

客货混运铁路行车诱发场地与建筑振动实测研究

兰日清^{1,2}, 韩蓬勃^{1,2}, 王 辛^{1,2}, 伍文科^{1,2}, 刘 鑫^{1,2}

¹国机集团科学技术研究院有限公司工程振动控制技术研究中心, 北京

²机械工业重大科学基础设施关键工艺装备振动控制重点实验室, 北京

收稿日期: 2026年8月1日; 录用日期: 2026年8月27日; 发布日期: 2026年9月3日

摘 要

普速客货混运铁路列车低速进出站时, 货运列车产生的低频振动对沿线高层建筑的干扰明显大于纯客运线路。现有轨道交通振动实测研究以地铁和高铁为主, 针对普速客货混运场景的分析相对不足。本文以京承铁路北京-怀柔段为对象, 2024年3~5月间在昼间开展了28次现场振动测试。沿垂直于线路方向布设了场地监测断面, 同时在距线路75 m和270 m的两栋高层建筑内布置楼层测点, 记录列车以25~50 km/h进出站时的竖向振动响应。实测发现: 货车的优势频段为2~8 Hz, 客车则集中在10~30 Hz; 低频振动在90~180 m测试范围内衰减速率低于中高频。75 m处建筑出现楼层振动放大, 其竖向基频与货运低频激励接近, 形成共振, 室内Z振级超过居住建筑舒适限值。基于实测结果, 建议铁路沿线新建住宅与线路的距离宜大于200 m; 受用地条件限制时, 需针对性设计低频隔振系统。

关键词

客货混运铁路, 环境振动, 现场实测, 低频衰减, 楼层放大

Field Study on Vibration Impact of Mixed Passenger-Freight Railway Operations on Surrounding Site and Building Structures

Riqing Lan^{1,2}, Pengbo Han^{1,2}, Xin Wang^{1,2}, Wenke Wu^{1,2}, Xin Liu^{1,2}

¹Engineering Vibration Control Center, Sinomach Academy of Science and Technology Co., Ltd., Beijing

²Key Laboratory of Vibration Control for Key Process Equipment of Major Scientific Infrastructure in the Machinery Industry, Beijing

Received: August 1, 2026; accepted: August 27, 2026; published: September 3, 2026

文章引用: 兰日清, 韩蓬勃, 王辛, 伍文科, 刘鑫. 客货混运铁路行车诱发场地与建筑振动实测研究[J]. 声学 & 振动, 2026, 14(3): 117-127. DOI: 10.12677/ojav.2026.143010

Abstract

Field measurements were conducted on the Beijing-Huairou section of Jingcheng Railway to investigate ground and building vibrations induced by mixed passenger-freight trains during low-speed arrival and departure. A total of 28 valid test groups were completed between March and May 2024. Three ground monitoring points were arranged at 90 m, 125 m and 180 m from the track centerline, and floor measuring points were installed in two high-rise buildings located 75 m and 270 m away, respectively. Test results show that freight trains generate dominant vibration in the 2~8 Hz range, whereas passenger trains dominate at 10~30 Hz. Within the 90~180 m range, low-frequency vibration decayed more slowly than mid-to-high-frequency components. Building A at 75 m exhibited significant floor amplification: the 25th-floor Z-vibration level reached 72 dB under freight train excitation, 5 dB above the ground level and exceeding the 65 dB sleep comfort limit specified in JGJ/T 170-2009. The vertical transfer function revealed a structural resonance peak at 6.73 Hz, which falls within the freight train's dominant frequency band, yielding a 25th-floor transfer rate of 3.58-approximately 6.4 times that under passenger train excitation. At 270 m, Building B met all vibration comfort criteria. Conventional mitigation measures, including structural stiffness adjustment, isolation trenches, polyurethane pads and steel spring-damper bearings, face frequency or scale mismatch issues in the 2~10 Hz range and are unlikely to achieve effective low-frequency isolation. A minimum setback distance of 200 m is recommended for new residential buildings along such railway lines; where land availability is constrained, dedicated low-frequency isolation systems should be developed.

Keywords

Mixed Passenger-Freight Railway, Environmental Vibration, Field Measurement, Low-Frequency Attenuation, Floor Amplification

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

当前铁路环境振动相关实测研究已较为丰富,但大多聚焦单一客运工况,以地铁运行区段、时速 270 km/h 以上高铁场景为主,针对客货混运线路列车低速进出站工况的专门研究仍较为欠缺。工程设计中,既缺少货运列车 2~8 Hz 低频激励在中软土地传播的实测数据,也难以判定现有隔振措施对超长波长低频振动的实际阻隔效果。

列车动力参数与轨道状态是影响振源特性的核心因素。张瞳等[1]实测表明,列车制动阶段振动显著高于 30 km/h 低速行驶状态,行车工况改变激励水平。胡晶晶[2]在重载铁路测试中得到竖向振动随距离呈幂函数衰减,且 14 m 以外衰减速率明显放缓。钱凤霞等[3][4]指出,轴重增加会降低振动优势频率、增大传播范围,货运列车与高铁因轴重、轴距差异,轮轨动力荷载特性存在本质区别。余梦雯[5]发现双线会车分频振级高于单线行车,且车速提升会进一步放大近场振动效应。上述成果具备一定参考价值,但已有研究的车速与轴重条件和本文 35~50 km/h 低速工况并不匹配,低速下轴重对振动频谱的调控规律仍缺乏实测支撑。

