

钢拱梁组合结构在城市景观桥中的设计与应用

刘鑫

(上海市市政工程设计有限公司, 上海市 200438)

摘要: 为满足城市景观桥梁交通功能与城市艺术形象展示的双重核心需求,同时应对地铁盾构与桥梁结构平面共线带来的复杂空间边界影响,以上海市临港新片区浦港大道冬涟河桥新建工程为例,初步探讨了钢拱梁组合结构在城市门户景观桥梁中的设计方法与工程应用。通过对结构景观表达的优化与比选,确定钢拱梁组合结构为桥梁设计方案。创新性地在钢拱结构中融入“腾云”设计理念,实现景观美学与力学功能的深度耦合。其设计思路与实施路径为中小跨径城市景观桥梁提供了兼具安全性、经济性和适用性的实践范例,丰富了同类工程结构选型与景观融合的技术体系。

关键词: 城市景观桥梁;钢拱梁组合结构;盾构;共线;腾云

中图分类号: U442.5

文献标志码: B

文章编号: 1009-7716(2026)07-0268-05

Design and Application of Steel Arch-Beam Composite Structures in Urban Landscape Bridges

LIU Xin

(Shanghai Municipal Engineering Design Co., Ltd., Shanghai 200438, China)

Abstract: To meet the dual core demands of urban landscape bridge transportation functions and the display of urban artistic images, while dealing with the complex spatial boundary influence brought about by the plane collinearity of the metro shield and the bridge structure, and taking the newly-built Donglianhe Bridge on Pugang Avenue in the Lingang Special Area in Shanghai as an example, the design methodology and engineering application of steel arch-beam composite structures in landscape bridges of urban gateway are initially discussed. Through the optimization and comparison of structural landscape expressions, the steel arch-beam composite structure is identified as the bridge design scheme. The design concept of “cloud soaring” is innovatively integrated into the steel arch structure, achieving the in-depth coupling of landscape aesthetics and mechanical functions. The proposed design ideas and implementation paths provide a practical paradigm characterized by safety, economy and applicability for small-span and medium-span urban landscape bridges, which enrich the technical system for structural type selection and landscape integration in similar projects.

Keywords: urban landscape bridge; steel arch-beam composite structure; shield; collinearity; cloud soaring

0 引言

随着国内社会经济的跨越式发展和城镇化水平的持续攀升,民众对于生活品质的追求以及文化认同感显著增强。现代桥梁工程早已突破传统的交通基础功能边界,结构美学与艺术表现力已成为现代桥梁设计中愈发关键的考量指标。

高水平的景观桥梁营造,应恪守力形合一的设计理念,采用理性且适度的美学表达手法,并将地域特点、时代风貌与文化内涵有机融合,彰显桥梁独特

的人文价值^[1-2]。时至今日,国内外桥梁美学设计已进入一个新的阶段,运用符合结构受力逻辑与力学原理的桥梁构件直接、诚实、优雅地表达符合结构理性的美,以达成“力与美、构与形、桥与境”之上的融合统一^[3]。

地铁盾构与桥梁平面共线能有效节地、降低投资、缩短建设周期。针对城市桥梁与地铁共线建设的工程总结并不多,而有关桥梁与盾构平面完全共线这种极端工况的技术经验更为不足^[4]。

钢拱梁组合结构得益于高性能材料特性,在满足跨径需求、降低自身恒载的同时,具备极强的景观造型可塑性,能有效助力城市标志性景观的构建,良好地适配桥梁与盾构平面完全共线等极端边界工

收稿日期: 2026-02-06

作者简介: 刘鑫(1981—),男,硕士,高级工程师,从事桥梁设计工作。

况,故而在现代城市桥梁建设中得到了日益广泛的应用^[5]。

1 工程背景

上海市浦港大道冬涟河桥作为国家级新区临港105片区中轴线的重要门户节点,不仅承担着城市道路的交通功能,还应满足慢行贯通、景观展示及区域空间仪式感的多重需求^[6]。

