

地铁双层停车场轨道减振降噪分析-以广州新城停车场为例^{*}

胡健健, 陈勇杰, 郭伟河

(广州市盾建建设有限公司, 广州 511400)

摘 要: 广州新城停车场为带上盖开发的局部双层停车场, 为提高上盖物业品质, 减小振动及噪音影响, 有必要进行针对性的减振降噪分析。利用有限元模型并结合国内典型车辆段上盖物业轨道减振降噪措施分析, 对停车场二层提出轨道减振降噪方案预测, 根据有限元预测, 使用减振降噪方案后和无措施方案结果的对比。二层爬坡线、咽喉区以及库内线的减振降噪效果分别提升为 15.9 %、30.1 % 和 9.9 %, 为双层停车场的轨道减振降噪方案提出建议; 研究结果可为今后地上地铁双层停车场项目减振降噪提供施工经验。

关键词: 地铁双层停车场; 轨道减振降噪; 有限元模型; 振动; 结构二次振动

中图分类号: TU744

文献标识码: A

文章编号: 1671-2439(2024)07-11-06

作者简介: 胡健健 (1991—), 男, 大学本科, 高级工程师, 主要从事土木工程方面的研究, E-mail: 576122722@qq.com。

Analysis of Vibration and Noise Reduction of Subway Double-decker Parking Lot - A Case Study of Guangzhou New Town Parking Lot

HU Jian-jian, CHEN Yong-jie, GUO Wei-he

(Guangzhou Municipal Dunjian Construction Co., Ltd, Guangzhou 511400)

Abstract: In order to improve the quality of the superstructure property and reduce the impact of vibration and noise, it is necessary to carry out targeted vibration and noise reduction analysis. Based on the finite element model and combined with the analysis of the vibration and noise reduction measures of the superstructure property of the typical depot in China, the prediction of the track vibration and noise reduction scheme is proposed for the second floor of the parking lot, and according to the comparison of the results of the finite element prediction after using the vibration and noise reduction scheme and the no measure scheme, the vibration and noise reduction effects of the second floor climbing line, throat area and library line are increased by 15.9%, 30.1% and 9.9% respectively. The research results can provide construction experience for the vibration and noise reduction of the above-ground subway double-storey parking lot project in the future.

Keywords: double-deck subway car park; track vibration and noise reduction; finite element model; vibration; secondary vibration of structure

近年来, 随着城市轨道交通的快速发展, 土地资源也随之日趋紧张, 使供地与需求的矛盾不断加大。地铁停车场通常面临占地大, 选址困难等问题, 因此地铁停车场的选址及总平面布置问题一直为项目建设的重难点^[1-3]。广州市轨道交通三号线东延段广州新城停车场通过对停车场总体布局的深入研究, 在满足地铁运营需求及便捷性的前提下, 结合停车场周边控制要素, 按双层停车列检库顺接进行总平面布置, 为广州市首个地上的地铁双层停车场, 解决停车场用地受限问题, 提高停车场运营效率, 同时充分预留上盖的建设条件^[4]。以广州新城停车场为例, 作为带上盖开发的局部双层停车场, 为提高

上盖物业品质, 减小振动及噪音影响, 对二层停车场及坡道范围进行轨道减振降噪研究^[5-8]。

1 工程概况

广州市轨道交通三号线东延段广州新城停车场原选址位于广州市番禺区亚运大道南侧、新碁路旁。受政府规划影响, 调整后的广州新城停车场用地呈现南宽北窄, 根据停车场调整选址后的地块现状, 在划定停车场红线的前提下, 为确保高峰期发车效率, 保证段场内停车、检修等作业流程不受影响, 采用双层停车列检和部分倒装方案, 预留上盖开发条件布置。为提高上盖物业品质, 减小振动及噪音

