

# 三塔悬索桥中间塔施工关键技术

田 唯<sup>1,2</sup>, 刘建波<sup>1,2</sup>, 游新鹏<sup>1,2</sup>

(1. 中交第二航务工程局有限公司技术中心, 武汉 430040; 2. 长大桥梁建设施工技术交通行业重点实验室, 武汉 430040)

**[摘要]** 泰州大桥中间塔采用深水沉井基础与纵向“人”字形钢塔相组合的结构形式,其施工极为复杂。该项目通过前期研究成果,在深水沉井基础施工过程中利用上下游锚墩定位技术,结合信息化实时监控系统,确保了沉井的准确定位和精确着床,同时采用终沉控制措施成功防止了沉井在终沉阶段的突沉、超沉现象。钢塔架设精度高,调整节段少,且在安装过程中结构存在多次体系转换,针对以上特点,采用几何控制的全过程控制理念,将节段制造误差、预拼装线性和架设误差进行统一分析,建立精度管理系统,最终钢塔的架设精度远远优于设计精度。泰州大桥中间塔施工取得了多项技术创新,形成了深水沉井施工与钢塔制造安装等关键技术,为今后类似工程提供了有益的借鉴。

**[关键词]** 泰州大桥;锚墩定位;实时监控;终沉控制;全过程控制;架设精度

**[中图分类号]** U446.2 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1009-1742(2012)05-0023-06

## 1 前言

随着国家进入“十二五”规划时期,我国的基础设施建设必将进入一个崭新的时代。过去十多年里,我国陆续建成了润扬长江大桥、杭州湾跨海大桥、苏通大桥、舟山跨海大桥等重大建设项目,目前举世瞩目的港珠澳跨海工程亦正式启动。根据我国公路交通网的规划,越来越多的跨海峡通道将进入人们的视野。在已建成、建设中或规划中的越江跨海工程中,下部结构的施工始终是桥梁工程建设中的重点、难点<sup>[1]</sup>,是桥梁建设者应该首要解决的难题。文章以已建成的工程为实例对塔和基础的施工进行简短的介绍。

## 2 工程概况

泰州大桥是国内首座三塔连跨悬索桥,其跨径为390 m、1 080 m、1 080 m、390 m,主桥桥宽为33 m,设计车速为100 km/h,采用六车道高速公路标准。

大桥中间塔采用纵向“人”字形、横向门式结构的钢塔,塔高为191.5 m,其横桥向的斜率为

39:1 920。全塔沿竖向分为21个节段,依次为D0~D20,其中D1、D4、D6和D16节段为调整节段,用来调整桥塔的整体线性。中塔基础采用方形圆倒角沉井基础,高度为76 m,其中钢结构部分和混凝土部分高度均为38 m,其总重量达16万t。沉井的标准断面尺寸为58 m×44 m,倒角半径为9.8 m,终沉设计标高为-70.0 m。

中塔施工区域水深超过15 m,最大流速为2.81 m/s,且属于双向感潮河段,给施工带来了很大的困难。沉井基础于2008年9月1日下沉到设计标高,钢塔于2010年3月31日全部吊装完成。

## 3 基础施工

### 3.1 沉井定位着床

目前,深水沉井定位的施工方法主要分为锚墩定位法、锚锭定位法和导向墩定位法三大类。根据国内外相关文献资料<sup>[2,3]</sup>,对各种施工方法从施工工艺、施工风险、可操作性、工期控制和技术经济性等进行综合对比分析,并结合泰州大桥施工特点,该工程采用“钢锚墩+锚系”的半刚性定位系统(见

**[收稿日期]** 2012-03-12

**[基金项目]** 国家科技支撑计划资助项目(2009BAG15B02);交通行业联合科技攻关项目(2008-353-332-180)

**[作者简介]** 田唯(1980—),男,湖北武汉市人,工程师,主要从事长大桥梁施工建造技术研究;E-mail: Mimikid-gg@163.com

图1)<sup>[4]</sup>。相比于其他定位系统,该系统具有以下优势:

1) 系统刚度大,施工操控性强,同时有效抑制沉井在定位过程中的摆动现象;

2) 减少锚墩对沉井着床区域河床局部冲刷的影响;

