

第十四章 隧道测量

第十四章 隧道测量.....	1
§14-1 隧道洞外控制测量.....	2
一、中线法.....	2
二、精密导线法.....	3
三、三角测量.....	3
四、三角锁和导线联合控制.....	4
五、GPS 测量.....	4
六、高程控制测量.....	5
§14-2 隧道洞外、洞内联系测量.....	6
一、进洞关系的计算和进洞测量.....	6
二、由洞外向洞内传递方向和坐标.....	9
三、由洞外向洞内传递高程.....	9
§14-3 隧道洞内控制测量.....	10
一、平面控制测量.....	10
二、洞内高程测量.....	12
§14-4 隧道洞内中线测量.....	12
一、洞内中线测量.....	12
二、洞内临时中线的测设.....	13
§14-5 隧道施工测量.....	14
一、导坑延伸测量.....	14
二、上下导坑的联测.....	15
三、隧道结构物的施工放样.....	15
四、竣工测量.....	15
§14-6 隧道贯通误差预计.....	16
一、贯通误差概述.....	16
二、贯通误差预计.....	16

隧道测量的主要任务：在勘测设计阶段是提供选址地形图和地质填图所需的测绘资料，以及定测时将隧道线路测设在地面上，即在洞门前后标定线路中线控制桩及洞身顶部地面上的中线桩；在施工阶段是保证隧道相向开挖时，能按规定的精度正确贯通，并使建筑物的位置符合规定，不侵入建筑限界，以确保运营安全。

勘测设计阶段的测量工作比较简单，前面已作过介绍，本章主要介绍隧道施工测量。

§14—1 隧道洞外控制测量

隧道的设计位置，一般在定测时已初步标定在地表面上。在施工之前先进行复测，检查并确认各洞口的中线控制桩，当隧道位于直线上时，两端洞口应各确定一个中线控制桩，以两桩连线作为隧道洞内的中线；当隧道位于曲线上时，应在两端洞口的切线上各确认两个控制桩，两桩间距应大于 200m。以控制桩所形成的两条切线的交角和曲线要素为准，来测定洞内中线的位置。由于定测时测定的转向角、曲线要素的精度及直线控制桩方向的精度较低，满足不了隧道贯通精度的要求，所以施工之前要进行洞外控制测量。洞外控制测量的作用，是在隧道各开挖口之间建立一精密的控制网，以便根据它进行隧道的洞内控制测量或中线测量，保证隧道的准确贯通。

洞外控制测量包括平面控制测量和高程控制测量。

洞外平面控制测量常用的方法有：中线法、精密导线法、三角测量、三边测量、边角测量或综合使用，此外还可以采用 GPS 测量。

一、中线法

所谓中线法，就是将隧道线路中线的平面位置，按定测的方法先测设在地表面上，经反复核对无误后，才能把地表控制点确定下来，施工时就以这些控制点为准，将中线引入洞内。

一般在直线隧道短于 1000m，曲线隧道短于 500m 时，可以采用中线作为控制。



图 14—1

如图 14—1 所示，A、C、D、B 作为在 A、B 之间修建隧道定测时所定中线上的直线转点。由于定测精度较低，在施工之前要进行复测，其方法为：以 A、B 作为隧道方向控制点，将经纬仪安置在 C' 点上，后视 A 点，正倒镜分中定出 D' 点；在置镜 D' 点，正倒镜分中定出 B' 点。若 B' 与 B 不重合，可量出 B'B 的距离，则

$$D'D = \frac{AD'}{AB'} \cdot B'B$$

自 D' 点沿垂直于线路中线方向量出 D'D 定出 D 点，同法也可定出 C 点。然后再将经纬仪分别安在 C、D 点上复核，证明该两点位于直线 AB 的连线上时，即可将它们固定下来，作为中线进洞的方向。

若用于曲线隧道，则应首先精确标出两切线方向，然后精确测出转向角，将切线长度正确地标定在地表面上，以切线上的控制点为准，将中线引入洞内。

中线法简单、直观，但其精度不太高。

二、精密导线法

导线法比较灵活、方便，对地形的适应性比较大。目前在光电测距仪已经普及和其精度不断提高的情况下，有条件的单位，导线法应当是隧道洞外控制形式的首选方案。

精密导线应组成多边形闭合环。它可以是独立闭合导线，也可以与国家三角点相连。导线水平角的观测，应以总测回数的奇数测回和偶数测回，分别观测导线前进方向的左角和右角，以检查测角错误；将它们换算为左角或右角后再取平均值，可以提高测角精度。为了增加检核条件和提高测角精度评定的可行性，导线环的个数不宜太少，最少不应少于4个；每个环的边数不宜太多，一般以4~6条边为宜。

在进行导线边长丈量时，应尽量接近于测距仪的最佳测程，且边长不应短于300m；导线尽量以直伸形式布设，减少转折角的个数，以减弱边长误差和测角误差对隧道横向贯通误差的影响。我国大瑶山隧道长14.3km，洞外控制采用导线网，取得了很好的效果。

导线的测角中误差按下式计算，并应满足测量设计的精度要求。

$$m_{\beta} = \pm \sqrt{\frac{[f_{\beta}/n]^2}{N}} \quad (14-1)$$

式中 f_{β} ——导线环的角度闭合差（″）；

n ——一个导线环内角的个数；

N ——导线环的个数。

导线环（网）的平差计算，一般采用条件平差或间接平差。边与角按下式定权

$$\left. \begin{aligned} P_{\beta} &= 1 \\ P_D &= \frac{m_{\beta}^2}{m_D^2} \end{aligned} \right\} \quad (14-2)$$

式中 m_{β} ——导线测角中误差，按式（14-1）计算，并宜用统计值；

m_D ——导线边长中误差，宜用统计值。

当导线精度要求不高时，亦可采用近似平差。

三、三角测量

三角测量的方向控制较中线法、导线法都高，如果仅从横向贯通精度的观点考虑，则它是最理想的隧道平面控制方法。

三角测量除采用测角三角锁外，还可采用变角网和三边网。但从精度、工作量、经济方面综合考虑，以测角三角锁为好。

三角锁一般布置一条高精度的基线作为起始边，并在三角锁另一端增设一条基线，以资检核；其余仅只有测角工作，按正弦定理推算边长，经过平差计算可求得三角点和隧道轴线上控制点的坐标，然后以控制点为依据，确定进洞方向。