影响，有必要进行针对性的减振降噪分析。

2 轨道减振降噪研究背景

调研国内有上盖开发车辆段的典型案例，减振降噪措施统计见下表 1^[9-12]。

名称	物业开发情况	主要措施	
		库外线（试车线）	库内线
北京8号线平西府车辆段	住宅及配套	减振垫	预留先锋扣件铺设条件
大兴机场线磁各庄车辆段	住宅及配套	减振垫、阻尼钢轨	库内高等级减振扣件
深圳2号线蛇口西车辆段	住宅及配套	减振垫、减振接头夹板	—
深圳5号线塘朗车辆段	住宅、学校、配套等	采用减振垫、阻尼钢轨	扣件减振
无锡1号线雪浪停车场	住宅、配套、商业等	采用减振垫	钢轨无缝化
苏州6号线桑田岛停车场	住宅、配套、商业等	采用减振垫	扣件减振、钢轨无缝化
宁波5号线前段停车场	住宅、学校等	采用减振垫、无缝线路（整体道床）	扣件减振、钢轨无缝化

2.1 停车场一层轨道减振降噪

对于常规地面一层停车场的轨道减振，前期拟定了施工图阶段广州新城停车场一层减振降噪方案如下表 2。

表 2 停车场一层轨道减振降噪措施		
序号	类别	位置
1	无缝线路	库内线、库外直线段
2	扣件高弹垫板	库内线整体道床
3	50kg/m钢轨冻结接头	无缝线路接头
4	嵌入式轨道	库外平过道
5	阻尼钢轨	库外线小半径曲线
6	减振道砟垫	库外线碎石道床道岔区
7	钢弹簧浮置板轨道（检查坑轨道针对性设计，建议采用高等减振扣件），预留安装声屏障安装条件	试车线

2.2 停车场二层轨道减振降噪

双层停车场与一层停车场轮轨振动通过土体传播衰减不同，停车场二层轮轨振动的传递路径为轮轨振动源→道床→楼板→立柱→上盖建筑，振动不经过土体衰减直接传递至上盖建筑，因此列车出入停车场二层时对上盖开发的振动影响更大^[13-15]。然

而，二层停车场没有成熟的标准或规范可供参考，需进行详细计算，根据预测超标量决定轨道减振降噪措施的选用。

由图 1 可知，广州新城停车场上盖敏感建筑有爬坡线上盖学校、咽喉区上盖住宅和库内线上盖住宅。

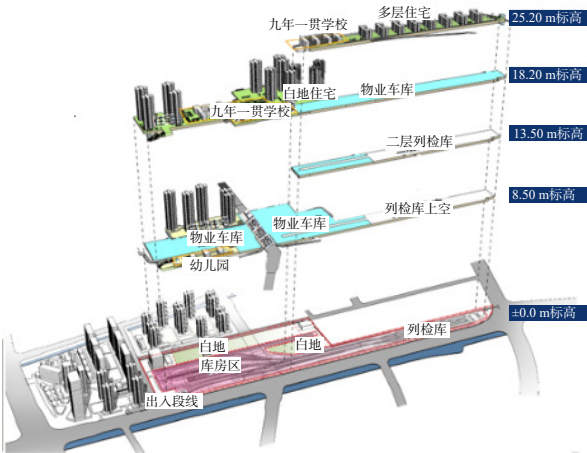


图 1 物业开发剖面效果图

3 停车场二层轨道减振降噪设计

3.1 评价标准

我国现行的国家标准、行业标准中，能供地铁停车场基地上盖建筑物环境振动及二次噪声影响评价的标准见下表 3。

表 3 振动及结构二次降噪现行标准		
发布单位	标准规范名称	标准号
原环保总局	城市区域环境振动标准	GB10070-1988
原环保总局	城市区域环境振动测量方法	GB10071-1988
住建部/质监总局	住宅建筑室内振动限值及其测量方法标准	GB/T50335-2018
住建部/质监总局	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	JGJ/T170-2009

3.2 控制标准

对地铁上盖建筑而言，为了满足人体振动及结构二次噪声舒适度的基本要求，本项目研究对象执行的控制标准如下：

（1）振动

指标：Z 振级，见表 4。

（2）结构二次振动

指标 1：倍频程等效声级，见表 5。

本项目倍频程等效声级以更为敏感的 63 Hz、125 Hz 和 250 Hz 这三组数据作为重点研究对象。

指标 2：等效 A 声级，见表 6。

表 4 本项目采用的 Z 振级振动限值

建筑物	GB10070-1988 (按照ISO2631-1985计权)		GB/T50355-2018 (按ISO2631-1997计权)	
	昼间 (dB)	夜间 (dB)	昼间 (dB)	夜间 (dB)
爬坡线上盖学校	75	-	不考虑	
咽喉区上盖住宅	75	72	78	75
库内线上盖住宅	75	72	78	75

