

DOI: 10.20040/j.cnki.1000-7709.2023.20220500

五岳抽水蓄能电站地下厂房初始地应力反演及围岩稳定性分析

任 斌¹, 张 帆¹, 李永生¹, 周永健², 张卓睿², 陈 凯¹, 刘 云¹

(1. 河南新华五岳抽水蓄能发电有限公司, 河南 信阳 465450;

2. 成都理工大学地质灾害防治与地质环境保护国家重点实验室, 四川 成都 610059)

摘要: 河南五岳抽水蓄能电站地下厂房洞室群结构复杂, 主厂房最大跨度 26.0 m, 高 55.1 m, 为大型地下洞室。岩体结构面发育, 强度低, 断层 f_1 贯穿三大厂房, 安全问题突出, 需分析其开挖后围岩的稳定性。为此, 使用 FLAC^{3D} 程序建立地质模型, 采用 BSA-BP 神经网络反演计算了该区的初始地应力场, 而后进行地下厂房开挖的模拟计算, 分析了围岩应力场、位移场及塑性区发育分布规律, 结果表明地下厂房洞室群围岩基本稳定, 但在断层发育部位及母线洞两端存在局部变形破坏的可能。研究成果可为该工程设计、施工提供指导, 也可为同类工程提供参考。

关键词: 抽水蓄能电站; 地下厂房洞室群; FLAC^{3D}; 地应力反演; BSA-BP 神经网络; 围岩稳定性

中图分类号: TV698.12

文献标志码: A

文章编号: 1000-7709(2023)05-0117-04

1 概况

五岳抽水蓄能电站位于河南省信阳市殷棚乡境内, 建成后将接入河南省电网, 承担系统调峰、填谷, 兼有调频、调相、紧急事故备用等任务, 对河南电网的稳定运行具有重要意义。电站设计总装机规模为 1 000 MW, 工程规模为二等大(2)型。地下发电系统布置于牢山寨主峰雄厚的花岗岩山体中, 三大洞室布置及其相对位置见图 1, 主厂房设计开挖尺寸为 165.00 m × 24.50 m × 55.10 m

(长 × 宽 × 高), 为“跨度大、边墙高”的大型地下洞室^[1]。主变洞设计开挖尺寸为 185.95 m × 20.00 m × 20.80 m (长 × 宽 × 高), 尾水闸门室设计开挖尺寸为 102.00 m × 8.70 m × 20.40 m (长 × 宽 × 高)。洞室埋深最大 300 m, 围岩为微风化一新鲜的燕山晚期中粒二长花岗岩, 受到节理切割严重, 岩体强度低。厂区主要发育两条断层与四组构造节理。断层产状分别为 $f_1: 50^\circ \sim 60^\circ \text{NW} \angle 70^\circ \sim 80^\circ$ 、 $f_2: 55^\circ \sim 65^\circ \text{NW} \angle 75^\circ \sim 85^\circ$ 。节理面产状分别为: ① $30^\circ \sim 50^\circ / \text{NW} \angle 75^\circ \sim 85^\circ$; ② $290^\circ \sim 300^\circ / \text{NE} \angle 60^\circ \sim 70^\circ$; ③ $80^\circ \sim 90^\circ / \text{SE} \angle 45^\circ \sim 60^\circ$; ④ $280^\circ \sim 290^\circ / \text{SW} \angle 70^\circ \sim 80^\circ$ 。断层 f_2 从主厂房西北角穿过, 于厂房中仅部分揭露, 对厂房影响较小。而断层 f_1 沿着 #3 机组所在剖面从主厂房贯穿至尾闸室, 宽度 0.5 ~ 1.0 m, 对地下厂房围岩稳定性影响较大。对此, 本文拟采用三维有限差分软件 FLAC^{3D} 建立地质模型, 采用 BSA-BP 神经网络对地应力进行反演计算, 之后进行分层开挖的模拟计算, 从开挖后的围岩变形规律、二次应力分布及塑性区发育分布情况评价地下厂房开挖后的稳定性^[2]。