四、三角锁和导线联合控制

这种方法只有在受到特殊地形条件限制时才考虑，一般不宜采用。如隧道在城市附近，三角锁的中部遇到较密集的建筑群，这时使用导线穿过建筑群与两端的三角锁相连接。

用于隧道施工控制测量的三角锁或导线环，在布设中除了前面所述要求之外，还应注意以下几点：

1. 使三角锁或导线环的方向，尽量垂直于贯通面，以减弱边长误差对横向贯通精度的影响。
2. 尽量选择长边，减少三角形个数或导线边个数，以减弱测角误差对横向贯通精度的影响。
3. 每一洞口附近测设不少于三个平面控制点（包括洞口投点及其相联系的三角点或导线点），作为引线入洞的依据，并尽量将其纳入主网中，以加强点位稳定性和入洞方向的校核。
4. 三角锁的起始边如果只有一条，则应尽量布设于三角锁中部；如果有两条，则应使其位于三角锁两端，这样不仅利于洞口插网，而且可以减弱三角网测量误差对横向贯通精度的影响。
5. 三角锁中若要增列基线条件时，应将基线设于锁段两端，但此时起始边的测量精度应满足下列要求：

$$\frac{m_b}{b} \leq \frac{m_\beta}{\sqrt{2}\rho''} \quad (14-3)$$

否则，不应加入基线条件。

五、GPS 测量

GPS 是全球定位系统的简称，它的原理和使用，可参看第十六章 GPS 测量。

隧道施工控制网可利用 GPS 相对定位技术，采用静态或快速静态测量方式进行测量。由于定位时只需要在开挖洞口附近测定几个控制点，工作量少，而且可以全天候观测，目前已得到应用。

隧道 GPS 定位网的布网设计，应满足下列要求：

1. 定位网由隧道各开挖口的控制点点群组成，每个开挖口至少应布测 4 个控制点。整个控制网应由一个或若干个独立观测环组成，每个独立观测环的边数最多不超过 12 个，应尽可能减少。
2. 网的边长最长不宜超过 30km，最短不宜短于 300m。
3. 每个控制点应有三个或三个以上的边与其连接，极个别的点才允许由两个边连接。
4. GPS 定位点之间一般不要求同视，但布设洞口控制点时，考虑到用常规测量方法检测、加密或恢复的需要，应当同视。
5. 点位空中视野开阔，保证至少能接收到 4 颗卫星信号。

6. 测站附近不应有对电磁波有强烈吸收和反射影响的金属和其它物体。

六、高程控制测量

洞外高程控制测量的任务，是按照设计精度施测两相向开挖洞口附近水准点之间的高差，以便将整个隧道的统一高程系统引入洞内，保证按规定精度在高程方面正确贯通，并使隧道工程在高程方面按要求的精度正确修建。

高程控制的二、三等采用水准测量。四、五等可采用水准测量，当山势陡峻采用水准测量困难时，亦可采用光电测距仪三角高程的方法测定各洞口高程。每一个洞口应埋设不少于2个水准点，两水准点之间的高差，以安置一次水准仪即可测出为宜。

水准测量的精度，一般参照表 14-1 即可。

表 14-1 等级水准测量的路线长度和仪器精度

测量部位	测量等级	每公里高差中数的偶然中误差 (mm)	两开挖洞口间的水准路线长度 (km)	水准仪等级	水准尺类型
洞外	二	≤ 1.0	> 36	$S_{0.5}$ 、 S_1	线条式因瓦水准尺
	三	≤ 3.0	13~36	S_1	线条式因瓦水准尺
				S_3	区格式水准尺
四	≤ 5.0	5~13	S_3	区格式水准尺	
洞内	二	≤ 1.0	> 32	S_1	线条式因瓦水准尺
	三	≤ 3.0	11~32	S_3	区格式水准尺
	四	≤ 5.0	5~11	S_3	区格式水准尺

由上述各种方法比较看出，中线法控制形式最简单，但由于方向控制较差，故只能用于较短的隧道；三角测量方法其方向控制精度最高，故在光电测距仪未广泛使用之前，是隧道控制最主要的形式，但其三角点的布设要受到地形、地物条件的限制，而且基线边要求精度高，使丈量工作复杂，平差计算工作量大；精密导线法，在光电测距仪的测程和精度不断提高的今天，由于布设简单、灵活、地形适应性强、外业工作量少，因而逐渐成为隧道控制的主要形式，只要在水平角测量时适当增加测回数，就可弥补其方向控制不如三角测量之不足。而且光电测距导线和光电测距三角高程可以同时进行，大大减少了野外工作量，是今后隧道控制中应首选的方案；GPS 测量是目前正处于试验阶段的一种全新控制形式，随着其价格的降低、精度的提高、理论的完善，势必成为将来最有前途的控制形式。

§14-2 隧道洞外、洞内联系测量

一、进洞关系的计算和进洞测量

洞外控制测量完成以后，应把各洞口的线路中线控制桩和洞外控制网联系起来。由于控制网和线路中线两者的坐标系不一致，应首先把洞外控制点和中线控制桩的坐标纳入同一坐标系内，故必须先进行坐标变换计算，得到控制点在变换后的新坐标。其坐标变换计算公式可以采用解析几何中的坐标转轴和移轴计算公式。一般在直线段以线路中线作为 x 轴；曲线上则以一条切线方向作为 x 轴。用线路中线点和控制点的坐标，反算两点的距离和方位角，从而确定进洞测量的数据。把中线引入洞内，可按下列方法进行：

(一) 直线隧道

1. 移桩法

如图 14-2 所示，空口两端线路控制点 A、B、C、D 是按定测精度测设的，它们并不是严格位于同一条直线上。经精测 A、B、C、D 后，可以 A 为原点，AB 方向为纵轴，计算出 C、D 两点相应的偏离值 y_c 、 y_d 和 β 角，将经纬仪分别安置在 C 和 D 上，拔角量出垂线 y_c 和 y_d ，即可移桩定出 C' 和 D' 点，再将经纬仪安置于 D' 点，照准 C' 即得进洞方向。当偏移量较大时，为保持原设计的线路平面位置和方向的一致性，可用洞口两端的 A、D 两点连线作纵轴，将 B、C 移至中线上。



