

沉管测量塔的反标定技术在深中通道工程中的应用

王伟¹, 锁旭宏^{2,3*}, 马得森⁴, 刘兆权¹, 宁进进¹

(1. 中交第一航务工程局有限公司, 天津 300461; 2. 兰州交通大学测绘与地理信息学院, 甘肃 兰州 730070;
3. 中交一航局第二工程有限公司, 山东 青岛 266071; 4. 中交一航局华南工程有限公司, 广东 佛山 528000)

摘要: 沉管隧道施工中, 测量塔安装后沉管处于漂浮状态, 在晃动状态下获取测量塔上安装定位设备位置和沉管几何关系较为困难。提出反标定的测量方法, 包括测控系统标定和定位精度校正, 其中测控系统标定包括管节初始标定、测量塔初始标定, 定位精度校正包括建立施工坐标系、数据处理、精度比对及校正。通过在管顶特征点上架设 GNSS 接收机实时采集其坐标并与测量塔测控系统的实时解算结果比对, 通过工程案例对反标定前后的中误差进行分析。反标定后中误差的显著减小, 证明了反标定方法在提高测量精度方面的有效性, 从而确保了沉管安装过程的准确性和可靠性。

关键词: 沉管隧道; 测量塔; 沉管安装; 标定

中图分类号: U652.62 文献标志码: B 文章编号: 2095-7874(2024)05-0081-05

doi: 10.7640/zggwjs202405013

Application of back-calibration technology for immersed tube measuring tower in the Shenzhen-Zhongshan Link project

WANG Wei¹, SUO Xu-hong^{2,3*}, MA De-sen⁴, LIU Zhao-quan¹, NING Jin-jin¹

(1. CCCC First Harbor Engineering Co., Ltd., Tianjin 300461, China; 2. Faculty of Geomatics, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou, Gansu 730070, China; 3. No.2 Engineering Co., Ltd. of CCCC First Harbor Engineering Co., Ltd., Qingdao, Shandong 266071, China; 4. South China Engineering Co., Ltd. of CCCC First Harbor Engineering Co., Ltd., Foshan, Guangdong 528000, China)

Abstract: During the construction of immersed tube tunnels, the immersed tube is in a floating state after the installation of the measurement tower, and it is difficult to acquire the position of the installed positioning equipment on the measuring tower and the geometric relationship with the immersed tube due to its swaying state. A "back-calibration" measurement method is proposed, which includes the calibration of the measurement and control system and the correction of positioning accuracy. The calibration of the measurement and control system encompasses the initial calibration of the tube section and the measuring tower. The correction of positioning accuracy includes establishing the construction coordinate system, data processing, accuracy comparison, and correction. By installing a GNSS receiver on the top feature points of the tube to collect its coordinates in real-time and compare them with the real-time calculation results of the measurement tower's control system, an analysis of the root mean square error before and after back-calibration is conducted through engineering cases. The significant reduction in root mean square error after back-calibration proves the effectiveness of the back-calibration method in improving measurement accuracy, thereby ensuring the accuracy and reliability of the immersed tube installation process.

Key words: immersed tube tunnel; measuring tower; immersed tube installation; calibration

收稿日期: 2024-01-02 修回日期: 2024-03-11

作者简介: 王伟 (1978—), 男, 陕西富平人, 硕士, 高级工程师, 测绘工程专业, 主要从事沉管隧道施工技术管理与研究工作。

*通讯作者: 锁旭宏, E-mail: 1398900215@qq.com

0 引言

近年来,随着社会的发展,跨海通道大型沉管隧道不断涌现,沉管隧道建设规模越来越大,沉管体量也越来越大,安装精度要求也越来越高。随着测量仪器的迅速发展和测量技术的不断更新,

水下定位测量方法也在不断提高^[1-3]。目前,国内外沉管管节的水下定位基本测量方法主要有绝对定位法和相对定位法,其中绝对定位法包括全站仪法、GNSS-RTK法,相对定位法包括声呐法和机械拉线法。沉管水下定位测控方法示意图见图1。

