

基于仿生计算智能的 地下工程反分析

——理论与应用

高 玮 刘泉声 著



科学出版社

www.sciencep.com

基于仿生计算智能的地下工程 反分析——理论与应用

高 玮 刘泉声 著

科 学 出 版 社

北 京

版权所有，侵权必究

举报电话：010-64030229；010-64034315；13501151303

内 容 简 介

本书全面系统地介绍了近年来在仿生计算智能地下工程反分析方面的研究成果。主要从围岩物性参数反分析和围岩模型辨识两个方面进行了介绍，针对不同反分析问题的难点，提出了大量有针对性的新型仿生算法，并基于有限元数值平台，创造性的提出了一系列新型的反分析技术，基本解决了传统反分析存在的一些难题。最后通过几个大型工程的应用证明了所提算法的可行性及有效性。

本书可供从事地下工程反分析、地下工程稳定性分析等的专业研究人员及从事地下工程设计施工的工程技术人员参考，也可以作为地下工程、隧道工程等专业的研究生教材。

图书在版编目（CIP）数据

基于仿生计算智能的地下工程反分析——理论与应用/高玮，刘泉声著.
—北京：科学出版社，2009
ISBN 978-7-03-024422-2

I. 基… II. ①高…②刘… III. 岩土力学 IV. TU4

中国版本图书馆 CIP 数据核字（2009）第 057951 号

责任编辑：王雨舸 / 责任校对：董艳辉
责任印制：彭 超 / 封面设计：苏 波

科学出版社 出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码：100717

<http://www.sciencep.com>

武汉市科利德印务有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2009 年 5 月第 一 版 开本：787×1092 1/16

2009 年 5 月第一次印刷 印张：10 3/4

印数：1—1 100

字数：250 000

定价：40.00 元

（如有印装质量问题，我社负责调换）

前 言

地下工程是迄今为止最复杂的工程问题之一,其处理的对象是性质、性态等极其复杂的天然岩土地质体,它是目前为止人们所知的最复杂的材料之一。而且,它所涉及的力学问题是一个多场(应力场、温度场、渗流场)、多相(气相、固相、液相)等影响下的复杂耦合问题。另外,在实际地下工程中,施工因素等也很重要。对如此复杂的工程问题,数值计算已成为了解决地下工程问题的有力工具。但是,数值计算的结果完全依赖于输入的参数及选定的模型,对于地下工程问题而言,由于其固有的数据有限的特征,使其“参数给不准”及“模型给不准”已成了数值计算应用的“瓶颈”问题。地下工程是一个自然化工程,属于一个开放的动态系统,其影响因素众多而复杂,且很多因素是未知或不确定的。对这种问题采用系统与功能方法解决是非常合适的,也是必需的。而施工中的变形量测与反分析是功能方法的成功应用,反馈思想是解决这种问题的非常重要的一种方法论和思维方式。不同于传统研究方法,反分析在借助现有研究方法的基础上,将工程岩土体作为一个系统进行研究,它集地下工程已有研究成果、优化技术及系统思想于一体,是一种综合性的研究方法。由于它的第一手资料来源于工程实际,因而,由它得到的结果有更大的可信度,其在实际地下工程中无疑会具有良好的应用前景。但传统的地下工程反分析研究在实际应用中存在很多问题,使得反分析研究“中看不中用”。为了解决这些问题,从研究思维变革的根本着手,进行学科的交叉与渗透,本书把新兴的仿生计算智能学科引入地下工程反分析领域,全面而系统地进行了反分析的仿生计算智能研究。试图从一个全新的角度入手,推动地下工程反分析的研究。

本书从围岩参数反分析及本构模型反分析两个角度入手,全面而系统的进行了仿生计算智能与地下工程反分析的融合研究,提出了大量新颖的反分析研究方法,最后,通过三个大型地下工程实例的应用证明了本书提出的主要反分析方法的工程实用性。其主要内容如下:

首先,把地下工程围岩物性参数反分析分为正反分析(优化反分析)及逆反分析两种。针对正反分析目标函数的复杂性,把仿生优化算法引入正反分析研究,提出了大量仿生优化反分析新算法。

(1) 基于前人的研究及对算法机理的分析,提出了一种新的快速收敛遗传算法反分析方法。

(2) 首次结合进化规划、人工免疫系统原理及有限元计算提出了一种新的免疫进化规划反分析方法。

(3) 借助传统蚁群算法的思想,把前述免疫进化规划的一些优点结合进来,提出了一种免疫连续蚁群算法。基于此新算法,提出了一种新型地下工程反分析算法。

(4) 把优化性能优良且设计简单的粒子群算法引入反分析研究,提出了一种基于粒

子群优化的新型反分析算法。

另外,从系统逆辨识的全新角度观察反分析研究,发展了一种基于神经网络的逆反分析新思路。基于此,提出了一种基于新型进化神经网络模型的地下工程逆反分析新方法,并在淮南矿区深部地下巷道工程中进行了工程验证应用研究。

