

## 城市轨道交通车辆制动系统发展趋势探讨

袁春华

重庆轨道交通运营有限公司, 重庆 400000

[摘要]城市轨道交通车辆制动系统的性能直接影响列车运行的安全性与效率, 其技术演进路径逐渐呈现智能化、集成化与绿色节能化的发展趋势。随着列车运营速度提升与线路规模扩大, 传统制动方式已难以满足更高精度与更低故障率的运行需求。新一代制动系统通过引入智能监测、实时控制算法与多源协同制动策略, 实现更稳定的制动力输出与更精细的响应调节, 同时提升设备寿命并降低维护成本。该趋势不仅推动制动技术由机械控制向信息驱动转型, 也促使制动系统在安全冗余、能量回收与环境适应性方面不断优化, 为城市轨道交通运营提供更高可靠性支撑。

[关键词]城市轨道交通; 制动系统; 智能化; 高可靠性; 节能技术

DOI: 10.33142/sca.v9i4.19569

中图分类号: U463.5

文献标识码: A

### Exploration into the Development Trends of Braking Systems for Urban Rail Transit Vehicles

YUAN Chunhua

Chongqing Rail Transit Operation Co., Ltd., Chongqing, 400000, China

**Abstract:** The performance of the braking system of urban rail transit vehicles directly affects the safety and efficiency of train operation, and its technological evolution path is gradually showing a trend of intelligence, integration, and green energy conservation. With the increase in train operating speed and the expansion of line scale, traditional braking methods are no longer able to meet the operational requirements of higher precision and lower failure rates. The new generation braking system achieves more stable braking force output and more precise response adjustment by introducing intelligent monitoring, real-time control algorithms, and multi-source collaborative braking strategies, while improving equipment lifespan and reducing maintenance costs. This trend not only drives the transformation of braking technology from mechanical control to information driven, but also promotes the continuous optimization of braking systems in terms of safety redundancy, energy recovery, and environmental adaptability, providing higher reliability support for urban rail transit operations.

**Keywords:** urban rail transit; braking system; intelligentization; high reliability; energy-saving technology

#### 引言

城市轨道交通在高密度城市网络中承担着持续增长的客流运输任务, 列车制动性能成为影响运行效率与安全稳定性的关键因素。随着线路结构更为复杂、列车速度不断提高, 制动系统面临的工况环境与技术要求呈现出前所未有的挑战。新材料、新传感技术与智能控制算法的涌现, 使制动系统具备更敏捷的响应能力与更强的环境适应性, 为性能提升创造了广阔空间。围绕制动力调配、系统冗余设计及能量利用等核心问题的突破, 正推动制动系统从传统机械式思路迈向数字化、智能化的新阶段, 体现出城市轨道交通装备技术发展的重要方向。

#### 1 制动系统面临的核心技术挑战

城市轨道交通车辆的制动系统在面临多重挑战时, 必

须在高效、安全和可持续性方面达到更高要求。随着城市轨道交通网络的不断扩展, 线路的复杂性和列车运行速度的提升对制动系统提出了前所未有的技术要求。传统的制动方式, 在面对快速、高频次的停靠需求时, 往往难以保证稳定的制动性能和较低的故障率。与此同时, 制动系统在高速、高负荷工况下的稳定性成为其设计的首要难题<sup>[1]</sup>。随着技术的不断进步, 传统的液压和气动系统在某些情况下暴露出制动力精度不足、能量消耗较高以及响应速度迟缓的问题, 这些都限制了制动系统在未来城市轨道交通中的广泛应用。

城市轨道交通车辆通常需要应对极其复杂的环境条件, 包括恶劣气候、强烈的车速波动及高频的启停等, 这些都会对制动系统的性能产生影响。制动效率的保持不仅

仅是技术问题，更涉及到安全冗余、系统可靠性等方面。高速列车对制动系统的要求更加严格，尤其是在极端情况下，如急停或紧急刹车时，系统的冗余设计和快速响应能力变得至关重要。在高频次的运输需求下，制动系统的过热问题也是需要关注的重要因素，尤其是在连续高速运行和频繁停车的情况下，过热可能导致制动效能下降甚至出现设备故障。针对这些挑战，如何确保在多种环境和负荷下，制动系统能够稳定高效地运行，成为技术开发的重要方向。

随着智能化技术的发展，制动系统的自动化与信息化也逐渐成为研究的热点。制动系统的智能化不仅是单纯的技术升级，还涉及集成多项先进技术，包括大数据、云计算、人工智能等。通过实时监测和自适应调节，智能化系统能够根据列车的实际行驶状态、路况和环境变化，自动调整制动力输出，从而提高整体制动效果。然而，智能制动系统的复杂性也带来了新的挑战，尤其是在系统的可靠性、信息传输速度以及实时控制能力等方面，如何保证这些技术的可靠应用，避免因信息延迟或算法错误带来的风险，依然是制动系统面临的核心难题。

