

TBM 施工技术在抽水蓄能电站中的应用前景分析

宋永

(中交一航局武汉建设投资有限公司)

摘要:为解决国内抽水蓄能电站地下洞室开挖过程中 TBM(Tunnel Boring Machine)施工技术普及率低的问题,以安徽某抽水蓄能电站为研究对象,从制约因素、发展前景、适用范围、路线布置、成功案例等多角度出发,分析了 TBM 施工技术在安徽某抽水蓄能电站施工中的应用前景。结果表明,TBM 施工技术适用于安徽某抽水蓄能电站的进厂交通洞、通风兼安全洞、引水隧洞、排水廊道等地下洞室建设,证实了在国内抽水蓄能电站建设中使用 TBM 施工技术是完全可行的,且其应用前景极其广阔。

关键词:抽水蓄能电站; TBM 施工技术; 进厂交通洞; 通风兼安全洞

0 引言

TBM,又名全断面岩石隧道掘进机(Tunnel Boring Machine),具有自动化程度高、掘进速度快、施工工期短、施工振动小、围岩扰动小、噪声小、安全风险低等优点,是目前最先进的硬岩隧洞开挖技术。

抽水蓄能电站是一种特殊形式的水电站,与传统水电站相比最大的区别在于抽水蓄能电站有上、下 2 个水库。抽水蓄能电站在电网负荷较低时,通过水泵做功将电网富余的电力转化为水的势能在上水库进行存储,在电网负荷较高时,通过水轮发电机组将上水库存储的势能转化为电能,从而对电网进行调峰、填谷、调频、调压等多方面的调节,保证电网能够正常运行。

从我国第一座抽水蓄能电站建成投入使用至今已有近 60 a 的发展历史,时至今日 TBM 施工技术应用我国抽水蓄能电站建设案例并不多见,主要是 TBM 设备一次性投入成本高,使用成本和维护费用较高,抽水蓄能电站地下洞室长度较短、洞室较复杂等因素造成的,如果能够解决上述问题,TBM 施工技术就可以推广应用于国内抽水蓄能电站建设中。

1 发展现状

当前,在我国抽水蓄能电站建设中,隧洞的开挖工作大多数使用钻爆法。即通过人工或多臂钻钻孔,安装炸药,然后爆破,爆破完成后进行出渣和支护工作,如此循环往复完成隧道的挖掘工作。钻爆法具有布置灵活和一次性投入成本低

的优点,可以适应各种尺寸和断面洞室,但同时钻爆法存在超欠挖难以控制、施工速度慢、围岩扰动大、施工噪声大、职业健康影响大、安全风险高等缺点。

为了在隧洞开挖施工中满足严格的环保要求并保障作业人员职业健康,日本于 1979 年在下乡抽水蓄能电站建设工作中首次使用了斜井 TBM 技术^[1],斜井 TBM 相较于普通 TBM 施工难度和技术要求更高,随后日本又在盐原、葛野川、神流川和小丸川等抽水蓄能电站成功应用了斜井 TBM 施工技术。

2 制约因素

相比于传统钻爆法,TBM 施工技术存在如下因素制约其推广应用:

1) TBM 设备一次性投资大。1 台小型 TBM 设备购买价格最低几千万元,1 台大型 TBM 设备价格过亿元,另外 TBM 设备的使用和运维成本也比多臂钻高很多,这样大大增加了工程前期一次性投入。

2) TBM 设备对地质条件适应性较差。TBM 设备具备掘进、支护、出渣和导向的功能,但不具备衬砌功能,比较适合地质情况较好的岩层。如遇到不良地质需要对地质加固处理后才能正常掘进,地质条件适应性不如传统钻爆法好。

3) TBM 设备系统集成度高、设备较复杂。TBM 设备由刀盘、主机、后配套及连接桥等组成,综合了机械、电气、智能化、自动化、传感等多个学科内容,由几十个独立子系统构成。任

何一个子系统出现故障，都会影响 TBM 设备正常使用。

4) 抽水蓄能电站地下洞室较复杂。抽水蓄能电站地下洞室众多，各洞室长短不一，断面尺寸和洞室类型多样，围岩类别和支护方式不尽相同。而且部分洞室属于变截面洞室，不同桩号位置断面形式、尺寸、纵向坡度、转弯半径都不一致。TBM 设备难以适应较大变截面洞室及较多类型洞室开挖。

