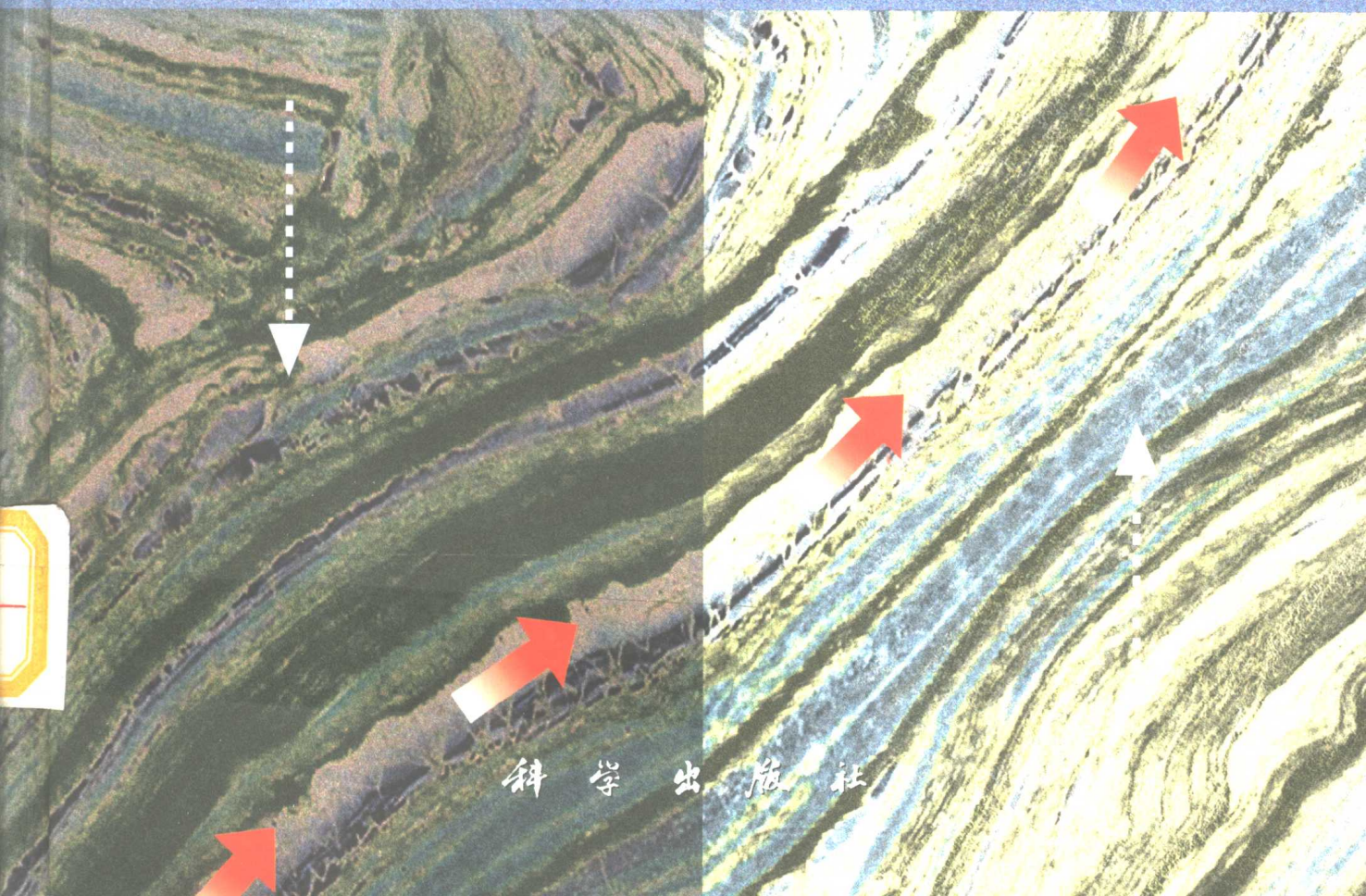


智能岩石力学导论

冯夏庭 著



智能岩石力学导论

冯夏庭 著



科学出版社

2000

内 容 简 介

智能岩石力学是智能科学、系统科学、非线性科学、不确定性科学与岩石力学交叉融合发展起来的新兴边缘分支学科。本书较为系统地介绍了近几年来这方面的研究成果,主要包括智能岩石力学的基本理论、岩石(体)力学参数的智能辨识(已知模型结构的智能识别方法、未知模型结构的智能识别方法、利用信息分形的神经网络重构方法、智能位移反分析方法、地应力的智能估计方法)、材料本构模型的自适应识别与智能有限元分析方法、岩石力学非线性动力学系统的智能辨识、化学环境侵蚀下的岩石破裂特性的声发射试验、时间分形分析与智能辨识、露天矿边坡稳定性综合集成智能分析、岩爆风险估计及其控制理论与方法等。

本书可供在建筑、铁道、公路、水利水电、矿山、市政建设、国防、人防以及核废料处理和地热开发等部门从事研究和设计工作的科技人员参考,也可用作岩土力学、岩土工程、减灾防灾与防护工程、环境工程、工程力学、采矿工程等专业研究生的教材。

