

盾构法隧道测量控制技术的研究与应用

文 / 高健民 中铁十一局集团有限公司

摘要: 在盾构法隧道施工中, 勘测工作是盾构掘进的“眼睛”, 起到了导向作用。在空间狭小、受环境影响较大的条件下, 如何保证盾构机的定位精度, 保证盾构机的顺利进场, 就成了首要任务。通过对盾构机在始发、掘进和接收三个阶段的姿态测量工作的分析, 实现了盾构机在各阶段的精准定位; 这样, 就能确保盾构的顺利接收。

关键词: 盾构法隧道; 盾构姿态; 测量控制

【DOI】10.12254/j.issn.2096-6539.2025.01.029

前言

随着城市的发展, 地铁也得到了快速的发展。盾构法施工速度快、安全性高, 对地表通行量要求低, 自动化程度高而得到广泛应用。在盾构法施工过程中, 准确、高效地确定盾构的方位、姿态, 是盾构法施工的关键环节。随着地铁建设的发展, 大断面、长距离的隧道日益增多, 对测量精度要求越来越高。文章以一座盾构隧道为例, 对盾构法施工中关键环节的测量工作进行了分析。

一、盾构法原理及关键技术

盾构法是一种用于隧道施工的先进技术, 其定位的基本原理是通过使用精密的测量和控制手段, 实时获取盾构机的位置、姿态、掘进参数等信息。这些信息结合了地质条件、设计要求等因素, 被用来精确控制盾构施工的全过程, 不仅可以确保隧道施工的精度, 还可以保证施工的安全性^[1]。

盾构法施工测量的关键技术包括盾构机姿态测量、隧道轴线控制和掘进参数监测与调整。姿态测量通过实时监测盾构机的位置和姿态, 确保按设计要求进行掘进。隧道轴线控制利用测量和调整盾构机位置, 使隧道轴线符合设计要求。掘进参数监测与调整则通过对监测数据和盾构机的掘进参数的分析后进行, 以保证施工稳定和安全。近年来, 随着测量技术的发展, 先进技术如激光扫描和三维成像已被引入盾构法施工中, 提高了测量精度和效率, 进一步提升了盾构法施工水平和安全性。

二、盾构始发前的测量

(一) 始发姿态模拟

为了保证隧道初始成型的轴线符合设计要求, 盾构机始发后的姿态调节变得困难。因此, 在隧道掘进初期, 需要对盾构机的始发姿态进行模拟。这个模拟分为横姿和垂姿, 并按里程划分, 采用计算机仿真的方法进行。在约束条件下, 可以用分段计算的方法, 并增加模拟点。在直线段或斜度较小的段落, 通常采用正位始

发。而在曲线段和小半径段, 通过模拟验证可以确定盾构的掘进方式是切向掘进还是割向掘进。预先设定预埋转角或盾尾预偏角可以降低掘进的风险^[2]。

(二) 盾构钢环的定位

在主体结构施工过程中, 通常会预埋保护罩钢环。然而, 在实际工程中, 由于各种因素的影响, 隧道衬砌的实际长度往往与设计值存在较大偏差。因此, 在进行放样之前, 需要先测量地连墙的实际长度, 并计算出实际的圈心, 以便进行放样。完成预制后, 采用极坐标法来确定钢环中心的放样点位和钢环内径的实际测量值, 并将其与设计值进行比较。只有当钢环尺寸与设计值之间的偏差符合要求时, 才可以进行精确的浇注。在主体结构完工或开始施工之前, 还需要重新检查盾构管片的坐标, 以确定是否需要调整盾构机的始发位置。

(三) 始发托架、反力架的定位

通过对盾构机的初始状态进行模拟, 并结合设计图纸和盾构机的尺寸, 对其进行了定位计算, 得出了盾构机的初始位置。起始支架轨道的中间偏移量也就是 $L/2$, 标高为 $H_1 = H_0 - \Delta h$, 其中 $\Delta h = (R^2 - (L/2)^2)$, H_0 是隧洞的中央高度, R 是盾构机的外部直径, L 是起吊轨道的中间距离。在实际施工中, 隧道掘进机从支撑

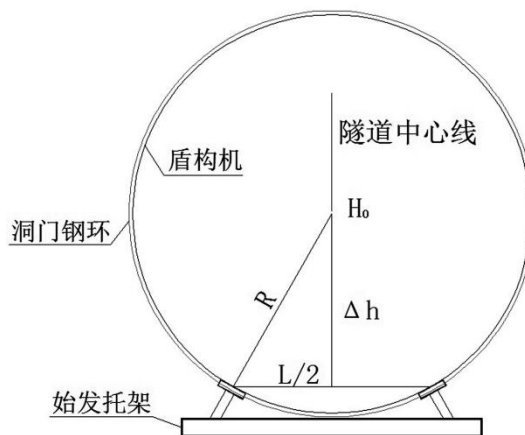


图1 始发托架示意图

架起往下压时，往往会发生“磕头”现象。要解决这个问题，就需要调整支架的前端和后端的高度。一般将前端相较设计隧道轴线抬高1cm~3cm，采用预先“抬头”的方法使垂直姿势保持平稳。起吊支架的关键装配精度要求如下：测量时，标高误差不超过±5mm，左右误差不得超过±10mm。