上海市浦港大道冬涟河桥桥位图见图1。

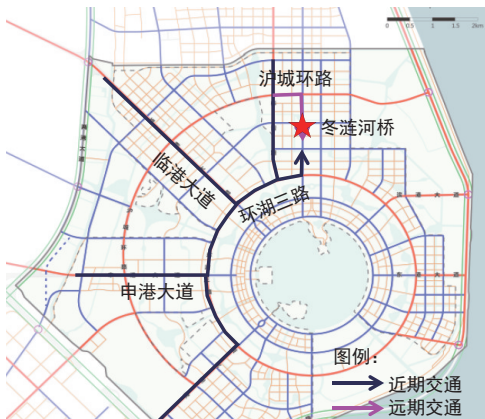


图1 上海市浦港大道冬涟河桥桥位图

浦港大道冬涟河桥宽32 m,1跨跨越冬涟河。河道规划河口宽25 m,河底宽不小于5.0 m,河底高程-1.0 m,两岸各设20.0 m陆域控制范围,无通航要求但需控制梁底高程不小于4.8 m^[6]。

桥梁面临着与建设中的两港市域铁路南汇支线(简称南汇支线)盾构结构平面共线的复杂不利因素。南汇支线在北护城河—沪城环路区间内与浦港大道线位重合,采用双洞双线隧道敷设方式;桥梁桥台桩基础在桥位处需考虑轨道盾构推进施工的影响,两者在空间上相互影响。

因此,浦港大道冬涟河桥的设计需兼顾结构可靠、技术先进、景观丰富及施工安全的需求。通过对结构型式的比选,浦港大道冬涟河桥最终采用较为新颖的钢结构拱梁组合体系桥型。

2 景观设计

浦港大道冬涟河桥的设计理念“腾云”紧扣临港国际开放枢纽与金融创新核心定位,呼应片区水绿交融的蓝绿空间格局。桥梁以流线拱肋塑造云涌汇流形态,植入金融内涵;采用白色为主色调,纯净通透契合云端意象与金融开放包容特质;通过滨水慢行与观景节点营造疏朗通达的门户空间,实现理念、文化与空间的统一。拱肋曲线犹如升起的白色云

朵,平缓的上升态势、磅礴的气势、简洁的曲线与南部核心区“荣耀之环”遥相呼应,共同组成临港北片区的重要空间节点(见图2)。



图2 桥梁景观设计

人行道内侧设置台阶作为小憩的座椅;通过设置于护岸上的人行步梯,行人可抵达桥下漫步于河畔,形成桥上与桥下互动的多用途空间景观节点,打造精致舒适的宜人空间(见图3)。



图3 桥梁人行道景观设计

矢跨比是控制宽幅景观钢拱梁组合桥视觉效果和拱肋受力的关键参数。矢跨比较小时,拱肋水平推力剧增,墩台基础负荷加大;矢跨比取0.2~0.4时,拱肋轴力与弯矩配比均衡,稳定性、变形控制及材料利用率最优,结构经济性最佳;矢跨比过大时,拱肋水平推力虽小但,刚度与材料效率受损。

2次抛物线为宽幅景观钢拱梁组合桥拱肋最优线形,其视觉顺滑度和受力均匀性均优于圆弧、悬链线,可规避拐点突兀和应力集中。合适的矢跨比与2次抛物线拱肋线形耦合,能实现视觉协调性与力学高效性的平衡。浦港大道冬涟河桥主拱轴线和风撑拱轴线均采用2次抛物线;主拱矢跨比为1/4.73。轴线理论方程如下:

$$Z = -\frac{9.1}{21.5^2} X^2 + \frac{18.2}{21.5} X \quad (1)$$
$$Y = Z \cdot \tan(15^\circ)$$

拱肋内倾15°可提升结构横向稳定性和抗扭性能,减小风撑跨度。通过增大横向惯性矩来强化横向刚度,有效约束宽幅桥梁面外变形,降低整体失稳风险;同时优化扭矩传递路径,规避局部应力集中,实现“形”与“力”的融合。

3 钢拱梁组合结构的特点

相较于梁式结构,拱式结构兼具优美的外观表现力和优异的跨越特性,结构优势突出^[7-10]。而钢拱梁组合结构将拱结构的受压优势与梁结构的受弯特性有机融合。该工程采用的钢拱梁组合结构具有以下特点^[11-14]:

(1)协同化受力体系。钢拱结构主要承受轴向压力,梁结构主要承担弯矩,二者通过吊杆和拱脚刚接节点传递荷载,形成“拱主压力、梁辅弯矩、吊杆传力”的协同受力体系。

(2)结构轻量化。采用钢材并配合合理的截面优化(采用薄壁钢拱、流线形钢箱梁),在保证刚度和强度的前提下,相较于同跨径混凝土结构减重效果显著,可大幅减轻下部结构竖向荷载,从而降低跨间布墩的需求,优化桩基数量及承台尺寸,大大减少对平面共线地铁盾构的影响。

(3)无需设置中间墩。通过拱的曲线形态拓展跨度,实现45 m 1跨过河,从而减少桥梁下部基础与地铁盾构的影响范围,降低施工及运营的风险。

(4)灵活的景观塑造能力。钢材的可塑性能塑造出简洁大气、富有张力的结构形态,景观性能突出。桥梁以流线拱肋塑造云涌汇流形态,简洁流畅的拱梁组合形态具有强烈的视觉冲击力。

(5)施工与环保协调性。钢结构可工厂预制、现场拼装,施工周期短,无需大规模支模,对周边环境扰动小;钢材可回收利用,符合绿色工程理念。

(6)功能兼容性强。结构下方可预留充足空间,适配桥下慢行步道、管线敷设等多重需求;同时钢箱梁的断面布置灵活,满足多车道、人行道、分隔带等复合型交通功能需求。

4 结构设计

冬涟河桥为45 m简支钢结构梁拱组合体系桥,桥宽32 m。钢梁西侧布置2车道,东侧布置1车道,拱结构布置于两侧人行道内。钢梁横断面整体呈流线形,梁高1.90 m,顶面设置1.5%横坡,人行道设置1%横坡,底板采用水平直线和圆弧线,横坡为0%。钢梁顶面车行道及非机动车道范围内顶板加劲肋采用U肋,其余采用I肋;底板、腹板采用I肋,箱梁腹板避开轮迹线。主梁采用单箱多室钢箱梁,顶板厚16 mm,跨中底板厚14 mm,腹板厚12 mm。

主拱截面采用800 mm(宽)×800 mm(高)矩形断

面的钢管。横桥向在竖直面内倾15°。拱截面外形尺寸在拱脚处相应增大。拱梁结合段钢结构采用整体设计。

吊杆采用成品15-5钢绞线,标准抗拉强度为1 860 MPa。吊杆两侧均设置吊耳,单片拱肋下设9根吊杆,采用下端张拉方式。主梁、拱肋连接采用耳板式构造,耳板厚55 mm,耳板与箱梁内隔板形成整体受力。

下部采用重力式桥台,台帽、台身采用钢筋混凝土结构,桥台承台埋于河道护坡面下,承台高度2 000 mm,横向跨越南汇支线。桥台下设置 $\phi 1\ 200$ mm钻孔灌注桩,沿纵向多排布置。根据地质报告采用 $\textcircled{7}_{2-2}$ 层粉砂作为桩基持力层。

桥梁横断面布置图见图4。

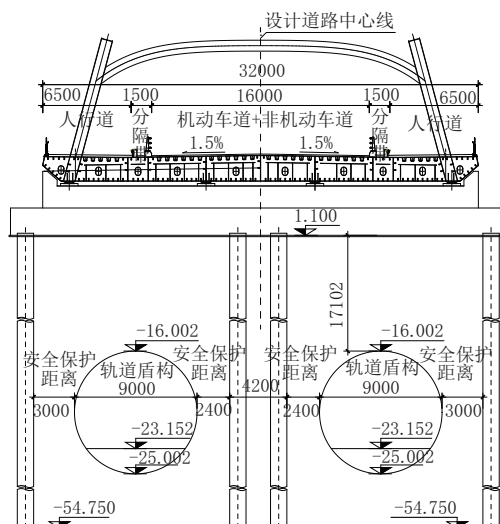


图4 桥梁横断面布置图(单位:mm)