3) 施工水域面积小,减少施工对航道的影响;

4) 上下游锚墩还兼顾防撞功能。



图1 “钢锚墩+锚系”半刚性定位系统

Fig.1 Semi-rigid positioning system of “steel anchor-piers and anchor-cables”

沉井定位系统由上下游锚墩和24根拉缆组成,通过改变缆绳受力来调整沉井平面位置和垂直度。沉井定位的施工流程如下:沉井浮运至墩位处,抛锚→通过缆绳将锚锭、沉井和锚墩连接→沉井初定位→腔内注水下沉至刃脚距河床2 m→利用定位系统对沉井进行精确调位→择机(枯水期、高平潮位)注水下沉,使沉井着床。

由于河床面局部遭冲刷,造成沉井下沉前呈前冲后淤的“S”形地势,严重影响沉井着床后的精度。针对此特点,项目在施工前进行了河工模型试验<sup>[5]</sup>,掌握了施工期间河床冲刷形态规律,并以此确定了沉井着床时的预偏量(设计值为向下游偏20 cm)。稳定着床后,通过反复测量,沉井的平面位置向下游偏18 cm,定位精度为2 cm,实现了深水沉井准确定位与精确着床,解决了水深流急作用下深水基础定位误差大的难题。

### 3.2 沉井振动分析

南京长江大桥在施工建设中,其五号桥墩沉井基础由于水流作用,导致其在定位过程中发生剧烈摆动,从而使锚链系统中边锚锚缆遭到破坏。根据国内外相关文献资料,深水基础在定位过程中,由水流作用易引起涡激振动(VIM运动),给施工带来极大的风险。针对此特点,利用大型流体软件采用计算流体力学(creep fluent design, CFD)方法对沉井在施工期间的各种工况进行仿真分析<sup>[6]</sup>,其有限元模型见图2。

通过计算分析,当流速小于0.8 m/s时,沉井摆振的轨迹呈“C”形,是因为沿来流方向的纵向力振动幅值很小,此时对运动起主导作用的是横向力。

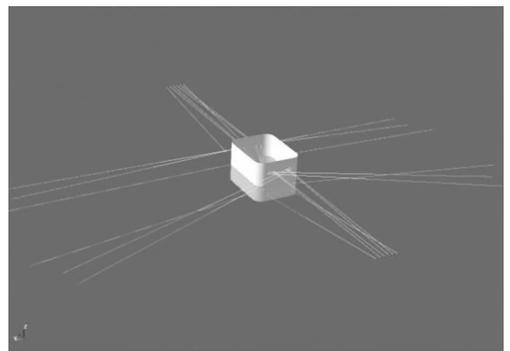


图2 沉井定位系统模型

Fig.2 Model of caisson positioning system

当流速处于0.8~0.9 m/s之间时,摆振运动开始逐渐呈现模糊的“8”形。此时,纵向振荡力的作用开始逐渐显现,沿流方形的运动渐渐从小幅漂移变成小幅漂移基础上的微幅振荡。当流速大于0.9 m/s时,摆振运动开始出现非常明显的“8”形。

为了解决沉井在定位过程中摆动过大的现象,在施工过程中应采取相应的抑振措施,对抑振措施的效果进行计算分析。通过加大缆绳拉力来增加定位系统刚度是有效抑制沉井摆动的方法之一,通过改变锚链长度来实现加大缆绳拉力。模型对锚链不折减、折减1 m、折减2 m和折减3 m四种工况进行分析,其计算结果见表1。

从表1可以看出,锚链长度折减得越多,预紧力越大,平衡位置向下游的纵漂越少。这是由于预紧力越大,锚泊系统对风、流定常作用的反力就越大。同时,横荡和纵荡的幅值也随着锚链长度的折减而减小,而横荡和纵荡的周期则随着折减长度的增加先增后减。

表 1 锚链不同张紧力作用下沉井运动特征参数比较  
Table 1 Comparison of characteristic parameters of caisson movement under different tensioning of mooring cables

