

富阳公望大桥设计与创新

詹远辉, 李小刚, 蒋雨骏

(中国电建集团华东勘测设计研究院有限公司, 浙江 杭州 311122)

摘要: 富阳公望大桥是一座融合现代美学与工程技术的梁拱组合桥。其主桥采用35 m+2×95 m+35 m宽幅钢箱梁-蝴蝶形钢叠拱组合体系, 不仅赋予了桥梁独特的外观, 同时也确保了结构的合理受力。通过新型偏态曲线钢叠拱的设计, 不仅丰富了桥梁的视觉效果, 还增大了桥梁的整体刚度和稳定性; 此外, 大桥的设计与施工过程中还运用了BIM技术, 大大提高了工程建设效率和精度, 并实现了复杂曲线钢拱桥的快速工业化建造。大桥的设计巧妙地结合了空间构成的形式美与结构受力的功能性, 使其成为北支江上的一个标志性建筑, 为城市景观拱桥的设计提供了新的思路 and 参考。

关键词: 梁拱组合桥; 蝴蝶形拱; 钢叠拱; 钢-高韧性混凝土组合桥面; BIM技术

中图分类号: U448

文献标志码: B

文章编号: 1009-7716(2025)06-0095-05

Design and Innovation of Fuyang Gongwang Bridge

ZHAN Yuanhui, LI Xiaogang, JIANG Yuqin

(PowerChina Huadong Engineering Corporation Limited, Hangzhou 311122, China)

Abstract: The Fuyang Gongwang Bridge is a girder-arch composite bridge integrating modern aesthetics and engineering technology. Its main bridge is a (35 m+2×95 m+35 m)-wide steel box girder-butterfly steel-arch composite system, which not only endows a distinctive appearance of bridge, but also ensures a rational stress of structure. Through the new skew curved steel-arch composite design, not only the visual effect of the bridge is enriched, but also the integral rigidity and stability of the bridge are enhanced. Furthermore, BIM technology is employed in the design and construction process of the bridge, which significantly increases the engineering efficiency and precision, and realizes the rapid industrialized construction of complex curved steel arch bridges. The design of the bridge cleverly combines the formal beauty of spatial composition with the functionality of structural stress to make it become a landmark building on the Beizhi River, which provides the new insights and reference for the design of urban landscape arch bridges.

Keywords: beam-arch composite bridge; butterfly-shaped arch; steel arch; steel high-toughness concrete composite bridge deck; BIM technology

0 引言

公望大桥位于杭州市富阳区富春江东洲岛畔, 紧邻黄公望故居和北支江亚运水上运动中心, 属于亚运会重点配套项目, 富阳区内环的重要交通节点。该工程北起高尔夫路与江滨东大道交叉口, 上跨北支江、南接环岛路, 与东洲岛中心路相衔接, 路线全长700 m, 大桥总长407.6 m, 主桥为宽幅钢箱梁-蝴蝶形钢叠拱组合桥。公望大桥总体平面布置图见图1。

桥位处江面宽约310 m, 现状河道水深2.0~6.6 m, 规划河床底标高1.0 m, 常水位5.4 m。

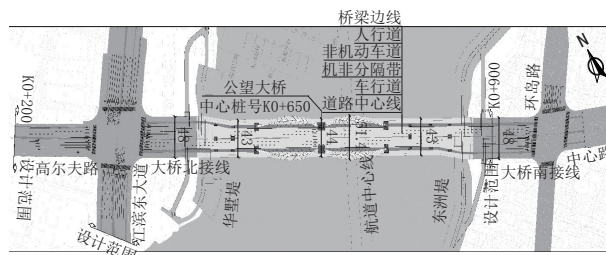


图1 公望大桥总体平面布置图(单位:m)

主要技术标准: 城市主干路, 双向6车道, 设计车速60 km/h, 城—A级设计荷载, 设计洪水频率 $P=1/100$, 内河Ⅵ级通航标准; 地震动峰值加速度 $0.05g$ 。

