

# 工程地质广义系统 科学分析原理及应用

黄润秋 许强 著

(国家杰出青年科学基金资助项目)

地质出版社

# 工程地质广义系统 科学分析原理及应用

黄润秋 许强 著

(国家杰出青年科学基金资助项目)

地质出版社

·北京·

### 图书在版编目(CIP)数据

工程地质广义系统科学分析原理及应用/黄润秋,许强

著.-北京:地质出版社,1997.9

ISBN 7-116-02453-0

I. 工… I. ①黄… ②许… II. 工程地质-系统分析

N. P642

中国版本图书馆 CIP 数据核字(97)第 19934 号

### 地质出版社出版发行

(100083 北京海淀区学院路 29 号)

责任编辑:屠涌泉

\*

北京地质印刷厂印刷 新华书店总店科技发行所经销  
开本:787×1092 1/16 印张:10 字数:250 千字  
1997 年 9 月北京第一版·1997 年 9 月北京第一次印刷  
印数:1—760 册 定价:23.00 元

ISBN 7-116-02453-0

P·1826

# 序

我未见过黄润秋教授,但深知他在运用岩石力学新概念解决工程地质问题的研究中,作出了开拓性的成就。摆脱了经典力学思维方式和研究方法的约束,进入了信息时代新科学方法论研究的前沿。我是从事采矿/岩土开挖工程与岩石力学工作的,信息时代的到来,把开挖工程与地质两门古老的科学融合在一起赋予了新的科学内涵,形成了二者谁都离不开的谁的新科学。黄润秋教授在这方面作出了突出贡献。我从以下4个方面来说明黄教授研究成果的特点:(1)正确的自然现象工程观;(2)正确的工程与地质结合观;(3)必要的力学研究方法;(4)必要的数学研究方法。

## (1)正确的自然现象工程观

运用信息时代科学方法论研究工程问题,首先要建立正确的自然现象工程观。因为古典的力学方法是解决人为现象工程的研究方法,而岩体稳定性问题,由于受到了地球运动与具有自组织机能的地应力的约束,不属于人为现象工程的研究。单一的古典力学方法不能解决这种复杂的工程研究问题。

人为现象工程像造一张桌子,事物概念清楚,结构明确,可以用静态、线性、确定性的研究方法进行研究。但自然现象工程受到自然规律的约束,牵扯的问题复杂、层次多,事物概念模糊、载体能量大、规模大,计算中的信息不全,结构和原始数据不清楚或不完全清楚,属于动态、非线性、非确定性问题。在工程地质研究中建立正确的自然现象工程观,是黄润秋教授研究方法中的第一个特点。

## (2)正确的工程与地质结合观

工程与地质正确的结合是指工程必须与地球活动和具有自组织机能的地应力的结合,必须确定地应力如何引起工程结构破坏和岩层移动的作用机理。

工程与地质结合是一对矛盾中的两个方面的结合。即工程开挖是破坏地层的行为,是(对地层的)干扰系统,属于工程因素研究范畴。地层则是被干扰系统,属于材料因素范畴。这是一对矛盾中的两个方面。二者缺其一,只能属于单方面的研究,不能成为结合。现实的情况是工程计算都不考虑地应力的研究。计算中的载荷条件基本是假设的,不是真正的实测的地应力数值。有的根本不考虑水平应力问题,这种工程计算没有实用意义。

同样的被干扰系统——地质方面的研究,只限于材料(岩石)自身的研究,不考虑外界环境对它的影响的研究,即不考虑工程施工和工艺方法对工程结构影响的研究,这种工程计算,同样地不能解决工程实际问题。这是黄润秋教授研究方法的第二个特点。

## (3)必要的力学研究方法

正确的力学方法来自对岩土开挖物理现象的正确认识。开挖工程计算正确的力学方法首先是非平衡热力学方法,然后才能满足工程要求,提出第二层次的力学研究方法。从热力

学提出力学方法是把开挖过程中的结构变形、损伤、破坏提高到物质、能量变化的高度来认识。热力学过程有两个特点：第一，过程是时间不可逆的和非对称的；第二，过程是随时处于非稳定性状态，这是力学计算的基本问题之一。

开挖工程属于多步骤开挖系统，工作面是变动的。在此过程中围岩内各点应力是变化的，岩石力学性质（弹、塑性）也有变化的特点，必须进行应力/应变历史的计算研究。通过应力/应变历史来预测结构状态，以使复杂的非确定性系统计算为可预测的计算问题。这也是力学计算的基本问题之一。

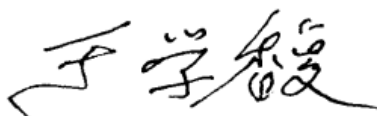
开挖过程具有两种运动状态，一种稳定状态，是指运动在一定条件下宏观上的稳定状态，运动是朝着稳定的方向发展。这是力学计算的一个方面。另一种运动是非稳定状态，当开挖干扰达到一定程度，特别达到阈值（极限），微小的干扰也会使系统失稳。失稳通常是以突变方式出现的，这是力学计算的又一个方面，计算的目的在于把这种灾难性突变破坏预报出来。这是黄润秋教授研究方法的第三个特点。

