

采矿岩石力学新论

于学馥 张玉卓 葛树高 著

知识出版社·上海

采矿岩石力学新论

于学敏 张玉卓 葛树高 著

知识出版社出版发行

(沪 版)

(上海古北路 650 号 邮政编码 200335)

新华书店上海发行所经售 上海印刷厂印刷

开本 850×1168 毫米 1/32 印张 4.87 字数 115,000

1992 年 2 月第 1 版 1991 年 2 月第 1 次印刷

印数 1,000 册

ISBN 7-5045-5490-3 1D·1

定价: 3.15 元

内 容 提 要

一般采矿岩石力学习惯于从实验中建立模型、本构关系,并在特定条件下求解。本书则对传统的岩石力学概念提出了新见解,认为对采矿工程稳定性问题必须作系统研究,重视工程或施工因素的影响,从材料和工程(或施工)两种因素进行统计规律意义上的工艺过程力学效应动态设计与分析,以解决采矿过程中大量界限不明确的中间状态和各种信息的偶然性、模糊性远大于必然性、精确性的问题。

本书可作为从事采矿和岩土工程(水利水电、铁道、核电站、军事、人防、地下仓库、城市地铁和地下洞室建设等)的科研、设计、施工人员以及有关院校的教师、学生的参考读物。

前 言

一般采矿岩石力学习惯于从实验中建立模型、本构关系,并在特定条件下求解。这与固体力学方法是一致的,其特点是从材料影响因素出发来认识采矿稳定性规律,但忽视了采矿工程的系统研究,特别是工程/施工因素的影响以及从工艺过程力学效应的动态变化中认识采矿稳定性规律。这种传统的从必然规律出发,遵循单因单果律的认识问题的方法,难以解决采矿生产实际中的设计与决策问题。

本书则认为采矿稳定问题的研究对象不是简单的封闭实体,而是一个复杂的系统工程稳定问题,其中包括大量界限不分明的中间状态,所有信息的偶然性与模糊性远大于其必然性与精确性,应通过统计规律意义上的大量计算分析结果来进行科学决策。这是采矿工程力学计算的基础,也是采矿岩石力学与固体力学的重要区别,其中工程因素的影响是关键。

这是因为,采矿开挖不是一次完成,而是多步骤、时间长,前次开挖对以后各次开挖都产生影响,后次开挖又会引起已采地层和围岩变形移动的系统工程问题。显然,它属多因素影响下的采矿工艺过程稳定性问题。解决这个问题,必须首先改变传统的认识与思维方法,建立符合信息时代特点的新的认识和思维方式。对此,本书第一章的 §1.1 和 §1.2 两节中有所阐述。

采矿岩石力学是为采矿工程设计与决策服务的。这样,采矿工程过程的力学效应动态分析就成为十分重要的问题。本书第一章中给出了它的基本原理和算例。算例来自生产实际,是在三个

采场同时开采且互为影响下的工程动态模拟计算。当然，限于篇幅，只介绍了其中两个模型的计算分析结果，这对于从统计规律的角度来认识采场稳定性规律是很不够的，这里仅提出了为解决工程设计与决策问题的主要思路。

第二章论述了有关原岩应力场的基本情况，它是认识采矿规律和进行采矿工程设计与计算的基础。对它的应用，请参见文献[1]、[2]。

第三至第九章均属用统计和系统思维认识采矿规律的重要内容，限于篇幅，仅作了简单介绍。

由于本书涉及的学科和范围较广，以及作者知识水平所限，有错误和不当之处，请读者指正。

于学毅

于北京科技大学

1991.10

目 录

前 言	1
第一章 采矿岩石力学新概念	1
§ 1.1 概述	1
§ 1.2 改变传统科学概念及研究方法是发展岩石力学的 必由之路	3
§ 1.3 工程过程力学效应动态分析	10
§ 1.4 采矿过程力学计算动态分析算例	13
第二章 原岩应力	35
§ 2.1 概况	35
§ 2.2 地应力测量的主要成果	36
§ 2.3 原岩自重应力场的麦克库钦理论	41
第三章 岩石的损伤与断裂	46
§ 3.1 引言	46
§ 3.2 岩石的连续损伤理论	48
§ 3.3 岩石的线弹性断裂理论	49
§ 3.4 弹塑性断裂理论	54
第四章 岩石的强度理论	60
§ 4.1 概述	60

