

基于推拼同步盾构机的管片拼装机结构和 控制方法研究

屠 垒

(上海城建隧道装备有限公司, 上海市 200137)

摘 要: 针对推拼同步盾构机利用轴向插入式管片拼装中产生的额外推进时间进行管片拼装的特点, 分析了管片拼装机的适应性要求。通过对比多种拼装机方案, 最终采用不改变传统大平移拼装主体结构方案, 通过算法和控制使拼装系统具有跟随和补偿双模式, 可分别使拼装机主体与盾构机、成环隧道保持静止。针对推拼同步盾构机管片拼装的工况对拼装机平移梁的可靠性进行了分析, 可满足推拼同步工作要求。

关键词: 盾构机; 盾构推进; 管片拼装; 推拼同步

中图分类号: U445.43

文献标志码: B

文章编号: 1009-7716(2024)06-0192-04

0 引言

当前, 我国盾构隧道发展趋势迅猛、需求巨大, 且盾构隧道工程朝着大断面、大埋深、长距离的趋势发展, 并涌现出一批典型的成功的江、海底隧道和城市快速道路隧道施工案例, 单线盾构掘进长度甚至超过 10 km^[1-2]。如上海市域铁路项目, 单条隧道长度超过了 5 km, 沪通铁路项目单条隧道长度超过了 7 km, 上海崇明线项目单条隧道长度更达到了 9 km。常规盾构施工方式是在盾构机掘进完成一环管片的宽度, 完全停下来后才开始拼装管片, 这种“掘进—停机—拼装—再掘进”的串联式施工方法效率不高, 已无法满足国家快速的经济和社会要求。在盾构隧道形成的过程中, 工期主要取决于盾构推进和管片拼装两部分时间, 且两者耗时接近。采用推拼同步系统的盾构机(见图1)可将推进和拼装时间整合, 大大提高施工效率。

目前, 在国内外, 只有日本在推拼同步盾构机技术领域内的研究较早, 并有了相对成熟的工程应用。目前已有双油缸推拼同步工法^[3]、F-NAVI 盾构工法^[4]、LoseZero 推拼同步工法^[5]、格构式油缸盾构工法^[6]等。其中, 基于 LoseZero 工法的推拼同步盾构机技术, 是利用盾构推进油缸的压力控制实现掘进与

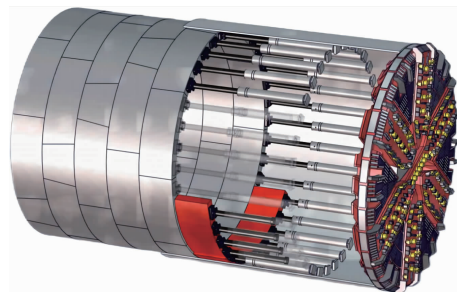


图1 推拼同步盾构示意图

拼装同步进行的快速施工方法。在确保开挖面稳定和掘进精度的同时进行管片拼装, 无需对盾构机主体结构、管片、出渣设备等进行较大的改良。

本文依托工程为上海市域铁路机场联络线3标工程, 贯通虹桥国际机场和浦东国际机场两大上海市重要交通枢纽, 此标段涉及两个盾构区间, 采用2台 $\phi 14.07$ m 泥水气平衡盾构施工, 隧道内采用单洞双线形式运行, 管片外径 $\phi 13.6$ m, 内径 $\phi 12.5$ m, 其中2号盾构搭载了推拼同步技术, 隧道全长5 657 m。凭借推拼同步技术, 对比市域1号机施工效率提升34.9%, 单日最快完成推拼15环。

1 推拼同步技术

市域铁路2号盾构推拼同步工法利用了轴向插入式管片拼装中产生的额外推进时间进行管片拼装, 缩短了管片拼装循环周期。依据标准工法中封顶块管片从隧道轴线方向插入盾构机中, 根据搭接量的不同需要掘进管片宽幅以上的距离(插入量), 因此不需要

