

DB61

陕 西 省 地 方 标 准

DB 61/T 1419—2021

长距离水工隧洞控制测量技术规范

Control Surveying Technical Specification for Long-distance Hydraulic Tunnel

2021 - 01 - 19 发布

2021 - 02 - 19 实施

陕西省市场监督管理局

发 布

目 次

前言..... II

1 范围..... 1

2 规范性引用文件..... 1

3 术语和定义..... 1

4 基本规定..... 2

5 洞外控制测量..... 3

6 联系测量..... 11

7 洞内控制测量..... 14

8 施工测量..... 21

9 质量控制..... 25

附录 A（规范性） 基于 GNSS 网坐标协因数阵的隧洞横向贯通误差预计法..... 28

附录 B（资料性） 控制点点之记..... 34

附录 C（资料性） 控制点埋设要求..... 35

前 言

本文件按照GB/T 1.1-2020《标准化工作导则 第1部分：标准化文件的结构和起草规则》的规定起草。

本文件由陕西省水利厅提出并归口。

本文件起草单位：陕西省引汉济渭工程建设有限公司、中铁第一勘察设计院集团有限公司、西南交通大学、长安大学。

本文件主要起草人：杜小洲、张忠东、徐国鑫、任晓春、何金学、王智阳、杨西林、杨志强、赵力、刘成龙、王家明、张齐勇、燕军乐、王博、王亮。

本文件由陕西省引汉济渭工程建设有限公司负责解释。

本文件首次发布。

联系信息如下：

单位：陕西省引汉济渭工程建设有限公司

电话：029-86326789

地址：陕西省西安市未央区浐灞大道2021号

邮编：710024

长距离水工隧洞控制测量技术规范

1 范围

本文件规定了长距离水工隧洞施工控制测量基本规定、洞外控制测量、联系测量、洞内控制测量、施工测量等施测方法、精度指标和技术要求。

本文件适用于相向开挖长度大于20 km的长距离水工隧洞贯通控制测量工作，对于相向开挖长度大于50 km时应做专门贯通测量设计。

2 规范性引用文件

下列文件中的内容通过文中的规范性引用而构成本文件必不可少的条款。其中，注日期的引用文件，仅该日期的版本适用于本文件。不注日期的引用文件，其最新版本（包括所有的修改单）适用于本文件。

GB/T 12897 国家一、二等水准测量规范
GB/T 16818 中、短程光电测距规范
GB/T 18314 全球定位系统（GPS）测量规范
GB/T 24356 测绘成果质量检查与验收
SL/52-2015 水利水电工程施工测量规范

3 术语和定义

下列术语和定义适用于本文件。

3.1

工程独立坐标系 independent coordinate system of engineering

为满足工程建设需要，以任意中央子午线和高程投影面进行投影而建立的平面直角坐标系。

3.2

三角形网 triangulation network

以三角形为基本图形组成的测量控制网，是地面测角网、测边网和边角网的统称。

3.3

1"（0.5"、2"）级仪器 1"（0.5"、2"） class instrument

1"（0.5"、2"）级仪器是指一测回水平方向中误差标称为 1"（0.5"、2"）的测角仪器，包括全站仪、电子经纬仪。

3.4

洞外控制测量 control survey outside tunnel

为保证隧洞施工贯通，在隧洞洞外进行的全隧洞范围内的平面、高程控制测量。

3.5

洞内控制测量 control survey inside tunnel

为保证隧洞施工贯通，在隧洞洞内进行的平面、高程控制测量。

3.6

联系测量 connection survey

隧洞测量过程中，将洞外控制网的坐标、方位和高程传递到洞内的测量。

3.7

隧洞贯通误差 through error

隧洞贯通后，相向（或单向）掘进的施工中线在贯通面处的偏离值。包括纵向贯通误差、横向贯通误差和竖向贯通误差。

3.8

施工加密控制网 densification control network for construction

为了满足工程施工测量的要求，在原控制点基础上加密的平面、高程控制网。

3.9

施工测量 construction survey

工程施工期间进行的测量工作。

3.10

卫星定位测量 global navigation satellite system survey

利用两台及以上卫星定位接收机同时接收全球导航卫星系统信号，确定地面点相对位置的测量方法，简称“GNSS测量”。

3.11

自由测站边角交会测量 side-angle resection at free station survey

在任一点上架设全站仪，对布设在线路两侧的控制点进行距离、水平方向和竖直角度的观测，构成边角交会网形的测量方法。

3.12

全站仪自由设站测量 free station positioning by total-station

在任一点上架设全站仪，对线路两侧的已知控制点进行距离、水平方向和竖直角度的观测，测定设站点坐标、高程及方位的测量方法。

4 基本规定

4.1 隧洞施工控制测量的平面和高程控制网系统，宜与规划设计阶段的坐标、高程系统相衔接，其平面坐标系宜采用基于 2000 国家大地坐标系（CGCS2000）基准的工程独立施工坐标系，高程系统宜采用 1985 国家高程基准。

- 4.2 隧洞施工控制测量开展前，测量单位应收集隧洞工程设计文件和施工图纸组织现场踏勘，根据施工图纸和地形地貌及地质条件，按照节约成本、严管质量、保障进度的原则进行优化设计；测量单位编制技术设计书报工程建设单位审批后进行测量工作。
- 4.3 本文件以中误差作为衡量测量精度的标准。极限误差（简称限差）规定为中误差的 2 倍。
- 4.4 各种测量仪器和工具应按规定做好保养和维护工作，并定期检校和检定，确保在检定有效期内使用。
- 4.5 所有测量记录、计算成果和图表，应书写清楚、签署完整，并应进行复核和检算，各种测量原始记录（包括电子记录）、计算成果和图表应妥善保存和归档。

5 洞外控制测量

5.1 一般规定

5.1.1 长距离水工隧洞开挖的极限贯通误差应符合表 1 的规定，相向开挖长度大于 50 km 时应做专门贯通测量设计。对于上、下两端开挖的竖井，其极限贯通误差不应超过 ± 200 mm。

表 1 水工隧洞开挖贯通测量容许极限误差值

相向开挖长度/km		20 ~ 25	25 ~ 30	30 ~ 35	35 ~ 40	40 ~ 45	45 ~ 50
极限贯通误差/mm	横向	± 400	± 500	± 620	± 740	± 880	± 1000
	纵向	± 400	± 500	± 620	± 740	± 880	± 1000
	竖向	± 124	± 150	± 176	± 200	± 224	± 250
注：相向开挖长度包括支洞的长度。							

5.1.2 在进行贯通测量设计时，可取极限贯通误差的 1/2 作为贯通面上的贯通中误差，根据隧洞长度，各项测量中误差的分配应符合表 2 的规定。

表 2 贯通中误差分配值

相向开挖长度/km	贯通中误差/mm								
	横向			纵向			竖向		
	地面	地下	贯通面	地面	地下	贯通面	地面	地下	贯通面
20 ~ 25	± 80	± 200	± 215	± 80	± 200	± 215	± 44	± 44	± 62
25 ~ 30	± 100	± 250	± 269	± 100	± 250	± 269	± 53	± 53	± 75
30 ~ 35	± 124	± 310	± 334	± 124	± 310	± 334	± 62	± 62	± 88
35 ~ 40	± 148	± 370	± 399	± 148	± 370	± 399	± 71	± 71	± 100
40 ~ 45	± 176	± 440	± 474	± 176	± 440	± 474	± 79	± 79	± 112
45 ~ 50	± 200	± 500	± 539	± 200	± 500	± 539	± 88	± 88	± 124

- 5.1.3 长距离水工隧洞平面控制网应建立施工坐标系，施工坐标系宜采用：
- a) 以进、出口端的控制点为约束基准的线路坐标系；
 - b) 固定一点一方位的工程独立坐标系。
- 坐标成果应投影到隧洞的设计平均高程面上。隧洞平面控制网应与规划设计阶段坐标系的控制点联测，求取施工坐标系与规划设计阶段坐标系的换算关系参数。
- 5.1.4 隧洞洞外 GNSS 控制网设计应符合以下规定：
- a) 控制网应根据设计目的、预期精度、作业时卫星的可见性、成果的可靠性等条件进行设计；

- b) 控制网应由一个或若干个独立观测环构成。各等级控制网同步图形之间的连接应采用边联式或网联式。各等级控制网应布设成三角形网或大地四边形网；
- c) 首级控制网应与国家等级控制点建立联系。

5.1.5 洞外 GNSS 控制网应根据洞外控制测量精度估算隧洞横向贯通中误差，验算洞外控制测量的横向贯通误差影响值。GNSS 控制测量误差引起的隧洞横向贯通中误差宜按以下方法估算：

- a) 控制测量前，按公式（1）估算测量设计时的验前横向贯通中误差：

$$M^2 = m_J^2 + m_C^2 + \left(\frac{L_J \sin \theta \times m_{\alpha_J}}{\rho} \right)^2 + \left(\frac{L_C \sin \varphi \times m_{\alpha_C}}{\rho} \right)^2 \dots\dots\dots (1)$$

式中：

M_J 、 M_C ——进、出口 GNSS 控制点坐标误差在贯通面上的投影长度；

L_J 、 L_C ——进、出口 GNSS 控制点至贯通点的长度；

m_{α_J} 、 m_{α_C} ——进、出口 GNSS 联系边的方位角中误差；

θ 、 φ ——进、出口控制点至贯通点连线与贯通点线路法线的夹角。

- b) 控制测量前，采用基于 GNSS 网坐标协因数阵的隧洞横向贯通误差预计法进行横向贯通误差估算，方法详见附录 A。
- c) 控制测量后应按公式（2）估算控制测量的验后横向贯通中误差，验后横向贯通误差应符合本文件表 2 的规定。

$$M^2 = \sigma_{\Delta x}^2 \cos^2 \alpha_F + \sigma_{\Delta y}^2 \sin^2 \alpha_F + \sigma_{\Delta x \Delta y} \sin 2\alpha_F \dots\dots\dots (2)$$

式中：

$\sigma_{\Delta x}$ 、 $\sigma_{\Delta y}$ 、 $\sigma_{\Delta x \Delta y}$ ——由进、出口推算至贯通点的 x、y 坐标差的方差和协方差；

α_F ——贯通面方位角。

5.1.6 隧洞洞外高程控制测量误差产生的高程贯通中误差应按公式（3）计算：

$$M_{\Delta h} = M_{\Delta} \sqrt{L} \dots\dots\dots (3)$$

式中：

$M_{\Delta h}$ ——洞外高程控制测量误差产生的高程贯通中误差（mm）；

M_{Δ} ——每千米水准测量偶然中误差（mm）；

L ——洞外高程路线长度（km）。

5.1.7 洞外控制网的布设应符合以下规定：

- a) 洞外平面控制网应沿两洞口连线方向布设成多边形组合图形，构成闭合检核条件。进、出口控制点应以直接观测边连接，构成长边控制网，增强图形强度；
- b) 控制点应布设在视野开阔、通视良好、土质坚实、不易被破坏的地方；
- c) 观测视线应距离障碍物 1 m 以上。通过水域、沙滩时，应适当增加视线高度；
- d) 地形困难、树林茂密的山岭测站，场地应进行清理和平整，以利于观测；

e) 点位应远离大功率无线电发射源(如电视台、微波站等) 200 m 以上, 远离高压电 50 m 以上。

5.1.8 洞口控制点布设除应符合本文件第 5.1.7 条规定外, 还应符合以下规定:

- a) 每个洞口(含: 进出口、支洞口或竖井口)平面控制点不应少于 3 个;
- b) 布设洞口控制点时, 应考虑有利施工放样和便于向洞内传递坐标和高程等因素。向洞内传递方位的洞外联系边长度宜大于 500 m, 困难时不宜短于 300 m;
- c) GNSS 洞外控制点间高度角不宜大于 3°, 洞外控制点与进洞点间的高度角不宜大于 5°;
- d) 洞口 GNSS 控制点应方便用常规测量方法检测、加密、恢复和向洞内引测;
- e) 洞口附近的水准点宜与隧洞洞口基本同高, 便于保护和联测。

5.1.9 利用原控制点增设新点时, 应对原控制点进行检测, 检测精度不应低于原测精度, 检测与原测较差应符合以下规定:

- a) 平面控制点角度、边长、点位检测较差的限差应按公式(4)计算:

$$f_{\text{限}} = 2\sqrt{m_1^2 + m_2^2} \dots\dots\dots (4)$$

式中:

m_1 、 m_2 ——分别为原测和检测的测边、测角、点位中误差。

- b) 利用原水准点增设新点时, 应检测相邻测段高差或相邻水准点间的高差。测段高差的检测限差应符合本文件表 5 的规定;
- c) 当检测与原测成果较差满足限差要求时, 采用原测成果; 不满足限差要求时, 应分析超限原因。确因点位位移, 应逐级检测至稳定控制点。

5.1.10 洞外平面控制点标志宜埋设为具有强制对中基座的混凝土观测墩或带有底盘的混凝土标石, 洞外高程控制点应埋设带有底盘的混凝土标石, 并按附录 B 的要求绘制点之记, 并拍摄近景、远景照片。

5.2 平面控制测量

5.2.1 长距离水工隧洞洞外平面控制网应根据隧洞长度、平面形状、洞口位置以及隧洞工程沿线自然地理及交通等条件采用 GNSS 网、边角网、GNSS+边角混合网等网型。长距离水工隧洞洞外平面控制网宜布设成 GNSS 网, GNSS 网的布设除应符合本文件第 5.1.7 条、第 5.1.8 条的要求外, 还应符合以下规定:

- a) GNSS 控制网由洞口子网和子网之间的联系主网组成。洞口子网宜布设成大地四边形或三角形网, 进洞联系边为直接观测边。洞口间联系网宜布设成大地四边形。当洞口子网采用 GNSS 方法测量困难时, 采用 GNSS 方法测量一条定向边, 洞口子网的其他控制点采用全站仪测量;
- b) 洞口控制点的数量不应少于 3 个, 且至少有一个与洞口通视良好, 定向边和洞口宜位于同一高程面上;
- c) 隧洞进洞联系边测量的后视方向不得少于 2 个;
- d) 点位宜选在安置仪器方便、顶空开阔地带, 视场内障碍物的高度角不宜超过 15°。

5.2.2 长距离水工隧洞洞外平面控制网采用 GNSS 控制网时, 视支洞的分布、位置、支洞间的开挖长度以及地形地貌条件等因素综合考虑, 按一级或分两级布设。两级布设时, 第一级为控制各个洞口间相对位置关系的首级平面控制网, 首级平面控制网由每个洞口的一个(或两个)主洞口控制点和联测的两至三个国家 B 级及以上 GNSS 点组成, 首级平面控制网的精度应该按照“《全球定位系统(GPS)测量规范》GB/T 18314”中 B 级网的技术要求与精度进行网形设计和观测; 第二级网为以第一级控制网点作为起始点, 分段联测各个洞口的 GNSS 控制点构成的加密 GNSS 控制网, 加密 GNSS 控制网按照二等 GNSS 网技术要求和精度进行网形设计和施测。

- 5.2.3 长距离水工隧洞的首级平面控制网宜采用工程独立坐标系统。工程独立坐标系投影变形值不宜大于 25 mm/km，中央子午线的经度宜选取进出口经度的均值。投影面高程应为隧洞设计洞底高程的平均值。
- 5.2.4 首级和加密的洞外 GNSS 控制点埋设规格应符合本文件附录 C 的规定。
- 5.2.5 首级网执行 B 级 GNSS 技术要求，加密网执行二等 GNSS 网技术要求，首级网与加密网施测按表 3 技术要求规定执行。

表 3 B 级和二等 GNSS 控制网外业观测技术要求

项 目	等级	
	B级网	二等GNSS网
接收机类型	双频	双频
固定误差/mm	5	5
比例误差系数/mm/km	1	2
卫星截止高度角/°	10	15
同时观测有效卫星总数	≥20	≥5
观测时段数	≥3	≥2
时段长度/min	≥1380	≥180
采样间隔/s	30	15
GDOP	≤6	≤6
最弱边相对精度	1/1000000	1/150000

- 5.2.6 GNSS 观测外业记录应符合以下规定：
- 记录项目应包括以下内容：
 - 测站点名、观测日期、天气情况、时段号、记录员姓名；
 - 观测的开始和结束时间；
 - 接收机类型及其出厂编号、天线型号；
 - 天线高量测值。
 - 记录项目应在现场记录，字迹清楚、整齐；
 - 外业各时段观测结束后，应及时将外业观测记录结果录入计算机。接收机内存数据文件在录入计算机时，不得进行编辑、修改。
- 5.2.7 GNSS 控制网相邻点间基线长度中误差按公式（5）计算：

$$\sigma = \pm \sqrt{\alpha^2 + (b \times d)^2} \dots\dots\dots(5)$$

式中：

α ——固定误差（mm）；

b ——比例误差系数（mm/km）；

d ——相邻点间距离（km）。

- 5.2.8 首级和加密的洞外 GNSS 控制网外业观测结束后，应采用长基线解算软件和精密星历进行首级网的解算，采用商用软件或其他经过评审的商用软件进行加密网的基线解算，当地面控制点两点间距大于 20km 时应采用精密星历进行基线解算。
- 5.2.9 基线解算完毕后，应该按以下标准判断基线质量是否满足要求：
- 同一时段基线观测值的数据剔除率不大于 10 %；

- b) 重复观测的基线长度较差应满足： $|d_s| \leq 2\sqrt{2}\sigma$ ；
- c) 异步环坐标分量闭合差和环线全长闭合差符合公式（6）规定：

$$|w_x|, |w_y|, |w_z| \leq 3\sqrt{n}\sigma; |w| \leq 3\sqrt{3n}\sigma \dots\dots\dots (6)$$

式中：

w_x, w_y, w_z ——异步环坐标分量闭合差；
 n ——异步环的边数；
 w ——异步环全长闭合差。

5.2.10 当首级网和加密 GNSS 网的所有基线向量检核符合要求后，应以三维基线向量及其方差-协方差阵作为观测信息，以一个点的 CGCS2000 大地坐标系或 ITRF 坐标框架或 WGS-84 坐标系的三维坐标为起算数据，进行三维无约束平差，并提供空间直角坐标、基线矢量及其改正数和精度信息。无约束平差的基线向量改正数绝对值应符合公式（7）要求：

$$\begin{aligned} V_{\Delta X} &\leq 3\sigma \\ V_{\Delta Y} &\leq 3\sigma \dots\dots\dots (7) \\ V_{\Delta Z} &\leq 3\sigma \end{aligned}$$

式中：

σ 按公式（5）计算，其中 $\alpha、b$ 应符合表3中相应等级规定， d 取各时段基线长度平均值（以km为单位计算）。

5.2.11 三维无约束平差后，应对控制网进行三维约束平差或二维约束平差。首级网进行三维约束平差和固定一点一方位的二维约束平差，加密网进行二维约束平差。约束点平差后边长相对精度应满足本文件表 3 的规定，二维约束平差后相邻支洞口的点位中误差转换为贯通纵、横向中误差应小于本文件表 2 中地面贯通中误差的规定。

5.3 高程控制测量

5.3.1 长距离水工隧洞洞外高程控制网等级应根据洞外地形地貌条件、交通通行和隧洞的设计比降等因素综合考虑选取测量等级。

5.3.2 长距离水工隧洞各个洞口宜布设至少 3 个洞外高程控制点，形成洞口子网，除此之外，宜在隧洞轴线附近联测高等级国家水准点。

5.3.3 洞外高程控制点应该布设在洞口附近便于向洞内引测、点位稳定和不容易被施工破坏的地方，尽量选在与洞口等高的位置。洞外高程控制点应按附录 C 的要求埋设。

5.3.4 长距离水工隧洞洞外高程控制测量宜采用水准测量方法，在困难条件下不易进行水准测量时，宜采用精密光电测距三角高程测量。

5.3.5 高程控制测量路线选择应符合以下规定：

- a) 水准路线宜根据隧洞进出口间的地形地貌起伏情况、交通情况遴选；
- b) 光电测距三角高程测量路线宜避开大面积水域、荒漠、公路、铁路等，尽量沿隧洞中线遴选。

5.3.6 洞外高程控制网的精度指标应符合表 4 的规定。

表 4 二等水准测量整网的精度控制指标

水准测量等级	每千米高差偶然中误差 M_{Δ} /mm	每千米高差全中误差 M_W /mm	附和路线或环线周长的长度/km	
			附和路线长	环线周长
二等	≤1	≤2	≤400	≤750

表 4 中， M_{Δ} 和 M_W 应分别按公式（8）和式（9）计算：

$$M_{\Delta} = \sqrt{\frac{1}{4n} \left[\frac{\Delta\Delta}{L} \right]} \dots\dots\dots (8)$$

$$M_W = \sqrt{\frac{1}{N} \left[\frac{WW}{L} \right]} \dots\dots\dots (9)$$

式中：

Δ ——测段往返高差不符值（mm）；

L ——段长或环线长（km）；

n ——测段数；

W ——附和或环线闭合差（mm）；

N ——为水准路线环数。

5.3.7 二等水准测量限差应符合表 5 的规定。

表 5 二等水准测量限差要求

单位为 mm

水准测量 等级	测段、路线往返测 高差不符值		检测已测测段高差 之差	附和路线或环线闭合差	
	平原	山区		平原	山区
二等	$\pm 4\sqrt{K}$	$\pm 0.8\sqrt{n}$	$\pm 6\sqrt{R_i}$	$\pm 4\sqrt{L}$	
注 1: K 为测段路线长度, R_i 为检测测段长度, L 为水准路线长度, 单位均为 km ; n 为测段测量站数; 注 2: 当山区高程测量每公里测站数 $n \geq 25$ 站以上时, 采用测站数计算高差测量限差。					

5.3.8 二等水准观测的主要技术要求应符合表 6 的规定。

表 6 二等水准测量测站观测技术要求

单位为 m

等级	水准仪最低型号	水准尺类型	视距	前后视距差	测段的前后视距累积差	视线高度	数字水准仪重复测量次数
			数字	数字	数字	数字	
二等	DS1	因瓦	≥3 且 ≤50	≤1.5	≤6.0	≤2.8 且 ≥0.55	≥2 次

5.3.9 水准测量应采用相应等级的数字水准仪及其自动记录功能采集数据。

5.3.10 水准测量所使用的水准仪和水准尺，应在每个项目作业前进行检验。

- 5.3.11 水准测量与国家水准点附合时，所采用的高差根据实际情况进行水准标尺长度、水准标尺温度、正常水准面不平行、重力异常等计算改正。
- 5.3.12 二等水准测量的观测方法应符合表 7 的规定。

表 7 二等水准测量的观测方法

等级	观 测 方 式		观测顺序
	与已知点联测	附和或环线	
二等	往返	往返	奇数站：后-前-前-后
			偶数站：前-后-后-前

- 5.3.13 二等水准观测的测站限差应符合表 8 的规定。

表 8 二等水准测量的测站限差

单位为 mm

等 级	项 目		
	同一标尺两次读数之差	同一测站前后标尺两次读数高差之差	检测间歇点高差之差
二等	0.4	0.6	1

- 5.3.14 水准观测中，测站观测限差超限，在本站观测时发现，应立即重测；迁站后发现，则应从水准点或间歇点开始重测。
- 5.3.15 精密光电测距三角高程测量可用于困难地区代替二等水准测量，所使用的全站仪应具有自动目标搜索、自动照准（ATR）、自动观测、自动记录功能，仪器标称精度应不低于 $\pm 0.5''$ 、 $\pm 1\text{mm} + 1 \times 10^{-6}D$ 。全站仪使用前需进行检校并在检校有效期内使用。
- 5.3.16 精密光电测距三角高程外业测量宜采用具有自动控制全站仪采集数据的数据采集软件。数据处理软件采用经专业评审的精密光电测距三角高程数据处理软件，能自动化对测量数据进行处理。
- 5.3.17 精密光电测距三角高程观测时应采用两台同精度智能型全站仪同时对向观测，观测距离宜小于 500 m，竖直角不宜超过 10° 。
- 5.3.18 精密光电测距三角高程测量观测的主要技术要求应符合表 9 的规定。

表 9 精密光电测距三角高程测量观测的主要技术要求

等级	边长/m	测回数	指标差较差/″	测回间垂直角较差/″	测回间测距较差/mm	测回间高差较差/mm
二等	≤100	2	±5	±5	±3	±4√S
	100~500	4				
	500~800	6				
	800~1000	8				
注：S为视线长度，单位为km。						