图书在版编目(CIP)数据

智能岩石力学导论/冯夏庭著. -北京:科学出版社,2000
ISBN 7-03-008339-3

I. 智… II. 冯… III. 岩石力学-研究 N. TU45

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2000)第 04263 号

科学出版社 出版

北京东黄城根北街16号
邮政编码:100717

新蕾印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

2000年8月第 一 版 开本: 787×1092 1/16
2000年8月第一次印刷 印张: 21
印数: 1—1 200 字数: 476 000

定价: 38.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换〈新欣〉)

序

从传统固体力学所赋内涵的内容而言,人们习惯上都把岩土(石)力学视为它的一个分支。多年以来,随着岩土(石)工程建设的规模日益宏大而数量又极为众多,以及计算机科学的飞速进步和推广应用,岩土(石)力学学科得到了重大的发展,但与此同时,也暴露出不少困难和问题。现在看来,岩石力学中的许多问题如果仍然沿用经典的力学方法来对待和处理,往往存在着明显的不足,有的还似乎难以克服。其中的主要困难表现在:岩体及其工程力学行为以及它的变形和破坏机理在主、客观两方面的相当程度上都是随机的、模糊的,也就是不确定的;且更由于获取信息与数据量方面的限制和不完全、不充分,它又是不确知的。因而,对这方面问题的解决,今天的认识似是:尽管力学仍然是求解工程问题必要的和不可或缺的手段,但是它已决不能只是唯一的手段;在力学基础上如何进一步谋求完善与更新,则成了当务之急。这里,另辟蹊径的软科学方法应运而生,它在岩石力学与工程中的应用必将有璀璨可喜的前景。

众所周知,在众多的软科学门类中,人工智能方法近年来脱颖而出,不失为最具魅力和吸引力的有力工具之一。在由青年教授冯夏庭博士撰著的《智能岩石力学导论》一书中,作者注重岩体作为一种复杂多变地质体的客观实际,改用全新的研究思路,科学地运用系统科学、不确定数学与多种非线性解题方法的综合,在本书中对岩石力学的微观信息与宏观信息之间的自相似性、小尺度下的信息与大小尺度下的信息之间的自相似性、局部信息与整体信息之间的自相似性、历史的信息与未来的信息之间的自相似性开展研究,并在此基础上提出了由微观信息预测宏观信息、由宏观信息预测微观信息、由容易获得的局部信息预测整体信息、由小尺度下的信息预测大小尺度下的信息、由历史的信息预测未来的信息等的处理与决策方法。在对问题的建模过程中,根据模型的结构是否已知,采用了自学习方法获得对应的模型,进而结合具体的力学与工程问题,提出各种复杂环境下的岩体力学参数、本构模型、非线性动力学系统的智能识别以及大型岩石工程的综合集成智能分析方法。此外,书中还提出了许多新的学术观点和构思,如岩石力学信息的分形特征、岩石工程设计的闭环解法、岩石工程稳定性从定性上升到定量的综合集成分析等等,不一而足,其内涵涵盖面广而又具学术深度。粗读之余,确感它主题鲜明、新颖而极具特色。

相信本书的付梓,将是岩土力学界花蕊盛放的园地里的一株奇葩,它必将为岩石力学领域增添新的芬芳。我期待着本书的早日问世,并乐意为之序。

孙 钧

千禧年早春

写于上海同济大学

前 言

随着国民经济持续稳定的高速发展,各类岩土工程,如高速公路、铁道隧道、大型水利电力工程、高层建筑等,正以前所未有的速度在全国兴建。同时,随着世界能源工业战略的演化,国家战性能源储备,高放核废料永久性处置,城市有毒有害固体废弃物的储存,地热、城市地下空间及沿海海岸工程的开发与利用等,也将进入国家总体规划。世界上矿山与石油开采已进入超深度(采矿开采深度近 4000m,石油开采深度已达 10000m),类型日益增多、规模日益加大、难度日益增加的岩石工程给岩石力学研究带来了新的机遇,同时也带来了严峻的挑战。这些机遇与挑战迫切要求我们进一步完善和发展岩石力学的理论和分析方法,对岩体(土)介质在复杂的环境中的力学特性有更加深入的认识,以保证工程的安全、经济、合理。然而,由于岩土介质的复杂性,有许多带根本性的问题并没有得到很好的解决。

岩石力学是一门既赋理论内涵而又工程实践性很强的发展中学科。数十年来,它沿用材料力学、弹塑粘性理论等传统科学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,岩石力学面对的是“数据是有限”的问题,不仅输入给模型的基本参数(例如原岩应力、材料性能等)很难准确地给出,而且能对过程(特别是非线性过程)的演化提供一些反馈信息或者能校正模型的测量并不多(Detournay 等,1993);另一个原因是,对岩体的破坏机理理解不清。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,它几乎到处都在变化着,所涉及的力学问题是多场(应力场、温度场、渗流场)、多相(气、固、液)影响下的地质构造与工程结构相互作用的耦合问题。因此,工程岩体的变形破坏特征是极其复杂的,且多是高度非线性的。岩体力学问题多半是病态的、不确定性的、多尺度的,研究的对象也在不断地变化,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,没有任何可以被广泛接受的概念模型。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较大。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,那么在对计算结果影响较大的岩体本构模型的给定上却带有相当程度的盲目性。这是因为对真实岩体本构模型的研究尚不完善,何况还涉及到对目前各种假定下得到的本构模型的选择上。

