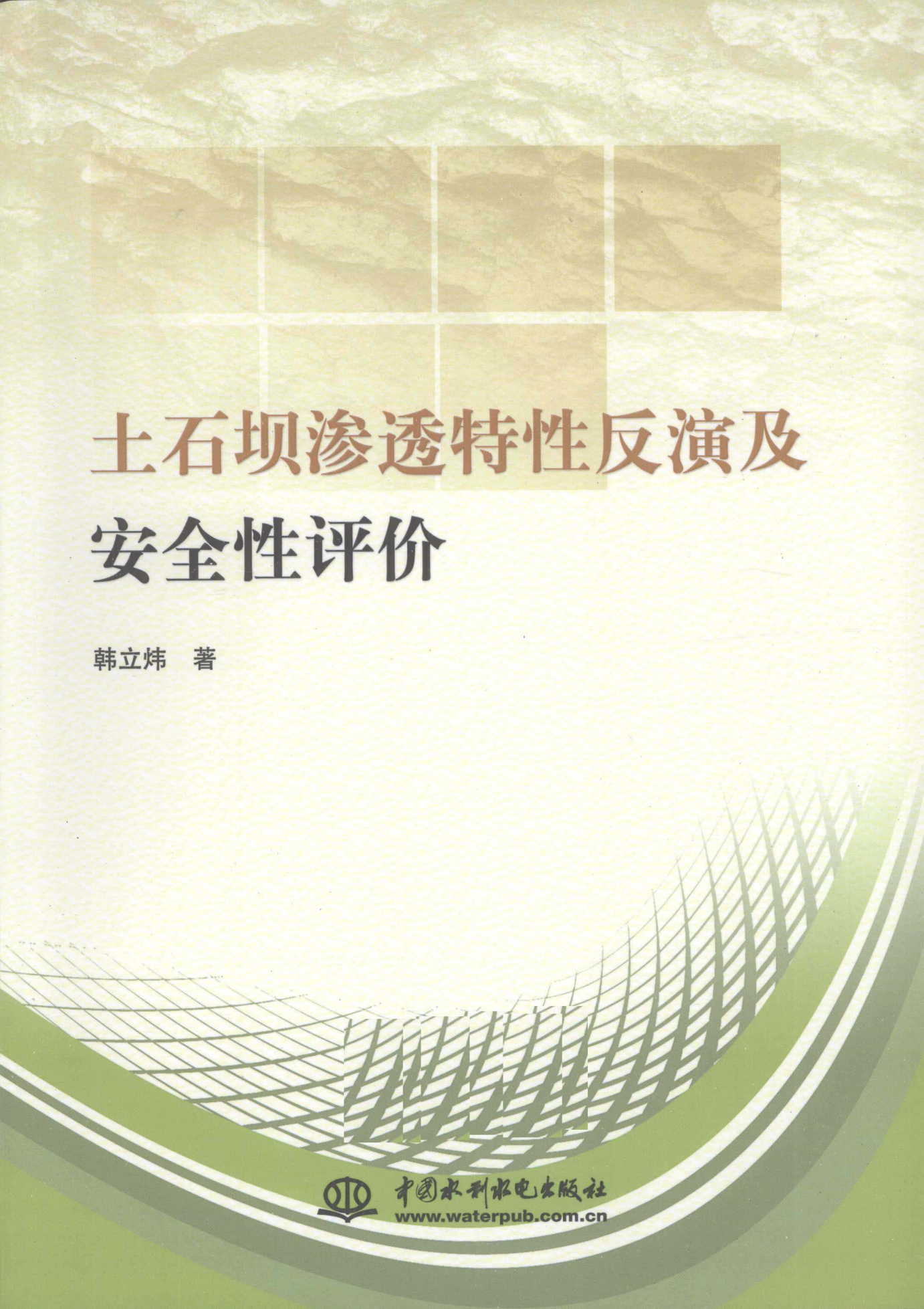




土石坝渗透特性反演及 安全性评价

韩立炜 著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

土石坝渗透特性反演及 安全性评价

韩立炜 著



中国水利水电出版社

www.waterpub.com.cn

内 容 提 要

本书紧扣土石坝渗透特性及安全性评价中存在的诸如不确定性、损伤识别困难等问题,首先引入能将模糊性和随机性综合考虑的云理论,在此基础上提出云神经网络模型。而后利用云理论进行土石坝安全监测及监控研究,建立渗透特性反演及时变模型、土石坝综合评价模型及损伤识别模型。

本书可作为水利水电工程、岩土工程和土木工程等领域进行相关的管理、规划与科研人员的参考用书,也可作为高等院校水利、岩土等专业的教师、本科生、研究生用书。

图书在版编目(CIP)数据

土石坝渗透特性反演及安全性评价 / 韩立炜著. --
北京:中国水利水电出版社, 2014.8
ISBN 978-7-5170-2473-6

I. ①土… II. ①韩… III. ①土石坝—渗透性—安全性—评价 IV. ①TV641

中国版本图书馆CIP数据核字(2014)第206610号

书 名	土石坝渗透特性反演及安全性评价
作 者	韩立炜 著
出版发行	中国水利水电出版社 (北京市海淀区玉渊潭南路1号D座 100038) 网址: www.waterpub.com.cn E-mail: sales@waterpub.com.cn 电话: (010) 68367658 (发行部)
经 售	北京科水图书销售中心(零售) 电话: (010) 88383994、63202643、68545874 全国各地新华书店和相关出版物销售网点
排 版	中国水利水电出版社微机排版中心
印 刷	大恒数码印刷(北京)有限公司
规 格	184mm×260mm 16开本 8.75印张 208千字
版 次	2014年8月第1版 2014年8月第1次印刷
定 价	38.00元

