

# 地铁新型轨道结构减振降噪技术应用与全生命周期优化策略

杨健<sup>1</sup> 张磊<sup>2</sup>

1. 中铁投资集团交通运营有限公司 天津 300000

2. 天津轨道交通线网管理有限公司 天津 300000

**摘要：**随着地铁建设运营的高速发展，传统减振技术在实际应用中面临减振效果不足、维护更换困难、全生命周期经济性差等多重挑战。本文系统分析了嵌入式轨道与钢弹簧浮置板轨道两类主流新型轨道结构的实际应用效果与工程痛点，提出一种面向工程实践的“三阶段”全生命周期优化策略：即在设计阶段引入基于实测振动谱的荷载谱反演与数字孪生仿真；在施工阶段推广模块化预制与智能化装配工艺；在运维阶段建立基于传感器网络的健康监测与性能预测系统。研究成果为新型轨道结构从实验室性能向工程可靠性转化提供了系统性解决方案，可为城市轨道交通减振降噪工程提供技术参考。

**关键词：**轨道交通；减振降噪；全生命周期

## 引言

截至2024年底，国内开通运营的地铁线路总里程已突破10000公里，其中超60%的线路穿越城市主城区、历史保护区或敏感建筑群。为应对因地铁运营引起的环境振动与噪声，各类新型轨道减振降噪技术在研究中取得了显著进展，其理论插入损失普遍可达10~25dB。但实际应用中，各类减振技术的实际表现常大幅低于设计值，主要存在长期性能衰减、环境适应性不足、维护更换困难等问题。

目前，新型轨道结构的研究多集中于隔振机理数值模拟、新材料配方优化等基础层面，实验室理论条件下的性能验证难以复现现场实际的复杂环境；而规划设计时多依赖经验选型与定性评价，缺乏对减振结构全生命周期性能衰减规律的精准把握，导致技术选型与实际需求存在差异。这种差异导致技术方案的实际效能、经济性与可靠性不及预期。因此，亟需建立一种贯通设计—施工—运维链条、以长期性能可靠性与全生命周期经济性为核心的系统性优化方法，以推动减振降噪技术从实验室优等生向工程可靠伙伴的实质转化。

## 1 实际应用痛点分析

### 1.1 嵌入式轨道结构

嵌入式轨道结构通过将钢轨嵌入高分子弹性填充材料中，形成连续支承结构，凭借其优良的初期减振效果和相对较低的初始造价（约为钢弹簧浮置板的1/3），在中等减振要求区段得到广泛应用，国内应用里程已超800公里，其实际应用痛点如下：

#### 1.1.1 材料老化引发性能衰减

槽内填充的聚氨酯、环氧树脂等高分子弹性材料，在光照、水浸及油污的长期作用下，易发生化学老化，表现为开裂、粉化。国内部分已运营8~12年的嵌入式轨道结构钻芯取样测试结果表明：服役8年后，部分材料的动态刚度可上升50%以上，损耗因子下降约40%，对应的减振效果衰减30%~40%<sup>[1]</sup>；服役12年后，材料老化更为严重，局部区段甚至出现填充材料与钢轨、轨道板剥离现象，减振效果基本丧失。上述问题，根源在于传统设计中对环境多因素耦合加速老化机制考虑不足，缺乏有效的原位状态监测与性能预警手段，且维护手段滞后。

#### 1.1.2 维护更换困难

嵌入式轨道结构的填充材料更换或局部修补时需按照开凿清除—基层处理—材料灌注—养护固化的流程，其中仅养护固化约需60h。地铁运营线路的施工天窗通常约4小时，维修作业需夜间封站或周末全封闭施工，对运营影响大。

## 1.2 钢弹簧浮置板道床

钢弹簧浮置板道床通过钢弹簧隔振器实现道床板与基础的连接，形成道床板与下部基础的弹性隔离，是目前隔振等级最高的轨道结构形式之一，实测隔振效率可达15~25dB，适用于穿越特殊敏感区域，国内应用较多。其局限性如下：

### 1.2.1 全生命周期造价高

钢弹簧浮置板道床的造价约为普通整体道床的4~6倍，显著增加建设成本。为保证各钢弹簧支撑点受力均

匀及轨道结构的平顺度,需定期进行轨道板顶升调平作业;钢弹簧隔振器的更换需专业设备与技术人员,日常维护和更换成本高昂。

### 1.2.2 对基础变形敏感

钢弹簧浮置板道床的隔振效果依赖于各支撑点的均匀受力与稳定形位,而隧道结构的不均匀沉降会直接传递给浮置板。若基础沉降量超出钢弹簧的调高范围,则导致支撑力二次分配,轻则局部隔振效率下降,重则引发轨道几何形位超限,影响行车安全。在软土地区或穿越地质活动带的线路中,此类风险尤为突出。

