第十三章

地下工程测量

第十三章 地下工程测量

主要内容

- 地下工程的种类、特点及对测量的要求
- 隧道贯通误差预计
- 地面和地下控制测量
- 联系测量
- 陀螺经纬仪及定向测量
- 隧道施工与竣工测量

13.1.1 地下工程的种类

地下工程根据工程建设的特点可分为三大类:

一. 地下通道工程，如隧道工程(包括铁路隧道、公路隧道以及输水隧洞)、城市地下铁道工程等;

二. 地下建(构)筑物，如地下工厂、仓库、影剧院、游乐场、舞厅、餐厅、医院、图书室、地下商业街、人防工程以及军事设施等;

三. 为开采各种矿产而建设的地下采矿工程。

13.1.2 地下工程测量的特点

与地面工程测量相比，地下工程测量具有以下特点：

(1) 地下工程施工面黑暗潮湿，环境较差，经常需进行点下对中，有时边长较短，因此测量精度难以提高；

(2) 地下工程的坑道往往采用独头掘进，洞室之间互不相通，不便组织校核，出现错误不能及时发现。随着坑道的进展，点位误差的累积越来越大；

13.1.2 地下工程测量的特点

(3) 地下工程施工面狭窄，并且坑道往往只能前后通视，造成控制测量形式比较单一，仅适合布设导线；

(4) 测量工作随着坑道工程的掘进，而不间断的进行。一般先以低等级导线指示坑道掘进，而后布设高级导线进行检核；

(5) 由于地下工程的需要，往往采用一些特殊或特定的测量方法（如为保证地下和地面采用统一的坐标系统，需进行联系测量）和仪器。

13.1.3 地下工程对测量的要求

地下工程的测量环节包括:建立地面控制网、地面和地下的联系测量、地下坑道中的控制、竣工及施工测量。对测量的要求如下:

（1） 应严格按照先控制后碎部、高级控制低级、对测量成果逐项检核，测量精度必须满足规范要求等原则进行。

（2）在隧道工程中，两个相向开挖的工作面的施工中线往往因测量误差产生贯通误差(分为纵向、横向和高程贯通误差)。对于隧道而言，纵向误差不会影响隧道的贯通质量，而横向误差和高程误差将影响隧道的贯通质量。因此应采取措施严格控制横向误差和高程误差，以保证工程质量。

13.1.3 地下工程对测量的要求

（3）为保证地下工程的施工质量，在工程施工前，应进行工程测量误差预计。预计中应将容许的竣工误差加以适当分配。一般来说，地面上的测量条件比地下好，故对地面控制测量的精度应要求高一些，而将地下测量的精度要求适当降低。

（4）在地下工程中应尽量采用先进的测量设备。地面控制测量应采用GPS测量技术进行。平面联系测量应尽量采用陀螺定向。坑道内的导线测量应采用红外测距仪测距以加大导线边长，减少导线点数。为限制测角误差的传递，当导线前进一定距离后应使用高精度陀螺经纬仪加测陀螺定向边。

13.2 隧道贯通误差预计

隧道控制测量包括地面和洞内两部分，每一部分又分平面控制测量和高程控制测量。地面平面控制测量常采用三角网、电磁波测距导线、GPS网。地下平面控制测量主要采用钢尺量边导线和电磁波测距导线进行。另外还可对某些边加测陀螺方位角。地面和洞内的高程控制，一般都采用水准测量的方法。

隧道控制测量的主要作用是保证隧道的正确贯通（两个或两个以上的掘进工作面在预定地点彼此接通的工程），其精度要求，主要取决于隧道贯通精度的要求、隧道长度与形状、开挖面的数量以及施工方法等。隧道贯通误差在线路中线方向上的投影称为纵向贯通误差，在垂直于中线方向的投影长度称为横向贯通误差，在高程方向上的投影称为高程贯通误差。一般取两倍中误差作为各项贯通误差的限差。

13.2 隧道贯通误差预计

对于纵向误差，通常都是按定测中线的精度要求给定：

$$\Delta l = 2m \le \frac{1}{2000} L \qquad (13-1)$$

式中，L为隧道两开挖洞口间的长度。

对于横向贯通误差和高程贯通误差的限差，按《铁路测量技术规则》根据两开挖洞口间的长度确定：

两开挖洞口间的长度(km)	<4	4-8	8-10	10-13	13-17	17-20
横向贯通限差（mm）	100	150	200	300	400	500
高程贯通限差（mm）	50					



13.2 隧道贯通误差预计

13.2.1 地面边角网测量误差对横向贯通精度影响

在隧道的地面三角测量中常采用三角锁，因此主要讨论三角锁测量误差所引起的横向贯通误差。

13.2 隧道贯通误差预计

13.2.1.1 简化为导线的近似估算

将三角锁的边看做为导线边，选择最靠近隧道中线的一条线路，将其做为导线。

13.2.1.2 按方向的间接平差估算

在方向间接平差中，可按求平差未知数函数的精度的方法估算横向贯通误差，另外还有零点误差椭圆法，上述两种方法都属于严密估算方法。可利用控制网通用平差程序（可考虑基本条件）在微机上进行，能适合各种网形，使用简便，具有普遍推广意义。

13.2 隧道贯通误差预计

1 按求平差未知数函数的精度的方法估算横向贯通误差

如图13-1所示，GJ、GC分别表示由进出口点通过联系角和边长SJG、SCG计算的贯通点。在计算地面控制网测量误差对横向贯通误差的影响时，应将βJ、βC、SJG、SCG视为不含误差的量。

由图可知横向贯通误差即贯通面上两点GJ、GC的横坐标差△YG的中误差。J、C、A、B、G分别表示进、出口点、向点和贯通点。

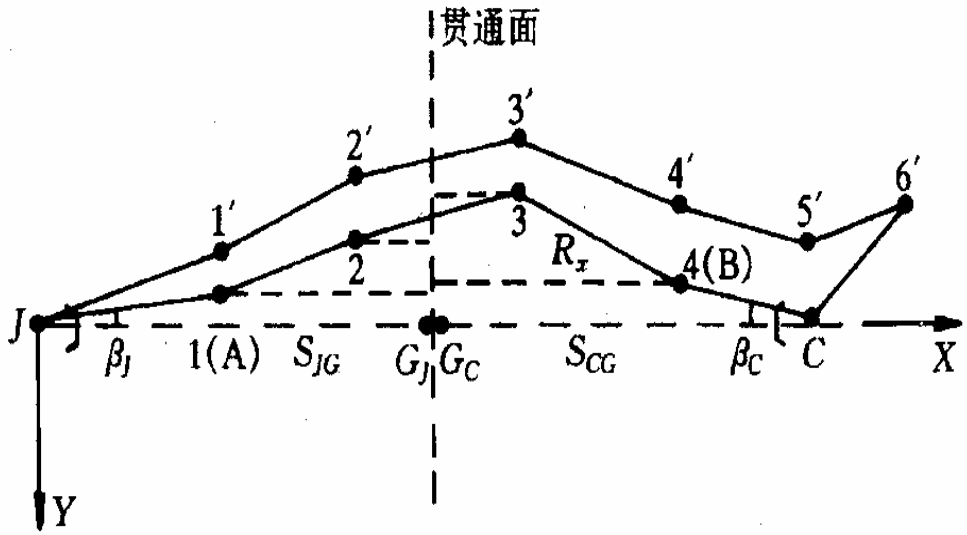


图13-1 隧道贯通误差预计图

13.2 隧道贯通误差预计

因此应首先列出计算△Y_G的公式，然后对△Y_G全微分，可得权函数式：

$$d(\Delta Y_G)=a_{JA}\Delta X_{JG}dx_J+(1+b_{JA}\Delta X_{JG})dy_J-a_{JA}\Delta X_{JG}dx_A-b_{JA}\Delta X_{JG}dy_A$$
$$-a_{CB}\Delta X_{CG}dx_C-(1+b_{CB}\Delta X_{CG})dyc+a_{CB}\Delta X_{CG}dx_B+b_{CB}\Delta X_{CG}dy_B \qquad (13-2)$$

其中$a_{JA}=\Delta Y_{JA}/S_{JA}^2$，$b_{JA}=-\Delta X_{JA}/S_{JA}^2$

因此，只要能计算出进出口点及其定向点的协方差阵（可由通用平差程序求得），即可按广义误差传播律计算出的方差。

13.2 隧道贯通误差预计

由（13-2）式不难看出，影响值与贯通点G的位置有关（G应位于进出口点之间的中部），且与定向点的位置和精度也有关。若进出口分别有m、n个定向点，则有m×n个影响值。测量设计时，可计算出最小影响值所对应的定向点组。由洞外向洞内作进洞测量时，应优先考虑这一组定向点作联系方向点，并以其它定向点检核。

13.2 隧道贯通误差预计

进一步还可将影响值的权函数式表示为观测值的线性函数，即

$$d(\Delta Y_G) = D_R^T dl_R + D_R^T dl_S \qquad (13-3)$$

式中：dl_R、dl_S—分别为方向、边长观测值的微分向量；

D_R、D_S—为相应的系数向量；

由上式可研究每一观测值误差对横向贯通精度的影响，这对网的优化设计具有意义。

2 零点误差椭圆法

若将βJ、βC、SJG和SCG视为不含误差的虚拟观测值，并将GJ、GC作为控制网的点纳入一起计算，在通用平差程序中，可计算GJ、GC、两点的相对误差椭圆，该椭圆长半轴在贯通面上的投影即为影响值，即：

$$m_q = \sqrt{E^2 \cos^2 \Psi = F^2 \sin^2 \Psi} \qquad (13-4)$$

式中：Ψ—以椭圆长半轴为起始方向时Y轴的方位角：

$$\Psi = 90^\circ - \varphi_0 (\varphi_0 \le 90^\circ) \quad 或 \quad \Psi = 270^\circ - \varphi_0 (\varphi_0 > 90^\circ)$$

