

• 联系测量

联系测量是将地面的平面坐标系统和高程系统传递到地下,使地上和地下能采用同一个坐标系进行测量工作。联系测量包括平面联系测量与高程联系测量,即定向和导入高程。联系测量的任务包括以下内容。

- (1) 确定地下导线起算边的坐标方位角。
- (2) 确定地下导线起算点的平面坐标 X 和 Y 。
- (3) 确定地下水准点的高程。

要实现地上、地下的测量坐标系统的一致,需要采用适当的方法将地面上的测量坐标系统传递到地下,作为地下隧道测量的起算数据。地铁修建于城市环境中,其地下隧道的埋深一般相对矿山来说较浅,一般是通过竖井或车站进行开挖的,很少通过横洞(平坑)或斜井开挖。在公路与铁路施工中,根据隧道长度与深度及施工要求的精度不同,联系测量的方法也不同。由于上述原因,隧道工程的联系测量按照地上控制网与地下联系形式的不同可分为一井定向(联系三角形法)、两井定向、铅垂仪(钢丝)与陀螺经纬仪组合定向、导线直接传递测量等。

任务 3.1 一井定向

任务介绍

本任务主要介绍了一井定向的过程，包括投点、联合三角形法测量、联系三角形的解算。通过本任务的学习，学生能应用一井定向方法完成联系测量的工作。

任务目标

- ① 明确一井定向工作的过程与目的。
- ② 掌握投点的两种方法及注意事项。
- ③ 理解联系三角形法的适用范围、要求及解算原理。

能力目标

- ① 通过联系三角形实例分析，能进行设计、施测、解算，从而完成联系测量工作。
- ② 通过联系三角形的解算，提高内业处理和计算的能力。

一井定向是指通过一个竖井进行定向的方法，也可称为联系三角形定向。一井定向的方法是通过测量角度、距离等几何量来完成定向的，属于几何定向方法。这种方法需要在竖井、车站或投点孔等处进行。

进行一井定向时，在竖井井筒中悬挂两根钢丝垂球，在地面上利用地面控制点测定两垂球线的平面坐标及其连线方位角，在井下使用全站仪测角量边，把垂球线与井下起始控制点连接起来，通过计算确定井下起始控制点的坐标和方位角。一井定向测量工作可分为投点（在井筒中下放钢丝）和连接测量两项工作。

3.1.1 投点

采用联系三角形进行一井定向时，要在井筒内挂两根垂球线，投点时，一般都采用垂球线单重投点法，即在投点过程中，垂球的重量不变。单重投点法可分为单重稳定投点法和单重摆动投点法。前一种方法是将在垂球放在水桶内，使其基本上处于静止状态；在定向水平上测角量边时，均与静止的垂球线进行连接。后一种方法则恰恰相反，先是让垂球自由摆动，用专门的设备观测垂球线的摆动，求出它的静止位置并加以固定；在定向水平上连接时，按固定的垂球线位进行。

只有当垂球线的摆幅很小时，才能使用单重稳定投点法，否则，必须采用单重摆动投点法。

由地面向下投点时，由于受井筒内气流、滴水等的影响，使垂球线从地面上的位置投到定向水平后会发生偏离，一般称这种线量偏差为投点误差。由这种误差而引起的垂球线连线方向的误差称为投向误差。

减少投点误差的主要措施如下。

- (1) 尽量增加两垂球线间的距离，选择合理的垂球线位置。例如，使两垂球线的连接方

向尽量与气流方向一致,这样虽然沿气流方向的垂球线偏斜可能较大,是最危险的方向,但由于垂直于两垂球线连线方向的偏斜不大,因此可以减少投向误差。

(2)尽量减小马头门处气流对垂球线的影响。定向时最好停止风机运转或增设风门,以减小风速。

(3)采用小直径、高强度的钢丝,适当加大垂球重量,并将垂球浸入稳定液中。

(4)减小滴水对垂球线及垂球的影响,在淋水大的井筒,必须采取挡水措施,并在大水桶上加挡水盖。

1. 单重稳定投点

单重稳定投点是假定垂球线在井筒内处于铅垂位置并保持静止不动。当井筒不深、滴水不大、井筒内气流缓慢、垂球线摆动很小、摆幅不超过 0.4 mm 时采用单重稳定投点。

进行单重稳定投点所需的设备和安装系统如图 3-1 所示,缠绕钢丝的手摇绞车固定在出车平台上,钢丝通过安装在井架横梁上的导向滑轮,自定点板的缺口挂下,定点板固定在专用木架上,用以稳住垂线悬挂点的平面位置,使其不受井架震动的影响。在钢丝下端挂上垂球,并将它放在盛有稳定液的水桶中。

1) 对投点所需主要设备的要求

(1)垂球。以对称砝码式的垂球最好,其构造如图 3-2 所示。每个圆盘的重量最好为 10 kg 或 20 kg。当井深小于 100 m 时,采用 30~50 kg 的垂球;当井深超过 100 m 时,则宜采用 50~100 kg 的垂球。

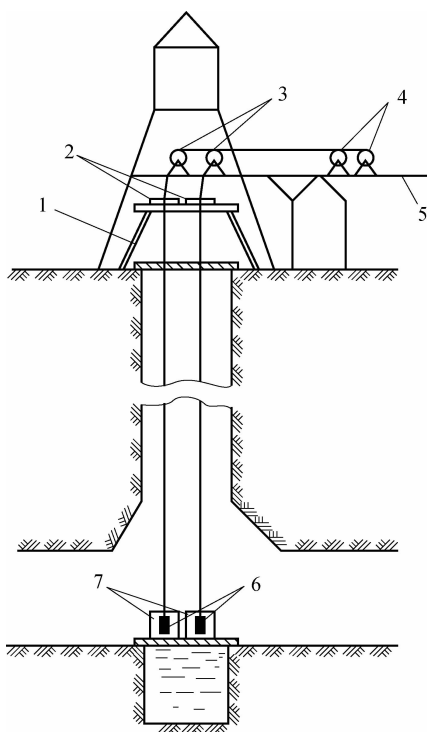


图 3-1 单重稳定投点的设备和安装系统图

- 1—定点板固定架; 2—定点板; 3—导向滑轮;
4—缠绕钢丝的绞车; 5—出车平台;
6—垂球; 7—水桶

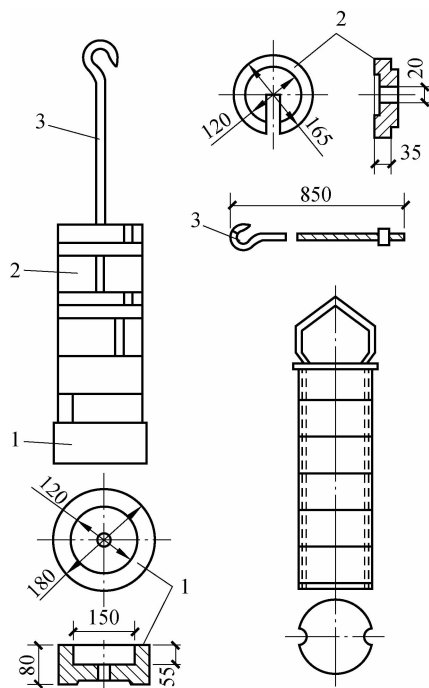


图 3-2 对称砝码式垂球结构

- 1—底圆盘; 2—开口圆盘; 3—中心轴

(2) 钢丝。钢丝应采用直径为 0.5~2 mm 的高强度的优质碳素弹簧钢丝。钢丝上悬挂的重锤重量应为钢丝极限强度的 60%~70%。

(3) 手摇绞车。绞车各部件的强度均应能承受 3 倍投点时的荷重, 绞车应设有双闸。

(4) 导向滑轮。导向滑轮的直径不得小于 150 mm, 轮缘做成锐角形的绳槽以防止钢丝脱落, 最好采用滚珠轴承。

(5) 定点板。定点板用铁片制成。定向时也可不用定点板。

(6) 垂球。垂球在提放钢丝时用, 其形状呈圆柱形或普通垂球形状均可。

(7) 水桶。水桶用以稳定垂球, 一般可采用废汽油桶。水桶上应加盖。

2) 钢丝的下放和自由悬挂的检查

进行测量之前, 应该用坚固的木板将井口盖上, 以便能安全地进行工作。但应在盖板上留有孔隙, 以便让钢丝通过。在下放钢丝之前必须通知定向水平的人员离开井筒。钢丝通过滑轮并挂上垂球后, 将其慢慢放入井筒内。为了检查钢丝是否弯曲和减少钢丝的摆动, 钢丝应通过握成拳状的手均匀、缓慢地下放, 每下放 50 m 左右, 稍停一下, 使垂球摆动稳定下来。当收到垂球到达定向水平的信号后, 即停止下放并闸住绞车, 将钢丝卡入定点板内。在定向水平上, 取下垂球, 挂上定向垂球。此时应事先考虑到钢丝因挂上重锤后被拉伸的长度。挂好后, 应检查垂球是否与桶底、桶壁接触。

垂球线在井筒中的自由悬挂检查常采用信号圈法和比距法同时进行。信号圈法是将在地面上用铁丝做成的直径为 2~3 cm 的小圈(信号圈)套在钢丝上, 然后下放, 看是否能达到定向水平。使用此法时应注意信号圈不能太重及钢丝摆动, 以免信号圈通过接触处。比距法就是通过比较井上、下两垂球线间距离的方法进行检查。若量得的井上下两垂球线间的距离之差不大于 2 mm, 则认为垂球是自由悬挂。

2. 单重摆动投点

单重摆动投点就是观测垂球线的摆动, 找出其位置并固定起来, 然后进行连接。目前, 我国常采用标尺法和定中盘法。单重摆动投点所需设备及安装方法基本上和前述的单重稳定投点一样, 只不过在定向水平上增设了一对观测垂球线摆动的定点盘, 其结构如图 3-3 所示。

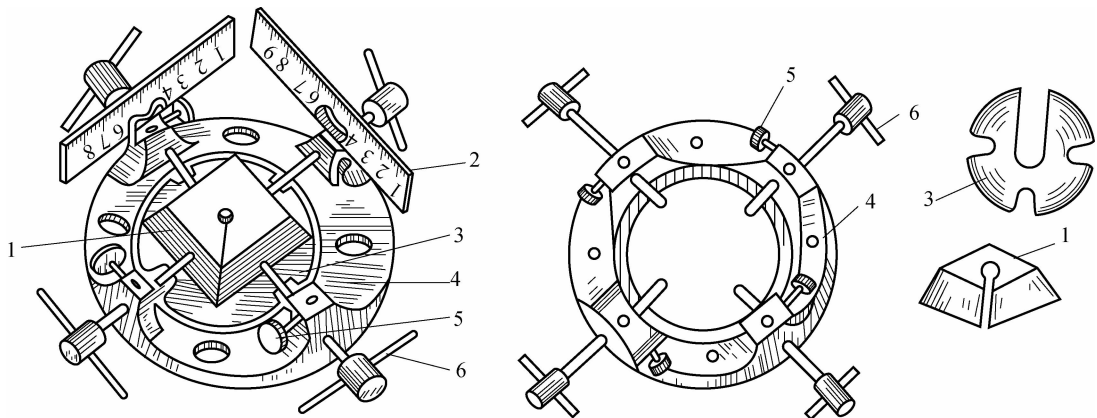


图 3-3 定点盘概貌

1—对点块; 2—标尺; 3—切口薄片; 4—空底圆盘; 5—固定螺钉; 6—螺杆

当钢丝下放到定向水平后,将定点盘固定在专门的工作台上。然后挂上定向垂球,使钢丝大致位于空底圆盘中央,再牢固地固定在工作台上,并将空底圆盘也固定在工作台上。观测垂球线的摆动,是借助于定点盘上两个互相正交的小标尺和经纬仪来进行的。

3.1.2 联系三角形法测量

暗挖隧道采用竖井联系三角形法测量(见图 3-4),即通过竖井悬挂两根钢丝,由近井点测定与钢丝的距离和角度,算得钢丝的坐标及它们的方位角,然后通过测量和计算便可得出地下导线的坐标和方位角,从而将地上和地下联系起来。

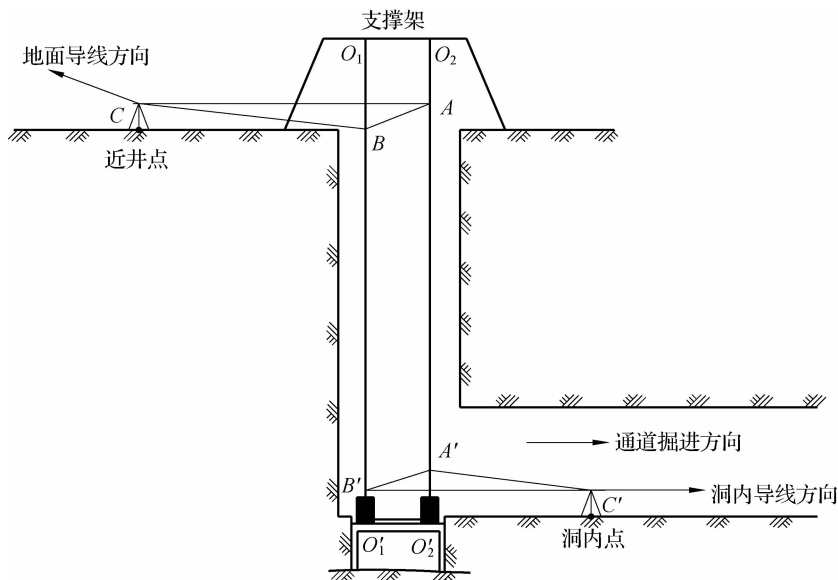


图 3-4 联系三角形法定向测量

联系三角形法一般适用于井口小、深度大的竖井进行联系测量。虽然其作业工作量较大,但其精度很稳定,因而国内很多单位仍在使用该法,该法在城市轨道交通联系测量工作中也得到广泛应用。井上、井下联系三角形应满足下列要求,如图 3-5 所示。

