

民航机发〔2023〕2号

民航局机场司关于印发《铁路、城市轨道交通 下穿机场航站区影响分析研究》的通知

民航各地区管理局，各运输机场公司，各运输航空公司，质监总站：

为贯彻落实“平安、绿色、智慧、人文”四型机场建设发展理念，进一步拓展规划设计思路，便利旅客出行、提升旅客出行体验，机场司组织编制了《铁路、城市轨道交通下穿机场航站区影响分析研究》（IB-CA-2023-01），现予以发布，供各单位参考。

该信息通告的电子版可在民航局网站“机场司——政策发

布”一栏下载。

民航局机场司

2023年1月17日



信息通告

中国民用航空局机场司

编号：IB-CA-2023-01

下发日期：2023年1月17日

铁路、城市轨道交通下穿 机场航站区影响分析研究

前言

为贯彻落实“平安、绿色、智慧、人文”四型机场建设发展理念，进一步拓展规划设计思路，便利旅客出行、提升出行体验，民航局机场司组织成立编写组，依托2020年度民航安全能力建设资金项目“空铁联运模式下铁路穿越对机场的影响及安全保障技术研究”，对国内轨道交通、城际、高铁等穿越机场航站区的工程建设案例进行了研究分析，并对国内外相关标准和技术规范的控制指标进行了梳理，供相关单位在机场规划、设计、施工和运营时参考。

在相关工程案例资料收集整理和技术评审过程中，感谢首都机场集团、上海机场集团、四川机场集团、民航规划设计总院等单位的大力支持和帮助。

主编单位：湖南机场股份有限公司

中铁二院工程集团有限公司

参编单位：民航中南机场设计研究院（广州）有限公司

湖南省轨道勘察设计有限公司

哈尔滨工业大学

主 编：洪 鑫 金旭炜

参编人员：徐爱民 王兆有 邱团结 杨吉忠 冯读贝

陈志贤 蒋 尧 陈以庭 曾志强 戴小罡

吕勇刚 屠潇宇 陈钦文 张海涛 李 军

邓娟红 刘舫泊 张 震 邓 昆 王 建

主 审：姜昌山 王晓鸿

审查人员：郑 斐 任守贵 朱亚杰 钟选明 蔡 琪
张 楠 肖军华 赵东平 赵旭伟 张雅丽
李 岳 周 全 张 昆 侯振宇 段学科

目 录

1. 概 述	1
1.1 研究背景	1
1.2 主要技术问题	2
1.3 研究内容	3
2. 航站区车致振动控制标准及措施	5
2.1 航站区振动控制标准	6
2.1.1 国内标准	7
2.1.2 国外标准	12
2.1.3 各标准的对比	18
2.1.4 标准选取原则	20
2.2 地铁、城际铁路下穿北京大兴国际机场	21
2.2.1 工程概况	21
2.2.2 振动控制措施	22
2.2.3 小结	31
2.3 地铁、城际下穿厦门新机场	32
2.3.1 工程概况	32
2.3.2 振动控制措施	33
2.3.3 小结	39
2.4 济青高铁下穿青岛胶东国际机场	40
2.4.1 工程概况	40
2.4.2 振动控制措施	41
2.4.3 小结	46

2.5 成自高铁下穿成都天府国际机场	47
2.5.1 工程概况	47
2.5.2 振动控制措施	48
2.5.3 小结	52
2.6 汉孝城际、地铁下穿武汉天河国际机场	52
2.6.1 工程概况	52
2.6.2 振动控制措施	53
2.6.3 小结	55
2.7 南凭高铁、地铁下穿南宁吴圩国际机场	55
2.7.1 工程概况	55
2.7.2 振动控制措施	57
2.7.3 小结	62
3. 机场地下高铁站气动效应评估及措施	64
3.1 概述	64
3.2 海口美兰机场站	64
3.2.1 工程概况	64
3.2.2 气动效应仿真分析	66
3.2.3 气动效应控制措施	67
3.3 南宁吴圩机场站	68
3.3.1 工程概况	68
3.3.2 气动效应现场试验	69
3.3.3 气动效应控制措施	71
3.4 成都天府机场站	73
3.4.1 工程概况	73

3.4.2 气动效应仿真分析	74
3.4.3 气动效应控制措施	75
3.5 北京大兴机场站	76
3.5.1 工程概况	76
3.5.2 气动效应数值分析	77
3.6 小结	81
4. 信息共享、标识标牌、安检值机及坐标系	83
4.1 信息共享	83
4.2 标识标牌	85
4.2.1 上海虹桥综合交通枢纽标识标牌案例	85
4.2.2 北京大兴国际机场综合交通枢纽标识标牌案例	91
4.3 安检值机	95
4.4 坐标系	97
5. 总结与建议	99
5.1 总结	99
5.2 建议	100
6. 参考文献	103

1. 概述

1.1 研究背景

空铁、空轨联运综合交通枢纽的建设发展，是提高交通运输效率、优化运输结构、实现交通运输战略性转型的关键环节，是顺应国家大型基础设施布局与战略的重要方向。《中华人民共和国国民经济和社会发展第十四个五年规划和 2035 年远景目标纲要》提出，要加快建设交通强国，建设现代化综合交通运输体系，推进各种运输方式一体化融合发展，构建多层次、一体化综合交通枢纽系统，提高网络效应和运营效率^[1]。

《国家综合立体交通网规划纲要》提出：“加强干线铁路、城际铁路、市域（郊）铁路、城市轨道交通规划与机场布局规划的衔接，国际航空枢纽基本实现 2 条以上轨道交通衔接”，要求综合交通枢纽遵照“统一规划、统一设计、统一建设、协同管理”的原则，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。

近年来，我国不断强化枢纽机场联通轨道交通的实践探索，部分机场已经建设或规划了联通干线铁路、城际铁路、城市轨道交通等集疏运系统，通达性进一步提高。“枢纽机场轨道交通接入率须达到 80% 以上”已写入《现代综合交通枢纽体系“十四五”发展规划》，一体化建设将极大地提升旅客体验，但也为空铁、空轨联运综合交通枢纽的建设工作提出了前所未有的技术挑战，通过下穿式布局引入机场综合交通枢纽的

铁路和城市轨道交通，往往与机场航站楼、综合交通枢纽换乘中心（简称“GTC”）、酒店、办公楼等建筑物存在结构上的共板、共柱或共基础等强连接关系，铁路运行引起的轮轨振动，特别是高铁正线不停站通过时的高速轮轨动态作用引起的振动，会通过结构上的强连接节点传递至上部结构中，对航站区建筑物内旅客、工作人员及设施设备产生振动与二次结构噪声影响。同时，列车高速穿越地下车站时产生的气动效应可能会导致站内设施破损、掉落等，还会带来振动及噪声影响，降低旅客出行体验。在解决好“硬联通”的同时，空铁信息共享、标识标牌与安检值机等“软联通”环节仍然有一定提升空间。为更好地满足旅客个性化、多样化、高品质的出行需要，在规划、设计、施工及运营过程中应采取系列工程措施，打造环境友好型的“零换乘、一体化”空铁联运综合交通枢纽，是推进综合交通枢纽一体化建设的关键。

本通告对城市轨道交通、铁路下穿机场航站区，特别是高铁正线不停站通过航站楼、GTC、酒店、办公楼、地下站房等引起的轮轨振动及气动效应的影响进行了调研及仿真分析，综合近年来在建及运营的下穿式布局空铁联运项目的经验和问题，对铁路下穿航站区时存在的系列问题进行了梳理并提出了建议，为铁路、轨道交通下穿机场航站区的规划设计和建设实施提供参考和借鉴。

1.2 主要技术问题

为进一步提升旅客的出行便捷性，实现“零距离换乘”，铁路、城市轨道交通与航站区结构的联系将不可避免的更加紧

密，结构间的高度融合，也将带来更严重的振动、噪声及空气动力的影响。同时，铁路、城市轨道交通与航空的融合，对设计与运营提出了更多挑战。

(1) 在复杂空铁联运综合交通枢纽中，铁路、城市轨道交通引入机场，形成密不可分的空间高度融合、结构高度复杂的大型综合体。列车运行时，因轨道不平顺激发的轮轨动荷载使车辆-轨道系统产生振动，振动经由轨道结构、铁路与机场建筑共构联节点等向上部建筑物传播，这种振动对人的正常工作、休息，对建筑结构的安全及精密仪器设备的使用等都将产生不同程度的影响。

(2) 列车高速通过空铁联运地下车站时，由于隧道空间限制和车体对空气的拖曳挤压作用，将在隧道内产生强烈的压力波动，形成列车风和微压波等空气动力学效应，从而引起影响列车运行安全、建（构）筑物舒适度及设备正常使用的问题。

(3) 铁路、城市轨道交通与机场航站区分别属于不同的管理系统，无论设计阶段的坐标系，还是运营阶段的信息共享、安检值机、标识标牌，各系统之间均存在一定差异。有效融合协调铁路与航空系统在坐标系、信息共享、安检值机、标识标牌等方面的关键设计要素，是实现“空铁融合”的重要课题。

1.3 研究内容

为保证铁路、城市轨道交通下穿航站区的振动噪声舒适度及气动结构安全与舒适度，本通告开展了以下研究：

(1) 针对铁路、城市轨道交通下穿机场航站区对航站楼、GTC、机场旅客过夜用房等建筑物带来的振动和噪声等问题，首

先对国内外相关标准进行梳理，提出了铁路与城市轨道交通下穿航站区振动噪声评价标准选取的原则。其次从铁路与航站区建筑结构关系、下穿航站区振动预测与评估、振动控制措施等方面，对北京大兴国际机场、厦门新机场、青岛胶东国际机场、成都天府国际机场、武汉天河国际机场等有铁路及地铁下穿机场航站区案例进行分析，总结轨道减振、建筑隔振支座、结构共构脱离等方法对航站区车致振动的控制效果。

(2) 针对列车高速通过空铁联运地下车站时诱发的气动效应问题，通过分析海南东环铁路下穿海口美兰机场、南凭高铁下穿南宁吴圩机场、成自高铁下穿成都天府机场、京雄高铁下穿北京大兴机场等典型案例的研究成果，总结了缓解列车高速过站气动效应的工程措施。

(3) 针对铁路、城市轨道交通与机场航站区从设计到运营阶段面临的坐标系、信息平台、安检值机、标识标牌等不协调、不融合的问题，采用案例分析与归纳总结的方法，研究了空铁联运信息共享的基本模式及坐标系等关键要素的协调融合策略。

2. 航站区车致振动控制标准及措施

目前，国内外减隔振措施主要有振源减振、传播路径隔振、建筑物被动隔振和其他振动控制措施等。

(1) 振源减振。主要考虑列车和轨道两个方面：a、车辆轻型化、轴重合理配置、一二系减振系统优化及车轮平滑等；b、轨道可以采用无缝线路、大半径设计、减振扣件及减振道床^[2]。地铁线路一般采用浮置板轨道来降低振动的影响，其隔振频率约 10Hz~15Hz，隔振效果可达 25dB~40dB^[3]，适用于上盖建筑物隔振要求较高的区域，如医院、博物馆、高校实验室等场所。由于高铁对轨道变形要求较高^[4]，且受轨道结构高度的限制，因此减振道床隔振频率较高，一般为 20Hz~30Hz，其减振效果有限，且当前我国只在 300km/h 及以下线路有应用经验，尚缺乏 300km/h 以上减振轨道的应用案例和经验；同时，道岔区减振道床技术依然是空白。

(2) 传播路径隔振。在振动传播路径上布设隔振措施，如连续屏障（隔振空沟和连续墙）和非连续屏障（排孔和排桩）等，通过阻断振动波的有效传递，使振动产生的能量尽可能少地传递到敏感目标上。

(3) 建筑物被动隔振。常见的建筑物被动隔振措施有建筑结构分缝、隔振垫、隔振支座和浮置楼板等，使用被动隔振措施将敏感目标隔离起来，减少振动对建筑物的传递，同时，可结合阻尼器等措施，耗散振动能量。

(4) 其他振动控制方法。因楼层结构的固有频谱排列较

密，而铁路引起的振动频率范围较宽，易引起共振。根据列车和轨道设计参数、运行速度、隧道和车站设计及地质状况等条件，在结构设计时，合理确定上盖建（构）筑物平面尺寸、柱网形式、梁板刚度等，可把结构的振幅控制在合理范围内^[5]。

铁路下穿航站区上盖建（构）筑物的影响主要表现在振动和二次结构噪声超标，而人体往往对二次结构噪声的感知更为敏感，这也是国内地铁运营过程中居民投诉的重点，二次结构噪声是一种低频噪声，其频率范围为 16Hz~200Hz，室内隔声、吸声等降噪措施成本高且不易控制，通过振源减振及建筑隔振依然是当前最有效且性价比高的方式。

2.1 航站区振动控制标准

我国地铁的运营经验表明，若上盖建筑物与地铁隧道结构相距较近，易引起居民的投诉。当前，国内外针对地铁引起的建筑物振动与二次结构噪声测试方法、标准限值及控制措施的研究成果较为丰富。我国铁路根据铁路安全保护区划定原则及沿线声环境质量保护原则，对线路中心线外侧 30m 范围内的住宅实施拆迁或置换处置，而铁路车站及“铁路干线道路两侧”的振动限值要求较宽松。

机场航站区一般设置有 VIP 旅客休息区、旅客过夜用房、办公用房等对振动和二次结构噪声较为敏感的场所，针对城市轨道交通、铁路下穿机场建筑物引起的振动及二次结构噪声尚无明确的标准可以执行，若继续采用铁路车站 80dB 的振动限值，显然无法满足民航旅客的高品质出行需求，而标准限值决定着工程实施难度与费用，应根据机场上盖建（构）筑物的使

用功能和特点来研究选用不同的控制标准，因此，亟需制定适用于空铁联运工程的振动和二次结构噪声标准。

2.1.1 国内标准

(1) 城市轨道交通引起的建筑物振动与二次辐射噪声限值及其测量方法标准

住房和城乡建设部于2009年发布的《城市轨道交通引起的建筑物振动与二次辐射噪声限值及其测量方法标准》（JGJ/T 170-2009），以振动舒适度为指标对轨道交通引起的敏感建筑物振动水平进行评价，振动关注的频率范围为4Hz~200Hz，评价量要求为三分之一倍频程中心频率上的最大振动加速度级（简称分频最大振级），具体限值如表2.1-1所示。

表 2.1-1 建筑物室内振动限值

区域分类	适用范围	振动限值/dB	
		昼间 (06:00~22:00)	夜间 (22:00~06:00)
0类	特殊住宅区	65	62
1类	居民、文教区	65	62
2类	混合区、商业中心区	70	67
3类	工业集中区	75	72
4类	交通干线道路两侧	75	72

该标准采用不同频率垂向振动计权因子对振动加速度级修正，即为计权振动加速度级，定义为：

$$VL = 20\log\left(\frac{a_{rms}}{a_0}\right)$$

式中： VL —代表计权振动加速度级； a_0 —代表基准加速度，为 $10^{-6}m/s^2$ ； a_{rms} —代表频率计权振动加速度，计权加速度的计算公式为：

$$a_{rms} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T a_w^2(t) dt}$$

式中： T —代表振动过程的平均时间； $a_w(t)$ —代表随时间变化的频率计权振动加速度。其计算过程中采用的 Z 计权因子如表 2.1-2 所示。

表 2.1-2 加速度在三分之一倍频程中心频率的 Z 计权因子

1/3 倍频程中心频率 (Hz)	4	5	6.3	8	10	12.5	16	20	25
计权因子 (dB)	0	0	0	0	0	-1	-2	-4	-6
1/3 倍频程中心频率 (Hz)	31.5	40	50	63	80	100	125	160	200
计权因子 (dB)	-8	-10	-12	-14	-17	-21	-25	-30	-36

(2) 城市区域环境振动标准

我国《城市区域环境振动标准》(GB 10070-1988)规定城市各类区域铅垂向 Z 振级标准值列于表 2.1-3。GB/T 10070-1988 没有单个中心频率上振动强度限值。1/3 倍频程中心频率上的振动加速度限值可参照《住宅建筑室内振动限值及其测量方法标准》(GB/T 50335-2005)。

表 2.1-3 城市各类区域铅垂向 Z 振级标准值

适用地带范围	振动限值/dB	
	昼间	夜间
特殊住宅区	65	65
居民、文教区	70	67
混合区、商业中心区	75	72
工业集中区	75	72
交通干线道路两侧	75	72
铁路干线道路两侧	80	80

如表 2.1-3 所示，“特殊住宅区”是指特别需要安宁的住宅区，因此航站区高低标酒店及空管塔台等可参照此类标准执行；“居民、文教区”是指纯居民区和文教、机关区，航站区

办公室、休息区及进出关等重要区域等可参考该类标准；“混合区”是指一般商业与居民混合区，工业、商业、少量交通与居民混合区，航站区商业、安检、一般候机等区域可参照该类标准执行；“商业中心区”是指商业集中的繁华区域；“工业集中区”是指在一个城市或区域内规划明确确定的工业区；

“交通干线道路两侧”是指车流量每小时 100 辆以上的道路两侧，GTC 换乘空间可参照该类标准执行。

近年来，环保部门开始使用新的《环境振动标准》来代替 GB 10070-1988 和 GB 10071-1988，如表 2.1-4 所示。新标准规定评价指标为 1/3 倍频程中心频率最大振动加速度级，或称分频最大振动级。

表 2.1-4 《环境振动标准》（征求意见稿）规定的 Z 振级容许值

振动环境功能区类别	昼间/dB	夜间/dB	适用地带说明
0 类	65	65	康复疗养区等具有较高环境振动保护要求的区域
1 类	70	65	以居民住宅、医疗卫生、文化教育、科研设计、行政办公为主要功能，具有一定振动环境保护要求的区域
2 类	75	70	以商业金融、集市农贸为主要功能，或者居住、商业、工业混杂，具有一定环境振动保护要求的区域
3 类	75	70	以工业生产、仓储物流为主要功能，需要放置工业振源振动对周围环境产生严重影响的区域
4a 类	75	70	高级公路，一级公路、二级公路、城市快速路、城市主干路、城市次干路、内河航道、城市轨道交通两侧区域
4b 类	80	80	铁路干线两侧区域

（3）建筑工程容许振动标准

《建筑工程容许振动标准》（GB 50868-2013）在参考 ISO 2631 的基础上，提出建筑物内人体舒适性容许振动计权加速度

级，规定交通振动对建筑物内人体舒适性影响的评价频率范围应为 1Hz~80Hz，评价位置应取建筑物室内地面中央或室内地面敏感处。交通引起的振动对建筑物内人体舒适性影响的评价，应附加采用竖向四次方振动剂量值，竖向四次方振动剂量值应按下式计算：

$$VDV_z = \left[\int_0^T a_{zw}^4(t) dt \right]^{\frac{1}{4}}$$

式中， VDV_z —为竖向四次方振动剂量值， $m/s^{1.75}$ ； $a_{zw}(t)$ —为现行国家标准 GB/T13441.1 规定的基本频率计权 W_k 进行计权的瞬时竖向加速度， m/s^2 ； T —为昼间或夜间时间长度， s ； t —为时间， s 。

交通振动对建筑物内人体舒适性影响的容许振动值，宜按下表 2.1-5 的规定确定。

表 2.1-5 ISO 2631/2 关于建筑物振动限值的建议

建筑物类型	时间	容许竖向四次方振动剂量值($m/s^{1.75}$)
居住建筑	昼间	0.2
	夜间	0.1
办公建筑	昼间	0.4
车间办公区	昼间	0.8

(4) 机械振动与冲击人体暴露于全身振动的评价标准 GB/T 13441.1-2007

机械振动与冲击人体暴露于全身振动的评价第一部分：一般要求 GB/T 13441.1-2007 规范与 ISO 2631-1: 1997 的一致性为等同，ISO 2631 是目前振动舒适度领域应用广泛的标准。该标准规定振动评价分为基本评价方法和补充评价方法。

1) 用计权均方根加速度的基本评价方法

基本评价方法采用计权均方根加速度:

$$a_{rms} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T a_w^0(t) dt}$$

式中, $a_w(t)$ —为时间函数的计权加速度, m/s^2 ; T —为测量时间长度, s 。

2) 基本评价方法的适用性

波峰因数定义为以频率计权加速度信号的最大瞬时峰值与其均方根值的比的模。对波峰因数小于或等于 9 的振动, 基本评价方法一般是有效的。

3) 基本评价方法不适用时的附加评价方法

在基本评价方法可能会低估振动影响(高的波峰因数、偶然性冲击、瞬态振动等)的情况下, 应采用如下所述的任何一种替代方法, 包括运行均方根或者四次方振动剂量值。

① 运行均方根评价方法

运行均方根评价方法通过使用一个短的积分时间常数来考虑偶然性冲击和瞬态振动。定义振动幅值为最大瞬时振动值(MTVV), 由 $a_w(t_0)$ 的时间历程上的最大值给定。

$$a_w(t_0) = \sqrt{\frac{1}{\tau} \int_{t_0-\tau}^{t_0} a_w^2(t) dt}$$

式中, $a_w(t)$ —为瞬时频率计权加速度, m/s^2 ; τ —为运行平均积分时间, s ; t_0 —为观测时间(瞬时时间), s 。

最大瞬时振动值 MTVV 定义为:

$$MTVV = \max(a_w(t_0))$$

在测量 MTVV 时，推荐使用 $\tau=1s$ 。

②四次方振动计量值（VDV，单位为 $m/s^{1.75}$ ），其定义为：

$$VDV_Z = \left[\int_0^T a_{zw}^4(t) dt \right]^{\frac{1}{4}}$$

式中， $a_{zw}(t)$ 一为瞬时频率计权加速度， m/s^2 ；T一为测量时间长度。

测量时间长度应能充分保证合理的数据统计精度。测量长度对于 1Hz 的下限频率（LLF）至少需要 108s 的测量时间长度，对于 0.5Hz 的 LLF 至少需要 227s 的测量时间长度。

2.1.2 国外标准

（1）国际化组织标准

目前，世界各国、各行业制定的建筑物内振动控制标准，主要以《机械振动与冲击人体暴露于全身振动的评价第 1 部分：一般要求》（ISO 2631-1:1997）和《机械振动与冲击人体暴露于全身振动的评价第 2 部分：建筑物内的振动（1 Hz~80 Hz）》（ISO 2631-2:2003）为基础。ISO 2631-1:1997 提供振动对人体健康、感知、舒适性的可能影响指南。其中，对于振动感知评价，主要分为可能感知振动和不可能感知振动 2 级。对于在公共交通系统中综合振动总值的舒适性评价，按没有不舒适、有一些不舒适、比较不舒适、不舒适、很不舒适、极不舒适分为 6 级。对于不同振动量值的舒适性反应，主要取决于经历时长、活动类型（如走动、静止）以及其他因素（温度、噪

声)等。ISO 2631-2:2003 主要提供建筑物内人体全身振动与冲击的测量和评价方法。ISO 2631-2:1989 给出了建筑物内 X、Y、Z 轴加速度均方根的基准曲线, 以及不同功能、不同时间相对于基准曲线的修正系数, 换算后得到相应的允许振级, 如表 2.1-6 所示。但 ISO 2631-2:2003 不再保留相关的基准曲线, 当建筑物的振动幅值稍微超过正常感知值时, 即可认为可能引起建筑物内人体的不舒适感。

表 2.1-6 建筑物内不同功能和不同时间对应的允许振级

建筑类型	时间	允许振级/dB	
		连续振动、间歇振动和重复性脉冲冲击	1 天只发生大约 3 次的脉冲冲击
严格工作区 (手术室、精密实验室等)	全天	74	74
	昼间	80~86	110~113
居民楼	夜间	77	77~100
	全天	86	116
办公室	全天	92	116

(2) 英国标准

《人体暴露在建筑物内振动的的评价指南 (0.5Hz~80Hz)》(BS 6472-1: 2008), 提出连续振动、间歇振动和冲击振动的评价方法, 包括人体暴露在旅客列车引起的建筑物内振动的舒适度评价。BS 6472-1: 2008 对建筑物内振动评价采用四次方振动剂量值 (VDV), 即用加速度时间历程的四次方代替平方作为计算平均的基础。这种评价方法对振动峰值更为敏感, 单位为 $m/s^{1.75}$ 或 $rad/s^{1.75}$ 。BS 6472-1: 2008 规定的 VDV 值如表 2.1-7 所示。由于人体对振动的敏感程度和振动环境的期望存在很大差异, 表 2.1-7 给出的 VDV 值由区间范围表示。

表 2.1-7 BS6472-1: 2008 规定的 VDV 值

适用地点范围	时间/h	抱怨可能性小 */m/s ^{1.75}	有可能抱怨/ m/s ^{1.75}	抱怨可能性 大**/m/s ^{1.75}
住宅	16 (昼间)	0.2~0.4	0.4~0.8	0.8~1.6
办公室	16 (昼间)	0.4~0.8	0.8~1.6	1.6~3.2
车间	16 (昼间)	0.8~1.6	1.6~3.2	3.2~6.4
住宅	8 (昼间)	0.1~0.2	0.2~0.4	0.4~0.8

注: *表示低于这些范围不大可能产生抱怨, **表示高于这些范围可能产生抱怨。

(3) 德国标准

德国标准主要采用等感值 **KB** 来表示振动的严重程度, **KB** 值由计权振动速度表示。不同 **KB** 值对应不同的感知度级别, 感知度分为感觉不到、非常弱、弱、适中、强、很强六个层次。

德国标准 DIN 4150-2-1999 中评价指标包括最大计权振动强度 **KBFmax** 和评估振动值 **KBFTr**。表 2.1-8 给出了该规范规定的人在住宅区和其他区域建筑物内受振动影响时振动容许值。振动评价包括两个阶段: 第一阶段, 若 **KBFmax** ≤ **Au**, 满足要求; 若 **KBFmax** > **Au**, 不满足要求; 第二阶段, 对于 **KBFmax** ≤ **A0** 的情况, 只有当 **KBFTr** ≤ **Ar** 时才满足要求。

表 2.1-8 DIN4150-2-1999 规定的评估振动在建筑物内的参考值

建筑所在区域	昼间 (6: 00~22: 00)			夜间 (22: 00~6: 00)		
	Au	A0	Ar	Au	A0	Ar
纯工业区	0.4	6	0.2	0.3	0.6	0.15
以商业区为主	0.3	6	0.15	0.2	0.4	0.1
非商业非住宅区	0.2	5	0.1	0.15	0.3	0.07
主要居住区	0.15	3	0.07	0.1	0.2	0.05
特殊区域 (如医院)	0.1	3	0.05	0.1	0.15	0.05

德国标准《建筑物振动的影响》(DIN 4150-3:1999), 根

据建筑结构对振动的敏感性将建筑分为商业用途、住宅区和敏感建筑三类。该标准给出了每类建筑在发生连续振动和非连续振动时不同振动频率范围内峰值振动速度的上限值。如表 2.1-9 所示。

表 2.1-9 DIN 4150-3: 1999 对影响建筑物正常使用的振动速度限值

建筑物类型	建筑物基础部分：非连续振动			建筑物顶层	
	1 Hz ~10 Hz	10 Hz ~250 Hz	50 Hz ~100 Hz	非连续 振动	连续振 动
第 1 类 商业用途类	20	20~40	40~50	40	10
第 2 类 住宅区类	5	5~15	15~20	15	5
第 3 类 敏感建筑类	3	3~8	8~10	8	2.5

(4) 美国标准

规范 FRA (2005) 和 FTA (2006) 推荐采用三阶段预测评价交通环境振动，其中在第二阶段，分别给出了公共交通和高速地面交通对不同类别建筑物的影响限值，如表 2.1-10 所示。

表 2.1-10 FTA 对建筑物室内振动的限值规定

一般建筑房间类别	振动速度有效值允许值/dB		
	一天内振动时间发生的频率		
	>70 次	30 次~70 次	<30 次
影响室内人、仪器、设备正常工作的房间	65	65	65
振动会影响人的睡眠的卧室	72	75	80
主要在白天使用的房间	75	78	83
特殊建筑房间类别	一天振动事件发生的频率		
	>70 次	<70 次	
	音乐厅、电视工作室、录音工作室	65	65
礼堂、剧院	72	80	