其次,为了进行围岩模型辨识,把模型反分析分成类内辨识及类间辨识两种。基于围岩弹塑性本构模型的两种统一表达式,分别采用免疫进化规划及改进遗传算法提出了两种新的围岩本构模型类内辨识的新方法。通过理论研究,基于围岩弹黏塑性本构模型的统一表达式,采用改进遗传算法提出了一种进行围岩弹粘塑性本构模型类内辨识的新方法。基于分子生物学及现代进化论观点,创造性地提出了一种既模拟生物种间竞争又模拟生物种内竞争的生态竞争进化模型。基于此,提出了一种围岩本构模型类间识别并同时反演其物性参数的新算法。

最后,采用龙滩隧道工程、天生桥一级电站工程及某抽水蓄能电站工程三个大型地下工程实例进行了基于进化神经网络逆反分析的围岩参数及地应力场同时反分析研究、基于免疫进化规划的围岩参数反分析研究及基于生态竞争模型的围岩本构模型识别反分析研究。通过大型地下工程实例的应用研究,从工程实用的角度验证了本书反分析新方法的可行性及有效性。

本书内容主要来源于著者的博士学位论文、博士后出站报告及以后的一些研究成果,在此向著者的博士生导师重庆后勤工程学院郑颖人院士及博士后合作导师中国科学院武汉岩土力学研究所冯夏庭研究员表示衷心感谢。另外,书中的少量内容也引用和借鉴了一些反分析前辈学者的研究成果,在此也向他们表示谢意。

鉴于著者水平及认识的局限性,书中存在不妥乃至谬误之处在所难免,欢迎各同行批评指正,相互交流(著者联系方式:wgaowh@hotmail.com 或 wgaowh@163.com)。

目 录

1 绪论	(1)
1.1 反分析的不同描述法	(2)
1.1.1 数学描述法	(2)
1.1.2 力学描述法	(3)
1.1.3 信息描述法	(3)
1.1.4 系统描述法	(4)
1.2 地下工程反分析研究现状	(4)
1.2.1 参数反分析研究	(4)
1.2.2 模型反分析研究	(7)
1.3 反分析的仿生计算智能研究	(8)
1.3.1 基于人工神经网络的反分析研究	(8)
1.3.2 基于进化计算的反分析研究	(10)
1.3.3 其他仿生计算智能反分析研究	(10)
1.4 本书主要内容	(11)
参考文献	(12)
2 仿生计算智能原理及方法	(16)
2.1 人工神经网络(ANN)	(18)
2.1.1 多层前向神经网络	(19)
2.1.2 进化神经网络(ENN)	(21)
2.2 进化计算(EC)	(25)
2.2.1 遗传算法(GA)	(27)
2.2.2 进化规划(EP)	(32)
2.3 人工免疫算法	(35)
2.3.1 生物免疫系统	(35)
2.3.2 人工免疫算法	(37)
2.4 蚁群算法	(39)
2.4.1 蚁群算法的生物基础	(39)
2.4.2 蚁群优化算法的实现	(41)
2.5 粒子群优化算法	(43)
2.5.1 粒子群优化算法的提出	(43)
2.5.2 粒子群优化算法的实现	(44)

2.5.3 粒子群优化算法同进化算法的比较	(45)
2.5.4 粒子群优化算法的仿真实验	(46)
2.6 其他算法简介	(47)
2.6.1 模拟退火算法	(47)
2.6.2 混沌优化算法	(48)
2.6.3 DNA 分子计算	(49)
参考文献	(50)
3 地下工程围岩物性参数反分析研究	(54)
3.1 进化神经网络逆反分析	(54)
3.1.1 神经网络反分析的必要性	(54)
3.1.2 进化神经网络的训练样本获取	(55)
3.1.3 进化神经网络算法	(56)
3.1.4 逆反分析的进化神经网络研究	(60)
3.2 仿生优化反分析研究	(73)
3.2.1 仿生优化反分析的必要性	(73)
3.2.2 改进的快速遗传算法及其在反分析中的应用	(76)
3.2.3 进化规划及其在反分析中的应用	(83)
3.2.4 免疫连续蚁群算法反分析研究	(92)
3.2.5 粒子群优化反分析研究	(97)
3.3 基于仿生优化算法的岩体渗流参数反分析研究	(99)
3.3.1 岩体渗透系数反演的基本模型	(99)
3.3.2 岩体渗透系数反演的仿生算法实现	(100)
3.3.3 算例分析	(100)
参考文献	(104)
4 地下工程围岩本构模型反分析研究	(106)
4.1 围岩弹塑性本构模型类内辨识研究	(107)
4.2.1 屈服函数模型反分析研究 1	(107)
4.2.2 屈服函数模型反分析研究 2	(112)
4.2 围岩弹黏塑性本构模型类内辨识研究	(116)
4.2.1 理论研究	(116)
4.2.2 围岩弹黏塑性模型的反分析研究	(117)
4.2.3 工程实例	(118)
4.3 围岩本构模型类间辨识与力学参数同时反分析研究	(121)
4.3.1 模拟生态竞争模型的提出	(121)
4.3.2 围岩本构模型类间辨识及参数同时反演的模拟生态竞争模型	(122)

