

悬索桥主缆施工控制与监测

田养军, 王鸿龙

(长安大学 地球科学与国土资源学院, 陕西 西安 710054)

[摘要] 分析悬索桥主缆施工过程中测量数据的影响因素及误差来源, 介绍测量方法的应对调整方案。主缆线形基准索股测量无法使用几何水准, 采取先进高精度测量全站仪器, 只能单向三角测量, 一台全站仪器进行单向三角测量如果出现粗差无法校对, 同时测量的基准索股对温度变化、风力的大小、塔位的偏移等因素十分敏感, 因此对测量方案进行调整, 选择在无风或风力很小、温度稳定的夜间进行, 用两台高精度的自动跟踪全站仪同步单向三角测量, 使得测量任务能在短时间完成, 满足悬索桥主缆施工控制精度要求。

[关键词] 施工控制; 监测; 主缆; 大气折光; 悬索桥

[中图分类号] P211 [文献标识码] A [文章编号] 1672-6561(2005)02-0070-03

[作者简介] 田养军(1964-), 男, 陕西蓝田人, 讲师, 博士研究生, 从事测量工程、遥感图像教学与研究。

悬索桥主缆施工是在猫道(施工中的作业通道)架设完成之后进行的, 为了使架设后的主缆线形与设计一致, 必须在施工中对主缆的线形进行控制^[1~4]。主缆由基准索股和非基准索股组成, 索股的线形控制就是指索股架设时, 基准索股包括中跨跨中和边跨跨中的绝对标高, 非基准索股的中跨跨中和边跨跨中相对标高以及猫道张力等控制。基准索股是非基准索股调整的基础。首先要选定和控制好基准索股。基准索股选择的原则是:

(1) 索股处于相对自由状态, 周围索股对其干扰性最小。

(2) 便于测量其他索股。

(3) 每根基准索股管理一定数量的非基准索股, 对索股分组以减少误差积累。

一般悬索桥主缆索股 1[#] 必定是基准索股。

1 施工控制网复测及塔柱偏移量测定

主缆架设是在猫道架设好后进行的, 施工控制网已满足施工的要求, 但主缆架设之前, 必须对施工控制网进行复测。用 2 台 TCA2003 全站经纬仪, 测角精度 ±0.5", 测距精度 (1 ± 10⁻⁶ d) mm, 有

自动对球气差进行改正, CCD 自动找准观测目标, 自动观测, 自动数据存储或及时传送数据和处理数据等功能。图 1 为长江某悬索桥施工控制网。

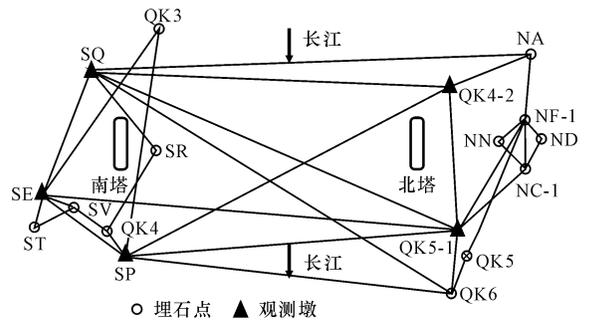


图 1 控制网示意图

Fig. 1 Sketch map of control net

1.1 跨河的高程控制

主要在 SQ, SP, QK4-2, QK5-1 四边形控制基点之间进行同步对向观测, 因为该四点观测方便、高低相近, 沿河岸对称、间隔距相近, 其球气差影响和视线观测高度相似。选择气温稳定条件下进行观测。三角高程的计算式

$$H = H_0 + D \sin \alpha + i - v + \frac{1-K}{2R} D^2 \quad (1)$$

式中: H 和 H_0 为目标点高程和观测点高程; D 为斜距; i 为仪器高; v 为棱镜高; K 为大气折光系数; R 为地球半径。复测用两台 TCA2003 全站经纬仪同时观测, 测得三角高程的闭合差为 +1.37 mm,

符合国家一等水准测量规范^[5], 其限差公式

$$M_x = \pm 0.1 \sqrt{S} (\text{mm}) \quad (2)$$

式中: S 为导线长度(km); 限差 $M_x = 1.7 \text{ mm}$ 。

1.2 观测墩位坐标的复测及塔柱偏移量测定

平面控制以 QK6 为基准, 对四边形 SQ, SP, QK4-2, QK5-1 以及外围点位各点的复测。

在对控制网进行复测时, 精度指标与前期观测一致: 点位中误差 $M_x \leq \pm 3 \text{ mm}$, $M_y \leq \pm 3 \text{ mm}$, 观测墩位结果如表 1。在对施工控制网的复测后, 对塔柱偏移量的测量, 结果如表 2, 表 3。

