

无定向导线在地铁测量中的应用

文 / 刘 鑫 中交三航局第九工程有限公司

摘要: 在地铁工程区间隧道的控制测量过程中, 针对盾构法的施工特点, 采用两井定向法进行平面联系测量较为普遍, 一般利用地铁车站两侧设置端头井作为联系测量竖井, 井下通过构造合理的无定向导线来传递平面坐标并得到较高的定向精度。本文结合杭州地铁10号线一期工程隧道控制测量实例, 浅述无定向导线的测量与计算过程。

关键词: 控制测量; 盾构法; 两井定向; 无定向导线

【DOI】 10. 12254/j. issn. 2096-6539. 2025. 06. 051

引言

为保证盾构法地铁隧道掘进过程中的施工质量与精度, 需要通过联系测量方法将地面控制点的坐标、高程和方位角传递到井下。地铁工程隧道的控制测量通常采用两井定向的联系测量方法, 一般选择地铁车站两侧端头井作为联系测量的竖井, 通过地面近井导线测量以及井下的无定向导线测量, 实现井上、井下坐标系统的统一以及空间位置的传递, 并得到较高的定向精度。

一、无定向导线与两井定向

(一) 无定向导线

导线测量是根据已知起算数据和实测的各导线边长及转折角的值, 依次推算得到各导线边的坐标方位角以及各导线点的坐标。无定向导线属于没有方向检核的导线, 其起始点和终点均为已知点, 但都没有定向方位角。由于缺少方向的检核, 无定向导线精度通常要低于附和导线, 但高于支导线的精度。

(二) 两井定向

两井定向基本原理为在两施工竖井中各悬挂一根垂球线, 通过地面和井下的导线将它们连接起来, 并确保

井上、井下连线的坐标方位角保持一致。两井定向在条件允许情况下需尽可能增大两垂球线间的距离, 缩短占用竖井的时间, 以减少投点误差引起的方向误差, 从而有效提高地下导线的精度。两井定向时, 在地面通过导线测量计算得到两垂球线的坐标及其连线的方位角, 在井下利用无定向导线对两垂球线进行联测, 按假定坐标系计算连线假定方位角, 再根据地上方位角和坐标经闭合差配赋, 计算出地下导线点的坐标和导线边的方位角。如下图1-1, A、D为地面平面控制点, B、C为近井点, 在车站两侧端头竖井各悬挂一根直径0.3mm的钢丝 O_1 、 O_2 并在适当位置处贴上反射片方便测距, 钢丝底端各悬挂一个10kg的重锤, 使锤球浸没并悬浮在装满废机油(阻尼液)的桶中央。P、Q为地下无定向导线控制点。

(三) 测量方法

如图1-2, 从地面控制点A、D用导线测量方法测设导线 $D \rightarrow A \rightarrow B \rightarrow O_1$ 和导线 $D \rightarrow A \rightarrow C \rightarrow O_2$ 的各导线边长及转角, 推算出 O_1 、 O_2 的平面坐标和 O_1 、 O_2 连线的坐标方位角, 井下在待测控制点P、Q上分别设站, 测设无定向导