1 总体设计

1.1 方案控制条件

该工程紧邻黄公望故居和亚运水上运动中心,

收稿日期: 2024-05-30

作者简介: 詹远辉(1985—), 男, 硕士, 高级工程师, 从事桥梁工程设计与研究工作。

自然环境钟灵毓秀,桥梁景观要求高。大桥上跨北支江与两岸道路平交,桥梁布置受防洪、堤防、通航、非机动车道限坡等多种因素控制。

(1)防洪要求:100 a一遇洪水位 11.12 m,常水位 5.4 m。

(2)通航要求:规划内河Ⅵ级航道,双向通航净宽不小于 40 m,净高不小于 6.8 m,最高通航水位 5.4 m。

(3)跨大堤净空要求:两岸堤顶高程 11.8 m,检修净空 2.2 m。

(4)交叉口标高限制:高尔夫路与江滨东大道交叉口距离华墅堤 120 m、中心标高 10.3 m;环岛路与东洲岛中心路交叉口距离东洲堤 100 m、中心标高 10.28 m。

1.2 方案比选

大桥桥墩阻水率不宜超 6%,桥位与航道以 5°斜交,通航孔需大于 50 m,紧邻皮划艇赛道要求桥下视觉通透,因此大桥主跨选择为 2×95 m。桥位周边多为中低层建筑,江两岸为生态景观带和较低的园林建筑,桥下为亚运会皮划艇赛道,桥位处不适合建造高塔耸立的桥梁结构。设计可选用造型新颖、优美、灵动的拱式或梁式的桥梁。设计对 35 m+2×95 m+35 m 钢箱梁-钢拱组合体系桥与 50 m+2×80 m+50 m 连续钢箱梁进行了综合比选。梁-拱组合体系桥建筑高度小、造型可塑性强,造型上能与周边环境很好地融合;梁高较低、桥面抬高量小,对两岸交叉口和桥面纵坡的影响最小,故将钢箱梁-钢拱组合桥作为推荐方案。

1.3 桥型构思

当今桥梁设计在满足安全性、耐久性、经济性等原有要求的基础上,进一步强调造型新颖美观、技术和艺术相互补充、经济与美学完美结合,并能与自然和社会环境相协调^[1]。公望大桥的设计灵感来源于北支江的别名白鹤江—白鹤亮翅,为体现这一意境,采用了钢箱梁-蝴蝶形钢叠拱组合桥方案。双跨下承式蝴蝶形钢叠拱桥方案将吊杆按一定斜率布置,获得偏态曲线的一种异形拱结构,拱形与山水一脉,与环境共生;桥拱整体向桥外侧倾斜,使得桥梁整体造型更具动态;人行道在主桥部分向江面挑出,弧形的平面与主拱优美的造型相互呼应。大桥犹如一双展翅欲飞的白鹤在水面起舞弄影,与周围的山光水色相融相合,优美隽逸又不失大气。公望大桥总体鸟瞰效果图见图 2。



图2 公望大桥总体鸟瞰效果图

1.4 总体设计

公望大桥总体布置图见图 3。

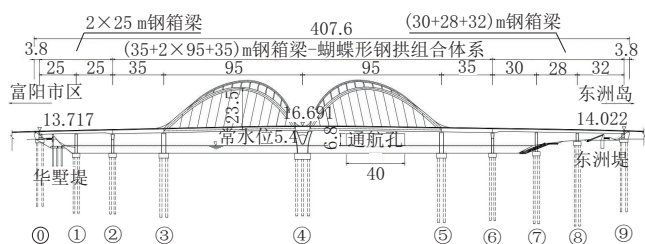


图3 公望大桥总体布置图(单位:m)