- 5.3.19 精密光电测距三角高程测量应采用往返观测，观测中应测定干、湿温和气压。气温读至 0.5°C ，气压读至 1.0 hPa。并在斜距中加入气象和仪器加、乘常数改正。气温、气压观测应符合以下规定：
- a) 测距边的气象改正应按仪器说明书给出的公式计算，精确的气象改正应按《中、短程光电测距规范》GB/T 16818 中的公式进行计算；
 - b) 气温和气压应在测站和反射镜站分别测记。
- 5.3.20 精密光电测距三角高程测量其他精度指标应满足本文件表 4、表 5 的规定。
- 5.3.21 洞外高程控制测量路线跨越江河、湖海及深沟时，应采用跨河水准方法测量。

- a) 宜采用精密光电测距三角高程测量方法构成大地四边形网进行跨河水准测量,精密光电测距三角高程跨河测量外业观测除应满足表 9 的技术要求外,观测的测回数 and 组数还应符合表 10 的规定;

表 10 精密光电测距三角高程法跨河水准测量观测的测回数 and 组数

等级	边长/m	双测回数	半测回组数
二等	≤300	2	2
	301~500	4	2
	501~800	6	4
	801~1000	8	4

- b) 各双测回间高差互差限值按公式 (10) 计算:

$$dH_{\text{限}} = 4 \cdot M_{\Delta} \sqrt{N \cdot S} \dots\dots\dots (10)$$

式中:

$dH_{\text{限}}$ ——测回间高差互差限值 (mm);

M_{Δ} ——相应等级的每千米水准测量偶然中误差 (mm);

N ——双测回的测回数;

S ——跨河视线长度 (km)。

- c) 由平行四边形或梯形的四边形组成的独立闭合环,用同一时段的各条边高差或各时段高差均值计算的闭合差 W 限值应按公式 (11) 计算:

$$W = 6 \cdot M_w \cdot \sqrt{S} \dots\dots\dots (11)$$

式中:

M_w ——每千米水准测量相应等级的全中误差限值 (mm);

S ——跨河视线长度 (km)。

- 5.3.22 洞外高程控制测量外业工作结束后,应进行观测数据质量检核。检核的内容包括:测站数据、测段高差数据,附和路线和环线的高差闭合差。数据质量合格后进行平差计算。
- 5.3.23 洞外高程测量结束后,应计算每千米水准测量偶然中误差 M_{Δ} 。当高程控制网的附和路线或环线超过 20 个时,应计算每千米水准测量全中误差 M_w 。
- 5.3.24 测量成果的重测与取舍应符合下列规定:
- a) 测段往返测高差不符值超限时,应先就可靠程度较小的往测或返测进行整段重测;
- b) 由测段往返测(左、右路线)高差不符值计算的每千米水准测量偶然中误差 M_{Δ} 超限时,应重测不符值较大的测段。
- 5.3.25 高程控制网应采用严密平差方法进行整体平差,并计算各点的高程中误差。

5.4 成果资料提交

- 5.4.1 原始观测记录和计算成果应记录真实、注记明确、计算清楚和格式统一。纸质成果应装订成册,电子成果应拷贝或刻录光盘并做好记录。两种成果均应长期保管。

5.4.2 原始观测和记事项目应在现场记录清楚，注明观测者、记录者、观测日期、起止时间、气象条件、使用的仪器等。纸质记录不得涂改或补记，各记录须编列页次。

5.4.3 洞外 GNSS 平面控制测量数据的取位应符合表 11 的规定。

表 11 GNSS 平面控制测量数据取位要求

控制网等级	基线向量/mm	点位中误差/mm	点位坐标/mm
B级/二等	0.1	0.1	0.1

5.4.4 洞外高程控制测量数据取位应符合表 12 的规定。

表 12 二等高程控制测量数据取位要求

等级	往（返）测距离总和/km	往返测距离中数/km	各测站高差/mm	往（返）测高差总和/mm	往返测高差中数/mm	高程/mm
二等	0.01	0.1	0.01	0.01	0.1	0.1

5.4.5 提交的测量成果应包含以下内容：

- a) 技术设计书；
- b) 仪器设备检定证书；
- c) 平差计算书；
- d) 控制点点之记；
- e) 控制点成果表；
- f) 控制网示意图；
- g) 外业观测数据电子文件；
- h) 外业测量点号、仪器编号、日期、时间、天线高等外业记录表；
- i) 技术总结；
- j) 成果质量最终检查报告。

6 联系测量

6.1 一般规定

6.1.1 长距离水工隧洞施工过程中的联系测量，包括：洞口、正洞与支洞、竖井的平面和高程联系测量。

6.1.2 联系测量应在良好的外界观测条件下采用技术手段先进、可靠、经济合理的方法，严格按照规定的技术要求进行各类联系测量。

6.1.3 平面联系测量分别采用标称精度不低于± 1″、±1mm +1×10⁻⁶D 的全站仪、5″的陀螺仪等；高程联系测量使用标称精度不低于 DS1 的水准仪和经过检定的钢尺等。

6.2 平面联系测量

6.2.1 平面进洞联系测量应选择在夜间或阴天和洞内施工间隙进行。有条件时，选择洞内外温差较小的季节进行测量。测量时，宜停止通风，视线尽量远离地面、风机、风管及洞口附属建筑物。联系测量次数应进行 2 次，取 2 次测量成果的平均值。

6.2.2 长距离水工隧洞平面联系测量，应采用构网方式。

6.2.3 平面联系测量涉及到的洞外 GNSS 控制点、进洞联系点和洞内控制点，宜采用强制对中装置。

6.2.4 平面进洞联系测量的洞外控制点，宜选择洞口附近的首级控制网点或图形强度较好的加密洞口控制点。

6.2.5 洞外平面控制点至少应有两个与洞口传递控制点通视良好，且定向边平均高程宜与洞口高程大致相同，定向边的长度宜大于 600 m。

6.2.6 进洞平面控制联系测量前，应采用全站仪同精度检测平面联系测量涉及到的洞外控制点间的水平角和水平距离的精度。利用洞外控制点坐标反算的水平角和水平距离，与全站仪检测的对应水平角和水平距离的较差，应符合表 13 的规定。

表 13 洞外控制点坐标反算与全站仪检测的角度和边长较差限差

相向开挖长度/km	角度较差/″	边长较差/mm
20~50	3	$\sqrt{2}\sigma$
10~19	4	
1~9	5	
注1：表中σ按照本文件公式（5）计算。		
注2：全站仪检测的距离在经过各项改正后，应两化改正到工程独立坐标系的投影面后再进行距离较差计算。		

6.2.7 进洞平面控制联系测量应采用固定测站分别后视两个定向边直接进洞、固定测站与自由测站相结合构网等方法进行。

6.2.8 在洞口无法设置进洞联系测量控制点或其点位受到施工影响的情况下，可采用双自由测站测量方法进行构网进洞平面联系测量。

6.2.9 当支洞与正洞直线交接的情况下，可采用交叉导线测量构网方法进行平面联系测量，其网形示意图见图 1。

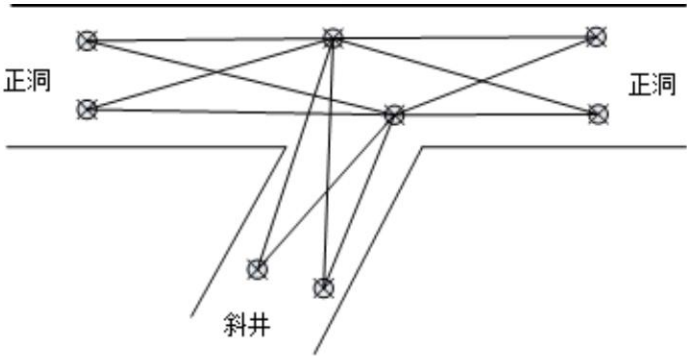


图 1 支洞与正洞直交时平面联系测量网形示意图

6.2.10 支洞与正洞曲线交接且交接处存在短边的情况下，宜采用短边强制对中的交叉导线测量方法进行构网平面联系测量，

6.2.11 采用竖井进行施工时，竖井定向测量可采用垂准仪和陀螺仪联合定向、联系三角形定向等方法。

6.2.12 垂准仪与陀螺经纬仪联合定向测量应符合以下要求：

- a) 井上、井下定向测量应与井上、井下趋近导线测量连续进行。从井上近井点通过竖井定向，传递到井下近井点的坐标相对井上近井点的限差应不大于 $\pm 5\text{ mm}$ ；
- b) 井下陀螺经纬仪定向边不应少于 2 条，并应对井下定向边之间的角度进行检核；
- c) 垂准仪投点应符合下列规定：
 - 1) 垂准仪的支承台架与观测台应严格分离；

- 2) 水准仪的旋转纵轴应与棱镜旋转轴同轴，其偏心误差应小于 0.2 mm；
 - 3) 投点时，至少应分别在 180°方向上两镜位对点。每一镜位至少应分别在 180°方向上两镜位投点，取中确定投点位置，以减弱对点和投点误差；
 - 4) 全站仪独立三测回测定水准仪纵轴的坐标互差应小于 3 mm。
- 6.2.13 陀螺仪定向测量应符合本文件 7.4 节的相关规定。
- 6.2.14 联系三角形定向测量应符合以下规定：
- a) 常规联系三角形法可采用悬挂两根垂球线并在垂球线上合适位置粘贴塑料反射片的方法，进行竖井进洞平面联系测量，其场地布设及其测量网形见图 2。图中测点 T1、T2、T1'、T2'为粘贴在垂球线上的塑料反射片，为确保 T1、T1'和 T2、T2'在同一铅垂线上，垂线下方应施加适当重量的垂球；

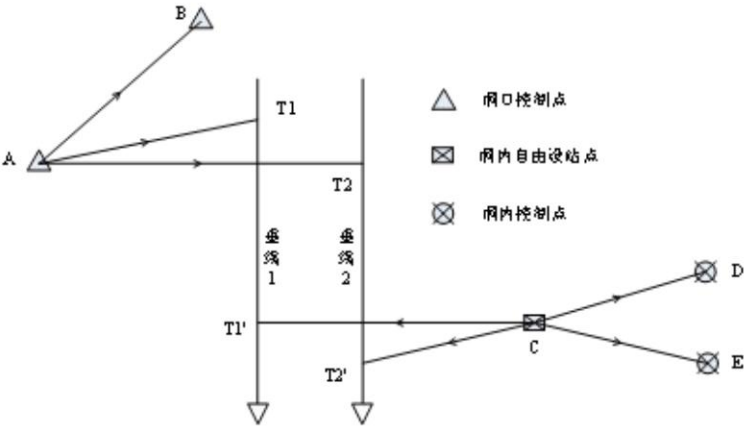


图 2 竖井进洞平面联系测量场地布设及其网形示意图

- b) 按 6.2.14 要求布设时，两悬吊钢丝间的距离不应小于 5 m，井上、井下测站点至两钢丝方向的夹角宜小于 1°，井上、井下测站点至两钢丝间的距离之比宜小于 1.5；
 - c) 竖井平面进洞联系测量施测时，近井洞外控制点 A 上的全站仪后视另一个洞外控制点 B 后盘左盘右实测 T1、T2 点的坐标，洞内自由设站点 C 上的全站仪通过 T1'、T2'点的坐标进行自由设站测量后，实测洞内控制点 D、E 的坐标。竖井进洞平面联系测量每处至少应独立测量三测回，每测回读数三次，三个测回实测的洞内控制点 D、E 的坐标较差应小于 1 mm，合格后取平均值作为最终成果。
- 6.2.15 平面联系测量时各类测站（包括固定测站、自由测站、短边强制对中测站，以及竖井平面联系测量中的井上测站）上的全站仪，应采用多测回全圆方向距离观测法进行水平方向和水平距离测量。
- 6.2.16 平面联系测量时采用多测回全圆方向距离观测法，各个时段施测时应符合表 14 和表 15 的技术要求。

表 14 平面联系测量全圆方向距离观测法水平方向观测技术要求

等级	仪器等级	测回数	半测回归零差/″	2C 互差/″	同一方向各测回互差/″
二等	0.5″级仪器	6	4	6	4
	1″级仪器	9	6	9	6
注1：2C互差指同一测回不同方向的2C互差；					
注2：50m以下短边归零差、2C互差和方向值互差可不按照上表中指标执行。					

