

文章编号: 1000-7598-(2007) 03-0577-05

地下洞室岩体力学参数反演软件系统开发与应用

付成华¹, 秦卫星¹, 陈胜宏¹, 周洪波²

(1. 武汉大学 水资源与水电工程科学国家重点实验室, 武汉 430072; 2. 二滩水电开发有限责任公司, 成都 610021)

摘 要: 岩体力学参数对地下洞室的施工和设计是极其重要的, 通过位移反分析确定岩体参数的应用研究很多。为了提高参数反演的效率, 采用均匀设计理论设计不同的反演参数组合, 用有限元计算组建的样本集训练神经网络, 根据洞室开挖过程中实测位移反演地下洞室岩体力学参数。基于面向对象、自适应、可视化三大关键技术, 开发了地下洞室岩体力学参数反演有限元软件系统 BAFES。该软件可实现地下洞室力学参数反演分析、开挖预报过程的可视化, 将地下洞室岩体力学参数反演模式由“数据—有限元分析—数据”转变为“图形—有限元分析—图形”, 结合现场监控技术和工程稳定分析, 能及时地指导工程设计和施工。以某水电站地下厂房洞室群岩体力学参数反演为例, 说明了该软件的实用性。

关 键 词: 地下洞室; 岩体参数; 反演分析; 面向对象技术; 神经网络; 有限元分析

中图分类号: TP 311; TU 43

文献标识码: A

Development and application of rock-mass mechanical parameters back analysis software system for underground cavern

FU Cheng-hua¹, QIN Wei-xing¹, CHEN Sheng-hong¹, ZHOU Hong-bo²

(1. State Key Laboratory of Water Resources and Hydropower Engineering Science, Wuhan 430072, China;

2. Ertan Hydropower Development Company, Ltd., Chengdu 610021, China)

Abstract: Rock-mass parameters are very important to underground cavern design and construction; many application studies about calculating rock-mass parameters have been implemented by back analysis of displacements. In order to improve parameters back analysis, the uniformity design theory is introduced to design training swatch for neural networks, rock-mass mechanical parameters of underground cavern are obtained from measured displacement messages. The back analysis finite element software is implemented based on three key techniques: object-oriented, adaptability and visualization, which can be used as visualized back analysis and forecast tool. Rock-mass parameters back analysis is implemented by mean of “graph—finite element analysis—graph” instead of “data—finite element analysis—data”, it can instruct design and construction in time with monitoring technique and stabilization analysis. It is illustrated that this software is very useful by the example of the underground cavern of a hydropower project.

Key words: underground cavern; rock-mass parameter; back analysis; object-oriented technique; neural networks; finite element analysis

1 引 言

运用数值方法解决岩土工程实际问题, 岩体力学参数是非常重要的。计算参数的选取在很大程度上决定了计算结果的精确程度。岩土力学界对有关数值模拟中计算参数反演进行了大量的应用研究, 它以工程现场量测位移反演岩体力学参数, 为正演分析提供了符合实际的基本数据^[1-7]。反分析的方法很多, 近年来随着智能化分析方法的发展, 遗传算法和人工神经网络方法也被应用于参数反演分析

中^[7-9]。反分析的目的不仅仅在于对工程范围内岩体初始地应力和力学特性参数的估计, 更重要的是同现场监控技术及工程稳定性分析相结合, 对工程可靠度做出合理的评价和符合实际的预测, 并对施工中的工程进行支护参数和方案的反馈设计等, 使数值解能有效地应用于工程决策。

随着自适应有限元和面向对象可视化技术的发展, 将地下洞室岩体力学参数反演模式由“数据—有限元分析—数据”转变为“图形—有限元分析—图形”就显得很有必要了。

收稿日期: 2005-04-22

修改稿收到日期: 2005-09-02

基金项目: 国家自然科学基金 (No. 50239070, No. 50379039)。

作者简介: 付成华, 女, 1978 年生, 博士, 现从事地下工程系统研究。E-mail: fuchenghua@sina.com

本文利用面向对象技术编制有限元分析软件,并在前后处理部分采用自适应和可视化技术,既有利于软件的开发和维护,又极大地方便了用户,并减少了出错的可能性^[10-12]。面向对象技术可以提高有限元程序的模块化程度,使程序设计的思路更为清晰^[11]。自适应技术的应用可以减少前处理工作量和实现网格离散的客观控制,避免可能的人工重复性劳动^[13]。可视化技术可以解决大量数据的处理,将科学计算过程以及产生的数据转换为几何图形和图像信息。在屏幕上显示出来并进行交互处理,以达到观察、理解、操纵、控制和引导计算的目的^[12]。

