

# 越东路跨曹娥江大桥方案比选研究

戴少东, 包江磊

(浙江数智交院科技股份有限公司, 浙江 杭州 310012)

**摘要:** 公路跨江特大桥通常是工程项目建设的控制性节点工程, 而桥梁方案比选作为首要解决的技术问题, 对工程造价、质量和安全有着深远的影响。现以越东路跨曹娥江大桥为例, 结合水文、防洪评价、航道通航和地质等建设条件, 对桥型、主梁、索塔、斜拉索和锚固方案进行多方案比选研究。最终采用钢混组合梁斜拉桥方案, 索塔采用景观优美的水滴形状, 斜拉索采用钢绞线斜拉索, 索梁锚固采用锚箱式, 索塔锚固采用钢锚梁。该方案整体刚度良好、行车舒适、施工工艺成熟、工期可控, 不会对通航产生影响, 投资估算费用低。

**关键词:** 跨江大桥; 桥梁方案比选; 桥梁设计; 斜拉桥

**中图分类号:** U442.5<sup>+</sup>4; TU997

**文献标志码:** B

**文章编号:** 1009-7716(2025)11-0095-05

## Comparison and Analysis on Scheme of Yuedong Road Bridge Spanning Cao'e River

DAI Shaodong, BAO Jianglei

(Zhejiang Digital Intelligence Transportation Institute Technology Co., Ltd., Hangzhou 310012, China)

**Abstract:** The highway cross-river super-large bridges are usually the key control node projects in engineering construction, and the comparison of bridge schemes is the primary technical issue to be addressed, which has a profound impact on the engineering cost, quality and safety. Taking Yuedong Road Bridge spanning Cao'e River as an example, and combined with the construction conditions of hydrology, flood control evaluation, waterway navigation and geology, the multiple schemes are compared and studied on bridge type, girder, cable pylon, stayed cable and anchoring. Finally, the scheme of steel-concrete composite beam cable-stayed bridge is adopted. The cable pylon is in the shape of a beautiful water droplet. The stayed cable is the steel strand stayed cable. The anchoring of the cable beam is in the anchor box type. And the steel anchor beam is used for the anchoring of the cable pylon. This scheme features the good overall rigidity, comfortable driving, mature construction techniques and controllable construction period. There is no impact on the navigation, and the estimated investment cost is low.

**Keywords:** cross-river bridge; comparison of bridge schemes; bridge design; cable-stayed bridge

## 0 引言

随着国民经济的不断发展, 人民对交通的需求日益增加, 越来越多的跨江跨河大型桥梁开始谋划建设。对于跨江大型桥梁, 桥型选择是桥梁设计过程中需要合理解决的首要问题<sup>[1]</sup>。需综合考虑总体走向、地质、地形、通航、环境敏感区等因素<sup>[2]</sup>, 在满足基本交通功能的基础上, 按照安全、耐久、适用、环保、经济和美观的原则<sup>[3]</sup>, 选择合适的桥梁方案。此外, 需重视公路跨江大型桥梁的景观性, 力求打造成区域地标工程。

收稿日期: 2025-01-13

作者简介: 戴少东(1992—), 男, 硕士, 工程师, 从事桥梁工程设计工作。

## 1 工程概况

越东路跨曹娥江大桥是杭绍甬高速越东路互通连接线的控制性节点工程, 项目起点位于绍兴市越东路与临海路交叉口之前, 顺接越东路快速路, 向北跨越曹娥江后, 终于与致远大道平交口, 路线全长 3.7 km。

### 1.1 建设条件

曹娥江是汇入钱塘江的最末一条重要支流, 是绍兴境内最大的河流, 具备航运、泄洪和引水灌溉等功能。自 2008 年口门大闸建成后, 平时关闸蓄水, 汛期开闸泄洪, 因此曹娥江仅有径流作用, 潮流不再上溯, 成为河道型水库, 冲淤特性由建闸之前的“洪冲潮淤”转向“单项冲刷”<sup>[4]</sup>。通过对通航水流进行分析, 桥位处的深槽会基本稳定在北岸偏中的河槽

