

顶进节段法最终接头测控技术研究与应用

王殿文¹, 徐良^{1,2*}

(1. 中交一航局第二工程有限公司, 山东 青岛 266071;
2. 天津市水下隧道建设与运维技术企业重点实验室, 天津 300461)

摘要: 大连湾海底隧道采用顶进节段法最终接头, 顶进节段无安装测量塔条件, 且全程为水下施工, 传统定位设备难以使用, 给最终接头顶推水下定位提出了新的技术难题, 为此研究以拉线位移计、摄像位移计、磁致位移传感器三者组合而成的最终接头水下定位系统, 实现最终接头顶推施工全程高精度定位。

关键词: 最终接头; 水下定位; 摄像位移计; 拉线位移计; 磁致位移传感器

中图分类号: U653.99 文献标志码: B 文章编号: 2095-7874(2024)04-0039-05

doi:10.7640/zggwjs202404009

Research and application of closure joint measurement and control technology by jacking segmental method

WANG Dian-wen¹, XU Liang^{1,2*}

(1. No.2 Engineering Co., Ltd. of CCCC First Harbor Engineering Co., Ltd., Qingdao, Shandong 266071, China; 2. Tianjin Key Laboratory of Construction, Operation and Maintenance Technologies for Underwater Tunnels, Tianjin 300461, China)

Abstract: The closure joint of Dalian Bay immersed tunnel adopts the jacking segmental method. There is no condition for installing measurement towers in the jacking segment, and the entire process is underwater construction. Traditional positioning equipment is difficult to use, which poses new technical challenges for underwater positioning by jacking the closure joint. Therefore, a underwater positioning system for the closure joint, which is composed of a combination of a wire displacement meter and a camera displacement meters, and a magnetic displacement sensor, is studied to achieve the high-precision positioning throughout the entire process of the closure joint jacking construction.

Key words: closure joint; underwater positioning; camera displacement meter; wire displacement meter; magnetic displacement sensor

0 引言

大连湾海底隧道最终接头结构形式采用国内首创的顶进节段法^[1], 以陆地预制水下顶推的方式将顶进节段从外部套筒内向外推出 1.5 m 左右, 与 E18 管节对接, 对接精度要求 5 cm 以内。其顶推全程为水下施工作业, 水深 23 m, 对施工过程中的平面位置监测是很大的挑战。为实现最终接头顺利顶推, 实现其施工全过程的平面位置的高

精度定位, 研究了适用于最终接头顶推定位的组合测控系统。

1 最终接头组合测控系统

针对最终接头特殊的全程水下施工的条件, 研究采用以拉线位移计、摄像位移计、磁致位移传感器 3 套水下测控设备组合而成的测控系统, 实现顶进节段顶推过程中实时测定顶进节段与 E18 的相对位置关系, 并计算和显示顶进节段的

收稿日期: 2023-10-17 修回日期: 2024-03-06

作者简介: 王殿文 (1984—), 男, 山西长治人, 高级工程师, 土木工程专业。

* 通讯作者: 徐良, E-mail: 573067862@qq.com

行进路线和实时位置^[2-3]，指导施工作业顺利进行等工作。其 3 套设备均可独立运行实现定位，3 套设备相结合可形成多种数据的组合方式，有利于剔除质量较差数据和失效设备对定位结果的影响，保证定位结果的高精度和高可靠性^[4]。

1.1 硬件设备及安装

1.1.1 拉线位移计

拉线位移计包括拉线仪与对应拉点，将二者分别安装在顶进节段与 E18 管节顶部特定位置上，通过钢丝绳将二者进行连接即可通过拉线位移计记录下的数据测量出 E18 管节与顶进阶段相对位置关系。东西各安装 1 组拉线位移计保证对接端两侧均有真实测量数据指导施工。

拉线位移计前端为钢丝绳及其固定与保护装置，后面的蓝绿色模块为激光测角模块。钢丝绳发生了角度偏转会导致激光发射模块产生变化，后面的圆筒状保护壳内置 1 个相机，相机记录激光的位置，并将数据通过线缆传输至计算机，计算机根据相机记录的激光位置偏移计算钢丝实际偏转角。再后面整体为编码器与钢丝绳线圈，编码器记录钢丝绳伸长距离并转换成数字信号通过线缆传输至计算机，再经数据筛选、平差计算后可实现测量拉线位移计与拉点的相对位置关系测量，获取顶进节段实时位置。拉线位移计构造如图 1 所示。

