

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2016.03.001

大型地下洞室群施工期围岩力学参数实时动态反演

张社荣^{1,2}, 胡安奎^{1,2}, 王超^{1,2}, 邵鹏哲³, 谭尧升^{1,2}

(1. 天津大学水利工程仿真与安全国家重点实验室, 天津 300072; 2. 天津大学建筑工程学院, 天津 300072;
3. 雅砻江流域水电开发有限公司, 四川 成都 610051)

摘要: 综合考虑大型地下洞室群施工现场的开挖进度信息、支护进度信息及新出露的地质信息, 建立能够实时更新且反映工程实际进度的三维全尺度数值仿真模型, 结合均匀设计和人工神经网络技术, 基于C#.NET+Python混合编程技术对通用数值软件ABAQUS进行二次开发, 提出大型地下洞室群施工期围岩力学参数实时动态反演分析方法。以黄登水电站为例, 对其地下洞室群施工期围岩力学参数进行实时反演。结果表明: 各施工分期测点计算位移与实测位移随施工期的曲线变化规律一致, 实测值与计算值吻合度较高, 第五期的平均误差仅为5.5%, 得到较好的反演结果, 验证了此法的合理性和可操作性。

关键词: 地下洞室群; 实时反演; 力学参数; 施工期; 神经网络; 黄登水电站

中图分类号: TU443 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-1980(2016)03-0189-07

Real-time dynamic inversion of surrounding rock mechanical parameters during construction of large-scale underground cavern group

ZHANG Sherong^{1,2}, HU Ankui^{1,2}, WANG Chao^{1,2}, SHAO Pengzhe³, TAN Yaosheng^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Hydraulic Engineering Simulation and Safety, Tianjin University, Tianjin 300072, China;

2. School of Civil Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China;

3. Yalong River Hydropower Development Company, Ltd., Chengdu 610051, China)

Abstract: Based on information regarding the excavation progress, support progress, and newly outcropped geology at the construction site of a large-scale underground cavern group, a three-dimensional numerical simulation model, which can be updated in real time and reflect the practical process of construction, was established. Using the techniques of uniform design and artificial neural networks and the mixed programming technique of C#.NET+Python, the secondary development of ABAQUS proceeded, and a method of real-time dynamic inversion of surrounding rock mechanical parameters was developed for a large-scale underground cavern group during the construction period. Using the Huangdeng Hydropower Station as an example, real-time dynamic inversion of surrounding rock mechanical parameters during the construction of a large-scale underground cavern group was conducted. The results show that the variations of calculated displacement and measured displacement of measuring points with construction time showed the same pattern of change in different construction periods and were in good agreement. The average error was only 5.5% in the fifth construction period. This good inversion result verifies the rationality and maneuverability of this method.

Key words: underground cavern group; real-time inversion; mechanical parameter; construction period; neural network; Huangdeng Hydropower Station

收稿日期: 2015-06-29

基金项目: 国家自然科学基金创新研究群体科学基金(51321065); 天津市应用基础与前沿技术研究计划青年项目(15JCQJNC08000); 国家自然科学基金青年项目(51509182)

作者简介: 张社荣(1960—), 男, 山东日照人, 教授, 博士, 主要从事水工结构分析、水电工程安全技术研究。E-mail: tjjudam@126.com

通信作者: 胡安奎, 博士研究生。E-mail: stephen5842@163.com

岩体力学参数的确定是岩土工程计算的前提条件,由于工程地形、地质的复杂性以及测量手段的局限性,岩体力学参数一般难以准确测量,因此研究如何充分利用围岩各种力学响应进行材料参数反演的反分析技术成为当前的热点与难点问题。国外学者对岩体本构模型识别方法以及参数反演智能优化方法进行了深入研究,提出不同的理论方法或进行了相关的改进^[1-4]。国内学者在这方面也有许多研究成果。赵洪波等^[5]将支持向量机与遗传算法结合,提出了一种用于位移反分析的进化支持向量机方法。田明俊等^[6]将改进蚁群算法用于土石坝土体参数的反演计算,并取得良好效果。刘福深等^[7]针对遗传算法的早熟现象,引入小生境技术与自适应杂交变异概率的方法改进了遗传算法。江权等^[8]基于松动圈-位移增量监测信息,采用进化神经网络-遗传算法,提出了大型洞室群岩体参数的智能反演新方法。漆祖芳等^[9]提出了粒子迁徙和变异的粒子群优化(MVPSO)反演算法,并应用于大岗山水电站右岸边坡岩体力学参数反演分析。这些成果一般是对反演新算法的研究或原有算法的改进,而由于地下洞室群施工现场的复杂性、不可预测性等特点,设计开挖、支护方案不可避免地需要根据现场信息进行修改,且伴随着开挖过程会揭露新的地质信息,需要对数值仿真模型信息进行实时更新,在保证模型精度情况下进行的参数反演方法研究还少之又少。

