

智能岩石力学(1)——导论*

冯夏庭^{1,2} 刁心宏¹

(¹东北大学资源与土木工程学院 沈阳 110006) (²中国科学院武汉岩土力学研究所 武汉 430071)

1 智能岩石力学产生的背景

1.1 岩石工程面临的新形式

为了满足经济建设的需要,在21世纪,各种岩石工程,包括开挖结构(边坡、采场、硐室、隧道等)将朝着更大、更深方向上发展。例如,三峡工程永久性船闸为五级船闸,整个闸室段均为劈山开挖形成,开挖后形成长1 617 m的左线船闸北坡和右线船闸南坡两大高边坡,闸室段最大深度达174.5 m,开挖后北坡最大高度137.8 m,南坡最大高度157.8 m。中隔墩两侧高度一般50 m,最高处达70 m。永久性船闸高边坡作为深挖岩质边坡,在国内外罕见。日本的东京大阪隧道的断面积达到200 m²。在矿山,开采深度越来越大。南非金矿是世界上开采深度最大的国家,目前许多矿山的开采深度为3 000 m以下,计划将延伸到4 500~5 000 m。我国的许多露天矿已转为深凹开采,一些特大型矿山的设计最大开采深度达500~700 m。对于地下矿山,如红透山铜矿、狮子山铜矿的开采深达1 000 m以上。日益加大、加深的岩石工程给传统的岩石力学带来了严峻的挑战,同时也带来了岩石力学新的研究机遇,为我们进一步完善和发展岩石力学的理论和分析方法开辟了广阔的空间。

1.2 传统岩石力学面临的困难

岩石力学是一门既富理论内涵而又工程实践性很强的发展学科。数十年来,它沿用材料力学、弹塑粘性理论等传统学科为基础的确定性求解方法,并未解答到恰如人意的效果。这是因为:

1.2.1 岩石力学面对的问题是数据有限的问题

岩石力学面对的问题是数据有限的问题,不仅

是输入给模型的基本参数(例如,原岩应力、材料性能等)没有很好的定义,而且能对过程的演化提供一些反馈信息或者能校正模型的预测的测量并不多^[1]。在现阶段,由于“参数给不准”,我们未能获得足够准确的数据用于理论分析和数值模拟。“有限的数据”已成为岩石力学理论分析和数值模拟的一个“瓶颈”问题。

1.2.2 岩体及其结构的破坏机理不清楚

自然界中,岩体被各种构造形迹(如断层、节理、层理、破碎带等)切割成既连续又不连续的地质体。因切割程度的不同,形成松散体-弱面体-连续体的一个序列。这一岩体序列要比迄今为止人类熟知的任何工程材料都复杂,它几乎是到处都在变化着。因此,岩体的变形破坏特征会是极其复杂,而且多半是高度非线性的。岩体力学问题多具有病态结构,研究的对象也不断地变化,很难找到一种精确的算法进行求解。在目前的条件下,人类对岩体在复杂条件下的变形破坏机理的理解可以说是甚少的。正因为如此,许多岩石力学过程的数学描述要么是不存在的,要么是弱的,或者是不完全的。更糟的是,没有任何可以广泛接受的概念模型^[1]。所以,人们在理论分析和数值模拟岩体力学问题时,经常不得不在特定条件下进行假设,套用已有的理论和定理进行处理,致使分析结果常常与实际出入很大。如果认为输入参数、边界条件、几何方程、平衡方程是基本符合实际的,那么对计算结果影响很大的岩体本构模型的给定上仍带有相当程度的盲目性。对真实岩体本构模型的研究尚不完整,而且还涉及到对目前各种假定下得到的本构模型的选择上。与“有限的的数据”一样,“对岩体的破坏机理理解不清”也已成为岩石力学理论分析和数值模拟的另一个“瓶颈”问

1998年11月29日收到来稿。

* 国家自然科学基金(59604001)、教育部博士点基金(96014513)和中国科学院百人计划资助项目。

作者 冯夏庭 简介:男,34岁,博士,1986年毕业于东北大学采矿系采矿工程专业,现任教授,中国科学院“百人计划”入选者,中国科学院武汉岩土力学研究所博士生导师,主要从事智能岩石力学与岩石工程方面的研究与教学工作。

