

抽水蓄能电站 TBM 技术发展报告

Pumped Storage Power Station
TBM Technology Development Report

2020 | 2021

国家能源水电工程技术研发中心
国网新源控股有限公司 编
中国水利水电建设工程咨询有限公司



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn



抽水蓄能电站 TBM 技术发展报告

Pumped Storage Power Station
TBM Technology Development Report

2020 | 2021

国家能源水电工程技术研发中心
国网新源控股有限公司 编
中国水利水电建设工程咨询有限公司



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

·北京·

图书在版编目(CIP)数据

抽水蓄能电站TBM技术发展报告. 2020-2021 / 国家能源水电工程技术研发中心, 国网新源控股有限公司, 中国水利水电建设工程咨询有限公司编. — 北京: 中国水利水电出版社, 2022. 5

ISBN 978-7-5226-0693-4

I. ①抽… II. ①国… ②国… ③中… III. ①抽水蓄能水电站—隧道施工—盾构法—技术发展—研究报告—中国—2020-2021 IV. ①TV743

中国版本图书馆CIP数据核字(2022)第081477号

书 名	抽水蓄能电站 TBM 技术发展报告 (2020—2021) CHOUSHUI XUNENG DIANZHAN TBM JISHU FAZHAN BAOGAO (2020—2021)
作 者	国家能源水电工程技术研发中心 国网新源控股有限公司 编
出版发行	中国水利水电建设工程咨询有限公司 中国水利水电出版社 (北京市海淀区玉渊潭南路1号D座 100038) 网址: www.waterpub.com.cn E-mail: sales@mwr.gov.cn 电话: (010) 68545888 (营销中心)
经 售	北京科水图书销售有限公司 电话: (010) 68545874、63202643 全国各地新华书店和相关出版物销售网点
排 版	中国水利水电出版社微机排版中心
印 刷	天津嘉恒印务有限公司
规 格	210mm×285mm 16开本 6印张 110千字
版 次	2022年5月第1版 2022年5月第1次印刷
定 价	80.00元

凡购买我社图书, 如有缺页、倒页、脱页的, 本社营销中心负责调换

版权所有·侵权必究

编写工作组

顾 问 路振刚 王忠耀

主 编 喻葭临 王洪玉

编审人员 (以姓氏笔画为序)

马明刚 王杜娟 石青春 朱安平 任金明
苏军安 李富春 杨文利 吴朝月 余 奎
张 军 张兴彬 张学清 赵 华 徐文仙
常作维 彭正阳 蒋明东 程永亮 潘福营

编写人员 (以姓氏笔画为序)

于庆增 凡 伟 王东锋 朱静萍 任 伟
任 鑫 刘 勇 刘传军 刘建峰 孙 恒
杜贤军 巫 敏 李 冰 张怀芝 张祥富
张菊梅 邵质中 岳金文 孟继慧 胡 超
茹松楠 贾连辉 徐艳群 殷 康 高 健
韩小鸣 程 立 程正飞 焦鹏程 谢 豪
潘月梁

前言

近年来，以国网新源控股有限公司为首的研究团队，围绕抽水蓄能电站先进建设技术，在小断面小转弯半径 TBM 应用上成功取得突破，在大断面平洞 TBM、斜井 TBM、竖井 TBM 应用方案研究上也取得长足进展并顺利推进试点，同时在专用 TBM 研发和隧洞标准化通用化设计方面开展了大量卓有成效的工作。为更好地发挥 TBM 技术在推进抽水蓄能电站群建设智能化转型中的作用，国家能源水电工程技术研发中心联合国网新源控股有限公司、中国水利水电建设工程咨询有限公司共同倡议，组织一线技术团队，开展抽水蓄能电站 TBM 技术发展报告研编工作，总结已有经验，梳理存在的主要问题，探讨未来发展的主要驱动力和实现路径，以促进行业形成发展合力。

