

【土木建筑工程 / Architecture and Civil Engineering】

港珠澳大桥沉管隧道最终接头合龙口状态测量

锁旭宏¹, 刘国辉², 张德津^{2,3}, 管明雷^{2,4}

1) 中交一航局第二工程有限公司, 山东青岛 266071; 2) 广东省城市空间信息工程重点实验室, 广东深圳 518060;
3) 深圳大学建筑与城市规划学院, 广东深圳 518060; 4) 深圳职业技术学院人工智能学院, 广东深圳 518055

摘要: 港珠澳大桥沉管隧道采用从东、西人工岛向中间沉放形成合龙口, 再沉放最终接头贯通的施工模式, 最终接头状态参数测量是决定工程成败的关键因素. 针对贯通测量方法效率低, 测量精度差, 且无法实时调整合龙口状态等问题, 提出合龙口状态形成过程的实时测量方法. 首先, 在形成合龙口的两个管节端面上布设测量特征点, 并测量获取管节坐标系下的特征点坐标. 其次, 在沉放过程中, 采用测量塔法和人孔井投点法进行合龙口实时测量及状态调整; 沉放结束后, 采用传统贯通测量方法测量合龙口状态. 最后, 将3种测量结果统一换算到工程坐标系下, 利用测量误差传递模型进行精度对比分析, 得到沉管隧道施工合龙口状态的最佳测量方法. 该方法改变了国内外沉管隧道施工中先形成合龙口状态, 后贯通测量, 再精确调整的施工方式, 为沉管隧道以及水下管道等大型水下安装工程提供了参考.

关键词: 工程测量; 港珠澳大桥; 沉管隧道; 合龙口; 测量塔; 人孔井投点; 贯通测量

中图分类号: P229.5

文献标志码: A

doi: 10.3724/SP.J.1249.2022.04402

Closure state measurement of final joint of the immersed tunnel of the Hong Kong-Zhuhai-Macao Bridge

SUO Xuhong¹, LIU Guohui², ZHANG Dejin^{2,3}, and GUAN Minglei^{2,4}

1) CCCC First Harbor Engineering Co. Ltd., Qingdao 266071, Shandong Province, P. R. China

2) Guangdong Key Laboratory for Urban Informatics, Shenzhen University, Shenzhen 518060, Guangdong Province, P. R. China

3) School of Architecture and Urban Planning, Shenzhen University, Shenzhen 518060, Guangdong Province, P. R. China

4) School of Artificial Intelligence, Shenzhen Polytechnic, Shenzhen 518055, Guangdong Province, P. R. China

Abstract: The immersed tunnel of the Hong Kong-Zhuhai-Macao Bridge adopts the construction mode of sinking from the east and west artificial islands to the middle to form a closed dragon mouth, and then sinking the final joint through. The final joint state parameter measurement is the key factor determining the success or failure of the project. Aiming at the problems of low efficiency, low measurement accuracy, poor reliability and inability to adjust the state of the closure in real time, this paper proposes a real-time measurement method for the formation of the closure state. Firstly, the measurement feature points are arranged on the end faces of the two pipe joints that form the closure, and the coordinates of the feature points in the pipe joint coordinate system are obtained by measurement. Secondly, in the process of sinking and laying, the measuring tower method and the manhole casting point method are used to measure and adjust the state of the closing mouth. Finally, the three measurement results are uniformly

Received: 2021-12-18; **Accepted:** 2022-04-10; **Online (CNKI):** 2022-06-27

Foundation: Shenzhen Science and Technology Program (KQTD2020090911395100)

Corresponding author: Professor ZHANG Dejin. E-mail: djzhang@szu.edu.cn

Citation: SUO Xuhong, LIU Guohui, ZHANG Dejin, 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. (in Chinese)



converted into the engineering coordinate system, and the accuracy is compared and analyzed by using the measurement error transfer model, and the best measurement method for the closing state of the immersed tunnel construction is obtained. This method changes the construction method of forming closure first, then measuring through and then adjusting accurately in the construction of immersed tunnels, and provides a reference for large-scale underwater installation projects such as immersed tube tunnels and underwater pipes.

