

文章编号: 1674—8247(2024)05—0016—08
DOI:10.12098/j.issn.1674-8247.2024.05.003

高速铁路引入对空铁一体枢纽振动和噪音影响 及控制措施研究

李鸿志¹ 王 梯¹ 陈以庭²

(1. 广东省铁路建设投资集团有限公司, 广州 510655; 2. 中铁二院工程集团有限责任公司, 成都 610031)

摘 要:本文针对某机场航站楼及综合交通换乘中心(GTC)的实际工程项目,建立了列车-轨道空间耦合动力学模型、轨道-土体-建筑物三维有限元模型及建筑物结构噪声分析模型,评估了高速铁路及地铁行车所致振动对航站楼及GTC建筑物的影响,并分析了建筑物基础隔振措施的隔振效果。结果表明:采取基础隔振措施前,GTC建筑物内旅客过夜用房区域的最大Z振级和二次结构噪声分别达到74.4 dB和45.3 dB(A),航站楼建筑的最大Z振级和二次结构噪声分别为74.6 dB和46.6 dB(A),均超出了标准GB 10070-1988和JGJ/T 170-2009规定的限值。采取基础隔振措施后,GTC和航站楼内Z振级分别减小了6.5~10 dB和6~9.9 dB,二次结构噪声分别减小了9.8~11.2 dB(A)和6.4~10.5 dB(A),均满足标准GB 10070-1988和JGJ/T 170-2009规定的夜间限值。研究结果对于铁路与航站楼的综合开发建设具有实际指导意义。

关键词:车辆-轨道耦合动力学;环境振动;二次结构噪声;基础隔振;高速铁路

中图分类号:U213.2 **文献标志码:**A

Study on High-speed Train-induced Structural Vibration and Noise of Airport-Railway Integrated Hubs and Control Measures

LI Hongzhi¹ WANG Ti¹ CHEN Yiting²

(1. Guangdong Provincial Railway Construction Investment Group Co., Ltd., Guangzhou 510655, China;
2. China Railway Eryuan Engineering Group Co., Ltd., Chengdu 610031, China)

Abstract: A spatial train-track coupled dynamic model, 3D finite element models of track-soil-building system, as well as building structural noise analysis model are established to evaluate the structural vibrations and noises of airport terminal building and a ground traffic center (GTC) induced by high-speed and subway trains. The isolation effectiveness of building foundation isolation measures is also investigated. The results show that, before implementing foundation isolation measures, the maximum Z-vibration level and structural noise of the GTC building reached 74.4 dB and 45.3 dB(A), while those in the terminal building were 74.6 dB and 46.6 dB(A). All the values exceed the limits specified in the standard GB 10070-1988 and JGJ/T 170-2009. After adopting foundation isolation measures, the Z-vibration levels of the GTC and terminal were decreased by 6.5~10 dB and 6~9.9 dB respectively, and their structural noise was decreased by 9.8~11.2 dB(A) and 6.4~10.5 dB(A), both meeting the nighttime limits specified in standards GB 10070-1988 and JGJ/T 170-2009. The research findings have practical guiding significance for the integrated development and construction of railways and airport terminals.

收稿日期:2024-04-25

作者简介:李鸿志(1979-),女,经济师。

引文格式:李鸿志,王梯,陈以庭.高速铁路引入对空铁一体枢纽振动和噪音影响及控制措施研究[J].高速铁路技术,2024,15(5):16-23.

LI Hongzhi, WANG Ti, CHEN Yiting. Study on High-speed Train-induced Structural Vibration and Noise of Airport-Railway Integrated Hubs and Control Measures[J]. High Speed Railway Technology, 2024, 15(5):16-23.

Key words: train-track coupled dynamics; environmental vibrations; secondary structural noise; foundation isolation; high-speed railway

2021 年中共中央、国务院印发了《国家综合立体交通网规划纲要》^[1],纲要指出,构建以铁路为主干,以公路为基础,水运、民航比较优势充分发挥的国家综合立体交通网。推进综合交通枢纽统一规划、统一设计、统一建设、协同管理。推动新建综合客运枢纽各种运输方式集中布局,实现空间共享、立体或同台换乘,打造全天候、一体化换乘环境。为满足一体化的换乘空间,大型综合枢纽需多种交通运输方式无缝衔接,铁路下穿机场 GTC(换乘中心)、航站楼、跑道等建(构)筑物成为常态。但这导致轨道线路与航站楼间的距离减小,车致振动传递到航站楼建筑物的衰减距离缩短。列车运行产生的振动直接经由轨道-线下基础-支撑柱传递至上盖建筑物,激发建筑物产生振动,并进一步诱发室内结构二次噪声,对换乘旅客的舒适性产生较大的影响,故亟需开展列车运行对上盖航站楼结构振动及二次噪声的研究。目前,国内外不少学者针对轨道交通上盖建筑的车致振动影响及减振降噪措施开展了研究,颜峰^[2]等对 350 km/h 高速列车穿越北京大兴机场航站楼结构振动响应研究发现,结构竖向振动响应比水平向大一个数量级,楼板最大 Z 振级达 79.7 dB;黄世明^[3]对汉孝城际铁路、地铁 7 号线穿越 GTC 进行动力响应分析发现,楼板产生的振动频率集中在 40~80 Hz 范围,随着楼层的增高,高频成分衰减明显快于低频;张凌^[4]等对南昌西站候车层进行实测,发现枢纽车站桥建分离结构,可以阻隔 40 Hz 以上的高频振动;谢伟平^[5]等对杭州地铁车辆段试车线以 35 km/h 运行时的上盖建筑振动进行了试验研究,得到最大 Z 振级超过标准限值,有必要在已有轨道减振基础上采取进一步的减隔振措施;Yang^[6]等采用两步分析法预测评估了地铁上盖机场酒店建筑物的车致振动影响,并对建筑基础隔振措施的效果进行了分析;Sadeghi^[7]等通过测试及模型分析,将地铁结构特性、土体动力学特性及建筑结构特性联系在一起,建立了安全距离预测函数图,为城市地铁线路规划设计提供了有效的工具。文献[8-9]指出高速铁路运行引起的高幅宽频的振动问题突出,需开展深入研究,且目前多线多制式铁路同时下穿航站楼及综合换乘中心引起的振动影响工程案例及研究甚少,对实际工程开展专项研究十分必要。

