

# 佛山市南海区地铁金融城项目振动控制研究

罗文静 伍永胜 何 亮

(广州地铁设计研究院股份有限公司, 510010, 广州//第一作者, 高级工程师)

**摘 要** 以佛山市南海区地铁金融城项目为例, 分析地铁线路上盖建筑的振动控制设计措施。项目实施前, 先对既有类似项目进行了调研和测试, 以指导相应的减振措施。项目裙楼施工完成后, 对地铁振动进行了现场实测, 并通过采集的数据进行数值分析。结果证明: 采用浮置板轨道、建筑结构采取脱开设计等振动控制措施是合理的。

**关键词** 地铁; 上盖开发; 振动控制; 减振措施

**中图分类号** X893.1:U231

**DOI:** 10.16037/j.1007-869x.2020.07.011

## Research on the Vibration Control of Metro Financial City Project in Foshan City

LUO Wenjing, WU Yongsheng, HE Liang

**Abstract** A metro project in Nanhai District of Foshan City is taken as the example to analyse the vibration control measures in the design of metro upper cover buildings. Before the construction, many similar projects are investigated and tested to guide the corresponding vibration control measures. After the completion of project podium construction, the metro vibration is measured on the spot and the filed test data are collected for numerical simulation. Results show that the vibration control measures by adopting floating slab track and separated design of the upper building structure are reasonable.

**Key words** metro; metro upper cover development; vibration control; reduction measures

**Author's address** Guangzhou Metro Design and Research Institute Co., Ltd., 510010, Guangzhou, China

由于城市土地资源的稀缺, 将地铁车站及车辆段上部空间开发利用将是发展城市轨道交通建设的趋势。迄今为止, 我国香港已经在其地铁沿线开发了近 600 万  $\text{m}^2$  的上盖物业, 并以“地铁+物业”的发展模式, 很好地实现了物业开发“反哺”城市轨道交通建设。借鉴香港的成功经验, 目前北京、上海、广州、深圳等城市也在大力发展地铁上盖物业。然而, 由于地铁自身运营时存在的振动影响, 势必会对上盖物业的隔震设计和舒适度造成影响。因此

合理控制地铁振动对上盖建筑的影响, 成为了目前地铁上盖建筑急需解决的问题。

本文以佛山市南海区地铁金融城项目(以下简称“地铁金融城项目”)为例, 分析地铁上盖建筑的振动控制设计措施。

## 1 地铁金融城项目简介

地铁金融城项目为广佛地铁金融高新区站上盖建筑, 为交通、商业、办公、住宅及酒店综合体项目。项目占地面积为 45 131  $\text{m}^2$ , 总建筑面积为 358 559  $\text{m}^2$ , 总建筑高度为 169.26 m。

该项目共两层地下空间, 负二层为地下车库及地铁广佛线金融高新区站台层和金融高新区站一千灯湖站区间隧道, 负一层为商业、金融高新区站厅层及地下车库, 且地下空间与地铁站合建。地铁金融城项目高层住宅边柱距地铁隧道中心线约 7.8 m, 高层办公及酒店(四星级)横跨区间隧道, 位于区间隧道正上方。商业裙楼位于地铁车站及区间隧道正上方, 且其结构与地铁站合建。项目负二层平面如图 1 所示。由图 1 可知, 对振动敏感的高层住宅、四星级酒店均距地铁非常近, 尤其是酒店位于地铁区间隧道正上方。而此段已经超出地铁站约 120 m 且为曲线段, 列车速度较快, 必须对项目进行减振设计且采取减振措施, 才能满足项目的振动控制要求。

## 2 振动控制设计措施

### 2.1 常用的振动控制措施

目前, 常用的地铁减振措施主要从两方面入手: 第一方面是从轨道上进行减振, 即减小振动源的作用; 第二方面是阻断振动传播路径。

#### 2.1.1 轨道减振措施

1) 减振扣件。扣件的主要作用是固定钢轨正确位置, 阻止钢轨的纵向和横向位移, 防止钢轨倾翻; 同时扣件还能为钢轨提供适量的弹性, 并将钢轨所受的力传递给轨枕或道床承轨台<sup>[1-2]</sup>。

