

文章编号:1674-2869(2017)04-0359-07

沉管隧道沉放对接监控中的超声阵列测量及其关键算法

赵朋辉¹,柴修伟^{2*},胡勇前¹,孙 斌³,阎要锋²

1. 佛山新城建设开发有限公司,广东 佛山 528000;

2. 武汉工程大学资源与土木工程学院,湖北 武汉 430074;

3. 上海海科工程咨询有限公司,上海 200231

摘 要:水下高精度沉放对接是沉管隧道施工的一个关键环节,对测量方法的环境适应性和精度等指标要求很高.目前实际工程中多采用高精度全站仪测量和刚性测量塔传递坐标的方法;此外,国外提出水下声呐测量方法,环境适应性强,且精度不随隧道长度增加而下降.本文通过对水下声呐法进行创新改进,采用三点后方交会方法,提出超声阵列测量方法,并用于佛山汾江路南延线沉管隧道工程中管段沉放对接的测量监控试验,并将测量结果与高精度全站仪测量结果进行了对比分析.现场监测试验结果表明,该方法能够满足工程需要,在管段间距2 m时,三轴坐标测量精度不大于 ± 45 mm.

关键词:沉管隧道;超声阵列测量系统;沉放和对接;算法

中图分类号:TU354 **文献标识码:**A **doi:**10.3969/j.issn.1674-2869.2017.04.009

Ultrasonic Array Measurement and Key Algorithm in Monitoring of Immersing and Docking of Immersed Tube Tunnel

ZHAO Penghui¹, CHAI Xiuwei^{2*}, HU Yongqian¹, SUN Bin³, YAN Yaofeng²

1. Foshan New Town Construction Development Co., LTD, Foshan 528000, China;

2. School of Resource and Civil Engineering, Wuhan Institute of Technology, Wuhan 430074, China;

3. Shanghai Heike Engineering Consulting Co., LTD, Shanghai 200231, China

Abstract: The high precision immersion and docking is the key part in immersed tube tunnel construction, which requires better environmental adaptation and high accuracy to the measurement system. Now, the high-precision total station and rigid measurement tower are commonly used in actual engineering. Moreover, the sonar method is also proposed in foreign country, which has good adaption to the surrounding and its precision does not decline with the tunnel length increasing. Through innovation and improvement based on the underwater sonar methods, the ultrasonic array measurement system was proposed by the three points resection method and was used to measure and monitor the immersed tube tunnel immersing and docking process of Foshan Fenjiang road extending to the south. Compared with the high-precision total station, the method can meet the needs of engineering, and the 3-axis measurement precision can be controlled between +45 mm and -45 mm when the distance between two tubes is 2 m.

Keywords: immersed tunnel; ultrasonic array measurement system; immersing and docking; algorithm

收稿日期:2017-03-30

作者简介:赵朋辉,硕士,高级工程师. E-mail:1030064866@qq.com

*通讯作者:柴修伟,博士,副教授. E-mail:342650018@qq.com

引文格式:赵朋辉,柴修伟,胡勇前,等.沉管隧道沉放对接监控中的超声阵列测量及其关键算法[J].武汉工程大学学报,2017,39(4):359-365.

ZHAO P H, CHAI X W, HU Y Q, et al. Ultrasonic array measurement and key algorithm in monitoring of immersing and docking of immersed tube tunnel[J]. Journal of Wuhan Institute of Technology, 2017, 39(4): 359-365.

沉管隧道采用水上预制混凝土沉箱,拖运到预定位置后下沉,并利用水压将前后两节管段连接起来,最终贯通形成水下隧道.1959年加拿大成功采用水力压接法建成迪斯隧道,标志着沉管隧道关键技术的突破,使得沉管法很快被世界各国普遍采用.截至2001年,世界上有近20多个国家采用沉管隧道技术修建了130多座水下隧道^[1-2].已建成沉管隧道中,里程最长的是1969年美国建成的旧金山海湾快速交通隧道,也是目前世界上最长的沉管隧道,全长5 825 m,由58节管段组成^[3-4].我国大陆地区已建成20多条,其中港珠澳大桥隧道全长5 664 m,由33节钢筋混凝土沉箱组成^[5-7].

