

# 杭州钱塘江江东大桥总体设计

张剑英 郝维索 戴建国 沈洋

(上海市政工程设计研究总院)

**摘要:**江东大桥(钱江九桥)位于杭州市区的东北角,西起下沙,东接萧山,属城市快速路。桥址附近有钱江观潮,对桥梁景观要求较高。该处江面宽约2.1km,处于动力条件较为复杂的钱塘江河口段的中间。河床底面冲淤剧烈。跨江桥梁长约2253m,主桥结构为两座自锚式悬索桥和一座预应力混凝土刚构桥,江中非通航孔桥为预应力混凝土连续梁桥。通航孔自锚式悬索桥造型独特,寓意“钱江帆影”,其主跨260m,采用独柱桥塔、分离式钢箱加劲梁、空间缆索、边跨不设吊索,这种悬索桥型式在国内、外尚无先例。本文着重介绍了江东大桥的设计构思、施工特点。

**关键词:**江东大桥 设计构思 施工特点

## 1 项目概况

江东大桥(钱江九桥)位于杭州市区的东北角,西起下沙,东接萧山,其接线工程纳入杭州“三纵五横”快速路网,主线道路为双向8车道,两侧各设2m宽的人行道。设计车速 $v=80\text{km/h}$ ,属城市快速道路上的越江工程。工程全长4.32km,其中桥梁长3.55km。附近有钱江观潮,因此桥梁设计时景观、桥型放在较为重要的位置。

桥址处江面开阔,宽约2.1km,跨江桥梁长约2253m,主桥结构为两座自锚式悬索桥和一座预应力混凝土刚构桥,江中非通航孔桥为预应力混凝土连续梁桥,见图1。

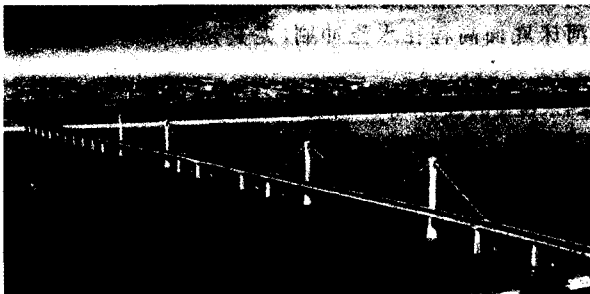


图1 江东大桥全景图

江东大桥是一座交通功能和景观功能并重的桥梁,通航孔自锚式悬索桥造型独特,寓意“钱江帆影”,独柱桥塔、分离式钢箱加劲梁、空间

注:《杭州市江东大桥及接线工程》项目获第三届欧维姆预应力技术奖三等奖。本文原载《2008年全国桥梁会议论文集》

缆索、边跨不设吊索,其结构新颖有创新,在技术方面有突破,不仅为人们提供交通的便利,景观视觉上的享受,同时也为我国桥梁技术的创新和发展做出贡献。

### 1.1 技术标准

主要技术指标:

- (1) 桥梁等级:城市桥梁特大桥;
- (2) 计算行车速度:城市快速路, $v=80\text{km/h}$ ;
- (3) 荷载等级:桥梁荷载为城—A级;
- (4) 桥梁宽度:跨江段梁式桥宽度:双幅 $18.75\text{m} \times 2=37.5\text{m}$ ,跨江段自锚式悬索桥宽度:46.5m;
- (5) 建筑界限:地面道路 $\geq 5.0\text{m}$ ,沿江大堤 $\geq 4.5\text{m}$ ;
- (6) 通航水位:设计通航水位取20年一遇水位7.64m(黄海高程);
- (7) 航道等级:通航净空 $\geq 24\text{m}$ ,通航净宽:单向 $\geq 2 \times 120\text{m}$ 、双向 $\geq 220\text{m}$ ;
- (8) 抗震要求(见表1);
- (9) 风: $v_{10\text{m}}=28.6\text{m/s}$ ;