在轨道振动影响方面,Ming 等[6]认为钢轨波磨是建筑振动超标的主导因素,扣件竖向刚度影响相对有限。杨舟[7]通过地铁出站实测发现,钢轨振动幅值随车速升高而增大,40 km/h 时道床与隧道壁加速度

响应最为显著。轨道不平顺、扣件状态及行车速度对振源强度均有明显调控作用，但现有试验多针对地铁隧道和无砟高铁线路，与京承铁路有砟普速线路结构形式、场地土性差异较大，相关结论无法直接借鉴。

场地条件与传播距离共同控制振动衰减规律。王祥秋等[8]实测高铁振动主频集中在 25~60 Hz，远高于本文货运列车 2~8 Hz 低频特征。周颖等[9]、闫石等[10]、彭也也[11]均得出随距离增加三向振动整体衰减的规律，其中周颖等[9]还发现 40~50 m 区间存在竖向振动局部放大现象。毕俊伟等[12]明确近场振动由轴重主导，远场受轮对叠加效应控制，中高频成分衰减更快。这些结论对本文 90~180 m 远场分析有借鉴意义，但现有研究多基于高铁与硬土场地，中软土地对低频瑞利波的衰减弱化效应仍缺少量化成果。司丕贤等[13]仅开展普通铁路路基断面振动测试，未涉及向高层建筑基础的耦合输入问题。

振动传入建筑内部后楼层传递规律更为复杂。花雨萌等[14]实测表明，楼板振动沿楼层并非单调衰减，中间楼层响应更突出，结构基频处共振效应显著。张小安[15]提出上盖建筑振动需综合基础形式、结构刚度及使用功能多维度考量。陈建国[16]认为高频振动随楼层升高衰减更快，建筑竖向振动主频多集中在 10~100 Hz。既有研究多集中于中高频区间，并未覆盖本文建筑 6.73 Hz 共振所处的货运低频段，类似 25 层高达 3.58 的低频传递率特征，暂无实测数据可佐证。

部分学者针对特殊场景开展了振动研究。陈洪运等[17][18]得到京张高铁地表振动主频为 30~42 Hz，分析了路堤形式的影响规律。宋启宇[19]测试铁路综合体上盖建筑，得到站台区域 Z 振级分布在 55~90 dB。张学智等[20]揭示了地铁振动经隧道、立柱向建筑传递的波动衰减特征。上述研究的振动主频、场地形式与传力路径，和本文地面铁路侧向激励、中软土地、高层剪力墙建筑的耦合工况差异显著，结论难以直接套用。

总体而言，现有研究已在振源机理、传播规律及建筑响应方面形成基础体系，但针对客货混运低速进出站、中软土地临近高层建筑的组合场景，系统实测资料仍较零散。多数研究仅定性描述振动规律，未依据 GB 10070-88 开展规范量化评价；减振分析也多停留在定性罗列，缺少结合实测主频、场地波长与结构共振特征的定量适配研究。因此，开展场地与建筑同步实测，完成振动规范评价及减振措施失效机理分析，可有效弥补该工况下现有研究的不足。

2. 铁路线路及场地参数分析

2.1. 铁路与列车基本参数

京承铁路是普速客货混运铁路，测试区段位于北京站至怀柔段之间，属复线。列车进出站时的运行速度在 35~50 km/h，主力车型为东风 4C/4D 型内燃机车。客运列车一般编组 8~12 节，货运列车编组 30~50 节，轴重 18~23 t。测试时间为 2024 年 3 月至 5 月的昼间(8:00~20:00)共完成 28 组有效测试，无降雨、大风等干扰工况。28 组测试中，客车通过事件 6 组、货车通过事件 16 组，背景噪声 6 组。

2.2. 场地土基本信息

测试场地为典型中软土，具体土层参数见表 1。

Table 1. Site soil characteristics summary table
表 1. 场地土特性一览表

层数	名称	层高(m)	天然重度 N/m ³	剪切波速 m/s	土类型
1	人工堆积土	0.50~5.30	(17.5)	171.6~177.1	中软土
2	黏质粉土	1.70~8.20	20.2	169.0~178.4	中软土

续表

3	重粉质黏土	1.50~7.90	19.2	198.5~210.2	中软土
4	细砂	1.50~6.10	(19.5)	225.0~266.5	中软土
5	粉质粘土	1.70~6.00	20.2	252.5~267.4	中硬土

注：土层参数来源于拟建场地的工程地质勘探报告。

黏质粉土和细砂虽都为中软土，但两者对振动的传播衰减并不完全一样。黏质粉土主要靠颗粒间黏聚力衰减高频振动，但对低频振动衰减非常慢，低频成分很容易传出去很远；细砂则主要依赖颗粒间摩擦阻尼，高频衰减速度比黏质粉土还要快一些，低频衰减也略好于黏质粉土。本研究场地的剪切波速在 169.0~267.4 m/s 之间，这个波速直接决定了列车振动在土层中的传播速度和衰减规律。地面铁路激励产生的振动以瑞利面波为主，能量高度集中在地表附近，传播过程中衰减缓慢，因此对沿线建筑结构的影响更为明显。

