

一种拱梁组合体系人行桥的设计要点分析

唐春霞

[同济大学建筑设计研究院(集团)有限公司,上海市 200092]

摘要:以太原市某拱梁组合体系人行桥为背景工程,提出了人行桥设计创新中应重视因地制宜的总体布置与精细化构造设计方案。该人行桥总体布置摒弃传统的全宽跨越地面道路的总体布置模式,仅在机动车道范围布设主桥,两侧通过下行梯道顺接,既实现景观过渡,又缩减占地与梯道规模,同步提升结构性能、经济性与美观度。构造设计聚焦轻钢结构人致振动难题,对比3种斜吊杆方案后采用2对柔性斜吊杆设计,通过优化固有频率从根源规避振动问题。同时系统阐述总体布置与上下部构造,实现功能与美学的多维度平衡,为同类工程提供技术参考。

关键词:拱梁组合体系;人行桥;创新;总体布置;构造设计;结构性能

中图分类号: U448.11; TU997

文献标志码: B

文章编号: 1009-7716(2026)06-0265-05

Key Design Points of an Arch-Beam Composite System Pedestrian Bridge

TANG Chunxia

[Tongji Architectural Design (Group) Co., Ltd., Shanghai 200092, China]

Abstract: Taking an arch-beam composite system pedestrian bridge in Taiyuan as the background project, it is proposed that in the design innovation of pedestrian bridges, the emphasis should be placed on the overall layout and refined structural design schemes that are adapted to local conditions. The traditional model of full-width spanning over ground roads is abandoned in the overall layout of the pedestrian bridge. The main bridge is only constructed within the scope of motor vehicle lanes, and its both sides are smoothly connected by downward staircases, which not only achieves a landscape transition, but also reduces the land occupation and the staircase scale, simultaneously improving the structural performance, economic efficiency and aesthetic appearance. The structural design is focused on the problems of human-induced vibration in lightweight steel structures. 2 pairs of flexible diagonal suspenders are designed after comparing 3 different diagonal suspender schemes. The vibration issue is fundamentally avoided by optimizing the natural frequency. Meanwhile, the overall layout and the superstructure and substructure are systematically expounded, and a multi-dimensional balance between function and aesthetics is achieved, providing the technical reference for similar projects.

Keywords: arch-beam composite system; pedestrian bridge; innovation; overall layout; structural design; structural performance

0 引言

随着人们生活水平的日益提高,对城市公共设施的期待早已超越基础功能,人行天桥便是典型代表。它不再仅仅是解决行人过街安全、分流地面交通的“功能性通道”,更被赋予了承载城市文化、展现区域特色的“美学使命”^[7-10]。如今的人行天桥,正从单调的钢筋混凝土结构,向结构类型多样、体系多变的方向创新。兼具实用性与艺术性的天桥,正逐渐成为城市地标或区域标志,为市民出行增添了

一份风景,也让城市空间更具独特魅力。与此同时,带给结构工程师需要解决的问题就是功能性需求和美学实现之间的平衡。

1 工程概况

为满足区域地面道路快速化改造的核心需求,提升道路通行效率与行人过街安全,计划增设一座人行天桥。前期已针对桥型选择、结构安全性、周边环境适配性等关键因素开展多轮方案论证,综合考虑通行需求、施工难度及后期维护成本后,最终确定采用拱梁组合体系钢结构人行天桥,意向效果见图1。该结构兼具承载力强、跨度适配性优与景观协调性好的特点。

收稿日期: 2025-11-20

作者简介: 唐春霞(1980—),女,硕士,高级工程师,从事桥梁设计工作。



图1 意向效果图

地面道路路面布置:3 m(人行道)+4 m(非机动车道)+2.25 m(绿化带)+13.75 m(机动车道)+4 m(中央绿化带)+13.75 m(机动车道)+2.25 m(绿化带)+4 m(非机动车道)+3 m(人行道)=50 m。桥位处中央分隔带、两侧绿化带及地面人行道外侧(规划为绿地)均有布墩条件。

