

湛江海湾大桥塔上锚管定位方法介绍

李毛毛 刘成龙

(西南交通大学土木学院, 四川成都, 610031)

[摘要] 斜拉桥是一个受力结构复杂、各构件间相互影响较大的超静定结构体, 斜拉索锚管的安装定位是其施工的重点与难点之一。本文结合湛江海湾大桥工程实践, 介绍一种涉及到大跨度斜拉桥主塔锚管安装定位的原理、放样数据计算的理论、现场安装测量控制和精度等内容的新方法。

[关键词] 斜拉桥; 锚管; 安装定位; 放样

[中图分类号] P258 [文献标识码] B [文章编号] 1001-8379(2007)02-0092-05

The Introduction of Tower Anchorage Pipe Positioning Method in Zhanjiang Bay Bridge

LI Mao-mao, LIU Cheng-long

(School of Civil Engineering of Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

Abstract: The cable-stayed bridge is an immobile structure style, which has complicated force-bearing structure and has big influences between its components. Positioning for anchorage pipe of cable is an important problem in the construction of the cable-stayed bridge. This paper introduces a new method, which refers to the principle of positioning anchorage pipe in large-scale cable-stayed bridge, the theory of processing the staking out data and the method and precision of fix measure control in scene.

Key words: Cable-stayed bridge; Anchorage pipe; Installment positioning; Stake out

斜拉桥是一种跨度大、净空高、新颖美观的桥梁, 它的主体结构由主梁、索塔及斜拉索三大部分组成。斜拉索体系是斜拉桥上部构造的核心, 亦是全桥受力的关键结构, 要保证斜拉索在工作状态的实际受力与设计相符, 就必须保证斜拉索安装与定位的准确。斜拉索的空间状态主要由主塔上锚管与箱梁上锚管的空间位置决定, 因此锚管的定位精度对成桥的受力影响至关重要。根据文献1和文献2, 斜拉桥锚管的定位要求为: 锚固点空间位置的三维允许误差为 $\pm 10\text{mm}$, 即每方向的允许偏差为 $\pm 5\text{mm}$; 锚管轴线与斜拉索轴线的相对允许偏差为 $\pm 5\text{mm}$ 。可见在大型斜拉桥的施工中, 锚管的测量定位及放样数据的计算是一项精度要求很高、工作难度较大、对成桥质量影响显著的工作。

1 锚管构造特点

锚管为斜拉索两端锚固于主塔、主梁的定位构件, 如图1所示。锚管主要由锚垫板与中空圆柱体组成, 因此可以通过定位锚管两端口中心位置来确定锚管的空间位置及姿态。由于锚管为中空圆柱体结构, 很难在其两端口精确地找到其几何中心点, 由传统的测量方法定位时需在两端口中心的位置设置目标点也是较困难的。

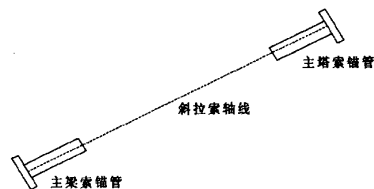


图1 斜拉索与锚管构造图

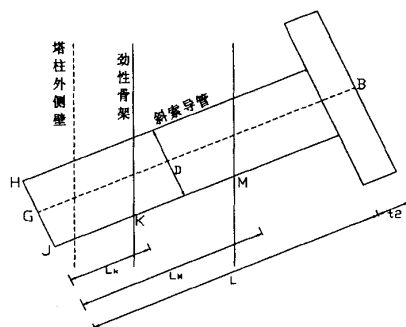


图2 塔上锚管安装定位原理

2 塔上锚管安装定位的原理及方法

2.1 工程概况

湛江海湾大桥位于广东省湛江市, 主桥为双塔双索面预应力钢箱梁斜拉桥, 全长840m, 跨径组合为60m+120m+480m+120m+60m。全桥共有斜拉索112根, 混凝土桥塔高约160m。

2.2 局部控制网的建立

根据大桥施工的整体平面和高程控制网，在已竣工的边跨和主墩承台上布设锚管测量定位的局部平面控制网点，用徕卡 TC2003 全站仪采用边角网的方法测量其平面坐标。在索塔承台上布设局部高程控制网点，用精密水准仪将施工控制网点的高程传递到主墩承台上的局部水准点上，这样就构成了锚管测量定位的局部测量控制网。