5 计算分析

采用MIDAS有限元程序建立三维空间模型进行计算^[15]。拱肋、风撑、主梁均采用空间梁单元模拟,主梁采用梁格法模拟,吊杆采用桁架单元模拟。

MIDAS计算模型见图5。竖向荷载下拱肋承担约62%的总荷载,主梁承担约38%的荷载,两者协同受力。

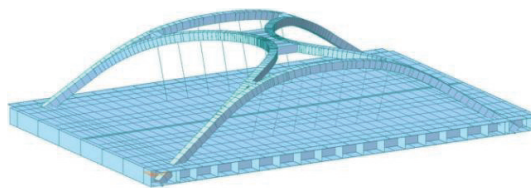


图5 MIDAS计算模型

拱肋在承载能力极限状态下的最大应力为-220.4 MPa(拱肋上缘压应力);因跨中吊杆集中力及拱脚固结约束的影响,部分拱肋段下缘出现拉应

力。通过控制吊杆张拉索力、加大拱脚截面等优化措施,拱肋下缘拉应力最大约 152 MPa,均满足《公路钢结构桥梁设计规范》(JTG D64—2015)要求。拱肋应力图如图 6 所示。

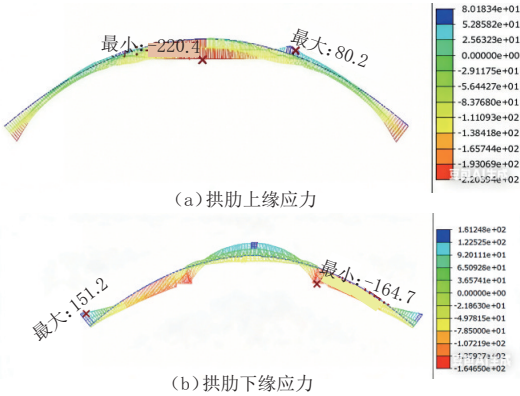


图 6 拱肋应力图(单位:MPa)

主梁应力图见图 7。由图 7 可知,主梁在承载能力极限状态下的最大应力为 69 MPa(第 1 体系主梁上缘拉应力),叠加主梁第 2 体系计算应力后主梁最大应力约 179 MPa,满足《公路钢结构桥梁设计规范》要求。

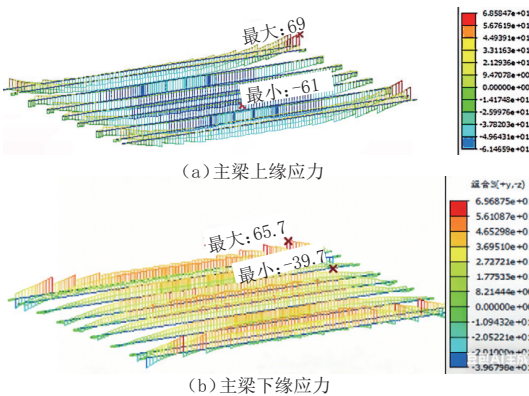


图 7 主梁应力图(单位:MPa)

风撑应力图见图 8。由图 8 可知,风撑横联最大压应力为-220 MPa,满足规范要求^[14]。

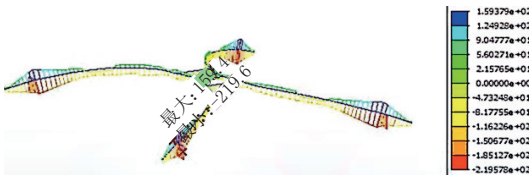


图 8 风撑应力图(单位:MPa)

吊杆索力分布图见图 9;吊杆应力图见图 10。由图 9、图 10 可知:吊杆索力呈现两侧大、中间小的分布趋势;吊杆最大应力为 814 MPa,均小于 1 005 MPa,满足规范要求^[14]。

在汽车活载(不计冲击力)作用下,主梁的正负挠度最大绝对值之和为 0.015 m=L/3 000,满足《公路钢结构桥梁设计规范》的刚度要求。

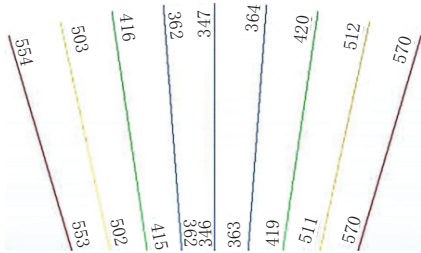


图 9 吊杆索力分布图(单位:kN)

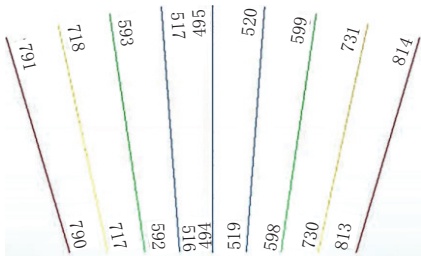


图 10 吊杆应力图(单位:MPa)

