

斜拉桥索塔三维相对基准定位方法研究

梅文胜¹ 韩国明² 张正禄¹

(1 武汉大学测绘学院,武汉市珞喻路 129 号,430079)

(2 中国交通建设集团公路一局三公司,北京市朝阳区管庄,100024)

摘要:结合斜拉桥索塔基准放样及斜拉索预埋钢管的精密定位的需要,提出了一种新的基于测量机器人的三维相对基准放样方法,并成功用于灌河特大桥斜拉桥主桥的施工放样。实践证明,与传统的方法相比,该方法具有方便、高效、精度高等特点。

关键词:三维相对基准法;放样;斜拉索;索塔

中图分类号:P258

斜拉桥以其大跨径、经济、美观的特点近 30 年来得到迅速发展。斜拉桥属于高次超静定结构,索塔和梁在成桥后要承受巨大的轴向力和弯矩,施工过程中受施工偏差、混凝土收缩、徐变、基础沉降、风荷载、温度变化等因素影响,其几何尺寸及平面位置可能发生变化,对结构受力将产生不利影响。因此,在施工的全过程中应采取严格的施工测量控制措施对索塔施工进行定位指导及监控。斜拉索预埋钢管的精密定位是索塔施工的重点,也是全桥施工的重点,它的定位精度直接关系到成桥质量,定位速度直接影响到工程进度。

索塔基准的放样和斜拉索预埋钢管的精确定位可采用常规方法进行。一般索塔基准的平面位置采用边角交会测量的方法确定;高程采用水准仪配合长钢尺的方式传递;斜拉索预埋钢管的精确定位是在索塔基准的基础上再用弦线配合小钢尺丈量的方式进行。这种传统的方式虽然能满足斜拉桥施工的精度要求,但速度慢,受施工干扰大,影响施工进度。近年来,在斜拉桥索塔的定位放样中普遍采用三维极坐标法,该方法的致命弱点是随着距离的增长定位精度显著降低,特别是受大气折光的影响,单向三角高程精度较低,导致三维极坐标法在距离稍远时根本达不到精度要求。另外,施工中随着索塔的升高,其受日照的影响而产生的扭转也越来越严重。实际观测结果表明,灌河斜拉桥索塔在上横梁高度上,其因日照、

温度的变化而产生周期性的摆动扭转已有约 8 mm,在上塔柱施工阶段将达到 15 至 20 mm,因此即使是在近距离的情况下,如不采取寻找平衡时间和定时观测措施,采用三维极坐标法也很难保证斜拉索预埋钢管的精确定位。

本文针对三维极坐标法的缺点,提出了三维相对基准法,采用特殊的观测和数据处理方法来改善三维极坐标法的精度,减小索塔扭转、摆动的影响,并在灌河特大桥的主桥斜拉桥中得到应用。

1 三维相对基准法

三维相对基准法包括平面相对基准极坐标法和三角高程相对基准差分法,平面相对基准极坐标法为三维相对基准法提供平面坐标,三角高程相对基准差分法为相对三维基准法提供高程位置。

1.1 平面相对基准法

该方法主要为尽量消除索塔因日照、温度变化产生的变形、提高测量精度而设计,其基准为位于稳定区域(索塔承台、下横梁)和变形区域(上横梁、上塔柱)的经过精密测设的固定点,相对基准极坐标法可用来精确放样变形状态下的上塔柱点位。该方法主要包括以下两个步骤。

1.1.1 基于后视基准的距离差分改正

三维相对基准法中,后视基准点应选择在稳

定、通视条件好的位置,索塔承台或下横梁处可以认为是平面位置最稳定处(因有庞大的桩基础,平面位置变动一般可忽略不计,但高程方向在自压下会产生微小的沉降,可定期进行纠正),因此索塔承台或下横梁和岸上强制观测墩的位置相对稳定,可近似认为索塔承台墩中心点到强制观测墩中心的距离不变,而实测距离往往与此距离存在差异,此差异可以认为是由平差改正、气象改正不严密引起的。若将此差异按比例加到观测边长上,则相当于将观测边长改正到平差计算的基准面上,有利于提高精度。基于以上考虑,建议采用索塔承台或下横梁处的经过精密定位的固定点(一般为墩中心点)。