Key words: engineering survey; Hong Kong-Zhuhai-Macao Bridge; immersed tunnel; final closure; survey tower; man-hole well casting point; penetration survey

港珠澳大桥集桥、岛、隧于一体, 东连香港、西接珠海和澳门, 是具有国家战略意义的世界级跨海通道。大桥隧道沉管段全长 5 664 m, 由编号 E1—E33 共 33 个管节和 1 个特制的最终接头组成, 属于外海超长沉管隧道, 是目前世界上综合难度最大的沉管隧道之一。隧道施工采用从东、西人工岛向中间沉放对接安装的方式。E1—E29 管节从西人工岛向东沉放安装, E33—E30 管节从东人工岛向西沉放安装, 利用最终接头将两条安装线路的末端管节 E29 和 E30 连接, 最终贯通形成一条完整的海底隧道^[1]。因此, 最终接头的成功安装对隧道工程至关重要。

在 E29 和 E30 管节安装结束后, 两个管节中间会形成一个凹槽作为最终接头的安装位置, 这个凹槽称为“合龙口”^[2]。最终接头需要根据形成的这个合龙口的状态数据进行设计生产和安装。合龙口状态测量是利用端面方位角、竖向倾角、横向偏差和里程偏差, 通过测量 E29 和 E30 沉管对接端面的标识特征点, 进而精确推算整个对接面的位姿, 为最终接头设计生产和沉放对接提供参数^[3]。当前国内外通常采用贯通测量的方法调整合龙口状态和获取合龙口状态参数, 依据合龙口状态参数设计生产和安装最终接头。在贯通测量方法中, 测量人员需要进入隧道内测量, 测量工作效率低、耗时长; 已安沉管隧道位姿不稳定、且测线长, 导致贯通精度可靠性差; 贯通测量在合龙口状态形成后进行, 再基于测量结果调整合龙口状态, 导致整体施工难度大^[4]。

针对合龙口状态测量存在的问题, 本研究提出合龙口状态实时测量方法, 设计了测量塔法和人孔井投点法两种合龙口状态实时测量方法, 在港珠澳大桥沉管隧道合龙口状态测量进行了实验, 并与传统贯通测量方法进行精度对比, 分析了 3 种方法的各自的适应性, 为港珠澳大桥沉管隧道最终接头合龙口状态提供了最优测量方案。

1 合龙口状态测量原理

管节预制和沉放施工阶段分别建立有管节坐标系和工程坐标系, 管节坐标系以管节中轴线为 x 轴方向, 以垂直于中轴线方向为 y 轴方向, 以对接端起点为原点 o , 如图 1。工程坐标系在施工控制网内以待沉管节理论沉放位置为基础建立, 贯通测量后修正的待沉管节方向为 x 轴方向。在管节预制场采用控制网测量管节上特征点在管节坐标系下的坐标, 依据设计参数换算 o 点在工程坐标系下的坐标, 并确定管节在工程坐标系 x 轴方向后, 管节特征点就能相应的换算到工程坐标系。因此, 管节沉放对接相当于管节坐标系 $o-xyz$ 平面在工程坐标系中的旋转和平移, 按照设计参数准确沉放完成后管节坐标系 $o-xyz$ 坐标系与工程坐标系重合。

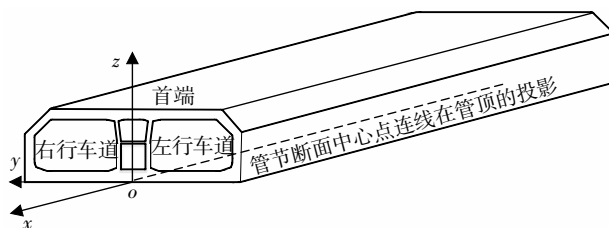


图1 沉管管节坐标系

Fig. 1 Immersed tube coordinate system.

管节坐标系的 x 轴根据管节中轴线确定, 管节中轴线依据管节端面特征点的平面测量结果进行计算选取。管节轴线示意图见图 2。其中, S1 表示管节的对接面, S8 表示管节的非对接面, S1-1 至 S1-8

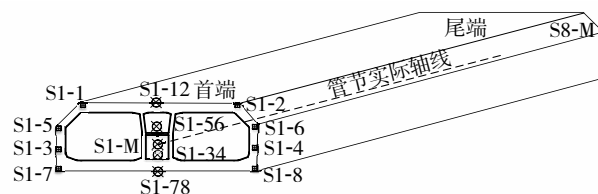


图2 管节轴线示意图

Fig. 2 Schematic diagram of the axis of immersed tube.

为人工标识的均匀布设对称的特征点. 以 4 对对称特征点中点 S1-12、S1-34、S1-56 和 S1-78 的中心作为管节对接面的中心点 S1-M, 同理, 标记非对接面的中心点为 S8-M. S1-M 和 S8-M 两点的连线为管节的实际中轴线, 实际中轴线在管节底面的投影为 x 轴. 管节实际中轴线示意图见图 2.