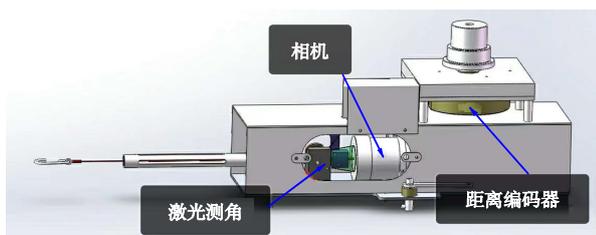


图 1 拉线位移计构造示意图

Fig. 1 Schematic diagram of wire displacement meter structure

1.1.2 摄像位移计

摄像位移计包括摄像机与摄像标靶(光源)，其安装位置与拉线位移计相似，分别于顶进节段和 E18 管节顶部东西两侧安装 2 组设备，由于水下环境复杂，可能有泥沙或海洋生物影响摄像机图像获取，所以为尽可能缩短摄像机与摄像标靶间距，而将其安装位置适当靠近。

摄像位移计根据双目摄影测量原理，摄像机照准摄像标靶，并将实时数据传输至计算机，再

经图像降噪、筛选后计算摄像位移计与摄像标靶的相对距离和方向，由此计算摄像位移计与摄像标靶的相对位置关系，进而推算出顶进节段与 E18 管节实时相对位置关系。摄像机与摄像标靶实物如图 2 所示。



(a) 摄像机 (b) 摄像标靶

图 2 摄像位移计实物图

Fig. 2 Physical image of camera displacement meter

1.1.3 磁致位移传感器

磁致位移传感包括 2 组横向磁致位移传感器与 2 组纵向磁致位移传感器，分别安装在顶进节段与扩大段侧墙之间。东西各 1 组，分别测量顶进节段横、纵向位移。

磁致位移传感器采用 316 不锈钢保护筒保护，保护筒内安装磁致位移传感器和可移动顶杆，采用弹簧顶进方式将顶杆压向扩大段墙壁，顶杆前端安装滑珠，减少顶杆与扩大段墙壁紧密接触时的摩擦力。保护筒与顶杆之间安装止水密封圈，避免海水渗入保护筒损害传感器，保护筒垂直穿过扩大段侧面墙壁。2 台横、纵向磁致位移传感器用于相互检校，保证数据可靠，同左右 2 台间横向磁致位移传感器测定的位移量^[5]，计算顶进节段在顶推全过程的里程与轴线方向偏差。磁致位移传感器结构如图 3 所示。

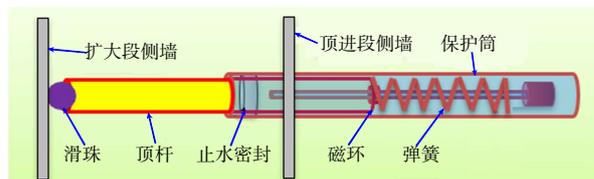


图 3 磁致位移传感器构造示意图

Fig. 3 Schematic diagram of magnetic displacement sensor structure

1.1.4 双轴倾斜传感器

双轴倾斜传感器作为顶进节段姿态监测设备，安装在顶进节段底板处，在顶进节段顶推全过程进行实时姿态检测，由于顶进节段体积较小，且底板平整无坡度，所以姿态对其平面位置影响较

小,倾斜数据仅作为风险控制数据显示,不进入软件平面位置计算。

1.1.5 测控系统整体布置

除上述硬件设备外,最终接头顶推测控系统还需要布置数据处理、传输、显示等部分,将仪器读取数据进行计算、处理并转化成图像信息进行显示^[6]。最终接头顶推测控系统整体布置与数据流转如图4所示。

