

浅谈封闭井盾构机本体调头及平移技术

顾益丹

上海隧道工程有限公司盾构工程分公司

摘要：在封闭式工作井内对盾构机本体进行调头平移等动作，可实现一台盾构机完成同一区间上下行隧道的施工工作。封闭及狭小空间需要借助专业起重设备及相应工装对盾构机本体进行水平180°旋转，更有甚者可能还需将盾构本体进行局部分解方能完成调头工作。文章结合施工案例介绍了一种在狭小空间内进行的非常规盾构调头技术，希望能够为今后相似条件的施工项目提供一些思路。

关键词：盾构机；井下调头；狭小空间；封闭井

【DOI】10.12254/j.issn.2096-6539.2024.08.043

一、前言

盾构机作为隧道掘进的专用工程机械，广泛用于地铁、铁路、公路、市政、水电等隧道工程。盾构机本体一般由刀盘、切口环、支撑环及盾尾等组成，出于工程筹划及成本考虑，在隧道掘进时经常采用利用一台盾构机进行同一区间上下行隧道施工的方式。当一条隧道贯通后，可以将盾构机本体分解后通过起重机及运输车辆将盾构机运送至始发井进行安装，也可根据需要采用起重及平移工装在接收井内将盾构机本体作为一个整体进行调头和平移。结合以往施工案例，在同一工作井内进行盾构机本体调头平移可以采用多种方法，如整体吊装、钢柱型移动法及盾构本体利用钢板之间的相对滑动等。井内调头平移相比吊装上井运输至端头井再进行组装在成本及工期上有较大优势，尤其适用于封闭式工作井，其缺点是井下整体平移对工作井的尺寸有一定要求，对现场操作人员的技术要求也较高。杭州轨道交通4号线项目金家渡站根据工程筹划，采用一台盾构机进行上下行隧道的施工，该工作井为封闭式且站层顶板无开孔，项目部结合现场实际状况采用了利用钢板之间的相对滑动进行本体调头的施工方案。

二、工程概述

金家渡站位于杭州市金昌路与古墩路交叉口，是地铁2号线与4号线的换乘车站，车站主体宽度23m，最大开挖深度26.6m，为地下三层双柱三跨箱形框架结构，其中地下一层为站厅层，地下二层为设备层、地下三层为站台。该区间隧道使用一台盾构机先完成右线的推进工作后，在工作井（接收井）完成盾构本体的平移及调头后再进行右线隧道的掘进作业。由于工作井顶部为封闭式，无法采用常规起重吊装的方式进行拆装机，因此只能利用起重及平移装置在工作井内进行调头工作。工作井长度约26.6米，呈梯形结构，右线最小处距离为10.26m，左线最大处距离为13.53m，左右线轴线距离约17米，工作井高度7.95m，工作井相关尺寸如图1所示。

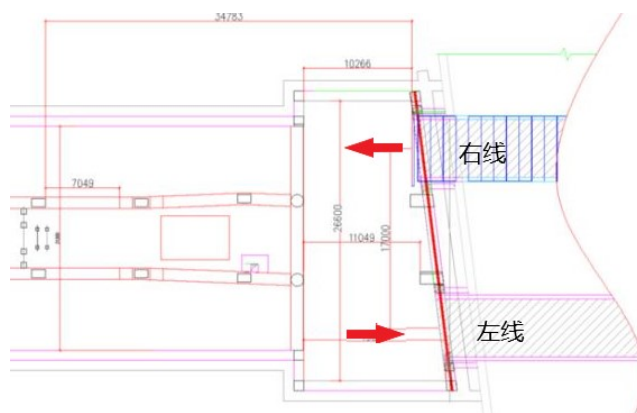


图1 工作井尺寸图

调头及平移所用的盾构机为国产863盾构，最大外径为 $\Phi 6390\text{mm}$ ，本体重量约274吨，主要部件尺寸及重量如下表1所示：

表1 盾构机主要部件参数表

序号	部件名称	数量	毛重 (t)	外形尺寸 (m)
1	刀盘	1	38	$\Phi 6390 \times 1580$
2	切口环	1	101	$\Phi 6380 \times 1773$
3	支撑环	1	121	$\Phi 6380 \times 3572$
4	盾尾	2	14	$6380 \times 3392 \times 3190$

