

# 泰州大桥——世界首座千米级三塔悬索桥

钟建驰

(江苏省长江公路大桥建设指挥部,江苏泰州 225321)

**[摘要]** 2007年12月开工建设的泰州大桥位于江苏省中部,连接泰州与镇江,为世界首座千米级三塔连跨悬索桥,同时中塔采用世界首个纵向人字型钢塔,中塔基础采用世界上入土最深的水中沉井基础。为了建造这项宏伟的工程,针对众多技术挑战,建设者采取了一系列的创新技术:三塔悬索桥的设计技术,江中大型深井的定位着床、封底技术,人字型钢中塔的钢混结合连接技术、超厚钢板的焊接加工技术以及钢中塔异型节段的精确加工与控制技术等。

**[关键词]** 三塔悬索桥;创新;设计;水中沉井;人字型钢塔

**[中图分类号]** U448.25 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1009-1742(2010)04-0004-05

## 1 前言

泰州大桥(地理位置见图1)是江苏省“五纵九横五联”高速公路网的重要组成部分,连接京沪、沪陕和沪蓉三条国家高速公路,在长江三角洲地区和江苏省的高速公路网络中起着重要的联络和辅助作用。泰州大桥工程全长62.088 km,起于宁通高速公路宣堡枢纽,止于沪宁高速公路汤庄枢纽,全线采用双向六车道高速公路标准,桥面宽33 m。跨江主桥采用主跨跨径为1 080 m的双主跨悬索桥桥型方案,系世界第一,且为世界首创。

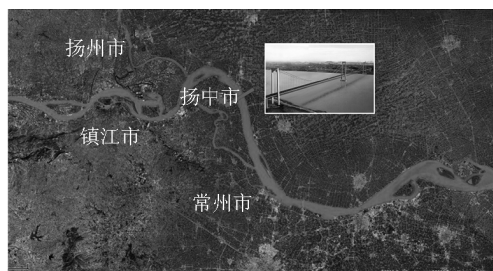


图1 泰州大桥地理位置图

Fig. 1 Location of the Taizhou Bridge

泰州大桥建设单位是江苏省长江公路大桥建设

指挥部,设计单位是以江苏省交通规划设计院为主体,中铁大桥勘测设计院、同济大学参加的设计联合体,施工任务分别由中交第二公路工程局、中交第二航务工程局、中铁大桥局、中铁宝桥集团有限公司和江阴法尔胜缆索有限公司等承包商承担,中交公路规划设计院、多门朗技术有限公司、日本长大株式会社等参加了大桥的技术咨询工作。

## 2 方案的选择

泰州大桥主桥通航净空要求为:主通航孔760 m×50 m,副通航孔:220 m×24 m。且在桥位附近有船舶锚地。结合桥位特点,目前满足此通航净宽要求、跨度在800 m以上的适合桥型方案有斜拉桥和悬索桥。

泰州大桥所处位置江面宽度约2.1 km,若要采用悬索桥一跨跨越,则跨度将达2 000 m以上,规模超过了明石海峡桥,其锚碇基础将十分巨大。由于扬中河段两岸均为长江中下游冲积平原,土质松软,覆盖层厚,基岩埋深在200 m左右,在此地基上建锚碇,工程的规模势必很大,工程费用亦相当高,同时施工风险较大;若采用主跨1 430 m的双塔悬索桥

**[收稿日期]** 2010-01-04

**[基金项目]** 国家科技支撑计划资助项目(2009BAG15B01)

**[作者简介]** 钟建驰(1957-),男,江苏武进县人,教授级高级工程师,主要从事大型土木工程建设与管理方面的研究工作;

E-mail: tzbridge@163.com

方案,其结构实施性较好,通航适应性佳,但在江中有两个较大的主墩基础,对水流影响较大,船舶撞击机率亦较大,并且为了适应防洪要求,需将锚碇置于两岸长江大堤以外一定安全距离处,边中跨比较大,结构受力不理想,且主梁为三跨连续,钢梁长,工程造价也会较高。对于斜拉桥方案,由于本桥位处河床断面形态呈“W”形,为满足通航净宽要求,主跨在980 m左右,但该方案在江中心深水处有两个较大的主墩,航道边缘距主墩较近,船撞机率较大,且斜拉桥除主墩外,尚有较多的辅助墩、过渡墩和引桥墩,深水基础较多,对河床断面压缩较大,对河势有一定的影响。采用主跨1 080 m的三塔两跨悬索桥方案(见图2),既满足了通航要求,同时为该江段航道的定线制实施以及可能的深泓左移、航道变迁预留了调整的余地。中塔将长江一分为二,提供了宽阔的上下行航道,对通航十分有利。该方案通航适应性佳,船舶进出锚地顺畅,对两岸的岸线开发和利用有利,充分顺应该河段的自然条件,且桥形美观,总造价适中。