以水平状态下管节底面所在水平面为 xoy 平面,

以合龙口底边线理论中点为原点 o , 管节端面中心点连线所在竖直平面为 yoz 平面(图 3). E29 和 E30 管节坐标系 x 轴以指向右行车道为正向(沿着 S8 向 S1 方向分左右行车道), y 轴以指向 S8 端为正向, z 轴以竖直向上为正向. E29 管节坐标系示意图见图 3(a), E30 管节坐标系示意图见图 3(b).

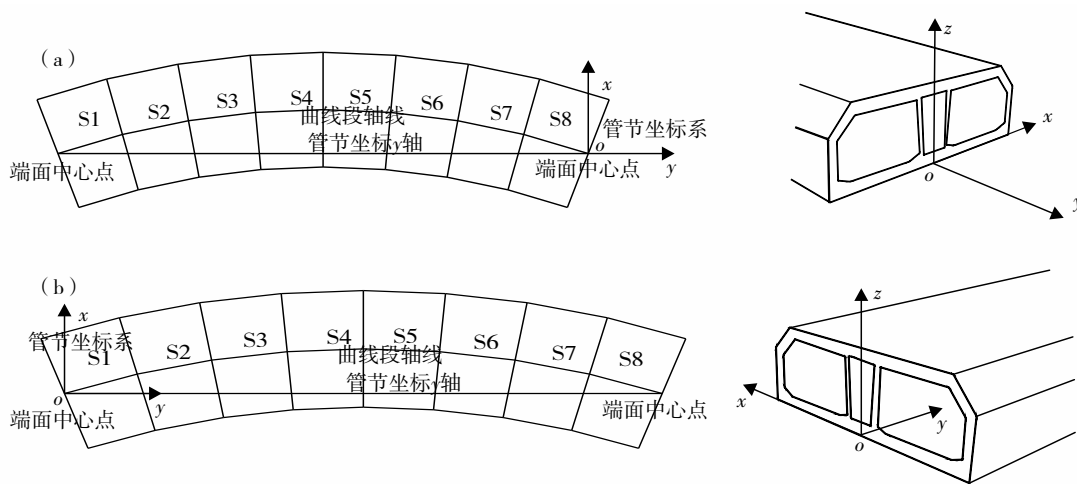


图 3 管节坐标系平面示意图 (a)E29;(b)E30

Fig. 3 Coordinate system of immersed tube of (a) E29 and (b) E30.

管节预制完成后, 基于预制场控制网测量管节端面特征点的管节坐标 $P(x, y, z)$, 基于设计参数计算管节端面底边线理论中点 o 在工程坐标系的坐标 $o(x_0, y_0, z_0)$, 姿态传感器测量管节横向倾角为 α , 管节纵向倾角为 β , 管节轴线方位角(首尾中心点连线)为 γ , 则可以计算待测点 P 在工程坐标系的坐标

$P(x_1, y_1, z_1)$. 为了获取合龙口状态参数, 需要先测定管节特征点, 再根据特征点标定成果推算管节端面的姿态, 为此需要确定管节坐标系与工程坐标系转换关系. 管节安装完成后, 可以测定管节坐标系与工程坐标系的转换关系^[5], 转换关系如式(1)所示.

$$\begin{cases} x_1 = -x \cos \alpha \cos \gamma - x \sin \alpha \sin \beta \sin \gamma - y \sin \beta \sin \gamma + z \sin \alpha \sin \gamma - z \cos \alpha \sin \beta \sin \gamma + x_0 \\ y_1 = -x \cos \alpha \cos \gamma + x \sin \alpha \sin \beta \cos \gamma + y \sin \beta \cos \gamma + z \sin \alpha \cos \gamma + z \cos \alpha \sin \beta \cos \gamma + y_0 \\ z_1 = -x \sin \alpha \cos \beta + y \sin \beta - z \cos \alpha \cos \beta + z_0 \end{cases} \quad (1)$$

其中, x 、 y 和 z 为管节上任意一点在管节坐标系中的坐标, x_1 、 y_1 和 z_1 为该点在工程坐标系中的坐标. x_0 、 y_0 和 z_0 为管节坐标系与工程坐标系间的平移量, α 、 β 和 γ 为管节坐标系与工程坐标系间的旋转角. x_0 、 y_0 、 z_0 、 α 、 β 和 γ 合称为管节坐标系与工程坐标系的坐标转换参数.

