

# Suspension Bridge Construction Monitoring Technology

Zilu Shao<sup>1\*</sup>, Fengdong Diao<sup>2</sup>, Zijian Ma<sup>3</sup>, Yang Shi<sup>1</sup>

<sup>1</sup>No.4 Branch Company of China Petroleum Pipeline Engineering Co., Ltd., Langfang Hebei

<sup>2</sup>China Petroleum Pipeline Engineering Co., Ltd. International, Langfang Hebei

<sup>3</sup>No.1 Branch Company of China Petroleum Pipeline Engineering Co., Ltd., Langfang Hebei

Email: \*cyszl@cnpc.com.cn

Received: Oct. 19<sup>th</sup>, 2020; accepted: Nov. 30<sup>th</sup>, 2020; published: Dec. 15<sup>th</sup>, 2020

---

## Abstract

Suspension bridge can make full use of the strength of materials, and has the characteristics of material saving, light weight, often used in large span. In order to avoid the accumulation of errors in the construction process which will seriously affect the reliability and safety of suspension bridge structure, it is necessary to monitor the construction process.

## Keywords

Suspension Bridge, Construction Monitoring, Monitoring Calculation

---

---

\*通信作者。

# 悬索桥施工监控技术

邵子璐<sup>1\*</sup>, 刁凤东<sup>2</sup>, 马子健<sup>3</sup>, 史 洋<sup>1</sup>

<sup>1</sup>中国石油管道工程有限公司第四分公司, 河北 廊坊

<sup>2</sup>中国石油管道局工程有限公司国际事业部, 河北 廊坊

<sup>3</sup>中国石油管道工程有限公司第一分公司, 河北 廊坊

Email: \*cyszl@cnpc.com.cn

收稿日期: 2020年10月19日; 录用日期: 2020年11月30日; 发布日期: 2020年12月15日

## 摘 要

悬索桥能充分利用材料的强度, 具有节省材料、重量轻的特点, 经常被用于大型跨越中。为避免施工过程中各种误差的积累对悬索桥结构的可靠性及安全性带来严重影响, 必须进行施工过程的监控。

## 关键词

悬索桥, 施工监控, 监控计算

Copyright © 2020 by author(s), Yangtze University and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

近年来, 对于能源安全的保护, 国家全面加快石油和天然气管网建设, 管道建设进入了一个大发展的时期。为应对我国山区沟壑、峡谷等复杂地形, 常采用跨越的方式进行管线敷设[1]。悬索桥是作为一种以缆索为主要承重构件的柔性桥梁, 主要用于大型跨越中。

但对于大跨度的桥梁来说, 桥梁最终产品结构的形成要经历一个漫长而复杂的过程, 而且在施工期间桥梁结构分析体系也将随着建筑施工管理阶段的不同而不断发生变化[2]。在施工过程中, 为及时避免各种误差的积累对悬索桥结构的可靠性及安全性带来严重影响, 需要在整个施工过程中严格控制。施工质量控制可以通过进行施工现场的结构状态测试, 同步结构计算能力分析以及社会结构状态预测给出合理的反馈控制措施, 为施工过程研究提供决策性技术依据, 为结构行为控制提供相关理论基础数据, 确保工程施工后成桥线形与受力状态符合设计要求[3]。可以说, 建设有效控制是跨径悬索桥施工成功的关键。

## 2. 悬索桥施工监控的主要内容

悬索桥施工控制的内容是校核主要的设计计算参数, 根据实测材料参数调整合理成桥状态, 提供施工管理阶段各理想状态线形及内力数据, 对施工各状态控制系统数据实测值与理论值进行研究比较结果分析, 进行经济结构优化设计技术参数识别与调整, 对施工各阶段和成桥状态进行有效预测与反馈控制

能力分析,对结构线形及内力(应力)进行环境监测,防止施工中出现过大位移和应力,确保工程施工工作顺利发展进行[4]。

悬索桥施工监测,监测内容如下:

#### 1) 主缆

主缆为主要承重结构,主缆架设状态直接影响全桥内力和变形。监控内容包括:

- ① 计算主缆索股无应力索长。
- ② 基准索股控制点的计算和标记。
- ③ 监测主缆温度。
- ④ 计算、监测基准索股线形、索力。
- ⑤ 计算、监测一般索股空缆线形、索力。
- ⑥ 计算、监测各施工阶段主缆索力、线形。