## 2 面向全生命周期的优化策略

针对嵌入式轨道结构与钢弹簧浮置板道床的痛点,提出以“全生命周期成本最低、长期性能可靠、运维便捷高效”为核心的优化策略,涵盖设计、施工、运维三大阶段,通过数字化、工业化、智能化技术手段,实现新型轨道结构的精准设计、优质建造与智慧运维。

### 2.1 设计阶段

传统设计依赖设计规范中的标准荷载谱,无法反映具体线路的车辆类型、运营速度、地质条件等个性化特征,导致设计方案“一刀切”,难以适配复杂工程环境。优化策略如下:

#### 2.2.1 构建线路个性化激励谱

在新线设计前,调研相同技术条件的线路和列车情况,或利用各类传感器实时采集列车运行过程中的轮轨垂向力、横向力、轴重、钢轨振动响应、轨道变形与噪声数据。基于实测数据,利用传递路径分析方法反演构建该线路特有的运营荷载谱,包含日均荷载峰值、荷载频次分布、冲击荷载比例等关键参数,使设计荷载更贴合实际运营情况<sup>[2]</sup>。

#### 2.1.2 建立耦合模型

基于BIM与GIS数据,整合轨道结构、下部基础、邻近建筑的三维几何信息与物理参数,创建精细化有限元模型。将个性化荷载谱输入模型,同时融入环境因素与地质变形预测数据,对不同减振方案进行全生命周期性能仿真——预测20~30年内的减振效果衰减趋势、结构应力变化、材料老化速率及对周边建筑的振动影响,实现“所见即所得”的虚拟验证<sup>[3]</sup>。

#### 2.1.3 多目标优化的方案比选

建立综合评价指标体系,涵盖多个一级指标(全生命周期成本、长期减振保证率、施工可行性、运维便捷性)与二级指标(如建设成本、运维费用、20年减振效果衰减率、施工工期、维修天窗需求等)。利用数字孪生平台,对不同轨道类型、材料参数、结构尺寸进行

虚拟比选与参数优化,通过遗传算法求解多目标优化问题,最终形成“一区段一方案”的精准化设计结果,实现性能与成本的平衡。

## 2.2 施工阶段

施工质量是决定减振轨道长期性能的关键——现场施工的人为误差、材料灌注不均、安装精度不足等问题,均会导致实际性能与设计值偏差。优化策略聚焦工业化生产与智能化施工,减少现场人为因素影响:

### 2.2.1 推广模块化预制技术

将浮置板道床、嵌入式轨道板等关键部件在工厂进行标准化、模块化预制,出厂前进行平整度、强度等指标检测,确保质量可控。同时,对嵌入式轨道的填充材料进行工厂预养护,通过加速老化试验验证其性能稳定性,确保出厂参数符合设计要求。

### 2.2.2 应用智能化施工装备与工艺

钢弹簧浮置板安装:采用轨道精调机器人进行三维精确定位,通过激光测距与压力传感技术实时监测各支撑点受力状态,确保安装后受力均匀性满足要求。嵌入式轨道填充:使用压力传感与注浆监测一体化系统,控制填充材料的灌注压力与流速,避免出现空洞、气泡等缺陷,同时通过超声波检测技术实时监测灌注密实度。竣工验收:利用三维激光扫描技术对成品轨道的几何形位进行快速检测,建立数字化竣工档案,为后续运维提供数据支撑。

## 2.3 运维阶段

传统运维采用状态修,被动响应且成本较高。优化策略变被动维修为主动预警与预测性维护,通过状态感知、数据建模与精准处置,延长设备寿命、降低运维成本。

### 2.3.1 部署低成本无线传感网络

在关键减振区段的轨道板、钢轨、隧道壁上,分布式布设微型化、低功耗的振动传感器、温湿度传感器与应变传感器。传感器采用无线通信方式传输数据,实现轨道动力响应、环境状态与结构应力的实时监测,确保精准捕捉异常信号。

### 2.3.2 开发性能退化预测模型

为突破传统阈值报警的滞后性,本研究提出融合物理机制与数据驱动的混合建模方法。首先,基于材料加速老化试验建立不同环境应力(温、湿度,化学腐蚀)下的性能退化物理方程。继而,利用部署的传感网络获取长期原位监测数据,采用长短期记忆网络(LSTM)挖掘振动响应时序数据中隐含的性能退化特征。最终,通过卡尔曼滤波等算法将物理模型与数据驱动模型进行融合,建立不确定性量化下的性能退化预测模型,从而实现更早、更准的衰退趋势预报。

### 2.3.3 制定分级预警与精准维护策略

根据预测模型输出结果，建立“观察—监测—计划性维修—紧急处置”四级响应机制：

观察级（性能衰减  $\leq 10\%$ ）：保持常规监测频率，无需额外处置；监测级（ $10\% \leq 20\%$ ）：提高监测频率（从每周1次增至每天1次），密切关注性能变化；计划性维修级（ $20\% < \text{性能衰减} \leq 30\%$ ）：提前在夜间天窗点安排局部维护（如嵌入式轨道填充材料局部修补、钢弹簧单点调平）；紧急处置级（性能衰减  $> 30\%$ 或几何形位超限）：立即启动应急响应，安排专项施工进行全面整治。

