

# 自锚式悬索桥施工监控研究

梁智焱<sup>1</sup>, 田瑞忠<sup>2</sup>, 陈士通<sup>3</sup>

(1. 同济大学桥梁工程系, 上海 200092; 2. 中铁十二局第三工程有限公司, 山西太原 030000;  
3. 石家庄铁道学院国防交通研究所, 河北石家庄 050043)

**摘 要:**基于桂林市丽泽桥——我国第一座自锚式柔性悬索钢桁梁桥, 讨论了此类桥型力学特性及施工监控技术, 为今后同类桥梁的施工建造提供有益的参考。

**关键词:**悬索桥; 自锚式; 钢桁梁; 施工监控; 桂林市

**中图分类号:**U448.25 **文献标识码:**A **文章编号:**1009-7716(2005)02-0084-04

## 1 工程概况

桂林市丽泽桥(见图 1)是我国第一座自锚式柔性悬索钢桁梁桥(2002 年 2 月正式通车运营), 也是桂林市两江四湖桥梁工程的重点工程之一, 位于丽泽路三多路交叉口至环卫处附近。丽泽桥为 25 m + 70 m + 25 m 三跨自锚式悬索钢桁梁桥, 桥面宽 25.5 m, 桥中心线为直线, 设计荷载为城市 B 级, 中跨悬索垂跨比为 1/5.49, 中跨结构高跨比为 1/40.7, 边跨结构高跨比为 1/14.53。其上部结构为自锚式悬索钢桁梁, 主缆采用 451 根 7 mm 镀锌高强钢丝, 吊杆为 61 根 7 mm 镀锌高强钢丝, 桥面为纵横向桁架梁, 桥面板为 200 mm 现浇钢筋混凝土板, 与纵横向桁架梁共同作用形成结合梁。纵横桁架梁之间在腹板处用高强螺栓连接, 纵横梁自身在上下翼缘处采用高强螺栓或焊缝连接。恒载由主缆和吊索承受, 通过吊索传至主缆, 活载主要由桁架结合梁承受。下部结构索塔为钢筋混凝土现浇塔身及横梁, 其基础为扩大基础和桩基两种。

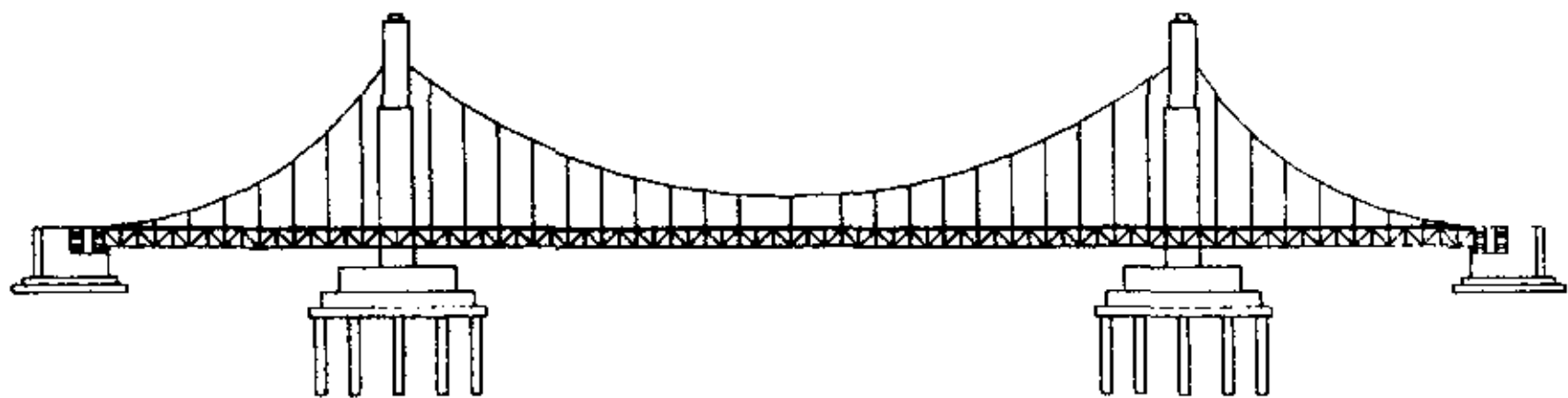


图 1 丽泽桥结构示意图

自锚式悬索桥有如下特点:

(1) 在外形结构上, 取消了其它悬索桥两端大体积锚碇混凝土, 节省了占地面积。

(2) 在受力结构上, 利用桥梁桥面系来平衡主缆的水平拉力, 悬索部分和钢桁梁自成体系形式, 上部

结构中的恒载和活载通过自锚体系传力至索塔, 再传至索塔基础, 最后传力至地基<sup>[1]</sup>。

(3) 在施工步骤上, 其它悬索桥先施工主缆, 然后再进行梁体的安装或浇筑, 而自锚式悬索桥由于主缆锚固在主梁两端, 故先进行钢桁梁的施工, 再安装主缆。

(4) 在施工监测监控上, 自锚式悬索桥要求精度较其它悬索桥高, 钢梁拼装、主缆安装调整、索夹和吊杆的安装调整、索塔的偏位变形等都应在监控之下, 使桥梁时刻处在良好的施工控制状态和操作状态。

总之, 自锚式悬索桥保留了传统悬索桥的外形, 桥梁造型美观, 在地基很差或锚碇修建困难的地区也可采用, 是城市中小跨径桥梁设计方案的理想选择<sup>[2]</sup>。

## 2 桥梁施工监控

桥梁施工监控是一个“施工—测量—计算分析—修正—预告”的循环过程, 即通过事先在塔、梁和拉索等主要部位埋设数种性能各异的传感器和相关的测试仪器获得大量的数据, 包括几何参量和力学参量; 并利用高效计算机程序, 对数据进行分析处理, 并确定一个阶段的施工参数。通过二者的有机结合, 调整控制桥梁的内力和线形, 实现桥跨结构的内力和线形同时达到设计预期值, 确保桥梁施工安全和正常运营, 并保证其具有优美的外观形状。

丽泽桥是一座形式独特的自锚式悬索桥, 主缆锚固在桥梁两端的锚碇横梁上, 加劲钢桁梁的两端也分别埋入两端的锚碇横梁中, 锚固梁通过板式橡胶支座支撑在桥台上, 主缆水平力与加劲梁水平力平衡, 如主缆张拉力过大则容易引起加劲钢桁梁内力超限, 造成加劲梁局部失稳, 甚至全桥垮塌; 主缆

收稿日期: 2004-04-19

作者简介: 梁智焱(1978-), 男, 山西汾阳人, 博士生, 研究方向为桥梁抗震技术。



鞍座偏心过大,造成主塔弯曲拉应力过大,形成施工过程的不安全。

监控计算采用的基本方法是倒拆法,即通过从成桥状态倒拆结构的过程进行结构分析来得到每一工况段结构的内力状态和位移状态。倒拆法在计算时由于设计时所采用的计算参数诸如材料弹性模量、构件的重量、混凝土的收缩徐变系数、施工中温度变化以及施工临时荷载条件等与实际工程中所表现出来的不完全一致,因此计算只能按假设的理想状态进行计算,然后:再根据施工过程中所监测到的实际结构参数对原假设计算施工控制的目标值进行必要的调整,以保证主体结构在施工过程中的安全并最终达到或接近设计成桥状态。

### 3 确定初始状态及建立模型

在施工过程中应根据实际情况对设计成桥状态重新进行优化计算,来确定最优的成桥状态,以此作为监控计算的初始状态。

根据其跨度  $L$ 、垂度  $f$ 、荷载  $\omega$  值,以主缆一端为坐标原点,平行桥跨纵轴方向为  $x$  轴,建立平面坐标系,利用抛物线方程,并依照设计部门确定的设计成桥线形来确定成桥状态:

$$y = x \tan \alpha - \omega x(L-x)/2H \quad (1)$$

式中:  $\alpha$ ——主缆两端点所连直线与  $x$  轴的夹角

$H$ ——主缆水平拉力,  $H = \omega L^2 / 8f$

施工控制参数包括:构件自重  $\omega$ 、施工荷载  $P$ 、结构温度  $\Delta t$  和施工周期  $T$ ;节段立模(或拼装)时的标高、索力值及张拉顺序和塔顶位移;节段施工完毕的标高、索力值及张拉顺序和塔顶偏位,中间调索时的标高、索力值及张拉顺序和塔顶偏位。计算假定是对全桥竖向恒载和温度变化采用平面有限元分析法,即建立平面杆系计算模型,主缆、吊索为索单位,其它为梁单位,主缆与吊索的抗弯刚度不计,进行非线性结构分析。