目前,沉管隧道沉放对接监控测量主要采用全站仪和潜水探摸结合的方法.沉放初期,采用全站仪进行管段空间定位,当管段之间的距离靠近到20 cm以内时,由潜水员入水探摸检测,保证管段间对接到位^[8-9].经过长期的实践、总结和完善,该方法已基本成熟,广泛应用在内河沉管隧道对接测量中,包括广州珠江隧道、宁波常洪隧道、上海外环隧道、佛山汾江路南延线隧道、南昌红谷滩隧道均采用了该测量方法.另外,还有一些其它的测量方法,如拉线法、水下声呐法等.其中,水下声呐法采用声波测量方式对管段进行空间定位进而达到测量监控目的^[10-12].该方法已经应用在日本京叶线台场隧道、日本多摩川隧道和土耳其博斯普鲁斯海峡沉管隧道的沉放对接测量中^[13-16].该测量技术由日本公司垄断,长期限制技术出口转让,只提供工程服务,且收费十分昂贵.

本文提出的超声阵列测量法是在水下声呐法基础上改进而成的,采用三点后方交会方法,即已知空间3个点的坐标和未知点到该3点的空间距离计算得出未知点的空间坐标.下面对该测量系统的组成、原理、实施流程和关键算法进行分析.

1 测量原理与系统组成

1.1 测量原理

该方法是一种相对定位测量方法,其测量结果是待沉管段与已安装管段对接端头间的相对空间位置,当管段间距离较近时,该方法具有很高的定位精度.测量阵列由安装在沉箱顶部的水下超声传感器组成,包括接收和发射两种.该系统通过测量超声波在水中的走时计算出两点间的空间距离,进而求解未知点坐标值.一般来说,超声传感器阵列组合形式比较灵活,只要满足求解唯一性

即可.文中以3组1发4收的形式为例,如图1所示,每个对接面两侧各布置3组高灵敏度超声波传感器,每组传感器包含1个发射端和4个接收端.

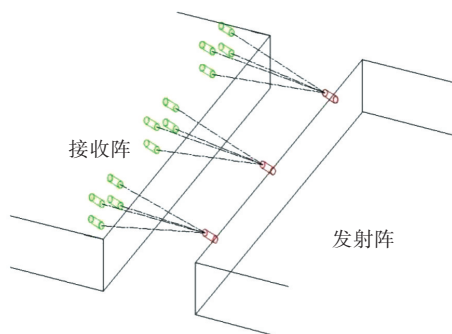


图1 水下声呐定位方式示意图

Fig. 1 Diagrammatic sketch of underwater sonar localization

该测量系统采用三点后方交会法计算未知点坐标,首先通过前期标定得到接收阵列传感器的中心坐标,并在水下超声距离测量结果的基础上计算得到发射点的坐标.发射传感器安装在待对接管段上,每节管段各安装3个,也就是最终得到3个点的坐标值.由于传感器中心与待对接管段刚性连接,空间相对位置在测量过程中保持不变,因此可以进一步计算出管段上任意点的空间坐标.这样就建立了两节管段的准确空间坐标关系.

1.2 系统组成

整个测量系统包含超声传感器阵列、控制系统、通讯系统、计算机终端,如图2所示.超声传感器阵列前面已有介绍,控制系统实现对测量传感器的收发控制、采集参数设定、采集进程控制、采集模式调整和数据传输控制等;通讯系统实现测量终端与计算机终端之间的数据和命令交换,该系统中包含了无线和有线两种模式;计算机终端是整个系统的大脑,指挥整个系统有序工作,同时接收测量终端发回的测量数据并处理、反演出对接管段的相对空间坐标,并在此基础上构建可视化空间模型并展示测量结果.