收稿日期: 2023-10-07

作者简介: 屠垒(1968—), 男, 学士, 高级工程师, 从事隧道工程施工及管理工作。

从轴线方向插入的下部管片可以在盾构机掘进过程中进行拼装。因此推进油缸的行程参数是此类推拼同步盾构机提升效率的关键参数之一,推进油缸的长度则影响到壳体、盾尾的长度。同时,由于推进油缸和壳体长度调整,影响了管片拼装机真空吸盘的初始位置和行程,需基于推拼同步进行调整,并对结构可靠性进行计算。

管片拼装机是盾构掘进机的关键部件,它的作用是从喂片机上抓接管片,并运送到预定位置拼接管片。常见的管片拼装机型式有环臂式、大平移式等。大平移拼装机一般采用回转轴承形式,相对于环臂式拼装机具有更高的定位精度、高机械效率、振动小等优点,而且由于行程长更便于盾尾刷的更换,特别是近年来盾构管片拼装机正在往高精度、高智能、高效率的方向发展,大平移拼装机更具有优势,成为近年来盾构管片拼装机发展的趋势。一般,要满足管片拼装的需求,拼装机必须包括平移、提升、旋转三大动作,同时,为进一步保证管片准确地拼装到预定位置,抓接管片的管片抓取装置还包含偏转、前后俯仰、左右横摇这三个微调动作。管片抓取装置分为机械式和真空吸盘式,其中真空吸盘因为其自动化程度较高、高效率、可靠性成为目前应用最为广泛的嵌取机构。市域铁路工程拼装机采用大平移式管片拼装机,管片抓取装置采用真空吸盘。

推拼同步工法通过增加推进油缸行程盾尾长度增加油缸富裕量,管片拼装机抓接管片和拼接管片位置发生变化,需要根据推拼同步方案做调整,同时所需的平移行程增加,应满足推拼同步条件。

推拼同步工法的特殊性在于盾构机在掘进的同时,管片拼装作业、管片补给同时进行。常规的拼装机作业是在盾构机掘进停止后进行,故现有的拼装机设计在拼装作业的功能性上、便捷性,并不能很好的匹配推拼同步工法的需求,会在一定程度上增加拼装作业人员的作业难度,进而影响作业效率。故必须研究适应推拼同步作业的管片拼装机,以满足推拼同步高效要求。根据推拼同步作业特点,保持拼装机与管片的相对轴线静止是解决技术难点的关键,相应方案如图2所示。

2 推拼同步管片拼装机方案

拼同步盾构机的特点就是在管片拼装过程中,尽可能保持盾构主机的持续推进状态,从而达到缩短工期的效果。根据相关计算,推拼同步虽然会一定

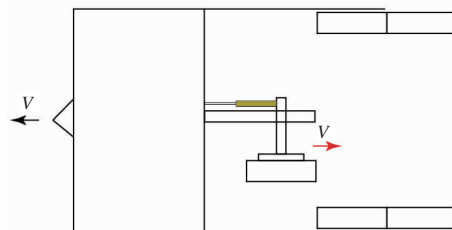


图2 同步拼装机拼装机方案

程度上增加拼接管片所需要的时间,但是在纯推进阶段节省的时间会更加显著,从而在总时间上完成了缩短的目标。在基础参数不变的情况下,推拼同步占比越大,工期缩短效果越显著。

由于在推拼同步过程中,管片拼装机与盾构机其余部件之间的相对运动关系会从普通拼装模式的相对静止状态变化为相对运动状态,同时相对速度会因此增大。这不仅会增加拼装过程的不稳定性,同时由于目标一直在发生变化,拼装操作过程会变得非常艰难,其中最大的难点之一就是拼装机管片抓取装置夹接管片的困难。在普通拼装模式下,拼装机主体与被抓取的管片在轴线方向上保持相对静止,通过拼装机管片抓取装置的位置调整完成管片的抓取固定动作。而在推拼同步盾构机上,如果拼装机保持结构与运动方式不变,那么因为其平移梁安装固定在壳体上,所以会与被抓取的管片存在轴线方向上的相对运动,不利于管片的抓取。因此解决抓取管片过程中如何保持拼装机与管片的相对轴线静止,是推拼同步盾构的要点。