本报告包括综合篇、设计篇、装备篇、应用篇、政策篇、展望篇六部分，总结了近年来我国抽水蓄能电站 TBM 技术发展与应用情况，对比分析了国内外 TBM 技术的发展差距，并对发展趋势进行了分析预测，提出了抽水蓄能电站 TBM 技术未来应关注的方向、重大课题立项建议及促进抽水蓄能电站 TBM 技术发展的政策建议。其中综合篇、政策篇和展望篇由国家能源水电工程技术研发中心与中国水利水电建设工程咨询有限公司牵头编写；设计篇由中国电建集团中南、北京、华东勘测设计研究院有限公司牵头编写；装备篇由中铁工程装备集团有限公司、中国铁建重工集团股份有限公司牵头编写；应用篇由国网新源控股有限公司牵头编写，文登、洛宁、平江、抚宁、宁海等抽水蓄能有限公司参与编写。

在报告即将付梓之际，特别向参与编写的专家及所在单位表示衷心感谢，特别向参与研讨和提出宝贵意见、建议的编审专家表示衷心感谢。尽管本报告制定编写大纲之初和报告编写过程中征求了多方面的意见，力求全面准确，但由于编写时间仓促、收集资料有限等原因，报告中难免存在不足和疏漏，相关观点也仅代表编写工作组的意见，如有不妥之处，恳请读者提出宝贵意见和建议。

最后，衷心希望本报告在助力和保障我国抽水蓄能电站高质量发展方面发挥积极作用，并为政府和行业制定相关政策与标准提供有益参考。

编写工作组

2021年12月



前言

1 综合篇 /1

- 1.1 引言/2
- 1.2 发展现状与主要创新成果/3
 - 1.2.1 发展现状/3
 - 1.2.2 主要创新成果/6
- 1.3 面临的主要问题/7

2 设计篇 /9

- 2.1 总体设计原则与思路/10
 - 2.1.1 TBM 应用总体思路/10
 - 2.1.2 标准化设计原则/12
- 2.2 标准化设计/13
 - 2.2.1 排水廊道标准化设计/13
 - 2.2.2 交通洞及通风洞标准化设计/15
 - 2.2.3 引水斜井标准化设计/18
 - 2.2.4 竖井标准化设计/22
- 2.3 施工组织设计/27
 - 2.3.1 设备选型与性能要求/27
 - 2.3.2 主要施工程序/27
 - 2.3.3 TBM 施工组织设计/27
 - 2.3.4 施工进度分析/30
- 2.4 技术经济分析/30
 - 2.4.1 现行定额的适应性分析/30
 - 2.4.2 TBM 施工经济分析原则/32
 - 2.4.3 TBM 施工费用构成/32
 - 2.4.4 TBM 设备费摊销方式/34
 - 2.4.5 TBM 施工经济分析/34



3 装备篇 /36

3.1 推广应用类/37

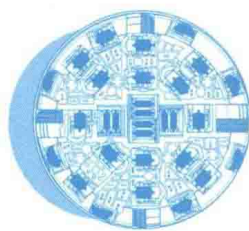
- 3.1.1 国内外类似装备基本情况/37
- 3.1.2 小断面小转弯半径 TBM 国内技术进展/37
- 3.1.3 重难点问题分析与发展展望/42

3.2 示范试点类/43

- 3.2.1 大断面小转弯半径平洞 TBM/43
- 3.2.2 斜井 TBM/44
- 3.2.3 竖井 TBM/51

3.3 创新研发类/54

- 3.3.1 抽水蓄能电站 TBM 施工数字孪生技术/54
- 3.3.2 异形断面掘进机技术/55



4 应用篇 /59

4.1 推广应用案例/60

- 4.1.1 文登抽水蓄能电站排水廊道/60
- 4.1.2 宁海抽水蓄能电站厂房排水洞和排水廊道/63
- 4.1.3 洛宁抽水蓄能电站自流排水洞和排水廊道/66