三、盾构本体平移及调头工序

盾构本体全长约10.9m（含盾尾及螺旋机），超过右线10.26m的最小距离，无法满足一次性将盾构本体整体调头的条件。由于车站结构限制，需在右线接收位置处将盾构本体进行分块，再平移至工作井空间充足处进行调头作业，最后平移至左线始发位置处进行组装。盾构机完成右线推进并通过推进油缸顶伸至预定位置后，先利用碳刨将盾尾（长度约3.2m）与盾尾本体断开，先对除盾尾外的本体（长度约6m）进行平移及调头，盾构本体旋转180°所需的最小距离为8.8m，结合工作井实际尺寸，割除盾尾后先将本体平移至工作井中间位置，再进行调头旋转。之后继续平移本体至左线始发位置后，通过顶升油缸与搁凳的相互配合，调整盾构机本体到达始发高度，最后再以相同步骤完成盾尾的平移和调头工作。盾构本体调头及平移前，需将放置在本体下方的工字钢替换成调头及平移用的滚珠钢板，受限于垂直顶升油缸的行程，工字钢的替换过程需分多次进行。操作前先在顶升油缸底部放置搁凳1，顶升盾构本体后抽出本体下方的型钢，并垫上高度比原型钢低的搁凳2，放下盾构本体后用高度比搁凳1低的搁凳3替换搁凳1，重复之前的动作直至盾构本体放置在滚珠板上。实际施工中，金家渡站的盾构机参照图2所示流程完成了调头和平移工作：

