

DOI: 10. 20040/j. cnki. 1000-7709. 2023. 20222265

# 大型抽水蓄能电站泄洪排沙洞运行期巡检与服役性能评价

贾 涛<sup>1</sup>, 韩 钢<sup>2</sup>, 辛 萌<sup>1</sup>, 李 斌<sup>1</sup>, 张雨霆<sup>2</sup>

(1. 河北丰宁抽水蓄能有限公司, 河北 丰宁 068350;

2. 长江水利委员会长江科学院水利部岩土力学与工程重点试验室, 湖北 武汉 430010)

**摘要:** 大型抽水蓄能电站的泄洪排沙洞在运行期将受高速水流、输沙冲刷及外水压作用, 洞内可能存在衬砌开裂、剥蚀、掉块等局部破坏现象, 对其长期使用产生不利影响。以丰宁抽水蓄能电站泄洪排沙洞为例, 首先开展了基于机器人的实时视频、高清图像和多参数气体采集, 实现了近 2 km 洞段的巡检, 将隧洞缺陷划分为结构性和功能性缺陷, 并提出分级标准; 然后, 结合近 6 年的隧洞内监测数据初步评价了隧洞围岩的稳定性; 最后, 采用数值分析方法对不同运行条件下的隧洞围岩和衬砌结构受力进行计算分析评价。结果表明, 泄洪排沙洞在当前状态下服役性能良好。研究结果对已建电站运维管理及类似隧洞工况巡检具有一定参考价值。

**关键词:** 丰宁抽水蓄能电站; 泄洪排沙洞; 机器人巡检; 缺陷分级; 服役性能评价

**中图分类号:** TV734

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1000-7709(2023)09-0130-04

## 1 工程概况

河北丰宁抽水蓄能电站的泄洪排沙洞位于下水库右岸, 其中无压隧洞长 1 996 m, 衬砌后过流断面为 5 m×6.5 m(宽×高)的城门洞形, 隧洞底坡  $i = 1.24\%$ , 进口高程 1 045.00 m, 出口高程 1 019.12 m。采用钢筋混凝土衬砌, 出口以涵洞+明渠(约 654 m)与原河道相接。泄洪排沙洞于 2013 年 5 月开始施工, 于 2016 年 5 月完成土建施工并正式通水, 至今已运行 6 年。泄洪排沙洞作为电站的重要建筑物之一, 其结构安全和服役性能对电站在整体投运后持续发挥预期效益至关重要。因此, 亟需对泄洪排沙洞开展一次系统性检查。通常此类隧洞多采用定期排水放空后, 由人工直接进入巡查的方式进行。但该方式存在风险高、效率低、数据质量差等缺陷<sup>[1]</sup>。对此, 张涛等<sup>[2]</sup>研究了混凝土内部缺陷探测方法; 张凯等<sup>[3]</sup>研究了采用摄像探头在深水环境中地涵的缺陷检测技术; 汪天伟等<sup>[4]</sup>研制了适用于水下工作的机器人并用于水工隧洞检查。上述研究为实现无人洞内巡检提供了良好的借鉴。为此, 本文以丰宁抽水蓄能电站泄洪排沙洞为例, 围绕在役水工隧洞巡检的工程需求, 介绍了基于机器人的水

工隧洞无人化巡检工程实践, 并结合安全监测数据资料评价了水工隧洞的服役性能。

## 2 巡检方案及结果

### 2.1 巡检内容

巡检内容包括: ①隧洞内淤泥、沉沙、滞留物等情况; ②衬砌开裂范围、掉块规模、裸露围岩表层形貌情况; ③隧洞内氧气、有害气体情况。

### 2.2 巡检方式

采用搭载图像、视频和气体成分检测等模块的机器人, 以洞外操控、洞内机器人行进的方式进行巡检。预计到洞内可能存在淤泥、树枝等, 特别采用了增大机器人爬行器轮胎尺寸、增大机器人负载方式, 以提升机器人的通过能力。搭载多工作模块的巡检机器人构成见图 1, 其核心工作模块主要包括摄像头、高清录像机、气体检测仪等。