题。因此,要进一步提高计算的可靠性,就必须解决输入的参数和本构模型。

1.2.3 开挖结构是难度自增殖系统

一般地,开挖结构都是难度自增殖系统,即随时间演化,如果不及时处理,难度就会自增殖,而且对外部扰动更加敏感。这些难度自增殖系统在开挖深度的增加、多空间开挖系统、开挖尺寸的增大等情况下将表现更为复杂。这需要采用快速适时、自适应的方法进行决策。确定性求解方法似乎并不能做到这一点。

1.2.4 岩石力学与工程中存在大量的非确定性

岩体是一种不确定性系统,岩石力学与工程中既存在客观上的非确定性,也有主观上的非确定性。这种非确定性包括随机性、模型性、信息的不完全性和信息处理的不确切性。对于客观上的非确定性,主要有:载荷环境的初始应力场、介质地质环境的岩性参数、不同施工环境与条件,如岩土与结构材料及与以上的多种不利组合。由于客观上的这些不确定性,加上对岩体变形破坏机理认识不清,导致了岩石力学分析和模拟主观上的非确定性,如计算模型、计算参数的选取、计算的假定、计算简化、计算图式、信息描述、测量精度以及设计施工数据与信息不足等^[2]。

既然岩体工程问题都带有非确定性(随机性、模糊性、信息不完全性和未确知性等),对许多带全局性、综合性的问题都要求作出系统分析,这样一来在吸取已有知识、数据、经验、人脑思维的优点等重要方面,沿用确定性方法进行计算分析显而易见将有极大的局限性,甚至完全无能为力。

1.3 人的智能的作用

人具有很好的综合、判断能力,人能运用自己所积累的知识、经验进行综合分析的工程决策。正因为如此,目前的许多岩体工程问题,即使是在做了大量的计算和分析之后,专家在错综复杂的情况下判断,得出的假设等是一种人的智能行为,是专家拥有知识、经验和聪明才智的集中体现。专家在查看岩土工程时有时可以根据他所观察的现象和岩体暴露面的节理裂隙分布特征和状态等可以做出会不会塌方等类似的判断。这是一种形象思维过程,运用自己所积累的直觉经验知识,很快地做出决定。但是,这种直觉知识和专家经验是不易用传统的数学模型进行表达的。由于缺乏高效率的推理工具与系统的组织,而未在理论分析和数值模拟中得到充分的应用。如何在岩石力学理论分析和数值模拟中,充分利用专家的直觉经验知识、逻辑类比性知识等进行工程决策,如何充分利用专家的思维方式进行问题求解,如何充分发掘蕴涵于大量工程实例中的

知识等等,就是亟待解决的问题。另外,单个人的智能、知识与经验有时不可避免地带有片面性,专家群的集体智能可以克服个人智能的片面性。因此如何模拟专家群的集体智能以及他们之间的协同工作机制等也是一个十分重要的课题。人工智能等新兴学科的兴起为其提供了很好的科学方法。专家系统可以模拟人类专家抽象思维知识,神经网络可以模拟人类的形象思维经验和直觉推理知识。遗传算法和进化计算可以模拟自然选择和生物进化的机制。建立综合集成智能系统,可以充分发挥人的智能和人工智能的优越性,凭借计算机来综合处理专家群体的定性知识,以及大量专家提供的论断,经过综合的加工处理,从而上升到定量的认识。

1.4 思维方式的转变

从思维方式上看,传统的岩石力学分析方法,不论是理论分析还是数值方法主要是一种正向思维,即是从事物的必然性出发,根据试验建立模型、处理本构关系,在特定有限条件下求解。这反映在参数的研究上就是取样、设计试验、测定、结果分析;反映在模型的研究上就是根据已有的公理、定理和理论,再加上特定条件下的假设,通过推演得到的结果。正向分析需要数据充分、准确。不敢断言,在将来,这种传统的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一类问题的研究提高到一个新的高度^[2]。

70年代发展起来的位移反分析法是一种逆向思维。它以实测的位移值通过反演得出岩体力学参数和初始地应力,从而开辟了岩体力学参数和初始地应力研究的新途径。将反分析得到的参数作为在同一模型下正分析的输入参数,可以大大提高分析结果的可靠性,因而受到了工程界的普遍赞誉和欢迎。但参数反演并未解决如何辩识与确定合理的模型问题^[2]。