距离差分改正是在有稳定基准点的条件下,提高距离测量精度的特殊方法。由文献[1]知,其基本公式如下:

$$D_p = S_p \left(1 - \frac{\Delta d}{d} \right) \quad (1)$$

式中, d 为固定边观测所得的斜距; Δd 为观测值 d 与反算理论值之差; S_p 为实测前视距离; D_p 为改正后前视距离; $1 - \frac{\Delta d}{d}$ 即为距离差分改正系数。

将强制观测墩中心至索塔承台墩固定点的坐标反算距离与实测距离求差得 Δd ,再求得距离改正系数,用来改正前视实测距离,可得与平差基准更一致的距离值。

假设基准点和测站点都稳定是距离差分改正的前提条件,但如果现场条件不具备,强行进行差分改正反而会降低精度,因此在条件不具备时可不进行后视基准距离差分,而直接使用气象元素来进行测距改正。

1.1.2 基于相对基准的变形改正

位于上横梁或上塔柱上的经过精密测设的固定点称为相对基准点,相对基准点本身位于变形区域内,它将随索塔一起每天作周期性的扭转摆动。假设索塔的扭转摆动是周期性且有规律的,其每天都要周期性地经过摆动平衡位置,那么相对基准点的准确坐标应该为索塔在平衡位置时观测到的坐标。其精确坐标的测定可通过以下两种方式得到:①需经过一个摆动周期(24 h)的短间隔(1 h 或 2 h)的持续精密观测,取其平均值作为平衡位置坐标;②找出摆动规律后,在平衡时间进行精密观测,一般也要在不同的平衡时间多次测量。

在索塔每天作周期性摆动的假设前提下,可以认为索塔的变形是每天都要归位的,进而提出

基于相对基准的变形改正的思想。该思想的关键是认为相对基准点随索塔一起作周期性摆动,相对基准点的变形可以反映索塔的变形,那么以相对基准点为依据的相对基准极坐标法可以保证放样点与相对基准点的相对位置关系。因此索塔在变形状态下放样依然能够保证其在平衡位置下的准确位置,同时,该方法可以在非平衡位置时间作业,大大加长作业时间,可以有效保证施工进度。

相对基准的变形改正是以相对基准点作为后视点,距离经过差分改正和高程面投影改正后,按极坐标方式计算上横梁或上塔柱上固定点的坐标,其与精密测设时测定的坐标之差,可近似认为是塔柱观测时因日照等外界因素引起的变形量。在测设放样其他点位时加以改正,从而得到考虑索塔形变的待定点的最终坐标。

此方法在操作时应注意以下几个问题。

1) 如果相对基准点位于上横梁,那么求出的变形量是代表相应高度上的变形。如果放样点不在此高度则只进行了近似改正。当塔柱变形较大时,则改正不够准确。所以,要求尽量选择索塔变形较小的时段放样。

2) 该方法要求仪器精度高,稳定可靠,如使用 Leica TCA 全站仪的自动照准功能,可提高测量精度。如果仪器精度低、不稳定,将得不到好的结果。

3) 基于单个相对基准点的变形改正不能改正扭转变形,如果索塔扭转较严重,可考虑使用两个相对基准点来解决扭转变形改正的问题。

1.2 三角高程相对基准差分法

大气折光影响是单向三角高程测量的主要误差来源,为削弱大气折光的影响,应采用等距差分技术。将相对基准点作为高程控制点,用水准或对向三角高程的方法精密测定其高程,放样时以索塔相对基准点作三角高程后视,实时求得待测点相对于相对基准点的高差,由于观测视线所通过的环境与后视基本相同,大气垂直折光误差可基本消除。

三角高程单向观测高差计算公式为:

$$h = S \cdot \sin \alpha + \frac{1-K}{2R} (S \cdot \cos \alpha)^2 + i - v \quad (2)$$