表 1 观测墩位的坐标及高程精度计算结果

Table 1 Result of coordinate and altitude in observation station

点号	x/m	y/m	M_x/mm	M_y/mm	M_p/mm	H/m
QK5-1	502.860	-83.785	1.4	1.0	1.8	83.568
SP	1590.309	-87.912	1.3	0.8	1.6	88.674
SQ	1576.526	45.928	1.2	1.0	1.5	86.808
QK4-2	523.246	56.738	1.4	1.4	2.0	84.150

表 2 北塔塔柱测量的偏移量

Table 2 Offset of north tower via survey

点名	x_i/m	x_r/m	x_d/mm
上游点	487.605	587.609	+4
下游点	487.563	487.568	+5

表 3 南塔塔柱测量的偏移量

Table 3 Offset of south tower via survey

点名	x_i/m	x_r/m	x_d/mm
上游点	1 453.748	1 453.751	+3
下游点	1 753.717	1 453.720	+3

2 主缆架设施工控制

2.1 主缆架设精度控制

主缆架设在白天完成。一般在主缆线形形成以后, 中、边跨水平分力相差不允许太大, 但如果水平力相差较大, 就使塔的受力处于主缆施工中最不利阶段。在裸塔状态下, 索塔受力模式最为不利, 且承受的竖向压力最小, 因而允许最大偏位最小, 以保证塔中不出现较大拉应力, 即 $N/A - Fl/W = 0$ (F 为不平衡水平力, l 为不平衡力至计算截面的高度, N 为竖向压力, A 为计算截面处索塔截面积), 计算出最大允许不平衡水平力, 乘以塔柔度系数,

得到最大允许偏位。该大桥北塔裸塔状态最大允许偏位 10 cm, (取 1.25 的安全系数)。主缆架设顺序是从北锚跨开始, 上下索对称同时北边跨、北塔顶、中跨、南塔顶、南边跨到达南锚跨(图 2)。

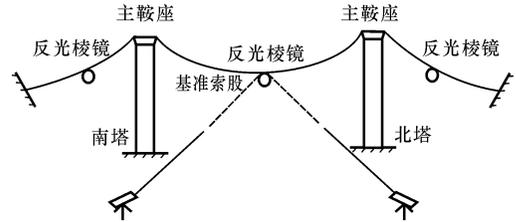


图 2 基准索股架设示意图

Fig. 2 Sketch map of basic rope spanning

2.2 主缆索股的调整要求

主缆高度调整一般选择在温度相对稳定, 风力不大的夜间进行。调整前要事先进行外界气温和索股温度的精心试测。该悬索桥索股调整是在晚上 24 时到次日凌晨 6 时。大桥的实际观测时间为 1~5 时。温度对索股的线形影响很小, 索股温度的测定用接触热敏电阻来测量, 沿长度方向布置为: 边跨 1/2 处, 南北塔顶两侧处边跨和中跨 1/4 处, 中跨 1/2 处, 沿断面方向布置到基准索股上缘、下缘及两侧。基准索股的线形测量前和测量后各读一次温度, 并注意不让灯光直接照射确定索股温度稳定的条件是长度方向索股的温差: $\leq 1^\circ\text{C}$ 。不符合温度稳定的条件, 或者当风力超过 $12 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 索股摆动太大以及雾太浓时都不能进行索股调整。各种条件满足时, 才可进行基准索股高度测量。测量采用同步观测方法, 测量前重新计算球气差改正。首先需要调整同一对主缆各索间的相对垂度, 上下游两索间的相对垂度及两索的绝对垂度。调整同索的相对垂度, 是为使各索拉力均匀, 塔受力均衡, 若某一根索受力较大, 索塔将会存在安全隐患。调整上下游两索间的相对垂度是为了减小索塔受扭。调整两索的绝对标高是为了减少主缆全部形成后的调整工作量。因为主缆的线形形成后, 再进行调整时所需要的力较大, 且需要上下索一起调整, 因而难度较大。调整主缆索的受力与高度调整量是按设计要求。该大桥规定基准索绝对垂度精度中跨为 $20 \sim -10 \text{ mm}$, 边跨为 $\pm 20 \text{ mm}$ 。上下游主缆索控制在 $\pm 10 \text{ mm}$ 误差范围内。

