

# 某地锚式悬索桥基准索股架设监测与控制

焦明东<sup>1</sup>, 陈厚淞<sup>2</sup>

(1.上海同济检测技术有限公司, 上海 200092; 2.中国水利水电第八工程局有限公司, 湖南 长沙 410004)

**摘要:** 地锚式悬索桥主缆基准索股绝对垂度的精确测量和控制对于悬索桥的合理成桥状态起着较重要的作用。文中依托某地锚式悬索桥基准索股的绝对垂度监测与控制, 分析悬索桥基准索股架设过程监测、控制过程和关键控制指标, 并从测量精度和索股稳定性方面分析基准索股绝对垂度测量与控制方法的有效性。

**关键词:** 桥梁; 地锚式悬索桥; 基准索股; 绝对垂度; 监测与控制

**中图分类号:** U446.2

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1671-2668(2022)06-0132-05

悬索桥尤其是地锚式悬索桥是目前特大跨径桥梁选型中的首选。悬索桥的主梁线形主要由空缆线形、吊索长度及主梁上恒载决定, 一旦索股架设完成空缆线形就已确定, 吊索架设完成则主梁线形已确定。作为悬索桥的主要承重结构, 主缆架设是整个桥梁建设中非常重要的环节, 架设精度决定桥梁线形和合理成桥状态。主缆的线形控制包括基准索股线形控制和一般索股线形控制。索股线形控制主要通过索股垂度测量和分析进行, 主要包括基准索股的绝对垂度测量和一般索股的相对垂度测量, 其中一般索股以基准索股为基准进行控制, 因而基准索

股的绝对垂度测量和控制是主缆架设的重要环节。本文在分析基准索股测量内容及绝对垂度测量方法的基础上, 对基准索股垂度测量精度、基准索股稳定性进行分析。

## 1 工程概况

某地锚式悬索桥跨越区域性河流, 是某高速公路的控制性工程。桥梁全长 1 366 m, 跨径布置为  $(3 \times 40 + 4 \times 40 + 3 \times 50)$  m T 梁 +  $(3 \times 50 + 3 \times 50)$  m 钢板组合梁 + 700 m 悬索桥 +  $2 \times 40$  m T 梁, 主桥为单跨 700 m 简支钢箱梁悬索桥, 其总体布置见图 1。

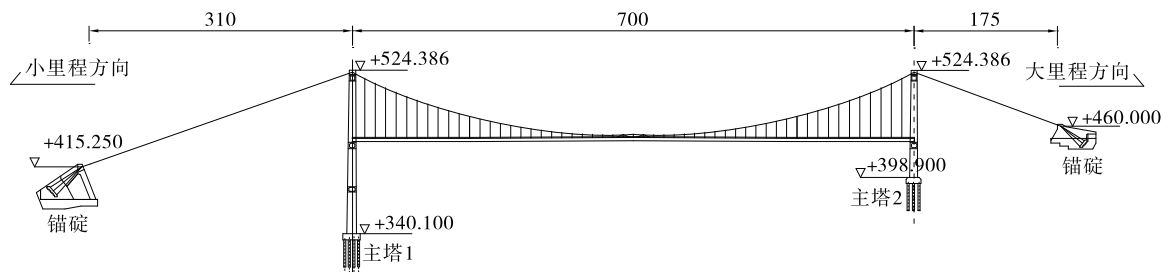


图 1 某地锚式悬索桥的整体布置(单位:m)

主桥为双塔三跨双索面悬索桥, 跨径 700 m, 主缆跨径布置为  $(310 + 700 + 175)$  m = 1 185 m。主缆设上下游 2 根, 采用预制平行钢丝索股, 通过 PPWS 法编织而成。每根主缆由 85 根索股组成, 每根索股由 127 根  $\phi 5.0$  mm 预制平行钢丝组成。

为使主缆架设线形与设计线形无限接近, 对施工过程中主缆线形进行精确测量和控制。鉴于基准索股是一般索股架设中调整的基准, 对架设过程中基准索股的绝对垂度进行精密测量和控制, 保证基准索股