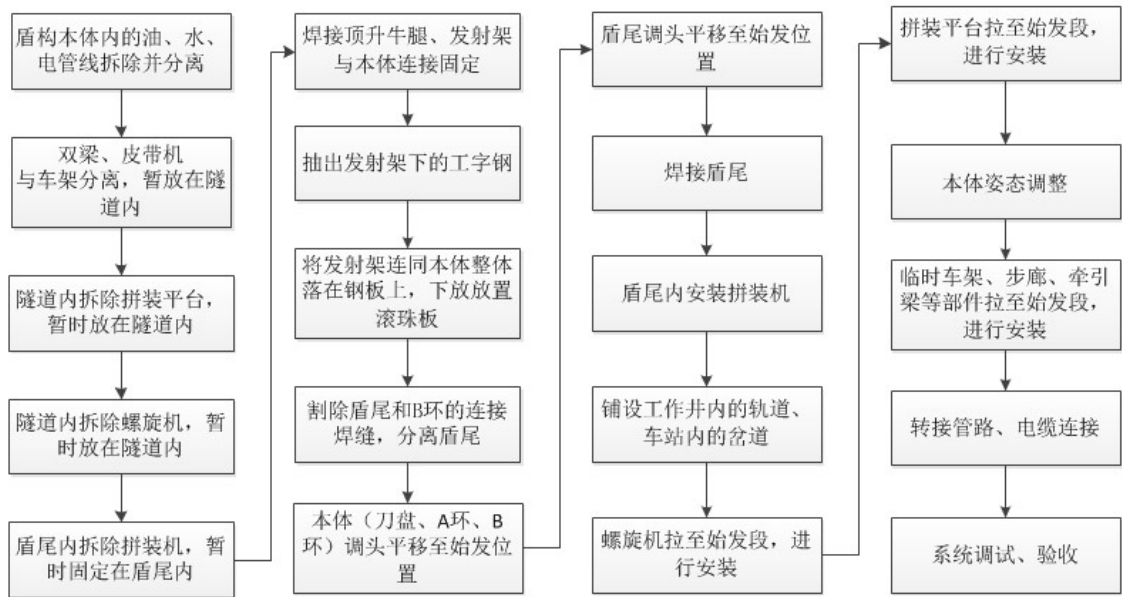


图2 盾构机调头流程图

四、调头施工的关键技术措施

(一) 平移及调头的原理以及设备

利用钢板之间的相对滑动进行本体调头的原理是将盾构机本体连同发射架作为一个整体，利用下方设置的钢球或聚四氟乙烯板材与工作井内事先铺设的钢板形成的摩擦副，以大幅减小移动盾构机的推力。聚四氟乙烯板材摩擦系数低，多用于大直径盾构调头平移的场合。在本项目采用了钢球形式的摩擦副。钢球安装在滚珠板形成的球窝内可自由转动，与滚动轴承相似。由通过在发射架外的液压油缸提供水平回转和平移的力进行本体调头和平移。盾构机完成掘进并顶伸到位后，需将盾构本体与搁置盾构机的基座焊接成一体，垂直顶升的液压油缸作用在预先焊接在盾构壳体上的顶升油缸支座上，油缸顶伸后将滚珠板铺设在发射架下方，设置在工作井内的横向及纵向油缸根据调头所需的角度的作用在盾构机本体的侧面，克服滚珠板的滚动摩擦力从而实现盾构机的平移和调头。滚珠板由钢板16mm钢板和 $\phi 80\text{mm}$ 钢球组合而成，钢板焊接的框架类似滚动轴承的保持架，钢球在球窝里可自由转动，使用前钢球满涂润滑油脂。每张滚珠板共9个滚珠，本次平移工作共使用24张滚珠板，其结构如图3所示。

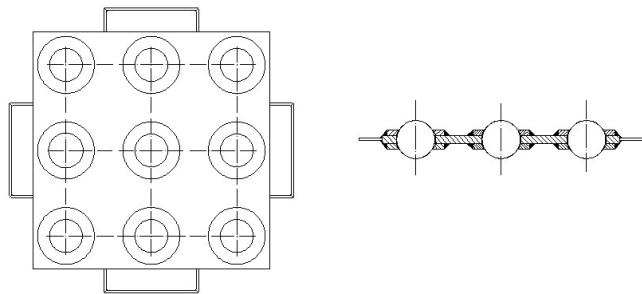


图3 滚珠板结构图

滚珠板设置后，利用2只100吨液压油缸将主机往顶端推，使主机完全脱出盾尾。将主机平移至工作井中间位置后，继续使用液压油缸对主体旋转 180° 完成调头，旋转过程中确保盾构机不与工作井产生干涉。之后继续使用液压油缸将主机平移至左线始发位置。盾尾调头和平移与主机相同，平移至始发位置后将盾尾与主机进行连接，并定位焊接。

(二) 盾构本体与发射架的可靠连接

为防止平移时因底面倾斜导致油缸顶伸受力不均产生安全隐患，工作井底板需事先采用黄沙铺平后，再满铺20mm钢板，钢板铺设范围内的平面度应不大于 $\pm 10\text{mm}$ ，钢板铺设后采用间断焊连接以限制钢板间的相对运动。完成以上工作后将接收基座放置在钢板上，盾构机完成推进并停留在接收基座上。盾构机与接收基座临时采用 $450\text{mm} \times 200\text{mm} \times 20\text{mm}$ 的钢板连接（如图4所示），每块连接钢板间距1500mm，数量共10件，接收基座重量约 $G=13\text{吨}$ ，钢板与盾构机之间采用双侧10mm角焊，计算得到角焊缝处的切应力 $\tau = G/S = 13 \times 1000 \times 9.8 / 10 \times 10 \times 0.7 \times 200 = 9.1\text{MPa}$ ，查得Q235焊缝的许用切应力 $[\tau] = 118\text{MPa}$ ，安全系数 $S = 1.5$ ， $\tau = 9.1\text{MPa} < [\tau] / S$ ，焊缝强度足够。