表 15 平面联系测量全圆方向距离观测法距离观测技术要求

等级	测回	半测回间距离较差/mm	测回间距离较差/mm
二等	≥3	2	3

6.2.17 平面联系测量的水平方向和水平距离观测值,应与洞内平面贯通控制网中的观测值一起进行构网严密平差和精度评定。

6.3 高程联系测量

6.3.1 有支洞的长距离水工隧洞,在支洞与正洞交会处,应按照二等水准测量的精度进行高程联系测量,以构成闭合水准路线进行洞内高程贯通控制网的高程闭合差检核。

6.3.2 设有竖井的长距离水工隧洞,应在竖井处进行竖井高程联系测量。宜采用悬挂钢尺(钢丝)水准测量的方法或全站仪导高法进行竖井高程联系测量。

6.3.3 高程联系测量应符合以下规定:

- 高程传递测量应与井上、井下趋近水准测量同时进行;
- 用于高程传递的近井高程点不应少于 2 个,以检核井下高程传递结果。

6.3.4 采用悬挂钢尺(钢丝)法传递高程应符合以下要求:

- 井上和井下安置的两台水准仪应同时读数,悬吊钢尺用的重锤重量应与钢尺检定时的重量相同;
- 每次应独立观测三测回,每测回应变动仪器高度,三测回测得井上、井下水准点的高差较差应小于 3 mm;
- 各测回测定的高差应进行温度和尺长改正。当井深超过 50 m 时,应进行钢尺自重张力改正。

6.3.5 采用全站仪导高法传递高程应符合以下规定:

- 将全站仪安置在井下投点处,在井上投点处安置棱镜,测量井下投点至井上棱镜间的高差;
- 在井上水准点处架设棱镜,在距离水准点和井上投点距离大致相同处安置全站仪,采用全站仪中间法三角高程测量水准点至井上投点间的高差;
- 全站仪导高应独立测量不少于两次,其互差不应大于 $H/10000$, H 为传递高差。

6.4 成果资料提交

长距离水工隧洞各处平面和高程联系测量施测后,应及时整理和提交以下成果资料:

- 联系测量场地及其测量网形示意图;
- 联系测量原始观测资料(包括测量仪器自动记录的原始观测值和人工记录的原始观测值,竖井联系测量时允许进行人工表格记录);
- 联系测量计算资料;
- 联系测量技术总结。

7 洞内控制测量

7.1 一般规定

7.1.1 长距离水工隧洞洞内控制测量包括洞内平面控制测量和高程控制测量。应根据洞口间相向开挖长度对应做横向、竖向贯通中误差的估算,确定洞内平面和高程控制测量的精度等级。

7.1.2 洞内控制测量包括贯通控制测量和施工控制测量,平面施工控制网应每 200 m~500 m 附合在平面贯通控制网上,高程施工控制网应每 1000 m 左右附合在高程贯通控制网上。

- 7.1.3 洞内平面贯通控制测量每 200 m～500 m 沿隧洞纵向布设一对控制点，点对的横向间距为 1m～L m（L 最大值为隧洞横向设计宽度）。洞内高程贯通控制测量每 1000 m 左右沿隧洞纵向布设一个控制点。洞内高程贯通控制点与平面贯通控制点点位相近时可以共桩。
- 7.1.4 洞内平面贯通控制测量可以采用交叉导线网法、导线环网法或自由测站边角交会网法施测，要求测量用的全站仪为智能型全站仪。
- 7.1.5 洞内高程贯通控制测量应采用几何水准测量方式，水准测量应采用电子水准仪和配套的因瓦条码尺进行，电子水准仪的标称精度不低于 DS1。
- 7.1.6 洞内平面控制测量用的全站仪在观测前须按要求进行检校，作业期间全站仪须在有效检定期内。如果经过检定认为全站仪的加乘常数显著，则应对洞内平面贯通控制网中的斜距进行加乘常数改正。
- 7.1.7 长距离水工隧洞洞内平面贯通控制测量在方案设计时，应进行洞内控制网测量误差引起的横向贯通误差仿真计算，预计的洞内横向贯通误差应小于表 1 的规定。洞内横向贯通误差仿真计算时，应考虑进洞联系点的起算数据误差、平面联系测量误差、全站仪和棱镜对中误差（自由测站边角交会网除外）、水平方向和水平距离观测误差等因素的影响。
- 7.1.8 长距离水工隧洞洞内平面、高程贯通控制点在隧洞施工期间应妥善保护，确保其稳定性。
- 7.1.9 长距离水工隧洞洞内控制测量应随施工掘进距离分期、分段布设。洞内控制网在下一段延伸测量前，应对搭接的原控制点点位稳定性及其精度进行检测。在隧洞贯通前，应进行不少于 2 次的洞内控制网复测，采用历次成果加权平均值作为最新采用成果。

7.2 洞内平面控制测量

- 7.2.1 长距离水工隧洞应根据相向开挖长度确定洞内平面贯通控制测量的精度，并符合表 16 规定。

表 16 长距离水工隧洞洞内平面贯通控制测量精度要求

相向开挖长度/km	精度等级	测角中误差/″	最弱边相对中误差	角度闭合差/″
20～50	二等	1.0	1/100000	$2.0\sqrt{n}$
注：相向开挖长度包括支洞或支洞的长度。				

- 7.2.2 长距离水工隧洞洞内平面贯通控制测量宜采用智能型全站仪交叉导线网法或导线环网法，控制点布设应满足 7.1.3 条的规定，具备条件时洞内平面贯通控制点宜布设成强制对中观测墩。
- 7.2.3 交叉导线网或导线环网中点对的横向距离 L 可以为 1m～2m，布设条件困难时点对宜布设在隧洞中线附近。
- 7.2.4 洞内交叉导线网观测网形如图 3 所示。洞内交叉导线网中各个闭合环的角度闭合差应满足表 16 的要求；网中边长进行往返观测，往返测平距较差应小于 $2(a+b\times D)$ （a 为全站仪的固定误差，单位为 mm；b 为全站仪的比例误差，单位为 mm/km）。

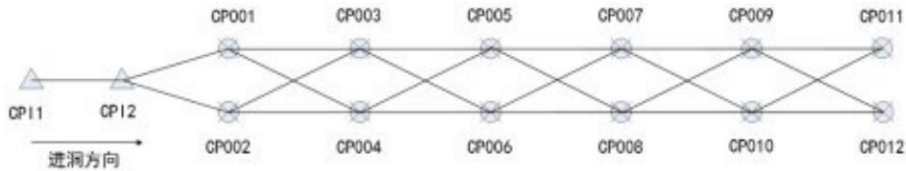


图 3 洞内交叉导线网观测网形示意图

- 7.2.5 洞内导线环网法观测网形如图 4 所示。每个环由 4 条～6 条边构成，各个环的角度闭合差应符合表 16 的要求；网中边长进行往返观测，往返测的平距较差应小于 $2(a+b\times D)$ 的要求。

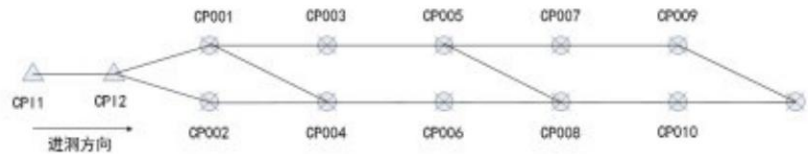


图 4 洞内导线环网观测网形示意图

7.2.6 长距离水工隧洞洞内平面贯通控制测量可采用智能型全站仪自由测站边角交会网法，沿隧洞纵向每 250 m~300 m 左右布设一对控制点，点对的横向间距与隧洞的设计横向宽度基本一致，控制点布设在隧洞两边侧壁，采用强制对中测量标志。

7.2.7 洞内自由测站边角交会网法观测网形如图 5 所示。外业观测时，全站仪自由测站架设在隧洞中线附近，对全站仪前后的两对控制点进行水平方向和水平距离的单程观测，侧壁上的控制点不架设仪器。相邻自由测站间的纵向间距为洞内相邻控制点间的纵向间距，除洞口附近的自由测站外，一般情况下每个自由测站均对测站前后的两对共 8 个控制点进行观测。

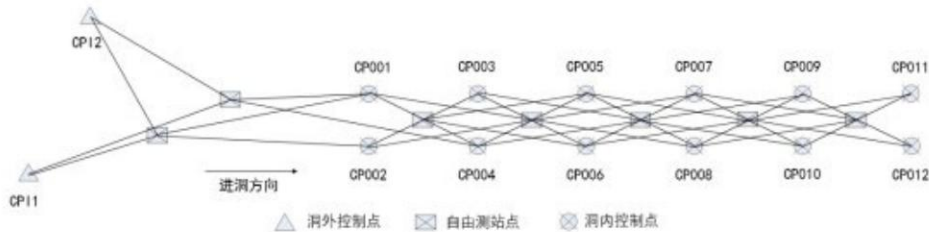


图 5 自由测站边角交会网观测网形示意图

7.2.8 洞内交叉导线网法、导线环网法或自由测站边角交会网法中每个测站上的水平方向和水平距离测量，应采用全站仪全圆方向距离交会法进行外业测量，测回数、半测回归零差、同一测回不同方向 2C 互差、不同测回同一方向归零后的方向值互差应符合表 14 的相关要求；同一测点盘左盘右的距离互差、不同测回同一测点的距离互差应符合 17 的相关要求。

表 17 全圆方向距离观测法距离观测技术要求

等级	测回数	半测回间距离较差/mm	测回间距离较差/mm
二等	与测角同步	2	3

注：距离测量一测回是指全站仪盘左、盘右各测量一次的过程。

7.2.9 洞内平面贯通控制网的严密平差及其精度评定，宜采用常规定权方法。并用方差分量估计定权方法对洞内平面贯通控制网进行平差计算复核，对贯通控制点的坐标较差及其精度差异应进行复核。

7.2.10 洞内平面贯通控制网平差的起算数据为洞口处（包括支洞口）平面联系测量时用到的洞外平面控制点的坐标及其方位角，使用前应检核洞外平面控制点的稳定性及其精度情况。

7.2.11 洞内平面控制网全站仪观测的边长应进行仪器加、乘常数、气象元素和倾斜等改正，干湿温度计读数精确至 0.5℃，气压计读数精确至 1.0 hPa。

7.2.12 洞内平面施工控制网延伸测量宜采用单导线等方法，但不宜过长，如图 6 所示。

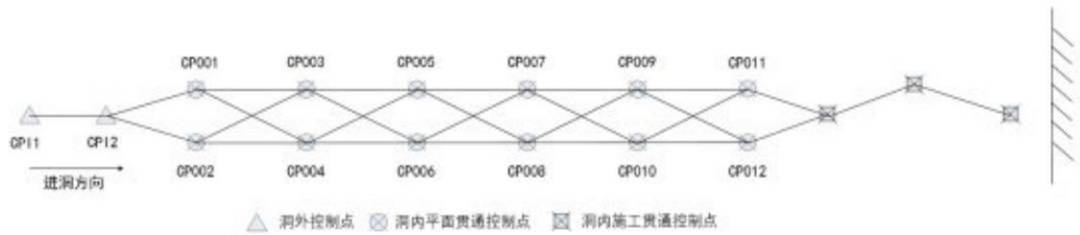


图 6 洞内平面贯通控制网与洞内平面施工控制网关系示意图

7.2.13 洞内平面贯通控制网延伸测量后，应采用延伸测量前洞内平面贯通控制网的原有观测数据，加上延伸测量后的观测数据，进行延伸测量后洞内平面贯通控制网的整体平差。

