

DOI: 10. 20040/j. cnki. 1000-7709. 2023. 20221431

基于 BPA 法计算特高压直流输电线路合成电场

邹岸新¹, 王守刚¹, 杨 滔¹, 李永明², 刘 岩²

(1. 国网重庆市电力公司超高压分公司, 重庆 400039;

2. 重庆大学输配电装备及系统安全与新技术国家重点实验室, 重庆 400044)

摘要: 为研究特高压直流输电线路地面附近的离子流场问题, 应用 BPA 法求解双极直流输电线路离子流场, 结合逐次镜像法计算的标称电场, 进而求得合成电场, 并利用该方法计算了±800 kV 直流输电线路的离子流场与合成电场问题, 分析了导线对地高度、极间距、子导线半径对特高压直流输电线路合成电场的影响。此外, 还对比了求解合成电场强度的电场线法。结果表明, BPA 法求解离子流场准确有效, 且计算效率大大提高; 提高导线架设高度和增加分裂子导线半径均可改善地面附近电磁环境, 而减小导线极间距能够降低地面附近的合成电场强度, 但效果不明显。

关键词: BPA 法; 特高压直流输电; 合成电场; 对地高度; 极间距; 分裂子导线半径

中图分类号: TM75 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-7709(2023)05-0194-05

1 引言

随着电力系统的发展, 为满足远距离、大容量输电的需要, 特高压直流输电工程在国内得到了快速的发展和推广。在直流输电系统中, 当导线表面的电场强度超过起晕场强时, 周围空气会发生局部放电、产生电晕, 空气中游离的离子会在电场的作用下产生离子流, 增强地面附近的电场。因此特高压直流输电引发的电磁环境问题日益成为关注的焦点。直流合成电场强度和离子流密度是直流输电线路的电磁环境评估指标。高压电气设备周围合成电场强度和离子流密度的控制方程均为耦合偏微分方程组^[1], 其解析解较难获得, 需对其进行简化后再求解。直流输电线路离子流场的计算方法总体可分为两大类, 即以 Deutsch 假设为基础的通量线法和采用网格剖分的数值解法^[2-3]。李永明等^[4]基于 Deutsch 对地面离子流场进行解析求解; 乔骥等^[5]提出一种消除 Deutsch 假设的高精度迭代特征线法; 江汎等^[6]采用高精度上流有限元法求解离子流场。邦纳维尔电业局(BPA)法以其求解效率高、稳定性好等优点多次在 CIGRE 被阐述, 但该方法在国内却鲜有介绍。为此, 本文在介绍 BPA 法理论的基础上, 编制了适应性更强的求解程序, 在验证算法的

有效性后, 将其应用于双极直流输电线路离子流场的求解与分析中, 大大提高了计算效率。

2 基于 BPA 的离子流场求解算法

2.1 BPA 法简介

BPA 法是在沿通量线方向积分时, 预估导线表面初始电荷密度, 推导得到电压电流特性方程, 引入与 ρ_0 相关的经验常数 P , 由于 P 的取值不同在实际计算中通常会出现不收敛的情况。为提高计算效率, 本文应用导线表面电荷密度的预估初值公式来求解导线表明电荷密度, 迭代求解后收敛速度更快、精度更高。

2.2 BPA 法求解双极直流输电线路离子流场

当输电线路电场强度超过电晕起始电场强度产生电晕现象时, 周围空气分子电离所形成的电离层见图 1。以负极导线电离过程为例, 电离层内部空气电离生成的正、负离子在电场力的作用下, 正极性离子运动至电极导线为电晕电流形成通路; 负极性离子离开电离层向空间运动, 或向异极性极导线大地运动, 最终达到稳态。直流输电线路离子流场问题的求解关键是对空间电荷分布的求解。

BPA 法求解时认为电场线形成的通量管中离子流保持连续, 满足电流连续性方程。基于以

收稿日期: 2022-07-13, 修回日期: 2022-08-10

作者简介: 邹岸新(1985-), 硕士、高级工程师, 研究方向为电网电磁环境与噪声控制技术, E-mail: zouaxin@163.com

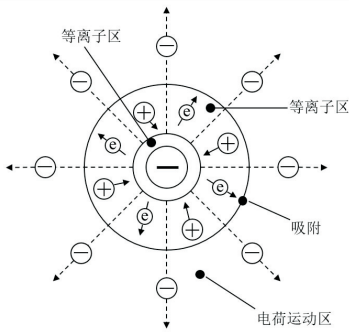


图 1 周围空间空气电离层

Fig. 1 Peripheral space air ionosphere

下假设可获得计算所需的通量管(图 2):①不考虑电离导体周围电离层的厚度;②导线为无限长直导线;③离子迁移率、风速视为常数,离子流场视为二维稳态场;④空间电荷仅影响电场强度的大小,不改变其方向。

