

双模式 TBM 刀盘集成式超前钻探系统设计及其与掘进协同作业研究

朱国鑫

浙江海聚科技有限公司 浙江 杭州 311100

摘要：双模式TBM刀盘集成式超前钻探系统旨在实现掘进与钻探协同作业，适应复杂地质。系统设计受刀盘空间、震动等多重约束，具备取芯钻探与冲击钻探双模式。通过模块化设计，实现取芯钻进模式与冲击钻机模式快速切换，满足隧道掘进过程中，不同地层下的超前钻探需求，减小钻探作业对TBM掘进的工期影响。该系统为复杂地质隧道施工提供高效、安全的钻探技术方案，提升隧道施工效率与质量。

关键词：TBM；刀盘集成；双模式超前钻探系统；协同作业；复杂地质

引言：在复杂地质隧道施工中，传统施工方式面临诸多挑战，难以高效精准地获取前方地质信息并保障施工安全与进度。双模式TBM刀盘集成式超前钻探系统应运而生，其将取芯钻探与冲击钻探功能集成，模块化设计，实现取芯钻进模式与冲击钻机模式快速切换。该系统设计需综合考虑TBM内狭小空间作业的施工条件，恶劣的现场环境，制定快速、有效的便捷切换计划。通过深入研究设计，旨在为复杂地质条件下的隧道施工提供先进、可靠的、高效的地质钻探，推动隧道施工技术的创新发展。

1 双模式TBM刀盘集成式超前钻探系统总体设计

1.1 系统设计约束条件

双模式TBM刀盘集成式超前钻探系统的总体设计需严格遵循多重约束条件，以保障系统与TBM主体设备的兼容性及作业可靠性。空间约束是核心前提，盾体内部安装空间有限，钻探系统需采用紧凑化结构设计，避免与拼装机、驱动机构等核心部件发生干涉；同时，由于空间狭小，大型吊运设备无法在该空间内使用，系统切换需考虑各部件的质量不得过重。载荷约束方面，钻探系统运行时产生的轴向力、扭矩需控制在齿圈承载阈值内，防止齿圈变形失效导致其他结构干涉甚至发生事故。环境约束要求系统具备耐高温、抗粉尘、防渗水性能，适配隧道施工中的恶劣工况^[1]。功能切换约束需满足钻探与掘进模式的快速切换，切换时间不影响施工进度，同时需兼顾系统的可维护性与经济性，确保零部件更换便捷且制造成本可控，各项约束条件相互关联、协同制约，构成系统设计的基础框架。

1.2 双模式功能定义

双模式TBM刀盘集成式超前钻探系统的核心功能定

义为冲击钻进模式与取芯钻探模式的协同适配。冲击钻进模式下，钻探系统采用水动力潜孔锤（品牌Wassara），进行快速的钻进。该潜孔锤可以适应超硬岩层，并且在深长孔钻进过程中，保持优秀的直线度，利用其冲击钻进，快速钻进至目标位置。取芯钻进模式启动时，钻探系统采用取芯钻具，该钻具通过金刚石环形钻头磨削岩层，岩心储存在内管中，随钻具取出至孔外，供后续实验室做地质分析。双模式切换功能需实现模块化设计，易搬运，切换高效便捷，通过双模式的灵活切换，可以实现，TBM掘进遇到特殊地层时，在目标位置快速取样，分析岩层，判定地质风险，制定处理方案。

1.3 系统组成与工作原理

双模式TBM刀盘集成式超前钻探系统主要由钻臂集成模块、动力驱动模块、潜孔锤模块、取芯钻具模块、切换机构及测控模块。切换机构是核心执行部件，采用快速拆装结构实现潜孔锤模块与取芯钻具模块的高效换装；动力驱动模块提供钻探所需的轴向推力与旋转扭矩，配备变量泵组实现动力参数的无级调节；测控模块负责模式切换控制、参数采集与故障诊断。工作原理为：快速钻进时使用潜孔锤模块钻进；需要取芯时，通过切换机构将取芯钻具模块换装至动力驱动模块上，动力驱动模块带动取芯钻具旋转钻进，同时实时采集钻探参数与地质数据，传输至TBM主控系统，实现地质超前探测与掘进施工的协同衔接。

2 双模式TBM刀盘集成式超前钻探系统详细设计

2.1 核心模块详细设计

结合系统总体设计要求及刀盘集成布局特点，针对各核心模块开展详细设计，兼顾紧凑性、可靠性与切换效率，适配TBM隧道施工恶劣工况。钻臂集成模块采用

折叠式结构设计, 选用高强度铝合金材料, 在满足承载要求的前提下最大限度降低模块重量, 便于狭小空间内的安装与调试, 折叠后占用空间缩减40%以上, 有效规避与TBM拼装机、驱动机构的干涉问题。钻臂长度可根据刀盘尺寸与钻探深度需求, 实现0.8~1.2m无级调节, 末端配备快速连接接口, 与动力驱动模块精准对接, 保障钻探过程中的稳定性。

