

考虑所有洞室开挖影响的蟠龙地下厂房结构特性分析

袁长安¹, 苏超²

(1. 重庆蟠龙抽水蓄能有限公司, 重庆 401452; 2. 河海大学水利水电学院, 江苏 南京 210098)

摘要: 目前研究大型地下洞室群稳定问题所采用的计算模型为仅包含主厂房、主变室、母线洞及部分引水洞和尾水洞的三维简化模型, 没有考虑其他洞室开挖对主厂房的影响, 与实际工程不完全相符。为此, 结合蟠龙水电站地下洞室群工程建立包含所有洞室的三维有限元模型及仅包含部分洞室的三维简化模型, 采用三维非线性有限单元法研究洞室群在开挖过程中的变形规律和应力状态。结果表明: 两种模型的应力、位移、塑性区的分布规律基本相似, 包含所有洞室的三维有限元模型的计算结果普遍大于简化模型的计算结果, 其中主厂房上游墙的水平位移差达 19.5%。从工程安全角度考虑, 建议地下洞室群施工仿真分析选择包含所有洞室的三维有限元模型。

关键词: 地下洞室; 软岩; 施工仿真; 围岩变形; 塑性区; 蟠龙水电站

中图分类号: TV222.2 **文献标志码:** A **文章编号:** 1006-7647(2018)06-0056-05

Structural characteristics of Panlong Underground Powerhouse considering excavation of all caverns//YUAN Changan¹, SU Chao² (1. Chongqing Panlong Pumped Storage Co., Ltd., Chongqing 401452, China; 2. College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: Current numerical models for studying the stability of underground cavern group are simplified 3D models that are only composed of the main powerhouse, the main transformer chamber, the main electrical wire hall, part of the diversion tunnel and tailrace tunnel. The influence of the excavation of other caverns is usually ignored, leading to the inconsistency with realistic project conditions. In this study, a 3D FEM model of the Panlong Power Station, considering all the caverns as well as a 3D simplified model only including part of the cavern was built. The deformation characteristics and stress states of the cavern group during excavation were studied using 3D nonlinear FEM. The results show that the simulated distributions of deformation field, stress field, and plastic zone between the two models are similar but the magnitudes of the results from the 3D FEM model considering all caverns are generally higher than that of the simplified model. The difference between the two simulated horizontal displacements of the upstream wall can reach 19.5%. Therefore, from the point of view of engineering safety, it is recommended to choose 3D FEM simulation models considering all caverns to perform stability analysis for underground cavern group excavation.

Key words: underground cavern; soft rock; excavation simulation; surrounding rock deformation; plastic zone; Panlong Power Station

根据国家电网的优化配置需要,我国目前正在兴建一批抽水蓄能电站,电站厂房通常为大尺寸的地下洞室群。水电站地下洞室群在开挖过程中洞周围岩的稳定问题一直是工程界和学术界关注的重点,近几年的研究主要包括以下几个方面:①洞室围岩的变形规律^[1-2];②高地应力水平对洞室稳定的影响及应对措施^[3-5];③洞室群围岩稳定分析方法^[6-8];④施工程序、施工仿真及施工方法^[9-10];⑤不同类型围岩的开裂机理和破坏特征^[11-13];⑥地震荷载作用下洞室的稳定^[14-15];⑦洞室围岩岩爆的模拟与分析^[16];⑧高地温环境下岩石特性等^[17]。这些研究涉及大型地下洞室群稳定的主要问题,采用的计算模型都是包含主厂房、主变室、母线洞及部分引水洞和尾水洞的三维简化模型,没有考虑其他洞室开挖对主厂房的影响。本文以蟠龙水电站地下洞室群为研究对象,拟建立包含所有洞室的三维有限元模型,研

究洞室群在开挖过程中围岩的变形机理,并与三维简化模型计算结果进行对比,研究不同计算模型对计算结果的影响,为类似工程的数值模拟提供参考。

1 工程概况

蟠龙抽水蓄能电站由上水库、输水系统、地下厂房系统、下水库及地面开关站等建筑物组成,地下厂房系统采用尾部式布置,电站装机容量为 1 200 MW (4×300 MW),洞室上覆岩体厚度为 40 ~ 480 m。主厂房开挖尺寸为 169.00 m×24.00 m×54.43 m(长×宽×高),安装场位于主厂房中部,主变洞开挖尺寸为 139.40 m×20.30 m×21.20 m(长×宽×高),机组剖面图见图 1。