图 14-2

2. 拔角法

如图 14-3，当以 AD 为坐标纵轴时，可根据 A、B 及 C、D 点的坐标，反算出水平角 α 和 β ，即可得到进洞方向。通常为了施工测量方便，亦可将 B、C 两点移到中线上的 B'、C' 点上。

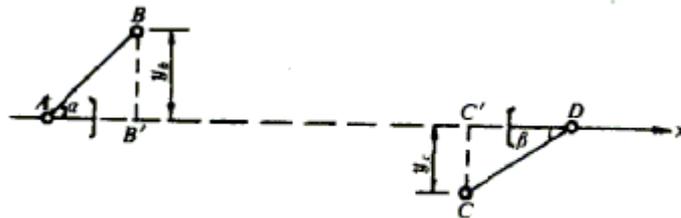


图 14-3

(二) 曲线隧道

曲线隧道两端洞口的每条切线上已有两个投点的坐标在控制网中得到，如图 14-4 中的 A、G 和 D、E。经坐标变换后，以 A 点为坐标系原点，AG 的切线方向为 y 轴，

其进洞关系的计算步骤如下：

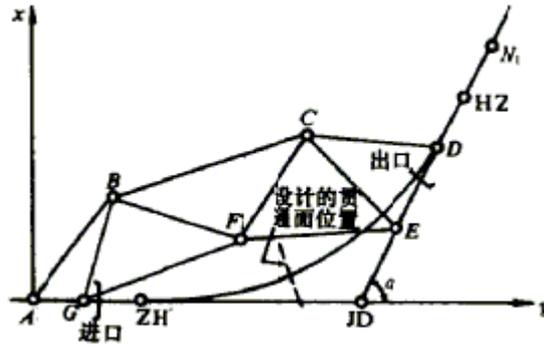


图 14-4

1. 坐标变换后，得到 A、G、D、E 各点的新坐标。根据这些新坐标反算得到 AG、DE 的方位角；两方位角相减得到曲线精测的转向角 α ，它的精度较之定测角值精确，并与各点的坐标相一致。

$$\alpha = \alpha_{AG} - \alpha_{ED}$$

2. 计算交点的坐标

因为 AG 切线与 y 轴重合或平行，故 JD 的 x 坐标为零或选定值，它是已知的；只需计算出 JD 的 y 坐标值即可。

$$y_{JD} = \frac{x_{JD} - x_E}{x_E - x_D} (y_E - y_D) + y_E \quad (14-4)$$

3. 根据精测算得的 α 和选定的曲线半径 R 和缓和曲线长 l_0 ，计算出曲线要素 T、L、 β_0 、 p 、 m 、 x_0 、 y_0 。

4. 选定洞口外面一个中线控制桩的里程，使其和定测里程一致，例如选定 A 点。由此从 A 推算隧道范围内其它中线控制点的里程，到隧道另一端洞口外的中线控制点上出现断链，这是由于精测长度和定测长度不一致所致，这种里程称为隧道施工里程。

5. 计算任一中线点的坐标

要想在洞中测设出任一中线点的位置，必须先知道该点的施工里程，使它与曲线控制桩的施工里程相比较，才能确定该点是在直线上，还是在曲线上，并且知道该点距中线控制桩有多远。由于任一中线点的位置不同，所以计算坐标的方法也不同，现分别说明如下：

(1) 中线点在直线上

如图 14-4 所示，进口洞门在一直线上，而 N_1 点在出口端的另一直线上。在已知各点的施工里程 $DK_{进口}$ 、 DK_{N_1} （不能用定测里程）的情况下，则

$$\left. \begin{aligned} x_{进口} &= 0 \\ y_{进口} &= DK_{进口} - DK_A \\ x_{N_1} &= [T + (DK_{N_1} - DK_{HZ})] \sin \alpha \\ y_{N_1} &= y_{JD} + [T + (DK_{N_1} - DK_{HZ})] \cos \alpha \end{aligned} \right\} \quad (14-5)$$

(2) 中线点在缓和曲线上

首先计算出它们的切线坐标（计算到 mm 或 0.1mm），然后将切线坐标转换为统一坐标。

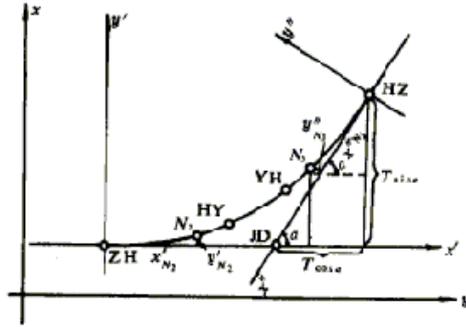


图 14-5

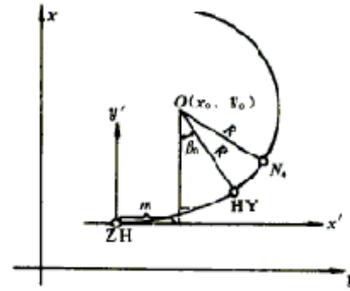


图 14-6

例如在图 14-5 中，统一坐标系的坐标轴为 x 、 y 轴；ZH 端的切线坐标系为 x' 、 y' 轴；HZ 端的切线坐标系为 x'' 、 y'' 轴。假设统一坐标系的 y 轴平行于 x' 轴，则中线点 N_2 、 N_3 的统一坐标推算如下：

$$\left. \begin{aligned} x_{N_2} &= x_{ZH} + y'_{N_2} \\ y_{N_2} &= y_{ZH} + x'_{N_2} \end{aligned} \right\} \quad (14-6)$$

$$\left. \begin{aligned} x_{N_3} &= x_{JD} + T \sin \alpha - x''_{N_3} \sin \alpha + y''_{N_3} \cos \alpha \\ y_{N_3} &= y_{JD} + T \cos \alpha - x''_{N_3} \cos \alpha + y''_{N_3} \sin \alpha \end{aligned} \right\} \quad (14-7)$$