的线形符合设计要求, 为主缆架设精度打下基础。

## 2 基准索股绝对垂度测量内容分析

基准索股绝对垂度测量中, 首先要确定基准索股, 然后进行绝对垂度测量。垂度测量主要包括基准索股的绝对垂度测量、上下游基准索股相对垂度测量和基准索股稳定性观测。

### 2.1 基准索股的选择

主缆由基准索股和一般索股组成, 线形控制包

括基准索股的绝对垂度控制、一般索股的相对垂度控制。鉴于基准索股线形是一般索股线形调整的基准,选择基准索股应充分考虑设计、施工等因素。具体如下:1) 索股处于相对自由状态,受其他索股影响较小;2) 先行架设,便于作为基准控制其他索股的相对垂度;3) 每根基准索股校核一定数量的一般索股;4) 如果一根基准索股受影响,则根据其他基准索股对全部索股进行分组控制。考虑上述因素,选择该桥 1<sup>#</sup> 索股作为基准索股。

## 2.2 基准索股的绝对垂度测量

基准索股牵引到位后,对准基准索股标志点、主索鞍中心标志点和散索鞍中心标志点,在温度相对稳定的时刻进行索股绝对垂度测量,并根据基准温度对索股线形进行修正。测量过程如下:

(1) 选择温度相对稳定的时刻进行测量,要求索股长度方向温差  $\Delta T \leq 2^{\circ}\text{C}$ ,横截面索股温差  $\Delta T \leq 1^{\circ}\text{C}$ 。

(2) 测量基准索股跨中标志点、主边跨散索鞍中心标志点、主索鞍中心标志点的里程和标高。

(3) 将绝对垂度实测值与当前状态下基准索股绝对垂度理论计算值相比得到差值,计算得到主索鞍处索股需调整的索长,反复调整直至中跨垂度满足限差要求。

(4) 中跨绝对垂度调整完成后,及时调整边跨绝对垂度,调整程序和控制要求与中跨相同。

(5) 中跨和边跨绝对垂度调整完成后,及时调整和控制锚跨张拉力。通过压力传感器测试锚跨索股张拉力,并与千斤顶油压表读数相互校核。

## 2.3 上下游基准索股相对垂度测量

作为悬索桥的主要承重结构,上下游主缆线形的对称程度对主梁结构的合理成桥状态和承载能力有较大影响,有必要对上下游主缆基准索股的相对垂度进行测量和调整。方法如下:

(1) 在边跨跨中和中跨跨中各搭设一条软管连接上下游基准索股,保持两端液面在索股同一位置。

(2) 利用钢板尺测量液面距索股跨中点高度,计算上下游基准索股的相对高差。

(3) 反复调整,直至高差满足规范和工程要求。

## 2.4 基准索股稳定性观测

鉴于基准索股受温度、风力等环境影响较大,对不同时刻基准索股绝对垂度进行测量并进行稳定性对比分析。

(1) 基准索股调整完成后,观察基准索股各控制点高程,如误差在允许范围内,则调整结束。

(2) 基准索股调整结束后,连续观察 3 d,每天至少测量 4 组索股的垂度有效数据。

(3) 若控制点高程与目标高程之间误差不大或误差可接受,则认为基准索股架设完成,取多次测量结果的算术平均值作为基准索股的最终线形。

## 3 基准索股绝对垂度测量方法

鉴于该地锚式悬索桥的地形条件复杂、施工设施上不易架设水准仪,选择全站仪三角高程法测量基准索股的绝对垂度。

### 3.1 测站设置

基准索股的绝对垂度测量分为 3 个部分,分别为边跨 1、中跨、边跨 2,合计 2 个测站,站点布置见图 2。

(1) 边跨 1 的测站为位于小里程侧的 JM01(测站 1),为首级控制网点,设计为强制归心观测墩。该测站用于测量边跨 1 索股的垂度及小里程侧主塔塔偏和塔顶标高,用来进行索股垂度修正。

(2) 由于中跨跨径较长,且地锚式悬索桥对中跨主缆线形的要求较高,选择大里程侧测站 JM04(测站 2)进行中跨主缆线形测量,设计为大里程侧混凝土强制归心观测墩。该测站主要用于测量中跨索股垂度。