2.3 锚管的安装定位

如图2所示，塔上锚管的安装与定位，一般应首先把需定位的锚管放在支撑它的劲性骨架上，因此可在桥轴线附近的局部控制网点上设置全站仪，采用二测回极坐标放样的方法，在已经装好的劲性骨架上精确放出两个支撑点K、M，并事先用小钢尺在要安装的锚管上自出口端底部点J向上量出 L_K 、 L_M 的距离，并在锚管上也标注出这两个标志点K、M，然后把锚管吊装在劲性骨架上，使锚管上标注出的标志点刚好与劲性骨架上放样出的支撑点相吻合。若吊装过程较为精密，已安装的锚管理论上已达到设计要求，但由于放样与施工都存在误差，这样安装的锚管的位置是否已达到设计精度的要求，还应进行检查。检查的方法是以整体和局部平面控制网为基准，采用单三角形或双三角形边角前方交会的方法测量锚管上出口H点的平面坐标；以局部高程控制网点为基准，采用精密水准仪悬吊钢尺水准测量方法测量H点的高程，这样就获得了H点的三维实测坐标，并与其设计坐标进行比较，若偏差值在允许限差以内，则该锚管安装定位完毕，否则应重新调整锚管的空间位置，直至检查结果达到要求为止。

由于塔上锚管的安装一般都在塔柱较高的高空位置上进行，而高塔柱受到日照方向与大气温度变化的影响下将产生扭转变形，扭转变形量的大小与塔柱的高度、日照方向及塔柱温差有关。根据湛江海湾大桥36h的连续变形监测结果表明：在100m高空，温差在3~4℃时，引起的塔柱变形约5mm左右；若温差大、塔柱越高，则引起的变形量越大。故塔柱因温度的变化引起的扭转变形对于锚管的定位精度，是一个不容忽视的影响因素。因此，在安装锚管前应对塔柱进行24~48h的连续变形观测以研究塔柱偏位与时间、温度的关系，从而确定塔柱处于平衡位置的时间段。锚管安装与检查的时间，应该在这种外界环境对塔柱扭转变形影响最小的时间段内为宜，此时塔柱基本位于平衡状态，从而最大限度地消除塔柱扭转变形对锚管定位的影

响。

3 塔上锚管定位数据计算模型的推导

塔上锚管的设计参数，均是以索塔中心为坐标原点，指向桥轴的顺桥向为X轴正向，指向下游的横桥向为Y轴正向，指向塔顶向为Z轴正向的局部施工坐标系（图3）而言的。塔上锚管的设计参数主要有：塔上锚垫板中心点B的三维坐标 X_0 、 Y_0 、 Z_0 ，斜拉索塔上锚管出口切线在XY平面上的投影与X轴正向的夹角 α_z 、在XZ平面上的投影与X轴正向的夹角 α_x 和在YZ平面上的投影与Z轴正向的夹角 α_y ，锚管的长度L和锚管的外径D以及锚垫板的厚度 ρ 等。以上锚管的设计参数，其几何关系可见图2和图4。

如图4所示，计算图2中定位点的坐标，应首先推算斜拉索塔上锚管出口切线BD与斜拉索在XY平面上的投影DF间的夹角 θ 。角 θ 的计算步骤如下：

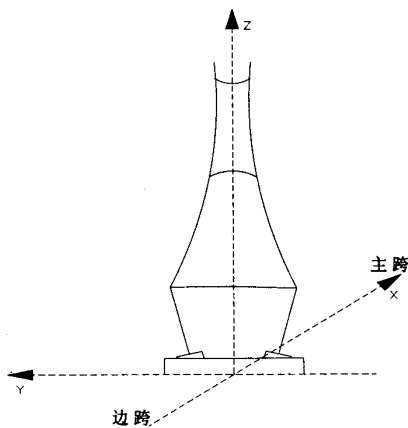


图3 施工坐标系示意图

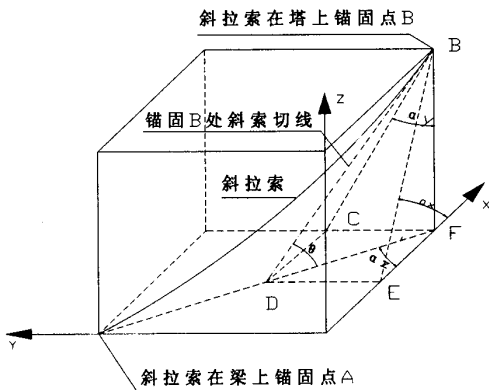


图4 锚管设计参数示意图

$$\text{图4中 } BC = \frac{BF}{\cos\alpha_y}, CD = EF = \frac{BF}{\tan\alpha_x}, BC^2 +$$