本文针对某机场航站楼及综合交通换乘中心(GTC)的实际工程项目,建立了列车-轨道空间耦合动力学模型、轨道-土体-建筑物三维有限元模型及

建筑物结构噪声分析模型,采用两步分析法,即第一步通过列车-轨道空间耦合动力学模型获得列车扣件力时程,第二步建立轨道-隧道-土体-建筑物三维有限元模型,以扣件力为外荷载求解建筑物的振动和二次结构噪声,预测评估了高速铁路及地铁行车所致振动对航站楼及 GTC 建筑物的影响,分析了建筑物基础隔振措施的隔振效果。研究结果对于轨道交通与航站楼的综合开发建设具有实际指导意义。

1 预测分析方法

1.1 项目概况

某机场引入“两高速铁路—城际铁路—快线”,即高速铁路1(350 km/h)、高速铁路2(350 km/h)、城际铁路(200 km/h)、机场快线(160 km/h),4条线路平行下穿机场T1航站楼和南交通中心(以下简称“GTC”)。机场平面如图1所示。四条线路均在GTC设机场站,其中,高速铁路1为2台4线(其中2条正线)、高速铁路2为2台6线(其中2条正线)、城际铁路为1台2线、机场快线为1台2线,整个GTC坐落在隧道结构上,上部柱网与下部车站对齐,GTC与隧道结构剖面关系如图2(a),GTC由地下两层和地上三层构成,地下两层为交通枢纽用房,地上三层为酒店用房。航站楼部分位于咽喉区,两高速铁路隧道已从整体车站中分离出,城际铁路与机场快线为并行连体隧道,整个航站楼在隧道顶板实现结构转换,T1航站楼与隧道结构的剖面关系如图2(b),T1航站楼由地下一层和地上四层组成,全部为功能性用房。

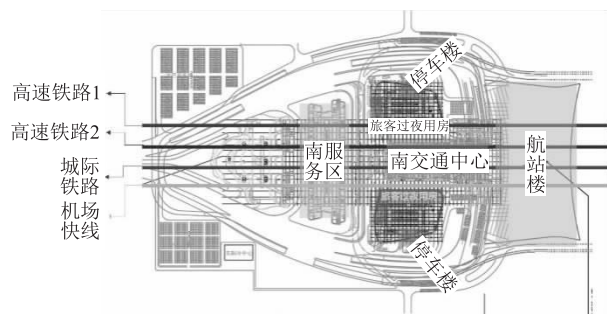


图 1 机场平面图

由于工程所在区域地质结构复杂,建筑物平面尺寸跨度范围较大,建筑物根据实际情况采用不同的基础结构。基底位于中风化岩时,采用筏板基础,筏板厚度为 1.5 m,其他范围采用桩基础或桩筏基础。桩基础采用嵌岩桩,桩长 15 ~ 45 m,桩径 1 m 和 1.5 m。