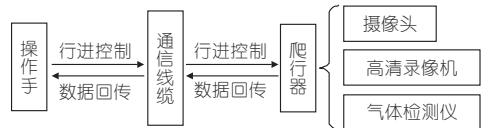


图 1 搭载多工作模块的巡检机器人组成单元

Fig. 1 Patrol robot with multi-work module

### 2.3 巡检步骤

泄洪排沙洞的机器人巡检步骤如下。

**收稿日期:** 2022-10-28, **修回日期:** 2022-12-07

**基金项目:** 国家自然科学基金项目(51979008); 长江科学院创新团队(CKSF2021715/YT)

**作者简介:** 贾涛(1989-), 男, 工程师, 研究方向为抽水蓄能电站工程建设管理, E-mail: 448559229@qq.com

**通讯作者:** 张雨霆(1984-), 男, 正高级工程师, 研究方向为隧洞围岩稳定与结构安全, E-mail: magicdonkey@163.com

**步骤 1 收集资料。**整理泄洪排沙洞投入使用至今 6 年间的流量和工程区域的水文资料,评估泄洪排沙洞放空进行巡检时段的可利用时间,为巡检工作提供明确的时间窗口。

**步骤 2 现场查勘。**在泄洪排沙洞放空后,现场查勘排沙洞的洞内水深,评估机器人的爬行器的涉水能力和越障性能,匹配合适的爬行器轮胎尺寸和动力供给。

**步骤 3 正式巡检。**在洞外操作控制端,控制机器人进入洞内开始巡检,重点通过搭载的高清摄像机、高分辨率照相机和多参数气体分析仪,收集洞内巡检的录像、图像和气体参数。完成巡检后,操作机器人原路返回,人工在洞口回收。

**步骤 4 结果分析和评价。**根据机器人巡检获得的资料,开展泄洪排沙洞的表现性态分析,根据隧洞结构的实际状态,辨识缺陷类型,划分缺陷等级。同时,结合其他可表征泄洪排沙洞的稳定状态的资料,整体评价服役性能。

## 2.4 隧洞表现状态的分级和评价标准

泄洪排沙洞内的表现缺陷划分为结构性缺陷和功能性缺陷两大类。隧洞结构性缺陷主要包括渗漏、底板冲蚀、钢筋腐蚀、墙体破裂等损害隧洞结构安全性的缺陷;功能性缺陷主要包括淤泥沉积、障碍物、浮渣等影响隧洞正常运营的缺陷。进一步根据各种缺陷的状态将其细分为 4 个缺陷等级(表 1):① 1 级缺陷。轻微缺陷,即在该状态下一般不会对隧洞的结构和功能产生影响;② 2 级缺陷。一般缺陷,即在该状态下已形成了明显的破坏征兆,但也不会对隧洞的结构和功能产生影响;③ 3 级缺陷。较严重缺陷,即在该状态下已形成了局部破坏,且会对隧洞的结构和功能产生影

表 1 隧洞内缺陷名称及等级解释

Tab. 1 Explanation of defect types and grades in the tunnel

缺陷	定义	等级	缺陷描述
破裂	衬砌裂纹或裂缝	1	细裂纹或裂缝
		2	裂缝有明显间隙,但无脱落
		3	裂缝部位存在脱落,范围较小
		4	裂缝部位存在脱落,范围较大
冲蚀	隧洞底板发 生冲蚀破坏	1	轻微冲蚀,以蜂窝麻面为主
		2	冲蚀深度较大,且有钢筋露出
		3	出现冲蚀坑,钢筋完全外漏
		4	大范围冲蚀坑,深度衬砌厚度
渗漏	外水渗流 到隧洞内	1	水滴状,沿洞壁流动
		2	水滴一线股状
		3	线股—涌水状
		4	涌水—喷水状
淤泥 沉积	淤泥沉积于 隧洞底板	1	淤积范围不超过断面 5%
		2	淤积范围占断面 5%~10%
		3	淤积范围占断面 10%~30%
		4	淤积范围超过断面>30%

响;④ 4 级缺陷。严重缺陷,即在该状态下,有较大范围的破坏,且隧洞结构和功能受损严重,无法正常运行。

## 2.5 隧洞表现缺陷巡检结果分析

基于现场检测结果,将对丰宁抽水蓄能电站泄洪排沙洞的机器人巡检结果汇总并列入表 2。由表 2 可看出,丰宁电站泄洪排沙洞破坏或缺陷主要有:① 底板冲蚀,主要为 1 级缺陷,分布区域较多;② 渗漏缺陷,现场共检测出 21 处,全部为 1 级缺陷;③ 隧洞边墙和顶拱衬砌的破裂破坏,现场共检测出 14 处,全部为 1 级缺陷;④ 除在泄洪排沙洞出口处,有一定深度的淤泥沉积外,隧洞内其他位置未检测到淤泥、块石堆积现象。