2.3 基准索股绝对标高的调整

基准索股观测如图 2。对架设阶段设定的基准索股, 测定索股下缘的标高后进行调整, 调整量由

对基准索股特征点位进行量测和基准索股的温度修正决定。调整前按设计要求使主散索鞍有个预偏量,并固定不动直到索股调整完成。

在南北各设一个测站和固定后视点,并安置全站仪。通过测站,测出塔顶标高及变位,基准索股跨中点位和标高,在塔顶用钢尺量出主索鞍预偏量,用全站仪测出边跨跨中、中跨跨中绝对标高,并对所测数据相互校核。基准索股测量结果如表 4。

表 4 1[#]主缆线形测量与调整

Table 4 Survey and adjust for 1[#] main cable

观测点	里程	x_c /mm	x_m /mm	x_d /mm	x_f /mm	调整否
北边跨	K 300+377	123.317	123.350	33	±20	调整
中跨	K 300+970	95.408	95.396	-12	+20 -10	否
南边跨	K 301+573	122.396	122.423	27	±20	调整

2.4 非基准索股的相对标高控制

用直钢尺配合水平尺测量的方法(图 3),量测出被调索股与基准索股的相对高差,重复测 3 次取平均值作最后测量值。图中 L1, L2 分别为一脚杆,其上标有刻划, L3 为装有水准管的水平尺,可相对于 L1, L2 能上下移动,亦可水平移动。

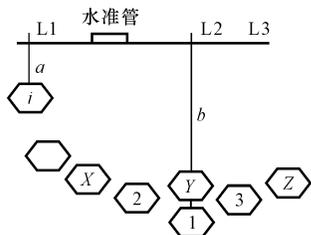


图 3 非基准索股相对标高控制

Fig. 3 Elevation control relatively for non basic rope

图 3 中 1 号为基准索股,其标高为 H_1 ,为确定 i 号索股标高,量出 i 号与 1 号和高差 Δh ,则 i 号索股标高为: $H_i = H_1 + \Delta h$ 。对同高索股如 2, 3 号或 X, Y, Z 号属同高用上述方法量完后用 L3 水准尺量其平面,检查同一高度各

索股间比较差及每根与基准索股的比较差之差值是否相等,重复测量 3 次取其平均值作为最后测量值。测量出相对数值后,算出调整量,由调整量反算出索股移动量。其调整顺序和方法与基准索股调整方法相同。

2.5 猫跨索股张力调整

一根索股调整好中跨、边跨标高后,进行该猫跨索股张力调整。控制猫跨索股张力与设计值的差值在 1 t 范围内,其调整的方法是用千斤顶顶推在锚头里的螺纹钢上的螺母,在锁定板与锚头之间加减垫片,张力大小是根据千斤顶的力和测定锚头

移动量求得,锚头移动量由千分计测量。

3 主缆架设中基准索股的测量方法

主缆线形基准索股测量,无法使用几何水准,只能采用单向三角测量。一台全站仪器进行单向三角测量如果出现粗差无法校对,同时测量基准索股对温度变化、风力的大小、塔位的偏移等因素十分敏感,故选择稳定的夜间进行,两台自动跟踪全站仪单向三角测量与温度测量同步进行,测量点位能在短时间完成,满足设计要求的测量精度。主缆架设施工控制中基准索股测量方法是:

(1) 在南北两岸分别设站,架设 2 台全站型经纬仪,并对仪器的系统误差进行校正。主要有仪器倾斜补偿、指标差、 $2c$ 误差等校正。

(2) 计算大气折光系数。分别观测对岸高程控制点,求出观测值与理论值(或称其真实值)之差,由三角高程公式(1),解算得到 k 值。

(3) 采用单向三角高程方法,按事先确定的方案:由南岸观测北塔、北边中跨、南边中跨;由北岸观测南塔、南边中跨、北边中跨;中跨中点南北测站同时观测。

(4) 在观测时,同时测量索股的温度,根据索股的温度、南北塔位的偏移量,并对观测值和理论值进行检查计算,确定是否调整及调整量的大小。

(5) 如果不符合限差,应进行基准索股的调整。

(6) 基准索股的调整完成后,重新对索股进行测量,重复(2)~(4)步骤,如果符合限差要求,索股的调整完成^[6-7]。

4 结语

主缆施工控制为保证高精度,监测中采取先进的高精度测量仪器(2 台 TCA 2003 全站经纬仪),两岸同时观测、大气折光的及时调整以及索塔偏位和温度效应对量测值影响等相应改正措施;观测工作按精密工程规范对桥梁测量设计的要求,结合全站仪观测规程进行,以保证悬索桥主缆架设顺利进行,同时满足施工精度要求。通过对某悬索桥主缆施工进行控制,使得主缆形成后索塔偏位及承重绳受力情况良好,主缆线形能够满足下一阶段施工的需要。