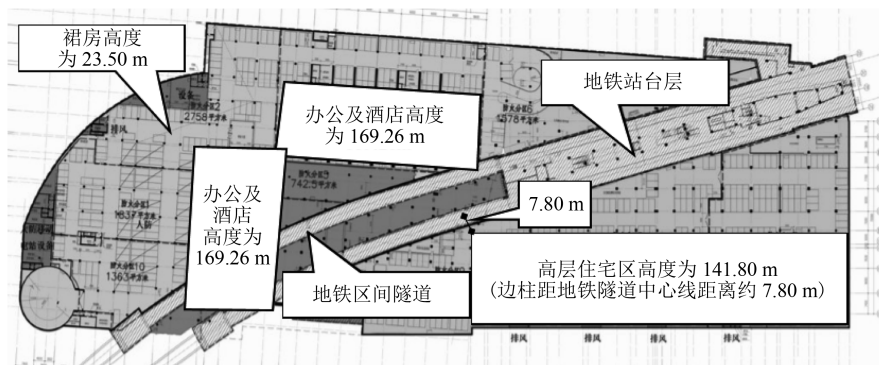


图 1 地铁金融城项目负二层平面图

2) 减振型轨道。地铁系统使用较广的减振轨道主要有弹性支承块式轨道、梯型轨道和浮置板轨道<sup>[3-6]</sup>。其中浮置板轨道按照支承条件不同主要分为橡胶支座浮置板轨道和钢弹簧浮置板轨道两种。橡胶支座浮置板轨道有载固有频率约为 16 Hz。减振范围为 20~30 dB<sup>[7]</sup>。钢弹簧浮置板轨道是把轨道板放置在由柔性钢弹簧构成的隔振器上,组成弹簧-质量隔振系统。在所有的振源减振方法中,钢弹簧浮置板轨道隔振效果最好。钢弹簧浮置板隔振系统的固有频率约 5~7 Hz,隔振效果为 25~40 dB (1/3 倍频程最大插入损失)<sup>[2]</sup>,尤其对低频振动具有良好的隔振效果,但是造价较高。

### 2.1.2 阻断振动传播路径

目前常用的阻断振动传播路径的方式有:

1) 隔振支座。采用隔振支座将上部结构与下部脱开,减小振动传播。

2) 将主要振动源,如地铁区间隧道,与地下主体结构脱开,并在两个结构间设置砂垫层等介质,使振动通过不同介质间的传播得到衰减。

## 2.2 对类似项目的调研测试

由于地铁站及长 160 m 的地铁区间均位于项目地下室范围内,高层住宅边柱距地铁隧道中心线约 7.8 m,办公及酒店位于隧道正上方。这些建筑物对地铁振动非常敏感,又距地铁非常近,因此地铁振动控制的好坏,直接影响到将来项目的正常使用。

在确定项目采取的振动控制方案前,项目组对广州市类似项目进行了调研。图 2 所示为广州地铁 1 号线某车站站台层与物业负二层关系图。其中,高层物业结构柱与地铁站最近距离约 8 m,地铁站与物业分属不同结构,两结构外墙贴建。该项目与地铁金融城项目列车通过车站引起的振动极为相似。而该地铁站采取的减振措施为浮置板减振道

床。为此,项目组对该项目进行了调研。

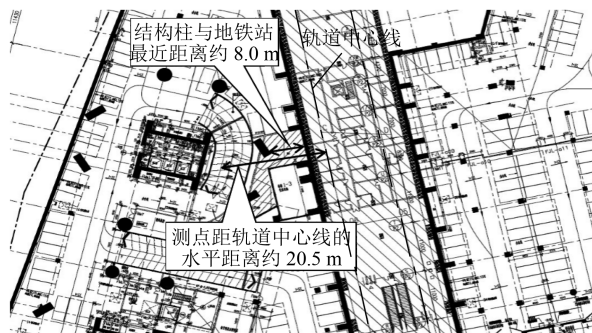


图 2 广州地铁 1 号线某车站站台层与物业负二层关系图

测试点布置在塔楼 7 层至 19 层,共 7 个测点(隔层布置在奇数层),每个测点均布置铅垂向和水平向拾振器(见图 3)。测点距轨道中心线的水平距离约为 20.5 m。实测数据如表 1 所示。由表 1 可知:该项目昼间和夜间所有振动低于 GB 10070—1988 要求的居民区和文教区 67 dB 的要求,说明该项目所采取的减振措施同样适用于地铁金融城项目位于车站的部分区域;同时可知,夜间与昼间相比峰值加速度相差不大,但铅垂向振动最大 Z 振级略有增加(有可能是因为该建筑为住宅楼,夜间空