公望大桥主桥为 35 m+2×95 m+35 m 宽幅钢箱梁-蝴蝶形钢叠拱组合桥,双跨蝴蝶形钢叠拱外倾 15°,空间四索面吊杆纵向按 15°斜布,双边箱梁格体系主梁,钢-高韧性混凝土组合桥面板,V形桥墩。

公望大桥标准断面图见图 4。

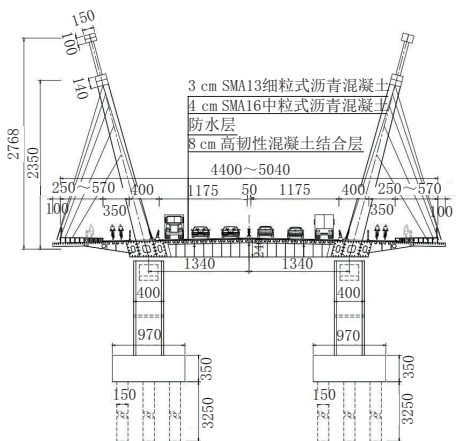


图4 公望大桥标准断面图(单位:cm)

公望大桥主桥桥面宽度为:2.50~5.70 m(人行道,含栏杆)+3.50 m(非机动车道)+4.00 m(拱区)+11.75 m(机动车道)+0.50 m(中央护栏)+11.75 m(机动车道)+4.00 m(拱区)+3.50 m(非机动车道)+2.50~5.70 m(人行道,含栏杆)=44.00~50.40 m。

拱肋和钢箱均采用 Q355C 钢材。

2 结构设计

2.1 结构体系

公望大桥主桥采用梁拱组合体系,由 5 跨 35 m+90 m+10 m+90 m+35 m 连续钢箱梁与 2 个钢叠拱有机

结合形成一个连续结构体系。梁拱组合体系中钢箱梁作为刚性系杆,可抵抗拱引起的水平推力,拱的水平推力与梁的轴向拉力相互平衡,拱与梁截面的总弯矩等效为主要由拱受压、梁受拉的受力形式^[2]。

2.2 拱肋

拱肋采用蝴蝶形偏态曲线钢箱叠拱,下层主拱为主受力拱,上层为副拱,两拱间以钢箱联结件连接。肋拱外倾 15° ,拱计算跨径 90 m ,主拱中心线在竖直平面内的投影高度为 23.50 m ,矢跨比 $1/3.83$,副拱矢高 27.68 m (见图5)。

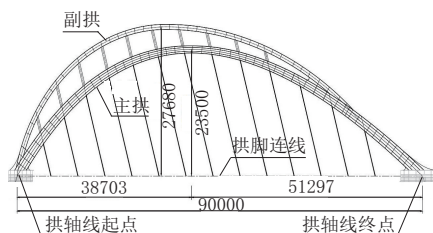


图5 拱肋布置图(单位:mm)

主拱拱轴线采用偏态曲线拱轴线,拱轴线最高点位于桥跨黄金分割点附近。主拱拱轴中心线在竖直投影面内方程为:

$$\begin{cases} X = t - Z \cot \alpha \\ Z = (4f/l)t \times (1 - t/l) \end{cases} \quad (1)$$

式中: X 为拱轴线的水平向坐标; Z 为拱轴线的坚直向坐标; l 为拱的计算跨径, 90 m; f 为拱的计算矢高, 23.5 m; α 为吊杆轴线与 X 轴 (水平轴) 的夹角, 75° ; t 为 X 轴上的坐标参数。

拱顶至拱脚的主拱箱宽度由 1.50 m 渐变至 2.20 m; 高度则由 1.40 m 渐变至 2.20 m, 壁厚均为 36 mm。副拱拱轴线采用圆弧线。拱顶至拱脚的副拱箱宽度由 1.50 m 至 2.20 m 线性变化, 高度为 1.00 m, 壁厚均为 16 mm。

