

广州万科城人行天桥总体设计

蔡晓鹏, 胡会勇, 周 昱

(广州市市政工程设计研究总院有限公司, 广东 广州 510060)

摘 要: 为解决万科城路段行人过街系统不完善的问题, 研究设计了一座“工”字形布置、主桥呈圆弧形变宽的人行天桥。主桥采用跨径 51.04 m 的下承式系杆拱, 拱肋内倾 13.7°, 并设置空间双曲面雨棚。研究通过 MIDAS Civil 建立整体模型及 ANSYS 进行局部精细化分析, 对结构应力、变形、稳定性及人群舒适性进行了系统计算与分析。结果表明, 结构应力水平、变形满足规范要求, 整体稳定性良好。针对结构基频较低的问题, 创新性地采用了 4 台电涡流调谐质量阻尼器(tuned mass damper, TMD), 以满足人致振动的舒适性要求。研究结果表明, 该设计方案在复杂管线环境下通过合理的结构选型与 TMD 的应用, 实现了结构安全、使用功能与景观效果的统一, 可为类似环境下的城市人行天桥设计提供参考。

关键词: 下承式拱桥; 人行桥; 斜拱; 空间结构雨棚; TMD; 桥梁设计

中图分类号: U448.11; TU997

文献标志码: B

文章编号: 1009-7716(2026)07-0273-05

Overall Design of Vanke City Footbridge in Guangzhou

CAI Xiaopeng, HU Huiyong, ZHOU Yu

(Guangzhou Municipal Engineering Design and Research Institute Co., Ltd., Guangzhou 510060, China)

Abstract: To address the inadequate pedestrian crossing system on the Vanke City section, a footbridge with an "I"-shaped layout and a curved main bridge of varying width is studied and designed. Its main bridge is a through bowstring arch bridge with 51.05-m span. Its arch ribs are inclined inward by 13.7°, and a spatially hyperbolic canopy is set up. The overall model is established through MIDAS Civil and the local fine analysis is carried out by ANSYS to systematically calculate and analyze the structural stress, deformation, stability and crowd comfort. The results show that both stress levels and deformations of the structure meet the code requirements, and the overall stability is satisfactory. Aiming at the problem of low fundamental frequency, four eddy current tuned mass dampers (TMDs) are innovatively employed to meet the comfort criteria for pedestrian-induced vibration. The study result demonstrates that through appropriate structural selection and the application of TMDs under complex pipeline conditions, the design scheme achieves an integration of structural safety, using function and landscape effect, which can provide a reference for the design of urban footbridges in similar contexts.

Keywords: through arch bridge; footbridge; inclined arch; spatial structure canopy; TMD; bridge design

1 工程概况

万科城人行天桥位于广州市黄埔区开创大道西端, 距离广汕公路约 280 m, 该路段北侧分布有较大幅度的居民住宅、商铺等, 道路两侧均设有公交停靠站, 桥位处人流量较大, 过街需求大, 且该路段行车速度较快, 沿线行人过街系统也不健全, 因此在此处设置立体人行过街设施^[1]。

桥位处地下管线十分复杂, 分布的管线主要有 600 mm 机场输油管线、长途光缆、高压电缆、市政供

排水管网、地铁 6 号线等, 地铁 6 号线与该范围的市政道路平行, 建设于其地下空间, 对本天桥的中墩布设有一定影响。由于场地管线比较多, 为避免桩基与既有管线冲突, 对部分梯道桩基采用横向偏移避让管线的方法, 在保证满足使用功能的前提下, 减少对既有管线的迁改^[2-3]。

场区位于珠江三角洲冲积平原和剥蚀残丘地带, 基岩孔隙裂隙承压水、孔隙承压水和上层滞水是主要的地下水类型, 地下水混合稳定水位埋深为 1.80~4.70 m。场区地层土层自上而下分别为中、粗砂层、可塑状粉质黏土层、卵石层、全、强风化岩层、中、微风化岩层。场区距区域深大断裂较远, 未发现断裂通过场地的迹象, 场地的地质构造基本稳定。