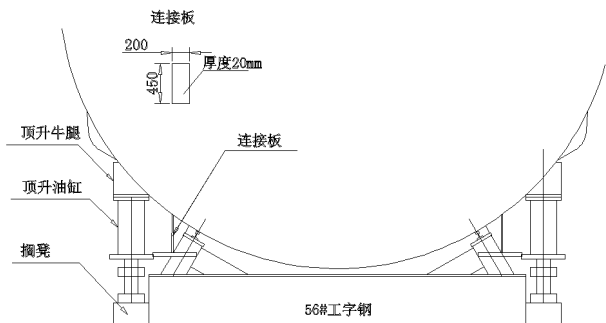


图4 连接板布置图

(三) 本体顶升过程的技术措施

拆除拼装机、螺旋机等部件后，利用顶升油缸将盾构机本体抬起，拆除接收基座下用来调节高度的工字钢后，放入滚珠板。当顶升油缸行程有限时，可以采用不同的搁凳组合将盾构本体高度逐级下降，直至使滚珠板与基座接触。机头外壳上焊接了4只顶升支架，为了防止顶升过程中的盾构壳体变形，焊接位置应考虑本体重心位置且选择在有筋板的位置，薄弱位置需进行内侧加强以防外壁凹陷。根据现场实际情况，前部两只顶升支架焊接在切口环土仓筋板处，后部两只顶升支架焊接在支撑环上推进油缸环板处（如图5所示）。盾构主机重量约为G=273吨（含基座，不含盾尾），利用4个200T液压油缸进行顶升。顶升支架尺寸300mm*300mm，采用40mm钢板拼焊而成，如下图所示：

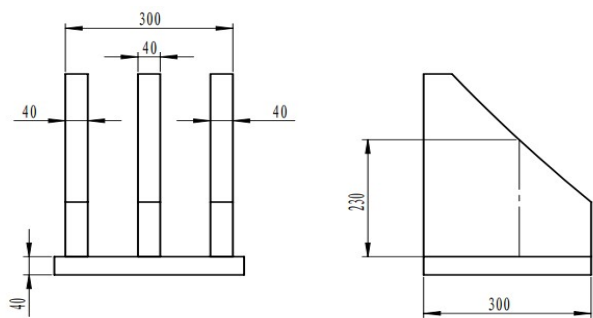


图5 顶升支架结构图

顶升支架与盾构机壳体的接触角度为 45° ，单个支架的竖直分力 $F_1 = G \cdot \cos 45^\circ / 4 = 273 \cdot 1000 \cdot 9.8 \cdot \cos 45^\circ / 4 = 473 \text{ kN}$ ，水平分力 $F_2 = G \cdot \sin 45^\circ / 4 = 273 \cdot 1000 \cdot 9.8 \cdot \sin 45^\circ / 4 = 473 \text{ kN}$ ，水平分力产生的弯矩 $M = F_2 \cdot L = 473 \text{ kN} \cdot 230 \text{ mm} / 1000 = 109 \text{ kNm}$ 。顶升支架的钢板焊接采用坡口焊，1、弯矩产生的正应力 $\sigma = M / n \cdot W_z = F_2 \cdot L / (b \cdot h^2 / 6)$ ，其中 $b = 40 \text{ mm}$ ， $h = 300 \text{ mm}$ ， $n = 3$ ，

