

# 关于地铁信号系统自动控制功能分析

陈雷

徐州地铁运营有限公司 江苏 徐州 221000

**摘要:** 随着城市轨道交通快速发展,地铁作为核心交通工具,对运行安全与效率的要求日益提高,地铁信号系统自动控制技术成为关键支撑。本文以地铁信号系统自动控制功能为研究对象,阐述了该技术的定义、核心功能及固定闭塞、移动闭塞、CBTC三大技术类型;深入分析ATS、ATP、ATO三大核心功能模块的具体作用机制;剖析数据通信与传输、定位与测速两大关键支撑技术;并指出智能化、集成化、绿色化是其未来发展趋势。研究表明,地铁信号系统自动控制技术通过多模块协同与关键技术支持,能有效保障列车安全高效运行,为地铁运营优化提供技术参考。

**关键词:** 地铁信号系统;自动控制;功能模块;技术

引言:地铁信号系统自动控制技术可实现列车运行的自动化监测、调控与保护,但其技术体系复杂,功能模块与关键技术的协同作用仍需深入研究。本文从技术概述入手,分析核心功能模块与关键支撑技术,探讨未来发展趋势,旨在研究地铁信号系统自动控制功能的运行逻辑,为相关技术优化与运营实践提供理论依据,推动地铁运营向更安全、高效、可持续方向发展。

## 1 地铁信号系统自动控制技术概述

### 1.1 定义与核心功能

地铁信号系统自动控制技术,是依托电子信息、通信、控制等多领域技术,对地铁列车运行全过程进行自动化监测、调控与保护的综合性技术体系,其核心目标是保障列车安全高效运行,提升地铁运营的稳定性与可靠性。该技术的核心功能围绕列车运行全周期展开,其中列车自动监控功能(ATIS)负责对列车运行状态进行实时追踪,包括列车位置、运行速度、车次信息等,同时依据预设运营计划实现自动排路与时刻表管理,确保列车按序运行;列车自动防护功能(ATP)是安全保障的核心,通过精准计算列车移动授权,实时监控列车速度,在列车超速、越界或存在碰撞风险时自动触发制动,避免安全事故发生;列车自动驾驶功能(ATO)则承担列车的自动运行控制,涵盖自动启动、加速、减速及精准停车等操作,同时可根据运行环境动态调整参数,兼顾运行效率与乘客舒适度,这三大核心功能协同作用,构成地铁信号系统自动控制技术的核心框架。

### 1.2 技术分类

从技术原理与应用模式来看,地铁信号系统自动控制技术主要可分为以下三大类。(1)固定闭塞技术是较早应用的类型,其通过将轨道划分为固定的闭塞分区,以分区占用状态作为列车运行控制依据,技术原理相对

简单,但受限于固定分区划分,列车运行间隔较大,难以满足高密度运营需求。(2)移动闭塞技术则突破固定分区限制,以列车实时位置、速度等动态信息为基础,通过计算列车安全制动距离确定动态闭塞分区,可有效缩短列车运行间隔,提升线路运输能力,不过其对列车定位精度与信息传输实时性要求较高。(3)基于通信的列车控制技术(CBTC)是当前主流技术,以无线通信为核心传输手段,实现列车与地面控制系统之间的双向、大容量信息交互,不仅融合移动闭塞技术的优势,还能整合列车自动监控、自动防护、自动驾驶等功能,具备更高的自动化程度、灵活性与可靠性,可更好适配复杂地铁运营场景<sup>[1]</sup>。

## 2 自动控制系统的核心功能模块

### 2.1 列车自动监控(ATIS)系统功能

列车自动监控(ATIS)系统作为地铁运营调度的核心指挥中枢,其功能设计围绕“保障运营计划精准落地、实现运行状态实时可控”展开。在列车运行计划编制与动态调整方面,ATIS系统可基于线路客流特征、站点停靠需求及设备运维计划,生成包含列车车次、运行区间、停靠时长、发车间隔等参数的基础运营时刻表,并支持调度人员根据实际情况进行人工编辑与优化。在运营过程中,系统能实时采集列车位置、运行速度及线路设备状态数据,当出现列车晚点、设备故障或客流突发变化等情况时,自动触发时刻表调整算法,通过优化列车发车间隔、调整停靠顺序或临时加开列车等方式,减少异常情况对整体运营秩序的影响,确保线路运输能力与客流需求动态匹配。