表1 江东大桥抗震要求

等级	主通航孔桥、辅通航孔桥	非通航孔桥
水准 I	100年超越概率10% (相当于重现期950年)	50年超越概率10% (相当于重现期475年)
水准 II	100年超越概率3% (相当于重现期3283年)	50年超越概率3% (相当于重现期1642年)

(10) 船舶撞击力: 按1000DWT海轮考虑:

$$P_{\text{顺}} = 7590\text{kN}, P_{\text{横}} = 15180\text{kN};$$

(11) 桥面横坡: 2.0%;

(12) 设计基准期: 100年。

## 1.2 建设条件

江东大桥桥位处于钱塘江河口段, 受径流、潮汐共同作用, 水动力条件较为复杂。

河口段河床冲淤剧烈, 纵剖面上存在一庞大沙坎, 沙坎顶端在本桥址工程河段一带变动。河床冲淤年内具有“洪冲潮淤”的特点, 年际最大冲淤幅度达10~3m。深泓线主要集中在桥位东侧, 最深点和主槽主要集中在离南岸100~500m。

桥址处江面宽约2.0km, 河槽宽浅, 地势较平坦, 但在钱塘江区域江底高程变化较大。从西岸至东岸渐深, 河床底面高程在水流冲刷, 尤其是洪水的冲刷作用下处于动态变化之中。

桥址区属于第四系覆盖的钱塘江河口平原区, 根据钻探揭露, 桥址区域下覆基岩为白垩系紫红色砂砾岩、泥质粉砂岩。第四系地层总厚度达50余米, 按地质时代、成因类型及其工程特性, 可分为①、②、③、⑥、⑧和⑨6个土层, 下覆基岩(12)层)为白垩系下统朝川组下段(K1C1)岩层, 岩性为砂砾岩及泥质粉砂岩。

杭州市地处亚热带湿润地区的北缘, 属亚热带季风性湿润气候, 四季交替显著, 有一些明显的特殊现象: 如寒潮、雾、梅雨、春秋季节低温、干旱等。7~8月受台风影响, 历年实测最大风速28m/s, 最大台风达12级, 风速34m/s。

## 2 总体构思

### 2.1 桥位选择

城市越江桥梁的桥位选择, 首先要符合道路规划的基本要求。在此基础上, 根据桥墩布置情况以及水文资料, 对线位作适当微调, 调整后的桥梁线位, 征得了规划部门的认可。

规划设计线路走向与河道中心基本垂直, 有利于减少桥墩阻水, 也有利于通航, 符合桥梁总体布置的一般性要求。下沙岸桥位处正好有一个丁坝, 桥梁施工时会有影响, 尽管可以采取措

施, 会降低相关措施费用。如果桥轴线向下游方向稍偏转, 根据水文资料, 主槽处涨急流与落急流与桥轴线的夹角会减少。所以, 在设计时对规划桥位进行了适当微调, 既避免了丁坝, 又使涨落潮水流方向与桥轴线夹角小于5°。

### 2.2 跨径布置

根据通航净空尺度论证, 通航孔按单孔双向通航标准进行设计, 通航净空宽度不小于220m, 或按双孔单向通航标准进行设计, 通航净空宽度不小于120m。通航孔跨径由通航孔净宽、桥墩墩身宽度(承台埋在河床断面下)与防撞设施宽度及桥墩附近紊流影响宽度三部分组成, 同时结合桥梁总体方案布置和主梁构造等结构设计特点综合确定。主通航孔自锚式悬索桥双向通航, 跨径取260m。连续刚构通航孔桥单向通航, 跨径取160m。

通航孔位置根据主槽位置确定。本工程所在河段受赭山湾弯道河势控制, 桥位处主槽偏于东岸, 经河床演变分析预测: 桥位断面最大深泓线主要集中在桥位东侧, 最深点和主槽主要集中在离南岸100~500m, 槽底高程在-3~2m。故本桥主通航孔中心设置在近萧山侧的主槽中, 离萧山防洪大堤约300m。