本文依托黄登水电站大型地下厂房洞室群,结合施工现场的开挖进度信息、支护进度信息及新出露的地质信息,建立能够实时更新且反映工程实际进度与信息的三维全尺度数值仿真模型,利用C#.NET+Python脚本语言的混合编程技术对数值软件ABAQUS进行二次开发,采用均匀设计-神经网络反演方法,进行围岩力学参数实时反演,并对围岩安全稳定进行了实时与预测仿真分析。

1 实时参数反演分析方法基本思路

实时参数反演基本思想如下:基于实时数值仿真模型,综合均匀设计法可大幅度减少试验次数并易于实现数字化的特性,耦合神经网络非线性拟合的优势形成智能优化算法,采用增量位移反分析法,利用现场位移实测资料反演分析地下洞室群围岩的力学参数,实现地下洞室群围岩力学参数实时反演。

具体反演流程如图1所示,描述如下:

a. 以初始地应力场反演^[10]为基础,结合洞室群布置、结构尺寸信息以及厂区的地形地质信息等建立初始数值仿真模型。

b. 根据地下洞室群当前施工期,即第*i*施工期的实际开挖进度信息、支护进度信息、新揭露的地质信息等现场信息,实时修改数值仿真模型,建立第*i*施工期的实时数值仿真模型。

c. 进行第*i*施工期参数反演,确定优化反演目标函数。采用最小二乘目标函数,即

$$g(X) = \sum_{i=1}^n (U_i^c - U_i)^2 \quad (1)$$

式中:*g*——最小二乘目标函数;*X*——待求参数集合;*n*——测点个数;*U_i^c*——第*i*个测点的计算位移,由神经网络预测得到;*U_i*——第*i*个测点的实际监测位移。

d. 根据参数敏感性原则^[11],确定待反演的围岩力学参数。根据围岩力学参数建议取值范围,采用均匀设计方法设计试验方案,通过ABAQUS数值计算获取神经网络训练样本与验证样本。

e. 通过神经网络对步骤d建立的训练样本进行学习以建立非线性映射关系。

f. 在对监测位移进行异常值处理^[12]后,利用神经网络的机器学习功能,以实际监测位移信息为输入值,反演得到最优的围岩力学参数,当前第*i*期参数反演

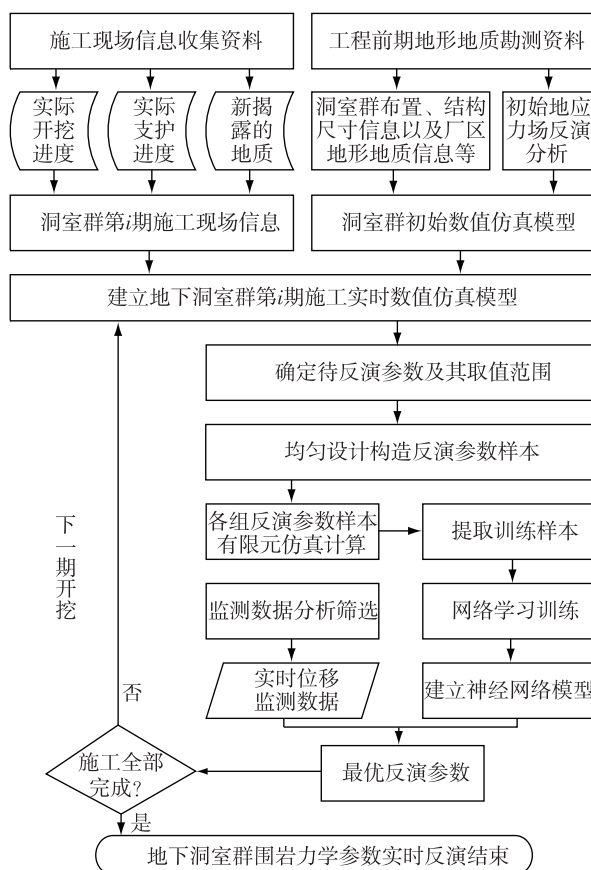


图1 实时反演流程

Fig. 1 Flowchart of real-time inversion

完成。

g. 若工程施工未完成,转到步骤 b 开始进行下一个循环直至工程施工完成,反演结束。

2 实时动态反演的关键技术

大型地下洞室群围岩力学参数实时反演的关键在于用于反演的数值模型能否在满足工程要求的精度下,真实客观地模拟实际工程状态。针对单元分组、系统支护等效^[13]引起的建模工作量巨大等问题,在引入其“集合”映射概念的基础上,对数值仿真模型映射更新算法进行了相关的改进。