针对推拼同步的特点,制定了4个可行性方案。

(1)方案一

采用大平移式管片拼装机,结构不做任何改制,如图3所示,盾构机在拼装机抓接管片时停推。此方案的优点是容易实施,效果稳定。和传统大平移管片拼装机结构对比,没有任何结构修改。缺点是直接减少了推拼同步在拼装过程中的占比,增加了推进油缸启动停止的次数。

(2)方案二

采用大平移式管片拼装机,同时增加管片拼装机平移油缸的工作模式——通过算法和控制使管片拼装机平移系统具有跟随和补偿模式,可以分别与盾构机、成型隧道保持相对静止。此方案和传统大平移式管片拼装机结构对比,也不需要做额外的结构修改,同时,不影响推拼同步在拼装过程中的占比。难点是若需要达到理想的效果,拼装机平移油缸的伸出速度应当与盾构主机推进速度实时相等,需要额外针对拼装机与被抓接管片的轴向相对距离的修

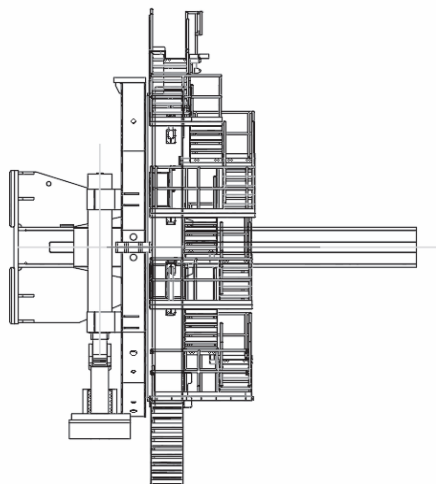


图3 方案一、二管片拼装机结构

正能力,拼装机平移油缸增加了工作模式,对电气控制与液压系统有了额外需求。

(3)方案三

采用挡拖轮式管片拼装机,对其主结构进行改造,在提升系统与盘体之间增加一组平移油缸,如图4所示,额外的拼装机平移油缸专门用于保证管片抓取过程中拼装机与管片之间的轴向距离相对静止。此方案的优点是不影响推拼同步在拼装过程中的占比,同时与方案二相比,无需对原拼装机平移油缸系统进行修改,在控制上更容易实现。缺点是和普通盾构机相比,需要额外修改结构,增加了油缸系统和对应的电气控制与液压系统等配套设施。因为原拼装机平移油缸系统的功能性不变化,所以拼装机结构占据的空间会增加,可能会影响主机长度;同时,拼装机平移油缸的伸出速度应当与盾构主机推进速度实时相等的需求,以及针对拼装机与被夹取管片轴向差距的修正能力的需求,转移到新平移油缸系统上。

(4)方案四

采用大平移式管片拼装机,对主结构进行改制,使拼装机平移梁不与壳体刚性连接,而是与车架连接,如图5所示。此方案优点是拼装机与被抓取管片在轴线上的相对距离保持恒定不变,不需要考虑速度修正,同时不影响推拼同步在拼装过程中的占比。缺点是和传统盾构机相比,需要大幅修改结构,拼装机与壳体之间需要增加油缸连接,同时因为盾构机的转弯半径,拼装机与车架之间仍需要安装姿势调整用的油缸系统。此外,由于拼装机不固定在壳体上,所以其工作中的所有负载转移到了车架上,车架结构难以承担这么大的载荷。可以考虑增加额外的止动装置将负载转移到周围管片环上,但这时管片环也将面临负载过大的问题。