机动车道净空按5 m控制,非机动车道按3.5 m,人行道按2.5 m。

2 总体布置

根据路面布置的情况以及选定的桥型,一般来说优先考虑主桥一跨过地面道路,尽可能减少施工过程中对地面道路交通的干扰。在本桥位处,由于地面道路总宽达50 m,如果采用一跨跨越则主桥跨径将至少达到52 m。大跨径、轻型化的现代钢结构人行桥最突出的问题就是人致振动问题^[1]。因此,为了从总体布置上避免出现结构过于轻柔产生人致振动问题,总体布置时考虑将主桥边墩设置在机动车道与非机动车道之间的绿化带中,从而有效减小主桥的跨径,从根本上降低产生人致振动的概率。主桥总体立面布置见图2。

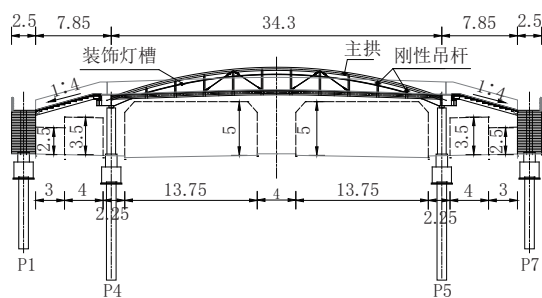


图2 总体布置图(单位:m)

主桥采用拱梁组合体系结构,拱梁固结,单跨跨径34.3 m,桥面净宽3.5 m,采用支座进行上下部的连接。

天桥两侧梯道顺应拱身曲线设计,采用1:4的坡度实现平顺衔接,既满足了桥下净空的需求,又能确保立面整体造型协调统一,完整保留了拱结构的流畅形态,弥补了主桥仅跨越机动车道造成造型上的不连贯;同时通过梯道快速降低了桥面标高,也保

证了两侧梯道在一定范围内(控制在2个18级踏步内)完成与地面的顺接,减少对地面广场的占用。

沿地面道路走向共设置4座楼梯,分别对应路口不同方向的人行需求,完成天桥与地面的全方位衔接,提升行人通行的便利性与选择性。

主桥平面总体布置见图3。

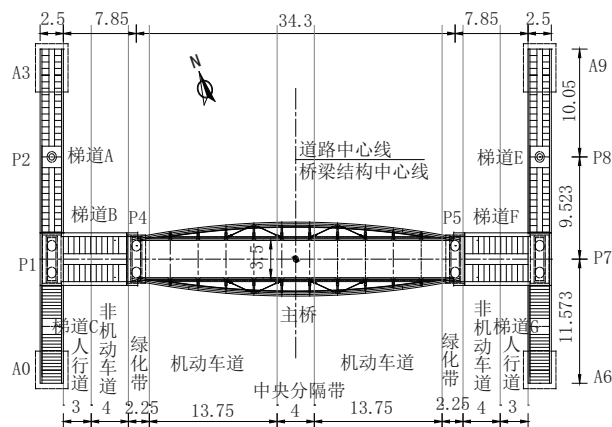


图3 平面布置图(单位:m)

3 结构设计

3.1 上部结构设计

拱肋采用 $\phi 299$ 结构用无缝钢管,拱肋平面与水平面间夹角为 62.964° ,起拱点间跨径为35.2 m,矢高3.3 m,矢跨比1/10.667。

吊杆采用变高度工字型钢构件,吊杆标准间距3 m。

主梁标准断面采用 π 型的双主梁形式,梁高0.4 m,顶板标准宽度3.5 m,见图4。

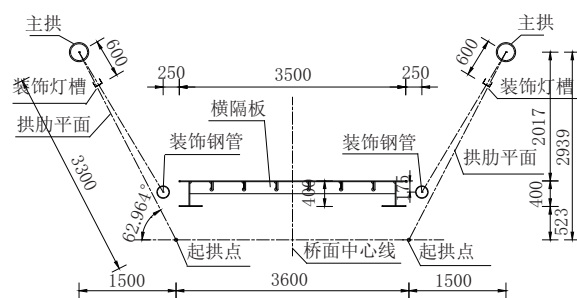


图4 横隔板处标准断面(单位:mm)