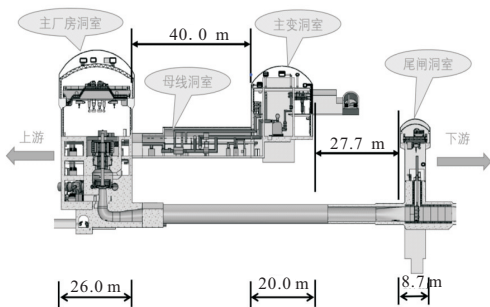


图 1 地下厂房横剖面图

Fig. 1 Cross section of underground powerhouse

收稿日期: 2022-03-17, 修回日期: 2022-07-25

基金项目: 国家自然科学基金项目(41977252); 地质灾害防治与地质环境保护国家重点实验室自主探索课题(SKLG2020Z001); 新华水力发电有限公司科研项目(XHWY-2020-DL-KY01)

作者简介: 任斌(1971-), 男, 教授级高级工程师, 研究方向为水利水电工程管理, E-mail: 1475986030@qq.com

通讯作者: 张帆(1985-), 男, 工程师, 研究方向为水利水电工程, E-mail: Z13072880815@163.com

2 计算模型与计算参数

2.1 模型建立

按照实际山体建模,包括主厂房、主变洞、尾闸室、母线洞及尾水连接管。采用 Rhino 7、griddle 进行建模与网格划分,完整模型见图 2(a),断层 f_1 、 f_8 采用实体单元建立,断层与地下厂房位置关系见图 2(b)。系统锚固通过 FLAC^{3D} 中 Cable 与 Shell 单元模拟。计算模型以主厂房轴线(N15°W)为 y 轴正方向,水平面上以垂直于洞轴线为 x 轴,以铅垂向上为 z 轴,模型尺寸为 320 m×390 m×450 m(长×宽×高)。网格划分以六面体为主,外部网格尺寸为 20 m,向内网格尺寸逐渐减小,厂房模型网格尺寸为 1 m,建立模型网格单元数为 1 098 708 个。

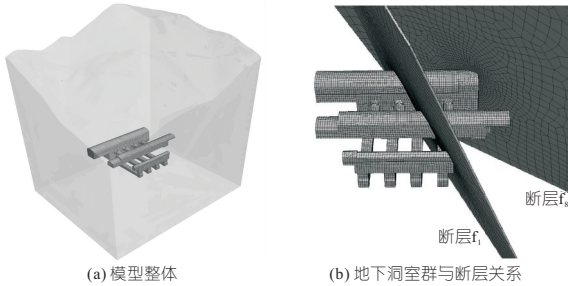


图 2 计算模型

Fig. 2 Calculation model

2.2 计算参数与支护参数

三维数值计算采用适用于地下工程开挖的 Mohr-Coulomb 本构模型。现场围岩以Ⅲ类围岩为主(Ⅲ类围岩超过 82%),计算参数根据围岩分级及现场承压板试验结果确定,详见表 1。系统锚固的详细参数见表 2。

表 1 地下厂房洞室围岩参数

Tab. 1 Parameters for surrounding rock of underground cavern of underground powerhouse

围岩	干密度 / ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	弹性模量 / GPa	泊松比	抗拉强度 / MPa	粘聚力 / MPa	内摩擦角 / ($^\circ$)
Ⅲ类	2 650	9.0	0.23	1	1.2	41
V类(断层破碎带)	2 350	0.5	0.35	0	0.2	22