2.1 开挖进度实时映射更新

根据工程实际的施工分期开挖进度信息,以各洞室的实际分期开挖高程为映射条件,将已经开挖完成的开挖体区域通过“集合”映射到各分期开挖步对应的开挖单元,并按照分期开挖顺序将单元“杀死”,实现施工进度状态的仿真分析。开挖映射流程见图 2。以某城门洞室的分期开挖为例,分层开挖示意图如图 3 所示。洞室分 n 期开挖,每期对应的高程分别为 $h_1, h_2, \dots, h_n$ 。

根据第 i 期开挖高程 h_i ,得到洞室开挖体中高程坐标介于 h_{i-1} 与 h_i 之间的第 i 期开挖体单元“集合”,激活开挖荷载步并“杀死”第 i 期开挖体单元,进行洞室开挖数值仿真分析,直到开挖完成。

2.2 支护实时映射更新

本文支护进度实时映射更新只考虑锚杆和锚索 2 种支护方式,流程见图 4。支护进度实时映射思路如下:根据地下洞室群实际分期支护进度信息,经支护几何信息识别、三维坐标转换^[14]、支护建模、支护仿真等操作后,将 DXF 文件中所包含的分期支护信息映射到数值仿真模型中,实现施工支护进度状态的实时仿真分析。

支护映射更新重点和难点包括 2 方面:(a) 支护几何模型信息的识别。利用 C# 编程技术进行 DXF 文件的二次开发^[15],识别各图层中支护模型的几何信息。(b) 支护仿真模型的实时建立。利用 Python 脚本编程技术,进行 ABAQUS 数值软件的二次开发,根据支护分期荷载步进行支护的“杀死”与“激活”操作,实现支护的实时仿真分析。

2.3 新揭露地质实时映射更新

新揭露地质实时更新思路如下:根据地下洞室群施工现场揭露的地质信息,以 STL 文本文件为地质“集合”映射媒介,通过识别仿真模型中岩体单元与地质区域的包含关系,实现数值仿真模型中地质信息的实时更新,具体流程见图 5。

地质区域映射更新重点和难点包括 2 方面:(a) 如何判断数值仿真模型中的单元与揭露地质区域的包含关系,即单元节点与地质区域的包含关系。利用 C# 编程技术进行 STL 文件的二次开发,经三维坐标转换^[14],确定地质区域映射的单元“集合”。(b) 新揭露地质仿真模型如何建立。利用 Python 脚本编程技术进行 ABAQUS 数值软件的二次开发,建立新揭露的地质仿真模型。