规范选用最大速度级作为评价指标，分析时间为 1s，参考速度为 $1 \mu \text{in/s}$ ， $1 \text{in}=25.4 \text{mm}$ 。

美国对不同建筑物内振动限值有明确规定，特别是针对轨道交通，美国运输部联邦公共交通管理局《联邦公共交通工程环境影响评价指南》采用列车通过时的最大示数作为评价量，根据列车运行时间间隔，分频率事件、偶然事件和非经常事件。不同列车运行间隔下各类建筑振动控制标准值如表 2.1-11 所示。

表 2.1-11 各类建筑物振动控制标准值

适用建筑类型	振动速度级/dB		
	频率事件	偶然事件	非经常事件
高敏感类（1类）	65	65	65
居住区（2类）	72	75	80
其他建筑（3类）	75	78	83

美国钢结构协会发布的钢结构设计 AISC-11 “人类活动引起的楼面振动”的目的，是为由人类活动引起的钢框架楼面系统和人行天桥的振动舒适性问题提供基本设计原则和方法。该标准考虑了人的舒适度要求和特殊设备对振动的要求，也为存在振动问题的楼面系统提供补救措施和指导原则。它基于钢—混凝土组合楼面系统的动力反应提出适用于评判办公室、商场、室外人行天桥等类似环境的标准。

人对振动的反应是一个非常复杂的现象，与振动的幅值、周围的环境以及本人对振动的敏感程度都有关系。持续性振动比瞬时激励引起的振动更让人烦恼；人在嘈杂的场所因振动感到的烦恼阈值比安静环境要高一些；另外，人的年龄、身体状况等因素也对振动烦恼度影响很大，例如同一公寓中，住在五

十层的老年人对振动的感受与住在二层的年轻人有很大差别。

此外，人对振动的反应与当时的行为有很大关系。在办公室或住宅中工作或休息的人不喜欢能明确感受到的振动（峰值加速度约为 $0.5\%g$ ），但是参加某种活动的人可能就能接受 10 倍以上的振动（峰值加速度约为 $5\%g$ ）；在舞厅周围用餐，在健身房锻炼或是在商业区购物的人所能接受的振动大约介于两者之间（约 $1.5\%g$ ）。人在不同地方对振动的敏感程度还因振动持时和振源远近而不同。以上的这些限值针对频率在 $4\text{Hz}\sim 8\text{Hz}$ 之间的振动，对频率在这个范围之外的振动，人们能接受更高的峰值加速度，如图 2.1-1 所示。

该标准的加速度限值采用 ISO 2631-2(1989)推荐的基线标准。ISO 标准以均方根加速度形式给出基准曲线，AISC-11 在 ISO 基线的基础上乘以一定倍数作为不同振动环境的峰值加速度限值，这个倍数对办公室取 10，对商业区和室内步行桥取 30，对室外步行桥取 100。设计中，该倍数可以根据振动持时和振动频率在 0.8 倍~1.5 倍之间变动。

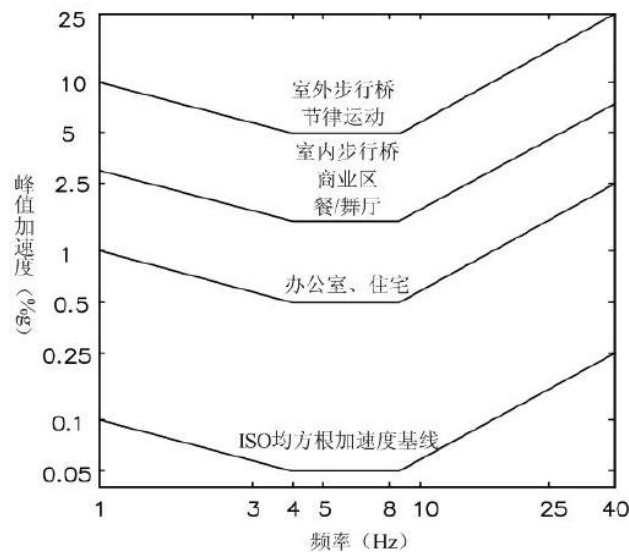


图 2.1-1 AISC 舒适度评价标准曲线

(5) 日本标准

日本工业标准调查会（JISC）发布的环境振动控制标准如表 2.1-12 所示。规范要求测点可布置在建筑物一层室内或建筑物基础距墙外 0.5m 处。评价指标为分频最大加速度振动级。

表 2.1-12 日本《环境振动控制法》对环境振动的要求

振动类型	场所划分	Z 振级 VL _Z /dB		场所划分说明
		白天	夜间	
工厂振动	第 1 类区域	60~65	55~60	第 1 类区域：为了保持良好的居住环境，需要保持安静的区域，以及为了提供居住使用而需要保持安静的区域。
	第 2 类区域	65~70	60~65	
道路交通	第 1 类区域	65	60	第 2 类区域：供居住用，兼供商业、工业等区域，为了保持这一区域内居民的生活环境而需要防止发生振动的区域；主要工业用区域等，为了不使这一区域的居民生活环境恶化而需要防止发生显著振动的区域。
	第 2 类区域	70	65	

2.1.3 各标准的对比

不同国家各类环境振动评价与控制标准的对比情况如表 2.1-13 所示。

表 2.1-13 环境振动评价与控制标准对比

评价对象	规范名称	发布单位	评价指标	目的
区域环境振动控制标准	《城市区域环境振动标准》(GB/T10070-1988)	环保部	铅垂向 Z 振级	控制城市区域环境污染,降低环境振动对居民居住、生活的影响。
	《城市区域环境振动测量方法》(GB/T10071-1988)		铅垂向 Z 振级	用于城市区域环境振动测量。
	《机械工业环境保护设计规范》(GB50894-2013)	住建部	铅垂向 Z 振级	工业振源产生的振动。
人体振动控制标准	《机械振动与冲击人体暴露于全身振动的评价第 1 部分:一般要求》(ISO2631-1: 1997)	ISO	频率计权均方根加速度、四次方振动剂量值 VDV	提供振动对人体健康、感知、舒适性的可能影响指南。
	《机械振动与冲击人体暴露于全身振动的评价第 2 部分:建筑物内的振动(1 Hz~8 Hz)》(ISO2631-2: 2003)		最大计权振动强度和评估振动值	提供建筑物内人体全身振动与冲击的测量和评价方法。
	《结构振动-第 2 部分:暴露在建筑物内的振动》(DIN4150-2 (1999-06))	德国	四次方振动剂量值	涵盖评估振动对结构影响的原则,以及建筑物对人员的影响。
建筑物振动评价与控制标准	《人体暴露在建筑物内振动的评价指南(0.5Hz~80Hz)》(BS6472-1: 2008)	英国	四次方振动剂量值	对人体暴露在旅客列车引起的建筑物内振动的舒适度进行评价。
	《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/T 170-2009)	住建部	分频最大振动加速度级	为规范城市轨道交通列车运行引起沿线建筑物振动与室内二次辐射噪声的限值及测量方法。
	《建筑物振动影响》(DIN4150-3:1999)	德国	峰值振动速度	提供评价振动对构筑物影响的原则。
	《高速环境交通噪声和振动影响评估》	美国	峰值振动速度	为评估高速地面运输项目产生的噪声和振动影响的方法和程序。
	《交通噪声和振动影响评估》(FTA-VA-90-1003-06)	美国	最大速度级	提供确定交通项目产生的噪声和振动预测方法及减振措施。
	《振动-振动对结构的影响》(SN 640312:2013-12)	瑞士	峰值振动速度	适用于公路和铁路交通等产生的冲击。
	《古建筑防工业振动技术规范》(GB/T50452-2008)	住建部	允许振动速度	适用于工业振动对古建筑影响的评估和防治。

2.1.4 标准选取原则

振动评价中关注的对象主要有三类：（1）处于振动环境中的人，主要评价其感知、舒适、健康等状况；（2）建（构）筑物本身，主要关注振动对结构安全性能的影响，使其不发生结构性损坏；（3）精密仪器设备，主要关注振动环境下其能否正常使用。

当轨道交通下穿航站区时，在确保结构安全和仪器设备正常使用的基础上，还需更多关注人的舒适度。舒适度是指人们对自身所处的客观环境从生理与心理方面所感受到的满意程度而进行的综合评价，主要是人的主观感觉，因人而异、且量化难度大。受各种因素及条件的影响，舒适度会因个体差异而呈现不同的结果。因此，舒适度往往不用于表征个体，而是反映大多数人对客观环境从生理与心理方面所达到的满意状态。

为了规范人体的振动环境，必须对人体所处的环境振动水平进行量化。在诸多振动响应指标中，加速度指标由于测量方便且人体对其较为敏感，所以应用较为广泛。目前各国舒适度标准多采用一定形式的加速度指标作为评价指标。代表性的主要有两类：（1）峰值加速度，其优点是便于量测、使用方便，缺点是未考虑人对不同频率振动敏感程度的差异性；（2）各种形式的频率计权加速度，如计权均方根加速度、振动剂量、单步均方根值等，主要以 ISO 系列规范 ISO 2631-1:1997、ISO 2631-2:2003、ISO 10137:2007 为代表。

评价建筑物安全性，一般以峰值振动速度和 VDV 为指标；精密仪器的正常使用以振动速度为评价指标。

振动评价根据评价对象区分，选取的原则分为环境场地振动控制标准、人体振动控制标准、建（构）筑物振动控制标准、精密仪器振动控制标准。

2.2 地铁、城际铁路下穿北京大兴国际机场

2.2.1 工程概况

北京大兴国际机场航站区总占地面积约 27.9 公顷，南北长 1753.4m，东西宽约 1591m。航站区主要包括航站楼及 GTC、停车楼和综合服务中心等三个主要建筑单元。轨道交通相关建筑面积约 120 万 m²。航站楼总建筑面积约 70 万 m²，GTC 总建筑面积约 8 万 m²，停车楼总建筑面积约 25 万 m²，综合服务中心总建筑面积约 10 万 m²。

航站楼混凝土结构南北长 996m，东西方向宽 1144m，由中央大厅、中央南和东北、东南、西北、西南五个指廊组成，中央大厅地下二层、地上五层，其他区地下一层，地上二~三层。地下一层为行李传送通道、机电管廊系统和预留的 APM 捷运通道，地下二层为高速铁路、地铁及轻轨通道。机场接入京雄城际、新机场地铁专线和廊涿城际铁路三条铁路和地铁线路，其中京雄城际设计速度为 350km/h，如图 2.2-1 所示。上部结构会在下部列车通过及进、出站时的轮轨载荷和列车风载荷作用下产生振动响应。大兴机场针对由此引发的振动影响以及相应的振动控制和减振措施，在规划和设计阶段均开展了系列研究^[6]。

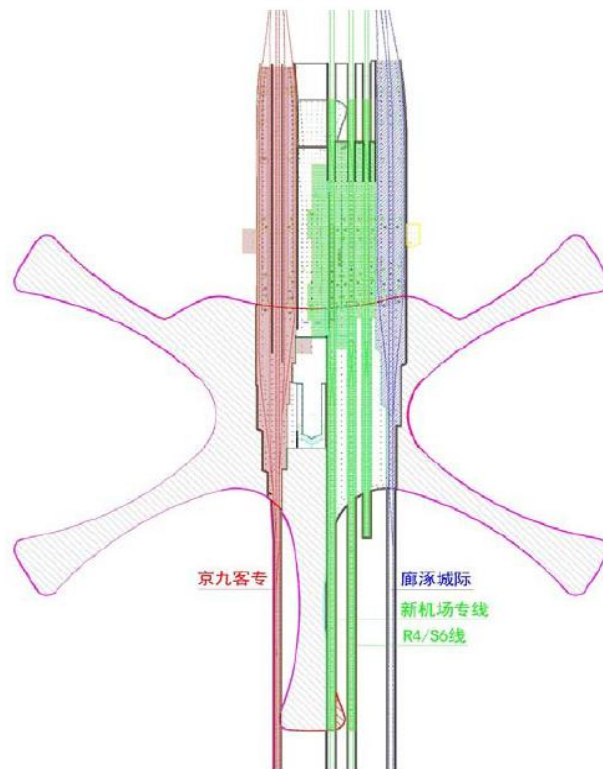


图 2.2-1 大兴机场下穿铁路与地上建筑交叉关系示意

2.2.2 振动控制措施

本工程主体结构采用钢筋混凝土框架结构，分为 19 个单元，单元之间的分缝在地下按伸缩缝和沉降缝设置，地上按抗震缝设置，混凝土柱网为 $9\text{m} \times 9\text{m}$ 和 $9\text{m} \times 18\text{m}$ 。中心区长宽两个方向的尺度较大（ $504\text{m} \times 462\text{m}$ ），建筑功能复杂，屋顶钢结构支承条件复杂，中心区整体采用隔震措施，在 ± 0.000 标高柱顶设置橡胶隔震支座。

(1) 仿真模型

采用 ANSYS 软件建立有限元模型。由于中心区、酒店、指廊之间采用结构缝分开，三部分之间不存在结构上的联系，故可以单独建立三个模型分别计算，以减小计算难度。所有模型均按照施工图纸建立了桩基和筏板，按照地勘报告建立了分层土体，土体最外侧为半无限粘弹性边界单元。航站楼中心区

的有限元模型如图 2.2-2 所示。

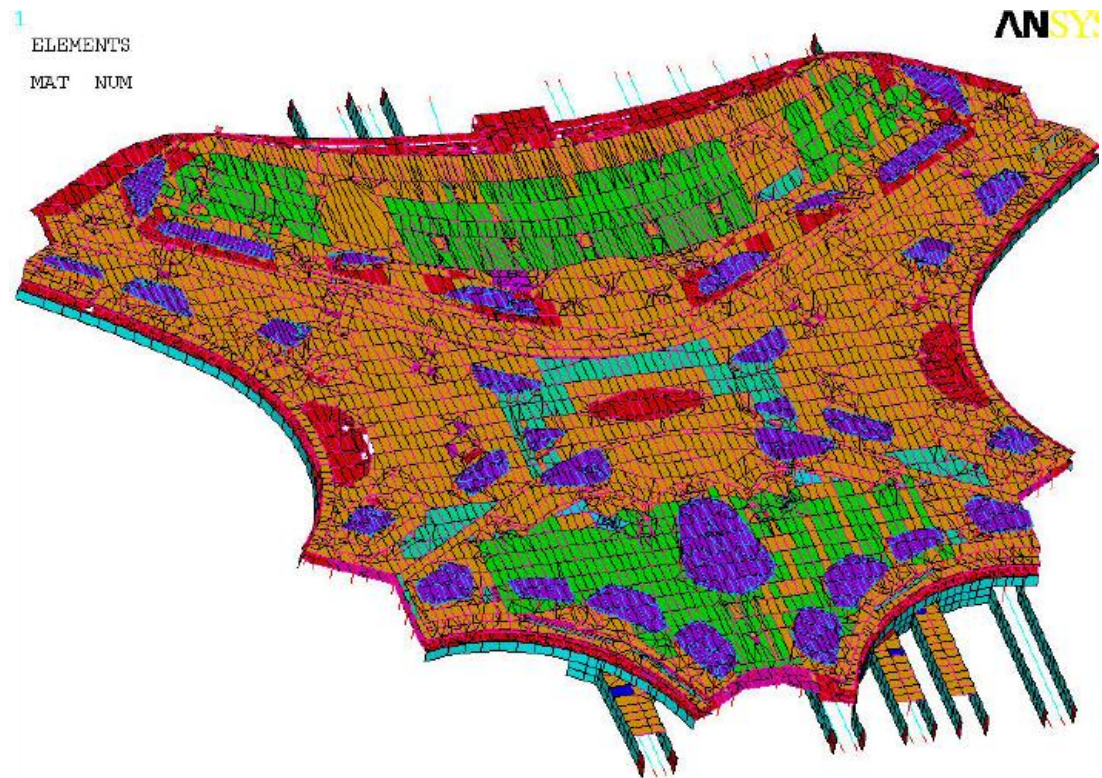


图 2.2-2 航站楼中心区有限元模型（上部结构及隧道）

（2）振动响应

研究团队通过仿真计算得出，当列车以 350km/h 的速度在中心区范围内通过和会车、以 250km/h 或 200km/h 的速度会车、减速进站、加速出站及三场同时会车或进站时，中心区部分区域的竖向加速度最大值大于 50mm/s^2 ，详见表 2.2-1。经过对各区域建筑功能的核对，加速度较大的区域包括办公区和长时间休息区等对舒适度要求较高区域（其中 F2 层要求较高区域不在超限范围内），如图 2.2-3 所示。该区域的主要频率响应在 4Hz~8Hz 之间，超过美国钢结构协会标准《人类活动引起的楼面振动》(AISC-11)中规定的舒适度限值 $0.5\%g$ (4-8Hz)，不满足舒适度要求。

表 2.2-1 中心区结构最大响应——加速度 (mm/s^2)

站场	工况	B1	F1	F2	F3	F4	F5
京霸场	350km/h 过站	93.99	55.28	62.17	98.63	81.14	29.64
	350km/h 会车	183.30	70.21	63.74	109.00	110.60	43.92
	250km/h 会车	88.49	53.39	51.13	58.68	57.12	28.39
	200km/h 会车	44.01	43.41	42.23	43.09	43.76	24.11
	进站	23.21	15.10	17.49	18.58	13.32	14.97
	出站	22.86	17.84	19.79	17.36	14.71	14.08
廊涿城际	进站	26.87	15.32	15.24	20.56	19.68	10.78
	出站	22.46	16.42	18.12	18.64	20.32	10.11
新机场快线	进站	29.83	12.98	24.80	25.44	24.36	17.95
	出站	27.26	17.74	26.40	24.12	27.35	21.50
三站场	同时会车/进站	183.30	70.23	63.76	109.10	110.68	33.98

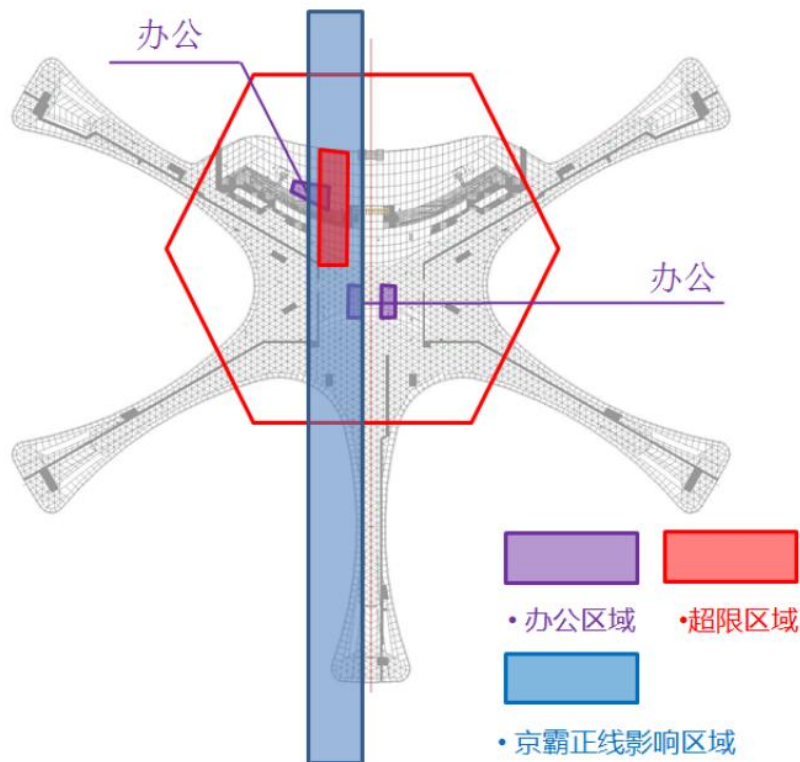


图 2.2-3 中心区 B1 层振动响应超限区域

当列车以 350km/h 的速度在中心区范围内通过、会车及以 250km/h 的速度会车时，中心区均存在部分区域的最大 Z 振级大于《城市区域环境振动标准》（GB10070-88）规定的容许值 72dB，不满足舒适度要求。

表 2.2-2 中心区结构最大 Z 振级 (dB) ——上入区域

站场	工况	B1	F1	F2	F3	F4	F5
京霸场	350km/h 过站	72.1	68.6	67.3	72.5	71.8	65.8
	350km/h 会车	74.4	69.4	71.2	73.9	73.5	66.4
	250km/h 会车	72.6	67.5	67.8	70.7	70.6	65.8
	200km/h 会车	66.6	66.5	66.4	66.5	66.7	65.5
	进站	65.4	64.9	64.9	65.1	64.8	64.9
	出站	65.4	65.0	65.2	64.9	65.0	64.7
廊涿城际	进站	65.7	64.6	64.6	65.3	65.7	64.2
	出站	65.3	64.8	65.0	65.1	65.7	64.0
新机场快线	进站	66.0	64.3	65.6	65.8	66.1	65.3
	出站	65.8	65.0	65.8	65.6	66.4	65.4
三站场	同时会车/进站	74.4	68.4	71.2	73.9	73.5	66.4

当列车以 350km/h 的速度在中心区范围内通过、会车及以 250km/h 的速度会车时，中心区均存在部分区域的最大竖向四次方振动剂量值大于《建筑工程容许振动标准》（GB50868-2013）规定的竖向四次方振动剂量容许值 $0.4\text{m/s}^{1.75}$ ，不满足舒适度要求。中心区其他区域在各工况下的加速度峰值和竖向四次方振动剂量值均满足规范关于振动舒适度的要求。

表 2.2-3 中心区结构最大竖向四次方振动剂量值 ($\text{m/s}^{1.75}$) ——上入区域

站场	工况	B1	F1	F2	F3	F4	F5
京霸场	350km/h 过站	0.20	0.13	0.13	0.31	0.58	0.38
	350km/h 会车	0.41	0.14	0.22	0.46	0.70	0.68
	250km/h 会车	0.20	0.12	0.12	0.25	0.41	0.35
	200km/h 会车	0.12	0.11	0.08	0.08	0.12	0.12
	进站	0.06	0.05	0.06	0.07	0.07	0.08
	出站	0.07	0.04	0.05	0.08	0.10	0.07
廊涿城际	进站	0.06	0.05	0.06	0.07	0.09	0.07
	出站	0.07	0.05	0.06	0.08	0.08	0.08
新机场快线	进站	0.07	0.06	0.07	0.08	0.10	0.07
	出站	0.07	0.07	0.07	0.09	0.09	0.06
三站场	同时会车/进站	0.41	0.14	0.22	0.46	0.70	0.68

酒店结构各层最大竖向加速度、最大 Z 振级及最大竖向四次方振动剂量值如表 2.2-4~表 2.2-6 所示。

当列车以 350km/h 的速度在酒店范围内通过、会车及以 250km/h 的速度会车时，酒店均存在部分区域的竖向加速度最大值大于 50mm/s^2 ，且主要频率响应在 4Hz~8Hz 之间，超过 AISC—11 中规定的舒适度限值 $0.5\%g$ （4Hz-8Hz），不满足舒适度要求，超限区域如图 2.2-4 所示。

表 2.2-4 酒店结构最大响应——加速度 (mm/s^2)

站场	工况	B1	F1	F1.5	F2	F3	F4	F5	F6
京霸场	350km/h 过站	18.21	50.49	48.99	49.94	54.95	55.73	62.98	50.97
	350km/h 会车	30.16	51.07	66.87	55.61	88.02	88.35	92.27	95.02
	250km/h 会车	27.08	43.23	48.69	44.58	59.39	52.63	58.00	65.91
	200km/h 会车	24.71	41.11	43.10	40.86	45.83	45.79	48.26	47.43
	进站	16.55	25.56	11.45	14.80	14.60	14.36	15.13	18.09
	出站	17.43	28.69	12.26	16.23	17.35	17.07	17.75	21.03
新机场快线	进站	12.64	20.08	11.69	15.50	18.33	17.86	18.55	22.54
	出站	12.48	25.31	12.40	17.07	20.51	20.15	20.61	24.19
两站场	同时会车/进站	30.20	51.17	66.94	55.81	88.32	88.73	92.51	95.61

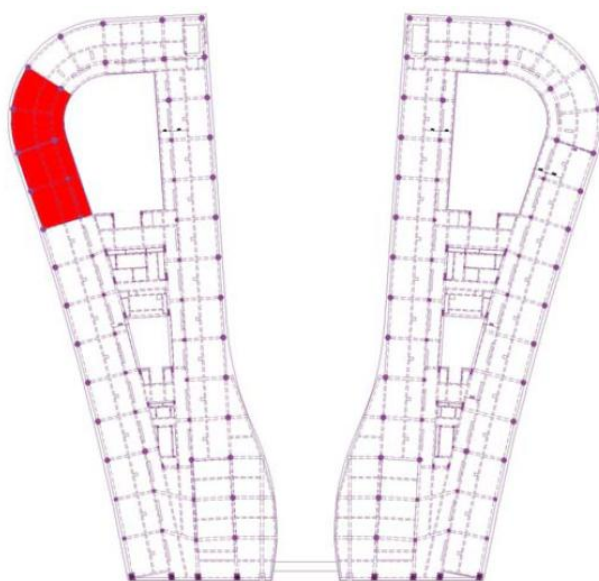


图 2.2-4 酒店各层舒适度超限区域

当列车以 350km/h 的速度在酒店范围内通过、会车及以 250km/h 的速度会车时，酒店均存在部分区域的最大 Z 振级大于《城市区域环境振动标准》（GB10070-88）规定的容许值 67dB，不满足舒适度要求。

表 2.2-5 酒店区域最大 Z 振级 (dB)

站场	工况	B1	F1	F1.5	F2	F3	F4	F5	F6
京霸场	350km/h 过站	65.2	66.6	66.9	66.4	68.0	68.2	68.1	68.4
	350km/h 会车	65.7	67.3	68.5	66.9	70.6	70.7	71.9	72.0
	250km/h 会车	65.2	66.8	67.6	67.2	68.8	68.5	68.8	68.9
	200km/h 会车	65.4	66.0	66.1	66.2	66.2	66.5	66.8	66.9
	进站	64.9	65.4	64.4	64.9	65.2	65.0	65.3	65.6
	出站	65.0	65.6	64.5	65.0	65.4	65.2	65.5	65.8
新机场快线	进站	64.5	65.1	64.4	65.0	65.5	65.2	65.5	65.9
	出站	64.5	65.4	64.5	65.1	65.6	65.4	65.7	66.0
两站场	同时会车/进站	65.7	67.3	68.5	66.9	70.6	70.7	71.9	72.0

当列车以 350km/h 的速度在酒店范围内通过、会车及以 250km/h 的速度会车时，酒店均存在部分区域的竖向四次方振动剂量值大于《建筑工程容许振动标准》（GB 50868-2013）规定的竖向四次方振动剂量容许值 $0.1\text{m/s}^{1.75}$ ，不满足舒适度要求。

表 2.2-6 酒店结构最大竖向四次方振动剂量值 ($\text{m/s}^{1.75}$)

站场	工况	B1	F1	F1.5	F2	F3	F4	F5	F6
京霸场	350km/h 过站	0.04	0.15	0.15	0.11	0.16	0.17	0.16	0.16
	350km/h 会车	0.09	0.17	0.24	0.19	0.30	0.31	0.34	0.33
	250km/h 会车	0.04	0.13	0.09	0.09	0.13	0.15	0.15	0.15
	200km/h 会车	0.04	0.08	0.08	0.08	0.09	0.09	0.09	0.09
	进站	0.02	0.05	0.02	0.03	0.04	0.04	0.04	0.05
	出站	0.02	0.05	0.02	0.03	0.05	0.05	0.05	0.06
新机场快线	进站	0.02	0.05	0.03	0.05	0.05	0.05	0.05	0.06
	出站	0.02	0.05	0.03	0.05	0.05	0.05	0.05	0.06
两站场	同时会车/进站	0.09	0.17	0.24	0.19	0.30	0.31	0.34	0.33

指廊结构各层最大竖向加速度、最大 Z 振级及最大竖向四次方振动剂量值如表 2.2-7 至表 2.2-9 所示。

表 2.2-7 指廊结构最大响应——加速度 (mm/s^2)

站场	工况	B1	F1	F2	F3	F4
京霸场	350km/h 过站	22.28	22.36	23.44	42.80	17.68
新机场快线	160km/h 通过	15.09	19.04	25.03	42.42	38.27