3. 现场振动测试及振动特性分析

背景噪声测试在列车通过间歇期开展，6 组背景噪声的有效值加速度为 $2\sim5\times10^{-4}\text{m/s}^2$ ，对应 Z 振级 42~46 dB。货车通过时测点加速度有效值为 $1.2\sim4.0\times10^{-3}\text{m/s}^2$ ，Z 振级 64~69 dB，信噪比约 18~23 dB；客车通过时有效值加速度为 $0.4\sim1.8\times10^{-3}\text{m/s}^2$ ，Z 振级 57~64 dB，信噪比约 15~18 dB。各工况信噪比均大于 10 dB，数据有效性满足分析要求。现场测试采用 G1B 型数字化力平衡加速度传感器，仪器灵敏度 2.5 V/g，量程 $\pm3\text{g}$ ，有效频响 0~100 Hz (-3 dB)，频域动态范围约 145 dB，典型噪声有效值 $0.5\times10^{-6}\text{g}_n$ ，各项指标均可满足铁路环境振动高精度采集需求。

测点布设兼顾了不同位置、不同高度和不同方向。在铁路沿线的空旷拟建场地，布设地表测点 3 个，分别距铁路中心线 90 m、125 m、180 m，用于分析场地振动传播规律。选取沿线 2 栋高层建筑作为测试对象，用于分析楼层的振动传播规律。其中建筑甲是 2019 年建成的 28 层(总高 78.4 m)桩基础(桩长约 36 m)剪力墙结构，建筑距铁路中心线约 75 m，在这个结构的室外地面、6 层和 25 层共布设 3 个振动测点；建筑乙是 2000 年建成的 26 层(总高约 72.8 m)桩基础(桩长约 33 m)框架 - 剪力墙结构，建筑距铁路中心线约 270 m，在建筑 5 层和 20 层共布置 2 个测点(图 1)。所有测点的测试方向以铅垂向为主，同时记录列车类型、通过时刻及运行速度等。

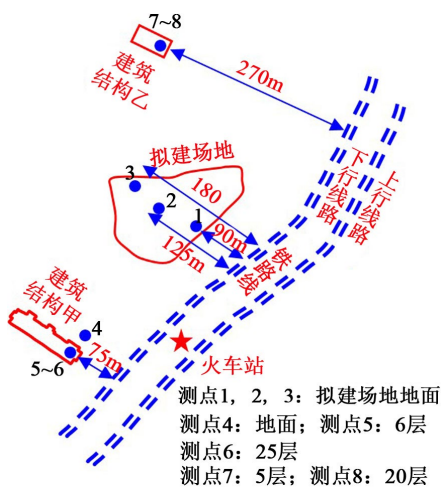


Figure 1. Schematic diagram of vibration measurement point distribution on passenger-heavy mixed railway lines
图 1. 客货混用铁路线振动测试测点分布示意图

受现场条件限制,场地测点从 90 m 起布设,与 75 m 处的建筑甲之间存在空间间隔;建筑甲仅布置了 6 层和 25 层测点,未能覆盖其他中间楼层。这些局限在后续分析中需予以考虑。

3.1. 场地振动特性分析

3.1.1. 列车场地振动

客车通过时(图 2(a)),场地振动主导频率集中在 10~30 Hz,属中高频成分。距线路 90 m 处 Z 振级为 64 dB,125 m 处衰减至 62 dB,180 m 处为 60 dB,90~180 m 范围内总衰减量 4 dB。

货车通过时(图 2(b)),场地振动主导频率以低频 2~8 Hz 为主。距线路 90 m 处 Z 振级为 69 dB,125 m 处衰减至 65 dB,180 m 处为 64 dB,90~180 m 范围内总衰减量 5 dB,但 125~180 m 区段仅衰减 1 dB。

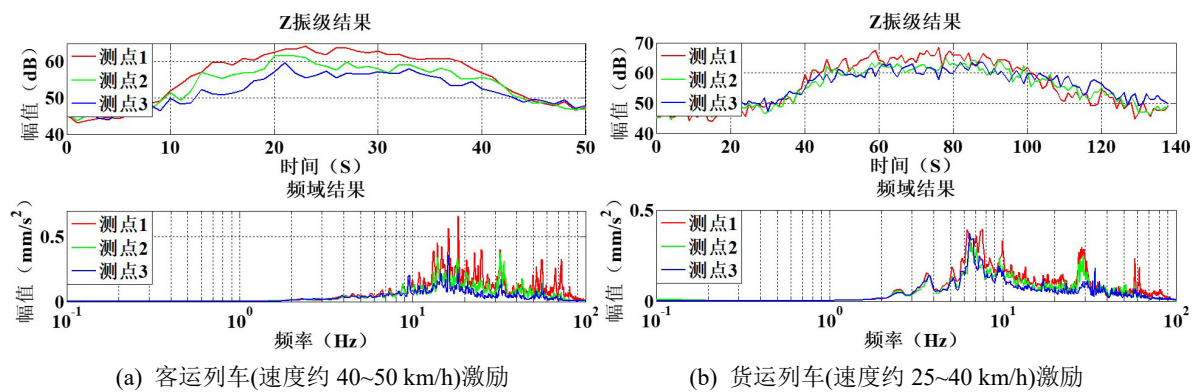


Figure 2. Analysis of site vibration characteristics under train excitation

图 2. 列车激励下场地振动特性分析

3.1.2. 高低频振动衰减对比

从 3 个测点的数据对比可见,中高频振动(10~30 Hz, 客运列车激励)在 90~180 m 范围内衰减相对均匀,平均每 45 m 下降约 2 dB,这主要是因为中高频振动受土体材料阻尼作用明显,振动能量在传播中被持续耗散。