“参数给不准”和“模型给不准”已成为岩石力学理论分析与数值模拟的“瓶颈”问题。“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一类问题的研究提高到一个新的高度”(孙钧,1998)。为此需要另辟蹊径。

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、系统科学等新兴学科的兴起,为我们提供了全新的思维方式和研究方法,为突破岩石力学的确定性研究方法提供了强有力的理论基础。当今的时代是知识经济时代,知识创新是民族的灵魂。在这种背景下,一个新的学科分支——智能岩石力学就应运而生了。

智能岩石力学是人工智能、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交叉、融合发展起来的。它扬弃了过去一贯的研究方法和研究思路,旨在探索出一条注重岩体的客观实际(复杂的地质体、材料的非线性、知识和信息的不确定性、数据有限、变形破坏机理难以理解清楚等)的全新的研究思路。作者在这方面的研究先后得到了国家自然科学基金、国家教委博士点基金、国家科技攻关项目、中国科学院“百人计划”项目、葡萄牙国家科学基金、日本工业技术基金、南非科学院基金等的资助。本书就是作者在系统地总结近年来相关研究成果的基础上写成的,并与作者先前的专著《岩石力学与工程专家系统》(辽宁科技出版社,1993)和《采矿工程智能系统》(冶金工业出版社,1994)构成一个比较完整的智能岩石工程力学理论框架。本书的书名之所以写成《智能岩石力学导论》,是为以后的深入研究和发 展留下空间。

全书共 11 章。第 1 章主要论述了智能岩石力学产生的背景、主要研究思路和内容、与常规岩石力学研究的区别和联系,以及若干新概念。

鉴于智能岩石力学是近年来兴起的智能科学、非线性科学、系统科学与岩石力学交叉发展起来的新的学科,它需要论述其智能科学的主要理论基础,包括神经网络理论、遗传算法、并行遗传算法、模拟退火算法、并行退火演化算法、分布式人工智能、知识发现与数据挖掘等(第 2 章)。

为解决岩石力学参数的准确识别问题,提出了岩石(体)力学参数的五种智能辨识方法,包括已知模型结构的智能识别方法、未知模型结构的智能识别方法、利用信息分形的神经网络重构方法、智能位移反分析方法和地应力的智能估计方法。前三种方法在第 3 章中做了详细论述,结合岩石工程中最关心的两个敏感问题即泥化夹层和节理进行了研究,给出了泥化夹层残余强度和岩石节理参数的估计结果,并与其它方法的结果进行了比较。第 4 章论述了智能位移反分析方法,包括基于进化搜索的智能位移反分析方法和进化神经网络位移反分析方法,给出了这种方法用于三峡永久船闸高边坡岩体力学参数反演的结果。地应力是岩石工程设计、稳定性分析、力学计算中不可缺少的参数,第 5 章结合声发射测试,尝试了利用 Kaiser 效应的地应力估计的智能方法,并给出了一些有益的结果。

在复杂地质、应力条件下,岩石(体)的变形破坏是非线性动态演化过程,在演化过程中伴随着能量的耗散与转移。第 6 章论述了岩体力学非线性动力学系统的智能辨识方法,包括常微分方程数值解与动力学模型识别、岩体力学非线性动力学系统的智能辨识,给出了卧龙寺新滑坡、新滩滑坡、三峡永久船闸高边坡和中隔墩岩体的变形演化的识别与预报,还讨论了煤矿顶板来压的自适应识别与灰色系统的预测。

为解决岩体本构模型的准确识别问题,第 7 章提出了一种新的材料本构模型的表达与学习方法,这是基于神经网络来实现的,在此基础上提出了智能有限元的分析方法。砂岩、复合材料本构模型的识别验证了模型和方法的合理性。