各工况下指廊各层区域最大加速度小于 AISC—11 中规定的舒适度限值 1.5%g（休息候机区域 0.5%g），满足舒适度要求。

表 2.2-8 指廊结构最大 Z 振级 (dB)

站场	工况	B1	F1	F2	F3	F4
京霸场	350km/h 过站	66.4	66.6	66.8	67.3	65.1
新机场快线	160km/h 通过	64.9	65.1	66.3	67.1	66.5

各工况下结构 Z 振级最大值小于《城市区域环境振动标准》（GB10070-88）规定的容许值 72dB，满足舒适度要求。

表 2.2-9 指廊结构竖向四次方振动剂量值 ($m/s^{1.75}$)

站场	工况	B1	F1	F2	F3	F4
京霸场	350km/h 过站	0.05	0.05	0.05	0.11	0.10
新机场快线	160km/h 通过	0.02	0.05	0.05	0.10	0.08

各工况下结构竖向四次方振动剂量值最大值小于《建筑工程容许振动标准》（GB50868-2013）规定的竖向四次方振动剂量容许值 $0.4m/s^{1.75}$ ，满足舒适度要求。

（3）减隔振措施

当列车以 350km/h 的速度在中心区范围内通过、会车及以 250km/h 的速度会车时，中心区均存在部分区域的竖向加速度最大值大于 $50mm/s^2$ ，包括办公区和长时休息区等对舒适度要求较高的区域，主要频率响应在 4Hz~8Hz 之间，超过 AISC—11 中规定的舒适度限值 0.5%g（4Hz~8Hz），不满足舒适度要求。同时，这三个工况下中心区均存在部分区域的最大 Z 振级大于《城市区域环境振动标准》（GB10070-88）规定的容许值 72dB，且存在部分区域的最大竖向四次方振动剂量值大于《建筑工程容许振动标准》（GB50868-2013）规定的竖向四次方振动剂量容许值 $0.4m/s^{1.75}$ ，不满足舒适度要求。因此需要采用相

应的减振方案对振动响应进行控制，设计者提出两种方案。

减振方案 1 为对薄弱区域进行加强，使其振动响应减小。

减振方案 2 为将相应区域范围内的正线行车速度降至 200km/h。

当列车以 350km/h 的速度在酒店范围内通过、会车及以 250km/h 的速度会车时，酒店均存在部分区域的竖向加速度最大值大于 50mm/s^2 ，且主要频率响应在 4Hz~8Hz 之间，超过 AISC-11 中规定的舒适度限值 $0.5\%g$ (4Hz~8Hz)，不满足舒适度要求。这三个工况下酒店均存在部分区域的最大 Z 振级大于《城市区域环境振动标准》(GB10070-88) 规定的容许值 67dB，且存在部分区域的竖向四次方振动剂量值大于《建筑工程容许振动标准》(GB50868-2013) 规定的竖向四次方振动剂量容许值 $0.1\text{m/s}^{1.75}$ ，不满足舒适度要求。对其分布区域进行研究后，发现振动较大区域集中在 HL11 轴~HL14 轴范围内的楼板跨中及悬挑区域。故对于酒店各区域，采用对薄弱区域进行加强，使其响应减小的方案。

对中心区采取对应措施后进行计算，两种减振方案的加速度幅值对比如表 2.2-10~表 2.2-12 所示。

两种方案可以将结构振动加速度响应峰值分别降低至 80mm/s^2 和 43mm/s^2 ，均可满足相应区域（办公区和长时休息区 $0.5\%g$ 及其他区域 $0.15\%g$ ）的规范要求。

两种方法可将结构最大竖 Z 振级分别降低至 72dB 和 66.7dB，均满足 72dB 的规范要求。

两种方法可将结构最大竖向四次方振动剂量值分别降至

0.21m/s^{1.75} 和 0.12m/s^{1.75}，均满足 0.4 m/s^{1.75} 的规范要求。

相对而言，加强构件方法刚好能达到规范要求的限值，满足舒适度要求；车速降低至 200km/h 的效果更好，能达到较高的舒适度水平。

表 2.2-10 中心区结构最大竖向加速度 (mm/s²) ——上人区域

工况	B1	F1	F2	F3	F4	F5
现状	183.30	70.21	63.74	109.00	110.60	43.92
方案 1: 加强构件	80.32	49.72	46.61	49.50	48.77	43.92
方案 2: 车速 200km/h	44.01	43.41	42.23	43.09	43.76	24.11

表 2.2-11 中心区结构最大 Z 振级 ——上人区域

工况	B1	F1	F2	F3	F4	F5
现状	74.4	69.4	71.2	73.9	73.5	66.4
方案 1: 加强构件	72.0	66.8	66.9	67.5	67.4	66.0
方案 2: 车速 200km/h	66.6	66.5	66.4	66.5	66.7	65.5

表 2.2-12 中心区结构最大竖向四次方振动剂量值 (m/s^{1.75}) ——上人区域

工况	B1	F1	F2	F3	F4	F5
现状	0.41	0.14	0.22	0.46	0.70	0.68
方案 1: 加强构件	0.21	0.14	0.11	0.13	0.16	0.16
方案 2: 车速 200km/h	0.12	0.11	0.08	0.08	0.12	0.12

对酒店采取对应措施后进行计算，两种减振方案的加速度幅值对比如表 2.2-13-表 2.2-15 所示。

两种方法可以将结构的最大加速度分别降低至 48.8mm/s² 和 48.3mm/s²，均满足加速度限值 0.5%g (50mm/s²) 的规范要求。

两种方法可将结构最大竖 Z 振级分别降低至 66.9dB 和 66.8dB，均满足 67dB 的规范要求。

两种方法可将结构最大竖向四次方振动剂量值分别降至 0.09 m/s^{1.75} 和 0.08 m/s^{1.75}，均满足 0.1 m/s^{1.75} 的规范要求。

相对而言，加强构件方法刚好能达到规范要求的限值。车速降低至 200km/h 的效果最好，能达到更高的舒适度水平。

表 2.2-13 酒店结构最大竖向加速度 (mm/s²)

工况	B1	F1	F1.5	F2	F3	F4	F5	F6
现状	30.16	51.07	66.87	55.61	88.02	88.35	92.27	95.02
方案 1: 加强构件	30.16	43.08	45.82	41.78	48.36	48.73	49.57	49.81
方案 2: 车速 200km/h	24.71	41.11	43.10	40.86	45.83	45.79	48.26	47.43

表 2.2-14 酒店结构最大 Z 振级

工况	B1	F1	F1.5	F2	F3	F4	F5	F6
现状	65.7	67.3	68.5	66.9	70.6	70.7	71.9	72.0
方案 1: 加强构件	65.5	66.5	66.4	66.3	66.8	66.8	66.9	66.9
方案 2: 车速 200km/h	65.4	66.0	66.1	66.2	66.2	66.5	66.8	66.8

表 2.2-15 酒店结构最大竖向四次方振动剂量值 (m/s^{1.75})

工况	B1	F1	F1.5	F2	F3	F4	F5	F6
现状	0.09	0.17	0.24	0.19	0.30	0.31	0.34	0.33
方案 1: 加强构件	0.05	0.09	0.06	0.07	0.08	0.09	0.09	0.09
方案 2: 车速 200km/h	0.04	0.08	0.06	0.06	0.05	0.06	0.07	0.07

2.2.3 小结

(1) 当列车以 350km/h 的速度在中心区及酒店范围内通过、会车及以 250km/h 的速度会车时，中心区均存在部分区域的竖向加速度最大值大于 50mm/s²；同时这 3 个工况下中心区均存在部分区域的最大 Z 振级大于《城市区域环境振动标准》

(GB10070-88) 规定的容许值 72dB，且存在部分区域的最大竖向四次方振动剂量值大于《建筑工程容许振动标准》

(GB50868-2013) 规定的竖向四次方振动剂量容许值 0.4m/s^{1.75}，不满足舒适度要求。

(2) 针对列车运行对航站楼结构造成的振动影响超标的问题，提出了两种解决方案，即对中心区和酒店振动超过限值的薄弱区域进行局部加强或降低车速至 200km/h。加强构件可使

振动达到规范要求限值；相对而言，车速降低至 200km/h 的效果更好，能达到更高的舒适度水平。

(3) 地铁运营经验表明，采用浮置板轨道可大幅度降低地铁运行对周边建筑物的振动影响。北京大兴机场快线和地铁在航站楼、酒店和中心区段均设置了浮置板轨道，以保证振动满足限值要求，经计算，在铺设减振轨道条件下，航站楼中心区及酒店的加速度峰值、竖向四次方振动剂量值和结构 Z 振级均满足相关标准规定的舒适度要求。

(4) 结合列车噪声影响的相关结论，建议高铁通过时降低车速，以达到较高的舒适度水平。

2.3 地铁、城际下穿厦门新机场

2.3.1 工程概况

厦门新机场规划建设 85 万 m^2 的航站楼、75 万 m^2 的陆侧配套设施。配套设施主要有地铁 3 号线、4 号线，以及厦漳泉城际铁路、GTC 以及旅客过夜用房。

厦漳泉城际铁路 R1 线设计速度 160km/h，途经泉州中心区、厦门本岛和漳州主城区，与当地的轨道交通无缝衔接，构筑形成厦漳泉主城区半小时生活圈和厦漳泉大都市区 1 小时交通圈。同时，R1 线与晋江机场、高崎机场、泉州高铁站、漳州站衔接，直通厦门新机场航站楼，使厦门新机场成为辐射厦门本岛、漳州、泉州、龙岩的区域性机场。R1 线下穿新机场航站楼、酒店，场地基于大嶝岛填海造陆形成。城市轨道交通 3 号线和 4 号线也将平行于 R1 线下穿机场^[7]。3 号线、4 号线设计速度为 120km/h。



图 2.3-1 厦门新机场航站楼和酒店剖视图

2.3.2 振动控制措施

(1) 仿真模型

1) 机场配套酒店区域

① 轨道交通与酒店空间相互关系

机场配套酒店与轨道交通平面相互关系如图 2.3-2。机场陆侧酒店主要承担宴会、旅客过夜用房等功能，酒店内大部分房间属于振动敏感区域，计算时选取酒店内铁路上方室内楼板作为监测点。

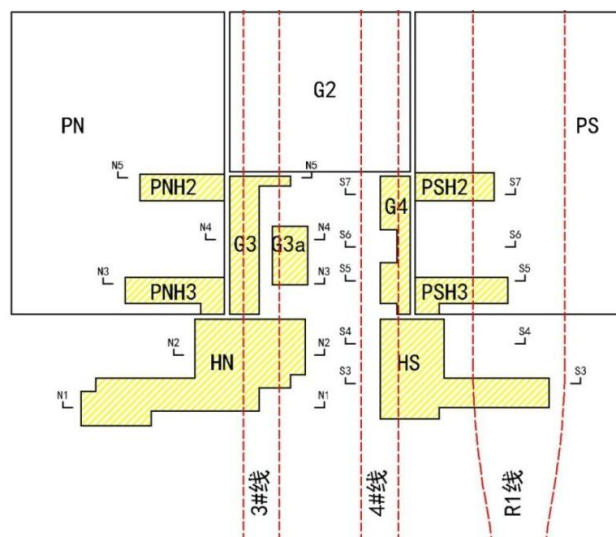


图 2.3-2 机场配套酒店与轨道交通平面相互关系

②仿真模型

建立列车-轨道-隧道/站房-土体-上部建筑相互作用分析模型，分析得到上部结构的响应，检验其响应是否超过相关规范要求，并分析减隔振措施的振动控制效果。

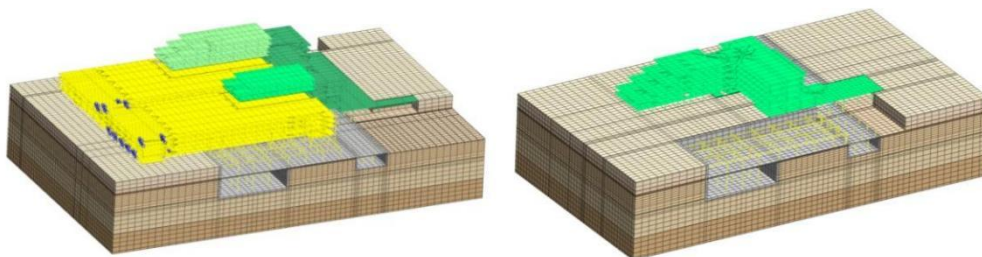


图 2.3-3 局部酒店结构耦合分析模型

③参考规范

由于目前暂时未有相关规范规定机场建筑物（如航站楼及配套酒店）相关功能分区参考标准，因此本研究参考《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/T 170-2009）中的振动影响区域分类标准，建议旅客过夜用房功能区域按 1 类区域标准控制，适用范围为居住、文教区，其昼间和夜间分频最大振动加速度级分别为 65dB 和 62dB。

2) 航站楼区域

①轨道交通与航站楼空间相互关系

机场主航站楼主要承担安检、商业、餐饮、办公（包括值机、安检、海关等）、行李提取以及旅客候机功能。其中，对轨道交通引起的振动敏感的区域主要是办公区以及候机室。在实际运营过程中，除特殊情况外，厦漳泉城际 R1 线和地铁 4 号线均会在机场停车，列车加速或减速下穿航站楼通过。轨道交

通与航站楼穿越位置关系如图 2.3-4 所示。

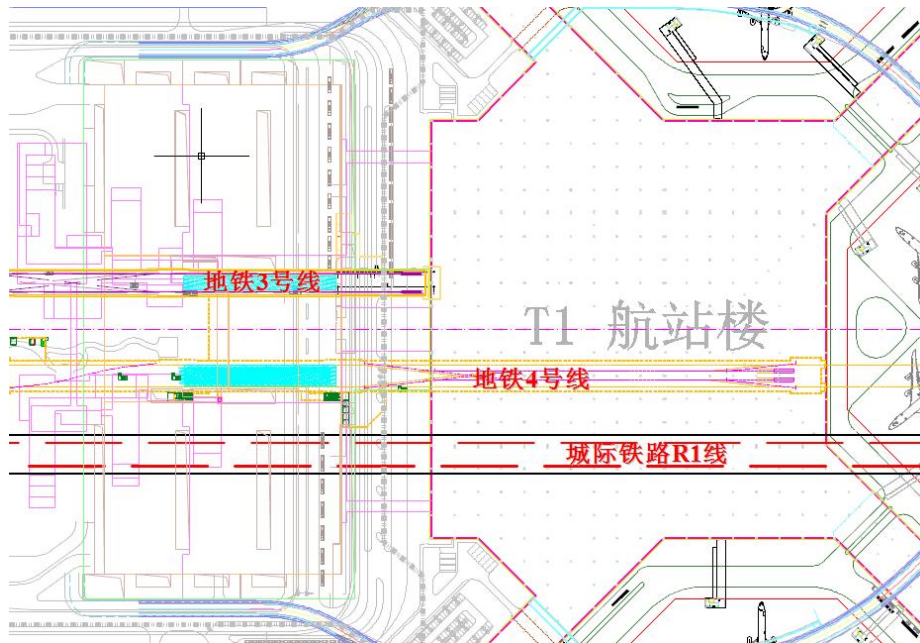


图 2.3-4 铁路与 T1 航站楼相互位置关系

城际铁路 R1 线和地铁 4 号线的大部分柱网与上部航站楼对齐，航站楼部分柱下基础置于区间顶板上，中间覆土约 3.7m~6.7m，城际铁路、地铁结构与航站楼形成共建、共柱的强连接结构，加强了列车运行引起的振动向上部结构传递，不利于航站楼内部工作人员以及换乘旅客的舒适度。未采取任何减隔振措施的情况下，航站楼分频最大振级达到 72.0dB，超过 2 类标准 67.0dB 的限值。

② 仿真模型

航站楼与大地/隧道耦合动力学分析模型如图 2.3-5 所示。构建的分析模型包括航站楼、隧道和大地，三者之间通过节点耦合，地铁、城际铁路隧道结构潜埋于地下，航站楼部分支撑柱直接坐落在隧道结构上方。在动力分析过程中波动的频率成分与岩土的波速特性会影响波传播的精度，然而网格尺寸受输入波的最短波长限制，网格尺寸必须小于输入波形最短波长的

1/8 ~ 1/10。模型边界会发生波的反射，对动力结果产生影响，为消除边界反射波的影响，模型的外围四周需添加三维粘弹性人工边界，人工边界等效为连续分布的并联弹簧-阻尼器系统。

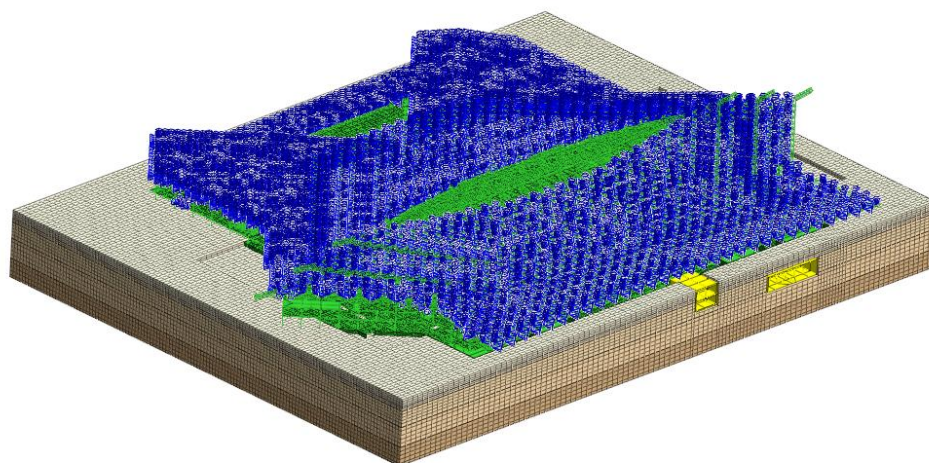


图 2.3-5 航站楼-大地-隧道耦合动力学分析模型

(2) 减隔振措施及评估

1) 机场配套酒店

根据机场配套酒店振动评价结果，酒店 HS 单体、G4 单体、PSH3 单体、HN 单体及 G3 单体在城际及地铁减速运行通过时部分区域振动超标，需要采取减隔振措施。

城际铁路采用减振型 CRTS I 型双块式无砟轨道，如图 2.3-6 所示。

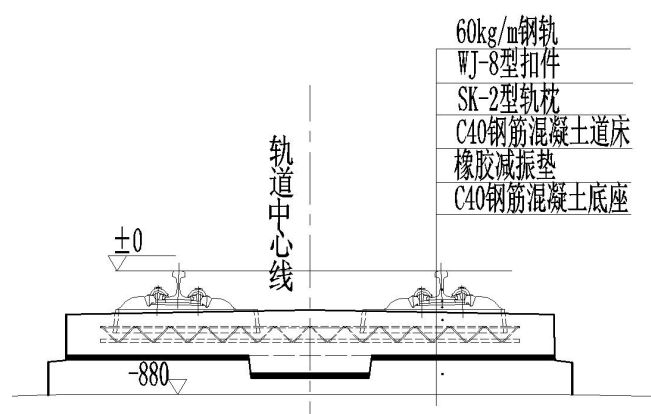


图 2.3-6 减振型 CRTS I 型双块式无砟轨道断面图

减振型 CRTS I 型双块式无砟轨道由钢轨、扣件、双块式轨枕、道床板、减振垫以及混凝土基底组成，受限于钢轨位移及轨道结构高度，I 型双块式减振轨道的垂向一阶固有频率一般为 20Hz~30Hz。

城市轨道交通通常采用浮置板轨道，即通过在轨道板下添加减振垫或钢弹簧将道床板浮置，从而隔离振动向板下传递，如图 2.3-7 所示为钢弹簧浮置板轨道，其垂向一阶固有频率一般为 10Hz~15Hz。

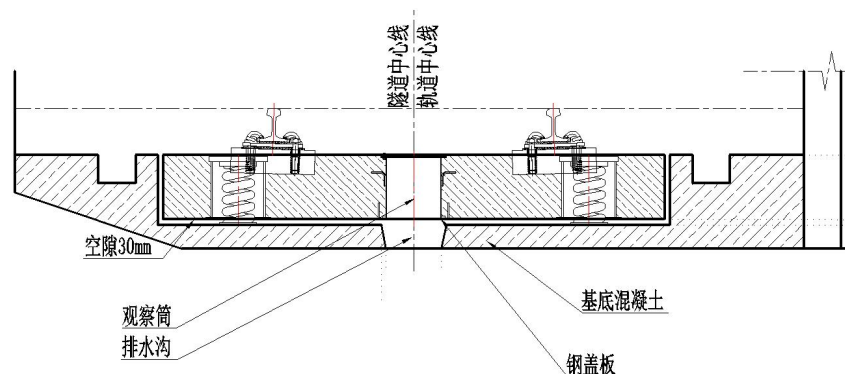


图 2.3-7 浮置板轨道断面图

建筑物柱底设置隔振支座以及诸措施同时实施等多种减振方案。局部区域隔振支座布置示意如图 2.3-8 所示。

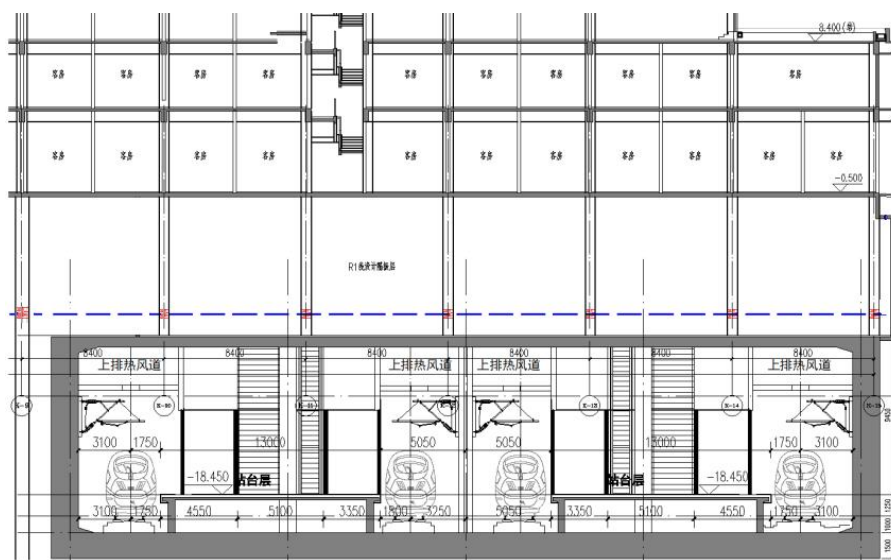


图 2.3-8 城际线范围内 HS 单体部分隔振支座布置

HS 酒店测点 HS-F1-6 振动加速度级如图 2.3-9 所示。从图中可以看出，建筑隔振支座能够大幅衰减地铁列车引起的振动向上部结构的传递，分频最大振动加速度级从 67dB 减小到 60.5B，采用建筑隔振支座，基本能够将振动降至限值以内。采用减振轨道之后，由于减振轨道会放大一阶固有频率处振动的特性，在城际线上方测点的中心频率 25Hz 以及地铁线上方测点的中心频率 12.5Hz 左右出现振级放大现象，部分测点采取减振轨道结构后低频段振动仍超标。同时采用减振轨道和建筑隔振支座后，在低频段及中高频段均具有更好的效果，振动降低至容许限值以内。从对比结果中可以看出，建筑隔振支座较减振轨道结构具有更好的隔振效果；虽然减振轨道结构的一阶放大效应，但是分频最大振动加速度级也基本降至限值以内。

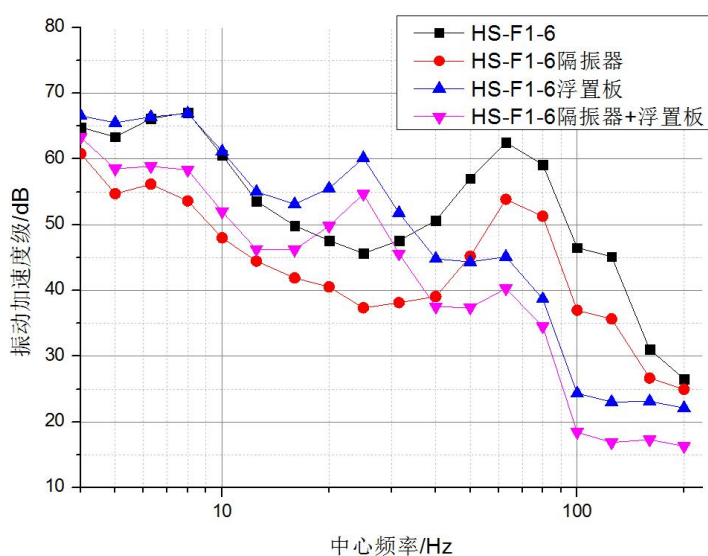


图 2.3-9 城际线上方 HS 酒店测点振动加速度级

2) 航站楼区域

为减小列车运行对航站楼振动敏感区域的影响范围，航站楼的建筑功能布局根据轨道交通穿越的位置做了调整，调整后航站楼振动敏感区域范围划分如图 2.3-10 所示。

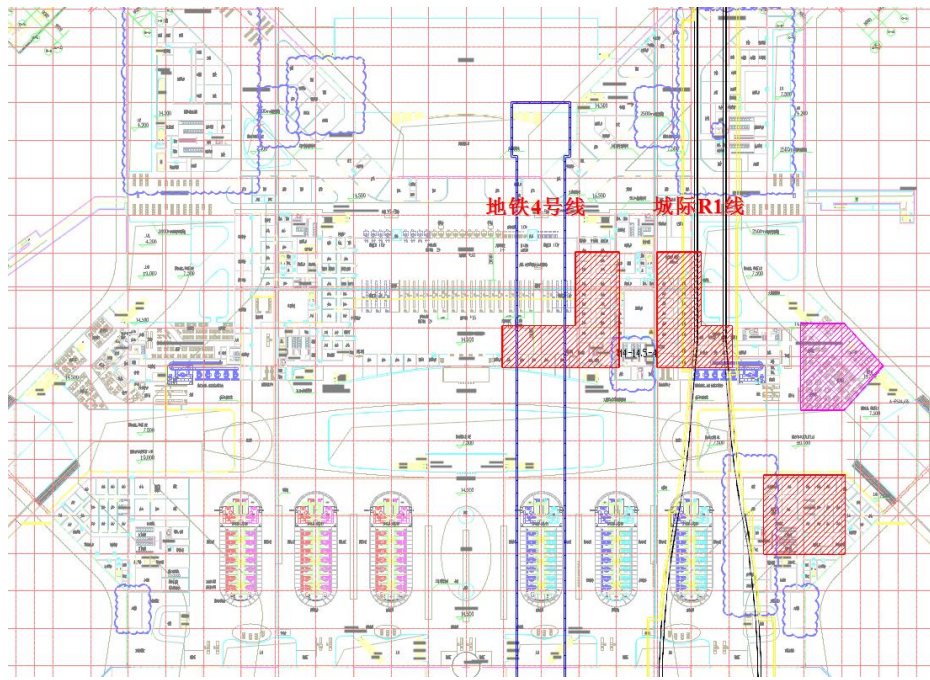


图 2.3-10 国际出发层振动敏感区域（标高 14.5m）

其中，红色阴影为办公用房区域，洋红色阴影为高舱位旅客候机区域。振动分析结果表明，在列车加速运行通过航站楼下方的情况下，振动超标区域面积约 684m^2 。航站楼在建筑功能布局调整后，振动超标面积较小，综合工程条件与投资，轨道交通穿越航站楼区段采用减振轨道进行振动控制。

2.3.3 小结

(1) 在城际列车及地铁减速通过时，酒店部分单体振动仍超标，需采取减隔振措施。建筑隔振支座较减振轨道具有更好的减振效果；同时采用减振轨道和隔振支座后，在全频段均具有良好的减振效果，振动降低至容许限值以内。

(2) 为减小列车运行对航站楼振动敏感区域影响的范围，对减隔振设施条件有限区域，可通过更换用房功能的方式避开振动超标区域。

2.4 济青高铁下穿青岛胶东国际机场

2.4.1 工程概况

青岛胶东国际机场建有全通型、立体化、零换乘的综合交通中心，引入济青高铁、M8号线地铁穿越航站楼并在地下设站，可实现1h通达山东全省，1.5h通达苏北、豫东和皖北地区。