## 3 工程验证案例

### 3.1 项目背景

某市地铁S线全长28.6公里，其中3.2公里区段需下穿国家级历史建筑群保护区，该区域建筑多为明清时期砖木结构，对振动极为敏感，环境振动控制要求严苛（夜间VLzmax  $\leq 65\text{dB}$ ）。传统方案拟采用全线钢弹簧浮置板轨道，总投资约3.84亿元，建设成本高昂。

### 3.2 优化策略应用

#### 3.2.1 设计优化

通过“车载+轨旁”测试获取该线路的个性化荷载谱（列车轴重14t，最高运营速度80km/h，轮轨冲击荷载峰值250kN）；构建轨道-隧道-历史建筑耦合数字孪生模型，仿真不同减振方案的长期性能<sup>[4]</sup>。结果表明：仅核心保护区下方约300米区段需采用钢弹簧浮置板（隔振效率20~25dB），两侧过渡区（各1.45公里）采用高性能嵌入式轨道（填充材料选用耐老化聚氨酯，初始减振效率10~12dB）即可满足振动控制要求，高等减振段长度减少了40%。

#### 3.2.2 施工保障

对钢弹簧浮置板实施工厂预制、现场机器人精调，安装后各支撑点受力偏差  $\leq 3\%$ ；对嵌入式轨道采用压力监控灌注工艺，超声波检测显示灌注密实度达98%以上；竣工验收时，三维激光扫描检测轨道几何形位偏差均  $\leq 2\text{mm}$ ，符合设计要求<sup>[5]</sup>。

#### 3.2.3 智慧运维

在全线减振区段布设120个无线传感器，实时监测振动响应与结构状态，开发的性能退化预测模型已稳定运行3年。

### 3.3 应用效果

成本优化：工程总投资降至3.15亿元，较传统方案节省18%，全生命周期成本降低15%；性能保障：运营3年来，核心保护区夜间实测振动值为58~63dB，过

渡区为60~64dB，持续优于VLzmax  $\leq 65\text{dB}$ 的要求，且减振效果衰减率  $\leq 8\%$ ，远低于传统方案的30%；运维优化：主要部件（钢弹簧、填充材料）的首次大修周期从预估的10年延长至15年以上，维护工作量减少40%，运维成本降低35%<sup>[6]</sup>。

### 结束语

新型轨道减振降噪技术的工程化应用，核心在于破解“实验室性能优而工程可靠性差”的鸿沟。本文通过分析嵌入式轨道结构与钢弹簧浮置板道床的工程痛点，提出了贯通设计、施工、运维全过程的全生命周期优化策略：设计阶段以数字孪生为核心，实现个性化精准设计；施工阶段以模块化预制与智能化装配为手段，保障工程质量；运维阶段以状态感知与预测性维护为支撑，降低全生命周期成本。该策略在某地铁穿越历史保护区项目中得到验证，取得了显著的经济与社会效益。

未来，随着物联网、人工智能与新材料技术的进一步融合，轨道交通减振降噪技术将向“智能自适应”方向发展：一方面，研发具备自感知、自修复功能的智能减振材料（如形状记忆聚合物、自愈合弹性体），从源头延缓性能衰减；另一方面，构建跨线路的减振系统大数据平台，通过多线路数据融合训练，提升性能预测模型的通用性与精度，最终实现“设计-施工-运维”的全链条智能化，为轨道交通绿色、智能、可持续发展提供核心支撑。

### 参考文献

- [1]王建平, 刘浪, 李秋义.地铁嵌入式轨道高分子填充材料老化性能试验研究[J].铁道学报, 2021, 43(5): 112-119.
- [2]刘维宁, 李克飞, 马蒙.地铁列车运行引起的环境振动预测、评估与控制[M].北京: 科学出版社, 2014.
- [3]孙方道, 高亮, 蔡小培.钢弹簧浮置板轨道技术在北京地铁的应用与长期性能观测[J].铁道建筑, 2019, 59(8): 131-135.
- [4]周毅, 李成辉, 林红松.基于数字孪生的轨道减振系统全生命周期管理框架研究[J].振动与冲击, 2022, 41(10): 1-9.
- [5]张顶立, 王梦恕, 李永生.城市地铁隧道施工对邻近建筑物的影响及控制技术[J].岩石力学与工程学报, 2018, 37(S2): 3868-3876.
- [6]Zhao C,Wang P,Wang L,et al.Field investigation and numerical analysis of the dynamic properties of floating slab tracks[J]. Construction and Building Materials, 2021, 292: 123455.