上面公式中，E、F、φ_0 为零点相对误差椭圆的元素。用该法所计算的影响值综合了所有的测量误差，其影响值是唯一的，其值不同于坐标差权函数法的任一结果，相当于用所有的定向点进行多点定向进洞。

13.2 隧道贯通误差预计

用上述两种方法计算影响值时，需要给出网的近拟坐标、观测方案以及观测精度等值，用通用平差程序计算坐标未知数向量的协因数阵，乘以先验单位权方差得协方差矩阵。地面网施测之后，也可以按上述方法用验后单位权方差计算实测网的影响值。

13.2.2 导线测量误差引起的横向贯通误差

13.2.2.1 地面导线测量误差引起的横向贯通误差

如图13-2所示，为测定曲线隧道两个洞口点A和F的相对位置，沿着隧道延伸的方向，在地面上布设了一条支导线，引起隧道横向贯通误差的地面导线测量误差包括，导线测角误差m_β、导线量边误差m_l和洞口两端起始边方位角误差。

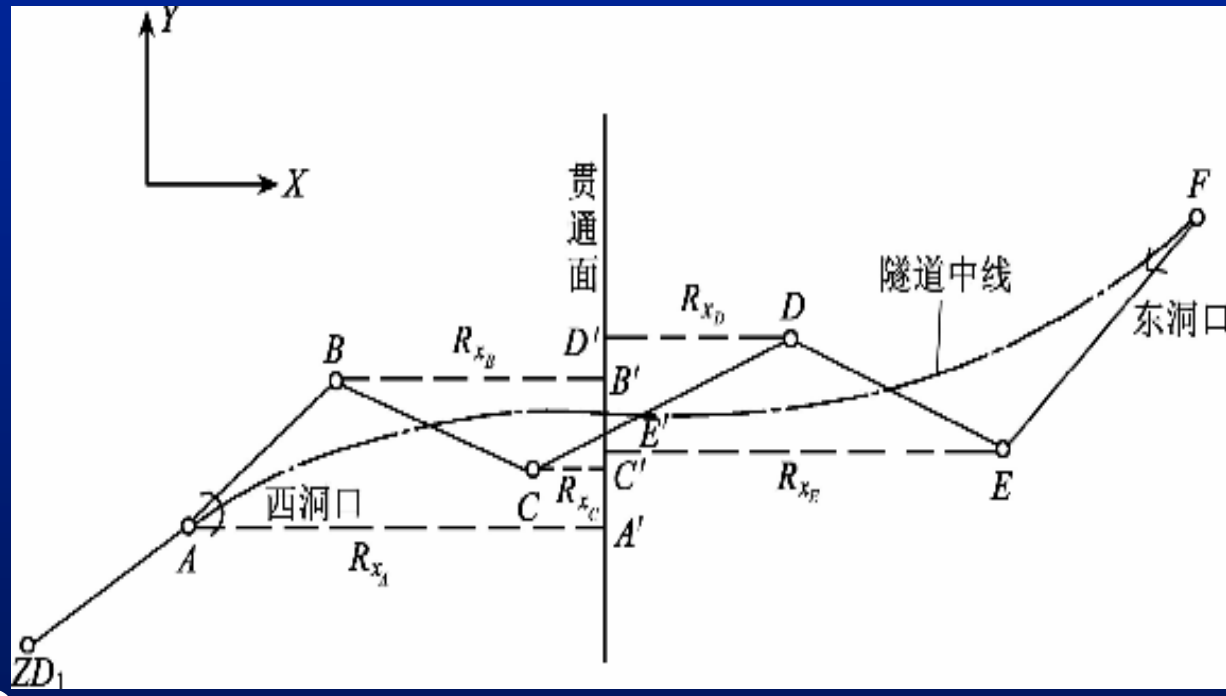


图13-2 地面贯通导线误差预计图

13.2.2 导线测量误差引起的横向贯通误差

则由于地面导线测量误差而引起的横向贯通误差可以表示为：

$$m_{q上} = \pm\sqrt{m_{y_\beta}^2 + m_{y_l}^2 + m_{y_\alpha}^2}$$

$$= \pm\sqrt{\left(\frac{m_\beta}{\rho}\right)^2 \sum R_x^2 + \left(\frac{m_l}{l}\right)^2 \sum d_y^2 + \left(\frac{m_{\alpha_{01}}}{\rho}\right)^2 R_{01}^2 + \left(\frac{m_{\alpha_{02}}}{\rho}\right)^2 R_{02}^2} \qquad (13-5)$$

m_{y_β}、m_{y_l}、m_{y_α}—测角、量边和洞口两端起始边方位角误差所引起的横向贯通误差；

m_β—地面导线的测角中误差，以秒计；

$\frac{m_l}{l}$—导线边长的相对中误差；

$\sum R_x^2$—各导线点至贯通面的垂直距离的平方和；

$\sum d_y^2$—各导线边在贯通面上投影长度平方的总和；

$m_{\alpha_{01}}$、$m_{\alpha_{02}}$—洞口两端起始边方位角误差；

R_{01}、R_{02}—洞口两端点至贯通面的垂直距离；

13.2.2 导线测量误差引起的横向贯通误差

13.2.2.2 洞内导线测量误差引起的横向贯通误差

$$m_{q下} = \pm\sqrt{m_{y_\beta下}^2 + m_{y_l下}^2}$$

$$= \pm\sqrt{\left(\frac{m_{\beta下}}{\rho}\right)^2 \sum R_{x下}^2 + \left(\frac{m_{l下}}{l}\right)^2 \sum d_{y下}^2} \qquad (13-6)$$

式中，各符号的含义同上。

13.2.2 导线测量误差引起的横向贯通误差

13.2.2.3 导线测量误差引起的横向贯通误差

由(13-5)式和(13-6)式可得：

$$m_q = \sqrt{m_{q上}^2 + m_{q下}^2} \qquad (13-7)$$

上式即为导线测量误差对横向贯通误差的影响值的近似公式。因为它是按支导线推导的，而实际工作中，总是要布设为环形或网形，通过平差，测角测边精度都会产生增益，故按上式进行横向贯通误差估算将偏于安全。

13.2.2 导线测量误差引起的横向贯通误差

13.2.2.3 导线测量误差引起的横向贯通误差

对于等边直伸的地下导线来说，导线的测角误差引起横向误差，而量边误差与横向误差无关。因地下导线一般为支导线，由测角引起的横向贯通误差可表示为：

$$m_{q下}=\sqrt{\frac{n^2s^2m_\beta^2}{\rho^2}\cdot\left(\frac{n+1.5}{3}\right)} \qquad (13-8)$$

式中：m_q 以米为单位，s 为导线边长(单位为米)，n 为导线的边数。

13.2.3 GPS网对贯通误差影响的估算方法

由GPS网的测量误差所引起隧道贯通误差，可以根据进、出口点及其定向点的坐标值及其协方差矩阵，由贯通点的设计坐标、贯通面的方位角等信息，编写一段专门计算贯通误差影响值的程序，在微机上进行。

13.2.3 GPS网对贯通误差影响的估算方法

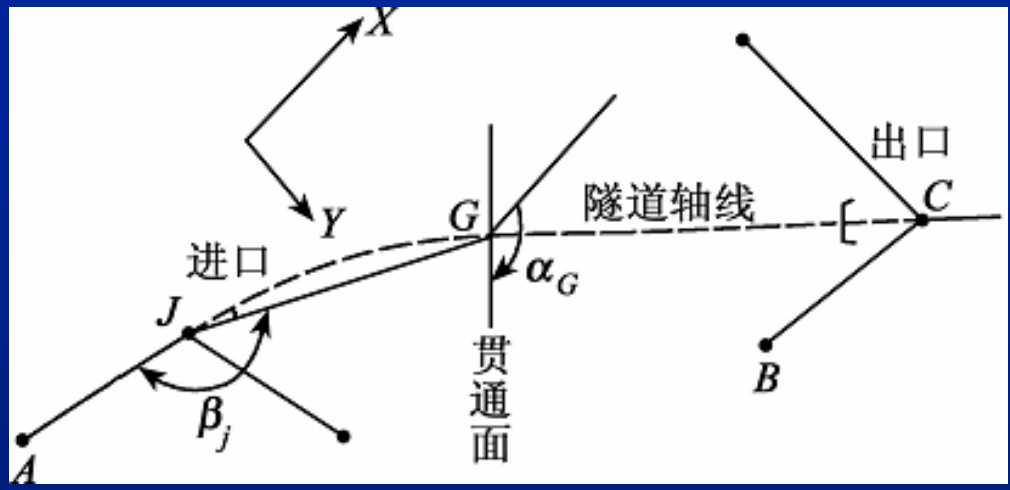


图13-3 GPS网贯通误差影响图

如图13-3所示，*J*、*C*为进出口点（不一定在中线上），*A*、*B*为定向点（可能有多个），*G* 为贯通点，在不考虑边长S_{JG}、S_{CG}和连结角和的误差的情况下，由进、出口推算出贯通点的坐标差 ΔX_G、ΔY_G的权函数式（见13-2式）