(3) 边跨 2 的测站为位于大里程侧的 JM04,与中跨主缆垂度测站一致,用于测量塔偏和塔顶标高及边跨 2 的索股垂度。

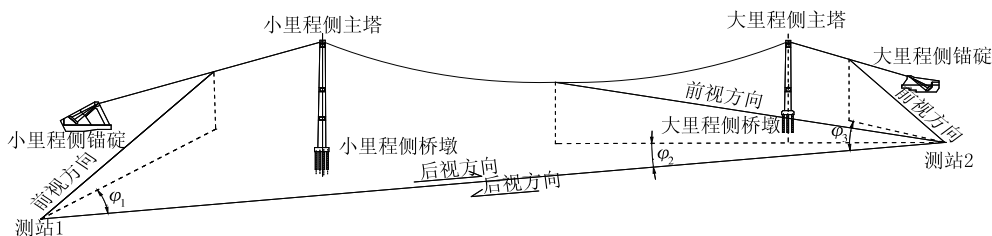


图2 基准索股测量测站点布置

### 3.2 跨中控制点的确定

悬索桥主缆基准索股测点位于跨中,如果索股线形发生变化,则跨中测点的高程和里程会发生变化。选择索股监测点的方法有2种,对应不同的计算方法和调整方法。第1种方法是固定跨中里程位置,仅测量该里程处索股标高,根据解析结果调整索股,直至该里程处索股标高与目标控制值的偏差满足规范和工程要求。第2种方法是标记跨中索股主跨中点,将棱镜放置在索股上固定位置,同时测量里程和高程,并根据计算结果调整索股里程和高程,直至标志点里程和高程均达到目标控制值。2种方法的控制点见图2,棱镜固定见图3。

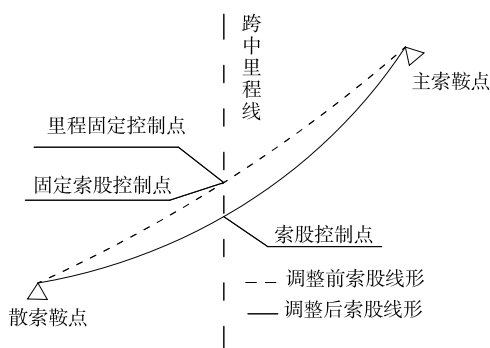


图3 索股监测点选择中控制点示意图

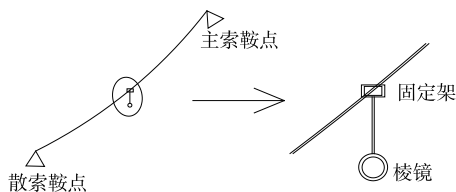


图4 棱镜固定示意图

2种方法均能实现高精度的施工控制,其优缺点:1)第1种方法仅控制索股在固定里程处的标高,施工操作简单;缺点是仅测试高程数据,无法为后期箱梁架设提供有效的测量基准点。2)第二种方法索股标记点位置确定,且该点的里程和高程可根据温度和塔偏情况进行修正,其首要任务是对该点进行精确放样。索股线形调整过程中,先计算里程和高程变化量,然后结合2组测量数据对索股偏

差进行计算和分析。该方法的缺点是每次索股调整后需进行标记点重新放样。该桥基准索股监测和控制中采用第2种方法测量基准索股的里程与标高。

## 4 基准索股垂度测量结果分析

为评价主缆基准索股测量与控制精度,为主缆线形控制打下基础,对基准索股绝对垂度测量精度和现场稳定性进行分析。

### 4.1 测量精度分析

单向三角高程测量时,计算测站1与测站2高差 $h_{ab}$ 的公式如下:

$$h_{ab} = S_{ab} \times \tan \alpha + i_a - v_b + f \quad (1)$$

式中: $S_{ab}$ 为左岸测站距索股跨中的最近距离, $S_{ab} = 600 \text{ m}$ ;  $\alpha$ 为竖直角,约为 $2.3^\circ$ ;  $i_a$ 为测站1的仪器高;  $v_b$ 为测站2的觇标高。

