

地铁施工盾构机选型研究

赵斌¹ 李安云²

(1 中城轨安全委 北京 100020; 2 中铁十五局集团有限公司 上海 200040)

摘要: 依据盾构工程安全风险智能决策支持系统, 总结人脑学习历史盾构选型案例的经验, 根据新形势下安全风险管控的实际需要, 结合移动互联网、大数据等新技术, 提供一种能够针对盾构工程的概况选型出合适的盾构机器的系统, 以用户输入的关键信息匹配历史案例, 综合评估后给出选型参数结果, 作为选型的关键参考依据; 也可以匹配到已有的参数相近的盾构机, 辅助用于盾构机改造工程。

关键词: 盾构选型; 辅助决策; 支持系统

0 引言

随着科学技术的发展, 盾构机制造技术也在不断提高, 以及施工领域应用越来越多, 盾构机行业的竞争越发激烈, 国内外的盾构机企业都在不断加大资本投入用于研发。目前, 国内企业在竞争中发展迅速, 市场份额不断增加, 已经打破了国外盾构机占据主导地位的局面。2017 年已进入或正准备进入盾构机行业的企业达到 45 家, 可单独承接盾构机施工项目的企业如中铁装备、辽宁三三、中国铁建重工集团等, 拥有开发、设计、制造、服务一体化的专业施工能力。

2017 年, 中国一重与辽宁三三合作制造两台地铁用土压平衡盾构机已投放市场。国内盾构机市场初步形成“南有上海隧道, 中有中铁隧道、中铁重工, 北有北方重工”的布局, 同时行业的自主化、专业化、产业化和市场化也逐步形成。

工程项目复杂多样, 盾构机的种类也越来越多。目前生产的断面盾构机有圆形、双圆形、矩形, 此外还有马蹄形等异形截面的盾构机, 以满足不同领域工程的需求。例如, 在江海中进行施工时适合使用大口径圆形盾构机; 而在城市中, 一般选用小口径的盾构设备, 可以在施工作业时不影响地面上居民的正常生活; 在地铁施工时, 采用矩形断面盾构设备, 可以进一步增加空间利用率, 提高整体施工效率。盾构机具有不同刀具类型, 在相同地质下选用不同刀具也会产生较大的差异, 适配合适的盾构刀具, 可有效提高盾构刀具乃至整个盾构机的应用水平, 给城市轨道交通建设提供安全保障, 在此前提下进一步达到提质增效的效果。由此可见, 盾构选型涉及的参数之多、波及面之广, 对盾构选型的研究亦愈发重要。

目前国内外研究学者, 在盾构选型领域多为针对某种特定条件, 或某一项具体的施工方案作为切入口。如唐国荣等在广湛高铁湛江湾海底隧道方案比选与盾构机选型研究, 张旭等在复合地层中超大直径泥水盾构刀盘刀具选型设计研究。均对具体的某类实施工程, 或某些特定的地质环境中的盾构选型提供了充分和专业的技术研究成果。但由于影响盾构选型的因素较多, 且具有很大的随机不确定性, 目前尚未形成一套综合考虑各方面影响因素的地铁盾构选型系统分析方法。国外一些学者利用多标准分析法、模糊逻辑方法等为盾构机械选型。这些方法为盾构选型提供了有效建

议, 但是多标准分析法在确定各方案初始评价时缺少客观评价标准, 模糊逻辑方法在确定元素隶属度时易受主观因素影响。这些问题都限制了研究结果的客观性。本文基于以上背景, 对盾构机械选型进行研究, 拟建立一个完整客观的盾构选型体系及评价方法。

随着大数据、知识图谱等相关技术的蓬勃发展, 盾构选型研究领域, 参数复杂、涉及领域广、波及因素多等难题有了新的研究方向。大数据 (Bigdata) 作为当前热门的技术领域, 得到了广泛的关注和研究, 通过国内外多年的发展, 逐步在大数据的各个领域, 包括数据采集与感知、数据存储与处理、数据分析、数据可视化等方面的共性基础技术和前沿技术获得了诸多突破, 这使得对处理庞大的地质、盾构、工程、参数等相关数据成为可能。同时, 自然语言处理技术的发展 (Natural Language Processing, NLP), 包括命名实体识别、实体链接、语义理解等, 使得对大量非结构化盾构工程案例数据的处理和理解成为可能, 对推动盾构工程数字化具有重大意义。知识图谱 (Knowledge Graph) 通过将应用数学、图形学、信息可视化技术、信息科学等学科的理论与方法与计量学引文分析、共现分析等方法结合, 它把复杂的知识领域通过数据挖掘、信息处理、知识计量和图形绘制而显示出来, 揭示知识领域的动态发展规律, 为学科研究提供切实的、有价值的参考。通过“实体”、“关系”、“属性”三元组, 对复杂知识领域进行拆解、关联、解读, 形成了独有的知识存储与知识推理体系。目前知识图谱大量应用于知识库、推理、推荐等相关智能应用。