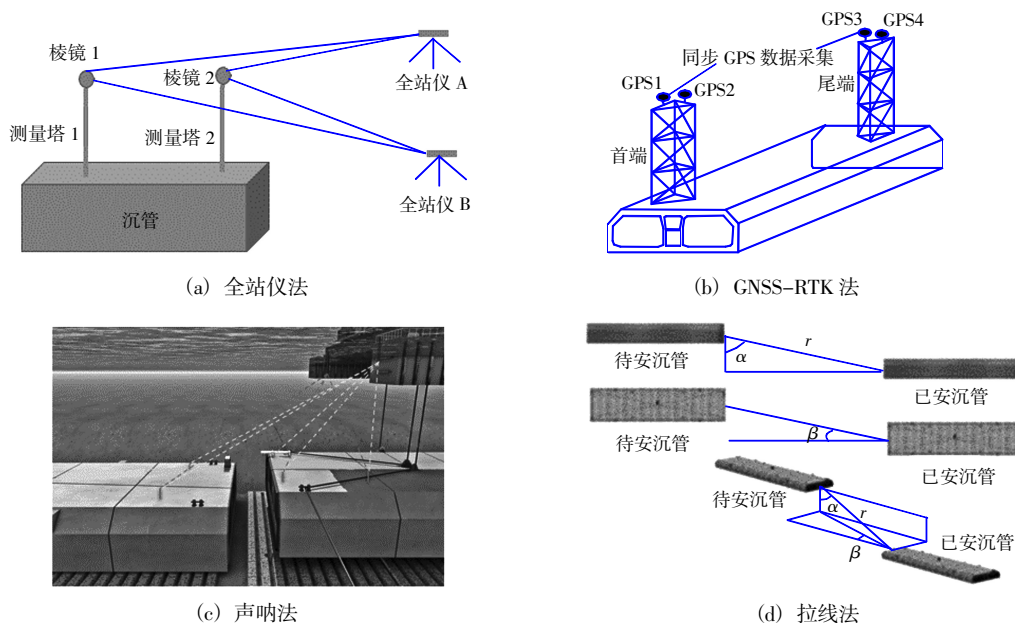


图1 沉管定位测控方法示意图

Fig. 1 Schematic diagram of immersed tube positioning measurement and control method

测量塔法是将GNSS-RTK测量与水下测量相结合的高精度、高可靠性测量方法,在多个项目中得到广泛应用。在沉管安装过程中,测量塔标定受风浪流等自然环境因素影响,精度控制难度增大。为解决这一问题,本文提出一种沉管安装测量塔定位精度反标定校正方法,旨在提高标定可靠性,降低测控风险,保障沉管安装精度^[4-5]。

首先,沉管预制结束后,在干坞内对管节顶面、端面及内部特征点进行标定测量,建立管节独立的坐标系。并在管顶布设测控系统标定测量的控制点。

其次,根据测量塔法安装定位的技术要求,在管节顶面安装一定高度的铁塔,用以安装GNSS天线和全站仪棱镜。然而,测量塔安装后安装船不能套入沉管,与沉管合体,因此测量塔不能在干坞里安装。塔顶的GNSS天线和全站仪棱镜安装位置标定测量也要在深坞船管合体^[6-7],二次舾装后管节出坞前完成。此时,管节已经浮起,并处于动荡状态,需采用动态测量方法将测量塔上的定位设备位置标定到干坞内标定时的管节坐标系中^[8]。

针对以上问题,提供了一种沉管安装测量塔定位精度反标定校正方法,用以提高测量塔标定精度的可靠性、降低沉管对接测控风险、保障沉管安装精度。

1 反标定及坐标转换关系

1.1 反标定

在沉管测量标定过程中使用反标定方法,针对常规方法标定管节自身坐标系成果,运行测控系统使用GNSS-RTK反向校正参数,进而减小标定误差的校正方法。通过反标定,可以降低测量数据中的系统误差和随机误差,提高标定测量结果的精度和可靠性。