#### （4）必要的数学研究方法

必要的数学方法包括两种含义：一是确定论—模糊系统—概念论三种数学方法从对立走向统一的研究方法；二是采用黑箱—灰箱—白箱统一的研究方法。

开挖系统本身属于结构不完全清楚的灰箱计算问题。灰箱计算需要通过过程的历史研究才能使系统成为可预测的。灰箱计算方法是从黑箱方法发展出来的。黑箱是指事物（物体）内部结构完全不清楚的计算方法。对于一个结构不完全清楚，原始条件不全的系统是无法进行计算的，也没有可预测性。但是当—个系统内部结构内涵模糊时，它的功能（行为）总会有所表现。因此，黑箱和灰箱计算的方法需要用功能模拟的方法进行研究。在计算机上实现这一步又需要白箱网络的计算方法。运用计算机进行计算，其运算程序是事先知道的，这种程序就是“白箱网络”。因为在程序设计时，我们对于程序输入计算机后的计算步骤、运算方式都是知道的。黑—灰—白三个环节正是人类的认识从不知到知之较少，进入知之较多的过程。这样白箱方法反映了层次更高的认识，并达到了可预测的程度。所以开挖工程计算需要运用计算机模拟和运用黑—灰—白箱统一的数学方法进行计算。这也是工程地质计算的必要计算方法。

以上是从工程地质和岩石力学研究来说明了黄润秋教授出版著作的四个方面特点。我确信本著作对工程地质、采矿和各种岩土工程研究与计算方法的发展，会起到推动作用。



1997年7月1日  
于北京科技大学

# 前 言

地球科学虽是一门极其古老的学科,但并不因其古老便发展得很成熟、很完善。从其发展水平来讲,它还是一门非常“年轻”的学科。人们常说“上天容易入地难”,这话一点也不过分。之所以会出现“上天容易入地难”的反常局面,完全是由两者本身的性质决定的。天体之间主要是靠微弱的万有引力发生相互作用,任何天体和绕其转动的另一天体(例如,月球和地球)之间往往会构成一个近似封闭的系统。因此,卫星、宇宙飞船在太空中的运动规律基本上还遵循牛顿的经典力学定律。牛顿力学属于机械论力学,它是以决定论的法则来描述事物的演化和发展的。因此,它所描述的事物的演化规律是确定性的、可逆的,“好象只要我们足够精确地‘知道’了系统在给定时刻的状态,那么将来(以及过去)就可以较准确地预测了”(Prigogine, 1986)。然而,近年来数十起人类工程建设的失事,地质灾害的频繁发生,使人们逐渐清醒地认识到:地质体,特别是工程地质体(与人类工程活动有直接联系的地质体)的变形破坏规律并不是基于决定论思想的牛顿经典力学所能较好地描述的,其本质原因就在于地质体是一个完全开放的体系。

从系统论的角度讲,任何地质体都可以看作是一个复杂的开放的体系。在这个体系中,由于其较强的开放性,使得它与一般的系统(如热力学中的孤立系统、封闭系统)相比,表现出完全不同的特点,最突出的是具有“黑箱”特性和高度的非线性以及不可逆性。这些性质决定了该系统存在着简单与复杂、平衡与非平衡、线性与非线性、开放与封闭、确定性与随机性、可逆性与不可逆性、无序与有序等矛盾的对立与统一。

工程地质体一般都是由岩土体组成的,任何岩土体(特别是岩体)都具有一定的结构。但岩土体的内部结构是不可直接观察的,只有通过钻探、物探等间接手段来了解岩土体的大体结构(如滑坡体的滑面)。由于岩体结构本身的复杂性,用上述方法所得岩体内部结构往往仅是局部的、片面的,有时与真实情况相差甚远,甚至是错误的。因此,从岩土体内部不可直接观察这个角度讲,任何地质体都是一个“黑箱”,也正是这种“黑箱”特性限制了人们对地质体的正确认识,特别是定量化描述,当然也就阻止了地球科学的迅速发展。对于这类“黑箱”,只有通过系统论中功能模拟、系统辨识以及反馈分析等手段才能了解地质体的内部结构和发展演化的行为方式。因此,要研究地质体的变形破坏机制和发展演化规律,首先必须将所研究对象当作一个系统来看待。同时,由于地质体在发展演化过程中本身就具有非线性和不可逆性,这种非线性相互作用是事物产生复杂性的本质原因。要查明工程地质系统变形破坏的机理及其非线性演化规律,不能仅仅依靠经典的牛顿力学,必须引入现代非线性科学理论,两者结合起来便是本书所说的广义系统科学。因此,从系统的高度来看待工程地质体,并运用广义系统科学的基本理论和方法来分析 and 解决工程地质问题已成为工程地质学科发展的一个重要方向。

一般而言,从内容上讲广义系统科学主要包括两大部分:一般系统科学和现代非线性科学。一般系统科学主要以“老三论”(系统论、控制论、信息论)为代表;现代非线性科学则包括



“老三论”(耗散结构论、协同学、突变理论)以及混沌动力学、分形理论、超循环论、神经网络理论等一系列新理论和新方法。一般系统科学是从系统本身的角度研究系统的组成、系统的一般特点,系统中信息的提取和传输以及如何对系统实施控制。非线性科学则是从各个不同的角度研究开放系统在演化过程中所表现出的非线性特征。例如,耗散结构论、协同学、超循环论三者连在一起被称为自组织理论,它们分别从热力学、动力学和生物大分子(非生命物质→生命物质)的角度探索这三类系统如何从无序进化到有序的自组织过程。突变理论主要从定量的角度描述非线性系统在临界失稳(相变)时的突变行为。分形理论从几何的角度探讨系统内各个层次间的自相似性。混沌动力学主要探讨非线性系统在其演化过程中的不可逆性和演化行为对初值的敏感性。神经网络理论则从另外的角度以探讨系统内外组成或影响因素(变量)之间的非线性关系为其主要研究内容。此外,还有重正化群理论、细胞自动机模拟方法等用于研究系统非线性特性的数学物理工具。从广义系统科学的理论体系可以看出,广义系统科学是以系统(尤其是开放系统)为其主要研究对象,从不同的角度采用不同的手段和方法,来探索系统的发展演化机理和行为特征。本书便是将广义系统科学与工程地质具体实际结合起来,首先把工程地质体(例如斜坡)看作作为一个由数目众多的不同大小、不同层次的要素(岩块)组成的巨系统,再运用上述广义系统的各种理论和方法,探讨该系统变形失稳机理和发展演化规律,最后在此基础上提出其失稳时间和空间的预测预报方法。

