

# TBM智能化技术发展现状及未来研究重点探析

王 磊

中铁电建重型装备制造有限公司 云南昆明 650200

**摘 要：**全断面隧道掘进机（TBM）智能化是改善隧道施工效率和安全的关键举措，本文梳理其技术现状并探寻未来发展道路，已有的技术主要围绕三类核心内容展开：第一类是以多传感器融合和数据驱动为基础的智能感知技术，用于实现对地质的精确预测，第二类是利用人工智能的智能控制技术，用于改进掘进参数，第三类是利用数字孪生技术，实现全生命周期经营，虽然已经取得了长足的发展，但是仍然存在岩机作用机制不明、数据和算法不够鲁棒等问题，以后的研究重点将放在建立地质-岩机-控制一体理论体系、开发更可靠的传感技术、将实现“无人化”自动智能挖掘作为最终目标上，从而为行业的发展提供最根本的动力。

**关键词：**全断面隧道掘进机；智能化；智能控制；数字孪生；自主掘进

## 引言

全球隧道工程越来越复杂，传统全断面TBM凭借操作经验施工的方式，难以满足现代工程对效率、安全、经济性的极致要求，把人工智能、大数据、数字孪生等新一代信息技术同TBM深度融合，发展智能化掘进技术，已成为业界共识和必然趋势，这是改良装备性能的关键，也是推动隧道工程行业转型升级的重要引擎，笔者想全面评价这项技术的现状，剖析瓶颈和难点，探究未来重点研究方向，给相关理论和工程应用提供参考。

## 一、TBM智能化关键技术发展现状

### 1.TBM智能感知及地质预测技术

TBM掘进本质上就是刀盘破岩与围岩相互作用的过程，对于前方和周边的地质环境做到精准感知是智能化掘进的第一要务，传统地质勘探手段具有滞后性和局部性，很难满足TBM连续、快速掘进的需求，于是基于TBM掘进信息开展实时感知并实现超前地质预报的技术应运而生，从实时感知的角度来看，如今的TBM装备上装有大量的传感器，如压力、扭矩、位移、温度、振动等传感器，形成了一张复杂的机载感知网，这些传感器可以实时监测刀盘、主驱动、推进系统、支撑系统等关键部位的运行状态参数，通过对这些海量、高维的掘进参数进行深入挖掘和分析，就可以反演出当前掌子面

岩体力学特性。比如利用刀盘扭矩、总推力等参数与岩石强度、完整度之间的映射关系，然后用机器学习算法（支持向量机、神经网络等）来建立岩体等级的实时识别模型，这样就能对围岩类别实施自动分类，给后续掘进参数的自动调节给予直接依照，不过，仅凭掘进参数做地质解译，其精确性及可信度是有限的，因为这是一种“随掘感知”，针对前方未知的重大不良地质体，像断层破碎带、软弱夹层、岩溶发育区之类的，就无能为力了，所以发展超前地质预报技术是很有必要的，现在用来做TBM超前地质预报的技术主要有地震波反射法（TSP）、探地雷达（GPR）、瞬变电磁法等等，其中地震波法探测距离最远，最能感受到构造界面，所以被应用得最多。地震波探测就是在盾体里面布置震源和拾震器，主动发射地震波，让地震波在不同岩层界面反射回来，经过一系列复杂的数据处理和反演成像，就能得到前面几十米甚至上百米范围内的地质构造图像，把探测到的地球物理参数数据和其他掘进参数、地质素描、超前钻探信息合在一起，再用数据融合的技术手段（像卡尔曼滤波、贝叶斯网络等等），就能建立起更加完善、立体感更强、动态特征更明显地质模型，而且还能大大提高地质预报准确率 and 可靠度，给TBM穿越复杂地段提供决策依据。