表 2 泄洪排沙洞缺陷统计表

Tab. 2 Defect statistics of flood discharge tunnel

缺陷 类型	缺陷名称	等级			
		1 级 (处)	2 级 (处)	3 级/4 级 (处)	合计 (处)
结构性	底板冲蚀	>100	2	0	>100
	渗漏	21	0	0	21
	破裂	14	0	0	14
功能性	淤泥沉积	1	0	0	1

## 2.6 隧洞有害气体检测结果分析

表 3 为泄洪排水洞内不同取样点的有害气体检测情况。由表 3 可看出,泄洪排沙洞内氧气含量为 20.9%,未检测出有害气体。

表 3 有害气体检测情况

Tab. 3 Summary of hazardous gas detection results

桩号/m	氧气/%	可燃气体/%	硫化氢 /PPM	一氧化碳 /PPM
141	20.9	0	0	0
490	20.9	0	0	0
701	20.9	0	0	0
1 235	20.9	0	0	0
1 300	20.9	0	0	0
1 496	20.9	0	0	0
1 628	20.9	0	0	0

## 3 运行期安全监测数据分析

(1) 多点位移计。表 4 统计了典型监测截面的洞周围岩变形分布。由表 4 可看出,4 个监测断面在运行期的顶拱和边墙围岩变形总体较小。其中,0+770、1+685、1+878 截面的围岩变形在 1.5 mm 以内,变幅很小。1+173 截面的顶拱围岩变形达到 2.6 mm,2015 年 4 月~2022 年 4 月的变形曲线总体保持平稳,局部存在陡变,应是受到运行期过流影响和其他偶然荷载作用所致。

表 4 典型截面洞周变形统计

Tab. 4 Summary of deformation at typical section mm

监测断面	顶拱	边墙	监测断面	顶拱	边墙
0+770	1.3	0.6	1+685	1.0	0.9
1+173	2.6	0.9	1+878	0.9	1.4

(2)钢筋应力计。表 5 统计了典型截面的衬砌结构钢筋应力(正值为拉,负值为压)。由表 5 可看出,二次衬砌的钢筋既有受到压应力作用,又有受到拉应力的作用,但总体上受到的压应力作用更为显著,压应力在 100 MPa 以内,拉应力在 60 MPa 以内。1+173 截面 2015 年 4 月~2022 年 4 月的衬砌钢筋应力曲线总体保持平稳,局部测点存在陡变,导致钢筋压应力增大。

表 5 典型截面衬砌钢筋应力统计

Tab. 5 Summary of liner steel stress at typical section

MPa			
监测断面	顶拱测点 1、2	左边墙测点 3、4	右边墙测点 5、6
0+770	31~52	-28~-26	-36~8
1+173	6~35	-83~-11	-15~11
1+685	-48~-18	-100~-50	-35~19
1+878	-41~-34	-27~26	-48~34

(3)锚杆应力计。表 6 统计了典型截面的洞周围岩锚杆应力监测值。由表 6 可看出,各截面的锚杆应力值多在 50 MPa 以内,最大值为 81 MPa。1+173 截面 2015 年 4 月~2022 年 4 月的锚杆应力曲线总体保持平稳。

表 6 典型截面洞周围岩锚杆应力计

Tab. 6 Summary of anchor bolt stress at typical section

MPa			
监测断面	顶拱测点 1	左边墙测点 2	右边墙测点 3
0+770	21	24	—
1+173	52	81	50
1+685	78	41	19
1+878	33	37	42

(4)渗压计。运行期泄洪排沙洞洞周的围岩内地下水水头值总体不大,各断面的水头实测值在 10 m 以内。

## 4 典型截面衬砌结构受力分析

### 4.1 初始计算条件

选取典型截面桩号 1+173 所在截面作为典型洞段,进行围岩开挖和衬砌结构受力分析,评价长期运行期条件下的衬砌结构安全。该洞段埋深约 260 m,Ⅲ类围岩洞段二次衬砌厚 0.6 m,位于微新地层。

围岩力学参数取变形模量 11 GPa,泊松比 0.27,粘聚力 1.1 MPa,内摩擦角 45°。计算模型见图 2,共剖分了 13 070 个单元和 6 400 个节点。其中,位于隧洞周边的围岩网格尺寸基于敏感性分析确定,量值在 0.5~1.0 m,能够满足围岩稳定分析精度要求。