本书第一章主要阐述广义系统科学的形成过程和发展历史、广义系统科学的理论体系以及将广义系统科学的基本思想与现代工程地质学相融合而提出的十大工程地质系统分析原理。第二章至第七章是应用篇,它们是广义系统科学在工程地质中的实际应用,也即运用广义系统科学的基本理论和方法来分析、解决实际工程地质问题。其中,第二章提出和总结了工程地质数据处理和建模方法,包括基于常规统计分析的数据处理方法、自组织建模技术和神经网络数据处理和建模技术,这三种方法处理数据(特别是具非线性关系的数据)的能力依次增强。第三章、第四章,主要将岩体作为基本研究对象,分析岩体系统在自身的内部因素和外界环境的双重作用下,其变形失稳机理以及变形破坏过程中所表现出的复杂的动力学行为。第五章至第七章则把研究对象具体落实到斜坡上,分析斜坡体系本身的特性、演化状态以及在其发展演化过程中的自组织行为,最后在此基础上提出斜坡失稳的时间和空间预测预报理论及具体模型(具体见图0-1)。

从图0-1和上述说明可以看出,第一章是全文的理论基础和总纲,特别是该章所提出的十大工程地质系统分析原理将直接指导以后各章的基本思路和具体研究方法。反过来,第二章至第七章又是第一章所述内容在工程地质中的具体体现。

广义系统科学在不同的历史阶段有着不同的含义和内容。系统论的创始人贝塔朗菲(Beterlanffy, 1973)在《一般系统论的基础、发展与应用》一书修订版的序言中首先提出了“广义系统论”一词,但由于受当时学科发展水平的限制,他所提出的广义系统论主要指“老三论”。魏宏森(1982, 1985, 1991)在贝塔朗菲的基础上扩充了广义系统论的范畴,并提出了广义系统论的八大基本原理。按照他的论述,广义系统论应包括“老三论”和近年来新发展起来的“自组织理论”。随着近年来非线性科学的迅猛发展,我们认为,广义系统论内容应该包括非线性科学的所有新成果,于是于1996年在第五届全国工程地质大会上正式提出了“广义系统科学”的概念(黄润秋、许强, 1996)。

非线性科学是广义系统科学的重要组成部分和核心内容。特别是近年来,随着非线性科

学的迅猛发展和它在其它领域中应用时所取得的成功引起了工程地质工作者的广泛关注,工程地质界一大批青年科技工作者(周萃英,1992;秦四清,1992,1993,1994;许强、黄润秋,1993,1994,1995,1996;李后强、艾南山、高鹏,1994,1995;刘松玉等,1993;易顺民、唐辉明,1995)在将非线性科学引入工程地质领域已作了大量的工作。特别是周萃英博士在探讨滑坡灾害的复杂性方面作了较深入系统的工作;秦四清博士在此基础上进行了更为深入地研究,并出版了国内有关非线性科学在工程地质中的应用方面的第一部专著(《非线性工程地质学导引》,西南交通大学出版社,1993)。但是,从总体上看,他们的这些工作主要是以非线性科学中分形理论和突变理论在工程地质中的应用为主。本书则是从哲学和系统的高度,把现代非线性科学和一般系统科学以及传统工程地质学有机地结合起来,将广义系统科学中的各门学科巧妙地融合于工程地质科学之中,并用它们分析和解决了大量实际工程地质问题。