每3 m设置一道吊点横梁,吊点横梁标准断面见图5。考虑刚性吊杆的连接,对应吊杆位置横梁外挑0.7 m,吊杆横梁总宽为4.9 m。两道吊点横梁之间设置一道高0.2 m的横隔板(见图5)。

两侧梁端综合考虑拱梁结合构造的处理,主梁截面由开口 π 型渐变为封闭箱型,结构高度增加至1 m,箱型断面见图6。并在梁端设计顺桥向钢牛腿,与顺桥向的梯道衔接。牛腿及拱梁锚固节点大样见图7。

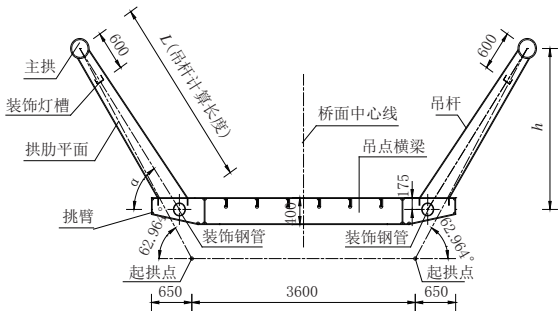


图 5 吊杆横梁处断面(单位:mm)

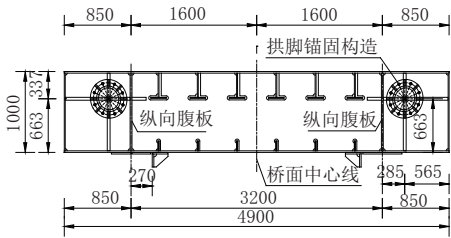


图 6 梁端箱型断面(单位:mm)

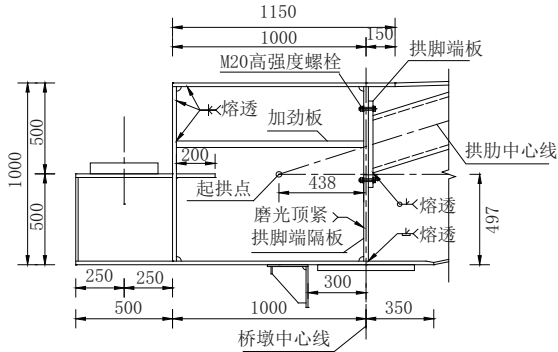


图 7 牛腿及拱梁锚固节点大样(单位:mm)

主梁梁底设置纵横向挡块做防落梁措施。

即使梁高增加至 1 m,梁端箱型横梁内的结构尺寸依然十分有限,箱室内板件焊接的难度非常大。为进一步简化构造、降低施工难度并提高施工精度,拱梁结合位置采用群栓形式的高强度螺栓连接体系,对接精准度高,传力路径清晰明确。

钢结构主梁兼做系杆,平衡拱肋传递的水平力。

另外,主梁两侧各布置一根 $\phi 194$ mm 的装饰钢管,既从景观上与拱肋造型进行呼应,桥梁景观照明等过桥管线也可以置于内部,减少明线的设置。装饰钢管从挑臂腹板处穿过,两端与拱肋钢管相交焊接。