作为研究的最新进展,本文介绍的系统主要完成了地下洞室岩体力学参数反演有限元软件 BAFES (Back Analysis Finite Element Software) 的开发,它既可以作为岩体参数反演分析软件独立使用,也可作为一个模块嵌入整个施工信息化系统。

2 有限元软件简介

BAFES 的开发继承了笔者所在课题组已开发的有限元软件 AFEAS^[10, 12, 13]。该软件基于三个关键技术:面向对象、自适应、可视化。

该软件系统采用 C++ 语言,基于 VC++6.0 集成环境的 MFC 编制,界面类似 Windows 的风格,自带绘图系统,能与 AutoCAD 和其他商业有限元软件实现无缝连接,使前处理的建模工作量大大减少,并降低了出错的可能性;后处理采用等值线和矢量显示应力和位移场,并能给出屈服区和局部化区域,具有形象直观的优点;有限元分析的核心部分采用以往完备的有限元分析程序,缩短了开发周期^[14]。该软件系统包括如下几个模块:

(1) 用户界面模块:弹出下拉菜单、对话框、工具条以及相关的 GUI 图符等。

(2) 前处理模块:包括实体建模、网格自动剖分、自动生成网格模型信息或与外部通用软件连接导入模型、网格信息等。

(3) 参数反演分析模块:包括设计不同的参数组合、有限元计算组建网络训练样本、训练网络,反演岩体力学参数以及预报分析等;

(4) 后处理模块:包括结果数据生成和计算结果的可视化。

3 岩体力学参数的反演分析

3.1 模型选择及学习算法

地下洞室多步开挖反演岩体力学参数问题的数学模型可用下式表达,其中预报位移 u'_i 为待反演

参数的函数, u_i 为实测位移, n 为测点个数。

$$\phi(x) = \sum_{i=1}^n [u'_i(x) - u_i]^2 \quad (1)$$

对参数反演这一优化问题可采用人工神经网络方法进行求解。神经网络是由大量神经元依一定结构互连而成,用来完成不同智能处理任务的一个大规模的复杂系统,具有自组织、自适应、自学习、联想记忆、高度容错、高度非线性映射能力和非线性动力特性。神经网络应用于参数反演不需要建立实际系统的反演格式,且适用于多变量系统,它是用梯度搜索技术,使所要求的目标函数达到最小^[9]。

3.2 网络训练样本设计

应用神经网络方法进行工程问题的反分析,关键在于要确定包含监测资料在内的网络模型的训练数据样本。若采用全组合的方法,样本个数则太多,盲目删除若干样本,则又可能不能反映网络空间的全局性。本文结合均匀设计原理设计不同的参数组合,确定有限元正分析方案来计算组建网络训练样本,可以保证训练效果的同时,大幅度地降低所需计算样本数量^[15]。

3.3 反演算法实现

对于岩体,其力学参数与位移之间具有非线性关系。利用 BP 神经网络,可以建立位移和参数多元输入与输出的非线性映射关系,映射关系一旦建立,即可依据实测位移得到岩体力学参数;然后利用反演所得参数进行有限元计算,即可对施工过程中洞室的变形和稳定进行预报。应用 BP 网络进行岩体力学参数反分析的步骤如下:

(1) 组织训练样本:根据经验或资料确定待反演参数的取值范围,每个待反演参数在其取值范围内均匀地取 N 个值,依据均匀试验设计理论设计成 N 组不同的参数组合,对每一组参数组合下的模型进行有限元计算,求得相应测点的位移。以计算的测点位移作为网络输入,对应的岩体力学参数组合作为网络输出,每组参数组合及相应的测点位移构成 BP 网络的一个样本,即可组建具有 N 个样本的训练样本集。

(2) 网络学习:用组建的样本集训练网络,直至达到设定的精度要求。

(3) 将工程施工中测点的实测位移输入训练好的网络,网络输出即为反演得到的岩体力学参数。

(4) 用反演所得的岩体力学参数进行有限元计算,预报洞室下一开挖步将产生的位移。预报位移和该开挖步实测位移进行比较,若满足精度要求,

则可取为岩体实际力学参数，继续预报以后的开挖过程；若不满足精度要求，调整参数取值范围，重复以上过程，直至预报满足精度要求为止。

4 软件系统 BAFES 的实现与应用

4.1 软件系统流程

地下洞室围岩体力学参数反演软件的流程设计如图 1 所示。该软件具有如下特点：

(1) 建立有限元模型的多样性。可以通过自带绘图系统或 AutoCAD 建立实体模型，自动离散生成有限元网格模型；也可以结合其他商业有限元分析软件（如 ANSYS）建模，直接导入有限元网格模型。