上述原因很大程度上制约了 TBM 技术在我国抽水蓄能电站建设中的推广应用。

3 发展前景

TBM 施工技术在施工速度、安全和环保方面有传统钻爆法无法比拟的优势。通常情况下传统钻爆法在较大断面尺寸和围岩类别较好的Ⅱ级和Ⅲ级围岩条件下月进尺分别为 150 m 左右和 120 m 左右，而在围岩类别较差的Ⅳ级和Ⅴ级围岩条件下月进尺不超过 60 m 和 45 m。根据国内相关项目经验，采用 TBM 施工技术的较大断面尺寸隧洞月进尺可达 300 m，最高甚至能达到 400 m，是钻爆法施工速度的 2~3 倍。小断面 TBM 设备开挖月进尺能达到 600 m，平均月进尺 480 m，这是传统钻爆法无法企及的。

另外 TBM 施工技术属于机械开挖方式，无需使用炸药和其他火工材料。而传统钻爆法施工过程中钻孔、装药、爆破和出渣过程中都存在较大职业健康、安全和环保风险，如施工中管理不善容易导致安全或环保事故发生。

4 适用范围

以正在建设中的安徽某抽水蓄能电站为实例，分析 TBM 施工技术在抽水蓄能电站输水系统、地下厂房洞室群及施工支洞的适用性。目前国内抽水蓄能电站应用 TBM 施工可以考虑的设备常见的有小型 $\phi 3.53$ TBM 以及大型 $\phi 9.53$ TBM^[2]。

4.1 输水系统 TBM 适用性分析

安徽某抽水蓄能电站输水系统采用二洞四机布置形式，总装机容量 120 万 kW，安装 4 台单机容量为 30 万 kW 的可逆式水轮发电机组，年发电量 12 亿 kW·h，年抽水耗电量 16 亿 kW·h，输水系统隧洞主要包括引水隧洞、尾水隧洞及排水廊道。引水隧洞共 2 条，每条引水隧洞直径 5.8~7.2 m，每条长度约 864 m。若考虑引水隧洞均采用 TBM 设备施工，存在以下 3 点困难：

1) 引水隧洞洞径不一致，直径从 7.2 m 逐步变化为 5.8 m，TBM 设备无法实现大范围的直径变化；

2) 相邻隧洞之间间距较小，无法达到 TBM 设备最小转弯半径；

3) 每条引水隧洞分为 2 段斜井和 3 段平洞，洞室长度较短，不适合 TBM 技术。

综上分析，通过设计单位对引水中平洞和排水廊道进行优化，将两洞室连接，变短洞为长洞，可以采用小型 $\phi 3.53$ TBM 进行施工；引水斜井可以考虑将三级平洞+两级斜井布置优化为一级长斜井方案，斜井长度将达到 615 m，采用 $\phi 3.53$ TBM 施工导井，人工钻爆法或大直径 TBM 扩挖至设计断面。

4.2 地下厂房洞室群 TBM 适用性分析

安徽某抽水蓄能电站地下厂房洞室群主要由主副厂房、主变室、进厂交通洞、通风兼安全洞及出线洞等洞室组成。进厂交通洞和通风兼安全洞洞室长度较长，断面形状和尺寸相差不大，两洞室均与厂房和外地面相连，可对交通洞和通风兼安全洞进行优化设计，使 TBM 设备从进厂交通洞始发，途经主副厂房，最后从通风兼安全洞接收，从而满足 TBM 设备连续作业，提高 TBM 设备的使用效率。厂房排水廊道通过设计优化与引水隧洞排水廊道连通，采用小型 $\phi 3.53$ TBM 施工，为 TBM 连续施工创造条件。出线洞洞室较短，由平洞和竖井组合而成，不适合采用 TBM 设备进行施工。

4.3 施工支洞 TBM 适用性分析

安徽某抽水蓄能电站共有 5 条施工支洞，施工支洞长度、断面、尺寸各不相同，各支洞特性见表 1。

表 1 安徽某抽水蓄能电站施工支洞特性表

支洞名称	宽×高/(m×m)	长度/m	平均坡度/%	最小转弯半径/m	备注
1 号	7.0×6.5	444	3.91	80	引水上平洞、上斜井
2 号	7.5×8.2	771	0.34	80	引水上斜井、中平洞、下斜井
3 号	7.8×7.8	584	-6.52	100	引水下斜井、下平洞、支管、岔管
4 号	7.0×6.5	275	-7.35	100	厂房中下部
5 号	7.2×7.8	350	-2.00	100	厂房底层、尾水隧洞

根据各施工支洞的特性,若应用 TBM 进行洞室开挖存在下述难点:

- 1) 施工支洞长度整体较短,最长不超过 800 m,最短只有 275 m;
- 2) 各施工支洞断面尺寸不一,包括方形断面、圆形断面或拱形断面;
- 3) 施工支洞主要作用是为引水隧洞、进厂交通洞、主副厂房等洞室增加工作面,如果引水隧洞、进厂交通洞等洞室采用 TBM 施工技术,可以减少施工支洞的数量。