3 基于 BSA-BP 神经网络的地应力反演计算

3.1 BSA-BP 神经网络模型构建

采用回溯搜索算法(BSA)优化 BP 神经网络,以提高计算速度与精度。BSA 算法由初始化种群、选择、变异、交叉和选择五部分组成^[3],具

表 2 系统锚固参数表

Tab. 2 Parameters for supporting

洞室	支护名称	支护参数		
		砂浆锚杆	树脂预应力锚杆	喷射混凝土
主厂房	顶拱	$\Phi 28@3.0 \times 1.5 \text{ m}; L=6 \text{ m}$ $\Phi 32@3.0 \times 1.5 \text{ m}; L=9 \text{ m}$	$\Phi 32@3.0 \times 1.5 \text{ m}; L=12 \text{ m}$	挂网喷 C25 混凝土,厚 0.15 m
	边墙	$\Phi 28@3.0 \times 1.5 \text{ m}; L=6 \text{ m}$ $\Phi 32@3.0 \times 1.5 \text{ m}; L=9 \text{ m}$	$P=100 \text{ kN}$	
主变洞	顶拱	$\Phi 28@3.0 \times 1.5 \text{ m}; L=5 \text{ m}$ $\Phi 28@3.0 \times 1.5 \text{ m}; L=7 \text{ m}$	$\Phi 32@3.0 \times 1.5 \text{ m}; L=12 \text{ m}$	挂网喷 C25 混凝土,厚 0.15 m
	边墙	$\Phi 28@3.0 \times 1.5 \text{ m}; L=7 \text{ m}$ $\Phi 32@3.0 \times 1.5 \text{ m}; L=5 \text{ m}$	$P=100 \text{ kN}$	
母线洞	顶拱	$\Phi 25@1.2 \times 1.2 \text{ m}; L=4.5 \text{ m}$		挂网喷 C25 混凝土,厚 0.15 m
	边墙	$\Phi 25@1.2 \times 1.2 \text{ m}; L=4.5 \text{ m}$		
尾闸室	顶拱	$\Phi 25@3.0 \times 1.5 \text{ m}; L=4.5 \text{ m}$ $\Phi 28@3.0 \times 1.5 \text{ m}; L=6 \text{ m}$ $\Phi 32@3.0 \times 1.5 \text{ m}; L=9 \text{ m}$		挂网喷 C25 混凝土,厚 0.15 m
	边墙	$\Phi 25@3.0 \times 1.5 \text{ m}; L=4.5 \text{ m}$		

说明:表中“ $\Phi 28@3.0 \times 1.5 \text{ m}; L=6 \text{ m}$ ”表示锚杆直径 28 mm,间距 1.5 m,排距 3.0 m,锚杆长度 $L=6 \text{ m}$ 。

体选择步骤见图 3。该算法在全局搜索能力与收敛速度方面有很大优势,能够优化 BP 神经网络各层之间的权值阈值,以提高神经网络的稳定性、准确性与计算速度^[4]。

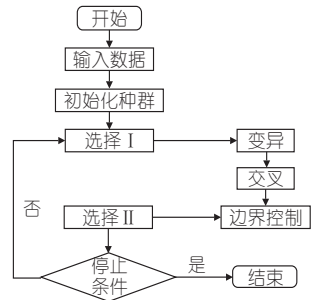


图 3 BSA-BP 算法基本流程图

Fig. 3 Basic flow chart of BSA-BP algorithm

传统 BP 神经网络由三层组成(输入层、隐含层与输出层),是一种利用误差逆传播算法训练得到的神经网络。通过迭代计算并反馈给输出与输入层,不断调整权值阈值,最终得到一种输入层到输出层的映射关系。经过参数试算与经验公式计算,BP 神经网络的隐含层节点数为 15,训练输入层节点数为 48,输出层节点数为 6。训练函数选用 trainlm 算法,学习速率为 1×10^{-3} ,训练期望精度设置为 1×10^{-3} 。输入层到隐含层传递选用 tansig 函数,隐含层到输出层传递选用 Purelin 函数。回溯搜索优化算法中,根据多次试验计算,种群规模确定为 60,遗传代数定为 100,交叉概率定为 0.90,变异概率定为 0.2。BSA-BP 神经网络通过对样本的不断学习来构建黑箱模型。

3.2 地应力反演过程

在模型的初始地应力平衡过程中,施加以下初始边界条件:施加自重并乘以参数 V_1 ;在垂直于 x 轴方向的两个边界施加方向相反,大小为 V_2

的均布荷载,模拟 x 方向的构造应力;在垂直于 y 轴方向的两个边界施加方向相反,大小为 V_3 的均布荷载,模拟 y 方向的构造应力。假定 $V_1 \in (0.9, 1.3)$ 、 $V_2 \in (4.0, 8.0)$ 、 $V_3 \in (4.0, 8.0)$,在设计训练样本时,采用正交试验法,使得样本输出值在问题空间中均匀分布。采用 $L_{25}(5^3)$ 设计 3 因素 5 水平的试验方案,共计 25 种。试验样本见表 3。