4.3.3 实例分析	(124)
4.4 地下工程围岩本构模型反分析的其他可能研究	(126)
4.4.1 岩土材料本构模型识别的神经网络研究	(126)
4.4.2 本构模型识别的遗传程序设计研究	(129)
参考文献	(130)
5 工程应用研究	(132)
5.1 地下工程围岩参数逆反分析的工程应用研究	(132)
5.1.1 龙滩隧道工程简介	(132)
5.1.2 龙滩隧道工程围岩监测情况	(134)
5.1.3 围岩力学性质试验情况	(138)
5.1.4 隧道区地应力场实测情况	(141)
5.1.5 围岩参数及地应力场逆反分析研究	(143)
5.2 地下工程围岩参数优化反分析的工程应用研究	(150)
5.2.1 天生桥一级电站工程现场监测试验概况	(150)
5.3.2 试验洞围岩参数的优化反分析	(154)
5.3 地下工程围岩本构模型辨识的工程应用研究	(156)
5.3.1 某抽水蓄能电站现场位移监测试验概况	(156)
5.3.2 试验洞围岩体本构模型的辨识	(157)
参考文献	(159)
6 结论及展望	(160)
6.1 结论	(160)
6.2 展望	(163)
参考文献	(164)

1

绪 论

地下工程是一门既古老又崭新的研究课目,说其古老是因为自从原始人穴居开始,人们就同地下工程结下了不解之缘,而说其崭新是因为作为一门独立的学科进行研究还仅仅有不足 50 年的历史。因此可以说,人们对地下工程的利用和研究在时间上存在很大滞后性。而且,综观地下工程学科的发展历史,也能发现同其他学科(如结构工程)相比地下工程的发展很缓慢。造成这种现象的根本原因是地下工程是迄今为止最复杂的工程问题之一,其根本在于地下工程所处理的对象是性质、性态等均极其复杂的天然岩土地质体。一般岩土材料均具有非线性、非连续、非均质及多相性等特点,是目前为止人们所知的最复杂的材料之一。尤其是天然岩体,由于其赋存地特殊性,它被各种地质构造(如断层、节理、层理及破碎带等)切割成既连续又不连续的形态,从而,一般均形成一个从松散体到弱面体再到连续体的材料序列,这一岩体序列比迄今人们所知的任何工程材料都复杂,它几乎处处都在变化着。而且,它所涉及的力学问题是一个多场(应力场、温度场、渗流场)、多相(气相、固相、液相)等影响下的复杂耦合问题。而且,对于天然岩体人们目前还没有一种办法可以对其进行全面了解。而且,在实际地下工程中,施工因素等也很重要。对如此复杂的问题,采用传统地解析等方法进行求解几乎不可能。随着有限元等数值方法地发展,数值计算已成为解决地下工程问题的有力工具^[1]。目前,在地下工程分析中使用的数值方法主要有:有限元、边界元、离散元及其各种耦合形式,而且,针对地下工程问题的实际情况对上述方法都作了不同程度地改进,使其更适合于地下工程问题。近年来,针对地下工程问题地特殊性,人们又提出了非连续变形分析(DDA)、拉格朗日元法(FLAC)、块体理论及流形元等新数值方法,更加巩固了其在解决地下工程问题中的地位。但是,数值计算的结果完全依赖于输入的参数及选定的模型,对于地下工程问题而言,其固有的数据有限的特征,使其“参数给不准”及“模型给不准”已成了数值计算应用的“瓶颈”问题。

孙钧院士指出^[2]，“不敢断言,在将来,岩石力学这种目前的研究方法是否会对这样一类问题的研究有新的突破,至少在今天还不可能将这类问题的研究提高到一个新的高度。”因而,要从根本上解决问题需要我们从方法论的高度来研究,找到更好地解决方法。由于地下工程是一个自然化工程,属于一个开放的动态系统,影响它的内部因素(结构及地应力、地下水及地温等状态变量)和环境因素(工程作用及地震、降水和气温等自然环境因素)是众多而复杂地,且其中很多因素是未知或不确定地。一般而言,对复杂的岩土体,其性能只能由外部量测得到。因此,对这种问题采用系统与功能方法解决是非常合适

地^[3],也是必须地。而施工中的变形量测与反分析是功能方法的成功应用,反馈思想是解决这种问题的非常重要的一种方法论和思维方式。因此,自从20世纪70年代反分析方法被提出以来,它在地下工程界得到了迅速发展,很快成了解决地下工程问题的有力工具。可以说,地下工程反分析的提出与研究是地下工程的一大突破,不同于传统研究方法,反分析在借助现有研究方法的基础上,将工程岩土体作为一个系统进行研究,它集地下工程已有研究成果、优化技术及系统思想于一体,是一种综合性的研究方法。由于它的第一手资料来源于工程实际,因而,由它得到的结果有更大的可信度,其在实际地下工程中无疑会具有良好的应用前景。

