

过黄浦江顶管工程的精密导向技术

黄 腾 华锡生

(河海大学土木工程学院 南京 210098)

摘 要 在误差分析的基础上研究了长距离顶管工程中精密导向技术.所采取的各种误差合理分配、施测方案、竖井的精密方位传递、提高陀螺经纬仪的定向精度以及为满足顶管工程动态顶进特点而采用精密导线控制自动导向系统等一系列的方法和措施,确保了贯通的高精度,有效地解决了顶管中精密导向问题.本项技术应用于上海市过黄浦江顶管工程,效果显著.

关键词 顶管工程 方位传递 动态顶进 自动导向系统

中图分类号 P631.83

过黄浦江排水管道的建设是上海市政重大工程之一,因其顶进距离特长、技术难度大、精度要求高,所以是上海市排水工程中的关键项目.按上海市政工程规划,浦西的城市污水,经陆地上明槽开挖后埋设的排污主管道,过黄浦江到浦东,再由浦东埋设的主管道排向东海.

此排水工程中,排水管穿过黄浦江是采用在浦东和浦西各设一座深度分别为 32 m 和 18 m 的集水井,各集水井底部侧壁预留两个直径 2.9 m 的洞口.通过此洞口由浦东井采用顶管技术把两条直径 2.8 m,每节长度 3.0 m 的钢筋混凝土管在距地表 30 m 深处顶到浦西竖井的预留洞口内,如图 1 所示.

顶管全长约 760 m,要求顶管贯通中误差不大于 ± 25 mm,即全长偏向中误差小于 $\pm 7''$.0.如果偏向误差过大,将导致昂贵的掘进机头难于取出,使工程受到损失.

在长距离、深度大的顶管工程中,必须为掘进机提供准确的挖掘方向、保证掘进过程中及时的纠偏、提供混凝土管的精密顶进方向和顶进轨迹.因此,精密的导向技术是关键.

顶管工程的定位导向技术有别于隧洞及其它地下工程的导向测量.这是由于顶管作业是个动态的过程,每节管子随着顶进而不断地向前移动,有时甚至会产生少量的转动,因此在管子内找不到稳定的固定点,对测量作业带来了更大的困难.所以,在顶管工程中,应根据其特点,合理地进行误差的分配并采用有效的技术,才能确保顶管工程高质量地完成.

1 测量误差的配赋

整个顶管的精密导向中,测量误差 M 主要由三个独立部分组成:地面控制测量的误差 m_1 ,竖井联系测量的误差 m_2 ,洞内导向测量的误差 m_3 ,即

$$M = \pm \sqrt{m_1^2 + m_2^2 + m_3^2} \quad (1)$$

要确保最终的贯通误差 $M \leq \pm 25$ mm,并顾及到此三部分测量作业的难易程度、工作环境和已有的仪器设备,结合顶管工程动态顶进的特点,故在此顶管工程导向作业中,将贯通误差按 1:2:2 的比例由中误差传播律配

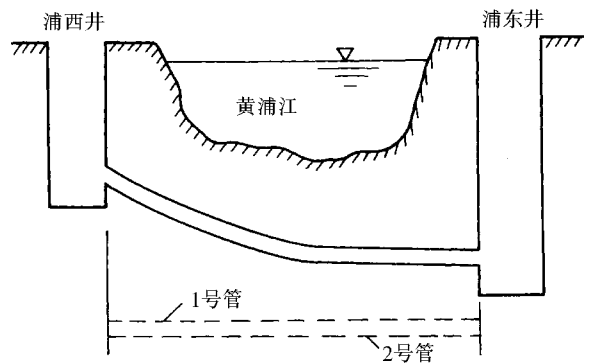


图 1 黄浦江排水管示意图

Fig.1 Drainage pipeline of the Huangpu River

赋给三个部分.由式(1)可得 $m_1 \leq \pm 8.3 \text{ mm}$, $m_2 \leq \pm 16.6 \text{ mm}$, $m_3 \leq \pm 16.6 \text{ mm}$. 根据本工程的特点,可以认为以上三部分的误差都是在两个井口附近展开的.例如,地面控制的精度主要体现在两个井口投点的相对精度,联系测量及洞内导线也在井口部位进行.所以上述误差的配赋,按两井口距离为 760 m 计,则三个部分对方位误差的要求,分别为 $m_1 \leq \pm 2''.2$, $m_2 \leq \pm 4''.4$, $m_3 \leq \pm 4''.4$. 上述的含义为,两个洞口投点坐标中误差而产生的方位误差不能大于 $\pm 2''.2$,竖井联系测量的方位误差不能大于 $\pm 4''.4$,洞内导线方位角闭合差的中误差不能大于 $\pm 4''.4$.

