

超长距离 TBM 隧洞施工中轴线控制

李国涛

中铁隧道股份有限公司, 河南 郑州 450000

[摘要] 随着时代的发展, 科技的进步, 大量隧洞采用 TBM 法施工, 超特长距离隧洞随之增加, 用于各种民生工程。作为超特长距离隧洞施工, 隧洞轴线控制是 TBM 掘进过程中的一项关键性技术难题, 是超特长隧洞施工的技术核心。TBM 掘进前要编制合理科学的轴线控制方案, 过程中要严格把控, 保证 TBM 超特长距离隧洞精准贯通。

[关键词] TBM 隧洞; 中轴线; 科学

DOI: 10.33142/aem.v4i7.6413

中图分类号: U455.4

文献标识码: A

Axis Control in Super Long Distance TBM Tunnel Construction

LI Guotao

China Railway Tunnel Co., Ltd., Zhengzhou, He'nan, 450000, China

Abstract: With the development of the times and the progress of science and technology, a large number of tunnels are constructed by TBM method, and ultra long distance tunnels are increased, which are used in various livelihood projects. As a super long tunnel construction, tunnel axis control is a key technical problem in the process of TBM excavation and the technical core of super long tunnel construction. Before TBM excavation, a reasonable and scientific axis control scheme shall be prepared and strictly controlled in the process to ensure the accurate penetration of TBM ultra long distance tunnel.

Keywords: TBM tunnel; central axis; science

1 工程概况

KS 隧洞线穿越福海县、富蕴县、清河县、奇台县, KS 隧洞总长约为 283.393km, 为超长地下隧洞, 根据施工分段规划和施工方案, KS 隧洞共采用 11 台 TBM 及钻爆法施工。本标段隧洞使用 2 台 TBM 施工, TBM4-1 独头掘进 15474m, TBM4-2 独头掘进 8150m, TBM5 独头掘进 17491m, 在本标段隧洞桩号 KS110+250m 处布置 398m 的 F2 通风竖井(净直径为 3.5m), 桩号 KS125+500m 处布置 429m 的 F3 通风竖井(净直径为 3.5m)。

2 施工期测量实施方案

2.1 地面控制测量

严格执行测量规范; 遵守先整体后局部的工作程序, 先确定平面、高程控制网, 再以控制点为依据进行各部位的施工放样, 按股份公司测量三级复核制由股份公司精测队及项目部测量组对业主及第三方测量所交的导线控制桩点进行了复测。

2.1.1 地面控制测量的复测频率及精度要求

地面控制网点的复测频率为年一次首级精密测量, 复测结果及时上报, 以便掌控地面控制点的点位情况。在复测过程中, 其中平面控制点实测值与理论值较差为: 当控制点距离 ≥ 1 公里时, 其夹角 $\leq \pm 5''$, 当控制点两点距离边长小于 1 公里, 按下列公式计算: $\Delta \epsilon = e/d * \rho''$, $\Delta \epsilon$ 允许误差 ($\pm 8''$) $e=0.025M$, D 为控制点两点边长、 $\rho'' = 206265$, 其中最大误差为 $\pm 10''$, 测距往返误差为

$1/110000$ 。相邻高程控制点不符值 $\leq \pm 8 \sqrt{L} \text{mm}$, 较差 $\leq \pm 10 \text{mm}$ 。

精密水准测量观测的视线长度、视距差、视线高不应超过下表的规定: 如表 1:

表 1 精密水准测量观测的视线长度、视距差、视线高的要求(m)

标尺类型	视线长度		前后视距差	前后视距累计差	视线高度	
	仪器等级	视距			视线长度 20m 以上	视线长度 20m 以下
因瓦尺	DS1	≤ 60	≤ 1.0	≤ 3.0	0.5	0.3

精密水准测量观测站观测限差不得超过下表 2 的规定:

表 2 精密水准测量观测站观测限差(mm)

基辅分划读数差	基辅分划所测高差之差	上下丝读数平均值与中丝读数之差	检测间歇点高差之差
0.5	0.7	3.0	1.0

精密导线测量和精密水准测量的主要技术要求见下表 3-4:

2.1.2 地面平面控制网的复测

水平角观测: 分为导线左右角各二个测回, 共四测回(1 级全站仪), 按国家《水利水电工程施工测量规范》(SL 52-2015), 精密导线测角要求, 测角中误差达到 $\pm 2.5''$ 。

现场测定温度和气压输入全站仪进行气象改正。同时全站仪的加乘常数也自动改正。平面桩点的交接与复核:

在做平面控制之前，首先要跟业主进行正式的桩点移交，

表 3 精密导线测量的主要技术要求

等级	导线总长/km	平均边长/km	方位角闭合差/(")	测角中误差/(")	测距中误差/mm	全长相对闭合差	测距仪等级	测回数						
								边长	水平角			天顶距		
									0.5"级	1"级	2"级	0.5"级	1"级	2"级
二	--	--	$\pm 2\sqrt{n}$	± 1.0	± 2	1:110000	I	往返各 2	6	9	--	3	4	--
三	3.2	400	$\pm 3.6\sqrt{n}$	± 1.8	± 2	1:55000	II II I	往返各 2	4	6	9	2	3	4
	3.5	600			± 5	1:60000			4	6	9	2	3	4
	5.0	800			± 2	1:70000			4	6	9	2	3	4
四	2.8	300	$\pm 5\sqrt{n}$	$\pm 5n$ ± 2.5	± 7	1:35000	III II II	往返各 2	2	4	6	1	2	3
	3.0	500			± 5	1:45000			2	4	6	1	2	3
	3.5	700			± 5	1:50000			2	4	6	1	2	3
五	2.0	200	$\pm 10\sqrt{n}$	± 5.1	± 10	1:18000	III、IV III、IV III	往返各 2	1	2	4	1	1	2
	2.4	300			± 10	1:20000			1	2	4	1	1	2
	3.0	500			± 7	1:25000			1	2	4	1	1	2

表 4 精密水准测量的主要技术参数

每千米高差中数中误差 (mm)		符合水准路线平均长度 (km)	水准仪等级	水准尺	观测次数		往返较差、符合或环线闭合差	
偶然中误差 M_{Δ}	全长中误差 M_w				与已知点联测	符合或环线	平坦地	山地
± 2	± 4	2~4	DS2	因瓦尺	往返测各一次	往返测各一次	± 8	± 2

注：L 为往返测段，符合或环线的路线长度（以 km 计），n 为单程的测回数。

在移交时注意记录与相邻标段共用的桩点，做首级控制时与这些点联测，保证与相邻标段对接坐标的一致性；然后要对勘测设计院所提供的桩点进行复核测量，复核测量工作由我公司测量队来完成，并及时将复核结果报监理、业主审批，待批复后方能使用；最后我们在接到正式的书面测量桩点资料后，本标段测量组仍须对所交桩点重新进行复核测量，将测量结果与业主、结果进行对照，从而完成三级复核，来保证工程施工的精度与准确性。

2.1.3 地面高程控制网的复测

采用 DNA03 水准仪及配套钢钢尺，按照城市二等水准精度要求，上午和下午各进行一次往返测。往返测高差 $\leq \pm 8 \sqrt{L}$ mm (L 为全程长度，单位：km)，复测后的点位高程与设计院所交高程较差符合规范及精度要求。

2.2 洞内施工控制测量

T2 勘探试验洞位于 KS 隧洞 117+500m 桩号处，进口布置在主洞左侧，与主洞夹角 94° 向隧道主洞段桩号 87+750m~95+650m、101+303m~116+663m，TBM5 设备掘进洞段为主洞段桩号 117+543m~135+000m，两边掘进。其中 95+650m~96+650m（长度 1.0km）；100+303m~101+303m（长度 1.0km）；116+663m~117+543m（长度 0.88km）；总长度 2.88km 为钻爆法开挖段：