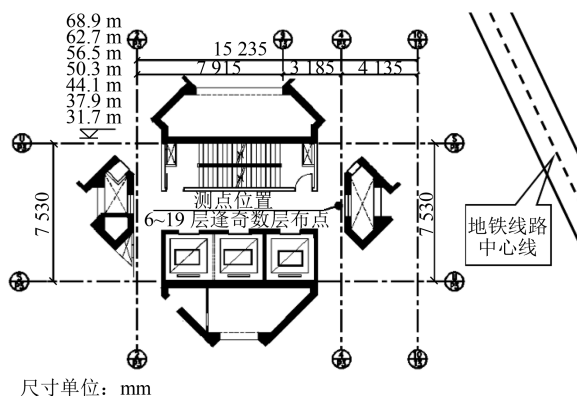


图 3 调研的某物业振动测试点布置图

表 1 某物业振动实测表

测点 编号	所在 楼层	标高/m	铅垂向				水平向			
			昼间		夜间		昼间		夜间	
			加速度/(m/s <sup>2</sup> )	Z 振级/dB	加速度/(m/s <sup>2</sup> )	Z 振级/dB	加速度/(m/s <sup>2</sup> )	Z 振级/dB	加速度/(m/s <sup>2</sup> )	Z 振级/dB
1	7	31.70	0.001 7	55.33	0.001 1	56.84	0.001 3	51.04	0.001 1	51.26
2	9	37.90	0.001 1	54.74	0.001 3	56.35	0.001 0	49.71	0.001 0	52.31
3	11	44.10	0.001 5	53.49	0.001 2	54.69	0.001 4	49.79	0.000 8	50.61
4	13	50.30	0.000 9	53.00	0.000 9	52.89	0.000 8	48.73	0.000 9	48.65
5	15	56.50	0.001 1	53.49	0.001 2	55.12	0.001 8	51.11	0.001 3	52.26
6	17	62.70	0.001 5	54.74	0.001 4	55.98	0.001 6	50.14	0.001 4	51.97
7	19	68.90	0.001 7	55.72	0.001 3	56.96	0.001 7	50.19	0.001 7	52.47

调使用量增加,导致本底振动稍有增加所致)。

然而,地铁车站大部分位于直线段,列车进站速度和出站速度均远小于区间运行速度。因此其振动比区间较小。所以对于区间部分,应采取比车站要求更高的振动控制措施。

2.3 地铁金融城项目采取的振动控制措施

2.3.1 地铁站的振动控制措施

考虑到地铁金融城项目与地铁车站合建,地铁振动没有通过地层的隔振与衰减,而是直接传递到上部建筑物上。随着楼层的增加,振动虽然会逐渐衰减,但毕竟有限。金融高新区站南侧即为地铁金融城项目住宅部分,住宅面积达 8.6 万 m<sup>2</sup>,地铁振动控制要求严格,经过比较选择,决定采用钢弹簧浮置板减振道床进行隔振,即整个地铁金融城项目范围全部采用钢弹簧浮置板减振道床。

考虑到列车进站时,速度下降,引起的振动相对区间较小,且车站跨度较大,若在结构设计上采取措施难度较大(如设缝、将车站与物业脱开设计等);同时,对类似项目的调研亦证明,仅采用钢弹

簧浮置板减振道床便能满足车站的减振要求。因此针对车站部分,只采用了钢弹簧浮置板减振道床。

2.3.2 区间隧道的振动控制措施

除地铁车站外,还有长约 160 m 的区间曲线隧道从地铁金融城项目地下室内部穿过。对于曲线段,轮轨摩擦厉害,另外列车在区间的运行速度比进出站速度都要高,所以区间的振动比车站要大。而地铁金融城项目 170 m 高的办公楼和酒店(140 m 以下为办公,以上为四星级酒店)横跨在区间隧道上,其中还包括办公楼和酒店核心筒的一角。