式中 x'_{N_2} 、 y'_{N_2} —— N_2 点的切线坐标；
 x'_{N_3} 、 y'_{N_3} —— N_3 点的切线坐标。

(3) 中线点在圆曲线上

当中线点位于圆曲线上时，最好通过圆心来计算它们的坐标。

如图 14-6 中， N_4 点在圆曲线上，则圆心 O 的统一坐标为：

$$\left. \begin{aligned} x_o &= x_{ZH} + p + R \\ y_o &= y_{ZH} + m \end{aligned} \right\} \quad (14-8)$$

而 ON_4 的坐标方位角为：

$$\alpha_{ON_4} = 180^\circ - \beta_o - \frac{DK_{N_4} - DK_{HY}}{R} \cdot \frac{180^\circ}{\pi} \quad (14-9)$$

$$\left. \begin{aligned} x_{N_4} &= x_o + R \cdot \cos \alpha_{ON_4} \\ y_{N_4} &= y_o + R \cdot \sin \alpha_{ON_4} \end{aligned} \right\} \quad (14-10)$$

按上述方法计算出测设中线点的坐标后，再根据控制网点的坐标，反算出两点间的距离和方位角，利用极坐标法即可确定洞门的位置和进洞方向。如图 14-7，H 为出口洞门的设计位置，D、E 为切线方向的控制点，根据 D、H 点坐标可以算出距离 S_{DH} 及方位角 α_{DH} ；根据 D、E 坐标可以算出方位角 α_{DE} ，根据两方位角之差可以求得水平角 β 。将经纬仪按在 D 点，后视 E 点，转一角度 β ，沿此方向丈量距离 S_{DH} ，即可定出洞门出口位置 H 点。

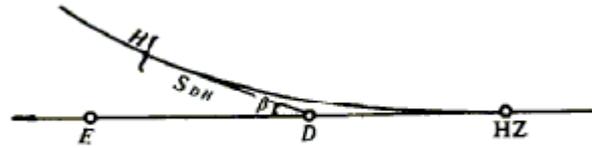


图 14-7

二、由洞外向洞内传递方向和坐标

为了加快施工进度，隧道施工中除了进出洞口之外，还会用斜井、横洞或竖井来增加施工开挖面。为此就要经由它们布设导线，把洞外导线的方向和坐标传递给洞内导线，构成一个洞内、外统一的控制系统，这种导线称为联系导线，如图 14-8。联系导线属支导线性质，其测角误差和边长误差直接影响隧道的横向贯通精度，故使用中必须多次精密测定、反复校核，确保无误。

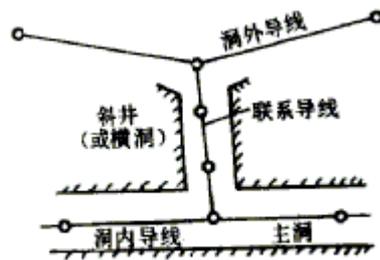


图 14-8

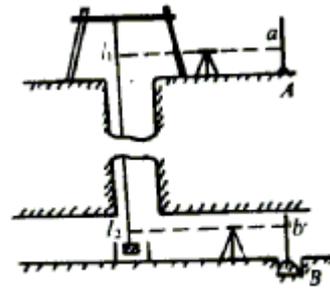


图 14-9

当由竖井进行联系测量时，可以采用垂准仪光学投点、陀螺经纬仪定向的方法，来传递坐标和方位。

三、由洞外向洞内传递高程

经由斜井或横洞向洞内传递高程时，一般均采用往返水准测量，当高差较差合限时取平均值的方法。由于斜井坡度较陡，视线很短，测站很多，加之照明条件差，故误差积累较大，每隔 10 站左右应在斜井边脚设一临时水准点，以便往返测量时校核。近年来用光电测距三角高程测量的方法来传递高程，已得到愈来愈广泛的应用，大大提高了工作效率，但应注意洞中温度的影响，以及应采用对向观测的方法。

经由竖井传递高程时，过去一直采用悬挂钢尺的方法，即在井上悬挂一根经过检定的钢尺（或钢丝），尺零点下端挂一标准拉力的重锤，如图 14-9 所示，在井上、井下各安置一台水准仪，同时读取钢尺读数 l_1 和 l_2 ，然后再读取井上、井下水准点的尺读数 a 、 b ，由此可求得井下水准点 B 的高程：

$$H_B = H_A + a - [(l_1 - l_2) + \Delta t + \Delta k] - b \quad (14-11)$$

式中 H_A ——井上水准点 A 的高程；

a 、 b ——井上、井下水准尺读数；

l_1 、 l_2 ——井上、井下钢尺读数， $L=l_1-l_2$ ；

Δt ——钢尺温度改正数， $\Delta t=\alpha L(t_{\text{均}}-t_0)$ ；

α ——钢尺膨胀系数，取 $1.25 \times 10^{-5}/^\circ\text{C}$ ；

$t_{\text{均}}$ ——井上、井下平均温度；

t_0 ——钢尺检定时温度；

Δk ——钢尺尺长改正数， $\Delta k=(L/l) \times \Delta l$ ； l 和 Δl 分别是钢尺的名义长度和它的尺长改正数。

如果在井上装配一托架，安装上光电测距仪，使照准头向下直接瞄准井底的反光镜测出井深 D_h ，然后在井上、井下用两台水准仪，同时分别测定井上水准点 A 与测距仪照准头转动中心的高差 ($a_{\text{上}}-b_{\text{上}}$)、井下水准点 B 与反射镜转动中心的高差 ($b_{\text{下}}-a_{\text{下}}$)，即可求得井下水准点 B 的高程 H_B ，如图 14-10 所示。

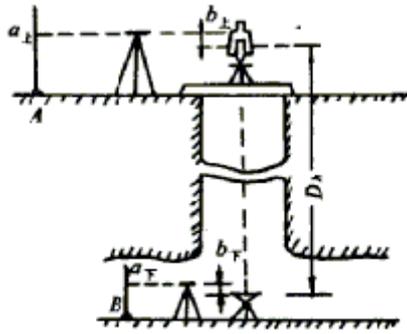


图 14-10

$$H_B = H_A + (a_{\text{上}} - b_{\text{上}}) + (b_{\text{下}} - a_{\text{下}}) \quad (14-12)$$