13.2.3 GPS网对贯通误差影响的估算方法

设未知数函数的线性化权函数式为：

$$dF(X)=f^{T}dX,dG(X)=g^{T}dX \qquad (13-9)$$

则由协因数传播律可得权函数的权倒数（协因数）和互协因数，即：

$$\frac{1}{P_F}=q_F=f^{T}Q_{xx}f,\frac{1}{P_{FG}}=f^{T}Q_{xx}g \qquad (13-10)$$

因此，由（13-2）式，可计算出 ΔX_G、ΔY_G 的协因数 $q_{\Delta x}$、$q_{\Delta y}$ 以及它们的互协因数 $q_{\Delta x}$，乘以GPS网的验后单位权方差，即可得到贯通点坐标差的方差和协方差，由它们可以计算贯通点的零点相对误差椭圆，该椭圆在贯通面上的投影即为GPS网的横向贯通误差影响值。

13.2.4 高程测量误差对高程贯通误差的影响

高程测量误差对高程贯通误差的影响，可按下式计算：

$$m_h = \pm m_\Delta \sqrt{L} \qquad (13-11)$$

式中：L —洞内外高程线路总长（以km计）；

m_h —每公里高差中数的偶然中误差，对于四等水准，$m_\Delta = \pm 5mm/km$ ，对于三等水准，$m_\Delta = \pm 3mm/km$。

需要指出，若采用光电测距三角高程测量时，L 取导线的长度。若洞内外测量精度不同时应分别计算。

13.3 地面和地下控制测量

地下工程的地面平面控制测量可根据地下工程的特点、范围、地形条件，采用精密导线、三角测量及GPS技术进行。高程控制测量可采用精密水准测量或光电测距三角高程测量进行。地下控制测量可采用导线测量、水准测量和三角高程测量。

13.3.1 地下工程地面控制测量

地下工程控制测量根据其工程范围（或长度）、工程类型、工程的施工方法可大致分为三类：一类是简单的小型地下工程（如较短的隧道、较小的且采用明挖法建造的地下商场、仓储等），该类型工程可不进行控制测量而直接测量（现场标定法）；另一类是大型的隧道工程，其控制测量从网型上看多呈直伸形，且有特殊要求；再一类是地下矿山工程、城市地铁工程，该类工程涉及范围大，因此控制网覆盖面积大，精度要求高。

13.3.1 地下工程地面控制测量

13.3.1.1 现场标定法

假设A、D两点为隧道中线在洞口处的已知点，由于不能通视，因此要在中间定出B、C两点，作为向洞内引线的依据。标定时可按设计图纸求得AD的概略方位角，然后在现场按此方向用经纬仪以正倒镜延长直线的方法，将中线从A点延长至B、C’，最后至D ’点，并量出DD’间的距离。另外用视距法求得AB’、B’C’、C’D’等距离，这时CC’的距离可用下式求得：

$$CC' = \frac{DD'}{AD'} \times AC' \qquad (13-14)$$

然后将经纬仪移到C，后视D点，再用上法延长直线至A，若直线不通过A点，再按上述方法计算在B点的偏距，并将仪器移至B点，依此方法，直至使B、C二点都在AD直线上为止。最后将B、C二点在地面上标定出来，作为向洞内引线的依据（后视点）

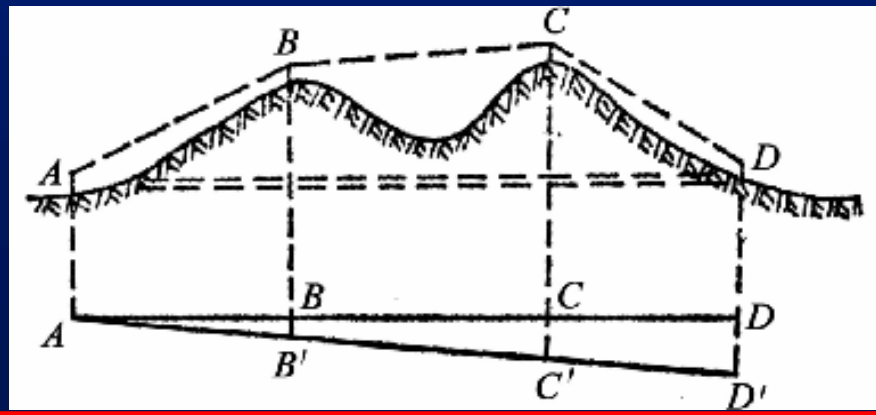


图13-4 现场标定法示意图

13.3.1 地下工程地面控制测量

现场标定法的优点在于可以不建立地面与地下的控制网，测量和计算工作比较简单。但其缺点也是很严重的。因为隧道都位于山岭地区，地面起伏大、障碍物多，不论是放样工作还是测量工作，采用这种方法都很困难，且不易达到较高的精度，这对于保证地下开挖面的正确贯通是非常不利的。因此，这种方法只适用于比较短的隧道。

13.3.1 地下工程地面控制测量

13.3.1.2 隧道地面控制网

隧道地面控制网多呈直伸形。为保证工程的贯通精度，应将隧道两洞口点，对于曲线隧道还应将两切线上的点ZD_1、ZY、ZD_3及ZD_4包括在控制网内（见图13-5）。可精确地测定两条切线的交角，从而精确地确定曲线元素。

控制网的布网方案有三角锁、导线、三角与导线联合布网、GPS网等形式。

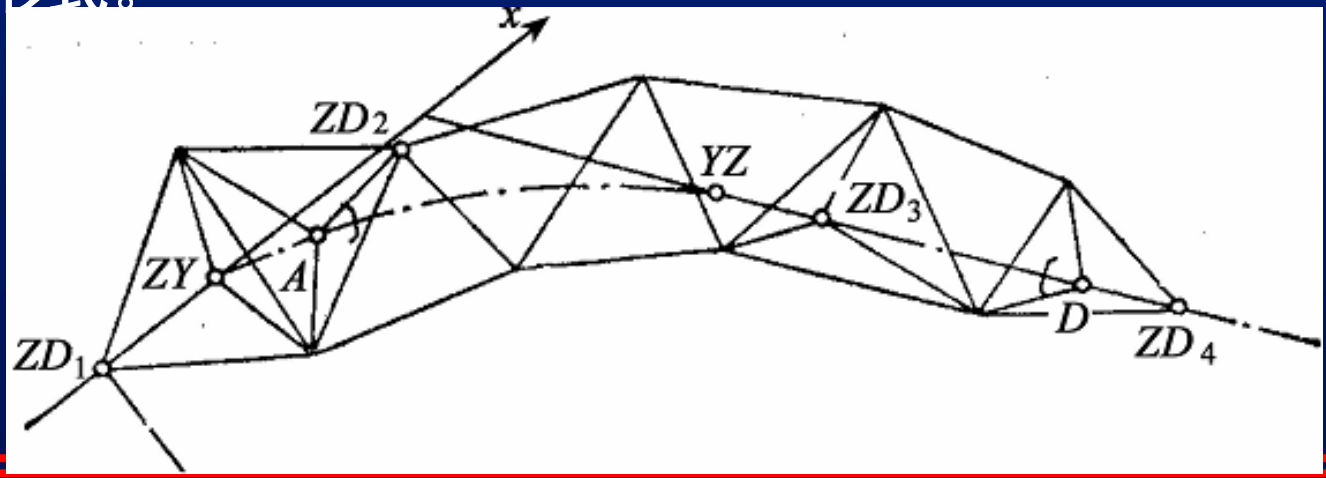


图13-5 隧道地面控制网示意图



13.3.1 地下工程地面控制测量

13.3.1.2 隧道地面控制网

1 三角锁的优点是图形结构坚强、布点少、推进快、精度高、多余观测数据较多，可以检查判断明显的粗差和系统误差，其缺点是测角工作量大，受图形传距角大小的限制以及基线丈量困难。但目前由于高精度光电测距仪的应用，测量边长已不再困难。所测边长根据其测距精度的高低，可作为基线使用也可当作观测值参与平差。

13.3.1 地下工程地面控制测量

13.3.1.2 隧道地面控制网

2 导线测量的优点是选点布网较自由、灵活，对地形的适应性较好。目前光电测距导线已成为隧道平面控制测量的主要布设方案。光电测距导线的布设形式可分为附合导线、闭合导线和直伸形多环导线锁等。



13.3.1 地下工程地面控制测量

13.3.1.2 隧道地面控制网

3 GPS全球定位系统的应用，导致测绘行业发生了一场深刻的技术革命。GPS控制测量在隧道施工控制测量中已得到广泛的应用，而且取得优于常规控制测量的结果。GPS网的布网原则同于常规的平面控制网。应在洞口处设点给出精确的进洞方向以指导隧道开挖，确保贯通质量。

13.3.1 地下工程地面控制测量

13.3.1.3 地下矿山工程平面控制网

由于地下矿山工程涉及范围较大，并且在其采矿区域内，地表由于采矿影响会产生塌陷的现象。因此在布设控制网时，除在工业广场内布设可相互通视的2至3个控制点外，还可在采矿范围之外布设几个控制点，以供日后使用。当两个井口相距较远，且需要进行贯通工程时，应在两个井口附近各设立一个控制点并尽量使其构成控制网中的一条边，以减小控制测量对贯通精度的影响。地下矿山工程平面控制网，常采用三角网、导线网或GPS网等形式建立。

13.3.1 地下工程地面控制测量

13.3.1.4 地下工程的高程控制测量

高程控制测量的任务是在各洞口（或井口）附近设立2—3个水准基点，以便于向洞内或井下传递高程之用。高程控制测量可采用等级水准测量、光电测距三角高程测量。一般在平坦地区采用等级水准测量，在丘陵及山区采用光电测距三角高程测量。

对于矿山工程来讲，水准基点的精度应达到国家四等高程控制点的要求。但对于一些大型隧道工程而言，其水准测量等级的确定，一方面应视隧道的长度而言，另一方面应视地形起伏情况而定。即要满足相应等级水准对两洞口间水准线路长度的要求。