考虑到以上诸多因素,除采用钢弹簧浮置板减振道床外,区间隧道与地铁金融城项目地下室采用了脱开设计的措施(区间隧道跨度小,有脱开设计的条件),使地铁振动在通过钢弹簧浮置板减振道床隔振后,先传至地基,通过地基的衰减和扩散后,再传至物业。隧道与建筑物结构体间设置 200 mm 宽的空隙,以保证各自侧壁的防水施工及隔振。相关设计如图 4 所示。

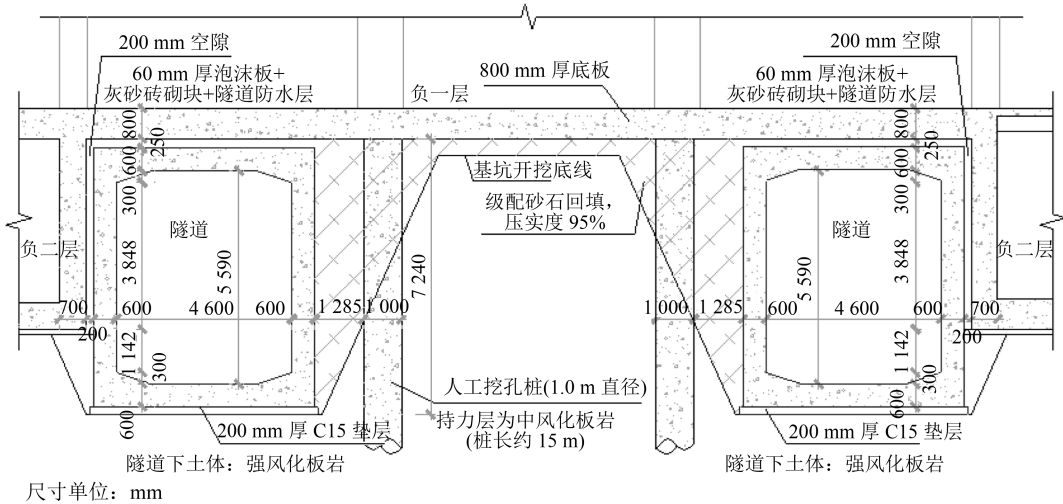


图 4 地铁隧道与建筑物结构体分离式设计示意图

2.4 地铁金融城项目振动控制效果测试

为了验证南海金融城项目所采取的减振措施的合理性,并保证项目品质,应控制地铁振动在允许范围内。在地下室及部分裙楼实施完成而上部塔楼(含住宅和办公、酒店等)未施工前,项目组对地下室振动进行了测试,并根据测试结果确定在结构上是否需采取进一步的减振措施。

综合考虑评估需求、现场在建结构特点、施工情况及地铁运行状况等因素,将现场分为 7 个测区(见图 5),47 个测点,测点分布于项目负二层至裙楼四层的不同区域。测点特性如表 2 所示。测点平面位置如图 5 所示。采样频率为 400 Hz。其中,在测区 1 和测区 7 分别监测了水平向与铅垂向振动,其它测区则仅监测铅垂向振动。