式中; S 为斜距; α 为垂直角; K 为大气折光系数; i 为仪器高; v 为棱镜高。

$$h_{\text{前}} = S_{\text{前}} \cdot \alpha_{\text{前}} + \frac{1-K}{2R} (S_{\text{前}} \cdot \cos \alpha_{\text{前}})^2 + i - v_{\text{前}} \quad (3)$$

$$h_{后} = S_{后} \cdot \alpha_{后} + \frac{1-K}{2R}(S_{后} \cdot \cos\alpha_{后})^2 + i - v_{后}$$

$$(4)$$

$$\Delta h = h_{前} - h_{后} \quad (5)$$

$$H_{前} = H_{后} + \Delta h = H_{后} + S_{前} \cdot \sin\alpha_{前} - S_{后} \cdot \sin\alpha_{后} + v_{后} - v_{前} \quad (6)$$

因前视点与后视点基本在一个索塔上,可近似认为 K 和平距基本相同,仪器高完全相同, $h_{前}$ 和 $h_{后}$ 中第二项和第三项求差后为零,消除了大气折光的影响。如果采用定高的前、后视,如图 1 所示,高差中只剩下测距和测角误差的影响了。现代全站仪测角和测距精度都很高,用 TCA1800 仪器的精度 ($1''$, $1+2$ ppm) 估算,理论上 500 m 时可达优于 ± 3 mm 的高程精度。此法可以完全替代水准仪配合长钢尺的方式传递,大大提高了高程放样的效率。

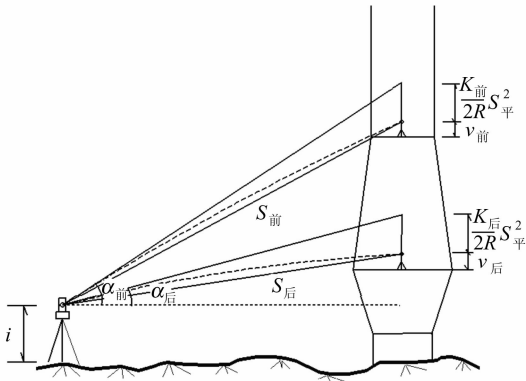


图 1 三角高程等距差分原理图

Fig. 1 Principle of Triangulated Height Survey by Equal Distance Differencing

采用本法测量时,应注意以下几点。

- 1) 相对基准点的高程应确保准确,可采用多种方法精密求得;
- 2) 相对基准点尽量随着塔柱的升高而上移,以确保该线路上的大气折光系数基本一致;
- 3) 施测时应用两个已知相对基准点高程来推算,相互检核,在限差之内取平均值作为最后高程值,超限重测。

2 全站仪机载程序开发

灌河特大桥使用 Leica TCA1800 进行施工放样。为发挥测量机器人的潜能,用 GeoBASIC 开发了三维相对基准法机载程序,该程序按照三维相对基准法的要求编制。程序上载到仪器后,只进行简单的操作,仪器会自动按照相对三维基准法的要求自动观测、自动计算并输出最终结果。

三维相对基准法机载程序包括以下 3 项功能菜单。

- 1) 测站信息:主要设置测站的基本信息,包括测站三维坐标、仪器高、观测测回数、是否进行距离差分改正等项;
- 2) 后视测量:设置后视点的三维坐标、后视镜高等,自动按设置的测回数作后视观测,记录、显示观测成果;
- 3) 目标点测量:设置目标高、点名等,自动按设置的测回数作目标点观测,记录、显示观测成果,按三维相对基准法计算目标点三维坐标并显示结果。

3 精度分析及应用试验

3.1 精度分析

由以上推导知,三维相对基准法的坐标计算公式为:

$$\begin{cases} X_p = X_0 + D_p \times \cos H_{z_p} \\ Y_p = Y_0 + D_p \times \sin H_{z_p} \\ H_p = H_{后} + D_p \times \sin\alpha_p - D_{后} \times \sin\alpha_{后} + v_{后} - v_p \end{cases} \quad (7)$$