7.2.14 洞内平面贯通控制网中全站仪观测并经过气象、加乘常数改正后的斜距，应该按公式（12）计算其水平距离 D_p ：

$$D_p = S \times \cos(\alpha + f) \dots\dots\dots(12)$$

$$f = (1 - k) \frac{S \times \cos \alpha}{2R_m} \rho \dots\dots\dots(13)$$

式中：

S ——经气象及加、乘常数等改正后的斜距（m）；

α ——测距边垂直角观测值；

f ——地球曲率与大气折光对垂直角观测值的改正数；

k ——当地的大气折光系数；

$\rho=206265''$ ；

R_m ——地球平均曲率半径（m）。

7.2.15 洞内平面贯通控制网中测距边的验前精度评定，应按以下方法进行：

a) 控制网中测距边的验前单位权中误差 μ （mm），应按公式（14）计算：

$$\mu = \sqrt{\frac{[Pdd]}{2n}} \dots\dots\dots(14)$$

式中：

d ——各边往返测水平距离的较差（mm）；

n ——控制网中测距的边数；

P ——各边距离测量的先验权，其值为 $1/\sigma_{D_i}^2$ ； σ_{D_i} 为测距边的先验中误差，可按公式（15）全站

仪测距部分的标称精度计算：

$$\sigma_{D_i} = a + b \times s_i \dots\dots\dots(15)$$

式中:

a 、 b ——全站仪测距部分标称精度中的固定误差、比例误差系数,单位分别为 mm 和 mm/km;

s_i ——测距边长度 (km)。

b) 任一边的实际测距中误差 m_{D_i} (mm), 应按公式 (16) 计算:

$$m_{D_i} = \mu \sqrt{\frac{1}{P_i}} \dots\dots\dots (16)$$

式中:

P_i ——第 i 条边距离测量的先验权,按全站仪测距部分的标称精度计算。

7.2.16 当交叉导线网或导线环网中的闭合环总数 ≥ 20 个时,应按公式 (17) 计算洞内平面贯通控制网中水平角的测角中误差 m_β ("):

$$m_\beta = \sqrt{\frac{1}{N} \left[\frac{f_\beta \cdot f_\beta}{n} \right]} \dots\dots\dots (17)$$

式中:

f_β ——交叉导线网或导线环网中闭合环的角度闭合差 (");

N ——闭合环的个数;

n ——计算时闭合环中的角度个数。

7.2.17 对于交叉导线网或导线环网中的测距边,在往返测的水平距离较差满足要求且取往返测距离均值后的水平距离,以及自由测站边角交会网中测距边的水平距离,在平差前还应该按照以下方法进行两化改正,并用两化改正后的水平距离参与洞内平面贯通控制网的严密平差:

a) 归算到工程独立坐标系投影高程面上的测距边长度 D_1 (m), 应按公式 (18) 计算:

$$D_1 = D_0 \left(1 + \frac{H_0 - H_m}{R_A} \right) \dots\dots\dots (18)$$

式中:

D_1 ——测距边在测距边平均高程面上的平距 (m);

H_0 ——工程独立坐标系投影面高程 (m);

H_m ——测距边两端点的平均高程 (m);

R_A ——参考椭球体在测距边方向的法截弧曲率半径 (m)。

b) 测距边在工程独立坐标系高斯平面上的长度 D_2 (m), 应按公式 (19) 计算:

$$D_2 = D_1 \left(1 + \frac{Y_m^2}{2R_m^2} + \frac{\Delta y^2}{24R_m^2} \right) \dots\dots\dots(19)$$

式中：

Y_m ——测距边中点至中央子午线的横向距离（m）；

Δy ——测距边两端点的横坐标增量（m）；

R_m ——测距边中点处在工程椭球面上的平均曲率半径（m）。

- 7.2.18 洞内平面贯通控制网在进行间接平差后，应提供贯通控制点平差后的坐标及验后单位权中误差、点位中误差、边长相对中误差、控制边方位角中误差、点位误差椭圆参数和相对点位误差椭圆参数等精度信息。
- 7.2.19 长距离水工隧洞洞内每个贯通面贯通后，应及时在贯通面处设立实际横向贯通误差测量点，并利用贯通面两侧的洞内平面贯通控制点实测该贯通段的实际横向贯通误差。
- 7.2.20 长距离水工隧洞洞内各个贯通面贯通及其横向贯通误差满足要求后，应把进、出洞方向的平面贯通控制网连接成一个整网，并按表 14、17 技术要求进行连接段网中观测值的观测，在相关精度符合表 18 要求之后,进行洞内平面贯通控制网的整网平差，并用整网平差的成果指导洞内后续工程的施工。

表 18 洞内平面贯通控制网整网验前精度要求

相向开挖长度 /km	精度等级	测距中误差 /mm	测角中误差 /"	相邻点相对点位中误差/mm	导线全长相对闭合差限差	方位角闭合差限差/"
20~50	二等	3	1.0	4.0	1/140 000	$2.0\sqrt{n}$

- 7.2.21 长距离水工隧洞洞内各个贯通面贯通及形成洞内平面贯通控制网整网后,应进行附和路线方位角闭合差、导线全长相对闭合差等验前精度指标的检核，精度指标应符合表 18 的要求。
- 7.2.22 平面贯通控制网观测时应同时记录仪器高和棱镜高。

7.3 洞内高程控制测量

- 7.3.1 洞内高程控制测量包括洞内高程贯通控制测量和洞内高程施工控制测量，洞内高程贯通控制测量的等级为二等，洞内高程施工控制测量的等级为四等。
- 7.3.2 洞内高程贯通控制点与洞内平面贯通控制点位置相近时，两者可以共桩。
- 7.3.3 洞内高程贯通控制网平差的起算数据为洞口处（包括支洞口）高程联系测量时用到的洞外高程控制点的高程，使用前应检核洞外高程控制点的稳定性及其精度情况。
- 7.3.4 当掌子面距最近的高程贯通控制点距离大于 1 km 时,应及时按照二等水准测量方法及其技术要求进行洞内高程贯通控制网的延伸测量。
- 7.3.5 长距离水工隧洞洞内高程贯通控制网应结合地质条件、施工方法和施工进度进行定期复测。复测的方法、数据处理及其精度要求与原测相同。建立新一期的高程贯通控制点前，应按本文件第 5.3.7 条检测起算高程点。
- 7.3.6 在洞内高程控制测量中每个测段的往返测高差较差和每千米高差测量偶然中误差满足二等的限差要求后，可以根据起算点高程推算（近似平差）洞内各个高程控制点的高程。
- 7.3.7 长距离水工隧洞洞内每个贯通面贯通后，应实测该贯通段的实际竖向贯通误差。

7.3.8 长距离水工隧洞洞内各个贯通面贯通及其竖向贯通误差满足要求后，应把进、出洞方向的高程贯通控制网连接成一个整网（附合水准路线），在附合路线高差闭合差满足要求后，进行洞内高程贯通控制网的整网平差，并用整网平差的成果指导洞内后续工程施工。

7.3.9 支洞洞内高差或坡度较大可采用精密光电测距三角高程测量方法施测洞内二等高程控制测量。二等精密光电测距三角高程测量相关技术和精度要求，参照本文件 5.3 节“高程控制测量”中的相关规定。

7.4 陀螺方位边测量

7.4.1 长距离水工隧洞单向掘进每隔 3km 左右应采用不低于 5"级的高精度的陀螺仪加测定向边。

7.4.2 陀螺全站仪定向测量应符合以下规定：

- 地面已知边陀螺观测站应无明显震动、风流和交通、人流影响，并避开高压电磁场；地下定向边陀螺观测站应选择在施工影响区域外，定向边边长应大于 200 m，视线距隧洞边墙的距离应大于 0.5 m；
- 使用陀螺全站仪时，定向测量应采用“地面已知边—地下定向边—地面已知边”的测量程序。地面已知边、地下定向边的陀螺方位角测量每次应测三测回，测回间陀螺方位角较差应小于 15"；
- 测定仪器常数时地面已知边应与地下定向边的位置尽量接近，且应进行子午线收敛角改正；测前、测后测定的陀螺仪常数平均值的较差应小于 10"；
- 测量前应检查陀螺仪器常数的稳定状态；每次陀螺定向测量应在三天内完成；
- 使用悬挂带类陀螺全站仪进行陀螺方位角测量时，绝对零位偏移大于 0.5 格时，应进行零位校正；观测中的测前、测后零位平均值大于 0.05 格时，应进行零位改正；
- 采用磁悬浮陀螺测量时，纬度测量精度应不低于 0.1°。

7.4.3 陀螺全站仪作业注意事项：

- 陀螺定向测量时应尽量减少周围环境振动的影响，必要时可选用陀螺偏心观测；
- 测站应避开通风口和干扰大的位置，远离高压线及电磁场干扰；
- 启动陀螺马达达到额定转速之前和制动陀螺马达的过程中，陀螺灵敏部必须锁定状态，防止悬挂带导流丝受损伤；
- 在陀螺灵敏部处于锁定状态，马达又在高速旋转时，严禁搬动和水平旋转仪器；
- 陀螺仪在搬动时要防止颠簸和振动。

7.4.4 当陀螺边方位角与洞内导线边坐标方位角之差大于 $\pm 2\sqrt{2}m''$ 时，应进行分析检查，其中， m 为陀螺方位角中误差。

7.5 成果资料整理与提交

7.5.1 各个阶段洞内控制测量（包括洞内贯通控制测量、洞内施工控制测量、洞内控制网复测等）工作结束后，应及时提交以下资料并长期保存：

- 长距离水工隧洞洞内平面贯通控制测量技术设计方案；
- 洞内平面贯通控制测量误差引起的洞内横向贯通误差仿真平差报告；
- 智能型全站仪、电子水准仪洞内控制测量外业观测值电子手簿；
- 洞内平面贯通控制测量验前精度评定资料，包括各条边往返测距离较差统计表、根据往返测距离较差计算的测距单位权中误差和各个闭合环角度闭合差统计表等（分阶段提交）；
- 洞内高程控制测量验前精度评定资料，包括各个测段往返测高差较差统计表和根据测段往返测高差较差计算的每千米高差偶然中误差等（分阶段提交）；
- 洞内贯通控制网平差输入数据文件和平差报告（分阶段提交）；
- 洞内贯通控制网网形示意图（分阶段提交）；

- h) 洞内贯通控制测量技术总结报告（分阶段提交）；
- i) 以上资料的电子文档。

8 施工测量

8.1 一般规定

- 8.1.1 施工测量应包括下列内容：施工平面与高程控制测量、地下工程的施工放样、断面测量、中间验收及竣工验收等。
- 8.1.2 施工控制网布设应遵循因地制宜、技术经济合理、确保质量的原则。平面控制宜采用导线法施测，高程控制宜采用水准或光电测距三角高程方法施测。
- 8.1.3 光电测距边长应进行对向观测，并经气象、加常数、乘常数、周期误差、倾斜和投影各项改正。
- 8.1.4 在地下使用各类光电测距仪时，应特别注意仪器的防护，仪器及棱镜面上的水珠或雾气应及时擦拭干净。
- 8.1.5 放样测量作业结束后，应及时对放样点进行检查，并保存放样、检查记录。

8.2 平面控制测量

- 8.2.1 根据隧洞中掌子面向前推进的施工进度，及时沿隧洞纵向布设一个平面施工控制点，并按规定施测洞内平面施工控制网，施工控制测量宜按导线法施测。
- 8.2.2 洞内平面施工控制网采用支导线方法施测应附合在平面贯通控制点上，使用前应对平面贯通控制点进行点位稳定性及其精度的检核。施测用全站仪的标称精度不低于 $\pm 2''$ 、 $\pm 2\text{mm} + 2 \times 10^{-6}D$ 。
- 8.2.3 根据最新的洞内平面贯通控制网成果，可采用近似平差方法计算洞内施工控制点（支导线点）的坐标。
- 8.2.4 施工控制网的布设应满足开挖施工放样需要，根据隧洞开挖方法确定。
- 8.2.5 钻孔爆破法开挖宜每隔 50 m 左右布设 1 个导线点；掘进机开挖法宜根据掘进机导向系统测量窗口的布置位置和掘进机后配套的长度以及通视情况确定导线点位和间距。导线边视线距离设施不小于 0.2m。
- 8.2.6 为防止点位变动，控制点点位应定期检查复核。
- 8.2.7 按照一级导线的精度要求施测洞内平面施工控制网，一级导线的主要技术指标应符合表 19 的要求。

表 19 一级导线测量技术要求

导线长度/m	精度等级	测角中误差/''	测距相对误差	距离测量
<500	一级	4	1/20000	往返测各一次

- 8.2.8 可采用全圆方向距离观测法进行一级导线每个测站的水平方向和水平距离测量，一级导线的外业观测应符合表 20 的要求。

表 20 一级导线外业观测技术要求

精度等级	仪器等级	测回数	半测回归零差/''	2c 互差/''	同一方向值各测回互差/''
一级	1''级仪器	2	6	9	6
	2''级仪器	3	9	15	9