90年代以来,人们注意到了信息时代的新的思维方式应用于岩石力学行为模拟的优越性^[3~5],如系统思维主张从系统的角度、反馈思维主张从信息反馈的角度、全方位思维主张从全面信息的角度研究问题。

人脑思维有很多优点,如人脑能进行抽象思维、形象思维、感知思维和灵感思维等。形象思维主要是用典型化的方法进行概括,并用形象材料来思维。形象思维与神经机制的连接论相适应,可以高度并行处理。联想记忆、模式识别、图象加工等都是属于这个范畴。抽象思维是一种基于抽象概念的思维方式,通过符号信息处理进行思维,可以认为物理符号系统是抽象思维的基础。人的思维过程中,注意发挥重要的作用,注意思维活动有一定的方向和集

中,保证能及时反映客观事物及其变化,能很快地适应周围环境。人脑在数据含有噪声、信息不全等情况下能得出正确的决策也不乏其数。

传统思维方式在解决模型选择与参数输入上的局限性以及信息时代思维方式的转变,看来涉及到问题的实质。由此可见,解决问题的关键是要进行思维方式的转变。即放弃过去单一的正向思维,进而走向全方位的系统思维、不确定性思维与逆向思维,充分利用人脑思维固有的优点,进行抽象思维和形象思维的模拟,据已取得的参数进行分析和推理,并与计算相结合,实现从定性到定量的综合集成,这可能是解决问题的正确抉择。

2 智能岩石力学的一些新概念

智能岩石力学就是在综合考虑了上述各个方面而提出、并迅速发展起来的一门新的学科分支。它的主要做法是将人工智能、神经网络、遗传算法、进化计算、非确定性数学、非线性力学、系统科学、系统工程地质学等与岩石力学进行交叉、融合,在信息时代思维方式的指导下,从岩体问题的实际出发,系统而全方位地研究岩石力学智能化问题,建立蕴涵岩体力学内在本质的理论体系,包括专家系统、知识学习、智能化应力模拟和理论分析、基于工程实例的类比、各种分析方法的综合集成、经验加计算的集成、力学参数和模型的智能辨识等。

2.1 人的智能、人工智能与智能岩石力学

智能是人类个体有目的的行为、合理的思维以及有效的适应环境的综合性能力。人类个体的智能是一种综合性能力,具体讲,可以包括感知与认识客观事物、客观世界与自我的能力;通过学习取得经验、积累知识的能力;理解知识、运用知识和运用经验分析问题和解决问题的能力;联想、推理、判断、决策的能力;运用语言进行抽象、概括的能力;发现、发明、创造、创新的能力;实时地、迅速地、合理地应付复杂环境的能力;预测、洞察事物发展变化的能力等。正是因为人有这样的智能,使得在处理某些复杂的岩体力学问题时能得心应手。

人工智能(Artificial Intelligence)是相对人的自然智能而言,即人工的办法和技术,模仿、延伸和扩展人的智能,实现某些“机器思维”。

智能岩石力学是应用人工智能的思想,研究智能化的力学分析与计算模型,研制具有感知、推理学习、联想、决策等思维活动的计算机综合集成智能系统,解决人类专家才能处理的岩体力学问题。

2.2 机器学习

学习是获取知识、积累经验、改进性能、发现规

律、适应环境的过程。在智能岩石力学中,学习的基本机制是设法把在一种环境下是成功的力学分析、设计与工程表现行为转移到另一类似的新情况中去。机器学习的研究可以使机器自动获取岩体力学知识,赋予机器更多的智能。另一方面可以进一步揭示人类解决复杂岩体力学问题的思维规律和学习掌握奥秘,帮助岩石力学专家提高学习效率。