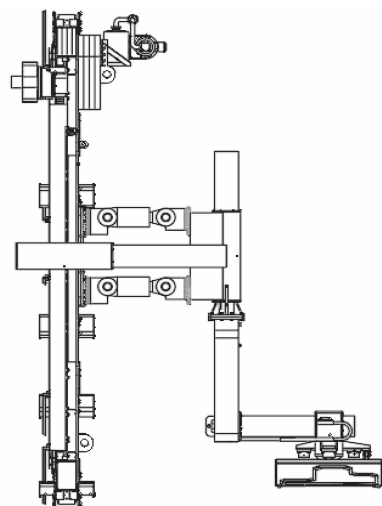


图4 拼装机方案三

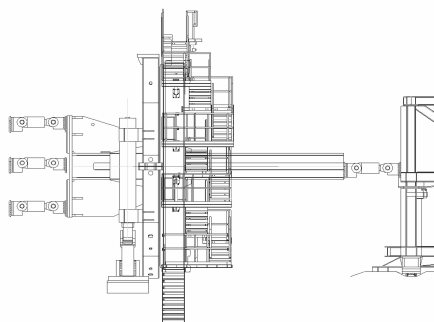


图5 拼装机方案四

综合考虑,方案三和四对管片拼装机的结构都需要大幅修改,同时也影响了盾构机的总体布置,增加了主机长度,受力情况差,风险太大。方案一和方案二都不需要更改拼装机结构,方案二相比方案一,不影响推拼同步在拼装过程中的占比,更具优势,且通过对液压系统和电气系统的升级、优化控制策略是可以实现的。因此,本同步盾构机采用方案二。通过实时采集推进油缸行程传感器数据,获取盾构机头向前运动的速度,并作为拼装机反向运动速度的目标值,控制器通过对反馈速度和目标值之间进行比较再对输出值进行修正,达到拼装机精准的闭环位移控制。

3 拼同步管片拼装机平移梁可靠性分析

管片拼装机轴向行程需要覆盖封顶块插入位置以及管片抓取装置平移至喂片机上方抓取管片位置,并满足拆装盾尾刷的需求。由于推拼同步盾构机推进油缸行程和盾尾长度增加,管片拼装机初始位置需要做相应调整,同时平移行程根据推进油缸行程方案进行增加,平移梁长度增加。平移梁一端固定在壳体H形梁上,属于悬臂结构,长度的增加对平移梁刚度影响较大,末端变形超差的风险增加。同时,与常规盾构机管片拼装的方式相比,推拼同步施工

是在盾构推进时持续进行管片拼装,此时拼装机平移梁除了受到管片拼装时的载荷外还同时受到后配套系统的牵引力。因此,重新评估平移梁的可靠性是十分必要的。

平移梁一端与H型梁固定,拼装机主体通过4个平移轴承在平移油缸作用下沿平移梁运动,拼装机主体在拼装管片过程中所承受的力通过平移轴承传递到平移梁,同时左右平移梁通过平移梁横梁连接,平移梁横梁与车架牵引机构相连,受到车架牵引力左右。平移梁的受力分析可按两种危险工况进行。

(1)拼装平移机构移动至行程最大处,此时平移梁受力有:平装机主体结构重力,拼装平台重力、管路重力、平移梁自身重力,有限元分析结果如图6、图7所示。

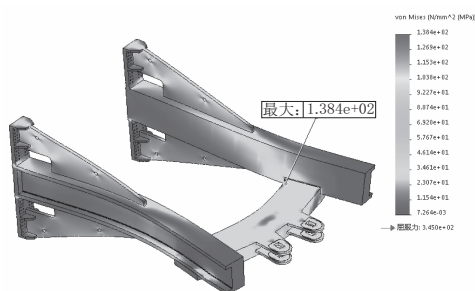


图6 工况1应力云图

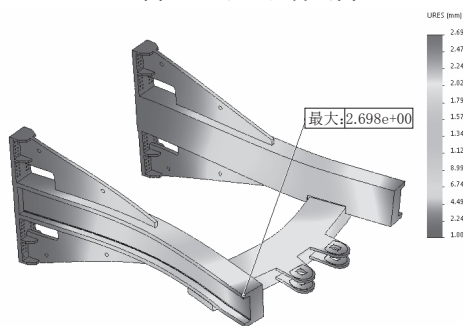


图7 工况1位移云图

(2)管片拼装机在90°方向拼装管片,此时,考虑工况最恶劣的情况,止水条对管片反力与同向,扭矩达到最大,则平移梁的受力有:平装机主体结构重力、止水条反力、拼装平台重力、管路重力、平移梁自身重力、车架牵引力,有限元结果如图8、图9所示。