综上所述可知,安徽某抽水蓄能电站施工支洞不适合采用 TBM 施工。

5 TBM 施工线路布置

5.1 排水廊道

为与 TBM 设备的尺寸相配套,将引水中平洞、厂房上层、中层、下层排水廊道、自流排水洞等洞室的断面形状调整为直径 3.53 m 的隧洞,通过优化施工图设计将这些独立布置的洞室首尾相连,调整后的洞室总长预计可达 9 km 左右,最小转弯半径 30 m,最大坡度 4.9%,开挖断面为直径 3.53 m 圆形断面。TBM 从始发洞出发,沿线路螺旋式掘进,最终在进厂交通洞或通风兼安全洞接收。

这样既能将排水廊道、自流排水洞等洞室串联一次开挖完成,又能够延长洞室连续开挖长度,减少 TBM 安装拆卸次数,加快施工进度,降低单位长度洞室开挖成本。

5.2 引水隧洞斜井

引水隧洞斜井施工长度受反井钻设备施工能力限制,一般不宜超过 400 m,否则偏差不易控制^[3]。受目前国内斜井施工设备及技术限制,本工程原设计通过长洞短挖的方式将长斜井(615 m)设计为三级平洞(131 m+315 m+73 m)+两级斜井(250 m+320 m)的布置形式,然后通过传统方法反井钻机+人工扩挖溜渣井+人工扩挖至设计断面可以满足施工及设计需求,然而这种传统方法会大大增加施工安全风险并延长施工工期,不利于新技术的推广与应用。

采用 TBM 施工技术,需调整斜井布置,增大上平段、下平段与长斜井段之间的转弯半径,便于 TBM 设备从上平段顺利进入斜井段,取消上斜井段、中平段和下斜井段,优化为长斜井。引水隧洞斜井调整前、后布置见图 1、图 2。

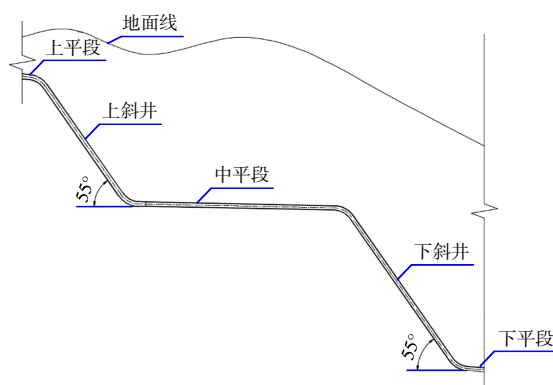


图 1 引水隧洞斜井调整前布置图

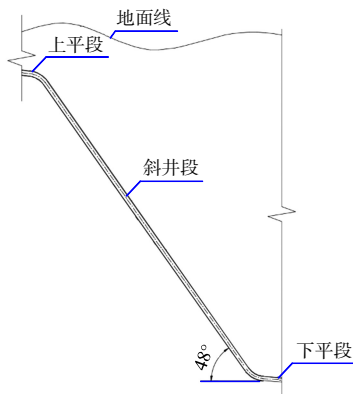


图 2 引水隧洞斜井调整后布置图

5.3 进厂交通洞和通风兼安全洞

进厂交通洞与通风兼安全洞两洞室断面相差不大且均连接主副厂房,根据两洞室的断面形式和尺寸,采用大型 $\phi 9.53$ TBM 施工比较符合安徽某抽水蓄能电站实际情况,施工前需调整进厂交通洞、通风兼安全洞与连接厂房段的转弯半径不小于 300 m,便于 TBM 设备顺利过弯;结合两洞室的位置、坡度、长度等因素综合考量,TBM 设备由进厂交通洞始发,途经主副厂房,最后在通风兼安全洞接收是最合理的施工路线。进厂交通洞和通风兼安全洞调整前、后布置见图 3、图 4。