4.2 试点案例/68

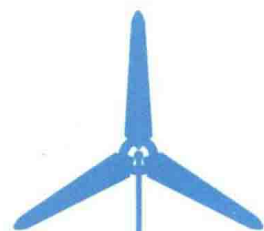
- 4.2.1 抚宁抽水蓄能电站大断面 TBM 应用/68
- 4.2.2 洛宁抽水蓄能电站斜井 TBM 应用/70
- 4.2.3 平江抽水蓄能电站可变径 TBM 在引水系统的应用/73
- 4.2.4 宁海抽水蓄能电站竖井 TBM 应用/74

4.3 建设管理/77

- 4.3.1 商业模式/77
- 4.3.2 质量与验收管理/78
- 4.3.3 降本增效路径研究/78

5 政策篇 /81

6 展望篇 /86



1 综合篇





1.1 引言

抽水蓄能电站作为电力系统中技术最为成熟、安全性最有保障、经济性优势明显的具有灵活调节能力的电源，在电力系统中提供了较好的调峰、调频、调相、储能、紧急事故备用和黑启动等服务，对于保障电力系统安全稳定运行、提升清洁能源消纳利用水平和改善系统发、配、用各环节性能等方面发挥了重要作用。加快发展抽水蓄能，是构建以新能源为主体的新型电力系统的迫切要求，是保障电力系统安全稳定运行的重要支撑，是可再生能源大规模发展的重要保障。截至 2020 年年底，我国抽水蓄能电站总装机规模达到 3149 万 kW，在建装机总规模为 5373 万 kW。我国抽水蓄能电站已建和在建规模均居世界首位，且已形成较为完备的规划、设计、建设、运行管理体系。

根据我国“碳达峰、碳中和”总体目标的要求，国家能源主管部门已经锚定 2030 年非化石能源占一次能源消费比重达到 25% 左右，风电、太阳能发电装机容量达到 12 亿 kW 以上的目标。构建以新能源为主体的新型电力系统，已经成为刻不容缓的重大战略任务。作为具有灵活调节能力的电源，抽水蓄能电站必将在新型电力系统中发挥越来越重要的作用，并已迎来前所未有的高速发展期。

绿色高质量发展是抽水蓄能电站高速发展的基础和保障。而智能建造关键技术的研发与应用已成为水电工程建设运行领域绿色、高质量创新发展的关键支撑。特别是随着水电工程建设越来越注重机械化和自动化，加之传统技术工人队伍日趋萎缩且流动性大，继续依靠传统的劳动密集型模式实现高强度施工、高标准建设和高频度质量检测将面临愈来愈大的困难和代价。可以预见，智能化建造技术必将全面改变包括抽水蓄能电站建设在内的所有可再生能源领域工程建设的模式、方式和手段，进而重新定义可再生能源项目建设与管理的内涵和外延。

机械化是智能建造的重要基石之一。TBM（隧道掘进机）是集机械、电子、液压、控制等技术于一体的高度机械化和自动化的大型成套设备，既是智能制造的重要组成部分和代表性产品，也是智能化建设的重要突破方向和抓手。大量工程实践充分表明，TBM 应用于隧洞施工在工程质量、安全、进度、环保、文明施工等方面具有显著优势，代表了“机械化、智能化、标准化”的发展趋势，创新意义和实用价值突出。



2019年以来,以国网新源控股有限公司为首的研究团队,围绕抽水蓄能电站先进建设技术,在小断面小转弯半径TBM应用上成功取得突破,在大断面平洞TBM、斜井TBM应用方案研究上也取得长足进展,已具备实施试点应用的条件,同时还在专用TBM研发和隧洞标准化通用化设计方面开展大量卓有成效的工作。

探索推进TBM在抽水蓄能电站群的应用总体上具有突出的先天优势,一方面,通过抽水蓄能电站群的规模效应可解决TBM的经济可行性问题;另一方面,通过优选站址,抽水蓄能电站地下洞室群施工的地质条件适宜性总体上较好,基本解决了TBM应用技术可行性问题。因此,抽水蓄能电站群TBM关键技术研究与应用是实现能源领域智能化机械化转型升级的重要抓手,更是以重要领域和关键环节的突破带动全局的关键举措。