上述重点描述在工程实践中盾构选型现状与问题, 通过结合大数据、自然语言处理、知识图谱等相关基础, 与盾构选型领域的相关业务知识进行研究, 以知识图谱平台和知识库作为主要研究成果, 包括: 盾构选型适应性图谱知识库、盾构过程管理图谱知识库; 两个图谱应用: 盾构选型适应性辅助决策工具、盾构施工过程辅助决策工具。希望通过大数据自然语言处理、知识图谱, 为实际业务场景提供精准的知识支撑以及辅助决策。

1 过程论述

在系统实际使用与操作层面, 通过对工程参数进行录入。平台基于自然语言处理、知识图谱所提供支撑的检索和

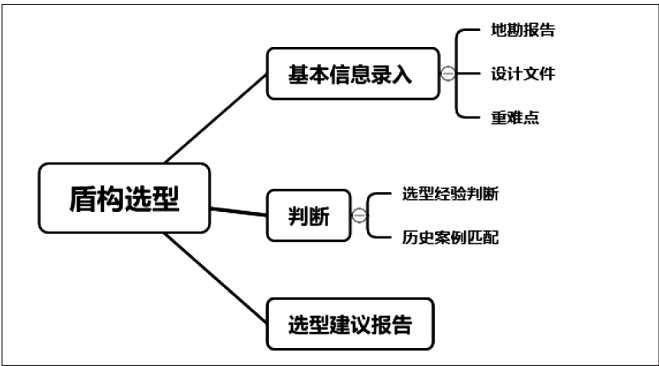


图 1 盾构选型逻辑思维导图

推理能力，基于海量盾构案例经验对当前填报的工程参数进行判断，同时匹配相似度较高的历史案例，最终输出完成的选型建议报告，对当前的工程提供盾构选型决策依据以及历史案例参考，形成完整的业务闭环（如图 1 所示）。

基本信息录入：以系统表单的方式或文件模板的形式，将用户根据地勘报告、设计文件等填写 excel 模板，上传至系统；

规则判断：系统基于海量案例数据，以及各类盾构选型经验形成数据算法模型。由算法模型对用户所提交的工程参数，判断盾构机型、刀盘直径、铰接方式、刀具配置等主要参数，最终以系统检索结果进行反馈。检索结果的排序以匹配程度由高到低进行排序，优先级最高的机型、案例为准。

建议报告：作为最终盾构选型的输出物，通过对工程参数的填写、算法模型的分析，对最终产出的盾构选型结果、案例，以报告的形式完整输出。

2 盾构选型系统运转步骤

2.1 成功历史盾构选型案例的搜集

系统建设前期的数据调研，根据成功历史盾构选型案例以及图谱建设要求，结合线上公开工程案例、以及线下案例书籍搜集的方式，进行案例收集。对收集到的数据按照图谱设计要求，对数据进行结构化清洗、形成结构化内容；对图谱主体数据包括盾构机、施工方、施工地、事故、工程项目图谱关系进行构建，图谱中盾构适应性评估、盾构工程建设安全风险事故分析、盾构机适应性评估智能决策支持、盾构工程风险管理智能分析、盾构施工安全风险应急处置决策支持分析等图谱模型进行模型构建；通过中软成熟知识图谱工具产品，实现知识加工、知识融合等知识图谱构建功能，同时提供数据资源、图谱等管理模块，完成从数据到知识整个过程（如图 2 所示）。

石家庄市城市轨道交通 3 号线二期工程 02 标段盾构始发、掘进、接收专项施工方案（南豆站 - 韩通站），工程概况：区间隧道起始里程为右 CK23+262.8（左 CK23+262.8），终点里程为右 CK24+459.95

（左 CK24+459.95（含长链 1.457m）），右线全长 1197.15m（左线全长 1198.607m）。区间于左 / 右 CK23+860 处设联络通道，并在联络通道中间位置设一泵房。区间隧道上方为石家庄东开发区，上方建筑物较少，多为荒地和农田。盾构区间结构型式为钢筋混凝土圆形结构，采用装配式钢筋混凝土单层衬砌，断面内径 5400mm，结构厚度 300mm。衬砌环采用标准环 + 左右转弯楔形环型式。区间隧道所处土层主要为 1 层粉细砂、1 层粉质粘土、1 层细砂、3 层含卵砾石中粗砂。砂层约占隧道 60%（如图 3 所示）。