$$CD^2 = BD^2, \text{ 因为}$$

$$\sin\theta = \frac{BF}{BD} = \frac{BF}{\sqrt{BC^2 + CD^2}}$$

$$= BF / \sqrt{(BF^2 / \cos^2 \alpha_Y) + (BF^2 / \tan^2 \alpha_X)}$$

故 $\theta = \arcsin(BF/BD) = \arcsin\{(\cos \alpha_Y * \tan \alpha_X) / \sqrt{\tan^2 \alpha_X + \cos^2 \alpha_Y}\}$ (1)

由于湛江海湾大桥为双塔双索面斜拉桥，根据设计所给出的计算参数，每个塔柱上的锚管既有中跨和边跨之分，又有左幅与右幅之分，即每个塔柱上各锚管定位点的设计坐标计算方法有所不同。本文仅以47号墩的右幅塔柱中跨为例，推导图2中所示的各定位点及检查点坐标计算公式，其他锚管的定位点坐标均可参照此模型进行计算。

有了 θ 角，根据锚垫板中心点B的三维坐标 X_0 、 Y_0 、 Z_0 和锚管钢护筒的长度L、锚垫板的厚度 t_2 ，可以按(2)式计算出锚管出口中心点G的设计坐标(X_G 、 Y_G 、 Z_G)。

$$\left. \begin{aligned} X_G &= X_0 + (L + t_2) * \cos \theta * \cos \alpha_Z \\ Y_G &= Y_0 - (L + t_2) * \cos \theta * \sin \alpha_Z \\ Z_G &= Z_0 - (L + t_2) * \sin \theta \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

有了G点坐标和设计给出的锚管外径D，就可以按(3)式和(4)式计算出锚管出口上边缘检查点H的设计坐标(X_H 、 Y_H 、 Z_H)和下边缘辅助计算点J的设计坐标(X_J 、 Y_J 、 Z_J)。

$$\left. \begin{aligned} X_H &= X_G + \left(\frac{D}{2}\right) * \sin \theta * \cos \alpha_Z \\ Y_H &= Y_G - \left(\frac{D}{2}\right) * \sin \theta * \sin \alpha_Z \\ Z_H &= Z_G + \left(\frac{D}{2}\right) * \cos \theta \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

$$\left. \begin{aligned} X_J &= X_G - \left(\frac{D}{2}\right) * \sin \theta * \cos \alpha_Z \\ Y_J &= Y_G + \left(\frac{D}{2}\right) * \sin \theta * \sin \alpha_Z \\ Z_J &= Z_G - \left(\frac{D}{2}\right) * \cos \theta \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

根据K、M点至锚管出口下边缘点J的距离 L_K 、 L_M 和设计参数 α_Z ，就可以按(5)式和(6)式计算锚管在劲性骨架上支撑点K、M的设计坐标(X_K 、 Y_K 、 Z_K)、(X_M 、 Y_M 、 Z_M)。

$$\left. \begin{aligned} X_K &= X_J - L_K * \cos \theta * \cos \alpha_Z \\ Y_K &= Y_J + L_K * \cos \theta * \cos \alpha_Z \\ Z_K &= Z_J - L_K * \sin \theta \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

$$\left. \begin{aligned} X_M &= X_J - L_M * \cos \theta * \cos \alpha_Z \\ Y_M &= Y_J + L_M * \cos \theta * \cos \alpha_Z \\ Z_M &= Z_J - L_M * \sin \theta \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

有了K、M两点坐标，即可利用普通计算器采

用两点定线的原理，根据锚管安装现场的实际情况，实时计算出锚管底部直线上距出口任意距离处的点位坐标。

4 锚管定位计算程序的应用

由前所述，湛江海湾大桥主跨480m，每个中跨和边跨各有14对斜拉索，即全桥2个主塔上共有 $2 * 4 * 14 = 112$ 个锚管，由图2所示，每个锚管上需计算的放样点、辅助点及检查点至少5个，所以全桥主塔上锚管定位需要计算点位坐标的定位点至少有 $112 * 5 = 560$ 个。如此大的计算量，对于手工计算是件十分烦琐的事情，而且手工计算出现错误的可能性很大，如用程序实现计算，则会提高计算速度及减少或消除计算出现错误的可能。由于篇幅所限，本文仅对所编写的锚管定位计算程序的功能进行简单介绍。