将式(1)全微分并转化为中误差关系式:

$$m_h = \pm \sqrt{\tan^2 \alpha \times m_s^2 + \frac{S_{ab}^2 \times m_a^2}{\cos^4 \alpha \times \rho^2} + m_{ia}^2 + m_{vb}^2 + m_f^2} \quad (2)$$

式中: $m_s$ 为测距精度; $m_a$ 为测角精度; $m_{ia}$ 为仪器高精度; $m_{vb}$ 为觇标高精度; $m_f$ 为三角高程与水准点高程的差值。

该项目基准索股绝对垂度测量采用莱卡全站仪TM60,其标称精度为 $1 + 10^{-6} \cdot 0.5''$ ,则 $m_s = \pm 1.6 \text{ mm}$ ,  $m_a = \pm 0.5''$ 。仪器高利用精密水准尺采用小角度法测量, $m_{ia} = \pm 0.2 \text{ mm}$ 。目标高采用固定棱镜杆测量, $m_{vb} = \pm 0.5 \text{ mm}$ 。

测量过程中,由于大气折光系数测量精度较低,为最大程度削弱大气折光的影响,在小、大里程侧埋设二等水准点,架站后在小、大里程侧观测对向水准点,计算大气折光系数进行修正,保证所测三角高程与水准点高程差值控制在 $\pm 5 \text{ mm}$ ,则 $m_f = \pm 5 \text{ mm}$ 。取2倍中误差为极限误差,则主跨垂度测量误差区间为 $(-10.48 \text{ mm}, +10.48 \text{ mm})$ ,能满足索股架设的设计精度要求。测量精度分析结果见表1。

表1 测量精度分析结果

位置	几何参数				全站仪参数			$m_h/\text{mm}$	
	$S_{ab}/\text{m}$	$\alpha/(\circ)$	$m_s/\text{mm}$	$m_a/(\prime)$	$m_{ia}/\text{mm}$	$m_{vb}/\text{mm}$	$m_f/\text{mm}$	计算结果	规范要求
边跨1	126	26.2	$\pm 1.13$	$\pm 0.5$	$\pm 0.2$	$\pm 0.5$	$\pm 5$	$\pm 5.07$	$\pm 50$
中跨	600	2.3	$\pm 1.60$	$\pm 0.5$	$\pm 0.2$	$\pm 0.5$	$\pm 5$	$\pm 5.24$	$\pm 20$
边跨2	182	27.5	$\pm 1.18$	$\pm 0.5$	$\pm 0.2$	$\pm 0.5$	$\pm 5$	$\pm 5.10$	$\pm 50$

注:边跨1为小里程边跨;边跨2为大里程边跨。

根据 JTG/T 3650—2020《公路桥涵施工技术规范》,悬索桥主跨主缆基准索股跨中高程精度要求为 $\pm 20\text{ mm}$ ,边跨基准索股跨中高程精度要求为 $\pm 50\text{ mm}$ ,该桥边跨 1、中跨和边跨 2 的绝对垂度测量精度满足要求。

4.2 基准索股的稳定性观测结果

基准索股受不均匀光照和风的影响处于动态平衡状态,为保证基准索股架设线形的精度,剔除环境

中各种不利因素,选择多次测量结果评价基准索股绝对垂度的稳定性来评价基准索股的架设精度。

基准索股架设完成后,进行持续 3 d 的基准索股稳定性观测。考虑温度、塔偏和塔高的影响,对基准索股绝对垂度进行修正,得到当前状态下理论绝对垂度,并与基准索股的实测绝对垂度对比,得到基准索股的相对垂度差(见表 2)、中跨索股绝对垂度差值变化(见图 4)。