洞室群主要处于中硬岩和软岩之中,软岩层有 6 层,为泥岩或粉砂质泥岩或泥质粉砂岩,软硬岩相间分布,见图 2(软岩层 4 在主厂房上游,图中没有标出)。软岩强度和弹性模量总体偏低,抵抗变形的能力较差,层与层之间连接力弱,基坑开挖后易发生卸荷回弹,同时软岩抗风化能力差,暴露在空气中极易崩解,加之洞室跨度大,存在大型洞室软岩变形与稳定问题。

2 有限元模型

考虑所有洞室的三维有限元模型(简称 M1 模型)计算网格如图 3 所示,包括主厂房、主变室、母线洞、主变运输洞、联系廊道、送风机房、排风机房、进厂交通洞、主厂房送风洞、主厂房排风洞、主变室送风洞、主变室排风洞、引水隧洞、尾水隧洞、高压电缆平洞、高压电缆竖井、检修排水廊道、排风竖井、3 ~ 6 号施工支洞、厂顶锚固洞以及环绕主厂房和主变室的外围 3 层排水兼锚固洞,同时考虑了软岩等地质构造。为了与以往计算方案进行比较,建立了只包含主厂房、主变室、母线洞、主变运输洞、引水洞、尾水洞的三维简化模型(简称 M2 模型)计算网

格如图 4 所示。计算采用在岩土工程中应用广泛的有限元通用计算程序 ABAQUS,岩石本构模型采用 Mohr-Coulomb 准则,岩石力学参数见表 1。

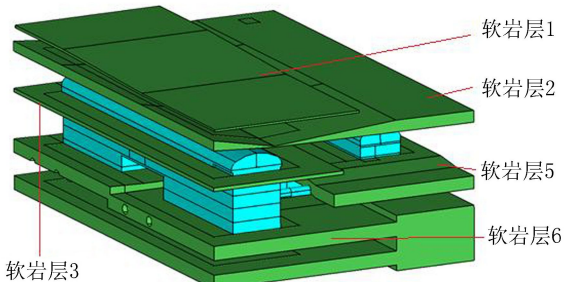


图2 软岩与厂房关系示意图

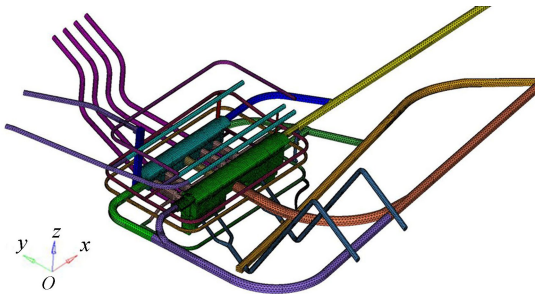


图3 考虑所有洞室的有限元三维模型计算网格

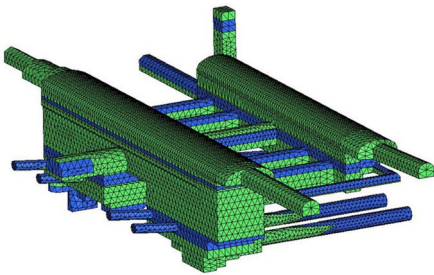


图4 考虑局部洞室的简化模型计算网格

表 1 岩石力学参数

围岩类别	密度/ (kg · m ⁻³)	弹性模量/ GPa	泊松比	黏聚力/ MPa	内摩擦角/ (°)
Ⅲ _A 类	2 550	7.0	0.23	0.900	45.0
Ⅲ _B 类	2 550	7.5	0.23	0.950	46.4
Ⅳ类	2 500	4.5	0.26	0.350	33.0
Ⅳ ~ Ⅴ类	2 460	3.9	0.26	0.305	30.9
Ⅴ类	2 300	1.5	0.30	0.125	21.8

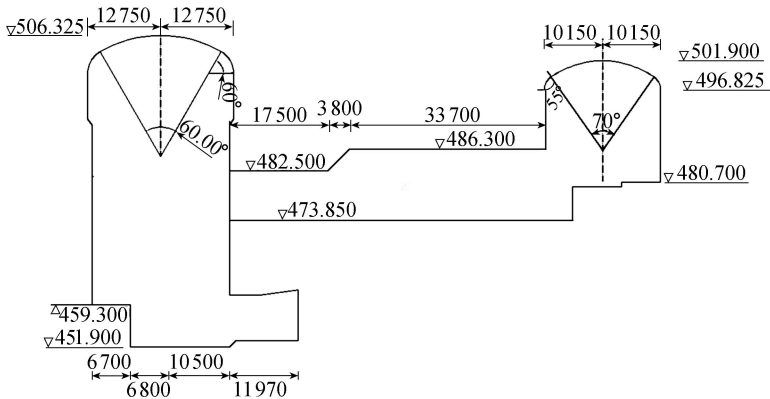


图 1 1 号机组剖面图(高程单位:m;长度单位:mm)