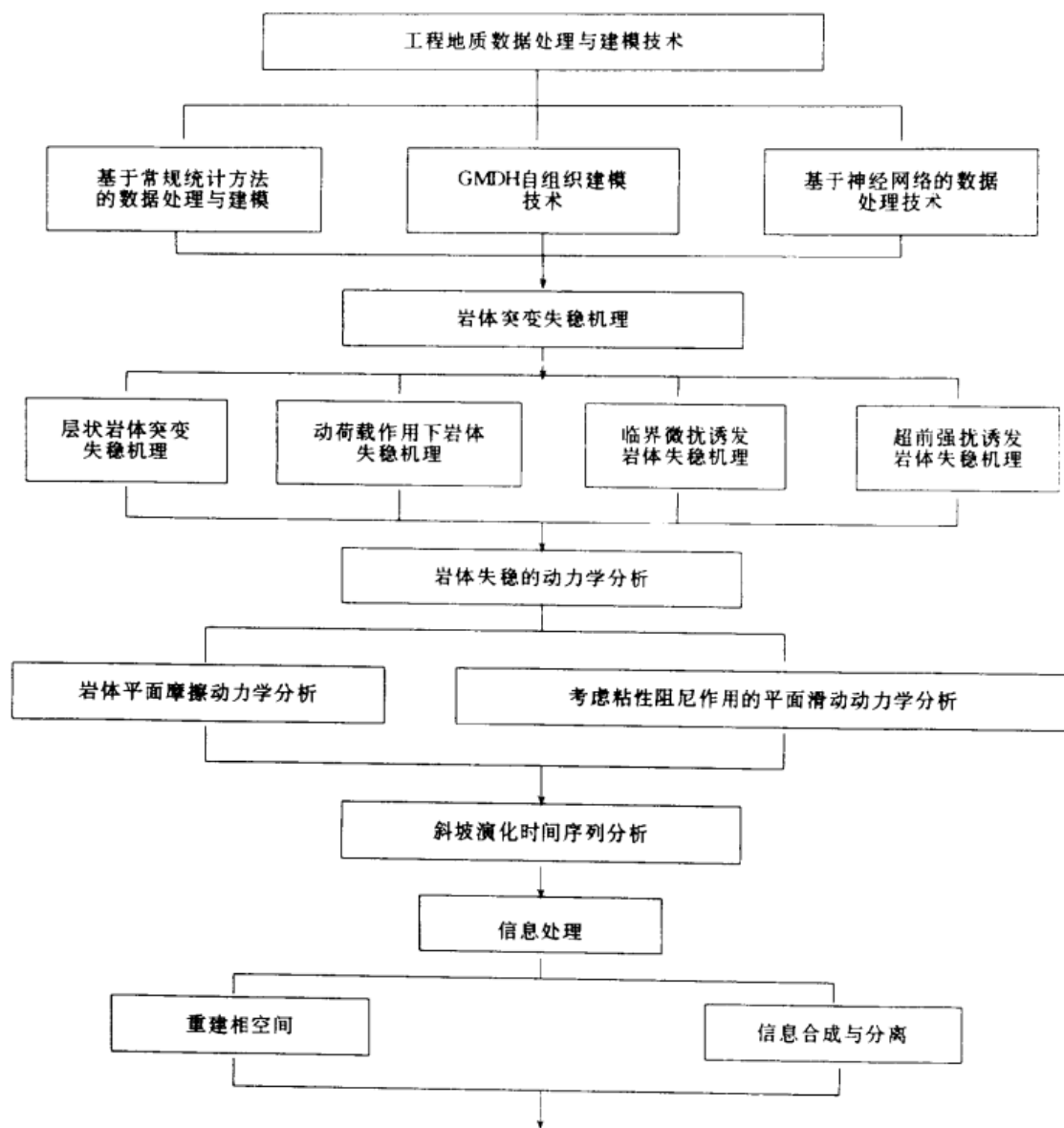
广义系统科学是一门涉及内容极其广泛、数学力学知识极其深奥的学科,要想对其进行深入系统的了解绝非一朝一夕所能达到的。为了适合工程地质学科的特点和使本书易于被广大工程地质工作者所理解和接受,在撰写本书的过程中,作者尽量做到叙述深入浅出,并在第一章中运用了较大的篇幅对广义系统科学所包含的各门学科的基本概念和基本思想作了概略地介绍。同时,在涉及到一些数学公式时也尽可能详尽地写出了推导过程。即使这样,有些读者在阅读本书时可能仍会遇到一些数学力学方面的困难,此时请参考本书所列出的相关文献资料。

工程地质学科向来以解决工程地质实际问题为其主要目的。尽管近年来现代非线性科学得到了迅猛地发展,各个学科领域的科技工作者已利用非线性科学和一般系统科学分析和解决了大量的实际问题,并大大地推动了相关学科的发展,但是,由于工程地质问题本身的复杂性,作者认为,企图用广义系统科学的理论和方法来解决生产实践中所遇到的所有工程地质问题,目前还有一定的困难。本书的主要目的是想从哲学和广义系统的高度,探讨分析和解决工程地质问题时所应采取的基本思路和方法(这一点集中体现于本书所提出的十大工程地质系统分析原理),同时,还试图对工程地质学科中某些概念、现象以及成因机理(如岩土体累进性破坏机理、外荷载诱发岩体失稳机制、斜坡演化自组织机理等)进行深入系统地研究,尽量将以前的一些定性的感性认识上升为定量的理性认识,以加深对工程地质问题的认识和理解。鉴于此,作者认为,要想对复杂的工程地质问题有一个全面系统地认识,不但应吸收本书所介绍的广义系统科学的思想和方法,同时也绝不能丢掉传统工程地质学的方法和手段,也即必须将二者有机地结合起来。

本书较为全面地反映了作者近年来在这一领域的研究成果,初稿由许强编写,最后由黄润秋统一修改定稿。由于专业的限制,作者深知自己的数学、力学知识还不能对广义系统科学这一博大精深的新兴学科进行深入系统的了解,甚至在某些方面可能还存在一些错误的理解和认识,敬请同行专家批评指正。

在撰写本书的过程中,曾得到张倬元教授、王士天教授、王兰生教授、孔德坊教授、聂德新教授、刘汉超教授以及成都理工学院工程地质研究所的全体老师和同事的关心和指导,季恒玉老师绘制了本书中大部分插图,在此向他们表示衷心地感谢!





