

DOI: 10.7672/sgjs2025110068

特大跨径悬索桥主缆锚固系统安装定位技术研究*

柳寅峰¹, 李桂华²

(1. 中化地质矿山总局浙江地质勘查院, 浙江 杭州 310000; 2. 河海大学地球科学与工程学院, 江苏 南京 211100)

[摘要] 锚固系统定位安装是特大跨径悬索桥施工中的重要工序,对测量精度和可靠性要求高。结合南京仙新路过江通道跨江主桥锚固系统定位安装工程,推导了空间三维锚固系统局部坐标系与桥轴施工坐标系的转换关系,实现了两者之间的直接转换,并根据安装精度建立安装定位专用精密控制网。基于高精度智能全站仪的精密测量方法和专用测量棱镜设备及测量精度估算,采用全站仪极坐标法锚固系统安装定位,在平面和高程方向上的精度可达到0.81,1.66mm,满足安装定位需求。

[关键词] 悬索桥;锚固;定位;安装

[中图分类号] TU198

[文献标识码] A

[文章编号] 2097-0897(2025)11-0068-05

Installation Technology and Positioning of Main Cable Anchorage System of Extra-long Span Suspension Bridge

LIU Yinfeng¹, LI Guihua²

(1. Zhejiang Geological Prospecting Institute of China Chemical Geology and Mineral Bureau, Hangzhou, Zhejiang 310000, China; 2. School of Earth Sciences and Engineering, Hohai University, Nanjing, Jiangsu 211100, China)

Abstract: The anchorage system positioning and installation is an important process in the construction of super-long-span suspension bridges, which requires extremely high measurement accuracy and reliability. Combined with the positioning and installation project of the anchorage system of the main bridge of the cross-river channel of Xianxin Road, Nanjing, the conversion relationship between the local coordinate system of the three-dimensional anchorage system and the construction coordinate system of the bridge shaft is deduced, and the direct conversion between the two is realized. A special precision control network for installation and positioning is established according to the installation accuracy. The polar coordinate method of the total station was used to install and locate the anchoring system based on the precision measurement method of the high-precision intelligent total station and the special measurement prism equipment and measurement accuracy estimation. The accuracy in the plane and elevation direction can reach 0.81, 1.66mm, respectively, which meets the needs of installation and positioning.

Keywords: suspension bridge; anchoring; positioning; installation

0 引言

主缆锚固系统作为悬索桥的关键部位,在整体桥梁上起着至关重要的作用,其精确安装定位很大程度上决定了桥梁的耐久与安全^[1-2]。随着我国桥梁技术的快速发展,悬索桥主桥跨径也越来越大,因此对锚固系统的安装精度提出了更高的要求。

部分学者^[3-5]以锚固系统安装测量工程为依托,采用全站仪对锚固系统安装定位进行测量控制,取得了较好的效果。设计图纸局部坐标与工程施工坐标转换问题是锚固系统安装的关键问题,周海生等^[6]以五峰山大桥北锚碇锚固系统为背景,对大角度空间直角坐标系转换模型进行推导,实现了锚固系统局部坐标系与桥轴坐标系的转换。

本文以南京仙新路过江通道跨江主桥锚固系统定位安装工程为背景,建立锚固系统局部坐标系与桥轴坐标系的通用严密转换模型。为了实现锚

* 中央高校基本科研业务费专项资金资助(B210205013)

[作者简介] 柳寅峰,助理工程师,E-mail: 201309020009@hhu.edu.cn

[收稿日期] 2024-12-25

固系统的精确安装,采用全球导航卫星系统(global navigation satellite system, GNSS)静态测量方法对控制网进行加密,建立锚固系统专用控制网,并制作了新型测量工装,采用合理的测量方法和监测方法对锚固系统安装定位进行控制。

1 工程概况

仙新路过江通道位于南京栖霞山大桥和南京八卦洲大桥之间,主桥部分起于栖霞区仙新路,向北跨长江至江北新区玉渡路,主桥跨径 1 760m。仙新路过江通道南锚碇主缆锚固系统由后锚梁和锚杆组成。安装完成后分层浇筑混凝土,后锚梁全部埋于锚体混凝土内,锚杆一端通过小牛腿螺栓孔与后锚梁连接,另一端伸出锚碇锚体前锚面与主缆连接。