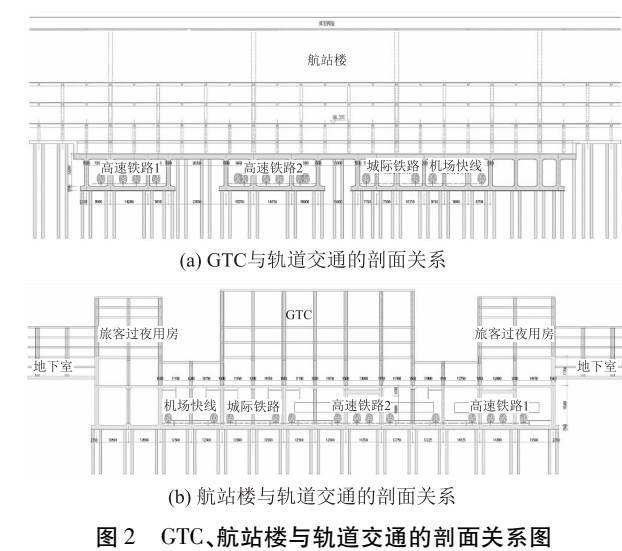


图2 GTC、航站楼与轨道交通的剖面关系图

1.2 预测分析模型

本文采用两步分析法预测列车通过时引起的航站楼和GTC结构振动及结构二次噪声,分析流程如图3所示。

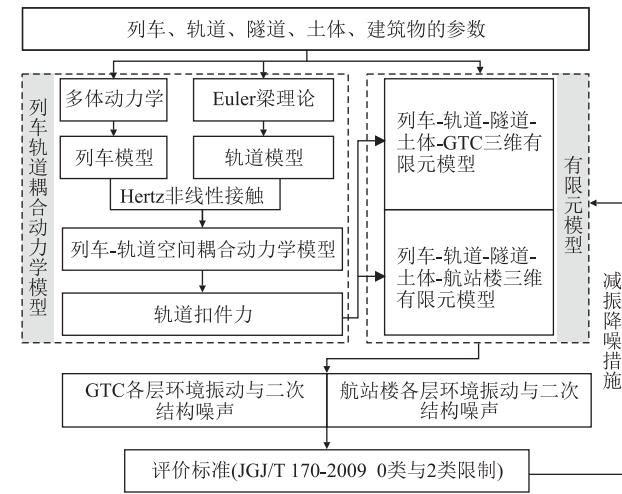


图3 技术路线图

在第一分析步中,建立列车-轨道空间耦合动力学模型求解列车通过时的扣件力时程,如图4所示。首先,基于车辆-轨道空间耦合动力学理论,将列车的每节车辆视作35个自由度的多刚体系统;钢轨视作离散点支承的 Euler 梁,具有垂向、横向以及扭转运动;轮轨动态相互作用采用空间的 Hertz 非线性相互作用关系计算;扣件用弹簧-阻尼单元模拟。其中,轨道长波不平顺采用 TB 3352-2014《高速铁路无砟轨道不平顺谱》^[10],短波不平顺通过中国铁道科学研究院建议的功率谱密度函数变换得到,其波长范围为 0.01~1 m。通过机场的高速铁路列车为 CRH380A 型,城际铁路为 CRH6 型动车组,机场快线为市域 D 型车。

在第二分析步中,建立轨道-隧道-土体-建筑

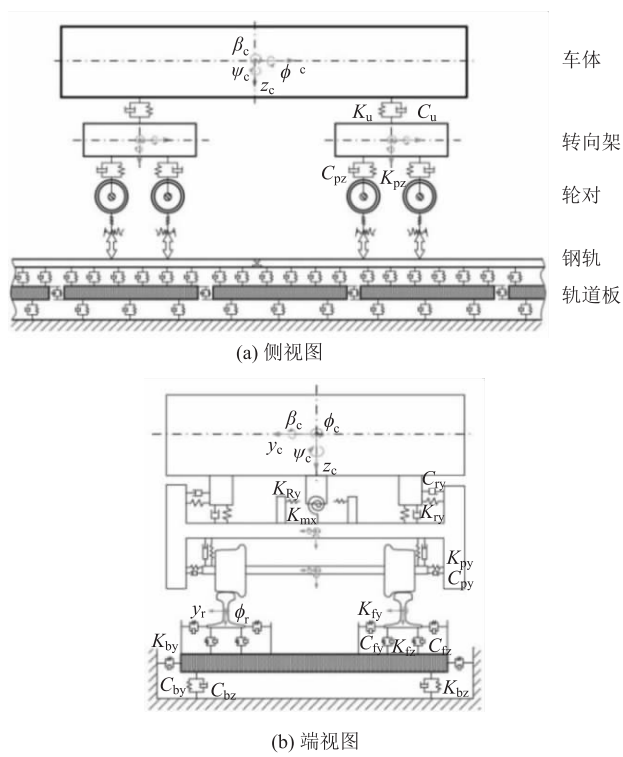


图4 车辆-轨道空间耦合动力学模型图

物三维有限元模型,以扣件力为外荷载求解建筑物的振动和二次结构噪声,所建立的有限元模型如图5、图6所示。由于建筑物结构较为复杂且形状不规则,为保证计算结果的准确性,本文建立了较为细化的三维有限元模型,航站楼和GTC均为混凝土框架结构,其中梁、板、柱的混凝土强度分别为C40、C30、C60,梁、柱采用1D梁单元模拟,板采用2D壳单元模拟,隧道及土体采用3D实体单元模拟。为详细考虑建筑物结构空间几何尺寸,GTC部分三维模型沿轨道方向、垂直于轨道方向及竖向的尺寸分别为400 m、400 m和65 m,单元数量约为160万个;航站楼部分的三维模型沿轨道方向、垂直于轨道方向及竖向的尺寸分别为280 m、400 m和65 m,单元数量约为135万个,网格尺寸为0.12~2.0 m,在靠近模型边界的地方逐渐放大单元尺寸,既能满足计算精度需求,又能提高计算效率,土体的分层情况及计算参数如表1所示。

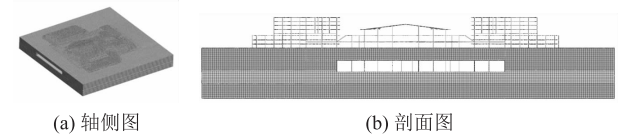


图5 列车-轨道-隧道-GTC-土体三维模型图

为保证建筑物振动响应分析中阻尼比处在合理范围内,取隧道-地基系统的阻尼系数为0.02,考虑模型的低频5 Hz及优势频率上限100 Hz,得到 Rayleigh

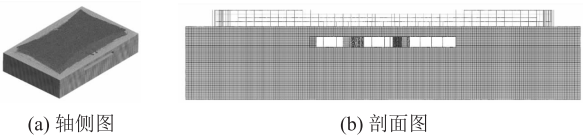


图 6 列车-轨道-隧道-航站楼-土体三维模型图

表 1 土体分层情况及计算参数表

编号	土层	厚度 /m	弹性模量 /MPa	泊松比	密度 /(kg·m ⁻³)
1	填土	18.0	97	0.35	1 850
2	强风化泥岩	20.0	260	0.32	1 950
3	中风化泥岩	27.0	580	0.30	2 350
4	隧道	—	30 000	0.28	2 400