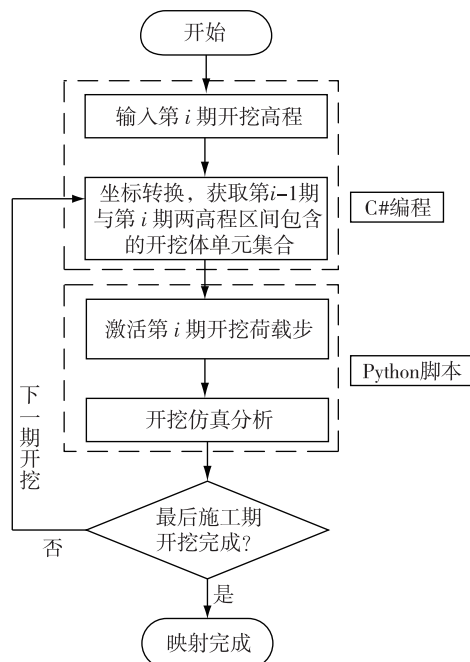


图 2 开挖进度实时映射流程

Fig. 2 Flowchart of real-time mapping of excavation

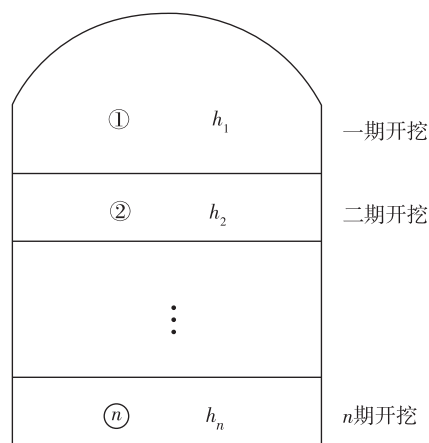


图 3 洞室分期开挖示意图

Fig. 3 Schematic diagram of stage excavation of cavern

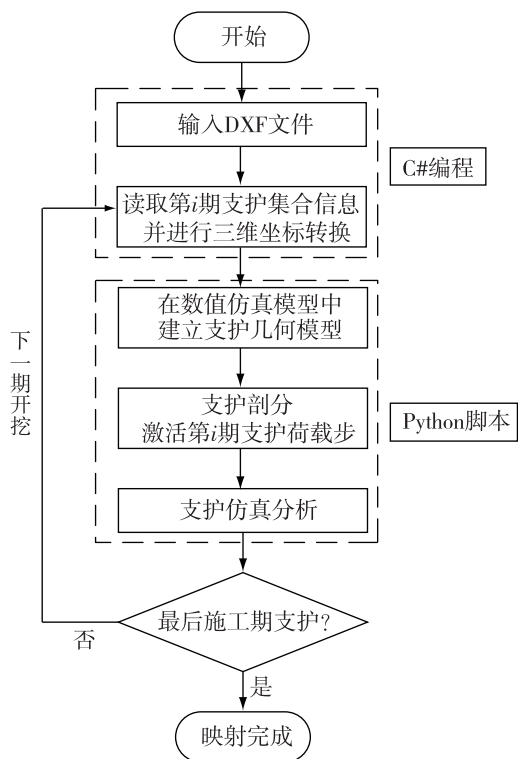


图4 支护实时映射更新流程

Fig. 4 Flowchart of real-time mapping of support

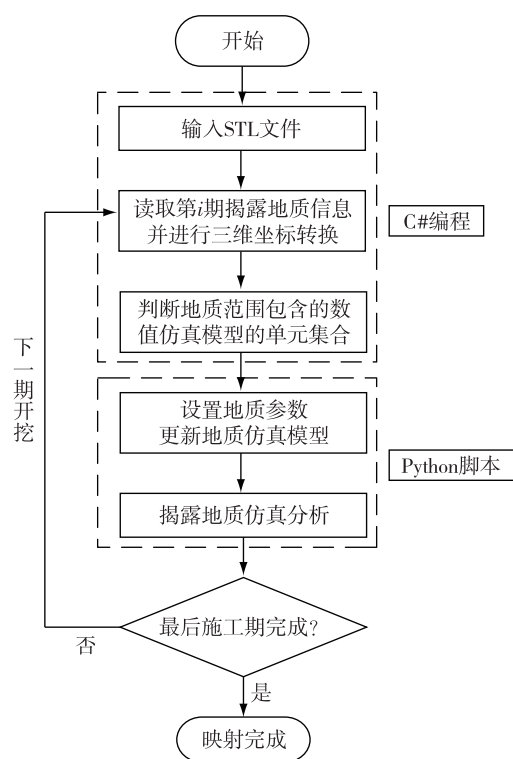


图5 新揭露地质实时映射更新流程

Fig. 5 Flowchart of mapping of newly outcropped geology

3 工程应用

3.1 工程简介

黄登水电站地下厂房洞室群由主厂房、主变室、尾水检修闸门室和尾水调压室四大洞室平行布置组成。厂区岩层主要为变质火山角砾岩、夹变质凝灰岩,微风化~新鲜、未卸荷,岩体较完整。以Ⅱ、Ⅲ类岩体为主,局部地区为Ⅳ类岩体,断层为Ⅴ类岩体。岩体物理力学参数建议值如表1所示。

3.2 监测点布置及选择

左岸地下厂房布置有5个监测断面,分别为厂纵0+000.000 m、0+025.770 m、0+070.000 m、0+105.000 m

以及0+154.000 m断面,编号为A-A、B-B、C-C、D-D以及E-E断面。监测断面及监测仪器布置见图6。由于主变室目前第三层刚开挖完成,监测仪器安装进度滞后,监测数据很小,不适合参与反演。因此本文选择的监测测点均位于主厂房,反演位移为相对于主厂房前期开挖完成后的增量位移。