仙新路过江通道左右幅南锚碇锚体各布置后锚梁 9 根,锚杆 103 根,其中锚杆分单束锚杆和双束锚杆。南锚碇主缆锚固系统的主缆理论散索点高程为 33.085m,高程系统采用 1985 国家高程基准。主缆在散索鞍处的入射角为 20.485°。主缆理论散索中心线与水平面的夹角为 39°。南锚碇锚体中心距桥轴线 13.85m。锚体顺桥向长 64.75m,横桥向宽 62.8m。

2 控制测量

2.1 坐标系

主缆锚固系统图纸设计坐标系如图 1 所示。 O 为理论散索点, x 轴为理论散索中心线, y 轴垂直于 x 轴向上, z 轴与 x, y 轴构成右手坐标系。

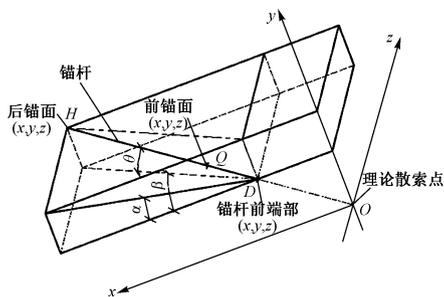


图 1 主缆锚固系统局部坐标系

Fig. 1 Local coordinate system for main cable anchoring system

现场安装测量采用桥轴坐标系,如图 2 所示,桥轴坐标系以桥轴线为 x 轴,由小里程(南)至大里程(北)方向为正向; y 轴垂直于桥轴线,上游向下游方向为正向, z 轴与 x, y 轴构成左手坐标系,南锚碇中心点在桥轴坐标系下的坐标为 (6 374.600, 5 000.000)。

为了方便现场安装测量,测量前需要将待测点

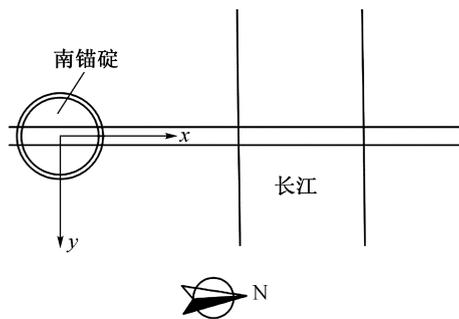


图 2 桥轴坐标系

Fig. 2 Bridge axis coordinate system

的局部坐标转换为桥轴坐标。根据设计图纸得到理论散索点在桥轴坐标系下的坐标为 (6 395, 5 000, 33.085),在局部坐标系下的坐标为 (0, 0, 0)。由此应用三维空间直角坐标转换模型可以得到桥轴坐标系与局部坐标系的转换关系为:

$$x = -X\cos 39^\circ - Y\sin 39^\circ + 6\,395 \quad (1)$$

$$y = Z + 5\,000 \pm 13.85 \quad (2)$$

$$z = -X\sin 39^\circ + Y\cos 39^\circ + 33.085 \quad (3)$$

式中: (x, y, z) 为点在桥轴坐标系下的坐标; (X, Y, Z) 为点在主缆锚固系统局部坐标系下的坐标。

2.2 锚固系统专用控制网

采用桥轴坐标系进行安装定位需要控制网为其提供精确的坐标基准,考虑锚固系统所在测区范围内已有控制点的通视条件较差,无法满足安装定位的需求,因此在首级控制网的基础上加密锚固系统专用控制点,用于主缆锚固系统的各部位测量定位。

仙新路过江通道南岸共 6 个首级控制点,3 个加密控制点采用强制对中观测墩,可以将仪器对中误差降低到最低。考虑到南锚碇荷载大、基坑开挖深度大、地质条件差,在主缆锚固系统的安装测量中基坑会发生沉降,因此在南锚碇桥梁中心线处建立测量塔,在塔顶布设控制点 JM1,即能测量到锚碇左右幅的绝大多数测点,又能够反映基坑沉降, JM2 和 JM3 控制点分别布设在锚碇东西两侧。锚固系统专用控制网如图 3 所示。