收稿日期: 2025-11-12

作者简介: 蔡晓鹏(1993—), 男, 硕士, 工程师, 从事桥梁设计工作。

2 主要技术标准

(1)人群荷载:主桥按4 kPa,梯道按5 kPa。

(2)地震荷载:抗震设防烈度7度,地震峰值加速度值 $0.10g$ (g 为重力加速度)。

(3)净空:桥下车行道范围不小于5 m,桥上人行净空不小于2.5 m。

(4)桥梁结构设计基准期:100年。

3 结构总体设计

万科城人行天桥是进入科学城的门户,设计思路来源于广州这座浪漫自由的岭南之都与科创新区的现代生态之城,整体造型具有现代感的飘逸灵动,同时体现传统的对称之美,灯光中其造型如森林中展开的伞状植物,又如翩翩起舞的蝴蝶,呼应科创新区生态自然的环境和腾飞发展的势头。

整个天桥平面呈“工”字形布置,主桥采用 1×51.04 m跨系杆拱垂直跨越开创大道地面道路^[4],梯道采用双边接地型式,在主梁两端设置直线形楼梯。主桥平面呈圆弧形变宽,最窄处人行宽度为3 m,楼梯宽度为2.9 m。正立面拱高7.86 m,两片拱肋向内倾斜 13.7° ,拉索及拱肋均在斜面内。天桥设置曲面网格雨棚结构。拱肋、系梁及雨棚结构分节段于工厂预制,现场分段吊装拼接而成。万科城人行天桥总体布置见图1。

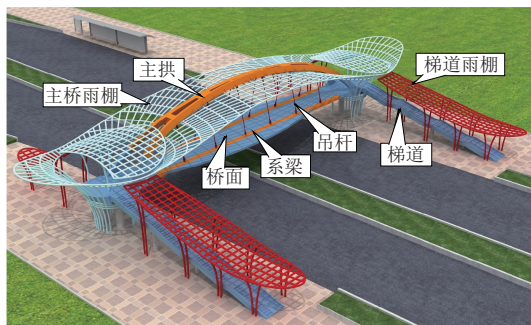


图1 万科城人行天桥总体布置

4 上部结构设计

万科城人行天桥上部结构包括主拱、系梁、桥面、吊杆、钢平台及雨棚,标准横断面见图2。

4.1 主拱肋

主拱跨48 m,拱肋平面内矢高8.09 m,矢跨比为1/5.933,拱肋整体内倾 13.7° ,正立面拱肋矢高7.860 m。主拱采用等高箱型断面,箱高900 mm,宽500 mm,顶、底、腹板厚度均为32 mm,主拱肋截面见

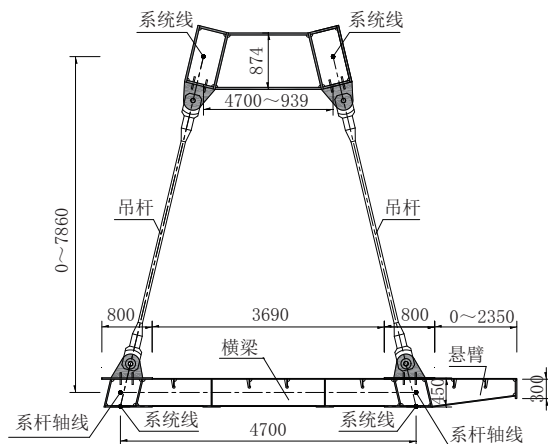


图2 天桥标准横断面图(单位:mm)

图3。拱肋立面(拱平面内)按圆弧形布置。

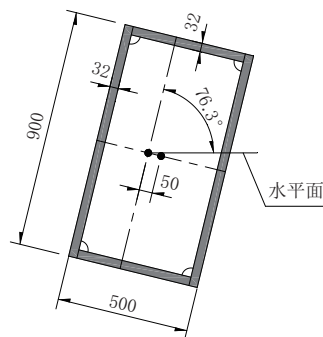


图3 主拱肋断面图(单位:mm)