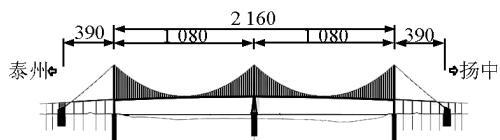


图2 泰州长江大桥桥型布置图(单位:m)

Fig. 2 Layout of Taizhou Bridge (unit: m)

主缆跨径布置为 $(390 + 2 \times 1080 + 390)$  m。主梁梁高3.5 m,全宽39.10 m,标准节段长16 m。中、边塔塔顶标高分别为200.0 m和180.0 m,中塔与边塔处主缆理论交点高程相差20 m。两根主缆横向中心距为35.8 m,主缆矢跨比采用1/9。每根主缆由154股索股组成,每根索股由91丝直径为5.2 mm的镀锌高强钢丝组成,钢丝极限抗拉强度为1 670 MPa。

加劲梁横断面为单箱三室构造,两侧边室为风嘴兼检修道,加劲梁顶面宽度为36.7 m(含检修道)。主缆采用预制平行钢丝索股,单根索股无应力长约3 100.0 m,重47 t。主缆在索夹内空隙率取18%,索夹外取20%。主缆对主要应力的强度安全系数 $K \geq 2.5$ 。主缆钢丝与鞍槽之间摩擦系数取 $\mu = 0.2$ ,其抗滑安全系数 $k \geq 2.0$ 。边塔基础采用群桩基础,塔身采用混凝土塔柱,塔柱顶高程180.0 m,塔柱底高程8.30 m。中塔基础为沉井,塔

身采用钢结构,纵向呈人字型,柱顶高程200.0 m,塔柱底高程8.50 m。斜腿段倾斜度为1:4。南、北锚碇基础采用沉井,锚体为大体积混凝土结构。

### 3 困难与挑战

泰州大桥所采用的三塔悬索桥不仅是桥梁在跨越能力上的突破,更是实现大跨悬索结构多跨连续跨越的全新桥梁结构体系,这项工程的建设面临着一系列的重大挑战:

1)首次设计千米级三塔悬索桥,对于这种新结构,必须对结构总体的受力特性、结构的具体方案、结构的稳定性、适用性展开全面的研究,并攻克三塔悬索桥中塔合理刚度选择、中塔稳定性的难题。

2)三塔悬索桥中塔与传统的两塔悬索桥有较大的区别,其中塔在任何工况下,均要求保证主缆在中主鞍座间不发生相对滑移,否则会造成整个体系的失稳。然而中塔两侧均是主缆的柔性约束,在活载非对称作用下,若中塔刚度较小,中塔顶两侧主缆不平衡水平力较小,主缆的抗滑移安全系数易于实现,但加载跨主缆垂度大,主梁的挠跨比较大,行车安全不易保证;如中塔刚度大,主梁的挠跨比易于满足要求,但中塔顶主缆不平衡水平力大,可能因鞍槽与主缆束股间的摩擦力不足而造成滑移。

3)中塔基础采用了世界上入土最深的水中沉井基础,在长江上开展深水沉井施工,与海上的设置沉井施工不同,面临着三项技术难题:一是必须有强有力的沉井控制系统,以防止沉井在江中受到水流力及风力的影响引起沉井的自振,这种大型结构一旦振动起来,将极难控制。二是沉井在下沉过程中,会引起河床面的施工冲刷,造成河床面的前冲后淤,这就给大型沉井的准确定位、着床等带来了极大的挑战。三是沉井在江中的地质条件复杂,必须确定合理的下沉系数,同时要解决大型沉井的下沉控制问题:既要防止加载过量引进沉井在水中的突沉而无法控制,同时也要防止加载不足造成沉井无法下沉。

4)钢中塔根据受力的要求,大量采用高强度的厚钢板,69.5%的钢板为Q420qD,57.8%以上的钢板厚度达到50 mm到60 mm,钢塔柱为变截面切角矩形结构,焊接量大、焊缝分布不对称,焊接作业热变形较大,且几何精度要求高,结构焊接变形及几何尺寸的控制是需要攻克的难题之一。