13.3.1 地下工程地面控制测量

《铁路测量及技术规程》对各级水准测量的规定。

等级	两洞口间水准线路长度（km）	水准仪型号	标尺类型
二	>36	$S_{0.5}$ ，S_1	线条式因瓦水准尺
三	13-36	S1	线条式因瓦水准尺
		S3	区格式木质水准尺
四	5-13	S3	区格式木质水准尺

13.3.2 地下控制测量

地下控制测量包括地下平面控制测量和地下高程控制测量。地下平面控制测量由于受地下工程条件的限制，使得测量方法较为单一，只能敷设导线。地下高程控制测量方法有水准测量、三角高程测量。

13.3.2 地下控制测量

13.3.2.1 地下导线的特点和布设

地下导线测量的作用是以必要的精度，建立地下的控制系统。依据该控制系统可以放样出隧道（或坑道）中线及其衬砌的位置，从而指示隧道（或坑道）的掘进方向。

地下导线等级的确定，取决于地下工程的类型、范围及精度要求等。

13.3.2 地下控制测量

13.3.2.1 地下导线的特点和布设

与地面导线测量相比，地下工程中的地下导线测量具有以下特点：

(1)由于受坑道的限制，其形状通常形成延伸状。地下导线不能一次布设完成，而是随着坑道的开挖而逐渐向前延伸。

(2)导线点有时设于坑道顶板，需采用点下对中。

(3)随着坑道的开挖，先敷设边长较短、精度较低的施工导线，指示坑道的掘进。而后敷设高等级导线对低等级导线进行检查校正。

(4)地下工作环境较差，对导线测量干扰较大。

13.3.2 地下控制测量

13.3.2.1 地下导线的特点和布设

在布设地下导线时应注意以下事项：

(1)地下导线应尽量沿线路中线（或边线）布设，边长要接近等边，尽量避免长短边相接。导线点应尽量布设在施工干扰小、通视良好且稳固的安全地段。大断面的长隧道可布设成多边形闭合导线或主副导线环。有平行导坑时，单导线应与正洞导线联测，以资检核。

(2)在进行导线延伸测量时，应对以前的导线点作检核测量，在直线地段，只作角度检测，在曲线地段，还要同时作边长检核测量。

13.3.2 地下控制测量

13.3.2.1 地下导线的特点和布设

在布设地下导线时应注意以下事项：

(3)由于地下导线边长较短，因此进行角度观测时，应尽可能减小仪器对中和目标对中误差的影响。当导线边长小于15m时，在测回间仪器和目标应重新对中。

(4) 边长测量中，采用钢尺悬空丈量时，除加入尺长、温度改正外，还应加入垂曲改正。当采用电磁波测距仪时，应经常拭净镜头及反射棱镜上的水雾。当坑道内水汽或粉尘浓度较大时，应停止测距，避免造成测距精度下降。洞内有瓦斯时，应采用防爆测距仪。为保证测距精度，边长很短时应采用钢尺量边。在矿山的重要贯通工程中，还应对导线边长加入归化到投影水准面和投影到高斯-克吕格投影面的改正。

13.3.2 地下控制测量

13.3.2.1 地下导线的特点和布设

在布设地下导线时应注意以下事项：

(5) 凡是构成闭合图形的导线网，都应进行平差计算，以便求出导线点的新坐标值。

(6) 对于螺旋形隧道，不能形成长边导线，每次向前引伸时，都应从洞外复测。复测精度应一致，在证明导线点无明显位移时，取点位的均值。

13.3.2 地下控制测量

13.3.2.2 地下导线测量的精度设计

地下工程的平面误差包括了地面平面控制测量误差、联系测量误差（有些工程无此项误差 ）以及地下导线测量误差。设地下工程的极限误差为Δ，则地面控制测量所允许的测量误差为：

$$m_{上} = \pm\frac{\Delta}{\sqrt{5}} = \pm 0.45\Delta \qquad (13\text{-}15)$$

没有进行联系测量工作的地下工程，地面控制测量所允许的测量误差为：

$$m_{上} = \pm\frac{\Delta}{\sqrt{3}} = \pm 0.58\Delta \qquad (13\text{-}16)$$



13.3.2 地下控制测量

13.3.2.2 地下导线测量的精度设计

导线端点的横向误差为

$$m_u^2 = \frac{n^2 s^2 m_\beta^2}{\rho^2} \times \frac{n+1.5}{3} \qquad (13\text{-}17)$$

地下直伸导线的边长误差只对隧道的纵向贯通误差产生影响，当隧道两开挖洞口间长度大于4km，且洞内具有长边通视条件时，采用在基本导线基础上在成洞部分用长边组成主要导线的方法，主要导线的边长精度与基本导线的边长精度相等，用公式表示为：

$$M_s = \pm\mu\sqrt{s \cdot n} \qquad (13-19)$$

式中，MS为主要导线的边长中误差，μ为边长丈量偶然误差系数,S为基本导线的平均边长。

13.3.2 地下控制测量

13.3.2.3 地下高程控制测量

地下高程控制测量的任务是，测定地下坑道中各高程点的高程，建立一个与地面统一的地下高程控制系统，作为地下工程在竖直面内施工放样的依据。解决各种地下工程在竖直面内的几何问题。

地下高程控制测量可分为：地下水准测量和地下三角高程测量。

13.3.2 地下控制测量

13.3.2.3 地下高程控制测量

地下高程控制测量的特点：

(1) 高程测量线路一般与地下导线测量的线路相同。在坑道贯通之前，高程测量线路均为支线，因此需要往返观测及多次观测进行检核。

(2) 通常利用地下导线点作为高程点。高程点可埋设在顶板、底板或边墙上。

(3) 在施工过程中，为满足施工放样的需要，一般是低等级高程测量给出坑道在竖直面内的掘进方向，然后再进行高等级的高程测量进行检测。每组永久高程点应设置三个，永久高程点的间距一般以300—500m为宜。

13.4 联系测量

在地下工程中，可使用平峒、斜井及竖井进行地下的开挖工作。为保证地下工程沿设计方向掘进，应通过平峒、斜井及竖井将地面的平面坐标系统及高程系统传递到地下。该项工作称为联系测量。通过平峒、斜井的联系测量可由导线测量、水准测量、三角高程测量完成。本节只讲述竖井联系测量工作。竖井联系测量工作分为平面联系测量和高程联系测量。

平面联系测量又分为几何定向（包括一井定向和两井定向）和陀螺定向。

13.4.1 一井定向

一井定向测量工作可分为投点（在井筒中下放钢丝）和连接测量工作。

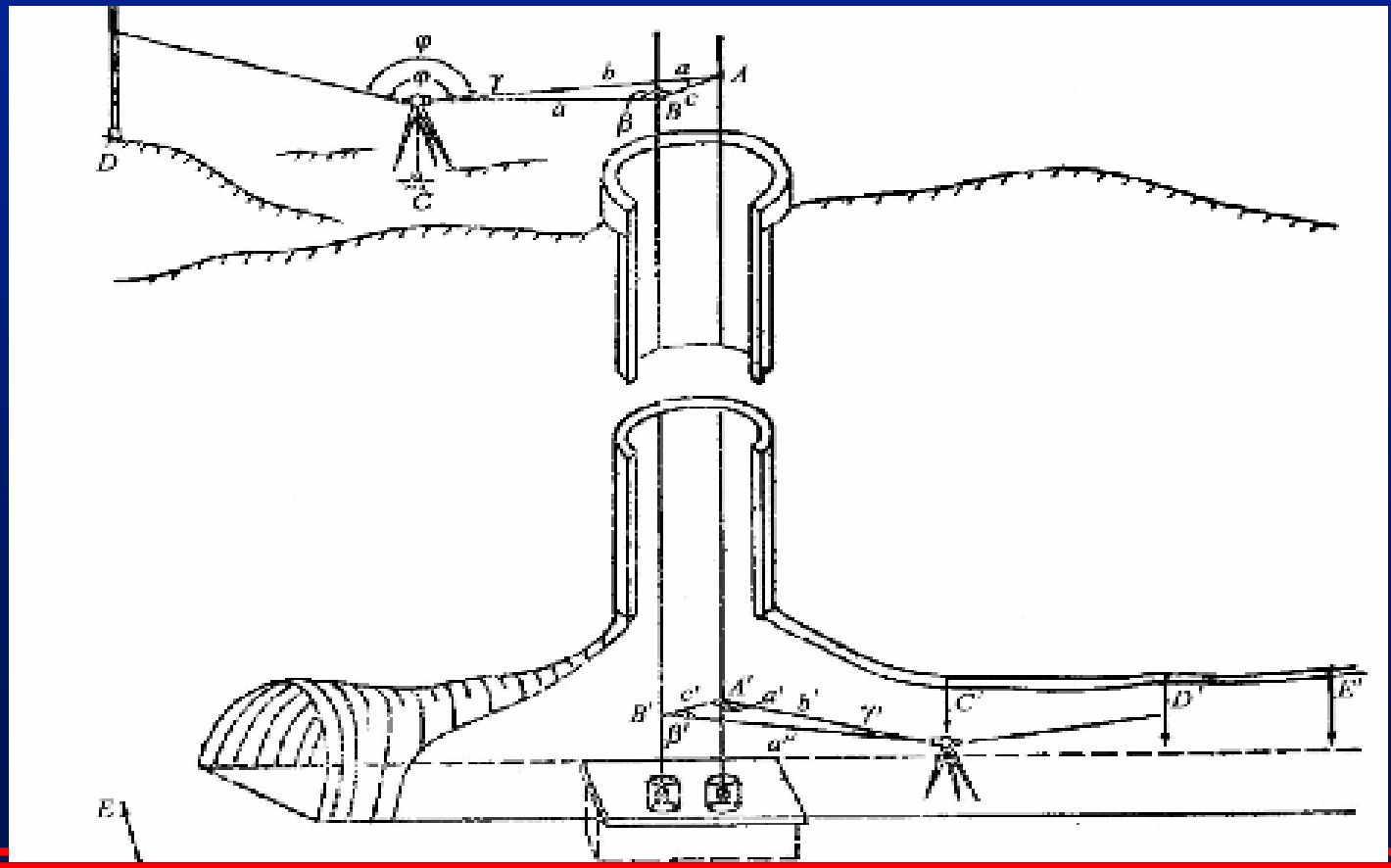


图13-6　一井定向示意图

13.4.1 一井定向

连接测量时，常采用连接三角形法（见图13-7）。C与C′称为井上下的连接点，A、B点为两垂球线点，从而在井上下形成了以AB为公用边的三角形ABC和ABC′。在选择井上下连接点C和C′时应满足下列要求：