4.2 系梁

为与拱肋顺接,系梁采用平行四边形截面,高450 mm,腹板间距500 mm,腹板与顶底板夹角 76.3° ,板厚均为20 mm,系梁截面见图4。

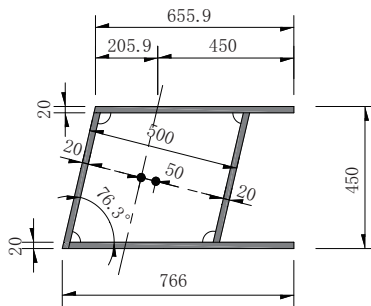


图4 系梁断面图(单位:mm)

4.3 桥面

桥面采用正交异性钢桥面板^[5],桥面板厚12 mm。纵向设置板肋,肋高120 mm,厚12 mm,横向间距600 mm。纵向每隔2 m设置横肋,横肋为倒T形,腹板厚12 mm,下翼缘宽250 mm,厚12 mm,与系梁底板平齐。为加强主梁竖向刚度,除纵肋外还设置了两道中纵梁,与横肋等高共同构成格子梁体系。桥面板与系梁顶板焊接共同受力。

4.4 吊杆

吊杆与桥面夹角为 76.3° ,在梁上的间距为5.4~

6 m,共 6 对。吊杆外裹热挤双层 PE 防护套,采用标准抗拉强度 $f_{pk}=1\ 860\text{ MPa}$ 的整束挤压式钢绞线。吊杆在拱肋及系梁上均采用插销式锚头,吊杆规格为 GJ15-5,设计安全系数大于 3.0。

4.5 钢平台

为与楼梯接顺,于拱轴线底部向端部延伸 3.47 m,形成一钢平台。平台高 1 m,与拱脚共同形成一整体节段。平台节段顶、底板厚 32 mm;与拱肋、系梁连接的节点板厚 36 mm;支点处设置横隔板及支座加劲肋,厚度均为 32 mm。节段横向两侧设置钢牛腿以搁置梯道,牛腿高 420 mm,顶板隔板均厚 20 mm。

4.6 雨棚

4.6.1 雨棚结构设计

雨棚为空间双曲面结构,造型独特,阳光板分格每个单元各不相同,考虑到曲面半径比较大,为减小玻璃加工难度,在保证整体效果的情况下,采用折面代替曲面的原则,保证施工拼接面协调过渡^[6]。雨棚上端面采用光滑的隐框设计,排水通畅,不聚灰,保证雨棚长期洁净、美观。

4.6.2 雨棚与主拱肋连接

雨棚与主拱肋连接构造^[7]由上、下耳板及连接板组成,上耳板焊接于拱肋腹板,下耳板焊接于雨棚杆件上端,上耳板与下耳板通过连接板进行连接,连接板与上耳板之间通过销轴连接,与下耳板之间通过高强螺栓连接,本连接构造其拱肋端、网架端构造均于工厂预制,现场通过销轴连接,无需现场焊接,施工便捷,连接构造见图 5。

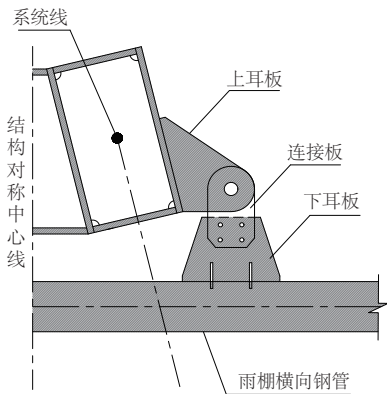


图 5 雨棚与主拱肋连接构造

5 结构特性分析

5.1 整体有限元模型

采用 MIDAS Civil 软件建立天桥空间杆系整体模型进行结构受力分析,天桥上部结构及雨棚各杆件采用空间梁单元模拟,桥面板、支座附近加强钢板以及雨棚阳光板采用板单元模拟,吊杆采用桁架单元

模拟。全桥共 1 975 个节点、4 634 个单元,整体模型见图 6。雨棚立柱底部固结处理,主梁底部设置支座,主梁与雨棚纵桥向固结,横向桥可相对移动,以减小风荷载对主桥结构影响。