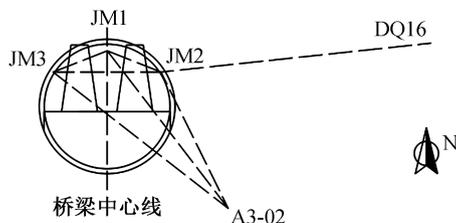


图 3 锚固系统专用控制网

Fig. 3 Dedicated control network for anchoring system

2.3 平面控制测量

平面控制网采用 GNSS 静态测量技术,测量过程严格按照二等 GNSS 控制网精度要求执行^[7-10]。GNSS 静态测量可获得丰富的多余观测,通过基线解算和网平差可以提高控制点的定位精度^[11]。将 6 台 Trimble R8 接收机同时安置在 3 个首级控制点和 3 个加密控制点上,天线定向标志指向正北方向,每个时段观测前后应各量取天线高 1 次,每次量取互成 120°角的 3 个位置高度,取平均值作为最后的天线高。

将原始观测数据下载后,采用 Trimble Business Center(TBC)软件进行控制网平差处理,按照以下步骤进行。

1) 基线解算

基线解算是对 2 台及以上接收机同步观测值进行独立基线向量的计算。基线解算涉及一系列的参数设置,坐标系应采用大地坐标系,一般采用 WGS84;然后通过尝试不同的 GNSS 系统、载波频段、星历类型、截止高度角、处理时间间隔等参数组合方案,根据基线解算报表中的 Ratio 值、RMS 等是否超过所设置的标准确定最佳组合方案。对于残差较大的卫星和时段,可以将其剔除后再进行重新解算,直到符合要求并生成固定解为止。本次观测中三维基线向量在 x, y, z 方向上的最大残差 V_x 为 -1.3mm , V_y 为 -9.4mm , V_z 为 -5.9mm , 限差为 16.2mm 。

2) 三维无约束平差

GNSS 网的无约束平差除引入 1 个起算点坐标外,不引入其他外部起算数据,其结果用来衡量内符合精度情况。求解各点在 WGS84 坐标系下的三维坐标,平差后最弱边边长相对中误差为 $1/334\ 702$,最弱点点位中误差 2.0mm 。

3) 二维约束平差

GNSS 网坐标转换到施工坐标系需使用地面已知点进行约束平差。约束平差最弱点为 DQ14,最弱边为 A3-08 ~ DQ16,其边长相对中误差为 $1/308\ 000$,约束平差后的各项指标均满足规范要求。

2.4 高程控制测量

高程控制测量采用二等水准测量的方法,测量仪器选用 Trimble Dini 03 电子水准仪及配套因瓦水准尺,测量过程严格按照 GB/T 12897—2006《国家一、二等水准测量规范》进行。二等水准测量主要技术指标中 $3\text{m} \leq \text{视距} \leq 50\text{m}$,前后视距差 $\leq 1.5\text{m}$,前后视距累计差 $\leq 6\text{m}$, $0.55\text{m} \leq \text{视线高度} \leq 2.8\text{m}$,水准仪重复测量次数 ≥ 2 次。二等水准测量精度要

求每千米测量偶然中误差 1mm ,全中误差 2mm ,往返测测高不符值 $4\sqrt{L}\text{mm}$,附和线路或环形闭合差 $4\sqrt{L}\text{mm}$, L 为附和线路长度,各测段往返测高差不符值合格后进行平差计算。

3 主缆锚固系统安装

由于棱镜对中杆在后锚梁和锚杆特征点上立点困难,后锚梁和锚杆安装采用新型测量工装,如图 4 所示,棱镜中心高 93.7mm ,宽 30mm ,长 35.4mm 。新型工装分为上下两部分,上部是小棱镜,通过实测数据与 Leica 原装棱镜实测数据对比可知无偏差,下部是开关磁铁,可以吸附在后锚梁和锚杆上,与常规的对中杆比较,本次锚固系统安装测量应用的新型测量工装对中误差较小。



图 4 新型测量工装

Fig. 4 New measuring equipment

3.1 安装定位精度估算

后锚梁安装中心偏位允许偏差 $\pm 5\text{mm}$,偏角 0.15° 。锚杆安装 x, y, z 轴允许偏差 $\pm 10, \pm 5, \pm 5\text{mm}$ 。

3.1.1 平面精度估算

极坐标法测量点位 P 的平面坐标计算公式如下^[12]:

$$x_p = x_0 + S \sin V \cos \alpha \quad (4)$$

$$y_p = y_0 + S \sin V \sin \alpha \quad (5)$$

考虑到控制点中误差,根据误差传播定理可得:

$$m_x^2 = \sin^2 V \cos^2 \alpha m_s^2 + S^2 \cos^2 V \cos^2 \alpha \frac{m_v^2}{\rho^2} +$$

$$S^2 \sin^2 V \sin^2 \alpha \frac{m_\alpha^2}{\rho^2} + m_1^2 + m_r^2 \quad (6)$$

$$m_y^2 = \sin^2 V \sin^2 \alpha m_s^2 + S^2 \cos^2 V \sin^2 \alpha$$

$$\frac{m_v^2}{\rho^2} + S^2 \sin^2 V \cos^2 \alpha \frac{m_\alpha^2}{\rho^2} + m_2^2 + m_r^2 \quad (7)$$