## 2 制动性能提升的关键影响因素解析

制动性能的提升，涉及多个技术层面的突破与整合。在现代城市轨道交通中，列车的运行速度与频繁的启停模式要求制动系统具有极高的响应速度和稳定性。制动系统的核心组成部件，如制动盘、制动片、液压和电气控制系统等，必须具备高耐磨性、低热膨胀性以及极强的热导性能，以确保在高负荷情况下的制动效果。传统制动材料虽然具备一定的耐用性，但面对频繁的高强度使用，易导致磨损加剧、性能衰退<sup>[2]</sup>。新型复合材料的引入成为解决这一问题的关键。采用具有高摩擦系数的先进材料，可以在不同的温度和湿度条件下保持较好的制动性能，延长了制动系统的使用寿命，同时减少了对环境的污染。

在制动技术的进步中，智能化控制技术扮演着越来越重要的角色。随着传感器和实时监控技术的不断进步，制动系统能够实时监测列车的速度、位置、载荷等多项数据，进行精准的状态预测和制动控制。通过采集和分析多种操作数据，系统可以在极短的时间内对制动响应进行自适应调整，使制动过程更加平滑和精准。自动化技术的加入，使得制动系统可以在复杂环境下自主优化运行参数，提升了系统的可靠性和安全性。此外，智能化系统在能量管理方面也起到了关键作用，通过能量回收系统，在制动过程中回收一部分动能，转化为电能供给其他系统使用，从而

提高了整个车辆的能源效率，减少了对外部电网的负担。

制动系统的综合性能不仅依赖于单一技术的改进，更需要多个技术领域的协同发展。例如，制动系统的热管理技术尤为关键。制动过程中产生的大量热能如果无法及时有效地散发，可能导致制动器过热，从而影响制动效果并缩短制动元件的使用寿命。采用更高效的冷却系统，以及改进热传导材料，可以有效降低制动过程中产生的高温，确保制动系统在长时间的高负荷运行中保持良好的性能。除热管理外，制动系统的冗余设计和安全策略也是提升性能的重要保障。为了应对可能发生的故障或异常情况，制动系统往往设计有多个备份路径和自动故障检测功能，确保系统在出现单点故障时仍能可靠工作，避免对列车安全造成威胁。因此，制动性能的提升不仅仅是单一部件的技术进步，更是一个涉及多维度技术整合的复杂工程，需要从材料、控制、热管理、安全等多个方面共同发力。

## 3 新型智能制动技术的应用路径

新型智能制动技术在城市轨道交通系统中的应用，正逐步改变传统制动技术的局限性，推动了系统性能的进一步提升。随着传感器、数据处理及人工智能技术的进步，智能制动系统开始依赖于实时监测和动态调整，优化制动过程。在高速与复杂工况的环境下，传统的制动方式已难以满足精细化控制的需求。通过对列车行驶状态的实时感知，智能制动系统能够自动调节制动力，确保制动过程平稳无冲击，减少传统制动方式中的顿挫感<sup>[3]</sup>。基于智能算法的优化策略，能够在不同的运行条件下，动态调整制动的力度与时机，达到最佳的制动效果。这样的系统不仅提升了乘客的舒适度，还显著提高了制动系统的安全性和稳定性。

智能化制动技术在车辆与轨道之间的协同控制中展现出独特优势。借助无线通信技术，制动系统能够与车辆的其他关键系统，如牵引、供电和安全系统，进行实时信息交换。这种信息共享可以在不同系统之间实现无缝协同，增强整个列车的协调性和响应速度。例如，当列车即将到达急弯或有复杂地形时，制动系统会根据实时传感器数据提前进行预判，主动调整制动力，从而确保列车能够平稳过弯，防止因制动力不均而引起的安全隐患。智能制动系统还可以结合乘客数量和列车负载情况，动态调整制动力度，从而优化列车的刹车效率，减少因超负荷或过度刹车所带来的能量损失。

能源回收与绿色环保是智能制动技术应用的另一大亮点。传统制动系统在刹车过程中常常将动能转化为热能，

造成能源浪费并影响系统的长期稳定性。智能制动系统则通过先进的能量回收技术,将列车的动能转化为电能回馈到电网或用于列车其他部分的能量需求。这种能量回收机制不仅提高了能源使用效率,还减少了对环境的负担。此外,智能系统的自适应能力使其能够根据路况变化、速度波动等因素进行快速调整,提升了能量回收的效果。在城市轨道交通日益关注可持续发展的背景下,智能制动技术的这一优势显得尤为重要,不仅有助于减少运营成本,还在降低能耗和环境污染方面起到了积极作用。通过这些智能化技术的应用,未来城市轨道交通的制动系统将更加高效、绿色、安全。

#### 4 综合制动协同策略的优化方向

综合制动协同策略的优化,正在成为城市轨道交通车辆制动系统发展的关键技术方向。随着列车运行速度提升和线路结构复杂化,单一制动方式已无法满足多工况、多载荷下的高精度制动需求。为了实现更高水平的稳定性和安全性,制动系统必须在电制动、再生制动与机械制动之间形成高度协调的工作机制<sup>[4]</sup>。通过对牵引系统、制动控制单元以及车辆网络系统的数据进行深度融合,制动系统能够在不同模式之间自动切换,使制动力在最大限度上实现合理分配。高效的协同策略可以减少机械制动部件的磨损,长期保持制动力的持续性和稳定性,并在频繁启停的城市轨道交通运营中展现出更强的适应性。