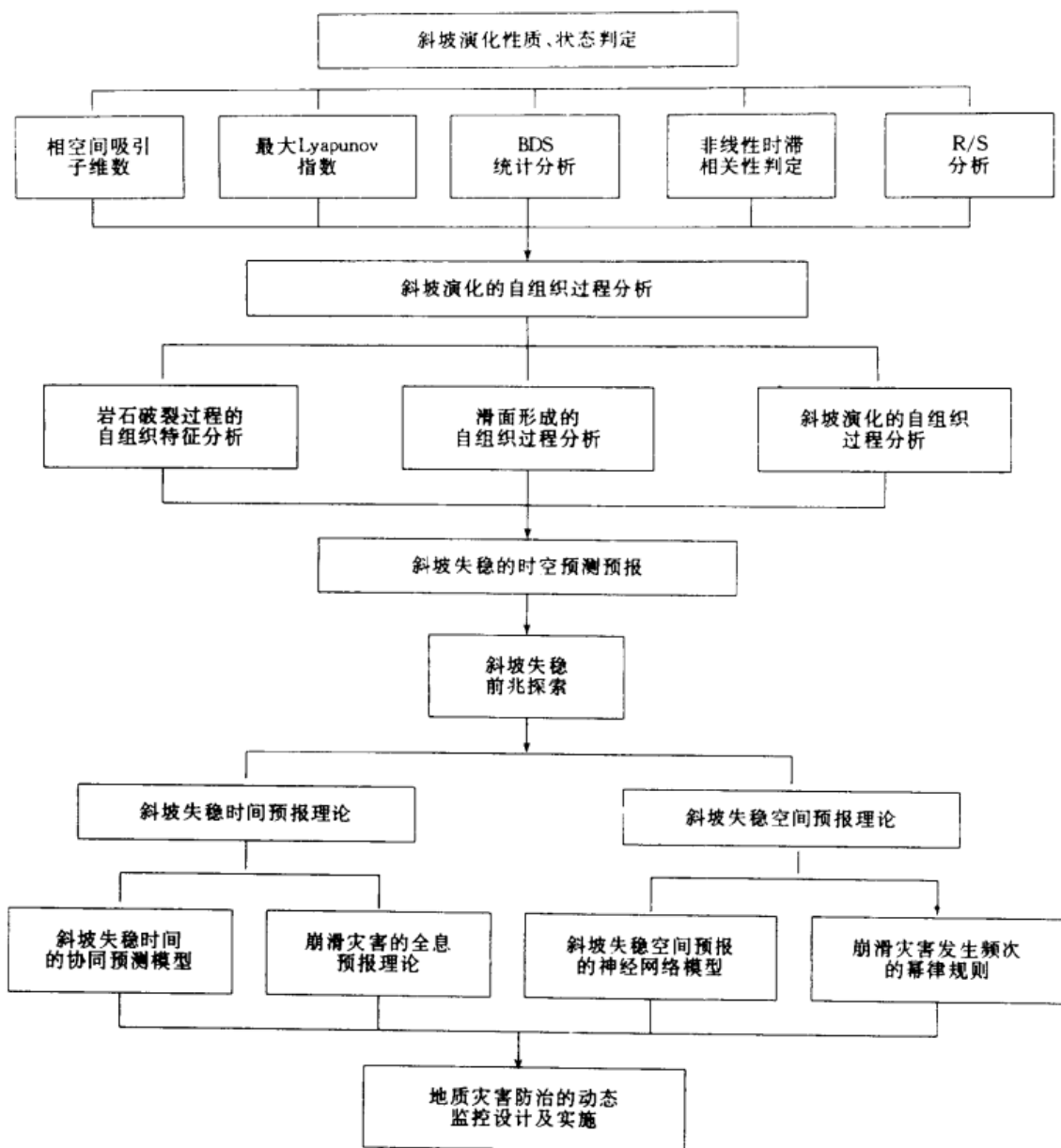


图 0-1 研究思路与技术路线框图

# 目 录

<b>第一章 广义系统科学理论及工程地质系统分析原理</b> .....	(1)
1.1 广义系统科学的形成与发展 .....	(1)
1.2 广义系统科学的理论体系 .....	(3)
1.2.1 系统论 .....	(3)
1.2.2 控制论 .....	(4)
1.2.3 信息论 .....	(5)
1.2.4 耗散结构理论 .....	(6)
1.2.5 协同论 .....	(7)
1.2.6 超循环论 .....	(8)
1.2.7 突变理论 .....	(8)
1.2.8 混沌动力学 .....	(9)
1.2.9 分形理论 .....	(12)
1.2.10 神经网络理论 .....	(12)
1.2.11 细胞自动机模拟方法 .....	(14)
1.2.12 重正化群方法 .....	(16)
1.3 工程地质系统分析原理.....	(17)
1.3.1 动态地质历史过程分析原理 .....	(17)
1.3.2 整体性和分解协调性原理 .....	(18)
1.3.3 层次性原理 .....	(20)
1.3.4 自相似原理 .....	(22)
1.3.5 开放性原理 .....	(23)
1.3.6 突变性原理 .....	(25)
1.3.7 自组织原理 .....	(26)
1.3.8 监控—反馈原理 .....	(29)
1.3.9 对称破缺原理 .....	(31)
1.3.10 统一性原理 .....	(32)
<b>第二章 工程地质数据处理与建模技术</b> .....	(37)
2.1 基于常规统计方法的工程地质数据处理与建模方法.....	(37)
2.2 工程地质数据处理的 GMDH 自组织建模技术 .....	(38)
2.2.1 GMDH 方法概述 .....	(39)
2.2.2 单变量非线性时间序列的 GMDH 建模技术 .....	(39)
2.2.3 实例分析 .....	(42)

2.3	基于神经网络理论的工程地质数据处理与定量化分析方法	(45)
2.3.1	神经网络方法的特点及研究现状	(45)
2.3.2	基于神经网络的工程地质定量化评价方法	(46)
2.4	水库诱发地震预测的数学模型	(48)
2.4.1	基于常规统计方法的预测模型(方法)简述	(48)
2.4.2	水库诱发地震震级预测的神经网络模型	(52)
2.4.3	各种数学模型的对比分析	(59)
<b>第三章</b>	<b>岩体突变失稳机理</b>	(61)
3.1	用尖点突变理论解决工程地质问题的一般方法	(61)
3.2	层状岩体变形特性分析	(62)
3.2.1	基本原理	(62)
3.2.2	层状岩体的变形特性	(64)
3.3	反倾斜坡弯曲拉裂变形的尖点突变分析	(68)
3.3.1	反倾斜坡弯曲拉裂变形的尖点突变模型	(69)
3.3.2	斜坡失稳的条件	(71)
3.3.3	不同因素对斜坡稳定性的影响	(71)
3.3.4	实例分析	(73)
3.4	涨落诱发岩体失稳的机制分析	(75)
3.4.1	临界微扰诱发岩体失稳机制	(75)
3.4.2	超前强扰诱发岩体失稳机制	(76)
3.5	地震作用下结构非线性响应的突变分析	(78)
3.5.1	分析模型	(79)
3.5.2	结构振动特性的突变理论分析	(79)
<b>第四章</b>	<b>岩体失稳的动力学分析</b>	(84)
4.1	岩体平面摩擦动力学机制	(84)
4.1.1	单状态变量摩擦本构模型	(84)
4.1.2	双状态变量摩擦本构模型	(86)
4.2	考虑粘性力的平面滑动的动力学分析	(87)
4.2.1	粘弹动力学模型的基本形式	(89)
4.2.2	粘弹性体在恒定外力作用下的动力学行为	(89)
4.2.3	粘弹性体在振动荷载作用下的动力学行为	(90)
4.2.4	粘弹性体非线性振动系统的动力学行为	(92)
<b>第五章</b>	<b>斜坡演化特性的判定</b>	(96)
5.1	重建相空间	(96)
5.2	相空间维数	(97)
5.2.1	关联维数及其计算	(97)
5.2.2	实例分析	(98)
5.3	斜坡演化混沌性程度的 Lyapunov 指数判定	(100)
5.3.1	最大 Lyapunov 指数的计算	(100)