式中 H_A 为井上水准点 A 的已知高程。

用光电测距仪测井深的方法远比悬挂钢尺的方法快速、准确，尤其是对于 50m 以上的深井测量，更显现出其优越性。

§14-3 隧道洞内控制测量

一、平面控制测量

为了给出隧道正确的掘进方向，并保证准确贯通，应进行洞内控制测量。由于隧道洞内场地狭窄，故洞内平面控制常采用中线或导线两种形式。

(一) 中线形式

中线形式是指洞内不设导线，用中线控制点直接进行施工放样。一般以定测精度测设出新点，测设中线点的距离和角度数据由理论坐标值反算，这种方法一般用于较短的隧道。若将上述测设的新点，再以高精度测角、量距，算出实际的新点精确点位，再和理论坐标相比较，若有差异，应将新点移到正确的中线位置上，这种方法可以用于曲线隧道 500m、直

线隧道 1000m 以上的较长隧道。

(二) 导线形式

导线形式是指洞内控制依靠导线进行，施工放样用的正式中线点由导线测设，中线点的精度能满足局部地段施工要求即可。导线控制的方法较中线形式灵活，点位易于选择，测量工作也较简单，而且具有多种检核方法；当组成导线闭合环时，角度经过平差，还可提高点位的横向精度。导线控制方法适用于长隧道。

洞内导线与洞外导线比较，具有以下特点：洞内导线是随着隧道的开挖逐渐向前延伸，故只能敷设支导线或狭长形导线环，而不可能将全部导线一次测完；导线的形状完全取决于坑道的形状；导线点的埋石顶面应比洞内地面低 20~30cm，上面加设护盖、填平地面，以免施工中遭受破坏。

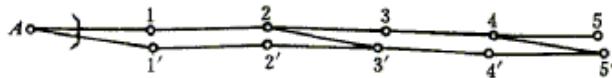


图 14-11

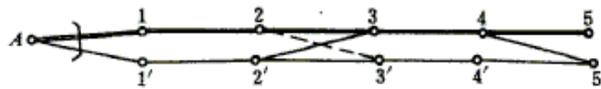


图 14-12

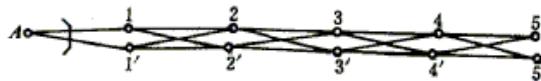


图 14-13



图 14-14

洞内导线一般常采用下列几种形式：

1. **单导线** 半数测回测左角，半数测回测右角。
2. **导线环** 如图 14-11 所示，每测一对新点，如 5 和 5'，可按两点坐标反算 5~5' 的距离，然后与实地丈量的 5~5' 距离比较，这样每前进一步均有检核。
3. **主副导线环** 如图 14-12 所示，双线为主导线，单线为副导线。副导线只测角不量距离，主导线既测角又量距离。按虚线形成第二闭合环时，主导线在 3 点处能以平差角推算 3~4 边的方位角；以后均仿此法形成闭合环。闭合环角度平差后，对提高导线端点的横向点位精度很有利；并可对角度测量加以检查，同时根据角度闭合差还可以评定测角精度；另一方面又节省了副导线大量的测边工作。主副导线环在洞内控制中应推广使用。
4. **交叉导线** 如图 14-13 所示，并行导线每前进一段交叉一次，每一个新点由两条路线传算坐标（如 5 点坐标由 4 和 4' 两点传算），最后取平均值；亦可以实量 5~5' 的距离，

来检核 5 和 5' 的坐标值。交叉导线不作角度平差

5. **旁点闭合环** 如图 14-14 所示, A、B 为旁点。旁点闭合环一般测内角, 作角度平差; 旁点两侧的边长, 可测可不测。

当有平行导坑时, 还可利用横通道将正洞和导坑联系起来, 形成导线闭合环。

无论是采用中线形式, 还是采用导线形式作洞内控制, 在测量时应注意以下几点:

1. 每次在建立新点之前, 必须检测前一个老点的稳定性, 只有在确认老点没有发生变动时, 才能用它来发展新点。

2. 尽量形成闭合环、两条路线的坐标比较、实量距离与反算距离的比较等检查条件, 以免发生错误。

3. 导线应尽量布设为长边或等边, 一般直线地段不短于 200m, 曲线地段不宜短于 70m。

4. 洞内丈量工具, 在使用前应与洞外控制网丈量工具比长。

5. 以导线形式作为洞内平面控制时, 正式中线点由临近的导线点以极坐标法测设在地面上之后, 应在中线点上安置经纬仪, 以任何两个已知坐标的点为目标测其角度。用实测角值与坐标反算的角值比较, 以检查中线点测设的正确性, 如图 14-15, 中线点 5 由导线点 C 测设出来之后, 将经纬仪安置在 5 点上, 测出检查角和坐标反算出的角值比较。

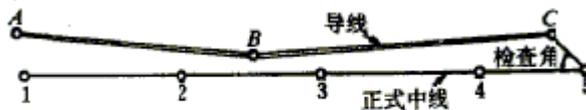


图 14-15

二、洞内高程测量

洞内高程测量应采用水准测量或光电测距三角高程测量的方法。洞内高程应由洞外高程控制点向洞内测量传算, 结合洞内施工特点, 每隔 200m 至 500m 设立两个高程点以便检核; 为便于施工使用, 每隔 100 m 应在拱部边墙上设立一个水准点。

采用水准测量时, 应往返观测, 视线长度不宜大于 50m; 采用光电测距三角高程测量时, 应进行对向观测, 注意洞内的除尘、通风排烟和水气的影响。限差要求与洞外高程测量的要求相同。洞内高程点作为施工高程的依据, 必须定期复测。

当隧道贯通之后, 求出相向两支水准的高程贯通误差, 并在未衬砌地段进行调整。所有开挖、衬砌工程应以调整后的高程指导施工。

§14-4 隧道洞内中线测量

一、洞内中线测量

隧道洞内施工, 是以中线为依据来进行。当洞内敷设导线之后, 导线点不一定恰好在

线路中线上，更不可能恰好在隧道的结构中线上（即隧道轴线上）。而隧道衬砌后两个边墙间隔的中心即为隧道中心，在直线部分则与线路中线重合；曲线部分由于隧道衬砌断面的内外侧加宽不同，所以线路中心线就不是隧道中心线，如图 14—16 所示。隧道中线的测设方法有下列两种：