根据桥梁的几何参数、结构参数和初始状态建立监控计算有限元模型。计算采用全桥模型,输出的主缆内力为二根主缆之和。

## 4 施工监控的实施

自锚式悬索桥施工监控的主要内容有索塔偏位、梁体线形、索力测量、温度测试、应力测试等。

### 4.1 主塔塔偏测量

由于主塔在施工和成桥状态均通过吊杆和主缆承担相当部分的荷载,在不平衡荷载和大气温差及

照射下均会使主塔产生不同程度的变形,为了不影响索力调整,须掌握主塔在自然条件下的变化规律以及在索力影响下偏离位置的程度。

主塔塔偏测量主要采用测距法,使用全自动安平水准仪和全站仪等仪器设备,对顺桥向和横桥向两个方向变位值进行测量。测站点一般布置在桥梁轴线上适当位置,观测点的布置可随测试阶段作相应的适时调整,一般设置在塔桩侧壁或顶端部位。主塔塔偏测量可以提供塔柱在索力调整过程中塔柱的变位以及在日照下随温度变化发生纵横桥向偏移的曲线。

### 4.2 加劲钢桁梁线形测量

钢桁梁线形测量包括高程测量、位置测量和中线测量。

由于钢桁梁拼装时各构件拼装误差相当小,极易造成梁体产生倾斜、扭曲、偏离轴心位置,为保证梁预拱度符合设计要求,保证中跨跨中合拢,必须控制主梁中线测量和位置测量。位置测量和中线测量是将全站仪安置在桥梁轴线和主纵梁轴线上,以桥轴线上某一点为后视点,采用视准线法直接利用小钢尺测量每一片横梁的偏离值以及用小垂球测量钢桁梁的垂直度。高程测量采用水准测量法,测出每一片钢桁梁的安装的标高,与设计值比较并调整至误差范围内为止。

高程测量和中线测量的测点一般布置在钢桁梁桥轴线顶面上。位置测量观测点一般布置在主纵梁与横梁交叉点上,一片横梁布置两个点。位置测量、中线测量观测应与高程线形测量同步进行。

加劲钢桁梁线形测量可提供主梁的各施工阶段的高程实测值和中线实测值;提供主梁线形随温度变化的曲线,以随时掌握主梁温度变形的影响。

### 4.3 索力测量

拉索索力的准确与否直接关系到主梁线形、主缆线形,乃至施工安全。因此,在施工中必须确保索力测试结果正确可靠。

索力测量主要是提供各测试阶段的索力值以及关键索力随温度变化的曲线。然后根据上部结构施工工况对吊索在不同工况下的索力进行调整。索力测量一般采用随着在拉索下的高灵敏度传感器拾取拉索在环境振动激励下的振动信号,经过滤波、放大和频谱分析,根据频谱图来确定拉索的自振频率,然后根据自振频率与索力的关系确定索力。考虑到拉索弯曲刚度的影响,应进行测量前的标定工作,并在测量中加以修正。索力换算不仅要符合基频,并且



要用前 3~4 阶频率作验证。

#### 4.4 温度测试

温度的影响总体上可分为两种,一是昼夜温差,二是季节温差。前者是指太阳每日的起落对桥梁各部位的日照变化对钢桁梁结构产生伸缩变形影响,后者则是由于长期的昼夜变化,使钢桁梁结构产生基本均匀的伸长、缩短等。温度变化,特别是日照温差的变化,对于自锚式悬索钢桁梁桥结构内力和变形影响是复杂的。在施工阶段,日照温差对主梁挠度和塔柱水平位移的影响尤为显著。温度测量可以提供索、塔、梁各测度断面温度短期变化曲线和季节性温差曲线。

为了便于施工测试资料的分析,应测量出具有代表性的某一天或几天 24 h 内结构温度变化情况。结合塔柱偏移和主梁线形测量结果,总结出结构日照温差变形规律和季节性的温差变形规律。温度测量元件一般选用性能优良的热敏电阻。将热敏电阻埋入索塔,用数字式万用表进行测量,根据电阻与温度的标定曲线,由测定的电阻值推算温度值。