3 主要洞室变形特征

主厂房侧墙以顺水流向的水平位移为主,随着开挖的持续进行,侧墙的开挖高度不断增大,侧墙的水平变形也不断增大,尤其是主厂房上下游边墙的中部,软岩层6贯穿处,以及母线洞、主变运输洞、进场交通洞、引水洞与主厂房上下游边墙交叉处。开挖结束后上游墙最大水平位移 $U_2(y$ 方向) 为 50.18 mm, 发生在下部软岩层贯穿厂房上游墙部位,主厂房下游墙的最大水平位移 $U_2(y$ 方向) 为 -36.07 mm, 发生在母线洞与主厂房交叉洞口处,上游墙位移云图见图 5,下部软岩层位移云图见图 6,下游墙的变形规律与上游墙基本一致。

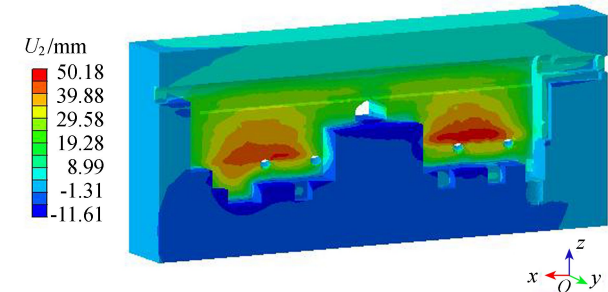


图 5 开挖结束后主厂房上游墙顺水流向位移云图

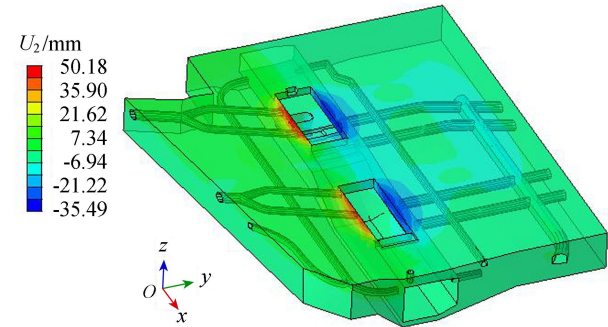


图 6 开挖结束后下部软岩层顺水流向位移云图

4 两种模型计算结果对比分析

4.1 变形对比

M1 和 M2 模型洞周围岩变形规律基本一致。主厂房和主变室上下游边墙以水平位移为主,顶拱和底板以铅直向位移为主,而且随着开挖的进行,洞周围岩的变形逐渐增大。在主厂房顶拱、岩锚梁及母线洞顶部区域分别选取 5 个关键点(图 7),这 5 个关键点变形随开挖过程(分 7 步从上向下开挖)的变化规律见图 8,上游墙的 B、D 两点变形指向下游,下游墙的 C、E 两点变形指向上游,顶拱 A 点的变形铅直向下。M1 模型的上游墙较大水平位移为 33.64 mm,发生在 B 点(附近有软岩层 3);下游墙较大水平位移为 -25.77 mm,发生在 E 点,顶拱铅直向位移为 -31.10 mm。M2 模型相应点上游墙较大

水平位移为 27.07 mm,下游墙较大水平位移为 -21.83 mm,顶拱铅直向位移为 -27.79 mm,通过比较可见,M1 模型的整体变形比 M2 模型大,其中上游墙的水平位移偏差达 19.5%。