#### 2) 主索鞍和散索套

监控内容:

- ① 计算、监测空缆时散索套位置。
- ② 计算、监测空缆时主索鞍位置(偏位)。
- ③ 计算、监测在施工过程中的位置(偏位)。
- ④ 计算主缆鞍顶的顶推量和顶推时间。

#### 3) 索塔

- ① 裸塔状态塔顶高程及温度影响位置监测
- ② 计算监控空缆状态塔顶鞍座位置。
- ③ 计算和监控加劲梁架设过程中的塔顶鞍座位置。
- ④ 计算并监测桥塔控制截面应力。

#### 4) 索夹

- ① 索夹定位和监测。
- ② 索夹紧固力的监测及调整。

#### 5) 吊索

吊索长度直接影响桥面标高、受力均匀程度及其寿命。

- ① 计算吊索无应力长度。
- ② 计算、监测安装时吊索索力,监测吊索温度。

### 3. 施工监控计算

#### 3.1. 分析计算软件

采用 ANSYS 有限元软件和 MIDAS Civil 土木专用程序对计算结果进行了对比分析,保证结构分析计算的准确性。ANSYS 软件具有良好的非线性分析能力,非常适合于计算悬索桥大变位结构的几何非线性,计算精度高。MIDAS Civil 软件能进行悬索桥空间非线性施工架设过程仿真分析,能充分发展考虑主塔砼收缩、徐变的影响,能考虑结构体系温差和环境整体温度影响。

#### 3.2. 分析方法

悬索桥由于其主要承重结构主缆为柔性结构,在弹性范围内工作,其线形对外力、温度、塔偏等多种因素影响变化非常明显,为了能够准确反映主缆特定条件下的状态,悬索施工控制分析计算需针对对

空缆及成桥两种状态。

悬索桥施工监控中关于结构的计算一般可分为正装分析法、倒拆分析法、无应力状态分析法。依据实际施工的需要,本文侧重于倒拆分析法的介绍。倒拆法按照桥梁结构实际施工加载顺序的逆过程来进行结构行为分析。其基本思想是:首先以设计的成桥状态时为初始数据计算工作状态,施工开展后根据实际材料参数(包括主缆和桥面桁架容重、弹性模量,主缆和桥面附属结构重量等)调整计算合理成桥状态。在成桥模型基础上拆除主缆索股以外的所有结构构件计算得到空缆状态。然后按照施工过程中的计算得出,直至成桥。

### 3.3. 监控计算内容

监控计算内容包括确定设计参数,各施工阶段的缆索及吊索索力,主塔、主缆线形和鞍座偏移量,主塔应力等,后续施工的控制预报。

#### 3.3.1. 设计参数的确定和调整

设计参数与实际参数具有一定差别,如主缆和吊索弹性模量、构件自重、施工荷载、施工周期、主缆线形、索力值(主缆及吊索)、塔顶偏位等等,针对设计参数与实际参数两者的偏差,是通过测量材料的实际参数和施工过程中实际结构的行为,分析结构的实际状态与理想状态的偏差,从而修正设计参数来控制桥梁结构的实际状态与理想状态的偏差,使成桥在施工过程中达到一个理想的状态。

首先,确定由所述桥的偏差的结构的主要设计参数,对于企业采用的施工质量控制参数主要包括:主缆和吊索弹性模量  $E$ 、构件具有自重  $\omega$ 、施工设计荷载  $P$ 、结构进行温度  $\Delta t$  和施工管理周期  $T$ 、主缆线形、索力值(主缆及吊索)、塔顶偏位等参数;其次,采用最小二乘法或卡尔曼滤波来识别这些设计参数的误差,并得到这些参数的正确估计。通过修改设计参数,使桥梁结构的实际状态与理论状态相一致。

#### 3.3.2. 各施工阶段实测索力、应力、线形分析

施工过程中不可能通过监测得到全桥各断面的应力,只能测量到某些控制断面的数据。偏差的比较,从而需要缆力,应力,线性测量和计算值,目标是监测结果与分析计算研究结果一致[5]。否则,应进行分析与判断,确定相差的原因。因此,通过监控计算可对结构整体的索力、应力水平和主缆线形进行监控。