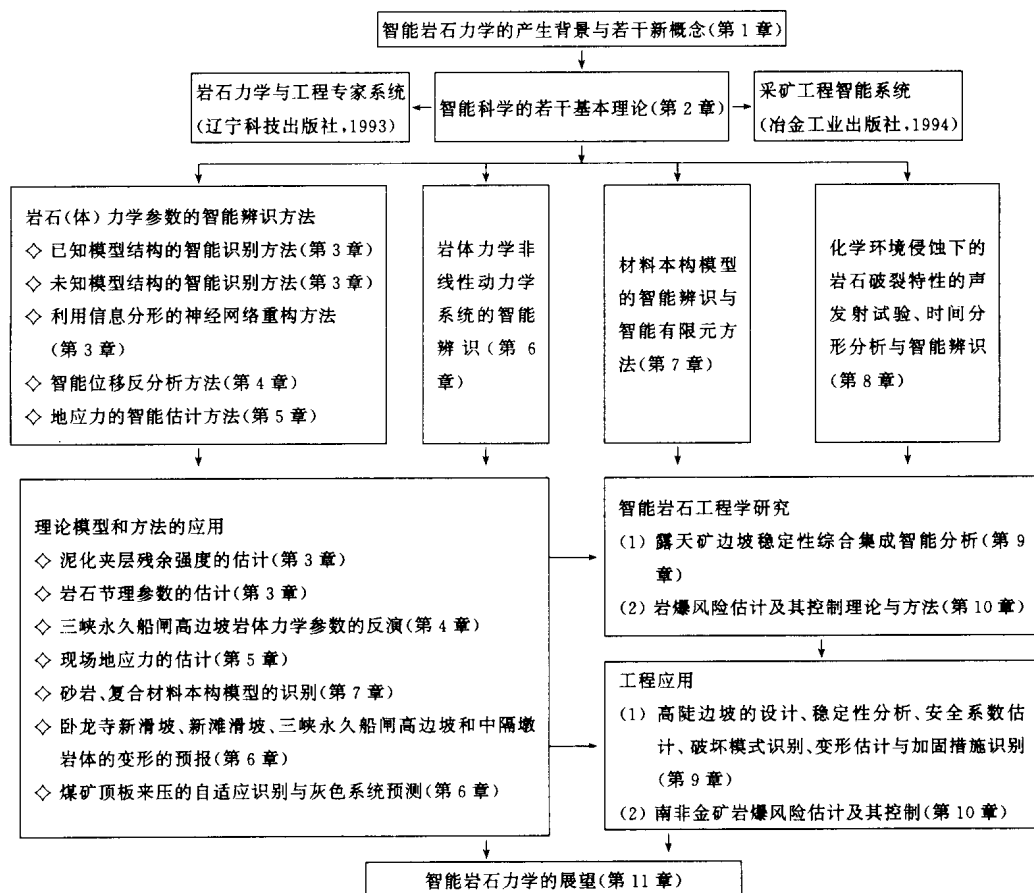
化学环境侵蚀下的岩石破裂特性的研究是核废料处理、环境岩土工程、石油开采等工程中的关键问题,是国际上的研究热点和难点。为此,第 8 章论述了不同应力(双抗扭、三

轴压缩、单轴压缩、三点弯曲等)条件下受不同化学溶液侵蚀的花岗岩、砂岩的破裂过程的声发射试验、时间分形分析与智能辨识的方法和结果,并与受水或空气侵蚀的结果进行了比较。

对于智能岩石工程学研究,本书给出了露天矿边坡稳定性综合集成智能分析(第9章)与深部开采诱发岩爆的智能估计(第10章)的理论和方法。第9章论述了边坡稳定性的集成智能理论模型,分析了影响边坡稳定性的主要因素,讨论了边坡岩体质量的分级方法,论述了边坡角的BP神经网络和进化神经网络估计、破坏模式专家系统识别、边坡稳定性的进化计算、神经网络、极大似然方法、模糊神经网络、基于粗糙集的神经网络的综合集成智能估计、边坡设计过程的进化的理论和方法,最后介绍了边坡稳定性的综合集成智能系统及其应用实例。

第10章首先给出了岩爆及其控制的有关认识,论述了岩爆和微震事件的空间与时间分形行为、岩爆烈度识别专家系统、岩爆发生可能性识别的神经网络模型、岩爆风险估计的综合集成智能系统,最后给出了该智能系统在南非多个深采矿山的应用情况。

智能岩石力学是刚刚兴起的分支学科,还有许多问题有待于深入研究和发。其发展方向之一是利用 Internet 网的强大功能,开展全球范围内的智能岩石力学与岩石工程协作研究。在开采工程力学方面,开展智能采矿控制工程研究将是一个新的方向,第11章论述了这方面的情况。下图勾画出了本书概貌。



智能岩石力学研究最早是在林韵梅教授、王泳嘉教授的精心指导和亲切关怀下提出与发展的,并先后得到了国内外许多知名岩石力学与工程专家特别是孙钧院士、张清教授、于学馥教授、王思敬院士、葛修润院士、白世伟教授、宋振骐院士、云庆夏教授、刘怀恒教授、徐小荷教授、朱维申教授,以及前国际岩石力学学会主席 S. Sakurai 教授、副主席 John Hudson 教授、国际岩石力学学会教育委员会委员 M. U. Ozbay 教授等的大力支持、鼓励和指导。丁恩保研究员、卢世宗教授、张思维教授级高级工程师、熊传治教授级高级工程师等提供了大量的边坡稳定性分析专家经验知识。书中介绍的南非深部金矿开采诱发岩爆的风险估计智能系统是与 M. U. Ozbay 教授、S. Webber 博士合作的成果,化学环境侵蚀下花岗岩破裂过程的声发射试验结果是作者与日本的赖户政宏博士和歌川学博士的合作成果。边坡稳定性分析的离散元与极限平衡计算实例是由博士生常春完成的,边坡稳定性估计的粗糙集和模糊神经网络是作者与何希勤博士和黎明博士的合作研究成果。基于智能位移反分析方法的三峡工程永久船闸高边坡岩体力学参数的反演是作者的博士生张治强完成的,复合材料本构模型的自适应识别是作者的博士生杨成祥完成的。本书中的部分内容从 1993 起就给东北大学的采矿工程、工程力学的博士生、硕士生进行了多次讲授,最近又给中国科学院武汉岩土力学研究所的博士生、硕士生以及中国力学学会岩土力学专业委员会岩土力学新计算方法讲习班的学员进行了讲授,在日本、南非、法国以及国内的几十个研究所(会)和大学进行了讲学,有关学者提出了一些宝贵的意见。在此一并表示特别的谢意。