考虑到航道易变迁的特殊性, 再设二个通航孔, 布置在靠近江主通航孔处。

关于非通航孔的跨径问题, 既要考虑施工方法, 对主桥施工的影响, 也要考虑对河势的影响。考虑钱塘江涌潮的影响, 以及减少江中桥墩阻水面积, 江中跨径取80m。

### 2.3 桥型方案

在对桥型方案进行反复比较论证后, 通航孔选用了两座自锚式悬索桥和一座预应力混凝土刚构桥组合的方案, 自锚式悬索桥主跨260m, 矢跨比1/4.5, 造型独特, 寓意“钱江帆影”。边跨主缆在中央分隔带内平行布置, 不设吊索, 刚构桥主跨160m, 采用预应力混凝土结构, 单箱单室斜腹板截面。

非通航孔采用基本跨径80m的预应力混凝土连续梁, 与通航孔西侧相接的一联非通航孔桥长为

840m, 东侧相接的一联非通航孔桥长为214m。

### 3 桥型结构

#### 3.1 连续梁桥

西侧非通航孔为十一跨一联预应力混凝土变截面连续箱梁, 跨径组合 $44\text{m}+10\times 80\text{m}$ , 中支点梁高 $5\text{m}$ , 高跨比 $1/16$ , 跨中梁高 $3.5\text{m}$ , 高跨比 $1/23$ 箱梁高度按二次抛物线线形变化, 边跨与中跨梁高对称。桥梁截面为单箱单室斜腹板箱形截面, 见图2。箱梁顶板宽 $18.45\text{m}$ , 设置 $2\%$ 单向横坡, 底面横向为平坡, 只在墩顶上设置横梁。

连续梁采用悬臂浇筑法施工。

下部结构桩基础岸上采用 $\phi 1.5\text{m}$ , 水中采用 $\phi 2.0\text{m}$ 大直径钻孔灌注桩, 采用桩底后注浆工艺, 提高桩的承载能力。桥墩采用空心薄壁墩, 墩柱截面采用单箱单室, 墩柱横桥向上小下大, 顺桥向等厚度, 根据桥墩高度的变化, 有 $2.8\text{m}$ 和 $3.2\text{m}$ 二种规格。墩顶横向设置预应力钢束。

#### 3.2 刚构桥

上部结构主梁为预应力变截面箱梁, 跨径组合 $91.5\text{m}+160\text{m}+91.5\text{m}$ 。中支点梁高 $9.6\text{m}$ , 高跨比 $1/16$ ; 跨中梁高 $3.5\text{m}$ , 高跨比 $1/45.7$ 。箱梁高

度按 $1.5$ 次抛物线线形变化, 边跨与中跨梁高对称。桥梁截面为单箱单室斜腹板箱形截面, 与连续梁断面相似。箱梁顶板宽 $18.45\text{m}$ , 设置 $2\%$ 单向横坡, 底面横向为平坡。在墩顶及中跨跨中设置横梁。

施工方法采用悬臂浇筑法施工。

下部结构桩基础采用 $\phi 2.0\text{m}$ 大直径钻孔灌注桩, 采用桩底后注浆工艺, 以减少桩基沉降。桥墩采用空心薄壁墩, 墩柱截面采用单箱单室, 墩柱横桥向上小下大, 顺桥向等厚度为 $5\text{m}$ 。

#### 3.3 悬索桥

自锚式悬索桥主跨 $260\text{m}$ , 跨径组合为 $(83\text{m}+260\text{m}+83\text{m})$ , 矢跨比 $1/4.5$ , 三跨连续加劲梁为分离式钢箱梁, 全宽 $47\text{m}$ 。主缆为空间索布置, 双塔双缆面结构, 边跨主缆在中央分隔带内平行布置, 中跨主缆在跨中向两侧分开, 横桥向索面与铅垂面角度为 $19^\circ$ , 为世界上已建角度最大的空间缆。独柱桥塔高度近 $100\text{m}$ , 中跨两根空间主缆交汇于塔顶, 倾斜吊索间距 $9\text{m}$ , 见图3。桥梁造型新颖、别致, 但结构受力复杂, 设计、施工难度很大。