2 地面控制

为精确求得浦东、浦西两个竖井的位置及对应洞口间的方位,地面控制网布设成由煤厂、粮仓、船厂和环卫厂四点构成的大地四边形,并在各点设置强制对中观测墩,如图 2 所示.四边形平均边长 900 m,最长边为 1.2 km,用 T2000 电子经纬仪按国家 II 等网要求观测,经精度估算可确保最弱点位中误差不大于 $\pm 2 \text{ mm}$.

此外,在浦西及浦东井口各设置一个井口投点西 1 和东 1. 由于建筑物众多、通视极困难,只能以极坐标法测定井口投点的坐标.极坐标测定时,以 T2000 6 测回测角 ($m_\beta \leq \pm 1''.0$),DI5 测距 ($m_s \leq 3 \text{ mm} + 2 \times 10^{-6}$),极距不大于 500 m,则极坐标法定位的中误差约为

$$m' = \pm \sqrt{m_s^2 + \left(\frac{m_\beta}{\rho} S\right)^2} = \pm 4.7 (\text{mm})$$

顾及控制网的误差,则洞口投点的误差约为 $\pm 5.0 \text{ mm}$,满足了不大于 $\pm 8.3 \text{ mm}$ 的要求.如果按方位误差考察,两洞口投点相对误差可看作 $\sqrt{2} \times 5.0 \text{ mm}$,若把距离误差和方位误差考虑为等影响,则两洞口投点间的方位误差应为

$$m_\alpha = \frac{5.0}{760\,000} \rho'' = \pm 1''.4 < \pm 2''.2$$

即地面控制对贯通方位的影响仅 $1''.4$ 左右.

3 竖井联系测量

要把地面控制的坐标及方位精确传递到 30 m 深处的井底,以便准确地指导顶管作业,就必须完成竖井的联系测量工作.以浦东竖井为例,虽然竖井直径 10 m,但由于井内已布置升降机、空压机、大功率油压千斤顶等许多设备,可用的最大直径只 7 m 左右,所以没有较大余地可以利用.

竖井联系测量最重要的是确保方位传递的高精度.为满足贯通精度,前面的分析表明,要求方位传递不大于 $\pm 4''.4$.

3.1 联系三角形法

如图 3 所示,在洞口适合位置布置洞口投点东 1,再向竖井内悬挂两根直径 0.3 mm 的钢丝 a 和 b,末端悬挂 15 kg 重锤,浸入置于井底的两只油桶内.在东 1 及井底 EM 点架经纬仪,测定 $\beta_1, \beta_1', \beta_0, \beta_0'$,并精确量得 $S_1, S_2, S_3, S_1', S_2', S_3'$. 由联系三角形经平差后可解得 β_2, β_2' 之