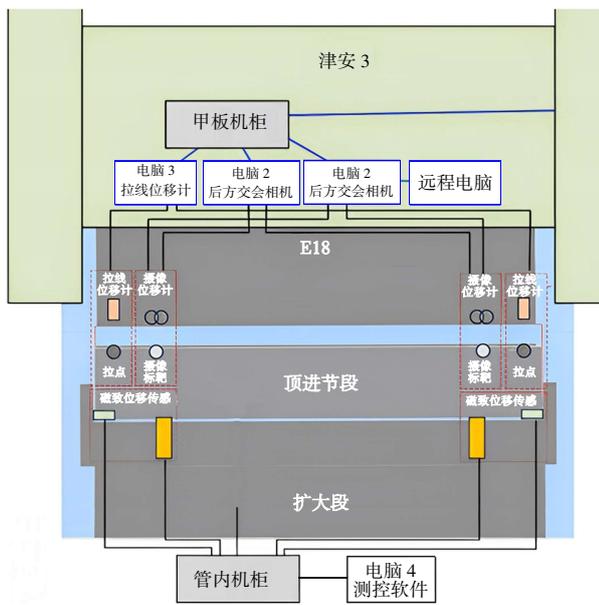


图4 测控系统整体布置与数据流转示意图

Fig. 4 Overall layout and data flow diagram of measurement and control system

E18管顶安装摄像位移计与拉线位移计并将数据传输至津安3的数据处理电脑,经处理后再将数据汇总并通过远程电脑与扩大段管内进行通讯传输。

磁致位移传感器数据则直接接入管内电脑进行数据处理并显示,最终将顶进节段的实时位置信息转换成图像显示在管内测控软件内,指导顶进节段顶推施工。

1.2 组合测控系统原理

系统通过3套设备获取顶进节段自身位移与其和E18管节相对位置关系,后根据E18实际位置对顶进节段实时的绝对位置进行计算。计算采用坐标转换原理,即通过设备测得公共点进行坐标系转换参数的解算,实现将顶进节段相对坐标系(O_D-UV)转换至施工坐标系(O_K-XY)再与同坐标系下设计位置进行比对,获取最终接头顶进节

段顶推全程四角点的实时里程与轴线偏差。关于2个坐标系对应顶进节段位移关系如图5所示。

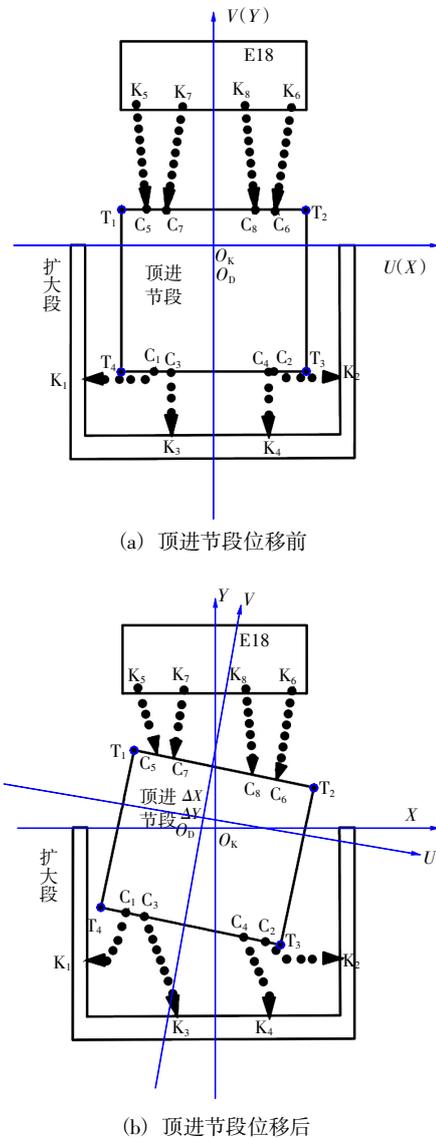


图5 顶进节段相对坐标系与施工坐标系相对关系示意图

Fig. 5 Schematic diagram of relative relation between jacking segment relative coordinate system and construction coordinate system

如图5所示, T_1-T_4 为顶进节段特征点, C_1-C_8 为测点, K_1-K_8 为仪器安装位置或测量支点, 顶进施工开始前顶进节段坐标系与扩大段坐标系处于重合状态, 顶进节段坐标系 O_D-UV 和扩大段坐标系 O_K-XY 此时重合。因此, 以上各点的标定坐标在2个坐标系中坐标值相同。 T_1-T_4 和 C_1-C_8 点均位于顶进节段上, 因此这些点在 O_D-UV 坐标系中的坐标值不会随顶进节段移动而变化。同样, K_1-K_8 各点均位于扩大段或E18上, 因此这些点

在 O_k-XY 坐标系中的坐标值不会随顶进节段移动而变化。

从而可以在顶进节段顶推过程中，根据实测出的 C_1-C_8 坐标值作为公共点即可求解 O_D-UV 至 O_k-XY 的转换参数，进而计算出施工所需要的 T_1-T_4 特征点的实际位置与偏差值。将各点在坐标系 O_D-UV 的坐标定义为 $(U_i, V_i)-(U_8, V_8)$ ，在坐标系 O_k-XY 的坐标定义为 $(X_i, Y_i)-(X_8, Y_8)$ 。2 个坐标系之间转换关系为：

$$\begin{cases} X_i=U_i-\alpha \cdot V_i+\Delta U \\ Y_i=\alpha \cdot U_i+V_i+\Delta V \end{cases} \quad i=1, \dots, 8 \quad (1)$$