5.3.2 实例分析 .....	(101)
5.4 斜坡演化非线性特性的 BDS 统计分析 .....	(102)
5.5 非线性时滞相关性的判定 .....	(103)
5.5.1 时滞相关性指标 .....	(103)
5.5.2 实例分析 .....	(104)
5.6 斜坡演化趋势的 $R/S$ 分析 .....	(105)
5.6.1 $R/S$ 分析的基本原理 .....	(106)
5.6.2 实例分析 .....	(106)
<b>第六章 斜坡演化的自组织特征分析</b> .....	(108)
6.1 岩石破裂过程的自组织临界特征分析 .....	(108)
6.1.1 自组织临界现象——岩石累进性破坏的本质 .....	(108)
6.1.2 岩石破裂过程自组织现象的计算机模拟 .....	(112)
6.2 滑面形成的自组织过程 .....	(114)
6.3 斜坡演化的自组织特征分析 .....	(117)
6.3.1 斜坡演化自组织过程的定性描述 .....	(117)
6.3.2 斜坡演化规律的定量描述 .....	(118)
6.3.3 斜坡演化的动力学分析 .....	(119)
6.3.4 外界因素对滑坡的影响 .....	(121)
6.3.5 本章小结 .....	(124)
<b>第七章 斜坡失稳的预测预报</b> .....	(125)
7.1 斜坡失稳预测评价的重要性及研究现状 .....	(125)
7.2 用加卸载响应比理论探索斜坡失稳前兆 .....	(126)
7.2.1 加卸载响应比理论的基本原理 .....	(126)
7.2.2 固体潮应变理论值的计算 .....	(127)
7.2.3 实例分析 .....	(129)
7.3 斜坡失稳时间的协同预测模型 .....	(131)
7.3.1 协同学的基本思想 .....	(131)
7.3.2 斜坡的演化方程 .....	(132)
7.3.3 斜坡失稳时间的预测 .....	(133)
7.3.4 实例检验 .....	(134)
7.4 崩滑地质灾害全息预报理论 .....	(135)
7.4.1 崩滑地质灾害全息预报理论的学术思想 .....	(136)
7.4.2 全息预报的实施 .....	(136)
7.5 斜坡稳定性空间预测的神经网络方法 .....	(139)
7.5.1 实例一 .....	(139)
7.5.2 实例二 .....	(142)
7.6 滑坡发生频率的幂律规则 .....	(143)
<b>主要参考文献</b> .....	(147)

# 第一章 广义系统科学理论及 工程地质系统分析原理

## 1.1 广义系统科学的形成与发展

系统存在于世间万物,是人类迄今认识的重要事物之一。系统是相互作用着的若干要素的集合体。人们对系统的认识经历了从系统思想→系统观→一般系统论→广义系统科学这样一个由浅入深、由现象到本质、由感性认识到理性认识,再上升到理论体系的认识过程。从系统观逐渐发展到今天的系统论,经过了古代—近代—现代三个不同的历史阶段。它的产生决非偶然,而是有着深远的历史、思想渊源和现代科学技术基础的。

早在公元前,原子论的创史人德谟克利特(B. C. 460~370)在其著作《世界大系统》中首次采用了“系统”这个词,标志着古代朴素系统思想的出现。古代伟大哲学家亚里士多德最早提出了“整体大于部分之和”的论断,精辟地阐述了系统的本质特性,这种论断至今仍未过时。我国古代的《易经》、《洪范》以及《老子》中对宇宙、自然与人的认识也体现了古代朴素的系统思想。特别是《荀子·天论》中认为“万物为道一篇,一物为万物一篇”,即一物为万物的一部分,万物又为更大的道的一部分,这种思想体现了低层次与高层次之间、部分与整体之间的辩证关系。

在我国古代,人们不仅自然地应用系统思想认识世界,而且还有意识地用其改造世界,使系统思想直接转化为生产力。其典型事例有都江堰水利工程、北宋时所谓的“一举而三役济”的皇宫修建工程以及中国古代医学(中医)的系统思想。战国时期(B. C. 250),李冰父子修建都江堰水利工程,将“鱼嘴”岷江分水工程、“飞沙堰”分洪排沙工程、“宝瓶口”引入工程三者巧妙地结合起来,构成了一个结构精巧、和谐的水利系统。北宋大臣丁谓在皇宫修建时将施工工作分为挖沟(取土)→引水入沟(运入建筑材料)→填沟(处理垃圾、修复大道)三个互相依赖、互相衔接的阶段,也较好地体现了系统思想和最优化思想。同样,我国古代医学圣典《黄帝内经》把人的身体结构看作是自然界的一个组成部分,并提出了“天人相应”的理论,经络学说、阴阳学说、脏腑学说、五行学说等充满了系统思想和辩证法思想的医学理论,这些理论直至现在还指导着中医实践。