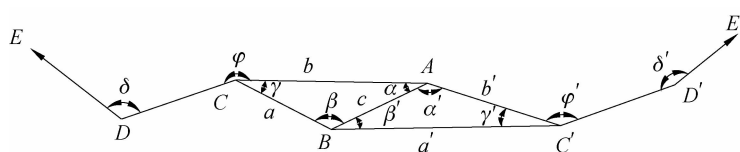


图 3-5 联系三角形法

- (1) 竖井中悬挂钢丝间的距离 c 应尽可能长。
- (2) 联系三角形锐角 γ, γ' 宜小于 1° , 呈直伸三角形。

(3) a/c 及 a'/c' 宜小于 1.5, a 为近井点至悬挂钢丝的最短距离。钢丝宜选用 $\phi 0.3$, 悬挂 10 kg 重锤, 并将重锤浸没在阻尼液中。联系三角形边长测量可采用光电测距或经检定的钢尺丈量, 每次应独立测量三测回, 每测回三次读数, 各测回较差应小于 1 mm。地上与地下丈量的钢丝间距较差应小于 2 mm。钢尺丈量时应施加钢尺鉴定时的拉力, 并应进行倾斜、温度、尺长改正。角度观测应采用不低于 II 级全站仪, 用方向观测法观测六测回, 测角中误差

应在 $\pm 2.5''$ 之内。联系三角形定向推算的地下起始边方位角的较差应小于 $12''$ ，方位角平均值中误差应为 $\pm 8''$ 。

图 3-5 中的三角形 ABC 和 ABC' 称为联系三角形。为了提高定向的精度，应选择井上、井下连接点 C, C' 。地面连接测量是在 C 点安置经纬仪测量出 φ 和 γ 两个角度，并丈量 a, b, c 三条边的边长。同样，井下连接测量是在 C' 点安置仪器测量出 φ' 和 γ' 两个角度，并丈量 c, b' 和 a' 三条边的边长。

3.1.3 联系三角形的解算

(1) 运用正弦定理，解算出 $\alpha, \beta, \alpha', \beta'$ 。

$$\begin{aligned} \sin \alpha &= \frac{a \sin \gamma}{c}, \sin \beta = \frac{b \sin \gamma}{c} \\ \sin \alpha' &= \frac{a \sin \gamma'}{c'}, \sin \beta' = \frac{b' \sin \gamma'}{c'} \end{aligned} \quad (3-1)$$

(2) 检查测量和计算成果。首先，连接三角形的三个内角 α, β, γ 以及 α', β', γ' 的和均应为 180° ，若有少量残差可平均分配到 α, β 或 α', β' 上。其次，井上丈量所得的两钢丝间的距离 $c_{\text{实}}$ 与按余弦定理计算出的距离 $c_{\text{计}}$ 相差应不大于 2 mm ；井下丈量所得的两钢丝间的距离 $c_{\text{实}}$ 与计算出的距离 $c_{\text{计}}$ 相差应不大于 4 mm 。

若符合上述要求，则可在丈量的 a, b, c 以及 a', b', c' 中加入改正数 v_a, v_b, v_c 及 $v_{a'}, v_{b'}, v_{c'}$ 。

(3) 将井上、井下连接图形视为一条导线，如 $D-C-A-B-C'-D'$ ，按照导线的计算方法求出井下起始点 C' 的坐标及井下起始边 $C'D'$ 的方位角。

在进行竖井定向时，一般均要移动弦线，使方向的传递经过不同的三组联系三角形进行定向，称为一次定向。现行的《城市轨道交通工程测量规范》(GB 50308—2008) 也规定：“联系三角形测量，每次定向应独立进行三次，取三次平均值作为定向成果。”如果一次定向向地下起始方向角的中误差以 $\pm 19''$ 计，则三组联系三角形定向平均值的中误差为 $\pm 19''/\sqrt{3} = \pm 11''$ 。为了使隧道精确贯通，应利用联系三角形法进行多次定向。《城市轨道交通工程测量规范》(GB 50308—2008) 同时规定：“隧道贯通前的联系测量工作不应少于 3 次，宜在隧道掘进到 $100 \text{ m}, 300 \text{ m}$ 以及距贯通面 $100 \sim 200 \text{ m}$ 时分别进行一次。当地下起始边方位角较差小于 $12''$ 时，可取各次测量成果的平均值作为后续测量的起算数据指导隧道贯通……贯通面一侧的隧道长度大于 1500 m 时，应增加联系测量次数或采用高精度联系测量方法等，提高定向测量精度。”

3.1.4 联系三角形工程实例

以下是深圳地铁一号线某区间采用联系三角形法定向的工程实例，该区间长度为 1600 m ，采用盾构法单向掘进。贯通前，分别在掘进至 $150 \sim 200 \text{ m}$ 、隧道 $1/2$ 长度和距贯通面约 150 m 时进行了 3 次联系三角形定向，每次定向时竖井内悬挂 3 根钢丝组成两组联系三角形，联系三角形图形如图 3-6 所示。

1) 仪器设备

T2 经纬仪 2 台，Leica TCR702 全站仪 1 台， 10 kg 重锤 3 个，直径 0.3 mm 高碳钢丝

50 m, 经过检定的 30 m 钢卷尺 1 把, 机油 3 桶(阻尼液)。

2) 角度观测

两台 T2 经纬仪井上、井下同时观测。地面以指向 AB 点的方向为零方向, 地下以指向 DX_1 的方向为零方向, 采用全圆测回法观测 9 测回, 每测回开始前按规范要求配置水平度盘, 各项限差严格按照相关规范执行。地面照准点选在悬挂点以下 50 cm 处, 在地面下应尽可能使视线保持水平。

3) 边长测量

测量边长时由两人张拉钢尺, 另外两人分别在两端同时读数, 每读完一组数后变换钢尺读数位置, 每个边长丈量 3 次, 3 次边长互差应小于 2 mm。测量的同时记录环境温度, 以进行钢尺的温度改正。

4) 数据处理

表 3-1 为第一次联系测量的观测数据。

表 3-1 第一次联系测量的观测数据

项 目	地面上		地面下	
	$\Delta JS-O_2-O_1$	$\Delta JS-O_1-O_3$	$\Delta JX-O'_2-O'_1$	$\Delta JX-O'_1-O'_3$
$\alpha/(\text{° } ' \text{ ''})$	0 40 21.34	0 39 38.00	0 47 18.55	0 27 17.23
a/m	8.132 36	8.157 71	8.133 04	8.157 71
b/m	2.437 64	2.437 64	3.200 39	3.200 39
c/m	10.571 34	10.596 68	11.332 02	11.358 19
a'/m	8.132 88	8.158 22	8.132 71	8.157 79
b'/m	2.438 16	2.438 15	3.200 06	3.200 47
c'/m	10.570 82	10.596 17	11.332 35	11.358 11
$\beta/(\text{° } ' \text{ ''})$	0 12 05.88	0 11 50.67	0 18 36.88	0 10 42.31
$\gamma/(\text{° } ' \text{ ''})$	179 07 32.78	179 08 31.33	178 54 04.57	179 22 00.46

先根据表 3-1 的计算结果和地面已知点 JS、AB 的坐标值可以求出点 O_1 、 O_2 、 O_3 的坐标, 计算结果见表 3-2。其中, 计算点 O_1 的坐标时, 由于边长为两个三角形的公共边, 因此取边长平均值来计算坐标。表 3-2 中同时列出了 JS 和 JX 两测站上的方向观测值。

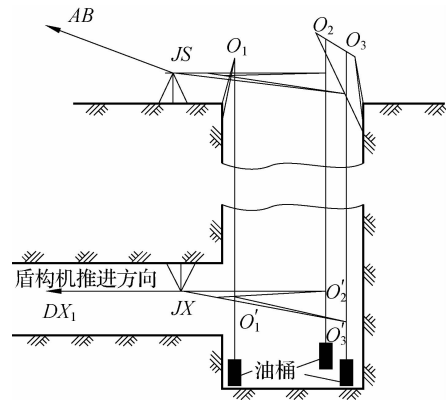


图 3-6 联系三角形图形

表 3-2 O_1 、 O_2 、 O_3 点坐标值计算结果

测 站	方 向 名	方 向 值 / ($^{\circ}$ ' ")	边 长 / m	北 坐 标 X / m	东 坐 标 Y / m
JS	JS	—	—	18 706.555 3	114 270.721 8
	AB	0 00 00.00	—	18 557.156 4	114 009.207 3
	O_2	208 39 34.33	10.570 82	18 706.754 4	114 281.290 7
	O_1	209 19 55.67	2.438 16	18 706.572 6	114 273.159 9
	O_3	209 59 33.67	10.596 17	18 706.508 3	114 281.317 9
JX	DX_1	0 00 00.00	—	—	—
	O'_2	177 31 43.00	11.332 35	—	—
	O'_1	178 19 01.55	3.200 26	—	—
	O'_3	178 46 18.18	11.358 11	—	—

再根据已知点 JS 和 AB 的坐标方位角和连接角,按照小角传递的线路,把地面控制点的坐标方位角经过边 O_2O_1 和边 O_3O_1 传递至隧道内起始边 $JXDX_1$,计算结果见表 3-3。根据以上计算结果,可以求出隧道内起算点 JX 的坐标,结果见表 3-4。

表 3-3 方位角传递计算

传递线路	起 点	讫 点	方 向 值 / ($^{\circ}$ ' ")	方 位 角 / ($^{\circ}$ ' ")
由边 O_2O_1 至边 $JXDX_1$	JS	AB	0 00 00.00	240 15 41.00
	JS	O_2	208 39 34.33	88 55 15.33
	O_2	O_1	359 47 54.12	268 43 09.45
	O'_1	JX	181 05 55.43	269 49 04.88
	JX	DX_1	181 40 58.55	271 30 03.43
由边 O_3O_1 至边 $JXDX_1$	JS	AB	0 00 00.00	240 15 41.00
	JS	O_3	209 59 33.67	90 15 14.67
	O_3	O_1	0 11 50.67	270 27 05.34
	O'_1	JX	179 22 00.46	269 49 05.80
	JX	DX_1	181 40 58.55	271 30 04.25

隧道内起始边 $JXDX_1$ 方位角的平均值为 $271^{\circ}30'03.84''$

表 3-4 隧道内起算点 JX 坐标的计算

起算点 (O_2) 坐标	起算边方位角 / ($^{\circ}$ ' ")		方位角平均值 / ($^{\circ}$ ' ")	边长 / m	JX 点坐标 / m
$X=18\ 706.572\ 6$	由 $O'_2O'_1$ 至 O'_1JX	269 49 04.88	269 49 05.34	3.200 26	$X=18\ 706.562\ 4$
$Y=114\ 273.159\ 9$	由 $O'_3O'_1$ 至 O'_1JX	269 49 05.80			$Y=114\ 269.959\ 7$

表 3-5 为三次定向的计算成果。由表 3-5 可以看出,三组定向成果的互差最大为 $4.43''$,说

明定向成果精度较高,贯通结果也说明了这一点,隧道最后的横向贯通误差为 23 mm。这说明,采用联系三角形作业方法时只要精心设计、精心施测,完全能够满足地铁隧道定向的需要。

表 3-5 三次联系测量定向成果

隧道内起始边	第一次定向/(° ' ")	第二次/(° ' ")	第三次/(° ' ")
JXDX ₁	270 30 03.84	271 30 05.04	271 30 08.27

任务 3.2 两井定向

任务介绍

本任务主要介绍了两井定向的定义、适用范围、施测过程,具体阐述了包括投点、地面连接测量、地下连接测量、数据处理等施测步骤。通过本任务的学习,学生能应用两井定向方法完成联系测量工作。

任务目标

- 明确两井定向工作的定义与适用范围。
- 掌握两井定向的施测步骤。
- 理解两井定向的内业计算原理。

能力目标

- 通过两井定向实例分析,能应用两井定向法施测、解算,从而完成联系测量工作。
- 通过两井定向内业处理工作,提高学生的计算能力。

3.2.1 两井定向的过程

两井定向是指通过两个竖井向地下投测控制点,在地下通过无定向导线连接所投测的控制点的定向方法。在地铁工程定向测量中还有一种常用的方法,即通过两个竖井所投测的控制点在地下能够直接通视,这两个控制点可以直接作为地下控制网的起算依据。这种情况可视为是两井定向的一种特殊形式。