阻尼参数 α 和 β ,实际中土体是半无限空间区域,为消除振动波在传播到土体截取处产生实际中并不存在的反射与折射,本文采用刘晶波^[11]提出的将粘弹性人工边界转换为等效粘弹性人工边界的方法,即沿着土体法线方向延伸出一层单元并赋予等效材料参数,同时将外层单元自由度固定,阻尼参数和材料参数确定方法为:

$$\tilde{\nu} = \begin{cases} \frac{\alpha - 2}{2(\alpha - 1)} & , \alpha \geq 2 \\ 0 & , \text{其他} \end{cases} \quad (1)$$

$$\alpha = \frac{\alpha_N}{\alpha_F} \quad (2)$$

$$\begin{cases} \tilde{G} = \alpha_T h \frac{G}{R} \\ \tilde{E} = \alpha_N h \frac{G}{R} \times \frac{(1 + \tilde{\nu})(1 - 2\tilde{\nu})}{(1 - \tilde{\nu})} \end{cases} \quad (3)$$

$$\tilde{\eta} = \frac{\rho R}{2G} \left(\frac{c_s}{\alpha_T} + \frac{c_p}{\alpha_N} \right) \quad (4)$$

式中: $\tilde{\nu}$ ——等效粘弹性边界单元的等效泊松比;
 \tilde{G} ——等效剪切模量(Pa);
 \tilde{E} ——等效弹性模量(Pa);
 α_T, α_N ——切向与法向粘弹性人工边界参数;
 G ——介质剪切模量(Pa);
 R ——波源至人工边界点的距离(m);
 h ——等效单元的厚度(m);
 c_s, c_p ——S波和P波波速(m/s);
 ρ ——介质质量密度(kg/m³);
 $\tilde{\eta}$ ——阻尼比例系数。

1.3 评价标准

选择 GB 10070 - 1988《城市区域环境振动标准》^[12]为车致建筑物振动的评价标准,选择 JGJ/T 170 - 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》^[13]作为二次结构噪声的评

价标准,其规定的振动及噪声限值如表 2 所示。航站楼和 GTC 地下两层区域参考 2 类区域限值,GTC 地上三层为酒店用房,参考 0 类区域限值。

表 2 振动及噪声的限值表

区域 分类	适用范围	振动/dB		噪声/dB(A)	
		昼间	夜间	昼间	夜间
0 类	特殊住宅区	65	65	38	35
1 类	居住、文教区	70	67	38	35
2 类	混合区、商业中心区	75	72	41	38
3 类	工业集中区	75	72	45	42
4 类	交通干线道路两侧	75	72	45	42
5 类	铁路干线两侧	80	80	—	—

2 结果分析及基础隔振效果评估

为评估不同楼层不同位置的车致振动,在铁路上方的 GTC 和航站楼的不同楼层选取多个分析点,以关注各个区域的振动量值。GTC 和航站楼不同楼层上的分析点位置如图 7 所示。其中,GTC 地下二层、地下一层测点分别为 B2F 和 B1F,地面一层为 HL1F 和 HR1F 来区分左右两侧过夜用房,二层、三层的测点分布与一层的一致,不再给出;航站楼地下一层测点为 B1F,地上一层~四层分别为 1F~4F。分析工况为四线同时通过,其中,高速铁路 1 上行线 350 km/h 通过,高速铁路 2 下行线 350 km/h 通过,城际铁路上行线 200 km/h 通过,机场快线下行线 160 km/h 通过。

2.1 车致振动及二次结构噪声结果

GTC 各楼层测点 Z 振级如图 8 所示(图 8(c)、图 8(d)中 L、R 分别代表左侧和右侧过夜用房,和图 7(a)中 HL、HR 对应)。由图 8 可知,地下二层各分析点 Z 振级在 70~75.2 dB,最大 Z 振级超出了 GB 10070 - 1988规定的 2 类区域昼间限值 0.2 dB,超出夜间限值 3.2 dB;大部分分析点的 Z 振级虽超出了夜间限值,但并未超出昼间限值。地下一层分析点的最大 Z 振级为 75 dB,几乎没有超出昼间限值,但大部分分析点的 Z 振级超出了夜间限值。地上一层~三层分析点的最小 Z 振级分别为 65.3 dB、64.6 dB 和 64.5 dB,几乎所有分析点的 Z 振级都超出了 GB 10070 - 1988 规定的 0 类区域夜间限值;其中,最大 Z 振级为 74.4 dB,超出昼间、夜间 9.4 dB。综上所述,车致 GTC 结构振动随楼层增高并没有明显衰减的趋势,同时地上左侧建筑物的振级明显大于右侧建筑的。