§ 4.2	岩石的材料强度	61
§ 4.3	矿山岩体的强度特征	66
§ 4.4	岩体强度预测的概率统计方法	72
第五章	层状岩体弹性理论	75
§ 5.1	基本概念和基本方程	75
§ 5.2	Kelvin 问题	77
§ 5.3	层状岩体中的孔边应力集中	79
§ 5.4	当量连续体方法	82
第六章	岩石的模糊内时本构理论	87
§ 6.1	岩石本构方程研究概况	87
§ 6.2	岩石变形的不可逆过程热力学描述	90
§ 6.3	内时理论的基本思想	92
§ 6.4	岩石的非模糊内变量演化方程	94
§ 6.5	岩石内变量演化的模糊随机过程	96
§ 6.6	岩石的模糊内时本构方程	101
第七章	数值分析方法	104
§ 7.1	内时理论有限元分析	104
§ 7.2	边界积分方程与边界元法	113
第八章	岩层移动三维力学计算与参数反分析	121
§ 8.1	引言	121
§ 8.2	地表移动三维分析	122
§ 8.3	地表移动参数反分析	125
§ 8.4	参数的物理意义与取值限制	127
§ 8.5	计算实例	130

第九章 岩石工程专家系统实例	131
§ 9.1 概况.....	131
§ 9.2 专家系统的基本结构.....	132
§ 9.3 岩石工程专家系统的知识库.....	133
§ 9.4 模糊推理方法.....	136
§ 9.5 矿柱尺寸选择与稳定分析专家系统设计及推理机.....	138
§ 9.6 工程实例.....	139
参考文献	142

第一章 采矿岩石力学新概念

§ 1.1 概 述

一、固体力学与岩石力学

至今还没有被公认一致的岩石力学模式。人们对已有的模式具有不同的评价：有人说都是材料本构关系的研究，公式来公式去，解决不了工程实际问题；有人说它是数学游戏，纸上谈兵，所以现场人员都不欢迎；也有人说有限元计算没有解决实际问题的价值，不能作为研究生毕业论文。此外，国内外都有人提出：岩石力学是一门不存在的学科，因为它没有超出固体力学范畴。

我们把是否考虑“工程施工”因素的影响，作为区分固体力学与岩石力学范围的界限。当然，它们又是不能截然分开的。

岩石力学是一门工程学与地质学(包括地质力学)、数学、固体力学、数值计算学及其他学科组合的边缘综合学科。它的基础理论不仅仅是数学、力学，还需要地质和工程基础，其中包括工程素质的训练。否则，单纯依靠固体力学，是无法解决工程实际问题的。

从静力学考虑，影响采矿工程稳定的因素有两个：一是材料，二是工程施工。对于工程工艺方案(包括工艺流程)的优化和设计，

主要取决于后者,而不是前者,因为它不是单纯的固体力学问题。

二、采矿工程过程是力学效应动态设计分析问题

采矿工程开挖不是一次完成,而是多步骤,前次开挖对以后各次开挖都产生影响的动态过程。所以,它不是单因单果一个截面的普通结构静力计算问题,而是工程开挖过程力学效应动态设计分析问题。

地层本身存在着地应力,岩石都处在受力和被约束的状态。开挖使应力释放,开挖又具有卸载途径性。不同的开挖过程(工艺方法和流程),不同的开挖步距(范围),具有不同的应力(变形)动态过程,也具有不同的最终应力(变形)状态。因此,工程施工过程是个动态分析问题。

三、工程的必然规律和统计规律

传统固体力学的计算,主要是从材料和必然性出发认识规律。实际上,其中包含着大量界限不分明的中间状态和非确定性参数。地应力、岩石强度和各种力学参数,以及岩石试验模式和模型、计算模式和模型等等,都属非确定性的。所有的信息,其偶然性与模糊性远远大于必然性与精确性。从这个问题来看,传统的从必然性和精确性出发认识采矿稳定规律,在实际工程中难以做到令人满意的程度。究其原因,采矿不是个封闭的简单实体,面是个复杂的系统,其中更多的属于统计规律问题。

四、变革岩石力学工作方法,发展采矿工业

传统岩石力学工作方法习惯于从材料试验中建立模型、方程式,重点工作是处理本构关系和在特定条件下求解。这种作法的缺点是:过去的科学理论认为,在加速度运动下可以看出精确的本构关系;而现在已认识到,有些介质的本构关系是模糊的,它虽是