地铁隧道在采用暗挖法施工时,为了加快施工进度,经常在区间中部设置施工竖井,一旦该竖井和相邻竖井或车站贯通,就可以进行两井定向了,以两井定向成果指导剩余的隧道掘进。采用两井定向联系测量时,两钢丝间的距离应大于 60 m,特殊情况下不得小于 30 m。在施工过程中利用地面上的精密导线点,按同等精度导线测定近井点坐标,进行两井定向的测量。如图 3-7 所示,在两竖井处各挂一根钢丝(在通视等条件允许的情况下,可在两个井

口各挂两根钢丝来加强传点精度),同时测定地下起始边的方位角。另外,由于地铁隧道的埋深一般较浅,在掘进过程中往往还需采用在隧道上方打孔的方式向下投测控制点,也可以与竖井或车站的控制点形成两井定向图形。

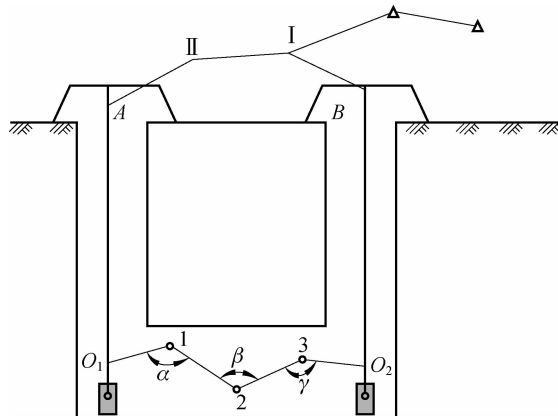


图 3-7 两井定向的测量

与一井定向相比,两井定向由于两根投点吊垂线的距离大大增加,因此减小了因投点误差引起的方向误差,有利于提高地下控制网起算方向的精度。另外,两井定向外业测量简单,占用竖井时间短。由于两井定向具有以上优点,因此它是地铁隧道工程定向测量常用的定向方法。

如图 3-8 所示,两井定向时,分别通过两个竖井向井下投测控制点,在隧道内通过导线将两个投测控制点连接起来,由于这种形式的地下导线没有起始方向,因此被称为无定向导线。通过解算两个投测控制点之间的无定向导线,可以得到地下导线各点坐标及各边的坐标方位角,从而完成定向。

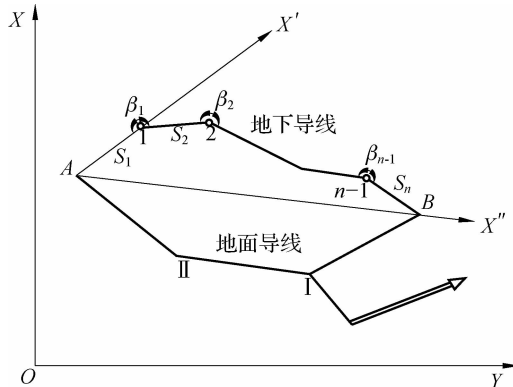


图 3-8 两井定向示意图

两井定向的过程可以分为如下几个步骤。

1. 投点

投点所用的设备及投点过程与联系三角形法相同,可以用钢丝和重锤(或铅垂仪)进行投点。在使用钢丝和重锤进行投点时,重锤应浸入阻尼液中以便使钢丝尽快稳定。

2. 地面连接测量

在地面上布设导线将两个竖井中的吊垂线连接起来。为了增加多余观测条件,防止出现粗差或错误,可以用双极坐标法测量投点的坐标。如果是铅垂仪投点,还可以将投点直接纳入地面附和导线线路中观测。

3. 地下连接测量

在地下沿两竖井之间的隧道布设导线,布设导线时应注意尽量拉长导线边长,减少测站,以减小测角误差对定向成果的影响。

4. 数据处理

两井定向的内业计算工作如下。

(1) 计算两吊锤线在地面坐标系中的方位角 α 和距离 S_{AB} , 计算公式为

$$\left. \begin{aligned} \alpha_{AB} &= \arctan \frac{Y_B - Y_A}{X_B - X_A} \\ S_{AB} &= \frac{Y_B - Y_A}{\sin \alpha_{AB}} \\ S_{AB} &= \frac{X_B - X_A}{\cos \alpha_{AB}} \\ S_{AB} &= \sqrt{(X_B - X_A)^2 + (Y_B - Y_A)^2} \end{aligned} \right\} \quad (3-2)$$

式中, X_A, Y_A, X_B, Y_B 分别为两吊锤线在地面坐标系中测定的坐标。

(2) 计算地下导线点在假定坐标系中的坐标。设吊锤线以 A 为坐标原点, 其坐标为 $X'_A = Y'_A = 0$, $A1$ 也为 X' 轴方向, 其方向角 $\alpha'_{A1} = 0$ 。利用地下导线的测量成果, 可以计算出导线点在假定坐标系中的坐标, 即

$$\left. \begin{aligned} X'_i &= \sum_{i=1}^k S_i \cos \alpha'_i \\ Y'_i &= \sum_{i=1}^k S_i \sin \alpha'_i \\ \alpha'_i &= \alpha'_{A1} + \sum_{j=1}^{i-1} (\beta_j - 180^\circ) \end{aligned} \right\} \quad (3-3)$$

式中, $k=1, 2, 3, \dots, n-1, n$ 。

由式(3-3)求得 B 点的坐标为

$$\begin{aligned} X'_B &= \Delta X'_{AB} \\ Y'_B &= \Delta Y'_{AB} \end{aligned}$$

由 A, B 两点在假定坐标中的坐标, 反算其方位角与距离, 可得

$$\left. \begin{aligned} \alpha'_{AB} &= \arctan \frac{Y'_B}{X'_B} \\ S'_{AB} &= \frac{Y'_B}{\sin \alpha'_{AB}} = \frac{X'_B}{\cos \alpha'_{AB}} = \sqrt{X'^2_B + Y'^2_B} \end{aligned} \right\} \quad (3-4)$$

由地面与井下计算得到的 S_{AB} 及 S'_{AB} , 必须投影到同一投影面上才能进行检核。隧道埋深较浅, 地面与地下导线的投影改正数很小, 可以忽略不计。但是由于测量误差影响, $S_{AB} \neq S'_{AB}$, 其差值为

$$\Delta S = S_{AB} - S'_{AB} \quad (3-5)$$

当上述 ΔS 值不超过允许值时,就可以计算地下导线各点在地面坐标系中的坐标。

(3)计算地下导线各点在地面坐标系中的坐标,即

$$\begin{pmatrix} X_i \\ Y_i \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} X_A \\ Y_A \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \cos \alpha_i & -\sin \alpha_i \\ \sin \alpha_i & \cos \alpha_i \end{pmatrix} \begin{pmatrix} X'_i \\ Y'_i \end{pmatrix} \quad (3-6)$$

其中

$$\begin{aligned} \alpha_i &= \alpha'_i + \Delta\alpha \\ \Delta\alpha &= \alpha_{AB} - \alpha'_{AB} \end{aligned}$$

一般来说,由于两井定向的两根吊锤线之间的距离远远大于一井定向,能够减少投点误差对地下导线方位角精度的影响,因此两井定向的精度较一井定向高,当工程具备条件时应进行两井定向。

5. 两井定向的注意事项

在进行两井定向时应注意以下几点。

- (1)地下导线的边长应尽量拉长,从而减少测站数,以减少测角误差对定向精度的影响。
- (2)两根吊锤线之间的距离应适当,如果距离太短,地面控制测量对定向的影响较大;如果距离太长,地下导线的测站数将增加,地下测角误差对定向精度的影响也会较大。
- (3)在地面测定两吊锤线的坐标时,应适当布置测量图形,使得两点之间的相对横向误差尽量小。

3.2.2 两井定向测量实例

两井定向法在沈阳地铁盾构区间应用较多,下面以沈阳地铁二号线某盾构区间平面联系测量为例进行分析。

1. 采用的仪器设备

Leica TCR1201 全站仪(标称精度为 $1''$, $2 \text{ mm} + 2 \times 10^{-6} D$)及配套精密对点器、 0.3 mm 钢丝、 15 kg 重锤、油桶、钢尺等。

2. 已知数据

地面起算边为 AD ,其中, A 点为近井点, D 为后视方向,已知数据见表 3-6。两井定向示意如图 3-9 所示。

表 3-6 两井定向法已知数据

点 号	X 坐标/m	Y 坐标/m	A-D 方位
A	33 559.601	34 727.218	143°42'4.06"
D	32 990.662	35 145.128	

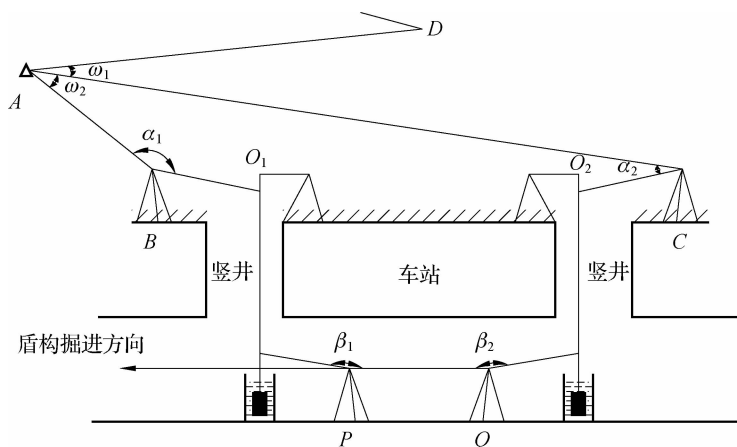


图 3-9 沈阳地铁二号线某盾构区间两井定向示意图

3. 观测数据

两井定向法实测数据见表 3-7。两井定向法投影如图 3-10 所示。

表 3-7 两井定向法实测数据

测 站	角度观测值/(° ' ")		边长观测值/m	
地面	ω_1	165 07 46.4	AB	112.160 8
	ω_2	200 10 54.4	AC	153.316 8
	α_1	1 37 21.5	BO_1	29.161 2
	α_2	110 23 54.2	CO_2	33.201 0
地下	β_1	123 17 20.3	QO_2	19.798 8
	β_2	144 08 52.0	PQ	94.937 8
	—	—	PO_1	23.463 5

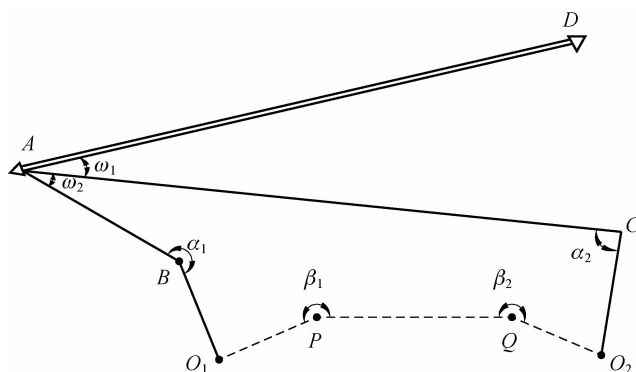


图 3-10 两井定向法投影

4. 内业计算

(1) 根据地面连接测量的结果,按支导线的计算方法可求得两垂球线上 O_1 、 O_2 点的坐

标,即 $O_1(33\ 639.120\ 6, 34\ 703.380\ 6)$, $O_2(33\ 638.748\ 5, 34\ 579.256\ 3)$ 。从而可计算出两垂线连线的坐标方位角及长度,即 $\alpha_{12} = 269^\circ 49' 41.66''$, $S_{12} = 124.124\ 8\ \text{m}$ 。

(2)按假定坐标系统进行地下连接导线的坐标计算,计算过程见表 3-8。

表 3-8 地下连接导线的计算过程(一)

点 号		水平角 /(° ' ")	方位角 /(° ' ")	水平距离 /m	坐标增量/m		坐标/m	
测站	视准点				ΔX	ΔY	X'	Y'
O_1							0	0
		P		0 00 00	23.463 5	+23.463 5	0	23.463 5
P	O_1	123 17 20.3						
	Q		303 17 20.3	94.937 8	52.107 7	-79.359 7	75.571 2	-79.359 7
Q	P	144 08 52.0						
	O_2		267 26 12.3	19.798 8	-0.885 4	-19.779 0	74.685 8	-99.138 7

$$\alpha'_{12} = \arctan(Y'_2/X'_2) = 306^\circ 59' 32.7''; S'_{12} = \sqrt{X'^2_2 + Y'^2_2} = 124.122\ 7\ \text{m}.$$

(3)测量和计算的检验。用比较地面与地下算得的两投点间距离 S_{12} 与 S'_{12} 进行检查。

$$\Delta S = S_{12} - \left(S'_{12} + \frac{H}{R} S_{12} \right) = 1.7\ \text{mm}$$

式中, H 为地下两吊锤线高程平均值,取 20 m; R 为地球平均曲率半径,取 $R = 6371\ \text{km}$ 。

(4)按地面坐标系统进行地下连接导线的坐标计算。

$$\alpha_{1-P} = \alpha_{12} - \alpha'_{12} = \Delta\alpha = 322^\circ 50' 08.96''$$