凡购买我社图书,如有缺页、倒页、脱页的,本社发行部负责调换

版权所有·侵权必究



前 言

我国是世界筑坝大国,无论筑坝数量和规模均居世界第一。在已建的 8.7 万多座大坝中,90%以上为土石坝,在西部大开发的拟建大坝中,土石坝也占绝大多数。据资料统计,在大坝失事事故中,土石坝所占比例高达 70.5%,目前全国病险水库大坝中绝大部分也是土石坝。因此加强土石坝施工过程和运行期工作状态的安全监测,实时分析评价,发现可能出现的异常情况,及时采取措施,防止事故发生,不仅对病险水库大坝除险加固有重要实用价值,而且对已建大坝的正常运行和提高土石坝的筑坝水平也有重要的指导意义。

本书提出了目前该领域存在的一些急需解决的问题和解决的方法。主要内容如下:

(1) 鉴于土石坝安全监测及渗透特性研究中广泛存在的不确定性,尤其是模糊性及随机性,引入云理论进行研究,所采用的方法包括云发生器、云推理、云变换、云概率密度分布等,并在此基础上提出云神经网络模型。

(2) 针对于土石坝工程中广泛存在的不确定性,提出了土石坝健康诊断的云神经网络算法。该方法不仅具有云推理较强的结构性知识表达及处理不确定性的能力,而且具有神经网络较强的非线性映射能力及自学习能力,其应用较好地考虑了土石坝系统中广泛存在的不确定性。

(3) 采用云模型、云神经网络算法建立了土石坝不确定性安全监控模型,资料分析表明,各种监控模型能够很好地模拟大坝实际渗流、变形工作状态,具有较高的精度。

(4) 针对渗透系数反分析过程中存在的不确定性,提出了基于云推理的反分析方法,在此基础上,建立了防渗体渗透系数的时变模型。即通过对历年防渗体渗透系数进行反分析,获取渗透系数随时间的变化规律,并据此诊断防渗体的健康状况。

(5) 根据损伤识别的需要,以测压管埋设断面来确定大坝的分区,建立起适合于损伤识别的土石坝分区综合评价模型;鉴于综合评价涉及大量的定性定量指标转换,而且有强烈的不确定性存在于综合评价过程中,提出了采用云模型进行定量、定性指标“软划分”,利用“软与”运算实现综合评价,

从而建立了土石坝综合评价模型；并将云神经网络应用于巡视检查评价当中。

(6) 通过对防渗体各种损伤类型的分析，得到防渗体的各种损伤都会表现出防渗性能改变的结论，从而确定了利用两排测压管水位反演处于其间的防渗体渗透系数，以进行损伤识别并评价其渗流特性的方法；将云神经网络应用于渗透系数反演分析，分析结果表明精度满足要求；最后利用云模型进行结果处理，形象直观地得出各小块防渗体的损伤程度。

本书部分内容由笔者博士论文和近年来对土石坝渗透特性反演及安全性评价等方面研究基础上凝练而成。相关资料的收集、整理得到了郑州大学水利与环境学院、陆浑水库管理部门等老师、同仁的大力支持与帮助；另外，部分理论也参考和借鉴了国内外相关论著；本书的出版也得到了国家自然科学基金面上项目（51279064），河南省教育厅科技创新人才支持计划（14HASTIT047）、河南省教育厅科技创新团队支持计划（14IRTSTHN028）的资助，在此表示感谢。

土石坝渗透特性反演及安全性评价是一个涉及面较广且复杂的领域，目前仍有诸多问题有待于进一步的研究，由于作者水平有限，错误和不足之处恳请专家和读者批评指正。

作者

2014年6月

目 录

前言

第1章 绪论	1
1.1 研究背景及意义	1
1.2 知识的不确定性	3
1.3 国内外研究现状及发展趋势	6
1.4 研究目的	12
参考文献	13
第2章 云理论	17
2.1 云模型	17
2.2 云概率密度	32
2.3 云神经网络模型	40
2.4 最小二乘支持向量机	44
参考文献	46
第3章 土石坝安全监测及安全监控模型	48
3.1 土石坝安全监测	48
3.2 土石坝渗流观测资料分析	53
3.3 土石坝沉降观测资料分析	58
3.4 实例分析	60
参考文献	77
第4章 渗透系数反分析及时变模型	79
4.1 有限元计算方法	79
4.2 渗透系数反演及时变模型	88
4.3 应用实例	90
参考文献	100
第5章 土石坝综合评价模型	101
5.1 评价指标的设置	101
5.2 评价指标的度量方法	103
5.3 基于云模型的综合评价	110

5.4 应用实例	111
参考文献	116
第 6 章 防渗体损伤识别模型	117
6.1 损伤识别模型的基本框架	117
6.2 损伤识别模型的实现	121
6.3 基于云神经网络的损伤识别	125
参考文献	129
第 7 章 结论与展望	131
7.1 主要结论与成果	131
7.2 展望	132