塔柱的温度测试断面一般与应力测量断面相同,以资对应,也便于计算分析。索温测量是采用一段同实索等粗的长约 1.5 m 的试验索(包括主缆和吊索)1~2 根,在其中心和内部以及外表均对称布置,吊挂于施工现场实索部位,以承受同样的大气环境条件,并在其表面布设测点,测得表面温差,对照试验短索的测量结果,确定实索的内外温差。

#### 4.5 应力测试

应力监控测量主要是监测各施工状态下监测截面的应力值,塔柱监测截面的应力值以及成桥状态下各监测截面的恒载应力值,它能够更准确地了解塔柱控制截面的应力状况,并对施工过程中各工况施工荷载变化情况进行判断,确保结构施工安全。

施工应力测试是一项长期的现场观测。在钢梁的安装应力测试中采用手持应变计测量,可以满足施工监控的要求。

施工应力测试截面根据施工计算的控制截面确定,原则上采用以下几个方面:上部结构安装调整过程中的最大正、负弯矩截面,成桥状态的最大正负弯矩截面,主塔及其横梁的应力控制截面以及设计院从设计角度考虑的其它控制截面。由于施工应力测试成本相当高,为了既能满足施工监控的要求,又不至于投入多余的财力,梁体应力监控断面可选择 4~6 个,主塔应力测试截面可选择 1~4 个。在钢桁梁结构中选择控制部位和控制杆件、连接部位等适

宜手持式应变计的测点,读取初始读数和钢构件温度及环境温度,结合温度补偿测点数值,以便正式测量时参照修正。

### 5 施工监控的特殊措施

桂林市丽泽桥在主缆架设和吊索张拉过程中,监控实施主要存在以下几个问题,由于采取了相应的措施,得到了较好的解决<sup>[3]</sup>。

(1)由于主缆是利用斜拉索的制造工艺制造的成品索,其刚度较大,生产和运输过程中主缆有弯曲和扭曲现象,使主缆安装完成后空缆线形极不理想(实测值计算值相差 30 cm),为吊索的定位带来较大困难;随后通过非线性数值计算,采用无应力长度控制吊索位置,实践证明,经过吊索的初张拉和脱架后的第一次和第二次张拉,主缆的线形越来越接近计算值,脱架后第二次张拉完成后线形计算值和实测值只差 6 mm,随着吊索张拉力和荷载的增大,主缆线形越来越接近计算值,主缆线形得到控制,因此空缆坐标和主缆长度采用数值解法求解是能满足施工监控要求的。

(2)由于初始状态主缆线形较差,吊索安装完成后部分吊索锚端螺母无法安装,以致于无法张拉,根据计算,张拉 L/4 跨处 A6 吊索和 A5 吊索时对主缆的线形和其他吊索的内力影响最小,因此初张拉的方案决定先张拉 1/4 跨处的 A5 吊索,然后以 1/4 跨处为对称点,分别张拉 1/8 和 3/8 处的吊索;边跨以 B4 为对称点向两侧张拉,此方案效果较好。塔偏适时监控,均控制在 5 mm 以内。

(3)塔偏的控制,丽泽桥塔顶初期最大允许偏移量为 11 mm,在吊索张拉过程中,考虑到诸多因素的影响,塔偏最大偏移量需控制在 6 mm 以内,此时控制截面应力为 1.8 MPa,为了达到这一目标,除每一工况通过计算严格控制对称张拉力和塔偏实时监控外(监控包括塔偏和截面应力),在 A5 和 B4 吊索处也安装千斤顶作补充使用,另外在脱架前最后一次调索施工中,主塔鞍座限位装置放开±2 cm,以保证主塔的安全(实际施工中,鞍座最大滑移 7 mm),这一方案不仅能保证安全,同时也缩短了工期。

通过非线性有限元分析计算,采用倒拆正装法,确定主缆初始状态,并计算主缆无应力索长,结合施工步骤,计算各施工阶段的内力和线形,对主塔温度、主缆及吊索温度进行了测试,同时测试了主塔和主梁应力。在二期恒载完成以后,主塔全截面处于受压状态,主梁应力亦满足设计要求。



# 苏州河水闸边墩沉井沉放影响分析与对策

季永兴<sup>1</sup>, 卢永金<sup>1</sup>, 张永宝<sup>2</sup>, 张志玉<sup>2</sup>

(1. 上海市水务工程设计研究院, 上海 200063; 2. 中港三航局上海分公司, 上海 200122)