式中: ρ 取 $206\ 265$, m_1 和 m_2 分别是控制点在 x, y 方向上的中误差, $m_1 = \pm 0.6\text{mm}$, $m_2 = \pm 0.6\text{mm}$, m_r 是棱镜立点误差,取 $\pm 0.5\text{mm}$ 。采用标称精度为 $0.5''$, $0.6\text{mm} + 1\text{ppm}$ 的 Leica TM50 全站仪观测时,其他参数取最不利的情况,距离 S 取 50m ,天顶距 V 取 120° ,方位角 α 取 45° 。通过计算,测距中误差 $m_s = 0.65\text{mm}$,天顶距中误差 m_v 和方位角中误差 m_α 均

取 $0.5''$, 通过计算可得 m_x 和 m_y 均为 0.81mm 。

3.1.2 高程精度估算

锚固系统安装高程测量采用全站仪三角高程测量的方法, 由于测量距离较近, 球气差可忽略不计, 则测站点到待测点之间的高差 H 计算公式为:

$$H = S_1 \times \cos V + i - j \quad (8)$$

式中: S_1 是测站点到待测点之间的斜距; i 为仪器高; j 为棱镜高。考虑到控制点高程中误差 m_3 , 根据误差传播定理可以得出高差中误差 m_H 的计算公式为^[13]:

$$m_H = \sqrt{\cos^2 V m_s^2 + S^2 \sin^2 V \frac{m_v^2}{\rho^2} + m_i^2 + m_j^2 + m_3^2} \quad (9)$$

式中: m_v 取 $\pm 0.5''$, ρ 取 $206\,265$, m_i 和 m_j 取 $\pm 0.5\text{mm}$, m_3 取 $\pm 1.43\text{mm}$, 通过计算得到待测点的高程中误差 $m_H = \pm 1.66\text{mm}$ 。

以 2 倍中误差为极限误差, 则待测点在 x, y, z 向的极限误差 $\delta_x, \delta_y, \delta_z$ 分别为:

$$\delta_x = \pm 2 \times 0.81\text{mm} = \pm 1.62\text{mm} \quad (10)$$

$$\delta_y = \pm 2 \times 0.81\text{mm} = \pm 1.62\text{mm} \quad (11)$$

$$\delta_z = \pm 2 \times 1.66\text{mm} = \pm 3.32\text{mm} \quad (12)$$

后锚梁安装中心偏位允许偏差 $\pm 5\text{mm}$ 。锚杆安装 x, y, z 轴允许偏差分别为 $\pm 10, \pm 5, \pm 5\text{mm}$ 。通过计算可以看出 x, y, z 向极限误差均小于允许偏差, 测量精度满足施工要求。

3.2 锚固系统安装测量

3.2.1 后锚梁安装测量

在后锚梁安装测量前, 通过设计图纸给出的尺寸和空间姿态, 采用坐标正算可得到后锚梁各特征点在局部坐标系下的坐标, 再将其坐标归算至新型测量工装棱镜中心。由于局部坐标系不能直接用于后锚梁安装定位, 还需通过三维空间坐标转换将局部坐标转换至桥轴坐标系。

后锚梁和锚杆安装测量仪器选用 Leica TM50 全站仪, 并且在测量前使用干湿温度计和气压计精确测定气象元素以进行气象改正。由于主缆锚固系统的施工时间长, 考虑到气象元素变化对测量精度的影响, 本次安装测量选择在气象元素变化较稳定的夜间进行^[14]。当后锚梁就位后, 由测量人员对后锚梁的特征点进行测量复核, 并与设计值对比, 再进行调节以确保后锚梁的精确安装。后锚梁安装测量采用极坐标测量方法, 在 MZ 安置仪器, 观测 A3-02 完成后视定向, 为了满足现场施工放样要求, 通过加密点将首级点进行串联, 在实测过程中检核首级点, 完成测站设置后, 在后锚梁特征点上依次