第 1 章 绪 论

1.1 研究背景及意义

我国水资源贫乏,年径流总量约 2.78×10^4 亿 m^3 ,人均约 2140m^3 ;我国水能资源却十分丰富,据最新复查资料,我国大陆的水电理论蕴含量约 6.944 亿 kW,其中,技术可开发利用量达 5.416 亿 kW,居世界首位。新中国成立之初,全国坝高 15m 以上的水库仅 22 座,江河堤防只有 4.2 万 km。到 2007 年,根据水利部开展的全国水库大坝安全状况普查统计资料,我国已建成各类水库 87085 座(不含港、澳、台地区),其中大型水库 510 座、中型水库 3260 多座,小型水库更是星罗棋布,水利工程年供水能力达到 6591 亿 m^3 ,累计解决了 2.72 亿农村人口的饮水困难和 1.65 亿农村人口的饮水安全问题;已修建堤防 28.69 万 km,防洪保护区 5.7 亿人口、4.6 万 hm^2 耕地以及重要基础设施的防洪安全基本得到保障;建成小型水电站(装机容量 5 万 kW 以下)4.5 万余座,总装机容量 5127 万 kW;全国农田灌溉面积扩大到 8.77 亿亩,占世界总额的 1/5,居世界首位;累计初步治理水土流失面积 101.6 万 km^2 ,实施封育保护面积 72 万多 km^2 。

但是,在对新中国成立以来水利建设的成就作出应有评价的同时,也应该清醒地看到,我国水利工程重建设轻管理的问题依然十分突出。仅就水工建筑物的安全运行而言,比较突出的问题表现为:各类水工建筑物的监测与检测设施尚不够完善,对水工建筑物内在缺陷监测与检测的技术不够先进,还缺乏对大型建筑物运行安全可靠的健康诊断方法,很多建筑物由于内在缺陷得不到及时的诊断和修复致使其功能失效等。

我国目前已建成的 8.7 万多座大坝中,90% 以上为土石坝。由于历史原因和当时的经济、技术条件,一些大坝的安全度较低或者设计标准偏低等,以及多年运行,年久失修,约有 1/3 的大坝存在较多的隐患和老化病害,尤其是中小型水库其病害更为严重,影响着这些工程效益的发挥,甚至威胁下游人民的生命财产安全。

据资料统计,在大坝失事事故中,土石坝所占比例高达 70.5%,目前全国病险水库大坝中绝大部分也是土石坝。1954—2003 年 50 年中的溃坝事故共 3481 起,其中大型水库 2 起,中型水库 123 起,小型水库 3356 起。统计的区域涉及全国除台湾以外的 31 个省、自治区、直辖市(暂将重庆市的有关数据统计入四川省,未将其单独列出)。对于中国溃坝失事的统计先后进行过三次,图 1.1 给出了第三次统计的统计结果:①溃坝事件的发生具有明显的三次高峰期,分别是 1959—1962 年、1971—1981 和 1990—1994 年;②20 世纪 70 年代溃坝数量最多,按溃坝数多少进行排序,排在前三位的依次是 1973 年、1974 年和 1975 年,对应溃坝数分别达到 556 座、396 座和 291 座;③自 1982 年之后,溃坝数量明显减少。将垮坝失事原因分为漫坝(泄洪能力不足和超标准洪水两种情况)、质量问

题、管理不当、其他原因和原因不详 5 类，对全国 1954—2003 年 50 年中已溃水库的溃坝原因进行统计，统计结果如图 1.2 所示。

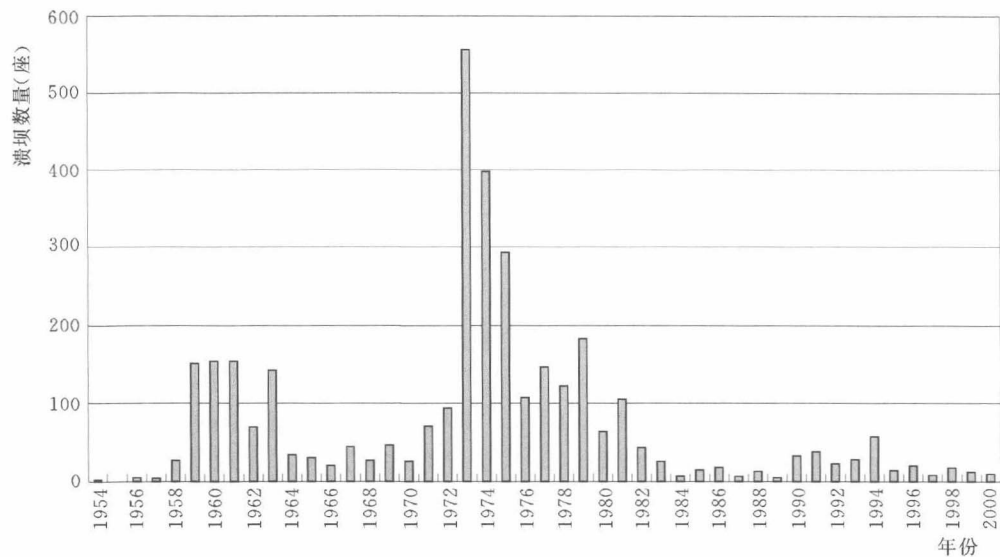


图 1.1 1954—2003 年历年溃坝数量统计

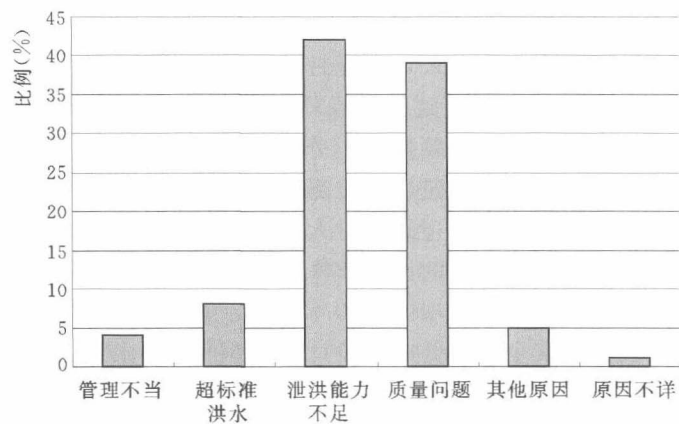


图 1.2 20 世纪 70 年代各种溃坝原因导致溃坝数占相应溃坝数比例

另外，随着水能资源的深入开发，一些新建或待建的大坝坝址的地质条件越来越复杂，大坝的规模也越来越大，增加了大坝出事的风险因素。如近些年来我国已建坝高在 150m 以上的工程，有二滩、龙羊峡、乌江渡、白山、三峡等，对这些水利工程实施安全检（监）测和健康诊断十分必要。