3.3 计算网格模型及反演参数确定

黄登地下洞室群三维全尺度数值仿真模型包括主厂房、主变室、尾水检修闸门室、尾水调压室、母线洞、尾水支洞、压力管道等,如图7所示。模型采用四节点四面体单元,整体模型共有单元618 027个,节点104 583个,其中地下洞室群单元共311 587个,节点67 354个。

为简化反演过程,且考虑实际工程中未涉及松动圈的监测,以岩体的弹性模量作为主要反演参数,其他力学参数按照建议范围的中值取值。厂区主要分布Ⅱ、Ⅲ、Ⅳ类岩体,因此以这三类围岩的弹性模量进行实时动态反演。

3.4 模型实时动态更新

根据现场实际施工信息,地下洞室群一期开挖为主厂房Ⅰ层;二期开挖为尾闸室Ⅰ层;三期开挖包括主

表1 岩体分类及物理力学参数建议值

Table 1 Rock classification and recommended values of physical and mechanical parameters

围岩类别	弹性模量/ GPa	泊松比	内摩擦角/ (°)	黏聚力/ MPa
Ⅱ	12~18	0.23~0.25	50.2~54.5	1.2~1.3
Ⅲ	7~12	0.25~0.28	45.0~50.2	0.8~1.2
Ⅳ	3~7	0.28~0.30	38.7~45.0	0.5~1.0
Ⅴ	2~5	0.30~0.35	16.7~35.0	0.1~0.3