航站楼各楼层测点最大 Z 振级如图 9 所示,由图 9 可知,地下一层各分析点 Z 振级在 57.1~74.6 dB,

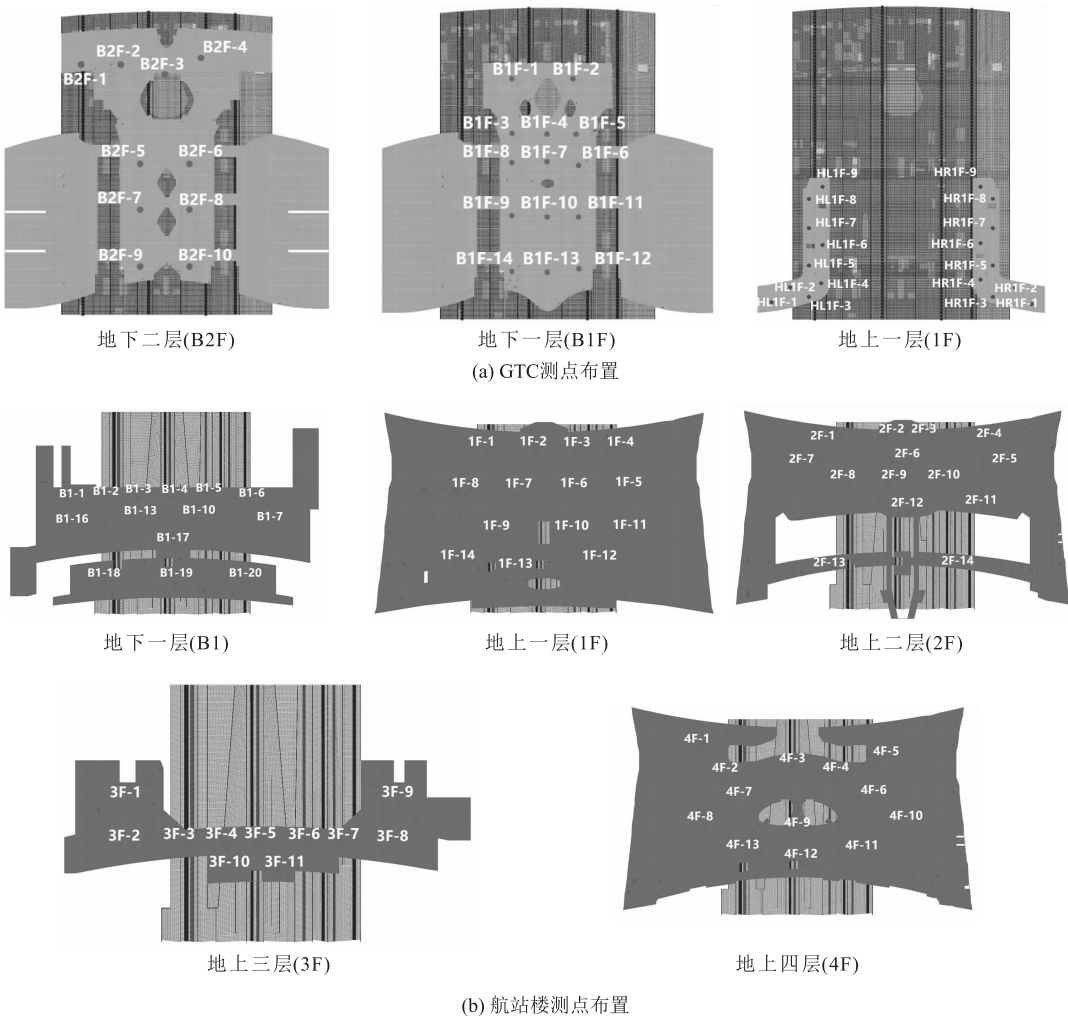


图 7 测点布置图

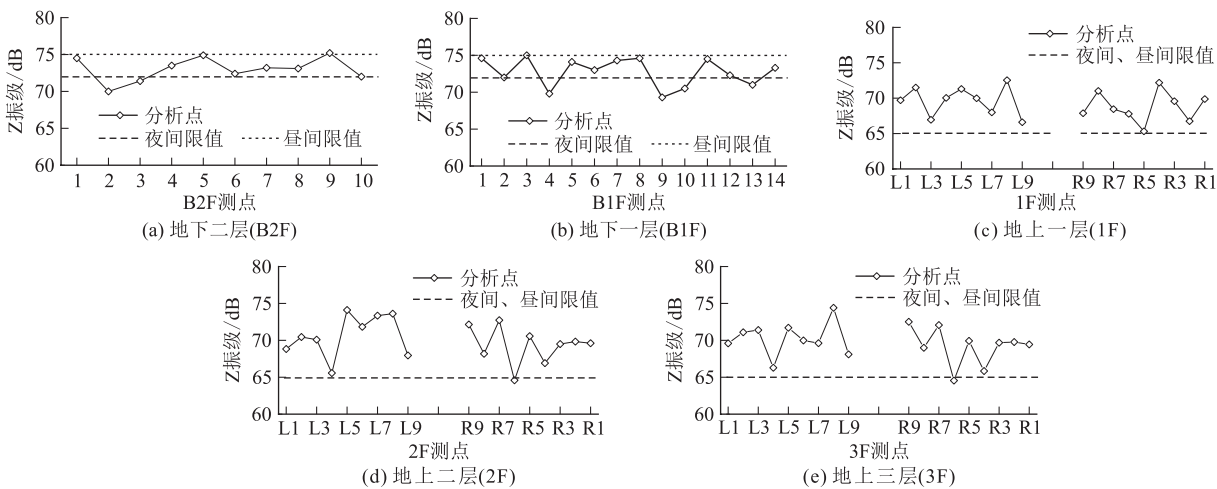


图 8 GTC 各楼层测点 Z 振级分布图

最大 Z 振级超出了 GB 10070 - 1988 规定的 2 类区域夜间限值 2.6 dB,大部分测点超出夜间限值,但整体均未超出昼间限值;地上一层 ~ 四层各分析点 Z 振级为 57.1 ~ 74.2 dB,最大 Z 振级超出了 GB 10070 -