(1)CD和的长度应尽量大于20m；

(2)应使C和C′点处的锐角γ及γ小于2^0，构成最有利的延伸三角形；

(3)点C和C′应适当地靠近最近的垂球线，使a/c和b'/c之值尽量小一些。

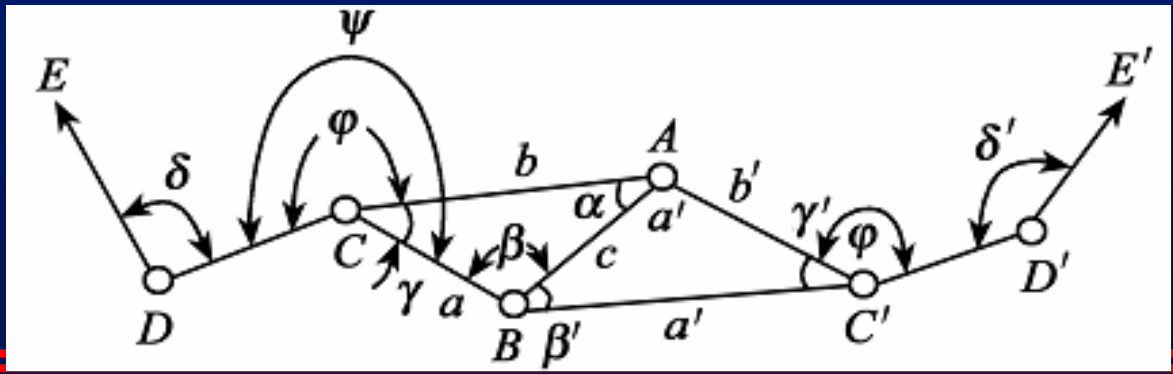


图13-7 连接三角形法示意图

13.4.1 一井定向

13.4.1.2 一井定向误差分析

由图13-7可知：$\alpha_{c'd'} = \alpha_{dc} + \phi - \alpha + \beta' + \phi' \pm 4\times 180^0$

由此可得：$m^2_{\alpha_{c'd'}} = m^2_{\alpha_{cd}} + m^2_{\phi} + m^2_{\alpha} + m^2_{\beta'} + m^2_{\phi'} + \theta^2$

在点C处的连接角的误差，对连接精度的影响可按下式计算：

$$m_{\varphi} = \pm\sqrt{m_i^2 + \left(\frac{e_T}{\sqrt{2}d}\right)^2 \rho^2 + \left(\frac{e_D}{\sqrt{2}d}\right)\rho^2} \qquad (13-29)$$

式中 m_i---测量方法误差；

d ---连接边CD的边长；

e_T 、e_D---经纬仪在连接点C、D上对中的线量误差。

由此可知，欲减少测量连接角的误差影响，主要应使连接边d尽可能长些，并提高仪器的对中精度。上述公式对估算井下连接测量的误差也同样适用。

13.4.2 两井定向

13.4.2.1 投点、连接测量及内业计算

由地面控制点布设导线测定两垂球线A、B的坐标，在地下定向水平用导线将A、B两垂球线连接起来。

原坐标系下：

$$\alpha_{AB} = \arctan\frac{y_B - y_A}{x_B - x_A}$$

$$c_{AB} = \sqrt{\Delta x_{AB}^2 + \Delta y_{AB}^2}$$

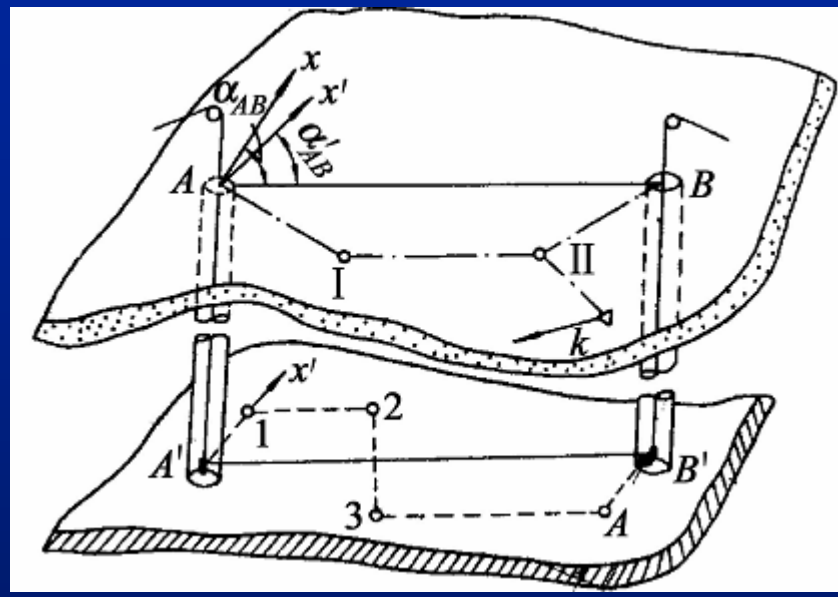


图13-8 两井定向示意图

13.4.2 两井定向

13.4.2.1 投点、连接测量及内业计算

假设A为假定坐标系的原点，A1边为假定纵轴x′轴方向：

$$\alpha'_{AB} = \arctan\frac{y'_B}{x'_B}$$

$$c'_{AB} = \sqrt{(x'_b)^2 + (y'_B)^2}$$

$$\Delta c = c_{AB} - \left(c'_{AB} + \frac{H}{R}c\right)$$

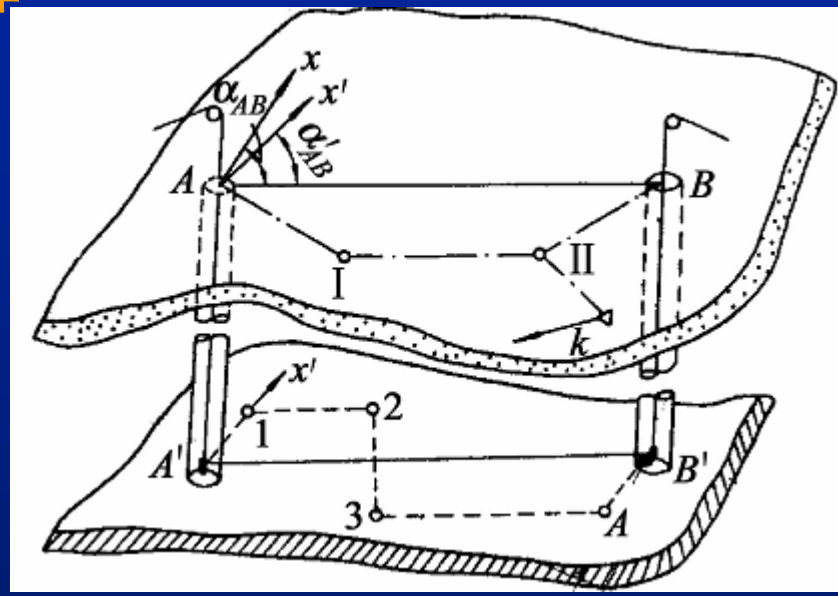


图13-8 两井定向示意图

式中H为竖井深度；R为地球的平均曲率半径。则：$\alpha_{A1} = \alpha_{AB} - \alpha'_{AB}$

由于测量误差的影响，地下求出的B点坐标与地面测出的B点坐标存有差值。如果其相对闭合差符合测量所要求的精度时，可将坐标增量闭合差按边长成比例反号分配给地下导线各坐标增量上。最后计算出地下各点的坐标。

13.4.2 两井定向

13.4.2.2 两井定向的误差分析

两井定向起始边的方位角误差来源于投点误差θ（计算公式同于一井定向）、地面连接误差及地下连接误差。为研究方便，假定AB连线为y轴，垂直于AB的方向为x轴。

地面连接误差为：

$$m_{上}=\pm\sqrt{\frac{\rho^2}{c^2}(m_{x_A}^2+m_{x_B}^2)+nm_{\beta}^2} \qquad (13-34)$$

地下连接误差主要由测角误差和量边误差综合引起

$$m_{下}^2=\sum_1^n\left(\frac{\partial\alpha}{\partial\beta_i}\right)^2 m_{\beta_i}^2+\sum_1^n\left(\frac{\partial\alpha}{\partial l_i}\right)^2\rho^2 m_{l_i}^2 \qquad (13-35)$$

地下连接导线角度测量误差对各边方位角误差的影响是不相同的，边长测量误差对各边方位角误差的影响是相同的。因此造成两井定向地下连接导线各边的方位角中误差不同，靠近导线中部的边长方位角中误差较小。