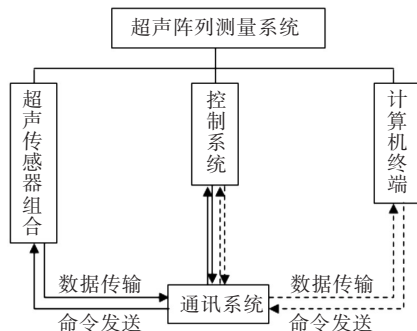


图2 超声阵列测量系统组成框架图

Fig. 2 Construction of ultrasonic array measurement system

1.3 测量过程

超声阵列测量过程可以分为4步,包括设计、加工和预埋,岸上标定,测量前安装,水下测量与建模.

1)设计、加工和预埋. 超声阵列构件需满足防水、稳定并保持足够的刚度,且安装设计需考虑管段施工工序. 部分测量构件需要预埋,其工序与管段顶面浇筑部分重叠,在钢筋绑扎时,将测量构件的底座按照设计方案定位后焊接到钢筋网架上并浇筑混凝土.

2)岸上标定. 预埋件安装后,为确定传感器阵列与管段的空间相对位置,使用高精度全站仪测量方法得到各个传感器中心和管段上控制点坐标. 控制点宜选择断面结构边缘拐点的位置,即角点位置. 标定完成后,暂时拆除预埋底座上部的超声阵列测量部件,待管段沉放对接前再安装.

3)测量前安装. 一般管段浮运到位后需进行二次舾装,在此期间,择机安装超声阵列测量系统. 超声阵列的上部结构按照编号安装到位,将整个端面上的所有电源和信号电缆一起绑扎后贴着管段内边布线,最后驳船或者控制塔上岸并连接到控制箱. 安装工作完毕后,检查传感器阵列、通讯设备和计算机终端是否正常.

4)水下测量与建模. 沉放作业开始后,随着管段的下沉,发射传感器逐渐淹没至水下,此时已满足超声波传播条件,启动超声阵列测量系统并开始测量监控. 开始阶段,由于收/发传感器组之间的距离在20 m左右,处于信号有效接收的临界点,信号不稳定. 随着管段的下沉和管段间的靠拢,传播距离逐渐缩小,可以看到声波信号逐渐增强,首波也逐渐清晰,待所有传感器首波均可明确提取后启动测量模块功能,系统根据相应的算法程序自动计算出两节管段的相对空间位置并构建其空间三维模型.

2 关键算法

2.1 坐标系的选择

文中涉及到标定和对接测量2个过程,分别采用不同的坐标系. 标定坐标系采用管段制作坐标系,该坐标系为笛卡尔坐标系,遵循右手螺旋法则,记作 $O_1\text{-}XYH$. 水下对接测量采用自建独立坐标系,原点位于已沉放管段底板端头与中轴线交点, X 轴沿管头断面方向向右, Y 轴与中轴线重合向外, H 垂直于底板向上记作 $O_2\text{-}XYH$,如图3所示.

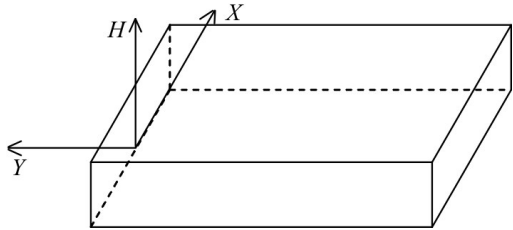


图3 自建独立坐标系示意图

Fig. 3 Schematic diagram of self-built independent coordinate system

2.2 距离后方交会算法

水下超声阵列测量中,各传感器测量中心与管段结构的空间相对位置保持不变. 本文采用3组阵列的形式,每组包括1发4收共5个传感器. 测量过程中,通过水下超声射线测量得到发射传感器与同组接收传感器之间的空间距离. 根据上述射线长度计算出对应发射传感器中心在 $O_2\text{-}XYH$ 坐标系下坐标值的算法如下.

前期标定得到了接收传感器阵列中心在 $O_1\text{-}XYH$ 坐标系中的坐标值,首先将其转换至 $O_2\text{-}XYH$ 坐标系下. $O_1\text{-}XYH$ 和 $O_2\text{-}XYH$ 均为笛卡尔坐标系,对 $O_1\text{-}XYH$ 坐标系进行平移、旋转等空间变换,最终达到已沉放管段模型在两坐标系中重合,并得到变换过程矩阵积 T_1 ,将标定坐标乘以 T_1 即得到其在 $O_2\text{-}XYH$ 坐标系中的坐标.