通过测量推算合龙口 E29 和 E30 管节对接面多个特征点, 得出合龙口的状态数据, 进而获得合龙口特制最终接头的生产设计与安装参数. 从端面特征点坐标公式分析, 影响端面特征点 P 坐标计算的主要因素为端面特征点管节坐标 $P(x, y, z)$ 、管节端

面底边线理论中点 o 工程坐标 $o(x_0, y_0, z_0)$ 、管节横倾 α 、管节纵倾 β 和轴线方位角 γ 的测量精度.

2 合龙口状态测量

E29 和 E30 管节安装完成后, 在 E29 尾端外侧端面 S8 与 E30 首端外侧端面 S1 形成合龙口. 合龙口两侧管节端面底边线中点距离称为合龙口宽度, 两侧管节端面在工程坐标系中的空间姿态为合龙口姿态, 隧道合龙口示意图请扫描论文末页右下角二维码见图 S1.

为了测量和调整合龙口状态,在水下沉管安装工程实践中,可以通过测量塔法、人孔井投点法以及贯通测量的方法进行。

测量塔法是在最终接头两侧管节沉放过程中,通过管顶测量塔上安装的全球导航卫星系统(global navigation satellite system, GNSS)设备和管节内部安装的姿态传感器测量管节的位置和姿态,实时计算合龙口的状态参数。该方法在管节沉放过程中可获取合龙口的状态参数,对合龙口状态进行调整。但是,管节在沉放过程中的形变、测量塔自身的形变等因素会影响合龙口参数的测量精度。

人孔井投点法是指合龙口两侧管节顶部预留有人孔井,人孔井投点法通过在管节顶部前后两个人孔井底盖板上安置天顶天底仪,在人孔井顶部架设的GNSS设备获取同轴点工程坐标,在管节内部人孔井正下方架设天顶天底仪进行同轴管内投点,结合管节内部姿态传感器提供数据计算合龙口的状态参数。该方法在管节沉放结束即可获取合龙口的状态参数,对合龙口状态进行调整。其精度主要受GNSS测量精度影响。

贯通测量法是在沉管安装后利用全站仪、水准仪等设备进行隧道贯通测量,将隧道外工程坐标引入到隧道内,计算合龙口的状态参数。该方法耗时长,也可能需要多次测量^[6],且无法实时调整合龙口状态,导致整体施工难度大。

2.1 测量塔法状态测量

测量塔法利用管顶两个测量塔顶部安装的GNSS设备,结合管节内部安装的姿态传感器测量管节位置和姿态,实时解算管节坐标系与施工坐标系的转换关系^[7],依此计算沉管端面特征点的实时位置,确定管节实时三维参数,对合龙口两侧两个端面的三维测量数据建模,实时得到合龙口的状态参数^[8-9]。测量塔法状态测量原理请扫描论文末页右下角二维码见图S2。

特征点坐标计算公式^[10]为

$$\begin{bmatrix} x_{\text{new}} \\ y_{\text{new}} \\ z_{\text{new}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} T_x \\ T_y \\ T_z \end{bmatrix} + (1+m) \begin{bmatrix} 1 & \omega_z & -\omega_y \\ -\omega_z & 1 & \omega_x \\ \omega_y & -\omega_x & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_{\text{old}} \\ y_{\text{old}} \\ z_{\text{old}} \end{bmatrix} \quad (2)$$

其中, x_{old} 、 y_{old} 和 z_{old} 是通过标定得到的特征点在管节坐标系中的坐标; T_x 、 T_y 、 T_z 、 ω_x 、 ω_y 和 ω_z 是通过GNSS设备及管内姿态仪的数据计算的管节坐标系与工程坐标系之间坐标转换参数; x_{new} 、 y_{new} 和 z_{new} 为特征点在施工坐标系中的工程坐标; m 为尺度

参数。

管节舾装时,测量塔与管节的关系会在浮态下进行标定^[11]。依据多次实测结果,测量塔参考平面的坐标分量中误差为20 mm,高程中误差为50 mm。在沉管安装过程中,GNSS定位参考平面坐标分量中误差为20 mm,测量塔形变等其他因素引起的平面中误差为10 mm,GNSS定位高程中误差为30 mm,采用测量塔法解算E29S8和E30S1端面特征点,二者影响误差因素一致。基于影响误差,计算E29S8和E30S1端面底边线理论中点 $o(x, y, z)$ 的测量中误差 m_{x0} 、 m_{y0} 和 m_{z0} 分别为30、30和58 mm,管节轴线方位角测量中误差 m_γ 为 $0.016\ 21^\circ$,横倾误差(m_α)、纵倾误差(m_β)分别为 $0.058\ 0^\circ$ 和 $0.050\ 4^\circ$ 。E29S8和E30S1端面测量方法一致。将以上误差分析结果代入式(1),计算端面特征点各分量中误差。