**摘 要:**在简要介绍苏州河水闸边墩沉井结构和施工方案基础上, 从工程施工条件、地质条件、工程结构和功能要求等方面分析影响沉井沉放控制的因素, 并论证沉井沉放适宜的质量控制允许偏差, 建议不同方向采用不同的控制标准。从下沉速度控制、高差控制、水平位移控制、倾斜控制和水平扭转控制等多方面提出沉井下沉沉放达标控制的合理措施, 并评价沉放控制标准与措施效果。

**关键词:**沉井施工; 控制措施; 苏州河水闸

**中图分类号:**U455.557 **文献标识码:**A **文章编号:**1009-7716(2005)02-0087-04

## 0 前言

沉井结构具有刚性好、施工简便等特点, 在建筑、水利、水运、交通、市政、港口等行业的基础工程中得到广泛的应用。尤其是为了满足结构物的要求, 适应地基的特点, 在土木工程结构的实践中沉井基础是较好类型的深基础, 如重型沉井、深水浮运钢筋混凝土沉井和钢沉井, 在国内外已有广泛的应用和发展。各类沉井在沉放过程中均会发生或多或少的偏位, 研究沉井纠偏技术的专家学者已经在这方面做出了努力, 取得了少成果<sup>[1,2,3,4]</sup>。沉井沉放施工质量控制虽然在许多规范内有说明, 但建筑、水利、市政、港口等不同专业对允许偏差有不同的要求。

苏州河河口水闸是上海市的重大工程, 也是上海市防汛的重要节点, 涉及上海市的安全, 工程又位于上海市的焦点位置, 其政治、社会地位非常重要。工程采用单跨结构, 沉井沉放的偏差对闸底板的浮运沉放、闸门驱动底轴的长度、闸门门叶的宽度、闸

墩启闭机房的位置影响非常巨大。同时, 沉井沉放受不断水、不断航施工条件、工程结构和功能要求等多种因素影响, 沉井沉放控制要求比较高。因此, 需要对沉井沉放的施工质量验收标准和达标措施进行专题论证和研究, 以保证工程施工质量, 顺利实施苏州河水闸, 确保水闸安全运行。同时, 通过研究, 可以积累经验, 为国内外建设此类工程提供参考。

## 1 沉井结构与施工概述

苏州河河口水闸闸墩基础结构采用钢壳沉井式承台, 下设桩基础。沉井式承台为预制中空钢壳沉箱, 浮运至现场后充填混凝土。边墩沉井尺寸为 30 m×16 m×7 m(长×宽×高), 受力井高 7.0 m, 钢围堰高 10.0 m。边墩沉井由隔墙分隔成八仓, 边壁厚 2.0 m, 垂直水流向隔墙壁厚 1.0 m, 顺水流向中隔墙壁厚 3.0 m。中墩沉井 18 m×13 m×4 m(长×宽×高), 受力井高 4.0 m, 钢围堰高 13.0 m。中墩沉井由隔墙分隔成四仓, 边墙壁厚 1.0 m, 隔墙壁厚 1.0 m。沉井到位后, 刃脚标高为 -12.25 m, 砂岛平均标高 -1.5 m。边墩沉井结构具体见图 1。

钢壳沉井在船坞制造完毕后, 由黄浦江浮运至闸址现场, 由临时施打的施工定位钢管桩将沉井正确定位, 并向钢壳沉井空腔内灌水, 低潮位时, 沉井

收稿日期: 2004-11-04

作者简介: 季永兴(1970—), 男, 人, 工程师, 华东理工大学在读 MBA, 主要从事水利工程设计与研究。

## 6 结论

随着城市经济的发展, 自锚式悬索桥必将在城市和旅游区的桥梁建设中大放异彩。由于丽泽桥是我国第一座自锚式柔性悬索钢桁梁桥, 在桥梁施工中尚属新型结构, 无经验可循, 其施工监控为该桥顺利通车提供了坚实的保障, 也为今后同类桥梁的建造施工积累了宝贵的经验。

## 参考文献

- [1] 张元凯, 肖汝诚, 金成棣. 自锚式悬索桥的设计[J]. 桥梁建设, 2002(5).
- [2] 张哲, 窦鹏等. 自锚式悬索桥的发展综述[J]. 世界桥梁, 2003(1).
- [3] 中铁十二局集团第三工程公司工程技术部. 自锚式柔性悬索钢桁梁桥施工技术研究报告[R]. 太原: 中铁十二局集团有限公司, 2003.