动力驱动模块采用液压驱动方式, 配备大功率变量柱塞泵与减速机, 输出轴向推力范围为50~200kN, 旋转扭矩可在1000~5000N·m之间无级调节, 适配不同地层钻探需求。模块内部集成冷却系统与减震机构, 冷却系统采用水冷循环方式, 可将模块运行温度控制在60°C以内, 适配隧道高温作业环境; 减震机构采用橡胶减震垫与弹簧阻尼组合结构, 有效吸收钻探过程中产生的震动, 降低对TBM刀盘及主体结构的影响, 震动衰减率达65%以上。

切换机构采用快换接头与定位销组合结构, 设计专用换装支架, 实现潜孔锤模块与取芯钻具模块的快速拆装, 切换时间控制在30min以内, 无需大型吊运设备, 仅需2名操作人员即可完成切换作业。切换机构设置定位检测传感器, 确保模块换装后的同轴度误差不超过0.5mm, 避免钻探过程中出现偏斜、卡钻等故障。潜孔锤模块选用Wassara水动力潜孔锤, 钻头直径设计为110mm, 适配超硬岩层钻进, 钻进速度可达1.5~2.0m/h; 取芯钻具模块采用金刚石环形钻头, 取芯直径为89mm, 岩心采取率不低于90%, 确保地质分析的准确性。

2.2 刀盘集成布局设计

结合TBM刀盘结构特点与作业需求, 优化钻探系统在刀盘上的集成布局, 兼顾钻探效率与刀盘掘进性能, 避免相互干扰。采用周向均匀布局方式, 在刀盘边缘区域设置3个钻探孔位, 孔位间距120°, 避开刀盘主驱动齿轮与刀具安装位置, 确保刀盘旋转过程中钻探系统不与其他部件发生干涉。钻探孔位设计为可拆卸式结构, 平时采用密封盖板封闭, 避免掘进过程中粉尘、岩渣进入孔内, 影响钻探系统正常运行; 钻探作业时, 拆除密封盖板, 快速安装钻探模块, 实现掘进与钻探的快速切换。布局设计充分考虑刀盘震动影响, 在钻探孔位周围增设加强筋结构, 提升孔位承载能力, 防止刀盘掘进过程中孔位变形^[2]。同时, 优化钻探模块与刀盘的连接方式, 采用高强度螺栓固定, 配合减震垫片, 进一步衰减刀盘震动对钻探系统的影响, 保障钻探过程中钻具的直线度, 钻孔倾斜度控制在1%以内。此外, 布局设计兼顾系统维护便利性, 每个钻探孔位均预留维护空间, 便于操作人员对钻

探模块进行检修、零部件更换及故障排查, 提升系统可维护性。

2.3 测控模块设计

测控模块采用PLC主控单元+触摸屏操作界面的设计方案, 实现系统模式切换、参数调节、数据采集与故障诊断的一体化控制, 与TBM主控系统实现数据互通, 保障协同作业顺畅。PLC主控单元选用高性能工业级PLC, 具备耐高温、抗干扰、响应速度快的特点, 采样频率可达10Hz, 能够实时采集钻探过程中的轴向推力、旋转扭矩、钻进速度、冲击频率等参数, 同时接收TBM主控系统传输的掘进速度、刀盘转速、管片拼装进度等信息, 实现数据协同。触摸屏操作界面采用中文显示, 布局简洁、操作便捷, 操作人员可通过界面实现冲击钻进与取芯钻进模式的切换, 手动调节钻探参数, 查看实时钻探数据与地质信息, 同时可查询历史数据、故障记录等。测控模块设置多种故障报警功能, 当钻探系统出现参数异常、模块连接松动、钻具卡钻等故障时, 及时发出声光报警信号, 并在操作界面显示故障类型与处理建议, 同时将故障信息传输至TBM主控系统, 提醒操作人员及时处理, 避免故障扩大, 保障施工安全。

3 协同作业控制策略

3.1 协同控制架构设计

协同作业控制架构设计紧密围绕实现TBM掘进与超前钻探高效协同这一核心目标展开。针对不同场景制定钻进匹配策略。当探测到围岩基本稳定时, 系统采用高效的潜孔钻进作业模式, 匹配较高的动力模块转速、钻探推力与冲击频率, 达到较高的钻探速度, 以提高施工效率, 缩短工期。当探测到围岩破碎或存在不良地质体时, 及时切换至取芯钻进模式, 降低钻探速度, 并取芯做岩性分析, 准确判定地层信息, 制定地层处理方案, 确保施工安全。建立参数匹配数据库, 纳入不同地质条件下的最优参数组合, 为掘进参数调整、地层加固处理提供参考依据。确保刀盘掘进与钻臂钻探的作业协同, 避免因地层不明导致的施工风险或设备故障, 提升地质勘探的有效性与及时性^[3]。