根据起算数据 X_1, Y_1, α_{1-P} 与地下导线的测量数据重新计算地下连接导线点的坐标。

先将地面与地下求得的 O_2 点坐标相比较,即可得到导线测量的相对闭合差,然后将坐标增量闭合差按井下连接导线边长成比例反号加以分配,地下连接导线的计算过程见表 3-9。

沈阳地铁二号线某区间采用两井定向法进行联系测量后,又利用陀螺全站仪对地下两条定向边的方位角进行了校核,其方位角差值仅为 $8.9''$ (见表 3-10),能够满足《城市轨道交通工程测量规范》(GB 50308—2008)中地下起始方位角较差小于 $12''$ 的规定;沈阳地铁一号线某盾构区间长 875.4 m,掘进期间于盾构始发前、盾构掘进 100 m 处、盾构掘进 300 m 处及隧道贯通前进行了四次联系测量工作,所采用的方法均为两井定向测量法,隧道最终横向贯通精度为 11.5 mm。可见采用两井定向法也可达到较高的测量精度。

表 3-9 地下连接导线的计算过程(二)

点 号		水平角 /(° ' ")	方位角 /(° ' ")	水平距离 /m	坐标增量/m		坐标/m	
测站	视准点				ΔX	ΔY	X'	Y'
O_1							33 639.120 6	34 703.380 6
		P		23.463 5	18.698 2	(-0.4) -14.1743	33 657.818 8	34 689.205 9

续表

点号		水平角 /(° ' ")	方位角 /(° ' ")	水平距离 /m	坐标增量/m		坐标/m	
测站	视准点				ΔX	ΔY	X'	Y'
P	O_1	123 17 20.3				(-1.5)		
	Q		266 07 29.26	94.937 8	-6.416 2	-94.720 7	33 651.402 6	34 594.483 7
Q	P	144 08 52.0				(-0.3)		
	O_2		230 16 21.26	19.798 8	-12.654 1	-15.227 1	33 638.748 5	34 579.256 3

$$f_x=0, f_y=2.2 \text{ mm}; f=2.2 \text{ mm}, f/p=2.2/138\ 200=1/62\ 818 (p \text{ 为导线全长})$$

表 3-10 定向与陀螺定向方位比较

边名	两井定向方位角	陀螺定向方位角	互差
HG2~HG8	209°19'55.4"	209°19'46.5"	8.9"

两井定向也可通过铅垂仪投点法实现,即在车站预留的盾构井或风道上搭架观测台,利用铅垂仪将地上点位投影到地下,如两投设点位相互通视,则所投点位可直接作为地下导线的起算边。当前地铁施工中所采用的铅垂仪的投点精度一般为 $1/200\ 000 \sim 1/40\ 000$,当井深小于 20 m 时,其投点误差仅为 0.1~0.5 mm。若通过车站的两端头井投点,其距离可达 150 m 以上,考虑到投点误差的影响,该方法传递方位角精度可达 $3'' \sim 5''$ 。当两个投测控制点位在地下不通视时,可在两点之间布设 1~3 个导线点与所投点位构成无定向导线,利用两井定向的方法进行计算。虽然此法定向精度较高,但由于通过盾构井搭设观测台比较麻烦,且投测控制点作业时存在一定的危险因素,故该方法在实际工程中应用并不多。

任务 3.3 导线直接传递测量

任务介绍

本任务主要介绍了导线直接传递测量方法,包括导线直线传递测量的路线形式、导线直接测量的计算方法和导线直接测量过程中的注意事项。通过本任务的学习,学生能应用导线直接传递测量方法完成联系测量工作。

任务目标

- ① 明确导线直接传递测量的适用范围。
- ② 掌握导线直接传递测量的路线形式。
- ③ 理解导线直接传递测量内业计算原理。

能力目标

- 能够应用导线直接传递测量法完成联系测量工作。
- 通过导线直接传递测量内业处理工作，提高学生的计算能力。

竖井联系三角形定向测量虽然具有较高的精度,但由于竖井的井筒直径有限、工作面窄小、施工干扰大,因此布设优化的联系三角形并不容易,且存在工序繁多、作业时间长、劳动强度大等不足。当地铁工程的深度相对较浅时,竖井联系测量可采用导线直接传递测量定向,相对于竖井联系三角形定向法,该方法在布设和施测方面都比较简单,受井口施工干扰小,而且可以满足工程的实际要求,但导线直线定向精度和点位传递精度会随竖井深度的增加而降低。

3.3.1 导线直接传递测量的路线形式

当井筒直径比较大,且竖井中部有站厅平台(车站中板)等可架设测量仪器时,可采用经纬仪或全站仪直接从地面经站厅平台(车站中板)到地下布设导线进行坐标和方向传递测量,如图 3-11 所示。

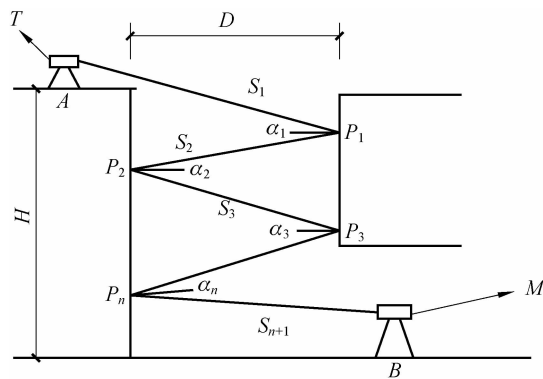


图 3-11 导线直接传递测量

3.3.2 导线直接传递测量的计算方法

导线直接传递测量主要是沿竖井方向布设导线点,通过测定相邻点之间的水平角和导线边,根据地面已知边和已知坐标推算井下待定边的方位角和待定点坐标的一种方法。井下定向边 BM 的坐标方位角 α_{BM} 及井下坐标可按式(3-7)计算。

$$\left. \begin{aligned} \alpha_{BM} &= \alpha_{TA} + \sum_{i=0}^{n+1} \pm \beta_i \mp 180^\circ(n+1) \\ X_B &= X_A + \sum_{i=0}^n S_i \cos \alpha_i \cos \alpha_{i-1,i} \\ Y_B &= Y_A + \sum_{i=0}^n S_i \cos \alpha_i \sin \alpha_{i-1,i} \end{aligned} \right\} \quad (3-7)$$

式中, S_i 为各导线的观测边长; α_i 为各导线的竖直角; $\alpha_{i-1,i}$ 为各导线边的方位角; β_i 为导线转折角。

在竖井联系测量中采用直接导线进行定向测量的方法,通过实践证明是一种比较经济

的定向测量方法,只要在测量过程中,注意仪器气泡居中和觇牌的偏心问题,同样可以获得高精度的方位角传递成果,而且与联系三角形定向测量方法相比更为简便、可行。例如,在上海、北京等竖井联系测量生产实践中,一些单位在井筒中设置多个带有强制对中标志的控制点,使用具有双轴补偿装置的 TCA 全站仪,通过测量多组导线路线,将坐标和方位角传递到地下定向边上,获得了高精度的定向测量成果。

3.3.3 导线直接测量过程中的注意事项

(1)导线直接传递测量应按《城市轨道交通工程测量规范》(GB 50308—2008)中对精密导线测量的有关技术要求进行。

(2)导线直接传递测量应独立测量两次,地下定向边方位角互差应小于 $\pm 12''$,平均值中误差为 $\pm 8''$ 。

(3)导线直接传递测量应符合下列要求。

- ①宜采用具有双轴补偿的全站仪,如徕卡 1202+R400。
- ②垂直角应小于 30° 。
- ③仪器和觇牌安置宜采用强制对中或三联脚架法。
- ④测回间应检查仪器和觇牌气泡的偏离情况,必要时重新整平。

(4)导线边必须对向观测至少一个测回。

任务 3.4 陀螺经纬仪、铅垂仪(钢丝)组合定向测量

任务介绍

本任务主要介绍了陀螺经纬仪、铅垂仪(钢丝)组合定向测量的施测过程,阐述了陀螺经纬仪的定向原理、特性及基本结构。通过本任务的学习,学生能学会使用陀螺经纬仪,同时应用铅垂仪、陀螺经纬仪联合定向法完成联系测量工作。

任务目标

- ①明确陀螺经纬仪、铅垂仪(钢丝)组合定向测量的适用范围。
- ②掌握陀螺经纬仪、铅垂仪(钢丝)组合定向测量的施测过程。
- ③掌握陀螺经纬仪的原理与使用方法。

能力目标

- ①学会使用陀螺经纬仪。
- ②学会应用陀螺经纬仪、铅垂仪(钢丝)组合定向测量法完成联系测量工作。

3.4.1 陀螺经纬仪、铅垂仪(钢丝)组合定向测量法简介

地上、地下联系测量是地铁测量中的一个重要组成部分。竖井定向大都采用铅垂仪、陀螺经纬仪联合定向和联系三角形定向方法。与传统的联系三角形定向方法相比,目前使用的陀螺经纬仪、铅垂仪(钢丝)组合定向测量,利用全站仪、1/200000Q 铅垂仪和陀螺经纬仪的联合作业,具有投点精度高、测量精度高、测量时间短的优势。

陀螺经纬仪是一种全天候、不依赖其他条件能够测定真北方位的物理定向仪器,在我国的军事、航天、矿山、铁道、森林、建筑、海洋和测绘部门应用广泛。

近年来,随着我国城市轨道交通建设的飞速发展,陀螺经纬仪定向在城市轨道交通工程建设中的应用也越来越多,北京、广州、深圳等城市地铁建设中有不少利用陀螺经纬仪进行定向的工程实例,并且均取得了良好的效果。陀螺经纬仪定向法,它是利用惯性原理,通过观测陀螺转子的摆幅(逆转点法)或观测转子经过分划板特殊位置的时间(中天法)来完成定向,属于物理定向方法,既可以在车站、竖井、投点孔处进行,又可以在区间隧道内任何能够架设仪器的地方进行。

陀螺经纬仪、铅垂仪(钢丝)组合定向测量布置如图 3-12 所示。

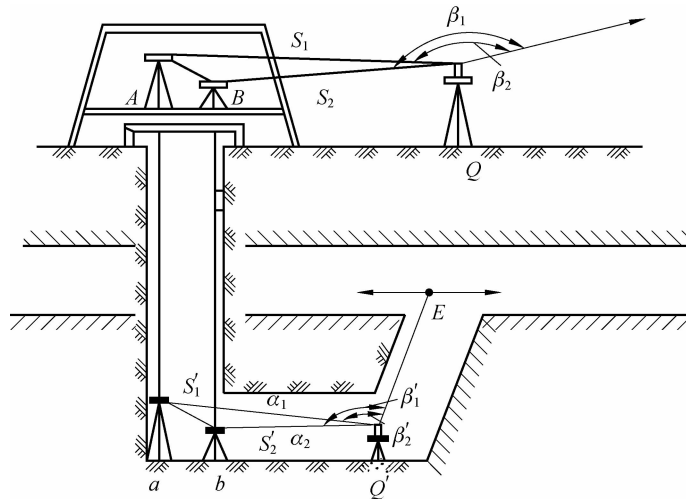


图 3-12 陀螺经纬仪、铅垂仪(钢丝)组合定向测量布置

Q—地面上近井点; Q'—地下近井点; A、B—铅垂仪位置; a、b—井底测量点位;
 S_1 、 S_2 —地面测量距离; S'_1 、 S'_2 —地下测量距离; Q'E—地下方位角起算边;
 α_1 、 α_2 —陀螺方位角; β_1 、 β_2 —地面观测角度; β'_1 、 β'_2 —地下观测角度

施工中陀螺经纬仪定向法是采用光学垂准仪(或重垂球)投出井上、井下在同一铅垂线上的点位,根据井上、井下陀螺经纬仪定向成果推算投点在空间的平面夹角,使得井上、井下的导线联成一体,把井上导线的坐标和方位传递给井下导线。下面介绍陀螺定向法实施的特点。

1. 定向要求

- (1) 全站仪标称精度不应低于 $2''$, $3 \text{ mm} + 2 \times 10^{-6} D$ 。
- (2) 陀螺经纬仪一次定向精度应小于 $20''$ 。

(3) 铅垂仪投点中误差应为 ± 3 mm。

(4) 全站仪测定铅垂仪纵轴坐标的中误差应为 ± 3 mm。

(5) 从地面近井点通过竖井定向,传递到地下近井点的坐标相对地面近井点的允许误差应在 ± 10 mm之内。

2. 作业实施过程

1) 竖井投点

井上、井下导线布置情况如图 3-13 所示。在井口选定 T_1 、 T_2 两个点位,在井盖上的相应位置挖 $30\text{ cm} \times 30\text{ cm}$ 的方孔,将 NL 垂准仪置于方孔上方(垂线通过方孔),另架设钢架(与井盖脱离)供观测人员站立。垂准仪置平后,投点时,平转照准部, 90° 为一个盘位,全圆测四个盘位,每一个盘位测一个投点,取 4 个盘位投点的重心为一测回投点位置,如图 3-14 所示。每个投点观测四测回,并取四测回的 4 个点位所构成图形的重心为井下采用投点位置 T'_1 ;盖上方孔,同样方法得到 T'_2 。按上述方法在井上、井下投下 T_2 、 T'_2 。实践证明,当竖井深度不大于 30 m 时,垂准仪投下的 T_1 和 T'_1 、 T_2 和 T'_2 的点误差不大于 0.5 mm。 T_1 和 T'_1 在空间上为 2 个点,但投影到同一平面时就成为一个点; T_2 和 T'_2 的情况相同。这样井上、井下导线通过投点 T_1 和 T'_1 、 T_2 和 T'_2 就联成一体,构成了闭合环 $A-T_1-Z_1-Z_3-Z_2-T_2-A$ 。光学垂准投点可将投点中误差限制在 0.5 mm 以内,井上两点与井下对应两投点长度之差小于 2 mm,满足长隧深井测量的精度要求。