8.3 高程控制测量

- 8.3.1 洞内高程施工控制测量应采用四等水准或光电测距三角高程方法施测。

8.3.2 据隧洞中掌子面向前推进的施工进度，及时沿隧洞纵向每 50 m 左右布设一个高程施工控制点，当其 与洞内平面施工控制点位置相近时，两者也可以共桩。

8.3.3 洞内高程施工控制网采用支水准路线方法施测应 附合在高程贯通控制点上，如图 7 所示，施测前应对 高程贯通控制点进行点位稳定性及其精度的检核。支水 准路线中的各个测段高差应该进行往返测，往返测的 高差较差应该满足四等水准的限差要求。

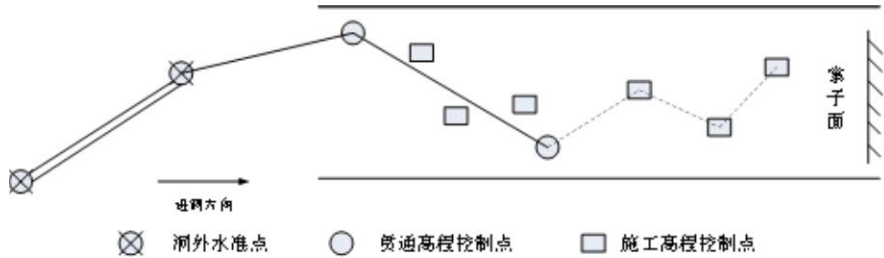


图 7 洞内高程贯通控制网与洞内高程施工控制网关系示意图

8.3.4 施工高程控制网主要技术要求见表 21。

表 21 高程控制网的技术要求

水准测量等级	每千米高差偶然中误差 M_{Δ}/mm	每千米高差全中误差 M_W/mm	附和路线长度/km	往返测不符值	附和路线或环线闭合差	检测已测测段高差之差
四等	≤ 5	≤ 10	$\leq 1\text{km}$	$\pm 20\sqrt{K}$	$\pm 20\sqrt{L}$	$\pm 30\sqrt{R_i}$

8.3.5 水准观测主要技术要求、观测方法及限差分别见表 22、表 23、表 24。

表 22 水准测量主要技术要求

等级	水准仪最低等级	水准尺类型	视距/m	前后视距差/m	测段的前后视距累积差/m	视线高度/m	数字水准仪重复测量次数
			数字	数字	数字	数字	
四等	DS1	因瓦	≤ 100	≤ 5.0	≤ 10.0	≥ 0.35	≥ 1 次
	DS3	因瓦	≤ 100				

表 23 水准测量的观测方法

等级	观测次数		观测顺序
	与已知点联测	附和或环线	
四等	往返/左右线路	往返/左右线路	后-后-前-前（或后-前-前-后）

表 24 水准观测的测站限差

等级	项 目	
	同一测站前后标尺两次读数高差之差/mm	检测间歇点高差之差/mm
四等	5	5

- 8.3.6 采用水准方法测量洞内施工高程控制网时，应采用数字水准仪及其自动记录功能采集数据。
- 8.3.7 采用光电测距三角高程测量方法时测量洞内施工高程控制网时，四等光电测距三角高程测量的限差应符合表 25 的规定。

表 25 光电测距三角高程测量限差要求

测量等级	对向观测高差较差 /mm	附和或环线高差 闭合差/mm	检测已测测段的高差 之差/mm
四等	$\pm 40\sqrt{D}$	$\pm 20\sqrt{\sum D}$	$\pm 30\sqrt{L_i}$
注：D为测距边长；L _i 为测段间累计测距边长，均以km计。			

- 8.3.8 光电测距三角高程测量观测的主要技术要求应符合表 26 的规定。

表 26 光电测距三角高程测量观测的主要技术要求

等级	仪器标称精度	观测方式	两组对向观测高 差的平均值 之较差/mm	测回数	测回间测距 较差/mm	指标差较差/"	测回间垂直 角较差/"
四等	$\leq 2''$ 、3mm+ $2\times 10^{-6}D$	对向观测	$\pm 20\sqrt{D}$	3	6	7	7

- 8.3.9 四等光电测距三角高程测量可按双程对向方法或单程双对向方法进行两组对向观测。
- 8.3.10 光电测距三角高程测量应满足以下要求：
- a) 光电测距三角高程测量可结合平面导线测量同时进行；
 - b) 仪器高和反射镜高量测，应在测前、测后各测一次，两次互差不得超过 2 mm；四等测量宜采用专用测尺或测杆量测；
 - c) 垂直角采用中丝法量测，对向观测应符合本文件表 27 的规定；
 - d) 距离观测时，应测定气温和气压。气温读至 0.5 ℃，气压读至 1.0 hPa，并加入气象改正；
 - e) 光电测距三角高程测量应选择成像稳定清晰时观测。
- 8.3.11 四等光电测距三角高程测量中，当一组对向观测高差较差超限，但对向观测高差平均值与另一组对向观测高差平均值较差满足本文件 8.3.8 条的要求时，取 2 组对向观测高差平均值的均值。

8.4 施工放样测量

- 8.4.1 地下工程细部放样轮廓点相对于洞轴线的点位限差，应符合以下规定：
- a) 开挖轮廓点放样限差为 50 mm；
 - b) 混凝土衬砌立模点放样限差为 20 mm。
- 8.4.2 钻孔爆破法开挖施工测量应符合以下规定：
- a) 开挖放样应以施工导线标定的轴线为依据，开挖过程中应安置激光指向仪或激光经纬仪标定中线；
 - b) 开挖放样应在掌子面上标定开挖轮廓特征点，必要时还应标出钻孔位置。对分层开挖的地下厂房等大断面洞室进行放样时，可只标定设计开挖轮廓特征点；

- c) 地下洞室混凝土衬砌放样,应以贯通后经调整配赋的洞室轴线为依据,在衬砌断面上标出拱顶、起拱线和边墙的设计位置,立模后应进行检查;

8.4.3 采用 TBM 全断面掘进机开挖施工测量应符合以下规定:

- a) 首先将地下基本导线或施工导线的坐标和高程引测至掘进机的激光导向系统,再以设计轴线指导掘进机的掘进方向;
- b) 为保证隧洞的准确贯通,对隧洞轴线应进行定期检测;
- c) 使用双护盾式掘进机施工时,开挖与衬砌平行作业,可只测绘混凝土衬砌竣工断面,断面测点相对于洞轴线的点位中误差不应超过 $\pm 20\text{mm}$ 。

8.4.4 支洞开挖放样可用坡面经纬仪直接测定轴线和平行腰高。若用经纬仪架设在轴线上按真伪倾角法测定平行腰高时,各点的垂直角 α' 可按公式(20)计算:

$$\alpha' = \arctan(\tan \alpha \cos \theta) \dots\dots\dots (20)$$

式中:

α ——支洞的设计垂直角, ($^{\circ}$);

θ ——支洞轴线至照准点方向的水平夹角, ($^{\circ}$)。

8.4.5 竖井开挖与衬砌测量放样可用重锤、激光投点仪或光学投点仪进行,开挖轮廓放样点相对于竖井轴线的测量限差不应超过 $\pm 50\text{mm}$;混凝土衬砌轮廓放样点相对于竖井轴线的测量限差不应超过 $\pm 20\text{mm}$ 。

8.4.6 在地下洞室混凝土衬砌过程中,应根据需要及时在两侧墙上埋设一定数量的铜质(或不锈钢)永久标志,并测定高程、里程等数据,以便检修和监测时使用。

8.4.7 隧洞二次衬砌结构施工测量应符合以下要求:

- a) 二次衬砌施工测量所使用的控制点成果,应是平差后的导线控制点成果;
- b) 在隧洞未贯通前进行二次衬砌施工时,应采取增加控制点测量次数以及增加陀螺方位角测量等方法,提高现有控制点精度,并以其调整中线和高程控制线。同时在贯通面前后各预留 200m 以上隧洞不得进行二次衬砌施工,作为贯通后误差调整段。

8.4.8 用台车浇筑隧洞边墙顶拱二次衬砌结构时,台车两端的中心点与中线允许偏差为 $\pm 5\text{mm}$ 。当曲线段台车长度与其相应曲线的矢距允许偏差为 $\pm 5\text{mm}$ 时,台车长度可代替曲线长度。台车两端隧洞结构断面中心点的高程允许偏差为 $\pm 3\text{mm}$ 。

8.4.9 衬砌环测量要求应满足以下要求:

- a) 在盾尾内管片拼装成环后应测量盾尾间隙;
- b) 衬砌环从盾尾推出并完成壁后注浆后,应进行衬砌环姿态测量,测量内容应包括衬砌环中心坐标、底部高程、水平直径、垂直直径和前端面里程。测量误差应在 $\pm 3\text{mm}$ 以内。

8.5 断面测量

8.5.1 隧洞开挖、喷锚支护和二次衬砌竣工后应及时测绘竣工断面。

8.5.2 断面布设:直线段宜 5m 一条,曲线段宜 3m 一条,结构变化或特殊部位应适当增加断面。

8.5.3 地下厂房等大洞室采用分层开挖时,应分层进行竣工断面测量。

8.5.4 断面测量点的位置,应能反应开挖、喷锚支护和混凝土浇筑现状及其建筑限界控制点、设计指定位置的断面点。

8.5.5 断面测点相对于洞室轴线的测量限差为:开挖竣工断面 $\pm 50\text{mm}$;混凝土衬砌竣工断面 $\pm 20\text{mm}$ 。

8.5.6 断面测量可采用高精度三维激光扫描仪。三维激光扫描仪应在检定合格后方可投入使用。

8.6 资料整理

8.6.1 在施工过程中应整理提交以下资料：

- a) 隧洞轮廓点线的放样计算、验收记录资料；
- b) 开挖和混凝土衬砌工程量测量资料；
- c) 开挖和混凝土衬砌工程量计算图、表。

8.6.2 地下工程竣工后，应提交以下资料：

- a) 施工测量技术设计书；
- b) 施工控制测量平差计算成果；
- c) 洞轴线控制点与控制网连测的平差资料及进洞关系平面图；
- d) 隧洞轮廓点线的放样、开挖、衬砌等测量和检测资料；
- e) 开挖和混凝土竣工断面图，竣工工程量计算表；
- f) 贯通误差的实测成果和说明；
- g) 技术总结。

9 质量控制

9.1 一般规定

9.1.1 在长距离水工隧洞建设过程中，建设单位应委托第三方单位在工程建设期间进行第三方检测工作。第三方检测应满足以下要求：

- a) 承担第三方检测工作的单位，应具备相应的资质，并有从事长距离水工隧洞工程测量、工程监测或类似工程的业绩；
- b) 承担第三方检测工作的单位工作前应编制第三方检测技术方案，建设单位应组织专家进行检测技术方案评审，评审通过后方可实施；
- c) 第三方检测应独立进行，数据采集精度不应低于原控制测量的要求；
- d) 第三方检测单位应积极主动配合业主，协助业主制定测量过程的管理办法与协调机制，从质量、进度、安全等方面对施工测量进行管理与协调；
- e) 第三方检测单位应及时按照要求提供各项检测成果。

9.1.2 施工单位应在第三方检测单位对控制测量、关键工序等测量工作进行 100% 检测合格后，方可进行后续施工。控制测量、关键工序测量项目应包括以下内容：

- a) 控制测量项目应包括：洞外平面和高程控制测量及加密控制点测量、平面和高程联系测量、洞内平面和高程控制测量等；
- b) 关键工序测量项目应包括：平面和高程联系测量、平面和高程贯通测量、施工控制测量、施工测量。

9.1.3 长距离水工隧洞测量成果质量应实行两级检查、一级验收，并应符合以下规定：

- a) 两级检查中的一、二级检查应由项目承担方的作业部门、质量管理部门分别实施；
- b) 验收宜由项目委托方组织专家或国家认可的质检机构进行。

9.1.4 测量成果质量检查与验收应依据以下文件进行：

- a) 依据的国家政策法规和技术标准；
- b) 项目委托书或合同书，以及项目委托方与承担方达成的其他文件；
- c) 技术设计或施测方案；
- d) 项目承担方的质量管理文件。