低频振动(2~8 Hz, 货运列车激励)在 90~125 m 范围内 Z 振级下降 4 dB,而在 125~180 m 范围内仅下降 1 dB,衰减速率明显减缓。这种差异与低频振动的传播机理及场地土性质有关。近场区(90~125 m)内,轨道、路基与浅层土体之间会产生复杂的散射与干涉效应,再加上几何扩散作用,使得低频能量衰减较快;传播距离超过 125 m 进入远场后,散射效应减弱,振动以瑞利面波形式传播,而本场地为中软土,对低频波的阻尼较弱,导致能量衰减速率大幅降低。在瑞利面波主导下,低频振动波长更长、能量衰减更慢,远距离传播能力明显强于中高频振动。

为量化场地振动衰减规律,采用 Kurzweil 及 ISO14837-1 推荐的半经验衰减模型:

$$L(r) = L_0 - n \cdot 10 \lg \frac{r}{r_0} - \alpha(r - r_0)$$

式中, $L(r)$ 为距线路中心线 r 处的 Z 振级; L_0 为参考距离 $r_0 = 90$ m 处的振级; n 为几何衰减系数(球面波 $n=2$, 柱面波 $n=1$); α 为材料阻尼系数(dB/m),反映土体对振动能量的吸收耗散。

以货车工况为例,将 90 m、125 m、180 m 三处测点的 Z 振级(69 dB、65 dB、64 dB)代入拟合,得几何衰减系数 $n \approx 1.3$ (介于球面波 $n = 2$ 与柱面波 $n = 1$ 之间),材料阻尼系数 $\alpha \approx 0.016$ dB/m。据此外推

至 200 m 处, Z 振级约为 63 dB。需要说明的是, 该模型基于 3 个测点拟合, 样本量有限, 外推结果具有预测性质, 后续需增加测点以验证模型稳健性。

3.2. 建筑结构振动响应分析

3.2.1. 建筑结构甲振动响应(距线路 75 m)

客运列车激励下(图 3(a)), 地面 Z 振级 57 dB, 6 层降至 47 dB, 25 层回至 54 dB, 高层出现放大, 主频集中在 10~30 Hz; 货运列车激励下(图 3(b)), 地面 Z 振级为 67 dB, 6 层略降至 65 dB, 25 层进一步放大至 72 dB, 高于地面振级, 主频以 6~8 Hz 为主。

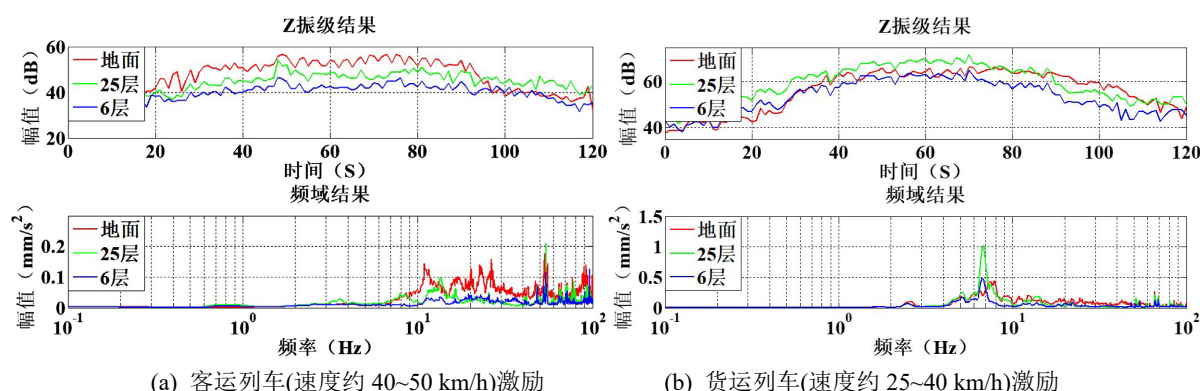


Figure 3. Analysis of vibration characteristics of structure a under train excitation

图 3. 列车激励下结构甲振动特性分析

3.2.2. 建筑结构乙振动响应(距线路 270 m)

在客运列车激励下(图 4(a)), 5 层 Z 振级为 39 dB, 20 层增加到 48 dB, 整体振动水平相对温和, 对居住环境已基本无干扰; 而在货运列车工况下(图 4(b)), 5 层 Z 振级为 53 dB, 20 层略增加到 57 dB, 在时域波形上虽仍能清晰识别出列车引发的振动响应信号, 但对居住环境影响也较小。

3.2.3. 楼层振动传递特性分析

为揭示高楼层振动放大的内在机理, 通过地面与楼层加速度信号的互功率谱分析获取系统竖向振动传递函数, 如图 5 所示。

建筑结构在 6.73 Hz 处出现显著竖向共振峰, 该频率对应结构竖向模式或局部楼层模式, 且恰好落入货运列车振动主频区间(2~8 Hz), 从而引发共振放大效应(图 5(a))。定量结果显示, 货车激励下该频率处 25 层传递率达 3.58, 为 6 层(1.73)的 2.07 倍, 较 6 层额外提升约 6.3 dB。窄频段统计(图 5(c))表明, 6~8 Hz 共振敏感区内, 货车 25 层平均传递率为 1.05, 约为客车 25 层(0.50)的 2.1 倍。无论是在 2~8 Hz 的低频段, 还是在 10~100 Hz 中高频段, 客车振动传递率均低于货车振动传递率(图 5(b))。

