

长大越江隧道贯通测量技术的应用提升与工程验证

张宏伟

上海市建筑科学研究院有限公司, 上海 200032

DOI:10.61369/ME.2026010035

摘 要： 针对长大越江隧道施工中因距离长、环境复杂、误差累积显著导致的贯通测量难题，本文以某轨道交通市域线越江盾构隧道工程（全长约 7.7 km）为背景，系统研究了隧道贯通测量精度提升手段及垂直顶升测量技术在验证贯通精度中的应用。文章分析了贯通测量的主要难点，提出包括优化测量方案、建立高精度控制网、采用先进测量技术、引入陀螺方位角测量等综合提升措施。在此基础上，重点阐述了垂直顶升测量在隧道轴线修正中的作用，并通过无定向导线平差方法对贯通误差进行了有效控制。通过垂直顶升实测数据，验证了各项精度提升措施在减小横向贯通误差方面的显著效果。结果表明，采用综合提升措施后，顶升处横向贯通误差约为 47.7mm，满足规范限差 $100 \pm \text{mm}$ 的要求。本文研究为类似长大越江隧道的精准贯通提供了可靠的技术支持与实践参考，也为隧道贯通测量误差控制与验证方法提供了新的思路。

关 键 词： 越江隧道测量；无定向导线；误差控制；陀螺定向；贯通精度验证

Application Improvement and Engineering Verification of Changyue River Tunnel Penetration Measurement Technology

Zhang Hongwei

Shanghai Architectural Research Institute Co., Ltd., Shanghai 200032

Abstract： In view of the penetration measurement difficulties caused by the long distance, complex environment, and significant error accumulation during the construction of the Changchun River Tunnel, this paper uses a certain rail transit municipal line cross-river shield tunnel project (total length approximately 7.7 km) as the background to systematically study the tunnel penetration measurement accuracy improvement methods and the application of vertical jacking measurement technology in verifying penetration accuracy. The article analyzes the main difficulties in penetration measurement, and proposes comprehensive improvement measures including optimizing the measurement plan, establishing a high-precision control network, adopting advanced measurement technology, and introducing gyro azimuth measurement. On this basis, the role of vertical jacking measurement in tunnel axis correction was focused on, and the penetration error was effectively controlled through the non-directional wire adjustment method. Through the measured data of vertical jacking, the significant effect of various accuracy improvement measures in reducing lateral penetration errors has been verified. The results show that after adopting comprehensive lifting measures, the lateral penetration error at the jacking point is approximately 47.7mm, which meets the specification tolerance of $100 \pm \text{mm}$. The research in this article provides reliable technical support and practical reference for the accurate penetration of tunnels similar to the Changyue River, and also provides new ideas for tunnel penetration measurement error control and verification methods.

Keywords： cross-river tunnel measurement; non-directional wire; error control; gyro orientation; penetration accuracy verification

引言

随着城市轨道交通与跨江交通建设步伐加快，长大越江隧道工程日益增多。隧道贯通精度直接关系到工程安全、质量与运营效能，在跨越水体、长距离掘进、复杂地质等条件下，测量误差易累积，贯通风险显著^[1]。在以往工程中，隧道横向贯通误差控制对于隧道能否安全贯通至关重要。本文结合某轨道交通市域线越江盾构隧道（全长约 7.7km）的施工实践，探讨贯通测量技术的多种精度提升路径，以垂直顶升测量数据作为验证，研究了减小隧道横向贯通误差的关键测量技术^[2]。

一、长大越江隧道贯通测量

（一）长大越江隧道贯通测量难点

长距离隧道贯通测量主要测量难点包含如下：第一，地面控制网陆岛远离，整体控制网联测及精度分析实施难度增大；第二，地下支导线距离长、误差累积显著。随着掘进距离增加，测角、测距误差逐步累积，贯通面精度难以保证；第三，传统测量模式对精度影响大，人工不仅效率低下，劳动强度大，：每次测量需经过“整平、对中、照准、读数、记录”等多个繁琐作业流程，耗时耗力^[9]。且测量精度受人为主观因素影响大照准误差、读数误差：仪器操作误差；最后，地下控制网受土体变形、水位变化等影响，控制点易发生位移，稳定性差^[10]。

（二）长大隧道贯通误差预估

在隧道掘进过程中，影响贯通误差反映在平面位置上包括横向贯通误差及纵向贯通误差，反映在高程上为高程贯通误差。根据以往工程案例经验分析，影响长距离隧道贯通安全最大因素为横向贯通的测量误差^[11]。

其中，横向贯通误差的来源主要有地面控制测量误差、盾构竖井联系测量误差、地下导线控制测量误差、盾构姿态定位测量误差和盾构贯通点坐标测量误差。预计方法基于误差传播理论，将贯通误差视为多个独立误差源的合成结果。误差传播公式采用平方根法合成独立误差源：