9.1.5 对测量成果，应根据质量检查结果评定其质量等级。质量等级应分为合格和不合格两级。当测量成果出现以下问题之一时，应判为质量不合格：

- a) 控制点和放样点的数量或布设位置严重不符合本文件要求；
- b) 各级控制点和放样点的标志类型及埋设严重不符合本文件要求；
- c) 所用仪器设备不满足本文件规定的精度要求；
- d) 所用仪器设备未经检定或未在检定有效期内使用；
- e) 观测成果精度不符合本文件要求；
- f) 编造数据。

9.1.6 测量成果质量检查与验收应符合以下规定：

- a) 对所有观测记录、计算和分析结果，应进行一级检查；
- b) 对测量阶段性成果，应进行二级检查；提交给项目委托单位的阶段性成果应为二级检查合格的成果；
- c) 对测量最终成果，应在两级检查合格的基础上进行质量验收；最终提交给项目委托单位的综合成果应为质量验收合格的成果；
- d) 质量检查与验收过程应形成记录，并与测量成果一并归档。

9.1.7 当成果质量检查与验收中发现不符合项时，应立即提出处理意见，退回作业部门进行纠正。纠正后的成果应重新进行质量检查与验收。

9.2 成果检查验收

9.2.1 阶段测量成果，应检查以下内容：

- a) 各级控制点和放样点的布设位置图；
- b) 标石、标志的构造及埋设照片；
- c) 仪器设备的检定和检验资料；
- d) 外业观测记录和内业计算资料；
- e) 测量成果图表；
- f) 与项目有关的其他资料。

9.2.2 最终测量成果的质量检查应符合以下规定：

- a) 按本文件技术要求进行质量检查；
- b) 编写质量检查报告。质量检查报告应包括检查工作概况、项目成果概况、检查依据、检查内容及方法、质量问题及处理情况、质量统计及质量等级内容；
- c) 质量等级应由项目承担方质量管理部门根据检查结果评定，并应符合本文件第 9.1.5 条的规定。

9.2.3 测量成果质量验收时应核查技术设计和技术报告，且应包括以下内容：

- a) 控制点的布设位置图；
- b) 标石、标志的构造及埋设照片；
- c) 仪器设备的检定和检验资料；
- d) 外业观测记录和内业计算资料；
- e) 测量成果图表；
- f) 检查记录和检查报告；
- g) 与项目有关的其他资料。

9.2.4 测量成果质量验收中，当需使用仪器设备时，其精度不应低于项目作业时所用仪器设备的精度。

9.2.5 测量成果质量验收应形成质量验收报告并评定质量等级。质量验收报告应包括验收工作概况、项目成果概况、验收依据、抽样情况、核查内容及方法、主要质量问题及处理情况、质量统计及质量等级内容。质量等级评定应符合本文件第 9.1.5 条的规定。

9.3 成果管理

9.3.1 原始观测记录和计算成果应记录真实、注记明确、计算清楚和格式统一。纸质成果应装订成册，电子成果应拷贝或刻录光盘并作好记录。两种成果均应长期保管。

9.3.2 原始观测和记事项目应在现场记录清楚，注明观测者、记录者、观测日期、起迄时间、气象条件、使用的仪器等。纸质记录不得涂改或凭记忆补记，各记录须编列页次。

9.3.3 记录、计算的取位应符合本文件各成果整理及取位的规定。

9.3.4 长距离水工隧洞控制测量完成后，提交的测量成果应包含以下内容：

- a) 技术设计书；
- b) 平差计算书；
- c) 点之记；
- d) 控制点成果表；
- e) 控制网示意图；
- f) 实际贯通误差及其调整结果；
- g) 技术总结。

附录 A (规范性附录)

基于 GNSS 网坐标协因数阵的隧洞横向贯通误差预计法

A.1 基于GNSS网坐标协因数阵严密计算隧洞横向贯通误差的原理

设隧洞工程独立坐标系与隧洞贯通面的相对关系如图A.1所示，将隧洞工程独立坐标系 $X-A-Y$ 顺时针旋转 φ 角，使得旋转后的 X' 轴与隧洞贯通面垂直，旋转后的坐标系为 $X'-A-Y'$ 。

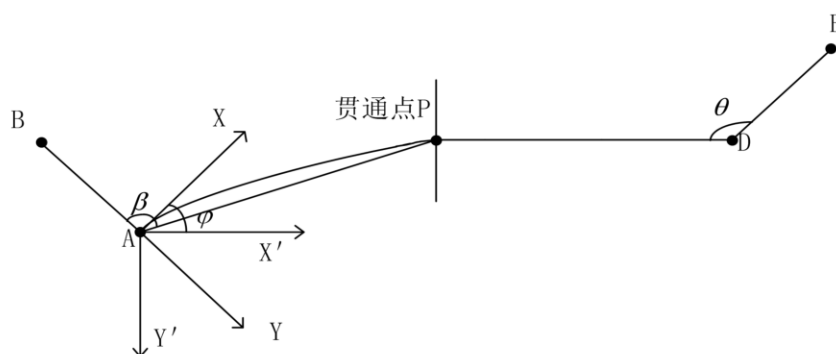


图 A.1 隧洞独立坐标系与隧洞贯通面相对位置关系示意图

由图A.1中各点的几何关系计算贯通点P从进洞推算的坐标与从出洞推算坐标的坐标差如公式(A.1)所示：

$$\begin{cases} \Delta X_p = X_{PD} - X_{PA} = X_D + S_{DP} \times \cos(\alpha_{DE} - \theta) - S_{AP} \times \cos(\alpha_{AB} + \beta) \\ \Delta Y_p = Y_{PD} - Y_{PA} = Y_D + S_{DP} \times \sin(\alpha_{DE} - \theta) - S_{AP} \times \sin(\alpha_{AB} + \beta) \end{cases} \quad \text{..... (A.1)}$$

式中：

(X_{PA}, Y_{PA}) 、 (X_{PD}, Y_{PD}) ——分别为由洞口点 A 、 D 推算贯通点 P 的坐标；

α_{AB} 、 α_{DE} ——分别为 AB 、 DE 边的方位角。

贯通面的横向贯通中误差的微分表达式为公式 (A.2)：

$$dP = -\sin \varphi d\Delta X_p + \cos \varphi d\Delta Y_p \quad \text{..... (A.2)}$$

基于公式 (A.3)、公式 (A.4)：

$$\begin{cases} \Delta X_{AP} \cos \varphi + \Delta Y_{AP} \sin \varphi = \Delta X'_{AP} \\ \Delta X_{DP} \cos \varphi + \Delta Y_{DP} \sin \varphi = \Delta X'_{DP} \end{cases} \quad \text{..... (A.3)}$$

$$\begin{cases} \alpha_{AB} = \frac{\sin \alpha_{AB}}{S_{AB}} & b_{AB} = -\frac{\cos \alpha_{AB}}{S_{AB}} \\ \alpha_{DE} = \frac{\sin \alpha_{DE}}{S_{DE}} & b_{DE} = -\frac{\cos \alpha_{DE}}{S_{DE}} \end{cases} \quad \text{..... (A.4)}$$

横向贯通中误差微分表达式为公式 (A.5) :

$$dP = \mathbf{f}_p^T d\mathbf{Z} \dots\dots\dots (A.5)$$

其中, $\mathbf{f}_p$ 及 $d\mathbf{Z}$ 如公式 (A.6)、公式 (A.7) 所示:

$$\mathbf{f}_p = \begin{bmatrix} \sin \varphi - \alpha_{AB} \Delta X'_{AP} \\ -\cos \varphi - b_{AB} \Delta X'_{AP} \\ \alpha_{AB} \Delta X'_{AP} \\ b_{AB} \Delta X'_{AP} \\ -\sin \varphi + \alpha_{DE} \Delta X'_{DP} \\ \cos \varphi + b_{DE} \Delta X'_{AP} \\ -\alpha_{DE} \Delta X'_{DP} \\ -b_{DE} \Delta X'_{DP} \end{bmatrix}^T \dots\dots\dots (A.6)$$

$$d\mathbf{Z} = [dX_A \quad dY_A \quad dX_B \quad dY_B \quad dX_D \quad dY_D \quad dX_E \quad dY_E]^T \dots\dots\dots (A.7)$$

横向贯通中误差为公式 (A.8):

$$m_p = \pm \sigma_0 \sqrt{\mathbf{f}_p^T Q_{XX} \mathbf{f}_p} \dots\dots\dots (A.8)$$

式中:

σ_0 ——洞外控制网的验后单位权中误差;

Q_{XX} ——坐标协因数矩阵。

根据附录A.2与附录A.3章节给出的 σ_0 和 Q_{XX} 计算方法, 按公式 (A.8) 计算横向贯通中误差。

A.2 坐标协因数阵计算方法一

A.2.1 采用GNSS建立隧洞工程独立控制网的步骤如下:

- 结合具体的隧洞工程独立控制网的建网需求, 选择一个适宜的地面固定点及与一条特定方向。
- 进行 GNSS 工程控制网一点一方位平差, 得到工程独立坐标系中的成果。
- 设固定地面起算点的平面坐标为 (x'_0, y'_0) , 其同一坐标系中的特定起算方向方位角为 α'_{01} , 二者均为隧洞独立坐标系中的成果; 该点对应的三维无约束平差后转换后的高斯平面直角坐标为 (x_0, y_0) , 由三维无约束平差成果转换至高斯平面直角坐标系, 反算该方向坐标方位角为 α_{01} , 洞外控制网一点一方位平差后的高斯平面直角坐标经平移旋转后, 在独立坐标系中的坐标为公式 (A.9) :

$$\begin{cases} x'_i = x_i + (x'_0 - x_0) + (x_i - x_0) \times \cos(\alpha'_{01} - \alpha_{01}) - (y_i - y_0) \times \sin(\alpha'_{01} - \alpha_{01}) \\ y'_i = y_i + (y'_0 - y_0) + (x_i - x_0) \times \sin(\alpha'_{01} - \alpha_{01}) + (y_i - y_0) \times \cos(\alpha'_{01} - \alpha_{01}) \end{cases} \dots\dots\dots (A.9)$$

式中:

x'_i 、 y'_i ——GNSS 控制点在隧洞独立坐标系中的平面坐标;

x_i 、 y_i ——经过三维无约束平差后转换得到的高斯平面直角坐标系中的坐标。

根据方差-协方差传播定律，得到变换后坐标的协方差阵为公式（A.10）：

$$D'_{xy} = R_{\alpha} D_{xy} R_{\alpha}^T \dots\dots\dots (A.10)$$

式中：

D_{xy} ——经三维无约束平差转换计算得到的高斯平面坐标中的相应方差阵；

R_{α} ——分块对角阵，其主对角线上的矩阵子块为公式（A.11）：

$$R_{\alpha} = \begin{bmatrix} \cos(\alpha'_{01} - \alpha_{01}) & -\sin(\alpha'_{01} - \alpha_{01}) \\ \sin(\alpha'_{01} - \alpha_{01}) & \cos(\alpha'_{01} - \alpha_{01}) \end{bmatrix} \dots\dots\dots (A.11)$$

通过工程独立控制网一点一方位平差计算隧洞独立控制网的验后单位权中误差，根据公式（A.9）和公式（A.10）计算隧洞独立坐标系下的协因数矩阵，根据公式（A.8）严密计算得到GNSS误差引起的隧洞横向贯通中误差。

A.3 坐标协因数阵计算方法二

A.3.1 隧洞洞外GNSS控制网的坐标协因数阵转化法计算过程：

（1）GNSS 控制网空间直角坐标协因数阵的计算

洞外 GNSS 控制网以空间直角坐标系中基线向量 $(\Delta x_{ij}, \Delta y_{ij}, \Delta z_{ij})^T$ 为观测值，其误差方程为公式（A.12）：

$$\begin{bmatrix} \Delta x_{ij} - x_j^0 + x_i^0 \\ \Delta y_{ij} - y_j^0 + y_i^0 \\ \Delta z_{ij} - z_j^0 + z_i^0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} v_{\Delta x_{ij}} \\ v_{\Delta y_{ij}} \\ v_{\Delta z_{ij}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \delta_{xi} \\ \delta_{yi} \\ \delta_{zi} \\ \delta_{xj} \\ \delta_{yj} \\ \delta_{zj} \end{bmatrix} \dots\dots\dots (A.12)$$

式中：

x_i^0 、 y_i^0 、 z_i^0 等——近似坐标；

δ_{xi} 、 δ_{yi} 、 δ_{zi} 等——近似坐标相应改正数；

$v_{\Delta x_{ij}}$ 、 $v_{\Delta y_{ij}}$ 、 $v_{\Delta z_{ij}}$ ——基线分量残差。

独立基线向量的观测方程组合成矩阵形式为公式（A.13）：

$$V = A\delta_X - l \dots\dots\dots (A.13)$$

式中:

V ——残差项;

A ——系数阵;

δ_x ——改正数项;

l ——常数项。

使用间接平差计算验后单位权中误差以及空间直角坐标协因数阵为公式 (A.14):

$$\begin{cases} \sigma_0 = \sqrt{\frac{v^T P v}{r}} \\ Q_{\hat{x}} = (A^T P A)^{-1} \end{cases} \dots\dots\dots (A.14)$$

式中:

r ——多余观测的个数;

P ——相应权矩阵。

(2) GNSS 控制网大地坐标协因数阵的计算

GNSS 控制网空间直角坐标与大地坐标的微分关系式如公式 (A.15) 所示:

$$\begin{bmatrix} dx \\ dy \\ dz \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -(M+h)\sin B \cos L & -(N+h)\cos B \sin L & \cos B \cos L \\ -(M+h)\sin B \sin L & -(N+h)\cos B \cos L & \cos B \sin L \\ (M+h)\cos B & 0 & \sin B \end{bmatrix} \begin{bmatrix} dB \\ dL \\ dh \end{bmatrix} \dots\dots\dots (A.15)$$

式中:

L 、 B ——大地经度、纬度;

h ——大地高;

M 、 N ——分别为子午圈、卯酉圈曲率半径。

忽略GNSS控制网中各点间的相关性, 令 E 为分块矩阵, 即公式 (A.16):

$$E = \begin{bmatrix} D_1^{-1} & & & \\ & D_2^{-1} & & \\ & & \ddots & \\ & & & D_n^{-1} \end{bmatrix} \dots\dots\dots (A.16)$$

由协因数传播律计算大地坐标协因数阵:

$$Q_{BLh} = E Q_{\hat{x}} E^T \dots\dots\dots (A.17)$$

(3) GNSS 控制网高斯坐标协因数阵的计算

大地坐标转换到高斯平面坐标微分关系式如 (A.18) 所示:

$$\begin{bmatrix} d_x \\ d_y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} g_{11} & g_{12} \\ g_{21} & g_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} dB \\ dL \end{bmatrix} = G \begin{bmatrix} dB \\ dL \end{bmatrix} \dots\dots\dots (A.18)$$

式中: g_{11} 、 g_{12} 、 g_{21} 、 g_{22} 分别由公式(A.19)表示:

$$\begin{cases} g_{11} = N \left[\left(1 - e^2 \right) / w^2 + \left(\left(1 - 2 \sin^2 B + e^2 \sin^2 B \cos^2 B \right) \lambda^2 \right) / 2 \right] \\ g_{12} = N \left[\lambda + \left(\left(5 - 6 \sin^2 B \right) \lambda^3 \right) / 6 \right] \sin B \cos B \\ g_{21} = -N \left[\lambda \left(1 - e^2 \right) / w^2 + \left(\left(5 - 6 \sin^2 B \right) \lambda^3 \right) / 6 \right] \sin B \\ g_{22} = N \left[1 + \lambda^2 \left(1 - 2 \sin^2 B + e^2 \cos^4 B \right) / 2 \right] \cos B \\ w^2 = 1 - e^2 \sin^2 B \\ \lambda = L - \lambda_0 \end{cases} \quad \text{..... (A.19)}$$

式中:

λ_0 ——中央子午线的经度;

e ——参考椭球的第一偏心率。

对GNSS控制网中的每一个控制点,从 Q_{BLh} 中提出相应 B 、 L 的协因数阵,组成新的 Q_{BL} 。令 J 为分块矩阵,即公式(A.20):

$$J = \begin{bmatrix} G_1 & & & \\ & G_2 & & \\ & & \ddots & \\ & & & G_n \end{bmatrix} \quad \text{..... (A.20)}$$

由协因数传播律计算高斯平面坐标协因数阵:

$$Q_{xy} = J Q_{BL} J^T \quad \text{..... (A.21)}$$

(4) GNSS 控制网隧洞独立坐标协因数阵的计算

高斯平面坐标与隧洞独立坐标的转换关系如公式(A.22)所示:

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Delta X \\ \Delta Y \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \cos \alpha & -\sin \alpha \\ \sin \alpha & \cos \alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} \quad \text{..... (A.22)}$$

式中:

ΔX 、 ΔY ——两个平面坐标系之间的平移参数;

α ——旋转参数。

对公式(A.22)全微分,可得 $[dX \ dY]^T = R [dx \ dy]^T$,令 S 为分块矩阵,即公式(A.23):

$$S = \begin{bmatrix} R_1 & & & \\ & R_2 & & \\ & & \ddots & \\ & & & R_n \end{bmatrix} \quad \text{..... (A.23)}$$

由协因数传播定律计算隧洞独立坐标的协因数阵:

$$Q_{xx} = S Q_{xy} S^T \quad \text{..... (A.24)}$$

根据上述 4 个小节叙述的方法，即可求出隧洞独立坐标系协因数阵 Q_{xx} 。

附 录 B
(资料性附录)
控制点点之记

XXX 点之记

工程名称：第 页 共 页

点 名		等 级	
详细位置图:		标石断面图:	
点位详细说明		(点位近视图片)	
所在地及交通路线		(点位远景、远视图片)	
标石类型		概略坐标 (CGCS2000)	
选埋单位		B=	L=
选埋者		选埋日期	
备 注			

附 录 C
(资料性附录)
控制点埋设要求

C.1 控制点标志

C.1.1 控制点标志材料宜采用不锈钢制作。不锈钢标志可采用直径为20mm、长度为20mm~30mm不锈钢材料，下部采用普通钢筋焊接而成。标志规格应符合图C.1的规定。

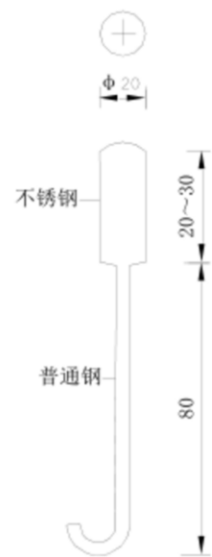


图 C.1 控制点标志 （单位为 mm）

C.2 平面控制点标识的埋设

C.2.1 一等（或B级）等平面控制点标石埋规格应符合图C.2的规定。

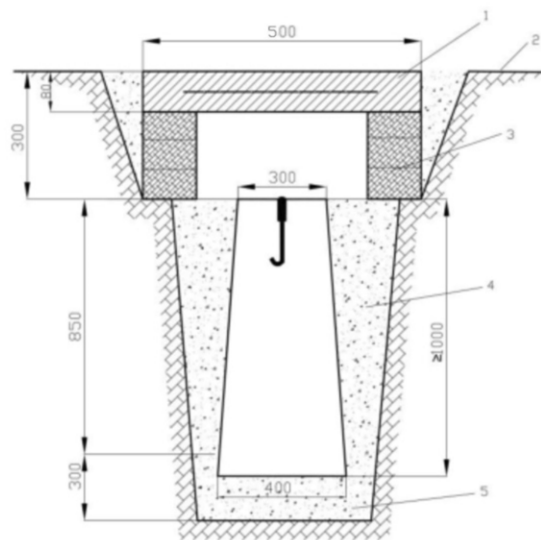


图 C.2 一等（或 B 级）平面控制点点标石埋设图（单位为 mm）

- 注 1：盖板；
注 2：地面；
注 3：保护井；
注 4：素土；
注 5：混凝土。

C. 2. 2 二等平面控制点标石埋规格应符合图C.3的规定。

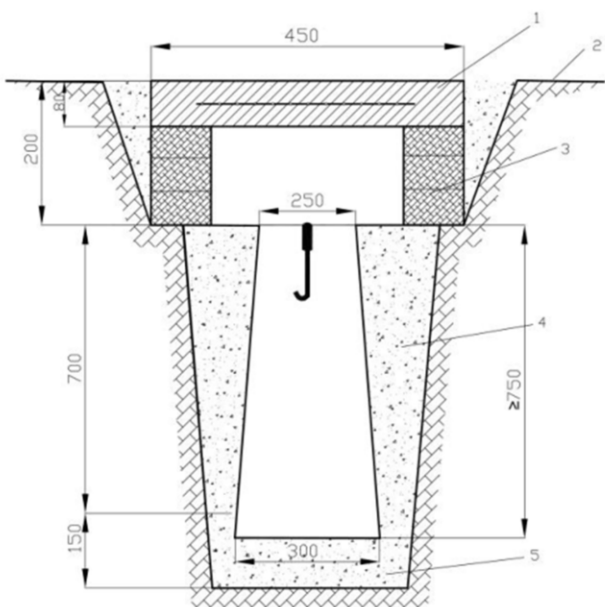


图 C.3 二等平面控制点点标石埋设图（单位为 mm）

- 注 1：盖板；
注 2：地面；
注 3：保护井；

注 4：素土；
注 5：混凝土。

C. 2. 3 三、四等平面控制点标石埋设符合图C.4规定。

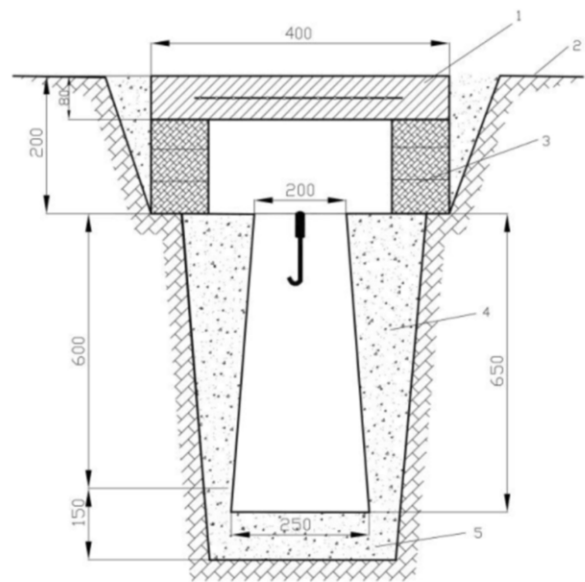


图 C.4 三、四等平面控制点点标石埋设图 （单位：单位为 mm）

注 1：盖板；
注 2：地面；
注 3：保护井；
注 4：素土；
注 5：混凝土。

C. 3 高程控制点标识的埋设

C. 3. 1 二等水准点标识埋设规格应符合图C.5的规定。

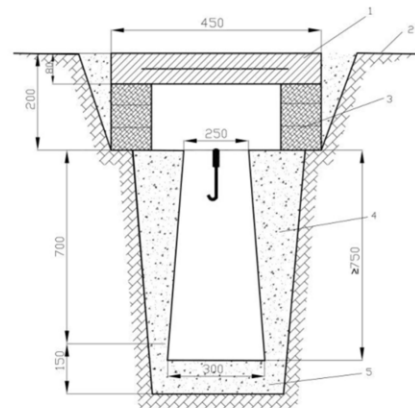


图 C.5 二等水准点标识埋设图 （单位为 mm）

- 注 1：盖板；
- 注 2：地面；
- 注 3：保护井；
- 注 4：素土；
- 注 5：混凝土。

C. 3. 2 四等水准点标识埋设规格应符合图C.6的规定。

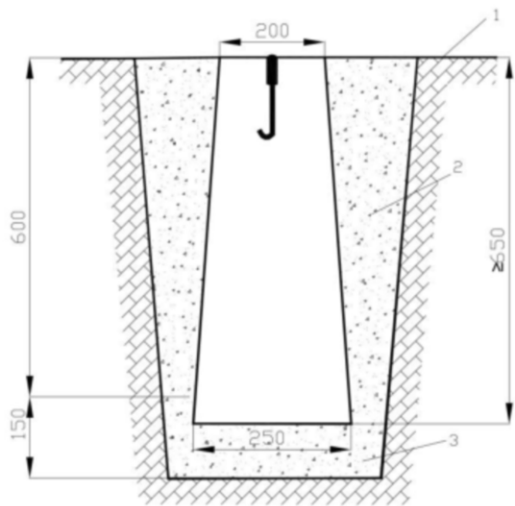


图 C.6 四等水准点标石埋设图（单位为 mm）

- 注 1：地面；
- 注 2：素土；
- 注 3：混凝土。