如图4所示, A 、 B 、 C 代表接收传感器中心,标定坐标转换至 $O_2\text{-}XYH$ 坐标系中的空间坐标分别为 (X_A, Y_A, Z_A) 、 (X_B, Y_B, Z_B) 和 (X_C, Y_C, Z_C) . H 代表发射传感器中心,坐标待求. 通过水下超声测量求得收发传感器之间的空间距离分别为 L_A 、 L_B 、 L_C . 垂直于 $\triangle ABC$ 并指向 H 节点的向量为 $PP' = ai + bj + ck$. 为了计算方便,对模型进行空间平移和旋转变换,结果如图5所示, A 与原点重合, B 位于 X 轴上,且 $\triangle ABC$ 与 XOY 平面重合. 同时添加辅助线 $HK \perp AB$ 、 $MK \perp AB$ 、 $MC \parallel AB$ 且 $HH' \perp KM$. 此时, H' 的平面坐标即为 H 的平面坐标, HH' 的长度即为 H 的 Z 轴坐标值.

经过变换后, A 、 B 、 C 三点的坐标分别为 $(0, 0, 0)$ 、 $(X_B, 0, 0)$ 、 $(X_C, Y_C, 0)$,根据 H 点与3个已知点之间的空间距离求解其坐标如下:

3 工程实例

佛山市汾江路南延线工程沉管隧道段全长为445 m,共分4节管段,编号分别为E1、E2、E3和E4,管节长度分别为115 m、115 m、105 m和110 m.管节标准断面宽39.9 m,高9.0 m. E4管节分2段,分别为E4-1和E4-2,E3与E4-1在岸上进行拉合,记作E3&E4-1(下同).管段安装顺序为E1→E2→E4-2→E3&E4-1,最终水下接头位于E4-2、E3&E4-1之间.

沉放过程采用全站仪测量和潜水探摸相结合的方式,2个测量塔顶端各安装一个棱镜,在管内安装有高精度倾斜仪,通过棱镜中心坐标结合横、纵倾角度得到整个管段的位置和姿态.同时,结合该工程进行了超声阵列测量系统试验,并将测量结果与全站仪测量结果进行比较和分析,得出其可靠性和精度指标.文中以E2、E3&E4-1管段间试验为例进行分析.按照预定方案进行了测量部件的安装、调试和现场测量,并得到了测量结果,沉放前后各管段状态如图7所示.

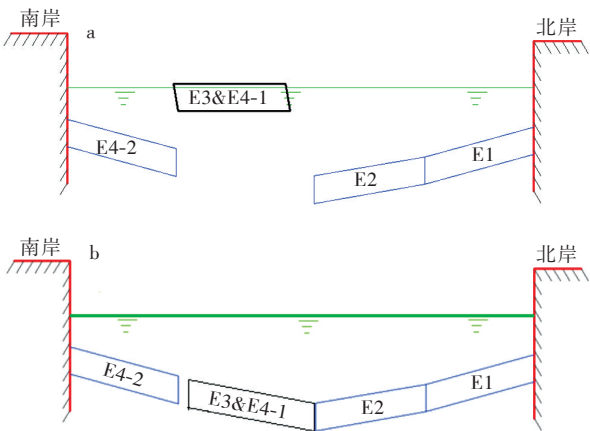


图7 E3&E4-1对接前后的管段状态示意图
(a) E3&E4-1沉放前各管段状态,
(b) E3&E4-1对接安装后各管段状态
Fig. 7 Diagrammatic sketch of states of tube tunnels before and after E3&E4-1 section docking
(a) E3&E4-1 section state before immersion;
(b) E3&E4-1 section state after immersion

为了方便与全站仪测量结果进行比较,分别将2种测量结果全部转化到佛山城建坐标系下,并根据测量坐标和管段的几何尺寸信息建立了沉放过程的三维可视化模型,如图8所示.