13.4.3 高程联系测量

为使地面与地下建立统一的高程系统，应通过斜井、平峒或竖井将地面高程传递到地下巷道中，该测量工作称为高程联系测量（也称为导入高程）。通过斜井、平峒的高程联系测量，可从地面用水准测量和三角高程测量方法直接导入，这里不再赘述。下面仅讨论通过竖井导入高程的方法。通过竖井导入高程的常用方法有，长钢尺法、长钢丝法、光电测距仪铅直测距法等。

13.4.3 高程联系测量

13.4.3.1 长钢尺法导入高程

如图13-9所示，将经过检定的钢尺挂上重锤（其重量应等于钢尺检定时的拉力），自由悬垂在井中。分别在地面与井下安置水准仪，首先在A、B点水准尺上读取读数a、b。然后在钢尺上读取读数m、n（注意，为防止钢丝上下弹动产生读数误差，地面与地下应同时在钢尺上读数）。同时应测定地面、地下的温度和。由此可求得B点高程：

$$H_B = H_A - \left[(m-n)+(b-a)+\sum \Delta l\right] \qquad (13-39)$$

式中：$\sum \Delta l$ 为钢尺改正数总和。

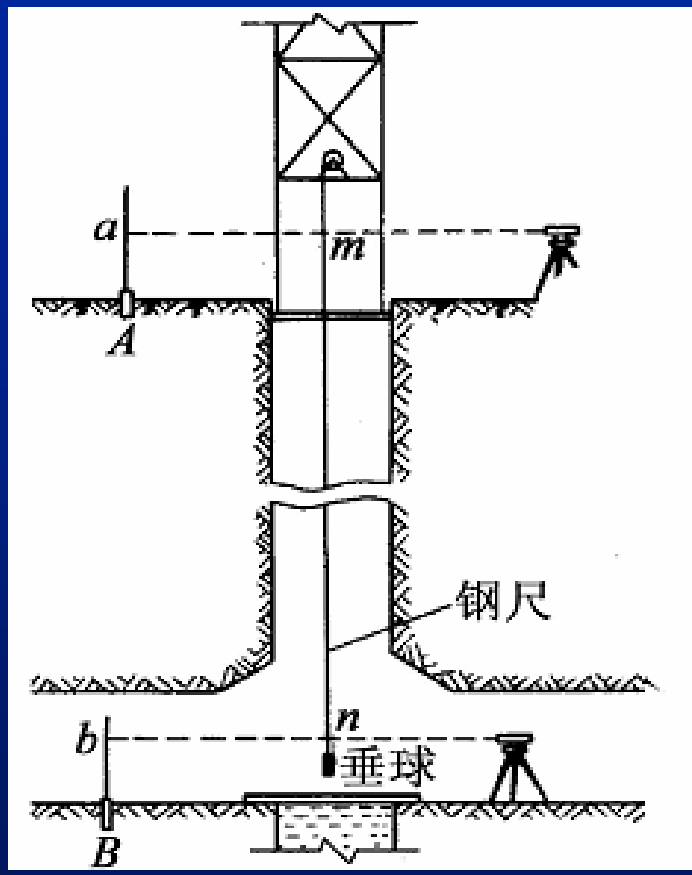


图13-9 导入高程示意图

13.4.3 高程联系测量

13.4.3.2 钢丝法导入标高

用长钢丝导入高程，一般随几何定向一起进行。长钢丝导入高程的过程基本同于长钢尺法。但长钢丝无尺寸标记，因此在地面以及地下观测钢丝时，需要在钢丝上作出记号，然后在地面选一平坦区域，加悬挂时的重量将钢丝拉开，用钢尺或光电测距仪丈量两记号间的长度。

13.4.3 高程联系测量

13.4.3.3 光电测距仪导入高程

当井筒内水蒸汽较小时，可采用光电测距仪导入高程。导入高程时，可将罐笼提升至井口后固定（可用木楔），在其中固定一平台C，将光电测距仪直接竖直安放在平台上。另将反光镜平放在井底平台D上，用光电测距仪直接瞄准反光镜（为便于瞄准可将一光源放置在反光镜上）测距s。并用水准仪在井上下测出AC、BD点之间的高差h_{AC}及h_{BD}，同时测定井上下的温度及气压。则A、B两点间高差可按下式计算：

$$h_{AB} = s - h_{AC} + h_{BD} - l + \Delta l$$

式中：l —光电测距仪镜头到仪器中心的长度；

Δl —气象改正（温度和气压应取井上下平均值）。

13.5 陀螺经纬仪及定向测量

13.5.1 陀螺仪的基本特性

陀螺经纬仪是一种将陀螺仪和经纬仪结合在一起的仪器。它利用陀螺仪本身的物理特性及地球自转的影响，实现自动寻找真北方向从而测定地面和地下工程中任意测站的大地方位角。

在没有任何外力作用，并具有三个自由度的陀螺仪称为自由陀螺仪。自由陀螺仪在高速旋转时具有两个重要特性：

(1) 陀螺仪自转轴在无外力矩作用时，始终指向其初始恒定方向。该特性称为定轴性。

(2) 陀螺仪自转轴受到外力矩作用时，将按一定的规律产生进动。该特性称为进动性。

13.5.2 陀螺经纬仪的基本结构

陀螺经纬仪是由陀螺仪、经纬仪、陀螺电源三部分组成。

1 悬挂式陀螺仪由以下几部分组成：

（1）灵敏部：包括悬挂带、导流丝、陀螺马达、陀螺房以及反光镜等。

（2）光学观测系统（用来观测和跟踪灵敏部的摆动）。

（3）锁紧限幅机构（用于陀螺灵敏部的锁紧和限幅）。

（4）陀螺仪外壳（用于防止外部磁场的干扰）。

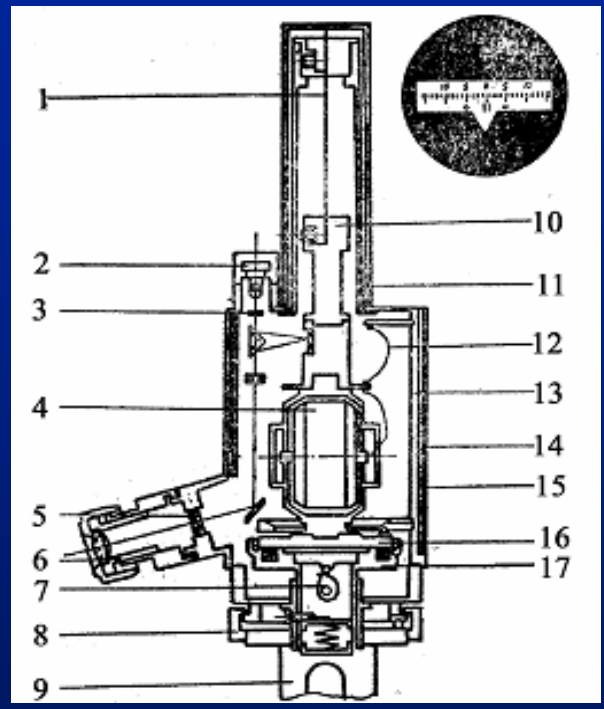


图13-10 陀螺仪基本结构图

2 经纬仪则比普通经纬仪增加了一个定位连接装置。

3 陀螺电源由蓄电池组、充电器、逆变器等组成。

13.5.3 陀螺经纬仪的定向测量方法

13.5.3.1 陀螺经纬仪定向的作业过程

在地面已知边上测定仪器常数

在待定边上测定陀螺方位角

在地面上重新测定仪器常数

求算子午线收敛角

求算待定边的坐标方位角

13.5.3 陀螺经纬仪的定向测量方法

13.5.3.2 一次测定陀螺方位角的作业过程

1 在测站上整平对中陀螺经纬仪，以一个测回测定待定边或已知边的方向值，然后将仪器大致对正北方。

2 粗略定向锁紧灵敏部，启动陀螺马达，待达到额定转速后，下放陀螺灵敏部，用粗略定向的方法测定近似北方向。完毕后制动陀螺并托起锁紧，将望远镜视准轴转到近似北方向位置，固定照准部。

3 测前悬带零位观测打开陀螺照明，下放陀螺灵敏部。进行测前悬带零位观测。同时用秒表记录自摆周期T。零位观测完毕，托起并锁紧灵敏部。

13.5.3 陀螺经纬仪的定向测量方法

13.5.3.2 一次测定陀螺方位角的作业过程

4 精密定向（精密测定陀螺北）：采用有扭观测方法（如逆转点法等）或无扭观测方法（如中天法、时差法、摆幅法等）精密测定已知边或待定边的陀螺方位角。

5 测后悬带零位观测。

6 以一个测回测定待定边或已知边的方向值，测前测后两次观测的方向值的互差对J2和J6级经纬仪分别不得超过10″和25″。取测前测后观测值的平均值作为测线方向值。

13.5.4 全自动陀螺经纬仪

光学陀螺经纬仪为了精确测定真北方向，一般采用逆转点法或中天法进行。而人工观测，对观测员的操作技术要求较高，并且存在效率低、劳动强度大、易出错等缺陷。随着科学技术的发展，上个世纪八十年代以来，世界上开始研制并使用全自动的陀螺经纬仪。

13.5.4 全自动陀螺经纬仪

下面是自动陀螺经纬仪的主要技术指标：

型 号		Gyromat2000			AGP1		
定向精度(1σ)		方式1	方式2	方式3	方式1	方式2	方式3
		3.2″	32.4″	16.2″	6″	32″	16″
测量时间		约10分	约2分	约5分	约10分	约2分	约4分
使用环境	温度	-20℃~+50℃					
	相对湿度	≤85％					
	温度梯度	≤5℃					
仪器重量		18.5kg			10.4kg		