表 3 正交试验设计表

Tab. 3 Orthogonal experimental design table

样本	V_1	V_2	V_3	样本	V_1	V_2	V_3	样本	V_1	V_2	V_3
1	0.9	4	4	10	1.0	8	4	19	1.2	7	5
2	0.9	5	5	11	1.1	4	6	20	1.2	8	6
3	0.9	6	6	12	1.1	5	7	21	1.3	4	8
4	0.9	7	7	13	1.1	6	8	22	1.3	5	4
5	0.9	8	8	14	1.1	7	4	23	1.3	6	5
6	1.0	4	5	15	1.1	8	5	24	1.3	7	6
7	1.0	5	6	16	1.2	4	7	25	1.3	8	7
8	1.0	6	7	17	1.2	5	8				
9	1.0	7	8	18	1.2	6	4				

根据表 3 数据,在 FLAC^{3D} 中分别设置不同应力边界,进行初始地应力平衡计算,得到 25 种工况下两个地应力测试断面(图 4)中每个测点地应力的数值计算值。将模拟计算的地应力值作为模型输入值,系数作为模型输出值,以此对 BSA-BP 神经网络模型进行训练。随机从 25 组数据中抽取 4 组作为检测样本,其余为训练样本,经过大量训练调试后建立黑箱模型,将地应力实测值输入黑箱模型并输出各系数,将初次反演得到的系数与实测应力值增加为新的样本数据,再次对黑箱模型进行训练,得到更新后的模型。将实测应力值输入更新后的模型,得到系数 V_1 、 V_2 、 V_3 分别取为 1.22、5.35、6.64。

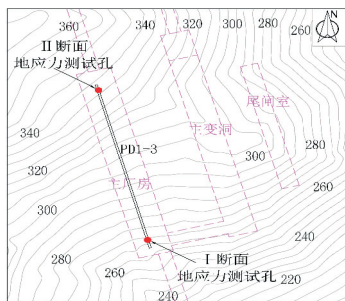


图 4 地应力测试断面

Fig. 4 In-situ stress test section

根据系数设置模型边界进行初始地应力平衡计算,可得到地应力反演结果,表 4 为地应力现场实测值与反演值对比。由表 4 可知,36 个结果中,仅有一个应力值的误差大于 10.34%,其余误差均在 10% 以内,平均误差仅为 3.52%。个别测点误差较大,可能与地应力与其测量本身的复杂

表 4 地应力实地测量值与反演值对比表

Tab. 4 Comparison of measured and inversion values of in-situ stress

点 位	高程 /m	σ_x			σ_y			σ_z		
		实测值	反演值	相对误	实测值	反演值	相对误	实测值	反演值	相对误
		/MPa	/MPa	差/%	/MPa	/MPa	差/%	/MPa	/MPa	差/%
I	122.7	3.04	2.82	7.15	3.19	2.86	10.34	4.28	4.19	2.14
	112.5	3.28	3.11	5.30	2.84	2.73	3.98	2.79	2.74	1.93
	103.1	2.88	2.80	2.90	2.88	2.74	4.99	4.14	4.06	1.91
	90.4	4.85	4.72	2.62	4.87	4.58	5.97	5.48	5.44	0.81
	84.6	4.41	4.18	5.26	4.42	4.33	1.96	4.6	4.39	4.58
	77.8	5.03	4.81	4.37	4.94	4.83	2.13	5.24	4.97	5.09
	II	120.3	3.74	3.65	2.54	3.25	3.06	5.88	4.76	4.65
115.1		4.93	4.72	4.18	4.56	4.40	3.56	5.58	5.48	1.80
108.6		5.59	5.47	2.08	5.17	5.12	0.97	6.65	6.58	1.00
100.2		5.17	4.96	4.14	4.72	4.56	3.32	6.03	5.93	1.70
90.4		6.88	6.71	2.49	6.17	5.99	2.94	8.02	7.96	0.81
80.6		6.03	5.77	4.25	5.45	5.04	7.54	6.8	6.68	1.70