### 4.2 计算分析工况

计算工况为:①施工期工况。即考虑开挖支

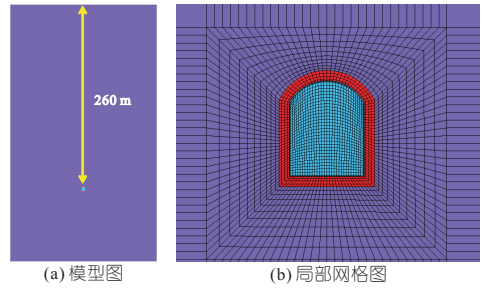


图 2 典型截面(1+173)洞段计算分析模型

护作用分析;②初始运行工况。即实施二次衬砌后开始通水,但不考虑长期冲蚀对衬砌结构影响的分析工况,即此工况不考虑衬砌的减薄;③长期运行工况。即在初期运行工况的基础上,考虑长期冲蚀作用对衬砌结构影响的工况,该工况依据巡检所发现的洞内衬砌厚度有所减薄的情况,取典型断面的衬砌厚度为 0.5 m,即减薄 10 cm。

### 4.3 计算结果分析

施工期工况计算结果见图 3。由图 3 可看出,洞周边墙围岩变形在 6.2 mm 以内,顶拱围岩变形在 5 mm 以内,变形矢量指向洞内侧。顶拱围岩塑性区深度在 0.8 m 以内,边墙塑性区深度在 1.5 m 以内。洞周围岩锚杆应力分布在 7~18 MPa。

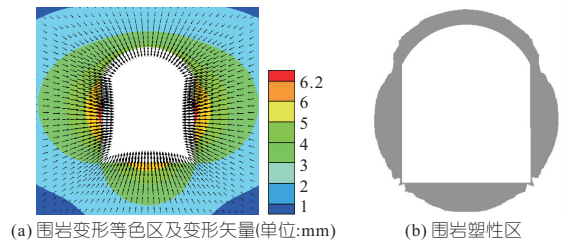


图 3 施工期工况计算结果

Fig. 3 Calculation results of construction working condition

初始运行工况衬砌结构应力见图 4。由图 4 可看出,围岩变形、塑性区和支护受力与施工期工况基本相同,变化很小。衬砌第一主应力在-1.2~-0.1 MPa 之间,第三主应力在-0.3~0.3 MPa。边墙和底板内缘及底板两侧外缘出现一定量值拉应力,量值在 0.3 MPa 以内。

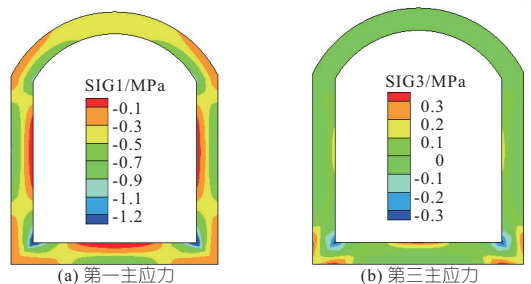


图 4 初始运行工况衬砌结构应力(单位:MPa)

Fig. 4 Liner stress under initial operation working condition

长期运行工况衬砌结构应力见图 5。由图 5

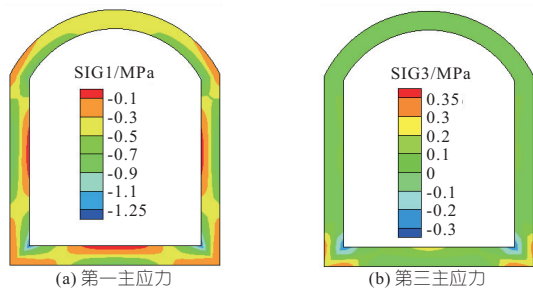


图 5 长期运行工况衬砌结构应力(单位:MPa)

Fig. 5 Liner stress under long-term operation working condition

可知,围岩变形、塑性区和支护受力与施工期相比,有一定变化,但幅度较小。衬砌受减薄影响,应力有所变化。其中,第一主应力为 $-1.25 \sim -0.10$  MPa,即最大压应力增加约 $0.05$  MPa;第三主应力为 $-0.30 \sim 0.35$  MPa,拉应力区域与初始运行工况基本相同,但量值增加约 $0.05$  MPa。

对比计算工况分析结果与运行期安全监测数据,发现长期运行工况所反映的围岩稳定性和支护结构受力特性,与安全监测数据所反映的隧洞结构稳定状态一致。

## 5 泄洪排沙洞的服役性能评价

(1)基于巡检结果的评价。洞内结构缺陷和功能缺陷等级以 1 级为主,极个别部位存在 2 级缺陷。当前状态下泄洪排沙洞处于良好运行状态,无需采取专门措施处理洞内缺陷。