5)钢中塔节段重量大,钢混联接以及下横梁分

叉段等安装难度高。D0 段底板采用三块重约 20 t 厚 150 mm 的钢板熔透焊接,中塔下塔柱采用 M140×10 184 mm 长锚杆与承台相连,这些在我国桥梁建设史上为首次采用。D4 为下塔柱的合龙节段,分别与下面的两个 D3、上面的 D5、水平方向的下横梁相连,共有 4 个方向的连接关系,空间关系极其复杂。

## 4 技术创新

### 4.1 结构体系

由于三塔悬索桥体系的结构特点,中塔在顺桥向的结构刚度,应是既有恰当的可挠曲性,又有足够的抗弯刚度。设计中对中塔的合理刚度进行了广泛的比选,对中边塔高度、中塔截面尺寸、中塔纵向分叉宽度、分叉点高度等进行了详细广泛的计算比选,最终选择了纵向人字型塔形和弹性均匀性良好的钢材作为中塔材料,该方案可以兼顾中塔纵向刚度和抗滑移安全度。

设计中分别研究了主梁与中主塔间不同的竖向连接方式对中主塔、主缆、主梁、支座参数的影响。最终选用主梁在中塔处不设竖向刚性约束、但设竖向限位挡块的支承方式。通过上下游竖向限位挡块联合作用,使主梁的扭转振动得到一定程度的约束,对于减小风荷载作用下扭转振动的振幅有所帮助。对主梁与中主塔间的纵向连接方式的研究表明:加劲梁与中主塔间纵向设约束,可以显著提高主缆与中主鞍座间抗滑移安全系数,减小加劲梁竖向挠度,改善中主塔受力,极大地减小加劲梁纵向活载位移;与纵向刚性约束相比,弹性索约束对结构的有利效应相当,并且在构造上相对简单,最终选用在主梁与中塔间设置纵向弹性约束。

设计对主跨跨中是否设中央扣及设多对中央扣进行了研究比较,结果表明中跨跨中中央扣的设置有着相当大的难度,与两塔悬索桥完全不同。如只设置一对中央扣,中央扣扣索的倾角无法选取,倾角小、扣索受力很大,到了无法实施的地步;倾角大、对总体的改善微乎其微。设三对中央扣对结构总体行为有一定的改善,但存在疲劳破坏、扣索拉力大、需设置三对等特点,经比选后初步设计推荐不设置中央扣的方案。

### 4.2 中塔深水沉井基础

泰州大桥中塔位于江中深泓区的边缘。为提高基础抗震性能和抗船撞能力、节约建设成本,中塔基

础选用沉井结构,其标准断面为 58.00 m × 44.00 m,被两纵三横隔墙分隔为 12 个井孔;沉井高 76 m,下部 38 m 为钢壳混凝土结构,上部 38 m 为钢筋混凝土结构;沉井底标高 - 70.00 m,顶标高 + 6.00 m,为目前世界上入土最深的水中沉井基础。

沉井下部 38 m 为钢壳混凝土沉井。钢壳在工厂分节分块制作,首节钢壳沉井高 8 m,在船台上拼焊完成后,通过滑道法下水,并浮运至桥位附近的临时码头;分节接高钢壳至 38 m,再整体浮运至墩位,利用定位系统精确定位并着床下沉;待达到一定埋置深度后浇筑钢壳夹壁混凝土,然后进行沉井吸泥下沉和混凝土沉井接高的交替作业;至沉井下沉至设计标高后,进行清基和封底。沉井施工完成时的精度要求为:平面偏位 ≤ 50 cm,倾斜度 ≤ 1/150,扭转角 ≤ 1°。

河床局部冲刷是影响沉井施工的一个重要因素,沉井下沉初期是一个至关重要的阶段。选择什么样的时机进行沉井着床,采用什么样的定位系统来保证沉井在复杂的水流、风力、波浪条件下精确定位,如何保证沉井在发生局部冲刷的条件下平稳着床和下沉,是确保工程质量和安全的关键。为此,在施工前对沉井的定位方案进行了大量的研究比选工作。经过大量研究,最终泰州大桥的中塔沉井定位由常规“定位船 + 导向船 + 锚系”的柔性体系,创新为“钢锚墩 + 锚系”的刚性定位体系(定位系统具体布置见图 3);沉井着床时机选择水流流速较小的高平潮时段;沉井封底采取对称分格舱清基、封底的工艺施工。沉井在施工过程中受到水流力、风力等外