表 5 本项目采用的结构二次噪声限值（倍频程等效声级）

建筑物	GB/T50355-2018（不计权）单位：dB							
	31.5 (Hz)		63 (Hz)		125 (Hz)		250 (Hz)	
	昼间	夜间	昼间	夜间	昼间	夜间	昼间	夜间
咽喉区上盖住宅	79	74	63	57	52	45	44	37
库内线上盖住宅	79	74	63	57	52	45	44	37

表 6 本项目采用的结构二次噪声限值（等效 A 声级）

建筑物	JGJ/T170-2009（A计权）单位：dB	
	昼间	夜间
爬坡线上盖学校	41	-
咽喉区上盖住宅	41	38
库内线上盖住宅	41	38

3.3 本项目有限元模型建立与预测

3.3.1 模型构建

将上盖住宅单个房间内表面网格作为声学边界元网格，网格尺寸取 0.2 m~0.3 m，使此网格尺寸设置下所有单元最高计算频率均大于 300 Hz。通过快速傅里叶变换将有限元模型中振动响应时域结果转换成频域结果，并将频域结果映射到声学边界元网格上。在离地面 1.2 m 高处设置输出场，其边界与墙体间距为 1 m，单个楼层的声学边界元模型见图 2。

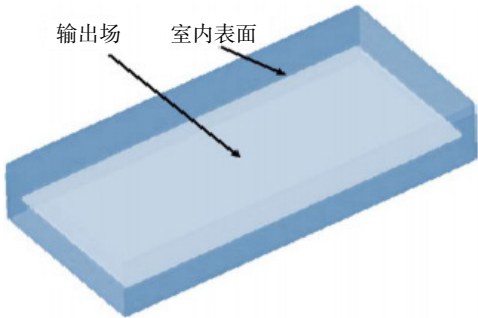


图 2 声学边界元模型图

模型中采用的流体材料参数如表 7 所示。

表 7 声学边界元模型中采用的流体材料参数

材料名称	声音传播速度 (m/s)	密度 (kg/m ³)	声阻抗 (kg·s/m ²)
空气	340	1.23	417

3.3.2 爬坡线上盖学校预测

为加快计算效率，考虑到土体对本工况主要起

到振动消散作用，因此进行简化考虑，设置为等桩长形式。其预测结果由表 8 和表 9 可见，振动预测结果超出标准值 2.45 %，结构二次噪声预测结果超出标准值 3.73 %，其中最大超标量在二楼。

表 8 振动预测结果（Z 振级，dB，GB10070-88）

楼层	无措施	
	Z振级	超标值
5楼	77.5	2.5
4楼	75.9	0.9
3楼	75.34	0.34
2楼	78.82	3.82

表 9 结构二次噪声预测结果（等效 A 声级，dB（A），JGJ/T170-2009）

楼层	无措施	
	A声级	超标值
5楼	41.93	0.93
4楼	41.12	0.12
3楼	42.58	1.58
2楼	44.71	3.71

3.3.3 咽喉区上盖住宅

咽喉区上盖建筑为 3 栋 8F 住宅建筑，本次预测挑选其中最为敏感的 2-5F 作为重点研究。

考虑列车在二层咽喉区运行（无减振措施），同时考虑列车在一层咽喉区运行的不利情况，二层

咽喉区列车运行预测结果见表 10 和表 11。

由表 10 和表 11 可见，在无减振措施情况下，预测结果为二层咽喉区列车运行时，上盖建筑各楼层振动预测结果起居室平均值为 81.18 dB，卧室平均值为 80.57 dB，分别超出标准值 3.92 % 和 6.91 %。而结构二次噪声预测结果均超标，总体超出标准值 24.98 %，其中振动的超标最大值出现在 2 层卧室，结构二次噪声倍频声级 63 Hz 和 125 Hz 超标最大值出现在 2 层卧室，250 Hz 倍频声级超标最大值出现在 3 层卧室。