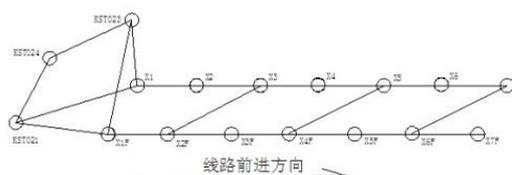


图 1 导线布置示意图

洞外设计院所交点平面等级为二等，高程等级为二等，故隧道内采用相同施测等级，导线测量与高程测量施测要求与洞外一样要求。导线布置示意图如下。

(1) 洞外控制点首先进行 GPS 联测，并检查相对位置关系确认点位稳定可靠，以洞外控制点 KST021、KST022、KST024 为准进行平差计算。根据设计交桩文件显示，需要在两套施工坐标系下进行平差计算。即：T1-T2 坐标系、T2-T3 坐标系。

平差采用铁四院精密工程测量平差软件进行平差计算，平差时将实测边长投影至两套坐标系相应的抵偿高程面上。

(2) 采用徕卡 TS30 全站仪进行测量，角度测回数 6 个。测角标称精度按 $\leq 2''$ 、测距标称精度按 $a \leq 5\text{mm}$ ， $b \leq 2\text{ppm}$ 来控制。

(3) 在进洞处布成完全测边、测角的四边形。或将基本控制网布成完全由三条边组成的测边、测角网。要尽量布成距离近似相等的长边导线网。一般情况下，边长不应短于 500m，平均边长不应短于 300m，且在有条件的情况下应当尽量拉长距离，以减小转折角观测误差对贯

通精度的影响。在不得已发生短边时，相邻的长、短边比值一般不大于3:1。导线边长受条件所限而短于300m时，两端导线点均采用强制对中方式或三联脚架法，以减少仪器对中误差的影响。施工导线的边长控制在50m左右，并每隔数点与基本导线复核，基本导线用于洞内控制测量，施工导线用于施工放样。

(4) 优化布设洞内高等级导线控制网

优化布设洞内高等级导线控制网，即交叉式主副双导线（II等），确保按照设计轴线掘进。项目在实际施工过程中控制测量采用交叉式闭合双导线进行轴线校准，利用主副导线传递方位和坐标，其单边长控制在400m左右；当单向开挖长度大于8KM时应加测陀螺方位角，方位角往返较差小于2倍仪器标称精度时，可取往返方位角中数作为导线边的方位角。高程控制测量：采用二等水准测量方法进行往返观测，每站前后视距小于50米。施工导线的边长控制在50m左右，并每隔数点与基本导线复核，基本导线用于洞内控制测量，施工导线用于施工放样。

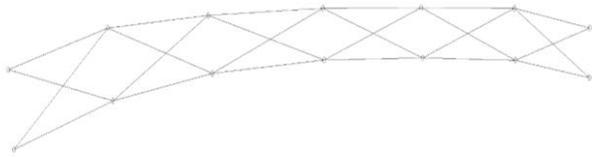


图2 洞内平面控制网

(5) 测量

测量时，现场应保证足够的通风和照明条件。洞内基本导线应独立地进行两组观测，导线点两组坐标值较差，不得大于洞内测量贯通中误差的 $\sqrt{2}$ 倍，合格后取两组坐标值的平均值作为最后成果。本工程平面控制基本要求：测角中误差 $\leq 1''$ ，测距中误差 $\leq \pm 3\text{mm}$ 。

(6) 控制测量注意事项

精密测角的一般原则：①在有利时间进行观测，以提高照准精度和旁折光的影响；②观测前要消除视差，在一测回的观测过程中不得重新调焦，以免引起视准轴的变动；③测回间进行度盘均匀分配，减小度盘分划误差；④进行盘左盘右观测，以消除和减弱视准轴误差、水平轴倾斜误差等影响；⑤上、下半测回照准目标次序相反，以消除或消弱与时间成比例均匀变化的误差影响；⑥半测回间在相应方向预转照准部1~2周，以减小水平度盘位移误差；⑦使用微动螺旋时，其最后方向均应为旋进方向；⑧观测过程中保持水准气泡的居中，以减弱垂直轴倾斜误差的影响。