2.3 推理

推理是指从一个或几个已知的判断(前提)逻辑地推论出一个新的判断(结论)的思维形式,这是事物客观联系在意识中的反映。专家解决岩体力学问题就是利用所积累的知识,通过推理得出结论。定量模拟是计算机在岩石力学领域的常规应用。但专家常常在未获得详细的计算数据时,就能预测或解释一些岩体力学系统的行为。这可通过定性推理来解决。定性推理把岩石力学系统或岩石力学过程细分为子系统或子过程,对于每个子系统或子过程以及它们之间的相互作用或影响建立起结构描述,通过局部因果性的传播和行为合成,获得实际岩石力学系统的行为描述和功能描述。因此,定性、定量推理的结合将会对岩石力学科学决策产生重大影响。

针对不同的不确定性的起因,可以采用不同的理论和推理方法。如处理随机性的 Bayes 方法和证据理论、处理模糊性的可信度和模糊测度方法和处理分布式的并行推理方法等。

2.4 全局优化

全局优化是从系统的全局的观点出发,寻找问题最优解的过程。岩体力学中的许多问题离不开优化,如用优化方法进行位移反分析、工程设计方案的优化、边坡岩体安全度最小滑动面的识别、力学参数与模型辨识、BP 神经网络求解等。如果处理不当或初始值选择的不同,这些问题就容易陷入局部极小,即所求的解不是全局最优。

2.5 综合集成

综合集成是将解决复杂岩体力学问题的各种知识、分析方法等有机地综合在一起而形成具有特定功能的整体系统。集成智能指的是人的智能与人工智能相结合的“人-机”系统的智能。集成包括功能的集成和分析方法的集成,在功能的集成与分析方法的集成的基础上,实现“人-机”系统的集成智能。岩体力学专家的思维方式是多种多样的,专家经验也是多种多样的,模拟他们的智能也应是多种方法、多条路径的集成系统。如对于露天矿边坡稳定性的综合集成智能分析,分析功能的集成是指岩体力学参数估计、岩体质量分级分区、岩体结构类型和边坡可能发生的破坏模式的判别、边坡角设计、边坡稳定性分析与安全系数估计、边坡设计校准与信息

反馈融于一体，通过内外两个闭环(这些子任务之间的协同求解和利用现场监测的信息进行修正)的反复操作，最终完成边坡的最优设计和稳定性分析。分析方法的集成包括：(1) 判别岩体结构类型和边坡可能发生的破坏模式，采用遗传算法、神经网络与专家系统相结合的集成智能模型；(2) 对于边坡角设计，采用遗传算法、神经网络和专家系统的集成模型；(3) 边坡参数的修正，采用内外两个闭环操作；(4) 边坡稳定性分析，采用数值计算(有限元、边界元和离散元)、极限平衡分析(Sarma 法、Bishop 法、余推力法、优化法)、自动搜索安全度最小滑动面的遗传算法等。集成的系统是有相互作用、相互依存、相互制约的若干元件组成的有机整体，具有组织性、整体性、相对性和层次性。

2.6 螺旋、自适应的闭环解法

螺旋是指认识 修改 再认识的螺旋式掌握问题实质的求解过程。自适应是指求解过程能根据地质的变化、思维方式的变化、力学参数的变化以及分析模型的变化等而进行自适应的变化。既然开挖结构是难度自增殖系统，可采用螺旋、自适应的闭环解法，按阶段(勘探、规划、设计、施工)依螺旋式方式去综合集成各种不同的分析方法。一方面，将开挖结构考虑为开放复杂巨系统，系统地、全方位地模拟其实际特征；另一方面，尽可能多的使工程经验、人的智能和思维得到应用。

例如，边坡设计的过程中，可首先利用综合集成方法进行在边坡角估计、该边坡角的可能产生的破坏类型识别以及安全系数估计与稳定性分析。这几者之间的不协调性以及因工程阶段的转移(如由设计转为施工)使得地质条件和输入数据的修正而引起的设计方案修改，都可以螺旋式、自适应地进行(图 1)。采用的方法是利用生物的自然进化、优胜劣汰的思想，使得模型的输入与输出逐步相一致，以获得系统的全局最优解。