由于地下工程反分析研究一般应借助于传统的研究成果,因此,传统的地下工程反分析研究也被打下了传统研究方法的烙印,在实际应用中存在着这样那样的问题。这些问题的存在同传统学科的研究方法有密切的联系,要解决这些问题,我们必须从根本上寻找突破。黄润秋教授^[4]指出,岩石力学学科实现突破的关键在于学科的交叉与渗透,学科的交叉与渗透是所有应用科学领域科学发展的模式,是现代学科的主体特色之一。因此,把地下工程学科同其他学科进行交叉渗透是发展地下工程学科的必由之路。对此,孙钧院士^[2]曾做出了高屋建瓴的预言,“科学发展到今天,将工程技术走与智能科学相交叉的路子来发展,就有可能产生一个飞跃,进而从根本上改变目前解决工程问题的现状,这方面的前景是喜人的。”在美国岩石力学协会组织的岩石力学发展新方向的讨论会^[5]上,与会代表们指出,岩石力学的发展必须借助于新兴学科的发展,如量子力学、混沌学、神经网络、复杂性理论等,其中,神经网络是很有前途的一种。可见,走智能科学与地下工程相结合的路子,必将极大的推进地下工程学科的发展。在智能科学同地下工程相结合方面,我国学者做出了巨大的贡献,结合人工智能等思想,东北大学冯夏庭教授等提出并发展了智能岩石力学的学科新分支^[6-7],并在此方面进行了大量卓有成效的研究。近来,同济大学杨敏教授等^[8]又提出了岩土工程未来发展的新方向为智能岩土工程的思想。

智能科学是现代信息处理技术发展的产物,它本身又包含了一个庞大的学科群,其中,仿生计算智能是20世纪90年代初新近提出并发展的一个智能科学学科新分支。同传统的人工智能不同,它主要是通过模拟自然界生物等的行为,抽象提取出的解决复杂现实问题的计算方法,其主要依赖于数值运算来进行智能处理,此特点使它同地下工程等其他主要由计算进行处理的工程问题结合非常容易、方便。因此,在作为地下工程新学科分支的反分析研究中引入仿生计算智能方法是很自然地,我们相信仿生计算智能方法的引入必将极大的推动反分析的发展,从而,也必将带动整个地下工程学科的发展。

§ 1.1 反分析的不同描述法

1.1.1 数学描述法

实质上,地下工程反分析也是一个数学上的反演问题,因此,地下工程反分析从数学

上的解释^[9]可以表示如下:

设 D 为 n 维空间的连通开区域, 变量表示为 $x = (x_1, \dots, x_n)$, 其中, 某变元可表示时间, D 的边界记为 BD 。从而, 问题的描述形式为

$$L(u, Q) = f, \quad x \in D \quad (1-1)$$

$$M(u, Q) = g, \quad x \in BD \quad (1-2)$$

其中, Q 为状态变量; u, f, g 均为 x 的函数; u 为与介质特性有关的物理参量; L 为作用于 D 上的微分算子; M 为作用于边界上的微分算子; f 为作用条件, g 为边界作用条件。

u 的分量中含内因(如介质特性参数等)及外因(如外力作用等)。如 u, f, g 已知, 把 u, f, g 代入式(1-1)和式(1-2), 均存在某种意义上与物理背景符合的广义解, 此求解过程为正分析。相反, 如 u, f, g 并非全已知, 而在 D 的某个子集 D_1 上, 可实测出解 Q 的某些信息。那么, 如何从这些实测信息中求得 u, f, g 中的未知量, 则为一个反分析过程。

1.1.2 力学描述法

地下工程反分析也是一个岩土力学问题, 因此, 地下工程反分析也可以从力学上进行解释^[10], 其可以表示如下:

一般力学问题均可表示成数学偏微分方程形式, 对一个一般力学问题, 其微分方程可描述如下:

$$\text{求解问题:} \quad L(u) = f(x, t), \quad x \in \Omega, \quad t \in (0, \infty) \quad (1-3)$$

$$\text{初始条件:} \quad I(u) = \varphi(x), \quad x \in \Omega, \quad t = 0 \quad (1-4)$$

$$\text{边界条件:} \quad B(u) = \psi(x, t), \quad x \in \Gamma, \quad t \in (0, \infty) \quad (1-5)$$

$$\text{附加条件:} \quad A(u) = k(x, t), \quad x \in \Gamma, \quad t \in (0, \infty) \quad (1-6)$$

