

城轨列车制动系统漏气问题排查与处置方法分析

王 森

常州地铁集团有限公司运营分公司 江苏 常州 213000

【摘要】：城轨列车制动系统是保障列车运行安全的核心子系统，漏气故障会直接削弱制动性能并放大运行风险。围绕制动系统常见漏气现象，结合城轨车辆运行与检修实际，对漏气故障的典型部位、形成机理及表现特征进行分析，从管路连接、阀类元件、密封结构及环境因素等方面明确主要诱因。在此基础上，构建以快速定位、分级判断和精准处置为核心的漏气排查思路，提出针对性维修与预防措施。研究表明，通过规范排查流程和优化维护方式，可有效降低制动系统漏气发生率，为城轨列车安全稳定运营提供技术支撑。

【关键词】：城轨列车；制动系统；漏气故障；故障排查；维护处置

DOI:10.12417/2811-0722.26.02.005

引言

随着城市轨道交通规模的持续扩大，列车运行密度和安全要求不断提高，制动系统的可靠性受到广泛关注。制动系统一旦发生漏气，将引起制动力不足、制动响应迟缓等问题，严重影响行车安全和运营秩序。实际运维中，漏气故障具有隐蔽性强、成因复杂的特点，给检修工作带来较大挑战。围绕这一现实需求，对城轨列车制动系统漏气问题进行系统分析，探索有效的排查思路与处置方法，对于提升检修效率、降低故障风险具有重要工程意义。

1 城轨列车制动系统运行可靠性的现实要求

城轨列车作为城市公共交通体系中的重要组成部分，其运行可靠性直接关系到乘客出行安全与城市交通秩序的稳定。其中，制动系统承担着速度控制与紧急制动的关键职能，是列车安全技术体系中风险敏感度最高的系统之一。在高密度运行条件下，列车频繁启停、长时间连续运行以及复杂工况叠加，使制动系统长期处于高负荷状态，对其稳定性和一致性提出了更高要求。任何制动性能的衰减或响应异常，都可能放大为运营安全隐患。

在城轨列车制动系统中，空气制动仍是实现服务制动与紧急制动的重要执行方式，其工作过程高度依赖气源压力的稳定性和系统气密性能。制动管路、控制阀、执行元件及连接接口共同构成封闭的气动回路，一旦局部密封失效或结构磨损，气压保持能力下降，将直接影响制动缸输出力的建立与维持。漏气问题往往具有渐进性特征，在初期不易被察觉，却会在持续运行中逐步削弱制动系统的可靠边界^[1]。随着城轨运营年限的增长，车辆逐渐进入多周期服役阶段，制动系统内部橡胶密封件、金属接头及柔性管路不可避免地产生老化、疲劳与性能退化。在实际运用环境中，振动冲击、温度变化以及粉尘污染等因素进一步加速了气动元件的失效过程。这种结构性劣化如果未能及时识别和干预，将导致制动系统参数偏离设计值，使系统运行状态由可控向不可控演变。

从运营安全管理角度看，城轨列车对制动系统可靠性的要求已由单一功能满足转向全过程稳定可控。制动系统不仅需要在额定条件下具备足够的制动力输出能力，还应在复杂工况与突发情况下保持响应一致性和动作可预测性。漏气故障破坏了气动系统的完整性，使制动响应时间延长、压力建立不充分，直接削弱了系统的安全裕度。在此背景下，对制动系统运行可靠性的认识不应局限于故障发生后的修复，而应扩展到对潜在失效模式的提前识别与风险控制。通过关注气密性能变化对制动系统整体可靠性的影响，将漏气问题纳入系统安全管理视角，是适应城轨高安全运行要求的重要现实需求。这也为后续针对漏气问题的深入分析与处置方法研究奠定了基础。