考虑拱肋对结构整体稳定的影响,对结构模型进行屈曲分析。将分析结果与单纯钢拱桥相应结果相比后发现,该桥静力稳定性能良好,结构稳定安全系数远大于 4。

拱肋失稳模态 I、II、III 的示意图如图 11 至图 13 所示。

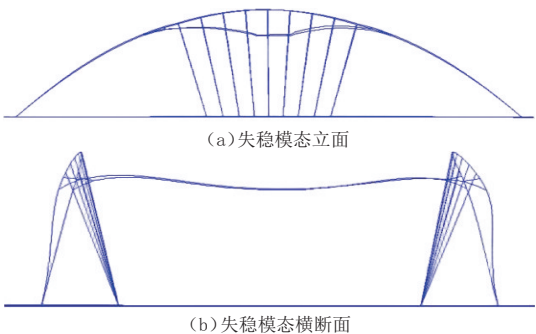


图 11 结构失稳模态 I 示意图

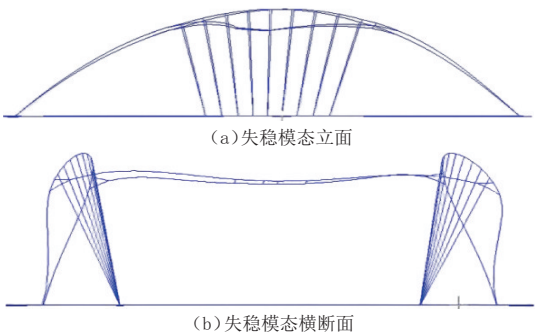


图 12 结构失稳模态 II 示意图

6 结 语

(1)钢拱梁组合结构兼具景观性和轻量化优势,实现了 45 m 1 跨过河,减少了桥梁下部基础与南汇支线地铁盾构的影响范围,优化了桥台桩基数量及承台尺寸,降低了施工及运营风险。

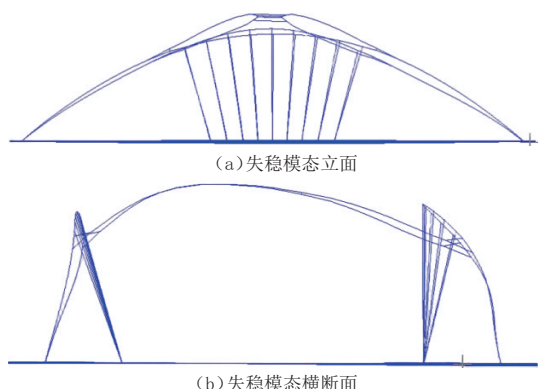


图13 结构失稳模态Ⅲ示意图

(2)钢拱结构主要承受轴向压力,钢梁结构主要承担弯矩,二者通过吊杆和拱脚刚接节点传递荷载,形成“拱主压力、梁辅弯矩、吊杆传力”的协同受力体系。

(3)充分利用钢拱梁组合结构景观塑造灵活的特点,在“腾云”设计理念下实现景观美学与力学功能的深度耦合。2次抛物线拱肋线形实现了视觉协调性与力学高效性的平衡。

(4)钢拱梁组合结构的设计思路和技术方案可为类似城市中小跨径景观桥梁提供一定的参考价值。

参考文献:

[1] 丁建明,曹菲,景国庆,等.景观桥梁四维创新理念与设计方法

——以北京冬奥冰雪五环桥为例[J].东南大学学报(自然科学版),2022,52(6):1171-1177.

[2] 曹菲.城市景观桥梁创新设计研究[D].南京:东南大学,2015.

[3] 丁建明,曹菲,景国庆,等.景观桥梁美学实现设计理论与方法[M].南京:东南大学出版社,2022.

[4] 梅继洲,冯超.市政道路与地铁共线设计解决方案[J].交通世界,2020(9):22-23;31.

[5] 兰峰.上承式钢梁拱组合景观桥梁设计与分析[J].城市道桥与防洪,2026(1):212-215.

