存和维修资源调度，实现运维成本的最小化和设备可用率的最大化。

3 面临的挑战与对策

3.1 系统复杂性与安全可靠

随着轨道交通系统自动化、智能化程度不断提升，控制系统、通信系统与信息系统的深度融合使得整体架构日益复杂。高度依赖软件的自动化系统一旦存在设计缺陷、逻辑漏洞或遭受网络攻击，极有可能引发连锁故障，甚至导致重大安全事故。对此，必须采用严格的安全工程方法，如形式化验证（Formal Verification）确保软件逻辑正确性，运用故障树分析（FTA）识别潜在失效路径，并依据国际标准（如IEC61508）开展安全完整性等级（SIL）认证。同时，应构建“纵深防御”（Defense-in-Depth）的网络安全体系，从边界防护、入侵检测到应急响应，实现多层次、全生命周期的安全保障。

3.2 多源异构数据的融合

轨道交通系统中设备来源广泛，涵盖不同厂商、不同年代、不同通信协议（如Modbus、CAN、MVB、以太网等），导致数据格式、语义、时序不一致，严重制约了大数据分析智能决策能力。解决之道在于大力推行行业标准化，特别是全面贯彻IEC62280系列（铁路应用—通信、信号和处理系统）等国际标准，推动接口、协议与数据模型的统一^[4]。同时，应建设统一的数据中台，整合来自信号、供电、车辆、站务等子系统的实时

与历史数据,利用数据湖架构实现海量异构数据的存储与治理,并通过元数据管理、数据血缘追踪、质量监控等手段提升数据可用性与可信度。

3.3 核心技术的自主可控

当前,部分关键核心部件如高性能FPGA芯片、实时操作系统(RTOS)、工业控制软件等仍严重依赖国外供应商,存在供应链中断与技术封锁的“卡脖子”风险。为保障国家轨道交通战略安全,必须加快关键核心技术攻关,加大国家与企业层面的研发投入,支持国产芯片、操作系统、工业软件的研发与适配验证。同时,应推动建立涵盖设计、制造、测试、应用的完整国产化生态链,通过示范工程引导市场接纳国产替代产品,逐步实现从“可用”到“好用”的跨越。

3.4 人才结构转型

传统轨道交通运维人员多以机电、信号等单一专业背景为主,难以胜任基于大数据、人工智能、数字孪生等新技术的智能运维任务。因此,亟需推动人才培养体系改革。一方面,高校和职业院校应优化课程设置,强化“轨道交通+信息技术+数据分析”的交叉融合,培养既懂业务逻辑又掌握数字技术的复合型人才;另一方面,企业应加强在职培训与技能认证,构建“懂业务、精技术、通数据”的新型人才队伍,支撑智能化转型的可持续发展。

4 未来发展趋势

展望未来,电气自动化技术在轨道交通领域的应用将呈现以下趋势:①与人工智能深度融合:AI将从辅助决策走向自主决策。例如,利用强化学习算法,列车可以自主学习并优化在复杂线路上的驾驶策略;利用计算机视觉,系统可以自动识别轨道异物、接触网缺陷等。②向“云-边-端”协同架构演进:计算和存储能力将向云端集中,以支持全局优化和大数据分析;同时,在靠近数据源的边缘侧部署智能网关和边缘计算节点,以满足

低时延、高可靠性的控制需求,形成云边端协同的智能架构。③构建数字孪生系统:通过构建与物理世界完全映射的数字孪生体,可以在虚拟空间中对列车运行、客流组织、应急演练等进行仿真、推演和优化,实现“先模拟,后执行”的智慧运营新模式。④绿色低碳与可持续发展:电气自动化技术将继续在能量管理、再生制动、光伏/储能接入等方面发挥关键作用,助力轨道交通实现“双碳”目标,成为真正的绿色交通典范。

5 结语

电气自动化技术是现代轨道交通系统不可或缺的“智慧引擎”。从保障列车安全运行的ATP/ATO系统,到高效稳定的牵引供电网络,再到集约智能的综合监控平台,以及面向未来的预测性维护体系,电气自动化技术已深度融入轨道交通的“血脉”之中。它不仅极大地提升了系统的安全性、可靠性、效率和乘客体验,也深刻地改变了轨道交通的规划、建设、运营和维护模式。面对未来更高层次的智能化、网联化、绿色化发展需求,我们必须正视挑战,持续创新,推动电气自动化技术与新一代信息技术的深度融合,加快核心技术的自主化进程,培养高素质人才队伍。

参考文献

- [1]张岩.轨道交通行业中电气自动化技术运用研究[J].城市建设理论研究(电子版),2025,(04):166-168.
- [2]高胜才.电气自动化技术在城市轨道交通中的应用[J].时代汽车,2023,(11):174-176.
- [3]韩宇淇.电气自动化技术在城市轨道交通中的应用[J].电子技术与软件工程,2021,(20):92-93.
- [4]黄昀溟,李发玲,姜超豪.轨道交通行业中电气自动化技术运用实践[C]//中国机电装备维修与改造技术协会.机电装备技术论文交流及技术人才培养与发展研讨会论文集.温州市铁路与轨道交通投资集团有限公司运营分公司,2025:179-182.