3.2 地层适配与参数匹配策略

针对不同地质场景制定钻进匹配策略, 实现地层适配与高效钻探。当感知层传感器探测到围岩基本稳定、岩层硬度适中时, 系统自动切换至潜孔锤冲击钻进模式, 动力驱动模块匹配较高的转速、钻探推力与冲击频率, 转速调节至80~100r/min, 冲击频率控制在30~40Hz, 钻探速度可达1.5~2.0m/h, 以提高施工效率, 缩短工期。当探测到围岩破碎、存在裂隙或不良地质体时, 系统立即发出信

号,自动切换至取芯钻进模式,降低钻探速度至0.3-0.5m/h,减小钻探推力与转速,避免扰动围岩导致坍塌,同时通过取芯钻具获取岩心样本,传输至实验室进行岩性分析,准确判定地层信息与地质风险,为制定地层加固处理方案提供依据。建立参数匹配数据库,结合不同地质条件(如花岗岩、砂岩、泥质页岩等)的钻探实践数据,纳入各地层对应的最优钻探参数组合,包括转速、推力、冲击频率等,系统可根据感知层采集的地质信息,自动调用数据库中的最优参数,实现参数的自适应调节,提升钻探效率与质量。

3.3 时空协同作业流程设计

结合TBM掘进、管片拼装的作业流程,设计钻探与掘进的时空协同作业流程,最大限度减少钻探作业对掘进工期的影响。采用“错峰作业、并行协同”的模式,当TBM进行管片拼装作业时,利用拼装间隙开展超前钻探作业,此时刀盘停止旋转,钻探系统启动,快速完成钻探取样或地层探测作业,管片拼装完成后,钻探系统立即完成模块切换与复位,TBM恢复掘进作业,实现拼装与钻探的并行作业,避免单独停机开展钻探导致的工期浪费。针对不同钻探需求制定差异化作业流程:常规地层探测采用“间歇式钻探”模式,每掘进50-100m开展一次超前钻探,每次钻探深度为10-15m,快速完成地层探测后立即恢复掘进;复杂地质段采用“连续式钻探”模式,缩短钻探间隔至20-30m,同步开展取芯分析与地层监测,实时反馈地质信息,动态调整TBM掘进参数,确保施工安全。同时,明确各工序的作业时间节点与衔接要求,建立协同作业调度机制,避免出现工序冲突,确保掘进、钻探、管片拼装等工序有序衔接,提升整体施工效率。

4 工程应用验证

4.1 应用场景与需求分析

在复杂地质隧道施工中,地质条件多变,传统钻探方式难以兼顾效率与精准性。双模式TBM刀盘集成式超前钻探系统需满足多场景需求:在坚硬岩层中,要实现快速钻进以获取地质信息;在破碎岩层或存在不良地质体时,需精确取芯分析,为施工方案调整提供依据^[4]。同时,系统需与TBM掘进、管片拼装等工序紧密协同,减

少对整体工期的影响。

4.2 系统性能验证

系统安装调试后,对双模式切换功能进行测试,切换时间严格控制在设计范围内,确保施工节奏紧凑。在不同地质条件下,验证钻探参数调节的精准性,动力驱动模块能根据地层变化,快速调整轴向推力、旋转扭矩等参数,满足多样化钻探需求。测控系统数据传输稳定,与TBM主控系统无缝对接,实现信息实时共享,保障协同作业顺畅。

4.3 协同效果评估

通过模拟不同施工场景,评估系统与TBM掘进、管片拼装的时空协同效果。结果显示,系统能充分利用管片拼装间隙开展钻探作业,无需单独停机,显著减少钻探对掘进工期的影响。同时,根据地层变化及时切换模式,有效识别地质风险,为施工安全提供有力保障,验证了系统在复杂地质隧道施工中的实用性与高效性。

结束语

双模式TBM刀盘集成式超前钻探系统设计及其协同作业研究,为复杂地质隧道施工带来新突破。通过系统总体设计、详细设计、协同控制策略研究及工程应用验证,实现了掘进与钻探的高效协同,提升施工安全性与效率,解决了单一钻探模式适应性有限、作业干扰大的行业痛点。未来,随着技术不断进步,该系统有望进一步完善,优化模块结构与协同控制策略,提升地层适配能力与钻探效率,在更多复杂地质场景中发挥重要作用,助力隧道建设事业迈向新高度。

参考文献

- [1]刘丛林,吴宁.轨道交通中基于复合式结构刀盘的土压TBM双模盾构设计及应用[J].安装,2025(5):9-11.
- [2]吴宁,刘丛林.地铁工程建设中的土压/TBM双模式盾构洞内转换刀盘技术[J].建设机械技术与管理,2025,38(2):157-159.
- [3]张家年,陈敬举,尚二东,等.土压/TBM双模盾构刀盘溜渣系统设计研究[J].建筑机械化,2025,46(2):68-70.
- [4]李雪,任伟,吴九七,等.长距离复合地层EPB/TBM双模盾构刀具磨损规律及影响因素研究[J].铁道标准设计,2025,69(12):144-151.