作者还要感谢中国科学院武汉岩土力学研究所、东北大学资源与土木工程学院的有关领导,他们对智能岩石力学的研究在时间和环境方面给予了大力的支持;作者也要感谢这两个单位的研究小组,他们对有些研究内容提出了有益的讨论和协助。作者还要感谢夫人王丽娜副教授的大力支持和无私奉献,书中的许多观点是与她的帮助分不开的。

应该说,智能岩石力学是一门前沿性的学科,因此作者的研究带有探索和尝试的特点。由于学术水平的限制和时间上的紧迫,书中的不完善之处在所难免,恳切希望读者批评指正,共同探讨。

作 者

于 1999 年 12 月

目 录

序

前言

1 概 论	1
1.1 智能岩石力学产生的背景	1
1.1.1 岩石工程面临的新形式	1
1.1.2 以固体力学为基础发展起来的岩石力学面临的困难	1
1.1.3 人的智能的作用	6
1.1.4 思维方式的转变	6
1.1.5 探索中的新理论、新方法之一——智能岩石力学(IRM)	7
1.2 智能岩石力学的主要研究思路和内容	13
1.2.1 基本理论研究	13
1.2.2 基础技术研究	14
1.2.3 智能岩石工程学研究	14
1.3 智能岩石力学的若干新概念	15
1.3.1 人的智能、人工智能与智能岩石力学	15
1.3.2 机器学习	16
1.3.3 推理	16
1.3.4 全局优化	16
1.3.5 综合集成	17
1.3.6 螺旋进、自适应的闭环解法	17
1.3.7 融合模型	17
1.3.8 岩石力学全智能系统模型	18
1.3.9 开放系统	19
2 智能科学的若干基本理论	20
2.1 神经网络模型与学习算法	20
2.1.1 神经元的一般模型	21
2.1.2 人工神经网络的特点	22
2.1.3 神经网络的自学习方法	23
2.1.4 BP 神经网络	24
2.2 遗传算法	28
2.2.1 概述	28
2.2.2 遗传算法的基本原理	28
2.2.3 基本的遗传算法	29

2.2.4	遗传算法的主要步骤	30
2.2.5	遗传算法的过程描述	32
2.2.6	遗传算法的特点	41
2.3	并行遗传算法	43
2.4	模拟退火算法	45
2.5	并行退火演化算法	47
2.6	分布式人工智能	48
2.7	知识发现和数据挖掘	50
3	岩石力学参数非线性关系的智能识别	52
3.1	岩石力学参数的智能识别方法	52
3.1.1	已知模型结构的岩石力学参数的智能识别	52
3.1.2	未知模型结构的岩石力学参数的智能识别	53
3.1.3	利用基于信息分形的神经网络重构	57
3.2	泥化夹层残余强度关系的智能辨识	60
3.2.1	粘土类泥化夹层残余强度	60
3.2.2	页岩和泥灰岩类泥化夹层残余强度	61
3.3	岩石节理力学参数的非线性估计	63
3.3.1	岩石节理开度的尺度效应	63
3.3.2	岩石节理开度的神经网络估计模型	64
3.3.3	岩石节理粗糙度的分形估计	66
4	智能位移反演方法	71
4.1	引言	71
4.2	基于进化搜索的智能位移反演方法	72
4.3	进化-神经网络位移反演方法	72
4.3.1	待反演参数与岩体位移非线性映射关系的确定	72
4.3.2	位移反分析目标函数	73
4.3.3	基于进化-神经网络的位移反演	74
4.3.4	方法的验证	74
4.4	三峡工程永久船闸高边坡的岩体力学参数的智能反演	76
4.4.1	三峡工程永久船闸布置概况	76
4.4.2	船闸区工程地质概况	76
4.4.3	17-17剖面地质地形条件	77
4.4.4	17-17剖面岩体的初始地应力场概况	77
4.4.5	17-17剖面开挖分区及监测点布置概况	79
4.4.6	17-17剖面岩体力学参数的反演	81
5	地应力的智能估计	89
5.1	引言	89
5.2	声发射数据的获取	89