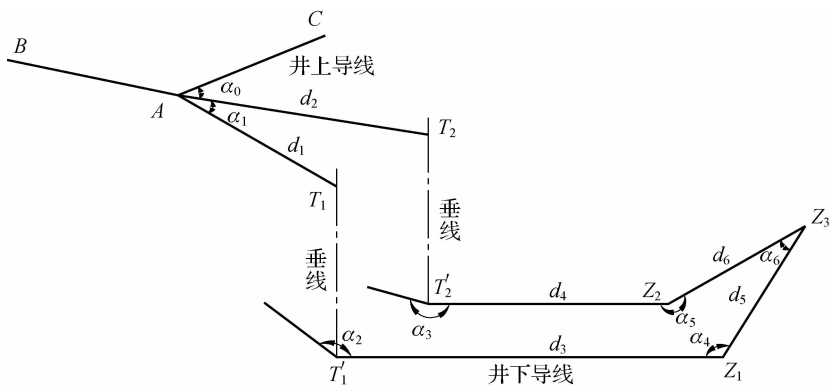


图 3-13 井上、井下导线布置情况

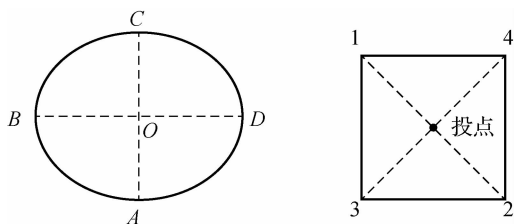


图 3-14 测回投点位置

2) 陀螺经纬仪定向

定向时采用逆转点法进行。对一条边定向时,完成一端定向为半测回,完成两端定向为一测回。如图 3-13 所示,由于井筒上下不宜安置陀螺经纬仪,故井上选择 AC 为定向边,井

下选择 Z_1Z_3 为定向边。下井前先由一名观测员对 AC 进行一测回定向；下井后对 Z_1Z_3 进行定向时，先由一名观测员完成一测回定向；再由另一名观测员在井上对 AC 进行一测回定向。求出陀螺仪的定向常数，并进行改正。

陀螺方位角要满足半测回间互差小于 $15''$ ，测回间互差小于 $8''$ 的精度要求。在达到精度要求的前提下，陀螺方位角采用两测回的平均值作为观测成果。假定陀螺经纬仪测得的 AC 陀螺方位角为 N_0 ， Z_1Z_3 陀螺方位角为 N_5 。

3) 导线边角的测量

在检测地面已知点 $B、A、C$ 的边角 $d_1、d_2、\alpha_0$ 准确无误的前提下，用全站仪按四等导线作业方法进行井上、井下导线边角的测量。

(1) 测 $\alpha_0、\alpha_1、\alpha_4、\alpha_5、\alpha_6$ 的角度。

(2) 量 $d_1、d_2、d_3、d_4、d_5、d_6$ 的长度。

4) 推算 $\alpha_2、\alpha_3$ 的角度

α_2 为 $AT_1、T'_1Z_1$ 在空间上的夹角， α_3 为 $AT_2、T'_2Z_2$ 在空间上的夹角。经通过有关的方位及角度推算，可得 $\alpha_2、\alpha_3$ 为

$$\left. \begin{aligned} \alpha_2 &= N_5 - N_0 - \alpha_0 - \alpha_1 - \alpha_4 \\ \alpha_3 &= N_0 - N_5 + \alpha_0 - \alpha_5 - \alpha_6 \end{aligned} \right\} \quad (3-8)$$

5) 导线计算

根据导线测量成果进行导线平差计算，坐标、方位从井上导线点传递到井下导线点。 $Z_1、Z_2、Z_3$ 坐标成果用于指导施工。

6) 经验总结

陀螺定向的实质是通过投点和定向把井上、井下的导线联成一体，陀螺经纬仪起到了量测空间边夹角的作用。陀螺定向法具有占用井筒时间短、精度高、观测作业简单的优点。竖井测量作业时，禁止施工人员从竖井上下通过，投点时供观测员站的钢架必须与井盖脱离；井上、井下投点用的木板应钉设牢固，在测量作业完成前严禁触碰。在测量时，应选择固定边进行，每条边由不同的观测员观测 1~2 个测回。以后再行竖井联系测量时，陀螺应定向在上次的定向边上进行，以利于核查。

《城市轨道交通工程测量规范》(GB 50308—2008) 规定，全站仪精度应选用不低于 II 级的精度，陀螺经纬仪的标称精度应小于 $20''$ ，铅垂仪(钢丝)投点中误差应为 ± 3 mm。

悬挂的钢丝宜选用直径为 0.3 mm 的钢丝，悬挂 10 kg 重锤，重锤应浸没在阻尼液中。

陀螺经纬仪定向应采用地面已知边—地下定向边—地面已知边的测量程序。同一边应定向三次，每次三测回。测回间陀螺方位角较差应小于 $20''$ ，三次定向陀螺方位角较差应小于 $12''$ ，三次定向陀螺方位角平均值中误差为 $\pm 8''$ 。隧道内定向边边长应大于 60 m，视线距隧道边墙的距离应大于 0.5 m。陀螺经纬仪、铅垂仪(钢丝)组合每次定向应在 3 d 内完成。

陀螺经纬仪在井下测量陀螺定向边的方位角时，其边长应长短适中，边长太短时对中、照准误差对方位角精度影响较大；边长太长时，由于隧道内粉尘分布不均匀及照明条件有限等所造成的照准误差也会影响方位角的精度。

在竖井附近的已知控制点上测定仪器常数时，由于已知边距待定向边较近，因此可认为井上、井下的子午线收敛角影响相同。在这种情况下可不考虑子午线收敛角的影响，计算仪器常数的公式为

$$\left. \begin{aligned} \Delta\alpha &= \alpha_0 - \alpha_T \\ m_{\Delta}^2 &= m_a^2 + m_{\alpha_T}^2 \end{aligned} \right\} \quad (3-9)$$

式中, α_0 为已知边的坐标方位角; α_T 为已知边的陀螺方位角。

由式(3-9)可以看出, 测定仪器常数的已知边的方位角精度对仪器常数的精度有直接影响, 因此已知边的方位角必须有较高的精度。

相关研究表明, 陀螺经纬仪的仪器常数不是一个恒量, 而是一个随时间和地点不断变化的量。因此, 规定陀螺定向的各个步骤应在三昼夜内完成, 以避免时间过长造成仪器常数发生变化。

3.4.2 陀螺仪的基本特性

凡是能绕自身轴高速旋转的任意刚体都可以看作是一个陀螺, 自由陀螺仪有两个基本特性, 即定轴性和进动性。

根据动力学原理, 对于一个转子的动量矩矢量来说, 有公式

$$\vec{H} = \vec{\omega} \cdot \int r^2 dm = \vec{\omega} \cdot J \quad (3-10)$$

式中, \vec{H} 为转子的动量矩矢量($\text{kg} \cdot \text{m}^2/\text{s}$); $\vec{\omega}$ 为转子的角速度(rad/s); J 为转子的转动惯量($\text{kg} \cdot \text{m}^2$); r 为质点到转轴的距离(m); m 为转子的质量(kg)。

式(3-10)表明, 转子的动量矩矢量的方向与角速度矢量的方向一致, 且与角速度及转动惯性成正比。

另外, 根据动量矩定理(动量矩矢量对时间的导数等于外力矩), 可知

$$\vec{\mu} = \frac{d\vec{H}}{dt} = \vec{M} \quad (3-11)$$

式中, $\vec{\mu}$ 为转子的动量矩矢量 \vec{H} 矢端的线速度(rad/s); \vec{M} 为外力矩矢量($\text{N} \cdot \text{m}$)。

从式(3-11)可以得出以下两个结论。

(1) 当外力矩为零时, 陀螺仪保持其动量矩的大小和方向不变, 这种特性称为陀螺的定轴性。

(2) 对于匀速自转的陀螺, 如果在陀螺自转轴上施加一个力矩, 这时陀螺的动量矩矢量的端点将沿力矩方向运动, 这称为陀螺仪的进动性。

如图 3-15 所示, 如果转子以角速度 $\vec{\omega}$ 高速旋转, 其动量矩与 x 轴重合, 这时在旋转轴两端施加上下方向的力, 在此力矩的作用下 \vec{H} 矢量的端点将沿力矩方向运动, 即在 xy 平面内向 y 方向转去, 此时的转子绕 z 轴逆时针转动, 这就是陀螺仪的进动性。正是由于陀螺仪的具有进动性, 人们才能够利用陀螺仪测定过某点的真子午线的位置。

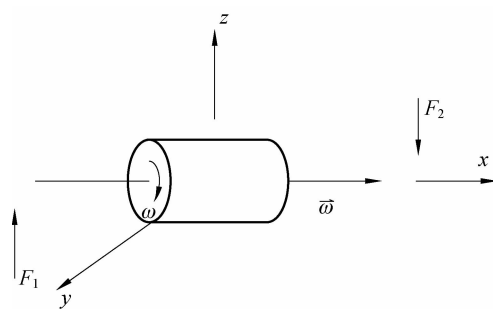


图 3-15 陀螺仪的进动性

3.4.3 陀螺经纬仪的定向原理

陀螺仪测定真北方向与地球自转对陀螺仪的作用有关。地球以南北两极的连线为自转轴自西向东旋转, 其自转的角速度 ω 为 $7.269 \times 10^{-5} \text{ rad/s}$, 如果在宇宙空间面向地球的

北极看去,地球在作逆时针方向的旋转,地球旋转角速度矢量 ω 沿自转轴指向北端(见图 3-16),对于纬度为 φ 的地面点 P 而言,地球自转角速度矢量和当地的水平面成 φ 角,且位于过当地的子午面内。地球自转角速度可以分解为水平分量 ω_1 (沿子午线方向,表示地平面在空间绕子午线旋转的角速度,地平面的东半面降落,西半面升起)和垂直分量 ω_2 (沿铅垂方向,表示子午面在空间绕铅垂线旋转的角速度,表示子午线的北端向西移动),即

$$\left. \begin{aligned} \omega_1 &= \omega \cos \varphi \\ \omega_2 &= \omega \sin \varphi \end{aligned} \right\} \quad (3-12)$$

图 3-17 为辅助半球在地平面以上的半球, O 点为半球的中心,陀螺仪位于 O 点上,陀螺仪主轴位于水平面上,其正端偏向真子午面以东,与真子午线的夹角为 α 。图 3-17 中 NP_NZ_NS 为观测点真子午面, $NWSE$ 为真地平面, OP_N 为地球旋转轴, OZ_N 为铅垂线, NS 为子午线方向, φ 为纬度。