本标段区间隧道工程施工涉及的危险源及难点有：盾构机运输、盾构机进出场吊装、盾构机始发和到达、盾构穿越不良地层、盾构下穿既有管线及民房、盾构侧穿通讯塔、盾构正穿农田灌溉水井、联络通道及泵房施工等 8 个主要方面。根据工程的地质条件对盾构机的要求以及结合以往的施工经验，采用复合式土压平衡盾构机，主要在刀盘刀具的布置及对开挖面的土体改善设备进行针对性的设计，满足在软土中掘进。

2.2 盾构选型参数的设定与输入

如表 1 所示，表中的参数为本次研究中盾构选型设定的盾构选型样例表：

2.3 盾构决策模型实现方法

2.3.1. 专家固化模型实现方法

如表 1 所示，表中的参数为本次研究中盾构选型。

盾构机型判断。盾构机型考虑因素较多，讨论规则和优先级如下：

第一步：根据地勘报告填写的各区段，分别进行选型，选型依据为：

根据渗透系数平均值判断选用泥水平衡盾构机；其他情况，暂不判断。

通过地层类型粘土、泥砂、粉细砂的、中细沙砾层、粗砂砾层、卵石层等，通过判断该地层类型适用于土压平衡



图 2 盾构知识图谱

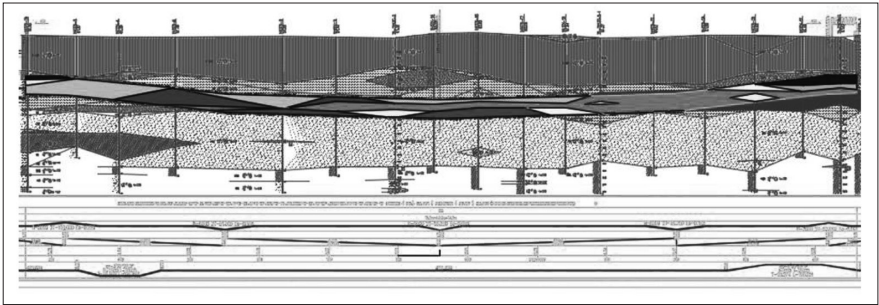


图 3 石家庄市城市轨道交通 3 号线二期工程 02 标段

表 1 盾构选型参数样例

基本信息	盾构机机型	土压平衡盾构机
刀盘	刀盘直径 m	6.5
	刀盘形式	复合式刀盘
	刀具配置	配置滚刀
	刀盘开口率 %	[33, 40]
	刀盘最大转速 rpm	[3.0, 3.5]
主驱动	主驱动形式	液驱（用户选择）
	额定扭矩 kN·m	[8000, 8620]
	脱困扭矩 kN·m	[9000, 9820]
	最大工作压力 bar	[3.0, 3.5]
主机	前盾直径 m	6.3
	最大掘进速度 mm/min	[80, 80]
	最大推力 kN	[45000, 46510]
	铰接形式	被动铰接
	主轴承直径 m	6.0
	主机重量 kg	
	主机长度 m	
	泡沫 路（土压）	[8, 8]
	刀盘驱动功率 kW	10 × 350kW
	总功率 kW	
	其他配置	双闸门

盾构机或泥水平衡盾构机。

通过地下水压平均值，判断是否选用泥水平衡盾构机。以上如有冲突的，提示给用户做判断。

第二步：结合风险源以及刀盘直径等信息判断，选用泥水平衡盾构机。

第三步：以上选型之后，结果进行汇总：若选型结果一致，则直接给出选型结果；若选型结果冲突，提示用户自行调整优先级，以最高优先级的为准；若此时仍未能选型的，基于经济性考虑，优先选用土压平衡盾构机。