### 2.TBM智能控制与智慧决策技术探索

精准感知之后，TBM庞大的机电液系统怎样才能得到高效的协调控制，并作出合理的掘进决策，这是智能化的重要体现，TBM的掘进参数，比如刀盘转速，总推

**作者简介：**王磊（1994.4.2-），男，汉，陕西宝鸡，助理工程师，主要研究方向：TBM/盾构机技术方面。

力, 泡沫注入量等等, 它们彼此之间有着很复杂的耦合关系, 而且对于地质条件的变化非常敏感, 传统的人工操控方法之下, 操作手只能依靠经验和仪表盘显示的有限信息来做调整, 工作强度大不说, 还难以保证掘进参数始终处于最佳状态, 这样就造成了掘进效率忽高忽低, 刀具磨损不均匀等情况的发生。智能控制技术想要借助先进的控制算法来取代或者帮助人去做参数优化, 模糊控制, 神经网络控制这些智能控制算法已在这一领域得到初步应用, 模糊控制技术能很好地模仿人的模糊思维和经验知识, 通过创建“IF-THEN”规则库, 把操作手的经验转换成机器能够执行的逻辑, 进而实现对掘进速度和推力的自动调节。神经网络凭借自身强大的非线性映射以及自学习能力, 可以对历史掘进数据进行学习, 在这个过程中会自动建立地质情况到最合适的掘进参数之间的模型, 从而实现对控制参数的自动调整。近些年由于强化学者算法的发展, 开始有人尝试将强化学习算法应用于TBM的最优控制上, 即构建TBM掘进过程的模拟环境, 让智能体(agent)在其中不断地试错学习, 最终实现掘进效率的最大化、能耗消耗的最小化, 通过自身不断地试错学习来发现最优控制策略的方法来替代精确的数学模型与专家知识, 这在未来有很大的发展空间, 不仅是掘进参数单机的最优控制问题, 还可以进一步延伸到TBM掘进的自动控制决策, 包括TBM掘进姿态的自动调节与纠正。通过融合陀螺仪、加上TBM的运动学、动力学模型, 就能实现对掘进轴线的精确跟踪与自动控制, 减少人工干预, 保证隧道成型质量。基于大数据的智慧决策支持体系, 可以整合分析整个工程项目的地质信息、设备状况信息、施工进度信息等, 为施工管理人员提供风险预报、工效评价、维保计划等宏观决策支持, 把智能化从设备层面提升到项目运作层面<sup>[1]</sup>。

### 3.TBM数字孪生与全生命周期管理研究

数字孪生技术是物理世界与信息世界融合的结果, 给TBM的智能化发展赋予了系统级的解决方法。TBM数字孪生就是用物理模型、传感器数据、运行历史等, 在虚拟空间里创建一个跟实际TBM完全相同、能随时同步的高保真数字模型。这个孪生模型不仅要包含TBM的三维几何模型, 而且更要包含TBM的运行机理、性能状况以及它同周围环境的互动逻辑, 数字孪生体的创建首先要把TBM准确地创建起来, 包含设备的三维几何模型、各个子系统的动力学模型、液压和电气控制模型等等, 在这些模型的基础上, 再利用物联网技术, 把实际TBM

上传感器搜集到的即时数据(压力, 流量, 转速, 温度, 震动等等)以毫秒级别速度传送到虚拟模型里, 这样虚拟模型就能立刻带动实际设备同步运转, 做到“虚实对应”。这种实时同步的数字孪生体给TBM的全生命周期管理带来革新, 设计制造的时候, 用数字孪生模型当作虚拟样机, 模仿不同工况下的设备表现, 改良设计方案, 掘进施工期间, 数字孪生体变成一个全方位可视化的监测平台, 管理者仿佛亲身置身其间, 可以全面观察设备内部各个部件的运作情形, 更关键的是, 可以在孪生模型上执行各种掘进策略的仿真和推演, 比方说, 在遭遇不良地质之前, 就能在虚拟环境里预演TBM穿越的过程, 评判不同掘进参数给设备负载以及掘进效率带来的影响, 从而制订出最合适的应变预案, 做到“先发制人”。设备运维阶段, 数字孪生技术价值凸显, 对历史与实时监测数据加以分析, 数字孪生体凭借内置的设备健康评估算法, 能够预测刀具磨损, 主轴承, 液压系统泄露等故障的发生, 还能预测部件RUL, 指导维护人员开展基于状态的预测性维护, 从被动的故障维修转变为积极的预防性维护, 缩减非计划停机时间, 保障工程正常推进<sup>[2]</sup>。

## 二、TBM智能化发展挑战与未来研究重点

### 1.TBM智能化面临的核心挑战

现阶段TBM智能化发展的阻碍是全方面的, 系统化的, 一是从感受层来看, 对地质-岩机强耦合的认识还不够深入。TBM掘进的过程是非常繁杂且动态变化的一个过程。刀头跟岩石之间存在着很多的交互过程, 例如刀头跟岩石之间刀具的相互作用和渣土的流动与排出, 围岩的变形与稳定, 很多不同的物理过程在不断发生着, 而且都是瞬息万变的过程, 我们现在所掌握的一些感知技术和数据分析的模型大多数还是处于黑箱或灰箱模型, 缺乏对一些物理本质的理解, 这些模型的泛化性也不好, 缺乏对极端工况的可靠性的理解, 二是数据的质量, 算法鲁棒性成为智能化水平提高的关键瓶颈, TBM施工现场条件恶劣, 传感器容易受到粉尘, 泥水, 震动等因素的干扰, 导致数据噪声较大, 漂移或者丢失, 进而影响数据驱动模型的训练结果及应用稳定性, 现有AI算法特别是深度学习模型需要大量高质量数据标注进行训练, 但目前隧道工程中获得各种情况的有效标注样本的成本非常高, 导致难以达到训练效果, 鲁棒性差<sup>[3]</sup>。人机协同和自主学习能力差。目前大多数智能化系统只是起到辅助决策的作用, 没有形成真正意义上的人机协同, 无法将人的宝贵经验知识与机器强大的计算能力相结合。