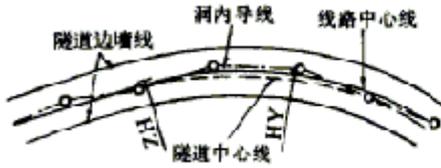


图 14—16

(一) 由导线测设中线

用精密导线进行洞内隧道控制测量时，为便于施工，应根据导线点位的实际坐标和中线点的理论坐标，反算出距离和角度，利用极坐标法，根据导线点测设出中线点。一般直线地段 150~200 m；曲线地段 60~100m，应测设一个永久的中线点。

由导线建立新的中线点之后，还应将经纬仪安置在已测设的中线点上，测出中线点之间的夹角，如图 14—17 所示，将实测的检查角与理论值相比较；另外实量 4~5 点的距离，亦可与理论值比较，作为另一种检核，确认无误即可挖坑埋入带金属标志的混凝土桩。



图 14—17

(二) 独立的中线法

若用独立的中线法测设，在直线上应采用正倒镜分中法延伸直线；在曲线上一般采用弦线偏角法。测规要求采用独立中线法时，永久中线点间距离：直线上不小于 100m，曲线上不小于 50m。

二、洞内临时中线的测设

为了知道隧道洞内开挖方向，随着向前掘进的深入，平面测量的控制工作和中线工作也需紧随其后。当掘进的延伸长度不足一个永久中线点的间距时，应先测设临时中线点，如图 14—18 中的 1、2……等，点间距离，一般直线上不大于 30m，曲线上不大于 20m，临时中线点应该用仪器测设。当延伸长度大于永久中线点的间距时，就可以建立一个新的永久中线点，如图中的 e。永久中线点应根据导线或用独立中线法测设，然后根据新设的永久中线点继续向前测设临时中线点。当掘进长度距最新的导线点 B 大于一个导线的设计边长时，就可以建立一个新的导线点 C，然后根据 C 点继续向前测设中线点（图 14—18）。当采用全断面法开挖时，导线点和永久中线点都应紧跟临时中线点。这时临时中线点要求的精度也较高。

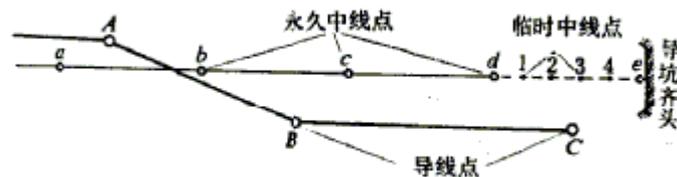


图 14—18

§14-5 隧道施工测量

隧道是边开挖、边衬砌，为保证开挖方向正确、开挖断面尺寸符合设计要求，施工测量工作必须要紧紧跟上，同时要保证测量成果的正确性。

一、导坑延伸测量

当导坑从最前面一个临时中线点继续向前掘进时，在直线上延伸不超过 30m，曲线上不超过 20m 的范围内，可采用“串线法”延伸中线。用串线法延伸中线时，应在临时中线点前或后用仪器再设置两个中线点，如图 14-19 中的 1'、2'，其间距不小于 5m。串线时可在这三个点上挂上垂球线，先检验三点是否在一直线上，如正确无误，可用肉眼瞄直，在工作面上给出中线位置，指导掘进方向。当串线延伸长度超过临时中线点的间距时（直线为 30m、曲线为 20m），则应设立一个新的临时中线点。

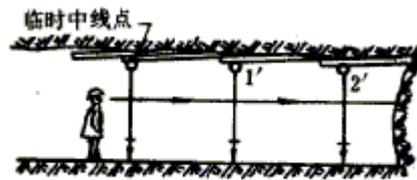


图 14-19

如果用激光导向仪，将其挂在中线洞顶部来指示开挖方向，可以定出 100m 以外的中线点，如图 14-20 所示。这种方法对于直线隧道和全断面开挖的定向，既快捷又准确。

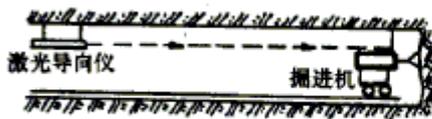


图 14-20

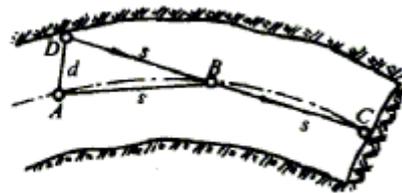


图 14-21

在曲线导坑中，常用弦线偏距法和切线支距法。弦线偏距法最方便，如图 14-21 所示，A、B 为曲线上已定出的两个临时中线点，如要向前定出新的中线点 C，要求 $BC=AB=s$ ，则从 B 沿 CB 方向量出长度 s，同时从 A 量出偏距 d，将两尺拉直使两长度分划相交，即可定出 D 点，然后在 D、B 方向上挂三根垂球线，用串线法指导 B、C 间的掘进，掘进长度超过临时中线点间距时，由 B 沿 DB 延伸方向量出距离 s，即可测设出新的临时中线点 C。

偏距 d 可按下列近似公式计算

$$\text{圆曲线部分} \quad d = \frac{s^2}{R}$$

$$\text{缓和曲线部分} \quad d = \frac{s^2}{R} \cdot \frac{l_B}{l_0}$$

(14-13)

式中 s——临时中线点间距；

R ——圆曲线半径;

l_0 ——缓和曲线全长;

l_B ——B 点到 ZH (或 HZ) 的距离。

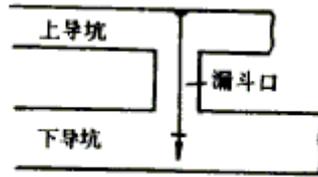


图 14-22

二、上下导坑的联测

采用上、下导坑开挖时，每前进一段距离后，上部的临时中线点和下部的临时中线点应通过漏斗联测一次，用以改正上部的中线点或向上部导坑引点。联测时，一般用长线垂球、光学垂准器、经纬仪的光学对点器等，将下导坑的中线点引到上导坑的顶板上，如图 14-22 所示。移设三个点之后，应复核其准确性；测量一段距离之后及筑拱前，应再引至下导坑核对，并尽早与洞口外引入的中线闭合。