在反标定过程中涉及到管节坐标和施工坐标,需要进行坐标转换。在实际应用中,反标定和坐标转换关系密切关联,通过对测量设备进行反标定,可以得到更精确的标定参数,进而提高测量和控制的精度,解决了在浮态状态下精确标定问题。

1.2 坐标系统及转换

1.2.1 管节坐标系

取钢壳实际轴线在钢壳底面投影为 x 轴,以指向首端的方向为 x 轴正方向, x 轴与首端端钢壳

下边线交点为原点 o 。使用左手法则建立 y 坐标轴, 过原点 o 做垂直于 xoy 平面的线为 z 轴, 以向上方向为 z 轴正方向。取钢壳底面设计高程为钢壳坐标系的高程基准, 管节坐标系示意图见图 2。

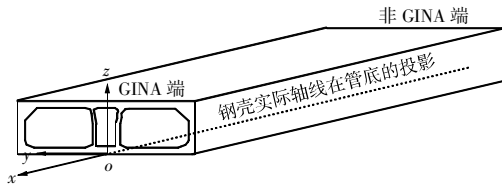


图 2 管节坐标系示意图

Fig. 2 Schematic diagram of pipe section coordinate system

1.2.2 施工坐标系

平面坐标系采用深中通道独立坐标系, 中央子午线经度为 $113^{\circ}42'52.69''$, 投影面高程为正常高 35 m, 采用国家 2000 大地坐标系椭球参数, 以 SZ02 为起算点, 假定 $XSZ02=150\ 000\text{ m}$, $YSZ02=250\ 000\text{ m}$, 以 1980 西安坐标系中的 SZ02—SZ09 的方位角作为深中通道独立坐标系的已知方位角, 按一点一方向法建立独立坐标系^[9]。

高程采用 1985 国家高程基准。

1.2.3 坐标系转换方法

1) 平面直角坐标系的关系

2 个不同坐标系统中平面坐标之间的差异可用 4 个参数表示。

2) 空间坐标转换方法

坐标系统转换包括 2 个内容: 一是根据 2 个坐标系统中的同名点, 解算转换参数; 二是已知坐标系统间的转换计算。在测量塔反标定过程中, 坐标转换关系起到重要作用^[10]。

2 测量塔反标定方法

沉管安装测量塔定位精度反标定校正方法主要包括以下步骤: 测控系统标定和定位精度校正。测控系统标定分为管节初始标定和测量塔初始标定; 而定位精度校正则包括 GNSS-RTK 同步标定、数据处理以及精度比对和校正。

2.1 初始标定

2.1.1 管节初始标定

在干坞区建立管节坐标系, 并对管节顶面的首尾两端各布设若干管顶特征点, 进行管节坐标系下的坐标标定。标定过程中, 采用高精度的全站仪或激光扫描仪对管顶特征点进行测量, 记录各特征点的空间坐标。

2.1.2 测量塔初始标定

将管节移至深坞区, 在管节顶面的首尾两端

各安装 1 个测量塔, 并在塔顶特征点处布设 GNSS 天线, 利用管顶特征点对 GNSS 天线进行管节坐标系下的坐标标定。在此过程中, 需要确保 GNSS 天线与管顶特征点之间的相对位置关系稳定不变。特征点分布见图 3。

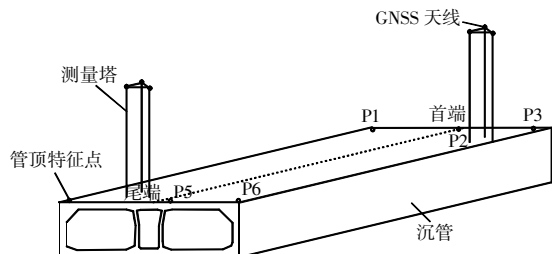


图 3 标定点位示意图

Fig. 3 Schematic diagram of the points of calibration

2.2 定位精度校正

2.2.1 GNSS-RTK 同步标定

根据工程设计阶段已建立的深中施工坐标系进行测量塔的坐标转换。将测量塔的初始坐标系与施工坐标系进行匹配, 确保测量塔在施工坐标系下的定位精度。

通过在管顶特征点上架设 GNSS 接收机实时采集其坐标并与测量塔测控系统的实时解算结果比对, 在管节沉放前对测量塔进行标定误差校正, 剔除可能的粗差或其他错误, 提高测量塔标定精度和可靠性, 保障沉管安装精度。