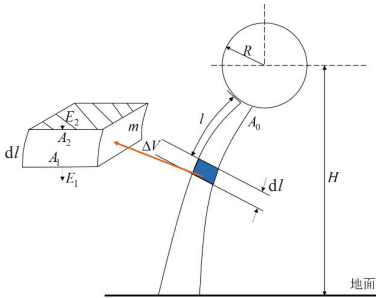


图 2 单根通量管示意图

Fig. 2 Schematic diagram of a single flux tube

图 2 中的单根通量管示意图,起始于导线表面,两边沿着电场线,终端截面垂直于电场强度的方向,阴影部分为通量管的上、下端面。图 2 中 H 为线路中心对地高度; R 为导线半径; A_2, E_2 分别为沿着电场线方向、距离导线表面 l 处的通量管界面边长和电场强度; A_1, E_1 分别为 $l + dl$ 处的通量管界面边长和电场强度; m 为单位长度; V 为 dl 范围内通量管微元的体积。

针对通量管微元,结合高斯通量定理可得:

$$\lim_{\Delta V \rightarrow 0} \frac{1}{\Delta V} \oint_s \tilde{E} d\tilde{s} = \lim_{dl \rightarrow 0} \frac{E_2 A_2 m + 2E(l)A(l)dl + 2E(l)dlm - E_1 A_1 m}{A(l)dlm} \quad (1)$$

式中, \tilde{E} 为电场强度向量; $d\tilde{s}$ 为通量管微元的面积分; $E(l)$ 为导线表面 l 处的电场强度; $A(l)$ 为导线表面 l 处的边长。

对图 1 中的通量管微元 ΔV 、电场强度 E_1 、 E_2 分别为正交于阴影部分所示的上、下端面;而电场强度 $E(l)$ 平行于通量管微元的四侧面,即 $E(l)A(l)dl = E(l)dlm = 0$, 由此可将式(1)化简为:

$$\lim_{\Delta V \rightarrow 0} \frac{1}{\Delta V} \oint_s \tilde{E} d\tilde{s} = \lim_{dl \rightarrow 0} \frac{E_2 A_2 - E_1 A_1}{A(l)dl} \quad (2)$$

不考虑环境风速的离子流场控制方程:

$$-\nabla(\nabla\varphi) = \rho/\epsilon_0 \quad (3)$$

$$\nabla(\rho \nabla\varphi) = 0 \quad (4)$$

式中, ϵ_0 为空气介电常数, 8.85×10^{-12} F/m; $\nabla\varphi$ 为电位的梯度; ρ 为单位体积内的总电荷。

当通量管微元较小时,假设在通量管内部离子流恒定不变,结合式(3)、(4)推导可得方程:

$$E(l)A(l)d[E(l)A(l)] = \frac{j(0)A(0)}{k\epsilon_0} A(l)dl \quad (5)$$

式中, j 为离子流密度; k 为等效离子迁移率。

将式(5)两端沿着电场线积分可得:

$$E(l) = \left[\frac{2j(0)}{k\epsilon_0 E_c(0)} \int_0^l \frac{1}{E_c(l)} dl + \frac{E_0^2}{E_c(0)^2} \right]^{1/2} E_c(l) \quad (6)$$

式中, $E_c(0)$ 、 $E_c(l)$ 分别为标称电场时沿着电场线方向,距离导线表面 0 、 l 处的电场强度; E_0 为导线表面的电晕起始电场强度,其值可由 Peek 公式获得。

引入计算因子 $K_B = \frac{2j(0)}{k\epsilon_0 E_c(0)}$, 式(6)可化简为:

$$E(l) = \left[K_B \int_0^l \frac{1}{E_c(l)} dl + \frac{E_0^2}{E_c(0)^2} \right]^{1/2} E_c(l) \quad (7)$$

式中, K_B 、 E_0 、 $E_c(0)$ 均为常量;合成电场强度 $E(l)$ 为标称电场强度 $E_c(l)$ 的积分函数,因此在标称电场强度已经求得的前提下,可通过积分法获得地面处的合成电场分布情况。