1988 规定的 2 类区域夜间限值 2.2 dB,未超过昼间限值,大部分测点均满足昼/夜间限值,另外,振动从地下传播到地上的过程中产生了衰减,但地上各层最大 Z 振级呈上升趋势。

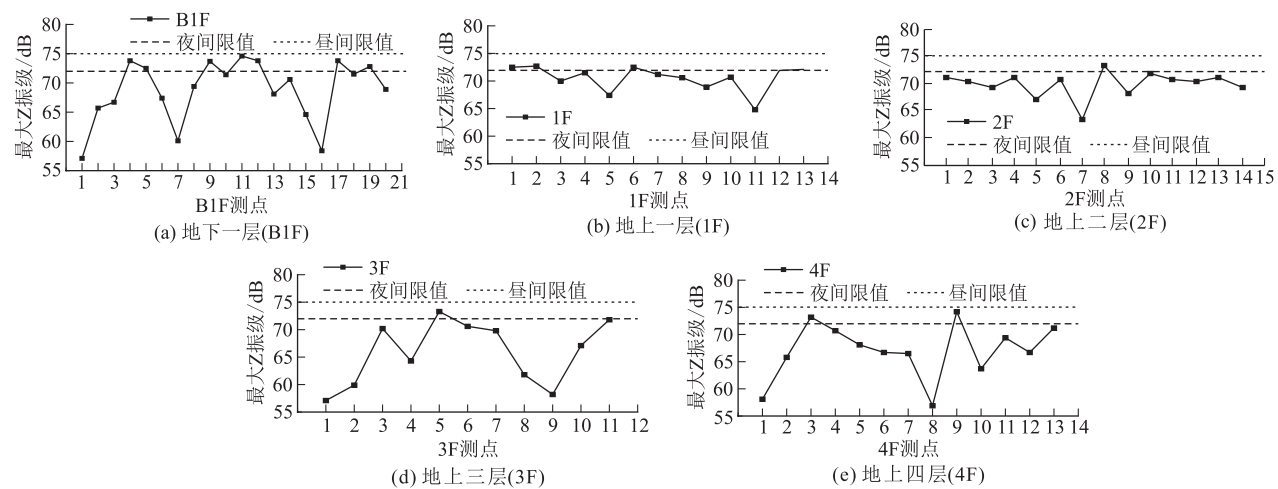


图 9 航站楼各楼层测点 Z 振级分布图

GTC 建筑在高速铁路 1 线范围内的地上楼层二次结构噪声如图 10(a)所示,均超出夜间限值,最大二次结构噪声 45.3 dB(A),超出夜间限值 7.3 dB(A)。航站楼建筑在高速铁路 1 线范围内各楼层二次结构噪声如图 10(b)所示,均超出夜间限值,最大二次结构噪声 46.6 dB(A),超出夜间限值 8.6 dB(A)。二种结构之间均呈现出随着楼层增加,二次结构噪声逐渐减弱的趋势。

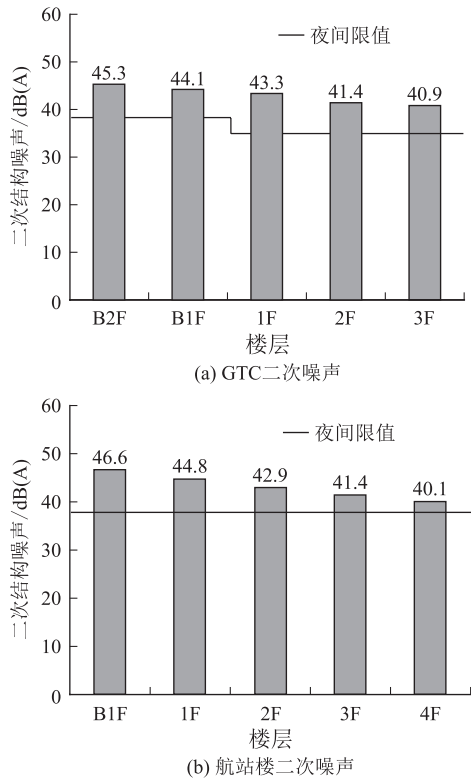


图 10 列车通过引起的二次结构噪声图

2.2 基础隔振效果

综上所述,GTC 和航站楼的车致振动与二次结构

噪声超出了标准规定的限值,需要采用减振降噪措施。常见控制措施为振源减振、传播途径隔振以及建筑被动隔振,本文采用建筑隔振支座,在隧道顶部设置减隔振层,降低车致振动向建筑物的传播,建筑隔振支座如图 11 所示,隔振支座的设计频率为 4 Hz,总刚度在 44 ~ 1 884 kN/mm 范围内,阻尼比为 0.05。建筑隔振支座布置在高速铁路线路范围内隧道结构顶部,形成减隔振层,GTC 和航站楼隔振支座布置如图 12 所示。