中,不会发生大的摆动。

曹娥江流域位于浙江绍兴,处于亚热带季风气候过渡地带,年温适中,四季分明,雨量充沛,多年平均气温 $16.4^{\circ}\text{C}$ 。5—8月为主汛期,汛期梅雨特征显著,形成连绵阴雨天气。夏秋季台风活动频繁,经常发生大暴雨,形成流域大洪水。剩余季节基本以晴冷、干燥天气为主。

曹娥江流域浅部地层分布冲海积粉土、粉砂层,一般厚度 $20\sim 25\text{ m}$ ,分布较均匀。中上部为厚 $25\sim 30\text{ m}$ 的淤泥质粉质黏土层,涂层性质差,呈流塑~软塑状,具有压缩性高的特点。中部主要为可塑状粉质黏土,下部基岩主要为白垩纪方岩组泥质粉砂岩。

桥梁建设位置见图1。

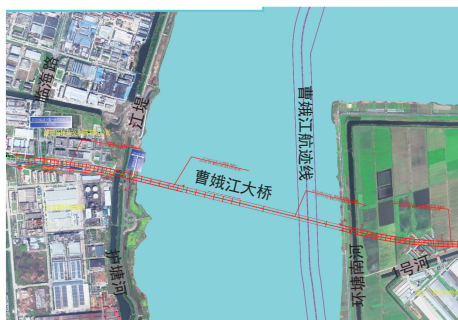


图1 桥梁建设位置

## 1.2 主要技术标准

公路等级:双向6车道一级公路。

汽车荷载等级:公路—I级。

桥梁宽度:桥面净宽 $2\times 15\text{ m}$ 。

环境类别:I类。

结构设计基准期:100 a。

地震烈度:地震动峰值加速度0.05,基本烈度为Ⅵ度。

桥址处设计基本风速: $32.5\text{ m/s}$ (重现期100 a)。

设计洪水频率:特大桥1/300。

通航等级:规划通航1 000 t级海轮。

通航净空:单孔双向,通航净空不小于 $164\text{ m}\times 23\text{ m}$ 。

设计最高/最低通航水位: $5.33\text{ m}/2.13\text{ m}$ 。

洪水位: $6.56\text{ m}$ (100 a一遇)、 $6.52\text{ m}$ (50 a一遇)。

蓄水位:正常蓄水位 $3.9\text{ m}$ 。

## 2 桥型方案比选

桥梁应满足1 000 t级海轮的通航净宽、净高要求,且需要考虑结构布置的合理边中跨配比、景观协调性等条件。考虑通航孔径时,应从提高桥梁结构的

安全冗余度、控制结构建设规模出发,留有适当余地。

主通航孔位于曹娥江大角度转弯处,航迹线会在一定范围内摆动。根据工可报告<sup>[5]</sup>的相关论述和港航部门的通航泄洪评估<sup>[6]</sup>论证,要求采用1个单孔双向的通航孔,主跨跨径要求不小于400 m。

大跨径混凝土梁桥因自重大、裂缝易产生、跨中存在长期下挠等问题,主跨无法做到400 m。目前套尔河特大桥<sup>[7]</sup>为混合梁连续刚构桥,主跨做到338 m,是世界上最大跨径的混合梁桥。因此,结合本桥桥位的特殊性,分别对拱桥、自锚式悬索桥、斜拉桥方案进行论述。

### 2.1 桥型方案一:拱桥

拱桥作为古老的桥型,由于结构受力的合理性,一直以来在大跨度桥梁建设中占有不可或缺的地位。这种桥型的体量较大,景观效果突出醒目。本桥地质为软土地基,无法采用有推力拱桥,而济南黄河齐鲁大桥<sup>[8]</sup>作为无推力系杆拱桥,跨径做到了420 m。