在测量塔初始标定的步骤中, 利用管顶特征点对 GNSS 天线进行标定时, 通过确定 GNSS 天线与各管顶特征点之间的相对位置关系, 标定 GNSS 天线于管节坐标系下的坐标。利用管顶特征点实现对测量塔在管节坐标系下的坐标校正。

2.2.2 数据处理

将 GNSS 接收机安装在管节顶部的指定特征点上, 以实时收集坐标数据。此过程持续进行 15 min, 以确保特征点坐标采集的准确性。这些实时坐标代表了安装过程中特征点的实际位置。

随后, 收集到的实时坐标与测量塔控制系统计算出的坐标比较, 旨在识别实际位置与计算位置之间的差异, 从而评估测量塔的定位精度。

将 GNSS 天线在施工坐标系下的定位结果与管节坐标系下标定的坐标结果结合。基于此结合, 推导出实时平面转换参数, 包括 4 个参数(X 方向平移、 Y 方向平移、旋转和比例因子)和高程。

根据实时平面转换参数, 测量塔的控制系统将管顶特征点在管节坐标系下的标定坐标结果转

换为施工坐标系下的理论施工坐标。利用不同坐标系下的坐标转换方法,实现了管顶特征点在施工坐标系下的理论施工坐标的实时解算。

实时平面转换参数主要包括平移参数(T_x , T_y), 旋转参数(θ)及比例因子(S)。给定2组坐标系,即管节坐标系下的标定坐标(X' , Y')和施工坐标系下的理论施工坐标(X , Y),转换公式可以表示为:

$$X=S(X'\cos\theta-Y'\sin\theta)+T_x \quad (1)$$

$$Y=S(X'\sin\theta+Y'\cos\theta)+T_y \quad (2)$$

式中: θ 为管节坐标系相对于施工坐标系的旋转角度; S 为比例因子; T_x 和 T_y 分别为在 X 轴和 Y 轴上的平移量。

2.2.3 精度比对及校正

完成数据处理后,将通过实时平面转换参数计算得到的管顶特征点的理论施工坐标与GNSS接收机实时采集的实际施工坐标比对,旨在识别和评估定位精度是否满足预定的工程精度要求。若比对中偏差超出了允许误差范围,表明需要对测量塔的定位系统进行进一步的标定误差校正。

在校正过程中,采用最小二乘法或其他高级优化算法来求解最优的标定参数。这些算法能够通过分析偏差数据,精确调整测量系统的参数,从而最小化定位误差,提高测量塔的定位精度。

对于精度比对及校正步骤中的偏差评估,设定了严格的限差要求:在施工坐标系下,管顶特征点的定位偏差在 X 方向和 Y 方向上均不得超过

1 cm。这一限差标准是基于工程精度需求设定的,确保了沉管安装过程的准确性和可靠性。

通过上述精细的比对及校正流程,不仅可以确保测量塔定位系统的精度符合工程要求,还可以在发现偏差时及时进行调整,确保整个沉管安装过程的高效性和精确性。

2.3 标定结果验证

为验证标定结果的有效性,需要进行标定结果的验证。通过录入新的标定参数,重新测量管顶特征点的坐标,并与初始标定结果进行比对,评估标定后的测量塔定位精度。若验证结果满足精度要求,则标定过程成功。

沉管安装测量塔定位精度反标定校正方法用于管节的沉放作业时,定位精度校正可在隧址现场进行。实现了管节在隧址现场沉放作业前的测量塔定位精度反标定校正,确保管节在隧址现场沉放作业时的对接精度。