(2) 反演过程采用人工智能与有限元分析的结合，并应用了均匀设计理论。

(3) 计算过程简便快捷，具有很强的实用性。

(4) 软件稳健，易于维护与扩充。

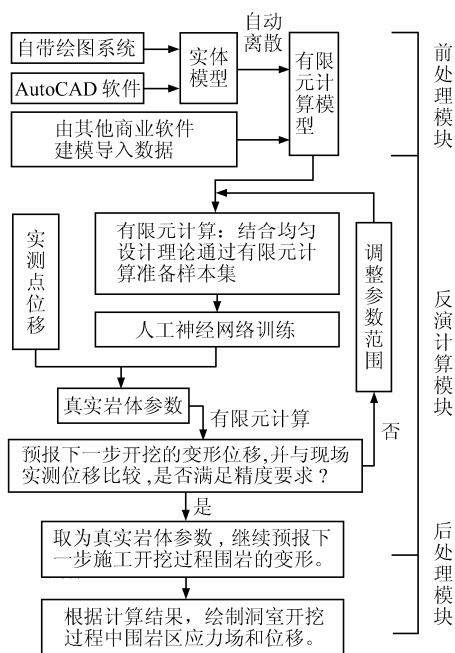


图 1 BAFES 系统流程图
Fig.1 BAFES system flow chart

4.2 应用示例

以某水电站地下厂房洞室围岩力学参数的反演为考题来说明该软件的实用性。洞室周围取 6 个测点，施工采用边开挖边锚固方式，测点布置和具体开挖步序如图 2 所示（图中 $KWn(n=1\sim 9)$ 代表开挖步）。岩体力学参数取值见表 1，这里仅考虑洞室周围岩体（即材料 4）力学参数的反演，待反演参

数的取值范围见表 2。根据表 1 中岩体力学参数取值，跟随开挖过程进行计算，将计算所得的测点铅直位移 U_y 视为现场实测位移，通过反演洞室周围岩体力学参数对软件系统进行考证。

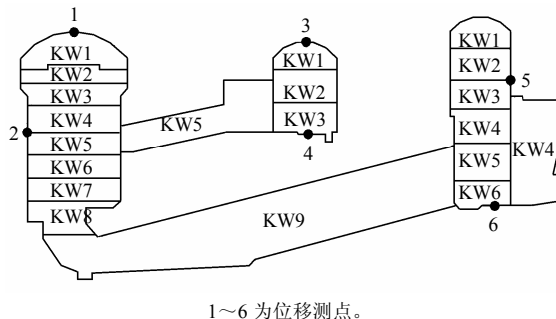


图 2 位移测点布置及施工开挖步序
Fig.2 Layout of displacement measuring points and excavation steps

表 1 岩体力学参数
Table 1 Mechanical parameters of rock mass

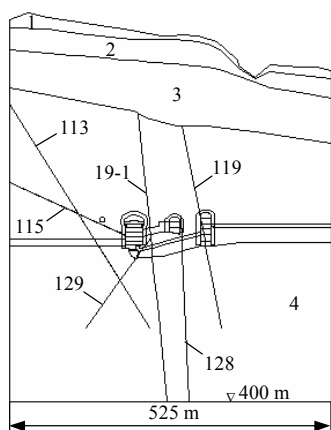
材料	1 (坡积堆积)	2 (IV+V 类岩体)	3 (III 类岩体)	4 (II+III 类岩体)
弹性模量 E / MPa	1 000	3 000	10 000	18 000
泊松比 μ	0.35	0.32	0.26	0.22
凝聚力 c / MPa	0.5	1.0	1.2	2.0
$\varphi / (^{\circ})$	38.66	40.03	47.73	53.47
重度 $\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$	25.0	26.2	27.1	28.4

表 2 反演参数的范围
Table 2 Variation ranges of various mechanical parameters in back analysis

力学参数	弹性模量 E / MPa	泊松比 μ	凝聚力 c / MPa	$\varphi / (^{\circ})$
取值范围	15 000~20 000	0.2~0.3	1.5~2.5	40~60