2.3 主梁

主梁采用双边箱梁格体系,中心高度 2.400 m,顶板设置双向 2% 横坡、梁板底水平。主纵梁采用单箱 3 室截面,底板宽 5.440 m,顶板宽 5.767 m,中心梁高 2.126 m,如图 6 所示。横隔梁沿纵桥向每隔 3 m 设置 1 道,采用工字形截面,中心梁高 2.400 m,下翼缘宽 60 cm,上翼缘为桥面板。每 2 道横梁间等间距设置 3 道倒 T 形截面小纵梁。

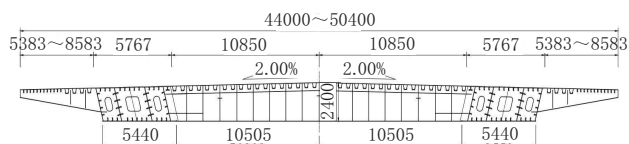


图6 主梁构造图(单位:mm)

2.4 拱梁结合段

拱梁结合节段受力复杂^[3],是该桥的结构设计重点。如图7所示,拱梁连接处采用钢格构形式,拱肋腹板贯通主纵梁顶板,与主纵梁腹板连成一体,保证传力的连续性,将拱肋所受荷载有效传至主梁和支座上。结合段主板厚36 mm,加劲肋厚24 mm。

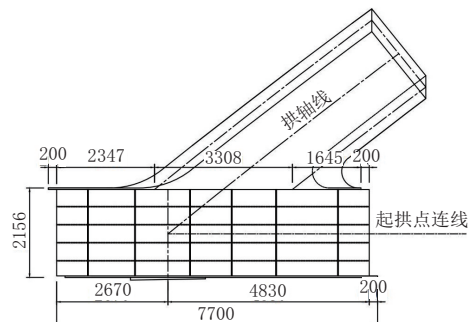


图7 拱梁结合段构造图(单位:mm)

2.5 桥面板

桥面板采用钢-高韧性混凝土组合桥面结构,桥面钢板厚 16 mm,板下采用 U 型肋加劲;钢板顶设 80 mm 高韧性混凝土结合层,通过 $\phi 16 \times 50$ mm 剪力钉与钢板结合。高韧性混凝土抗压强度不小于 60 MPa,抗折强度不小于 10 MPa,弹性模量不小于 30 GPa。钢-高韧性混凝土组合桥面结构将桥面刚度提高近 20 倍,可基本消除钢桥面疲劳开裂风险。

2.6 吊杆

吊杆设置成空间四索面,内、外侧吊杆纵桥向间距均为 6.0 m;吊杆纵桥向与竖直方向夹角均为 15° ,横桥向内侧吊杆与竖直面夹角约为 18° ,外侧吊杆横桥向与竖直面夹角随观景平台外挑长度而变化。全桥外侧吊杆 36 根,内侧吊杆 52 根。

吊杆采用镀锌(环氧)钢丝拉索,标准强度为1 770 MPa,对应锚具采用冷铸锚。吊杆两端设置叉耳,上端为固定端,下端为张拉端,调节杆位置设置可转0.008 rad的球铰。吊杆与拱肋、主梁的连接采用外露吊耳式锚固结构,在与其对应的位置上设置加强横隔板。吊耳垂直于桥轴线布置,吊杆横桥向可自由转动,能很好地适应外倾式拱面外变形。外露吊耳可方便吊杆的安装与后期养护。

拱上锚固构造图见图 8。

2.7 下部结构

主桥中墩采用V型桥墩,墩顶宽13.2 m,纵桥向宽度2.5~3.4 m,横桥向宽度4 m,中间采用预应力混凝土系梁连接。边墩采用矩形截面,尺寸为3.0 m(横桥向)×3.0 m(顺桥向)。过渡墩采用矩形截面,

