

应对极端天气，轨道交通基础设施韧性提升策略研究

褚画宜

天津中交轨道交通运营有限公司，天津 300201

DOI: 10.61369/ETQM.12235

摘 要： 在全球气候变化的大背景下，极端天气对轨道交通基础设施的威胁日益严峻。暴雨可能导致轨道结构被冲刷、车站积水，暴雪则会使接触网覆冰、供电受阻。为保障轨道交通的安全稳定运行，本文深入分析暴雨、暴雪等极端天气的影响机制，并构建全面的韧性评估体系。从优化设计标准、采用先进技术，到加强维护管理以及完善应急机制等多个方面，系统地提出提升策略，旨在全方位增强轨道交通基础设施应对极端天气的韧性。

关 键 词： 极端天气；轨道交通基础设施；韧性评估；提升策略；应急管理

Research on Strategies to Enhance the Resilience of Rail Transit Infrastructure in Response to Extreme Weather

Chu Huayi

Tianjin Zhongjiao Rail Transit Operation Co., Ltd. Tianjin 300201

Abstract: In the context of global climate change, the threat of extreme weather to rail transit infrastructure is increasingly severe. Heavy rains may cause the track structure to be washed away and water accumulation in stations, while heavy snow can lead to icing of the contact network and blocked power supply. To ensure the safe and stable operation of rail transit, this article deeply analyzes the impact mechanisms of extreme weather such as heavy rains and snowstorms, and constructs a comprehensive resilience evaluation system. From optimizing design standards, adopting advanced technology, to strengthening maintenance management, and improving emergency response mechanisms, the article systematically proposes enhancement strategies aimed at comprehensively enhancing the resilience of rail transit infrastructure in response to extreme weather.

Keywords: extreme weather; rail transit infrastructure; resilience evaluation; enhancement strategies; emergency management

在全球气候变化的大背景下，极端天气事件的发生频率与强度呈显著上升趋势。暴雨、暴雪、飓风、高温等极端天气给轨道交通基础设施带来了前所未有的挑战，严重威胁着轨道交通系统的安全与稳定运行。轨道交通作为城市公共交通的骨干力量，其基础设施在极端天气下的韧性水平，直接关系到城市交通的正常运转、居民的日常出行以及城市的整体发展。提升轨道交通基础设施应对极端天气的韧性，已成为城市可持续发展中亟待解决的关键问题。

一、极端天气对轨道交通基础设施的影响机制

（一）暴雨洪涝对轨道结构与道床的破坏

在当前经济可持续发展的迫切要求下，整个社会亟需全面认识和恰当评价暴雨洪涝灾害，使得从源头上规避灾害、减少灾害损失变成可能^[1]。暴雨洪涝是轨道交通基础设施面临的主要极端天气威胁之一。大量降水迅速汇聚，可能导致地下轨道结构被淹没。当轨道结构长时间浸泡在水中时，轨道扣件的金属部件会加速锈蚀，降低扣件对轨道的紧固力，使轨道的几何形位难以保持稳定。同时，道床中的道砟在水流冲刷下容易流失，道床的承载能力下降，进而引发轨道沉降、变形等问题。在一些地势较低的区间，如隧道的低洼段或靠近河流的区域，洪涝灾害的影响更为严重，可能造成轨道结构的严重损坏，甚至导致隧道坍塌，使轨

道交通线路长时间中断^[2]。

（二）暴雪冰冻对接触网与供电系统的影响

暴雪冰冻天气会在接触网上形成大量覆冰。接触网覆冰增加了接触网的重量，导致接触网线索弛度增大，与受电弓之间的接触压力发生变化，容易出现离线、拉弧现象，影响电力传输的稳定性，甚至造成供电中断。此外，冰冻还可能使接触网的支撑结构，如腕臂、绝缘子等被冰层包裹，降低其绝缘性能，引发短路故障。供电系统中的变压器、开关柜等设备在低温环境下，油液的黏度增加，散热性能变差，可能导致设备故障^[3]。而且，暴雪可能会压断供电线路的杆塔，造成输电线路中断，严重影响轨道交通的供电安全。

（三）强风对高架线路与车站建筑的危害

强风对高架轨道交通线路和车站建筑具有较大的破坏力。高

架线路的桥梁结构在强风作用下，会受到较大的风荷载。当风荷载超过桥梁结构的设计承载能力时，可能导致桥梁晃动加剧，影响列车运行的平稳性，甚至引发桥梁结构的疲劳损伤和破坏。强风还可能吹落车站建筑上的广告牌、玻璃幕墙等附属设施，对下方的轨道线路和过往列车构成安全威胁^[4]。在沿海地区或峡谷等风力较大的区域，强风对轨道交通基础设施的影响更为突出，需要特别关注。