（四）盾构机始发姿态检核

盾构机安装完毕后，需要测量和校正其零位姿。通常，我们使用“盾壳剖中”的方法来测量盾构机的盾首、盾中和盾尾的位置。这种方法是在盾壳外侧等高的地方测量两个点之间的距离，并选取中间的一个点作为盾构机中心线的投影位置。同时，对修正后的盾壳内部特征点与隧道掘进机的姿态建立转换关系并进行相互验证。在对盾构机初始姿态进行检验时，必须保证盾构机在工作状态下，导向系统所给的位姿与实际的位姿是一致的。在此基础上，构建隧道掘进机的特征点及姿态转换参数，保证隧道导向控制系统在特定工况下的检测与修复的可靠性^[3]。

三、测量设备与方法

在盾构法隧道工程中，使用合适的测量设备与方法对工程的顺利进行至关重要。全站仪是一种高精度设备，可用于地面控制点的测量和隧道断面的测量。激光测距仪通过发射激光脉冲来测定距离，在隧道施工中可用于远程距离测量。陀螺仪用于监测和纠正盾构机的姿态偏差，确保按照预设轴线前进。位移传感器可用于实时监测盾构机和周边环境的微小变化。测量内容包括地面控制点测量、导向仪测量、电测距离测量等。地面控制点测量是基础，在关键位置设立固定观测站以保证施工精度和安全性。导向仪测量可用于实时调整盾构姿态，保持正确轴线。电测距离测量通过发送和接收电磁波来确定相对距离，常用于检测设备位置变化。在选择测量设备和方法时，需要综合考虑实际情况、地质条件和设计要求等因素。不同的阶段、环境和需求都会影响设备和方法的选择。

（一）掘进过程中的测量

在隧道开挖施工中，我们进行了联系测量、地下控制网测量、盾构姿态测量以及管片位姿测量。联系测量和地下控制网的测定已经有了很多研究成果。在进行联合定向时，最好采用两井定向+地下双导线的布网方式，但此处不作详细说明。

在隧道施工过程中，我们对盾构机的位姿进行了测量，并完成零位姿检查后进行下一步的移台定位。除了对盾构机的姿态进行测量之外，还需要对管片的位姿进行检测。目前，主要有横尺法和侧边法两种方法来检测管片的位姿。利用移动端软件的发展，可以实现对管片

圆周方向和半径的定位，从而得到隧道的中心坐标。采用这种方案，测量点数较多，精度较高。然而，由于盾构机后方台车的长度较大，难以直接从盾尾取出管片。因此，在实际工程中，我们可以联合应用这两种方法来获取管片的位姿。通过测量成形后的管片位姿，可以校正盾构的位姿。

（二）贯通测量

在完成了隧道施工后，需要对其施工过程中的贯穿误差进行检查。利用在隧洞两端测量到的同一点在洞内的闭合差和高程的闭合差来进行计算。该方法能较好地反应地面和地下控制网在施工期的测绘质量。

四、盾构测量重难点

（一）盾构施工过程中，测量工作特别要重视下列三点：

（1）在始发和接收过程中，需要事先进行盾构机位姿的仿真，以防止加固物的存在影响姿态的调整。这会造成隧洞中线的偏差，从而对限界产生一定的影响。为此，有必要对起始位置进行模拟。

（2）在盾构施工过程中，已组装好的管片需要进行稳定处理，并且这需要一定的时间。已经施工完成的管片由于施工原因可能会有一定程度的变形。为确保基准点的精度，需要定期复查相关控制点，并进行稳定性分析。在此基础上，通过实时检测盾构施工过程中管片的位姿，并与实测结果进行对比，以确保施工过程中的精确姿态。利用周期性测量获得的管片变形量进行统计分析，并预测拼装后管片在拼装到初步稳定过程中的变化，从而实现对接片位置的精确定位。

（3）地面控制向洞穴内部传输的准确性必然会受到一定影响，特别是在与测量环节相关的情况下，准确度的损失较大。为了确保联络点传输的定向精度，可以采取适当的措施，如延长地面和地面近井点与金属丝之间的距离、增加地下控制点的边长等，以降低误差。埋地导线应采用强制中设备，并通过提高网的强度来确保测量的准确性。

五、工程实例

在全球范围内，盾构隧道项目因其技术的成熟性和稳定性，已经成功应用于多个复杂环境下的穿越工程。请从国内外典型盾构隧道项目中挑选具有代表性的案例，并对之进行详细分析。

以国内某跨江盾构隧道项目为例，这个项目位于我国某条重要河流之下，面临着地质条件复杂、水压高、长距离等诸多难题。通过介绍施工过程中如何运用盾构法测量控制技术，成功克服地质条件复杂、水压高等困难，确保隧道施工精度和安全。同时，分析在施工过程中遇到的问题 and 解决方案，为类似工程提供参考。