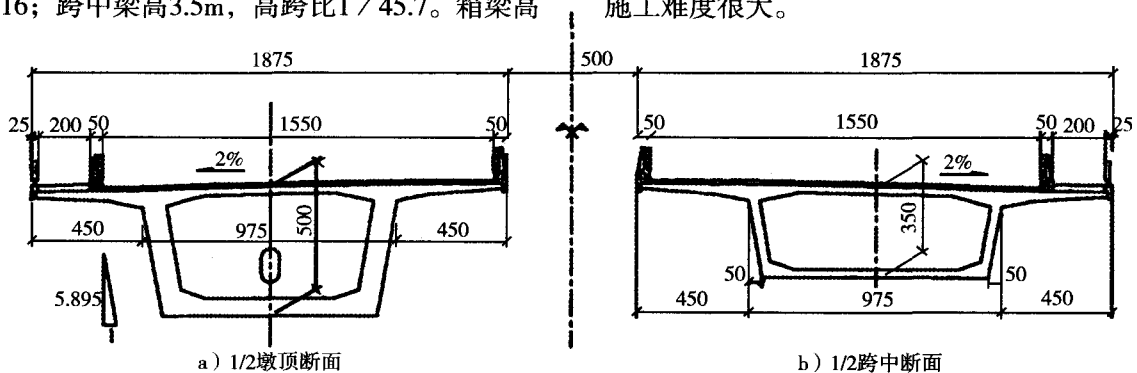


图2 连续梁横断面 (尺寸单位: cm)

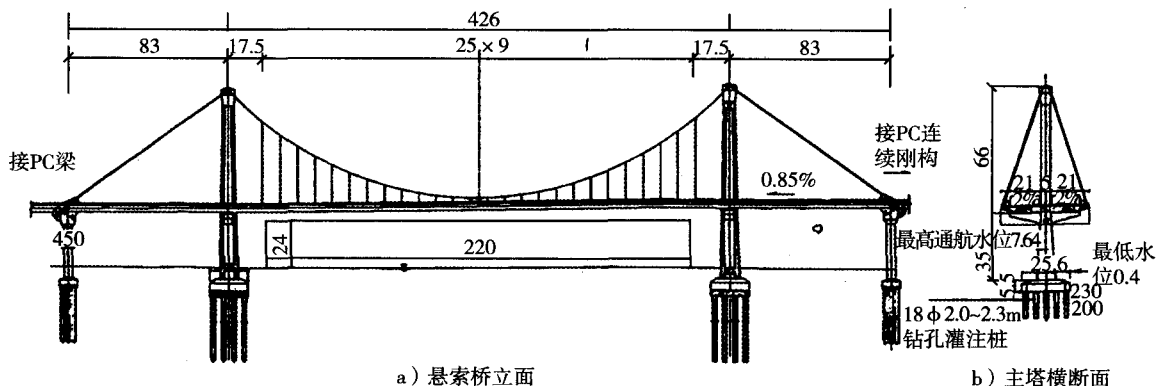


图3 悬索桥布置图 (尺寸单位: m)

### 3.3.1 主塔和下部结构

比较研究了不同桩基础的方案,同时兼顾施工难度和钱塘江上桩基的已有施工经验,主塔基础采用 $\phi 2.0 \sim 2.3\text{m}$ 变截面钻孔灌注桩。基础选择(12)3层中风化砂砾岩、泥质粉砂岩为桩基持力层,桩尖标高为 $-105.35\text{m}$ 。设计过程中对基础冲刷进行了数模、物模等分析工作。按不进行冲刷防护考虑进行基础设计,每个塔柱下承台最大厚度 $6\text{m}$ 。承台顶标高为 $-1.0\text{m}$ 。低于最低设计水位。