图9为沉放过程待对接管段E3&E4-1上4个控制点上2种测量结果(超声阵列和全站仪2种方式)的三轴坐标差.由图9可知,超声阵列测量结果

与全站仪测量结果非常接近,且随着距离的靠近,精度越来越高.但是受到水流变化、泥沙、悬浮物等不确定因素的影响,精度呈现区域不规则波动的特征.如图10所示,当距离缩小到2 m以内时,波动范围基本在一个区间内变化(<45 mm),具体见表1.

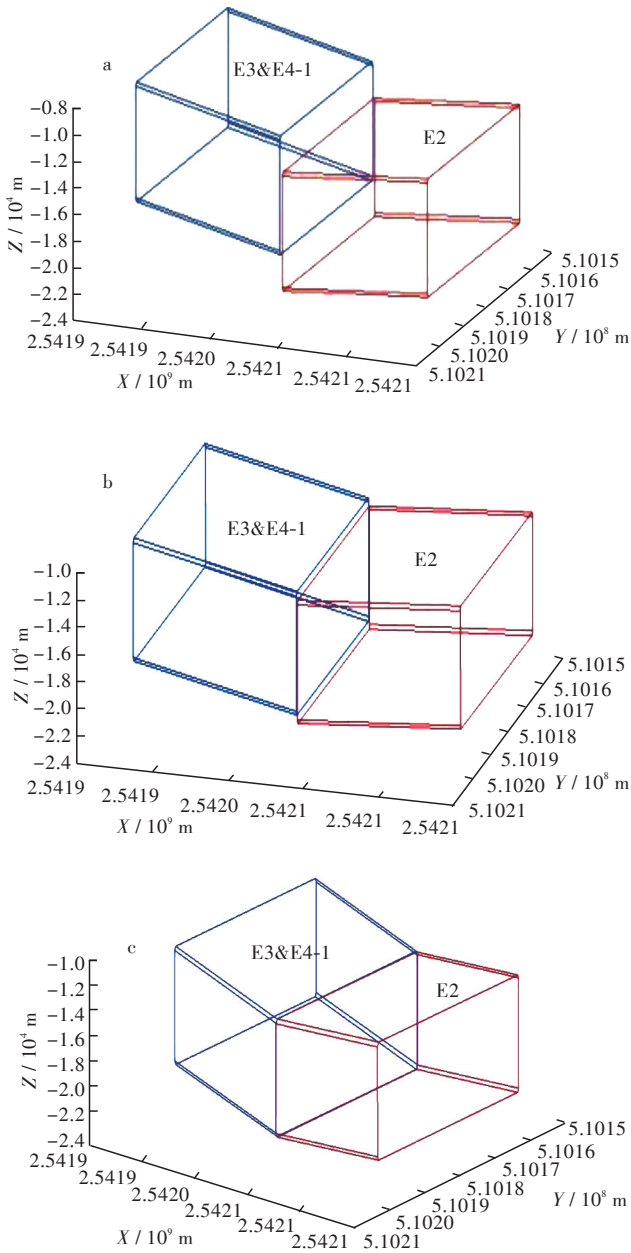


图8 E2-E3&E4-1对接的超声阵列测量结果三维模型图
(a) 12:06:11时刻E2-E3&E4-1空间姿态,
(b) 13:00:37时刻E2-E3&E4-1空间姿态,
(c) 14:02:14时刻对接完成后E2-E3&E4-1空间姿态
Fig. 8 Three-dimensional model of ultrasonic array measurements' result of E2-E3&E4-1 docking
(a) E2-E3&E4-1 pace attitude s at 12:06:11;
(b) E2-E3&E4-1 space attitude at 13:00:37;
(c) E2-E3&E4-1 space attitude at 14:02:14