表 2 基准索股的绝对垂度差 mm

测量时间		温度/℃	各位置基准索股的绝对垂度差					
			边跨 1		中跨		边跨 2	
			上游侧	下游侧	上游侧	下游侧	上游侧	下游侧
第 1 天	0:00	29.5	15.3	11.2	−19.4	−18.4	11.3	9.5
	1:00	28.7	13.2	9.8	−15.2	−14.2	9.4	8.4
	2:00	27.8	12.3	8.2	−7.5	−8.8	5.2	3.8
	3:00	26.5	13.7	10.3	6.2	7.2	1.2	−3.2
	4:00	25.6	15.6	11.7	9.3	13.6	3.3	5.5
	5:00	25.4	16.8	14.7	13.3	17.8	5.2	7.3
第 2 天	6:00	24.9	18.7	16.3	16.6	19.3	9.3	11.2
	0:00	29.3	16.5	13.7	−17.8	−16.0	10.3	9.8
	1:00	28.5	14.9	12.5	−13.7	−12.7	9.3	7.3
	2:00	27.7	13.8	10.9	−9.5	−8.3	7.7	5.7
	3:00	26.4	11.6	9.6	7.9	9.5	3.9	−1.7
	4:00	25.3	12.8	10.3	8.3	12.7	−1.5	−4.5
第 3 天	5:00	25.6	14.6	11.3	13.7	16.5	5.9	3.9
	6:00	24.7	17.7	15.7	17.9	18.3	7.9	6.8
	0:00	29.4	18.9	15.9	−15.3	−14.0	9.6	8.9
	1:00	28.6	16.6	14.8	−11.0	−10.8	5.6	3.9
	2:00	27.9	12.5	12.9	−8.3	−7.7	−1.3	−3.9
	3:00	26.4	10.6	11.3	6.9	7.6	2.6	1.9
	4:00	25.7	13.3	13.9	8.6	11.0	3.3	5.8
	5:00	25.5	15.8	14.6	10.9	13.9	5.8	6.9
	6:00	24.8	17.6	17.9	14.3	15.8	7.9	6.3

注:绝对垂度差值为以设计绝对垂度为基准的差值。

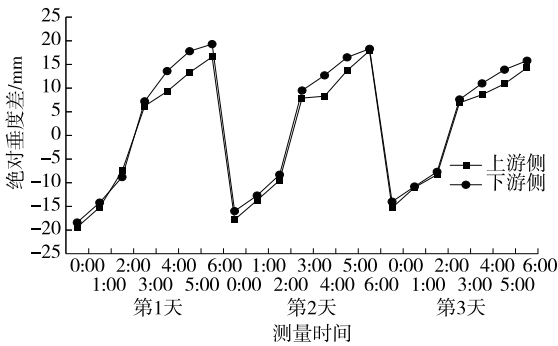


图 5 中跨索股绝对垂度差值变化

由表 2 可知:边跨 1 的绝对垂度差最大值约为 $+18\text{ mm}$ ,中跨绝对垂度差最大值约为 $-19\text{ mm}$ ,边跨 2 绝对垂度差最大值约为 $+11\text{ mm}$ ,满足边跨精度要求。由图 5 可知:上下游主缆变化趋势一致,绝对垂度变化与温度变化具有一定的规律,说明主缆线形及受力处于合理状态,所采用的基准索股监测和控制方法有效。

5 结论

通过对某地锚式悬索桥基准索股绝对垂度的测

量,得到如下结论:1) 将该桥 1# 索股作为基准索股,能满足施工、测量和控制要求;2) 固定跨中里程碑位置作为绝对垂度控制点,更能适应悬索桥主缆控制要求;3) 测量精度分析结果显示,测站设置和测点选择能满足相关规范要求;4) 基准索股稳定性观测结果显示,在温度保持稳定的情况下,基准索股的绝对垂度变化符合规范要求。分析中未考虑施工过程中温度不均匀、风力等外界因素,需考虑这些外界因素进行进一步分析研究,提高悬索桥基准索股监测和控制精度。