有规律的,但如果强求规律的精确度,就可能得出矛盾的结果。

现代岩石力学工作方法在考虑工程施工因素的影响下,根据材料和工程两种因素的需要建立模式、模型,重点工作是通过计算机进行计算,从系统综合中认识规律。

五、学习“上天”经验,改变“入地”面貌

在技术上,“上天”与“入地”都是力学的稳定问题,而且“上天”是比“入地”更为复杂的稳定问题。但是,我国“上天”已进入国际高技术先进行列,而“入地”则仍处于原始的凭经验施工,根据工程类比法进行设计和进行生产的阶段。

根据估计,我国各种工程的工作量,以地下和岩土工程(包括采矿、水利水电、隧道、洞库、交通军事设施、边坡及土石流等等)的工程和灾害量最大,建国以来的损失与浪费可能超过千亿以上。这个问题应当引起人们的注意。

30年代航天工业尚未出现,航空工业的力学计算只解决到螺旋桨飞机的设计水平。30年代以后,力学计算水平有了迅速发展,从螺旋桨设计进入喷气式,再进入航天设计。其中的重要经验是设计走出了传统力学范畴,改变了传统科学概念及研究方法,进入了“系统综合技术型”高技术行列。当前是一个“设计力就是竞争力”的新时代。我们确信,只要改变传统科学概念及研究方法,采矿和各种岩土工程出现一次飞跃式发展,是无可怀疑的。

§ 1.2 改变传统科学概念及研究方法 是发展岩石力学的必由之路

普利高津说过,当代科学的迅速发展,一方面是人对于物理世界认识的扩大与深化,另一方面是研究越来越复杂的对象,引起了科学概念及研究方法的质的变化。这后一方面可能更为重要。

现在我们正从牛顿时代进入信息时代，时代的变化首先体现在思维方式的变化。

当前，面临着信息时代高技术的挑战，人们的思想观念、思维方式与行为方式发生了巨大的变革，全球因而形成了一种全新的科学和经济格局。传统的思维方式受到了猛烈的冲击，代之而起的现代思维方式如系统思维、反馈思维、不确定思维、全方位思维等等，使人类重新认识世界，认识自己，使现代社会具有了更大的活力。我们把科研中遇到和体会最深刻的四种新思维：系统思维、反馈思维、不确定思维和全方位思维论述如下。这些思维引导着采矿、岩土科学概念及研究方法等实质性问题的的发展。

一、系统思维

高技术的发展有两种类型：技术突破型和系统综合型。阿波罗宇宙飞船所使用的技术，没有突破性新技术，都是在现有的技术基础上的系统综合与技术的重新组合。日本战后的经济奇迹，主要是靠引进、吸收、消化、综合各项技术，实现人和物的重新组合。综合就是创造，通过系统思维，运用系统方法，就能实现创造，出现奇迹。

十年中，作者运用新的科学概念和研究方法，组合已有的有限元、开挖步骤等计算技术，解决了若干采矿设计中的重大疑难问题，取得了成功。

传统的科学概念忽视甚至否认事物的复杂性和整体性，重视简单性和局部性。反映在自然科学的发展中，强调在实验的基础上分析和归纳，把复杂的系统分解为简单的因素来研究。例如，在力学中把异常复杂的机器体系分解成各种简单的机械力的不断重复。在当时科学中，这种研究方法的确取得了极大的成功。

以后，又进一步把一切运动归纳为简单的机械运动思维，企图用不同的各种力和素去解释各种运动现象，甚至认为人也是机器。

片面地强调事物的简单性方面，必然形成简单化倾向。例如，认为一旦了解了组成整体的小单元的性质，就掌握了整体；相信微观世界是简单的，仅用一些简单的数学定律就能认识。因此，便满足于对客体进行微观解剖，而忽视宏观的整体性的研究。

现代的科学发展正处在结束“现实世界简单性信念”阶段。今天，到处看到的是“不断增加着复杂性和多样性的进化过程”。不能只见树木，不见森林；因为森林是一个复杂整体，不仅仅是许多树木（小单元）的简单结合，更重要的是简单要素之间存在着复杂的相互联系和相互作用。许多科学家发现，不考虑系统时，对生物的研究，孤立的层次了解得越细、越深入，反而会失去对生物全貌的了解，从面对生命本质的理解更渺茫了。