M=√m1²+m2²+m3²+m4²+m5²

其中：控制网精度误差 m₁；地面导线误差 m₂；平面联系测量误差 m₃；洞内导线误差 m₄；盾构导回系统误差 m₅

其中各项误差计算公式为：

序号	误差源	符号	计算公式（简化说明）
1	控制网精度误差	m1	= GNSS基线相对中误差 × 隧道全长 × 1000
2	地面导线误差	m2	= 5 × SQRT(地面导线长度)
3	平面联系测量误差	m3	= 竖井定向中误差 × tan(竖井深度) × 10000
4	洞内导线误差	m4	=SQRT((测角中误差 /206265*SQRT((隧道长度^2*测站数)/12))^2+(测距中误差 *SQRT(测站数 /3))^2)
5	盾构导向系统误差	m5	= SQRT(姿态解算误差^2+(测角误差 × 推进距离 /206265)^2)

根据上述贯通误差精度估算公式计算该隧道横向贯通误差约为 ± 129mm，无法满足贯通要求，为提高贯通精度，拟采用多种误差控制措施来提高测量精度。

二、先进测量技术应用测量精度提升措施

为提高各项测量环节的精度，在本工程中采取以下措施；

- 1.地面控制测量误差控制措施：通过优化 GPS控制网复测网形和提高复测精度来提高地面控制测量精度。
- 2.盾构竖井联系测量误差控制措施：进行竖井联系测量时，

可采用双联系三角形法、增加测回数、增加联系测量复测次数、多种手段联合测量（若有条件采用两井定向、导线直传等方式）等措施来提高联系测量的精度^[16]。

3.地下导线控制测量误差控制措施：采用强制观测墩减少仪器对中误差，采用双导线、交叉导线，提高地下导线的精度，延长导线边长，减少测站数，增加测回数及测量频次等方式提高地下导线控制测量的精度。

4.盾构姿态的定位测量误差控制措施：在长期的掘进过程中，盾构机的振动有时候会造成激光靶的位置发生变化。管片的振动会引起 TCA的激光发生偏移。这两样都会引起导向系统显示的姿态不真实。因此需要采取以下措施：盾构初始零位姿态的准确测量、定期人工复测盾构姿态、定期检查自动导向系统（尤其是自动导向全站仪指标）、人工盾构姿态与轴线测量成果比较分析。

5.全自动化测量数据采集：采用高精度测量机器人搭载自主研发测量程序，以避免由人工观测记录产生的偶然误差。

6.陀螺方位角加测：对于超长距离的盾构施工，加测陀螺方位是非常行之有效的技术手段，通过加测陀螺边的方法，对地下导线的方向进行修正，减少方向传递误差对贯通精度的影响，不但限制了系统误差的累积，而且可以对导线方向进行检核，从而提高和改善了地下导线的精度和可靠性。

三、垂直顶升测量验证

由于隧道单次掘进距离较长，假如按照初始的导线进行测量，根据理论估算，最终测量中误差为 129mm 左右，无法满足贯通限差要求^[17]。为了确保盾构能够顺利接收，必须在盾构接收前对盾构进行一次定向。由于隧道单次掘进距离较长，假如按照初始的导线进行测量，根据理论估算，最终测量中误差为 90mm 左右，无法满足贯通限差要求。为了确保盾构能够顺利接收，必须在盾构接收前对盾构进行一次定向。在本工程中采用垂直顶升联系测量进行验证^[18]。

垂直顶升是指通过顶升工艺从隧道内向地面顶升出一根管道。测量人员借助于顶升管道传递坐标和传递方位，达到消除累积误差的目的。本方法优点是将 7.7 公里的隧道测量风险转化为 0.5 公里的隧道贯通。通过上下通视的垂直顶升孔，实测盾构机与接收井的相对位置关系，修正下阶段隧道轴线，该方法可以极大地削弱方位累计误差对隧道横向贯通精度的影响，垂直顶升方式的横向贯通中误差为 20mm，贯通限差为 40mm，确保盾构机准确无误接收。结合地质环境，在浦东岸上段某地内选取 2 处（一用一备）位置进行作业（距离接收井约 450m），顶升区域隧道线性为上坡 2‰，位置覆土深度约 21m。