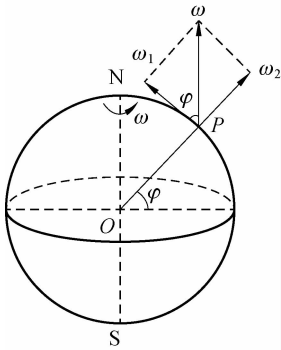


图 3-16 地球自转角速度的分量

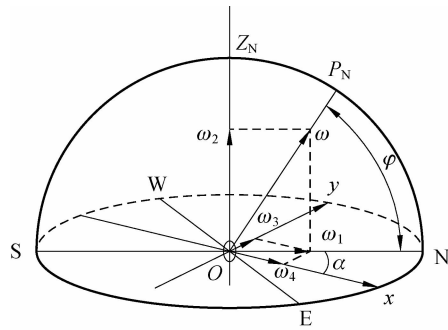


图 3-17 地球自转角速度分量相对陀螺主轴的变化

将把地球旋转的角速度水平分量 ω_1 再分解成为两个互相垂直的分量 ω_3 和 ω_4 。分量 ω_4 表示地平面绕陀螺仪主轴旋转的角速度,其大小为

$$\omega_4 = \omega \cos \varphi \cos \alpha \quad (3-13)$$

因为此分量对陀螺仪轴的空间方位没有影响,所以可不予考虑。分量 ω_3 表示地平面绕 y 轴旋转角速度,其大小为

$$\omega_3 = \omega \cos \varphi \sin \alpha \quad (3-14)$$

分量 ω_3 对陀螺仪轴 x 的进动有影响,称为地转有效分量,该分量使陀螺仪的主轴的空间方位发生变化:东端升起,西端下降,如图 3-18 所示。

当陀螺仪的主轴倾斜时,陀螺转子的重心与吊点将不在同一条铅垂线上。此时陀螺转子的重力将产生一个力矩,这个力矩将使陀螺向子午面方向进动。此力矩的大小为

$$M_B = Pl \sin \theta \quad (3-15)$$

式中, P 为陀螺转子的重量(N); l 为螺转子重心到吊点的距离(m); θ 为螺仪轴与地平面的夹角($^\circ$)。

由式(3-10)和式(3-11)得,陀螺仪转子进动的角速度为

$$\omega_p = \frac{Pl}{H} \sin \theta \quad (3-16)$$

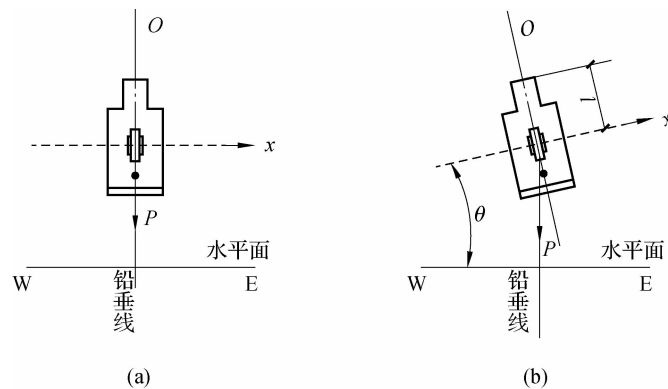


图 3-18 地球旋转的水平分量对陀螺仪轴的影响

悬挂陀螺仪在地球旋转角速度有效分量 ω_3 和重力矩 M_B 的共同作用下,使陀螺主轴总是向子午面方向进动,造成这种进动效应的力矩被称为指向力矩,其大小为

$$M_H = H\omega_3 = H\omega \cos \varphi \sin \alpha \quad (3-17)$$

指向力矩 M_H 表示将陀螺轴转至子午面的力矩大小。由式(3-17)可以看出,在赤道上, $\varphi=0$, M_H 最大;在南北极, $\varphi=90^\circ$, $M_H=0$ 。因此,在两极和 $\varphi>75^\circ$ 的高纬度地区,陀螺仪不能定向。

悬挂式陀螺仪的进动如图 3-19 所示, A 为陀螺仪的初始位置,陀螺转子在高速旋转,由于没有外力矩作用,陀螺轴在空间的方位保持不变,由于地球自转而使陀螺仪位置移动至 B 处,此时地平面将和陀螺轴形成一个夹角 θ ,由于陀螺转子偏离铅垂位置,形成了重力矩 M_B 。 M_B 与陀螺动量矩 H 的共同作用使陀螺转子产生进动,陀螺轴向子午面靠拢。当陀螺轴与子午面重合时,即处于 C 位置时,重力矩为零,陀螺的主轴指向真北。

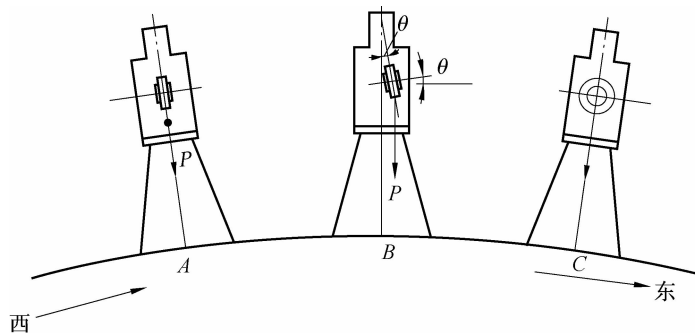


图 3-19 悬挂式陀螺仪的进动

陀螺仪运动方程的推导较为复杂,但是可以证明:指向子午面的进动力矩与动量矩的方向角 α 的正弦 $\sin \alpha$ 成正比。随着陀螺轴靠近子午面, α 越来越小,进动力矩也越来越小。当陀螺轴与子午面重合时,力矩为零。但此时陀螺轴进动的角速度达到最大值,由于惯性的作用,陀螺轴继续摆动偏离子午面,指向力矩会阻止陀螺的进一步摆动,直到陀螺轴达到最大摆幅后反方向转动。如此不断往复。如果没有其他因素影响,陀螺轴将以子午面为对称中心做角简谐运动。其运动周期与陀螺的动量矩、重量、吊点到重心的距离及地理纬度有关。但实际上由于空气阻力、轴承摩擦阻力等因素的影响,陀螺轴是做摆幅逐步衰减的阻尼运动的。

3.4.4 陀螺经纬仪的基本结构

近年来,国内外研制的陀螺经纬仪在精度不断提高的同时也在向自动化、智能化的方向发展。目前,国外较先进的陀螺经纬仪有德国 Deutsche Montan Technologie GmbH(简称 DMT)研制的 GYROMAT 2000 和 GYROMAT 3000 陀螺经纬仪,它们的一次定向精度可以达到 $\pm 3.6''$,时间约为 10 min。仪器为全自动操作。英法海底隧道在施工时就应用了 GYROMAT 2000 陀螺经纬仪。在国内,最近研制的高精度自动陀螺经纬仪有中南大学和长沙莱塞光电子技术研究所联合研制生产的 AGT-1 及 AFS-1 自动陀螺经纬仪,这两种型号的仪器一次定向精度优于 $\pm 5''$,定向时间为 15 min;另外,还有由西安测绘研究所研制、由西安 1001 工厂生产的 Y/JTG-1 自准直陀螺经纬仪。Y/JTG-1 在中纬度地区一次定向中误差不大于 $\pm 7''$,一次定向时间约为 20 min。在众多型号的陀螺经纬仪中,目前在地铁工程中使用较多的有我国徐州光学仪器厂生产的 JT15 以及瑞士 WILD 厂的 GAK-1 型陀螺经纬仪等。

目前,工程中使用的陀螺经纬仪大部分是上架悬挂式陀螺经纬仪,上架是指陀螺仪架在经纬仪的上部,悬挂是指陀螺仪的灵敏部采用带状悬挂的支承方式。对于悬挂式的陀螺仪,其结构一般分为如下几部分。

(1)灵敏部。灵敏部包括悬挂带、导流丝、陀螺马达和陀螺房,以及反光镜或光学给向器元件。

(2)光学观测系统。这部分主要用来观测灵敏部的摆动或用来跟踪灵敏部。

(3)锁紧装置。此部分主要用来固定灵敏部,当不使用陀螺时可以使悬挂带处于不受力状态,以便于搬运,有时也附有阻尼装置或限幅装置。

(4)机体外壳。机体外壳主要附有防磁屏蔽层和其他一些附属于机体的元件、电缆插头、观测孔等。

(5)电源。电源包括蓄电池和逆变器。

下面就 GAK-1 型陀螺经纬仪进行说明。

1. GAK-1 型陀螺经纬仪的基本结构

GAK-1 型陀螺经纬仪是一种上架悬挂式的陀螺经纬仪,由陀螺仪、经纬仪、电源箱(逆变器)和三脚架等几部分组成,陀螺仪的结构如图 3-20 所示。GAK-1 陀螺仪的摆动系统包括悬挂柱、悬挂带、陀螺、限幅盘等。陀螺和悬挂柱固连,并通过悬挂带悬挂在支架上。悬挂带的上下两端分别用钳形夹头固定在支架和悬挂柱上,可以通过上端钳形夹头的两个固定螺丝来调整悬带零位。在陀螺工作时,整个摆动系统的重量全部由悬挂带来承担。限幅盘用于在陀螺处于半脱位置时限制陀螺的摆幅。

支架系统包括一块底板、三个支承柱和一个烟囱状的外伸圆筒。底板下面的三个 V 形槽和经纬仪桥形支架上的三个球形顶针相配合,可以使陀螺仪在经纬仪上定位并强制归心,使得经纬仪照准部和陀螺仪可以一起旋转。光学棱镜、反射镜及电源输入插口均固定于支架上。

经纬仪外壳的下部有一个突出的短柱,内部嵌有一块带刻度的目镜分划板。陀螺的指标线通过光路投射到分划板上。用于观测陀螺指标线摆动的目镜可安装在这个短柱上,目镜为可拆卸式,不用时可以卸下。陀螺仪外壳内衬有一层防止外磁场干扰的防磁层。

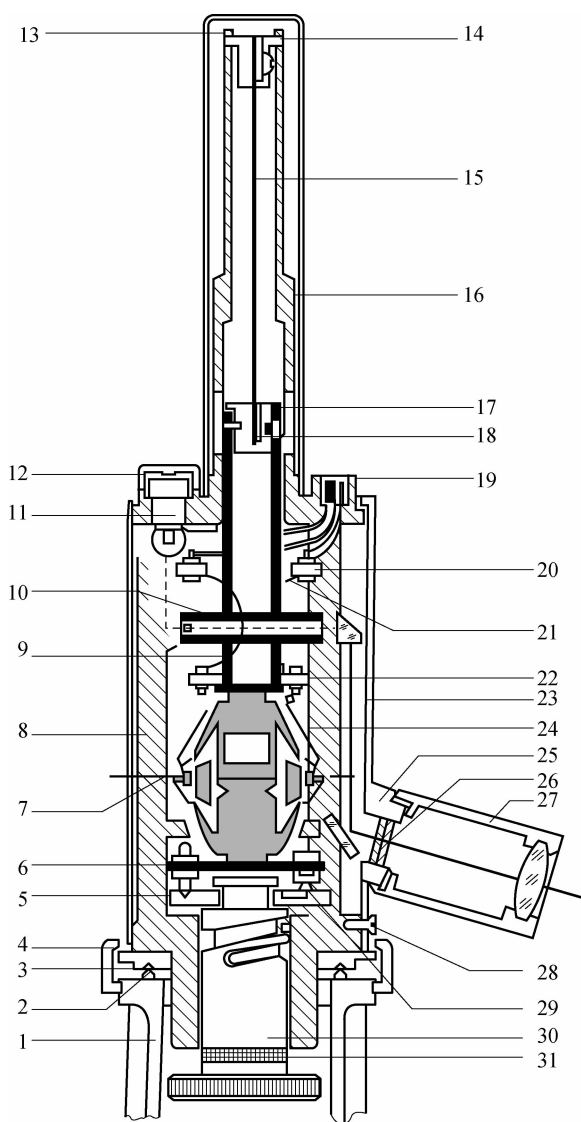


图 3-20 GAK-1 型陀螺仪的结构示意图

- 1—桥式支架；2—桥式支架的球形头顶针；3—V形槽；4—陀螺仪与桥式支架的联结螺母；5—锁紧盘；
 6—限幅盘；7—陀螺轴；8—框架柱；9—悬挂柱；10—光学指示系统；11—灯泡座；12—灯头帽；
 13—上钳形夹头的固定螺丝；14—悬挂带上固定钳形夹头；15—悬挂带；16—上部保护管；
 17—悬挂带下固定钳形夹头；18—悬挂带固定螺丝；19—连接逆变器的电缆插座；
 20、22—绝缘板；21—导流丝；23—外壳；24—陀螺；25—短柱凸块；
 26—分隔板；27—目镜筒；28—外壳固定螺丝；29—锁紧盘的触点；
 30—锁紧装置；31—警告红带

锁紧装置包括锁紧环、带螺纹的导柱和锁紧盘。锁紧盘的作用是在锁紧时使陀螺托起。这时悬挂带处于不受力的状态，以防止陀螺启动、刹车或者搬运陀螺时损坏悬挂带。锁紧盘上有三个安装在板式弹簧上的触头。当锁紧盘处于半脱状态时，这三个触头与限幅盘摩擦以限制陀螺的摆幅。在螺纹导柱上有一个红圈，当红圈可见时表示陀螺没有锁紧。

GAK-1 型陀螺经纬仪的蓄电池采用 10 个 1.2 V 的镍镉电池,逆变器可将直流电变为 115 V、400 Hz 的三相交流电给陀螺仪供电。

2. GAK-1 型陀螺经纬仪主要技术参数

(1)陀螺仪的主要技术参数,见表 3-11。

表 3-11 陀螺仪的主要技术参数

项 目	指 标	项 目	指 标
高	340 mm	启动时间	约 90 s
直径	85 mm	制动时间	约 50 s
悬挂带尺寸	0.4 mm×0.02 mm	中纬度地区摆动半周期	约 4 min
转速	22 000 r/min	适应范围	纬度 75°以内
角动量	$1.86 \times 10^{-5} \text{ g} \cdot \text{cm}^2/\text{s}$	方位角测定标准偏差	$\pm 20''$

(2)GKK3 逆变器的主要技术参数,见表 3-12。

表 3-12 GKK3 逆变器的主要技术参数

项 目	指 标
金属盒子总尺寸	260 mm×170 mm×225 mm
输入电压	12V(DC)
输出电压	115V(AC),400Hz

(3)GKB1 蓄电池的主要技术参数,见表 3-13。

表 3-13 GKB1 蓄电池的主要技术参数

项 目	指 标
金属盒子总尺寸	260 mm×170 mm×90 mm
可充电的镍镉电池	10 节 1.2 V 电池
电压	12 V
容量	7 A
电池充足电可用时间	4 h 左右