（四）高温对轨道材料与设备性能的改变

持续高温天气会使轨道材料的性能发生变化。例如，钢轨在高温下会出现热胀现象，若无缝线路的扣件阻力不足，钢轨可能会发生胀轨跑道，导致轨道几何形状严重变形，危及列车运行安全。高温还会影响轨道板、道床等混凝土结构的耐久性，加速混凝土的劣化过程^[5]。对于轨道交通中的电气设备，如信号设备、通信设备等，高温环境会使其散热困难，导致设备内部元件温度过高，性能下降，甚至出现故障。高温还可能影响列车的空调系统性能，降低乘客的乘坐舒适度。

二、轨道交通基础设施韧性评估体系构建

（一）韧性评估指标选取原则

轨道交通基础设施韧性评估指标的选取应遵循科学性、全面性、可操作性和敏感性原则。科学性要求指标能够准确反映基础设施在极端天气下的韧性特征，基于科学的理论和方法确定^[6]。全面性则需涵盖轨道结构、供电系统、通信信号系统、车站建筑等各个方面，以及抵御、恢复等不同阶段的性能表现。可操作性确保指标数据易于获取和计算，便于实际应用。敏感性指标对极端天气的影响变化具有较高的敏感度，能够及时准确地反映基础设施韧性的改变。

（二）具体评估指标体系框架

轨道交通基础设施韧性评估涵盖轨道结构、供电系统、通信信号系统和车站建筑等多方面的指标。轨道结构韧性通过轨道变形量、沉降速率、扣件松动率、道床完整性来衡量，这些指标分别反映轨道几何形位变化、扣件系统稳定性以及道床在水流冲刷、冻融等作用下的损坏程度^[7]。供电系统韧性指标包括接触网覆冰厚度、接触网离线率、供电中断时间和变压器油温升，它们关乎接触网安全运行、电力传输稳定性、系统恢复能力以及设备在极端条件下的运行状态。通信信号系统韧性通过信号传输误码率、通信中断时长、设备故障率来体现，影响列车运行控制精度、通信系统可靠性和设备稳定性。车站建筑韧性则由建筑结构位移、附属设施损坏率、车站积水深度来评估，反映车站建筑在极端荷载下的结构安全状况、附属设施受损程度以及洪涝对车站的影响。

（三）评估方法与模型应用

可采用层次分析法（AHP）确定各评估指标的权重，结合模糊综合评价法对轨道交通基础设施的韧性进行综合评估。首先，通过专家打分等方式构建判断矩阵，利用 AHP 计算各指标的相对权重。然后，根据实地监测数据或模拟分析结果，对各指标进行

模糊评价，确定其隶属度。最后，通过模糊变换得到基础设施的韧性综合评价结果。此外，还可应用复杂网络模型等方法，分析轨道交通系统在极端天气下的拓扑结构变化和功能失效情况，为韧性评估提供更全面的视角。

三、提升轨道交通基础设施韧性的策略与措施

（一）优化基础设施设计标准

提高抗灾设计标准需依据气候变化趋势和当地极端天气历史数据，重新评估与修订轨道交通基础设施的抗灾设计标准。于暴雨洪涝频发地区，提升地下轨道结构的防水、抗浮设计标准，增强排水设施的排水能力^[8]；在暴雪冰冻地区，强化接触网、供电线路等设施的抗冰设计，提高结构的承载能力与绝缘性能；在强风地区，优化高架线路和车站建筑的抗风设计，采用更为合理的结构形式和防风措施。考虑多灾种耦合影响方面，传统的基础设施设计通常仅考虑单一灾种的作用，然而实际中极端天气可能引发多种灾害的耦合，比如暴雨可能伴随强风，暴雪可能致使冰冻与低温灾害并发。所以，在设计阶段应充分考量多灾种耦合对基础设施的影响，通过构建多灾种耦合分析模型，评估基础设施在复杂灾害作用下的性能，进而制定相应的设计对策。

（二）采用先进的材料与技术

为提升轨道交通基础设施应对极端天气的能力，在材料与技术方面可采取多项关键举措。研发并应用新型轨道材料意义重大，像具有高耐久性、抗腐蚀和良好耐候性的材料，能有效增强轨道设施性能。采用耐腐蚀钢轨材料，可降低其在潮湿、盐雾等恶劣环境下的锈蚀速度，延长使用寿命；使用纤维增强混凝土道床这类高性能道床材料，能提高道床抗冲刷和承载能力，为轨道系统稳定运行奠定基础。

在智能监测与预警技术部署上，需在轨道交通基础设施中广泛安装应变、温度、位移、湿度等智能监测传感器，实时监测基础设施运行状态和环境参数。借助物联网、大数据、人工智能等先进技术，深入分析处理监测数据并构建预测模型，从而提前精准预警极端天气对基础设施的危害。例如，通过实时监测和分析接触网温度、张力等参数，可有效预测接触网覆冰可能性，及时采取除冰措施，保障供电系统稳定。