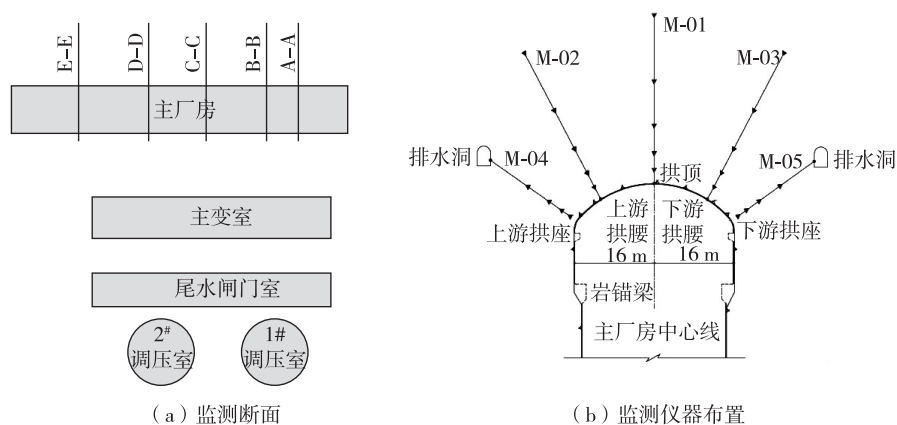


图6 监测断面和仪器布置示意图
Fig. 6 Layout of monitoring section and instruments

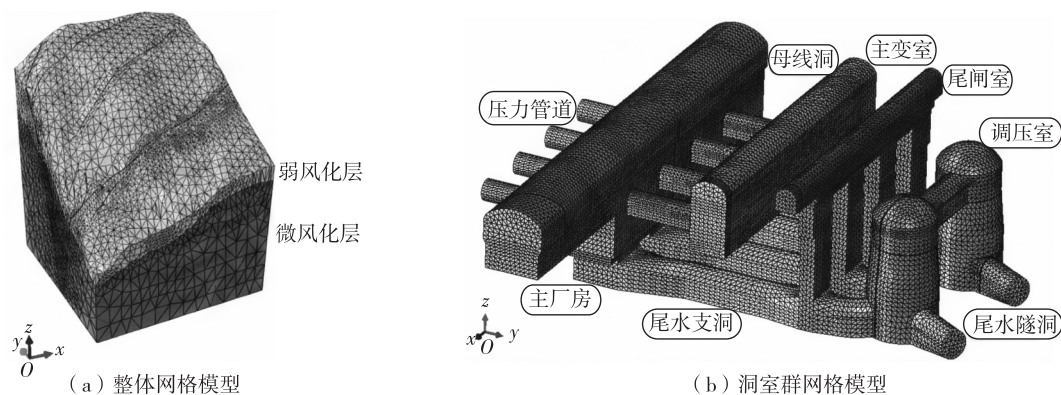


图7 三维整体有限元网格计算模型
Fig. 7 Three-dimensional finite element computing model

厂房Ⅱ层、主变室Ⅰ层及尾闸室Ⅱ层；四期开挖包括主厂房Ⅲ层、主变室Ⅱ层、尾闸室Ⅲ层、调压室Ⅰ层和压力管道Ⅰ层；五期开挖包括主厂房Ⅳ层、母线洞Ⅰ层、主变室Ⅲ层及尾水调压室Ⅱ层和Ⅲ层。厂区地质大部分为Ⅱ、Ⅲ类岩体，断层为Ⅴ类岩体，考虑了F230-1、F230-2、F9和F20等断层，主厂房开挖过程中揭露了位于上游厂纵0+112.000m~厂纵0+129.000m与下游厂纵0+111.000m~厂纵0+126.000m范围内的Ⅳ类凝灰条带岩体，利用C#编程识别STL文件中多面体的几何信息，采用向量法^[16]判断单元节点与凸多面体的包含关系，再利用Python脚本编程进行ABAQUS数值软件二次开发，建立新揭露的地质仿真模型。具体实际开挖、支护分层映射更新及新揭露的Ⅳ类岩体映射更新见图8。

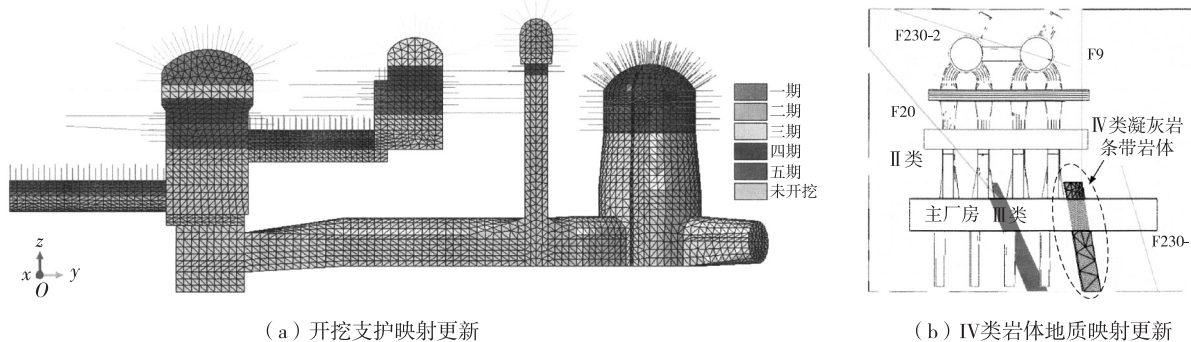


图8 数值模型动态映射更新
Fig. 8 Dynamic mapping of numerical model

3.5 洞室群实时动态反演分析

在建立能反映各期施工现场信息的实时数值仿真模型的基础上，通过参数建议取值范围，采用均匀设计

U28(28³)构造28组不同的参数组合,代入数值软件ABAQUS中进行计算。以监测点的实测位移作为输入样本,建立能反映围岩变形与力学参数非线性映射关系的神经网络模型以反演得到各施工期的围岩力学参数。

因用于反演的测点位移是相对于主厂房I层开挖完成后的增量位移,主厂房I层在第一期施工完成,主厂房II、III、IV层分别对应第三、四、五施工分期,因此,截至目前主要完成了3期的参数实时动态反演,分别为第三、四、五施工分期的参数反演。各期对应的参数反演结果见图9,反演结果均在建议的取值范围内,表明反演结果是合理的。通过各期反演结果对比表明:(a)第三期与后两期的反演结果差别较大,主要是因为第三期围岩监测位移较小,反演误差相对较大;(b)图9表示弹性模量 E 随开挖施工期的变化曲线,可以看出:由于围岩的开挖卸荷效应,不同类别围岩(II、III、IV类)力学参数 E 均会随着开挖施工期的进行而有所降低,且围岩类别越差,降低幅度也越大。在开挖至第五期时,相比于开挖第三期时II类围岩力学参数 E 降低百分比为8.70%,III类围岩力学参数 E 降低百分比为17.24%,而IV类围岩力学参数 E 降低百分比高达42.86%。

选取主厂房中监测值较大的监测点(A-A、D-D断面上游拱座处监测仪器M-05,见图6)随施工期的计算位移与实测位移进行对比分析(图10)。因考虑到监测仪器埋设时间不一,测点大部分为开挖后埋设,不同程度地存在监测位移损失,而采用数值分析软件计算模拟不会存在位移损失,因此图10中采用不同开挖期的位移增量值来进行计算位移与实测位移的对比分析,可得:计算位移与实测位移随施工期的曲线变化规律一致,吻合度较高。