[6] 陈肖,刘鑫,卫东,等.临港新片区浦港大道冬涟河桥梁新建工程可行性研究报告(初步设计深度)[R].上海:上海市市政工程设计院有限公司,2023.

[7] 邵长宇.现代拱桥[M].北京:人民交通出版社,2021.

[8] 张洪金.三官堂大桥主桥设计要点[J].城市道桥与防洪,2022(2):73-76.

[9] 吴冲.现代钢桥(上册)[M].北京:人民交通出版社,2006.

[10] 许艳林.上海青浦华为1号桥设计[J].城市道桥与防洪,2024(8):51-54.

[11] 蔡亮.上海哥白尼路川杨河梁拱组合桥设计与研究[J].中国市政工程,2024,1(2):24-27.

[12] 胡健.城市大宽度连续梁拱组合钢桥设计和受力分析[J].交通世界,2024,5(2):224-228.

[13] 黄华,蒲少杰,李小祥.超宽幅梁拱组合钢结构景观拱桥施工关键问题研究[J].城市道桥与防洪,2022(10):131-135.

[14] 姜廷会,张国林.一座景观梁拱组合桥的设计[J].公路,2007(6):12-16.

[15] 施颖,史杰.梁拱组合桥梁上部结构空间分析计算研究[J].浙江工业大学学报,2010,38(5):522-526.

(上接第267页)

类桥梁的模型修正与维修加固提供参考。

(4)拱顶部位在荷载效应比增大时可靠指标下降显著。该区域对荷载变化尤为敏感,是整体结构中的相对薄弱环节,其值较拱脚与斜撑低30%~40%。主要原因为拱顶区域弯矩和应力集中效应显著、横向约束相对较弱,在维修加固设计中应重点针对拱顶区域采取增强措施。

参考文献:

[1] 王志鹏.大跨度刚架拱桥裂缝病害机理研究[J].城市道桥与防洪,2022(9):108-110.

[2] 谢肖礼,勾文鑫,庞木林.RC刚架拱桥的板桁组合加固及动力特性[J].华南理工大学学报(自然科学版),2023,51(4):31-43.

[3] 李少辉.基于模态识别的波形钢腹板箱梁损伤位置研究[J].城市道桥与防洪,2023(12):70-74.

[4] 罗子文,罗成斌.塘屿刚架拱桥的荷载试验研究[J].山东建筑大学学报,2015,30(3):216-223.

[5] 张家强,刘月飞,樊学平.多测点驱动随机移动荷载识别.AR(1)-Tikhonov-SVD-GCV框架[J].交通科学与工程,2025.

[6] 吉荡.某刚架拱桥加固方法及加固效果分析[J].城市道桥与防洪,2016(12):63-67.

[7] 杨志林,罗漪,王海峰.基于数据库的优化随机子空间法识别精度评价[J].工程力学,2023,40(4):116-128.

[8] 赵一男,公茂盛,杨游.结构损伤识别方法研究综述[J].世界地震工程,2020(2):73-84.

[9] 宗周红,牛杰,王浩.基于模型确认的结构概率损伤识别方法研究进展[J].土木工程学报,2012(8):121-130.

[10] 雷家艳,姚谦峰,雷鹰,等.基于随机振动响应互相关函数的结构损伤识别试验分析[J].振动与冲击,2011,30(8):221-224.

[11] 张宇飞,王山山,甘水来.基于随机振动响应相干函数的梁结构损伤检测[J].振动与冲击,2016,35(11):146-151.

[12] 胡志祥,程成,胥河阳,等.基于谱聚类的随机子空间模态参数自动识别[J].工程力学,2026,43(1):39-49.

[13] 张志超.基于时变因素的桥梁可靠度指标计算[J].城市道桥与防洪,2023(4):103-105.

[14] 谢瑞杰.基于静动力有限元模型修正的既有钢筋混凝土拱桥承载能力评估[D].长沙:中南大学,2010.

[15] 桂劲松,康海贵.结构可靠度分析的智能计算方法[J].工程力学,2004,21(2):24-29.

[16] 杨万辉.正常使用极限状态下钢筋混凝土板式结构可靠度研究[D].兰州:兰州理工大学,2016.

[17] 丁幼亮,李爱群,姚晓征,等.结构可靠度响应面法的混沌动力学分析及其改进方法研究[J].应用力学学报,2009,26(1):12-16.