计算可将 8 组测点所得数据进行联立求解转换参数 $(\Delta U, \Delta V, \alpha)$ ，即横、纵向平移量 $(\Delta U, \Delta V)$ 以及旋转角 α 。

1.3 设备标定及精度测试

1) 拉线位移计

在平整的地面上，安置拉线位移计及拉点，采用全站仪测定拉线位移计及拉点的位置，拉线位移计保持不动，在前后 0.5~3.0 m 及横向左右 0.2 m 范围内，设置 112 个拉线位置点，其中 88 个位置点用于拉线位移计参数标定，另 24 个点作为精度检核，测试可实现测量精度纵向 2 mm，横向 5 mm。

2) 摄像位移计

采用 12×12 格标准标定板进行双目相机标定，解算双目相机各自内参及双目外参。要求标定时双目相机同时拍摄 24~30 张标定板相片，标定板在每个相机拍摄的相片中的 4 个象限中至少出现 1 次。要求采用双目标定软件计算双目相机内外参数，内参精度不低于 0.5 像素^[7-8]。标定完成后将设备在大连湾海底隧道附近深水水域进行精度测试，其测量精度可实现纵向 10 mm，横向 3 mm。

3) 磁致位移传感器

磁致位移传感器数据处理较为简单，只需在顶进节段顶推前将其数据置 0 即可。其精度验证在顶进节段预制完成后，顶推至外部套筒内时完成，干环境下安装磁致位移传感器，以全站仪测量顶进节段顶推全过程的位置信息，并记录下磁致位移传感器数据将其与全站仪数据进行比对。其测量精度可实现横、纵向均为 5 mm。

2 应用效果

最终接头组合式测控系统采用 3 套设备单独定位，其所得数据按照预设精度最小二乘进行综

合平差，软件显示结果为三者定位的综合结果。在数据分析过程中可将 3 组数据单独提取进行比对，分析 3 套设备的定位精度与数据稳定性。

大连湾海底隧道最终接头顶推全程，按照施工节点记录 3 组仪器设备里程偏差数据如表 1 所示。

表 1 顶推全过程 3 组设备里程偏差值

Table 1 Mileage deviation values of three groups of equipment during the whole pushing process

综合平差顶推距离	拉线位移计	摄像位移计	磁致位移传感器
0.1	0.998 3	1.038 2	0.100 2
0.3	0.299 1	0.394 3	0.302 0
0.5	0.498 7	0.508 6	0.500 1
0.7	0.701 8	0.695 5	0.698 5
0.9	0.901 4	0.893 3	0.898 3
1.1	1.098 1	1.107 7	1.100 9
1.3	1.298 4	1.302 2	1.301 7

表 1 中顶推距离为软件显示数值，即综合平差数值。通过数据可分析，拉线位移计与磁致位移传感器里程数值比较稳定，波动均在 2 mm 以内，二者互差均在 5 mm 内。摄像位移计里程向精度较差，最大偏差为 8.6 mm，分析原因可能顶推过程中受海底泥沙等漂浮物影响摄像机通视，对其距离测量有一定影响。

轴线偏差如表 2 所示。

表 2 顶推全过程 3 组设备轴线偏差值

Table 2 Axis deviation values of three groups of equipment during the whole pushing process

顶推距离	综合平差数值	拉线位移计	摄像位移计	磁致位移传感器
0.1	-0.028 1	-0.024 5	-0.027 5	-0.029 4
0.3	-0.051 3	-0.052 5	-0.049 7	-0.052 2
0.5	0.023 4	0.026 7	0.021 9	0.024 7
0.7	0.006 1	0.013 6	0.005 1	0.002 3
0.9	-0.016 2	-0.014 3	-0.016 9	-0.015 8
1.1	0.023 7	0.026 5	0.022 7	0.025 4
1.3	0.011 3	0.015 4	0.010 9	0.012 2

表 2 中数据显示摄像位移计与磁致位移传感器轴线定位更加稳定，互差均小于 3 mm，数据稳定可靠，拉线位移计横向存在较大浮动，最大偏差为 7.5 mm，分析原因可能受海流和施工影响，导致拉线位移计钢丝绳有较大波动，进而影响其横向角度测量精度。