根据图 5(d)给出的各频段最大放大倍数(该频段内楼层加速度与地面加速度的幅值比)对比, 在 6~8 Hz 这一共振敏感区间内, 货运列车作用下 25 层相对地面的振动放大倍数为 5.1, 客运列车仅为 1.6, 两者相差三倍以上。在 12~14 Hz、51~53 Hz 等中高频窄带内, 货车对应的放大倍数同样高于客车, 也印证了货车激励与结构固有频率存在较强的耦合关系。在 6.73 Hz 共振点上, 客车 25 层传递率只有 0.56, 不到货车的 1/6, 折算振动能量仅为货车的 1/41 左右。正因如此, 客车在 25 层上基本表现为正常衰减, Z 振级比货车工况低 18 dB。

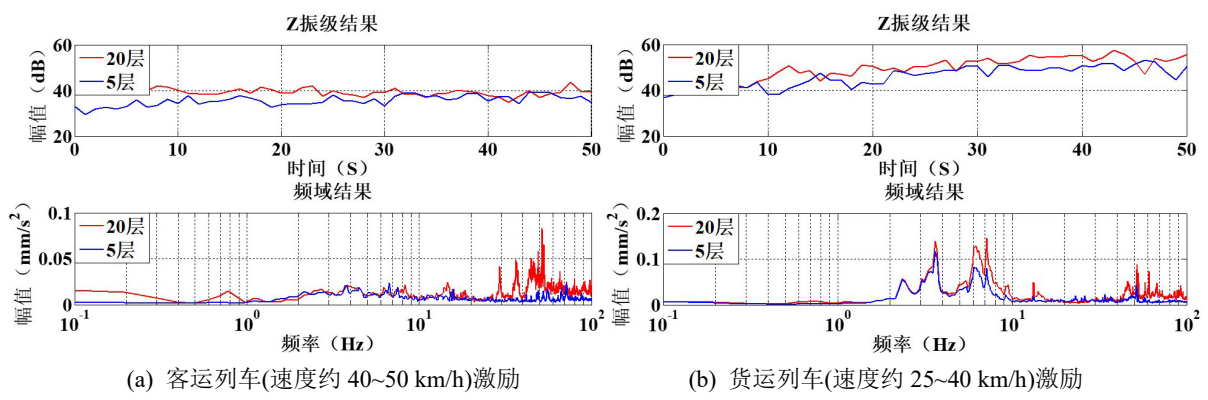


Figure 4. Analysis of vibration characteristics of structure b under train excitation
图 4. 列车激励下结构乙振动特性分析

因此，客货列车在 6.73 Hz 共振频率处的响应差异明显，传递率相差约 6.4 倍。从分析数据看，该频率选择性放大直接导致了高层楼层之间的振动差异。具体而言，货车激励频段恰好与该结构的共振频率重合，从而引发共振放大；而客车激励频谱避开了这一共振区间，振动沿楼层呈正常衰减规律。

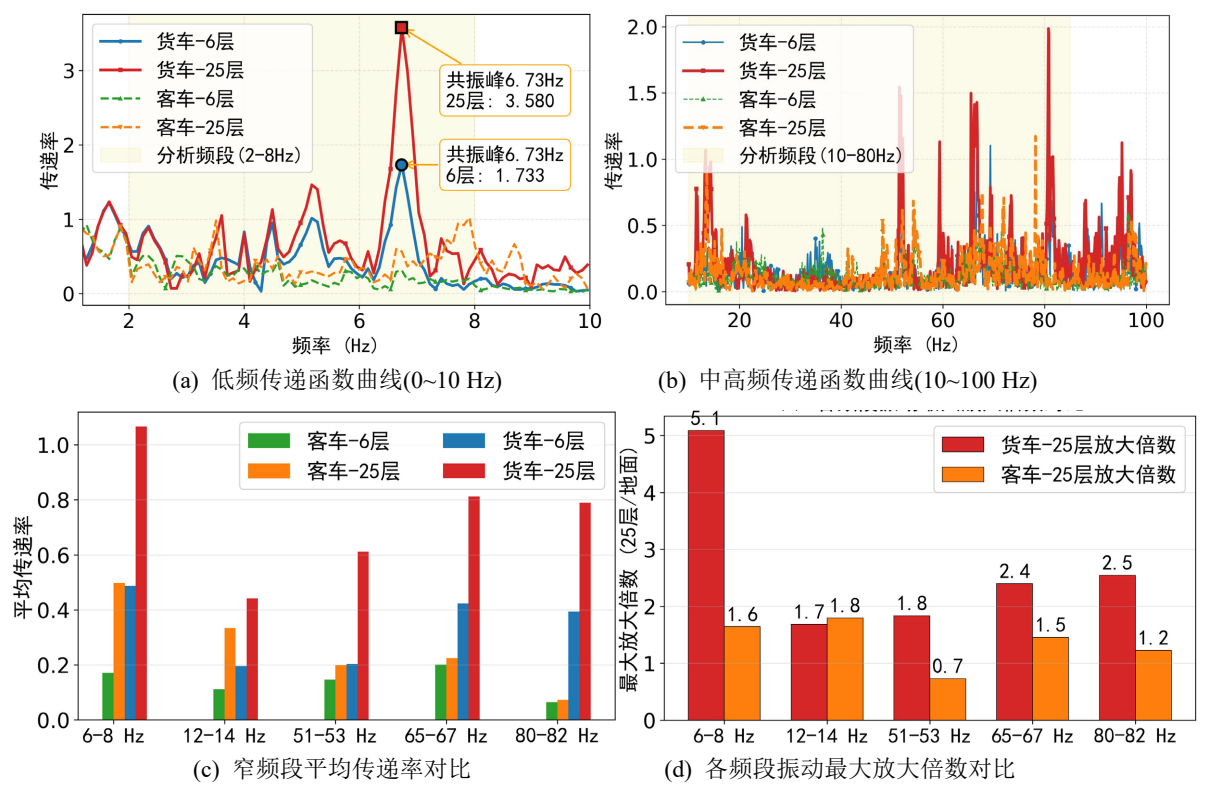


Figure 5. Analysis of vibration transmission characteristics of building a floor under train excitation
图 5. 列车激励下建筑甲楼层振动传递特性分析