系统的自主学习和进化能力也差，当遇到训练样本以外的全新地质环境或突发情况时，系统很难做出相应的反应，适应性、智能性差。最后是建立统一的数据标准以及开放的系统平台。不同的厂家、不同的型号的TBM设备其控制系统、数据接口都不一样，形成一个个“数据孤岛”，导致行业内数据共享、知识积累不够，不利于通用智能化技术与模型的研发与应用。

## 2. 未来研究的重点方向

就以上这些难题而言，未来的研究重点应该从这几个主要方向着手，第一点是要建立起一套地质-岩机-控制一体化的智能掘进理论体系，从根基层面开始，对TBM破岩机理、渣土改良及输送机理、围岩失稳机理等多物理场耦合问题展开研究，依靠细致入里的数值模拟与物理试验去探究掘进过程中的关键物理规律，从而为形成一个物理信息与数据双管齐下的所谓“白箱子”模型奠定理论基础，“白箱子”模型具有较强的解释力和普适性，从根本上提升智能认识的精确程度和智能操控的有效可信度，第二点是发展高可靠、准确度高的各种传感器技术及其相应数据处理办法，尤其要努力创造出一些能抵御磨损和干扰的新式器件，像分布在不同部位的光纤传感技术能够检测TBM结构内部的应变与温度场情况，通过声发射和微震监测等手段可以掌握到有关岩体即将崩坏前的预警信号。研究针对掘进大数据的清洗、降噪、修复和特征提取的先进算法，提升原始数据质量<sup>[4]</sup>。发展小样本学习、迁移学习、自监督学习等技术，减少模型对大规模标注数据的依赖，提升算法对不同地质条件和工程项目场景的适应性。第三，发展面向自主掘进的协同控制与决策智能。未来研究要努力开发自主学习的强化学习控制框架，让TBM能够像人一样，在不断与环境的交互中，不断积累经验，不断优化策略，从而实现自主协同控制掘进、出渣、支护等全流程。建立交互式的人机共融决策系统，把操作手的经验知识更好地嵌入到智能系统的决策环路中，实现“人”的直觉判断和“机器”的精确计算的互补。第四，推进数字孪生技术的深入应用和标准化。要努力开发出多尺度、多物理场耦合的高保真数字孪生模型，还要探究虚实双向映射以及实时优化的关键算法，在此基础之上尝试如何把数字孪生技术渗透到TBM设计、制造、施工、运维乃至再制造等全生命周期当中去，并推动形成整个行业的

TBM数据接口标准以及通信协议，创建开放的工业互联网平台，从而给TBM群组协同作业以及整个隧道掘进行业赋予数据能力，最终目标是实现“无人化”或“少人化”的自主智能掘进，让隧道施工人员脱离那些又苦又危险的地下环境<sup>[5]</sup>。

## 结束语

TBM智能化是隧道工程领域的必然发展道路，是破解隧道安全、高效、绿色施工的关键之策，目前以智能感知、智能控制、数字孪生技术为代表的自主掘进技术已取得了突飞猛进的发展，在实际工程建设中具有巨大的应用潜力，但我们也要认识到实现智能、高智能掘进，乃至全自主智能掘进仍十分困难，还涉及到基础理论、传感技术、智能算法与系统集成等问题，今后还需进一步明确问题、交叉学科协同攻关，重点突破地质-岩机耦合理论、高质量数据及算法可靠性问题、人机协同与自主学习等难题，建立起系统的智能掘进理论与技术体系。经过不断的创新和技术的实践，相信未来的TBM也不仅仅只是一个强大的掘进设备，它更会是一个高度智能、可以自主感知、自主决策、自主执行的一个“隧道建造机器人”，让隧道工程在未来进入一个安全、高效、智慧的时代。

## 参考文献

- [1]王杜娟, 潘宏, 冯晓燕, 等. 煤矿岩巷全断面掘进机(TBM)及智能化关键技术[J]. 煤炭学报, 2024, 49(S1): 396-409.
- [2]朱合华, 张子新, 李晓军, 等. TBM隧道掘进地质感知与岩-机数字孪生[J]. 应用基础与工程科学学报, 2023, 31(6): 1349-1365.
- [3]谭忠盛, 李涛, 夏毅敏, 等. TBM掘进参数与围岩参数的实时反馈与智能控制研究进展[J]. 现代隧道技术, 2021, 58(4): 1-13.
- [4]乐超, 来金东, 宋克志, 等. 基于数字孪生的TBM施工性能预测、可视化与监控框架[J]. 隧道建设(中英文), 2023, 43(S1): 1-13.
- [5]周海鑫, 李凤晨, 刘泉, 等. 基于掘进大数据的TBM刀盘状态智能感知与寿命预测研究[J]. 铁道学报, 2022, 44(8): 140-148.