默认优先级为：重难点 > 区段 1 > 区段 2 >

第四步：汇总以上，给出盾构机型的选型结果

刀盘直径判断。使用设计文件的管片外径 – 刀盘直径的对照表进行映射（对照表用户维护），匹配不到则为空。

铰接方式判断。依据设计文件的平曲线转弯半径判断，是否推荐主动铰接；否则留空不处理。

刀具配置。依据区段的单轴抗压强度平均值判断，是否配置硬岩刀具。

2.3.2 盾构机适应性知识库分析实现方法

判断了盾构机型、刀盘直径等

主要参数，其他参数匹配历史案例得出区间值，规则如下：

刀盘形式、刀具配置、刀盘开口率、刀盘最大转速。

通过地层类型匹配历史案例，如当前标段包括粘土、泥砂、粉细砂地层：

(1) 优先进行完全地层匹配，匹配同样是粘土、泥砂、粉细砂地层的历史案例，若匹配到，则类比该案例或多个案例的刀盘形式、刀具配置、刀盘开口率、刀盘最大转速；

(2) 如 A 未能匹配到，进行分解匹配，如查找粘土、泥砂地层的案例 1 和粉细砂地层的案例 2，提取区间范围；

(3) 若以上都匹配不到，规则如下：

刀盘形式基于地层进行判断：地层粘土 - 中细砂砾层选用辐条式刀盘；地层粗砂砾层 - 全断面硬岩选用面板式刀盘；存在前两者交集的或者是复合地层的选用复合式刀盘。

刀盘开口率基于刀盘形式判断：辐条式刀盘；复合式刀盘；面板式刀盘。

刀具配置 / 刀盘最大转速如匹配不到案例，则留空。

主驱动形式作为重要参考，由用户手动选择电驱或者液驱，两套模式下结果不同，默认选择液驱。

额定扭矩、脱困扭矩、最大工作压力，从历史案例中匹配属于同种机型、刀盘直径当前所选的主驱动形式的案例，提取额定扭矩、脱困扭矩和最大工作压力的区间范围。

2.4 基于知识库的匹配结果与分析

盾构选型样例表如表 2 所示，主要输出基于知识库推荐匹配的盾构机选型结果，包括基本信息、刀盘、主驱动以及主机信息。其中各项模块配有对应的项匹配区间范围。

表 2 基于知识库的匹配结果样例

基本信息	盾构机机型	土压平衡盾构机
刀盘	刀盘形式	复合式刀盘
	刀具配置	配置滚刀
主驱动	主驱动形式	液驱（用户选择）
主机	铰接形式	被动铰接
	泡沫 路（土压）	[8, 8]
	刀盘驱动功率	10 × 350kW
	总功率 Kw	
	其他配置	双闸门



图 4 系统选型

基于知识库的匹配结果与分析，结合本次研究的城市轨道交通盾构系统，对应系统截图如图 4 所示：

基于知识库的匹配结果与分析（如图 5 所示），结合本次研究的城市轨道交通盾构系统，将盾构选型的匹配结果生成选型建议报告进行对比分析。分析报告包括：编制依据、区间概况、选型方法以及选型建议四个章节。其中，区间概况分析包括：编制依据、区间概况、选型方法以及选型建议。其中区间概况分析包括：总体区间概况、设计文件、地质水文特征、盾构穿越地层分布以及盾构穿越地层分布；选型方法包括选型经验规则，历史案例匹配规则。

3 结语

近年来，人工智能逐渐应用于盾构领域，如盾构平衡控制、智能导向、故障预测与诊断、掘进预测及智能选型等。目前国内基于大数据、BIM 技术、人工智能等新兴信息技术在城市轨道工程建设安全风险智能管理中的工程智能管理还处于理论研究探索阶段。

本文描述的盾构选型系统依托专家盾构工程施工经验以及历史大量盾构工程风险案例知识库对施工区间地质风险进行了详细分析，并提出了对应的风险管理措施，最大程度的降低了风险发生的概率。为相似地质条件下的盾构隧道

施工提供施工风险管理参考。通过分析直径线地下隧道穿越地层的地质条件和水文条件，给出盾构机选型的专家型建议、知识库分析决策依据，分析工程地质条件对盾构选型的影响，对不同类型盾构的施工风险进行评估，对隧道结构设计和施工参数进行修正，从而辅助盾构施工决策。

参考文献：

[1] 李云山, 刘放. 盾构机发展趋势分析 [J]. 一重技术, 2018(01):35-38+23.

[2] 周庆伟. 不同地质条件下盾构刀具选型 [J]. 中华建设, 2021(10):114-115.

[3] 唐国荣, 齐春. 广湛高铁湛江湾海底隧道方案比选与盾构机选型研究 [J]. 铁道标准设计, 2021,65(10):103-110.

[4] 张旭. 复合地层中超大直径泥水盾构刀盘刀具选型设计研究 [J]. 工程建设与设计, 2021(13):160-162+171.

[5] EDALAT K, VAHADATIRAD M J, GHODRAT H, et al. Choosing TBM for Tabriz Subway using Multi Criteria Method [J]. Journal of Civil Engineering and management, 2010, 16(4):531-539.

[6] YAZDANI-CHAMZINI A, YAKHCHALI S H. Tunnel Boring Machine (TBM) Selection using Fuzzy Multicriteria Decision Making Methods [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2012, 30:194-204.

[7] 张锋军. 大数据技术研究综述 [J]. 通信技术, 2014(11):1240-1248.

[8] 冯志伟. 自然语言处理的历史与现状 [J]. 中国外语, 2008(01):14-22.

[9] 胡译文, 孙建军, 武夷山. 国内知识图谱应用研究综述 [J]. 图书情报工作, 2013, 57(03):131-137+84.

[10] 赵洪岩, 王利民, 王浩, 白磊. 盾构智能化施工的发展历程和研究方向 [J]. 建筑技术, 2021, 52(08):900-903.



图 5 盾构选型匹配结果与对比分析