2.7 融合模型

融合模型是指将智能技术与传统的数学模型融合在一起而建立的模型。如将有限元法中的刚度矩阵用神经网络模型 NN () 代替，内部反力和切线刚度矩阵就可以改写为

$$I_j = [B]^T NN(j-1, j-1) d$$

$$[K_i] = [K_i]^e = [B]^T [NN()][B] d$$

这样的模型具有自学习和非线性处理与表达能力(避免了因找不到合适的数学模型而不得不采用简单模型代替而造成的误差)，这种能力是由神经网络决定

的，神经网络具有表达任何非线性问题的能力。

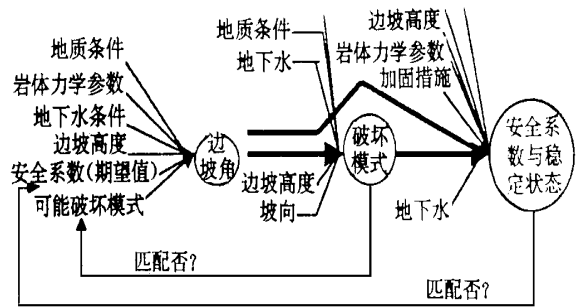


图 1 边坡设计的螺旋、自适应的闭环解法

Fig. 1 Adaptive evolution and closed-loop method on slope design

3 研究进展

人工智能最早出现在岩石力学文献上，是 H. H. Einstein 等人的文章。国内最早的是专家系统用于岩体分类；随后，针对解决不同的技术问题(如人防地下工程的兴废决策、隧道及地下结构岩溶灾害预报、采矿巷道围岩支护设计、结构性岩质边坡稳定性分析等)研制了相应的各种专家系统。嗣后，有关岩石力学在这方面的专著也陆续出版^[6~8]。张清教授还在国内率先将人工神经网络引入岩石力学与岩土工程，进行岩石力学行为的预测研究^[9]，近年来又拓展应用于岩石工程系统、岩石工程参数重要性分析、采掘巷道分类指标的聚类分析和巷道支护策略研究。90 年代中叶，张清教授还将实例类比系统方法引入岩石工程，为充分利用已建成的大量工程实例的成熟经验来指导今后类似的设计与施工。另外，神经网络应用于地下硐室破坏模式识别、岩石三性综合分级^[10]等方面也取得了一定的研究成果。

东北大学从 80 年代中期开始岩石力学智能化的研究，并注意到进行专家系统与神经网络的应用研究时不能孤立地探讨某单一问题，必须将人工智能、系统科学等新兴学科的思想融入岩石力学研究中去，进行综合集成智能系统和智能化的模型辨识和参数识别方法等研究，建立完整的理论体系。于是，在 1993 年提出了岩石力学智能化的研究思路^[11]。1995 年就复杂的采矿问题提出了智能采矿学的思想^[12]，在此基础上，进行拓宽与延伸，提出了“一个新的方向——智能岩石力学与岩石工程”^[13]。并就智能岩石力学的近期研究内容进行了较系统地讨论^[7, 8, 13, 14]。在智能岩石力学的基本理论方面，提出了有限数据的推广算法、面向岩石力学问题的专家系统模型、岩体本构模型的自适应识别方法、多种分析方法的综合集成模型等。在化学溶液侵蚀下

的不同复杂应力状态中的岩石微破裂特征的预测、岩石节理尺度效应及其剪切行为的预测等方面，提出了试验测试 信息分形 遗传 神经网络建模大尺度下的推广预测的智能思想。在矿压、地震震级、位移序列等非线性动力学系统行为的预测方面，提出了全局优化的非线性智能建模方法^[15, 16]。针对参数反演未解决模型的合理识别问题，还提出了智能化位移反分析法。在结合岩石工程研究方面，提出了一种适用于岩石工程设计的基于知识的闭环系统模型，比较系统地研究了采矿巷道围岩支护优化设计^[5, 7, 17]、高陡边坡稳定性分析与设计^[18]和岩爆风险估计的综合集成智能系统^[19, 20]。东北大学的博士生还就采场参数优化、复杂三维矿体造型、有限元带宽优化的智能化方法等进行了探讨。文[21]还就智能岩石力学发展过程中的几个主要问题进行了讨论。东北大学从 1993 年起就给采矿工程、工程力学等专业的硕士生和博士生开设了“智能岩石力学”课程，并培养出了 10 余名博士生和数名硕士生。