采用测量误差传播方法计算端面坐标点测量精度,

$$\begin{cases} z = F(x_1, x_2, \dots, x_n) \\ m_z = \sqrt{\left(\frac{\partial F}{\partial x_1}\right)^2 m_1^2 + \left(\frac{\partial F}{\partial x_2}\right)^2 m_2^2 + \dots + \left(\frac{\partial F}{\partial x_n}\right)^2 m_n^2} \end{cases} \quad (3)$$

其中, z 是关于变量 x 的函数; m_z 是函数 z 的中误差; x_n 为第 n 次测量值; m_n 为第 n 次测量值中误差。计算得到端面点坐标测量结果的精度为: m_x 的中误差为32.5 mm, m_y 的中误差为32.1 mm, m_z 的中误差为61.3 mm。

2.2 人孔井投点状态测量

E29和E30管节管顶设计有人孔井结构。如图4所示,管节初步完成安装后,在沉管人孔井盖板上安置天顶天底仪,对中人孔井盖板上表面特征点ZD1,倒转天顶天底仪向人孔井顶部投点,移动顶部GNSS天线使其与ZD1同轴,通过GNSS静态观测测定ZD1坐标。在管节内部人孔井正下方架设天顶天底仪,调整仪器位置并对中人孔井盖板下表面特征点ZD2(ZD2与ZD1同轴),使用全站仪放样,将所投点ZD2放样在行车道地面上为特征点ZD3。依此方法完成人孔井投点,将平面测量基准引入管节内,完成管节平面位置测定。

在沉管安装过程中,GNSS设备定位的平面坐标分量中误差为20 mm,对中误差(含测量塔摇晃和形变等)为10 mm,E29S8、E30S1端面底边线理论中点 o 的测量中误差 m_{x0} 和 m_{y0} 均为22 mm。人孔井

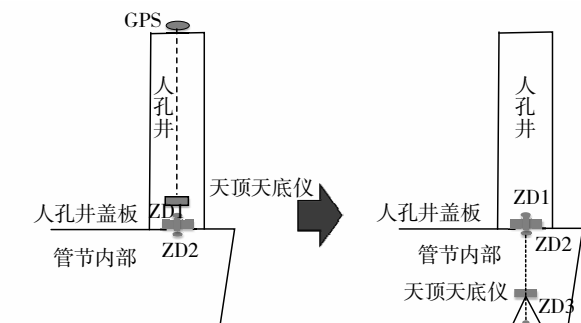


图4 人孔井投点测量原理

Fig. 4 Measuring principle of hole casting.

投点法管节轴线方位角测量中误差 m_γ 为 $0.010\ 07^\circ$, 横倾误差 (m_α)、纵倾误差 (m_β) 分别为 0.030° 和 0.006° . 采用人孔井投点法解算 E29S8、E30S1 端面特征点, 二者影响误差因素一致. 将误差分析结果代入式(1), 采用误差传播方法计算得到端面点坐标测量结果为: m_x 的中误差为 23.3 mm, m_y 的中误差为 22.3 mm, m_z 的中误差为 32.0 mm.

2.3 贯通测量

贯通测量根据岛隧工程首级加密控制网控制点数据, 进行洞外导线点测量, 利用进洞导线测定管内贯通测量特征点. 沉管隧道进洞导线平面控制网主要由洞外和洞内交叉双导线组成^[12]. 洞外分别设置左右测站, 采用 3 个已知点, 多测回全圆测回法确定进洞方向, 洞内左、右行车道上采用交叉双导线联系测量. 同一车道内相同里程上的两个导线点之间的短边不进行观测, 左、右车道交叉导线网联测通过外侧墙导线点进行联系, 联测边如下图弧线示意^[13], 沉管隧道贯通面西侧 (E29 侧) 控制网网形设计见图 5 所示, 沉管隧道贯通面东侧 (E30 侧) 控制网网形设计见图 6.

贯通测量测定尾端端钢壳端面底边线理论中点 o 的流程如图 7 所示. 采用贯通测量控制点二等水准测量方法, 管节首端贯通点 SGT、管节尾端贯通点 WGT 和设置在行车道上的用于测定管节横倾的

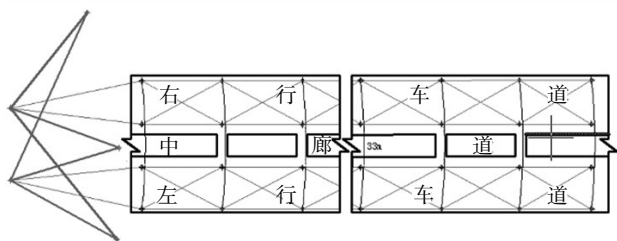


图5 沉管隧道贯通面西侧控制网

Fig. 5 West survey control network of sinking tunnel.