系统论的基本特点是要考虑系统的整体性和复杂性，要研究系统内各单元的相互作用和相互联系。整体可以大于部分之和。可靠性低的部件可以构成可靠性高的整体。

整体性和相互联系是系统论、控制论、信息论考虑问题的两条基本原则。

人的双眼的视敏度比单眼高 6~10 倍，就说明整体可以大于部分之和。

航天系统属结构和功能复杂、参数和变量众多的大系统，其整体性和复杂性的研究是至为重要的。同样，“入地”系统虽不如航天系统大，亦应属结构和功能复杂、参数和变量众多的复杂系统，采矿和岩土工程工作者对这个问题应有新的认识。

总之，当前科学研究的兴趣正从简单性向复杂性转变，对微观世界简单性的信息的认识已被打破。这个转变引导我们把重点放到新概念/新方法上去，研究复杂性/整体性，探索非线性/相干性，这对当前科学的发展更具重大意义。

为了避免进入极端，这里也要提一下，把事物结合起来研究以达到新的综合（更高技术）是必要的，但不能排斥经典科学强调实

体(如原子、分子、基本粒子、生物分工等)、注意把对象分解为各种粒子的研究,同时也要重视象中国的自然哲学强调的关系研究,注意研究整体的协调/协作。有人举出中医的研究,认为它缺乏对实体的研究,分析解剖也不够,但重视事物之间的相生相克,互相制约,注意人体的整体性的研究,注意人与环境之间的协调性。作者认为,“入地”工程既缺乏经典学的强调实体的研究,更缺乏中医那样强调关系的研究。而当前在数值计算中,仍重视材料和各种计算方法的研究,忽视整体系统的研究,忽视过程与发展的研究。

人的认识往往要经历一个复杂—简单—复杂,整体—局部—整体,综合—分析—综合,具体—抽象—具体的辩证发展过程。

这里要强调一点科学方法问题。从工业时代发展到信息时代,出现了科学概念的转变和研究方法的改变。这是科学实践总结出来的新科学方法论。有了新的科学方法论,而后才能达到新理性的认识。没有哲学方法论,也不可能有正确的认识论;没有科学方法得到的认识也往往是片面的,甚至是错误的认识。因为每人的实践与认识可以是各异的,但科学方法论却是严格的、规范的。因而,不以科学方法论作为统一的依据,仅仅从实践与认识出发,必然实践不同,认识不同,公说公有理,婆说婆有理。所以说,方法论是得到一致的、自然的科学认识的桥梁,这与采矿和岩石力学发展至关重要。

二、非确定性思维

经典自然科学认为,物理世界是简单的、被动的、不变的、可逆的和决定性的。这种传统决定论思想已被信息时代非决定论思维所代替。从而对规律的认识,出现了决定性与随机性,力学性与统计性,必然性与偶然性,决定性与非决定性,力学规律与统计规律等两两不同的认识方法。

经典的动力学理论的出发点是,时间是可逆的,现实世界是简

单性的。这样就必然得出严格的机械决定论。机械决定论认为,任何一个系统,只要知道它的初始状态,就可以根据普遍的动力学定律,推演出它随时间变化的系统状态(即根据逻辑推理的根本前提,可以演算出结论来一样)。拉普拉斯认为,只要知道了组成宇宙的每个质点在某一瞬间的位置和速度,又知道动力方程,就可以推出宇宙的过去和未来的一切情况。

这就是说,未来包括在过去的条件之中,一切都给定了,好象任何事物从理论上都可以作出决定性的预言,而不会有什么新的东西出现。这是宿命论的观点,不是信息时代的观点。

现代的看法是,对于一个比较简单的系统,上述认识可能做到这一点。例如,根据牛顿运动定律和万有引力定律,可以预测地球运行轨道和几百年后出现日食。但对于稍微复杂一些事物,则做不到这一点,如天气预报、地震预报,其中也包括采矿规律和工程岩石破坏规律。又如,牛顿的经典力学方法对计算日一地系统,可以得到精确的解答,但对日一月一地系统,则不能得到精确的回答。

这里要说明:在处理“多体系统”问题时,都必须从数学中引入概率的概念,得出统计性定律。但是,一旦离开了严格的决定论模型,则只能作出统计的预言(统计规律),预报平均的结果。