3 工程应用

在深中通道测量塔标定过程中,采用反标定校正方法以提高测控系统参数精度。通过比较初始标定结果与反标定结果,选取合理的标定参数或对标定参数进行修正。以某管节为例,介绍通过反标定方法选取高精度参数的过程。

3.1 参数获取与比较

在EN管节的标定过程中,采取了初始标定和反标定2种方法以获取不同的标定参数。这些参数的详细比较见表1,分析初始标定与反标定的结果,为参数优化提供了依据。

表1 2种标定结果

Table 1 Two calibration results

点号	测量塔初始标定成果/m			测量塔反标定修正成果/m			差值/mm		
	X	Y	Z	X	Y	Z	ΔX	ΔY	ΔZ
S1	-6.225 2	8.840 5	33.969 3	-6.222 0	8.851 0	33.963 0	3.2	10.6	-6.3
S2	-6.236 1	13.033 3	33.971 6	-6.237 0	13.034 0	33.965 0	-0.9	0.7	-6.6
S3	-9.840 2	10.936 3	33.971 2	-9.838 0	10.939 0	33.965 0	2.2	2.7	-6.1
W1	-158.670 0	-8.806 5	36.971 5	-158.666 0	-8.813 0	36.976 0	4.0	-6.5	4.5
W2	-158.633 2	-12.964 0	36.964 4	-158.625 0	-12.969 0	36.967 0	8.2	-5.0	2.6
W3	-155.059 2	-10.914 9	36.975 5	-155.054 0	-10.925 0	36.979 0	5.2	-10.1	3.5

3.2 参数设置

在施工前,将初始标定和经过优化的反标定2组参数录入测控系统中。这2组参数将在后续流程中用于数据比对和分析。

3.3 数据采集

在预定的管节顶面特征点上,利用全站仪在

沉管段沉放过程中实时采集精确的施工坐标,作为后续测控系统数据分析的参考标准。

3.4 数据分析

使用上述2组参数,测控系统分别采集100组数据。将这些数据与全站仪采集的施工坐标进行差值比较,计算平均差值,并据此评估2组参

数下的中误差,以此作为精度提高的衡量标准。

初始标定测量数据呈现较大的随机分布,其中误差计算结果为 3.90 cm。这反映了在没有应用反标定校正方法前,测量过程受到各种因素干扰导致的精度不足。

反标定后,通过优化测量参数并应用反标定技术,测量数据显示出更高的一致性。相应的中误差降低到 1.83 cm,明显低于校正前的值。该数据显著地减少说明反标定校正方法有效地提高了测量精度,减少了数据的随机误差,增强了测量结果的可靠性。

通过对 100 组测量数据的分析,展示了反标定校正方法在实际应用中显著降低了中误差,从而提高了测量精度。中误差从 3.90 cm 降低到 1.83 cm,清晰地证明了该方法的有效性,为沉管隧道等大型工程项目中提高测量精度提供了有力支持。反标定修正成果精度比对差值优于初始标定成果。因此,选择反标定修正成果作为测量塔标定参数应用于沉管安装。

4 结语

随着我国基础设施建设不断推进,深海隧道工程数量增加,反标定技术在测量塔定位精度中的应用为高精度安装提供了有力支持。但实际应用中仍面临挑战和不足,需进一步研究和改进。

1) 复杂环境因素如风速、浪高、潮汐等影响反标定技术的稳定性和精度。研究如何在这些环境下提高反标定技术的稳定性和精度至关重要。

2) 当前反标定技术主要依赖坞内稳定环境,后续工程中需关注外海动态条件下的标定问题。

3) 人工智能和大数据技术的发展有望推动反标定技术的优化和改进。通过人工智能算法和高精度数据分析,提高标定精度,同时为工程环境变化提供精准决策依据。

本文提出的基于反标定校正方法的高精度标定技术在实际应用中取得了良好效果,为我国深海隧道工程高精度安装提供了保障。同时,深入研究和完善反标定技术将为国际海洋测绘工程领域的发展提供有益借鉴。