5.2.1	岩石试件的制作	89
5.2.2	加载方法	90
5.2.3	AE 测量方法	91
5.3	从声发射随应力演化的数据中识别 Kaiser 效应点(应力)的方法	94
5.3.1	神经网络模型的确定	94
5.3.2	训练和测试样本数据集	94
5.3.3	网络结构的自适应确定	97
5.3.4	Kaiser 效应点(应力)的识别	98
5.4	地应力的估计实例	99
5.4.1	垂直地应力分量的估计	99
5.4.2	主应力的估计	102
6	岩体力学非线性动力学系统的智能辨识	104
6.1	引言	104
6.2	常微分方程数值解与动力学模型识别	105
6.3	岩石力学非线性动力学系统的智能辨识	106
6.3.1	问题的表达	107
6.3.2	多层前馈神经网络性能分析	108
6.3.3	遗传-神经网络建模方法	109
6.3.4	岩石力学非线性动力学系统行为的外推预测	110
6.4	边坡位移非线性时间序列的智能建模	111
6.4.1	卧龙寺新滑坡的变形	111
6.4.2	新滩滑坡的变形	116
6.4.3	三峡永久船闸高边坡与中隔墩岩体的变形	117
6.5	煤矿顶板来压非线性序列的建模	125
6.5.1	矿压显现实时自适应识别的神经网络建模与预测	126
6.5.2	矿压显现自适应识别的灰色系统建模与预测	129
6.5.3	小结	135
7	材料非线性本构模型的自适应识别	136
7.1	引言	136
7.2	神经网络材料本构模型	138
7.2.1	材料本构模型的神经网络表达	138
7.2.2	神经网络材料本构模型的结构	139
7.3	智能有限元方法	140
7.4	神经网络材料本构模型的自适应识别方法	142
7.4.1	神经网络材料本构模型的直接学习方法	142
7.4.2	神经网络材料本构模型的逐步改进学习方法	143
7.5	砂岩本构关系的识别	148
7.6	复合材料本构模型的识别	151

7.6.1	本构模型进化学习算法的原理	151
7.6.2	实例分析	151
7.6.3	结论	155
8	化学环境侵蚀下的岩石破裂特性及其智能辨识	156
8.1	引言	156
8.2	双抗扭条件下的岩石微破裂过程特性及其智能辨识	161
8.2.1	岩石微破裂特征的声发射测试	161
8.2.2	岩石微破裂过程的时间分形特征	167
8.2.3	岩石微破裂演化过程特征的智能辨识	177
8.3	三点弯曲条件下的岩石微破裂过程特性	186
8.4	三轴压缩条件下的岩石微破裂过程特性及其智能辨识	188
8.4.1	三轴压缩条件下的岩石微破裂过程的声发射测试	188
8.4.2	三轴压缩条件下的岩石微破裂过程的时间分形特征	190
8.4.3	三轴压缩条件下的岩石微破裂演化过程特征的智能辨识	192
8.5	单轴应力条件下的岩石微破裂过程特性	197
9	露天矿边坡稳定性的综合集成智能分析	199
9.1	引言	199
9.2	边坡稳定性分析的一种集成智能理论模型	200
9.3	影响露天矿边坡稳定性的因素	202
9.3.1	地质因素	202
9.3.2	边坡工程与开采方面的因素	205
9.4	边坡岩体质量分类	209
9.4.1	SMR 分类方法	209
9.4.2	Barton 的 Q 系统法	210
9.5	边坡角的神经网络估计	214
9.5.1	边坡角非线性映射的建立	214
9.5.2	神经网络模型预测能力的检验	219
9.6	破坏模式的智能识别	220
9.6.1	知识获取	220
9.6.2	边坡稳定性分析知识的综合表示	221
9.6.3	推理网络	226
9.6.4	推理方向	229
9.6.5	深度优先搜索	230
9.6.6	不确定性推理方法	232
9.6.7	边坡破坏模式的识别实例	236
9.7	边坡稳定性的综合智能估计	236
9.7.1	引言	236
9.7.2	边坡稳定性的神经网络估计	237

9.7.3	确定最小圆弧滑动面的遗传算法	245
9.7.4	基于实例的边坡安全系数的极大似然估计	248
9.7.5	基于实例的边坡安全系数的遗传算法估计	249
9.7.6	边坡稳定性估计的基于粗糙集的神经网络建模方法	252
9.7.7	边坡稳定性估计的基于模糊神经网络建模方法	257
9.8	边坡设计的进化	263
9.9	边坡稳定性分析综合集成智能系统	265
9.9.1	边坡稳定性的综合集成智能分析	265
9.9.2	边坡稳定性分析综合集成智能系统的结构	270
9.9.3	综合集成智能系统用户界面设计	271
9.10	工程应用	275
9.10.1	实例 I	275
9.10.2	实例 II	275
10	深部开采诱发的岩爆的智能风险估计	278
10.1	引言	278
10.2	关于岩爆及其控制措施的认识	279
10.2.1	岩爆机理的理解	279
10.2.2	岩爆的现场监测	280
10.2.3	岩爆控制的主要措施	280
10.3	岩爆与矿震事件的分形行为	282
10.3.1	矿震事件分布的空间分形分析	282
10.3.2	矿震事件分布的时间分形分析	282
10.3.3	矿震事件的尺寸分形分析	285
10.4	岩爆风险估计专家系统	286
10.5	岩爆发生可能性识别的神经网络模型	290
10.5.1	碳化(Carbon leader)采场岩爆风险估计神经网络模型	290
10.5.2	VCR 采场岩爆风险估计神经网络模型	294
10.5.3	隧道岩爆风险估计神经网络模型	294
10.6	防治措施识别	295
10.6.1	巷道岩爆防治措施的识别	295
10.6.2	采场的岩爆防治措施	295
10.7	岩爆风险估计的综合集成智能系统	295
10.7.1	综合集成智能系统模型	295
10.7.2	综合集成智能系统软件设计	297
10.8	综合集成智能系统的应用	300
10.8.1	应用实例 1	300
10.8.2	应用实例 2	302
10.8.3	应用实例 3	302