三、隧道结构物的施工放样

(一)隧道开挖断面测量

在隧道施工中，为使开挖断面能较好的符合设计断面，在每次掘进前，应在开挖断面上，根据中线和轨顶高程，标出设计断面尺寸线。

分部开挖的隧道在拱部和马口开挖后，全断面开挖的隧道在开挖成形后，应采用断面自动测绘仪或断面支距法测绘断面，检查断面是否符合要求；并用来确定超挖和欠挖工程数量。测量时按中线和外拱顶高程，从上至下每 0.5m（拱部和曲墙）和 1.0m（直墙）向左右量测支距。量支距时，应考虑到曲线隧道中心与线路中心的偏移值和施工预留宽度。

仰拱断面测量，应由设计轨顶高程线每隔 0.5m（自中线向左右）向下量出开挖深度。

(二)结构物的施工放样

在施工放样之前，应对洞内的中线点和高程点加密。中线点加密的间隔视施工需要而定，一般为 5~10m 一点，加密中线点可以铁路定测的精度测定。加密中线点的高程，均以五等水准精度测定。

在衬砌之前，还应进行衬砌放样，包括立拱架测量、边墙及避车洞和仰拱的衬砌放样，洞门砌筑施工放样等一系列的测量工作。

四、竣工测量

隧道竣工以后，应在直线地段每 50m，曲线地段每 20m，或者需要加测断面处，以中线桩为准，测绘隧道的实际净空。测绘内容包括：拱顶高程、起拱线宽度、轨顶水平宽度、

铺底或仰拱高程，如图 14—23 所示。

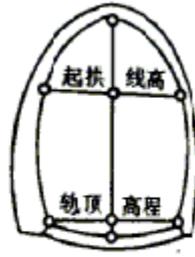


图 14—23

当隧道中线统一检测闭合后，在直线上每 200~500m、曲线上的主点，均应埋设永久中线桩；洞内每 1km 应埋设一个水准点。无论中线点或水准点，均应在隧道边墙上画出标志，以便以后养护维修时使用。

§14—6 隧道贯通误差预计

一、贯通误差概述

隧道施工进度慢，往往成为控制工期的工程。为了加快施工进度，除了进、出口两个开挖面外，还常采用横洞、斜井、竖井、平行导坑等来增加开挖面。因此，不管是直线隧道还是曲线隧道，开挖总是沿线路中线不断向洞内延伸，洞内线路中线位置测设的误差，就逐步随着开挖的延伸而逐渐积累；另一方面，隧道施工时基本上都是采用边开挖、边衬砌的方法，等到隧道贯通时，未衬砌部分也所剩不多，故可进行中线调整的地段有限。于是，如何保证隧道在贯通时（包括横向、纵向、高程方向），两相向开挖施工中线的相对错位不超过规定的限值，是隧道施工测量的关键问题。但是，在纵向方面所产生的贯通误差，一般对隧道施工和隧道质量不产生影响，从我国隧道施工调查中得知，一般不超过±320mm，即使达到这种情况，对施工质量也无影响，因此规定这项限差无实际意义；高程要求的精度，使用一般水准测量方法即可满足；而横向贯通误差（在平面上垂直于线路中线方向）的大小，则直接影响隧道的施工质量，严重者甚至会导致隧道报废。所以一般说贯通误差，主要是指隧道的**横向贯通误差**。

《铁路测量技术规则》对隧道贯通误差的限值见表 14—2。

表 14—2 贯通误差的限差

两开挖洞口长度(km)	<4	4~8	8~10	10~13	13~17	17~20
横向贯通误差(mm)	100	150	200	300	400	500
高程贯通误差(mm)	50					

二、贯通误差预计

影响横向贯通误差的因素有：洞外和洞内平面控制测量误差、洞外与洞内之间联系测量

误差。

《铁路测量技术规则》规定，洞外、洞内控制测量误差，对每个贯通面上产生的横向中误差不应超过表 14—3 的规定。

表 14—3 洞外、洞内控制测量的贯通精度要求

测量部位	横向中误差 (mm)						高程中误差 (mm)
	两开挖洞口间长度 (km)						
	<4	4~8	8~10	10~13	13~17	17~20	
洞外	30	45	60	90	120	150	18
洞内	40	60	80	120	160	200	17
洞外、洞内总和	50	75	100	150	200	250	25

注：本表不适用于设有竖井的隧道

洞外、洞内控制测量，产生在贯通面上的横向中误差，按下列公式计算：

1. 导线测量

$$m = \pm \sqrt{m_{y\beta}^2 + m_{yl}^2} \quad (14-14)$$

式中 $m_{y\beta}$ ——由于测角误差影响，产生在贯通面上的横向中误差(mm)，即

$$m_{y\beta} = \pm \frac{m_{\beta}}{\rho''} \sqrt{\sum R_x^2} \quad (14-15)$$

m_{yl} ——由于测边误差影响，产生在贯通面上的横向中误差(mm)，即

$$m_{yl} = \pm \frac{m_l}{l} \sqrt{\sum d_y^2} \quad (14-16)$$

其中 m_{β} ——由导线环闭合差求算的测角中误差 (")；

R_x ——导线环在隧道相邻两洞口连线的一条导线上各点至贯通面的垂直距离 (m)；

$\frac{m_l}{l}$ ——导线边边长相对中误差；

d_y ——导线环在隧道相邻两洞口连线的一条导线上各边在贯通面上的投影长度 (m)。

2. 三角测量

三角测量的计算公式可参考《铁路测量技术规则》中给出的有关公式，也可以按导线测量的误差公式计算。其方法是选取三角网中沿中线附近的连续传算边作为一条导线进行计算。但式 (14—14) (14—15) (14—16) 中：