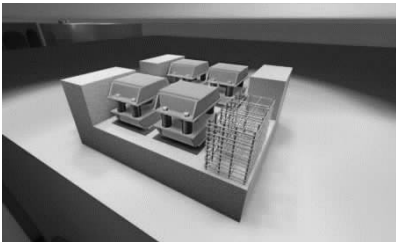


图 11 建筑隔振支座图

GTC 建筑采取基础隔振措施后,1F 和 3F 的减振效果如图 13(a)、图 13(b)所示,采用隔振支座后,旅客过夜用房最大 Z 振级 63.9 dB,满足 GB 10070 - 1988 规定的 0 类区域限值,各分析点振动减小 6.5 ~ 10 dB。航站楼建筑采取基础隔振措施后,B1F 和 1F 的减振效果如图 13(c)、图 13(d)所示。采用隔振支座后,航站楼各测点振动减小 6 ~ 9.9 dB,最大 Z 振级 66.4 dB,满足了 GB 10070 - 1988 规定的 2 类区域限值。

GTC 建筑采取基础隔振措施后的降噪效果如图 14(a)所示,各层二次结构噪声减小 9.8 ~ 11.2 dB(A),最大二次结构噪声 34.1 dB(A),各测点均满足 JGJ/T 170 - 2009 规定的 0 类区域限值。航站楼建筑采取基础隔振措施后的降噪效果如图 14(b)所

示,最大二次结构噪声 36.1 dB(A),满足 JG/JT 170 – 2009 规定的 2 类区域限值,各测点二次结构噪声减小 6.4 ~ 10.5 dB(A)。

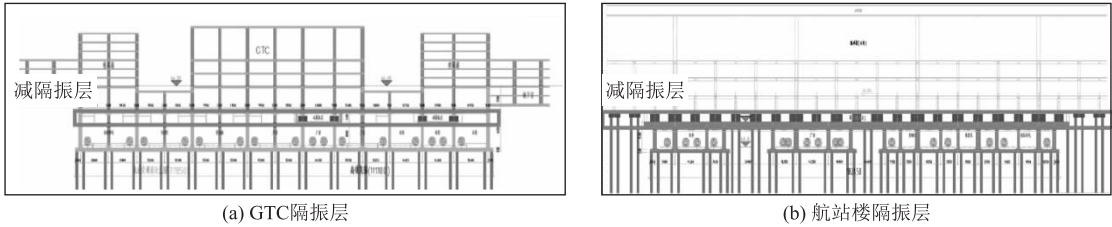


图 12 隔振支座布置位置图

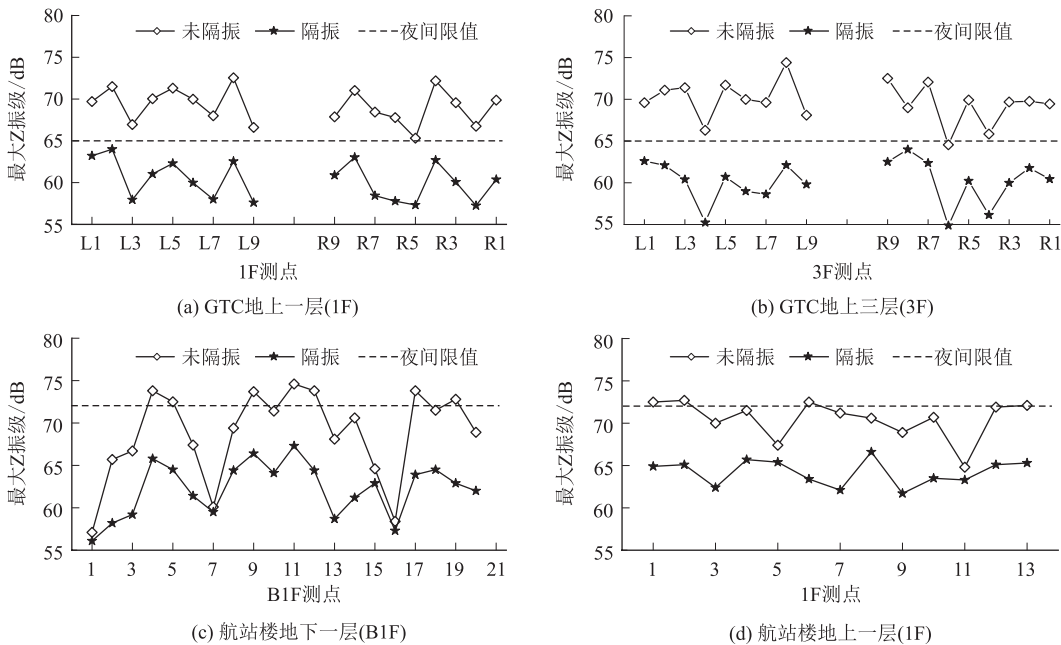


图 13 隔振支座减振效果图

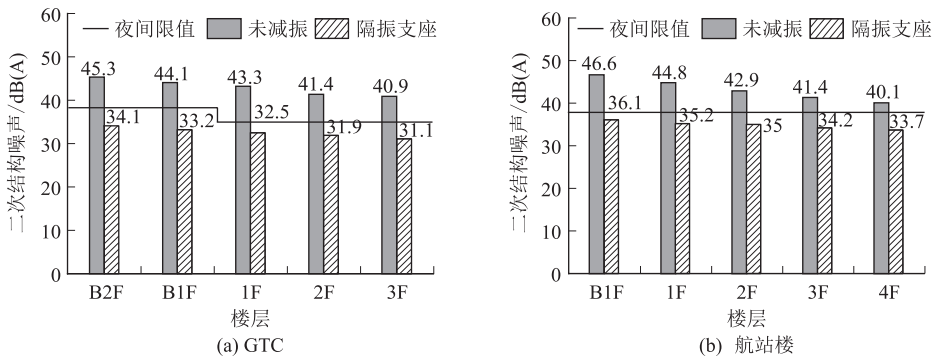


图 14 隔振支座降噪效果图

3 结论

本文以两高速铁路一城际铁路一机场快线下穿某机场的实际工程为研究对象,采用两步分析法对列车通过引起的航站楼及 GTC 建筑物的振动和二次结构噪声进行预测评估,并分析了两种建筑物采取基础隔