针对极端天气可能造成的基础设施损坏，研发快速修复技术和装备至关重要。开发快速固化的混凝土修复材料，可快速修复轨道结构的裂缝、破损等问题；研究便携式轨道抢修设备，能在现场快速处理轨道变形、扣件松动等故障，大幅缩短线路中断时间，降低极端天气对轨道交通运营的影响，确保轨道交通在极端天气下也能尽量维持正常运行，保障乘客的出行安全与便捷^[9]。

（三）加强基础设施的维护与管理

为保障轨道交通基础设施在极端天气下可靠运行，需从日常运维与应急准备着手。制定详尽的定期巡检计划，明确巡检内容、周期和标准，采取人工与智能巡检相结合的方式，对易受极端天气影响的关键部位增加巡检频次，同时依据设备要求和维护周期，对轨道结构、供电、通信信号等系统进行定期维护，确保设

备良好运行。

依据当地可能出现的极端天气，储备充足且种类齐全的应急物资与设备，如抢险救援工具、排水设备、除冰除雪设备、应急照明和通信设备等，并定期检查维护，保障其能正常使用。

定期组织轨道交通运营管理部门、维修人员和应急救援队伍开展应对极端天气的应急演练，检验应急预案可行性，提升各部门协同配合和应急处置能力。强化相关人员培训，提高他们对极端天气危害的认知、应急处置技能和安全意识，培训内容涵盖设备操作、故障排查修复和人员疏散等方面。

（四）完善应急响应与协同机制

强化轨道交通应对极端天气能力，需在应急预案、部门协作和公众沟通三方面发力。要依据轨道交通基础设施特点和当地极端天气状况，制定详尽应急预案。明确应急响应级别、启动条件、指挥体系、部门职责分工及应急处置流程，针对暴雨洪涝、暴雪冰冻、强风等不同极端天气制定专项预案，确保灾害发生时能迅速有序开展应急救援^[10]。

轨道交通应急管理涉及多个部门，建立健全协同合作机制至关重要。气象部门应及时向轨道交通运营单位提供精准预警信息，运营单位据此提前防范。灾害发生后，各部门按预案职责紧

密配合，城市规划部门评估基础设施损坏对城市交通的影响并制定疏导方案，应急管理部门协调资源保障救援。

极端天气期间，及时向公众发布轨道交通运营信息不可或缺，包括线路中断、恢复时间、运营方案调整等，利用官方网站、社交媒体、车站显示屏、广播等多渠道确保信息准确及时传达，方便乘客规划出行。同时，建立公众反馈渠道，收集需求和意见，回应社会关切，提升公众对应急管理工作的满意度。

四、结束语

提升轨道交通基础设施应对极端天气的韧性，无疑是一项任重道远且错综复杂的长期任务。通过实施重新评估修订抗灾设计标准、考虑多灾种耦合影响等策略，可在一定程度上降低极端天气的冲击。然而，鉴于气候变化的持续演进，极端天气的强度、频率和复杂性都在不断攀升。因此，必须持续探索创新路径，不断优化既有措施，持续提升应对能力。只有如此，才能全方位保障轨道交通系统在各种极端天气下的安全稳定运行，为城市的稳健发展筑牢坚实的交通根基。

参考文献

[1] 张茜,郭翔,王锐婷,等.四川省暴雨洪涝灾害风险区划研究[J].中国农学通报,2013,29(26):165-171.

[2] 刘俊.极端天气下的城市轨道交通运营研究[J].人民公交,2024,(16):174-176.DOI:10.16857/j.cnki.cn11-5903/u.2024.16.028.

[3] 江南潮,高燕,史天根,等.极端天气下轨道交通水害致灾因子时空分布特征[J].人民长江,2024,55(07):10-19.DOI:10.16232/j.cnki.1001-4179.2024.07.002.

[4] 李焕海.极端天气下城市轨道交通运营的思考建议[J].城市轨道交通,2024,(03):40-42.DOI:10.14052/j.cnki.china.metros.2024.03.006.

[5] 刘子健.极端天气事件下城市交通系统韧性定量评估方法研究[D].福建工程学院,2023.DOI:10.27865/d.cnki.gfgxy.2023.000208.

[6] 宋光辉.考虑极端天气影响的轨道交通自洽能源系统光储容量规划[D].华北电力大学(北京),2023.DOI:10.27140/d.cnki.ghbbu.2023.000948.

[7] 陈健,罗国鸿.极端天气下轨道交通运营防汛预案及应急措施研究[J].运输经理世界,2024,(03):10-12.

[8] 冯琳.极端天气下城市轨道交通应急管理评价指标体系研究[D].西南交通大学,2023.DOI:10.27414/d.cnki.gxnju.2023.001941.

[9] 夏典.城市轨道交通气象监测系统的探索[J].安徽科技,2023,(02):53-55.

[10] 李朋.极端天气条件下城市轨道交通防排水对策分析[J].工程建设与设计,2023,(07):53-55.DOI:10.13616/j.cnki.gcjsysj.2023.04.016.