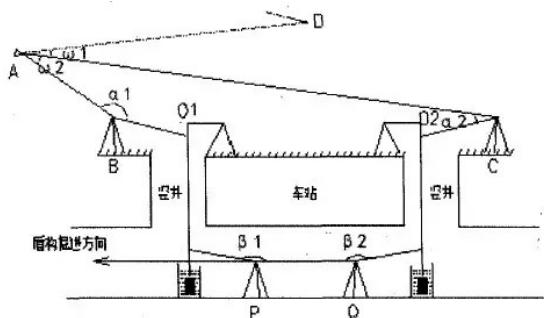


图 1-1 两井定向示意图

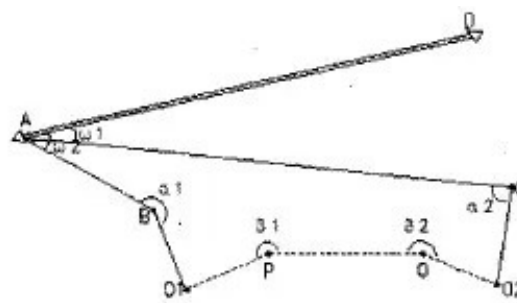


图 1-2 两井定向法投影示意图

线 $O_1 \rightarrow P \rightarrow Q \rightarrow O_2$ 的各导线边长及转角。

(四) 两井定向的内业计算

先根据地面已知控制点的坐标推算出两垂球线的地面坐标值, 并计算得到其连线的方位角和距离, 然后计算井下导线点在假定坐标系中的坐标, 据此推算出垂球线连线在假定坐标系中的假定方位角与距离。将两垂球线连线地面方位角与地下假定方位角对比, 通过两者的差值推算出井下导线在地面坐标系中的坐标方位角。步骤如下:

1. 通过导线简易正算方法求得两垂球线的地面坐标 $O_1 (X_1, Y_1)$ 、 $O_2 (X_2, Y_2)$, 根据两垂球线的坐标可通过简易反算得到其连线的坐标方位角 α_{12} 及其距离 S_{12} 。

2. 建立以 O_1 为坐标原点, O_1-P 为 X' 轴方向的假定坐标系, 通过全站仪测量得到各导线边长及转角, 依次推算无定向导线上各导线点的假定坐标和各导线边的方位角, 并计算得到两垂球线连线在假定坐标系中的假定方位角与距离:

$$\alpha'_{12} = \arctan(Y'_2 / X'_2), \quad S'_{12} = \sqrt{X'^2_2 + Y'^2_2}$$

3. 将地面与井下两垂球线连线距离的计算成果 S_{12} 与 S'_{12} 进行对比检核。

$$\Delta S = S_{12} - \left(S'_{12} + \frac{H}{R} \cdot S_{12} \right),$$

式中，H—井筒深度；R—地球曲率半径。

4. $\alpha_{1-P} = \alpha_{12} - \alpha'_{12} = \Delta\alpha$ ；各导线边坐标方位角为 $\alpha_i = \Delta\alpha + \alpha'_i$ （ α'_i —该导线边在假定坐标系中的假定方位角）；

5. 根据无定向导线起算点 O_1 的坐标（ X_1 、 Y_1 ）与起算边在地面坐标系中的方位角 α_{1-P} ，结合无定向导线各导线边长及转角的实测数据，重新推算各导线点的坐标和各导线边的方位角。将地面与井下求得的无定向导线终点 O_2 的坐标相比较，即可求得坐标增量闭合差、导线全长闭合差以及导线全长相对闭合差，然后将坐标增量闭合差按比例反号加以分配，得到改正后的坐标增量，即可计算出无定向导线上各待测点的坐标。

二、测量实例

下面以杭州地铁10号线汽国区间平面联系测量为例予以分析。该区间为全地下盾构区间，盾构机从国际会展中心站小里程端端头井始发，掘进至汽车北站大里程端端头井吊出。区间线路在DK8+361.314处侧穿普瑞科技大厦，DK8+313.661处侧穿花园岗村农转居公寓，DK8+059.121~DK8+272.603处下穿申花单元GS0403-07地块，右线DK8+598.809~DK7+815.148处下穿西塘河，左线DK8+593.975~DK8+563.975处下穿丰圣汽车修理厂（2层）、花神庙（1层）等民房，沿线分布自来水、天然气、污水、雨水、电力、通讯等市政管线，主要集中在莫干山路主干道、西塘河两侧。

（一）本次观测井上采用G310-7和JM-1作为定向边，其中JM-1为平面加密点，待钢丝稳定后，采用I级全站仪观测水平角，左右角各观测4个测回，保证其与 360° 的较差不超过 $4''$ 。井上采用两条支导线G310-7→JM-1→GS1（钢丝），G310-7→JM-1→GS2（钢丝），井下导线为无定向导线GS1→GJHZ2→GJHZ1→GS2，其中GJHZ1和GJHZ2为设置在国际会展中心站底板侧墙柱子上的强制对中点。两井定向点位布置投影示意图如下图2-1所示：