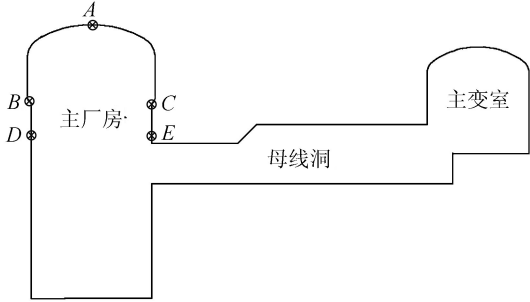


图 7 洞室关键点位置示意图

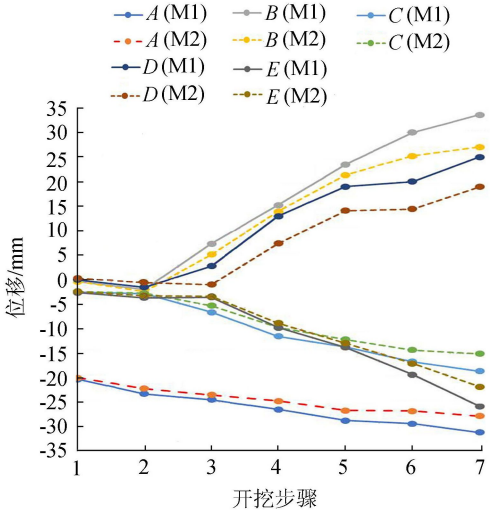


图 8 洞周关键点变形随开挖过程的变化规律

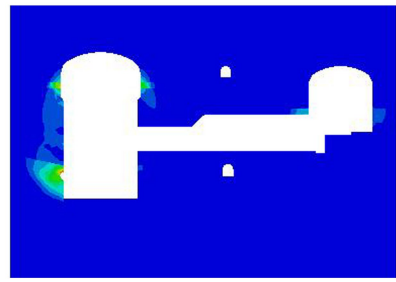
4.2 应力对比

M1 和 M2 模型洞周围岩的应力云图分布基本一致,M1、M2 模型中相同关键点处的应力变化趋势基本一致。洞室侧墙中部主拉应力较大,在主厂房和主变室拱肩部位和侧墙与底板转角部位有主压应力集中现象。M1 模型的最大主压应力为 -15.95 MPa,最大主拉应力为 0.69 MPa。M2 模型的最大主压应力为 -14.91 MPa,最大主拉应力为 0.66 MPa。在开挖过程中,主压应力没有超过围岩的抗压强度。通过比较可知,M1 模型计算结果比 M2 的稍大,最大主拉应力偏差为 4.55%,最大主压应力偏差为 6.52%。

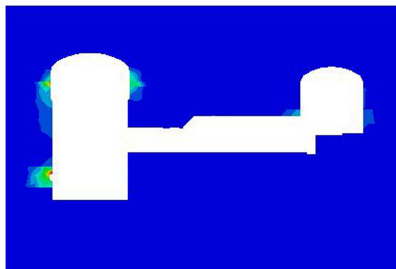
4.3 塑性区对比

图 9 为洞室群开挖完成后主厂房典型截面洞周围岩塑性区分布云图,图 9 表明 M1 和 M2 模型中的塑性区分布规律基本一致,塑性区主要位于贯穿厂房上下游侧墙的软岩内和拱肩处,且上游墙内的塑性区明显比下游墙内的塑性区分布范围大,主厂房和主变室之间没有贯通的塑性区。M1 模型的塑性区比 M2 的塑性区大,其中 M1 模型上游墙内塑性区

深度达 14 m, M2 模型上游墙内塑性区深度达 11 m, 表明 M1 模型考虑的洞室多, 其开挖扰动区更大, 对主厂房、主变室围岩产生了不利影响。



(a) 考虑所有洞室的三维有限元模型



(b) 考虑局部洞室的三维简化模型

图 9 开挖完成后主厂房典型截面洞周围岩塑性区云图

5 结 论

以重庆蟠龙软岩区抽水蓄能电站地下洞室群为依托, 分别建立包括所有洞室的三维有限元模型和只包含主厂房、主变室等部分洞室的三维简化模型, 采用非线性有限元法, 按照施工组织设计开挖过程对地下洞室群进行了有限元数值分析。计算结果表明: 包含所有洞室模型的应力、位移、塑性区均比只包含主厂房、主变室、母线洞等的模型大, 其中主厂房上游墙的水平位移差达 19.5%, 主拉应力偏差为 4.55%, 主压应力偏差为 6.52%, 主厂房上游墙塑性区深度相差 21.4%。说明主厂房周边小洞室的开挖会削弱围岩的整体性, 对主厂房洞周围岩的变形产生一定的影响, 建议在进行地下厂房三维有限元分析时有必要考虑不同计算模型的影响, 宜选择包含所有洞室的三维有限元模型。

参考文献:

[1] 黄秋香, 邓建辉, 苏鹏云, 等. 瀑布沟水电站地下厂房洞室群施工期围岩位移特征分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, 30(增刊1): 3032-3042. (HUANG Qiuxiang, DENG Jianhui, SU Pengyun, et al. Displacement characteristics analysis of surrounding rock in underground powerhouse chambers at Pubugou Hydropower Station during construction [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2011, 30(Sup1): 3032-3042. (in Chinese))

[2] 姚强, 杨兴国, 刘勇林, 等. 大型地下厂房洞室群施工期围岩变形分析[J]. 地下空间与工程学报, 2014, 10(5): 1164-1169. (YAO Qiang, YANG Xingguo, LIU Yonglin, et al. Deformation of surrounding rock mass of large underground powerhouse cavern groups during their construction [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2014, 10(5): 1164-1169. (in Chinese))

[3] 李仲奎, 周钟, 汤雪峰, 等. 锦屏一级水电站地下厂房洞室群稳定性分析与思考[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(11): 2167-2175. (LI Zhongkui, ZHOU Zhong, TANG Xuefeng, et al. Stability analysis and considerations of underground powerhouse caverns group of Jinping-I Hydropower Station [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 28(11): 2167-2175. (in Chinese))

[4] 王义昌, 卢文波, 陈明. 高地应力区洞室围岩开裂问题研究进展[J]. 水利水电科技发展, 2015, 35(2): 85-95. (WANG Yichang, LU Wenbo, CHEN Ming. A review of the rock fracture in cavern under high in-situ stress [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2015, 35(2): 85-95. (in Chinese))

[5] 苏国韶, 冯夏庭, 江权, 等. 高地应力下大型地下洞室群开挖顺序与支护参数组合优化的智能方法[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(1): 2800-2808. (SU Guoshao, FENG Xiating, JIANG Quan, et al. Intelligent method of combinatorial optimization of excavation sequence and support parameters for large underground caverns under condition of high geostress [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26(1): 2800-2808. (in Chinese))

[6] 谭义欣. 基于 ABAQUS 的大型地下洞室围岩稳定性分析[D]. 上海: 东华理工大学, 2016.

[7] 张国荣. 泰山抽水蓄能电站地下洞室群安全稳定性分析研究[D]. 济南: 山东大学, 2015.

[8] 孙红月, 尚岳全, 张春生. 大型地下洞室围岩稳定性数值模拟分析[J]. 浙江大学学报(工学版), 2004, 38(1): 70-74. (SUN Hongyue, SHANG Yuequan, ZHANG Chunsheng. Numerical modeling analysis for surrounding rockmass stability of large underground cavities [J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2004, 38(1): 70-74. (in Chinese))

[9] 李明超, 段志龙. 耦合风险因素的大型地下厂房施工进度仿真分析[J]. 水利水电科技进展, 2014, 34(5): 39-44. (LI Mingchao, DUAN Zhilong. Construction scheduling simulation integrated with risks of largescale underground powerhouse [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2014, 34(5): 39-44. (in Chinese))

[10] 陈刚, 吴立, 左清军, 等. 锦屏二级水电站地下厂房岩壁开挖爆破试验[J]. 水利水电科技进展, 2012, 32(3): 56-59. (CHEN Gang, WU Li, ZUO Qingjun, et al. Failure characteristics, blasting test of underground workshop's