水工建筑物的特点，不仅表现在投资大、效益大，设计施工复杂，也表现在其失事后果严重。大坝建成后，随着结构老化以及其他随机性的原因，出现事故也难于完全避免。另外，水工建筑物在复杂的自然条件影响下，在各种外力的作用下，其状态和工作情况始终不断地在变化着。水工建筑物究竟有没有病害，能否安全运用、发挥效益，必须通过对

水工建筑物进行认真系统的监测，及时掌握水库的变化动态，发现不正常情况，及时采取加固补强措施，把事故消灭在萌芽状态，以确保水工建筑物的安全运用。而且，由于材料性能、施工过程中的人为等因素，随着时间推移，大坝存在不同程度的老化、病变和裂缝等问题。这些缺陷或隐患问题若不能够被及时诊断发现并采取措施解决，将会时刻影响大坝的安全运行，严重情况下将会导致大坝溃决等灾难性事故。因此加强水工结构的安全监测和健康诊断是水利工程运行特点的需要。

从上面的分析可以提高对大坝安全认识的透明度，同时也使人们逐渐认识到：为了保证结构的安全性、完整性、适用性和耐久性，已建的大坝急需采用有效的技术手段监测和评定其安全状况，发现可能出现的异常情况，及时采取措施修复和控制结构损伤，防止事故发生，不仅对病险水库大坝除险加固有重要实用价值，而且对已建大坝的正常运行也有重要的指导意义；同时，对新建的大坝应总结以往的经验教训，在工程建设的同时安装长期的结构健康诊断系统，为监测结构服役期间的损伤演化规律提供有效和直接的试验平台，这对提高土石坝的筑坝水平也有重要的指导意义。因此，重大工程结构的健康诊断已经成为世界范围内的前沿研究方向。

1.2 知识的不确定性

具有不确定性的现象与事物，普遍存在于自然界和人类社会中。如何表示和处理不确定性现象与事物，一直是自然科学研究的热点和重点，也是一个瓶颈性问题。在各类不确定性中，随机性、模糊性最为关键，受到了人们更多的关注。

知识的不确定性，首先体现在语言的不确定性上，因为语言是知识的载体。知识的不确定性，还反映在常识知识上，因为它通常是知识的知识，也称为元知识，是其他专业知识的基础。常识通常也是用自然语言表达的。语言中的基本单元是语言值，对应于一个个的概念，概念的不确定性有多个方面，主要有随机性和模糊性。

研究随机现象的主要工具是概率理论，概率论有着坚实的理论基础，能够很好表示和处理随机不确定性。而自从 Zadeh 博士 1965 年发表了模糊集合的开创性成果后，模糊集合理论成为处理模糊不确定的主要工具，在理论和应用中已取得有目共睹的诸多成就。

1.2.1 随机性和正态分布

何谓随机性？在自然界与人类社会中，经常会遇到这样的一种现象，在完全相同的条件下，一个实验或观察（统称为实验）出现的结果可能是不同的，这种现象称为随机现象。其特点是可重复观察，在观察之前知道所有可能的结果，但不知道到底哪一个结果会出现。这种现象是一种由客观条件决定的不确定现象，这是因为事件发生的条件不充分，使得条件与结果之间没有必然的因果关系，因而在事件的出现与否上表现出不确定性。

具有随机性的事件具有的特点：①事件可以在基本相同的条件下重复进行，如以同一门炮向同一目标多次射击；只有单一的偶然过程而无法判定它的可重复性则不称为随机事件；②在基本相同条件下某事件可能以多种方式表现出来，事先不能确定它以何种特定方式发生，如不论怎样控制炮的射击条件，在射击前都不能毫无误差地预测弹着点的位置；

只有唯一可能性的过程不是随机事件；③事先可以预见该事件以各种方式出现的所有可能性，预见它以某种特定方式出现的概率，即在重复过程中出现的频率，如大量射击时炮弹的弹着点呈正态分布，每个弹着点在一定范围内有确定的概率；在重复发生时没有确定概率的现象不是同一过程的随机事件。

研究随机现象的最基本工具是随机变量，分布函数是随机变量最重要的概率特征，它可以完全描绘随机变量的统计规律。在概率论与随机过程的理论研究和实际应用中，正态分布起着特别重要的作用，在各种概率分布中居于首要的地位。正态分布函数形式为

$$F(x, \mu, \sigma^2) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma}} \int_{-\infty}^x e^{-\frac{(u-\mu)^2}{2\sigma^2}} du \quad (1.1)$$

概率密度函数为

$$f(x, \mu, \sigma^2) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma}} e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}} \quad (1.2)$$