在实时监控与故障报警机制上,ATIS系统通过与列车车载设备、地面信号设备及车站监控系统的实时数据交互,构建全线路可视化监控界面,调度人员可直观掌

握列车实时位置、运行方向、车门状态及站台客流等信息。同时,系统具备完善的故障检测与报警功能,能对列车设备故障、地面设备故障及通信链路中断等异常情况进行实时识别,通过声光报警、弹窗提示等方式及时通知调度人员,并自动记录故障发生时间、位置及故障类型等信息,为故障排查与应急处置提供数据支撑,有效缩短故障响应时间,降低故障对运营的影响范围。

## 2.2 列车自动防护(ATP)系统功能

列车自动防护(ATP)系统是保障列车运行安全的核心技术屏障,其功能聚焦于“防止列车超速、避免列车碰撞”,通过技术手段构建不可逾越的安全防线。在速度监督与超速防护方面,ATP系统会根据线路条件、信号状态及列车性能参数(如制动能力),实时计算列车当前允许的最大安全运行速度,并与列车实际运行速度进行持续对比。当列车实际速度接近或超过允许速度时,系统会先向车载设备发送减速提示指令;若列车未及时减速且速度持续超出允许范围,ATP系统将自动触发分级制动控制,根据超速程度采取轻微制动、常用制动直至紧急制动,强制将列车速度降至安全范围,避免因超速引发脱轨、颠覆等安全事故。

在安全间隔控制与紧急制动触发方面,ATP系统采用“移动授权”机制,通过列车定位技术精准获取列车实时位置,并结合前方列车位置、线路空闲状态及安全制动距离,为每列车动态分配专属的移动授权区域,确保前后列车之间始终保持大于安全制动距离的间隔,从根本上避免列车追尾或正面冲突。此外,当线路出现突发情况或列车自身发生严重故障(如制动失效)时,ATP系统可接收地面控制中心或车站发出的紧急停车指令,立即触发列车紧急制动,强制列车在安全距离内停车,最大限度保障人员与设备安全。

## 2.3 列车自动驾驶(ATO)系统功能

列车自动驾驶(ATO)系统是实现列车自动化运行的核心执行模块,其功能以“精准控制列车运行状态、提升运营效率与乘客舒适度”为核心,需与ATS、ATP系统紧密协同。在自动驾驶模式下的牵引与制动控制方面,ATO系统会根据ATS系统下发的运行计划及ATP系统提供的安全速度限制,结合列车载重、线路坡道与曲线等实时数据,自动生成平滑的牵引与制动控制曲线。在牵引阶段,系统通过精准调节牵引电机输出功率,实现列车平稳加速,避免启动过快导致的乘客不适;在制动阶段,采用“电制动优先、空气制动补充”的混合制动策略,根据与前方目标点的距离动态调整制动力度,确保列车在接近目标速度或停靠站点时平稳减速,既提升

能源利用效率,又降低制动系统损耗。

在站台精准停车与车门联动控制方面,ATO系统依托高精度列车定位技术,结合站台标志点信息,实时校正列车运行位置,确保列车停靠时车门与站台屏蔽门精准对齐,误差通常控制在 $\pm 30$ 厘米以内,满足乘客安全上下车需求。当列车到达指定停靠位置并停稳后,ATO系统会向列车车门控制单元与车站屏蔽门控制单元发送同步开关门指令,实现车门与屏蔽门的协同开启;在停靠时长达到ATS系统预设时间后,系统会先确认车门与屏蔽门已完全关闭且无异常,再向牵引系统发送发车指令,启动列车继续运行,整个过程无需人工干预,既提升了停靠精度与运营效率,又避免了因人工操作失误引发的安全风险<sup>[2]</sup>。

## 3 自动控制系统的核心技术

### 3.1 数据通信与传输技术

数据通信与传输技术负责保障列车与地面、各子系统之间的信息高效交互,直接影响系统控制的实时性与可靠性,其核心应用方向集中在无线通信技术选型及车地双向通信保障两方面:(1)无线通信(如LTE、WLAN)在信号系统中的应用。在地铁信号系统中,无线通信技术需满足高带宽、低时延、广覆盖的需求,当前主流技术以LTE(长期演进)和WLAN(无线局域网)为主。其中,LTE技术凭借其低时延(端到端时延可控制在100ms以内)、高可靠性及抗干扰能力,成为多数新建地铁线路的首选,可承载列车控制信号、运营调度指令、设备状态数据等关键信息的传输,支持多列车同时通信且互不干扰;WLAN技术则因部署成本较低、带宽充足的特点,在部分既有线路改造或对实时性要求稍低的场景中应用,主要用于传输非核心控制数据,两者根据线路运营需求合理搭配,可实现信号系统通信需求的全面覆盖。(2)车地双向通信的实时性与可靠性保障。车地双向通信需同时满足“实时传输控制指令”与“稳定传输数据”的双重需求,其保障机制从技术层面多维度构建。在实时性保障上,通过采用优先级调度机制,将列车控制指令(如移动授权、制动指令)设定为最高传输优先级,确保此类信息在传输队列中优先处理,避免因数据拥堵导致时延;优化通信频段选择,避开城市复杂电磁环境中的干扰频段,减少信号传输延迟。在可靠性保障上,采用冗余设计,当主通信链路出现中断时,备用链路可在毫秒级时间内切换,确保通信不中断;通过数据校验(如CRC循环冗余校验)、重传机制(如自动重传请求ARQ),对传输数据进行完整性检查,若发现数据丢失或错误,立即触发重传,避免因数