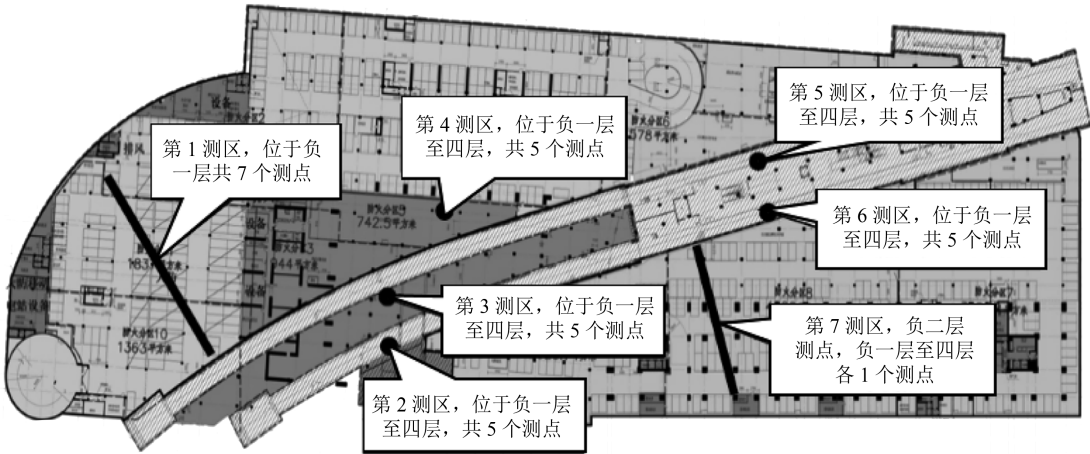


图 5 地铁金融城项目振动测区分布图

表 2 地铁金融城项目测区分组

测区编号	测点数	所在楼层	距轨道中心线水平距离/m	振动方向
1	9	-2	3.46~53.46	铅垂、水平
	2	-1	3.46~9.46	铅垂、水平
2	5	-1~4	17.28(1.19)	铅垂
3	5	-1~4	4.27	铅垂
4	5	-1~4	17.45	铅垂
5	5	-1~4	2.23(12.77)	铅垂
6	5	-1~4	3.79(11.21)	铅垂
	9	-2	3.25~45.25	铅垂、水平
7	1	-1	3.25(18.25)	铅垂、水平
	1	1	3.25(18.25)	铅垂、水平

注: 括号中的数字代表测点距另一条轨道中心线的水平距离

地铁金融城项目振动实测如表 3 所示。从表 3 可以看出,整个地铁金融城项目 4 层以下范围,振动最大点出现在第 3 测区的 1 层,为 0.025 8 m/s<sup>2</sup>;振动引起的最大振级也出现在第 6 测区的 1 层,为 64.52 dB,低于 GB 10070—1988 中的居民区和文教区 67 dB 的要求约 1.5 dB。说明采用的减振设计方案合理,地铁引起的振动控制在了一定范围以内。

2.5 地铁金融城项目振动分析

由于振动测试时,高层住宅和酒店结构尚未施工(处于地下室施工阶段),为进一步论证结构振动

安全可控,并理清振动在结构内的响应规律,设计选取高层住宅项目为对象进行振动分析。结构体系为框架剪力墙,地下 2 层,地上裙房 5 层,第 6 层为转换层,7~43 层为塔楼。裙房高为 27.80 m,塔楼高为 141.75 m。标准层平面如图 6 所示。

表 3 地铁金融城项目振动实测表

测区	振动最大点所在楼层	与轨道中心线的水平距离/m	加速度/(m/s <sup>2</sup> )	Z 振级/dB
1	-1	3.46	0.014 4	57.16
2	3	2.05	0.013 4	62.12
3	1	4.27	0.025 8	63.14
4	-1	17.49	0.012 3	62.61
5	-1	2.23	0.019 2	62.82
6	1	3.79	0.019 0	64.52
7	1	3.25	0.016 3	58.59

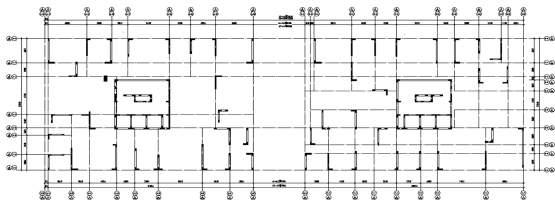


图 6 高层住宅标准层平面图

利用 SAP2000 有限元计算软件建立塔楼结构模型进行分析,结构的坐标严格按照图纸输入,构件

的材料特性和截面尺寸根据钢筋混凝土构件的截面尺寸和配筋率进行输入。梁柱采用框架单元,剪力墙和楼板采用三维壳单元。输入荷载包括自重及正常使用荷载。选择实测中产生最大加速度值的测点 3-1 竖向加速度时程(见图 7)作为输入。