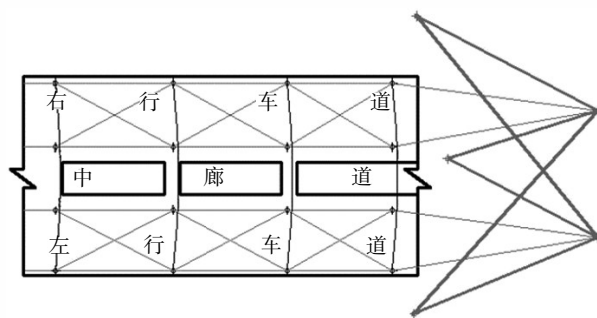


图6 沉管隧道贯通面东侧控制网

Fig. 6 East survey control network of sinking tunnel.

高程特征点 L1、R1、L2、R2 的高程. 采用全站仪测定管节首尾贯通测量点 SGT、WGT 的平面坐标. 之后, 通过 SGT、WGT 计算管节底板平面偏差及管节纵倾, 通过 L1、R1 计算管节首端横倾, 通过 L2、R2 计算管节尾端横倾.

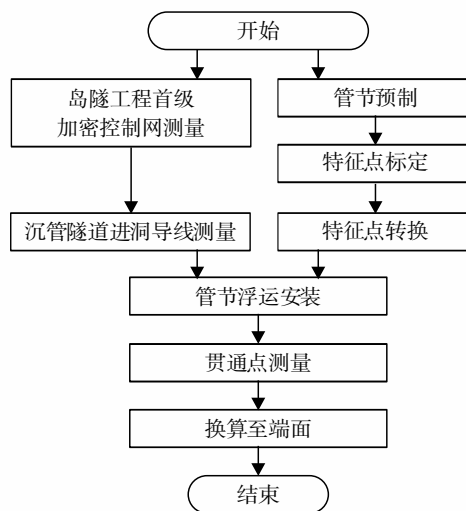


图7 贯通测量流程图

Fig. 7 The flow chart of the penetration measurement.

沉管隧道长距离进洞导线测量数据利用地面测量工程控制与施工测量内外业一体化和数据处理自动化系统按照设计的网型和测角、量边精度进行模拟计算^[14], 测角中误差取 $0.000\ 28^\circ$, 测边中误差取所用仪器 Leica TS30 的标称测距精度 0.6 mm, 比例误差是测距的百万分之一, 得到西岛端导线网引起的横向贯通中误差为 30.2 mm, 东岛端导线网引起的横向贯通中误差为 4.6 mm, 贯通测量放样中误差 x 坐标取值为 3 mm. 受岛隧工程首级加密控制网测量误差、仪器误差、外业测量误差和坐标系系统误差等因素影响, 按照 1 mm/km 的中误差估计洞内导线 y 坐标, E29S8 端面 y 坐标综合测量中误差按

照 10 mm、E30S1 端面 y 坐标综合测量中误差按照 5 mm 进行计算, E29S8 端面高程测量中误差按照 5 mm、E30S1 端面高程测量中误差按照 5 mm 进行计算. 端面底边线理论中点 $o(x_0, y_0, z_0)$ 的测量中误差分别为: m_{x0} 的中误差是 30 mm, m_{y0} 的中误差是 10 mm, m_{z0} 的中误差为 5 mm.

标定贯通点误差为 5 mm, 放样误差为 3 mm, 轴线方位角测量中误差 m_{γ_1} 为 $0.002\ 63^\circ$, m_{γ_2} 为 $0.001\ 39^\circ$, m_{γ_3} 为 $0.000\ 68^\circ$, m_{γ_4} 为 $0.001\ 35^\circ$. 由误差计算公式, E29S8 轴线方位角测量中误差 m_{γ_5} 为 $0.001\ 94^\circ$, E30S1 轴线方位角测量中误差 m_{γ_6} 为 $0.001\ 51^\circ$. 横倾误差(m_α)、纵倾误差(m_β)分别为 0.030° 和 0.006° . E29S8(尾端)、E30S1(首端)端面进洞导线长度不一致. 将以上误差分析结果代入式(1), 采用误差传播方法可求得端面点坐标测量精度结果. 其中, E29S8 的端面特征点中误差为:

m_x 的中误差为 31.0 mm, m_y 的中误差为 10.1 mm, m_z 的中误差为 12.2 mm. E30S1 的端面特征点中误差为: m_x 的中误差为 9.1 mm, m_y 的中误差为 5.2 mm, m_z 的中误差为 11.2 mm.