(4)GKL11 蓄电池的主要技术参数,见表 3-14。

表 3-14 GKL11 蓄电池的主要技术参数

项 目	指 标
输入电压	115 V 或 220 V
空电池充足电所用时间	14 h

3.4.5 陀螺经纬仪的定向方法

1. 陀螺经纬仪定向的一般步骤

在地下工程中使用陀螺经纬仪定向的一般步骤如下。

- (1) 在地面已知边上测定测前仪器常数。
- (2) 在待定边上测定该边的陀螺方位角。
- (3) 在地面已知边上测定测后仪器常数。
- (4) 计算待定边坐标方位角和精度评定。

2. 悬带零位的测定和改正

在定向时,有时需要进行悬带零位改正,在这里介绍悬带零位及如何进行悬带零位的测定和改正。

悬挂式陀螺仪的灵敏部是由悬挂带悬挂起来的,悬挂带是一个有弹性的金属带,由合金制成,当悬挂带发生扭曲时,因弹性效应而产生扭力,此时陀螺仪的灵敏部就相当于是有一个扭摆。即使陀螺转子不运行,灵敏部也会摆动。当灵敏部的摆动处于平衡位置时,悬挂带的扭力为零。这个位置称为无扭位置,此时光标在分隔板上的读数称为悬带零位。

在定向时,如果悬带零位不在子午线方向,那么当陀螺在指向力矩的作用下指向子午线方向时,悬挂带就会扭曲,扭力矩的作用就会使测得的陀螺北方向值有误差。为了消除这个误差,应该尽量使悬带零位接近北方向。在定向作业前后,应该测量悬带零位。如果悬带零位值比较大,则应该进行零位改正。

1) 悬带零位的测定

(1) 松开锁紧装置,缓慢地释放灵敏部。待灵敏部完全放下时,可从观测目镜中观察光标线在分隔板上摆动的情况,如果摆幅很大,就要重新托起灵敏部,再慢慢释放,反复几次,直到光标线不跑出观测目镜视场为止。

(2) 连续观测光标线左、右逆转点,并在分隔板上读数,记录在测前或测后零位观测栏内,然后按式(3-18)取中数作为测前或测后的零位值。

$$\left. \begin{aligned} A_1 &= \frac{1}{2} \left(\frac{a_1 + a_3}{2} + a_2 \right) \\ A_2 &= \frac{1}{2} \left(\frac{a_2 + a_4}{2} + a_3 \right) \\ A_3 &= \frac{1}{2} \left(\frac{a_3 + a_5}{2} + a_4 \right) \\ A_i &= \frac{1}{2} \left(\frac{a_i + a_{i+2}}{2} + a_{i+1} \right) \\ A &= \frac{A_1 + A_2 + A_3 + \cdots + A_n}{n} \end{aligned} \right\} \quad (3-18)$$

式中, a_i 为光标线在分隔板上的读数,规定左逆转点读数为正; A_i 为悬带摆动读数中值; N 为悬带摆动中值的个数; A 为悬带零位的平均值。

观测和记录的顺序如图 3-21 所示。根据摆幅达到逆转点的读数按式(3-18)计算悬带零位。

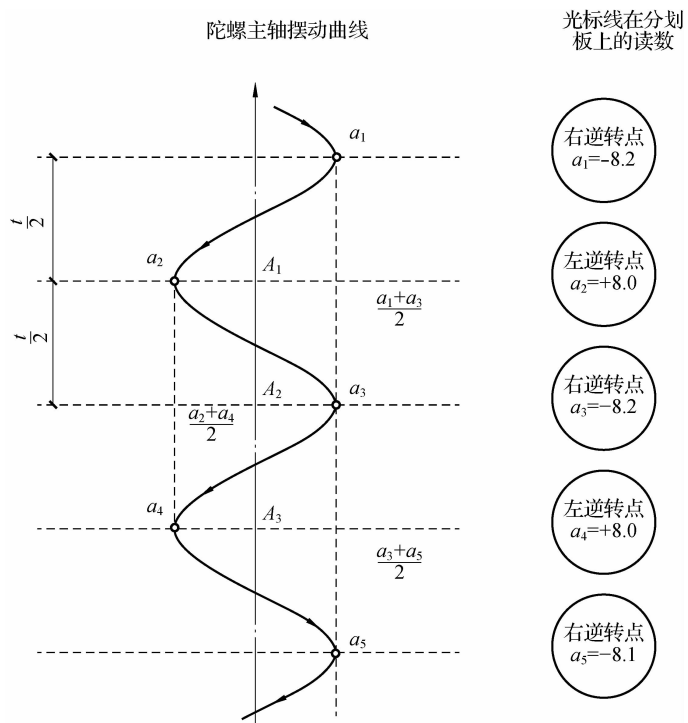


图 3-21 悬带零位测量

2) 悬带零位的改正

观测完毕后,当光标线移动到分划板零刻划附近时,将灵敏部托起,拧紧锁紧装置。这时在观测上镜中可以看到光标又回到了分划板线上。

如果测得的悬带零位较大,超过 ± 0.5 格时,就需要进行零位校正。零位校正通过调整陀螺仪上部的校正螺丝进行的。零位校正应由熟悉陀螺仪内部结构且有经验的人员进行操作,以免损坏仪器。

零位改正值的计算公式为

$$\Delta\alpha = \lambda\tau\delta \tag{3-19}$$

式中, δ 为零位值,以格为单位; τ 为目镜分划板的分划值; λ 为零位改正系数, $\lambda = D_B/D_K$,是悬带扭力矩与陀螺力矩的比值。若仪器更换了悬挂带或陀螺马达,则应重新测定悬带零位。 λ 用式(3-20)计算。

$$\lambda = \frac{T_A^2 - T_B^2}{T_B^2} \tag{3-20}$$

式中, T_A 为跟踪摆动周期; T_B 为不跟踪摆动周期。此处所求 λ 只适用于无扭观测(如逆转点法),当采用有扭观测(如中天法)时,应按式(3-21)计算。

$$\lambda = \frac{T_A^2 - T_B^2}{T_A^2} \tag{3-21}$$

3. 粗略定向

不管采用何种定向方法,在精确定向前都必须将经纬仪望远镜的视准轴置于近似北方向,这个过程称为粗略定向。在已知边上测定仪器常数时,可以根据已知边的坐标方位和测

站的子午线收敛角直接寻找北方向。当在未知边上定向时,可以采用两逆转点法或四分之一周期法进行粗略定向。

1) 两逆转点法

经纬仪的视准轴大致指北(可以借助罗盘),水平微动螺旋置于行程中间位置,启动陀螺,达到额定转速后下放陀螺灵敏部,用手转动照准部来跟踪陀螺灵敏部,使得陀螺仪目镜视场中移动的光标与分划板零刻划线时时重合。当光标快达到逆转点位置时制动照准部,改用水平微动螺旋继续跟踪,达到逆转点时,在经纬仪上读取水平度盘读数 a_1 ; 然后松开水平制动,继续用相同的方法跟踪陀螺灵敏部至另一个逆转点并在经纬仪上读取水平度盘读数 a_2 。锁紧灵敏部,制动陀螺马达,按式(3-22)计算近似北方向在水平度盘上的读数。

$$N' = \frac{1}{2}(a_1 + a_2) \quad (3-22)$$

转动照准部,使水平度盘读数为 N' ,此时视准轴就指向近似北方向,这种近似寻北的方法精度约为 $\pm 3'$,观测时间为 10 min 左右。例如,图 3-22 中, a_1 为 $7^\circ 14' 4''$, a_2 为 $352^\circ 40' 2''$,按式(3-22)可得 N' 为 $179^\circ 57' 3''$ 。

2) 四分之一周期法

启动陀螺马达,达到额定转速后下放陀螺灵敏部。用手转动照准部进行跟踪,让陀螺仪目镜分划板零刻划线走在光标的前面,当光标像的移动速度逐渐减慢,接近逆转点时固定照准部,停止跟踪,待光标与分划板零刻划线重合时,启动秒表,光标像继续向前移动至逆转点后又反向移动,待光标像再次经过分划板零刻划线时不停表读取时间 t ,并用式(3-23)计算 T' ,即

$$T' = \frac{t}{2} + \frac{T_1}{4} \quad (3-23)$$

式中, T_1 为跟踪摆动周期。

松开水平制动螺旋继续跟踪,使光标像与分划板零刻划线始终重合,同时观测秒表读数。当跟踪到 T' 时刻,立刻固定照准部,停止跟踪,这时望远镜视准轴就指向了近似北方向。这种方法指北精度可在 $\pm 10'$ 之内,观测时间约为 6 min。四分之一周期法如图 3-23 所示。

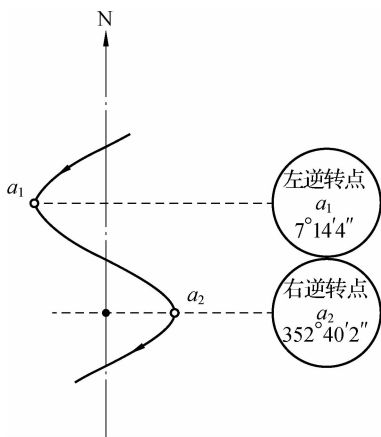


图 3-22 两逆转点法

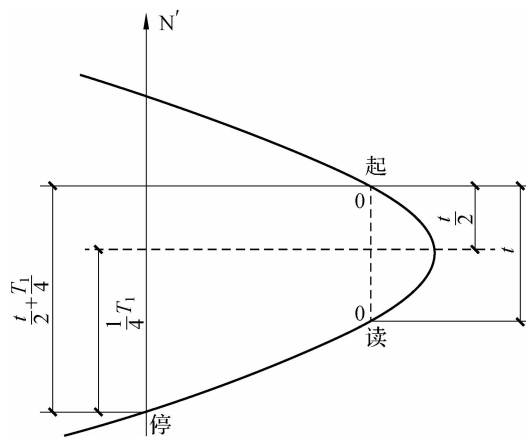


图 3-23 四分之一周期法

4. 精密定向

粗略定向完成后就可以进行精密定向。定向方法一般分为两类,一类是在定向过程中仪器的照准部跟踪陀螺灵敏部,主要指逆转点法;另一类是测量过程中照准部固定,这类方法有中天法、时差法、摆幅法、计时摆幅法等,其中,中天法应用最广泛。下面主要就逆转点法和中天法进行介绍。

1) 逆转点法

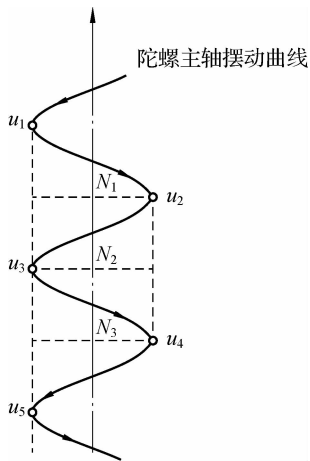


图 3-24 逆转点法定向

逆转点法定向如图 3-24 所示。逆转点法在一个测站上的操作程序如下。

(1) 经纬仪严格对中整平,并安置好陀螺仪,一测回测定待测边的方向值。

(2) 进行粗略定向,使望远镜视准轴指向近似北方向并固定照准部。

(3) 打开陀螺照明,下放陀螺灵敏部,进行测前悬带零位测量,同时用秒表记录自摆周期。零位测量完成后,托起并锁紧灵敏部。

(4) 启动陀螺马达,达到额定转速后,缓慢下放灵敏部到半脱离位置,稍停数秒后再全部放下,如果摆幅过大,则需再次用半脱离阻尼限幅,使摆幅在 $1^{\circ} \sim 3^{\circ}$ 为宜。用水平微动螺旋微动照准部,让光标像与分划板零刻划线随时重合,即跟踪。跟踪

时要做到平稳和连续,切忌跟踪不及时,造成分划板时而落后于光标像,时而赶上或超前于光标像。这种情况将影响摆动中值的稳定性,从而影响定向精度。当每次摆动到达逆转点时,应较快地在水平度盘上读数,一般连续读取 5 个逆转点读数 u_1 、 u_2 、 u_3 、 u_4 、 u_5 ,然后托起锁紧灵敏部,制动陀螺马达。

跟踪时,还需要用秒表测定连续两次同一方向经过逆转点的时间,即跟踪摆动周期 T_A 。

(5) 进行测后零位观测。

(6) 以一测回测定待测或已知测线的方向值。前后两次观测结果的互差,对于 J_2 级经纬仪不大于 $10''$,对于 J_6 级经纬仪不大于 $24''$ 。取测前测后两测回的平均值作为测线方向值。

(7) 摆动平衡位置在水平度盘上的读数 N ,按式(3-24)计算。

$$\left. \begin{aligned} N_1 &= \frac{1}{2} \left(\frac{u_1 + u_3}{2} + u_2 \right) \\ N_2 &= \frac{1}{2} \left(\frac{u_2 + u_4}{2} + u_3 \right) \\ N_3 &= \frac{1}{2} \left(\frac{u_3 + u_5}{2} + u_4 \right) \\ N_T &= \frac{N_1 + N_2 + N_3}{3} \end{aligned} \right\} \quad (3-24)$$