3.2 下部结构设计

主桥主墩没有采用常规的双立柱墩,而是充分考虑整体景观效果采用了“▽形”混凝土墩柱结构,桥墩处断面见图 8。

3.3 景观亮化设计

为打造城市标志性夜景名片,本项目进行了景观照明亮化设计。在吊杆底部配置点状投光,精准

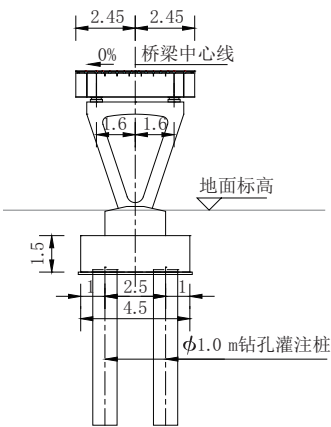


图 8 桥墩位置断面(单位:m)

聚焦吊杆,勾勒出吊杆竖直形态;在吊杆面内设置景观灯槽,嵌入式布置条形投光灯,突显拱肋流畅舒展的弧状线形。夜景效果见图 9。

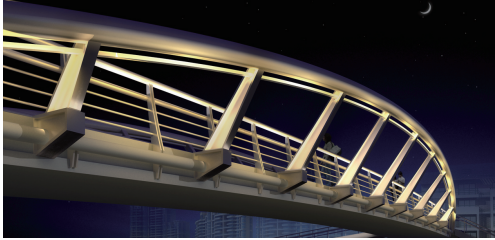


图 9 夜景效果示意

4 结构受力分析

4.1 结构基频

轻钢结构人行桥需重点关注人致振动问题^[2,4]。当人行桥自振频率与行人步频在相同范围内时,振动加速度超过阈值会让行人出现头晕、不安等不适感。因此,应尽可能通过增大结构刚度或者设置阻尼器等措施,使结构的自振频率在敏感频率范围之外^[11-15]。由于本项目规模较小,基于全寿命周期设计要求及后期运维成本的考虑,优先选择通过调整结构设计增强结构刚度来调整结构固有频率。

根据德国《人行桥设计指南》等相关国外人行桥设计指南或规范,行人正常步频集中在 1.6 ~ 2.4 Hz,如果结构的自振频率落在这一区间容易引发竖向共振;侧向荷载的一阶谐波频率一般在 0.5 ~ 1.2 Hz,这一范围对应人行桥侧向振动的敏感区间。一般来说,当人行桥的自振频率不在上述敏感频率范围时,认为人行桥的人致振动问题自然满足要求^[3]。《城市人行天桥与人行地道技术规范》^[5]规定,天桥上部结构竖向自重频率不应小于 3 Hz。因此,本项目的设计目标是结构自振频率大于 3 Hz;如果在采取各种

构造措施无法达到3 Hz,则尽可能控制大于2.4 Hz,同时进行人行舒适度分析,判断人行桥在人群步行荷载作用下的加速度响应是否满足行走舒适度条件。

主桥采用刚性竖吊杆,一定程度上提高了结构的整体刚度;但由于主梁梁高、拱肋矢高及截面尺寸

表1 不同斜吊杆设置方案下的结构自振频率情况

方案	斜吊杆设置方案	斜吊杆规格尺寸	一阶振型及频率		二阶振型及频率	
			振型	频率/Hz	振型	频率/Hz
1	不设置斜吊杆	—	横向	1.82	竖向	2.35
2	对称设置2对刚性斜吊杆	200 mm×160 mm×12 mm 工字钢	横向	1.73	竖向	3.05
3	对称设置2对柔性斜吊杆	D35 型桥梁用钢拉杆	横向	1.80	竖向	3.10

计算分析表明,由于桥梁横向刚度偏小,因此,三种方案一阶振型基本以水平横向振动为主,二阶振型出现了竖向平面内振动。当对称设置斜吊杆时,无论是刚性斜吊杆还是柔性斜吊杆,都会大大提高结构的竖向自振频率。

如果采用刚性斜吊杆,工字型竖吊杆、拱肋或横梁与工字钢斜吊杆的焊接会形成K型复杂焊接节点(见图10),需要增设节点板等措施,施工难度大,对整体造型也有一定的影响。采用柔性斜吊杆,吊杆耳板与横梁腹板或拱肋的连接路径清晰(见图11),焊接难度降低。因此,综合比较后,采用了对称设置2对(8根)柔性斜吊杆的方案,既满足了规范对于自振频率的要求,也降低了施工难度。