当前,抽水蓄能电站群TBM技术发展仍面临内生驱动力不足、有效需求与有效供给错位、规模化可持续发展路径不清晰等诸多挑战和困难,有必要凝聚行业乃至全社会的共识和力量,进一步明晰近期发展方向与技术路径,以及中远期发展战略,以期更好发挥TBM应用技术在推进抽水蓄能电站群建设机械化、智能化转型中的作用。

1.2 发展现状与主要创新成果

1.2.1 发展现状

(1) 抽水蓄能电站进入高速发展期,高质量发展是根本遵循和必然趋势。

截至2020年年底,我国可再生能源发电装机容量达到9.34亿kW,同比增长约17.5%;其中,水电装机容量3.7亿kW(含抽水蓄能装机容量3149万kW)、风电装机容量2.81亿kW、光伏发电装机容量2.53亿kW、生物质发电装机容量2952万kW。可再生能源发电量持续增长。2020年,全国可再生能源发电量达22154亿kW·h,同比增长约8.4%;其中,水力发电13552亿kW·h,同比增长4.1%;风力发电4665亿kW·h,同比增长约15.0%;光伏发电2611亿kW·h,同比增长16.4%;生物质发电1326亿kW·h,同比增长约19.4%。

作为新型电力系统的重要一极,抽水蓄能电站建设已进入高速发展期。截至2020年年底,我国抽水蓄能电站在建装机总规模5373万kW,共涉及40座电站,其中华北、东北、华东、西北、华中、南方和西南区域电网装机规模分别为1610万kW、



780 万 kW、1743 万 kW、380 万 kW、500 万 kW、240 万 kW 和 120 万 kW，华东电网在建规模最大，其次为华北电网。在建项目中，32 座电站项目法人为国网新源控股有限公司，占在建项目总数的 80%，2 座电站项目法人为南方电网调峰调频发电有限公司。同时，投资主体多元化态势也初现端倪，长江三峡集团、华电集团、中核集团等大型央企以及一些地方投资平台也积极参与各省抽水蓄能电站开发与建设。

经过几十年的积累和创新，我国抽水蓄能电站建设技术已处于世界领先水平，成功建成投运了一大批大型抽水蓄能电站，各类复杂地质条件下的抽水蓄能电站施工技术取得长足进步，在复杂岩溶地区水库防渗工程、高地应力超大规模地下厂房洞室群开挖支护工程、高水头混凝土或钢板衬砌压力管道与岔管工程等各方面都有大量成功实践。

新时期，抽水蓄能电站建设的高速发展必然要求绿色、安全、高质量发展，这既是国家和行业的要求，也是行业发展的必然选择。一方面，抽水蓄能电站建设仍将面临更大的挑战，多个规划建设的抽水蓄能电站需要应对不良的地质条件和复杂的建设环境，也就需要技术和手段的创新，以期实现更为规范、更加高效、更加友好、更有质量安全保障的工程建设。另一方面，当前抽水蓄能电站庞大的在建规模以及高速发展的开发建设规划，在环境保护与水土保持、国土资源利用、人才队伍与劳动力资源保障等多方面形成巨大压力，倒逼抽水蓄能电站走上绿色智能化建设的高质量发展道路。

(2) 水电工程智能建造方兴未艾。

当前，我国水电工程建设技术正从数字化向全面机械化、智能化迈进，工程建设管理水平和质量控制能力得到显著提升。大岗山研发了“数字大岗山”智能管理系统，实现了拱坝混凝土浇筑、灌浆以及安全监测等全过程数字化管控。为建成无缝智能大坝，乌东德、白鹤滩大坝施工全过程采用智能温控技术，突破了现场复杂环境多源数据采集技术难点，实现了大坝混凝土的实时、在线、个性化智能控制与精细管理。两河口大坝在糯扎渡、长河坝建设经验基础上，将大坝碾压监控技术进一步发展到了智能化无人碾压技术，突破了无人机械操控、三级安全管控、精确循迹管理等技术难题，实现了机群同步作业、多仓面协同施工。双江口电站针对大型地下工程地质条件复杂、地应力高、施工安全风险突出等特点，研发并应用了大型地下工程建设的智能感知、自动分析、动态馈控协同响应成套关键技术，通过构建较为完善的管