式中, φ, ψ, k 分别为初始条件、边界条件及附加条件; L, I, B, A 等为作用算子。

如对一个力学系统, 仅 u 未知, 而其余均已知, 则为正分析过程; 而如 u 可实测得到部分或全部, 而其他量中存在未知条件, 则为反分析过程。

1.1.3 信息描述法

反分析的目的是设法利用观测信息及经验等信息来辨识用于分析系统的其他一些未知信息, 因此, 反分析实质为一种信息传递的过程^[11]。

对任一物理系统, 均可用参数空间 V_x 来描述, 其中参数 $x = (m, n)$ 的信息状态表达了我们对于它在空间 V_x 中所处状态的一种认识, 其认识程度由其概率密度 $f(x)$ 来表达。当物理系统的参数空间 V_x 选定后, 可确定关于参数 x 的背景信息 $u(x) \geq 0$, 这样状态 $f(x)$ 所表达信息的信息量定义为熵,

$$I(x) = E \left[\log \frac{f(x)}{u(x)} \right] \quad (1-7)$$

它唯一地确定了空间 V_x 上的信息度量, 从而, 可推导出参数空间上的一个信息传递综合

关系,它称为反演定理。此定理表明了未知参数的三种已知信息(观测信息、理论预测信息、经验信息)的综合,给出了含更高信息量的后验信息。

后验信息=先验信息量(经验信息)+观测信息量+理论信息量

此式即为反分析的基本信息传递形式。

1.1.4 系统描述法

从系统论的角度来看,地下工程反分析的研究对象实质为一个复杂的巨系统,人们对其进行的各种施工活动,均可视为系统的输入,而人们能看到的位移、变形破坏等均可视为系统对输入反应的输出,此过程可用图 1-1 表达。

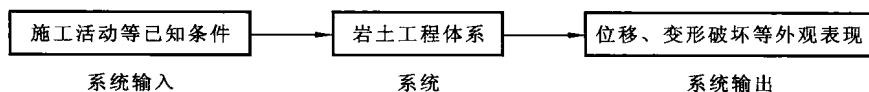


图 1-1 反分析的系统描述图

由于实际工程中外观表现,即位移、应力、应变等均可观测得到,而施工活动等因素也能直接人为控制,因此,实际上需求解的是系统模型、状态参数等,实质上为一个系统辨识问题。

研究表明^[12],地下工程系统可视为为一个分布参数系统,该系统可由一个一阶微分方程表示:

$$F(\varphi, p, z, t) \frac{\partial \varphi}{\partial t} + \sum_{i=1}^4 F_i(\varphi, p, z, t) \frac{\partial \varphi}{\partial z} = f(\varphi, p, \mu, \omega, z, t) \quad (1-8)$$

边界条件为 $b(\varphi, p, \omega_b, z, t) = 0$

初始条件为 $O(z, 0) = O^0(z)$

输出方程为 $y(t) = \int_{zh} g^x(\varphi, p, v, z, t)$

约束条件为 $h(\varphi, u, p, z, x) > 0$

式中, ω 为过程噪声, ω_b 为量测噪声, v 为边界噪声, p 为系统参数,约束条件综合了各参数有关的先验信息。

§ 1.2 地下工程反分析研究现状

地下工程反分析研究自从 20 世纪 70 年代提出以来,经过多年的发展已有了大量研究成果,成为一个相对成熟的学科分支,以下对地下工程反分析目前的研究情况进行简要综述。

1.2.1 参数反分析研究

参数反分析也称为参数辨识(parameters identification),是目前地下工程反分析研

究中最成熟、成果最多的一个分支。其实质为根据工程现场实测得到的信息(位移、应力、压力等)来反求工程所需的某种参数。地下工程参数反分析的主要内容包括以下方面:

- (1) 地层压力参数反分析。
- (2) 初始地应力场各分量的反分析。
- (3) 岩土体变形参数(弹性模量 E 、泊松比 μ 等)反分析。
- (4) 岩土体强度参数(内聚力 C 、内摩擦角 φ 等)反分析。
- (5) 岩土体中某种特殊结构几何尺寸的反分析。

参数反分析一般为在一个假定的较简单的本构模型下,进行各种参数的反推。由于它简单易行,且应用效果好,因此,目前已成为地下工程反分析研究的主流,到目前为止,其研究成果众多,并已在很多文献中有过详细的综述^[13-16]。这里仅对它们进行简单说明。