列车高速运行时，轮轨动荷载会激发车辆-轨道系统的振动，振动以振动波的形式通过轨道的基础结构及场地土层向四周传播，当振动波到达航站楼基础时会进一步诱发航站楼结构的振动。这种频繁发生的振动，不但威胁航站楼结构的使用安全，也会影响进出港旅客和机场员工的身心健康。因此，在投入使用前对其进行了振动研究，以便提前采取相应的减隔振措施，确保运营过程中能满足预定的功能要求^[8]。



图 2.4-1 轨道交通与机场航站楼相对位置图

航站楼一期建筑面积约 45 万 m²，绝对高程 10.05m。大厅地上 4 层（L1-L4 层），地下 1-2 层（分别为 B1A 层、B1 层和 B2 层）；指廊地上 2 层，地下 1 层（管廊层，位于各指廊中部）。航站楼中东侧有济青高铁及地铁 M8 号线南北向通过，地铁埋深约 16m，高铁埋深约 21m。航站楼由中央大厅和五个指廊构成，航站楼中央大厅各层标高如表 2.4-1 所示。

表 2.4-1 航站楼中央大厅各层标高

结构类型	基础形式	基地标高 (m)		
		层	相对	绝对
砼框架/网架	桩	L1	-0.90	9.15
	桩	B1A	-6.55	3.50
	桩	B1	-9.55	0.50
	独立	B2	-15.55	-5.50

青岛胶东机场采用 Z 振级来评价航站楼的车致振动水平。参考《城市区域环境振动标准》（GB 10070-88），机场中如贵宾休息室、办公室等一些特殊用途的区域按“居民区、文教区”的振动限值标准执行，即昼间 Z 振级标准值为 70dB，夜间为 67dB。其余区域按“商业中心区”的标准执行，其昼间 Z 振级标准值为 75dB，夜间为 72dB；

2.4.2 振动控制措施

(1) 仿真模型

① 高铁站房结构-土体-隧道有限元模型

考虑到高速铁路引起的环境振动影响区域，土体采用的模型尺寸为 85m（垂轨向）×370m（顺轨向）×35.5m（高度），分为 2 层。

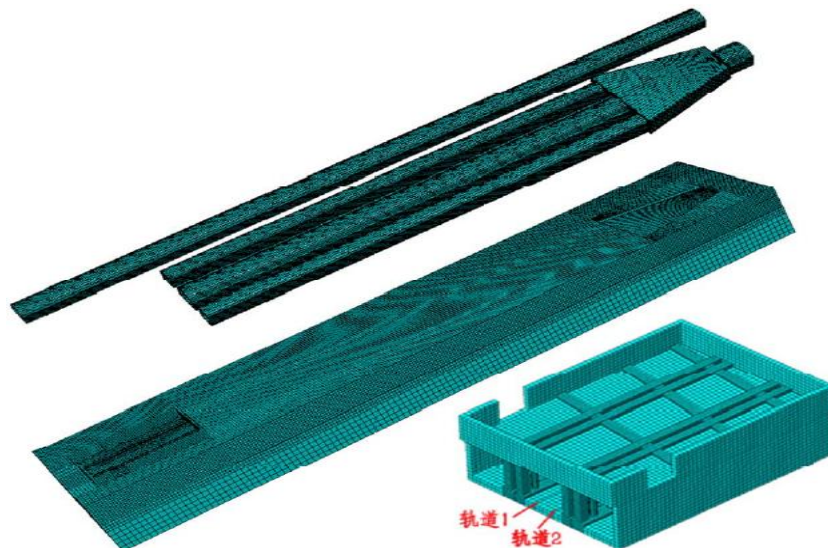


图 2.4-2 高铁站房结构-土体-隧道有限元模型

在轨道上施加列车 250km/h 对向通过时的列车荷载，观察土体中部剖面振动加速度传播规律，得到轨道上的峰值加速度达 2.5m/s^2 。图 2.4-3 给出了列车交会时土体剖面在某一时间段内的竖向加速度传播云图。

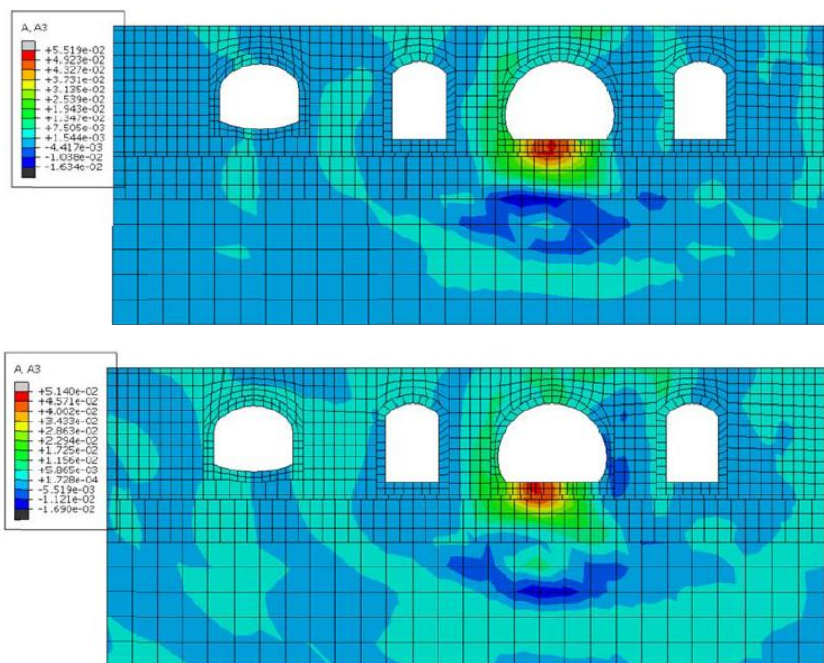


图 2.4-3 土体剖面竖向加速度传播云图

② 高铁站房结构-土体-隧道-航站楼结构有限元模型

将航站楼结构的有限元模型和高铁站房结构-土体-隧道有限

元模型组合得到整体结构的有限元模型，模型如图 2.4-4 所示，

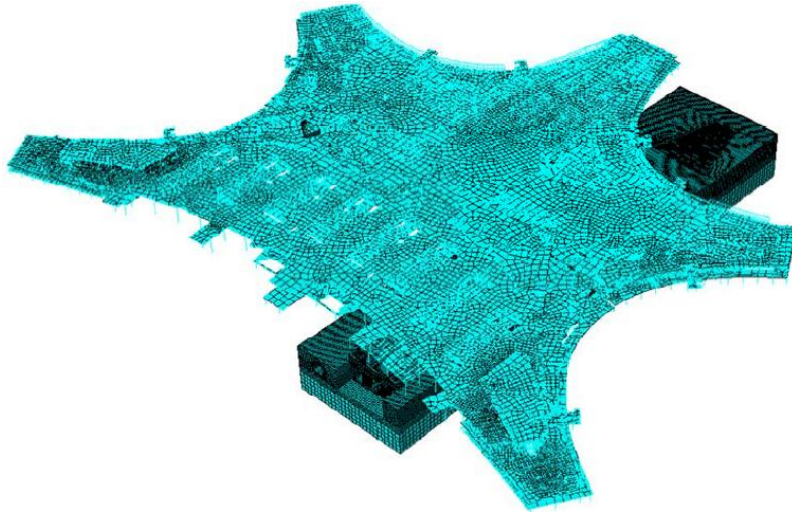


图 2.4-4 高铁站房结构-土体-隧道-航站楼结构有限元模型

(2) 减隔振措施

为降低振动的影响，在局部区域布置了 8 个隔振支座，布置位置见图 2.4-5。

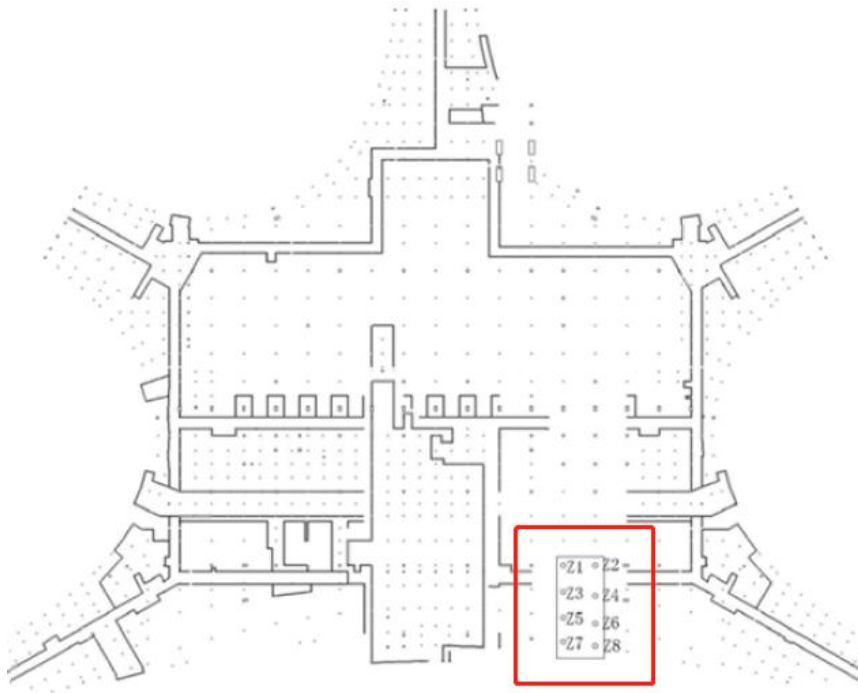
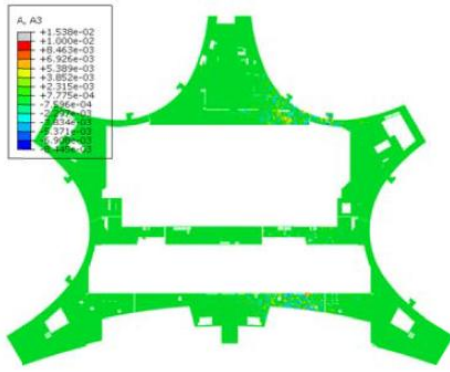
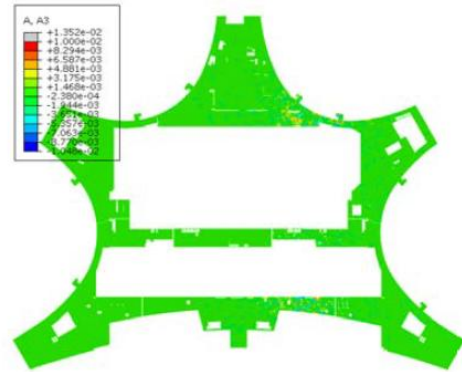


图 2.4-5 隔振支座布置位置

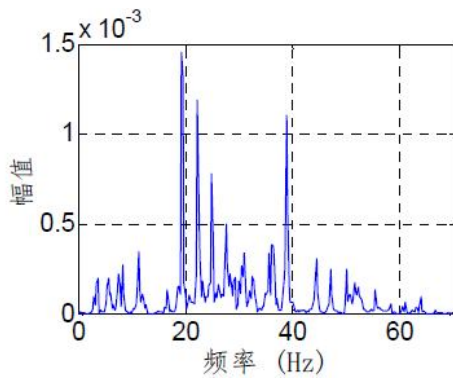
图 2.4-6~图 2.4-7 为非隔振与隔振情况下各层楼板某一时刻的竖向加速度云图及竖向振动频谱。



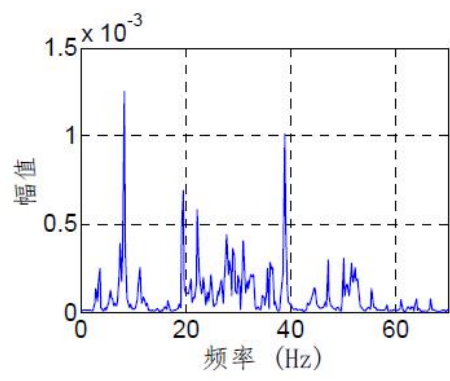
(a) 非隔振云图



(b) 隔振云图

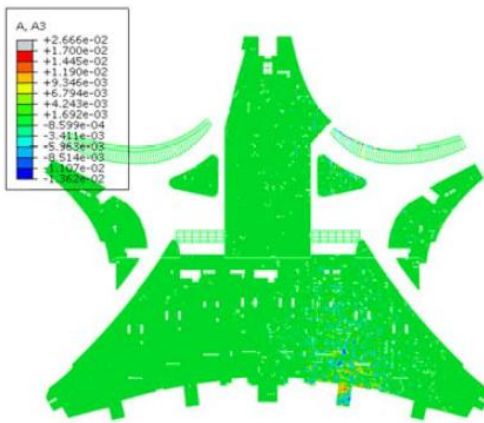


(c) 非隔振频谱

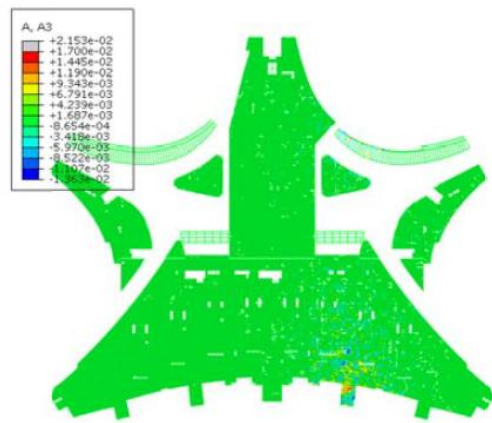


(d) 隔振频谱

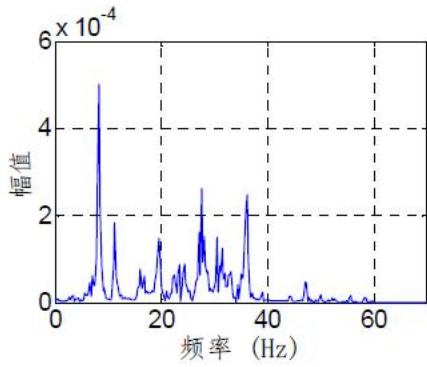
图 2.4-6 一层楼板竖向加速度云图及某点竖向振动频谱



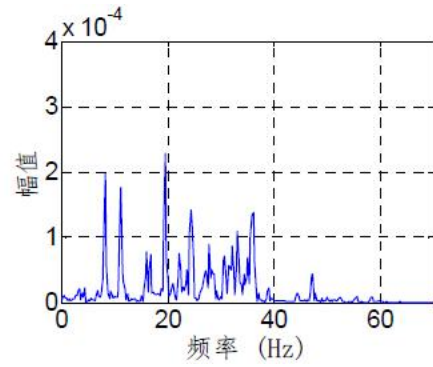
(a) 非隔振云图



(b) 隔振云图



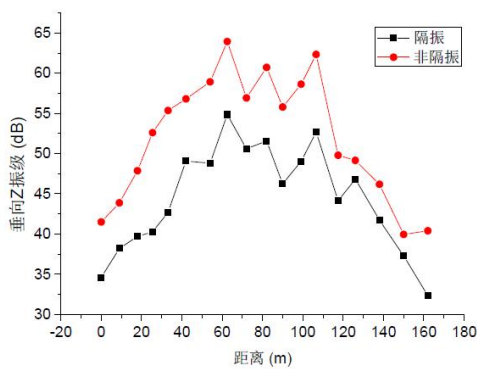
(c) 非隔振频谱



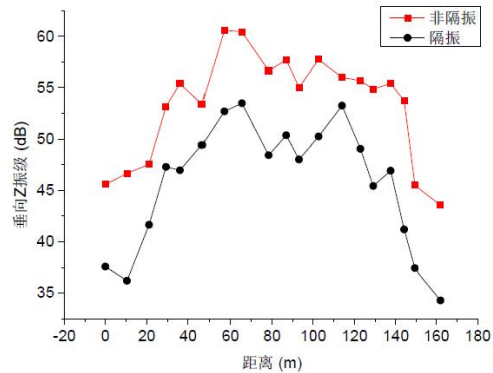
(d) 隔振频谱

图 2.4-7 三层楼板竖向加速度云图及某点竖向振动频谱

图 2.4-8 为第一层和第三层楼板隔振与非隔振情况下垂直线路方向的垂向 Z 振级分布，由此可见高铁振动影响区域集中在站房上部，隔振措施可以明显降低竖向振动。



(a) 第一层



(b) 第二层

图 2.4-8 第一层和第三层楼板隔振与非隔振垂向 Z 振级分布

航站楼内部各楼层的办公区及休息区大都远离振动影响区，只有在第三层部分休息区位于振动影响区内，如图 2.4-9 所示。对该区域进行分析，可得到非隔振情况下该区域内的 Z 振级最大值为 60.93dB，隔振后该区域的振级为 57.02dB。

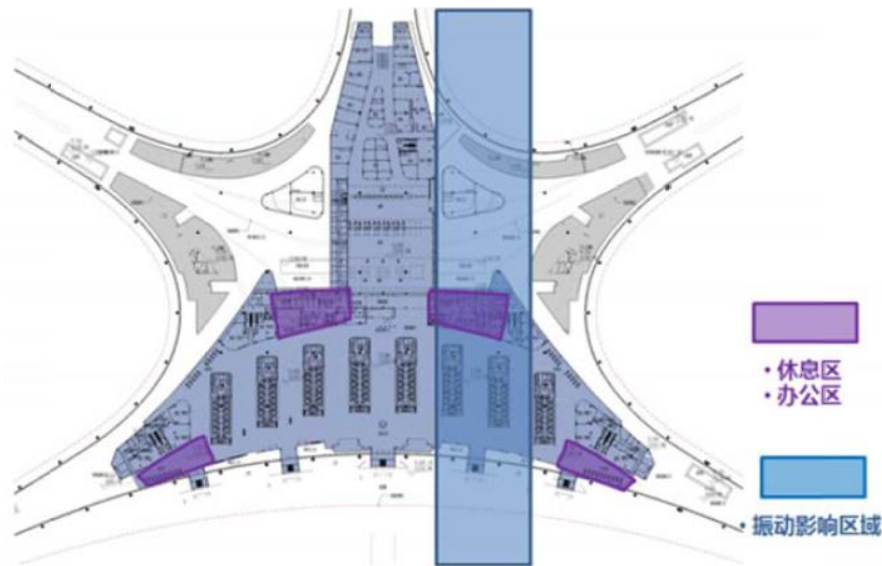


图 2.4-9 第三层建筑功能区分区示意

表 2.4-2 为各楼层的振动评价指标，由此可见非隔振情况下，只有地下一层的 Z 振级略大于《城市区域环境振动标准》（GB 10070-88）中混合区、商业中心区的白天限值 75dB，其它位置处的 Z 振级均小于 75dB；隔振后各楼层的 Z 振级均小于居民区、文教区的类别的振动限值 70dB，满足要求。

表 2.4-2 各楼层隔振前后的振动评价指标对比

位置	垂向计权最大加速度 (mm/s ²)		垂向 Z 振级 (dB)		四次方振动剂量 (m/s ^{1.75})	
	隔振前	隔振后	隔振前	隔振后	隔振前	隔振后
地下一层	15.78	8.82	75.7	69.88	0.0108	0.0053
第一层	9.55	6.76	70.9	67.96	0.0064	0.0042
第二层	7.59	6.81	67.3	65.72	0.0042	0.0036
第三层	10.92	4.38	70.2	63.87	0.0061	0.0026

如果机场的高速列车每天通行量为 200 对，则非隔振结构的最大竖向四次方振动剂量为 0.04m/s^{1.75}，小于《建筑工程容许振动标准》（GB 50868-2013）规定的白天竖向四次方振动剂量容许 0.4m/s^{1.75} 的要求。

2.4.3 小结

(1) 非隔振情况下，只有地下一层的 Z 振级略大于《城市

区域环境振动标准》（GB 10070-88）中 2 类区域的昼间限值；采用隔振措施后，即便是振动水平最高的地下一层，其 Z 振级已降为 69.88 dB，航站楼所有区域振动水平已满足 1 类区域的昼间限值要求。

（2）当机场的高速列车日通行量为 200 对时，则非隔振结构的最大竖向四次方振动剂量为 $0.04\text{m/s}^{1.75}$ ，小于《建筑工程容许振动标准》（GB 50868-2013）规定的昼间竖向四次方振动剂量容许 $0.4\text{m/s}^{1.75}$ 的要求。

2.5 成自高铁下穿成都天府国际机场

2.5.1 工程概况

成都天府国际机场引入设计速度 140km/h 的地铁 18 号线以及设计速度 350km/h 的成自高铁，建筑结构空间关系如图 2.5-1 所示。

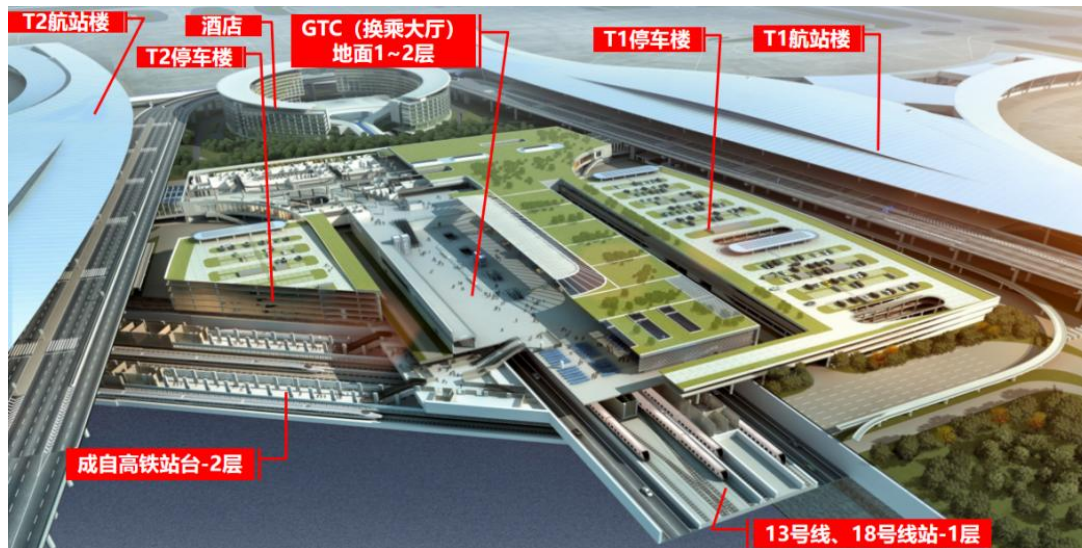


图 2.5-1 轨道交通及成自高铁与天府机场建筑结构空间关系

其中，成自高铁设天府机场站，斜向下穿天府机场主航站楼及 GTC，且存在正线 350km/h 高速不停站通过的运行情况，

如图 2.5-2 所示，成自铁路的顶板即为轨道交通的底板，GTC 部分支撑柱直接坐落在地铁支撑柱和成自铁路的顶板结构上，形成共板、共柱的强连接体系，高铁和地铁运行引起的振动直接传递至 GTC 内部，对换乘旅客的舒适度提出巨大考验^[9]。

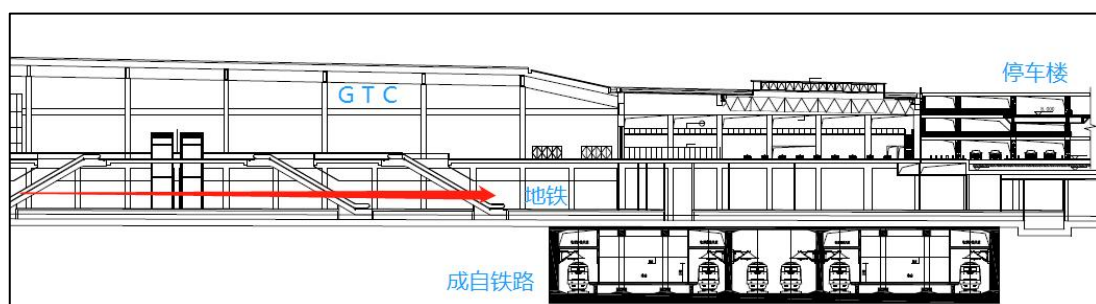


图 2.5-2 轨道交通及成自高铁和 GTC 位置关系

2.5.2 振动控制措施

(1) 仿真模型

1) 站房-土体模型

高铁站房-土体有限元模型如图 2.5-3 所示。

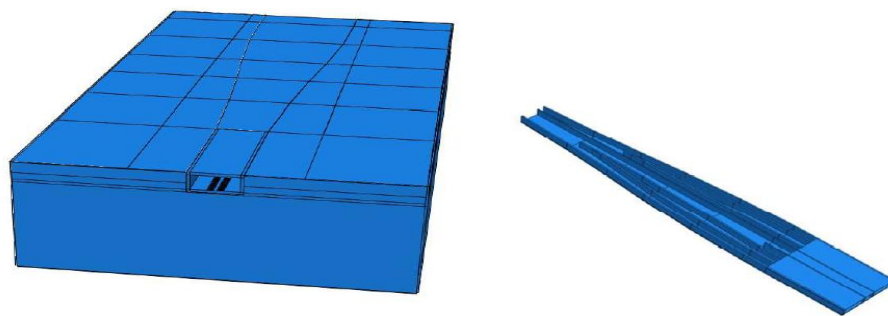


图 2.5-3 站房-土体有限元模型

考虑到高速铁路引起的环境振动影响区域，土体采用模型尺寸为 200m（水平横向）× 400m（水平纵向）× 90m（高度），土体分为 5 层。采用 C3D8 实体单元，土体和隧道单元总数为 70 万。在土体的四周和底面各加一层厚度为 1m 的等效三维黏弹性人工边界单元，单元外采用固定约束。

2) 列车-轨道耦合模型

在计算分析时，高速列车选用 CRH380A 型动车组，CRH380A 型动车组采用 8 节编组模式，6 动 2 拖，头车长 26.5m，中间车长 25.0m，轴距 2.5m，轴重不大于 15t，如图 2.5-4 所示。

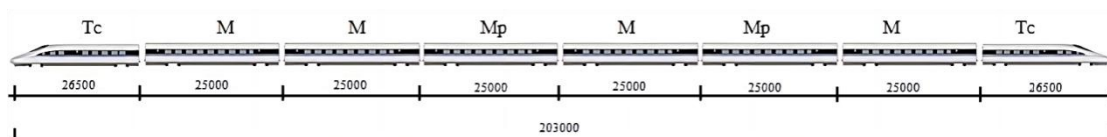


图 2.5-4 CRH380A 型高速列车编组

列车-轨道耦合模型如图 2.5-5 所示。

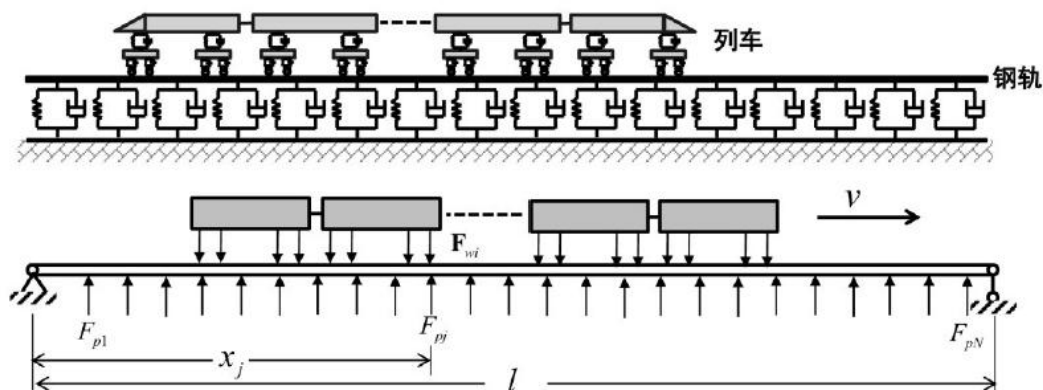


图 2.5-5 列车-轨道耦合模型

(2) 减隔振措施

为减小成自高铁列车运行对上部航站楼结构的振动影响，在高铁拱形顶板上方设置有 180 个限位基础，共计 694 个隔振器，T2 航站楼局部区域隔振器布置如图 2.5-6 所示。