3 TBM 施工测量

3.1 准备工作

对TBM推进线路数据进行复核计算，计算结果由监理工程师书面确认。在监理工程师书面确认后方可进行下道工序施工。

按设计图在实地对TBM基座的平面和高程位置进行放样，基座就位后立即测定与设计的偏差。

在TBM右上方留出位置供安装测量标志，并保证测量通视。TBM就位后精确测定相对于TBM推进时设计轴线的初始位置和姿态。安装在TBM内的专用测量设备就位后立即进行测量，测量成果应与TBM的初始位置和姿态相符，并报监理工程师备查。

在TBM右上方衬砌处安装吊篮，吊篮用钢板制作，其底部加工强制对中螺栓孔，用以安放全站仪。强制对中点的三维坐标通过洞口的导线起始边传递而来，并且在TBM施工过程中，吊篮上的强制对中点坐标与隧洞内地下控制导线点坐标相互检核。如偏差超过控制标准，需再次复核后，确认无误后以地下控制导线测得的三维坐标为准。因此TBM在推进过程中，测量人员要牢牢掌握TBM推进方向，让TBM沿着设计中心轴线推进。

TBM掘进洞段洞轴线水平和垂直方向的施工允许偏差分别控制在 $\pm 60\text{mm}$ 和 $\pm 40\text{mm}$ 。

3.2 掘进偏差控制

影响导向系统正常工作的因素：

- ①灰尘：若洞内灰尘太大，导致全站仪无法前（后）视到目标棱镜（定向棱镜），使系统无法正常工作。
- ②温度、水雾：若全站仪视线范围内出现局部温度剧烈变化，将直接影响全站仪的视线，使其视线在空气中“转弯”，造成无法前视目标棱镜；若围岩地下水丰富，造成地下水进入目标棱镜使之在棱镜片上形成一成水雾，将导致无法前视到棱镜内的照准目标，使系统无法正常工作。
- ③杂物阻挡或半阻挡经纬仪通视线，造成无法前视到目标棱镜。
- ④全站仪视线范围内无照明时，将造成全站仪无法测量和定向。
- ⑤导向系统本身故障，比如马达棱镜坏、线路故障、全站仪故障等问题，都会造成系统无法正常工作。

4 测量精度控制

- (1) 严格执行我部三级测量复核制度。
- (2) 项目部测量组由经验丰富、有合格资格的技术人员担任，并配备足够数量、符合精度要求的测量仪器。
- (3) 所使用的测量仪器定期到国家计量局授权的测量仪器鉴定单位检定。并将有关资料和检定报告报监理人。
- (4) 测量放样的有关数据及成果安排专人保管，并记录完整、清晰，及时上报监理人核对。
- (5) 项目部测量组按监理人要求提交测量报告。

5 项目管控措施

- (1) 受地域气候影响，冬季不适宜施测，致使支洞段测量误差偏大，为确保测量精度，连续2年选择在5~9月之间对洞内导线进行了多次复测，并在此期间采用陀螺方位检核及竖井联系测量对洞内导线控制网进行约束

平差,将洞导线成果固化在竖井前后。

(2) 由于线路较长多次复测成果不稳定,为保证测量精度,在每次施测时选择停机期间或要求停机配合,及采用停电、停风等相关措施尽可能降低环境因素对导线精度的影响。

(3) 由于超长隧道为确保测量精度达标,积极与公司借配高精度仪器为项目所用,合理利用停机期间对导线网进行复测延伸。并且采用全自动陀螺仪进行外业数据采集,陀螺方位附合导线网测量是在原导线网的基础上加测高精度陀螺方位角的方式进行,对原导线网进行检核校正,保证过程中的测量精度与成果,为TBM精准贯通提供准确“导向”。

(4) 定期对导向系统仪器设备进行自检、保养及年检,确保仪器正常运行精度达标。

(5) 不定时对测量组内、外业进行监督审核,避免测量过程中麻痹大意出现错误。

(6) 制定相应的管控措施和预警机制,确保掘进轴线符合规范及设计要求。

(7) 结合隧道工程设计结构参数,优化控制控制限差加强成本控制意识,尽量将水平姿态保持在允许范围,垂直姿态保持在+30mm~+50mm之间(因本隧道95%属于II类围岩无衬砌结构,底板需按设计标高进行浇筑,所以可从姿态控制方面节约部分成本)。