性等因素有关^[5]。整体来说地应力反演结果与现场实测地应力吻合较好,说明基于 BSA-BP 神经网络反演得到的地应力结果可用于开挖计算的初始条件^[6]。

4 围岩稳定性计算结果

采用 BSA-BP 神经网络反演计算了研究点地应力发育情况,模拟计算了地下洞室群分层开挖后围岩的应力场、位移场及塑性区发育分布情况,结果如下。

(1)应力场。洞室开挖使得围岩应力发生二次重分布,洞室四周围岩的径向应力减小而环向应力增加,并在部分位置出现应力集中。图 5 为地下厂房开挖锚固后 3 机组剖面的最小主应力与最大主应力云图。从围岩的最小主应力云图来看,地下厂房开挖后,洞室拱脚、边墙底部均出现压应力集中,主厂房拱脚最大压应力为 10~11 MPa,主变洞下游拱脚压应力为 11~13 MPa,尾闸室整个顶拱处于受压状态,压应力最大 14.5 MPa。岩体所受压应力最大的部位为主厂房上游边墙底部,压应力最大值为 15.23 MPa。岩体所受最大压应力远小于岩体饱和单轴抗压强度(70 MPa)。从最大主应力云图来看,主厂房上游边墙断层发育处及母线洞与边墙交界处存在局部拉应力集中,拉应力最大为 0.64 MPa。拉应力对的出现对于围岩稳定性不利,尽管拉应力远小于岩石的抗拉强度,但拉应力会导致岩体中的结构面张开,导致岩块松动或块体掉落。因此在实际开挖过程中,应加强主厂房上游边墙及母线洞与边墙交界处的支护工作。

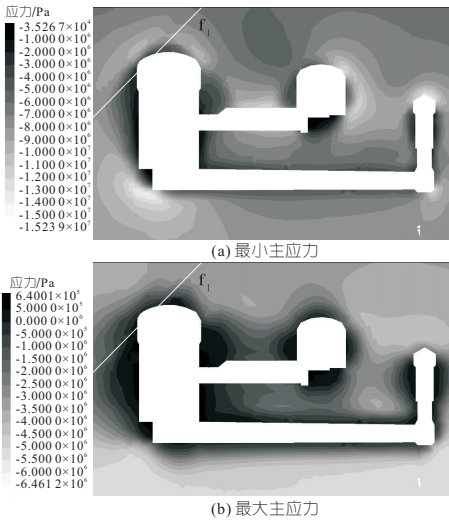


图 5 #3 机组剖面最小、最大主应力云图

Fig. 5 Minimum and maximum principal stress distribution of unit 3

(2)位移场。洞室开挖后,由于二次应力重分布,围岩产生指向洞内的回弹变形,主要表现为顶拱沉降、底板隆起及两侧边墙向洞内收敛。图 6 为开挖锚固完成后#3 机组剖面的位移矢量图。三大洞室中主厂房尺寸最大,开挖后围岩变形量明显大于其他两个洞室,且断层发育部位岩性更差,力学强度更低,开挖后出现的变形最大。主厂房围岩位移较大的部位以顶拱、主厂房上游岩锚梁及下游边墙与母线洞相交处为主,其中上游岩锚梁受断层 f_1 影响,围岩变形量最大,最大变形量为 16.66 mm;顶拱最大沉降量为 14.00 mm;下游边墙受到母线洞开挖影响也出现较大变形,变形量为 10.60 mm;底板回弹量约为 10.00 mm。主变洞中围岩变形最大的部位为上游拱脚位置,变形量最大为 9.10 mm;而上游边墙受母线洞开挖影响,变形量也较大,最大变形量为 7.00 mm;底板的回弹量大约为 8.00 mm。尾闸室围岩下游边墙围岩变形量最大,为 7.90 mm,其余部位变形量较小,约 3.00~5.00 mm。