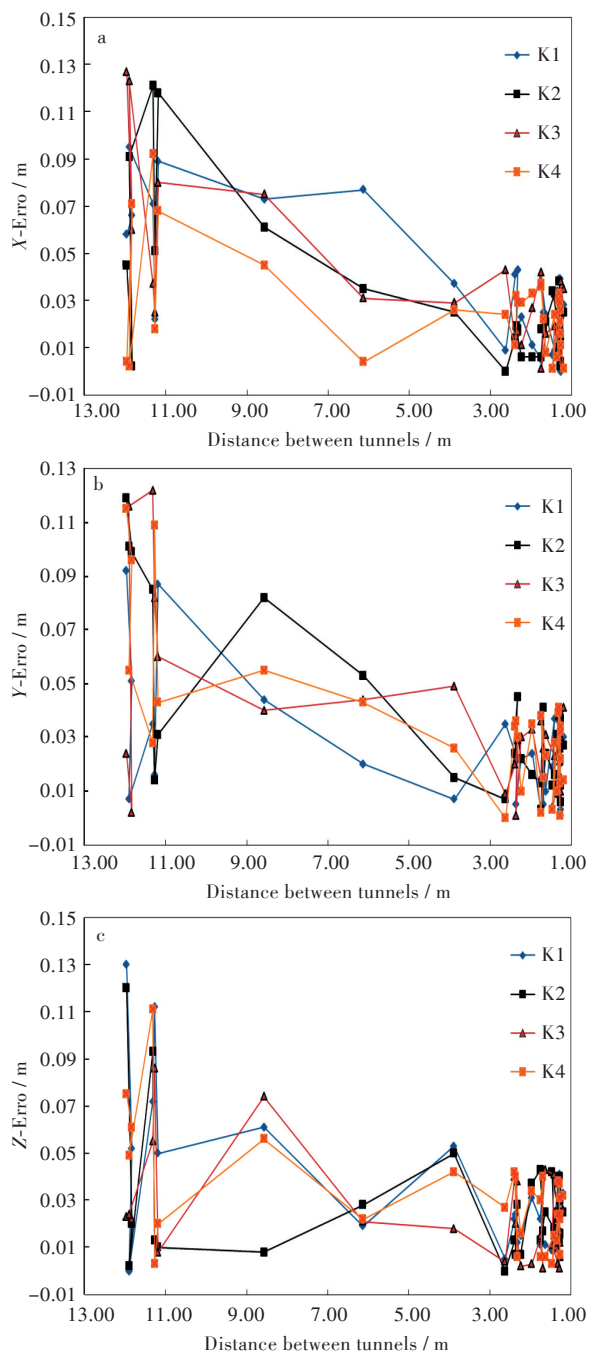


图9 超声阵列系统与全站仪测量结果的三轴坐标差值图
(12.0 m ~1.2 m)

(a)X 坐标差值图,(b)Y 坐标差值图,(c)Z 坐标差值图
Fig. 9 Three-axis errors diagrams between ultrasonic array and total-station measurement(12.0 m~1.2 m)
(a)X-axis errors; (b)Y-axis errors;(c)Z-axis errors