13.5.4 全自动陀螺经纬仪

目前，自动化陀螺经纬仪的主要产品有德国威斯特发伦采矿联合公司（WBK）的Gyromat 2000和日本索佳公司（SOKKIA）的AGP1等（如图13-11）。



图13-11 自动化陀螺经纬仪

13.5.4 全自动陀螺经纬仪

以Gyromat2000为例，介绍陀螺自动定向的基本原理。

Gyromat2000陀螺经纬仪的自动定向主要是依靠步进测量（概略寻北）和自动积分测量系统实现。步进测量的目的是减小陀螺在静态摆动下的摆幅，使摆动的信号处于光电检测元件的感光区内，同时在陀螺启动状态下也使摆动平衡位置最终接近于北。

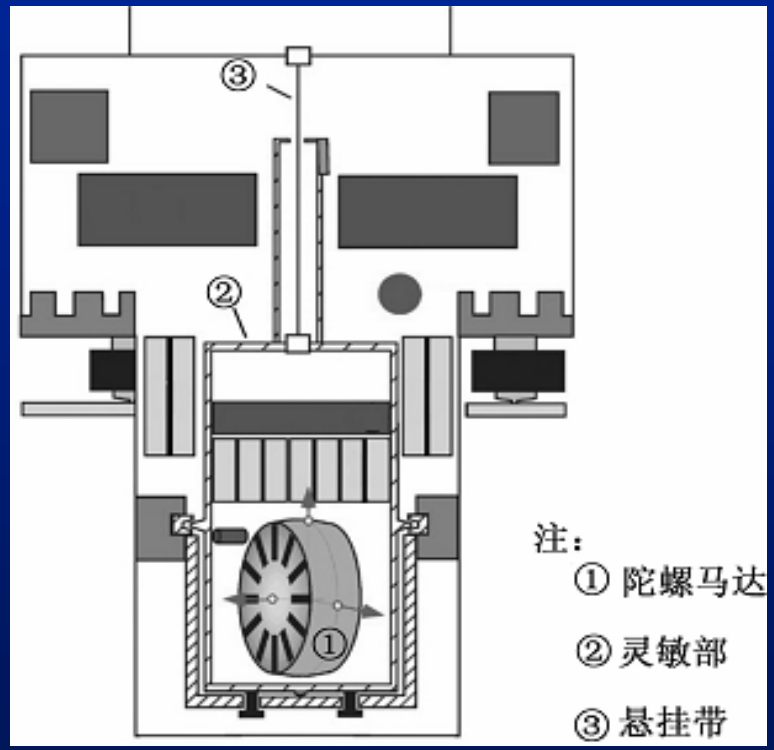


图13-12 陀螺仪悬挂结构示意图

13.5.4 全自动陀螺经纬仪

如图13-13所示，摆式陀螺仪的摆动平衡位置R和真北方向N，以及悬带扭力零位O之间存在着一个确定关系。假如开始定向观测时，照准部偏离真北α_N角时，由于悬挂带反力矩的作用，使摆动平衡位置处于照准部零位（参考反射镜法线）与真北N之间，即R方向。

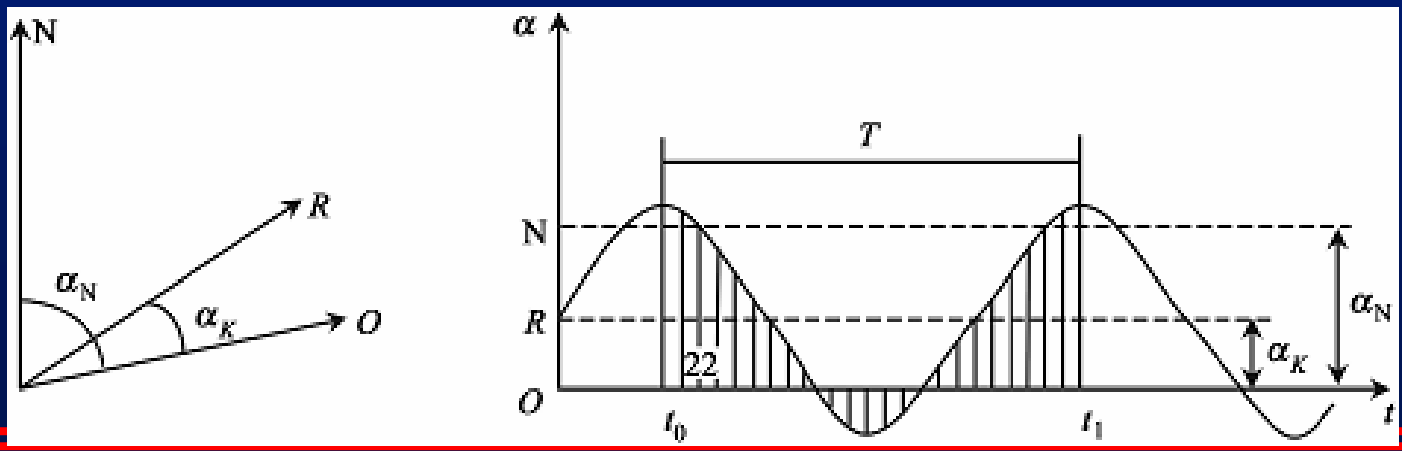


图13-13 积分测量原理示意图

13.5.4 全自动陀螺经纬仪

也就是说，陀螺摆动的平衡位置是在悬带弹性扭力矩和陀螺指北力矩的共同作用下产生的，此时可得到一个力矩平衡方程为：

$$\alpha_K D_B = (\alpha_N - \alpha_K) D_K \qquad (13-59)$$

式中：α_K——悬带扭力零位与陀螺平衡位置之间的夹角

α_N——悬带扭力零位与真北之间的夹角

D_B——悬带扭力矩系数；

D_K——陀螺指北力矩系数

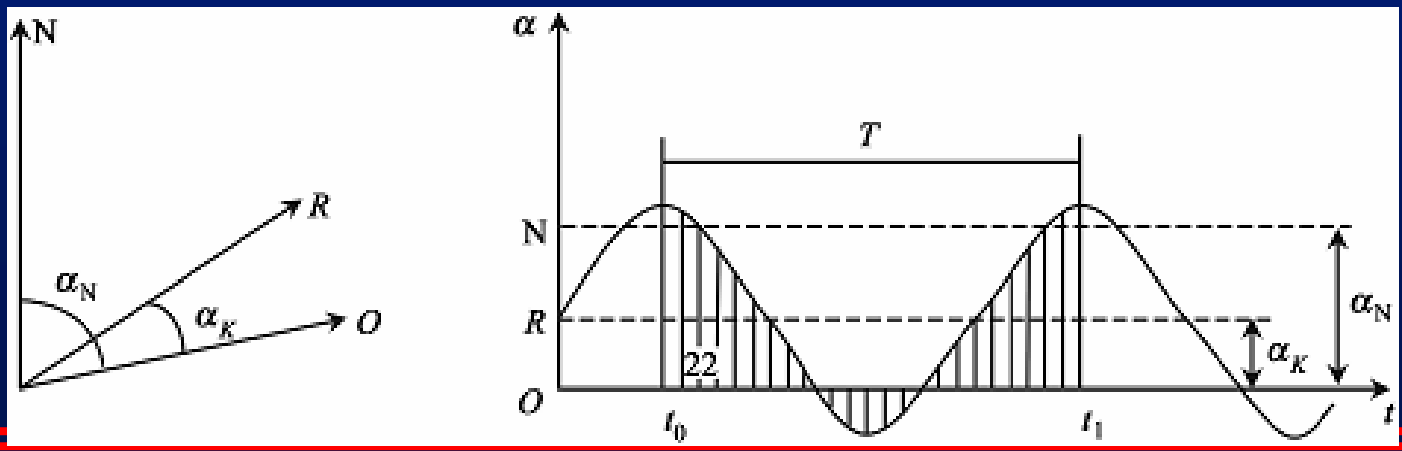


图13-13 积分测量原理示意图

13.6 隧道施工与竣工测量

隧道施工测量时的主要任务为：在隧道施工过程中确定平面及竖直面内的掘进方向，另外还要定期检查工程进度(进尺)及计算完成的土石方数。在隧道竣工后，还要进行竣工测量。

13.6.1 隧道掘进时的测量工作

13.6.1.1 隧道平面掘进方向的标定

隧道的掘进施工方法有全断面开挖法和开挖导坑法，根据施工方法和施工程序的不同，确定隧道掘进方向的方法有中线法和串线法。

13.6.1 隧道掘进时的测量工作

13.6.1.1 隧道平面掘进方向的标定

当隧道采用全断面开挖法进行施工时，通常采用中线法。在图13-14中，P_1、P_2为导线点，A为隧道中线点，根据已知数据，即可计算出放样中线点所需的有关数据，将经纬仪安置在导线点P_2上，用盘左后视导线点P_1，拨角度β_2，并在视线方向上丈量距离L，即得中线点A_1。然后盘右用同法可得A_2，取A_1A_2的分中点得到A点。