四、实施效果与贯通精度评估

1.控制测量：垂直顶升测量前，轴线复测单位对长兴岛及浦东段的首级控制网进行了检核，本次垂直顶升测量所采用的控制

网均符合限差要求。

2.联系测量：顶升联系测量前对始发井联系测量工作进行复

核，成果均符合相关规范要求。经测量传递井下始发导线点 JJ2、CM269，见表4-1。

表 4-1 最新联系测量成果对比表

期次点号	JJ2		CM269		方位角 (° ′ ″)	距离 (m)	方位角差值 (″)	距离差值 (mm)
	起点 X(m)	起点 Y(m)	终点 X(m)	终点 Y(m)				
第六次联系测量	45542.6009	38177.2701	45050.4872	37980.2825	201° 48′ 56.4″	530.0755	2.4	3.1
第七次联系测量	45542.6017	38177.2741	45050.4866	37980.2816	201° 48′ 58.0″	530.0786		

3.洞内施工导线测量：在垂直顶升联系测量前，对洞内所有施工导线点进行了导线测量。见表4-2。

表 4-2 洞内各施工控制点支导线成果表

序号	点号	坐标成果	
		X (m)	Y (m)
1	JJ2	45542.6017	38177.2741
2	CM269	45050.4926	37980.2972
由于保密要求，中间站点数据隐藏处理			
12	CM2626	40646.5789	36292.4912
13	CM2869	40190.6328	36122.5676
14	CM3095	39781.3373	35927.8195

4.陀螺方位角测量：本次陀螺方位角测量选用洞内施工导

表 4-3 陀螺测量成果表

导线边	支导线方位角	陀螺方位角	差值
	(DD° MM′ SS. S″)	(DD° MM′ SS. S″)	″
CM2869-CM3095	205° 26′ 44.6″	205° 26′ 40.5″	-4.1

5.垂直顶升平面联系测量：

(1) 平面联系测量：采用悬吊单根钢丝进行坐标传递，分别采用边角观测法获取钢丝井上坐标 O 及井下坐标 O1。具体成果见表 :4-4。

表 4-4 顶升处联系测量钢丝坐标成果表

井上钢丝坐标 O		井下钢丝坐标 O1		Δx (mm)	Δy (mm)	ΔM (mm)
X(m)	Y(m)	X(m)	Y(m)			
38776.4256	35511.9016	38776.5522	35511.9001	-126.6	1.4	47.7

我们以 O 为真值，将钢丝上下坐标投射至隧道轴线上即可得出顶升处钢丝横向偏差为 47.7mm，里程方向偏差为 118.1mm。

(2) 高程联系测量：采用悬吊钢尺法进行观测，将井上高程引入至隧道内高程点 DX2求得 h，再与洞内水准引测至 DX2高程至 h1 比对，顶升联系测量处的高程偏差为 0.02mm。本次高程联系测量成果见表 4-5。

表 4-5 顶升处高程联系测量高程成果表

高程点点号	顶升联系测量成果	隧道支水准成果	Δh (mm)
	h(m)	h1(m)	
DX2	-23.7846	-23.7846	0.02

内支导线传递坐标之间的横向偏差为 47.4mm（推进方向右偏），垂直偏差为 0.02mm。

2.为保证该隧道顺利贯通，地下施工导线（平面控制）建议采用井上钢丝坐标 O 与 1# 大小盾构转换段入口处 JJ2 坐标成果组成无定向导线平差后成果用于指导后续盾构推进；地下高程点可沿用洞内水准点进行指导推进。

3.实测及垂直顶升联系测量结果表明：通过本文采取的测量精度提高措施和验证修正方法，可以提高长大越江隧道贯通测量的精度和可靠性，确保隧道的准确贯通和安全使用^[9]。

五、结论与建议

1.某轨道交通长大越江盾构推进至垂直顶升处钢丝传递与洞

参考文献

- [1] 张正禄.工程测量学 [M]. 武汉：武汉大学出版社，2018.
- [2] 周建郑.盾构隧道施工测量技术 [M]. 北京：人民交通出版社，2019.
- [3] 黄声享, 尹晖, 蒋征.工程测量学 [M]. 武汉：武汉大学出版社，2021.
- [4] 潘国荣, 王穗辉.地下导线加测陀螺边最优位置确定及精度分析 [J]. 同济大学学报 (自然科学版), 2004, 32 (5): 656-659.
- [5] 徐秀川, 段双全, 张伟.盾构法地铁隧道施工测量误差控制技术措施和方法 [J]. 城市勘测, 2021 (3): 135-138.
- [6] 李方.长距离越江隧道一次性掘进贯通测量关键技术 [J]. 测绘通报, 2019 (7): 112-115.
- [7] 司大刚, 熊文豪, 张世杰, 等.超长隧道平面控制测量横向贯通误差预估研究 [J]. 测绘通报, 2024 (1): 155-160.
- [8] 王长进, 刘成龙.垂直顶升测量在隧道贯通精度验证中的应用研究 [J]. 铁道勘察, 2020, 46 (2): 34-37.
- [9] 上海长江隧道工程指挥部.上海长江隧道工程贯通测量技术总结 [R]. 上海：上海隧道工程股份有限公司，2008.