式中， μ 、 σ^2 分别是正态分布的期望和方差，分别表征随机变量的最可能取值以及一切可能取值的分散程度。

正态分布广泛存在于自然现象、社会现象、科学技术以及生产活动中，在实际中遇到的许多随机现象都服从或者近似服从正态分布，例如，正常生产条件下的产品质量指标，随机测量误差，同一生物群体的某种特征，某地的年平均气温等。中心极限定理从理论上阐述了产生正态分布的条件。对中心极限定理的简单直观说明：如果决定某一随机变量结果的是大量微小的、独立的随机因素之和，并且每一因素的单独作用相对均匀地小，没有一种因素可起到压倒一切的主导作用，那么这个随机变量一般近似于正态分布。例如，某种成批生产的产品，如果工艺、设备、技术、操作、原料等生产条件正常且稳定，那么产品的质量指标应该近似服从正态分布；否则说明生产条件不稳定或发生变化，影响了产品质量。在实际应用中，人们多是根据上述考虑来判断随机现象是否服从正态分布的。正态分布是许多重要概率分布的极限分布，许多非正态的随机变量是正态随机变量的函数，正态分布的密度函数和分布函数有各种很好的性质和比较简单的数学形式，这些都使得正态分布在理论和实际中应用非常广泛。

1.2.2 模糊性和正态隶属函数

模糊性又称非明晰性，它的出现是由于概念本身是模糊的，一个对象是否符合这个概念难于确定，在质上没有明确含义，在量上没有明确界限。这种边界不清的性质不是由于认得主观认识造成的，而是事物的一种客观属性，是概念外延的不确定性质。

隶属函数是模糊集合理论的基石，它是度量模糊程度的函数。通过隶属函数，模糊理论将模糊现象转变成精确数学加以研究。从模糊集合的开创者 Zadeh 开始，近 40 年来，人们普遍接受并使用的模糊集合及隶属函数定义，可表述如下：

若对论域（研究的范围） U 中的任一元素 x ，都有一个数 $A(x) \in \{0, 1\}$ 与之对应，则称 A 为 U 上的模糊集， $A(x)$ 称为 x 对 A 的隶属度。当 x 在 U 中变动时， $A(x)$ 就是一个函数，称为 A 的隶属函数。隶属度 $A(x)$ 越接近于 1，表示 x 属于 A 的程度越高，

$A(x)$ 越接近于 0, 表示 x 属于 A 的程度越低。用取值于区间 $\{0,1\}$ 的隶属函数 $A(x)$ 表征 x 属于 A 的程度高低。

隶属度属于模糊评价函数里的概念: 模糊综合评价是对受多种因素影响的事物作出全面评价的一种十分有效的多因素决策方法, 其特点是评价结果不是绝对地肯定或否定, 而是以一个模糊集合来表示。

自然和社会科学中的大量模糊概念的隶属函数, 并没有严格的确定方法, 通常靠经验确定, 归纳起来大致有 6 种形态, 为简便起见, 这里仅取它们的简化解析形式:

(1) 线性隶属函数: $\mu_A(x) = 1 - kx$ 。

(2) Γ 隶属函数: $\mu_A(x) = e^{-kx}$ 。

(3) 凹 (凸) 形隶属函数: $\mu_A(x) = 1 - ax^{-k}$ 。

(4) 柯西隶属函数: $\mu_A(x) = \frac{1}{1 + kx^2}$ 。

(5) 岭形隶属函数: $\mu_A(x) = \frac{1}{2} - \frac{1}{2} \sin\left(\frac{\pi}{b-a} \times \frac{x-(b-a)}{2}\right)$ 。

(6) 正态隶属函数: $\mu_A(x) = e^{-\frac{(x-a)^2}{2b^2}}$ 。

在描述模糊概念的亦此亦彼性的时候, 前 3 种隶属函数形态在亦此亦彼性的刻画上, 虽然连续, 但出现突变点, 即函数曲线的一阶导数不连续, 这种突变不符合中介过渡性质的渐变特征。如果认为模糊性在宏观和微观上都存在, 概念在不同尺度上都连续, 则高阶导数也应该连续。另外, 隶属函数在靠近“亦此”或“亦彼”区间的变化率反而较大, 也不符合一般的认识规律。因此这 3 种隶属函数仅用在一些简单的场合。

中国学者张南伦等曾经用统计方法对模糊概念“青年人”求得的隶属度为例对柯西、岭形、正态 3 种函数形态进行比较分析, 均方差最小的是正态隶属函数。

结果表明, 对大量模糊概念, 用正态隶属函数刻画最适合, 最接近人类思维。实际上, 人们对搜集到的各类隶属函数进行分析发现, 许多领域的隶属函数都和正态隶属函数有相当的一致性, 并且大多数都是正态隶属函数泰勒展开式的若干低次项之和, 是正态隶属函数的一种近似。因此有理由相信, 相对于其他类型函数, 正态隶属函数在众多领域有着最广泛的应用。

1.2.3 随机性、模糊性的关联之云模型

针对于随机性, 在强调正态分布的地位同时, 必须认识到许多随机现象不能用正态分布来描绘。如果决定随机现象的因素单独作用不是均匀的小, 相互之间并不独立, 有一定程度的相互依赖, 就不能够符合正态分布的产生条件, 不构成正态分布, 或者只能用正态分布来近似处理。概率论用联合分布来处理这类情况, 但是通常联合概率分布的确定非常复杂, 难以实际应用。李德毅院士提出用云模型来描述这类随机性, 将正态分布扩展为泛正态, 用一个新的独立参数——超熵, 来衡量偏离正态分布的程度, 这种处理方法比单纯用正态条件分布更为宽松, 同时比联合分布简单, 易于表示和操作。

对于模糊性而言, 在精确的隶属函数确定之后, 就可以计算论域中的值属于这个模糊概念的隶属度, 这是一个唯一的、精确的数值。这种用精确的隶属函数来严格表示模糊概

念,得到完全确定的、清晰的关系,本身违背了模糊学的基本精神,已经完全被纳入精确数学范畴而没有丝毫的模糊性可言。因此,隶属度的分布特性和分布函数受到越来越多的研究,允许隶属度在一个中心值附近做微小摆动,即将精确隶属度用一个有稳定倾向的随机数来代替,将精确隶属函数用一个有稳定倾向的期望隶属曲线表示,成为研究不确定性知识表示的重要方法。