10.8.4 应用实例 4	302
10.8.5 应用实例 5	305
11 结语	306
11.1 Internet	306
11.2 Internet 的应用	306
11.3 全球范围内的协作是发展智能岩石力学的有效途径	309
11.3.1 利用 Internet-神经网络进行示例转换模拟	309
11.3.2 在 Internet 上进行智能岩石力学协作研究	310
11.4 智能采矿控制工程力学	312
参考文献	313

1 概 论

1.1 智能岩石力学产生的背景

1.1.1 岩石工程面临的新形式

随着国民经济持续稳定的高速发展,各类岩土工程如高速公路、铁道隧道、大型水利电力工程、高层建筑等,正以前所未有的速度在全国兴建。同时,随着世界能源工业战略的演化,国家战略性能源储备、高放核废料永久性处置、城市有毒有害的固体废弃物的储存、地热和城市地下空间及沿海海岸工程的开发与利用,也将列入国家总体规划。例如,三峡工程永久性船闸为五级船闸,整个闸室段均在山体内开挖形成,开挖后形成长 1617m 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 174.5m,开挖后北坡最大高度 137.8m,南坡最大高度 157.8m,中隔墩两侧坡高一般为 50m,最高处达 70m,永久性船闸高边坡作为深挖岩质边坡,在国内外罕见。石油开采深度已达 10000m 以上。在矿山,南非金矿在世界上开采深度最大,目前许多矿山开采深度为 3000m 以下,计划将延伸到 4500~5000m。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 500~700m。对于地下矿山,如红透山铜矿、狮子山铜矿的开采深度达 1000m 以上。日益增加、加大、加深的岩石工程给岩石力学研究带来了新的机遇,同时也带来了严峻的挑战。这些机遇与挑战迫切要求我们进一步完善和发展岩石力学的理论和分析方法,使岩体(土)介质在复杂的环境中的力学特性得到更加深入的认识,以保证工程的安全、经济、合理。然而,由于岩土介质的复杂性,有许多根本性的问题并没有得到解决。

1.1.2 以固体力学为基础发展起来的岩石力学面临的困难

岩石力学是一门既赋理论内涵而又工程实践性很强的发展中学科。数十年来,它沿用材料力学、弹塑粘性理论等传统科学为基础的确定性求解方法,并未解答到恰如人意的效果。这是因为以下问题的存在。

1. 岩石力学面对的是“数据是有限”的问题

岩石力学面对的问题是数据是有限的,不仅是输入给模型的基本参数(例如原岩应力、材料性能等)很难准确地获取,而且能对过程的演化提供一些重要的反馈信息或者能校正模型的测量是很少的(Detournay 等,1993)。在现阶段,由于“参数给不准”,我们未能获得足够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。

2. 许多岩石力学与工程问题的破坏机理是不清楚的

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,随切割程度的不同,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,它几乎到处都在变化着。因此,岩体的变形破坏特征是极其复杂的,且多半是高度非线性的,岩体力学问题多具有病态结构,研究的对象也在不断地变化,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,没有任何可以被广泛接受的概念模型。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、几何方程和平衡方程是基本符合实际的,那么在对计算结果影响很大的岩体本构模型的给定上却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善,何况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”这一问题一样,“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的准确性识别问题。

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,而且对外部扰动特别敏感。这种难度自增殖系统在开挖深度的增加、多空间开挖系统、开挖尺寸的增大等各种情况下将表现得更为复杂。

(1) 开挖深度的增加导致开采的应力、温度等的增加,高应力下硬岩容易出现岩爆和岩崩。如对于硬岩中的采场和巷道,埋深小于 800m 时一般不易发生岩爆,而埋深超过 800m 时则极易发生岩爆。如 1990~1994 年间南非金矿采场发生岩爆的风险随着采深的增加而增加(图 1.1)。这种随开采深度增加的复杂性在图 1.2 中表现得更为明显。我国目前金属矿山开采的深度大都在 1000m 以内,有些矿山如狮子山铜矿、红透山铜矿等正发展 1000m 以下的开采。因此,对于深部开采可能诱发的岩崩和岩爆应引起足够的重视,采用合理的方法对其进行准确的识别,并加以适时的控制。

(2) 复杂的开采系统、高大硐室群等一般是多空间开挖系统。多空间开挖系统要比单空间开挖系统复杂得多。图 1.3 给出了采深为 2500m 的两个采场迎面推进与单一采场推进情况的比较。在采场回采迎面推进时,两个采场工作面之间将有可能形成高应力集中区。如果两个采场回采迎面向一个断层推进,情况将变得更加复杂。