锚链折减长度	运动形态	平衡位置/m	振荡幅值/m	振荡周期/s
不折减	纵荡	-1.88	2.38	82
	横荡	0	4.4	162.5
折减 1 m	纵荡	-1.8	1	84.3
	横荡	0	3.4	170
折减 2 m	纵荡	-1.26	0.46	85
	横荡	0	1.8	171.4
折减 3 m	纵荡	-0.67	0.17	85
	横荡	0	0.78	170

### 3.3 沉井吸泥下沉及终沉控制

中塔基础地质主要以砂层为主,沉井下沉过程中主要以冲吸法空气吸泥工艺为主,遇到特殊情况,采用潜水钻机加以辅助。冲洗法吸泥工艺流程见图 3。

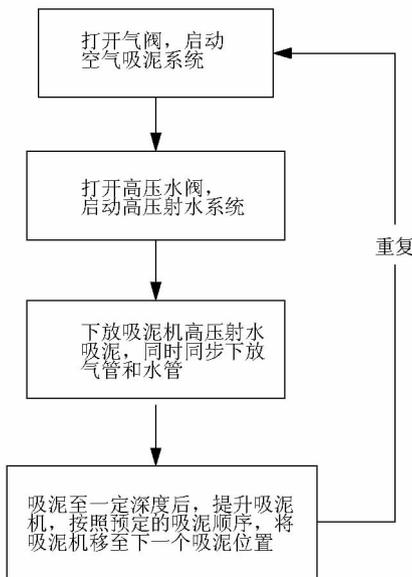


图 3 冲洗法吸泥工艺流程图

Fig. 3 The process chart of irrigation mud suction construction

沉井高出河床面长度为 21 m, 且总重量达 16 万 t, 在终沉阶段容易发生突沉、超沉现象。针对此难点, 在深入研究极限摩阻力和承载力的基础上, 采取“小锅底”取土下沉方式和“分孔清基、分舱封底”的控制措施。沉井格舱分舱见图 4。沉井清基和封底的原则为对称施工, 其施工顺序为 I 区→II 区→III 区→IV 区→V 区→VI 区。沉井终沉到位时的

刃脚标高为 -70.108 m, 仅比设计位置低 0.108 m, 有效防止了沉井超沉现象。

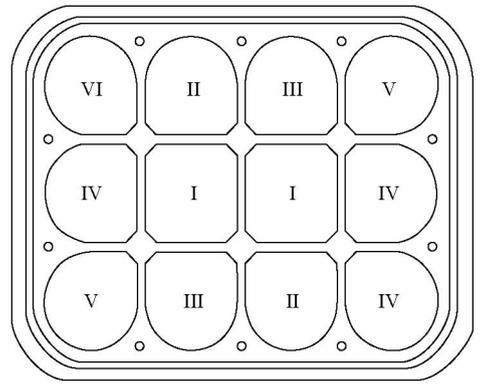


图 4 沉井格舱分舱

Fig. 4 Sketch of “Base clearing-off and base sealing for each bulkhead” of caisson

### 3.4 沉井施工监控系统

沉井在施工下沉过程中, 其空间几何姿态受外界因素(水流、波浪和基础冲刷等)影响不断地发生变化, 采用传统的人工测量方式不能满足施工要求。利用全球定位实时差分技术(global positioning system- real time kinematic, GPS-RTK), 研发相关配套软件, 集自动采集、分析和预测于一体的信息化监测系统, 对沉井着床和下沉节段结构中心偏位、整体垂直度、下沉量和扭转角等几何姿态进行实时监测。

沉井从 2007 年 12 月 1 日着床至 2008 年 8 月 31 日下沉到设计位置, 历时 9 个月, 比计划提前了 3 个月。沉井终沉到位时, 各项控制指标均小于设计允许值(见表 2)。

表 2 沉井终沉精度指标

Table 2 Error of final sinking and positioning of caisson

序号	项目	设计标准	实测数据
1	平面	≤50 cm	沉井顶面
	偏位		沉井底面
2	垂直度	整体垂直度 ≤1/150	1/363
3	扭转角	≤1°	10.8'

## 4 中塔施工

### 4.1 首节段吊装

塔底钢塔柱与混凝土承台采用螺栓锚固法的连接方式<sup>[7]</sup>, 即将塔柱底节通过塔柱底板(承压板)和预埋 in 基础的混凝土中的大型锚固螺栓连接在一