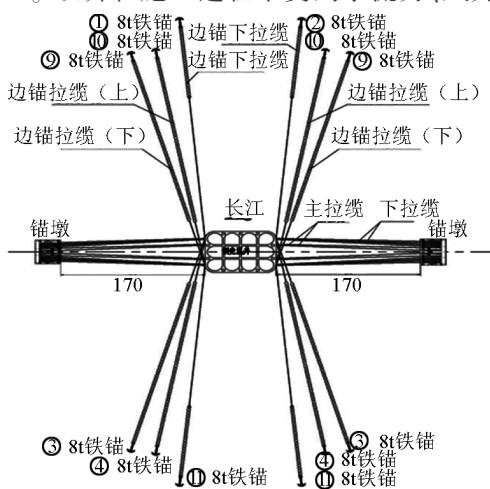


图 3 沉井锚墩定位布置图

Fig. 3 The layout of the anchorages for the sinking caisson

界因素的影响,很容易就产生偏位、扭转、倾斜等。为了保证沉井基础施工的质量及安全,运用了沉井下沉数字化动态监控系统,在沉井定位、着床、吸泥、

接高、下沉、终沉、封底等全过程中,均采用数字化动态监控系统(见图4)对沉井进行了实时监测。

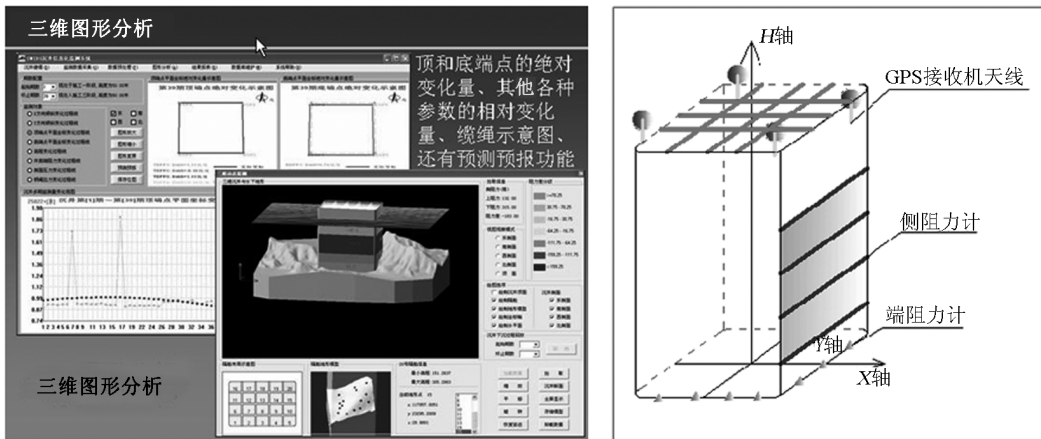


图4 沉井下沉数字化动态监控系统

Fig. 4 The dynamic digital monitoring system of the sinking caisson

### 4.3 纵向人字型钢中塔

#### 4.3.1 结构构造

中塔纵向呈人字型结构,塔柱高 191.5 m。钢塔柱主体结构按塔柱受力分别采用 Q370qD, Q420qD 钢。塔柱两条斜腿中心交点以上塔柱高 122.0 m,交点以下塔柱高 69.5 m,斜腿段倾斜度为 1:4。索塔横向为门式框架结构,塔柱横桥向尺寸自塔顶至塔底等宽为 5.0 m,塔柱共设置两道横梁。塔柱为单箱多室布置,为了减小塔柱截面风阻系数,在塔柱外侧角点处设置导角 0.6 m × 0.6 m。塔柱共划分为 21 个节段,塔柱节段连接传力形式,设计采用高强度螺栓传力与端面金属间接触传力相结合的方法。

中塔下塔柱与承台采用固结连接的方式。针对塔柱根部大偏心受压、截面轴向力和弯矩都比较大的特征,采用承压板和锚固螺栓结合的方式实现塔柱与承台的锚固连接。每个塔座底截面布置 34 根直径为 130 mm 的 40CrNiMoA 螺杆,并施加预拉力。螺杆的预拉力根据工作状态下塔底截面无拉力出现状况来控制。

#### 4.3.2 钢中塔制造

钢塔柱为变截面切角矩形结构,最大截面为 5.0 m × 12.69 m,节段最大长度为 15 m。根据受力及线形要求,节段断面横桥向、纵桥向尺寸公差为 ±2 mm,对角线差及扭曲允许误差不大于 3 mm,全断面平面度 ≤ 0.25 mm,塔段横桥向和纵桥向端面

垂直度 ≤ 1/10 000,塔段间壁板、腹板金属接触率 ≥ 50%,纵肋金属接触率 ≥ 40%,如此高的精度要求,给焊接变形、定位划线、机加工、测量精度控制带来了很大难度。