3 测量方法对比分析

对各方法的测量精度评估结果见表 1. 对端面倾斜及方位的测量精度评估结果见表 2.

表1 最终接头合龙口姿态点坐标测量精度评估结果
Table 1 Evaluation results of coordinate measurement accuracy of final joint of sinking tunnel. mm

测量方法	E29S8			E30S1		
	m_x	m_y	m_z	m_x	m_y	m_z
贯通测量	31.0	10.1	12.2	9.1	5.2	11.2
测量塔	32.5	32.1	61.3	32.5	32.1	61.3
人孔井投点	23.3	22.3	32.0	23.3	22.3	32.0

表2 最终接头合龙口姿态端面倾斜及方位测量精度评估结果
Table 2 Evaluation results of the end face inclination and azimuth measurement accuracy of final joint of sinking tunnel.

测量方法	E29S8			E30S1		
	横倾/%	纵倾/%	方位角/($^\circ$)	横倾/%	纵倾/%	方位角/($^\circ$)
贯通测量	0.052 36	0.011 11	0.001 94	0.052 36	0.011 11	0.001 51
测量塔	0.101 77	0.087 97	0.016 21	0.101 77	0.087 97	0.016 21
人孔井投点	—	—	0.010 07	—	—	0.010 07

表 1 和表 2 均是采用中误差获得的计算结果. 1 倍中误差概率为 68.3%, 2 倍中误差概率为 95.4%, 3 倍中误差概率为 99.7%. 因此, 本研究提出的两种合龙口状态实时测量方法均能达到合龙口状态测量的精度要求^[15]. 3 种测量方法具有以下特点:

1) 测量塔法. 该方法实时性最高, GNSS 精度可靠, 精度不受隧道长度影响, 在合龙口形成过程中就可以对合龙口状态进行调整, 一次性形成符合设计要求的龙口状态. 但该方法不适合超大水深的测量, 超大水深使得测量塔存在较大变形, 导致测量精度大幅降低, 数据不可靠.

2) 人孔井投点法. 该方法准实时、精度高, 且精度不受隧道长度影响, 在合龙口初步形成就可以获取合龙口状态参数进行调整. 该方法也不适合超大水深测量, 超大水深使得人孔井存在较大晃动, 导致测量精度大幅降低.

3) 贯通测量法. 该方法简单、数据处理难度低、成本低, 短隧道精度较高. 但该方法实时性差、耗时长, 且精度随着隧道长度增加而降低, 先

贯通再调整也给整体施工带来难度.

结 语

港珠澳大桥沉管隧道属于外海超长沉管隧道. 针对当前合龙口状态测量存在效率低、耗时长、无法实时调整合龙口状态等问题, 提出了测量塔法和人孔井投点法两种合龙口状态实时测量方法, 并与传统贯通测量法对比分析, 结果表明两种方法均满足合龙口状态测量精度要求, 测量效率和可靠性相对于贯通测量法具有显著优势. 将本研究提出的测量塔法和人孔井投点法应用于港珠澳桥合龙口形成过程, 一次性形成合龙口. 采用合龙口状态的最优组合测量方案, 降低了施工风险, 简化了施工流程, 提高了施工质量, 实现了港珠澳大桥海底隧道最终接头的安全设计生产与安装, 最终接头两端与已沉管节横向相对偏差仅为 1.8 mm. 本研究提出的合龙口状态实时测量方法, 改变了国内外沉管隧道施工中先形成合龙口状态、后贯通测量、再精确

调整的施工方式,解决了超长沉管隧道最终接头合龙口高精度测量技术难题,为沉管隧道以及水下管道等大型水下安装工程提供了参考。

基金项目:深圳市高层次人才资助项目(QTD2020090911395100)

作者简介:锁旭宏(1988—),中交一航局第二工程有限公司工程师。研究方向:海洋测量。E-mail:1398900215@qq.com

引文: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.