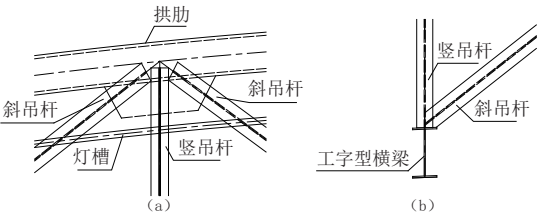


图10 刚性斜吊杆搭接节点示意

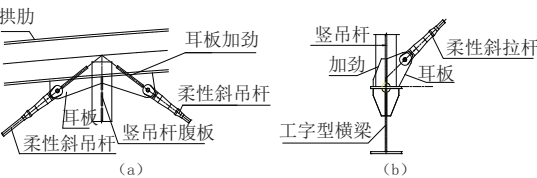


图11 柔性斜吊杆搭接节点示意

结构的第一阶竖向模态及频率见图12。

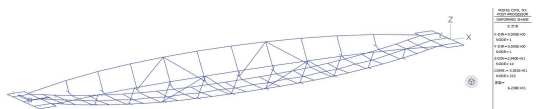


图12 第一阶竖向模态及频率(单位:Hz)

4.2 应力验算

基本组合作用下,钢梁、钢拱和钢吊杆的应力情况见表2,均小于《公路钢结构桥梁设计规范》^[6]表

有限,因此人行桥整体刚度偏柔。

为尽可能保持意向桥型方案轻盈、美观的造型,在不增加结构尺度的前提下,通过不同的斜吊杆设置方案对人行桥结构的自振频率进行计算比较。计算采用大型有限元软件MIDAS Civil建模,相应的振型及竖向自振频率数值见表1。

3.2.1 中的强度设计值,满足规范要求。

表2 主要钢构件应力情况

构件	基本组合最大/MPa	基本组合最小/MPa	允许抗压(抗拉)应力/MPa
钢纵梁	164.6	-11.5	275
钢横梁	111.8	-64.6	275
钢拱	-116.9	-131.9	270
钢吊杆	109.0	-89.7	275

斜吊杆采用D35型的桥梁用高强度钢拉杆,其应力情况见表3,斜吊杆安全系数1 080/351.1=3.1>2.5,满足规范要求。

表3 斜吊杆应力情况 单位:MPa

构件	基本组合最大	基本组合最小	允许抗压(抗拉)应力
斜吊杆	351.1	13.7	1 080

4.3 刚度验算

人群荷载作用下主桥位移情况见图13,竖向位移曲线呈对称分布,最大挠度值为29.9 mm,小于规范限值 $L/800=34\,300/800=42.9\text{ mm}$,刚度满足规范要求。

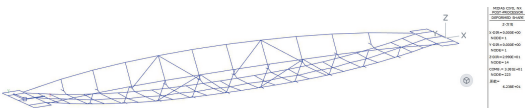


图13 人群下位移情况(单位:mm)

4.4 整体稳定性验算

对主桥结构进行整体稳定性验算,最不利荷载组合下的结构第一阶整体失稳屈曲模态见图14,整体稳定安全系数为9.1。

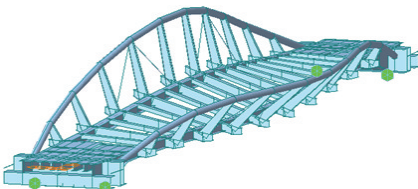


图14 屈曲模态

5 结 语

随着人行桥结构形式日趋丰富多元,在平衡结构功能与美学表达的过程中,需要进行多维度综合考量。本文以一种特殊的拱梁组合体系人行桥为研究对象,系统阐述其总体布置与上下部构造设计方案。针对轻钢结构人行桥普遍存在的人致振动问题,从总体布局优化、结构专项设计等关键环节切入,基于桥梁结构特性对比分析了3种斜吊杆布置方案,最终创新性地采用了增设2对柔性斜吊杆的设计。通过刚性竖吊杆和柔性斜吊杆的组合吊杆设计,优化了结构的固有频率,从根源上有效规避人致振动问题,确保通行舒适性与安全性,实现了结构性能、经济性与美观度的有机统一,为同类工程设计提供有益借鉴。项目实景见图15。