3.3. 列车类型对振动特性的主导作用

本次测试中，列车进出站速度在 25~50 km/h 范围内变化，客车速度整体略高于货车，但两者的振动频谱特征存在较大差异(图 2~图 4)。客车振动能量集中在 10~30 Hz 的中高频段，货车则集中在 2~8 Hz 的

低频频段。在相同距离下,货车振动幅值普遍比客车高出 5~15 dB。

从分析数据可看出,在低速进出站条件下,振动幅值主要受轴重与悬挂刚度控制;而频谱差异则由轴重、轴距、轨道不平顺及运行速度共同决定。货车轴重为 18~23 t,大于客车轴重 12 t,这正是货车激励能量更高、低频成分更突出的原因。

3.4. 振动限值达标评价

依据 GB10070-88《城市区域环境振动标准》,铁路干线两侧昼间 Z 振级限值 80 dB,夜间限值 75 dB;依据 JGJ/T170-2009《城市轨道交通引起建筑物振动与二次辐射噪声限值及其测量方法标准》条文说明:振动强度小于 65 dB 对居民睡眠的影响可以忽略,但如果振动强度超过 70 dB,对居民睡眠产生的影响就会较大。

距线路 75 m 处,货运列车激励下,建筑结构 25 层的 Z 振级 72 dB,超出 JGJ/T170-2009 的睡眠限值 7 dB;客运列车激励下,结构的 Z 振级为 47~54 dB,满足限值要求。需要指出的是,现行 GB 10070-88 仅要求地面测点,若仅按此评价,25 层 72 dB 的超标问题将被掩盖。

距线路 270 m 处,货运列车激励下,结构的 Z 振级为 53~57 dB,客运激励下,结构的 Z 振级为 39~48 dB,均满足规范振动舒适性控制限值要求。

此外,振动剂量值(VDV)可反映人体长时间暴露的累积效应,适用于评价夜间连续列车通行场景。本文测试期间昼间列车通过间隔较长,单次事件主导,故采用 Z 振级作为核心评价指标,兼顾与国际标准(ISO 2631-1)的衔接及国内工程实践的通用性。若后续开展夜间密集行车评价,可补充相应 VDV 指标。

4. 建筑结构振动控制措施讨论

列车振动经轮轨激励、场地传播、结构输入至楼层放大,当激励主频与结构竖向模态接近时,共振放大难以避免。基于实测 6.73 Hz 共振峰与 2~8 Hz 货车主频的耦合关系,对常用减振措施的适用性进行讨论。

4.1. 场地卓越周期与共振风险

按 GB50011-2010 等效剪切波速法,本场地覆盖层厚约 33.5 m,等效剪切波速约 200 m/s,计算得卓越周期 $T_s \approx 0.67$ s,对应频率 1.3~1.5 Hz。该频段低于货运列车 2~8 Hz 主频区间,场地共振风险有限。但建筑甲竖向基频实测为 6.73 Hz,恰好落入货车主频区间,这是 25 层放大 5 dB 以上的主因。因此,减振设计的核心不是避开场地卓越频率,而是切断 6~8 Hz 频段向高层的传递路径,或降低该频段的能量输入。

4.2. 常用减振措施适用性讨论

单自由度隔振系统的有效性由频率比决定。要实现振动衰减,需满足:

$$f_n < \frac{f}{\sqrt{2}}$$

式中, f_n 为隔振体系竖向固有频率, f 为激励频率。当该条件满足时,振动传递率 $T < 1$,系统进入隔振区;若 f_n 与 f 接近,则 $T > 1$,振动被放大。

基于上述频率比准则,对常用减振措施在本场景下的适用性进行讨论:

(1) 结构优化设计

调整梁、柱、楼板截面与刚度分布以改变结构自振频率,是工程中常用的处理方式。但 28 层高层建筑的竖向基频受结构自重与整体刚度限制,可调幅度通常不超过 ± 0.5 Hz,难以将 6.73 Hz 的共振频率移

出 2~8 Hz 的货运激励频段。即便通过增强构件刚度小幅抬升频率,也容易落在 6~8 Hz 的敏感区间内,刚度偏大还会加剧高频振动响应。因此,通过结构优化实现有效减振的难度较大。

(2) 屏障隔振技术(隔振沟、排桩、连续墙)

屏障隔振的效果主要取决于隔振沟的有效深度与瑞利波波长之比。以 6 Hz 振动为例,中软土中的瑞利波速约为 200 m/s,波长 $\lambda = v_R/f \approx 33.3$ m。Woods (1968)的试验研究表明,空沟隔振效果随深度波长比 d/λ 增大而提升, $d/\lambda = 0.3$ 时开始出现衰减, $d/\lambda = 1.0$ 时隔振效率可达 50% 左右。Beskos (1986) 等的数值分析进一步指出, $d/\lambda = 0.5$ 时隔振约 30%, $d/\lambda = 0.6$ 时隔振约 40%,但具体效率受土体泊松比和沟壁条件影响显著。常规 10 m 深沟的 $d/\lambda = 0.3$,仅处于隔振起始阶段;若按 $d/\lambda = 0.6$ 估算,有效深度需 20 m,施工难度与造价显著增加。