参考文献 / References:

- [1] 何杰,高正荣,辛文杰.港珠澳大桥沉管隧道合拢口水动力条件数值模拟研究[J].工程科学与技术,2019,51(6):68-74.
HE Jie, GAO Zhengrong, XIN Wenjie. Numerical simulation of hydrodynamic conditions on closure gap of immersed tunnel in Hong Kong-Zhuhai-Macao Bridge [J]. Advanced Engineering Sciences, 2019, 51 (6): 68-74. (in Chinese)
- [2] 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 Fengliang, LI Jialin, LI Jinfeng, et al. Closure construction technology for final joint of immersed tunnel of Hong Kong-Zhuhai-Macao Bridge [J]. China Harbour Engineering, 2019, 39(11): 67-71. (in Chinese)
- [3] LIN Ming, LIN Wei, WANG Qiang, et al. The deployable element, a new closure joint construction method for immersed tunnel [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2018(80): 290-300.
- [4] 李海全,何青.海底沉管隧道安放测量[J].海洋测绘,2004,24(6):34-36.
LI Haiquan, HE Qing. Undersea immersed tube tunnel placement measure [J]. Ocean Mapping, 2004, 24(6): 34-36. (in Chinese)
- [5] 杨军,刘成龙,杨雪峰,等.测量塔法沉管隧道沉放测控中三维坐标转换的一种新方法[J].测绘地理信息,2021,44(9):22-30.
YANG Jun, LIU Chenglong, YANG Xuefeng, et al. A new 3d coordinate transformation method for construction survey of immersed tunnel by measurement-tower [J]. Geomatics & Spatial Information Technology, 2021, 44(9): 22-30. (in Chinese)
- [6] 雷巨光.沉管隧道施工控制测量方法研究[D].成都:西南交通大学,2010.
LEI Juguang. Research on Measurement and control methods for construction of immersed tunnels [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2010. (in Chinese)
- [7] 谢鸣宇,姚宜斌.三维空间与二维空间七参数转换参数求解新方法[J].大地测量与地球动力学,2008,28(2):104-109.
XIE Mingyu, YAO Yibin. A new method for solving seven-parameter transformation parameters in three-dimensional space and two-dimensional space [J]. Geodetic and Geodynamics, 2008, 28(2): 104-109. (in Chinese)
- [8] 陈永奇.工程测量学[M].4版.北京:测绘出版社,2016.
CHEN Yongqi. Engineering surveying [M]. 4th ed. Beijing: Surveying and Mapping Publishing House. (in Chinese)
- [9] 李征航,魏二虎,王正涛,等.空间大地测量学[M].武汉:武汉大学出版社,2010:79-84.
LI Zhenghang, WEI Erhu, WANG Zhengtao etc al. Space geodesy [M]. Wuhan: Wuhan University Press, 2010: 79-84. (in Chinese)
- [10] 徐绍铨,张华海,杨志强,等.GNSS测量原理及应用[M].武汉:武汉测绘科技大学出版社,2000.
XU Shaoquan, ZHANG Huahai, YANG Zhiqiang, et al. Measurement principle and application of GNSS [M]. Wuhan: Wuhan Technical University of Surveying and Mapping Press, 2000. (in Chinese)
- [11] 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 Yangyang, JIA Xu, XU Liang. Research on the calibration method of immersed tube in floating state [J]. China Harbour Engineering, 2021, 41(11): 29-33. (in Chinese)
- [12] 陈光金,徐涛,汤宪海,等.隧道洞内CPII导线测量旁折光的影响与对策探讨[J].铁道勘察,2014,40(2):4-8.
CHEN Guangjin, XU Tao, TANG Xianhai, et al. Discussion on influence and countermeasure of side refraction of CPII wire in tunnel [J]. Railway Survey, 2014, 40(2): 4-8. (in Chinese)
- [13] 姚辉,陈凤颖.全站仪气象改正公式及气象元素测量精度对距离的影响[J].测绘通报,2008(4):14-16.
YAO Hui, CHEN Suying. Total station meteorological correction formula and effect of meteorological element measurement precision on distance [J]. Surveying and Mapping Bulletin, 2008(4): 14-16. (in Chinese)
- [14] 成益品,孙阳阳,高应东,等.海外超长沉管隧道精密贯通测量设计与实践[J].中国港湾建设,2018,38(5):12-15.
CHENG Yipin, SUN Yangyang, GAO Yingdong, et al. Design and practice of precision penetration survey for offshore ultra-long immersed tube tunnel [J]. China Harbor Construction, 2018, 38(5): 12-15. (in Chinese)
- [15] 宿发强.超大型沉管浮运的风险管控[J].中国港湾建设,2015,35(7):1-4.
SU Faqiang. Risk management on floating of ultra-large immersed tube [J]. China Harbor Engineering, 2015, 35 (7): 1-4. (in Chinese)

【中文责编:坪梓;英文责编:之聿】



补充材料