得到 $\sigma = 60.5 \text{ MPa}$ ，弯矩产生的切应力 $\tau = 3 \cdot F_2 / 2 \cdot n \cdot S$ ，其中 $S = b \cdot h$ ， $n = 3$ ，得到 $\tau = 19.7 \text{ MPa}$ 。2、竖直分力产生的应力为压应力， $\sigma = F_1 / n \cdot S$ ，其中 $S = b \cdot h$ ， $n = 3$ ，得到 $\sigma = 13.1 \text{ MPa}$ 。3、最大正应力 $\sigma = 60.5 + 13.1 = 73.6 \text{ MPa}$ ，最大切应力 $\tau = 19.7 \text{ MPa}$ 。根据第四强度理论 $\sigma_{r4} = (\sigma^2 + 3\tau^2)^{1/2}$ ，得到最大正应力 $\sigma_{r4} = 81.1 \text{ MPa}$ 。顶升支架材质为Q235B，焊缝许用强度为 $[\sigma] = 127 \text{ MPa}$ ，安全系数 $S = 1.5$ ， $\sigma_{r4} = 81.1 \text{ MPa} < [\sigma] / S$ ，焊缝强度足够。对三维模型进行有限元分析，不考虑应力集中，最大应力约80MPa，与理论计算接近，如图6所示：

将搁凳换成24个滚珠盘后，放下盾构主机，割除盾尾。取滚珠与钢板之间的滚动摩擦系数 $\mu = 0.01$ ，本体重量（含接收基座） $G = 273$ 吨，平移所需推力 $F = \mu \cdot G \approx 27 \text{ kN}$ ，考虑到平移过程中底板下陷变形以及铺设钢板时的不平整度，选取2个100T油缸作用在基座两侧提供顶伸力。

五、结语

盾构机平移及调头是一项复杂的系统性工程，方案实施前必须做好细致的准备工作并进行相应验证，同时狭小的操作空间也要求制定合理的施工流程以便各工作面顺利衔接。本工程通过三维空间模拟以及有限元计算，按照预先制定的施工方案进行项目实施，计划工期36天实际工期30天，盾构机本体调头和平移工作顺利完成，本次案例对今后类似的工程提供了一定的指导及参考意义。

参考文献

- [1] 陈大先. 机械设计手册 [M]. 化学工业出版社, 1969. 6.
- [2] 单辉祖. 材料力学 [M]. 高等教育出版社, 2004. 8.
- [3] 汪琪, 李钧. 机械设计计算 [M]. 中国致公出版社, 1998. 5.

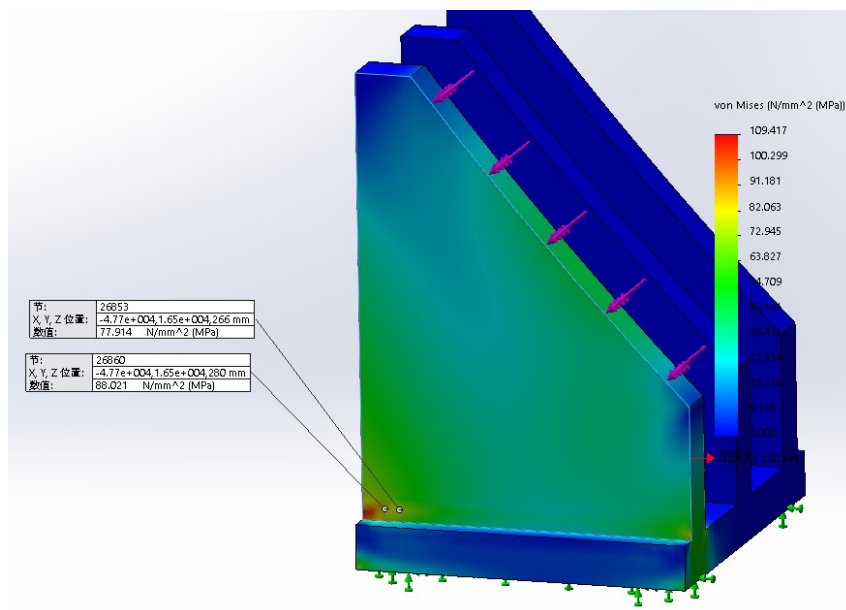


图6 有限元分析结果