本工程拱桥方案需跨越主航道和北岸堤坝,跨径布置为 $151\text{ m}+400\text{ m}+151\text{ m}$ 。由于主拱肋与边拱肋水平推力差距较大,采用三孔简支体系。桥型立面布置见图2。桥面主梁选用正交异性钢桥面板,钢纵梁与钢横梁相结合。主拱肋采用抛物线线形,矢跨比取 $1/5.2$ ,吊杆标准间距10.5 m。考虑到施工安全等因素,主拱肋采用钢箱梁或者钢桁架拱。

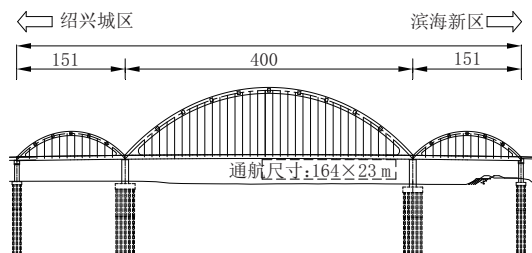


图2 拱桥方案立面布置(单位:m)

### 2.2 桥型方案二:自锚式悬索桥

悬索桥主塔挺拔,造型宏伟,主缆悬垂线条柔美,桥型刚柔并济,具有良好的跨越能力和良好的景观效果。悬索桥根据主缆方式及传力形式,产生了自锚式悬索桥和地锚式悬索桥两类分支。地锚式悬索桥需设置多个锚碇,对地基要求高,本桥地质为软土地基,无法给锚碇提供足够的承载力。而广州万龙大桥<sup>[9]</sup>作为世界第一大跨径自锚式悬索桥,主跨已经做到了608 m。

本工程自锚式悬索桥方案跨径布置为 $40\text{ m}+160\text{ m}+400\text{ m}+160\text{ m}+40\text{ m}$ 。桥型立面布置见图3。

主缆采用平行双主缆,理论边主跨比约 0.4,主缆主跨矢跨比约为 1/6.45,索塔高 110 m。主梁采用钢混组合梁或者钢箱梁,吊杆标准间距 10.5 m。

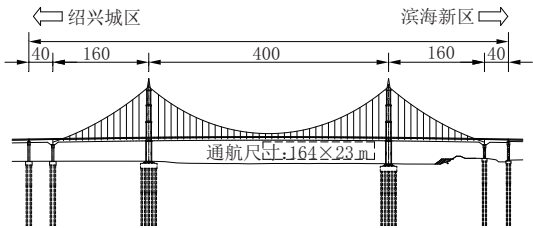


图3 悬索桥方案立面布置(单位:m)

2.3 桥型方案三:斜拉桥

斜拉桥高耸,气势宏伟,拉索刚劲有力,桥型充满力量感,具有良好的跨越能力和景观效果。

目前在建的常泰长江大桥<sup>[10]</sup>主跨达到了 1176 m,是目前世界上跨度最大的斜拉桥。斜拉桥具有良好的跨越能力和景观效果,国内外统计资料表明,在 200~500 m 跨径范围内,斜拉桥方案最具竞争力<sup>[11]</sup>。该桥型相比于同等跨径的自锚式悬索桥和拱桥,工程造价低。上部结构施工时可采用悬臂施工,施工快速方便,施工期不影响通航。

本工程斜拉桥方案跨径布置为 49 m+151 m+400 m+151 m+49 m,桥型立面布置见图 4。采用双塔双索面五跨布置,结构体系为半漂浮,索塔高 141 m,主梁采用钢混组合梁或者钢箱梁,斜拉索标准间距 11.7 m。