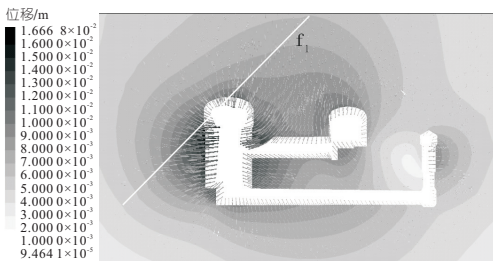


图 6 #3 机组剖面位移矢量图

Fig. 6 Displacements principal stress distribution

(3)塑性区。图 7 为地下厂房开挖后洞室围岩塑性区的发育分布情况,塑性区主要分布于三大洞室周围,洞室开挖尺寸越大,塑性区越大。主

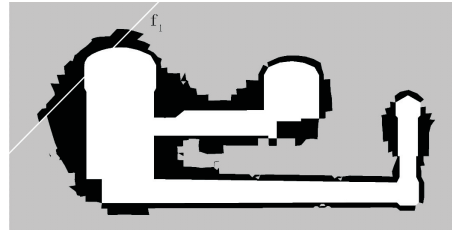


图 7 #3 机组剖面塑性区发育分布图

Fig. 7 Plastic zone distribution

厂房的塑性区范围最大,主厂房上游边墙受断层 f_1 影响,塑性区发育范围明显大于其余部位,最大发育深度为 14 m;母线洞与下游边墙相交处塑性区发育范围较大,最大发育深度约 11 m。顶拱的塑性区范围较小,发育深度约 5 m;主变洞中塑性区发育范围最大的部位为上游边墙与母线洞相交部位,最大发育深度约 8 m。下游边墙塑性区发育深度约 4~5 m,而顶拱塑性区发育深度仅为 2 m 左右。尾闸室中两侧边墙塑性区发育范围最大,发育深度约 4~5 m,而顶拱塑性区发育深度仅为 2 m 左右。主厂房及母线洞两端顶拱的塑性区发育深度较大,在施工时应予以足够重视。

5 结论

- a. 基于 BSA-BP 神经网络的地应力反演结果与实际地应力测量结果基本一致,能够较好反映研究点地应力情况,作为开挖计算的初始应力条件能够提高计算可靠性。
- b. 断层 f_1 发育部位岩体质量较差,且存在一定程度的拉应力集中(最大 0.64 MPa),存在松动掉块的可能。母线洞与主厂房(主变洞)相交部位受开挖扰动影响,形成两面临空的状态,围岩同样出现较大变形,仍然存在局部变形破坏的可能。
- c. 地下洞室群通过分步开挖后围岩整体处于稳定状态,围岩的变形、应力及塑性区分布符合同类工程的一般规律,说明现行开挖支护方案能够满足围岩整体稳定性需要,但存在局部变形破坏的可能。建议在断层发育部位及母线洞开挖时,提前采取适当的加固、支护措施(固结灌浆,增加预应力锚索等),防止局部变形破坏发生。

参考文献:

[1] 巨能攀. 大跨度高边墙地下洞室群围岩稳定性评价及支护方案的系统工程地质研究[D]. 成都:成都理工大学,2005.

[2] 叶智峰,赵英华,宣雍祺,等. 某水电站地下厂房喷锚支护数值模拟[J]. 人民珠江,2018, 39(7): 84-88, 119.

应用电场线法求解结果,验证了 BPA 法的准确性和高效性。

b. 提高导线的对地高度、增加分裂子导线半径和减小极间距可有效降低地面附近的电场强度,但极间距与子导线半径的影响效果很小。

参考文献:

[1] 李伟,张波,何金良. 直流输电线路离子流场计算方法[J]. 陕西电力,2009,37(10):1-5.

[2] 邹军,程启问,乔骥,等. 高压直流输电线路离子流场计算研究综述[J]. 南方电网技术,2020,14(6):1-10.

[3] 方正瑚,顾翔宇. 直流离子流场的求解问题[J]. 中国电机工程学报,1990(增刊 1):75-80.

[4] 李永明,陈晓鑫,张淮清,等. 计及地电位升高的 HVDC 输电线路离子流场的计算[J]. 高压电器,2012,48(1):17-24.

[5] 乔骥,徐志威,邹军,等. 一种消除 Deutsch 假设的高精度迭代特征线方法求解高压直流输电线路离子流场[J]. 电工技术学报,2018,33(19):4419-4425.