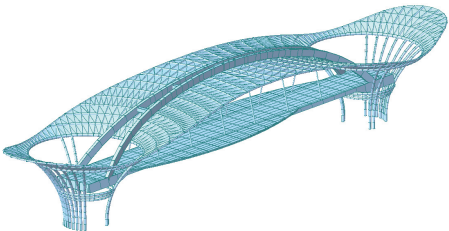


图 6 天桥 MIDAS Civil 整体模型

5.2 应力及变形

经整体有限元模型计算可知:

标准组合作用下,主拱肋最大剪应力为 15 MPa,上缘最大拉应力和最大压应力分别为 99 MPa 和 -117 MPa,下缘最大拉应力和最大压应力分别为 74 MPa 和 -156 MPa;系梁最大剪应力为 12 MPa,最大拉应力和最大压应力分别为 106 MPa 和 -69 MPa;桥面板最大等效应力为 57 MPa。天桥主要构件应力水平较低,正应力及剪应力均小于容许值,强度存在一定安全富余。

恒载作用下,由于索力作用,系梁最大竖向变形为向上 47 mm;成桥阶段人群纵向偏载(人群半跨满载、半跨空载)作用下,人群满载侧第二对吊杆处系梁发生最大竖向变形,为向下 16.3 mm(挠跨比 1/3131),小于《城市人行天桥与人行地道技术规范》(CJJ69—1995)的限值 1/800,结构刚度满足要求。人群荷载作用下变形云图见图 7。

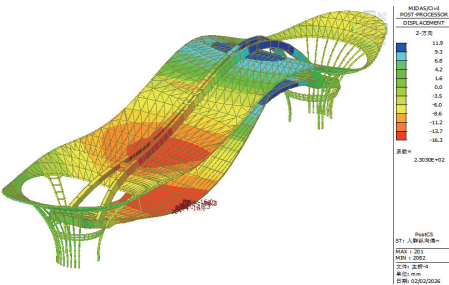


图 7 人群荷载作用下变形云图

5.3 拱梁结合段局部模型

拱梁结合段构造复杂,易发生应力集中,因此对拱梁结合段采用 ANSYS 建立板单元模型进行局部分析,选取 3D 壳单元 SHELL63 建立有限元模型。在拱肋顶部、梁内侧端部边界予以固结。在支座范围内施加向上节点力,单个支座总节点力大小为 2 000 kN;在人行梯道牛腿施加向下节点力,单侧人行梯道总节点力大小为 240 kN。有限元模型共 87 968 个

节点,89 446个单元,有限元模型见图8。

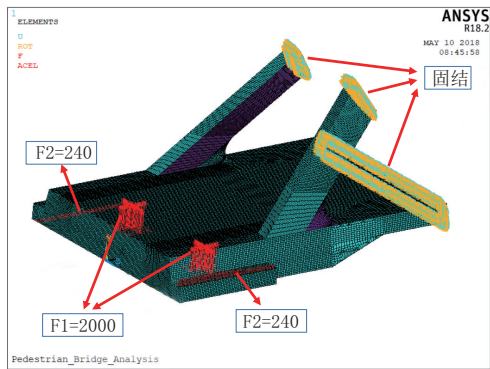


图8 拱梁结合段局部模型

5.4 拱梁结合段计算结果

- 经局部模型计算可知：
- (1)荷载作用下,拱梁结合段最大变形量为向下3 mm,出现在牛腿侧主梁端部。
 - (2)荷载作用下,最大Von Mises应力为107.4 MPa,位于与拱肋端部接触的底板,构件大部分Von Mises应力均在65 MPa以下,整体应力水平较低,满足材料强度要求,拱梁结合段Von Mises应力云图见图9。