控指标体系及预警分析模型，基本实现了大型地下工程施工安全与质量风险的自动识别、分级预警。

抽水蓄能电站建设充分吸收借鉴常规水电已有智能建设技术的积累，同时针对抽水蓄能电站地下洞室群规模大、占工程投资比例大的特点，围绕地下洞室群机械化、智能化施工开展了卓有成效的探索。

(3) TBM 在抽水蓄能电站全面机械化、智能化建设转型中取得突破。

TBM 设备已被广泛应用于铁路、水利等行业的大型长隧道施工，在质量、工期、安全、环境保护与文明施工方面表现出了突出优势，但在国内抽水蓄能电站工程施工中则鲜有应用。其主要原因：一是设备费用一次性投入大，施工成本高；二是抽水蓄能电站地下洞室群立体交叉多、短洞多、转弯多、断面不统一且变化多，而传统 TBM 设备装拆时间长，且一般无法同步设置多个工作面，施工工期优势在短隧道施工中或不同洞径施工中无法得到充分体现。此外也有行业内沿袭传统施工方式的惯性思维因素。

因此，提升施工安全、降低施工造价、发挥工期优势是 TBM 设备应用于抽水蓄能电站施工需要重点关注和研究的问题。一方面需要改进、提升 TBM 设备在抽水蓄能电站变径、小转弯、斜井施工、快速拆装、安全掘进等方面的工艺和能力，挖掘潜力，降低成本，减少非生产性工期损失；另一方面需要提升抽水蓄能电站地下洞室的标准化设计水平，同等规模、同一功能用途的洞室尽量在设计尺寸上保持一致，以适应 TBM 设备多场景及多电站应用要求。TBM 若能实现抽水蓄能电站地下洞室施工安全性提升、生态环境影响小、施工工期加快、成本可接受等目标，就能在试点应用中不断总结提升，并获得足够大的市场空间。这客观上也要求设计单位和制造单位在抽水蓄能电站各地下洞室设计和 TBM 设备研发中寻找契合最优点，以达到充分应用 TBM 设备实现安全、绿色、快速、标准化施工的目的。

围绕上述问题，以国网新源控股有限公司为首的研究团队，已经开展大量卓有成效的研究和试点应用工作，小断面小转弯半径 TBM 已在文登抽水蓄能电站成功应用，并积极推广到多个在建工程；基于正井法的竖井 TBM 已在宁海抽水蓄能电站投入试点应用，大断面平洞 TBM、斜井 TBM 已完成应用方案研究并在抚宁、洛宁、平江等抽水蓄能电站基本具备了试点应用条件。

总体来看，TBM 作为“机械化、智能化、标准化”发展方向的代表性技术与装备，已在抽水蓄能电站全面机械化、智能化建设转型中取得了可喜的突破，同时也将



面临更大的挑战。

1.2.2 主要创新成果

(1) 装备制造创新。

1) 创新研发并成功应用了“文登号”，适用于抽水蓄能电站排水廊道等小断面、小转弯半径隧洞的准通用型 TBM。

2) 创新研发了大断面竖井 TBM 并已在宁海抽水蓄能电站开展试点应用。

3) 创新研发了大断面、小转弯半径 TBM，并将在抚宁抽水蓄能电站通风兼安全洞、交通洞施工中开展试点应用。

4) 创新研发了大断面斜井 TBM，并将在洛宁、平江抽水蓄能电站压力管道斜井段开展试点应用。

(2) 设计理念创新。

创新开展了抽水蓄能电站典型地下洞室，如排水廊道、交通洞、通风洞、输水隧洞等的标准化设计研究，基于 TBM 施工方案，创新了上述地下洞室设计理念，形成了各典型地下洞室的标准化设计方案，并在 TBM 开挖洞室的支护理论方面进行了初步探索。