这个案例的成功实施，不仅彰显了我国在盾构隧道技术领域的先进水平，也为今后类似工程提供了宝贵的经验借鉴和理论支撑。

(一) 工程概况

广州地铁18号线横番区间5#盾构井~HP6/7盾构井区间位于广州市番禺区，盾构机在HP5盾构井北端头（大里程端）始发，左线起止里程ZDK32+410.583~ZDK34+183.101，区间长1772.518m，右线起止里程YDK32+408.398~YDK34+146.182，区间长1737.784m。本区间结构型式为单线单洞结构，管片外径8.5m，管片内径7.7m，左右线线间距为17.13m~82.62m。区间隧道最大纵坡为11.337%，最小纵坡为0.4%。线路平面上有3个曲线段，曲线半径分别为1600m、1500m、900m。在施工过程中，利用高精度全站仪TS16和天宝DINI03型电子水准仪进行放样，并利用两个井口提升钢丝，完成了两个井筒的定位，并将地面坐标转换至地面。在施工期间，利用吊尺法对施工期间的标高进行了传递。联系测量控制点，为地下控制网提供初始数据。

(二) 洞门钢环

洞门钢环位于线路的直线上，没有偏移，其设计半径为4.65m，是一种新型的隧道结构形式。利用测量的座标，对地连墙的内部里程进行了反向计算，得到了放样的中心坐标。在对钢环进行了初步的加固后，对钢环内部的坐标进行了现场测量，在有限的施工条件下，一共收集了9个测点，这些测点的分布情况见下表2。点位基本上包括了上、下、左、右4个方向，其他有通视情况的地点都要进行记录。

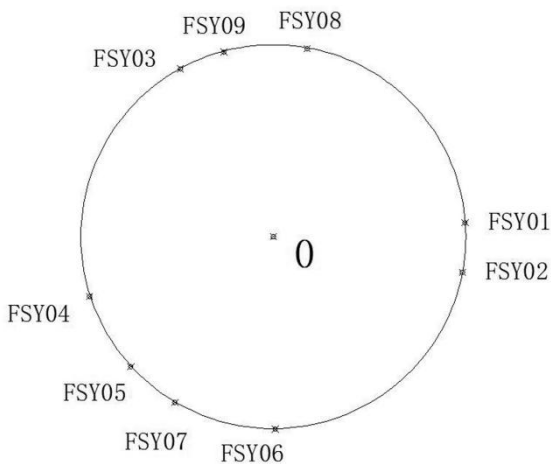


图2 钢环点位分布图

(三) 始发托架

始发支架的两个轨道的中间前缘宽3.20m，后端宽3.235m，盾构机的前端半径是4.425m，后端的半径是4.415m，起端的平曲线是一条直的，而垂直的垂直曲线

是2%的上坡路。洞门钢环经检查，其与设计位置基本一致，并已安装完毕。盾构机平面按照线路设计的方位摆放，垂直方向将支架垂直提升2cm。

(四) 管片姿态

在隧道施工中，采用水平杆法、左右测高法采集管片的位姿，采集1-360圈管片位姿，发现管片整体姿态整体稳定，在始发前60-80圈内的垂直偏差均在50mm以内，后续成形的管片姿态均能得到很好的控制。

(五) 贯通误差

在隧道贯通后，我们立即采用支基线在跨平面内对同一测点进行测量。由实测数据得出两套贯穿点的座标。计算结果表明，隧洞的横向贯通误差只有6.2mm，纵向贯通误差只有3.1mm。这两项指标都在规范范围之内。这说明，在整个建设期间，无论是地表还是地下，都是十分满意的。

六、展望未来发展趋势

随着科技的不断进步和新兴技术的不断涌现，盾构法隧道测量控制技术将不断发展和完善。未来可能的发展方向包括引入三维打印等新技术、开发智能化测量设备、研究多源数据融合等。本文从盾构法隧道工程简介、原理及关键技术、测量设备与方法、盾构参数优化与控制、成果表达与评价、实际案例研究以及未来发展趋势等方面对盾构法隧道测量控制技术进行了全面阐述。展望未来，随着科技的不断进步和新兴技术的不断涌现，盾构法隧道测量控制技术将不断发展和完善，为隧道工程的建设提供更加可靠的技术支持。

结语

本研究以广州地铁18号线横番区间5#盾构井~HP6/7盾构井区间为对象，对盾构法施工的各个阶段进行了分析研究。同时，我们提出了通过控制关键工序来准确把握盾构的实际位置和姿态，从而确保隧道的顺利贯通。本课题的成功实施对于类似工程具有一定的参考价值。

参考文献

[1] 钱美刚. 盾构法隧道轴线高精度控制测量方案设计与实践[J]. 山西建筑, 2022, 48(101): 423-424.
 [2] 刘璐. 长区间盾构法地铁隧道测量控制技术分析[J]. 四川水泥, 2023, 232(72): 247-249.
 [3] 骆红斌. 基于隧道盾构法的地下施工建筑物沉降控制技术研究[J]. 工程建设与设计, 2023, 323(112): 214-215.

作者简介：高健民（1989-），男，汉族，湖北荆州，中级工程师，本科，主要从事地铁盾构施工研究。