式中, N_T 为陀螺北方向值。

(8) 待测测线陀螺方位角 α_T 按式(3-25)计算。

$$\alpha_T = B - N_T + A \quad (3-25)$$

式中, B 为测线方向值; A 为零位改正数。

2) 中天法

用中天法观测时, 照准部固定于近似北方向上, 陀螺光标的摆动幅度必须限定在目镜的视场范围内, 因此要求起始的近似北方向精度在 $\pm 15'$ 之内。中天法定向如图 3-25 所示, 其在一个测站上的操作程序如下。

(1) 严格安置好仪器, 以一测回测定待测测线的方向值 B_1 。

(2) 进行粗略定向。将经纬仪照准部固定在近似北方向 N' 上, 并记录下 N' 值。在整个定向过程中, 照准部不允许转动。

(3) 进行测前零位观测。

(4) 启动陀螺马达, 达到额定转速后下放灵敏部, 并进行限幅, 使摆幅不要超出目镜视场, 但摆幅不要过小, 因为当摆幅过小时光标像经过分划板零刻划线时的速度较慢, 时间不容易测准。在确认摆幅合适后按以下顺序观测。

① 当灵敏部指标线经过分划板零刻划线的瞬间, 立即启动专用秒表, 读取中天时间 t_1 。

② 当灵敏部指标线达到逆转点时, 在分划板上读取摆幅读数 a_w 。

③ 当灵敏部指标线返回零刻划线的瞬间, 读取中天时间 t_2 。

④ 当灵敏部指标线达到另一逆转点时读取摆幅读数 a_E 。

⑤ 当灵敏部指标线返回零刻划线的瞬间, 读取中天时间 t_3 。

观测完毕后托起陀螺灵敏部, 关闭马达。

(5) 测后零位观测。

(6) 以一测回再次测定待测边的方向值 B_2 。当前、后两测回方向值的互差满足要求时, 取其平均值作为测线方向值, 即

$$B = \frac{1}{2} (B_1 + B_2) \quad (3-26)$$

(7) 测线陀螺方位角的计算。

摆动半周期

$$\left. \begin{aligned} T_E &= t_2 - t_1 \\ T_W &= t_3 - t_2 \end{aligned} \right\} \quad (3-27)$$

时间差

$$\Delta t = t_2 - t_1 \quad (3-28)$$

摆幅值

$$a = \frac{|a_w| + |a_E|}{2} \quad (3-29)$$

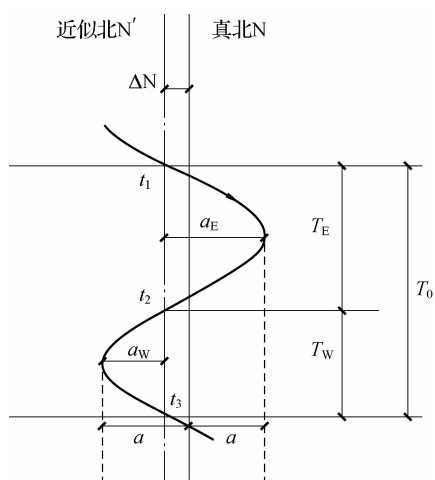


图 3-25 中天法定向

近似北方向偏离平衡位置的改正数为

$$\Delta N = ca\Delta t \quad (3-30)$$

陀螺摆动平衡位置在水平度盘上的读数为

$$N = N' + \Delta N = N' + ca\Delta t \quad (3-31)$$

测线的陀螺方位角 α_T 按式(3-32)计算。

$$\alpha_T = B - N + A \quad (3-32)$$

式中, c 为比例系数, 可以按以下两种方法测定和计算。

①经纬仪视准轴分别安置在北偏东 $10' \sim 15'$ 和北偏西 $10' \sim 15'$, 分别用中天法观测, 求出时间差 Δt_1 和 Δt_2 以及摆幅值 α_1 和 α_2 , 然后列出如下方程式, 以求解 c 值。

$$\left. \begin{aligned} N &= N'_1 + c\alpha_1\Delta t_1 \\ N &= N'_2 + c\alpha_2\Delta t_2 \end{aligned} \right\} \quad (3-33)$$

求解式(3-33)得

$$c = \frac{N'_1 - N'_2}{\alpha_1\Delta t_1 - \alpha_2\Delta t_2} \quad (3-34)$$

②用摆动周期计算比例系数 c 。

$$c = \frac{\pi}{2} \tau \frac{T_A^2}{T_B^2} \quad (3-35)$$

式中, τ 为分划板格值; T_A 为跟踪摆动周期; T_B 为不跟踪摆动周期。

比较而言, 以实际观测数据求算 c 值比较可靠。因此, 一般采用第一种方法求算。

c 值与地理纬度有关, 在同一地区南北不超过 500 km 范围内可以使用同一个 c 值, 超过这个范围必须重新测定。隔一定时间应抽测检查。

(8)测线坐标方位角 α 的计算。

$$\alpha = \alpha_T + \Delta - \gamma \quad (3-36)$$

式中, Δ 为仪器常数; γ 为子午线收敛角。

3.4.6 陀螺经纬仪定向时的注意事项

陀螺经纬仪是以动力学理论为基础的光、机、电一体化的精密仪器。定向时, 陀螺灵敏部具有较大的惯性, 必须注意合理使用, 妥善保管, 才能保持仪器的精度, 延长其使用寿命。在使用时必须注意以下事项。

(1)仪器应轻拿轻放, 避免猛烈冲击或震动。

(2)在打开和关闭仪器之前, 陀螺马达必须处于完全锁紧状态(按要求正确锁紧陀螺马达, 减少悬挂带折断现象的发生)。

(3)存放仪器时, 锁紧环必须完全锁紧, 并在锁紧环上罩上锁紧扣。

(4)使用陀螺电源逆变器时, 要注意接线正确, 使用外接电源时, 应注意电压、极性是否正确。在没有负载时, 不得开启逆变器。

(5)存放陀螺仪时, 应将其正确装入仪器箱内, 不准倒置或躺卧, 并且要放入干燥剂。

(6)仪器应存放在干燥、清洁、通风良好处, 切忌置于热源附近, 环境温度以 $10^\circ\text{C} \sim 30^\circ\text{C}$ 为宜。

(7)运输仪器时, 要使用专用的防振包装箱。

(8)在野外观测时, 应避免太阳光直接照射仪器。

任务 3.5 高程传递测量

任务介绍

本任务主要介绍了高程传递测量的两种方法，即钢尺传递高程法与全站仪传递高程法。通过本任务的学习，学生能完成高程传递测量工作。

任务目标

- ④ 明确高程传递测量的目的。
- ④ 掌握钢尺传递高程的原理与方法。
- ④ 掌握全站仪传递高程的原理与方法。

能力目标

- ④ 学会钢尺传递高程法的施测过程。
- ④ 学会用全站仪天顶测距法传递高程。

在隧道施工中，除了通过开挖平洞、斜井以增加工作面外，还可以采用开挖竖井的方法来增加工作面，即将整个隧道分成若干段，实行分段开挖。例如，城市地下铁道的建造，每个地下站是一个大型竖井，在站与站之间用盾构机进行开挖，并不受城市地面密集建筑物和繁忙交通的影响。为了保证地下各方向的开挖面能准确贯通，必须将地面控制网中的点位坐标、方位和高程通过竖井传递到地下，这项工作就称为竖井联系测量。竖井施工前，应根据地面控制点把竖井的设计位置测设于地面。竖井向地下开挖，其平面位置用悬挂大锤球或用垂准仪测设铅垂线，将地面的控制点垂直投影至地下施工面。工作原理和方法与高层建筑的平面控制点垂直投影完全相同。高程控制点的高程传递可以用钢卷尺或光电测距来实现。

3.5.1 钢尺传递高程法

联系高程测量的主要内容是将地面的高程系统传入井下的高程起算点上。用悬挂钢尺（钢尺需经检定合格）的办法，在地面上选好挂钢尺的固定位置系好钢尺，在钢尺的下端挂上钢尺在检定时所用的标准拉力的重物，井上和井下各安置一台水准仪同时读取钢尺上的读数，如图 3-26 所示。在进行高程传递的过程中每测回均应独立观测，测回间应变动仪器高度不小于 20 cm，每次应观测三测回，三测回测得的地上和地下的高程之差不大于 3 mm。三测回测定的高差应加入钢尺的温度和尺长改正，如果挖深在 20 m 以下，则可以不考虑自重伸长改正。

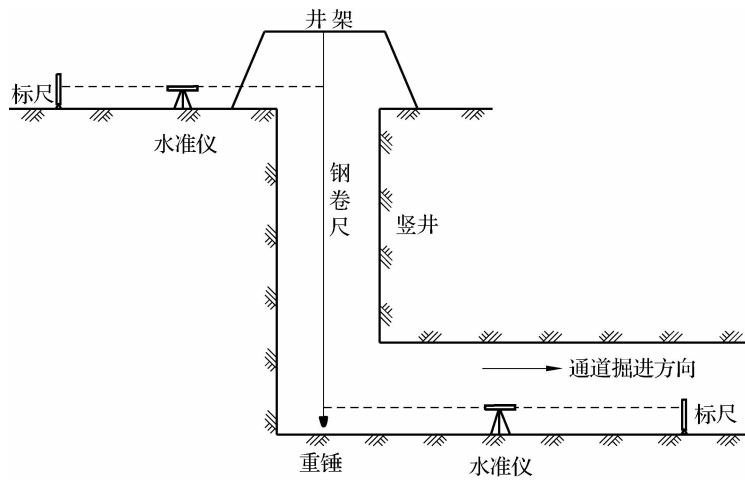


图 3-26 联系高程测量

经竖井传递高程应采用悬吊钢尺(经检定后),井上和井下两台水准仪同时观测读数,每次错动钢尺 3~5 cm,施测三次,取其平均值,测深超过 20 m 时,三次误差应控制在 ± 5 mm 以内。

3.5.2 全站仪传递高程法

利用全站仪代替长钢卷尺或长钢丝测定垂直方向的距离(高差),不仅操作简单,能大大减轻劳动强度,而且占用井筒时间短,导入高程精度高,实用性好。尤其对 50 m 以上的深井测量,更能显现出其优越性。

全站仪天顶测距法传递高程是地铁盾构施工中,利用车站施工竖井或定向测量投点孔,如图 3-27 所示。具体步骤如下。

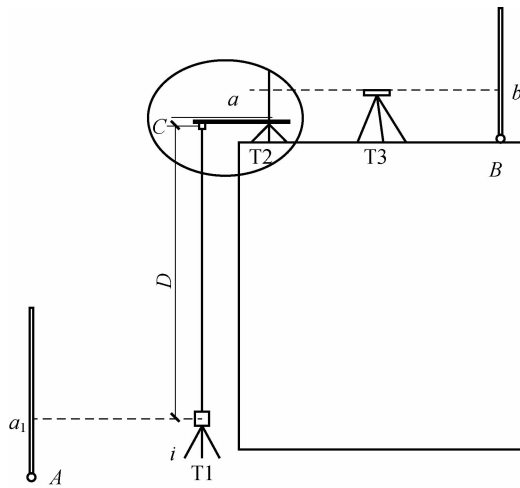


图 3-27 全站仪天顶测距法

(1)在竖井或隧道中钻孔下安置配有弯管目镜的全站仪,并将望远镜放置水平,即竖盘天顶距读数为 90° ,读取立于井下待测高程控制点上的水准尺读数 a_1 ,得到仪器高。

(2)在地面投点孔上方安置有孔的钢板,在钢板孔上安置反射棱镜。

(3)然后将望远镜指向天顶,显示天顶距读数为 0° 的状态,并瞄准反射棱镜,按测距键测定垂直距离 D ;仪器高加垂直距离,即得到仪器与钢板面的高差。

(4)在地面上用水准仪将钢板面与地面水准控制点 B 联测,得到钢板面高程后,根据已经测得的仪器高、仪器与钢板面的高差,从而计算出井下高程控制点的高程。

项目考核

一、名词解释

联系测量 一井定向 两井定向 投向误差 陀螺仪的进动性

二、填空题

1. 隧道工程的联系测量按照地上控制网与地下联系形式的不同可分为_____、_____、_____、_____、_____、导线直接传递法等。
2. 一井定向的方法是通过测量_____、_____等几何量来完成定向的,属于_____方法。
3. 与传统的联系三角形定向方法相比,目前使用的陀螺经纬仪、铅垂仪(钢丝)组合定向测量具有投点_____、测量_____、测量_____的优势。
4. 陀螺定向的实质是通过_____、_____把井上、井下的导线联成一体,陀螺经纬仪起了_____的作用。
5. 为了保证地下各方向的开挖面能准确贯通,必须将地面控制网中的_____、_____和_____,通过竖井传递到地下,这项工作称为竖井联系测量。

三、简答题

1. 联系测量的目的和任务是什么?为什么要进行联系测量?
2. 与一井定向相比两井定向的优势是什么?
3. 导线直接测量过程中的注意事项有哪些?
4. 何谓联系三角形?联系三角形各边的要求是什么?
5. 试述联系三角形的解算步骤和方法。
6. 简述一井定向的原理与过程。
7. 简述两井定向的过程。
8. 简述陀螺经纬仪、铅垂仪(钢丝)组合定向测量组合定向的施测过程。
9. 陀螺经纬仪包括哪些基本结构?
10. 试说明联系测量四种方法的优缺点与适用范围。