尽管随机性和模糊性是从两种不同出发点研究引出的不确定性,表示可能性的隶属度和表示随机性的概率分别出自不同的学科分支,但是采用统计的方法确定隶属函数已经成为事实上的重要方法。于是,研究人类认知过程中模糊性和随机性之间存在的关联显得十分必要。假设取能够代表一个模糊概念的样本点集,那么具有较大隶属度的样本显然应该有较大的获取概率,传统的隶属函数无法反映出它与随机性的这种关联。因此,为了将随机性和模糊性有机的综合在一起,引入云理论进行处理。

1.3 国内外研究现状及发展趋势

从 20 世纪 50 年代起人们就开始了相关方面的研究,致力于建立一套完整的土石坝健康诊断系统,包括在坝体及坝基内埋设各种监测仪器,以定期或实时监测埋设仪器部位的变形、渗流(渗透压力和渗流量)等,并通过对这些监测资料的分析和反分析,评价和监控土石坝结构的安全状况。据此建立各类监控模型和监控指标,结合有关大坝安全的设计、施工、运行管理、规范和法规等方面的知识和监测资料,对大坝的安全状况进行分析评价和监控,对出现的异常或险情进行物理成因解析,提出辅助决策建议。

但是由于:①土石坝的工作条件十分复杂,其健康状况反映在诸多方面,包括变形、渗流、应力等;②土石坝是一个非常复杂的结构,坝体材料分区多,非线性强,离散性大,材料参数随着工程的运行也会发生变化;③土石坝的安全受着水文、气象、地形、地质、施工条件、运行管理等方面的影响,而这些因素均处于不断的动态变化之中,这就使得水库大坝的安全运行和管理充满了各种不确定性,安全监控数据也充满了不确定性。上述特性决定了土石坝健康诊断不同于一般结构的健康诊断。

至今,国内外坝工界对大坝的健康诊断研究尚处于起步阶段,常用的方法是对单项监测效应量(如变形、渗流等)的监测和检测等实测资料进行分析,然后应用数学、力学方法,建立各种数学监控模型对大坝进行安全评价和监控,以分析和监控土石坝的健康状况。

以往进行土石坝健康诊断时,仅仅用单项监测效应量的数学监控模型进行分析,存在一定的不足:各个单项监测效应量之间的关系从表面上看是互相独立的,实际上相互之间有一定的联系,如变形、渗流、应力等之间互有影响,这就导致了单项分析有时难于准确诊断土石坝的健康状况;影响土石坝健康的各个因素的作用,有可能原来是次要的影响因素转化为主要影响因素的情况,得出不符合实际情况的结论。因此,土石坝健康综合诊断问题是一个多项目、多层次的递阶分析问题,不仅要考虑单个测点、单个项目所反映的局部性态,还要考虑多个测点、多个项目所反映的整体性态。为对整个土石坝的健康给出诊断结果,有必要建立一套比较完整的、科学合理的综合健康诊断结构体系。

下面分项叙述各方面的国内外研究现状。

1.3.1 土石坝中存在的确定性

大坝是一个多参数、非线性、时变的不稳定系统，系统中的事物、概念、实体或现象等基本都同时具备多种不确定性。其中，随机性和模糊性又是这种空间不确定性的主要内容。由于坝体及其坝基岩土体物理参数的空间变异性和时间动态变化等特点，以及大坝所处自然环境条件和可能促使其破坏失事的触发因素、发生时间及其动态过程的随机性，致使大坝安全监控与评价的过程和结果不可避免地存在不确定性。其次，在大坝中应用的各种知识既有规律性的真理，又有大量不完全的直觉经验。如果使得大坝监测数据易于接受、理解和运用，那么最好用自然语言来表示发现的过程和结果。可是自然语言描述的各种属性，具有强烈的不确定性。而且模糊性和随机性同时出现的情况较为常见。因此，在围绕数据并顾及不确定性的大坝健康诊断中，定性知识的表示、定性定量的相互转换以及定性推理机制等就成为不可回避的问题。

不确定性因素主要体现在以下方面：

(1) 量测信息的不确定性。在土石坝工程中，对于量测信息，由于量测技术和量测方法的限制，外界偶然扰动因素如仪器的机械振动及人读数时的偶然误差，以及由于土体本身复杂、随机和离散不确定性，内部各介质接触面在施工中随机变化而导致的量测信息本身的随机不定性，信息真值是不可能量测到的。量测信息是一个随机过程，因而其信息具有不确定性。

(2) 材料参数的不确定性。由于土体材料组成、结构和构造的不同，导致其不可能是绝对均质的，也不可避免地存在缺陷、软弱层等，这些不利因素是工程破坏的主要原因之一，在工程分析中扮演了重要角色。而这些不利因素的发展本身是不确定的，因而导致了材料参数的不确定性。

首先岩土性质本身在空间上具有明显的变异性，时间上也有可变性。实际工程中，土体内存在众多的薄弱层，必然导致参数空间上的极大可变性。对一定范围内的土体而言，其材料的空间均值也存在不确定性。土体一般都具有流变特性，材料参数随着时间的变化而变化。其次由于模型试验中存在试验误差、岩土参数测试中的条件与实际情况有出入而引起的误差都会导致岩土参数的不确定性。