边墩基础采用 $\phi 2.0\text{m}$ 钻孔灌注桩,选择(12)2层强风化砂砾岩、泥质粉砂岩为桩基持力层,桩尖标高为 $-96.35\text{m}$ 。单侧承台的平面为六边形结构,承台高度 $3.5\text{m}$ 。为提高船撞、地震等荷载下抵抗水平力的能力,承台间以系梁连接。

边墩采用空心薄壁墩,墩柱截面采用单箱单室,墩柱高度约为 $30\text{m}$ ,顺桥向尺寸 $4.5\text{m}$ ,横桥向尺寸墩顶为 $6\text{m}$ ,以 $1:20$ 的比例向下变宽。墩身内布置预应力钢束,墩顶设置拉压球形钢支座和横向限位等约束装置。

江东大桥主塔为独柱式桥塔,腰圆形空心截面,梁下采用挑臂横梁以设置竖向支座等。主塔塔顶最高标高为 $+96.815\text{m}$ 。由于设置主索鞍座的原因,塔顶设 $6\text{m}$ 高的实心段。下塔柱和横梁段总高最高为 $35\text{m}$ (横梁顶至塔底),塔柱内设爬梯以供检查养护,塔顶设鞍罩和航空标志等。主塔上挑臂横梁采用箱形截面,单箱单室,宽 $6.8\text{m}$ ,横梁顶设置竖向可调球形钢支座、纵向非线性阻尼器和横向限位等约束装置。

### 3.3.2 钢箱梁

主梁采用分离式流线形正交异性桥面板扁平钢箱梁。梁高 $3.5\text{m}$ ,单幅桥顶板宽 $21\text{m}$ ,设 $2\%$ 横坡,底板水平,为单箱三室断面。钢横梁位于中央分隔带内,钢横梁与钢箱梁节段对应布置。钢箱梁制造线形考虑预拱度设置,为五段连续曲线。预拱度设置考虑因素主要为恒载、混凝土收缩徐变和主缆、吊索松弛。

考虑构造及施工架设等因素,钢箱梁标准节段长度 $9\text{m}$ ,除锚固端横梁外,均采用顶推法施工。单幅钢箱梁设置的两道纵向中腹板,基本上对称于钢箱梁横桥向重心,避免顶推施工过程中发生偏心和扭转现象。两道中腹板除支点区域梁段采用整体实腹板外,边跨跨中区和中跨有吊杆区域梁段均采用空腹桁架式腹板,中腹板两侧设置密布的顶推连续支座加劲。外腹板和内腹板均采用实腹板。

锚固端横梁采用单箱双层四室断面,中央分隔带范围设置主缆钢锚碇,在全桥宽设置两个拉压球形钢支座。钢锚碇采用铸焊结合结构,同端横梁联为一体,边跨两根主缆经散索鞍发散成 $2 \times 37$ 个索股后直接锚固在钢锚碇上。

悬索桥钢箱梁主体结构采用Q345D钢材,另对化学成分、横向冲击等提出附加要求:要求碳当量 $C_{eq}(\%) \leq 0.44\%$ ;要求对正火控轧钢板进行横向冲击试验,其在 $-20^\circ\text{C}$ 时的横向冲击功 $A_{kv}$ 不小于 $27\text{J}$ ,在常温下的横向时效冲击功 $A_{kv}$ 不小于 $27\text{J}$ 。