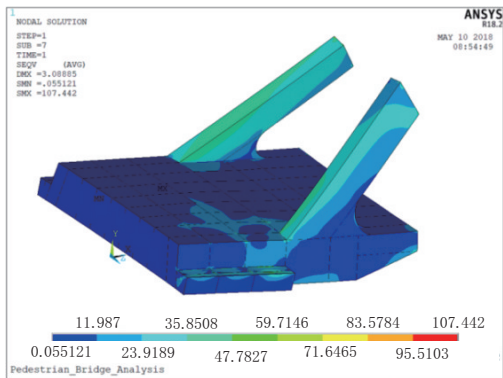


图9 拱梁结合段 Von Mises 应力云图

5.5 屈曲分析

屈曲分析考虑可变荷载为结构恒载+风荷载+人群荷载+整体升降温,各可变荷载组合系数均为1.0,由程序自动进行组合^[8]。根据计算结果,前10阶失稳模态均为网架屈曲,未见主桥屈曲,且第一阶屈曲系数为10.24,结构整体稳定性较好,第一阶屈曲模态见图10。

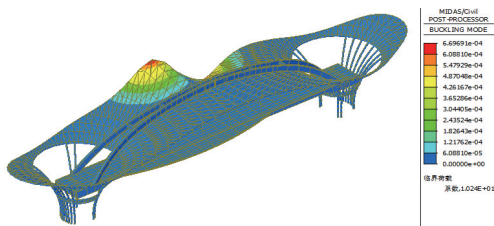


图10 第一阶屈曲模态

5.6 人群舒适性

万科城人行天桥为空间拱梁组合结构,且主拱

肋倾斜、主梁变宽,结构模态振型复杂。根据整体有限元模型计算,天桥第1阶频率为1.70 Hz,振型表现为拱肋主梁反对称竖弯,第2阶频率为2.18 Hz,振型表现为拱肋主梁横向侧弯,第3阶频率为2.33 Hz,振型表现为拱肋对称竖弯,第4阶频率为2.34 Hz,振型表现为拱肋对称横向侧弯。

根据计算结果,结构基频较低,第1阶竖向频率仅为1.70 Hz,为满足上下班高峰期行人通行的舒适性要求,采用电涡流调谐质量阻尼器(TMD)抑制振动^[9-12],全桥共设置了4台调谐重量为1 t的TMD,见图11至图12。

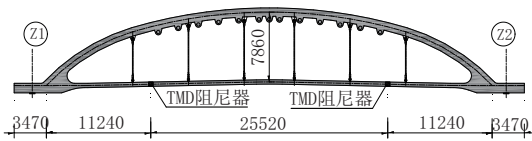


图11 TMD纵向布置(单位:mm)

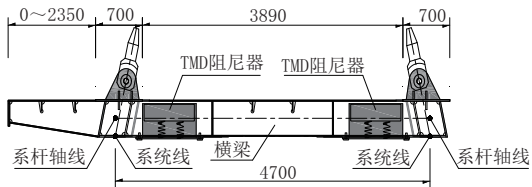


图12 TMD横向布置(单位:mm)

主桥TMD安装后,由专业单位进行减震效果实测与评价,测试方法如下：

- (1)测试桥梁的环境振动加速度响应,据此分析桥梁的各阶模态频率和振型。
- (2)通过人群跳跃让桥梁振动至一定幅度后停止激励,测试得到桥梁加速度自由衰减曲线识别各阶模态等效阻尼比。

基于测试得到的桥梁加速度自由衰减曲线和INV法识别各阶模态等效阻尼比。INV阻尼计法属于频域的分析方法,也称ZOOMBDFT法,即大容量数据频域任意区间聚焦细化技术,该方法可获得较高的精度^[13]。安装TMD后天桥实测阻尼比见表1。

表1 实测天桥阻尼比

TMD 编号	模态阶次	需求阻尼比/%	实测阻尼比/%	是否满足
1# 3#	1	2	2.71	是
2# 4#	2	2	2.83	是

安装TMD后桥梁相应模态实测阻尼比均大于人致振动控制所需求的阻尼比,满足人致振动控制要求。

6 总体施工方案

主桥钢拱肋、系梁、桥面及钢平台采用工厂预制,通过公路运输至指定施工现场,采用支架法+汽车吊进行分节吊装拼装施工。首先搭设临时支架,吊装系梁、桥面及钢平台,然后于桥面上搭设支架,吊装拱肋,