据异常导致系统控制失误。

### 3.2 定位与测速技术

定位与测速技术为列车自动防护、自动驾驶提供关键的位置与速度数据，其核心技术方向包括不同定位方式的特性对比及多传感器融合技术的应用：（1）轨道电路、应答器、惯性导航等定位方式对比。不同定位方式基于不同技术原理，在精度、稳定性、适用场景上存在差异：轨道电路定位通过检测轨道区段的电气特性变化判断列车位置，技术成熟且成本较低，但定位精度较粗，易受轨道磨损、环境湿度影响；应答器定位通过列车车载天线读取轨道上预设应答器的位置信息实现定位，定位精度高（误差可控制在厘米级），但需在轨道沿线密集布设应答器，维护成本较高，且单点应答器故障可能导致局部定位失效；惯性导航定位基于惯性传感器（如陀螺仪、加速度计）计算列车位置，无需依赖外部设备，可实现连续定位，但存在累积误差，无法单独长期使用，需与其他定位方式配合校正。（2）多传感器融合技术提升定位精度。为弥补单一定位方式的缺陷，地铁自动控制系统普遍采用多传感器融合技术，通过整合不同定位方式的优势，实现定位精度与稳定性的双重提升。其核心逻辑是通过数据融合算法（如卡尔曼滤波、粒子滤波），对轨道电路提供的区段位置、应答器提供的精准点位、惯性导航提供的连续位置数据进行综合处理：当列车经过应答器时，以应答器的精准位置数据校正惯性导航的累积误差；在应答器间隔区段，通过惯性导航的连续定位数据填补轨道电路定位的精度空白；结合车载测速传感器（如轮轴脉冲传感器）提供的速度数据，反向验证位置计算结果，进一步修正误差。通过多维度数据的互补与校验，可将列车定位精度控制在±1米以内，满足自动驾驶、精准停车等场景的严苛需求，同时提升定位系统的抗干扰能力，避免单一设备故障导致的定位失效<sup>[3]</sup>。

### 4 地铁信号系统自动控制功能的发展趋势

地铁信号系统自动控制功能的未来发展，将围绕以下三大方向深度演进：（1）智能化水平持续升级。将深度融合人工智能、大数据技术，实现控制功能从“被动响应”向“主动预判”转变：通过分析历史运营数据、实时客流与设备状态，提前识别潜在故障风险并触发预警，优化列车运行计划以动态匹配客流变化，同时提升系统自主决策能力，减少人工干预依赖。（2）系统集成化程度不断提升。打破信号系统与列车、车站、运维等系统的信息壁垒，构建多系统协同控制体系：信号系统将与列车车载诊断系统、车站安防系统、线路运维管理系统深度联动，实现运营数据共享、控制指令协同，提升整体运营效率与应急响应速度。（3）绿色化发展特征愈发凸显。自动控制功能将更注重节能降耗，通过优化牵引与制动控制算法，减少列车启停能耗；结合线路客流规律动态调整列车发车间隔与运行速度，降低无效能耗；采用低功耗硬件设备与智能休眠技术，减少系统整体能源消耗，助力地铁运营实现低碳可持续目标<sup>[4]</sup>。

结束语：地铁信号系统自动控制技术是一个由多功能模块、多关键技术构成的复杂体系，ATS、ATP、ATO模块协同保障运营秩序与安全，数据通信、定位测速技术奠定功能实现基础。当前技术已能满足地铁基本运营需求，且未来在智能化、集成化、绿色化方向的发展，将进一步提升其性能。

### 参考文献

- [1]舒心.地铁信号系统自动控制功能的研究分析[J].中文科技期刊数据库(全文版)工程技术,2022(10):186-189.
- [2]周奇.地铁信号系统自动控制功能的探讨[J].中文科技期刊数据库(全文版)工程技术,2020(11):263-263+265.
- [3]姜丽.地铁信号系统自动控制功能探讨[J].无线互联科技,2022,19(3):129-130.
- [4]王义东.轨道交通信号系统全自动运行功能的研究[J].智慧轨道交通,2025,62(1):8-13.