致谢 孙钧院士、张清教授、于学馥教授、王思敬院士、朱维申教授、葛修润院士、J. A. Hudson 教授、Sakurai 教授、宋振骐院士、云庆夏教授、刘怀恒教授、林韵梅教授、王泳嘉教授等许多老前辈给予了作者以极大的支持、鼓励和指导。在此表示深深的谢意。

参 考 文 献

- 1 Detournay E J, Pearson R P, Thiercelin M. Modeling rock mechanical processes in petroleum exploration and production. *ISRM News Journal*, 1993, 17 ~ 20
- 2 孙 钧. 世纪之交岩石力学研究的若干进展. 见: 陆培炎主编. 岩土力学数值分析与解析方法. 广州: 广东科技出版社, 1998, 1 ~ 15
- 3 于学馥. 信息时代岩土力学与采矿计算初步. 北京: 科学出版社, 1991
- 4 李世辉. 隧道围岩稳定性系统分析. 北京: 铁道工业出版社, 1991

- 5 冯夏庭. 巷道支护优化设计的智能系统研究[博士学位论文]. 沈阳: 东北工学院, 1991
- 6 李效甫. 回采巷道支护形式与参数合理选择专家系统. 北京: 煤炭工业出版社, 1993
- 7 冯夏庭, 林韵梅. 岩石力学与工程专家系统. 沈阳: 辽宁科技出版社, 1993
- 8 冯夏庭, 王泳嘉. 采矿工程智能系统. 北京: 冶金工业出版社, 1994
- 9 Zhang Q. The application of neural network to rock mechanics and rock engineering. *Int. J. of Rock Mech. Min. Sci.*, 1997, 34(1): 135 ~ 141
- 10 Feng Xiating. A neural network approach to comprehensive classification of rock stability, blastability and drillability. *International Journal of Surface Mining, Reclamation and Environment*, 1995, 9(2): 57 ~ 62
- 11 冯夏庭. 关于岩石力学智能化的研究思考. *岩石力学与工程学报*, 1994, 13(3): 205 ~ 208
- 12 冯夏庭, 王泳嘉. 采矿科学发展的新方向——智能采矿学. *科技导报*, 1995, (8): 20 ~ 22
- 13 Feng Xiating, Katsuyama K, Wang Yongjia, et al. A new direction-intelligent rock mechanics and rock engineering. *Int. J. of Rock Mech. Min. Sci.*, 1997, 34(1): 135 ~ 141
- 14 冯夏庭, 王泳嘉. 智能岩石力学及其内容. *工程地质学报*, 1997, (1): 21 ~ 27
- 15 Feng Xiating, Wang Yongjia, Yao Jianguo. A neural network model on realtime prediction of roof pressure in coal mines. *Int. J. of Rock Mech. Min. Sci.*, 1996, 33(6): 647 ~ 653
- 16 Feng Xiating, Seto M, Katsuyama K. Neural dynamic modeling on earthquake magnitude series. *International Geophysical Journal*, 1997, 128: 547 ~ 556
- 17 Lin Yunmei, Wang Lin, Feng Xiating. Closed intelligent system for optimal support design of underground excavations. *Int. J. of Rock Mech. Min. Sci.*, 1997, 34(3/4): 675 ~ 678
- 18 Feng Xiating, Katsuyama K, Wang Yongjia. Self-learning based and adaptive modeling on estimation of rock slope stability. *Journal of the Mining and Materials Processing Institute of Japan*, 1996, 112(12): 851 ~ 858
- 19 Feng Xiating, Webber S, Ozbay M U, et al. An expert system on assessing rockburst risks for South African deep gold mines. *Journal of Coal Science & Engineering(China)*, 1996, (2): 23 ~ 32
- 20 Feng Xiating. Rockburst prediction based on neural network. *Trans. Nonferrous Met. Soc. China*, 1994, 4(1): 9 ~ 14
- 21 冯夏庭, 王泳嘉. 智能岩石力学发展中的几个问题. *岩石力学与工程学报*, 1998, 17(6): 711 ~ 716

INTELLIGENT ROCK MECHANICS (1) ——INTRODUCTION

Feng Xiating^{1, 2} Diao Xinhong¹

^(1, 2) College of Resources and Civil Engineering, Northeastern University, Shenyang 110006)

⁽²⁾ Institute of Rock and Soil Mechanics, The Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071)