在地面处合成电场强度已求得的前提下,可得电荷密度 $\rho(l)$:

$$\rho(l) = \frac{j(0)A(0)}{kE(l)A(l)} = \frac{K_B \epsilon_0 E_c(l)}{2E(l)} \quad (8)$$

获得地面处的合成电场强度 $E(l)$ 和电荷密度 $\rho(l)$ 后,可求解地面处的离子流密度。导线表面电荷密度 ρ_{0new} 修正公式为:

$$\rho_{0new} = \rho_{0old} \left[1 + f\left(\frac{U - U_i}{U}\right) \right] \quad (9)$$

式中, ρ_{0new} 、 ρ_{0old} 分别为修正后、修正前导线表面电荷密度; f 为修正函数; U 、 U_i 分别为实际电位、计算电位。

2.3 求解流程

(1)计算导线表面起晕场强。应用 Peek 公式计算直流输电线路导线起晕场强:

$$E_{on} = E'_0 m \delta (1 + k/\sqrt{r\delta}) \quad (10)$$

式中, E_{on} 为起晕场强; E'_0 、 k 均为两个经验常数;

m 为导线表面的粗糙系数; δ 为空气的相对密度; r 为导线半径。

(2) 逐次镜像法求解输电线路标称电场强度。逐步镜像法用一个或多个模拟电荷来代替相应的输电线路分裂子导线。然后解电位系数矩阵得到每根子导线中包含的电荷量, 经过反复的镜像满足精度要求后, 将电荷量代入电场计算公式。计算流程见图 3。

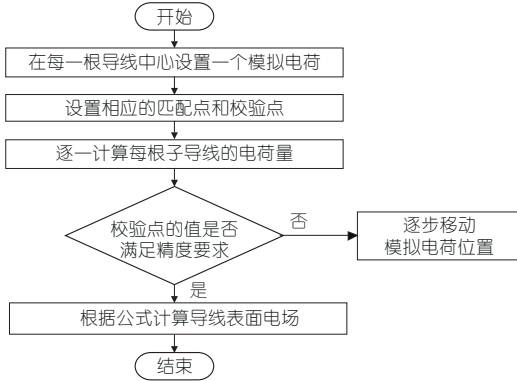


图 3 逐次镜像法计算流程

Fig. 3 Calculation flow of mirror-by-image method

(3) 预估导线表面的电荷密度。导线表面电荷密度的预估初值公式^[7]为:

$$\rho_m = \int_0^U \int_{\varphi} \frac{\rho d\eta}{E^2} d\varphi \bigg/ \int_0^U \int_{\varphi} \frac{d\eta}{E^2} d\varphi \quad (11)$$

式中, ρ_m 为每条电场线上的平均电荷密度, 对 ρ_m 进行适当的缩放即可作为导线表面电荷密度的预估值; U 为导线电压; φ 为无空间电荷时空间某点的电位值; η 为积分变量。

(4) 绘制电场线, 形成通量管。图 4 描绘了双极直流输电线路附近存在电场线的分布。由图 4 (b) 可看出, 电场线从分裂子导线发出不同于从一个单根导线发出, 标称电场和离子流场或多或少会因此而发生改变。BPA 法全部求解流程见图 5。