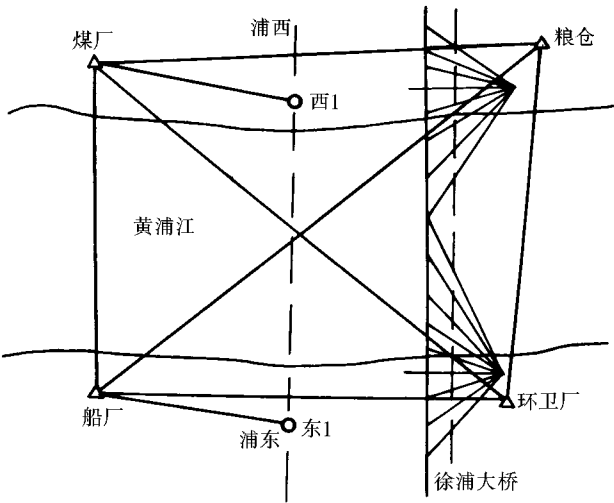


图 2 地面控制网示意图

Fig.2 Control network on ground

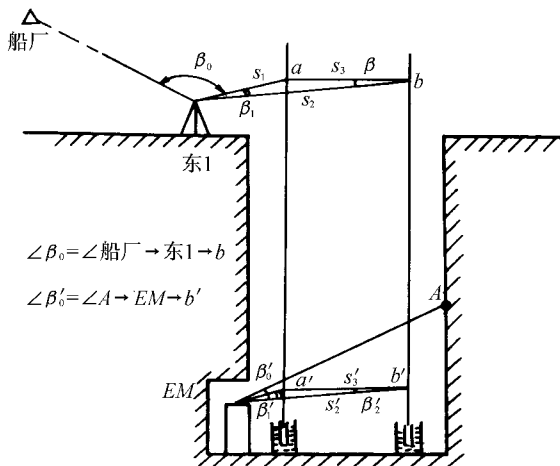


图 3 竖井联系测量的布置

Fig.3 Layout of shaft measurement

值. 以地表三角形为例,

$$\sin\beta_2 = \sin\beta_1 \frac{S_1}{S_3} \tag{2}$$

若布置三角形,使 β_1 和 β_2 均很小,则式(2)为

$$\beta_2 = \beta_1 \frac{S_1}{S_3} \tag{3}$$

由微分式(3)得

$$d\beta_2 = \frac{S_1}{S_3}d\beta_1 + \frac{\beta_1}{S_3}dS_1 - \frac{\beta_1 S_1}{S_3^2}dS_3 \tag{4}$$

转换成中误差

$$m_{\beta_2}^2 = (\frac{S_1}{S_3})^2 m_{\beta_1}^2 + (\frac{\beta_1}{S_3})^2 m_{S_1}^2 + (\frac{\beta_1 S_1}{S_3^2})^2 m_{S_3}^2 \tag{5}$$

取 $m_{S_1} = m_{S_3} = m_S$, 则

$$m_{\beta_2}^2 = (\frac{S_1}{S_3})^2 m_{\beta_1}^2 + (\frac{1}{S_3^2} + \frac{S_1^2}{S_3^4}) \beta_1^2 m_S^2 \tag{6}$$

若联系三角形布置为 $\beta_1 < 30'$, $S_3 = 7.0\text{ m}$, $S_1 = 4.0\text{ m}$, 各边量距误差 $m_S \leq \pm 1.0\text{ mm}$, 观测 β_1 角度时采用 T_2 经纬仪 6 测回 ($m_{\beta_1} \leq 1''.2$), 则由式(6)可估算得 β_2 的精度为 $m_{\beta_2} \leq \pm 1''.0$.

由图 3 可知,竖井从地面方位 $\alpha_{\text{船厂}-\text{东}1}$ 传递到井底 α_{EM-A} 的计算式为

$$\alpha_{EM-A} = \alpha_{\text{船厂}-\text{东}1} + \beta_0 + \beta_2 + \beta_2' + \beta_0' \pm 180^\circ \tag{7}$$

则

$$m_{\alpha_{EM-A}}^2 = m_{\alpha_{\text{船厂}-\text{东}1}}^2 + m_{\beta_0}^2 + m_{\beta_2}^2 + m_{\beta_2'}^2 + m_{\beta_0'}^2 \tag{8}$$

取 $m_{\alpha_{\text{船厂}-\text{东}1}} = \pm 1''.6$, $m_{\beta_0} = m_{\beta_0'} = \pm 1''.5$, $m_{\beta_2} = m_{\beta_2'} = \pm 1''.0$, 那么经联系三角形方位传递后, $M_{\alpha_{EM-A}} \leq \pm 3''.0$.

可见经优化布置后的联系三角形 ($\beta_2 < \beta_1 < 30'$, $S_1 < S_3$), 在竖井方位传递中, 可以达到较高精度. 本工程的浦东竖井方位传递中误差为 $3''.0$ 左右, 保证了顶管施工的精度要求.

3.2 陀螺经纬仪定向

陀螺经纬仪作为一种物理定向仪器,在地下工程中得到了较好的应用. 但是,由于陀螺经纬仪一些误差的影响而降低了定向的精度,特别是由于悬带在测量过程中受导流丝温度作用及悬带长期处于动力作用状态,将会使悬带零位产生漂移,极大地影响测值稳定性和精度. 采取措施减弱这种误差的影响,对提高定位精度有十分显著作用.