图15 项目实景图

参考文献:

- [1] 陈政清.人行桥的振动有动力设计[M].北京:人民交通出版社,2009.
- [2] 葛伟.某中承式拱梁组合人行桥振动舒适性分析[J].上海公路,2025(3):46-51.
- [3] 陈政道,刘光栋.人行桥的人致振动理论与动力设计[J].工程力学,2009,26(2):148-159.
- [4] 张慧新,邵明洁.钢结构景观人行桥振动舒适度优化设计[J].城市道桥与防洪,2024(10):115-118.
- [5] CJJ 69—95 城市人行天桥与人行地道技术规范(2003 修改版)[S].
- [6] JTG D64—2015 公路钢结构桥梁设计规范[S].
- [7] 陈翠丽.景观桥梁设计方法与实力分析[J].城市道桥与防洪,2023(4):131-134.
- [8] 史松磊,王斌,孙谷雨.立柱、拉杆、斜撑与钢板梁组合异型景观人行桥方案设计[J].城市道桥与防洪,2025(7):144-147.
- [9] 程利鹏.人行斜跨钢箱拱桥设计与分析[J].城市道桥与防洪,2021(5):111-113.
- [10] 于洋.大跨径景观人行桥设计[J].城市道桥与防洪,2025(7):140-143.
- [11] 温金龙,汪志昊,寇琛,等.人-桥竖向耦合振动效应试验研究[J].振动与冲击,2022,41(9):26-31.
- [12] 蒋甫海,方健.深圳茅洲河碧道燕罗人行桥设计[J].世界桥梁,2022,50(2):31-36.
- [13] 罗晓群,张晋,沈昭,等.单斜面索拱支承曲梁人行桥人致振动控制研究[J].振动与冲击,2020,39(11):83-92.
- [14] 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(6):141-144.

(上接第259页)

根据计算结果,部分连续梁加固后,边墩仍会出现较小负反力。设计考虑利用原有支座的抗拉能力,保证支座不致受拉脱空。既满足规范要求,又有效控制加固范围和工程规模,降低了工程造价。

参考文献:

- [1] 王强.独柱墩桥梁抗倾覆加固及影响因素分析[J].北方交通,2023(8):10-13.
- [2] 上海市市政工程设计研究总院(集团)有限公司.A15公路工程施工图设计文件[Z].上海:上海市市政工程设计研究总院(集团)有限公司,2006.
- [3] JTG 3362—2018 公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥梁设计规范[S].
- [4] 张子优.独柱墩桥梁抗倾覆设计与加固方法研究[J].交通世界,

- 2023(9):123-125.
- [5] 陈伟胜.城市桥梁抗倾覆设计方法与施工技术分析[J].城市道桥与防洪,2018(12):115-117.
- [6] 周永强.独柱墩桥梁横向抗倾覆加固分析[J].交通世界,2019(7):114-115.
- [7] 叶嘉豪.独柱墩桥梁抗倾覆验算及抗倾覆加固处治措施[J].道路桥梁,2019(8):142-144.
- [8] 卢羿良.浅谈独柱墩桥梁抗倾覆稳定性分析及加固设计[J].甘肃科技,2023(1):7-11.
- [9] 李王辉.独柱墩连续箱梁增设钢盖梁加固设计[J].公路交通科技,2019(1):232-234.
- [10] 上海市市政工程设计研究总院(集团)有限公司.S32公路独柱墩桥梁加固工程设计文件[Z].上海:上海市市政工程设计研究总院(集团)有限公司,2023.