(1) 计算参数的设置。如图5所示，锚管计算所需输入的参数有：锚管在索塔上的索号；塔上锚垫板中心点B的三维坐标 X_0 、 Y_0 、 Z_0 ；斜拉索塔上锚管出口切线在XY、XZ及YZ平面上的投影角 α_Z 、 α_X 及 α_Y ；锚管的总长度L；锚管的外径D及锚管所在索塔中心里程。锚管位置标识是为程序识别锚管所在塔柱的位置而设，位置标识有+L、-L、+R、-R四种，分别表示锚管在主塔左幅中跨、左幅边跨、右幅中跨、右幅边跨上的四种位置。 L_K 、 L_M 分别为定位点到锚管出口端底部J点的距离。参数输入完毕后，选择添加锚管将刚输入的锚管参数添加到锚管计算参数区。可重复添加多根锚管，所有欲计算的锚管参数将在锚管设计参数区内显示，用户可根据所显示的数据进行检查和修改。

(2) 锚管定位点设计坐标的计算。参数设置完毕，即可计算锚管定位点的设计坐标，程序自动计算锚管设计参数区内的锚管，无需人工干预。计算完毕后，结果以记事本的文件格式显示，显示结果包括以主墩中心点为坐标原点的数学坐标系定位点数据及以桥轴线为X轴的局部控制网施工坐标系定位点数据。用户可根据需要，对计算结果格式进行编辑、修改和保存。

5 锚管定位精度分析

5.1 平面定位精度分析

如前所述，锚管定位点平面位置的测量，是在桥轴线附近的局部控制网点上设置全站仪，采用二测回极坐标放样的方法，在已经装好的劲性骨架上精确放出定位点，故锚管平面定位误差包括横桥向



图5 锚管定位计算参数设置

定位误差 $m_{横}$ 和纵桥向定位误差 $m_{纵}$ 两部分。横桥向定位误差主要受控制点的点位误差 $m_{控}$ 、全站仪测角误差 $m_{角}$ 、目标点对中误差 $m_{对}$ 、仪器整平精度引起的投点误差 $m_{投}$ 的影响，可按下式^[3]计算锚管横桥向定位误差：

$$m_{横} = \pm \sqrt{m_{控}^2 + m_{角}^2 + m_{对}^2 + m_{投}^2}$$

$$= \pm \sqrt{1^2 + 1.2^2 + 1^2 + 1.5^2} = \pm 2.38 \text{ mm}$$

式中： $m_{控} = \pm 1\text{mm}$ ， $m_{对} = \pm 1\text{mm}$ ，仪器的测

角误差 $m_{角} = \frac{m_{\alpha}}{\rho} * S = \pm 1.2\text{mm}$ （采用TC2003全站仪， m_{α} 为全站仪测角中误差取 $0.5''$ ， $\rho = 206265''$ ， S 取最长距离500m），仪器整平精度引起的投点误差 $m_{投} = \frac{m_{\gamma}}{\rho} * h = \pm 1.5\text{mm}$ （ m_{γ} 为全站仪的整平精度取 $2''$ ，投点高度 h 取最大值150m）。

纵桥向定位误差主要受 $m_{控}$ 、 $m_{对}$ 、全站仪测距误差 $m_{距}$ 的影响，可按下式计算锚管纵桥向定位误差：

$$m_{纵} = \pm \sqrt{m_{控}^2 + m_{距}^2 + m_{对}^2}$$

$$= \pm \sqrt{1^2 + 1.5^2 + 1^2} = \pm 2.06 \text{ mm}$$

式中：仪器的测距误差为 $m_{距} = m_a + b * S = \pm 1.5\text{mm}$ （采用TC2003全站仪， m_a 为测距的固定误差为 $\pm 1\text{mm}$ 、 b 为测距的比例误差为 $\pm 1\text{ppm}$ 、 S 取最长距离500m）。

故锚管的平面定位误差 m_p 为： $m_p = \pm \sqrt{m_{横}^2 + m_{纵}^2} = \pm \sqrt{2.38^2 + 2.06^2} = \pm 3.15 \text{ mm}$ 。