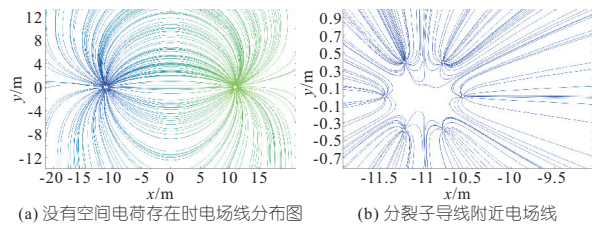


图 4 双极直流输电线路电场线

Fig. 4 Electric field line of bipolar DC transmission line

3 BPA 法求解直流输电线路合成电场

3.1 算例验证

以某实际 ±800 kV 特高压直流输电线路为

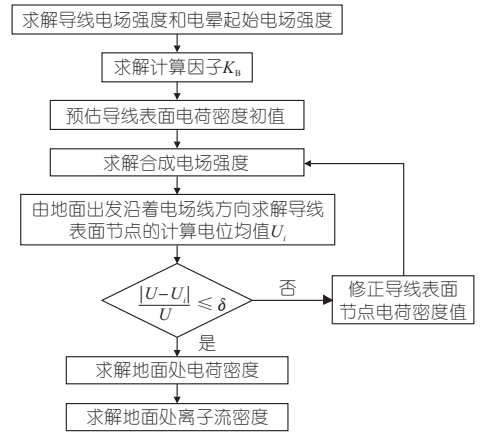


图 5 BPA 法计算流程

Fig. 5 BPA method calculation process

例, 线路参数见表 1, 导线表面粗糙度系数取 0.45。采用 BPA 法求解输电线路下距离地面 1.5 m 处的合成电场强度, 计算结果见图 6。由图 6 可知, 空间电荷的存在使得地面附近的合成电场强度显著增加。电场强度最大值由 10.13 kV/m 变为 27.42 kV/m。

表 1 ±800 kV 直流输电线路分裂导线参数

Tab. 1 ±800 kV DC transmission line split conductor parameters

线路参数	参数值	线路参数	参数值
极间距/m	22	线路对地高度/m	22
子导线半径/cm	1.68	避雷线半径/cm	0.875
分裂间距/cm	45		

注: 导线的分裂形式为 6 分裂。

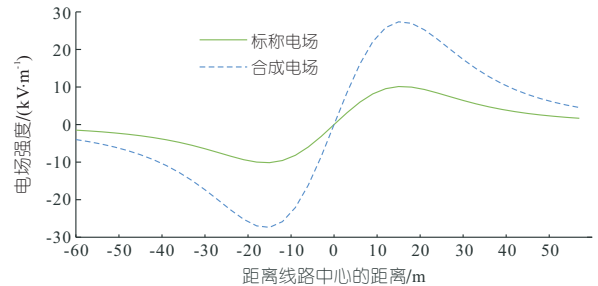


图 6 标称电场与合成电场计算结果

Fig. 6 Calculated results of nominal and synthetic electric fields

3.2 与电场线法计算结果比较

采用电场线法求解合成电场强度时, 与 BPA 法相同, 需绘制相应的电场线, 并提取出每步电场线节点处的电场强度, 沿着电场线方向对每条电场线采用弦截迭代积分, 获得导线节点电荷密度, 进而求得地面处电场强度分布情况。针对 ±800 kV 特高压直流输电线路, 应用电场线法和 BPA 法求解输电线路离子流密度与合成电场强度, 结果见图 7。

由图 7(b) 可看出, BPA 法和电场线法求得合成电场强度曲线整体趋势相同, 数值略微存在偏差。就最大合成电场强度而言, 两种方法求得的

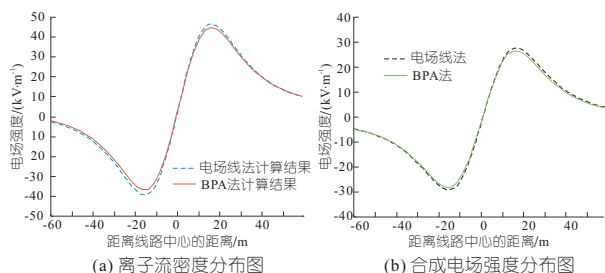


图 7 BPA 法与电场线法求解结果对比

Fig. 7 Comparison of the results of the BPA method and the electric field line method

最大出现位置相同,且前者求得的最大值为 27.42 kV/m,后者求得最大值为 28.44 kV/m。若以电场线法求得的最大值为基准,则采用 BPA 法所得地面合成电场强度最大值偏差为 3.6%,地面离子流密度最大值偏差为 3.8%。在同样的计算平台上,采用 BPA 法的计算时间约为电场线法计算时间的 1/3,计算效率更高,再次验证了 BPA 法计算特高压直流输电线路合成电场的优越性。

3.3 线路结构参数对合成电场强度的影响

(1)导线对地高度对合成电场强度的影响。

设置导线对地高度分别为 17、19、21、25 m,其他线路参数保持不变,分析导线对地高度对合成电场强度的影响结果见图 8。由图 8 可知,地面合成电场强度随导线对地高度的增加逐渐递减,这是因为提高导线对地高度,使得标称电场强度和离子流密度在同等条件下在地面附近的强度降低,从而合成电场强度大幅度减小。另外,不同高度的合成电场峰值会出现在距离线路中心 16 m 左右,在单极侧距离线路中心 36 m 左右会出现交汇的现象,在此之后各高度导线的地面合成电场减小的趋势缓慢,辐射范围也因此增大。当极间距较大,计算过程中考虑由于导线自重产生的弧垂时,同样位置下合成电场强度的峰值会增加。