(2)基于安全监测数据的评价。不同部位的多点位移计实测围岩变形量值均较小,反映出当前状态下的泄洪排沙洞围岩处于稳定状态;锚固支护结构受力总体正常,也处于安全状态;作用在二次衬砌上的地下水荷载总体不大,衬砌钢筋应力受力正常,二次衬砌结构受力也符合安全要求。

(3)基于数值分析的评价。施工期工况条件下,隧洞围岩稳定可得到保证;初始运行工况和长期运行工况条件下,表征围岩稳定性的指标变化

较小,隧洞围岩稳定性程度无明显变化。二次衬砌在考虑冲蚀减薄影响后,结构压应力和拉应力有一定增加,但幅度较小,均低于混凝土强度设计值,衬砌结构安全性仍有保证。

(4)综合评价。综上所述,判定在当前状态下,泄洪排沙洞的服役性能良好。

## 6 结论

a. 基于机器人巡检成果,认为隧洞内结构性缺陷主要为底板冲蚀、钢筋腐蚀、墙体破裂等,其中底板区域总体均存在轻微的冲蚀破坏和渗漏缺陷;边墙和顶拱衬砌出现少量开裂破坏。

b. 基于安全监测数据,初步判定当前状态下的隧洞围岩处于稳定状态;锚固支护受力总体正常,处于安全状态;作用在衬砌上的地下水荷载总体不大,钢筋受力正常,衬砌结构受力符合安全要求。

c. 基于数值分析,发现泄洪排沙洞的围岩稳定性在开挖支护完成可持续保持,在运行期变化较小;衬砌结构应力在长期运行冲蚀减薄后,结构应力量值有所增加,但幅度较小,均低于混凝土的强度设计值,因此其结构安全性仍有保证。

d. 服役性能评价基于巡检结果、监测数据和数值计算分析等 3 方面工作展开,认为泄洪排沙洞在当前状态下的服役性能良好。

### 参考文献:

- [1] 李永龙,王皓冉,张华. 水下机器人在水利水电工程检测中的应用现状及发展趋势[J]. 中国水利水电科学研究院学报, 2018, 16(6): 586-590.
- [2] 张涛,张世宝,张家宏,等. 混凝土内部缺陷精准探测方法研究[J]. 水电能源科学, 2022, 40(2): 149-152, 113.
- [3] 张凯,孟颖,程正飞. 搭载 4K 高清摄像系统 ROV 在长距离地涵水下检查中的应用[J]. 水电能源科学, 2020, 38(12): 126-128.
- [4] 汪天伟,周红坤,杨飞. 一种水电站隧洞检查专用水下机器人的研制及应用[J]. 水电能源科学, 2019, 37(8): 174-176.

## Patrol Inspection and Service Performance Evaluation of Flood Discharge Tunnel of Large Pumped Storage Power Station During Operation Period

JIA Tao<sup>1</sup>, HAN Gang<sup>2</sup>, XIN Meng<sup>1</sup>, LI Bin<sup>1</sup>, ZHANG Yu-ting<sup>2</sup>

(1. Hebei Fengning Pumped Storage Co., Ltd., Fengning 068350, China; 2. Key Laboratory of Geotechnical Mechanics and Engineering of Ministry of Water Resources, Changjiang River Scientific Research Institute, Wuhan 430010, China)

**Abstract:** The flood discharge tunnel of large pumped storage power stations will be subject to high speed water flow, sand transport erosion and external water pressure during operation period, and the tunnel may suffer from local damage such as lining cracking, spalling and falling blocks, which will have a negative impact on its long-term use. Taking the flood discharge and sand drainage tunnel of the Fengning Pumped Storage Power Station as the research object, this paper firstly carried out robot-based real-time video, high-definition image and multi-parameter gas collection to realize the inspection of nearly 2 km cavern section. The defects of the tunnel were classified into structural and functional defects and graded. Then, the stability of the tunnel envelope was initially evaluated by combining the monitoring data within the tunnel for the past 6 years. Finally, numerical analysis methods were used to analyze and evaluate the forces on the tunnel envelope and lining structure under different operating conditions. The results show that the flood discharge and sand drainage tunnel has good service performance in the current state. The results of the study are of reference value for the operation and maintenance management of existing power stations and for the inspection of similar tunnels.

**Key words:** Fengning Pumped Storage Power Station; flood discharge tunnel; robot inspection; defect classification; service performance evaluation