表 10 振动预测结果（Z 振级，dB）

楼层	位置	GB10070 (夜间限值72 dB)		GB50355 (起居室夜间限值78 dB) (卧室夜间限值75 dB)	
		Z振级	超标值	Z振级	超标值
2楼	起居室	81.2	9.2	84.54	6.54
	卧室	80.88	8.88	84.21	9.21
3楼	起居室	78.91	6.91	82.32	4.32
	卧室	78.57	6.57	81.68	6.68
4楼	起居室	76.51	4.51	79.81	1.81
	卧室	75.08	3.08	78.55	3.55
5楼	起居室	74.8	2.8	78.06	0.06
	卧室	74.6	2.6	77.82	2.82

表 11 结构二次噪声限值（倍频程等效声级）

楼层	位置	GB/T50355-2018					
		63 Hz	超标值	125 Hz	超标值	250 Hz	超标值
2楼	起居室	79.25	16.25	59.87	7.87	50.45	6.45
	卧室	77.71	20.71	70.43	25.43	57.99	20.99
3楼	起居室	75.76	12.76	70.99	18.99	59.94	15.94
	卧室	75.55	18.55	69.78	24.78	59.96	22.96
4楼	起居室	72.96	9.96	68.1	16.1	56.05	12.05
	卧室	72.27	15.27	69.37	24.37	55.89	18.89
5楼	起居室	71.37	8.37	66.61	14.61	56.1	12.1
	卧室	71.34	14.34	66.43	21.34	54.83	17.83

3.3.4 库内线上盖住宅

考虑到停车列检库列车运行速度较慢，影响范围较小，建筑模型与咽喉区上盖建筑大致一致。列车在二层库内线运行（无减振措施），同时考虑在一层库内线运行的不利情况，挑选其中最为敏感的 2-5F 作为重点研究，二层库内线列车运行预测结果见表 12 和表 13。

由表 12 和表 13 可见，在无减振措施情况下，预测结果为二层库内线列车运行时，上盖建筑各楼层振动和结构二次噪声预测结果均超标，其中 Z 振

级呈楼层越高振动越大的趋势。

表 12 振动预测结果（Z 振级，dB）

楼层	位置	GB10070 (夜间限值72 dB)		GB50355 (起居室夜间限值78 dB) (卧室夜间限值75 dB)	
		Z振级	超标值	Z振级	超标值
2楼	起居室	71.13	-0.87	74.68	-3.32
	卧室	70.9	-1.1	74.55	-0.45
3楼	起居室	71.73	-0.27	75.41	-2.59
	卧室	71.62	-0.38	75.39	0.39
4楼	起居室	73.25	1.25	77.04	-0.96
	卧室	73.17	1.17	77.02	2.02
5楼	起居室	74.88	2.88	78.72	0.72
	卧室	74.76	2.76	78.65	3.65

表 13 结构二次噪声限值（倍频程等效声级）

楼层	位置	GB/T50355-2018（单位：dB）					
		63 Hz	超标值	125 Hz	超标值	250 Hz	超标值
2楼	起居室	59.22	-3.78	47.02	-4.98	40.31	-3.69
	卧室	58.39	1.39	48.09	3.09	38.44	1.44
3楼	起居室	55.91	-7.09	47.73	-4.27	41.9	-2.1
	卧室	55.4	-1.6	48.91	3.49	39.6	2.6
4楼	起居室	56.3	-6.7	47.21	-7.24	38.39	-5.61
	卧室	56.59	-0.41	48.49	1.14	36.33	-0.67
5楼	起居室	59.79	-3.21	44.76	-12.7	39.26	-4.74
	卧室	59.99	2.99	46.14	-4.38	37.71	0.71

3.4 本项目采用减振降噪预测结果

3.4.1 爬坡线上盖学校

考虑到上盖学校的重要性并预留余量，利用有限元模型，初步判断需采用的减振措施为减振垫浮置板，振动预测和结构二次噪声预测如下表 14-15。

表 14 振动预测结果（Z 振级，dB，GB10070-88）

楼层	减振垫垂向刚度（N/mm ³ ）					
	0.02		0.03		0.04	
	Z振级	超标值	Z振级	超标值	Z振级	超标值
5楼	65.35	-9.65	66.82	-8.18	69.24	-5.76
4楼	62.06	-12.94	64.35	-10.65	66.6	-8.4
3楼	64.76	-10.24	68.26	-6.74	70.01	-4.99
2楼	66.9	-8.10	69.73	-5.27	71.46	-3.54