(3) 聚氨酯减振垫技术

聚氨酯减振垫依靠材料动刚度和阻尼实现耗能,其竖向固有频率与厚度、承载力密切相关。常用 30~50 mm 厚度的减振垫在设计荷载下固有频率 f_n 约为 9~13 Hz,按货运列车最高激励频率 8 Hz 计算,有效隔振要求 $f_n < 5.6$ Hz,现有产品明显高于这一临界值。即 2~8 Hz 货运激励下,体系会处于共振或近共振状态,传递率 $T > 1$;对于 10~30 Hz 的客运激励,频率区间也高度重合,同样可能放大振动。因此,聚氨酯减振垫在本场景下的适用性不佳。

(4) 钢弹簧阻尼器隔振支座

钢弹簧阻尼支座竖向刚度低,其竖向设计固有频率一般为 3~5 Hz,对高频振动具有良好的隔振效果。按单自由度隔振理论,传递率 $T = \left| \frac{1}{1-r^2} \right|$,其中 $r = f/f_n$ 。当 $r > \sqrt{2}$ 时系统进入隔振区, $T < 1$ 。要隔离 6.73 Hz 振动,系统竖向固有频率需满足 $f_n < 6.73/\sqrt{2} \approx 4.75$ Hz,此时 $T = 1$,为隔振起始临界状态,无实际隔振效果。若要实现 50% 以上的振动衰减 ($T \leq 0.5$),频率比需满足 $r \geq \sqrt{3} \approx 1.732$,即 $f_n \leq 6.73/\sqrt{3} \approx 3.89$ Hz,对应的静变形量 $\delta_{st} = g/(2\pi f_n)^2 \approx 16.4$ mm。若要求隔振效率达到 80% ($T \leq 0.2$),则需 $f_n \leq 2.75$ Hz, $\delta_{st} \approx 32.7$ mm;若要求 90% ($T \leq 0.1$),则需 $f_n \leq 2.03$ Hz, $\delta_{st} \approx 60.2$ mm。常规建筑结构用钢弹簧支座设计频率约 3.5 Hz,对应 $\delta_{st} \approx 20$ mm,对 6.73 Hz 振动理论隔振效率约 63%。但高层建筑风荷载及地震作用下的倾覆力矩显著,常规组合支座侧向刚度小、水平恢复力弱,抗倾覆能力难以满足结构安全要求。若通过增加水平约束来提高抗倾覆性能,又会显著增大支座水平刚度,竖向与水平方向的耦合效应将破坏隔振功能。因此,钢弹簧阻尼支座在本场景下存在隔振效率与结构安全的内在矛盾,工程适用性受限。

4.3. 减振措施综合评价

本段铁路振动控制的难点集中在 2~10 Hz 低频成分,振动波长达到 30~100 m,远场衰减缓慢。四种常用措施均存在频率或尺度上的不匹配问题。结构优化可调整的频率范围有限,减振效果不足 2 dB;隔振屏障因深度与波长比例偏小,低频绕射明显,减振效果低于 3 dB;聚氨酯减振垫固有频率与客货列车主频区间重叠,不仅减振效果有限,还可能放大振动;组合隔振支座易与 6~8 Hz 货运频段产生共振,且难以适配超高层结构。因此,现有常规措施在本场景下难以实现有效的低频振动控制。

4.4. 工程建议

新建居住建筑应优先控制与铁路线路的安全距离宜不小于 200 m。基于 3.1.2 节的衰减模型,外推 200 m 处货车 Z 振级约为 63 dB,已低于 JGJ/T170-2009 的 65 dB 睡眠限值。本文实测结果显示,距离线路 270 m 的建筑乙在货运列车作用下 Z 振级为 53~57 dB,满足室内舒适性要求。上述 200 m 建议值是基于 90~180 m 有限测点的模型外推结果,具有预测性质,实际工程中应结合具体场地条件、列车编组及建筑

类型综合确定。但总体而言,从源头控制距离仍是最为经济、可靠的减振方式。若受用地条件限制,必须在 200 m 范围内建设高层建筑,常规减振措施已难以满足要求,应采用针对性更强的低频控制技术,例如研发适用于 2~10 Hz 频段的低频复合隔振支座、地基调谐质量阻尼系统(TMD)或桩周阻尼环,需重点抑制 6~8 Hz 共振区间的能量传递与放大。对于已建成、距离线路仅 75 m 的建筑甲,建议优先开展结构竖向模态测试,明确 6~8 Hz 频段的共振放大特征。必要时可在关键楼层或基础部位增设局部调谐阻尼装置,降低 6.73 Hz 处的振动传递率,不建议直接采用常规隔振沟或隔振排桩等效果有限的措施。

5. 结论

本文以京承铁路中软土地带为研究对象,通过现场实测分析客货混运列车低速进出站条件下场地及建筑的振动响应、传播规律与减振措施适用性,并依据现行相关标准开展评价,主要结论如下:

1) 列车类型对振动频谱与幅值起控制作用。货运列车激励主频集中在 2~8 Hz,客运列车则为 10~30 Hz;距离线路 75 m 位置地面竖向加速度为 5~11 mm/s²,Z 振级介于 57~67 dB。这些差异主要由轴重、转向架动力特性及运行速度共同导致。