参考文献:

- [1] 锁旭宏. 组合式测控技术在外海超长沉管隧道安装中的应用[J]. 公路, 2018, 63(8): 37-42.
SUO Xu-hong. Application of combined measurement and control system in the installation of immersed tunnels in deep sea[J]. Highway, 2018, 63(8): 37-42.
- [2] 刘凌峰, 林巍, 尹海卿, 等. 世界交通沉管隧道工程建造情况与我国沉管科技发展现状[J]. 中国港湾建设, 2021, 41(8): 71-79.
LIU Ling-feng, LIN Wei, YIN Hai-qing, et al. Construction of immersed tunnel engineering in the world and development status of immersed tunnel technology in China[J]. China Harbour Engineering, 2021, 41(8): 71-79.
- [3] 刘健, 邓斌, 黄清飞. 深中通道沉管隧道钢壳设计及制造关键技术[J]. 隧道建设(中英文), 2021, 41(8): 1367-1374.
LIU Jian, DENG Bin, HUANG Qing-fei. Design and manufacturing techniques for steel-shell structure of Shenzhen-Zhongshan Link's immersed tunnel[J]. Tunnel Construction (Chinese and English), 2021, 41(8): 1367-1374.
- [4] 金文良, 宋神友, 陈伟乐, 等. 深中通道钢壳混凝土沉管隧道总体设计综述[J]. 中国港湾建设, 2021, 41(3): 35-40.
JIN Wen-liang, SONG Shen-you, CHEN Wei-le, et al. General review on overall design of steel shell-concrete immersed tunnel in Shenzhen-Zhongshan Link[J]. China Harbour Engineering, 2021, 41(3): 35-40.
- [5] 韩欣洁, 黎丽, 任科霖. 跨江隧道沉管段关键施工技术研究[J]. 科技创新与应用, 2023, 13(26): 172-175.
HAN Xin-jie, LI Li, REN Ke-lin. Study on key construction technology of immersed tube section of river-crossing tunnel[J]. Technology Innovation and Application, 2023, 13(26): 172-175.
- [6] 锁旭宏, 张超, 成益品. 管节安装测量塔浮态标定方法研究[J]. 水道港口, 2018, 39(S2): 107-111.
SUO Xu-hong, ZHANG Chao, CHENG Yi-pin. Research on floating state calibration method of pipe installation and measurement tower[J]. Journal of Waterway and Harbor, 2018, 39(S2): 107-111.
- [7] 张秀振. 长大沉管隧道线形控制研究[J]. 中国港湾建设, 2018, 38(12): 43-47.
ZHANG Xiu-zhen. Linear control of long and big immersed tube tunnel[J]. China Harbour Engineering, 2018, 38(12): 43-47.
- [8] 孙阳阳, 贾旭, 徐良. 漂浮状态下沉管标定方法研究[J]. 中国港湾建设, 2021, 41(11): 29-33.
SUN Yang-yang, JIA Xu, XU Liang. Research on the calibration method of immersed tube in floating state[J]. China Harbour Engineering, 2021, 41(11): 29-33.
- [9] 成益品, 董理科, 韩战伟, 等. 深中通道工程高等级首级控制网复测技术设计要点[J]. 中国港湾建设, 2021, 41(5): 37-41.
CHENG Yi-pin, DONG Li-ke, HAN Zhan-wei, et al. Key points in design of retest technology for high-grade first class control network of Shenzhen-Zhongshan Link project[J]. China Harbour Engineering, 2021, 41(5): 37-41.
- [10] 刘洪志, 刘莉鑫. 非线性最小二乘法在工程测量坐标系统转换中的应用[J]. 测绘与空间地理信息, 2023, 46(4): 186-188, 192.
LIU Hong-zhi, LIU Li-xin. Application of nonlinear least squares method in the transformation of engineering surveying coordinate systems[J]. Geomatics & Spatial Information Technology, 2023, 46(4): 186-188, 192.