5.2 高程定位精度分析

锚管定位点高程的测量，主要是采用精密水准仪悬吊钢尺水准测量方法，采用100m检定钢尺，先把承台上的水准点高程传递到塔上固定点上，再用精密水准仪由此固定点把高程传递到锚管定位点上。根据悬吊钢尺水准测量点定位精度估算公式^[4]，可估算定位点的高程中误差 M_h 为：

$$M_h = \pm \sqrt{m_c^2 + m_1^2 + m_2^2 + m_3^2 + m_4^2}$$

$$= \pm \sqrt{2^2 + 1^2 + 1^2 + 1^2 + 2.5^2} = \pm 3.64 \text{ mm}$$

式中： m_c 为承台高程水准点的高程中误差取 $\pm 2\text{mm}$ ； m_1 、 m_2 分别为精密水准仪在水准尺上和钢尺上的读数误差，均可取 $\pm 1\text{mm}$ ； m_3 为塔上水准仪传递高程的误差，取 $\pm 1\text{mm}$ ； m_4 为钢尺本身的长度误差，取 $\pm 2.5\text{mm}$ 。

由上述分析可知，按本文所述的测量方法定位锚管在X、Y和Z方向上均能够满足 $\pm 5\text{mm}$ 的定位精度要求。

6 锚管定位测量的注意事项

(1) 因锚管定位一般要经过长时间的反复调整（一般在2小时左右），故在锚管调整期间每次观测前，应重新对仪器进行整平、对中、检查后视方位以保证定位点平面位置的准确。

(2) 在悬挂钢尺进行高程测量时，需保证所用钢尺应事先检定，悬吊重物质量为检定时质量，读数完毕后应对钢尺进行尺长改正和温度改正，以保证高差测量的精度。

(3) 若因工程进度关系，有时不得不在塔柱扭

转变形量较大的时间段进行定位工作,则定位时,必须依照塔柱连续变形观测结果进行设计坐标的反向改正,以确保定位点的实测位置与设计位置相符。

7 结束语

上面介绍了斜拉桥主塔上锚管测量定位原理,推导了锚管定位点的数据计算模型,依据此方法亦可以推导出箱梁上锚管定位点数据的计算及定位方法。根据湛江海湾大桥的施工实践,证明此方法数据计算模型准确、外业观测简便、精度稳定可靠、作业快速高效,计算机程序的应用又提高了计算速度和准确性,因此该方法可为其他类似桥梁施工提供参考。

参考文献

- [1] JTJ 071-98, 公路工程质量检验评定标准 [S].
- [2] JTJ 041-2000, 公路桥涵施工技术规范 [S].
- [3] 武汉测绘学院《测量学》编写组. 测量学 [M]. 北京: 测绘出版社, 1985.
- [4] 瞿国万. 虎门悬索桥索塔施工测量控制方法与精度分析 [A]. 中国土木工程学会第十二届年会论文集 [C]. 1996. 209~215.

[收稿日期] 2006-07-25

[作者简介] 李毛毛 (1980-), 男, 硕士研究生, 研究方向: 精密工程测量与变形监测。

(上接第91页)

号顺序,而且还避免了逐控制点判断解算坐标正确与否的多余工作。如果控制网起算数据只有两个已知点坐标或与此相当的起算数据,那么在坐标解算结束后只需作一次人工判断即可解算出最终所需控制点概略坐标。如果控制网还具有其它已知数据,则可不需人工干预直接解算出正确的控制点概略坐标。这样,不但提高了计算机概算坐标的自动化程度,而且提高了工作效率。

参考文献

- [1] 武汉测绘科技大学《测量学》编写组. 测量学 [M]. 北京: 测绘出版社, 1993.
- [2] 武汉测绘科技大学《测量平差基础》编写组. 测量平差 [M]. 北京: 测绘出版社, 1996.
- [3] 武汉大学测绘学院测量平差学科组. 误差理论与测量平差基础 [M]. 武汉: 武汉大学出版社, 2003.
- [4] 孔祥元, 梅是义. 控制测量学 (上) [M]. 武汉: 武

汉大学出版社, 1996.

- [5] 谭浩强. C 程序设计 [M]. 北京: 清华大学出版社, 1999.
- [6] 顾孝烈, 毛锋. 测量电算程序设计 [M]. 北京: 石油大学出版社, 1992.
- [7] Tao Ben-zao. Statistic analysis of surveying data [M]. Beijing: Press of Surveying and Mapping, 1992.
- [8] Tao Ben-zao, Zhang Chao-yu. A New Method for Identifying the Model Error of Adjustment System [J]. Geo-spatial Information Science, 2005.

[收稿日期] 2006-06-06

[作者简介] 蒋洪波 (1981-), 男, 四川蓬溪人, 在读硕士研究生, 主要研究方向为 3S 技术、大地测量。