[6] 汪飒,范竞敏,李敏,等. 高精度上流有限元法在特高压直流输电线路离子流场计算中的应用[J]. 高电压技术,2016,42(4):1061-1067.

[7] SARMA M P, JANISCHEWSKYJ W. Analysis of corona losses on dc transmission lines: i - unipolar lines[J]. IEEE transactions on power apparatus and systems, 1969,PAS-88(5):718-731.

Calculation of Synthetic Electric Field of UHV DC Transmission Line Based on BPA Method

ZOU An-xin¹, WANG Shou-gang¹, YANG Tao¹, LI Yong-ming², LIU Yan²

(1. State Grid Chongqing Electric Power Company Ultra High Voltage Branch, Chongqing 400039, China;
 2. State Key Laboratory of Power Transmission Equipment & System Security and New Technology, Chongqing University, Chongqing 400044, China)

Abstract: In order to study the ion flow field problem near the ground of UHV DC transmission lines, the BPA method is applied to solve the ion flow field of bipolar DC transmission lines. The synthetic electric field is solved combined with the nominal electric field calculated by the successive image method. The ion flow field and synthetic electric field problems of ±800 kV DC transmission lines are calculated using the BPA method, and the effects of erection height, interelectrode distance, and sub-conductor radius on the synthetic electric field of UHV DC transmission lines are analyzed. In addition, the power-line method for solving the synthetic electric field strength is compared. The results show that the BPA method is accurate and effective in solving the ion flow field, and the calculation efficiency is greatly improved. Increasing the height of the wire erection and increasing the radius of the split sub-conductor can improve the electromagnetic environment near the ground, while reducing the interelectrode distance can reduce the synthetic electric field intensity near the ground, but the effect is not obvious.

Key words: BPA(Bonneville Power Administration) method; UHV DC transmission; synthetic electric field; height to ground; pole spacing; split sub conductor radius

(上接第 120 页)

[3] 王冰清. 基于回溯式搜索算法的随机神经网络优化及应用[D]. 济南:山东大学,2016.

[4] 田文凯. 回溯搜索优化算法的研究和应用[D]. 西安:西安电子科技大学,2014.

[5] 蒋中明,徐卫亚. 三维初始地应力场反分析的径向基函数法[J]. 岩土力学,2002,23(6):737-741.

[6] 王红彬,石焱炯,沈德虎,等. 白鹤滩水电站巨型地下厂房高边墙开挖支护变形研究[J]. 水电能源科学,2020,38(5):118-121.

Initial Ground Stress Inversion and Surrounding Rock Stability Analysis of Underground Powerhouse of Wuyue Pumped Storage Power Station

REN Bin¹, ZHANG Fan¹, LI Yong-sheng¹, ZHOU Yong-jian²,
ZHANG Zhou-rui², CHEN Kai¹, LIU Yun¹

(1. Henan Xinhua Wuyue Pumped Storage Power Generation Co., Ltd., Xinyang 465450, China; 2. State Key Laboratory of Geohazard Prevention and Geoenvironment Protection, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China)

Abstract: The underground powerhouse of Henan Wuyue Pumped Storage Power Station has a complex structure of caverns. The main powerhouse has a maximum span of 26.0 m and a height of 55.1 m, which is a large underground chamber. The rock mass structural planes are developed and the strength is low. The fault F1 runs through the three powerhouse, and the safety problems are prominent. The stability of surrounding rock after excavation should be analyzed. Therefore, FLAC^{3D} program was used to establish the geological model. The BSA-BP neural network was used to calculate the initial in-situ stress field of the area. And then the excavation of underground powerhouse was simulated. The stress field, displacement field and plastic zone development and distribution law of surrounding rock were analyzed. The results show that the surrounding rock of underground powerhouse caverns group is basically stable. However, local deformation and failure may occur in the fault development area and at both ends of the busbar hole. The research results can provide guidance for the design and construction of the project, and provide some reference for similar projects.

Key words: pumped storage power station; underground powerhouse caverns; FLAC^{3D}; geostress inversion; BSA-BP neural network; surrounding rock stability