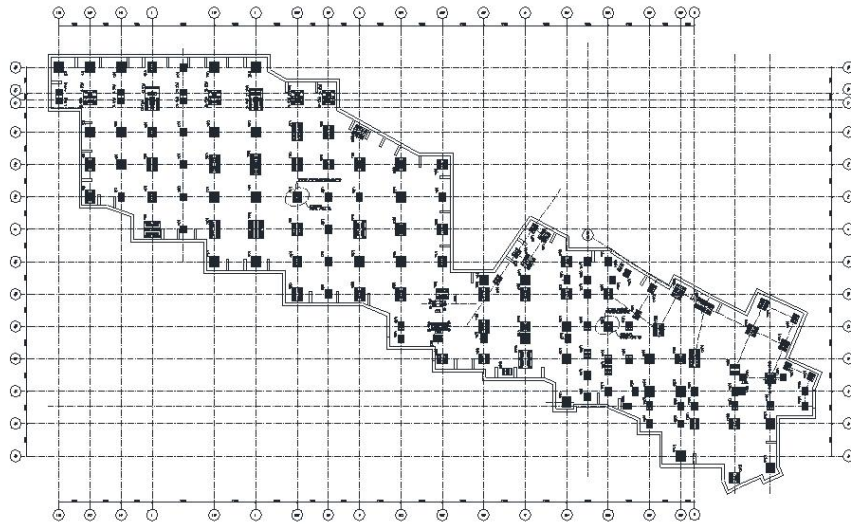
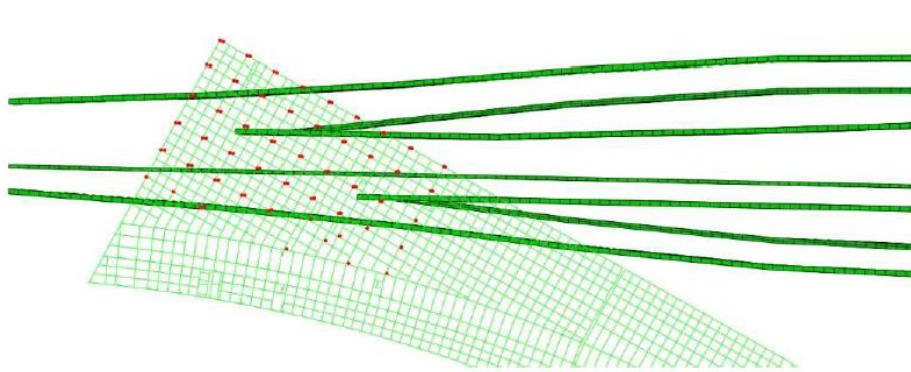
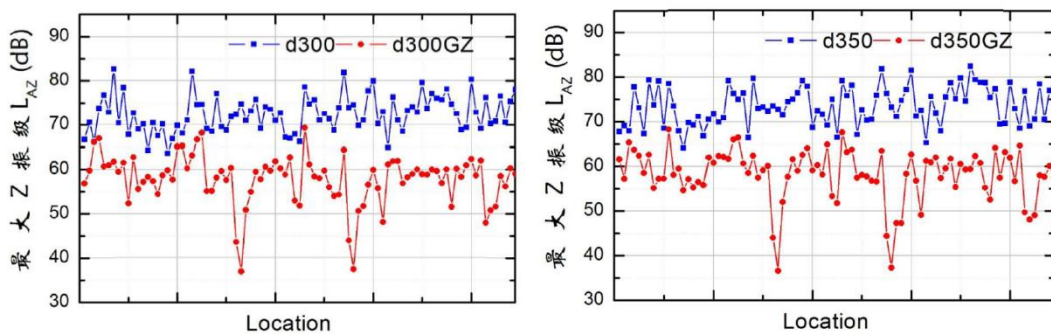


图 2.5-6 T2局部区域隔振支座安装示意

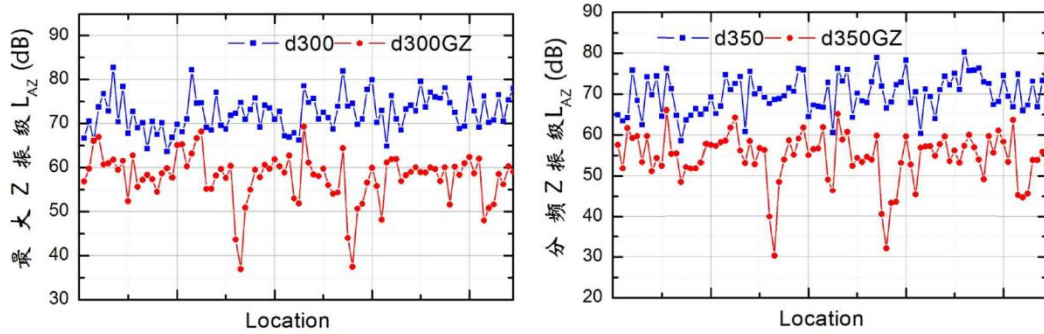
根据上述的隔振支座方案，仿真计算两种工况（工况 d300，即列车车速 $V=300\text{km/h}$ ；工况 d350，即列车车速 $V=350\text{km/h}$ ）在隔振和非隔振情况下上部结构柱底竖向加速度最大 Z 振级、竖向加速度分频 Z 振级如图 2.5-7 所示。



a) 监测点位置



b) 监测点竖向加速度最大 Z 振级



c) 监测点竖向加速度分频 Z 振级

图 2.5-7 上部结构底柱振动

由图 2.5-7 可知，高速列车速度为 300km/h 时，轮轨振动经站房传播后，非隔振情况下，上部结构柱底（基础）部分监测点的最大 Z 振级大于 72dB，分频 Z 振级大于 67dB；隔振情况下，所有监测点的最大 Z 振级均小于 72dB，分频 Z 振级均小于 67dB；列车以 350km/h 的速度通过航站楼时，若不采取隔振措施的情况下，部分监测点的最大 Z 振级大于 72dB，分频 Z 振级大于 67dB；隔振情况下，所有监测点最大 Z 振级均小于 72dB，分频 Z 振级均小于 67dB。

表 2.5-1 给出了各楼层平均振动级，可以看出，隔振支座降低振动的作用明显，减振效果可达 20%，减振效果良好。

表 2.5-1 各楼层的振动评价指标（平均振级）

位置	垂向 Z 振级 V_{L_z} (dB) GB10070-88				垂向分频 Z 振级 V_{L_z} (dB) JGJ/T170-2009			
	非隔振	隔振	非隔振	隔振	非隔振	隔振	非隔振	隔振
	V=300km/h	V=300km/h	V=350km/h	V=350km/h	V=300km/h	V=300km/h	V=350km/h	V=350km/h
两舱	75.70	56.03(26.0%)	77.07	56.61(26.5%)	72.23	52.05(27.9%)	73.99	53.28(28.0%)
地面	78.51	63.33(19.3%)	78.52	63.97(18.5%)	75.38	59.85(20.6%)	75.58	60.55(19.9%)
第一层顶板	75.15	60.92(18.9%)	75.24	61.43(18.4%)	72.45	57.39(20.8%)	72.29	58.67(18.8%)
第二层顶板	76.11	63.84(16.1%)	76.65	62.79(18.1%)	72.63	60.17(17.2%)	73.23	59.36(18.9%)
第三层顶板	75.28	59.00(16.1%)	76.07	59.65(21.6%)	71.99	55.43(23.0%)	73.24	56.59(22.7%)
第四层顶板	73.62	59.94(21.6%)	73.22	60.05(18.0%)	70.16	56.49(19.5%)	69.99	57.12(18.4%)
第五层顶板	75.35	61.87(17.9%)	73.37	58.16(20.7%)	71.56	58.46(18.3%)	70.12	54.64(22.1%)

2.5.3 小结

(1) 车速 350km/h 时高速列车对航站楼站房顶板上的振动影响大于车速 300km/h 时的振动影响，两个车速对站房上部结构的振动影响差别不大。

(2) 高速列车对向穿越，不采用隔振措施时，各层监测点最大 Z 振级的平均值超过或接近规定的限值 72dB，分频 Z 振级的平均值均超过规定的限值 67dB；采用隔振措施后，各层监测点最大 Z 振级的平均值均小于规定的限值 72dB，分频 Z 振级的平均值均小于规定的限值 67dB，振级降幅为 6dB~15dB；

(3) 在所有工况下，采取隔振措施后，两舱休息室范围内所有监测点的最大 Z 振级均小于 72dB，分频 Z 振级均小于 67dB，未超过规定的限值，隔振效果显著。

2.6 汉孝城际、地铁下穿武汉天河国际机场

2.6.1 工程概况

武汉天河国际机场 T3 航站楼主楼五层，地上四层，地下一层（局部地下两层），衔接地铁、城际、出租车、长途大巴、公交车、社会车辆等六种交通方式。

航站楼由主楼、指廊、登机桥及 T2-T3 连廊等建筑组成。主楼下设有一层地下室，南北两侧局部设两层地下室与地下停车楼和空侧捷运相接。地下二层结构面标高为 -12.600m~-10.300m，地下一层结构面标高为 -9.800m~-5.500m。T3 航站楼中部地下室以下有 3 条汉孝城际铁路隧道、2 条地铁隧道沿南北主轴线横向穿过，其中汉孝城际铁路以 200km/h 的速度通过正线，并在航站楼紧邻的交通中心设立站点，航站楼与城际、地

铁交通实现无缝对接，形成综合交通枢纽^[10]。城际铁路、地铁下穿航站楼平面示意如图 2.6-1 和图 2.6-2 所示。

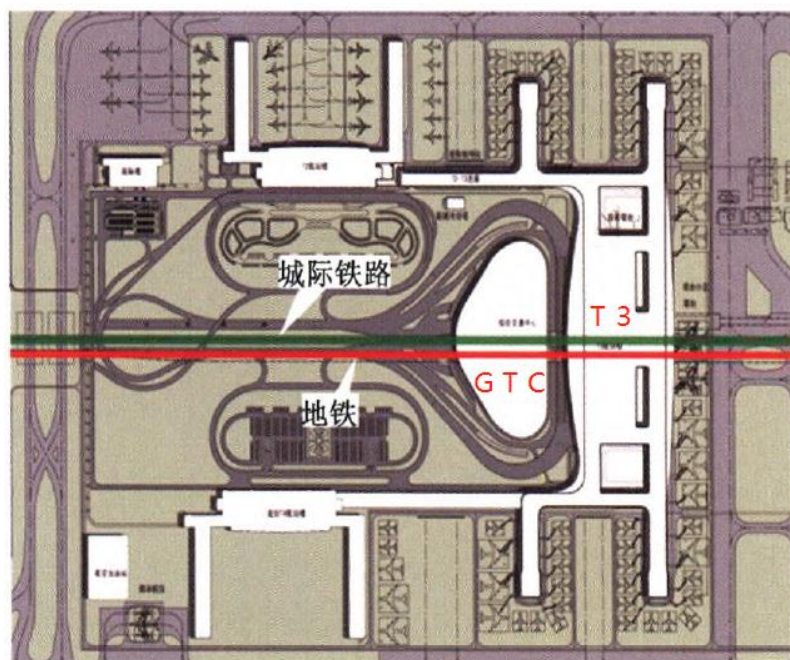


图 2.6-1 城际铁路、地铁下穿航站楼平面示意图

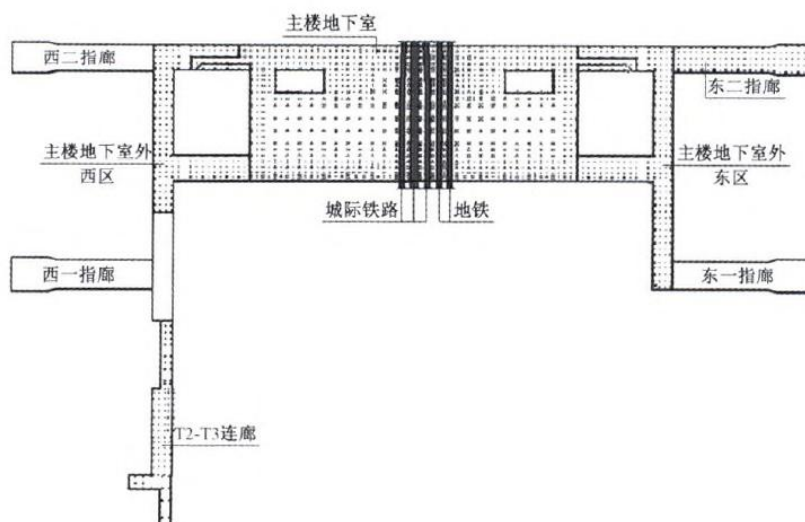


图 2.6-2 T3 航站楼城际铁路、地铁平面布置

2.6.2 振动控制措施

为保证 T3 航站楼结构在城际、地铁运营状态下的振动舒适度，本工程采用航站楼结构与城际、地铁结构完全分开，各自独立传力的结构设计方案。

结构设计时控制基础及底板的构件截面，尽量减少城际、地铁隧道的埋深，以节约轨道交通造价。配合轨道交通隧道设计，控制航站楼基础宽度；同时尽量减小隧道的结构断面尺寸。在不改变航站楼结构柱网尺寸的条件下，实现了双轨隧道从航站楼标准柱跨下的顺利贯通，避免结构转换，确保航站楼柱网的规则性和经济性^[11]。

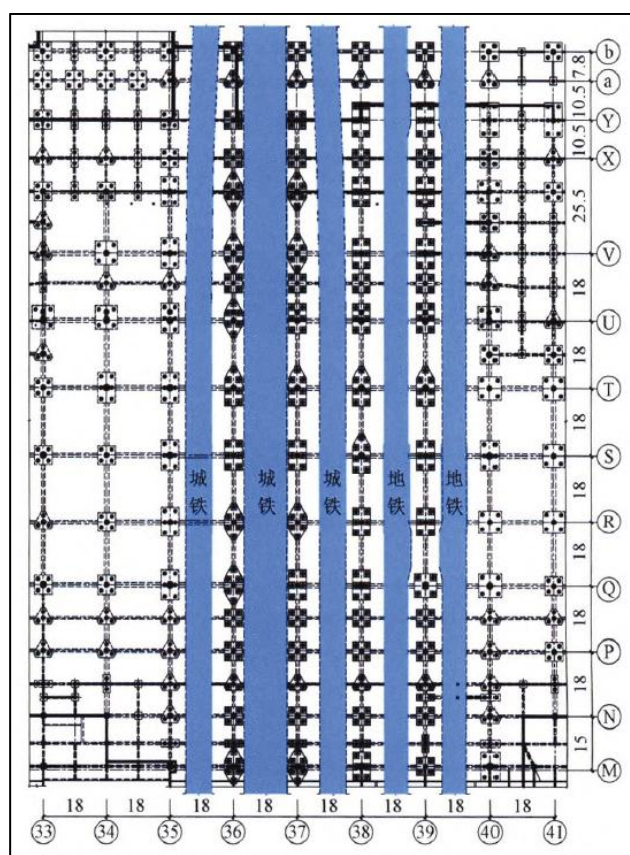


图 2.6-3 T3 航站楼地下室底板与城际、地铁隧道空间平面关系

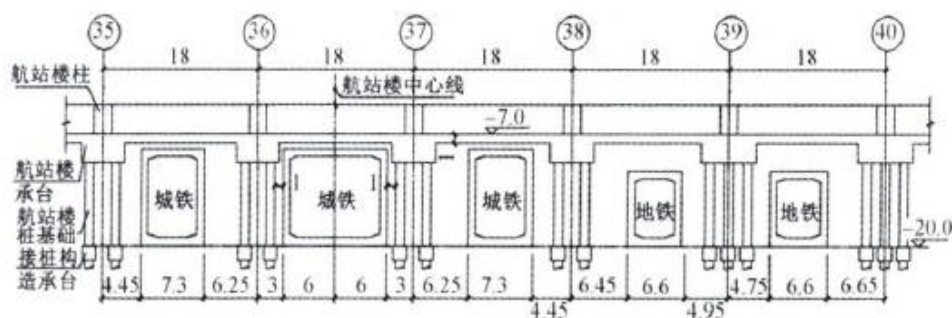


图 2.6-4 T3 航站楼基础与下部城际、地铁隧道空间关系剖面图

根据敏感点环境振动预测结果，城际铁路与地铁运营期的振级为 71.7dB，满足《城市区域环境振动标准》（GB 10070-88）中关于“混合区、商业中心区”昼间 75.0dB 的限值，城际铁路与地铁运营引起的 T3 航站楼二次结构噪声合成值为 39.7dB(A)，满足《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 / T 170-2009）中关于“2 类居住、商业混合区、商业中心区”昼间 41.0dB（A）的限值。

2.6.3 小结

航站楼结构与城际、地铁结构完全分开，切断了车致振动的直接传递路径，列车运行引起的振动相比于城际、地铁、航站楼共构建筑的影响要小。根据敏感点环境振动预测结果，城际铁路与地铁运营期航站楼的振动和二次结构噪声分别为 71.7dB 和 39.7dB(A)，满足 GB 10070-88 和 JGJ / T 170-2009 中关于“混合区、商业中心区”和“2 类居住、商业混合区、商业中心区”的限值要求。

2.7 南凭高铁、地铁下穿南宁吴圩国际机场

2.7.1 工程概况

南宁国际空港综合交通枢纽工程位于南宁吴圩国际机场既有 T2 航站楼和规划 T3 航站楼之间，如图 2.7-1 所示，包含停车库、城市轨道交通机场站、南凭高铁机场站、公共换乘空间及配套服务设施等。



图 2.7-1 南宁吴圩国际机场

南凭高速铁路连接南宁市与崇左市江州区、凭祥市的城际高速铁路，设计速度 250km/h。南凭高铁引入南宁吴圩国际机场段隧道全长 7.465km，隧道由南宁端区间隧道、吴圩机场地下车站及崇左端区间隧道组成，其中吴圩机场站为中间站，长 1.350km，采用两台四线双岛式布置，设到发线 4 条（含正线 2 条）。南凭高铁穿越塔台处轨面埋深 19.0m。城市轨道交通机场线南起吴圩机场站，北至宁东站，线路全长 47.6km，设计速度 120km/h。轨道交通机场线引入南宁国际空港综合交通枢纽，预留机场站及远期延伸条件，预留机场站轨面埋深约 22.4m。

机场塔台用于监管以及控制飞机起降，主要提供管制指挥、气象观察、现场指挥等功能。根据《民用航空空中交通管理规则》要求，塔台管制席管制员连续执勤时间不得超过 6 h，从事雷达管制的管制员连续执勤时间不得超过 2 h，以保证良好的精神状态。如图 2.7-2 所示，新建南凭高铁和城市轨道交通机场线近距离穿越机场塔台，高铁和地铁距塔台中心最近距离分

别为 48.0m 和 85.0m，考虑到铁路穿越所造成的振动对于塔台的影响，针对铁路运营引起的振动对塔台内工作人员的舒适度及设备的正常使用影响开展了专题研究。



图 2.7-2 铁路线路与塔台的相对位置关系

2.7.2 振动控制措施

(1) 仿真模型

1) 塔台三维模型

塔台主体为钢筋混凝土核心筒体结构，地上总高度约 89.0m，塔台三维有限元模型如图 2.7-3 所示。列车运行引起的振动敏感区域主要是人员活动的管制指挥层、气象观察层、休息及值班层和现场指挥层。塔台基础形式为桩基础，底部伸入到中等风化灰岩层中，承台坐落于硬塑状粉质黏土层中。

对塔台进行模态分析，前 20 阶固有频率如表 2.7-1 所示。塔台前 5 阶振型均为水平方向，从第 6 阶开始竖直方向开始占主导作用。第 14 阶振型固有频率为 7.85Hz，塔台顶部管制指挥层和设备夹层的形变显著，整体变形呈现蝴蝶状；第 20 阶固有频率为 11.39Hz，气象观察层振动显著，整体变形呈波浪状。

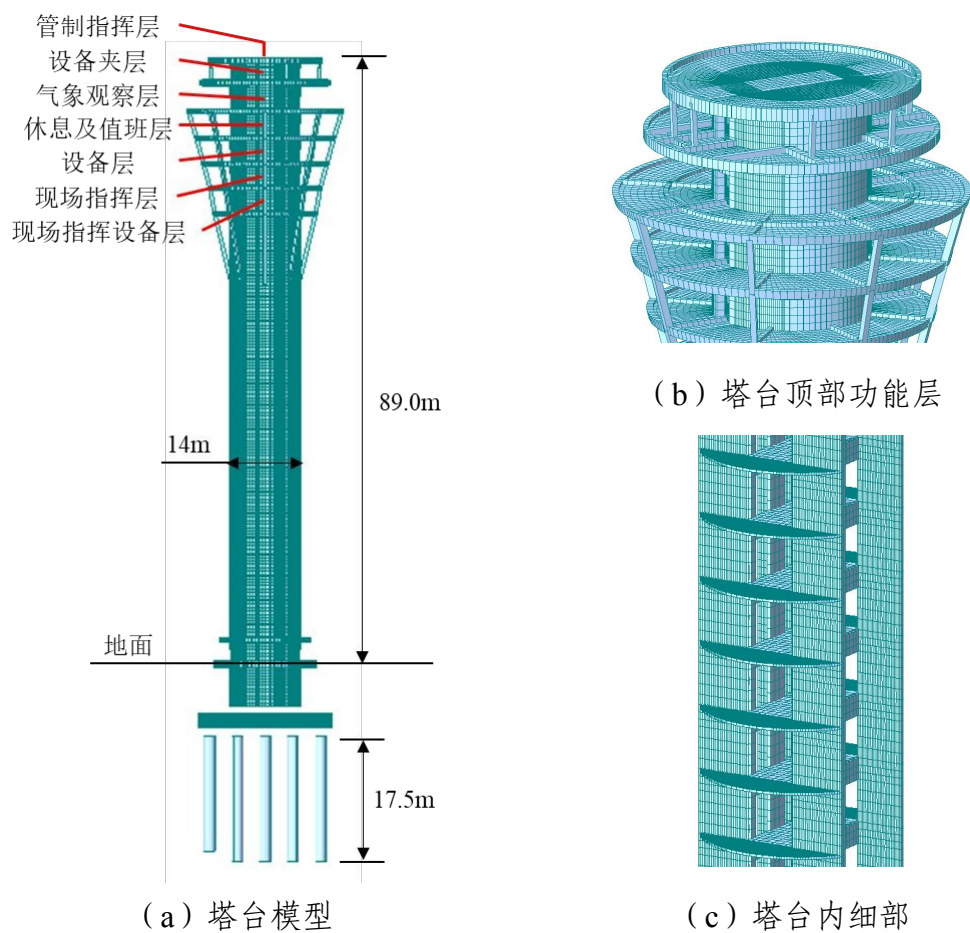


图 2.7-3 塔台三维模型

表 2.7-1 塔台前 20 阶固有频率

振型 (阶)	固有频率 (Hz)	周期 (s)	振型 (阶)	固有频率 (Hz)	周期 (s)
1	0.4249	2.3533	11	6.6951	0.1494
2	0.4279	2.3372	12	7.4276	0.1346
3	1.2516	0.7990	13	7.6993	0.1299
4	1.3640	0.7331	14	7.8474	0.1274
5	1.3749	0.7273	15	8.6345	0.1158
6	3.8137	0.2622	16	8.7785	0.1139
7	3.8417	0.2603	17	10.6629	0.0938
8	5.4159	0.1846	18	10.7924	0.0927
9	5.8237	0.1717	19	11.3360	0.0882
10	6.4459	0.1551	20	11.3912	0.0878

2) 列车-轨道-隧道-大地-塔台三维耦合动力学模型

基于车辆-轨道耦合动力学理论，分别建立高铁、地铁列车空间动力学模型。其中，轮轨接触模型采用 Hertz 非线性弹性接触理论确定轮轨法向力，按照 Kalker 线性理论计算轮轨蠕滑力，然后采用沈式理论进行非线性修正，长波不平顺采用《高速铁路无砟轨道不平顺谱》（TB 3352-2014），短波不平顺采用中国铁道科学研究院建议的功率谱密度函数变换而得，其波长范围为 0.01m~1.00m。在列车-结构相互作用分布式仿真平台上实现车辆运行行为的模拟，高铁列车为 CRH2 型动车组，高铁轨道为 CRTS I 型双块式无砟轨道，地铁列车为 6B 型车，地铁轨道为整体道床，隧道包括新建高铁隧道和地铁隧道，高铁隧道为单洞，在临近塔台区段由四线变为双线，底部坐落于中等风化灰岩层中，地铁隧道为单洞双线，上、下线之间由柱分隔，底部坐落于硬塑状粉质黏土层中。

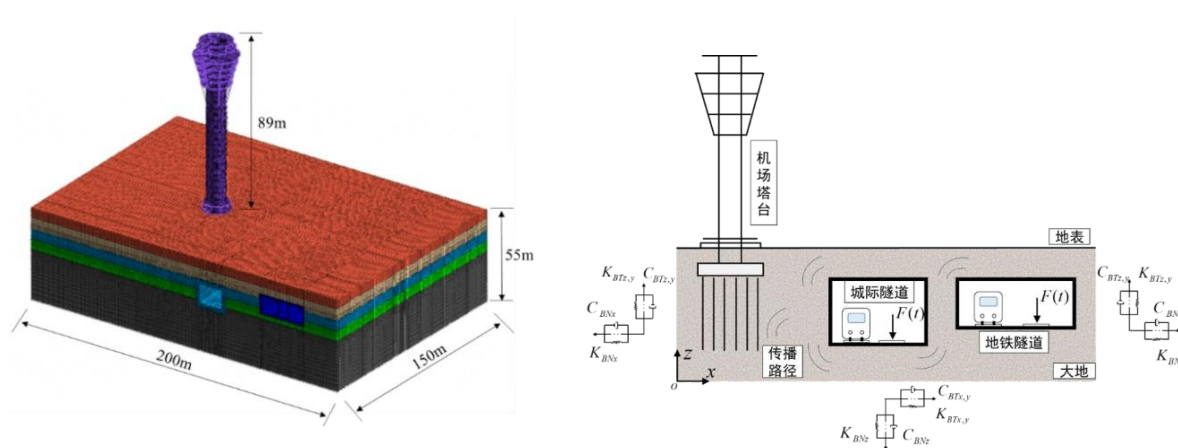


图 2.7-4 列车-轨道-隧道-大地-塔台三维耦合动力学模型

(2) 减隔振措施

1) 非减振情况下塔台振动预测

仅高铁通过（工况 1）、仅地铁通过（工况 2）及高铁地铁同时通过（工况 3）3 种工况下塔台不同位置的三分之一倍频程

振动加速度级如图 2.7-5 所示。

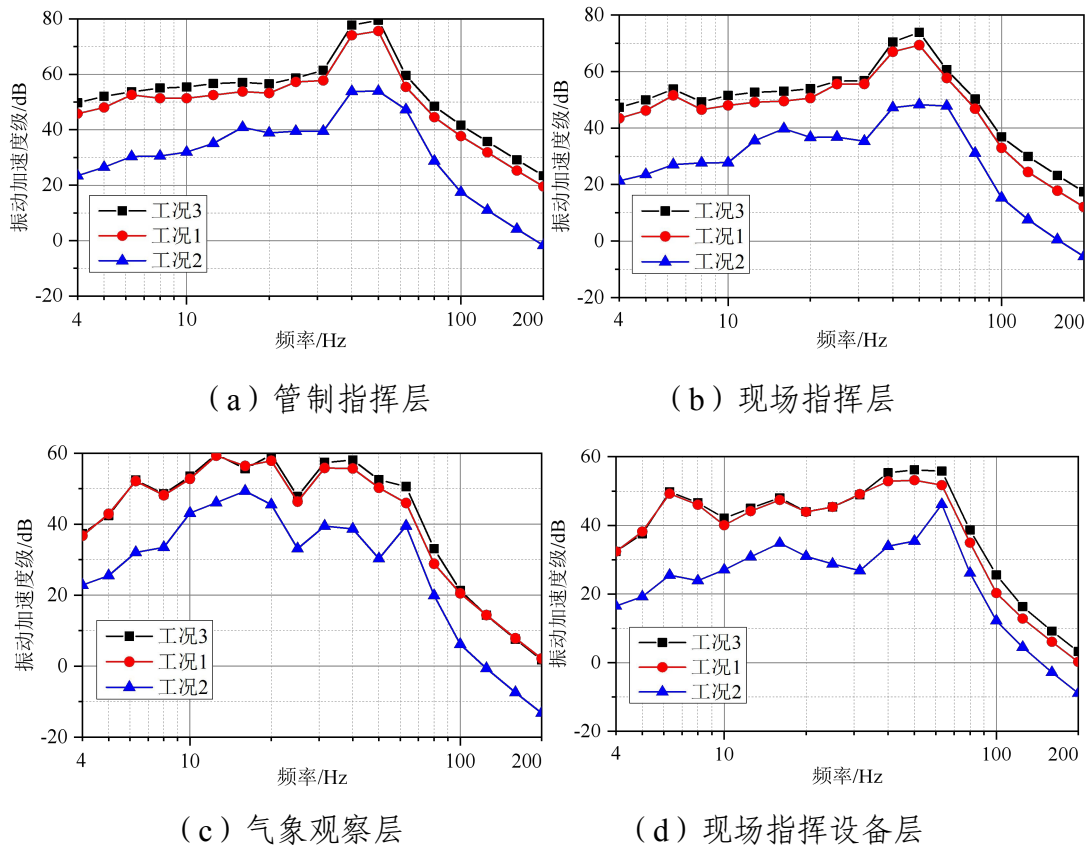


图 2.7-5 塔台不同位置三分之一倍频程振动加速度级

管制指挥层和现场指挥层测点的振动加速度级在 3 种工况下，4Hz~200Hz 频率范围内振级变化趋势基本一致，3 种工况的分频最大振级均出现在 50Hz 左右，管制指挥层测点在高铁和地铁同时通过的情况下分频最大振级达到 79.5dB，两测点在 30Hz~63Hz 频率范围内振级明显增大，大于 80Hz 频率范围振动快速衰减，车致振动对塔台电梯间影响较大。