#### 3.3.3. 后续施工的控制

通过桥梁施工正装过程分析,可以得到各施工阶段的主缆线形、主塔鞍座偏移量等控制参数。

然而,实际施工情况与设计别在差异,已施工的阶段可能会与所要求的状态有一定差别[6]。这时,需要通过建立一个具有反馈控制的实时跟踪分析管理系统,即使误差不致于积累,还可使成桥状态与设计状态差别缩小,也需要我们采用最优控制管理理论对后续的施工发展阶段的偏差量作出调整。

## 4. 施工监控实施及关键问题分析

### 4.1. 散索索力测试

散索力是内力的重要指标,同时,散索索力容易出现不均匀的情况,因此,应对散索索力进行测量和调整。通过散索索力测量、调整使散索索力误差在允许范围内。散索索力用频谱法测量,采用附着在索上的高灵敏传感器拾取索在环境震动激励下的振动信号,经过滤波、放大和频谱分析,根据频谱图来确定索的自振频率,然后根据自振频率与索力的关系确定索力(见图1)。

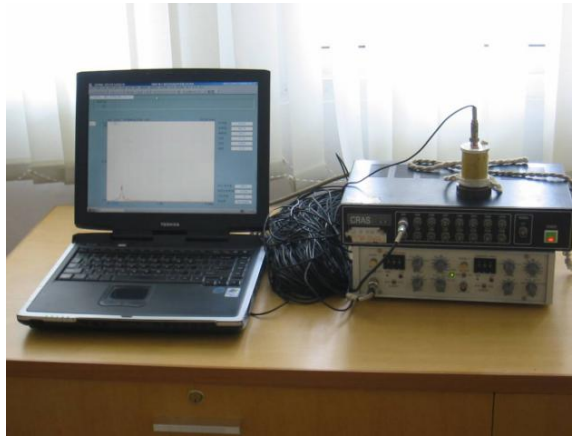


Figure 1. Spectrum test system  
图 1. 频谱法测试系统

#### 4.2. 主缆线形、鞍座位置测量

主缆线形和鞍座位置用全站仪进行测量。主缆在施工管理过程中进行变形影响较大，为了使棱镜始终与观测点保持高度一致，要使用索箍对棱镜在主缆跨中等特征点固定。测量时，先用全站仪后视岸上基准点，通过岸上基准点引测主缆线形[7]。主缆线形测点布置 8 个，分别在边跨跨中、主跨 L/4、L/2、3L/4 的位置。桥梁架设过程中鞍座位置影响主缆线形和主塔内力，在施工管理过程中应对鞍座位置信息进行有效监测，其位置采用全站仪进行测量。

#### 4.3. 主塔应力测试

##### 1) 应力测试方法

应力测试和施工同时进行，存较长的时间跨度和现场维护条件不足。因此，要求试验元件具有长期稳定性好、抗损性能好、埋设位置准确、施工方便、对结构干扰小等特点。

主塔为钢筋混凝土结构，全面的分析，并根据以往的经验，国内元器件和测试设备进行比较，决定对主塔的应力进行测试可以选用钢弦式应变计，将其直接埋入测试以及断面的混凝土内，配合我们使用无应力计。仪器的钢字符串匹配频率检测装置。通过应变—频率标定曲线，然后再通过根据不同混凝土结构弹性模量推算混凝土应力。

由于测试混凝土因素的内部应力是复杂的，除了所造成的应力负荷的弹性应变，而且还与温度，收缩等相关联。目前国内外混凝土企业内部控制应力测试方法一般可以通过应变测量换算应力值[8]，即：

$$\sigma_{\text{弹}} = E \cdot \varepsilon_{\text{弹}} \quad (1)$$

式中： $\sigma_{\text{弹}}$ 是负载下混凝土的弹性应力；

$E$ 为混凝土弹性模量；

$\varepsilon_{\text{弹}}$ 为荷载影响作用下混凝土的弹性以及应变。

实际测得的混凝土应变  $\varepsilon$  是包括其它变化的影响的总应变。这就是：

$$\varepsilon = \varepsilon_{\text{弹}} + \varepsilon_{\text{无应力}} \quad (2)$$

式中： $\varepsilon_{\text{弹}}$ 为弹性以及应变； $\varepsilon_{\text{无应力}}$ 为无应力进行应变。

为了补偿混凝土中无应力应变，在布置应力测点时，同时埋设工作应变计和无应力计。得出混凝土总应变  $\varepsilon$  和无应力应变  $\varepsilon_{\text{无应力}}$ ，并通过压实公式(2)便可得出应力应变  $\varepsilon_{\text{弹}}$ 。