在协同策略的设计中,精准的动力感知能力成为至关重要的基础。借助高精度传感器阵列与车辆控制网络,系统能够实时监测列车的速度、轨面附着系数、车体姿态以及负载变化,从而形成完整的运行状态模型。在此基础上,控制算法能够对各类制动方式进行优化组合,使制动过程更加平顺,并在面对低附着系数轨道、急弯区段、湿滑天气等不利条件时保持高可靠性。自适应控制策略能够在复杂工况下实现制动力的细致分级调配,避免因制动力不合理分布造成的车辆摆动、车轮滑移或制动距离偏差。随着系统冗余设计与多层安全机制的引入,协同策略能在单个制动模块出现异常时自动转入安全模式,保障列车在突发情况下仍具备可靠的制动能力。

为了进一步提升协同策略的整体效率,制动系统正在向智能化调度与预测性控制的方向发展。借助人工智能算法与大数据平台,系统能够通过历史运行数据和实时动态参数进行综合分析,在制动需求发生之前完成响应策略的预演与优化。通过引入深度学习模型,制动系统不仅能够识别复杂模式,还能根据运营特征形成个性化参数调校方

案,使协同制动在能源利用、系统稳定性与乘坐舒适度方面达到更高水平。再生制动在这一体系中扮演重要角色,其能量回收效率在智能分配策略的支持下得以提升,使制动系统在保持性能的同时兼顾节能价值。多种制动方式的协同与优化,使得系统具备更强的整体性和前瞻性,为更安全、更高效的城市轨道交通运营提供技术支撑。

#### 5 制动系统发展趋势与技术归纳

制动系统的发展趋势正在向智能化、集成化和高可靠性方向不断延展,在城市轨道交通高速化与高密度运营的背景下,这一演变显得尤为突出。随着列车运行条件的多样化与控制系统复杂性的增加,制动系统必须具备更强的环境适应能力与动态响应能力。新型制动技术正逐步突破传统机械式制动的局限,通过数字化控制和多传感器协同感知,使制动力调节更为精细<sup>[5]</sup>。材料工程与结构设计的进步也在加速推动制动装置的轻量化和高强度化,使其能够在长期高频制动任务中保持性能稳定,减少系统疲劳带来的潜在风险。

随着智能控制平台的普及,制动系统与车辆其他关键子系统之间的耦合程度不断加深,形成了以数据驱动的综合控制体系。系统通过实时采集列车状态参数,利用预测性控制算法完成制动过程的动态规划,使制动力输出更加贴合实际工况需求。在复杂线路条件下,制动系统能够根据轨道附着状况、坡度变化及运行负荷自动调整控制策略,确保制动距离稳定,降低车轮滑移与轨面损伤的发生概率。智能化架构的加入,也使制动系统具备自诊断能力,通过监测关键元件的健康状态,实现早期故障预判,为运维管理提供更加主动的技术支持。

再生制动与节能技术的深度融合成为未来发展的重要趋势。随着城市轨道交通对能源利用效率要求的不断提高,制动系统在动能回收、能量分配和储能装置匹配方面的技术不断革新。再生制动在大功率牵引系统与能量管理平台协同下,可实现更高比例的能量回馈,推动系统在节能与环保方面取得显著成效。制动系统的发展也正在向模块化与可重构方向迈进,通过标准化接口与可扩展架构,使系统具备更高的兼容性与升级潜力,更容易适应不同线路条件和运营模式的差异需求。伴随这些技术路径的持续优化,城市轨道交通制动系统正逐渐形成以智能、安全、高效为核心特征的技术体系,为行业技术演进提供坚实基础。

#### 6 结语

城市轨道交通制动系统的技术演进正不断推动车辆

运行安全性与整体效率的提升。随着智能化控制、协同策略优化以及节能技术的持续深化,制动系统在复杂工况下的稳定性与响应能力得到显著增强。新材料、新算法与多源数据融合的应用,使制动技术呈现出更加精细、可靠与绿色的发展特征,为城市轨道交通装备体系的升级奠定了坚实基础。

#### [参考文献]

- [1]邢利霞.城市轨道交通道床振动响应特性测试研究[J].新疆钢铁,2025(4):128-130.
- [2]徐阳,强力,廖晨鑫.城市轨道交通接触轨膨胀接头在线监测系统研究[J].电气化铁道,2025,36(1):204-207.
- [3]洪涛,王强.城市轨道交通防入侵报警系统提升方案研究[J].电气化铁道,2025,36(1):181-187.
- [4]赵聪.城市轨道交通高压电缆故障原因分析及快速应急处置[J].人民公交,2025(24):90-92.
- [5]史一新.城市轨道交通资源经营信息化平台建设[J].人民公交,2025(24):84-86.

作者简介:袁春华(1990—),毕业于兰州交通大学,车辆工程专业,现就职于重庆轨道交通运营有限公司,工程师。