螺杆制作:每根锚固螺杆长达 10.184 m,单根重达 846.8 kg,经过研究、攻关,摸索出了一套成熟的锚杆加工制造工艺,成功解决了长锚杆端部镦粗工艺难题、大直径长锚杆热处理技术难题、以及长杆两端螺纹同轴度 ≤ 5 mm 的高精度加工难题。图 5 为大直径长锚杆工厂制作的照片。



图5 大直径长锚杆制作

Fig. 5 Long anchorage spar with major diameter

水平预拼装:由于塔段较长,部分塔段长达 15 m,两段预拼装长 30 m,为了安全及避免温度影响,在厂房内进行钢塔节段水平预拼装辅以计算机模拟预拼装方案。

钢塔柱线形控制:为了保证钢塔节段的端面加工质量,通过大量的研究和科研攻关,选择了“先进的测量方法+数控找正方法+有效的工件状态控制方法+普通机加工设备”的加工精度控制方案;采用钢塔柱累积精度管理,根据钢塔柱单节段的塔段长度、端面垂直度及两节段预拼时壁板轴线间错移等项点的测量结果,利用计算机进行塔柱的仿真预拼,预测塔柱的安装误差,并以预测结果来指导后续塔段的加工(对高度偏差和轴线偏移进行修正加工)和两节段预拼(对扭转偏差进行修正)作业,实现对钢塔柱制造和安装精度的管理;为了保证高精度的塔柱线形要求,设计预留了4个调整接口(J1, J4, J6, J16)进行线形控制调整。

#### 4.3.3 钢中塔安装

钢塔 D0 节段的正确定位和安装,是整个塔身安装的基础,其安装精度将决定塔柱安装的精度。D0 节段共4个,具有双向倾斜度,每个节段底部承压板和顶板上各有34个直径为200 mm和180 mm的孔,安装时需将同样数量、直径为130 mm锚杆同时穿入钢塔柱底板和顶板对应的圆孔中。钢塔柱在“穿孔”过程中需调整为纵桥向1:4,横桥向3.9:192的坡度,且偏移不得超过20 mm,安装定位精度要求很高。吊装就位后,既要控制好单个节段的精度,同时还要保证4个节段之间的相对精度,需要进行精确的测量并保证节段可以进行3个方向的调整。

钢塔 D4 段重470 t,同时需要保证4个方向的连接关系,在浮吊吊装就位后,如何对重量如此之大的塔段进行精确微调,对调位千斤顶的设置和工装设计以及现场测量精度要求很高。因塔身分为下部斜腿段、曲线过渡段和上部直线段三个阶段,线性控制难度极大,加上吊装时受温度、风、沉井不均匀沉降以及塔吊附墙的影响,必须通过精确的测量和科学的监控分析来控制安装精度,保证吊装质量和安全。在吊装 D4 节段前,对 D3 节段顶面进行了多个夜间精密测量和24 h不间断监测,通过设置在下塔柱上的水平千斤顶来调整 D3 节段顶口顺桥向位置,下横梁支架上的水平千斤顶来调整 D3 节段顶口横桥向位置。吊装过程中为使下一架设节段能够

较容易地插入,在已安装节段与待安节段四边安装限位板。在牵引系统的配合下,待安节段下落时利用限位板对位。限位板在工厂内进行预拼装以保证孔位及尺寸形状能满足使用要求,当塔柱节段间完成拼装后解除限位装置。用调位牛腿来进行 D4 节段精调位,调位牛腿在钢塔加工厂加工、安装。在 D3 节段的每个牛腿上布置一台500 t千斤顶,用于 D4 节段的精调位。图6为 D4 节段的吊装施工照片。



图6 中塔 D4 节段吊装

Fig. 6 Hoisting of the D4 section of the middle tower

## 5 结语

作为世界首座跨千米三塔两跨悬索桥,泰州大桥的设计施工存在众多技术难点,通过大量的专题与科研研究,成功选择了全桥的结构体系与中塔结构,成功完成了中塔超大规模的深水沉井基础的定位、着床及下沉施工,成功完成了超厚钢板的焊接及变形控制、有双向倾斜度的 D0 节段的精确就位以及有4个方向连接关系的 D4 节段的精确安装等。在未来的3年里,泰州大桥还将面临钢主梁吊装及施工线形控制、超长超柔钢桥面铺装方案的选择等技术难题,大桥建设者将运用科技创新,掌握大跨径悬索桥核心技术,确保泰州大桥成功建成,推动桥梁建设技术进步,为今后相关桥梁建设提供可靠的技术支撑及经验。

(下转 28 页)