安置棱镜并记录数据。

3.2.2 锚杆安装测量

锚杆安装测量与后锚梁类似。锚杆中心线在锚杆前端部、前锚面和后锚面的局部坐标由设计图给出, 由于锚杆中心线处无法立棱镜, 因此在锚杆安装测量前, 需将锚杆中心线处的坐标归算至锚杆特征点棱镜中心的桥轴坐标, 锚杆测量特征点如图 5 所示。

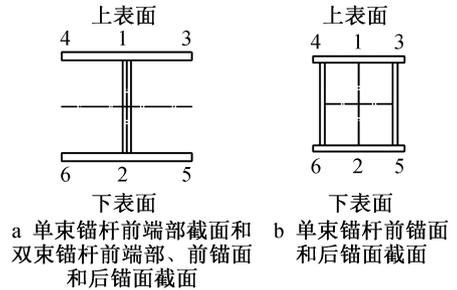


图 5 锚杆测量特征点

Fig. 5 Anchor rod measurement characteristic points

锚杆一端与后锚梁连接, 锚杆安装前需要对相应后锚梁上螺栓孔中心点进行测量复核, 以确保锚杆的精确安装定位。当锚杆就位后, 为了比较直观地指导现场调整方向, 通过实测锚杆长度计算 y, z 与设计值之差进行现场调整。

3.2.3 锚固系统变形监测

由于后锚梁和锚杆是分批安装, 后锚梁混凝土是分层浇筑, 即锚固系统的工况一直在变, 在每批后锚梁和锚杆安装完成后需对所有已安装的后锚梁和锚杆进行复测调整, 以确保整个锚固系统最终成品测量满足规范要求。整个锚固系统安装完成后, 在静置状态下每隔 2h 监测 1 次锚固系统, 以检验光照、温度等环境因素对主缆锚固系统的影响, 确定最佳的混凝土浇筑时间。混凝土分 4 层浇筑, 考虑荷载对锚固系统的影响, 每层混凝土浇筑过程中需监测锚杆偏位, 并进行及时调整, 浇筑混凝土后需复核测量锚杆前端部角点和轴线点等特征点的坐标。

4 安装定位结果

为了预防基坑沉降对主缆锚固系统的影响, 南锚碇右幅锚杆在 y 向按照极限正偏差 5mm 控制, 第 4 层锚体混凝土浇筑完成后, 后锚梁和锚杆中下部全部埋入混凝土中。混凝土浇筑后, 对南锚碇右幅每根锚杆前端上表面 2 个角点和轴线点进行复测, 共计 309 个点。混凝土浇筑后进行锚杆竣工测量。

根据竣工测量结果, 发现有 170 个测点在 y 向偏差超过允许偏差 $\pm 5\text{mm}$, 占测点总数的 55%。经

分析认为,锚杆全部吊装完成后,荷载基本不再增加,锚杆支架牢固,后续施工过程中锚杆不再发生下沉,锚杆中下部埋入混凝土内,受混凝土自重影响,锚杆前端发生上翘,上翘幅度在1~3mm,导致较多锚杆在y向偏差超限。在总结经验的基础上,本次复测将所有能调节的锚杆y向偏差进行重新调整,控制标准为-2~2mm,部分底层锚杆基本全部埋入混凝土内,无法调整,存在偏差超限情况。吸取了南锚碇右幅锚固系统安装经验,南锚碇左幅锚固系统在调整后验收测量满足设计允许偏差。整个锚固系统安装定位允许偏差合格率为93%。

5 结语

南京仙新路过江通道主缆锚固系统采用现场拼装工艺,各部件的安装定位均由施工测量指导完成。研究了基于高精度智能全站仪的精密测量方法和专用测量棱镜设备以及测量精度,并对锚固系统在混凝土浇筑过程中的变形进行了连续监测。本次南锚碇主缆锚固系统采用的测量方法简便,定位精度稳定可靠,可以满足安装定位的精度要求。

参考文献:

- [1] 张其玉,汤剑辉,刘高超,等. 莫桑比克马普托大桥型钢锚固系统定位与安装技术[J]. 公路交通科技(应用技术版), 2019,15(12):281-286.
ZHANG Q Y, TANG J H, LIU G C, et al. Positioning and installation techniques for profile anchorage systems for the Maputo bridge in Mozambique [J]. Journal of highway and transportation research and development, 2019, 15 (12): 281-286.
- [2] 肖仕周,王强,祝长春,等. 海外大型悬索桥型钢锚固系统安装定位技术[J]. 公路,2017,62(11):116-121.
XIAO S Z, WANG Q, ZHU C C, et al. Installation and positioning technology of section steel anchorage system for overseas large suspension bridges[J]. Highway,2017,62(11):116-121.
- [3] 岳德威. 悬索桥主缆锚固系统施工测量控制[J]. 黑龙江交通科技,2021,44(1):125-126,128.
YUE D W. Measurement control for construction of main cable anchorage system of suspension bridge [J]. Communications science and technology Heilongjiang, 2021, 44 (1): 125-126, 128.
- [4] 方鸿斌,田明,易继武. 矮寨大桥锚碇锚固系统测量定位[J]. 中外公路,2018,38(5):109-111.
FANG H B, TIAN M, YI J W. Measurement and positioning of anchor anchorage system of Zhuozhai Bridge[J]. Journal of China & foreign highway,2018,38(5):109-111.
- [5] 黄阳林,朱文军,谢东,等. 南京长江第四大桥北锚碇锚固系统安装测量定位[J]. 公路,2010,55(6):25-29.
HUANG Y L, ZHU W J, XIE D, et al. Measurement and positioning for the installation of anchoring system of north anchor of Nanjing Yangtze River Bridge No. 4 [J]. Highway, 2010,55(6):25-29.
- [6] 周海生,田远福. 锚碇基础动态条件下的锚固系统空间姿态严密测定方法[J]. 测绘通报,2021(S2):130-135.
ZHOU H S, TIAN Y F. A method for the rigorous determination of the spatial attitude of the anchoring system under dynamic conditions of the anchor foundation[J]. Bulletin of surveying and mapping,2021(S2):130-135.
- [7] 李明峰,刘支亮,王永明,等. 大旋转角空间直角坐标转换改进模型研究[J]. 大地测量与地球动力学,2017,37(5):441-445.
LI M F, LIU Z L, WANG Y M, et al. Study on the improvement model of spatial Cartesian coordinate transformation with large rotation angle[J]. Journal of geodesy and geodynamics,2017,37(5):441-445.
- [8] 陈再辉. 三维空间直角坐标转换的 Bursa 模型抗差解法[J]. 导航定位学报,2021,9(2):118-121.
CHEN Z H. Anti-differential solution of the Bursa model for three-dimensional spatial rectangular coordinate transformations [J]. Journal of navigation and positioning,2021,9(2):118-121.
- [9] 刘磊,何占国,郑作亚,等. 大角度三维坐标转换参数的一种迭代解法[J]. 测绘科学,2021,46(6):65-69,76.
LIU L, HE Z G, ZHENG Z Y, et al. An iterative solution for large-angle 3D coordinate transformation parameters[J]. Science of surveying and mapping,2021,46(6):65-69,76.
- [10] 黄丁发,张勤,张小红,等. 卫星导航定位原理[M]. 武汉:武汉大学出版社,2015.
HUANG D F, ZHANG Q, ZHANG X H, et al. Principles of satellite navigation and positioning [M]. Wuhan: Wuhan University Press,2015.
- [11] 姚鹏,汪培,覃雪梅,等. 县级2000国家坐标系控制网设计与实现[J]. 测绘与空间地理信息,2022,45(7):201-204.
YAO P, WANG P, QIN X M, et al. Design and realization of county-level 2000 national coordinate system control network[J]. Geomatics & spatial information technology, 2022, 45 (7): 201-204.
- [12] 牟建华,王成荣,刘俊岩. 全站仪极坐标法的基坑水平位移监测误差分析与控制研究[J]. 测绘与空间地理信息,2020,43(5):171-175.
MU J H, WANG C R, LIU J Y. Research on error analysis and control of pit horizontal displacement monitoring by total station polar coordinate method [J]. Geomatics & spatial information technology,2020,43(5):171-175.
- [13] 华锡生,黄腾. 精密工程测量技术及应用[M]. 南京:河海大学出版社,2002.
HUA X S, HUANG T. Precision engineering measurement technology and applications [M]. Nanjing: Hohai University Press,2002.
- [14] 刘新峰. 大气竖直折光对三角高程测量影响因素的研究[J]. 东华理工大学学报(自然科学版),2016,39(S1):166-168.
LIU X F. A study of the factors influencing atmospheric vertical refraction on triangular elevation measurements [J]. Journal of East China University of Technology (natural science), 2016, 39 (S1): 166-168.