### 3.3.3 缆索系统

主缆为三跨空间线形,中跨主缆设计矢跨比 $f/L=1/4.5$ ,跨中处距桥面高度 $3\text{m}$ ,两根主缆由塔顶鞍座处间距 $3.0\text{m}$ 逐步过渡到跨中最低点处间距 $42.5\text{m}$ 左右。边跨两根主缆在中央分隔带内平行布置,间距 $3.0\text{m}$ 。边跨不设吊索,主缆线形为悬链线;中跨设吊索,主缆线形为分段悬链线。主缆采用PPWS法施工,工厂预制平行钢丝索股,现场在猫道上逐股安装架设。每根主缆由 $37$ 束平行钢丝索股组成,每股含 $91 \phi 5.3\text{mm}$ 镀锌高强钢丝,抗拉强度 $1670\text{MPa}$ ,热铸锚。安全系数 $K>2.5$ 。

根据吊索的受力特点,并综合考虑材料性能、制造加工、安装维护、后期更换等因素,采用 $109 \phi 7\text{mmPE}$ 护套高强度镀锌平行钢丝,抗拉强度 $1670\text{MPa}$ ,冷铸锚。吊索标准间距 $9\text{m}$ ,横桥向倾斜,斜率约为 $2.9:1$ 。安全系数 $K>3.0$ 。为适应空间索面顺桥向和横桥向双向变形,采用新型

销接式吊索,每个吊点设1根吊索,吊索上端采用能适应 $\pm 6^\circ$ 转角的向心关节轴承同主缆索夹连接,下端采用角接触关节轴承同钢箱梁连接,吊索锚箱为锚管承压式,锚管为喇叭形,张拉端位于钢箱梁斜底板下面。

主塔鞍座与主缆布置是匹配的。本桥采用的空间缆索系统,成桥状态中跨两根主缆在倾斜平面内,边跨两根主缆在竖直平面内。由于边跨不设吊索,这将导致塔的不平衡力较大,需多次顶推鞍座调整塔的受力,空间曲面鞍座设计较复杂,加工技术精度要求高。主鞍座必须适应主缆的空间转换,因此,主鞍座除了在顺桥向设置立面圆弧外,在平面内同样设置圆弧,以完成主缆在顺桥向和横桥向的方向转换。另外,主缆索股安装和紧缆施工均在竖直平面内进行,因此在中跨鞍槽出口设置一段平面圆弧。考虑施工安装条件,主索鞍采用铸焊结合结构:单只铸钢鞍体吊装质量约50t,中间肋板部分采用焊接钢板,用M30摩擦型高强螺栓连接左右鞍体。为适应施工中的相对移动,在鞍体下设不锈钢板—聚四氟乙烯板滑动副,在侧向挡板和鞍体侧板之间设聚四氟乙烯滑板。为增加主缆与鞍槽的摩阻力,并方便索股定位,鞍槽内顺桥向设竖向隔板,隔板厚度16mm,走向沿鞍槽走向。

散索鞍位于中央分隔带内。散索鞍采用转索和散索相结合的散索套形式,主缆首先竖向下转然后再径向发散,以保证安装施工时最上层索股不会出现上翘。散索鞍采用全铸钢结构,由两部分组成:鞍体和底座。鞍体相当于半径渐变的索夹,上下对合结构,底座采用高强螺栓固定在钢支架上,钢支架焊接固定在钢箱梁上,鞍体和底座之间设置不锈钢—聚四氟乙烯板滑动式移动副。

索夹与吊索的连接为新型销接式连接,采用上、下对合的结构形式,上、下两个半索夹用高强螺栓相连并夹紧于主缆上。索夹采用铸钢材料。为使吊索索夹紧固螺杆受力均衡,销孔中心及索夹中心均位于吊索中心线的延长线上。

主缆缆套是主缆出入索鞍鞍室前墙的过渡装置,其构造形式为喇叭形管状钢套,沿纵向分为上下两半。缆套在对主缆提供防护的同时具有良好的密闭性能,并在索鞍鞍室前墙之间允许少量的伸缩活动,使主缆钢丝保持一定长度不受缠丝约束。