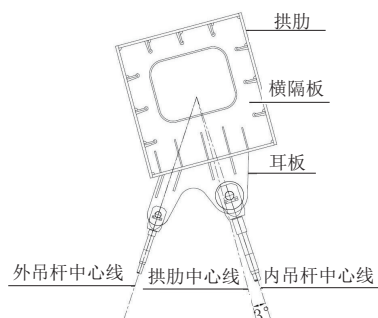


图8 拱上锚固构造图

尺寸为1.8 m(横桥向)×2.2 m(顺桥向),柱顶设置变截面段。

3 施工方案

跨江梁拱组合体系桥的施工一般有支架施工法、顶推施工法、悬臂拼装法等。考虑到公望大桥平均墩高11 m、施工期北支江水深2.0~6.6 m,主桥拱肋为空间曲线,安装定位难,各阶段的受力体系转换复杂等特点,大桥采用先梁后拱、少支架拼装的施工方法。钢箱梁采用龙门吊在支架上拼装,然后在梁上架设、拼装拱肋。

4 技术创新

4.1 新型外倾式偏态曲线钢叠拱设计

拱肋采用偏态曲线钢叠拱,吊杆纵向按 15° 斜布形成轻快韵律、拱肋重心向吊杆倾斜方向偏移、拱轴线最高点位于桥跨黄金分割点等特点,使得桥梁具有了强烈的动势效果,能很好地与周围环境相协调。景观拱桥设计往往因过度关注结构外形而忽略了其受力,使得拱肋线形偏离合理拱轴线,拱肋弯矩大,应力分布不均,材料耗费量大。本桥设计对2次抛物线与圆曲线拟合而成的景观拱轴线(见图9线形1)进行了优化。参照文献[4]合理拱轴线方程推导方法,结合吊杆的斜率与桥面系恒载,导出了异形拱的合理拱轴线(见图9线形2)。优化后的拱轴线在造型满足景观要求的前提下,使拱肋承受的弯矩大幅降低,应力分布均匀,恒载作用下拱肋最大应力由线形1的145.2 MPa(起点拱脚处)降低至115.3 MPa,降低了20.6%。

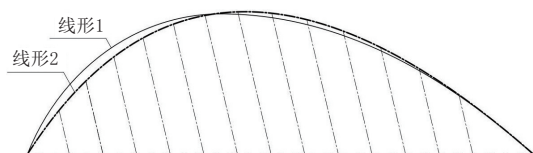


图9 主拱肋立面轴线

外倾式拱桥受力复杂,稳定性问题突出^[5],设计通过斜拱肋有无副拱对比,分析了钢叠拱的受力性能。副拱与主拱的截面抗弯刚度比为1:(4.5~16.0),设置副拱的结构体系相对于无副拱体系,拱肋活载挠度最大值由14.2 mm减小至11.7 mm,降低了17.6%;主梁活载挠度最大值由19.3 mm减小至18.2 mm,降低了5.7%;结构整体弹性稳定系数由18.1提高到20.2,增大了11.6%。钢叠拱体系中,副拱不仅丰富了桥梁造型,提高了桥梁的观赏性,而且分担了主拱承受的荷载,与主肋协同受力,增大了桥梁的整体刚度和稳定性。

4.2 复杂曲线钢拱桥的快速化工业建造

公望大桥采用了外倾式异形拱肋、弧形变宽的主梁,构件类型多、线形复杂。设计基于 Bentley MicroStation 平台,构建全桥 BIM 模型,实现关键节点的碰撞检查、图纸问题校核、工程量统计等,提高了复杂曲线钢拱桥设计的质量和准确性。图10为主梁翼缘板与纵梁碰撞检查模型。