气象观察层和现场指挥设备层的振动加速度级在 3 种不同工况条件下 6.3Hz 和 12.5Hz 处振级出现峰值，这主要与前述塔台固有频率接近，由于共振激发低频段振动的放大；两测点在 63Hz 附近，工况 2 和工况 1、3 的振级最为接近，但是均小于 60dB，说明车致振动对塔台功能区的影响较小。

计算结果表明，仅高铁通过（工况 1）的条件下，塔台功能区设备夹层和管制指挥层振动超标，分别超出夜间限值 4.8dB 和 4.6dB，塔台电梯间振动均超标，整体超标率达到 7.4%~21.9%；仅地铁通过（工况 2）的条件下，塔台分频最大振级出现在管制指挥层，达到 56.8dB，塔台振动均未超标；高铁和地铁同时通过的条件下，塔台功能区振动超标区域有所增加，现场指挥层至休息及值班层等 3 个功能区振动相比于工况 1 亦超标，塔台功能区分频最大振级增加约 0.9dB~3.0dB，电梯间分频最大振级增加约 3.9dB~4.6dB，整体超标率达到 0.97%~28.2%。

2) 减振轨道

南凭高铁在吴圩机场段预留了减振轨道的施作条件，与正线轨道结构保持统一，塔台段采用减振型 CRTS I 型双块式无砟轨道以降低振动影响，其特点为在道床板与混凝土底座板之间铺设一层减振垫，结构简单，且减振效果明显，在国内高速铁路中得到了成功应用，如图 2.7-6 所示。

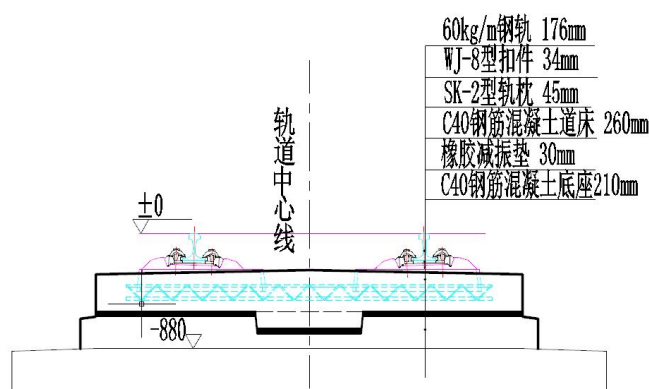
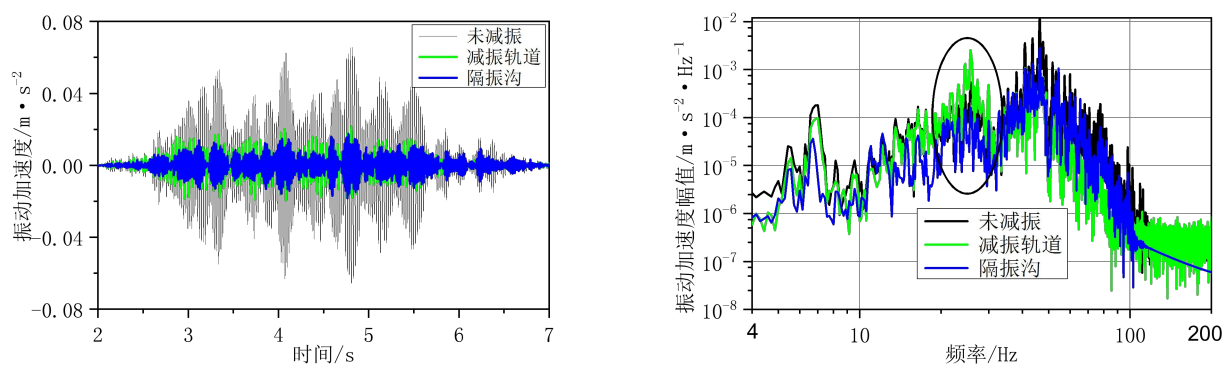


图 2.7-6 减振型 CRTS I 型双块式无砟轨道

塔台结构振动加速度时程曲线和幅频曲线见图 2.7-7 (a)

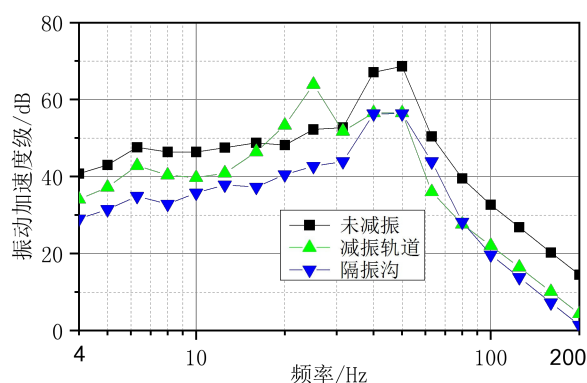
和 (b) 所示，减振轨道可以有效隔离车致振动，1/3 倍频程振动加速度级见图 2.7-7 (c) 所示，除减振轨道在其固有频率处会因共振放大振动之外，在其他频段减振轨道可以很好地衰减车致振动，减振量达 10dB。对于塔台等较难实施隔振支座等措施的高耸结构，减振轨道不仅工程造价低，施工及维护便利，还能保证铁路结构和上部建筑结构的连续性和完整性。

南凭高铁南崇段联调联试已于 2022 年 11 月 30 日之前完成，期间列车最高运行速度达到 275km/h，现场测试结果表明，减振轨道可以很好地隔离传递至塔台的列车振动。



(a) 时域对比

(b) 频域对比



(c) 三分之一倍频程振动加速度级对比

图 2.7-7 不同减隔振措施的效果对比

2.7.3 小结

(1) 高铁运行条件下，塔台电梯间及顶部两功能区振动超

标，分频最大振级达到 75.6dB，整体超标率达到 7.4%~21.9%；地铁运行条件下，塔台分频最大振级为 42.1dB~56.8dB，振动均未超标；高铁和地铁同时运行条件下，塔台车致振动响应有所叠加，超标区域相比于高铁单独运行增加 3 个功能区，分频最大振级达 79.5dB，整体超标率达到 0.97%~28.2%；

（2）高铁铺设减振轨道后，减振量可达 10dB 及以上，塔台的车致振动和二次结构噪声均满足《城市轨道交通引起的建筑物振动与二次辐射噪声限值及其测量方法标准》（JGJ/T 170-2009）0 类夜间标准要求。

3. 机场地下高铁站气动效应评估及措施

3.1 概述

为快捷换乘和节约用地，机场综合交通枢纽往往采用多层结构，高铁车站设置于下穿隧道内，为地下高铁站。目前国内机场综合交通枢纽地下高铁站主要有海南东环高铁美兰站、京雄高铁大兴机场站、成自高铁天府机场站、济青高铁青岛胶东机场站、厦漳泉城际铁路翔安机场站等。根据机场与市内铁路车站之间的距离及运营要求，大多数机场地下站都存在列车不停靠高速过站的情况。

列车高速通过隧道的过程中，由于隧道空间限制和车体对空气的拖曳挤压作用，将在隧道内产生强烈的压力波动、形成列车风、微压波等空气动力学效应，简称气动效应。气动效应将带来列车运行安全、建（构）筑物舒适度及设备正常使用的问题，是民用机场和高速铁路规划建设和运营期间需重点关注的问题。

为评估列车高速过站气动效应的影响，并提出有效的控制措施，可根据具体项目特点，采用 CFD 数值仿真、模型试验及现场试验等方法开展气动效应专题研究，为工程规划设计提供决策依据。

本章通过工程案例介绍机场地下高铁站气动效应影响评估及控制措施。

3.2 海口美兰机场站

3.2.1 工程概况

海南东环铁路北起海口市，沿海南岛东海岸途经文昌、琼海、万宁、陵水，到达南端的三亚市，全长 302km，为设计时速 250km/h 的双线电气化高速铁路，海口至三亚间直达列车的行车时间只需 80min。

为实现铁路与美兰国际机场的旅客零换乘衔接，东环线以隧道形式引入海口美兰机场 GTC 设美兰站，如图 3.2-1 所示。美兰机场隧道设计速度 250km/h，轨面以上净空面积为 92m²，全长 4600m，其中海口端区间隧道长 1430m，车站长 804m，三亚端区间隧道长 2366m，如图 3.2-2 所示。美兰站规模为 2 台 4 线，双岛式布置，两条正线（兼到发线）居中，既可供过站列车通过，也可停车上下乘客，站台外侧为到发线，可供停车避让和上下乘客，车站横断面布置如图 3.2-3 所示。



图 3.2-1 海口美兰机场平面布置

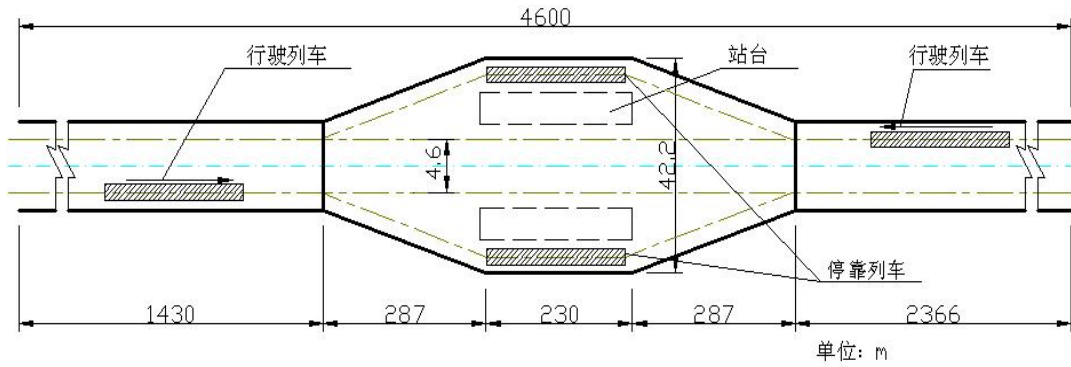


图 3.2-2 海口美兰机场站平面布置

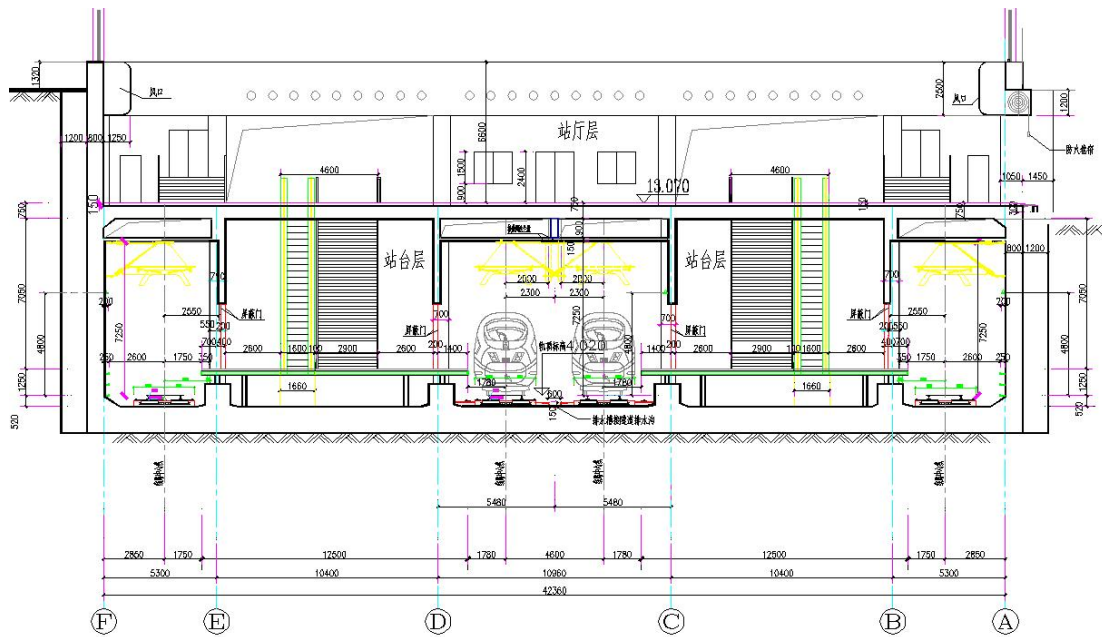


图 3.2-3 车站横断面布置

3.2.2 气动效应仿真分析

采用计算流体力学（CFD）方法，建立美兰站列车高速过站气动效应仿真模型，对各阶段设计方案的气动效应进行仿真分析。

初步设计方案（无站台门、无控制措施）气动效应仿真结果表明：（1）单列车 250km/h 通过时站台最大风速小于 5m/s，双列车 250km/h 站内交会时站台最大风速达 15m/s，存在人员安全隐患。（2）双列车 250km/h 站内交会时站台最大瞬变压力达

3.2kPa/3s，将产生人体压力舒适度问题。

增设隧道洞身泄压井方案气动效应仿真结果显示：增设隧道洞身泄压井后，双列车 250km/h 站内交会时站内最大瞬变压力小于 3.0kPa/3s；站台最大风速降为 11m/s，仍不满足要求。

站台两侧增设全封闭式站台门方案气动效应仿真结果显示：全封闭式站台门可有效降低站台最大瞬变压力和风速，站台门最大气动荷载达 3.8kPa。

3.2.3 气动效应控制措施

为减小列车高速过站气动效应的不利影响，美兰站采用以下技术措施：

- 1) 列车降速至 120km/h 通过美兰站；
- 2) 安装全高式站台门，以降低传入站台区域的压力波和列车风，保障人员健康和提高压力舒适度，如图 3.2-4 所示；



图 3.2-4 美兰站站台门

- 3) 小里程端隧道洞身设置 2 处泄压井，大里程端隧道洞身设置 3 处减压井，以降低车站及隧道内的压力波动幅度，从而减小站内设施的气动荷载，如图 3.2-5 所示；

4) 隧道洞口设置缓冲结构, 以降低车站、隧道及车内压力波动, 提高乘车舒适性, 如图 3.2-5 所示。

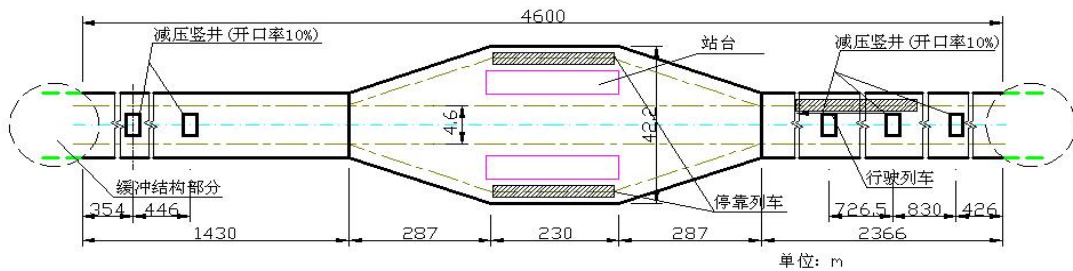


图 3.2-5 美兰机场站气动效应措施

3.3 南宁吴圩机场站

3.3.1 工程概况

南凭高铁以隧道形式引入南宁吴圩国际机场设吴圩机场站, 如图 3.3-1 所示。

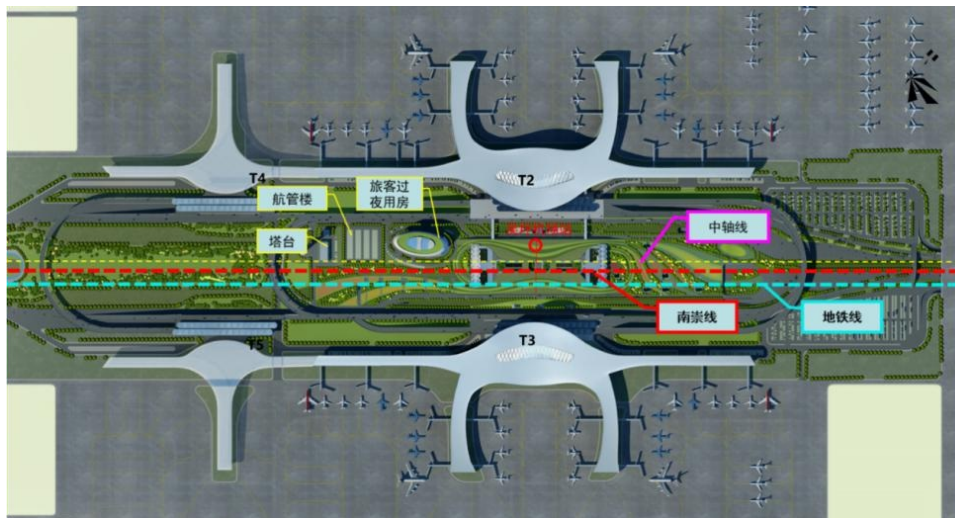


图 3.3-1 南凭高铁引入南宁吴圩国际机场

吴圩机场隧道全长 7465m, 设计速度 250km/h, 由南宁端区间隧道、吴圩机场地下车站和崇左端区间隧道三部分组成。其中, 南宁端区间隧道长 3185m; 吴圩地下车站段长 1350m, 车站为中间站, 采用两台夹四线双岛式布置形式, 设到发线 6 条 (含正线 2 条); 崇左端区间隧道长 2930m。

吴圩机场站站厅层位于 GTC 负一层，站台层位于负二层，如图 3.3-2 所示。

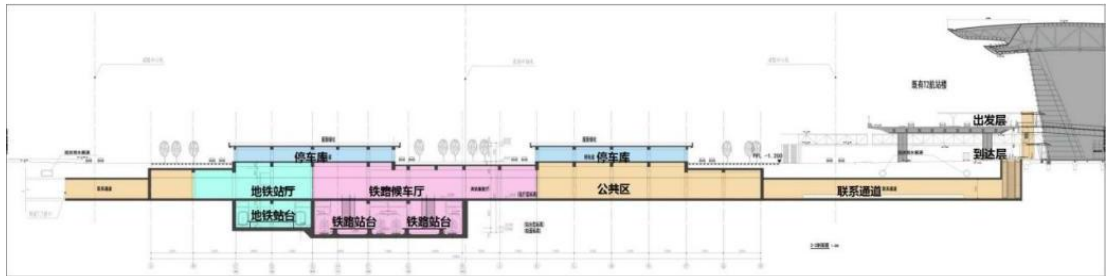


图 3.3-2 南宁吴圩国际机场 GTC 竖向布置

车站规模为 2 台四线，双岛式布置，两条正线（兼到发线）居中，如图 3.3-3 所示。

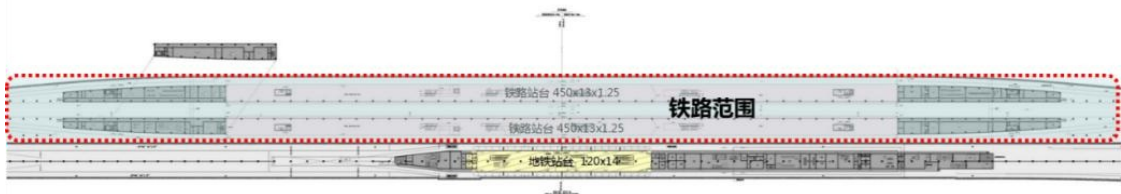


图 3.3-3 吴圩机场站平面图

站台尺寸 $450 \times 13 \times 1.25\text{m}$ ，正线侧装有全高式站台门，到发线侧无站台门，如图 3.3-4 所示。

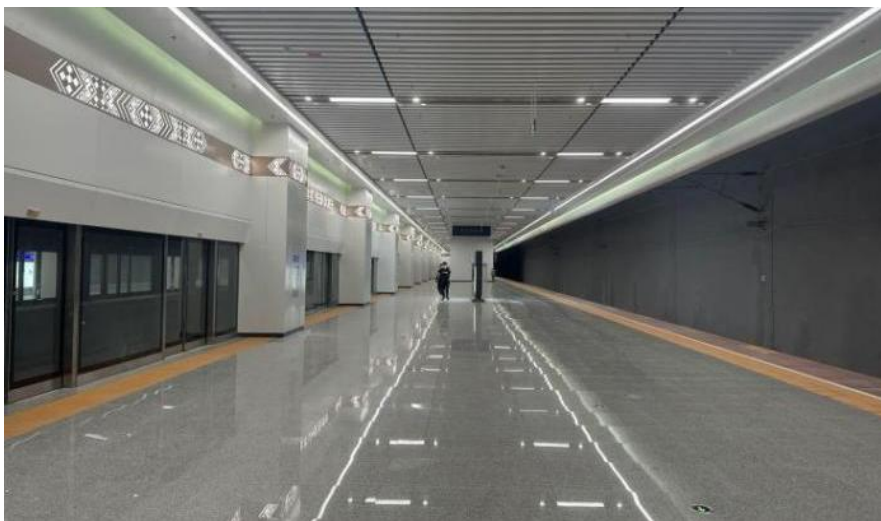


图 3.3-4 吴圩机场站站台实景

3.3.2 气动效应现场试验

(1) 测试内容

主要对单列车 120km/h~250km/h 过站和两列车 200km/h 站内交会时，站台门气动荷载及结构变形、站台空间压力波及风速、站厅层空间压力波及风速等气动效应指标进行测试。

(2) 测试设备

空气压力采用电阻式压力气压传感器测试，量程为 0 kPa~103kPa，如图 3.3-5 所示。安装方式为粘贴在门表面或三角架上，如图 3.3-6 所示。



图 3.3-5 气压传感器



图 3.3-6 气压传感器安装

风速采用机械式风速仪来测试，量程为 0 m/s~50m/s，灵敏度 0.5m/s，如图 3.3-7 所示。风速仪安装于地面 1.5m 高度处，如图 2.3-8 所示。



图 3.3-7 机械式风速传感器



图 3.3-8 风速传感器安装

(3) 测试结论

①站台门气动荷载和结构变形均未超过设计值。

②站台及站厅瞬变压力最大值均小于 $1.25\text{kPa}/3\text{s}$ 。

③压力波将通过站台层与站厅层之间的楼扶梯口传递至候车厅和出站厅，列车过站速度大于 120km/h 时，将引起站厅层平开门反复开闭现象。

④列车以 250km/h 过站时，站台风速最大值超过 5m/s ，其他工况站台及站厅风速均小于 5m/s 。

3.3.3 气动效应控制措施

(1) 降速运行

鉴于列车 250km/h 过站时站内旅客人体舒适度不高，列车过站速度不超过 200km/h 。

(2) 站厅层增设泄压窗

在铁路 1#、2#下沉广场处增加下旋电动窗（常开），用于泄压使用，如图 3.3-9 所示。



图 3.3-9 下旋电动窗

(3) 加强平开门锁闭结构

铁路进出站厅玻璃地弹门的地插销更换为高强度地插销，受力需大于 5kN，铁路进出站厅玻璃地弹门加装高强度闭门器，如图 3.3-10 所示。



图 3.3-10 高强度地插销

3.4 成都天府机场站

3.4.1 工程概况

成都至自贡高速铁路以隧道形式引入成都天府国际机场GTC负二层，设天府机场站，如图3.4-1所示。天府机场隧道设计时速350km/h，隧道拱顶以上最大埋深约30m，全长6227m，由3部分组成，小里程区间隧道长2777m，天府机场站长1613m，大里程区间隧道长3450m，如图3.4-2所示。

天府机场站是全国第一座设计速度为350km/h的地下高铁站，规模为2台6线，双岛式布置，两条正线位于中间，四条到发线位于站台两侧，正线线间距5.0m，正线与到发线间距7.3m，正线与到发之间设有隔墙。站台尺寸为450m×16m×1.25m，站台两侧均设置全高站台门，站台两端到发线侧均设置1座活塞风井，风井面积为26.4m²，如图3.4-3所示。