- rock anchor crane beam for Jinping Secondary Hydropower Station[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2012, 32(3): 56-59. (in Chinese))
- [11] 李志鹏,徐光黎,董家兴,等. 猴子岩水电站地下厂房洞室群施工期围岩变形与破坏特征[J]. 岩石力学与工程学报, 2014, 33(11): 2291-2300. (LI Zhipeng, XU Guangli, DONG Jiaxing, et al. Deformation and fracture of surrounding rock mass of underground caverns at Houziyan Hydropower Station [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2014, 33(11): 2291-2300. (in Chinese))
- [12] 刘国锋,冯夏庭,江权,等. 白鹤滩大型地下厂房开挖围岩片帮破坏特征、规律及机制研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2016, 35(5): 865-878. (LIU Guofeng, FENG Xiating, JIANG Quan, et al. Failure characteristics, laws and mechanisms of rock spalling in excavation of large-scale underground powerhouse caverns in Baihetan [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2016, 35(5): 865-878. (in Chinese))
- [13] 卢波,王继敏,丁秀丽,等. 锦屏一级水电站地下厂房围岩开裂变形机制研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(12): 2429-2441. (LU Bo, WANG Jimin, DING Xiuli, et al. Study of deformation and cracking mechanism of surrounding rock of Jinping-I Underground Powerhouse [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, 29(12): 2429-2441. (in Chinese))
- [14] 朱付广,王禹,宋康林,等. 基于三维离散元法的地下洞室定位块体地震响应[J]. 水利水电科技发展, 2014, 34(4): 20-24. (ZHU Fuguang, WANG Yu, SONG Kanglin, et al. Seismic response assessment of positioning block in underground cavern based on 3D DEM [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2014, 34(4): 20-24. (in Chinese))
- [15] 谷宁. 水电站地下洞室节理围岩的地震稳定性分析[D]. 大连:大连理工大学, 2011.
- [16] 李果,周承京,张勇,等. 地下工程岩爆研究现状综述[J]. 水利水电科技发展, 2013, 33(3): 77-83. (LI Guo, ZHOU Chengjing, ZHANG Yong, et al. Review of rockburst in underground engineering [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2013, 33(3): 77-83. (in Chinese))
- [17] 徐小丽,高峰,张志填. 高温作用下花岗岩的脆延性转化温度点[J]. 水利水电科技发展, 2014, 34(1): 43-49. (XU Xiaoli, GAO Feng, ZHANG Zhizhen. Temperature of brittle-ductile transition of granite under high temperature [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2014, 34(1): 43-49. (in Chinese))
- (收稿日期:2017-12-04 编辑:骆超)
-
- (上接第 43 页)
- [10] 李德毅,刘常昱,杜鹁,等. 不确定性人工智能[J]. 软件学报, 2004, 15(11): 1583-1594. (LI Deyi, LIU Changyu, DU Yi, et al. Artificial intelligence with uncertainty [J]. Journal of Software, 2004, 15(11): 1583-1594. (in Chinese))
- [11] 高玉琴,陈鸿玉,肖璇,等. 基于云理论的大中型水闸工程现代管理评价[J]. 水利经济, 2017, 35(2): 63-68. (GAO Yuqin, CHEN Hongyu, XIAO Xuan, et al. Evaluation of management modernization of large and medium-sized sluices based on cloud theory [J]. Journal of Economics of Water Resources, 2017, 35(2): 63-68. (in Chinese))
- [12] 李德毅,刘常昱,杜鹁,等. 不确定性人工智能[M]. 北京:国防工业出版社, 2014.
- [13] 李德毅,刘常昱. 论正态云模型的普适性[J]. 中国工程科学, 2004, 6(8): 28-34. (LI Deyi, LIU Changyu. Study on the universality of the normal cloud model [J]. Engineering Science, 2004, 6(8): 28-34. (in Chinese))
- [14] 许惠君,王宗耀,苏浩益. 基于 DGA 的反馈云熵模型电力变压器故障诊断方法研究[J]. 电力系统保护与控制, 2013(23): 115-119. (XU Huijun, WANG Zongyao, SU Haoyi. Dissolved gas analysis based feedback cloud entropy model for power transformer fault diagnosis [J]. Power System Protection and Control, 2013(23): 115-119. (in Chinese))
- [15] 麻士东,韩亮,龚光红,等. 基于云模型的目标威胁等级评估[J]. 北京航空航天大学学报, 2010, 36(2): 150-153. (MA Shidong, HAN Liang, GONG Guanghong, et al. Target threat assessment technology based on cloud model [J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2010, 36(2): 150-153. (in Chinese))
- [16] 刘继,邓贵仕,那日萨. 贝叶斯反馈云模型的分析与设计[J]. 系统工程理论与实践, 2008, 28(7): 138-143. (LIU Ji, DENG Guishi, NA Risa. Analysis and design of Bayesian feedback cloud model [J]. Systems Engineering-Theory & Practice, 2008, 28(7): 138-143. (in Chinese))
- [17] 徐克虎,孟强,李科. 基于云理论的坦克分队进攻队形综合评价[J]. 火力与指挥控制, 2011, 36(10): 37-40. (XU Kehu, MENG Qiang, LI Ke. The comprehensive evaluation of attack formations of tank element base on cloud theory [J]. Fire Control & Command Control, 2011, 36(10): 37-40. (in Chinese))
- [18] 中国气象局. 中国气象灾害年鉴(2016)[M]. 北京:气象出版社, 2016.
- (收稿日期:2017-11-19 编辑:雷燕)