根据计算方法的不同,参数反分析方法可分成数值法反分析及解析法反分析两种,其中,数值法反分析又可分成逆解法、优化法及图谱法等几种。逆解法也称为逆法反分析,它直接利用量测位移求解由正方程反推得到的逆方程,从而得到待求参数。简单地说,逆解法即是正分析的逆过程。该法中的典型为日本的樱井春辅教授等提出的反求隧洞围岩地应力及围岩弹性模量的有限元逆解法程式^[17-18],其基本原理为利用矩阵求逆的过程进行反分析计算。此外,杨林德教授等也提出了边界元逆解法程式。反分析逆解法基于各点位移与弹性模量成反比,与荷载成正比的基本假设,仅适用于线弹性等简单的问题。但它也具有计算速度快,可一次解出所有待定参数的优点。优化法也称为直接反分析法,该法把参数反分析问题转换成一个目标函数寻优的问题。它直接利用正分析计算得到相应于位移量测点的计算位移值,并以计算值同实测值间的误差函数作为目标函数,对其进行优化操作,找到最佳参数值。可见,该法的计算效果直接同优化方法的选取有关,只要采用适当的优化方法,其反分析的结果则会得到很大改善。目前常用的优化方法有:单纯形法、复合形法、变量替换法、共轭梯度法、罚函数法及 Powell 法等^[19-21]。优化法反分析最大的特点是可用于线性及各类非线性问题的求解,具有极宽的适用范围,而且,其编程简单、应用方便。尤其是对于具有观测噪声的实际地下工程问题,优化法可把噪声影响减少到最低程度,是实际工程中应用较多的一种方法。但由于其所采用的优化方法的局限,使其计算结果依赖于待定参数的初始试探值,同时,其计算工作量较大,解的稳定性较差,尤其当待定参数较多时,其计算的困难明显加大。图谱法^[22]是由我国学者杨志法教授等提出的一种位移图解实用反分析方法。它以预先通过有限元计算得到的对应于各种不同弹性模量和初始地应力与位移的关系曲线,建立简便的图谱及图表。根据相似原理,由现场量测位移通过图谱及图表的图解反推初始地应力及弹性模量。该法最大的特点是使用简单,但它应用范围较小,仅适用于线弹性反分析。除上述数值法反分析外,采用解析方法进行反分析也有了一定发展^[23-24]。其中,圆形洞室围岩弹性、黏弹性反分析是解析法研究的重点,非圆形洞室的反分析主要采用复变函数方法得到解答。该法的优点为,由于采用解析计算因此反分析的速度较快,但它求解的问题必须能以解析形式表达,因此,它只适合于求解线弹性、线黏弹性、无支护隧洞的问题,并且无法考虑工程因素,也不能处理边界较复杂、非均匀地应力、非均质及非线性等问题。

上述反分析方法的共同特点是没有考虑量测信息的随机不确定性及岩土体本身的随机不确定性,而把它们均作为确定性量进行处理,这种反分析形式可称为确定性反分析。相反,如果考虑上述因素的随机不确定性,而采用概率论、数理统计及随机过程等处理上述因素而进行的反分析,则称为非确定性反分析^[25-26]。

由非确定性反分析的参数辨识准则函数(考虑测量误差及待估参数的统计性质,以参数误差最小或待输出量测值出现最大等作为目标函数),非确定性反分析有以下几种:

1) 极大似然法^[27-28]

该法用似然函数概念建立概率反分析的目标函数,对目标函数采用适当优化方法求解待估参数。由于该法目标函数中包含了位移量测误差特性及参数先验信息的误差特性,从而,结果较可靠。

2) Bayesian 广义参数法^[29-31]

该法基于数理统计学中的 Bayesian 原理,考虑了应力、变形的不确定性及岩体系统特性参数的先验信息建立目标函数,优化求解待估参数。该法考虑因素较多,更符合实际。而且,通过该法目标函数的变换,可推广到其他几种反分析方法上去,如 Bayesian 反分析、极大似然反分析、马尔可夫反分析、最小二乘反分析等。因而,该法为一种较普遍的广义反分析法,更符合岩土体的非确定性反分析。

3) 强壮性估计法^[12,27]

该法针对现场实测位移值离散性较强的特点,根据休伯的观点,由 Bhattacharya 信息不等式推导出了一个具有普遍意义的目标函数,选择适当优化方法求解目标函数即得待估参数。针对目标函数的反分析方法实质上并非完全的非确定性反分析,地下工程反分析的非确定性研究应该从岩土体的非确知性本质着手。目前这方面的研究主要有以下四方面的工作:

(1) Monte Carlo 有限元反分析^[32-33]。该法考虑到岩土工程体的各种反应为随机过程,采用 Monte Carlo 法对它们进行模拟,并结合有限元技术进行处理。由于采用了随机过程的相应处理方法,该法可给出参数的均值、方差及其分布类型,从而为位移反分析提供了一种更可靠的随机参数估计结果,是一种较好的随机反分析方法。但其缺点是,需抽取较大的样本数,计算工作量较大。

(2) 随机有限元反分析^[34-35]。由于岩土工程中量测信息为一随机数列,而且岩土体的物理模型本身又具有随机不确定性,考虑此种情况,该法把随机有限元技术同反分析结合起来,对岩土工程体进行随机位移反分析。由于随机有限元处理较为复杂,目前仅发展了随机有限元逆反分析法。它采用 Sakurai 的逆反分析思路,将逆反分析同随机有限元结合,得到了随机有限元的逆反分析过程。实际应用中又采用特征函数方法推导了参数的方差及其高阶矩。该法不但考虑了量测信息的随机性又考虑了物理模型的不确定性,无疑更符合实际情况,所得结果更合理。同时算例表明此法精度高、耗时省。