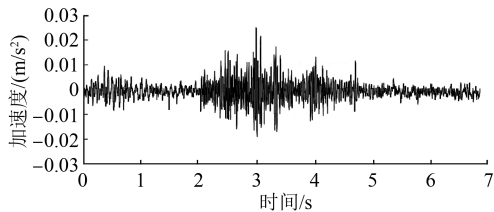


图 7 输入结构的加速度时程

选取塔楼(T1)东北侧悬挑阳台角部节点 254、楼板跨中节点 291 及核心筒角部节点 382 为对象(见图 8),考察其动力响应(层号:7、12、17、22、27、32、37、42)。不同部位加速度峰值如图 9 所示。不同部位加速度振级如图 10 所示。

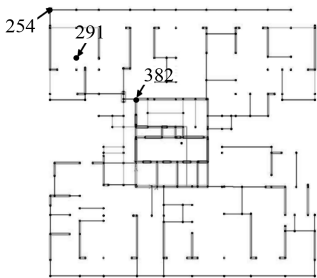


图 8 选取的典型节点

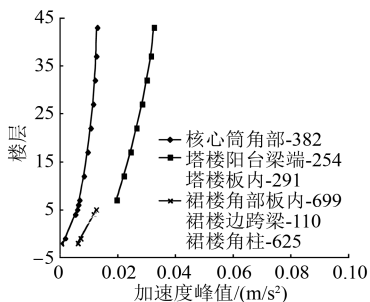


图 9 不同部位加速度峰值

由以上结果可知,结构对地铁激励引起的竖向振动有一定的放大作用,但效应不大;裙楼的放大作用要明显高于塔楼,每上升一层,铅垂向振级约增大 1 dB 左右;塔楼在 22 层之上,竖向振动加速度及其振级仅保持约 0.08 dB/层的微幅增长,可近似认为结构做整体的铅垂向刚体振动。

根据对不同结构部位构件振动响应的分析可知,核心筒部位振动最小,结构梁柱响应次之;塔

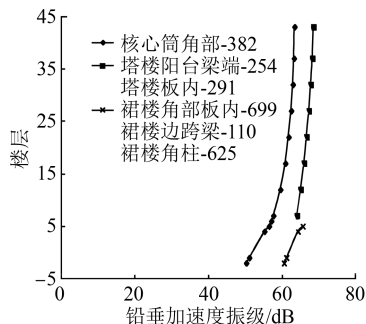


图 10 不同部位加速度振级

楼阳台角部等悬挑部位及板跨中段对振动响应较为敏感,虽然优势频段分频振级已接近 GB/T 50355—2005《住宅建筑室内振动限值及其测量方法标准》限值,但仍小于标准限值要求。

地铁金融城项目于 2014 年投入使用至今已运营约 5 年。在酒店房间内,人体感觉不到任何地铁振动,也未接到过住宅区任何关于地铁振动的投诉。

### 3 结论

1) 对于与地铁站合建的项目,在地铁轨道采用了浮置板减振道床后,地铁振动对建筑物的影响能控制在一般居民区和文教区要求范围内。在不采取其余减振措施的情况下,能满足住宅区振动要求。

2) 当区间隧道位于项目地下室内,如项目存在对振动敏感度较高的住宅、酒店等建筑时,除对地铁轨道采用浮置板减振道床外,宜另外对结构采取脱开设计的办法来减轻地铁振动影响。

3) 结构对地铁激励引起的竖向振动有一定的放大作用,但随着塔楼的增高,上部楼层振动增长幅度减小,可近似认为结构做整体的铅垂向刚体振动。

### 参考文献

- [1] 孙晓静.地铁列车振动对环境影响的预测研究及减振措施分析[D].北京:北京交通大学,2008.
- [2] 高世兵.钢弹簧浮置板减振轨道在城市地铁中的应用[J].铁道工程学报,2008(3): 88.
- [3] 王文斌.基于脉冲实验的地铁环境振动响应传递函数预测方法研究[D].北京:北京交通大学,2011.
- [4] 苏宇.地铁梯式轨道减振特性试验研究[D].北京:北京交通大学,2007.
- [5] 王文斌,刘维宁,马蒙,等.梯形轨道系统动力特性及减振效果试验研究[J].中国铁道科学,2010(2): 24.
- [6] 苏宇,刘维宁,孙晓静,等.梯形轨道减振性能研究[J].铁道标准设计,2007(10): 71.

(收稿日期:2019-09-24)