6 洞轴线偏差常规问题

(1) 地下控制导线延伸过程中,成果的更新修正对已揭露洞段轴线产生的误差;导向系统搬站多次采用坐标定向,产生的累计误差,导致洞轴线超限。

(2) 因开挖面围岩强度不均,出现侧压、偏压现象,导致调向困难,出现超限;开挖面围岩出现破碎、掉块、坍塌现象,掘进过程中不利于调向,出现超限;地质坍塌出现卡机,在脱困掘进过程中大幅度调节导致轴线超限;及设备油缸泄压,撑靴打滑影响,出现短距离超限等。

7 建议措施

(1) 建议按照公司测量管理实施细则执行复测程序,避免延期复测或复测线路过长,复测时项目需提供良好的复测环境提高测量精度,在施工过程中注重对控制网桩点的保护避免返工;

(2) 建议项目配置高精度仪器,合理利用项目短时停工间隙,项目测量组根据精测队的指导及时完成外业施测,从而加大复测频次,提高测量精度,避免等靠现象;

(3) 建议对测量内、外业工作定期审核,杜绝因侥幸心理而酿成大错。

8 总结

(1) 根据《二期输水工程洞内基本控制测量等级要求》针对本工程TBM段与钻爆段混合贯通的情况,面临着开挖长度明显不一致的情况,其洞内基本控制测量等级按其单向开挖长度 $\times 2$ 确定。(如钻爆段3km与TBM段11km贯通,钻爆段单向开挖3km基本控制测量等级按相向开挖6km要求,TBM段单向开挖11km基本控制测量等级按相向开挖22km要求。)所有TBM段洞内控制基本导线测量等级为二等、水准测量等级为二等,导线形式为交叉双导线,全自动陀方位螺仪。

(2) TBM4-1单向开挖长度18837.14m(加支洞),支洞内控制导线布设长度为400m,共埋设控制点8个,导线个数为7条,由主支洞交叉点至TBM4-1贯通面长度为15850.35m,控制导线布设长度为400m,共埋设控制点40个,导线个数为40条;TBM5单向开挖长度20233.6米(加T2支洞),支洞内控制导线布设长度为400m,共埋设控制点8个,导线个数为7条,由主支洞交叉点至TBM5贯通面长度为17847m,控制导线布设长度为400m,共埋设控制点45个,导线个数为45条。

(3) 设计贯通误差:TBM4-1现阶段所采用的导线方式、控制等级、采用设备基本能够满足水工隧洞35-40km的横向贯通误差 ± 399 mm,竖向贯通误差 ± 100 mm的要求。实际项目TBM4-1隧道贯通时横向贯通误差3mm、纵向贯通误差2mm,贯通精度已达毫米级,已为同级别最高。TBM5现阶段所采用的导线方式、控制等级、采用设备基本能够满足水工隧洞40-45km时横向贯通误差 ± 474 mm,竖向贯通误差 ± 121 mm的要求。实际项目TBM5隧道贯通时横向贯通误差-110mm、纵向贯通误差2mm,贯通精度已为同级别最高。

[参考文献]

- [1] 王礼,谢贤平,罗春红,等.地下洞室施工通风信息管理系统探讨[J].水利水电施工,2008(2):87.
 - [2] 申明亮,赵彦贤,宋媛媛.溪洛渡地下洞室群施工通风方案仿真与优化[J].长江科学院院报,2008(4):87.
 - [3] 郭金海.高阳寨隧道进口施工通风技术[J].山西建筑,2007(36):87.
 - [4] 吴志华,林国辉,陈艳琼.特长公路隧道施工通风技术方案设计[J].湖南工程学院学报(自然科学版),2016(1):87.
 - [5] 王海峰,张春雨,张吉钊.杨家坝隧道无轨运输长独头施工通风技术[J].铁道建筑技术,2002(65):76.
- 作者简介:李国涛(1991.8-)男,兰州交通大学、大专(函)、工程造价,中铁隧道股份有限公司,测量负责人,助理工程师。