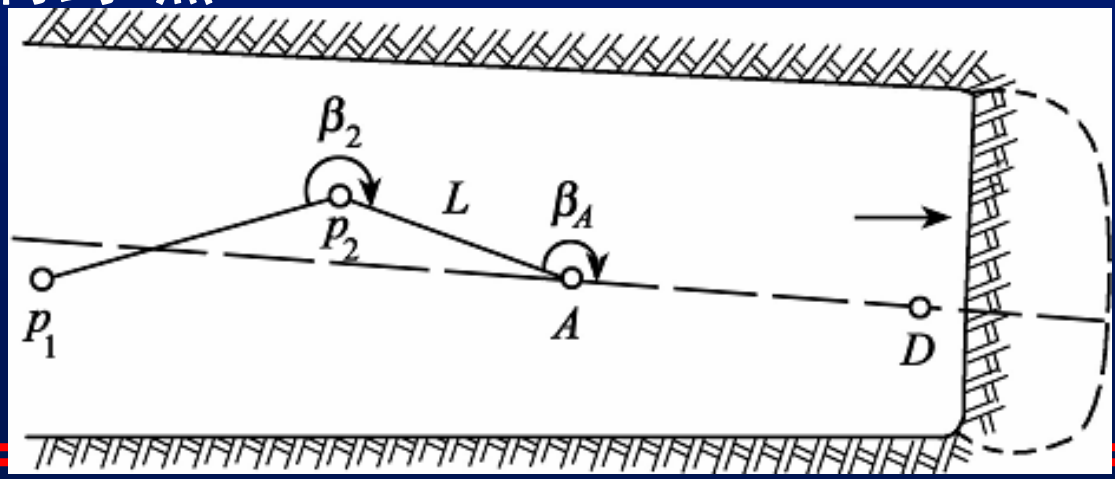


图13-14 中线标定示意图

13.6.1 隧道掘进时的测量工作

13.6.1.1 隧道平面掘进方向的标定

在A点上埋设与导线点相同的标志。用经纬仪重新测定出A点的坐标。标定开挖方向时将仪器安置于A点，后视导线点P2，拨角β1，即得中线方向。随着开挖面向前推进，A点距开挖面越来越远，这时需要将中线点向前延伸，埋设新的中线点。

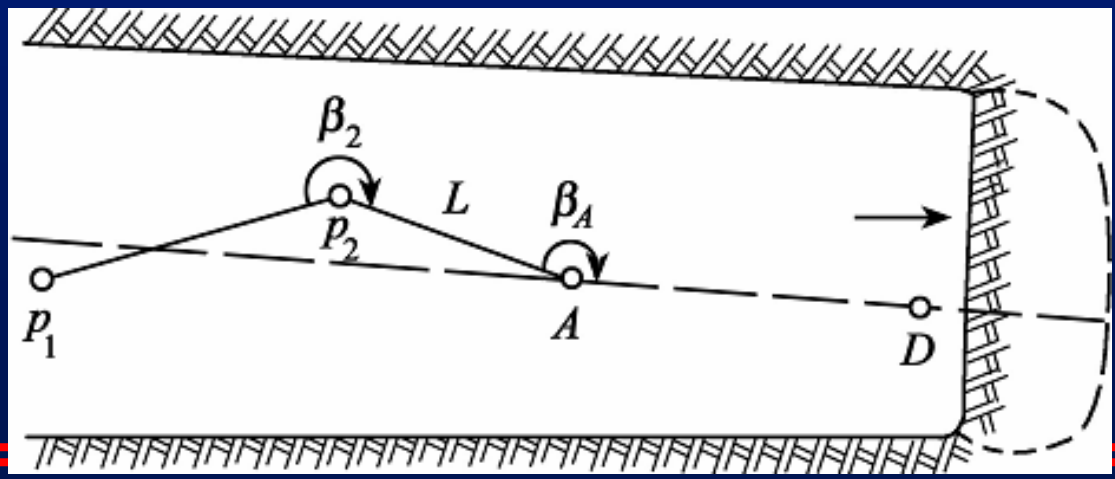


图13-14 中线标定示意图

13.6.1 隧道掘进时的测量工作

当隧道采用开挖导坑法施工时，因其精度要求不高，可用串线法指示开挖方向。此法是利用悬挂在两临时中线点上的垂球线，直接用肉眼来标定开挖方向。使用这种方法时，首先需用类似前述设置中线点的方法，设置三个临时中线点(设置在导坑顶板或底板上)，两临时中线点的间距不宜小于5m。标定开挖方向时，在三点上悬挂垂球线，一人在B点指挥另一人在工作面持手电筒(可看成照准标志)使其灯光位于中线点B、C、D的延长线上，然后用红油漆标出灯光位置，即得中线位置。另外还可采用罗盘法标定中线。

13.6.1 隧道掘进时的测量工作

随着开挖面的不断向前推进，中线点也应随之向前延伸，地下导线也紧跟着向前敷设，为保证开挖方向的正确，必须随时根据导线点来检查中线点，随时纠正开挖方向。对于曲线隧道掘进时，其永久中线点是随导线测量而测设的。而供衬砌时使用的临时中线点则是根据永久中线点加密的，一般采用偏角法（适用于钢尺量边时）或极坐标法（适用于光电测距仪测距时）测设。

13.6.1 隧道掘进时的测量工作

13.6.1.2 隧道竖直面掘进方向的标定

在隧道开挖过程中，除标定隧道在水平面内的掘进方向外，还应定出坡度，以保证隧道在竖直面内贯通精度。通常采用腰线法。隧道腰线是用来指示隧道在竖直面内掘进方向的一条基准线，通常标设在隧道帮上，离开隧道底板一定距离（该距离可随意确定）。

13.6.1 隧道掘进时的测量工作

在图13-15中，A点为已知的水准点，C、D为待标定的腰线点。标定腰线点时，首先在适当的位置安置水准仪，后视水准点A，依此可计算出仪器视线的高程。根据隧道坡度i以及C、D点的里程计算出两点的高程，并求出C、D点与仪器视线间的高差Δh1、Δh2。由仪器视线向上或向下量取Δh1、Δh2即可求得C、D点的位置。

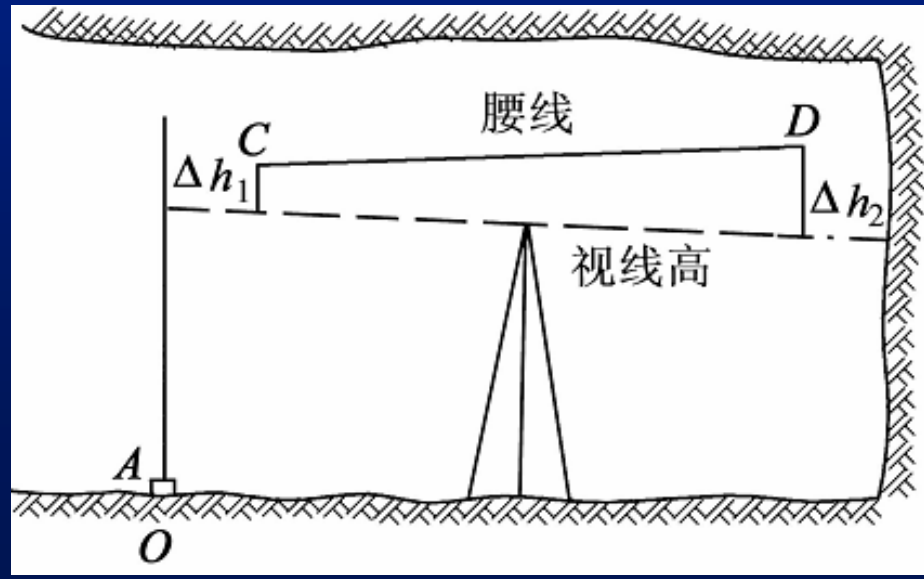


图13-15 腰线标定示意图

13.6.2 隧道竣工测量

隧道竣工后，为检查主要结构及线路位置是否符合设计要求，应进行竣工测量。该项工作包括，隧道净空断面测量、永久中线点及水准点的测设。

13.6.2 隧道竣工测量

隧道净空断面测量时，应在直线地段每50m、曲线地段每20m或需要加测断面处测绘隧道的实际净空。

测量时均以线路中线为准，包括测量隧道的拱顶高程、起拱线宽度、轨顶水平宽度、铺底或抑拱高程(见图13-16)。近年来许多施工单位已开始应用便携式断面仪进行隧道的净空断面测量，该种仪器可进行自动扫描、跟踪和测量，并可立即显示面积、高度和宽度等测量结果，测量速度快、精度高。

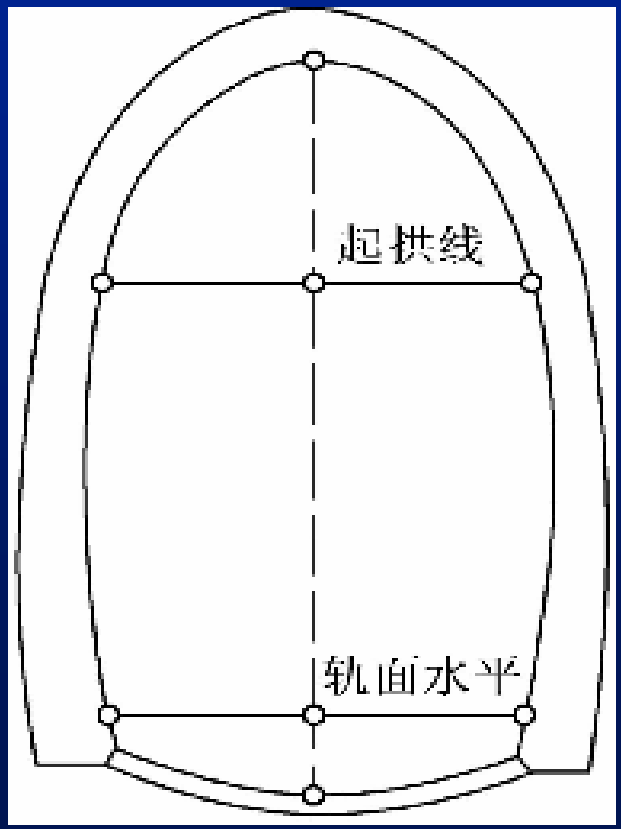


图13-16 隧道净空断面图

谢 谢 大 家！