式中, (X_0, Y_0) 为测站点平面坐标; $H_{后}$ 为相对基准点的高程; D 为差分后平距; v 为棱镜高; α 为垂直角; H_{z_p} 为方位角。

上式两边微分并转换成中误差的形式,在不考虑控制点误差的情况下,可导出以下相对三维基准法精度估算公式:

$$\begin{cases} m_{X_p}^2 = \cos^2 H_{z_p} \times m_{D_p}^2 + D_p^2 \times \sin^2 H_{z_p} \times \left(\frac{m_{H_{z_p}}}{\rho}\right)^2 \\ m_{Y_p}^2 = \sin^2 H_{z_p} \times m_{D_p}^2 + D_p^2 \times \cos^2 H_{z_p} \times \left(\frac{m_{H_{z_p}}}{\rho}\right)^2 \\ m_{H_p}^2 = 2 \times (\sin^2 \alpha \times m_{D_p}^2 + D_p^2 \times \cos \alpha \times \left(\frac{m_{\alpha}}{\rho}\right)^2) + m_v^2 \end{cases} \quad (8)$$

式(8)取三角高程后视与前视垂直角近似相等,高程精度估算时可用平均值。

若用 TCA1800 观测,取 $m_{H_{z_p}} = \pm 1''$, $m_{\alpha} = \pm 1''$,假设 $D_p \approx 500$ m, $\alpha \approx 15^\circ$, $m_v = \pm 1$ mm,文献[1]可近似取差分改正后的测距中误差为 ± 1 mm,则估算精度 $m_{平面} = \sqrt{m_X^2 + m_Y^2} = \pm 2.6$ mm, $m_H = \pm 2.6$ mm。由此可见,使用三维相对基准法,作索塔基准放样和斜拉索预埋钢管精确定位精度都能满足要求。

3.2 应用试验

为验证三维相对基准法的精度情况,特在灌河特大桥上塔柱施工前在上横梁位置作了精度试验。盐连高速公路上灌河特大桥全长 1.819 km,主桥长 640 m,是采用(32.9+115.4+340+115.4+32.9 m)五跨钢与混凝土组合的梁斜拉桥,半飘浮体系,塔柱采用 H 型索塔,索塔总高为 119.629 m。试验前分别在下横梁、上横梁顶部约桥墩中心处精密测定了一个基准点的三维坐标,下横梁点平面坐标用加密边角网的方式测量,

高程采用水准仪配合钢尺传递;上横梁基准点高程采用水准仪配合钢尺传递,平面位置由于受日照摆动的影响,采用了上横梁日照摆动变形监测的数据,用 24 h(每 2 h 观测一次)的平均值作为最终坐标。同时在上横梁上、下侧各布置一点,用水准仪测得它们与中心点的高差,在上横梁用全站仪测得它们与中心点的相对位置坐标。试验时仪器架设在离索塔约 500 m 处,用三维相对基准法观测两测回,测得上横梁处上、下游测点的三维坐标,与前面得到的坐标相比较,结果见表 1。

表 1 三维相对基准法测量结果

Tab. 1 Measured Result of 3D Relative Datum Method

点名	23SA3			23SA5		
	X/m	Y/m	H/m	X/m	Y/m	H/m
塔上测量结果	3 956.874 4	-10.979 9	84.606 4	3 956.859 5	10.983 8	84.610 2
相对基准法(第一次)	3 956.876 1	-10.978 9	84.604 4	3 956.860 4	10.985 4	84.607 8
较差	0.001 7	0.001 0	-0.002 0	0.000 9	0.001 6	-0.002 4
相对基准法(第二次)	3 956.874 9	-10.976 8	84.604 4	3 956.860 2	10.985 3	84.610 3
较差	0.000 5	0.003 1	-0.002 0	0.000 7	0.001 5	0.000 1