(3) 荷载的不确定性。在岩土工程中，荷载是不确定性存在的第二个原因。实际工程中，不管是人为还是自然荷载，往往很难精确测量其量值。对于临时或活荷载，更要考虑其不确定性对工程的影响。其一是初始地应力场具有不确定性，其二是上下游水位的变化往往难于预料，由于水位的不确定性，导致坝体坝基孔隙水压力的不确定性。

(4) 几何尺寸的不确定性。一般而言，在计算中几何尺寸的改变引起的变异性很小，但也不排除在敏感部位几何尺寸存在的微小变化带来的显著影响。裂缝等薄弱部位的几何尺寸一般很难把握，而这些对计算坝体应力场和耦合场至关重要。但由于几何不确定性有限元计算的复杂性，至今国内外研究成果还很少。

(5) 初始条件和边界条件的不确定性。无论是应力场还是渗流场的计算分析，都离不开边界条件。初始条件和边界条件的不确定性来源于实际问题的复杂性、初始条件和边界

条件的不可预知性、人们认识的局限性以及对问题的等效简化处理。

(6) 计算模型的不确定性。由于实际工程材料的复杂性,一般可根据室内试验、地质资料甚至经验初步确定材料模型类别。但符合建模原则的最佳模型应该只有一个,这正是模型识别理论的工程背景。事实上,不论采用何种本构理论和强度准则都难于绝对准确地反映材料的本构关系和破坏特征。至今,人们已经提出了许多对应于不同材料的本构模型和强度准则,不同模型侧重点各不相同。然而怎样确定材料的性质,如岩体何时为硬岩何时为软岩,就是一个模糊概念。计算模型的不确定性问题在国际上已经受到重视,然而,至今仅见到针对一些简单问题的零星报道。

对不确定性的研究,有多种方法。最早、最成熟的方法是概率理论,它从事件发生的必然性和偶然性出发,形成概率论、随机过程和数理统计三大分支。可是概率统计难于被用于研究“渗流不安全”等定性概念的模糊性,因为样本的参量之间可能事实上就不存在有价值的统计规律,而只存在少许可供参考性,所以证据理论对概率论的扩充、概率矢量对随机概率的空间分布描述、具有平稳性的空间统计学等,都是概率统计在不同应用学科中的扩展,也没有脱离该局限性。

后来出现的模糊集理论和粗糙集理论,从事件亦此亦彼性出发,将不确定性映射为 $[0, 1]$ 区间上的数值来抽象逼近,却没有估计事件发生的随机性。粗集以自己的上近似集和下近似集为基础,把包括二者在内的所有不确定性置之边界集而笼统考虑,也有待进一步研究。更通常的不确定性度量是通过熵来定义的,有热力学熵、信息熵等。对于确定系统中的不确定性研究,还有混沌和分形方法。这些方法只是从不同的视图去研究不确定性,固然有切入点明确、边界条件约束清楚、便于对问题深入研究的一面,但也常常带来视图的局限性。

那么,在现有的数学模型中,是如传统的经典数学一样同时抛弃随机性和模糊性?还是像概率统计一样仅仅考虑随机性,而抛弃模糊性?还是如模糊集仅仅考虑模糊性,而抛弃随机性,或者像粗集一样把随机性和模糊性笼统考虑,而留下一个难于解决的边界集问题(Wang et al., 2003)。

实际上,一个复杂系统的复杂性与分析它所能达到的精度相互之间服从一个粗略的反比关系,片面追求精确,可能陷入困境(黄崇福,王家鼎,1995)。在一定条件下,确定性和不确定性可以相互转换,宏观精确的实体在微观环境中可能变得不确定,在一定程度上还不确定的实体,如果有关认识已经满足决策等的需要,那么原有的认识就已达到了一定的精确性。仅仅使用实体的确定性或不确定性的一种,来完全取代他的所有不确定性,是不可能全面研究该实体的。

为了解决上述瓶颈问题,处理定性概念中广泛存在的随机性和模糊性,李德毅院士提出了包括基本云模型、云发生器、虚拟云、云变换和云可视化等内容在内的云模型。云模型具有宏观精确,微观模糊;宏观可控,微观不可控的特点。其本质单位是云滴组成的概念云,思想是兼顾了随机性和模糊性的精确。它把自言语言中的模糊性和随机性有机地综合在一起,构成定性和定量互相间的映射,不但突破了概率统计的数理统计的“硬计算”局限性,而且解决了作为模糊集理论基石的隶属函数的固有缺陷,破除了粗集边界集的局限性,提供了一套解决大坝不确定性问题的新方法和新技术。云模型作为一种一般性的数

学理论，巧妙地实现了定性定量之间的自由数学转换，其方法和技术发展至今已经被广泛应用于知识发现、数据挖掘、智能控制、调频电台和大系统效能评估中，解决或解释自然、社会或现象，并取得了显著的成效（李德毅、杜鹃，2005）。

在云神经网络算法方面，柳炳祥等探讨了基于云理论与神经网络混合集成的模糊系统；Tian Yongqing 等结合神经网络的学习算法和云决策树的推理方法，建立了 TS 型云神经网络；田永青等建立了 TS 型云神经网络进行税收预测；孙灵芳等基于云理论提出了一种用正态云来替代高斯径向基函数的 RBF 神经网络改进算法。

1.3.2 土石坝安全监控研究进展

国外于 20 世纪 30 年代就开始对监测资料进行分析，主要代表有 D. Tonini 和 M. Rocha，他们首次将影响大坝位移的因素归为水位、温度和时效三个分量，以函数式表达各个分量，然后用回归分析建立回归模型。P. Bonaldi 等用有限元计算了水位和温度及时效的统计模式，然后用最小二乘法建立确定性模型或混合模型，借以评价和监控大坝的安全状况，用时效分量的变化规律分析了大坝的安全变化趋势。目前，国外大坝安全监测的研究大部分集中在监测系统应用方面，Sellers. B、De Miranda、Portelaa、Rutledge 等分别对大坝监测数据的实时处理、自动获取以及 GPS 在大坝安全监测中的应用进行了研究；Pircher 等从观测数据方面研究了大坝安全监控方法；Peyras 等从大坝的老化等因素出发对大坝的安全监控做了研究。国外对土石坝安全监测的基础性研究很少。