m_{β} ——由三角网闭合差求算的测角中误差 (")；

R_x ——所选三角网中连续传算边形成的导线上各转折点至贯通面的垂直距离；

$\frac{m_l}{l}$ ——取三角网最弱边的相对中误差；

d_y ——所选三角网中连续传算边形成的导线各边在贯通面上的投影长度。

例：现以导线为例，说明洞外、洞内控制测量误差对横向贯通精度影响值的估算方法。

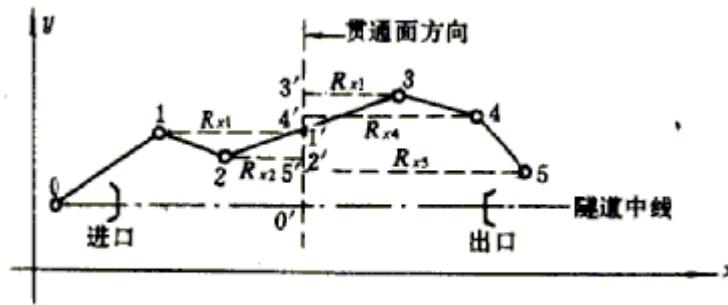


图 14—24

首先按导线布点，绘出 1: 10 000 的导线平面图，如图 14—24。0—1—2—3—4—5 为单导线，0、5 为洞外导线的始终点，使 y 轴平行于贯通面；由各导线点向贯通面方向作垂线，其垂足为 0'、1'、2'、3'、4'、5'；除导线点的始终点 0、5 之外，量出各点垂距 R_{x1} 、 R_{x2} 、 R_{x3} 、 R_{x4} （用比例尺量，凑整到 10m 即可）。然后以同样精度量出各导线边在贯通方向上的投影长度 d_{y1} 、 d_{y2} 、 d_{y3} 、 d_{y4} 、 d_{y5} （即 $0'1'$ 、 $1'2'$ 、 $2'3'$ 、 $3'4'$ 、 $4'5'$ 的长度），将各值填入表 14—4。

表 14—4 洞外导线测量误差对横向贯通精度影响值计算表

各点的投影垂距			各边的投影长度		
点名	R_x (m)	R_x^2 (m ²)	线段	d_y (m)	d_y^2 (m ²)
1	400	160 000	0~1	140	19 600
2	150	22 500	1~2	40	1 600
3	250	62 500	2~3	160	25 600
4	480	230 400	3~4	70	4 900
			4~5	130	16 900
$\sum R_x^2 = 475400m^2$			$\sum d_y^2 = 475400m^2$		

设 导线环的测角中误差为：

$$m_\beta = \pm \sqrt{\frac{[f_\beta^2 / n]}{N}} = \pm 4''$$

式中 f_β ——导线环的角度闭合差；
 n ——一个导线环内角的个数；
 N ——导线环的个数。

导线边长相对中误差为：

$$\frac{m_l}{l} = \frac{1}{10000}$$

$$m_{y\beta} = \pm \frac{m_\beta}{\rho''} \sqrt{\sum R_x^2} = \pm \frac{4}{206265} \sqrt{475400} = \pm 13.4mm$$

则

$$m_{yl} = \pm \frac{m_l}{l} \sqrt{\sum d_y^2} = \pm \frac{1}{10000} \sqrt{68600} = \pm 26.2mm$$

$$m_{y\text{外}} = \pm \sqrt{m_{y\beta}^2 + m_{yl}^2} = \pm 29.4mm$$

洞内控制无论是中线形式，还是导线形式，一律按导线看待，所以其估算方法与洞外导线测量完全相同，但有两点要注意：

(1) 两洞口处的控制点，在引入洞内导线时需要测角，其测角误差算入洞内测量误差。故计算洞外导线测角误差时，不包括始、终点的 R_x 值，而计算洞内导线测角误差时，如图 14—25 中的 R_{xo} 、 R_{xh} ，它们应归入洞内估算值中。

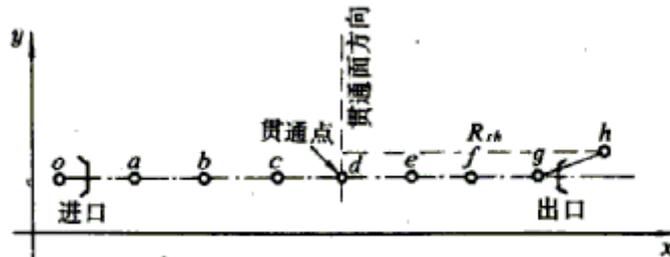


图 14—25

(2) 两洞口引入的洞内导线不必单独计算，可以将贯通点当作一个导线点，从一端洞口控制点到另一端洞口控制点，当作一条连续的导线来计算，如图 14—25 中，从 0 到 h 看成一条导线，其计算值见表 14—5。

表 14—5 洞内导线测量误差对横向贯通精度影响值计算表

点名	各点的投影垂距		各边的投影长度		
	R_x (m)	R_x^2 (m ²)	线段	d_y (m)	d_y^2 (m ²)
0	690	476 100	0~a	0	0
a	510	260 100	a~b	0	0
b	330	108 900	b~c	0	0
c	110	12 100	c~d	0	0
d	0	0	d~e	0	0
e	170	28 900	e~f	0	0
f	350	122 500	f~g	0	0
g	510	260 100	g~h	60	3600
h	630	396 900			
$\sum R_x^2 = 1665600m^2$			$\sum d_y^2 = 3600m^2$		

设 洞内测角中误差 $m_\beta = \pm 4''$

洞内测边相对中误差 $\frac{m_l}{l} = \frac{1}{5000}$

则

$$m_{y\beta} = \pm \frac{m_\beta}{\rho''} \sqrt{\sum R_x^2} = \pm \frac{4}{206265} \sqrt{1665600} = \pm 25.0mm$$

$$m_{yl} = \pm \frac{m_l}{l} \sqrt{\sum d_y^2} = \pm \frac{1}{5000} \sqrt{3600} = \pm 12.0mm$$

$$m_{y内} = \pm \sqrt{m_{y\beta}^2 + m_{yl}^2} = \pm 27.7mm$$

洞外、洞内测量误差，对隧道横向贯通精度的影响总值为：

$$m_y = \pm\sqrt{m_{y外}^2 + m_{y内}^2} = \pm 40.4mm$$

按表 14—3 中《测规》要求，两开挖洞口间的长度小于 4km 时，横向贯通中误差应小于 $\pm 50mm$ ，现估算值为 $\pm 40.4mm$ ，故可认为设计的施测精度能够满足隧道横向贯通精度的要求，设计是合理的。