(3) 建造技术创新。

采用“机械化、智能化”的施工手段替代传统钻爆法施工，依托 TBM 及配套设备，结合远程地面智能控制系统、超前地质预报系统、智能喷浆系统等技术，使得施工调度、掘进施工、出渣、物料运输、通风、排水、通信等整个施工过程都更为规范化、机械化、智能化，推动了抽水蓄能施工工艺及施工技术的进一步提升。

(4) 管理模式创新。

创新开展了各典型地下洞室，如排水廊道、交通洞、通风洞、输水隧洞等的施工关键技术研究、施工组织设计方案研究，提出了基于 TBM 的施工布置、临建设施、设备拆装、施工方法（工艺）、出渣运输与土石方平衡、施工进度安排、配套资源配置等具有较强指导意义的整体实施方案。小断面 TBM 施工关键技术与施工组织设计方案已通过文登抽水蓄能电站的成功实践得以总结提升。

此外，对基于 TBM 的工程投资与经济性问题开展了细致的研究和探讨，为 TBM 规模化应用和商业模式创新提供了有益的启示。



1.3 面临的主要问题

(1) 内生驱动力不足。

抽水蓄能电站高速发展与工程建设智能化转型升级这两个必然趋势，形成了两股强大的外部驱动力，推动以 TBM 为代表的抽水蓄能电站地下洞室智能建造技术取得了一些突破和成绩。然而，总体来看，当前内生驱动力明显不足，相关各方以及各环节还没有形成自觉的合力，外部驱动力的内化问题既紧迫也任重道远。导致内生驱动力不足的主要原因，仍然是经济性和商业模式问题，前者主要指向整体收益的量值大小，后者主要指向整体收益的合理分配。从已有实践效果分析，上述两个问题均未能得到有效解决，仍需要集合全行业智慧和力量，开展深入研究和有益尝试。此外，也有一些比较特殊的驱动力，比如抚宁抽水蓄能电站，受限于严苛的爆破施工条件，主动寻求非爆破开挖技术手段。

(2) 有效需求与有效供给对接欠佳。

一方面，从纵向的产业链来看，TBM 代表的一种智能建造技术方向，本身是多学科多产业交叉和集成的新领域，从前端的工程需求到后端的装备制造，既有传统专业知识壁垒以及物联网、区块链、边缘计算、人工智能等新技术知识壁垒的阻隔，也需要技术团队自身知识体系的升级以及合作模式的磨合，更需要全行业深化对绿色智能建造的认识，并从绿色智能建造的角度重新审视工程建设需求形态与关键技术装备研发思路的对接与融合。这既需要时间和实践积累，也需要新的产学研合作模式、新的技术团队运行方式。

另一方面，从横向的工程建设领域来看，抽水蓄能电站建设对智能建造、机械化与 TBM 的需求，可能只代表了可再生能源领域智能建造的一种需求模式，既存在相互复制、移植的需求和动力，也存在各自异化的可能。这就需要加强横向的沟通与交流，促进对各自有效需求与有效供给的思考。

(3) 规模化可持续发展路径仍有待破题。

以 TBM 为代表的智能建造技术需要尽快解决经济性、商业模式等内生驱动力问题，这是规模化可持续发展的必然要求和关键步骤。

此外，某一方向或某一产业的规模化可持续发展本身意味着更高层次的战略选择问题，可能还需要从抽水蓄能工程建设乃至可再生能源工程建设的智能化转型升级角



度，持续开展主要技术方向的战略契合度研究与修正。

更为重要的是，规模化可持续发展离不开新的技术、管理团队以及一线技术工人群体。推进智能建造发展的根本在于推动智能建造人才队伍的形成和不断进化。如何实现智能建造人才队伍的规模化、可持续发展，也是整个行业亟须共同关注和探索的关键问题。

2 设计篇