每台陀螺经纬仪悬带零位在测量过程中的漂移均有各自的特点,在浦东竖井方位传递中用一台 WILD GAK1(配 T2)陀螺经纬仪,为研究零位漂移的规律进行了多次的连续两个小时以逆转点法跟踪测量试验. 各次试验结果表明,漂移规律基本一致. 这里以 1997 年 10 月 25 日测量结果为例,表述该仪器零位漂移的规律性.

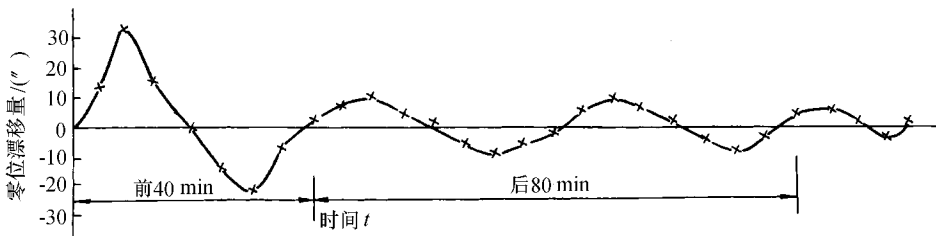


图 4 陀螺零位漂移曲线

Fig.4 Curve of gyroscopic zero drift

图 4 为取前两个小时 5 个逆转点为一组的连续跟踪计算定向中值. 在前 40 min 左右,各组定向中值间的偏差较大,与两个小时观测的平均值最大差异可达 $30'$, 且计算得的每个定向值的中误差约为 $\pm 12''$. 但工作 40 min 后,各定向值渐趋稳定,与平均值的偏差显著减小,最大差异不大于 $\pm 10''$, 每次定向中误差为 $\pm 6''.5$ 左

右.

由此可见,若以此台陀螺经纬仪定向,开机 40 min 后以 5 个逆转点方法定向,精度可得到显著提高.此外,从零位漂移规律来看,该仪器漂移的周期约 40 min 且近于正弦分布.如果在开机 40 min 后连续观测 8 组逆转点中值(每组约需 5 min),取平均值,则能进一步提高定向精度.根据试验结果预计,若连续测定 8 组逆转点中值,各中值的互差不大于 $\pm 10''$,取平均值后的定向中误差可达到 $\pm 3''.0$ 左右.

3.3 实测结果分析

过黄浦江顶管工程中,竖井方位传递的精度要求非常高.对此在测量作业中,以联系三角形法为依据,再辅以陀螺经纬仪的定向检核.实际多次作业的结果表明,这种施测方案是十分有效的,都能达到较高的精度.这里以 1997 年 10 月 25 日和 10 月 26 日两天,用两种方法传递井底 EM-A 的方位为例进行比较.

表 1 是两种传递方法测量的结果.联系三角形法在 25 日上、下午各进行一次.陀螺经纬仪在 26 日上午,以 3—3—3(地面—井底—地面)测回完成.检核的结果表明,两者互差不大于 $\pm 3''.0$.

表 1 两种定向方法的比较

Table 1 Comparison of two orientation methods		
定向方法	起始方位	定向结果(EM-A)
联系三角形法	$\alpha_{东1-船厂}$	上午 $214^{\circ}44'19''.82$
		下午 $214^{\circ}44'18''.48$
陀螺经纬仪	$\alpha_{东1-船厂}$	$214^{\circ}44'21''.07$

4 洞内动态导向

4.1 自动导向系统

顶管作业时,每节管子(3 m 长)顶进过程中均需实时指导顶进方向并且在不断地移动,此外还必须为控制油压千斤顶提供信息,因此通常的测量工作难于满足顶管的需要.所以洞内导向作业中,采用由机头计算机集中控制的自动跟踪全站仪(每隔 200 m 设一台)组成导向系统,以全自动三维导线测量,实施导向工作,如图 5 所示.

自动跟踪全站仪为 2'' 级测角精度,2mm + 3×10^{-6} 测距精度.用屏蔽电缆连入计算机.计算机内预置相应软件,可发布测量指令、接收测量信息并迅速处理、导线平差、显示顶进位置等多种功能,完成实时跟踪掘进方向和控制油压千斤顶的顶进作业.