起。钢塔首节段在两个方向均具有一定的倾斜度,纵桥向和横桥向的斜率分别为 1:4 和 39:1 920,这给施工带来了一定的难度。为确保吊装的成功率,施工现场在吊装前设置了定位导向支架进行辅助施工。

钢塔首节段采用 1 200 t 起重船进行吊装,见图 5。吊装完成后,利用调位系统,通过全站仪精确定位,对各首节段绝对及相对坐标进行调整。首节段安装工艺流程如下:定位导向支架安装→首节段运输至墩位处→起重船就位、抛锚→起重船起钩,并对首节段空中姿态进行调整(与设计倾斜率相近)→起重船落钩,利用导向架将首节段缓慢下放→临时固结→通过调位系统对全部安装完成的首节段进行精确调位→永久固结,并进行承压板底压浆。



图 5 钢塔首节段安装

Fig. 5 Installation of the first segment

#### 4.2 调整节段安装

钢塔调整节段设置的主要目的是及时调整钢塔整体安装线性,以满足工程设计的要求。节段调整的方法是通过在已安装节段的顶面设置合适的垫片以改变倾角误差,从而调整后续节段的平面误差。该调整方法仅能改变当前节段端面倾角,而不能改变其平面误差。通常情况下,钢塔的线性主要取决于节段的制造误差。但架设现场的安装环境也是影响其整体线性的重要因素。在钢塔的施工过程中,采用全过程的几何控制方法<sup>[8]</sup>,将节段制造误差、预拼装线性和现场架设误差进行统一分析,建立精度管理系统,有利地控制了误差的发展。

基于以上原因,在调整节段安装前须对已安装完成节段的平面误差和倾角误差进行综合评估,在设置合适的垫片后方可进行节段吊装。调整节段安装的施工顺序大致如下:利用全站仪和精密水准仪(精度高)对已安装完成节段进行测量,并确定最终

误差值→在已安装节段顶面设置合理的垫片→节段吊装,并进行临时连接→对调整节段平面位置进行评估,满足设计要求→永久拼接板现场匹配投孔→永久连接。在施工中,由于采用了垫片来进行后续节段平面位置及倾角的调整,该接缝处没有金属接触率的要求,其荷载传递主要通过高强螺栓来实现。

#### 4.3 一般节段安装

为了加快钢塔架设速度,全塔除了 D1、D4、D6 和 D16 节段外,其余均为一般节段。相对于调整节段,一般节段在吊装前不需要设置垫片,但两相邻节段间必须满足金属接触率大于 50% 的设计要求。施工中,往往用厚度为 0.04 mm 的塞尺进行检测。

钢塔下塔柱由于重量较大,采用起重船进行安装。上塔柱节段采用 MD3600 起重设备进行吊装,同时为了满足起重要求,上塔柱 D6 ~ D17 节段均沿纵桥向划分为两个节段,其余节段均采用一次性吊装。

#### 4.4 横梁安装

该桥塔共设置有上下两道横梁,其中下横梁与 D4 节段连接,上横梁与 D18、D19 和 D20 节段连接。

下横梁施工采用起重船进行一次性整体安装(见图 6)。由重力引起的钢塔内倾和安装累计误差等造成钢塔实际线性偏离设计线性,为实现下横梁的顺利安装,需利用顶推系统对钢塔的实际状态进行调整。结合现场施工特点,将顶推系统设置在下横梁支架上。在安装下横梁前,通过顶推系统将钢塔调整至理想状态(计算分析得出),然后进行吊装。下横梁安装的施工顺序大致如下:对 D4 节段平面位置进行评估→利用顶推设备将钢塔调整至理想状态→起重船进行吊装→下横梁接近预定安装位置→利用调整装置对下横梁位置进行微调,与 D4



图 6 下横梁整体安装

Fig. 6 Overall installation of under-crossbeam

节段侧面端口进行匹配→临时连接→拼接板现场匹配投孔→永久连接。

上横梁节段长 26 m,整体重量达 490 t,MD3600 起重设备无法实现一次性安装。设计方将上横梁划分为 4 个节段进行逐段安装(见图 7),节段重量为 97~108 t。上横梁安装前,同样需要利用顶推系统将上塔肢调整至理想状态(计算分析得出)。相对于下横梁安装,上横梁安装时保证 4 节段轴线处于同一直线上是安装的主要控制因素。施工中采用后视法进行控制,即以上下游塔肢 D20 节段顶面中心为控制点,将全站仪架设于其中一控制点,后视另外一控制点,吊装中每个节段顶面中心控制点位于由该两控制点(D20 节段顶面中心控制点)连成的直线上即满足要求。