(3) 模糊有限元反分析^[36]。由于岩土体的性质复杂,地下工程问题中存在大量不确定、不精确的模糊问题,考虑到此种模糊性,该法将常规反分析同模糊有限元方法进行结合,提出了模糊反分析的思路。由于模糊有限元计算复杂,目前仅有模糊有限元逆反分析的研究,也就是把 Sakurai 的逆反分析法同模糊有限元结合。实际推导中同时考虑了有限元单元构造、输入位移量测信息及假设边界条件的模糊性,使结果更合理可靠。该法虽然是一种较好的非确定性反分析方法,但由于其中确定各模糊量的隶属函数时存在较大的主观性,而且目前只能处理弹性介质,因此仍需要进行深入的研究。

(4) 卡尔曼滤波反分析^[37-38],由于地下工程施工中岩土体系统的反应是一个动态的随机过程,其观测位移变形量同围岩体物性参数等的关系是随机的,而且前一时刻的变形量对后一时刻有一定影响。考虑到地下工程施工中的这种动态过程,该法将原属最优控制理论及信息理论范畴的卡尔曼滤波技术引入地下工程位移反分析中,把卡尔曼滤波器的滤波修正——不断产生信息量的功能同有限元的迭代计算、场域分析功能进行耦合,建立了可反映围岩体动态随机过程的卡尔曼滤波有限元反分析。该法初期为把岩土体反应作为线性的线性卡尔曼滤波反分析,后来发展了把岩土体作为非线性系统的扩张卡尔曼滤波器算法。算例证明它可一定程度上反映地下工程施工中的动态过程。但由于滤波器设计中需考虑较多统计计算的初值输入,这些输入尚存在一些主观因素,而且目前该法仅能反分析弹性介质的情况,并且也不能考虑围岩体系统本身的随机变化。

由于岩土体是一种复杂的地质材料,其本身就是一个不确定、不确知的系统,而且,人们对其的认识尚有一定局限性,加上量测信息不可避免地存在随机误差,因此,对这样的问题采用非确定性反分析显然有比确定性反分析更好的适用性。但是,目前各种非确定性反分析方法的自身局限性,使得它们“中看不中用”,即它们看起来理论完美,但实际应用中却困难重重,实际效果并不好。

1.2.2 模型反分析研究

模型反分析也称为模型识别(model identification),其根本任务就是由现场观测得到的信息反求描述该地段岩土体的材料本构模型。相对于参数反分析,模型反分析在地下工程反分析中一直未得到重视,其主要原因在于对模型反分析的必要性学术界存在争论。有人认为反分析应该是在简单模型下进行参数反分析,其结果仅在于对类似条件下的工程进行预测。也有人认为,反分析的本质应该是对物理模型及各种参数信息均进行反演,并宣称只有这样的反演才能称得上反分析^[39]。无论那种观点,可以想象,如果本构模型能更好地反映岩土体真实的力学行为,那么,无论是参数反分析还是工程预测均能得到更好的效果是必然无疑的。

目前,在模型反分析方面的研究工作较少,以下对一些主要成果进行简单介绍。

模型反分析方面的研究最早大概是见于 1977 年在一次学术讨论会上由 Jurna 等发表的一篇题为“岩石力学中的模型辨识问题”的论文^[2]。以后陆续进行了一些研究。

袁勇等^[40]从系统辨识的角度进行了岩土模型反分析研究。研究中把地下工程围岩

体作为一个系统进行辨识,以系统辨识理论为依据,从建立岩土介质分布参数系统的偏微分方程模型入手,综合运用系统论、最优化方法、决策论及模式识别技术,对岩土介质的物理本构模型进行了反演识别研究。

徐日庆等^[41]针对黏弹性模型的统一表达形式,得到各模型的等效弹性模量,并用优化技术反演得到具体模型的参数,并根据各模型的模糊隶属度进行模型的模糊识别。

薛琳^[42]曾进行了黏弹性本构模型的解析反演研究。研究中,根据实测位移,用最小二乘法确定不同时刻岩体的蠕变柔量,并确定其与各类流变岩体力学参数的非线性关系,最后,据此用解析方法进行模型的识别。

刘保国^[43]在其博士论文中给出了辨识围岩黏弹、黏塑性本构模型的方法。他首先在黏弹塑性理论的基础上,推导出弹-黏弹性本构模型及弹-黏性本构模型的一般通式,再根据一般系统辨识理论及优化技术进行模型的反演识别研究。

吉小明等^[44]则采用一种两步分析法进行本构模型的反演研究。第一步,对模型集合中的所有模型进行参数反演;第二步,用反演得到的参数根据系统辨识及统计推断理论,并考虑模型优选原则进行模型筛选,最终得到合适的模型。

杨海天等^[45]通过解析法建立了力边界条件或力与零位移边界条件下,黏弹性准静力位移与其本构方程间的显式表达式,并通过优化技术下的迭代形式,从二阶微分方程的本构模型出发,研究了黏弹性本构模型的反演识别问题。