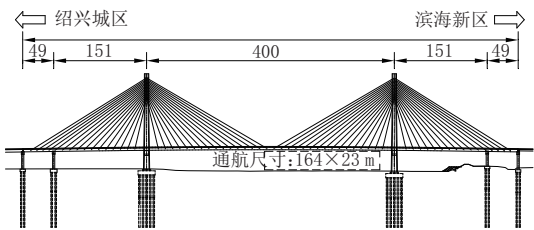


图4 斜拉桥方案立面布置(单位:m)

2.4 桥型方案比选

排除技术不可行的方案,综合比较以上三种桥型方案的特点,从桥型结构的景观效果、施工难易、投资估算等方面进行综合比选,桥型方案比选见表 1。方案三斜拉桥景观效果较好,与周边人文地理环境相协调,施工采用悬臂拼装工艺。该施工工艺技术成熟、工期可控,不会对通航产生影响,投资估算费用最低,因此大桥推荐采用斜拉桥方案。

表1 桥型方案综合比选

| 桥型方案   | 效果图 | 景观效果                      | 施工难易                          | 投资估算/亿元 |
|--------|-----|---------------------------|-------------------------------|---------|
| 拱桥     |     | 拱肋如一抹彩虹横卧江面,富有律动感,视觉景观好   | 先梁后拱,需设临时支墩,影响通航,施工期拱肋存在失稳的风险 | 6.98    |
| 自锚式悬索桥 |     | 桥型刚柔并济,主塔挺拔、造型宏伟,主缆悬垂线条柔美 | 先梁后缆,水中需设临时支墩,施工复杂,对通航影响大     | 8.58    |
| 斜拉桥    |     | 索塔高耸,气势宏伟,拉索刚劲有力,景观效果较好   | 悬臂拼装,施工工艺成熟,不影响通航,工期可控        | 6.60    |

3 主梁方案比选

主梁方案一(见图 5)采用钢混组合梁,其中钢梁由双边钢箱梁、小纵梁和钢横梁组成,主梁跨中梁高 3.28 m,桥面全宽 33.5 m,钢箱梁中心间距 31.2 m,钢横梁标准间距 3.9 m,斜拉索标准间距 11.7 m。混凝土桥面板厚 28 cm,预制板和湿接缝混凝土相结合。

主梁方案二(见图 5)采用整体扁平钢箱梁,由顶板、底板、横隔梁和加劲肋组成,钢箱梁跨中梁高

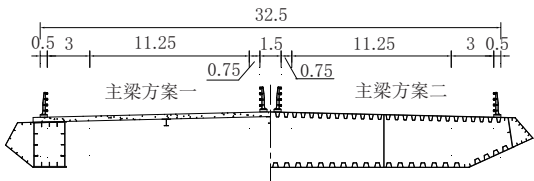


图5 主梁方案横断面(单位:m)

3.28 m,桥面全宽 33.5 m,腹板间距 8 m,钢横梁间距 3.9 m,斜拉索标准间距 15.6 m。

经计算比较,主梁方案一相比于方案二,整体刚度增加 13.7%,建造成本降低 17.2%。此外,主梁方



案一既可以节段整体安装,又可以钢构件现场散拼安装,为施工建设提供多种可选方案。因此,从控制造价、提升行车舒适度、主梁施工多样化等方面,大桥设计选用主梁方案一。

4 索塔方案比选

索塔原则上采用混凝土结构,从景观效果角度融入地方风土人情,对索塔造型进行多方案创作比选。索塔方案一为水滴形索塔,设计灵感来源于鱼儿、米粒,与绍兴江南水乡、鱼米之乡的城市特色相契合,与环境和谐统一[见图6(a)]。