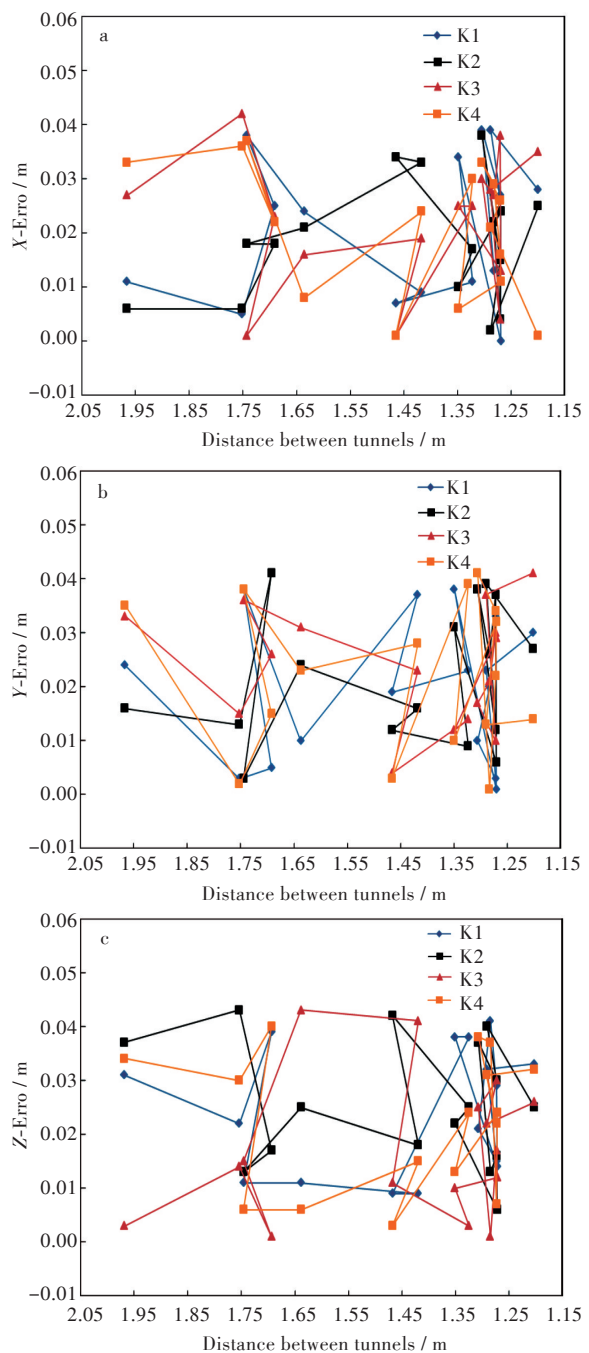


图10 超声阵列系统与全站仪测量结果的三轴坐标差值图(2.0 m ~1.2 m)

(a)X 坐标差值图,(b)Y 坐标差值图,(c)Z 坐标差值图
Fig. 10 Three-axis errors diagrams between ultrasonic array and total-station measurement(2.0 m~1.2 m)
(a)X-axis errors; (b)Y-axis errors;(c)Z-axis errors

| 指标 index | 最大值 maximum value / mm | | 最小值 minimum value / mm | | 平均值 average value / mm | |
|-------------|---------------------------|-------|---------------------------|-------|---------------------------|-------|
| | | | | | | |
| | 大于 2 m | 2 m 内 | 大于 2 m | 2 m 内 | 大于 2 m | 2 m 内 |
| X_{IQ-Cl} | 127 | 43 | 0 | 0 | 31 | 20 |
| Y_{IQ-Cl} | 122 | 45 | 0 | 0 | 33 | 22 |
| Z_{IQ-Cl} | 130 | 43 | 0 | 1 | 29 | 22 |

注: X_{IQ-Cl} 、 Y_{IQ-Cl} 和 Z_{IQ-Cl} 为X轴、Y轴和Z轴上全站仪和超声阵列测量结果坐标差

4 结 语

在分析沉管隧道工艺和超声阵列测量系统组成、原理的基础上,对超声阵列测量方法的数学过程进行了深入分析和阐述,包括三点距离后方交会算法及其它相关算法.结合佛山汾江路南延线沉管隧道工程进行了工程试验,并对试验结果进行了分析,主要结论如下:

- 1)超声阵列测量方法利用水下超声波测距精度高的优点,结合沉管隧道水下对接时空间距离短、管段顶部易于预埋超声测量件的优势,采用空间解析几何算法换算出统一坐标系下所有控制点的空间坐标值,以达到判断管段空间相对位置的目的.
- 2)采用几何解析的方法给出了详细求解过程,该测量系统涉及到复杂的坐标、坐标系和图形变换,给出了变换过程.
- 3)结合佛山汾江路南延线沉管隧道工程进行了超声阵列测量试验,并将测量结果与高精度全站仪测量结果进行了对比分析,在两管段相距2 m以内时,水下超声阵列方法在三轴方向上的坐标差最大为45 mm.结果表明文中采用的算法过程是可行的.

参考文献:

[1] 潘永仁,丁美.大型沉管隧道管段沉放施工技术[J].现代隧道技术,2004,41(5):1-5.
PAN Y R, DING M. Techniques for sinking and jointing tube sections of large immersed tube tunnel[J]. Modern Tunneling Technology, 2004, 41 (5): 1-5.