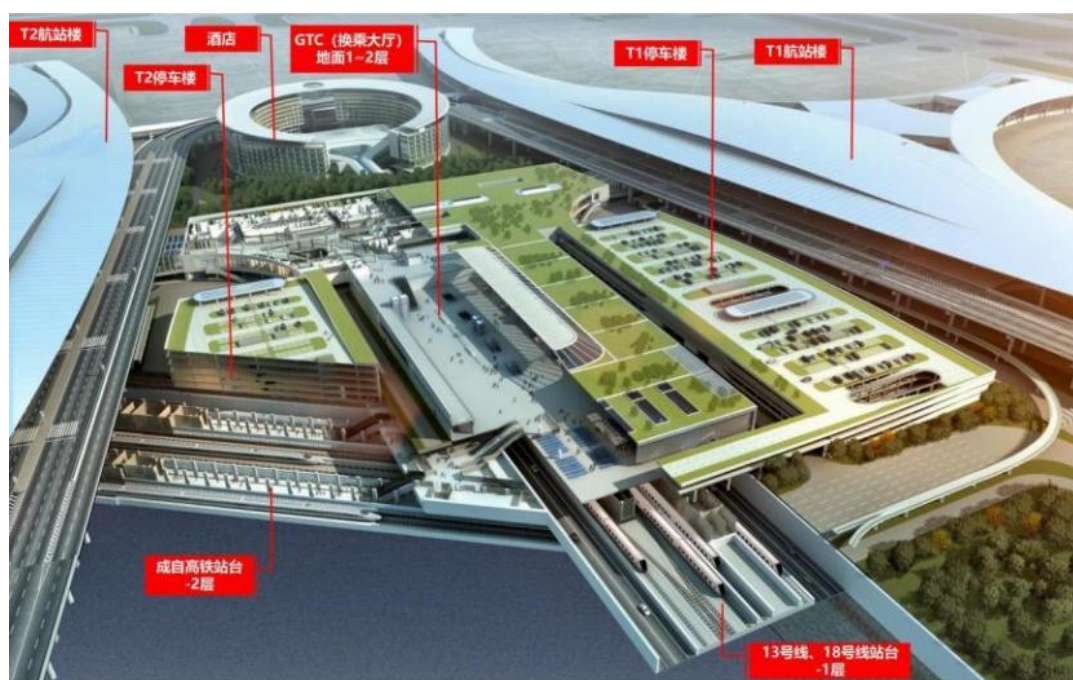


图 3.4-1 天府机场 GTC 竖向布置

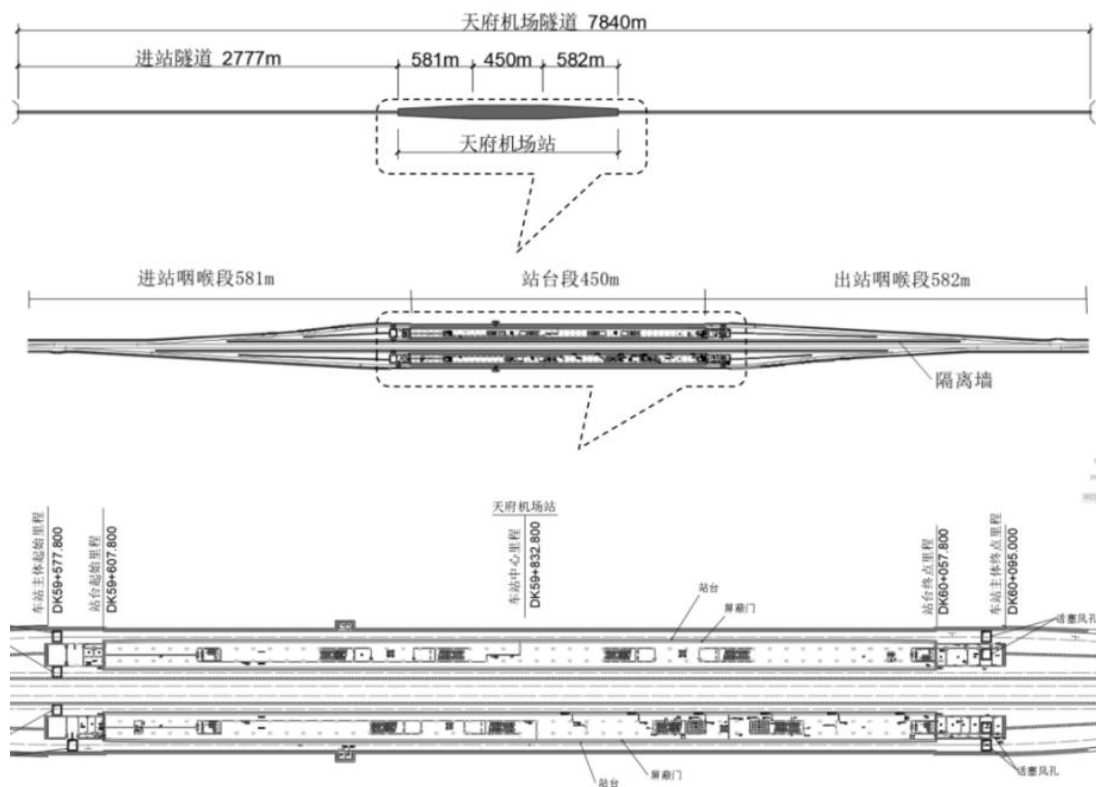


图 3.4-2 天府机场站平面布置

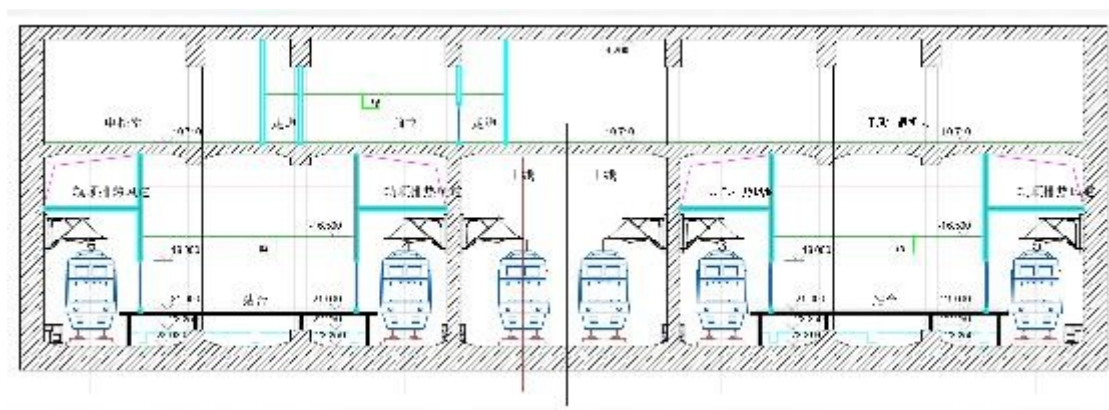


图 3.4-3 天府机场站平面布置

3.4.2 气动效应仿真分析

(1) 仿真模型

采用计算流体力学（CFD）技术，根据车站实际设计方案，建立了列车高速过站空气动力学效应仿真模型，如图 3.4-4 所示。列车高速通过车站及隧道时，车体周围气流速度和压力变化剧烈，在离散网格过程中，对列车周围区域适当加密，远

离列车网格设置较疏，模型网格总数约 3200 万~5000 万。

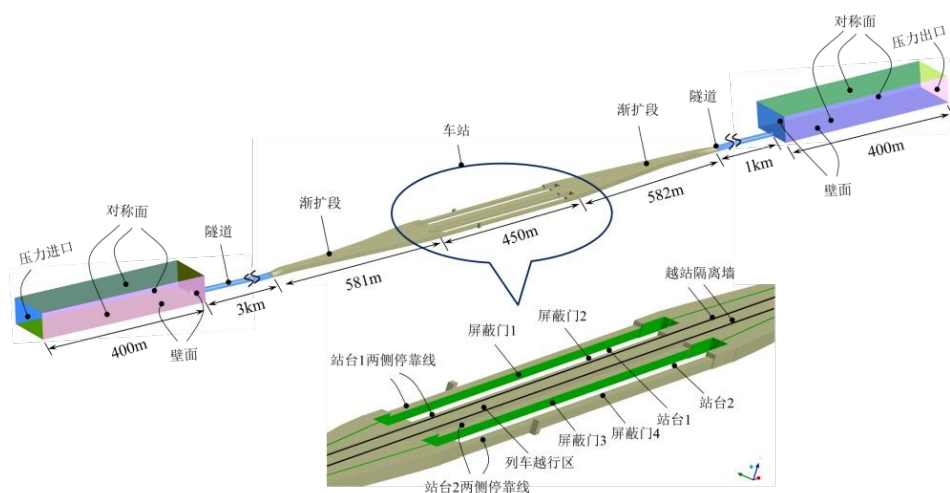


图 3.4-4 天府机场站气动效应仿真模型

(2) 结果分析

计算分析了单列车 350km/h 通过和双列车 350km/h 站内交会时的气动效应，主要分析得出全高式站台气动荷载特性。结果表明：站台门表面压力最大值，单列车通过时为 1416Pa，双列车车站中部交会时为 2104Pa，双列车车站端部交会时为 2302Pa。基于数值仿真结果，建议站台门气动荷载取 3kPa。

3.4.3 气动效应控制措施

为控制列车高速过站产生的气动效应，采用了如下措施：

1) 设置全封闭式站台门，降低传播至站台区的压力波和列车风，保障人员健康和提高压力舒适度。

2) 站台与正线之间设置隔墙，降低列车通过站台段时站台门承受的气动荷载，延长其使用寿命。

3) 利用到发线两端的活塞风井泄压，降低站内压力波动。

4) 隧道进出口设置开孔型缓冲结构，降低列车进、出隧道时产生的压力波，如图 3.4-5 所示。



图 3.4-5 天府机场隧道洞口缓冲结构

3.5 北京大兴机场站

3.5.1 工程概况

京雄高铁以隧道形式引入北京大兴国际机场航站楼下方，设大兴机场站，车站规模为 2 台 6 线，双岛式布置，2 条正线居中，4 条到发线分布位于站台两侧，正线与到发线之间设置隔墙，如图 3.5-1 所示。站台长 450m，两侧均设置全高式站台门，如图 3.5-2 所示。

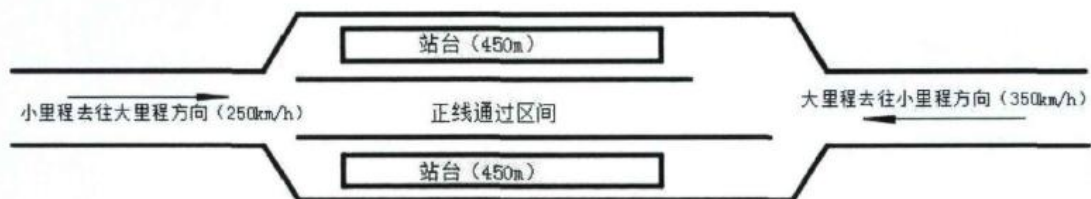


图 3.5-1 大兴机场站平面布置

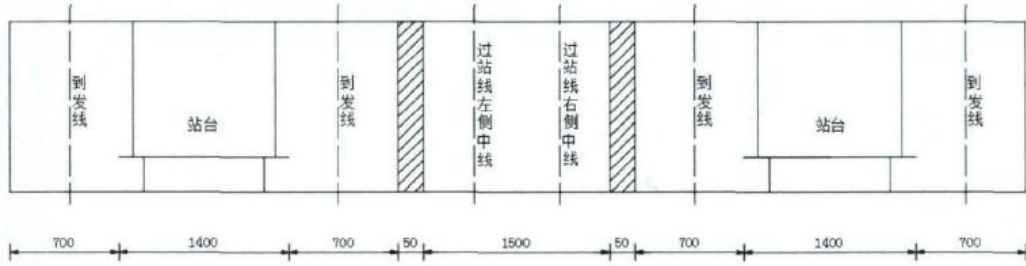


图 3.5-2 大兴机场站横向布置

本机场站在整个中心区和酒店范围内都采用了框架结构形式，而在中心区和北侧酒店以外的区域采用隧道形式。中心区正线上方框架梁跨度为 18m，两边有侧墙，形成一个矩形封闭结构形式，如图 3.5-3 所示。列车高速通过时，列车风压直接作用在 B1 层楼板、侧墙和底板上，造成动力振动响应。通过气动效应数值仿真，分析得出各工况下站内结构列车风压特性，为结构振动分析提供激励数据。

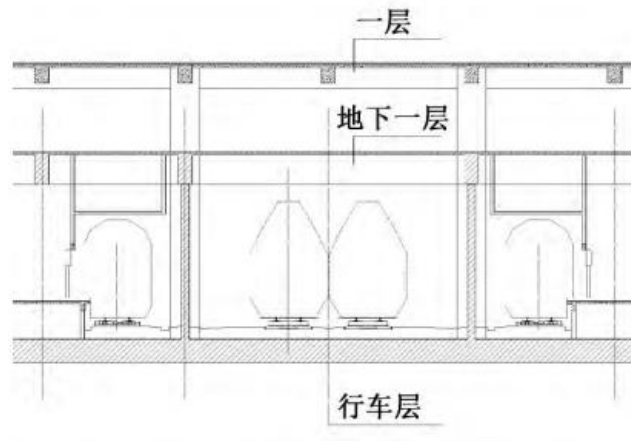


图 3.5-3 计算区域

3.5.2 气动效应数值分析

(1) 仿真模型

按照大兴机场站实际尺寸建立三维实体模型，其中地下车站部分按照设计图纸长度建模，保留主要结构物，简化站台面

的柱子、电梯等细小结构物，南北两侧区间隧道长度选取以隧道内入口压缩波峰值稳定为界限，且不小于 500m，如图 3.5-4 所示。采用 CRH2 动车组模型，8 编组，总长 201.4m，简化诸如受电弓、风挡、转向架等细部结构，如图 3.5-4 所示。

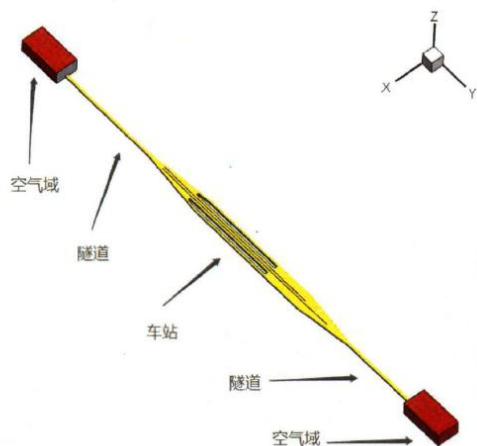


图 3.5-4 计算模型

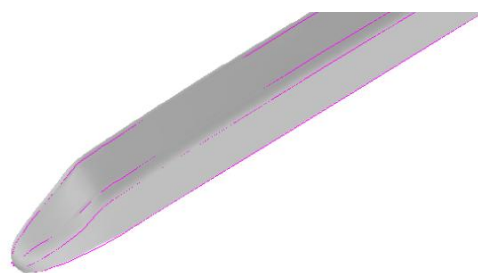


图 3.5-5 CRH2 模型

(2) 结果分析

根据高铁站与上部建筑结构的关系，沿线路方向可将站内划分为三个区域：中心区、近酒店区、薄弱区，具体位置如图 3.5-6 所示：

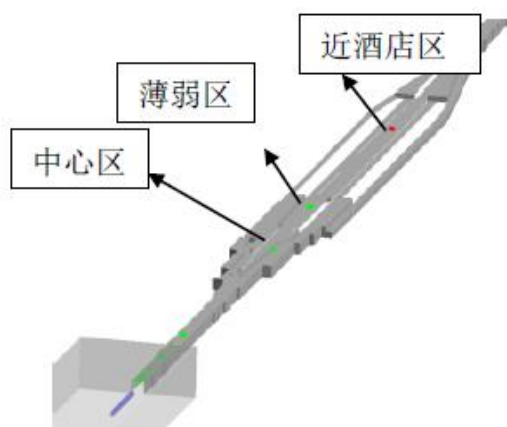


图 3.5-6 地下站场典型位置压力测点位置

高速列车通过地下站场时，压力分布更加复杂，中心区水平向 X-Y 剖面压力场如图 3.5-7 所示。

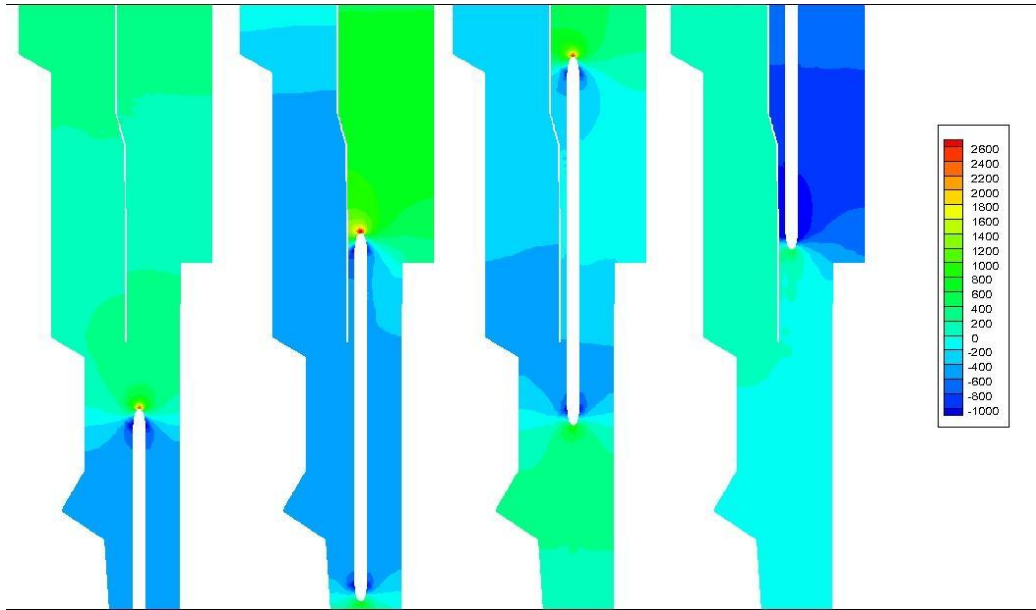


图 3.5-7 中心区 X-Y 剖面压力分布

高速列车通过中心区时，车头波和尾波的影响十分明显。高速列车通过薄弱区和近酒店区时，两侧存在挡墙，挡墙和底板、顶部结合，实际形成一个隧道空间，列车在这个空间中穿行时，隧道空气动力学特性十分显著，隧道内压力分布呈现一维化特征，沿隧道长度逐层分布。

中心区测点的压力时程曲线如图 3.5-8 所示。当入口压缩波传到测点时，测点压力升高，此正压峰值明显比隧道内的小，原因在于：一方面，随着压缩波的传播，能量会衰减；另一方面，由于从隧道到地下站场，空间截面积扩大，也引起压力值的降低。当车尾引发的膨胀波传到测点时，测点压力迅速降低，随后震荡。列车车头经过时，受头波影响，压力先增大，后迅速降低，车身车尾经过时，测点压力达到负压峰值。此区域压力变化幅值较小，正负压峰值由压缩波和膨胀波的反射叠加，及列车头波和尾波共同作用产生。

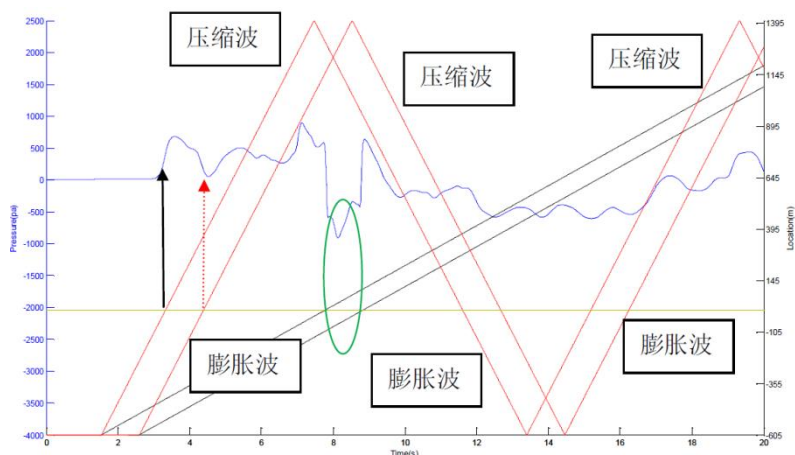


图 3.5-8 中心区测点的压力时程曲线

薄弱区测点的压力时程如图 3.5-9 所示，与中心区测点的压力时程分布基本类似。在薄弱区，列车经过时，列车头波和尾波的影响更为明显。薄弱区位于地下空间的两挡墙之间，实际是在地下空间内又一条隧道，受周围环境影响很小，隧道空气动力学特点更为鲜明。

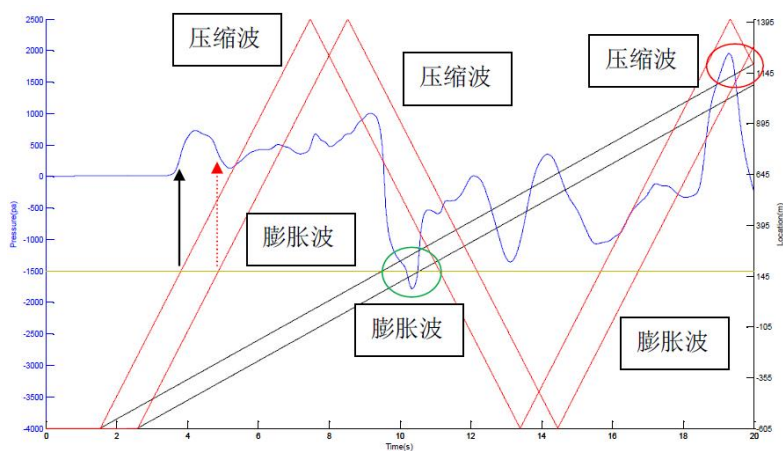


图 3.5-9 薄弱区测点的压力时程曲线

近酒店区测点的压力时程如图 3.5-10 所示，因仍然在地下空间的两挡墙之内，其压力时程曲线特点与薄弱区的测点更为相似。不同之处在于，在运行时刻末端出现了正压峰值，这是因为近酒店区已接近隧道出口，列车出隧道时产生了新的压力波，此压力波向站场内传播。

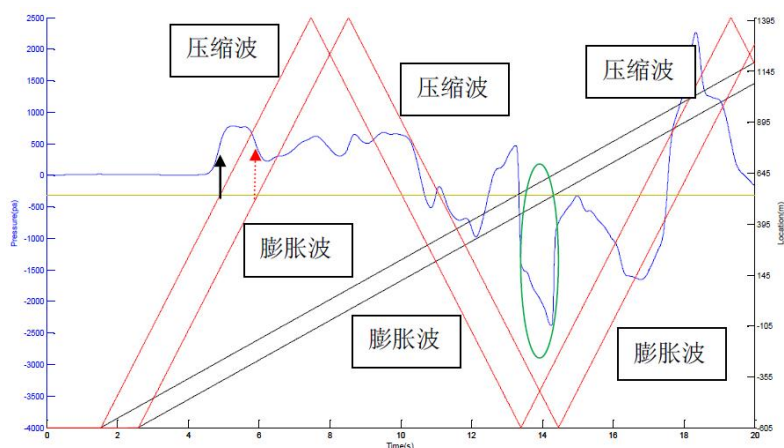


图 3.5-10 近酒店区测点的压力时程曲线

(3) 结论

1) 由于存在隔墙和站台门，站台层基本不受列车气流影响。

2) 单车通过时压力峰值与车速平方成正比；站内交会时压力峰值约与车速的 1.5~1.7 次方成正比。交会时压力峰值约为相同速度单车通过时的两倍。

3) 200km/h 交会时正负压峰值分别约为 1kPa 和 -2kPa。

4) 降低车速，有利于减小列车风对建筑结构的气动力作用。

3.6 小结

通过分析前述工程案例，可得出以下结论：

(1) 越站列车高速通过机场地下站将产生强烈的压力波、列车风、微气压波等气动效应，影响运营安全和质量，规划设计阶段须重点关注。

(2) 站台区将产生压力波动和列车风，过于强烈时将引起站台人员安全和舒适性问题的；岛式站台两侧均设置全高站台门，可有效阻挡气动效应向站台、站厅传播。

(3) 气动效应可通过站台与站厅层间的楼扶梯口传递至站厅层的候车厅、出站厅，甚至 GTC 公共换乘空间，引起风速过大、瞬变压力过高等影响旅客安全和舒适度问题，也会引起门窗等活动件反复开闭等问题。

(4) 须重点关注气动荷载对站台层顶板、设备区门窗、轨顶通风道、站台门等结构的作用，其结构强度和疲劳强度应满足要求。

(5) 泄压井（活塞风井）可有效降低站内气动效应的强度。

(6) 隧道洞口缓冲结构能够降低初始压缩波强度，但对列车通过时产生的压力波动无影响。

4. 信息共享、标识标牌、安检值机及坐标系

4.1 信息共享

空铁联运信息共享平台主要是为空铁联运的联程服务提供系统支持，其特点主要有：①面向多种用户，如铁路、机场、航空公司、旅游公司等；②信息多元化，既有静态信息（列车及航班的计划），也有动态信息（旅客联运的动态位置）；③系统信息的兼容性，系统处理的信息应兼容各企业内部平台信息结构^[12]。

空铁联运信息共享平台所服务的用户主要有3类：联运运营企业、联运服务企业、空铁联运乘客。联运运营企业是完成空铁联运过程中与运营相关的企业，如铁路路网公司、铁路运输公司、航空公司、机场公司等；联运服务企业是提供服务支持的公司，如旅行社、网站、联运信息中心、联运行包公司等；空铁联运乘客是联运产品的消费者。通过对以上平台用户的分析，空铁联运信息共享平台的功能模块主要包括客票发售、方案生成、座席管理、财务清分、数据采集、信息发布、决策支持等。

空铁联运共享信息平台中所涉及的信息包含基础信息、列车航班信息、座席信息、旅客在途信息、客票信息、清分信息等。平台中的共享信息相互关联，部分信息是对其它多类信息的整合处理得来的，图4.1-1表述了其各类信息间相互关系。需要指出的是，虽然共享信息密切相关，空铁联运信息平台中的信息共享是一种有条件的共享，共享信息并不是对所有用户开

放，不同权限的系统用户，只能获取权限内的信息，部分共享信息的提供者对于共享信息具有控制权。

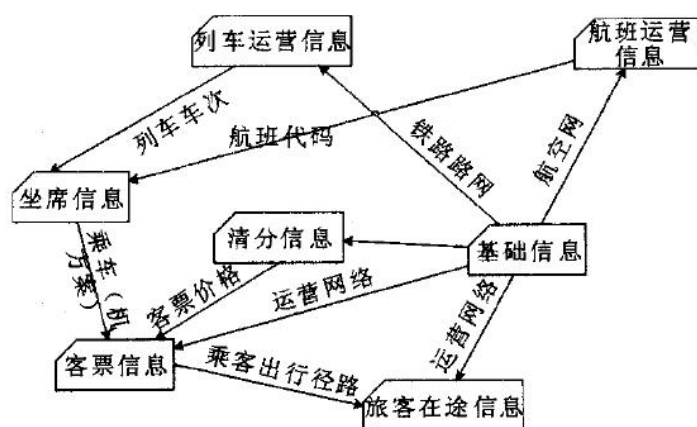


图 4.1-1 空铁联运共享平台信息关联

空铁联运共享信息的方式是对不同组织结构的体现，主要的信息共享解决方案有 3 种形式：集中式、多中心式及交互式。集中式信息共享，专门设有空铁联运信息中心，各方向信息中心提供信息数据，由信息中心负责整合处理，最后通过各个终端设置管理服务器管理调度对外的请求处理。多中心式信息共享，参与运营的各方已有比较成熟的信息共享平台（铁路的售票系统、KMIS、PMIS 系统，民航的 GDS 系统等）、已经形成了比较完善的内部运营机制，可以在各运输部门的信息中心建立数据交换服务器共享信息，对业务的办理则可以采取双方相互代理的方式。交互式信息共享，属于一种无中心模式，参与空铁联运各方根据自身的需要选择合作伙伴，签订必要的合作协议，相互之间提供有权限限制的信息访问权。特别的如订座信息、客票信息、旅客信息采取实时互换方式，清分信息可采取定期清算的方式进行信息共享。

2022 年 12 月 27 日，中国国际航空公司和中国国家铁路集

团有限公司合作全新推出了空铁联运产品，旅客可一站式购买高铁与航班衔接的联运产品，实现“一次购票、一笔支付、一证通行”。这是我国共建现代化综合运输交通体系的一次尝试，也是“空铁联运”由硬件联合升级为信息共享的新起点。

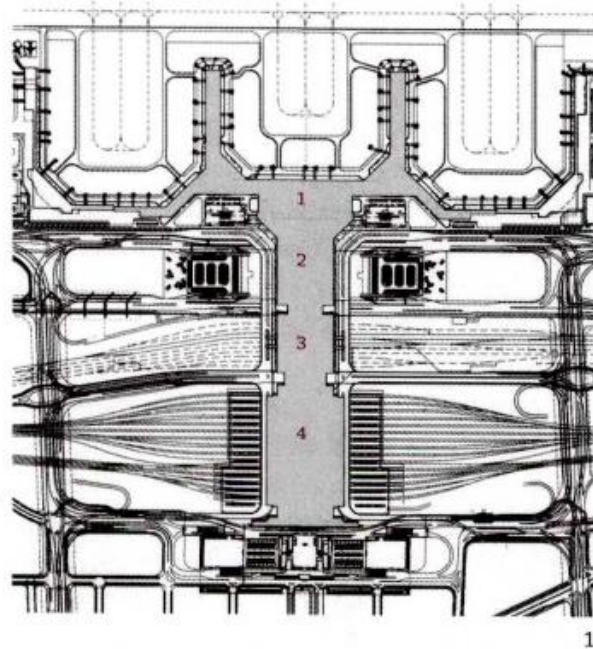
4.2 标识标牌

机场综合交通枢纽公共信息标识系统是机场文化和建筑系统的重要组成部分，对机场 GTC 流程效率、服务质量、用户体验和形象塑造有重要影响。标识版面虽小，却深刻影响到广大旅客以及其他机场用户的导向体验、视觉体验和服务体验。由于旅客的流线复杂而多样，只有严谨而清晰的旅客引导系统，才能使旅客高效而准确地完成整个集散过程。

4.2.1 上海虹桥综合交通枢纽标识标牌案例

上海虹桥综合交通枢纽核心区建筑综合体东西长 1km，南北宽约 220m，由虹桥机场 T2 航站楼、磁浮虹桥站、京沪高铁上海虹桥站及东西两大交通换乘广场组成。

上海虹桥综合交通枢纽集民用航空、高速铁路、城际铁路、高速公路、磁浮、地铁、地面公交、出租车等功能于一体，实现了跨区域、大范围人流物流的快速集散，大大提高了交通运营的整体效率。其中，机场、磁悬浮站、高铁、长途客运场站主要实现了虹桥综合交通枢纽城际交通的作用，而地铁站、出租车场站、公共汽车场站、停车场主要实现虹桥综合交通枢纽市域交通集散的作用。