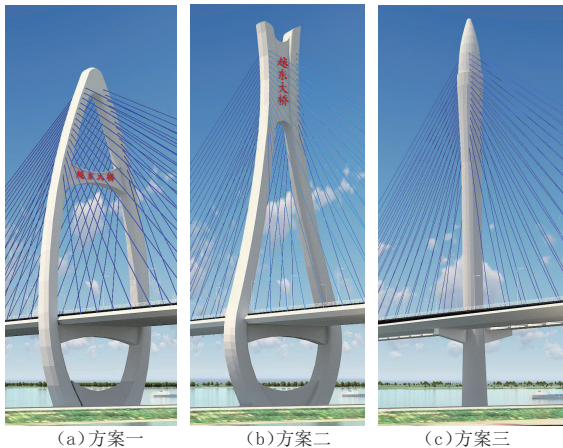


图6 索塔方案效果图

索塔方案二为花瓶形索塔,流线形状优雅融入越剧风情文化,如化蝶双舞,比翼齐飞[见图6(b)]。索塔方案三为穿心索塔,以毛笔作为设计灵感,与邻近的嘉绍大桥六支宝剑桥塔相呼应,一文一武,文武双全,彰显绍兴深厚的历史人文底蕴[见图6(c)]。

索塔方案征求多方意见后,选用更能体现城市特色的方案一水滴形索塔。

5 斜拉索方案比选

斜拉索应结合生产、运输和安装等条件选用平行钢丝斜拉索或钢绞线斜拉索<sup>[12]</sup>,对比见表2。近年来,钢绞线斜拉索在大跨径斜拉桥应用较多。例如双河大桥<sup>[13]</sup>、洪鹤大桥<sup>[14]</sup>等300~500 m级别的斜拉桥均采用了钢绞线斜拉索,其经验技术日趋成熟,耐久性较好,安装更换更加便利。因此,大桥斜拉索选用钢绞线方案。

6 锚固方案比选

6.1 索梁锚固方案比选

斜拉索与钢梁的锚固常采用锚箱、锚拉板等锚

表2 斜拉索对比

| 类型   | 钢绞线斜拉索                | 平行钢丝斜拉索           |
|------|-----------------------|-------------------|
| 成熟度  | 国内应用历史比平行钢丝索短         | 已广泛应用             |
| 强度   | 1 860 MPa             | 1 570 ~ 2 100 MPa |
| 刚度   | 抗挠曲性能较好               | 抗挠曲性能较差           |
| 运输   | 单股重量轻,运输要求简单          | 整索重量大,运输和吊装要求较高   |
| 施工   | 单根钢绞线挂索,无需大型起重设备      | 需大型设备整体挂索         |
| 耐久防护 | 环氧涂层+油脂+单根HDPE+HDPE护套 | 镀锌/环氧+缠包带+HDPE护套  |
| 换索   | 可单根钢绞线更换,规模小,可不中断交通   | 需整体更换,规模大,需中断交通   |
| 造价   | 略低                    | 略高                |

固方式(见图7)。

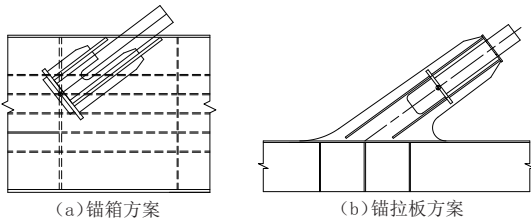


图7 索梁锚固方案示意

锚箱方案设置锚固梁,与钢主梁腹板侧面焊接,整体构造可藏于风嘴以隔绝雨水,搭配主梁除湿系统,可达到较好的耐久性,但风嘴狭小的空间给锚箱检修带来不便。锚拉板方案设置厚钢板与钢主梁顶面焊接,其构造完全暴露于大气中,虽方便检修,但对防腐耐久提出了更高要求。