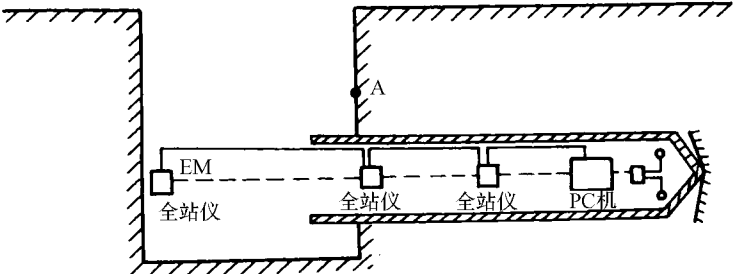


图 5 自动导向系统示意图
Fig.5 Auto-guiding system

4.2 精密导线

由于多种因素影响,这套自动导向系统并不十分稳定,为确保顶进方向的准确可靠,在顶管每推进 50 m 进行一次精密导线和 II 等水准的测量工作,用作自动导向系统的检核和顶进方向的纠偏依据.

此顶管工程在平面上是一条直管,所以精密导线测量中,由直伸等边导线精度分析知,横向中误差为

$$m_u = \pm \sqrt{[S]^2 \frac{m_{\beta}^2}{\rho^2} \cdot \frac{n+1.5}{3}} \tag{9}$$

由于作为控制的精密导线点每 200 m 设点,而 $[S] = 760$ m,精密导线四测回测角 $m_{\beta} \leq \pm 1''.5$,则由式(9)可得

$$m_u \leq \pm 9.0 \text{ mm}$$

表 2 所示为精密导线与自动导向系统每 50 m 对掘进机头测距棱镜标志定位的结果.

表 2 两种测量系统横向测值比较

Table 2 Comparison of observed values of two observation systems in grain-short direction												mm
距离/m	57.0	98.0	143.0	198.0	262.5	305.0	349.6	399.2	483.5	575.7	649.3	721.2
精密导线	-37.0	20.0	-3.0	-4.0	76.0	74.4	383.0	-42.0	22.0	55.0	-97.0	-59.3
自动定向系统	-18.0	20.0	-3.0	-1.0	79.0	51.0	362.0	-80.0	45.0	26.4	-45.0	-30.0
差值	-19.0	0.0	0.0	-3.0	-3.0	23.4	21.0	38.0	-23.0	28.6	-52.0	-29.3

由表 2 可知,由于自动导向系统的不稳定而使两种测量成果有时产生一定差异.根据精密导线的测量结

果,不断对自动导向系统修正,指导开挖顶进的方向.整个顶管工程前后历经 10 个月,在洞内精密导线的控制下,终于贯通.最终的贯通误差经测定,横向为 9 mm,高程为 3 mm,达到了很高的精度.

5 结 束 语

a. 地下长距离顶管工程中,为确保准确贯通,对各种误差限值应进行合理分配.分配时,应充分考虑各测量环节的难易、工作的环境条件、已有的仪器及技术水平,才能确定较优的方案,顺利地实施测量作业.此外,必须充分重视采用不同测量方法加强相互检核,确保测量结果的精度和可靠性.

b. 联系三角形法传递方位,能达到较高的精度,但在现场布设时必须特别注意图形的优化,以利方位传递精度的提高.

c. 陀螺经纬仪观测时间段的正确选择对进一步提高定向精度有显著作用.在本工程中,以高精度陀螺经纬仪定向,用作联系三角形法的检核和补充是十分有效和必要的.

d. 顶管工程中采用自动导向系统能满足动态实时导向的要求,有很好的发展及应用前景.由于顶管工程测量条件很差,周期较长,所以自动导向系统应进一步改善长期工作的稳定性及测值的可靠性.

Precise Guiding Technology for Underground Pipe-Driving Project through the Huangpu River

Huang Teng Hua Xisheng

(College of Civil Engineering, Hohai Univ., Nanjing 210098)

Abstract The precise guiding technology used in long distance underground pipe-driving project is studied on the basis of error analysis. Some methods and measures are studied, such as the rational readjustment of all kinds of error, the surveying plan, the precise azimuth transfer of shaft, and the auto-guiding system with traverse control improving the orientation precision of gyro theodolite, in order to take into consideration the feature of dynamic driving-in of the underground pipe-driving project. The high precision of holing through is ensured, and the precise guiding problems in the underground pipe-driving project are resolved effectively. This technology is applied to the underground pipe-driving project through the Huangpu River in Shanghai, and the result is significant.

Key words underground pipe-driven project ; azimuth transfer ; dynamic driving-in ; auto-guiding system