## 4 施工方法

岸上连续梁采用满堂支架法施工,江中连续梁和刚构桥采用悬臂浇筑法施工,为常规的施工方法,本文不再赘述。江中自锚式悬索桥采用先梁后缆的施工方法,其主要步骤为:下部及主塔施工;钢箱梁制作、架设;鞍座制作、安装;主缆和吊索制作、安装;张拉吊索、体系转换;桥面系施工。基础及下部结构施工与水中梁式桥的施工方法基本相同,本桥施工方法为先梁后缆,见图4。空间自锚式悬索桥施工的关键点在于钢梁顶推以及主缆的编缆安装、就位、体系转换。

### 4.1 顶推施工

江东大桥通航孔自锚式悬索桥钢箱梁采用分幅单向顶推法施工。顶推施工法为少支架施工法,需要在水中搭设施工临时墩和顶推平台,由于本桥宽度较大,且独柱主塔位于横断面中心,故钢箱梁采用分幅顶推施工,两幅钢主梁分别顶推到位后再焊接钢横梁,钢箱梁顶推时最大节段质量小于110t,见图5。

自锚式悬索桥桥面均位于坡度0.85%的直线纵坡段上。顶推施工的关键是控制钢梁的线形以及保证钢梁的安全。由于边跨没有吊杆,所以成桥线形调整的难度较大,顶推梁底为五段连续曲线。为方便钢箱梁制造加工,单个梁段呈直线,梁段之间呈折线。钢箱梁为全焊钢结构,梁段工地连接均采用焊接方式。临时顶推支座要具备可上下调节的条件。钢箱梁段间焊接拼装线形既要控制标高,又要控制节段间的宽度误差,顶推过程中还要控制支点反力不能超过容许值,以免钢梁局部应力过大。