由表 14 和表 15 可见，通过在爬坡线施加厚度 30 mm 的不同垂向刚度的减振垫（0.02 N/mm³、0.03 N/mm³、0.04 N/mm³），扣件采用普通扣件（刚度：60 MN/m），同时考虑列车在地面一层运行的最不利工况进行计算。当减振垫垂向刚度为 0.02 N/mm³

和 0.03 N/mm^3 时，爬坡线上盖学校的预测结果对比无措施情况，其中 Z 振级下降了 14.1 %，结构二次

噪声下降了 19 %，整体减振降噪效果提升了 15.9 %，均能达到标准限值要求。

表 15 结构二次噪声预测结果（等效 A 声级，dB (A)，JGJ/T170-2009）

楼层	减振垫垂向刚度 (N/mm^3)					
	0.02		0.03		0.04	
	A 声级	超标值	A 声级	超标值	A 声级	超标值
5楼	36.65	-4.35	38.15	-2.85	39.33	-1.67
4楼	28.39	-12.61	30.71	-10.3	32.12	-8.88
3楼	35.7	-5.3	36.6	-4.4	37.3	-3.7
2楼	32.84	-8.16	36.95	-4.05	42.62	1.62

3.4.2 咽喉区上盖住宅

利用有限元模型，初步判断在二层咽喉区采用的减振措施为采用减振垫浮置板。考虑减振垫浮置板板厚工况下不同隔振器刚度的自振频率随着隔振器刚度的增大而增大，本次预测采用的隔振器的刚度有 6 MN/mm 、 12 MN/mm 和 18 MN/mm 三种。

在二层咽喉区采用减振垫浮置板为减振措施，通过不同刚度的隔振器（ 6 MN/mm 、 12 MN/mm 和 18 MN/mm ），咽喉区上盖住宅的振动预测结果相比无措施情况下降了 20 %。

采用减振垫浮置板为减振措施的结构二次噪声预测结果如下表 16。

表 16 采用减振垫浮置板后结构二次噪声预测结果（倍频程等效声级）

楼层	位置	GB/T50355-2018（单位：dB）					
		63 Hz	超标值	125 Hz	超标值	250 Hz	超标值
2楼	起居室	51.49	-11.51	42.68	-9.32	35.07	-8.93
	卧室	51.46	-5.54	42.26	-2.74	35.15	-1.85
3楼	起居室	45.37	-17.63	39.23	-12.77	33.3	-10.7
	卧室	44.34	-12.66	37.6	-7.4	33.09	-3.91
4楼	起居室	42.6	-20.4	37.29	-14.71	30.15	-13.85
	卧室	42.24	-14.76	37.22	-7.78	29.21	-7.79
5楼	起居室	42.08	-20.92	34.8	-17.2	28.21	-15.79
	卧室	41.03	-15.97	34.02	-10.98	27.65	-9.35

由表 16 可见，在二层咽喉区采用减振垫浮置板为减振措施，咽喉区上盖住宅的结构二次噪声预测结果较无减振措施情况下降了 42.3 %，且均能达到标准限值要求。二层咽喉区采用减振降噪措施后比无减振措施效果提升了 30.05 %。

3.4.3 库内线上盖住宅

利用有限元模型，初步判断在二层库内线采用的减振措施为采用高等减振扣件。本次 Z 振级预测结果如下表 17。

采用高等减振扣件为减振措施的结构二次噪声预测结果如下表 18。

表 17 设置高等减振扣件后振动预测结果（Z 振级，dB）

区域	GB10070-1988			GB/T50355-2018		
	Z 振级	限值	超标值	Z 振级	限值	超标值
库内线	69.3	72	-2.7	72.5	75	-2.5