#### 4.4. 塔顶偏位测试

使用坐标法用全站仪对塔顶偏位进行测试。在岸上设置基准点进行测试,在桥塔的上、下游塔顶可以布置一个棱镜,将全站仪架设在岸上某一基准点,后视岸上基准风险控制点,再瞄准学生布置在桥塔上的棱镜,即可完成测试塔顶的三维空间坐标[9]。在塔帽至恒定温度后,在自由状态下的测定值作为初始值没有阳光的影响,所测量的值和结构的初始状态之间的差的开销偏差值。

#### 4.5. 温度场测试

由于温度的影响可分为以下两种,一是昼夜温差,二是季节气候温差[10]。温度变化,吊桥对内部受力和变形是复杂的。温度场测试需包括主缆和吊索等等。

##### 1) 主缆和吊索温度场测试

依据桥梁所在地区的气候与天气条件,桥梁架设过程中通过主缆断面温度索和主缆表面温度测试相结合,准确掌握主缆温度场。测温索应使用 2 米的主缆节段,共设 2 个测试断面。桥梁施工时,将测温索段放置在桥上,使测温索与实桥主缆处于同一个工作温度控制环境中。通过主缆温度索和表面温度测试能准确把握主缆温度,提高主缆线形测试精度[11]。吊索可通过表面测点进行测量。

##### 2) 温度测试工况及时间

① 主电缆安装阶段,吊索安装阶段,主塔应该测量和主电缆吊索的温度条件。测试工作时间为晚 22:00~凌晨 6:00。

② 选择适于施工的天气进行温差日 24 小时主缆温度、塔温度变化情况。

③ 成桥后选择较好天气进行 24 小时主缆、吊索、塔连续监测,同时进行主缆、吊索、主塔线形观测。

### 5. 结语

在施工过程中,结构随施工阶段的变化而变化,结构的实际参数与设计值有一定的差异,加上现场施工荷载及环境变化的不确定性将会使结构的应力状态和线形偏离设计值,这种偏离不仅影响桥梁的合龙,还会危及施工过程中结构的安全。因此,施工监控系统在施工中加强管理,才能有效地控制施工中的偏差。可以说,施工监控既是悬索桥施工发展过程中进行结构信息安全的保证措施,又是施工企业质量的保证措施。

### 参考文献

- [1] 唐有为,毛超军,刘喜梅. 白马长江大桥悬索桥施工监控关键技术[J]. 施工技术, 2017(32): 810-813.
- [2] 袁萍,马飒. 加强悬索桥的施工监控[J]. 工程管理, 2015, 10(29): 315.
- [3] 杨志斌. 自锚式悬索桥施工监控理论[J]. 建筑工程技术与设计, 2018(12): 2031.
- [4] 黄祖华. 某地锚式悬索桥施工监控研究[J]. 水利与建筑工程学报, 2016, 14(5): 193-197.
- [5] 龚辉朋. 单塔单跨悬索桥施工监控研究[J]. 城市建设理论研究: 电子版, 2015, 5(12): 6265-6266.
- [6] 董学文. 悬索桥的施工监控技术与关键问题[J]. 城市建设理论研究: 电子版, 2015(6): 213-216.
- [7] 张亮. 悬索桥钢箱梁吊装施工监控研究[J]. 名城绘, 2018(12): 1.
- [8] 杨雨豪. 自锚式悬索桥施工监控计算分析[J]. 城市建设理论研究: 电子版, 2015(9): 3840-3841.
- [9] 孙艳丽. 悬索桥施工监控过程中的几个问题探讨[J]. 山西交通科技, 2013(5): 59-61.
- [10] 王卫杰. 自锚式悬索桥施工监控技术研究[J]. 建筑与工程, 2005(1): 11-15.
- [11] 黄晔. 悬索桥的施工监控技术与关键问题[J]. 城市建设理论研究, 2014(11): 1-7.