然后安装吊杆,进行初次张拉,随后拆除临时支撑,完成体系转换,再安装雨棚、梯道,并施工栏杆、照明等附属设施,进行吊杆二次张拉,成桥^[14-17]。

7 结 语

万科城人行天桥跨越开创大道,主桥采用 51.04 m 跨下承式系杆拱,该桥造型融入了新区科技创新的元素,与周边环境高度融合,充分体现了力与美的结合。天桥拱肋整体内倾 13.7° ,主梁平面呈圆弧形变宽,结构形式新颖,雨棚为空间双曲面结构,造型独特。社会经济的发展对桥梁景观提出了更高的要求,万科城人行天桥的景观效果可为其他桥梁的外观选型提供参考。本天桥采用整体计算和局部模拟相结合的数值分析方式,保障天桥主体结构强度、刚度、整体稳定性安全可靠,为后续类似桥梁结构的计算提供了一种较为完善的思路。同时本天桥结构竖向基频较低,采用电涡流调谐质量阻尼器(TMD)技术以满足舒适性要求,其设计经验表明,通过TMD的应用,人行天桥可在一定程度上突破基频的限制,为创造出更轻巧乃至新的结构提供了条件。

万科城人行天桥 2019 年 5 月开工建设,2021 年 9 月建成通行,建成后实景如图 13 所示。



图 13 万科城人行天桥实景

参考文献:

- [1] 邓亚平,田涛.人行天桥功能与景观提升改造试点项目分析与总结[J].市政技术,2024,42(8):48-55.
- [2] 闫文华.城市人行天桥精细化设计的关键问题研究[J].城市道桥与防洪,2021(7):143-146.
- [3] 关清杰,张忠伟.复杂环境条件下城市人行天桥设计及结构处理措施探讨[J].城市道桥与防洪,2019(3):98-103.
- [4] 杜亚光,向毓,曾向往.某景观钢结构拱桥设计要点[J].市政技术,2021(4):1009-7767.
- [5] 程斌,孙斌,肖汝诚,等.正交异性夹层钢板桥面板力学性能分析与截面优化[J].世界桥梁,2021,49(3):84-90.
- [6] 杨宏利.大跨度双曲面钢结构雨棚制作与拼装技术研究[J].城市建设理论研究(电子版),2022(35):92-94.
- [7] 蔡晓鹏,周昱,张松涛,等.一种插销式拱肋网架连接构造:中国,ZL202421805003.8[P].2025-11-28.
- [8] 杨勇,宁平华,王晟,等.基于解析模式分解和随机减量技术的桥梁模态参数识别[J].铁道科学与工程学报,2022,19(5):1355-1363.
- [9] 马中文,刘峰,汪剑.斜吊杆下承式系杆拱人行天桥振动设计[J].城市道桥与防洪,2019(2):125-127.
- [10] 杨勇,乐小刚,曾炯坤,等.广州海心桥人致振动研究[J].世界桥梁,2023,51(4):70-76.
- [11] 蔡宪棠,杨燎原,罗雅芳.基于刚度及舒适度的大跨度人行桥振动控制研究[J].中国市政工程,2025(3):141-144.
- [12] 赵佳骏.大跨异形钢人行景观桥舒适度分析及控制[J].城市道桥与防洪,2025(6):169-173.
- [13] 应怀樵,李惠彬,沈松.关于用 INV 的频率细化与大容量数据采集分析技术提高阻尼比计算精度的研究[J].噪声与振动控制,1997(2):17-20.
- [14] 罗文辰.既有道路新建人行天桥施工技术研究[J].工程技术研究,2024,9(22):76-78.
- [15] 胡健健,赵运,郭伟河,等.城市装配式天桥施工技术与应用[J].广州建筑,2024,52(6):27-32.
- [16] 郑刚.人行天桥上跨快速路设计与施工[J].中国市政工程,2024(6):15-18.
- [17] 高曼.大跨度人行天桥钢箱梁两节段拼装技术[J].广东公路交通,2023,49(6):48-52.