因此,从耐久性角度考虑,大桥索梁锚固选用锚箱方案。

6.2 索塔锚固方案比选

斜拉索与索塔的锚固常采用钢锚梁、钢锚箱等锚固方式(见图8)。

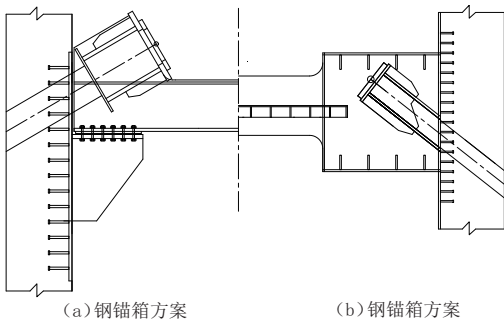


图8 索塔锚固方案示意

钢锚梁方案通常在索塔内侧设置牛腿,钢锚梁设于牛腿上方,施工期处于一端固定、一端自由状态,待全桥调索完毕后将自由端固定,因此采用钢锚



梁方案可使索塔混凝土仅承担活载引起的拉应力作用。

钢锚箱方案由钢锚箱通过剪力连接键直接与索塔混凝土连接,因此索塔混凝土要同时承担恒载和活载引起的拉应力作用。

通过建立节段简易计算模型,初步分析索塔混凝土承担拉索水平拉应力情况,结果见表3。由表3可知,中跨最长索钢锚箱方案要比钢锚梁方案多承担恒载作用引起的0.461 MPa拉应力。若考虑温度等作用,钢锚箱方案往往要搭配环向预应力一同使用。因此,从改善索塔混凝土受力、简化索塔锚固区构造等角度考虑,大桥索塔锚固采用钢锚梁方案。

表3 索塔混凝土承担拉索水平拉应力 单位:MPa

| 拉索    | 恒载效应  | 活载效应  |
|-------|-------|-------|
| 中跨最长索 | 0.461 | 0.063 |
| 中跨最短索 | 0.057 | 0.007 |

7 结 语

越东路跨曹娥江大桥作为绍兴城区与滨海新区的重要联系纽带,结合水文、防洪评价、航道通航和地质等建设条件,综合考虑技术可行性、工程造价、施工难易、景观效果等因素,最终采用主跨400 m斜拉桥方案,为同类型公路跨江大桥项目规划和设计

提供案例参考。

参考文献:

[1] 董红.公路特大桥梁总体选型的设计要点[J].城市道桥与防洪,2024(7):66-68.

[2] JTG D60—2015,公路桥涵设计通用规范[S].

[3] JTG B01—2014,公路工程技术标准[S].

[4] 郑国诞,吴军君,史英标,等.曹娥江大闸闸上河道建桥通航水流条件[J].水运工程,2021(6):141-146.

[5] 浙江公路水运工程咨询公司.杭绍甬高速公路(G92N杭州湾地区环线并行线)杭州至绍兴段工程可行性研究报告[R].杭州:浙江公路水运工程咨询公司,2019.

[6] 武汉长江航运规划设计院有限公司.杭绍甬高速公路(G92N杭州湾地区环线并行线)工程越东路互通连接线跨曹娥江大桥航道通航条件影响评价报告[R].武汉:武汉长江航运规划设计院有限公司,2021.

[7] 《中国公路学报》编辑部.中国桥梁工程学术研究综述·2024[J].中国公路学报,2024,37(12):1-160.

[8] 王伟.济南齐鲁黄河大桥总体方案研究[J].城市道桥与防洪,2022(3):55-59.

[9] 邓卓章.大跨度自锚式悬索桥椭圆塔钢混结合段受力性能分析[J].铁道勘测与设计,2023(1):54-59.

[10] 徐伟,苑仁安,王强,等.常泰长江大桥主航道桥结构体系及钢梁设计[J].桥梁建设,2021,51(3):1-8.

[11] 项海帆,等.桥梁概念设计[M].北京:人民交通出版社,2011.

[12] JTG/T 3365-01—2020,公路斜拉桥设计规范[S].

[13] 付炳宁,宋松林.格巧高速双河特大桥总体设计[J].世界桥梁,2025,53(2):1-7.

[14] 陈维家,张强,何铁明.珠海洪鹤大桥主航道桥总体设计[J].桥梁建设,2020,50(4):77-81.