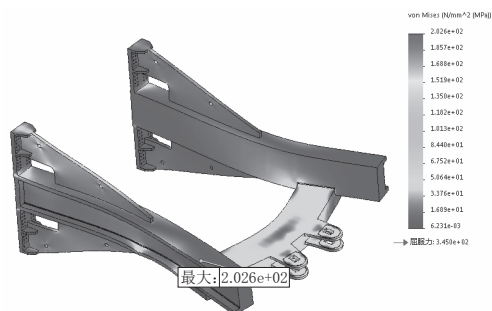


图8 工况2应力云图

推拼同步管片拼装机在拼装机平移至最大行程时,平移梁的最大应力为138 MPa,最大位移2.7 mm;

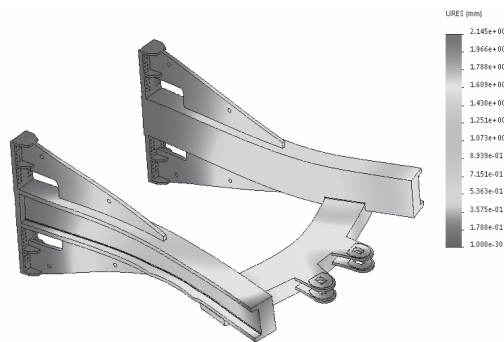


图9 工况2位移云图

在90°位置拼装管片时,平移梁最大应力203 MPa,最大位移2.1 mm。经分析,推拼同步拼装机在危险工况时,平移梁的强度和刚度满足设计要求。

4 结 语

基于利用轴向插入式管片拼装中产生的额外推进时间进行管片拼装的推拼同步工法,研究了管片拼装系统的适应性和可靠性,结论如下。

(1)推拼同步管片拼装系统设计的关键在在抓取管片过程中保持拼装机主体与成环隧道在轴向方向上的相对静止。

(2)经过几种方案的对比,采用传统的大平移式管片拼装机结构设计(市域1号机),增加平移行程以满足推拼同步的需求,同时在控制系统上采用跟随和补偿双模式,前者基于捕获的盾构推进速度反馈至拼装机大平移机构实现拼装机的位移互补,后者确保了管片拼装完成以后吸盘对已拼装管片的顺利脱离。

(3)对推拼同步管片拼装机的平移梁结构进行了可靠性分析,可满足推拼同步工况下的使用。

参考文献:

- [1] 王吉云.近十年来中国超大直径盾构施工经验[J].隧道建设,2017,37(3):330-335.
- [2] 洪开荣.我国隧道及地下工程近两年的发展与展望[J].隧道建设,2017,37(2):123-134.
- [3] 須田悦弘.ダブルジャッキ式同時掘進工法の開発(その3)ー東西連係ガス導管新設工事(富津工区)への適用~[J].土木学会第60回年次講演会,2005(9):193-194.
- [4] 林裕悟,鹿島竜之介,島厚夫.F-N A V I シールド工法による高速施工の事例紹介ー掘削・セグメント組立同時施工での施工実績(特集シールド機械と施工)[J].Construction Machinery and Equipment,2008,44(8):20-26.
- [5] 西明良.ロスゼロ工法ーシールド部分同時施工法[J].土地改良,2007(45):1-3.
- [6] 斎藤進,室木紀彦,山本邦男.ラチス式同時施工シールド工法による長距離施工ー大阪府寝屋川流域恩智川東幹線下水道工事[J].Tunnels and Underground,1999(30):717-724.