(下转第 81 页)

- [J] . 水文地质工程地质, 2003, 30(1): 88 ~ 90.
- [4] 王玮. 黑河水库单薄山梁排水洞方案优选研究[J] . 西安工程学院学报, 2002, 24(4): 30 ~ 34.
- [5] 徐恒力. 地下水系统外部描述方法与结构辨识[A] . 见: 中国地质大学(武汉) 水文系. 水文地质及工程地质论文集[C] . 武汉: 中国地质出版社, 1992.
- [6] 袁亚湘, 孙文瑜. 最优化理论与方法[M] . 北京: 科学出版社, 1999.
- [7] 汪兴旺, 党荣. 复杂工程系统优化设计——以某泥石流防治工程系统的优化设计为例[J] . 西安工程学院学报, 2000, 22(2): 44 ~ 49.
- [8] 成伟, 赵超英. 特殊条件下滑坡监测网的优化设计[J] . 长安大学学报(地球科学版), 2003, 25(3): 84 ~ 87.

To solve weight function of system theory with Excel

WANG Wei¹, QIAN Hui¹, MA Si jin²

(1. School of Environmental Sciences and Engineering, Chang'an University, Xi'an 710054, China; 2. Shaanxi Institute of Geological Survey, Xi'an 710600, China)

Abstract: Based on the analysis of system theory to build the relationship between precipitation and spring flow rate, this paper built up a set of method for solving weight function using Excel 2002. In this method, according the pre assigning length and initial value of weight function, the error quadratic sum between the observed value and calculated value of spring flow rate can be calculated using spreadsheet, and the object function can be built. Then, the weight that can minimize the object function can be solved by programming package. Through the error and trail method to adjust the length of weight function etc, the reasonable weight function can be ascertained finally. The results indicate that this method has distinct advantage in ascertaining the reasonable weight function and increasing efficiency via its visualization.

Key words: system theory; sequence of weight function; Excel 2002; mathematic programming; spring flow rate

[英文审定: 苏生瑞]

(上接第 72 页)

[参 考 文 献]

- [1] 李青岳. 工程测量学[M] . 北京: 测绘出版社, 1995.
- [2] 侯国富. 建筑工程测量学[M] . 北京: 测绘出版社, 1987.
- [3] 谢远光. 虎门大桥悬索桥主缆施工测量[J] . 公路, 1999, 7(7): 24 ~ 28.
- [4] 许曦. 悬索桥主缆差分定位及监测[J] . 测绘通报, 2001, (7): 45 ~ 47.
- [5] 国家技术监督局与建设部. 工程测量规范[S] . 北京: 测绘出版社, 1987.
- [6] 聂让. 全站仪与高等级公路测量[M] . 北京: 人民交通出版社, 1999.
- [7] 成伟, 赵超英. 特殊条件下滑坡监测网的优化设计[J] . 长安大学学报(地球科学版), 2003, 25(3): 84 ~ 87.

Construct control and monitoring for main cable of suspended cable

TIAN Yang jun, WANG Hong long

(School of Earth Sciences and Resources Management, Chang'an University, Xi'an 710054, China)

Abstract: Through analyzing the impact factor and error recourse of surveying data during the construct control of main cable of the suspended cable, this paper introduces a surveying method and a corresponding adjust scheme. The basic rope linearity survey of main cable can not use leveling. Because a high precision omnipotence instrument can survey in one direction, it is difficult to collate if it exists error. At the same time, the basic surveying rope is very sensitive to the change of temperature, magnitude wind and the offset of the tower. So the adjusting to the surveying scheme is necessary to satisfy the precision requirement. Such as selecting the non wind or little wind weather, selecting the night surveying due to the steady temperature, using two high precision omnipotence instruments at the same time etc.

Key words: construct control; monitoring; main cable; atmosphere refraction; suspended cable

[英文审定: 马智民]