

DOUBLE L,
DOUBLE ETA,GAMMA;
DOUBLE LOBJ,HOBj;

DOUBLE *P1,*P2;

P1=NULL;
P2=NULL;

岩土力学与工程中的 支持向量机分析

Y2=U[I2];

P1=&X[I1][0];
E1=CALCULATE(P1)-Y1;
P2=&X[I2][0];
E2=CALCULATE(P2)-Y2;

S=Y1*Y2;
GAMMA=S*ALPHA1+ALPHA2;

IF (Y1==Y2)
{
L=MAX(0,GAMMA-C);
H=MIN(C,GAMMA);
}
ELSE
{
L=MAX(0,GAMMA);
H=MIN(C,GAMMA+C);
}

IF(L==H) RETURN 0;

IF(K_OPTION==1)
{
KERNEL P(N,D);
K11=P.POLY(P1,P1);

赵洪波 • 著

煤炭工业出版社

岩土力学与工程中的 支持向量机分析

赵 洪 波 著

煤 炭 工 业 出 版 社

· 北 京 ·

图书在版编目 (CIP) 数据

岩土力学与工程中的支持向量机分析/赵洪波著. —北京: 煤炭工业出版社, 2008. 6

ISBN 978 - 7 - 5020 - 3284 - 5

I. 岩… II. 赵… III. 岩土力学-向量计算机-分析
IV. TU4

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2008) 第 040100 号

煤炭工业出版社 出版
(北京市朝阳区芍药居 35 号 100029)

网址: www.cciph.com.cn

北京房山宏伟印刷厂 印刷

新华书店北京发行所 发行

*

开本 850mm × 1168mm¹/₃₂ 印张 6

字数 151 千字 印数 1—600

2008 年 6 月第 1 版 2008 年 6 月第 1 次印刷

社内编号 6088 定价 18.00 元

版权所有 违者必究

本书如有缺页、倒页、脱页等质量问题, 本社负责调换

内 容 提 要

本书主要论述了支持向量机的基本理论及其在岩土力学与工程中的应用。全书共分 6 章，内容包括绪论、支持向量机及其他智能分析法、岩土结构变形预测、基于监测数据的位移反分析、边坡稳定性的支持向量机分析和支持向量机在岩土工程中的其他应用。

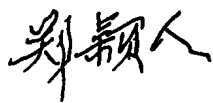
本书可供土木工程、矿业工程、计算机科学等领域科技工作者、高等院校相关领域的师生及研究生参考，对相关领域的工程技术人员也有一定的参考价值。

序

随着我国国民经济的快速发展,基本建设规模不断扩大,越来越多的岩土力学与工程问题需要岩土工程科技工作者和工程技术人员解决。由于岩土力学学科的复杂性和不确定性,采用传统的方法研究岩土力学与工程问题会面临很多困难,因此引进和借鉴其他学科的理论知识和研究方法,进行多学科交叉研究是解决这一问题的重要途径。其中信息与计算机科学领域的一些新方法(如计算智能)为其他学科的研究提供了很好的工具,将岩土力学与计算智能进行有机结合的方法——岩土力学与工程的智能分析方法就为我们提供了一条新的途径。

本书作者赵洪波博士在岩土力学智能分析方法的基础上,将支持向量机应用到岩土力学与工程中,进行了大量深入的创新性研究工作,提出了岩土结构非线性变形预测的进化支持向量机方法、边坡变形预测的群体智能方法、基于支持向量机的岩土工程位移反分析理论与方法、基于支持向量机的边坡可靠性分析、围岩破坏模式的支持向量机识别等新理论和方法,为岩土力学与工程问题的研究注入了新的血液和活力。

本书介绍的内容对解决岩土力学与工程问题提供了有价值的方法和新途径,并以理论联系实际的方式进行了论述,对岩土力学理论的研究具有很好的参考价值。



中国工程院院士

2008年3月6日

前 言

岩土力学与工程的智能分析方法（遗传算法、神经网络等）是国内外科技工作者广泛关注的研究课题，支持向量机自 20 世纪 90 年代问世以来，其在处理高维数、复杂非线性以及全局优化等方面的优良特性，受到各个研究领域的广泛关注，迅速应用到各个研究领域，并广泛应用于岩土力学与工程的各个方面。笔者一直从事该方面的研究与应用工作。

本书系统地介绍了支持向量机进行岩土力学与工程分析的理论、方法及应用，共分 6 部分：

（1）绪论。论述了岩土力学与工程问题的特点、研究现状及支持向量机应用的可行性。

（2）支持向量机及其他智能分析法。介绍了支持向量机的理论基础、算法以及遗传算法和微粒群算法的基础知识。

（3）岩土结构变形预测。提出了岩土结构非线性变形预测的进化支持向量机方法、边坡变形预测的群体智能方法，并对该方法进行了详细叙述。

（4）基于监测数据的位移反分析。论述了基于支持向量机的岩土工程位移反分析的理论与方法。

（5）边坡稳定性分析的支持向量机。详细论述了支持向量机在边坡工程中的应用。

（6）支持向量机在岩土工程中的其他应用。论述了支持向量机在岩土工程中其他方面的一些应用概况。

笔者在读博士期间开始接触支持向量机理论，在冯夏庭教授的指导下从事支持向量机在岩土工程中的应用研究，并学有所成，在此向冯夏庭教授表示衷心感谢。同时，在研究过程中得到了中国科学院武汉岩土力学研究所智能岩石力学课题组科研人员