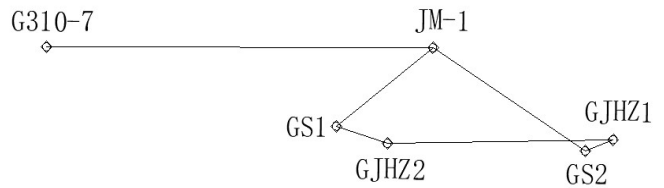


图 2-1 点位布置投影示意图

（二）已知数据

地面起算边JM-1→G310-7，其中JM-1为近井点，G310-7为后视方向。

表 2-2 两井定向法已知数据

点号	X 坐标	Y 坐标	JM-1 → G310-7 方位角
G310-7	88346.4577	74615.9322	225° 39' 27.68"
JM-1	88925.2060	75208.1221	

（三）观测数据

表 2-3 两井定向法实测数据

位置	设站点	目标点	水平角 (° ' ")	平距 (m)
地上	JM-1	G310-7	00-00-00	828.0369
		GS1	65-04-23.20	67.7611
		GS2	144-37-13.60	89.2488
地下	GJHZ2	GJHZ1	00-00-00	96.4994
		GS1	174-36-44.60	12.9491
	GJHZ1	GJHZ2	00-00-00	96.4995
		GS2	02-19-39.9	7.6142

（四）内业计算

- 通过简易正算可求得两垂球线GS1、GS2的坐标：
GS1（88949.1919，75144.7483）；GS2（89013.0226，75224.0465），从而可计算两垂球线连接的坐标方位角及长度 $\alpha_{GS12} = 51^\circ 10' 4.23''$ ， $S_{GS12} = 101.7967\text{m}$ ；
- 推算井下无定向导线上各点在假定坐标系中的坐标，计算过程见表2-4。
- 将地面与井下两垂球线连线距离的计算成果 S_{12} 与 S'_{12} 进行对比检核。

$$\Delta S = S_{GS12} - \left(S'_{GS12} + \frac{H}{R} \cdot S_{GS12} \right) = 1.6\text{mm} \quad (H \text{取} 20\text{m}) ;$$

表 2-4 假定坐标系无定向导线计算过程

点号	水平角 (° ' ")	方位角 (° ' ")	水平距离 (m)	坐标增量		坐标	
	(° ' ")			ΔX	ΔY	X	Y
GS1		00-00-00	12.9491	12.9491	0	0	0
GJHZ2	185-23-15.4	05-23-15.4	96.4994	96.0731	9.0606	12.9491	0
GJHZ1	02-19-39.9		109.0222	9.0606			
GS2		187-42-55.3	7.6142	-7.5453	-1.0222	101.4769	8.0384

$$\alpha'_{GS12} = \arctan(Y'_{GS2} / X'_{GS2}) = 4^\circ 31' 45.03'' ; S'_{GS12} = \sqrt{X'^2_{GS2} + Y'^2_{GS2}} = 101.7948\text{m}.$$

表 2-5 无定向导线计算过程

点号	水平角 (° ' ")	方位角	水平距离	坐标增量 (m) 及改正数 (mm)		坐标	
	(° ' ")	(° ' ")	(m)	ΔX	ΔY	X	Y
GS1		46-38-19.2	12.9491	8.8908 (0.1)	9.4145 (0.2)	88949.1919	75144.7483
GJHZ2	185-23-15.4	52-01-34.6	96.4994	59.3761 (1.0)	76.0698 (1.2)	88958.0828	75154.1630
GJHZ1	02-19-39.9					89017.4599	75230.2340
GS2		234-21-14.5	7.6142	-4.4374 (0.1)	-6.1876 (0.1)	89013.0226	75224.0465
Σ			117.0627				

$f_x=-1.2\text{mm}; f_y=-1.5\text{mm}; f=1.9\text{mm}; f/p=1.9/117062.7=1/61611$

4. 方位角 $\alpha_{GS1-GJHZ2} = \alpha_{GS12} - \alpha_{GS12}' = \Delta\alpha = 51^\circ 10' 4.23'' - 4^\circ 31' 45.03'' = 46^\circ 38' 19.2''$; 井下无定向导线各边在地面坐标系统中的方位角及各导线点的坐标计算过程见表2-5。