表 18 采用高等减振扣件后的结构二次噪声预测结果（倍频程等效声级）

楼层	位置	GB/T50355-2018（单位：dB）					
		63 Hz	超标值	125 Hz	超标值	250 Hz	超标值
2楼	起居室	46.66	-16.34	39.71	-12.29	36.86	-7.14
	卧室	42.7	-14.3	39.13	-5.87	35.87	-1.13
3楼	起居室	43.98	-19.02	40.48	-11.52	36.61	-7.39
	卧室	40.24	-16.76	39.56	-5.35	36.93	-0.07
4楼	起居室	43.82	-19.18	40.58	-11.42	35.55	-8.45
	卧室	39.95	-17.05	39.56	-5.44	34.31	-2.69
5楼	起居室	46.63	-16.37	39.2	-12.8	36.42	-7.58
	卧室	42.49	-14.51	38.18	-6.82	35.03	-1.97

由表 17 和表 18 可见，在二层库内线采用高等减振扣件时，库内线上盖住宅的振动比无措施情况下降了 5.4 %，二次结构噪声预测结果比无措施情况下降了 17.5 %，整体减振降噪效果提升了 9.9 %，均能达到标准限值要求。

4 结论

广州新城停车场作为广州市首个地上地铁双层停车场，在停车场北侧用地狭长的情况下，利用双层停车列检库的倒装方案。本文通过利用有限元模型，通过无措施模型和减震降噪措施模型分析后的预测结果进行对比，最终根据预测结果提出轨道减振降噪的建议措施，得出以下结论：

（1）利用我国现行的国家标准、行业标准、地方标准中确定地铁停车场上盖建筑物环境振动及二

次噪声影响评价的标准,作为本项目的评价指标。

(2) 利用有限元对本项目进行“无措施”和“有减振降噪措施”预测结果进行对比,二层爬坡线、咽喉区以及库内线的减振降噪效果分别提升为 15.9%、30.1% 和 9.9%,得出本项目的减振措施方案建议。

(3) 本项目的研究成果在地铁双层停车场、车辆段等的建设中,其减振降噪措施方案可应用在预留上盖建筑开发的工程,提高物业开发价值,为今后类似项目提供经验。

参考文献

- [1] 黄波.地下双层地铁停车场站场设计研究[J].[都市快轨交通](#),2019,32(1): 43-47.
- [2] 赵红光.南京地铁车辆段轨道技术综述[J].[都市快轨交通](#),2010,23(6): 54-57,80.
- [3] 刘齐霞.城市道路桥梁与地铁车辆段盖板合建结构体系变形控制分析[J].[广州建筑](#),2021,49(4): 27-33.
- [4] 侯帅.基于响应面法的地铁车辆段上盖建筑振动响应快速预测模型研究[D].北京:北京交通大学,2022.
- [5] 谷进朝.城市轨道交通减振降噪技术应用[J].[山西建筑](#),2023,49(04): 120-123.
- [6] 邹超,陈颖,胡子豪,等.地铁车辆段不同区域车致上盖建筑振动传播规律研究[J].[噪声与振动控制](#),2022,42(6): 181-186.
- [7] 陶子渝,汪益敏,邹超.基于阻抗和功率守恒法的地铁车辆段上盖建筑车致振动预测模型研究[J].[振动与冲击](#),2022,41(7): 62-67,73.
- [8] 杨波.南京地铁一号线南延线工程大学城段 II4 区结构隔震设计[J].[科技资讯](#),2010,40(8): 81,83.
- [9] 池源,李升峰,叶懿安,等.地铁停车场上盖物业开发声环境影响评价研究[J].[环境保护科学](#),2012,38(6): 51-55.
- [10] 唐康,王观璐,司小东.上盖与邻近基坑协同作用下对既有车辆段的影响[J].[华北科技学院学报](#),2022,19(1): 44-50.
- [11] 韦凯,赵泽明,王显,等.浮置板轨道减振垫的刚度测试与评价[J].[西南交通大学学报](#),2022,57(4): 848-854,925.
- [12] 冉蕾,马佳骏,孙井林,等.上盖开发车辆段库内轨道高等级减振扣件研发及应用[J].[铁道勘察](#),2020,46(3): 146-150.
- [13] 卢德辉,张华平,袁爱珍,等.某框架结构消能减震分析与设计[J].[广州建筑](#),2018,46(03): 3-7.
- [14] 舒磊.地铁轨道减振技术及应用[J].[建筑技术开发](#),2022,49(11): 127-129.
- [15] 芦睿泉.青岛地铁轨道减振措施应用研究及展望[J].[都市快轨交通](#),2022,35(5): 84-89.