2 制动系统气密性能失效的典型表现

制动系统气密性能失效通常并非以突发性故障形式出现，而是通过一系列运行参数异常和功能偏离逐步显现。在城轨列车正常运行过程中，空气制动系统应保持稳定的供风压力和可控的压力衰减速率，当气密性能下降时，最直观的表现表现为制动管路压力保持能力减弱。停车或保压状态下，制动主管压力出现非正常下降，且补风频率明显增加，反映出系统存在持续性泄漏通道。这类现象虽然短时间内未必导致制动失效，但会使压缩机及供风装置长期处于高负荷工况，间接加剧系统整体磨损。

在制动动作过程中，气密性能失效还会引起制动响应特性的变化。制动指令发出后，制动缸压力建立速度减慢，达到目标压力所需时间延长，表现为列车制动初期减速度不足。对于电空制动系统而言，控制阀对压力变化的调节精度依赖稳定的气源条件，当系统存在漏气点时，控制逻辑虽能持续补偿，但执行端实际输出与指令值之间会产生偏差，造成制动过程的可重复性下降^[2]。这种偏差在多次启停循环中不断累积，易引发驾驶操纵与列车响应之间的不匹配。气密性能失效还可能通过制动缓解异常的方式表现出来。在缓解过程中，制动缸应按照既定速率回排空气并恢复初始状态，若管路或阀件密封不良，缓解过程可能出现滞后或不完全现象，导致残余制动力长期存

在。这不仅影响列车加速性能，还会造成制动部件温升异常，增加制动盘和闸片的非正常磨损。此类问题在运行初期往往难以被单一参数监测发现，却会在长期运营中对系统稳定性产生持续影响。

从结构层面看，气密性能失效在不同部位呈现出差异化特征。柔性软管老化后产生的微裂纹，会导致间歇性漏气，使系统压力波动呈现不规律变化；接头松动或密封圈压缩变形，则多表现为稳定的小流量泄漏；阀类元件内部密封副磨损时，往往伴随内部串气现象，使不同气路之间产生非预期的压力干扰。这些表现形式增加了漏气故障的隐蔽性，也提高了现场排查的技术难度。在综合运行表现中，气密性能失效最终会体现为制动系统可靠性的下降，包括制动距离波动增大、制动一致性变差以及故障报警频次上升等问题。这些典型表现虽不一定立即触发严重后果，却在持续运行条件下逐步侵蚀制动系统的安全冗余，为后续更深层次的故障埋下隐患。

3 基于系统排查的漏气处置技术路径

针对城轨列车制动系统漏气问题的处置，应建立在系统化排查思路之上，而非依赖经验判断或局部处理。空气制动系统结构层级清晰、气路分布复杂，漏气源点可能分散于供风、控制及执行多个环节，因此排查工作需以系统完整性为核心，按照气路功能关系逐步缩小范围。通过对整车气动系统进行分区管理，将制动主管、辅助气路及各分支回路进行逻辑划分，可为漏气定位提供清晰路径。在具体排查过程中，运行参数监测是判断漏气状态的重要技术手段。通过对供风压力、制动缸压力及压力变化速率等关键参数进行比对分析，可初步识别异常气路区段。保压试验在此过程中具有较高实用价值，通过隔离部分气路并观察压力衰减特征，可有效区分系统性漏气与局部元件失效。对于具备状态监测条件的车辆，可结合历史数据趋势，判断气密性能变化是否已超出设计允许范围。

在定位到疑似漏气区段后，应进一步从结构与功能两个层面开展精细化检查。管路系统需重点关注接头连接状态、管壁完整性及固定可靠性，防止因振动松脱或疲劳损伤形成泄漏通道。阀类元件的排查应围绕内部密封副、阀芯动作灵活性及回位性能展开，避免因内部串气造成隐蔽性漏气^[3]。对于制动缸及相关执行装置，应结合行程变化和压力保持能力，判断密封件是否存在磨损或老化问题。漏气处置过程中，技术路径的合理性直接影响治理效果。简单更换部件虽能短期消除症状，但若未对失效机理进行分析，问题可能在其他部位重复出现。因此，在实施维修措施时，应结合漏气成因，对相关部件同步检查与调整，确保气动回路整体气密性能恢复至稳定状态。对易损件应采用预防性更换策略，减少运行中突发失效的概率^[4]。