为什么对于稍微复杂一些系统的初始状态的了解无论多么精确,也无法预言系统在一个长时间以后的行为?主要有列原因:首先,人对物理世界的认识是基于测量来的,而测量的精度只可能是有限的,不是无限的,测量本身就是一个不可逆的过程,它必然引起熵的增加,导致物理学预言的不确定性(在岩石力学里,地应力、各种岩石强度等等就是例子);其次,在复杂的事物中,绝对的预言是不可能的,历史是发展的,会不断出现新情况、新问题,总有新的东西在前头,未来并不完全包括在过去之中。因此从原则上说,绝对的预言是没有的。

总之，当今正从一个封闭的、一切都好象已经给定了的世界，逐步走向一个不断变革、进化、发展，不断产生新事物的开放世界，物理世界如此，生物和社会界也是如此，只要超出把研究对象简单化的限制，统计的概念就是必要的。采矿和岩土世界也是这样。

三、反馈思维

反馈思维的实质是运用反馈方法来调整系统行为并对系统实施有目的的控制，以实现被控系统的稳定性。反馈包括正反馈、负反馈、前馈及其组合。

反馈思维的目的有三个：第一，通过负反馈实现控制系统的自稳性；第二，通过正反馈实现控制系统的自组织，这要求抛弃原来的稳定状态，达到新的稳定状态，重组自身的结构与功能；第三，通过反馈实现对系统的最优控制，以实现人们预想的系统运行的最理想的效果。

反馈思维补充了单向因果联系的传统思维方式的不足，出现了双向互为因果的联系方式。任何一个完整的认识或实践过程都包含着反馈机制。因此，反馈思维揭示了人的认识与行为的本质。同时它弥补了传统认识论的单向开环系统的观点，走向双向闭环系统的认识与思维模式。

反馈思维运用反馈方法，其目的是实现人对自然和思维的控制，以实现人的有目的地认识世界和改造世界的任务，它将防止思维和行为的盲目性，实现信息时代的结构及要求。

这里需要说明一点，最近几年采矿和岩土工程界大谈位移反分析，这无疑是十分正确和必要的。但不能把它仅仅视为是一种位移反分析的计算方法，或者说根据它提出的施工—监测—设计法是采矿设计与施工的统一机制体系问题。这样的认识太简单了。更重要的，它是信息时代的一种重要思维方式，也是打破传统概念的认识方法。

四、全方位思维

全方位思维是现代思维方式的重要表现。全方位思维包括信息时代的思维，也包括传统思维，它们有各自的应用范畴，也有互补性。但必须弄清楚什么是传统思维方式，什么是近代思维方式。

全方位思维包括顺向与逆向思维、逻辑与非逻辑思维、收敛与发散思维等等形式。

传统思维方式着眼于顺向、收敛与逻辑的思维。无论是归纳与演绎，它们或是从经验中提升，从感性上升为理性；或是从理性抽象推至感性具体。人们借推理建立科学，发现并试图理解世界。这种思维模式更多地造就了循规蹈矩的条理性人才，无法造就大量创造型人才。逆向思维实际上是鼓励人们大胆地提出疑问，然后在实践中探索，在实践中检验，这是发展真理的正确之路。

全方位思维提倡发散思维。发散思维是指沿着不同的方向，去发现和探索问题的多种答案，最终使问题获得圆满的解决。其模式之一是从某问题出发，沿着不同的途径探索解决问题的办法，最后都达到预定的目的，即问题的解决。模式之二是从预定的问题出发，通过不同的途径探索原问题的解决，在此过程中如发现新的问题应转向新的方向，并努力去解决新的问题。发散思维的优点是流畅、独特、变通。我们习惯于传统的收敛性思维，即按着固定的模式，沿着按某种经验得到的教训或启发作定向运动，“以不变应万变”。收敛性思维使思维空间越来越狭窄，思维方式越来越单一。面临新的不同性质的问题时，会身不由己的沿着既定的思路，死搬硬套老经验老办法，因循守旧，故步自封，这就是思想僵化的表现。

总之，全方位思维包括的内容很多，还有直觉（灵感）思维等。直觉思维对人类生活与创造活动的重要性已被人们所认识，只要有创造，就离不开直觉思维。可以说，全方位思维，打开了创造的闸门，使人类重新认识世界和认识自己。