分析可得,磁致位移传感器数据横向与里程向最为稳定,由于安装在封闭环境下,受外界因素影响较小。拉线位移计受水流影响,横向数据波动较大,摄像位移计受泥沙影响,纵向数据波动较大,实际施工时,软件应在进行综合平差前适当降低相应精度较差部分的权重。

根据最终接头顶推完成后结合贯通测量数据与3组设备最终姿态的数据记录可验证最终接头组合测控系统定位精度具体如表3所示。

表3 3组设备定位最终姿态与贯通测量偏差值

Table 3 Deviation values of final attitude and penetration measurement for three groups of equipment positioning

项目	里程偏差	轴线偏差	与贯通测量差值	
			里程	轴线
贯通测量	-31	1		
拉线位移计	-28	3	3	2
摄像位移计	-27	3	4	2
磁致位移传感器	-34	-1	-3	-2

数据显示,在最终接头稳定后,水质和海流情况均有较大改善,3组测控设备与贯通测量差值均在5 mm内。数据可靠,验证采用该组合式最终接头顶推测控系统完全可实现最终接头顶推毫米级定位精度,满足最终接头施工要求。

3 结语

顶进节段法最终接头受限于其特别的结构形式与施工环境,传统测量设备难以使用,为此研究以拉线位移计、摄像位移计与磁致位移传感器3套设备组合进行定位的最终接头顶推测控系统,经实际应用验证:

1) 拉线位移计纵向定位精度较高,横向定位精度易受水流影响产生波动。

2) 摄像位移计横向定位精度较高,纵向定位精度易受泥沙影响波动。

3) 磁致位移传感器受外界影响较小,定位结果稳定,精度较高。

3套设备单独定位均可实现毫米级定位精度,3套设备独立定位组合平差保证最终接头测控系统定位数据质量、精度、稳定性均满足最终接头

顶推的高精度施工定位要求。该系统所采用的水下定位方法可为后续沉管隧道最终接头等类似水下测控工程提供参考。

参考文献:

- [1] 金文良,徐国平,郭亚唯,等.深中通道沉管隧道推出式最终接头设计原理分析及试验研究[J].隧道建设(中英文),2022,42(S2):305-311.
JIN Wen-liang, XU Guo-ping, GUO Ya-wei, et al. Experimental research and design principle analysis on push type final joint of immersed tunnel in Shenzhen-Zhongshan Link[J]. Tunnel Construction (Chinese and English), 2022, 42(S2): 305-311.
- [2] 锁旭宏,刘国辉,张德津,等.港珠澳大桥沉管隧道最终接头合龙口状态测量[J].深圳大学学报(理工版),2022,39(4):402-408.
SUO Xu-hong, LIU Guo-hui, ZHANG De-jin, et al. Closure state measurement of final joint of the immersed tunnel of the Hong Kong-Zhuhai-Macao Bridge[J]. Journal of Shenzhen University (Science and Engineering), 2022, 39(4): 402-408.
- [3] 吴凤亮,李家林,李金峰,等.港珠澳大桥沉管隧道最终接头合龙施工技术[J].中国港湾建设,2019,39(11):67-71.
WU Feng-liang, LI Jia-lin, LI Jin-feng, et al. Closure construction technology for final joint of immersed tunnel of Hongkong-Zhuhai-Macao Bridge[J]. China Harbour Engineering, 2019, 39(11): 67-71.
- [4] 赵坤.港珠澳大桥沉管隧道测控系统研究[D].广州:华南理工大学,2015.
ZHAO Kun. Research of the immersed tube tunnel surveying system[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2015.
- [5] 王博文,张露予,王鹏,等.磁致伸缩位移传感器检测信号分析[J].光学精密工程,2016,24(2):358-364.
WANG Bo-wen, ZHANG Lu-yu, WANG Peng, et al. Analysis of detection signal for magnetostrictive displacement sensor[J]. Optics and Precision Engineering, 2016, 24(2): 358-364.
- [6] 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 tunnel in the deep sea[J]. Highway, 2018, 63(8): 37-42.
- [7] 杨景豪,刘巍,刘阳,等.双目立体视觉测量系统的标定[J].光学精密工程,2016,24(2):300-308.
YANG Jing-hao, LIU Wei, LIU Yang, et al. Calibration of binocular vision measurement system[J]. Optics and Precision Engineering, 2016, 24(2): 300-308.
- [8] 舒娜.摄像机标定方法的研究[D].南京:南京理工大学,2014.
SHU Na. Research on camera calibration method[D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2014.