开挖结构尺寸的增大将导致更复杂的自增殖系统。如对采场的进一步拓开或大硐室的分步开挖,暴露面越大,围岩越易失稳,图 1.4 给出了硐室群不同开挖尺寸下围岩破损区的变化情况。同样的大硐室群是一次性开挖完成还是分多步开挖,围岩破损区是不一样的。对于非线性无锚固一次开挖,围岩破损区出现连通;而采用非线性无锚固六步开挖时,围岩破损区则减小到很小,仅限于硐室周边围岩。

在开挖过程中,岩石材料性质是多变的,各点的弹、塑、粘性质也是多变的,既有能量耗散,也有能量聚集,不过这些变化速度不是很快,看起来各空间好像是稳定的,但实际上这种稳定本质上是一种动态平衡过程,它的突变频率有增加的趋势,只要开挖工程在进行,就避免不了诸多空间之间的岩石和矿柱受到多因素的干扰,这些干扰发展到一定程

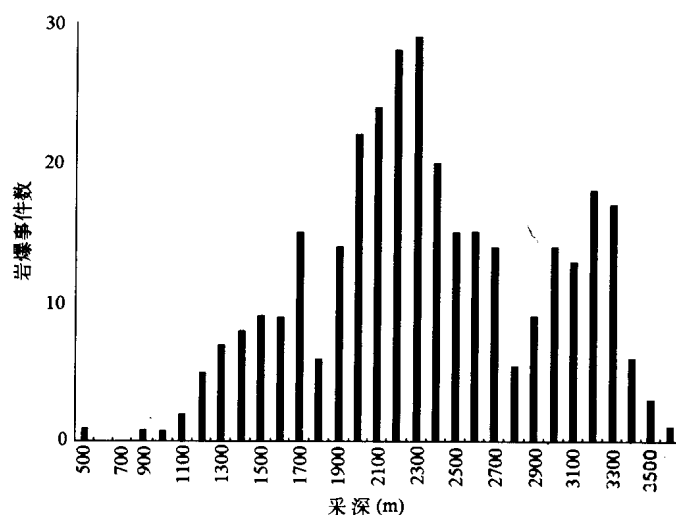


图 1.1 1990~1994 年间南非金矿发生岩爆数与采深的关系

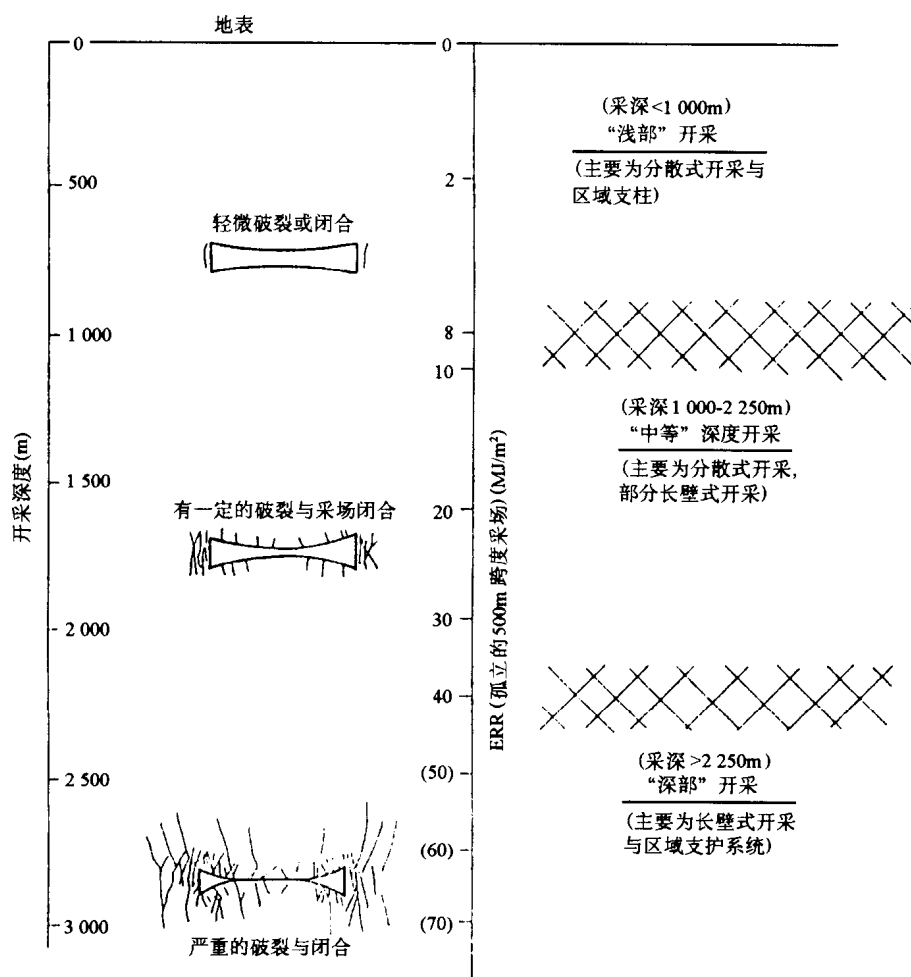


图 1.2 不同采深下的采场闭合率与围岩破裂情况 (Chamber of Mines Research Organization, 1988)