1 总平面/Site plan
 1-T2航站楼/T2 terminal
 2-东交通中心/East transportation centre
 3-磁悬浮站/Maglev rail station
 4-高铁虹桥站/Hongqiao High-speed Railway Station

图 4.2-1 上海虹桥机场综合交通枢纽平面布局

导向服务是虹桥综合交通枢纽旅客集散服务的一项重要内容，服务于旅客进出枢纽的全过程，为旅客在枢纽内快速流动并准确找到目的地提供便利。集散换乘功能是虹桥综合交通枢纽规划、设计、建设和运营管理的核心，为旅客集散活动提供清晰、明确的导向服务，是提高枢纽运营效率的有效途径之一。有效的导向服务可以帮助大量旅客平稳有序地流动，减少旅客在枢纽内的滞留时间，提高出行满意度和舒适度。

1) 功能空间和客流换乘特点分析

作为面向长三角的门户以及长三角面向世界的窗口和桥梁，虹桥综合交通枢纽的核心设施（即三大城际交通设施）为铁路、机场和磁浮交通，规划高峰吞吐总量达到 60 万人次/天，其中铁路的客运量最大，机场和磁浮两者相加的客运量略

小于铁路客运量。其他设施为轨道交通、公共汽车、出租车等市域交通设施，都是为这三大对外交通设施配套的，其规划高峰吞吐量达到 50 万人次/天。

虹桥综合交通枢纽空间布局和功能整合的主要特点包括：一是将高铁车站、磁浮车站和机场航站楼三大城际交通设施统筹规划建设，确保旅客便捷换乘；二是在建筑内部设计了不同层面的人行通道和车道边。这种“多车道边，多通道”体系在设施配套上为各个不同方向旅客顺畅地进出枢纽以及换乘提供了可能；三是旅客集散主要依靠公共交通。根据运量，为高铁车站在西面设置了一个交通中心，在机场航站楼和磁浮车站之间设置了一个共用的交通中心，市域交通与三大城际交通设施融为一体。公共交通在这两个交通中心内均设置了地铁车站、公交车站、长途车站以及社会车辆停车库，地铁车站以“东西两站、立体换乘”站点布局，最大限度地减少了换乘距离；四是对交通枢纽上盖建筑以及主要人行通道进行商业开发，为旅客提供一个便捷、人性化的 24h 全天候的大型换乘中心。根据上述特点及枢纽一体化换乘的原则，虹桥综合交通枢纽核心区设施布局如图 4.2-2 所示，多车道边，多通道体系如图 4.2-3 所示。

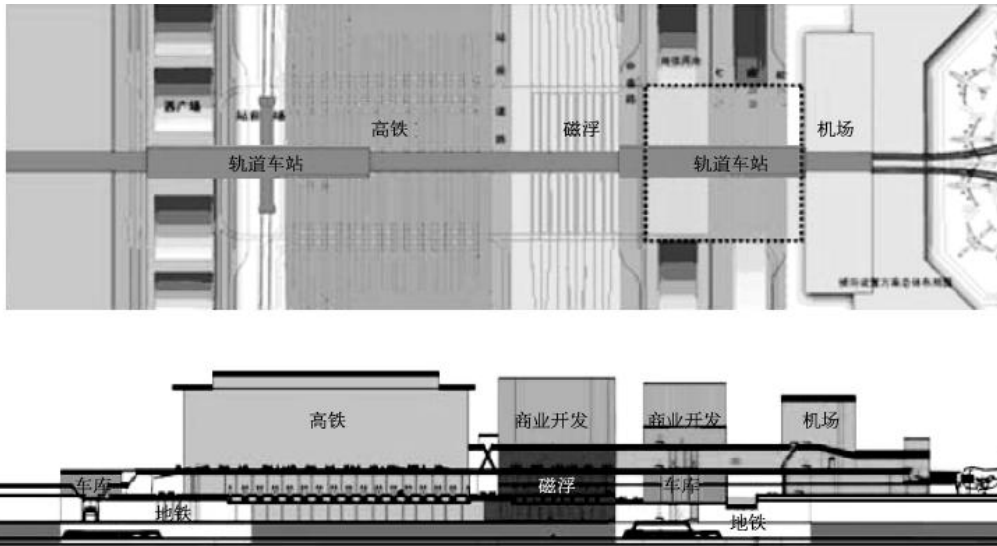


图 4.2-2 虹桥综合交通枢纽核心区建筑平面及竖向层面布置图

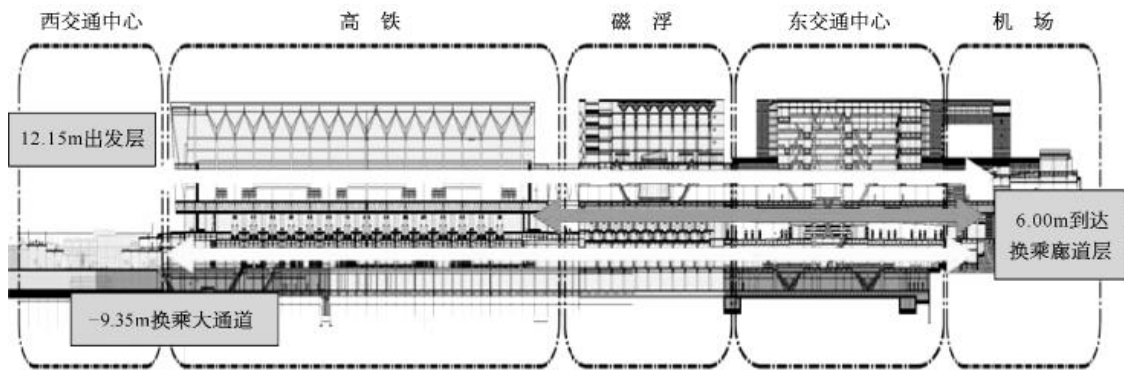


图 4.2-3 虹桥综合交通枢纽核心区建筑三大交通换乘通道

虹桥综合交通枢纽最重要的功能就是集散换乘功能。“以人为本，便捷换乘”的设计原则要求不同交通方式间的换乘布局应一体化考虑，各种交通方式客流换乘流线的组织，特别是旅客换乘大运量公共交通的流线设计应以立体换乘为目标，以实现便捷换乘，做到时间和距离上最小化。

2) 导向标识系统

导向标识系统设计的本质是对枢纽各功能空间线索的设计，是统筹虹桥综合交通枢纽环境整体以及各功能子空间的重要方法。其设计应遵循枢纽基本的空间关系与流线组织，服从

于安全、高效与便捷的换乘集散功能。空间线索的表现分为隐式线索和显式线索两种，隐式线索运用枢纽环境自身语言来增强旅客对枢纽空间形态的理解，强化空间识别性与导向性。显式线索则为导向标识系统的设计，其采用箭头、图形、文字以及动态交通信息等形式，向旅客明确地传达枢纽空间结构特征和交通信息，导向标识是一般综合交通枢纽最常用的显式线索之一。虹桥综合交通枢纽公共空间内部旅客的主要流线如图 4.2-4 所示。

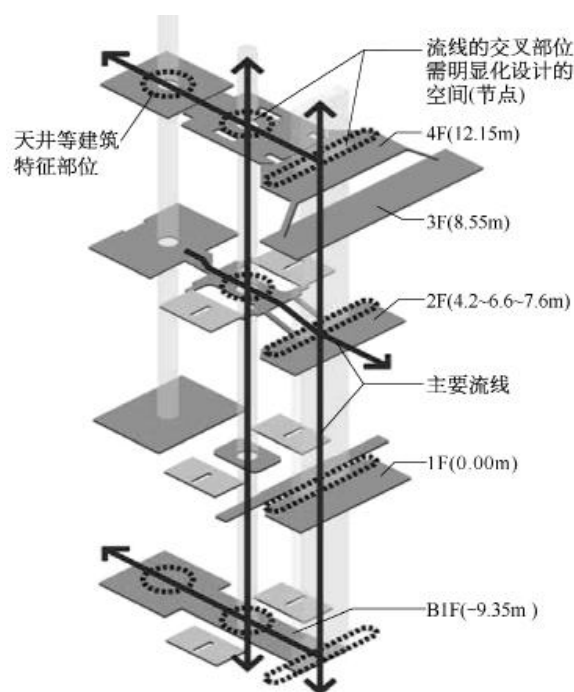


图 4.2-4 虹桥综合交通枢纽公共空间内部旅客的主要流线分析

通过流线分析，导向标识系统的规划和设计重点突出垂直流线、平面流线的交汇部位以及建筑的特征部位，如采光天井、出入口空间场所的节点设计。

导向标识系统设计与枢纽的空间布局和功能配置密切相关。标识系统通过符号、图形文字、动态信息，简洁、准确地为旅客提供各种环境信息，帮助旅客沿着他们选择的路径找到

目的地。

虹桥综合交通枢纽导向标识系统设计重点把握以下几点：

a. 最便捷的流线。由于不同层面多通道连接和多功能区域结合的特点，使得建筑结构错落复杂，为了最大限度提高旅客的换乘效率，应坚持使用最便捷的流线进行引导。

b. 合理的归类布局。基于上述最便捷的原则，在满足使用需要进行有效引导的同时，尽可能合理地控制布点数量、标识牌的高度及间隔距离。通过将各种交通信息、引导信息及警示信息进行系统归类，并根据各自功能分出主要信息和辅助信息，主要信息放在系统的显著位置，并通过色彩对比、面积对比加以强化。在细节上注意将同类型信息放在相同位置，以便使人的视线自觉地由点连成线，形成指向性轨迹并引导人的思维和判断。

c. 统一的标识形式。标识设置中使用统一风格，尺寸上尽量保持一致。不仅有利于形成统一的标识体系，更便于制作实施及后期的管理和维修。

在细节上，针对虹桥枢纽建筑特征及旅客的功能需求，建议在部分节点部位，对导向标识系统予以强化。

a. 垂直交通——电梯/自动扶梯节点。在虹桥枢纽独特多层复合空间内部，存在着多样化的上下移动形式，通过对电梯/自动扶梯进行突出的显式线索设计，即楼层导向标识的醒目化设计，可以引导大流量旅客在此平稳、顺畅地换层。

b. 问讯处。通过对设置在各个区域楼层的问讯处的醒目化的标识设计，充分发挥其提供综合信息的设施特性。同时，可

将问讯处提升为所有使用者服务的服务中心。

c. 各交通设施的目的地。作为导向标识流线的目的地，在抵达各交通设施的入口处采用大尺度的目的地名称标识来醒目化处理，使旅客易于识别并获得安全感。

4.2.2 北京大兴国际机场综合交通枢纽标识标牌案例

北京大兴国际机场轨道交通在航站楼地下二层设站，地下一层是广场式的换乘中心，可换乘高铁、地铁、城际等，其中包括京雄城际、廊涿高铁，还有机场快线。交通组织具备多功能集中、同质功能并行、多楼多层空间等特征。因此设计者在在大兴机场导向标识系统进行了更系统化、逻辑化的设计，并尝试从寻路的视角对项目建筑功能布局、建筑空间营造等进行检查和优化。

1) 目的地系统——流程等级策略检查及优化

空间框架模型（spatial framework）提出，对一个直立的观察者来说，垂直或上下的维度是最显著的，前后维度是次要的，而左右维度是最不重要的。依据此理论对航站楼流程进行分析，可以发现以下规律：

a. 串联与并联。显然，对于需要按时间去逐个经历的“串联”的流程系列，则应被安排在与迎客面垂直的“进深维度”，而需要旅客进行选择的“并联”流程，则应被安排在迎客面的平面维度内（垂直或水平）。

b. 唯一与多选。就“迎客面”的两个维度来说，理论上，对于最重要的“垂直或上下维度”，由于其识别的显著性及转换的不便性，应被应用与区分唯一目的地，即不可被替代的互

量与寻路难度呈正相关。而“集中”与“简单”这对矛盾的存在几乎是大型交通枢纽所必须面对的课题。

大兴机场在寻路优化设计中，引入了一种分级引导策略，即对相似功能进行区域性整合，在流程起点以对区域进行引导为主，在区域内对最终的目的地进行引导。将这十几个目的地按照交通类型、楼层分布进行整合，简化为三个主要的一级目的地，分别为：停车楼、地面交通换乘厅和轨道交通换乘厅。当旅客接近或到达这一级目的地之后，才需要进一步就交通线路和前往的城市方向进行二次选择。这样做的好处是通过分级策略，大大降低了旅客在到达后的第一时间需要做决策的难度，同时降低了到达出口处的旅客拥堵风险，通过本策略，引导旅客逐步明确自己的目标。



图 4.2-6 路侧到达环城流程路径规划策略

3) 视觉整合——视觉要素规划策略检查与优化

在旅客行进的过程中，有关流程、服务及商业等功能设施和空间要素会先后与旅客路径发生关联。为使旅客能够顺利完成旅程，并可以在此外的有限时间内充分享受到各种服务，这些视觉要素应以一个系统化的规则进行组织和呈现，而不是杂乱地布置缺乏秩序或互相竞争挤占资源，从而对旅客内心及实际流程进展造成负面的影响。当然这样做的受益者绝不仅仅是

旅客，机场的运营方、租赁方（航空公司与商家等）更能够从中收获运行的高效秩序和被释放的商机。

广告和商业店招、展陈是机场非航空收入的重要来源，由于其背后运营模式的推动，这些要素往往也是机场航站楼中最具有视觉吸引力的视觉要素，极尽自身抢占视觉资源之力。一方面，人的注意存在选择性。当旅客处于迫切寻路的阶段，会分配更多的注意力给标识牌，在此时旅客将特别留意标识通常出现的位置/标识的色彩/形状等，从而忽略其他信息。在此时用大幅抢眼的广告和商业店去招揽旅客的注意显然是不明智的选择。另一方面，在旅客流程中的有些部分指引内容是相对重复的，旅客容易产生视觉疲劳和焦虑，此刻的广告和商业的丰富色彩可以有效缓解旅客的情绪，同时更容易获得旅客的好感和注意，提高其商业价值，此可谓一举两得。此外，在一些路径分叉点设置大型的商业广告亦可承担寻路区域地标的的作用。

根据与行进过程中的旅客视线的关系，在一个典型的空间剖面中，引导标识、地图和手册信息台、商业店招、大型艺术/广告的理想位置如图 4.2-7 所示：

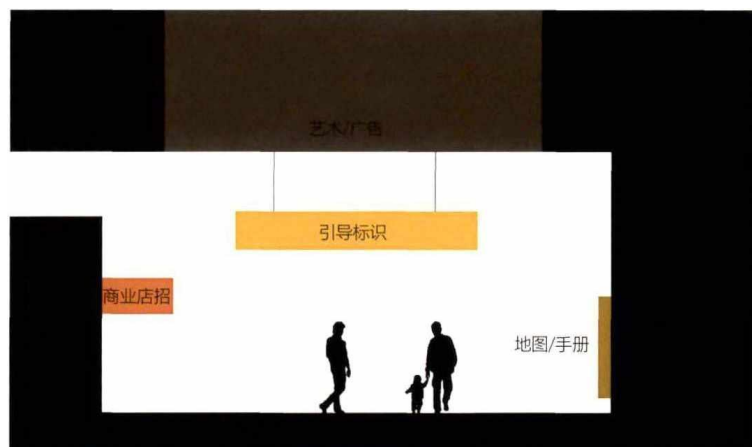


图 4.2-7 标识、商业和广告：在空间中的位置示意图

4.3 安检值机

2020年4月，国家发展改革委发布《关于促进枢纽机场联通轨道交通的意见》，要求促进枢纽机场联通轨道交通，提高出行便捷程度，简化换乘环节，优化轨道交通车站城市航站楼的值机、行李托运等服务，推进轨道交通与机场安检互认，提供便捷的换乘服务。

在国外，“空铁联运”模式已有先例，最早出现于上世纪80年代的欧洲。法兰克福机场的经验表明，“空铁联运”的核心在于旅客通过单次安检、值机、行李托运便可完成完整的“轨道交通—航空”出行。旅客在火车站即可办理乘机和行李联运手续，一到机场便可直接安检登机。

法国戴高乐机场衔接了法国新干线铁路（TGV）和区域快速地铁（RER），通过机场与法国国营铁路公司签订的代码共享协议实现空铁联运。法国航空公司出售的机票包括国内及欧洲各主要城市至戴高乐机场车站之间的铁路票，乘客在办理行李托运后，可搭乘高铁直达机场，提高了旅客运输的质量与效率。

英国伦敦希思罗机场通过希思罗快速轨道线与伦敦市帕丁顿车站相衔接，实现与伦敦高速铁路网的衔接。机场在帕丁顿车站设置了机场城市航站楼服务中心，并提供值机、行李传送等服务。从希思罗机场起飞的旅客可以选择在城市航站楼服务中心进行值机、托运行李，之后即可乘坐快速轨道线前往希思罗机场直接办理登机手续；旅客行李将被分成四类进行封箱，并分别运送到机场的四座相应航站楼。空铁联运不仅减轻机场

航站楼的值机压力，同时也为旅客提供快捷的联程运输服务。

国内也对空铁联运的一站式安检及值机优化方案，进行了一些探索。香港国际机场配套机场快线，在香港站和九龙站设置了免费的市区预办登机服务前台。旅客凭车票在此办理预登机以及托运行李等手续，根据自己的时间安排选择合适的机场快线班次到达机场航站楼，在出发大厅经过安检后登机。旅客交运的行李经前台初步安检后进入行李后台，后台行李员将行李进行数据检索处理后搬运至专用行李柜。列车停靠后，专用行李柜经自动运输系统送入行李专用车厢。行李到达机场后，经站台行李输送区域卸运进入机场行李运输系统进行处理。

为实现轨道交通和航空服务的无缝衔接，航空管制部门和机场运营部门建立了信息平台，对旅客办理值机手续的信息实行实时管控；同时为保证行李托运的安全性，港铁公司和香港机场建立了专用托运行李信息管理系统，对托运行李实行全过程的跟踪监控。

设置城市候机楼的香港站位于香港中环商务中心区域，九龙站位于西九龙南端的尖沙咀区，是香港近年来最瞩目的现代化市区发展计划的中心。这两个站点周边聚集了大量商务办公楼、住宅、商场和酒店，商务客多，客流量大，旅客提前办理完行李托运手续后，可继续在市区办公或购物，等接近登机时间再前往机场，增强了机场快线对航空旅客的吸引力。同时，香港机场快线站点的商店层直接与站外商业大厦相连，也显著提高了站点周边土地的开发程度。

近年来，内地也加大了空铁联运模式下安检与值机快捷化

探索力度。呼和浩特机场在航站楼内外共设置 3 处“空铁联运”服务专属区域。其中，在候机楼一楼国内到达大厅东侧设置“空铁联运”专属休息区，内设自助值机、自助手机充电、免费 WiFi 等服务设施；在二楼分别设置了“空铁联运”专属值机柜台和安检通道，专属值机通道为 C 值机岛 3 号、14 号柜台。

长沙黄花机场与中低速磁浮线实现空铁联运，通过将机场值机、行李托运等服务前移到磁浮高铁站，以缩短旅客在机场航站楼内的停留时间。

成都机场城市候机楼于 2021 年 8 月在成都东站正式投运，可为经成都东站中转双流国际机场出行的旅客提供航班值机、行李托运、安检预检、机场专线接驳、VIP 休闲、代售机票及相关航空业务咨询等服务，实现行李托运全程代办、旅客值机“一站式”通办服务。在候机楼大厅内，安装了专业值机设备和安检机，旅客可以提前托运行李完成值机，由转运人员将托运行李运送至各航空公司专用值机柜台，实现“两手空空”到机场，减少排队等待时间，享受便捷的“一站式”服务。

截至目前，在大型综合枢纽车站建立城市候机楼，使旅客在火车站内完成一次安检、值机和行李托运，便可直接搭乘列车至机场乘坐航班，中途不用再次进行安检和行李转运，是实现空铁无缝衔接、提高旅客出行便捷度的可靠方案。

4.4 坐标系

空铁联运综合交通枢纽工程，涉及机场空管、跑道、相关市政工程、高铁、城市轨道交通等复杂系统，从前期的施工建

设到后期航站楼、跑道、铁路等的运营维护，都离不开测量控制网。工程控制网是一切施工测量的基准，其稳定性直接关系到施工测量、工程的整体质量和后期安全的运营维护。

在厦漳泉城际铁路 R1 线及城市轨道交通下穿厦门新机场，成自高铁及成都地铁 18 号线下穿天府国际机场等项目中，均有多条铁路交通工程与机场工程共建，铁路引入机场段由机场工程代建，机场建设方为统一坐标系，一般在共建段，将铁路交通的坐标系统转换为机场工程所应用的坐标系统。

三种常用的测量坐标系统分别为：地心坐标系、参心坐标系、独立坐标系。坐标系统繁多，给工程设计及施工造成很多的不便，容易出现错误，因此需要建立各坐标系统之间的换算关系。国内外的很多学者对不同的空间直角坐标系之间的坐标转换问题作了许多研究，提出了多种转换模型，包括布尔沙-沃尔夫（Bursa-Wolf）模型、莫洛金斯基（Molodensky）模型等。

5.总结与建议

5.1 总结

目前在铁路、城市轨道交通下穿机场航站区的工程案例中，振动控制的主要技术思路为振源控制、传播途径隔离、受振体（建筑物）隔振等类别。

（1）在振源控制技术方面，车速 250km/h 的南凭高铁穿越空管小区与塔台时采用了 CRTS I 型减振型双块式无砟轨道，不仅工程造价低，施工及维护方便，还能保证铁路结构和上部建筑结构的连续性和完整性。现场测试结果表明，减振轨道可很好地隔离传递至塔台及空管小区的列车振动。同时，当前国内外减振轨道的应用车速不超过 300km/h，还需开展车速 350km/h 的减振轨道应用研究，以满足引入车速 350km/h 高速铁路的大型枢纽机场建设需求。

（2）在传播途径隔离技术方面，武汉天河机场将航站楼结构柱网与铁路隧道结构分离开，铁路顶板与建筑物底板之间填充约 1m 厚覆土。这种构造措施往往受铁路隧道埋深及建筑结构高度的制约，要实现构造上的结构脱离需要上盖建筑与铁路结构之间有宽松的空间。

（3）在受振体隔振技术方面，成都天府机场旅客过夜用房及航站楼、青岛胶东机场主航站楼及在建的厦门新机场旅客过夜用房等，均在铁路振动影响区域内的建筑物基础部位设置隔振层，布置竖向隔振支座，隔振频率可达 3.5Hz~4Hz。建筑隔振支座的优点是隔振效率高，但在结构设计上需考虑隔振层的

空间预留、建筑结构高度的控制、隔振节点横向变形控制等因素，特别是在高烈度地震区，隔振节点的设计需考虑建筑物抗震与隔震的整体性和结构安全性等问题，工程造价也较高，需综合总体投资和工程需求进行确定。

5.2 建议

综合近年下穿式布局的空铁联运项目建设及运营经验，对降低铁路、城市轨道交通下穿航站区的影响等情况建议如下：

(1) 优化航站区酒店、办公区、商业区等振动和噪声敏感点的建筑布局，使其尽量远离铁路振动和噪声的影响范围。

(2) 当结构空间允许时，铁路下穿机场航站区振动和噪声敏感建（构）筑物，宜避免采用共板、共柱或共基础等强连接结构形式。

(3) 当铁路结构无法避开而与航站区振动和噪声敏感建构筑物共柱、共板或共基础时，应设置隔振层。考虑隔振支座的检修便利性，隔振层高度可达 3.0m~4.0m，而且铁路标高及建（构）筑物限高应提前考虑隔振层带来的影响。

(4) 减振轨道是从振源处降低振动，尤其对降低二次结构噪声是最具性价比的工程措施。铁路设计单位可根据航站区振动和噪声敏感建构筑物的布局，合理设计减振轨道的隔振频率及铺设范围。重型低频减振轨道可在振源上实现更效率的振动控制，在综合交通枢纽和 TOD 站房等领域有着现实需求。

(5) 鉴于空铁联运工程项目的特点，振动和噪声敏感建（构）筑物大多情况下难以避开咽喉区。鉴于地铁道岔区减振轨道技术较为成熟，并已在多个城市得到应用，还应加强铁路

道岔区减振轨道技术的研究。

(6) 对于旅客过夜用房，减振轨道配合隔振支座等综合减振措施可获得更好的振动和二次结构噪声控制效果，部分区域还可考虑浮筑地板等措施。同时，可在敏感区域布设振动和噪声在线监测系统，为隔振节点养护维修提供数据支撑。

(7) 针对铁路下穿航站区振动和噪声敏感建（构）筑物，需结合工程实际开展专题研究，综合工程条件、工程投资和不同工程措施的减振效果，提出系统性的车致振动控制策略。

(8) 基于空铁联运综合交通枢纽的环境特点，应尽快开展航站区高舱位候机休息区、酒店、办公区、商业区、设备区等不同使用功能的振动和二次结构噪声标准限值研究，填补相关设计标准的空缺。

(9) 若列车以 250km/h 及以上速度通过地下机场站时，高铁正线应采用隔离墙，泄压井（活塞风井）及隧道洞口缓冲结构也可有效降低站内气动效应的强度；岛式站台两侧均设置全高站台门，可有效阻挡气动效应向站台及站厅层传播，需重点关注站台门在气动荷载往复作用下的振动疲劳问题，建议在站台端门、站台门等设施上布设包含气压、风速、振动等监测设备，为站台门等气动设计提供数据支撑；需关注气动荷载对站台层顶板、设备区门窗、轨顶通风道、站台门等结构的作用，其结构强度和疲劳强度应满足运营要求。

(10) 空铁联运信息共享平台建设一般需经历系统方案建立、信息交互、系统整合、系统扩展等阶段的循序渐进过程，不仅需要信息技术的支持，更需要法律法规、组织结构、基础

设施等方面的完善。

(11) 机场引导标识设计应与建筑空间设计、室内设计、寻路理论和空间认知心理学相结合，建议将导向标识设计这一边缘分支纳入建筑设计范畴，向建筑设计的前端延伸，从建筑空间和功能布局的源头进行寻路优化，避免在前序设计成果上进行“修补式设计”，以达成系统化、一体化的设计成果。

(12) 铁路、城市轨道交通下穿航站区设计中运用的坐标系繁多，给工程设计及施工带来不便，也容易出现错误。因此，在综合交通枢纽建设中，需要建立各坐标系统之间的换算关系或相应的坐标系统来解决这些问题。

6. 参考文献

- [1] 《中华人民共和国国民经济和社会发展第十四个五年规划和 2035 年远景目标纲要》[S].
- [2] 翟婉明. 车辆轨道耦合动力学（第四版）[M], 2015.
- [3] 毕伟. 地铁列车所致临近建筑物振动预测方法研究[D].北京交通大学, 2015.
- [4] TB 10761-2013. 高速铁路工程动态验收技术规范[S].
- [5] 吕玉恒. 噪声与振动控制技术手册[M].化学工业出版社, 2019.
- [6] 北京新机场列车振动及列车风专项研究第一分册-列车振动影响研究[R], 北京: 建研科技股份有限公司, 2016.
- [7] 铁路下穿厦门新机场振动专题研究报告[R], 成都: 中铁二院工程集团有限责任公司, 2019.
- [8] 青岛新机场高铁穿越振动分析报告[R], 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2016.
- [9] 成都新机场航站楼高铁穿越振动分析[R], 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2017.
- [10] 袁理明,黄银燊,李霆,等.武汉天河国际机场 T3 航站楼结构设计[J].建筑结构,2020,50(08):9-14.
- [11] 谢庆伦,李霆,袁理明,等.武汉天河国际机场 T3 航站楼桩基础设计与验证[J].建筑结构,2020,50(08):22-29+14.
- [12] 任鹏,徐瑞华,陶勇剑. 空铁联运信息共享平台的构建[J]. 交通信息与安全,2009,27(1):109-112.
- [13] 原战辉,胡伦俊,吴昊杰.成都天府国际机场工程测量平面基准的建立与应用[J].机场建设管理,2022,增刊 S1:218-224.

抄送：各监管局，各机场建设指挥部，各地区质监站，各设计、监理、
施工、咨询、检测单位。

民航局机场司

2023年1月19日印发