振措施后的减振降噪效果。得到主要结论如下:

(1) 采取基础隔振措施前,GTC 建筑物内旅客过夜用房区域的最大 Z 振级达到 74.4 dB,超出了 GB 10070 – 1988 标准规定的 0 类区域夜间振动限值

9.4 dB;最大二次结构噪声达 45.3 dB(A),超出了 JGJ/T 170-2009 标准限值 7.3 dB(A)。

(2)采取基础隔振措施前,航站楼最大 Z 振级为 74.6 dB,超出标准规定的 2 类区域夜间限值 2.6 dB;最大二次结构噪声 46.6 dB(A),超出标准规定的夜间限值 8.6 dB(A)。

(3)采取基础隔振措施后,GTC 建筑物内旅客过夜用房区域的最大 Z 振级和二次结构噪声分别为 63.9 dB和 33.2 dB(A);航站楼建筑物内旅客过夜用房区域的最大 Z 振级和二次结构噪声分别为 66.4 dB和 36.2 dB(A),均满足标准 GB 10070-1988 和 JGJ/T 170-2009规定的限值。

参考文献:

- [1] 中共中央,国务院. 国家综合立体交通网规划纲要[Z]. 国务院公报,2021年第8号.
Central Committee of the Communist Party of China, State Council. Outline of the National Integrated Three-dimensional Transportation Network [Z]. State Council Bulletin, No. 8, 2021.
- [2] 颜锋,祁跃,何连华,等. 北京大兴国际机场的列车振动影响研究[J]. 建筑科学, 2017, 33(5): 8-13.
YAN Feng, QI Yue, HE Lianhua, et al. Study on the Vibration Induced by High Speed Train in Beijing Daxing International Airport [J]. Building Science, 2017, 33(5): 8-13.
- [3] 黄世明. 轨道交通与建筑物共建结构车致振动舒适度评价[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2013.
HUANG Shiming. Comfort Evaluation of Vehicle-induced Vibration of Rail Transit and Building Co-construction Structure [D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2013.
- [4] 张凌,雷晓燕,冯青松,等. 高铁综合交通枢纽车站结构振动传播的测试分析[J]. 中国科学: 技术科学, 2019, 49(9): 1107-1116.
ZHANG Ling, LEI Xiaoyan, FENG Qingsong, et al. An Experimental Study on the Vibration Propagation of High-speed Railway Integrated Transportation Hub Station Structure[J]. Scientia Sinica (Technologica), 2019, 49(9): 1107-1116.
- [5] 谢伟平,袁葵,孙亮明. 地铁车辆段上盖建筑车致振动试验[J]. 建筑科学与工程学报, 2020, 37(3): 99-107.
XIE Weiping, YUAN Kui, SUN Liangming. Train-induced Vibration Test of Metro Depot Over-track Buildings[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2020, 37(3): 99-107.
- [6] YANG Jianjin, ZHU Shengyang, ZHAI Wanning, et al. Prediction and Mitigation of Train-induced Vibrations of Large-scale Building Constructed on Subway Tunnel [J]. Science of the Total Environment, 2019, 668: 485-499.
- [7] SADEGHI J, ESMAEILI M H. Safe Distance of Cultural and Historical Buildings from Subway Lines [J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2017, 96: 89-103.
- [8] 代丰,杨吉忠,冯读贝,等. 400 km/h 高速铁路车致环境振动预测方法和控制技术研究现状与展望[J]. 高速铁路技术, 2022, 13(4): 36-39.
DAI Feng, YANG Jizhong, FENG Dubei, et al. Research Status and Outlook of Prediction Method and Control Technologies for Train-induced Environmental Vibration for 400 km/h High-speed Railways [J]. High Speed Railway Technology, 2022, 13(4): 36-39.
- [9] 牛建青,金旭炜,杨吉忠,等. 成都至自贡高速铁路引入天府机场方案分析[J]. 高速铁路技术, 2022, 13(2): 80-85.
NIU Jianqing, JIN Xuwei, YANG Jizhong, et al. Scheme Analysis of Introducing Chengdu-Zigong High-speed Railway into Chengdu Tianfu International Airport[J]. High Speed Railway Technology, 2022, 13(2): 80-85.
- [10] TB/T 3352-2014 高速铁路无砟轨道不平顺谱[S].
TB/T 3352-2014 PSD of Ballastless Track Irregularities of High-speed Railway [S].
- [11] 刘晶波,谷音,杜义欣. 一致粘弹性人工边界及粘弹性边界单元[J]. 岩土工程学报, 2006, 28(9): 1070-1075.
LIU Jingbo, GU Yin, DU Yixin. Consistent Viscous-spring Artificial Boundaries and Viscous-spring Boundary Elements [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2006, 28(9): 1070-1075.
- [12] GB 10070-1988 城市区域环境振动标准[S].
GB 10070-1988 Standard of Environmental Vibration in Urban Area [S].
- [13] JGJ/T 170-2009 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[S].
JGJ/T 170-2009 Standard for Limit and Measuring Method of Building Vibration and Secondary Noise Caused by Urban Rail Transit [S].