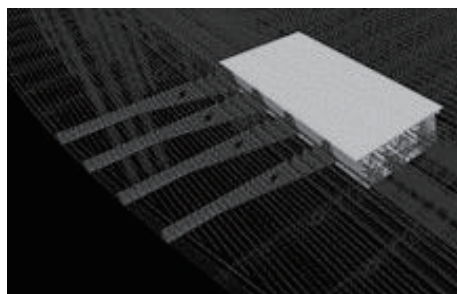


图10 主梁碰撞检查模型

针对桥梁的曲线变化以及控制点的空间变动问题,利用数字化技术,在设计建立的BIM模型上进一步深化,对桥梁线形完成二维与三维的转化,实现控制点精准选择和定位;将三维结构“碾平”并保留特定属性用于加工图和安装,提高桥梁线形深化的准确度以及线形控制的便捷性。大桥采用水上龙门吊吊装、拼装工法,结合数字化技术,进行放样、下料、加工、拼装,解决了复杂曲线钢拱桥的安装及其线形控制难题,实现了水上大跨径钢拱桥快速化工业建造。大桥主体工程提前了4个月完工。图11为大桥拱肋施工BIM模型。

5 结语

(1)公望大桥作为北支江亚运水上运动中心核心交通枢纽,不仅有效缓解了东洲岛片区交通压力,更以标志性景观重塑了城市滨水空间。其设计突破了传统桥梁工程中功能与美学的割裂状态,通过结



图 11 主拱施工 BIM 模型

构体系创新与数字技术赋能,实现了交通承载、艺术表达与环境共生的多维平衡。

(2)创新采用了 35 m+2×95 m+35 m 宽幅钢箱梁-蝴蝶形钢叠拱组合体系,将偏态曲线拱轴线优化、双拱协同传力机制与空间四索面吊杆系统深度融合,在塑造“白鹤亮翅”动态意象的同时,使主拱最大应力降低 20.6%,弹性稳定系数提升 11.6%,实现了“形

力同构”的设计理念。

(3)BIM 技术的应用极大地提高了设计和施工的效率与精度,解决了复杂曲线钢拱桥的安装和线形控制难题,工期缩短 4 个月,为复杂曲线钢拱桥的工业化建造提供了可借鉴的技术路径。

参考文献:

[1] 高振宇,郭文军,陈峰.桥梁美与环境协调[J].公路交通技术,2000,18(1):28-31.
[2] 马文刚,任远,黄侨.梁拱组合体系桥梁的受力特点与美学效果[C]//2010年全国桥梁学术会议.北京:中国公路学会桥梁和结构工程分会,2010:162-167.
[3] 杨剑,邹团结,汪金胜.梁拱组合拱桥拱脚局部应力分析和试验研究[J].铁道科学与工程学报,2014,11(6):25-29.
[4] 李生智,王玮瑶,邬妙年.异型拱桥[M].北京:人民交通出版社,1995.
[5] 刘彬斌.外倾式钢箱拱桥稳定性能研究[D].上海:同济大学,2006.

(上接第 86 页)

[5] 湛凯,杨法勇.脱硫胶粉/SBS 复合改性沥青黏温特性及烟气排放研究[J].公路,2024,69(5):372-376.
[6] 谢娟,罗浩宸,赵勖丞,等.OMMT-ZnO 复合抑烟净味剂对橡胶沥青性能的影响[J/OL].交通科学与工程,2024:1-13(2024-10-31)[2025-02-24].<https://kns.cnki.net/kns8s/defaultresult/index?crossids=YSTT4HG0%2CLSTPFY1C%2CJUP3MUPD%2CMPMFIG1A%2CWQ0UVIAA%2CBLZOG7CK%2CPWFIRAGL%2CEMRPGLPA%2CNLBO1>

Z6R% 2CNN3FJMUV&korder=SU&kw=OMMT-ZnO% E5%A4%8D%E5%90%88%E6%8A%91%E7%83%9F%E5%87%80%E5%91%B3%E5%89%82%E5%AF%B9%E6%A9%A1%E8%83%B6%E6%B2%A5%E9%9D% 92%E6%80%A7%E8%83%BD% E7%9A% 84%E5%BD%B1%E5%93%8D.
[7] JTG E20—2011,公路工程沥青及沥青混合料试验规程[S].
[8] GB 16297—1996,大气污染物综合排放标准[S].