由表 1 可知,三维相对基准法的测量结果与塔上水准仪和全站仪测量的结果符合得很好,平面最大差 3 mm,高程最大差 2 mm,精度与估算结果一致。

4 结 语

三维相对基准法充分利用了测量机器人的自动测量、观测精度高的特点,采用距离差分和三角高程差分技术改善距离和高程测量的精度,使用基于相对基准点改正方法解决了索塔摆动状态下的精密定位问题,大大减少了索塔精密定位的时间限制。三维相对基准法操作简单、观测速度快,使用 Leica TCA 系列全站仪,在观测距离 500 m 左右时最具优势(Leica TCA 系列自动照准效果 500 m 以内最好,尤其是夜间作业,不需照明,更具优越性),精度满足斜拉索预埋钢管的精确定位精度要求,在放样距离小于 500 m 时,是一种值得推广应用的索塔放样及斜拉索预埋钢管精确

定位方法。该方法的基本原理同样也适用于高耸建筑物的精密定位。

参 考 文 献

- [1] 梅文胜,张正禄,郭际明,等. 测量机器人变形监测系统软件研究[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2002,27(2):165-171
- [2] 谢建纲,吴栋材. 大型斜拉桥施工测量[M]. 北京:测绘出版社,1996
- [3] 张学庄,王爱公,张弛. 单波高精度测距系统的研究[J]. 测绘学报,1996,25(3):186-189
- [4] 吴栋材. 三维坐标法放样高塔柱的几个问题[J]. 测绘通报, 1997(2): 24-26
- [5] 吴栋材. 大型斜拉桥缆索管精密定位的研究[J]. 武汉测绘科技大学学报, 1995, 20(4): 337-342
- [6] 许曦,周胜利,尹长林. 斜拉索锚固管解析定位方法研究[J]. 工程勘察,2002(2):59-63

第一作者简介:梅文胜,副教授。主要从事精密工程测量、测量机器人应用、工程信息系统等方面的研究和教学工作。

E-mail: wshmei@sgg.whu.edu.cn

3D Relative Datum Method in Positioning of Main Pylon of Cable-Stayed Bridge

MEI Wensheng¹ HAN Guoming² ZHANG Zhenglu¹

(1 School of Geodesy and Geomatics, Wuhan University, 129 Luoyu Road, Wuhan 430079, China)

(2 Frist Highway Engineering Bureau of CCCG, Guanzhuang, Chaoyang District, Beijing 100024, China)

Abstract: In order to satisfy the demands of the main pylon measure benchmark stakingout

(下转第 187 页)

- [6] 胡成发. 印刷色彩与色度学[M]. 北京:印刷工业出版社,1993
- [7] 景翠宁. 基于 ICC 标准的输出设备的色彩管理研究[D]. 西安:西安理工大学,2002
- [8] 朱龙云. 跨设备色彩管理技术及打印机 Profile 生成[D]. 西安:西安电子科技大学,2003
- [9] 胡太银. 面向色彩管理的可视化技术研究[D]. 西安:西安电子科技大学,2002

第一作者简介:车森,博士生,研究方向为地图可视化。
E-mail:chxyics@126.com

Realizing Color Management in Map Publishing System

CHE Sen¹ WU Mingguang¹

(1 Institute of Surveying and Mapping, Information Engineering University, 66 Middle Longhai Road, Zhengzhou 450052, China)

Abstract: Color information is the important element of the publication. But presently the color management level in domestic map publishing system is still low. It has influenced the efficiency and quality of the map publication. The shortages of color management in domestic map publishing systems is analyzed. And then based on the process of color management, the means of realizing color management in map publishing system is introduced in detail.

Key words: color management; Profile file; transition of color space

About the first author: CHE Sen, Ph.D candidate, majors in the visualization in modern cartography.

E-mail: chxyics@126.com

(上接第 171 页)

and the cable anchor-pipe positioning for cable-stayed bridge, a new Georobot relative datum 3D polar coordinate method is presented. The practice indicates the relative datum 3D polar coordinate method has several advantages, such as, high efficiency, high automation and high precise etc.

Key words: 3D relative datum method; stakingout; cable-stayed bridge; main pylon

About the first author: MEI Wensheng, associate professor, majors in precise engineering geodesy, Georobot application, engineering geo-information system.

E-mail: wshmei@sgg.whu.edu.cn