首先建立实体模型如图 3 所示，包括主厂房、主变室、尾闸室、引水洞、母线洞、尾水管和尾水隧洞等洞室群，考虑 f_{13} 、 f_{15} 、 f_{9-1} 、 f_{19} 、 f_{28} 和 f_{29} 共 6 条主要断层。将实体模型离散成有限元网格如图 4 所示（13 353 单元，13 440 节点）。然后，每个待反演参数在其取值范围内均匀地取 21 个值，查均匀设计表采用 $U_{21}(21^7)$ 将其设计成 21 组不同的参数组合，有限元计算组建样本集，采用 6—11—4 的 3 层网络对样本进行训练，进而由实测位移反演得岩体力学参数，并对洞室下一步开挖进行预报分析。跟随开挖过程对反演结果不断地进行调整，直至满足预报精度要求为止。这里第 2 步开挖预报精度已满足精度的要求，反演所得洞室周围岩体力学参数分别为 $E = 18\ 156 \text{ MPa}$ ， $\mu = 0.224$ ， $c =$

1.93 MPa, $\varphi = 53.84^\circ$, 反演预报位移结果见表 3, 测点位移的预报值与“实测值”吻合较好。图 5 显示了洞室全部开挖完成的位移场, 可视化效果形象直观。围岩变形指向临空面内, 洞室全部开挖完成, 主厂房和尾闸室上下游边墙变位相对较大, 但洞室整体上是稳定的。可见采用本文构建的系统对地下洞室进行反馈预报分析是有效的。



1—坡积堆积层, 2—IV+V 类岩体, 3—III 类岩体, 4—II+III 类岩体, 113~129—断层

图 3 实体模型
Fig.3 Entity model

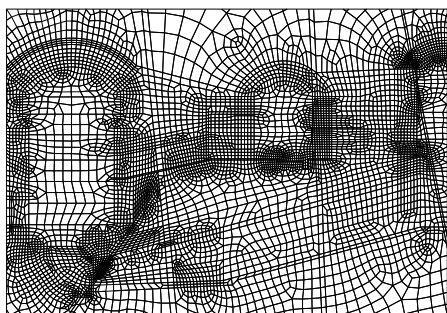


图 4 有限元局部网格
Fig.4 Finite element local mesh

表 3 开挖过程中实测位移与预报位移对照表(单位: mm)
Table 3 Comparison between measured and forecasted displacements during excavation (unit: mm)

测点	位移 U_y	第 1 步开挖	第 2 步开挖	第 3 步开挖
1	实测	-11.85	-11.52	-10.83
	预报	-11.79	-11.52	-10.87
2	实测	5.57	6.41	6.49
	预报	5.52	6.42	6.49
3	实测	-5.83	-4.84	-4.47
	预报	-5.82	-4.84	-4.47
4	实测	2.64	4.17	8.57
	预报	2.62	4.12	8.53
5	实测	2.45	-1.55	-1.25
	预报	2.44	-1.56	-1.26
6	实测	1.29	1.14	0.84
	预报	1.28	1.13	0.83

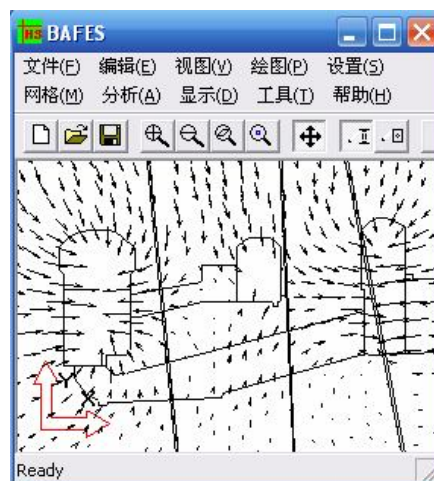


图 5 洞室全部开挖完成的位移场
Fig.5 Displacement field after all excavations

5 结 语

本文构建了一个地下洞室岩体力学参数反演分析软件体系, 具有如下优点:

(1) 自带绘图系统, 有利于文件格式的自我控制, 具有独立的版权; 也可以与当前一些应用广泛的大型商业有限元分析软件进行数据对接。

(2) 将面向对象、自适应、可视化技术应用于数值计算, 大大减少了工作量, 且形象直观。

(3) 将均匀设计和人工神经网络应用于参数反演, 提高了反演效率。

(4) 该系统能根据实测位移方便快捷地反演岩体力学参数, 并迅速反馈到下一施工步进行预报分析。

参 考 文 献

- [1] 冯紫良, 杨志法. 关于弹塑性问题位移反分析的若干研究[A]. 中国科学院地质研究所地质力学开放研究实验室 1989 年年报[C]. 北京: 地震出版社, 1990.
- [2] 郭怀志, 马启超, 薛玺成, 等. 岩体初始应力场的分析方法[J]. 岩土工程学报, 1983, 5(3): 64—67.
GUO Huai-zhi, MA Qi-chao, XUE Xi-cheng, et al. The analytical method of the initial stress field for rock masses[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 1983, 5(3): 64—67.
- [3] 林世胜, 中尾健儿. 反算法的进一步探讨[J]. 岩土工程学报, 1987, (3): 38—46.
LIN Shi-sheng, KENJI Na-ka. Going further into the back analysis[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 1987, (3): 38—46.
- [4] 杨林德. 岩土工程问题的反演理论与工程实践[M]. 北