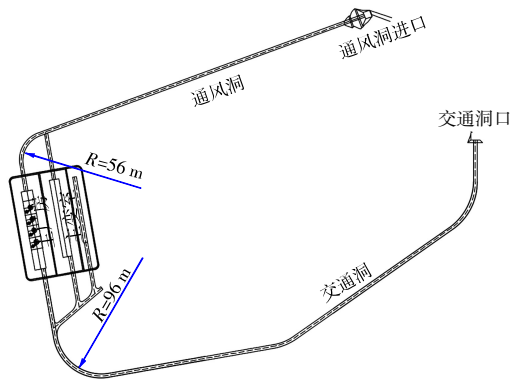


图 3 交通、通风兼安全洞调整前布置图

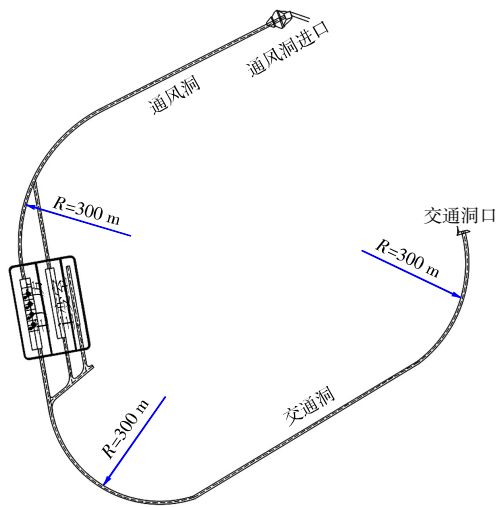


图4 交通、通风兼安全洞调整后布置图

6 成功案例

湖南平江抽水蓄能电站采用“两洞四机”4×350 MW(1 400 MW)可逆式水泵水轮发电机组设计，2019 年 9 月 25 日项目开工，计划 2026 年 7 月 31 日首台机组投产发电。

平江抽水蓄能电站地下洞室开挖设有 TBM 工区和钻爆工区，TBM 工区承建自流排水洞、厂房排水廊道、压力钢管排水廊道等洞室开挖工作。

TBM 工区使用“平江号”硬岩掘进机作业，直径 3.63 m，总掘进距离达 9.8 km，最小转弯半径 30 m，最大坡度 4.9%，开挖断面为直径 3.63 m 圆形。钻爆工区承建进厂交通洞、4 号施工支洞、5 号施工支洞、7 号施工支洞、引水下平洞、引水支管等洞室开挖工作。钻爆工区使用钻爆台车钻孔爆破+单臂钻锚杆台车支护+钢模台车衬砌的作业方式，施工总里程达 1.79 km。

TBM 采用螺旋式上升方式，掘进路线为：自流排水洞始发→下层排水廊道→中层排水廊道→2 次步进(进厂交通洞、通风兼安全洞)→上层排水廊道→压力钢管外排水廊道→通风兼安全洞接收。

“平江号”TBM 在自流排水洞施工中最高日进尺达 30.712 m，月累计进尺达到 602 m，创造了抽水蓄能电站小断面级曲线 TBM 施工月进尺新纪录，突破国内同级别小断面 TBM 施工最高日、月进尺纪录。“平江号”于 2021 年 11 月 28 日正式始发，2022 年 7 月 28 日自流排水洞第一阶段顺利贯通，历时 8 个月，平均月进尺 480 m，为加快平蓄电站建设做出重要贡献。

TBM 工区和钻爆工区具体工期、质量、安全和环保等差异及优缺点见表 2。

表 2 TBM 施工方法和钻爆法对比分析表

方法	平均月进尺/ (m·月 ⁻¹)	最高月进尺/ (m·月 ⁻¹)	超欠挖	开挖料 利用率	准备时间	断面形式	安全风险	环保风险	单位长度开挖 成本对比
TBM(直径 3.63 m)	480	602	易控制	低	长	圆形	较低	较低	≥3 km 时经济
钻爆法(大断面)	135	180	难控制	高	短	各种断面	较高	较高	<3 km 时经济

7 结语

目前我国抽水蓄能行业处于高速发展的黄金时期，每年都有大量抽水蓄能电站开工建设。但 TBM 设备一次性投入大、维护费用高、设备利用率低、适用范围较狭窄等因素导致目前 TBM 施工技术在 我国抽水蓄能电站建设中仍处于探索和起步阶段。

本文通过在建项目安徽某抽水蓄能电站为例，详细分析了 TBM 施工技术在该项目地下洞室开挖中的适用情况、制约因素以及优缺点，得出 TBM

施工技术可以在抽水蓄能电站地下洞室建设中发挥作用，可为抽水蓄能电站相关工程建设提供参考。

参考文献：

[1] 李富春,尚海龙,徐艳群,等.TBM 在抽水蓄能电站施工中的应用探讨[J].水电与抽水蓄能,2021,7(4):98-111.

[2] 赵修龙,丁兵勇,杨经卿,等.TBM 施工技术在抽水蓄能电站中的应用研究[C]//抽水蓄能电站工程建设文集 2021.北京:中国水利水电出版社,2021:427-431.

[3] 张祥富,朱静萍,杨朝,等.抽水蓄能电站引水斜井 TBM 施工关键技术研究[J].水电与新能源,2021,35(8):40-43.