在处置完成后，还需通过功能验证和动态测试对治理效果进行确认。通过模拟不同制动工况，观察系统压力响应、制动缸动作一致性及补风频率变化，可评估气密性能恢复程度。将

排查与处置过程形成标准化技术流程，有助于提升检修工作的规范性和重复性，为制动系统漏气问题的长期控制提供稳定技术支持。

4 制动系统漏气治理成效的案例分析

以下选取两例典型的阀类元件漏气故障案例，详细阐述排查过程、处置措施及实施效果，为同类故障的治理提供实践参考。两例案例均依托 PHM（故障预测与健康管理）系统的数据分析功能实现早期预警，再结合现场排查完成精准处置，充分体现了“数据预警-系统排查-精准处置”的技术逻辑。

案例一：某项目制动系统电子称重阀外泄漏预警

某运营项目列车在日常状态监测中，PHM 算法通过对 M2 架返回的大容量运行数据进行自动分析，多次识别出电子称重阀外泄漏特征信号。技术人员提取异常数据段后，结合车速、站点等关联信息进一步验证，确认泄漏特征出现时车辆均处于库内停车工况，排除了运行振动等工况因素的干扰。图 1 为该故障的典型数据曲线图：

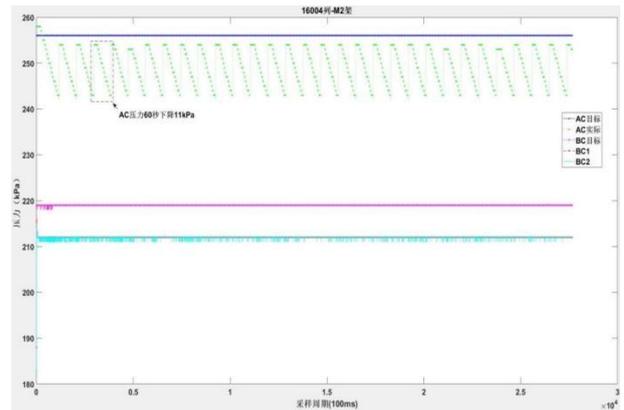


图 1 M2 架电子称重阀外泄漏特征曲线

从上图 1 中可以看出在目标 AC 和目标 BC 保持不变的情况下，AC 压力呈现明显的锯齿波特征，且特征持续，符合外泄漏特征，且泄漏速度较快，达到 11kPa/60s。潜在故障影响：泄漏可能会增加总风消耗。通过现场排查，确认为电子称重阀存在轻微泄漏，及时更换处理，避免了故障影响进一步扩大。

案例二：某项目制动系统 EP 阀内泄漏预警

经过 PHM 算法判断，某项目列车 M6 架大容量数据中存在 EP 阀内泄漏特征，泄漏速度较快，达到 12kPa/85s，但内泄漏现象存在间歇性，不是持续存在，且结合车速、站点信息判断出现异常时刻列车处于库内停车工况。下图 2 是 PHM 算法提取出的一段 M6 架 EP 阀内泄漏数据曲线，从图中可以看出 BC 压力在一段时间内持续出现过充现象(超出目标 BC 压力)，然后排气阀打开排气，如此循环反复，呈现明显 EP 阀内泄漏特征。潜在故障影响：如泄漏量持续加大，可能造成自检不通过。现场排查阶段，检修人员结合故障间歇性特征，采用“工况模拟-动态监测”的排查策略：通过模拟库内停车的制动保压

工况，同步监测 EP 阀各气路接口的压力变化，最终确认泄漏源为 EP 阀内部。随后更换故障 EP 阀，并将旧阀返厂进行拆解分析，验证了故障成因——阀口处残留的微小杂质导致密封副磨损，破坏了内部气路的隔离性能。更换新阀后，通过制动系统全工况测试：BC 压力过充现象完全消除，压力稳定性符合设计要求。