- 京: 科学出版社, 1996.
- [5] 朱岳明, 刘望亭. 渗透系数反分析最优估计方法[J]. 岩土工程学报, 1991, 13(4): 71—76.
- ZHU Yue-ming, LIU Wang-ting. Classic estimate method about invert analysis of seepage parameters[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 1991, 13(4): 71—76.
- [6] Sakurai S, Takeuchi K. Back analysis of measured displacement of tunnels[J]. **Rock Mechanics and Rock Engineering**, 1983, 16(3): 173—180.
- [7] Chen S H, Chen S F, Shahrour I, et al. The feedback analysis of excavated rock slope[J]. **Rock Mechanics and Rock Engineering**, 2001, 34(1): 39—56.
- [8] 冯夏庭. 智能岩石力学导论[M]. 北京: 科学出版社, 2000.
- [9] 易达, 徐明毅, 陈胜宏, 等. 人工神经网络在岩体初始应力场反演中的应用[J]. 岩土力学, 2004, 25(6): 943—946.
- YI Da, XU Ming-yi, CHEN Sheng-hong, et al. Application of artificial neural network to back analysis of initial stress field of rock masses[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2004, 25(6): 943—946.
- [10] 秦卫星, 陈胜宏. 面向对象自适应渗流有限元分析软件的研究和实现[J]. 岩土力学, 2003, 24(3): 463—466.
- QIN Wei-xing, CHEN Sheng-hong. Investigation and realization of object-oriented adaptive FEM analysis software for seepage problems[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2003, 24(3): 463—466.
- [11] 项阳, 平扬, 葛修润. 面向对象有限元方法在岩土工程中的应用[J]. 岩土力学, 2000, 21(4): 346—349.
- XIANG Yang, PING Yang, GE Xiu-run. The application of object oriented FEM to geotechnical engineering [J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2000, 21(4): 346—349.
- [12] 吴俊, 陈胜宏. 面向对象的水工结构自适应有限元分析软件系统初步研究[J]. 武汉大学学报(工学版), 2001, 34(4): 6—10.
- WU Jun, CHEN Sheng-hong. Primary study on object-oriented adaptive finite element analysis software system for hydraulic structures[J]. **Engineering Journal of Wuhan University**, 2001, 34(4): 6—10.
- [13] 陈胜宏, 王劲松, 张君禄. 水工结构的弹粘塑性自适应有限元分析[J]. 水利学报, 1996, (2): 68—75.
- CHEN Sheng-hong, WANG Jin-song, ZHANG Jun-lu. Adaptive elasto-viscoplastic FEM analysis for hydraulic structures[J]. **Journal of Hydraulic Engineering**, 1996, (2): 68—75.
- [14] Qin W X, Chen S H. Developing integrated software of adaptive finite element analysis by object-oriented approach [A]. **Contribution of rock mechanics to the New Century, proceedings of the ISRM International symposium: Third Asian Rock Mechanics Symposium**[C]. Rotterdam: Mill Press, 2004. 217—222.
- [15] 方开泰. 均匀设计与均匀设计表[M]. 北京: 科学出版社, 1994.

京沪高速铁路今年开建, 2010 年基本建成

记者元月 10 日从 2007 年全国铁路工作会议上了解到, 铁道部今年将确保京沪高速铁路开工建设, 并在 2010 年基本建成。

铁道部部长刘志军说, 2007 年将坚持高标准、高质量, 全面推进大规模铁路建设。加快项目前期工作进度, 确保京沪高速铁路等重点工程顺利开工建设。

铁道部有关负责人表示, 今年将利用引进的先进技术平台, 加大动车组系列产品的研发力度, 年内基本完成时速 200 km 大编组卧车动车组的设计制造工作, 实现时速 300 km 动车组下线目标, 启动京沪、京广客运专线运营所需高速动车组项目。

经国务院批准立项的京沪高速铁路目前正在进行开工前的各项准备工作。这条设计时速 350 km、初期运营时速 300 km 的客运专线, 它所通过的地区, 纵贯北京、天津、上海三大直辖市和河北、山东、安徽、江苏四省, 连接环渤海和长江三角洲两大经济区, 是全国经济发展最活跃的地区, 也是全国客货运输最繁忙、增长潜力巨大的交通走廊。