图 7 横梁分节段安装

Fig. 7 Overall installation of upper - crossbeam

## 5 结语

泰州大桥作为国内首座三塔连跨悬索结构,截止目前已完成索的安装,下阶段的工作将是钢箱梁的安装。中间塔施工是大桥建设的重难点,也开辟

了国内深水大型沉井基础施工的先例,其成功的施工经验可归纳为以下几点:

1)研发的“钢锚墩+锚系”的半刚性定位系统,增强了系统的操控性,使沉井准确定位、精确着床,同时该系统也有效抑制了沉井在施工中的摆动现象,降低了施工风险,为沉井的顺利下沉提供了有力的保障;

2)深水大型沉井终沉控制技术防止了终沉阶段沉井易发生突沉、超沉等现象,成功地将沉井刃脚标高控制在 -70.108 m,满足设计要求;

3)研发沉井施工信息化监控系统,首次实现沉井施工过程中空间几何姿态的实时监测,确保了沉井定位的准度和下沉的精度。

4)在钢塔安装过程中采用全过程几何控制方法,将制造误差、预拼装线性和安装误差进行统一分析,最终将成塔后的垂直度误差控制在 1/15 000 以下。

## 参考文献

- [1] 左明福. 公路桥梁深水基础施工[J]. 土工基础,1999,13(2): 1-5.
- [2] 杨其良. 施工中的日本明石海峡大桥[C]//中国土木工程学会全国市政工程学术交流会. 1998;287-295.
- [3] 刘自明,王邦楣,陈开利. 桥梁深水基础[M]. 北京:人民交通出版社,2003.
- [4] 杨宁,肖文福,吉林. 泰州长江公路大桥中塔沉井定位方案研究[J]. 桥梁建设,2009(4):64-68.
- [5] 南京水利科学研究院. 泰州大桥中塔沉井基础施工工期局部冲刷及稳定性试验研究[R]. 2007.
- [6] 上海交通大学. 沉井振动分析机理研究报告[R]. 2010.
- [7] 华新,韩大章,周彦峰,等. 三塔悬索桥人字型钢中塔选型及关键构造设计[J]. 中国工程科学,2010,12(4):37-42.
- [8] 李乔,卜一之,张清华,等. 大跨度斜拉桥施工全过程几何控制概论及应用[M]. 成都:西南交通大学出版社,2009.

# Key technology research on construction for the middle tower of suspension bridge

Tian Wei<sup>1,2</sup>, Liu Jianbo<sup>1,2</sup>, You Xinpeng<sup>1,2</sup>

(1. CCCC Second Harbour Engineering Company Ltd., Wuhan 430040, China; 2 Key Lab of Large-span Bridge Construction Technology, Ministry of Communications, Wuhan 430040, China)

[ **Abstract** ] The middle tower of Taizhou Bridge consists of deep-water caisson foundation and steel tower with herringbone shape along the longitudinal direction. The construction is complex. Based on previous study, using the technology of up-stream and down-stream anchor pier positioning and the system of information real-time monitoring ensures position and implantation. Meanwhile, control measure is used to prevent caisson sinking suddenly and extra-sinking in final stage. Erection accuracy of steel tower is very high, but adjusted segments are few. During the construction, the structure system changes frequently. To the feature, the method of whole process control based on geometric control is used in the project, which analyzed the error of manufacturing segment, linear of pre-assembled segment and erection, and accuracy management system is established uniformly. The final accuracy of erection is better than that designed. Many innovative technologies are obtained in this project, and the key technologies about construction of deep-water caisson, manufacturing and erection of steel tower are formed, which can be referred for other similar projects in the future.

[ **Key words** ] Taizhou Bridge; anchor pier positioning; real-time monitoring; control measure in final stage; whole process control; erection accuracy