综上所述,由于目前模型反演的研究尚不多,因此现有方法都或多或少存在一些问题,仅为初步研究。可见,在本构模型反分析方面尚有不少工作要做。

§ 1.3 反分析的仿生计算智能研究

由以上分析可以发现,尽管目前地下工程反分析的研究已经有了长足的发展,但是由于传统研究思路的局限性,传统反分析研究仍然存在很多问题需要解决。为了克服传统反分析的缺点,把智能科学和传统反分析结合起来,进行仿生计算智能反分析研究,是一个有前途的发展方向。目前国内外已有人在这方面进行了一些初步研究,以下对这些研究进行简单描述。

1.3.1 基于人工神经网络的反分析研究

基于神经网络的反分析研究包括两个方面。

一个方面为用神经网络进行参数识别。此方面的研究大概始于 20 世纪 80 年代。1996 年,梁艳春等^[46]在《模式识别与人工智能》上发表的论文《人工神经网络应用于地下洞室围岩参数识别的研究》提出了人工神经网络参数反演的典型方法。该法首先在参数取值范围内进行均匀取点(等间隔取点),并采用有限元等数值计算方法得到这些设定点处的位移信息,以参数值与其相应的位移值作为训练样本进行网络训练。最后,把现场量测位移值输入训练成功的网络,则可得到相应的参数值。所用神经网络为简单的三层 BP

网络,其结构由经验给定。冯夏庭等^[47]也提出了类似的位移反分析神经网络方法。龚朴等^[48]为了使BP网络能较好的实现全局优化,提出了一种新的S形函数,同样采用上述方法进行了高边坡多层介质物性参数反演识别研究。不同地是,其训练样本由正交试验得到。丁德馨^[49]也由正交试验得到网络样本,并采用简单的三层BP网络进行了参数反演研究。葛增杰等^[50]基于同样思想,采用三层改进快速BP网络对深基坑开挖过程中多层土体物性参数的识别问题进行了研究,工程实例证明反演参数效果良好。李守巨等^[51]也采用改进三层BP网络进行了混凝土大坝弹性参数识别研究。樊琨等^[52]采用改进四层BP网络对土石坝力学参数进行了反演识别研究。同上述方法不同,李立新等^[53]在进行地下工程黏弹性神经网络位移反分析时,网络的训练样本来自于已有黏弹性位移反分析资料的总结和整理,同样采用了三层BP网络,工程实例证明结果均满足工程要求。

另一方面是用神经网络进行岩土材料本构模型重建。岩土本构模型实质为一个描述应力-应变关系的映射系统,常规的数学建模法,采用一个显式的数学方程来表达此映射关系,但是,由于应力-应变关系的极端复杂性,数学描述均建立在一定的假设基础上,这样建立的模型带有一定的经验性。而神经网络模型是描述一个复杂映射关系的最简单、有效的方法,因此,采用神经网络模型进行岩土本构建模是一种非常有效的方法,它既可以考虑建模中的一些定量因素,也可以考虑一些定性或不确定的因素,而且,其建模仅依赖于实验结果,无需加入人为假设。目前,岩土本构模型的神经网络建模可分成两种方法:

一种方法可称为本构模型的神经网络逼近,考虑到神经网络的函数逼近能力,此种方法采用神经网络逼近实验得到的应力-应变关系曲线,如果得到了实验曲线的神经网络拟合模型,则此神经网络模型就代表了此种材料的本构关系,这是一种较简单的神经网络本构建模方法,它仅需要岩土的实验关系曲线。此种方法中较典型的为谭云亮等^[54]建立的大理岩神经网络逼近模型,他们考虑到BP网络收敛速度慢的特点,采用RBF网络进行建模。而李继良等^[55]的方法略有差异,他们首先把材料的本构模型写成一个通式,然后用神经网络逼近此通式,并采用此法建立了软岩的流变本构模型。

另一种方法可称为本构模型的神经网络描述,考虑到岩土的本构特性具有很强的路径依赖性,不同的加、卸载路径材料表现不同特性,因此,岩土本构模型不但应反映现时的应力-应变关系,而且,也应反映加载路径的影响。可见,神经网络逼近模型具有明显的缺点,对其进行改进,出现了神经网络描述模型,这种模型考虑了本构模型的路径依赖性。此方面主要是采用神经网络逼近实验室试验结果来完成本构模型建构。国外学者在此方面做的工作较多。美国Zaman等^[56]采用回归神经网络建立了无黏性土的神经网络本构模型。Ghaboussi等^[57]采用一种改进的自适应神经网络进行了砂土本构模型建构研究。由于传统方法很难建立反映非均匀材料试验(non-uniform material tests)结果的本构模型,美国Sidarta等^[58]发展了一个借助有限元的神经网络本构模型,它能很好地反映砂土的非均匀材料试验结果。美国学者Penumadu等^[59]总结了土的神经网络建模问题,并提出了砂土及黏土的神经网络本构模型。我国学者在此方面也做了一些工作^[60]。另外,代永新等^[61]给出了另一种岩土本构模型神经网络描述的方法,考虑到数值计算中,本构模