到了近代,对系统思想的形成有重大贡献的首先应提到伟大的数学家、物理学家和哲学家莱布尼茨(1746~1716)。他在《单子论》中指出“单子是事物的元素”,“宇宙是被规范在一种完满秩序的统一体系中”,这种认识已经注意到了系统具有一定的结构和组成要素,以及世界的统一性。他进一步指出“这种一切事物对每一事物的联系或适应,以及每一事物对一切事物的联系或适应,使每一个单纯实体具有表现其它一切事物的关系,并且使它因而成为宇宙的一面永恒的活的镜子”,这种观点已认识到了事物之间存在着联系和相互作用,以及系统的层次性和系统各个层次间的自相似性。同时,不可知论者和先验论者康德(1724~



1804)首先提出了知识的系统性问题,并初步提出了整体论、目的论的观点。近代辩证法大师黑格尔(1770~1831)在阐明和运用辩证法原理时也表达了系统观点。马克思、恩格斯曾明确地提出了系统的概念和系统思想,他们所创立的唯物辩证法认为:一切事物、过程乃至整个世界都是由无数相互联系、相互依赖、相互制约、相互作用的事物和过程形成的统一整体。马克思的政治经济学是把系统观运用于分析社会问题的典范。

真正把朴素的系统思想和系统观上升为理论的是近代生物学家贝塔朗菲(M. V. Beterlanffy, 1901~1972)。他于20世纪初在吸收当时生物学领域两大学派——机械简化论和新活力论的积极成果,克服二者不足的基础上创立了系统论。他发现一切生物都是在有限的时空中呈现出复杂的层次结构,都是由要素(部分)组成的有机整体,整体的功能大于组成它的部分之和。后来,他进一步研究表明,不仅仅是生物体,世界上大多事物都可以当作一个整体或系统来考虑,于是他力图寻找出适合于一切综合系统或子系统的概念、模式、原则和规律,来描述和概括与问题有关的客体,并将这些研究成果整理成册,于1968年出版了《一般系统论的基础、发展与应用》一书,创立了一般系统论。二次世界大战以后,控制论、信息论以及对策论、决策论、多元统计分析等一系列新的理论和数学方法的涌现和问世,大大丰富了系统论的内容。特别是1948年维纳(Weiner)提出的控制论和仙农(C. E. Shannon)提出的信息论,它们都是从不同侧面、不同角度对系统进行了更深一步的研究(控制论主要研究如何对系统实行有效控制,信息论主要研究系统中信息的传输)。因此,贝塔朗菲认为这些关于系统的新的研究成果都应包括在系统论中,于是他在1972年出版的《一般系统论的历史与现状》和1973年《一般系统论基础、发展与应用》修订版的序言中提出了广义系统论的概念,并进一步阐明了广义系统论的思想和理论框架。但是,从系统论迅速发展的今天来看,这种广义系统论仍仅具有“狭义”的性质。从以后的阐述将会看到,本书所指的广义系统论比当时贝塔朗菲的定义内容要广泛得多。因此,我们在本书中仍将贝塔朗菲所称作的“广义系统论”划为“一般系统论”的范畴。

70年代前后,关于系统的演化问题及其过程的非线性引起了人们的极大关注,出现了以耗散结构、协同学、超循环论、突变理论、神经网络理论为核心的非线性科学理论或自组织理论。如果说一般系统科学研究的是系统物理状态的构成要素之间的作用与联系,那么,自组织理论研究的就是系统的性质及其演化,如何从一种状态到达另一种新的状态。这方面的研究首先是普利高津(Prigogine, 1969)从化学系统的研究中取得进展。他从热力学第二定律出发,把稳定性、远离平衡态、序性等概念有机地结合起来,回答了开放系统“为什么”以及“如何”从无序走向有序的问题。他将大量性质完全不同的系统中产生的各种各样的有序结构归纳为空间有序、时间有序、时空有序三种形式,指出这种结构的形成是以消耗外界能量为条件,并依靠外界能量的不断供给来维持自身的结构,这种结构称为耗散结构。区别于孤立系统的平衡结构,耗散结构是“活的结构”。这一理论成功地解释了非线性系统的自组织现象,第一次建立了系统的自组织理论。接着,哈肯(H. Haken, 1970)的协同学问世。他克服了耗散结构理论的局限性,从物理系统出发,研究了系统如何在子系统的协同作用下,由无序走向有序的过程,回答了贝塔朗菲提出的耗散结构亦未能解决的目的性问题。而艾根(Manfred Eigen, 1971)的超循环论,则把信息、反馈、控制、耗散结构、突变论等理论和方法具体运用到第一个原始细胞结构形成的分析中,建立了非生命向生命过渡的自组织理论,沟通了无生命到生命的联系,大大发展了一般系统论,从根本上回答了系统的进化发展问题。这之

后,托姆(Thom,1972)提出了研究连续变化如何引起突然变化以及它与连续变化因素之间关系的突变理论;李天岩和约克(Yorke,1975)等提出了描述确定性系统表现出“初值敏感性”的随机行为(或无规运动)的混沌理论,从而提供了把复杂行为理解为有目的的某种行为的方法,而不是理解为外来的偶然行为。曼德尔布罗特(B. B. Mandelbrot,1973)为了定量描述各个层次系统的自相似行为,提出了分形理论。在广义系统科学中,还包括在40年代便已开始研究(Mcculloch 和 Pitts,1943),到80年代才趋于完善的神经网络理论。神经网络理论主要用于处理系统之间或某个系统的各组成要素之间复杂的非线性关系。同时,在非线科学的研究中,还经常用到70年代发展起来的重正化群方法和细胞自动机模拟方法,这些数学物理方法也是研究复杂的非线性系统强有力的手段和工具。