根据表2-5可得, 井下无定向导线 GJHZ1 (89017.4599, 75230.2340); GJHZ2 (88958.0828, 75154.1630), 方位角 $\alpha_{GJHZ1-GJHZ2} = 232^\circ 01' 34.66''$ 。

杭州地铁10号线采用两井定向法进行平面联系测量后, 测量成果与第三方测量单位的复测成果进行了对比校核, GJHZ1→GJHZ2方位角的差值仅为0.6" (见下表2-6), 满足规范中起始方位角较差小

于12"的规定。杭州地铁10号线汽国区间左线里程DK7+815.148~DK8+737.886, 区间长947.263m (长链24.525m), 盾构掘进期间分别于盾构始发前、盾构掘进100环、盾构掘进300环及隧道贯通前 (盾构掘进700环) 四个阶段分别进行了四次两井定向联系测量工作, 每次联系测量数据成果均报第三方测量单位 (杭州市勘测设计研究院) 进行检测和成果比对 (见下表2-6), 方位角互差最大值为9.39", 均小于限差值±12"。

通过实践证明, 采用两井定向方法配合无定向导线形式进行平面联系测量, 得到的井下控制点成果可靠, 且能够达到较高的定向精度。

表 2-6 联系测量成果检测表

序号	点号	X 坐标 (m)		Y 坐标 (m)		GJHZ1 → GJHZ2 方位角	
		检测值	差值 (mm)	检测值	差值 (mm)	检测值	差值 (")
		报验值		报验值		报验值	
第 1 次	GJHZ1	89017.4590	-0.9	75230.2198	-14.2	232° 01' 35.26"	0.6
		89017.4599		75230.2340			
	GJHZ2	88958.0830	-0.2	75154.1496	-13.4	232° 01' 34.66"	
		88958.0828		75154.1630			
第 2 次	GJHZ1	89017.4630	0.6	75230.2227	-13.2	232° 01' 32.26"	7.23
		89017.4624		75230.2359			
	GJHZ2	88958.0870	-2.3	75154.1549	-11.3	232° 01' 39.49"	
		88958.0893		75154.1662			
第 3 次	GJHZ1	89017.4630	6.5	75230.2227	-9.3	232° 01' 32.26"	9.39
		89017.4565		75230.2320			
	GJHZ2	88958.0870	4.5	75154.1549	-4.6	232° 01' 41.65"	
		88958.0825		75154.1595			
第 4 次	GJHZ1	89017.4602	3.7	75230.2238	-8.2	232° 01' 38.0"	3.65
		89017.4565		75230.2320			
	GJHZ2	88958.0845	2.0	75154.1524	-7.1	232° 01' 41.65"	
		88958.0825		75154.1595			

结束语

通过无定向导线方式进行地铁盾构区间隧道的定向测量能够得到精度较高的定向成果, 是目前城市轨道交通工程地下定向测量过程中普遍优先选择的一种测量方法。为避免和减小测角误差引起的点位成果误差, 选用无定向导线施测时需尽可能采用高精度的全站仪, 通过提高测角精度、增加边长等措施来提高导线的可靠性和精度, 保证测量成果能够有效的指导后续盾构的掘进施工以及区间隧道的顺利贯通。

参考文献

[1] 北京城建勘测设计研究院有限责任公司. GB/T50308-2017 城市轨道交通工程测量规范[S]. 北京: 中

国建筑工业出版社, 2017.

[2] 孙健, 孙晓明. 无定向导线在地下工程中的应用及精度分析[J]. 市政技术, 2009 (S1): 134-137, 187.

[3] 程效军, 鲍峰. 无定向导线的布设及精度分析[J]. 同济大学学报, 2002 (7): 886-889.

[4] 潘庆林, 高俊强, 吉文来. 南京地铁1号线定向测量方法及其精度的研究[J]. 测绘工程, 2004 (3): 39-41.

作者简介: 刘鑫, 男, 1993年7月, 江苏省靖江市人, 汉族, 本科毕业, 工程师, 从事铁路、地铁、市政、房建等工程测量相关工作。