### 4.2 架缆施工

在双塔空间自锚式悬索桥体系中,对编缆方法、空缆线形、索夹定位、吊杆张拉工艺、主缆

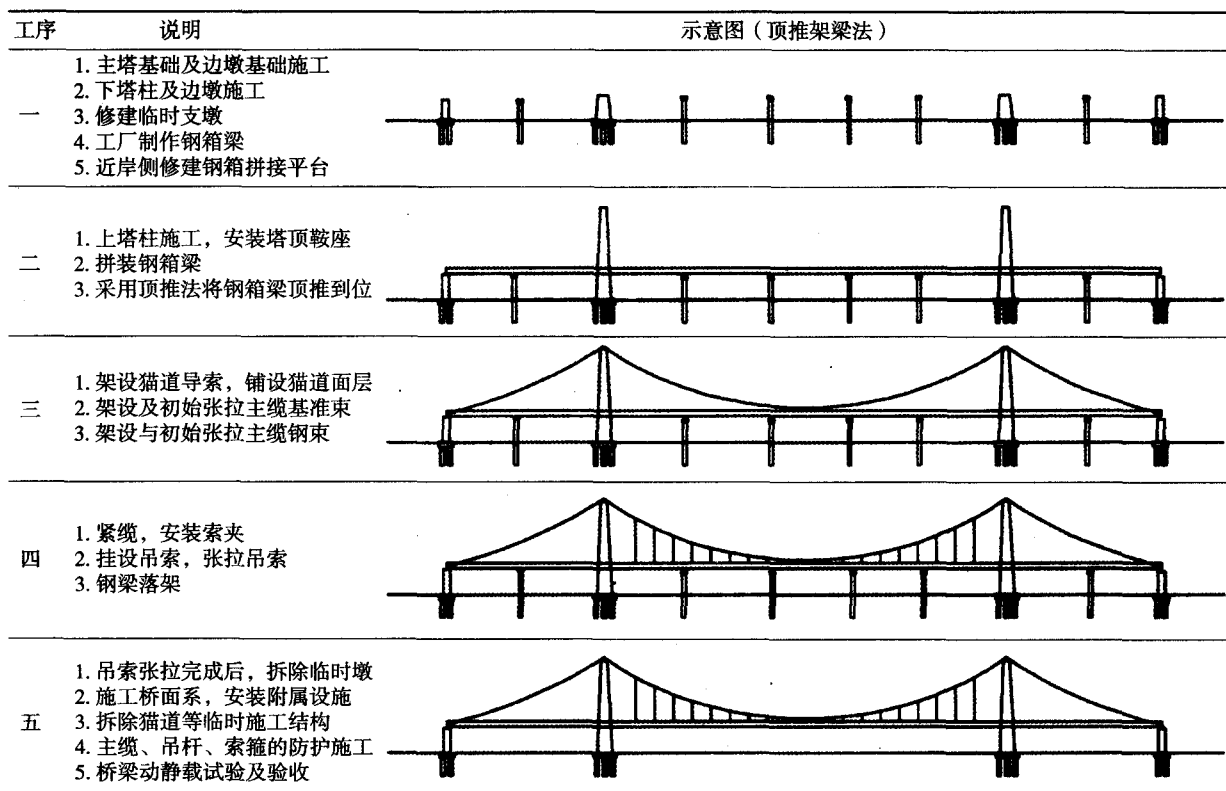


图4 悬索桥施工顺序示意图

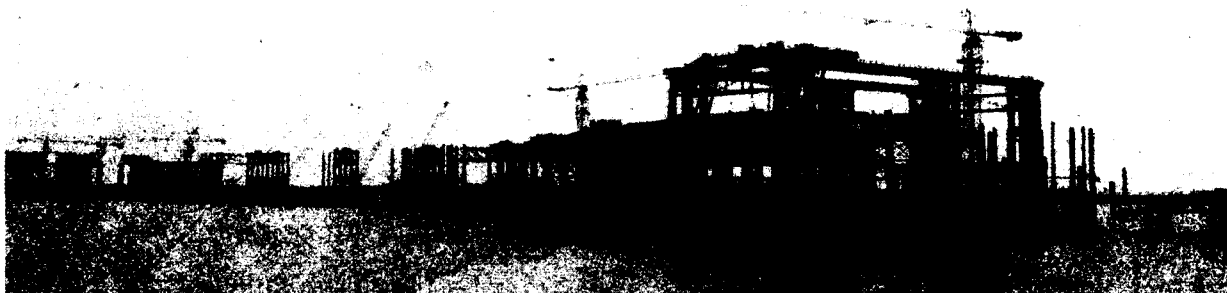


图5 顶推施工

线形、施工控制等关键技术, 均尚无现成资料可借鉴。由于本桥为空间缆面, 与常规平行缆相比, 多了如何将主缆架到空间斜面上的问题。有两种方法可以选择: 一种是直接按成桥线形施工, 另一种是先在铅垂面上安装, 再移到成桥线形面上。两种方法各有利弊, 经研究, 采用第二种方法。为了使主缆能顺利入鞍, 施工时要有辅助索鞍作为引导装置, 固定在主索鞍上。为配合正式架缆顺利, 在施工现场进行模拟架缆的实体试验。

## 5 结语

本工程跨江桥梁由预应力混凝土刚构桥和连续梁桥以及空间自锚式悬索桥三部分组成, 自锚

式悬索桥主跨260m, 采用三跨独柱桥塔、分离式钢箱加劲梁、空间缆索、边跨不设吊索, 这种三跨自锚式悬索桥形式在国内外尚无先例。工程于2008年12月竣工。

## 参考文献

- [1] 杭州市江东大桥初步设计说明书. 上海市市政工程设计研究院, 2005. 11.
- [2] 中华人民共和国行业标准. JTG D62—2004. 公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范[S]. 北京: 人民交通出版社, 2004.
- [3] 英国标准. BS5400钢桥、混凝土桥及结合桥[S]. 成都: 西南交通大学出版社, 1987.
- [4] 中华人民共和国行业标准. JT/T 449—2001. 公路悬索桥吊索[S]. 北京: 人民交通出版社, 2001. 400