## 1.2 广义系统科学的理论体系

从上节广义系统科学的形成与发展历史可以看出,广义系统科学从大的方面主要包括一般系统科学和非线性科学。一般系统科学指“老三论”(具体包括系统论、控制论、信息论),它们主要研究系统本身的结构、组成要素及系统特性;如何对系统进行控制使其向有利的方向演化以及信息在系统中的运动规律。非线性科学包括“新三论”(耗散结构理论、协同学、突变理论)、超循环论、混沌动力学、分形理论、神经网络理论以及重正化群方法和细胞自动机模拟方法。它们的共同特点是研究对象不再停留于一般系统,而是具有高度非线性的复杂系统。非线性科学的诞生给系统科学注入了新的活力,大大丰富和发展了一般系统科学,它与一般系统科学理论一起,构成了如图1-1所示的广义系统科学完整的理论体系。为了便于理解本书以后各章的内容,现对构成广义系统科学的各门学科的主要思想、主要研究内容和研究方法作概略地介绍。

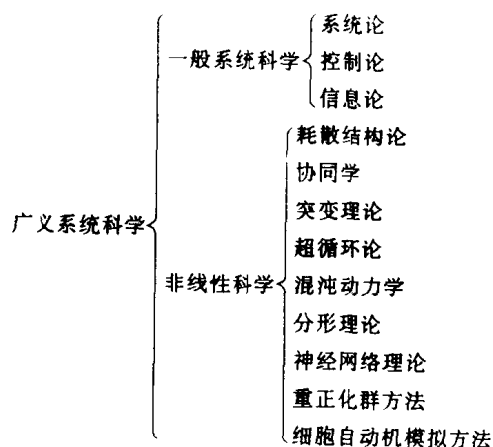


图1-1 广义系统科学的理论体系

### 1.2.1 系统论(systems)

一般认为,贝塔朗菲(Beterlanffy)于1932年发表的《理论生物学》是一般系统论的萌芽,真正对系统论作完整、系统的阐述则是他在1968年出版的《一般系统论的基础、发展与

应用》一书。

系统可以简单地定义为相互作用着的若干要素的复合体；或者说，系统是由若干相互联系、相互作用的部分，按照一定的结构所组成的具有一定新功能的有机整体。要素、结构和相互作用是构成系统三个不可缺少的因素。要素是构成系统的基本元素(单元)，结构是要素的组成方式，也即要素之间的“关系”。相互作用是指若干要素( $P$ )，处于若干关系( $R$ )中，以致于一个要素  $P$  在  $R$  中的行为不同于它在另一关系中的行为。

由要素通过相互作用构成系统的过程可以用如下数学语言来描述。设  $Q_i$  表示要素  $P_i$  ( $i=1, 2, \dots, n$ )的某个量，对于有限数目的要素，可表示为如下形式：

$$\left. \begin{aligned} \frac{dQ_1}{dt} &= f_1(Q_1, Q_2, Q_3, \dots, Q_n) \\ \frac{dQ_2}{dt} &= f_2(Q_1, Q_2, Q_3, \dots, Q_n) \\ &\dots\dots \\ \frac{dQ_n}{dt} &= f_n(Q_1, Q_2, Q_3, \dots, Q_n) \end{aligned} \right\} \quad (1-1)$$

上式表明，任何一个量  $Q_i$  不再孤立，都已纳入整个系统中，它的任何变化，都会引起其它所有量  $Q$ (从  $Q_1$  到  $Q_n$ )甚至整个系统发生或大或小的变化，因为各个要素间存在着相互作用(函数关系)。

式(1-1)仅是一个通式，在实际应用中可以将其具体化。最常用的办法是将式(1-1)右边项用泰勒(Talor)级数展开，再给出一定的限制条件，便可用于分析物质世界中许许多多的现象(如人口统计，生物物种的生存与竞争，城市的中心化等等)。本书在后面几章提到的诸如斜坡演化方程、平面摩擦系统动力学方程、岩体平面滑动动力学方程等都是方程(1-1)式的特殊形式和具体体现。

### 1.2.2 控制论(cybernetics)

控制论是第二次世界大战后出现的另一门新兴交叉学科，以1948年维纳(Weiner)发表《控制论》一书为标志。按维纳的定义，控制是在获取、加工和使用信息的基础上，控制主体使被控客体进行合乎目的的行为。根据上述定义，行为、目的和信息是控制论中重要的概念。在维纳《行为、目的和目的论》一文中，把“目的”理解为“由反馈来控制的目的”，目的是行为的向导，是行为最终结果的体现。控制的目的是在行为特征中表现为两个方面：一方面，当系统已处于所需要的状态时，就力图保持系统原状态稳定；另一方面，当系统不是处于所需的状态时，则引导系统由现有状态稳定地变到一种预期的状态。信息在控制过程中的作用也表现在两方面：一是要明确控制是否达到目的，就必须对系统的状态信息有所获取；二是要到达这种目的，则要了解环境变化信息以及系统偏离目的的信息。控制论研究的系统不是指一切系统，而是可控系统。世界上并不是一切系统都是可控的，例如地震。要达到对系统完全准确控制的目的，系统必须具有以下特征：可控性、目的性、可观性、闭环性以及多向性。控制系统的基本方式是反馈控制。所谓反馈，是指系统输出的全部或一部分通过一定的通道反送到系统的输入端(见图1-2)，从而对系统的输入和再输出施加影响的过程。反馈的作用后果有两种，一种是减弱输入信号，另一种是增强输入信号，前者称为负反馈，后者称为正反馈。负