国内在 1974 年以前，主要通过绘制过程线及统计最大与最小值等特征值，借以定性分析和评价大坝的运行状况。其后陈久宇等开创了应用统计回归法建立统计模型，以分析评价大坝的安全状况。吴中如在前人工作的基础上，进行全面系统的总结、发展和创新，建立了大坝与坝基安全监控模型体系，包括对统计模型、确定性模型、混合模型的因子用坝工理论和力学原理等进行分析和演绎，应用多种统计数学，结合实测资料，建立了各类监测量的测点及空间位移量的统计模型；或用有限元分析计算水压分量、温度分量和时效分量或仅计算水压分量，结合实测资料，用范数的最小二乘法，建立了测压孔和变形测点及空间位移场的确定性模型和混合模型等；与此同时，应用时序分析法、灰色系统、模糊数学、混沌理论、神经网络等建立了预测模型。

在土石坝的模型方法研究方面，吴中如、顾冲时等作了比较多的基础研究；徐竹青、徐晖等分别将灰色系统理论应用于土石坝资料分析，建立了沉降状态的灰色模型；郇能惠等基于土石坝变形和孔隙水压力产生机理的分析，提出了较合理的统计分析方法；徐洪钟等将模糊数学与神经网络相结合，将构成组合模型的各个子模型作为网络学习矩阵输入，建立土石坝沉降组合模型，采用自适应模糊神经网络进行组合预测；邓念武等运用 BP 神经网络克服了模型必须是基本观测量的线性和非线性组合的局限性，将 BP 模型应用于土石坝空间位移分析，实现了大坝空间位移的拟合和预测；唐彤芝等考虑库水位升降速率及各因子耦合的影响，建立了面板堆石坝沉降统计预测模型；王初生等根据土石坝坝基水文地质特征的差异性及渗流场的非平面性，将多元回归数学模型应用于坝基渗流稳定性预测中。

1.3.3 反分析研究存在问题

由于岩土材料的复杂性和不可预见性,使得岩土工程材料参数的确定问题一直成为人们定量认识这一工程领域中的各种行为、现象的主要障碍。已经发展起来的反分析方法成为解决这一问题的较理想手段,使得人们能够在某种程度上从定性到定量地认识问题的本质。

所谓反分析,即以现场量测到的、反映系统行为的某些物理量(如位移、应力应变或渗流量等)为基础,通过反演模型(系统的物理性质模型及数学描述)推算得到该系统的各项或某些初始参数(如初始应力、本构模型参数等)的方法。其目的是建立接近现场实测结果的理论预测模型,能够较准确地反映岩土结构的某些力学行为。

自20世纪60年代以来,国内外学者对岩土工程渗流特性反分析进行了大量研究,取得了众多成果,但是,由于具体问题的地质条件不同,参数在空间分布的不均性及反分析固有的不适定性等诸多因素影响,在渗流特性反分析研究方面还有很多工作要做。

在反分析方法方面,正演优化法(直接法)由于其具有能够根据工程实际情况构建较为合理的数值模型,确定参数的大致范围,而后采用一定的优化策略即可实现参数识别的特点,因而实现过程简单,适用面广,能够解决岩土工程中的绝大多数复杂问题,因而是目前实现反分析过程所采用的最普遍方式。从直接法的步骤可以看出,其关键是采用高效、鲁棒的优化算法来求解其中的参数。因而,通过选取或设计有效的优化算法来提高反演结果的精度和可信度,成为研究人员关注的重点。

人工神经网络近几年来发展迅速,由于利用神经网络近似代替结构有限元分析计算,可以克服优化过程中需要大量有限元正分析的缺点,张乾飞、苗丽、骆进军等分别将人工神经网络应用于大坝的渗透系数反演当中;袁会娜将神经网络和演化算法应用与位移反分析当中;傅志敏、王媛、邓祥辉等分别采用遗传算法来反演大坝渗透系数。陈雾应用基于最优化理论的可变容差法反演得到坝体主要分区以及坝基的平均渗透系数;张娇采用差异进化算法来进行反分析,并根据观测效应值不同分为:以位移值为指标的差异进化位移反分析方法和以水头值为指标的差异进化渗流反分析方法。

在不确定性反分析方面,考虑较多的是随机性或者模糊性。郑桂兰基于渗流场的随机有限元分析方法,结合变尺度优化算法和广义 Bayes 法,建立了一种渗透系数的随机反演方法;魏海、沈振中等首先利用试验资料求出坝体和坝基材料渗透系数的概率分布,根据坝体材料渗透系数的概率分布随机生成单元的渗透系数,然后采用 DFP 方法进行渗透系数反分析;王登刚、苏怀智等利用区间分析方法来进行坝体参数的反演;杨杰等将信息熵理论与基于最大熵原理的贝叶斯法有机结合,使不确定性反分析的系统辨识问题转换为对贝叶斯准则函数的最优化求解问题,并通过适当的优化求解方法,实现对工程结构参数或荷载项源的反演分析。

1.3.4 土石坝综合评价存在的问题

大坝安全评价是一个多层次、多指标的递阶分析问题。从评价指标体系中下一层多个因子(例如渗流压力、渗流量、水平位移、垂直位移等)的已知状态来评价上一层因子