#### 参考文献:

- [1] 冯玉祥,欧阳祖亮,鲜臣,等.马鞍山长江公路大桥基准索股自动化测量监控与分析[C]//中国交通建设股份有限公司.中国交通建设股份有限公司 2012 年现场技术交流会.北京:中国交通建设股份有限公司,2012: 569—573.
- [2] 王永国.丰都长江悬索大桥施工控制测量及基准索股定位[J].四川测绘,1997,20(1):24—29.
- [3] 谭红梅,袁帅华,肖汝诚.大跨度悬索桥的基准索股调整[J].中国铁道科学,2010,31(1):38—43.
- [4] 钟继卫,高建学,王戒躁.大跨度悬索桥基准索股施工控制[J].世界桥梁,2006,34(2):41—43.
- [5] 唐茂林,王昌将,沈锐利.西堠门大桥基准索股架设监控与分析[J].重庆交通大学学报(自然科学版),2008,27(4):532—536.
- [6] 高荣堂,李传习,李庭波,等.平胜大桥自锚式悬索桥基准索股架设的施工控制[J].世界桥梁,2007,35(1): 43—46+67.
- [7] 郭福,乔卫华.温度对悬索桥基准索股架设的影响[J].现代交通技术,2009,6(2):55—57.
- [8] 魏明明,陈伟钊,潘权.河闪渡乌江大桥主缆架设施工监控研究[J].公路与汽运,2021(3):102—105.
- [9] 周伟,夏雪莲,胡铁山,等.悬索桥索股架设参数敏感性分析[J].公路与汽运,2020(3):104—105+109.
- [10] 叶龙祥,柯红军.地锚式悬索桥主索鞍顶推控制研究及实例分析[J].公路与汽运,2020(3):106—109.
- [11] 王达,汪威,王磊.悬索桥主索鞍超量顶推施工控制分析[J].交通科学与工程,2019,35(1):32—37.
- [12] 曾广平.大跨径悬索桥风场特征监测及其与振动加速度关联分析[J].中外公路,2022,42(2):142—147.
- [13] 羿超.混合梁斜拉桥索力优化与控制研究[D].北京:北京建筑大学,2022.
- [14] 罗干.独塔双索面斜拉桥施工监控技术研究[D].太原:中北大学,2022.
- [15] 郁胜.公路桥梁监测数据孪生车流和温度作用模型与疲劳评估方法[D].大连:大连理工大学,2021.

收稿日期:2021—11—19

\*\*\*\*\*

## 长沙理工大学简介

长沙理工大学是一所以工为主,工、理、管、经、文、法、哲、艺等多学科协调发展,以本科、研究生教育为主体,具有博士后科研流动站、博士学位授予权和硕士生推免权的多科性大学。是全国先进基层党组织、国家“中西部高校基础能力建设工程”高校、首批全国“创新创业典型经验高校”50 强、湖南省“国内一流大学建设高校”(A 类)、湖南省文明标兵单位、湖南省依法治校示范学校。是“卓越工程师教育培养计划”试点学校、教育部“大学生创新性实验计划”项目实施学校。

设有 22 个教学学院、1 个独立学院、1 个继续教育学院、85 个本科专业,其中国家级一流本科专业建设点 43 个、国家级特色专业 9 个、通过国家工程教育专业认证的专业 14 个、中外合作办学本科教育项目 3 个。拥有国家级和省级教学团队 3 个,国家级一流本科课程、双语教学示范课程等 10 门,省级一流本科课程 101 门,国家级实践教学平台 12 个,省级实践教学与创新教育平台 59 个。现有专任教师 2 000 余人,其中正高职称 300 余人,副高职称 600 余人。拥有中国工程院院士、“长江学者奖励计划”特聘教授等国家级人才 30 余人;30 余人享受国务院政府特殊津贴专家、国家有突出贡献中青年专家、国家级教学名师等国家级荣誉称号;拥有“全国高校黄大年式教师团队”2 个,中宣部宣传思想文化青年英才、教育部“新世纪优秀人才支持计划”人选、交通部“交通青年科技英才”和湖南省科技领军人才、“芙蓉学者”等省部级人才 400 余人。

拥有湖南省国内一流建设(培养)学科 6 个,5 个学科进入 ESI 全球排名前 1%;现有博士后科研流动站 5 个、一级学科博士学位授权点 8 个、博士专业学位授权点 1 个、一级学科硕士学位授权点 29 个、硕士专业学位授权点 18 个,具有授予同等学力硕士学位资格。拥有国家科学技术进步一等奖等标志性科研成果。现有国家级科研平台 4 个,省部级创新团队 13 个、自然科学科研平台 46 个、哲学社会科学研究基地 22 个。