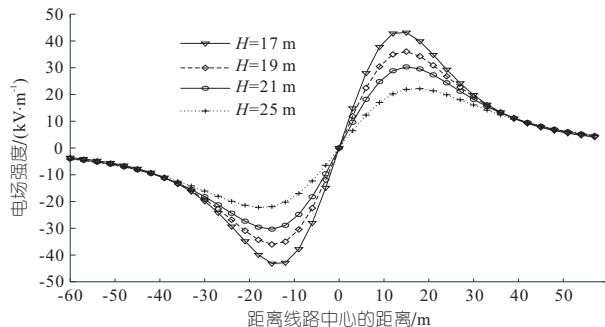


图 8 高度对合成电场的影响

Fig. 8 Effect of height on the synthetic electric field

(2)极间距对合成电场强度的影响。设置导线极间距分别为 20、22、24、26 m,其他线路参数保持不变,分析导线极间距对合成电场强度的影

响结果见图 9。由图 9 可知,双极导线极间距为 20、22、24、26 m 时对应的地面合成电场峰值分别为 20.97、22.19、23.3、24.29 kV/m,随着极间距的增加,输电线路下地面附近的合成电场强度增加,但幅度很小,峰值相差不大。极间距的变化不会影响空间电荷到达地面的距离。因此输电导线横向的移动没有纵向移动对地面合成电场的影响大,在线路架设时,导线极间距对周围电磁环境的影响可不必作为首要考虑因素,但要注意极导线之间的绝缘。

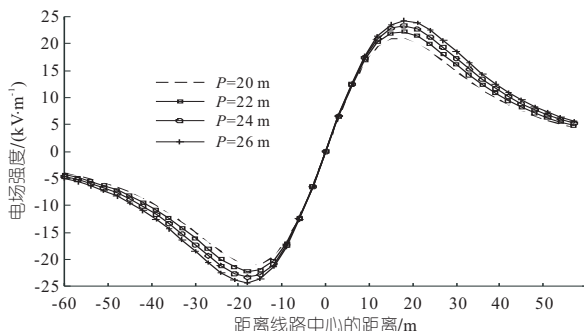


图 9 极间距对合成电场的影响

Fig. 9 Effect of pole spacing on the synthetic electric field

响结果见图 9。由图 9 可知,双极导线极间距为 20、22、24、26 m 时对应的地面合成电场峰值分别为 20.97、22.19、23.3、24.29 kV/m,随着极间距的增加,输电线路下地面附近的合成电场强度增加,但幅度很小,峰值相差不大。极间距的变化不会影响空间电荷到达地面的距离。因此输电导线横向的移动没有纵向移动对地面合成电场的影响大,在线路架设时,导线极间距对周围电磁环境的影响可不必作为首要考虑因素,但要注意极导线之间的绝缘。

(3)分裂子导线半径对合成电场强度的影响。

设置分裂子导线半径分别为 15、17.2、18.3、20.3 mm,其他线路参数保持不变,分析分裂子导线半径对合成电场强度的影响结果见图 10。由图 10 可知,子导线横截面积增加,地面合成电场减小;按子导线横截面积由小到大排序,地面合成电场峰值分别减小了 0.61、0.34、0.73 kV/m。根据规定,对于无人居住的区域,地面合成电场限制规定不超过 30 kV/m,由此可见计算结果均满足限制要求,但由于子导线截面积对地面合成电场强度的影响不大,因此为改善电磁环境改用更粗导线的措施适用性不高。

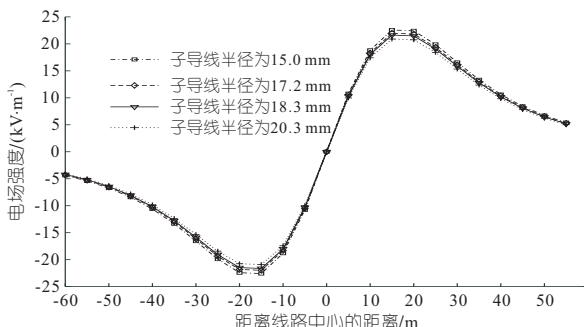


图 10 子导线半径对合成电场的影响

Fig. 10 Effect of radius of the subconductor on the synthetic electric field

4 结论

a. 本文应用 BPA 法,结合实例求解特高压直流输电线路下地面附近合成电场强度,并对比

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