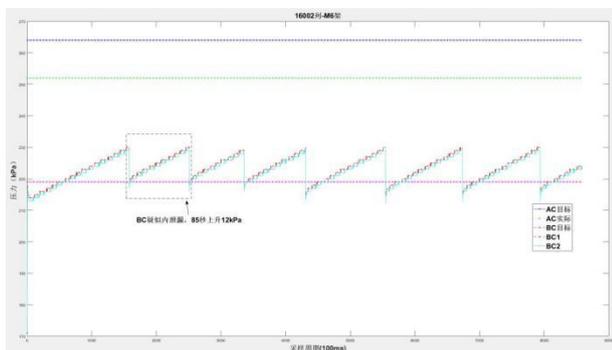


图 2 M6 架 EP 阀泄漏特征曲线

5 城轨制动系统气密管理的发展方向

随着城轨车辆技术水平与运营模式的不断演进，制动系统气密管理已由传统的故障修复导向逐步转向全过程、精细化管理方向发展。气密性能不再被视为单一部件层面的技术指标，而是影响制动系统整体可靠性和安全冗余的重要参数。未来的气密管理需要在设计、制造、运用和维护多个阶段形成闭环控制，使漏气风险始终处于可识别、可评估、可干预的状态。

在技术层面，气密管理的发展趋势体现在由事后检测向状态感知转变。通过对关键气路压力变化特征、补风频率及制动响应时间等参数进行持续监测，可实现对气密性能变化的动态掌握。这种基于运行数据的管理方式，有助于提前识别气密性

能衰退迹象，为维护决策提供客观依据，避免因隐蔽性漏气导致的突发故障。同时，气动系统设计中密封结构耐久性的重视，将成为提升先天可靠性的重要方向^[5]。在运维管理层面，气密性能的系统性评估将逐步取代单点检查模式。通过建立制动系统气密状态分级标准，将压力衰减特征与运行工况相结合，可对车辆制动系统健康状态进行综合判定。这种管理方式有助于优化检修资源配置，使维护工作更加贴近实际风险水平，减少不必要的重复拆检，同时提升对关键部位的关注度。

从管理体系角度看，气密管理的发展还体现在技术经验的标准化与流程化。将典型漏气模式、排查路径及处置效果进行系统归纳，形成统一的技术规范，有助于提升不同运维单位之间的技术一致性。通过持续修订和完善相关技术标准，使气密管理与车辆运行条件和设备状态保持动态适配，可增强制动系统长期运行的稳定性。在未来城轨运营环境中，列车运行密度和安全要求仍将持续提高，这对制动系统气密管理提出更高期望。通过将气密性能纳入制动系统全寿命周期管理框架，使技术手段与管理机制协同发挥作用，可有效降低漏气风险对制动可靠性的影响。这一发展方向不仅有助于保障城轨列车安全运行，也为制动系统技术水平的持续提升提供了现实路径。

6 结语

城轨列车制动系统漏气问题贯穿设备运行与维护全过程，对制动性能和运行安全具有持续影响。围绕制动系统气密性能，从运行要求、失效表现、排查处置到实践验证进行系统分析，可以看出漏气并非孤立故障，而是多因素叠加作用的结果。通过建立以系统排查为核心的技术路径，并将治理成效与运行数据相结合，有助于提升制动系统状态的可控性与稳定性。进一步强化气密管理理念，将为城轨列车制动系统的安全运行与长期可靠性提供坚实保障。

参考文献：

- [1] 李华柏,李丹,杜飞强.城轨列车再生制动能量中压馈能逆变系统控制策略[J].机电工程技术,2025,54(19):25-29.
- [2] 赵文飞.城轨列车再生制动能量回馈系统应用方案综述[J].设备监理,2024,(01):6-9+14.
- [3] 孙睿.浅析基于 FRPN 的城轨列车制动系统可靠性分配方法[J].中国设备工程,2024,(09):10-12.
- [4] 金剑峰.某线路城轨列车制动系统控制逻辑优化[J].铁道车辆,2021,59(04):75-78.
- [5] 马天和,吴萌岭,田春.城轨列车减速度反馈制动力闭环控制方法[J].仪器仪表学报,2021,42(04):197-205.