2) 低频振动在中软土中的远场衰减弱于中高频。90~180 m 范围内,货运 Z 振级仅下降 5 dB,且 125~180 m 段仅衰减 1 dB。低频瑞利波远距离传播能力强,导致对远距建筑产生影响。

3) 高层建筑存在频率选择性楼层放大。建筑甲 25 层在货运列车通过时 Z 振级达 72 dB,较地面高 5 dB,超出 JGJ/T170-2009 的睡眠限值(65 dB) 7 dB;而客运列车通过时 25 层仅 54 dB,未出现超标。建筑甲的传递函数显示 6.73 Hz 处存在竖向共振峰,与货车激励频率耦合,25 层传递率 3.58,明显高于客车工况的 0.56。而 270 m 处建筑乙振动大幅衰减,因此,距离仍是建筑结构振动控制的首要手段。

4) 根据 GB10070-88 及 JGJ/T170-2009 的 65 dB 睡眠限值,75 m 处建筑地面振动已接近允许值,25 层则因共振而超标;270 m 处建筑各楼层满足要求。GB10070-88 规定只测地面,这可能会低估高层室内的实际振动。

5) 建筑结构甲 6.73 Hz 的结构共振峰与货运列车 2~8 Hz 的主频段正好耦合。在这个低频范围,常规减振方法效果有限。结构优化、隔振沟、聚氨酯垫层和钢弹簧阻尼组合支座等,都很难在 2~10 Hz 频段稳定实现 7 dB 以上的插入损失。因此,对临近低速进出站轨道交通的高层建筑而言,如果用地不紧张,防护距离最好取 200 m 以上;若用地受限,就需要研发专门针对低频的复合隔振技术。

基金项目

国机集团重点研发项目(ZDZX2025-16)。

参考文献

- [1] 张瞳,周德豪,刘立斌,等. 地铁周边规划地块环境振动及室内二次结构噪声影响分析[J]. 交通节能与环保, 2024, 20(3): 239-242.
- [2] 胡晶晶. 重载铁路列车运行诱发场地振动特性的测试与分析[J]. 武汉船舶职业技术学院学报, 2023, 22(6): 95-100.
- [3] 钱凤霞. 货运列车引起环境振动响应研究[J]. 声学及振动, 2024, 12(4): 156-165.
- [4] 钱凤霞. 高铁对临近场地地面振动影响测试分析与评估方法[J]. 声学及振动, 2024, 12(4): 136-145.
- [5] 余梦雯. 地铁运行引起的环境振动评估影响因素研究[D]: [硕士学位论文]. 北京: 中国铁道科学研究院, 2023.
- [6] Ming, X.H., Zheng, J.Y., Wang, L.C., et al. (2022) A Case Study of Excessive Vibrations Inside Buildings Due to an Underground Railway: Experimental Tests and Theoretical Analysis. *Journal of Central South University*, **29**, 313-330. <https://doi.org/10.1007/s11771-022-4920-1>
- [7] 杨舟. 地铁列车加速对振动源强及环境振动传递特性影响研究[J]. 铁道标准设计, 2024, 68(5): 159-164.

-
- [8] 王祥秋, 张火军, 谢文玺. 高速铁路周边建筑物环境振动现场测试与分析[J]. 土木建筑与环境工程, 2018, 40(3): 16-22.
- [9] 周颖, 张君秋, 马开强, 等. 地铁致地面振动舒适度评价与放大区振动分析[J]. 地震工程与工程振动, 2023, 43(2): 24-33.
- [10] 闫石, 周游, 郝冰, 等. 高速列车运行引起的地基振动测试与分析[J]. 震灾防御技术, 2023, 18(1): 127-135.
- [11] 彭也也, 贺玉龙, 宋喆, 等. 成渝高速铁路某路堤段地面三向振动测试分析[J]. 中国测试, 2020, 46(2): 34-39.
- [12] 毕俊伟, 张继严, 高广运, 等. 高铁荷载下路堤和路堑段地面振动特性现场测试与数值分析[J]. 振动与冲击, 2024, 43(11): 194-205.
- [13] 司丕贤, 尹学军, 雷晓燕. 路基段列车引起的大地振动试验研究[J]. 噪声与振动控制, 2023, 43(2): 214-221.
- [14] 花雨萌, 谢伟平, 陈斌. 地铁振动对建筑物竖向楼层响应的影响研究[J]. 建筑结构学报, 2023, 44(3): 122-129.
- [15] 张小安, 王庞瑞, 李姝婷, 等. 地铁上盖建筑车致环境振动预测模型及影响因素研究[J]. 铁道科学与工程学报, 2025, 22(10): 4636-4649.
- [16] 陈建国. 车辆段曲线地段列车运行对周边建筑物振动影响分析[D]: [硕士学位论文]. 北京: 北京交通大学, 2024.
- [17] 陈洪运, 王海洋, 刘乾坤, 等. 京张高速铁路路基段环境振动现场实测研究[J]. 铁道标准设计, 2023, 67(7): 188-192.
- [18] 陈洪运, 王海洋, 刘乾坤, 等. 高速铁路路堤对环境振动的影响研究[J]. 噪声与振动控制, 2024, 44(2): 219-224.
- [19] 宋启宇. 铁路综合体上盖建筑振动传播规律测试与影响评价[J]. 铁道建筑, 2025, 65(7): 160-164.
- [20] 张学智, 郭志明, 傅林峰. 下穿隧道上盖建筑基础-地基-建筑振动传播规律分析[J]. 浙江工业大学学报, 2023, 51(1): 20-26.