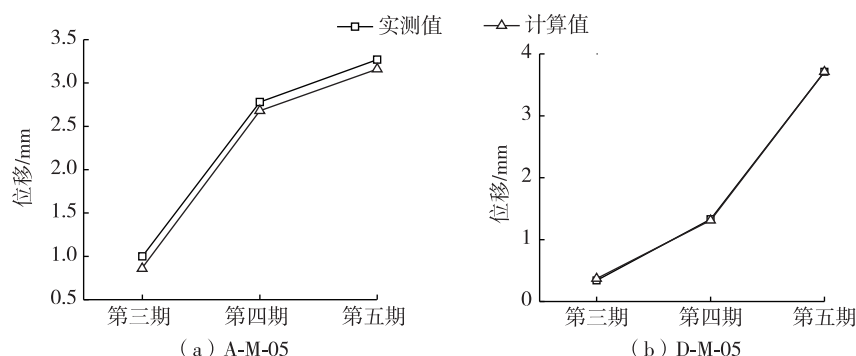


图10 位移实测值与计算值对比曲线

Fig. 10 Correlation curve of measured and calculated values

以第五期为例,将反演得到的围岩力学参数代入三维数值实时仿真模型中进行验证计算,对反演测点和验证测点的位移计算值^[17]和实测值进行对比分析(图11),两者吻合情况较好,平均相对误差仅为5.5%,表明反演结果具有可靠性。

4 结 论

a. 地下洞室群施工期围岩力学参数的反演应针对施工现场的复杂性、不可预测性等特点,充分考虑岩体开挖卸荷、支护加固及新地质出露等多因素的综合影响,以反映围岩力学行为动态变化与发展过程。

b. 采用均匀设计-神经网络反演方法,能充分考虑力学参数各种组合样本,具有高度的非线性处理和全局寻优能力。

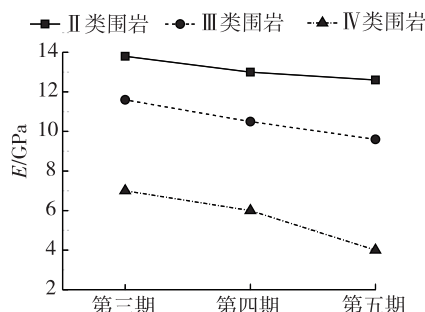


图9 弹性模量 E 随开挖施工期变化曲线

Fig. 9 Variation curve of elastic modulus E with excavating steps

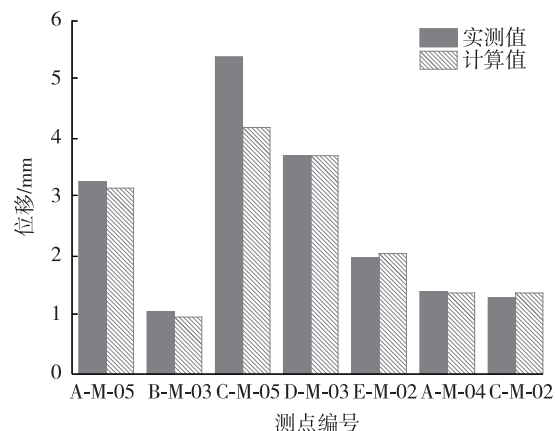


图11 第五期位移实测值与计算值对比柱状图

Fig. 11 Comparison bar graph of measured and calculated values in fifth period

c. 工程应用实例表明,黄登水电站地下洞室群第五期参数反演获得的围岩力学参数在允许范围内,测点实测位移与计算位移平均相对误差仅为5.5%,反演结果是可靠的。各期的计算值与监测值拟合情况较好,变形规律一致。第三期反演获得的参数值与第四、五期相差较大,主要是因为第三期监测位移较小,反演误差较大。

d. 现阶段支护映射只包括锚杆、锚索等杆状结构,对于灌浆、钢拱架等其他支护措施映射更新还需要进一步研究。

参考文献:

- [1] KAVANAGH K T, CLOUGH R W. Finite element application in the characterization of elastic solids[J]. Int J Solids Structures, 1972, 7: 11-23.
- [2] POLI R, KENNEDY J, BLACKWELL T. Particle swarm optimization[J]. Swarm Intelligence, 2007(1): 33-57.
- [3] SAKURAI S, TAKEUCHI K. Back analysis of measured displacement of tunnel[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 1983, 16(3): 173-180.
- [4] EBERHART R C, KENNEDY J. A new optimizer using particle swarm theory[C]//IEEE. Proceedings of the 6th International Symposium on Micro Machine and Human Science. Nagoya: IEEE, 1995: 39-43.
- [5] 赵洪波,冯夏庭. 位移反分析的进化支持向量机研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(10): 1618-1622. (ZHAO Hongbo, FENG Xiating. Study on genetic-support vector machine in displacement back analysis[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2003, 22(10): 1618-1622. (in Chinese))
- [6] 田明俊,周晶. 基于蚁群算法的土石坝土体参数反演[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(8): 1411-1416. (TIAN Mingjun, ZHOU Jing. Inversing soil mechanical parameters of embankment dam using ant colony algorithm[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(8): 1411-1416. (in Chinese))
- [7] 刘福深,刘耀儒,杨强,等. 基于改进遗传算法的拱坝位移反分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(23): 4341-4345. (LIU Fushen, LIU Yaoru, YANG Qiang, et al. Displacement back analysis of arch dams based on improved genetic algorithm[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(23): 4341-4345. (in Chinese))
- [8] 江权,冯夏庭,苏国韶,等. 基于松动圈-位移增量监测信息的高地应力下洞室群岩体力学参数的智能反分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(1): 2654-2662. (JIANG Quan, FENG Xiating, SU Guoshao, et al. Intelligent back analysis of rock mass parameter for large underground caverns under high earth stress based on edz and increment displacement[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26(1): 2654-2662. (in Chinese))
- [9] 漆祖芳,姜清辉,周创兵,等. 基于v-SVR和MVPSO算法的边坡位移反分析方法及其应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2013, 32(6): 1185-1196. (QI Zufang, JIANG Qinghui, ZHOU Chuangbing, et al. A new slope displacement back analysis method based on v-SVR and MVPSO algorithm its application[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2013, 32(6): 1185-1196. (in Chinese))
- [10] 郑江. 阳江核电厂排水隧洞围岩稳定与结构可靠度分析[D]. 天津: 天津大学, 2010.
- [11] 向天兵. 大型地下厂房施工期动态反馈优化设计方法研究[D]. 武汉: 中国科学院武汉岩土力学研究所, 2010.
- [12] 陈志坚,陈松,董学武,等. 岩土工程安全监测异常值属性的识别方法[J]. 水电自动化与大坝监测, 2004, 28(1): 40-44.
- [13] 撒文奇,张社荣,杜成波,等. 大型地下洞室群施工期结构安全与进度耦合实时仿真[J]. 四川大学学报(工程科学版), 2013, 45(1): 98-106. (SA Wenqi, ZHANG Sherong, DU Chengbo, et al. Coupling real-time simulation of structure safety and schedule of large-scale underground cavern group during the construction period[J]. Journal of Sichuan University (Engineering Science Edition), 2013, 45(1): 98-106. (in Chinese))
- [14] 张卡,张道俊,盛业华,等. 三维坐标转换的两种方法及其比较研究[J]. 数学的实践与认识, 2008, 38(23): 121-128. (ZHANG Ka, ZHANG Daojun, SHENG Yehua, et al. Research on two methods of three dimensional coordinate transformation and their comparison[J]. Mathematics In Practice And Theory, 2008, 38(23): 121-128. (in Chinese))
- [15] 刘传亮,陆建德. AutoCAD DXF文件格式与二次开发图形软件编程[J]. 微机发展, 2004, 14(9): 101-104. (LIU Chuanliang, LU Jiande. Analysis on AutoCAD DXF file format and the 2nd development graphics software programming[J]. Microcomputer Development, 2004, 14(9): 101-104. (in Chinese))
- [16] 石露,白冰,李小春. 判断点与多面体空间位置关系的一个新算法[C]//中国岩石力学与工程学会地下工程分组. 第十届全国岩土力学与工程学术大会论文集. 北京: 中国电力出版社, 2008: 295-298.
- [17] 孟永东,蔡征龙,徐卫亚,等. 边坡工程三维云图实时动态可视化方法[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 31(2): 3482-3490. (MENG Yongdong, CAI Zhenglong, XU Weiya, et al. A method for three-dimensional nephogram real-time dynamic visualization of safety monitoring data field in slope engineering[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012, 31(2): 3482-3490. (in Chinese))