[2] 胡政才,先其明,马积薪.日本多摩川沉管隧道的设计与施工[J].世界隧道,1995(5):52-75.
HU Z C, XIAN Q M, MA J X. Design and construction of tamagawa immersed tunnel in Japan [J]. World Tunneling, 1995 (5): 52-75.

[3] 宁茂权,肖明清.海底沉管隧道关键技术设计与分析[J].铁道工程学报,2008,119(8):50-57.
NING M Q, SHAO M Q. Design and analysis of key technology about channel immersed tunnel [J]. Journal of Railway Engineering Society, 2008, 119(8): 50-57.

[4] 王朝辉.内河沉管隧道浮运沉放施工技术[J].施工技术,2012,41(18):117-120.
WANG C H. Construction technology of floating and sinking of immersed tunnel crossing inland river [J]. Construction Technology, 2012, 41(18): 117-120.

[5] 聂美琳译.京叶台场隧道[J].世界沉管隧道技术,1998(5):41-85.
NIE M L (Translated). Keiyo odaiba tunnel [J]. World Immersed Tunnel Technology, 1998 (5): 41-85.

[6] RASMUSSEN N S. Concrete immersed tunnels-forty years of experience [J]. Tunneling and Underground Space Technology, 1997, 12(1): 33-46.

[7] GURSOY A. Immersed steel tube tunnels: an American experience [J]. Tunneling and Underground Space Technology, 1995, 10 (4): 439-453.

[8] 王解先,许琛,陆彩萍.沉管沉放的实时监测[J].测绘学报,2002,31(增刊):70-72.
WANG J X, XU C, LU C P. Real-time surveying of immersed tube allocation [J]. Journal of Geodesy and Geo-Information, 2002, 31(Suppl.): 70-72.

[9] 潘永仁.上海外环沉管隧道大型管段浮运方法[J].施工技术,2004,33(5):52-54.
PAN Y R. The floating transport method of large elements employed for Shanghai out-ring immersed tube tunnel [J]. Construction Technology, 2004, 33(5): 52-54.

[10] 吴瑞大,方长远.适合近岸管节水下施工的测量塔全站仪定位方法[J].中国港湾建设,2012(4):43-46.
WU R D, FANG C Y. Positioning methods by total stations for survey towers suitable for near-shore underwater laying of tunnel sections[J]. China Harbor Engineering, 2012(4): 43-46.

[11] 邓建林.沈家门港海底沉管隧道浮运、沉放施工控制技术[J].隧道建设,2015,35(9):914-919.
DENG J L. Control technology for towing and sinking of immersed tubes: case study on Shenjiamen port sub-sea tunnel [J]. Tunnel Construction, 2015, 35 (9): 914-919.

[12] 郭建文.海河隧道沉管沉放对接的主要施工技术[J].铁道标准设计,2013(4): 73-77.
GUO J W. Key construction technologies of sinking and docking of immersed tube of Haihe river tunnel [J]. Railway Standard Design, 2013(4): 73-77.

[13] 申琪玉,邱峰,张海燕.广州洲头咀隧道管段浮运沉放关键技术研究[J].施工技术,2010,39(5): 15-17.
SHEN Q Y, QIU F, ZHANG H Y. Research on key sinking technology of pipe sections in Guangzhou Zhou-touzui immersed tunnel [J]. Construction Technology, 2010, 39(5): 15-17.

[14] 任朝军,苏林王,吕黄,等.声纳法在管节沉放实时定位测量中的应用[J].现代隧道技术,2012,49(5): 132-135.
REN C J, SU L W, LÜ H, et al. Application of the sonar method to real-time positioning measurement for an immersed element [J]. Modern Tunneling Technology, 2012, 49(5): 132-135.

[15] 郭禄光,樊功瑜.最小二乘法与测量平差[M].上海:同济大学出版社,1984.

[16] 田青文,刘万林.控制测量学[M].西安:西安地图出版社,2004.