和同学们的很多建议和帮助；在本书的写作过程中，得到了雷文杰博士和茹忠亮博士的支持和帮助，并给出了很好的建议；河南理工大学土木工程学院为笔者提供了良好的科研环境，并给予了大力的支持，郑颖人院士在百忙之中为本书作序，令笔者非常感动，在此，谨向给笔者研究以指导和为本书出版提供帮助和支持的各位导师、各位同仁、各级领导表示诚挚的感谢。在本书的写作过程中，参考了一些国内外同行的研究成果，对被引用研究成果的同行和作者表示诚挚的谢意。本书的出版得到了河南省工程力学重点学科和河南理工大学重点学科的资助。

科学是永无止境的，书中的观点和方法是笔者当前的一些认识，需要随着时间和研究的深入进行不断完善。

由于水平所限，书中存在的一些缺点和不足之处，敬请各位专家和广大读者批评指正。

作 者

2007 年 3 月

目 次

0	绪论	1
0.1	岩土力学与工程面临的困难与挑战	1
0.2	国内外研究现状	3
0.3	支持向量机在岩土力学与工程中的应用的 可行性	9
0.4	支持向量机在岩土工程中的应用现状	10
	参考文献	12
1	支持向量机及其他智能分析法	15
1.1	统计学习理论简介	16
1.2	支持向量机及其学习算法	21
1.3	序列最小优化法	32
1.4	遗传算法简介	39
1.5	微粒群算法	42
	参考文献	44
2	岩土结构变形预测	45
2.1	边坡非线性变形的进化支持向量机分析	46
2.2	基于微粒群优化的边坡变形预测	65
	参考文献	72
3	基于监测数据的位移反分析	73
3.1	基于进化支持向量机位移反分析	73
3.2	基于进化支持向量机的滑动面参数识别	93
3.3	基于支持向量机与微粒群的位移反分析 研究	99
	参考文献	108
4	边坡稳定性的支持向量机分析	109

4.1	边坡稳定性估计的支持向量机	109
4.2	基于支持向量机的边坡最危险滑动面识别	117
4.3	滑坡加固方案优化的支持向量机	124
4.4	基于蒙特卡洛与支持向量机的边坡可靠性 分析	130
	参考文献	141
5	支持向量机在岩土工程中的其他应用	143
5.1	围岩破坏模式的识别	143
5.2	基坑支护设计优化的支持向量机	147
5.3	岩土本构关系的支持向量机模型	154
5.4	预测冲击地压的 PSO-SVM 模型	160
	参考文献	165
附录	支持向量机分类的 SMO 算法源程序	169

0 绪 论

支持向量机 (Support Vector Machine, 可简称 SVM) 是基于统计学习理论的一种新的通用机器学习方法, 它是建立在一套较好的有限样本机器学习的理论框架和通用方法之下, 其基本思想是通过用内积函数定义的非线性变换将输入空间变换到一个高维空间, 在这个高维空间中寻找输入变量和输出变量之间的一种非线性关系。支持向量机采用结构风险最小化原则, 比采用经验风险最小化原则的神经网络具有更好的泛化能力; 与传统的统计学相比, 统计学习理论是一种专门研究小样本 (有限样本) 情况下的机器学习规律的理论, 而支持向量机的理论基础就是统计学习理论。因此, 支持向量机方法既有严格的理论基础, 又能较好地解决小样本、高维数、非线性和局部极小点等实际问题^[1]。

支持向量机产生于 20 世纪 90 年代中期, 自出现以来已广泛应用于工业的各个领域, 例如: 数字识别、图像处理、污染物扩散分析及函数拟合等, 被认为是继神经网络之后的又一新的机器学习技术, 并具有广泛的应用前景。2000 年以来, 笔者在冯夏庭教授的指导下从事支持向量机在岩土力学与工程中的应用研究, 先后采用支持向量机方法对岩土工程安全性分析、边坡稳定性分析与变形分析、岩土工程反分析等进行系统的研究。近几年来, 越来越多的学者将支持向量机应用到岩土力学与工程中。

0.1 岩土力学与工程面临的困难与挑战

岩土介质是一种很复杂的材料。在天然状态下, 岩土体经过多次造山运动、构造运动, 有着长期的、复杂的变形历史, 赋存有地应力, 而且产生许多纵横交错的断裂构造, 如断层、节理、裂隙等; 岩土体还受到雨水冲刷、腐蚀等天然因素和施工等人为

因素的影响；岩土具有显著的时空变异性，在复杂地质条件下，再细致的勘察测试也难以完全查明岩土性状的时空分布。因此，无论何种力学模型都难以全面而准确地描述它的力学行为；单纯的理论计算和试验分析常常解决不了实际问题，而需要岩土工程师根据工程所处位置的工程地质情况和工程要求，依据其经验作出决策^[2]。

岩土力学是传统固体力学的一个分支。多年以来，随着大量岩土工程项目的建设，以及计算机技术的快速发展，岩土力学学科获得了重大的发展，但是也暴露出不少困难和问题。岩土工程是一门十分古老的、并随着工程实践不断得到发展的技术科学。远在古代，我们的祖先已在兴建水利工程、道路桥梁、房屋建筑实践中积累了许多有关岩土工程方面的经验；作为近代科学一部分的工程地质学、岩石力学、土力学、基础工程学，也已有百年的历史^[2]。虽然如此，岩土工程至今还是不够严谨、不够完善、不够成熟的技术学科，因而其难度大，潜力也很大。

随着国民经济的快速发展，大量基础设施的建设，尤其是西部大开发的提出，对岩土工程领域提出了很多挑战，无论是学术界还是工程界，对岩土力学行为的了解已成为解决学术问题和工程难题的重要方面。实际工程中，影响岩土力学行为的因素众多，其中有确定性因素，还有许多随机因素和不确定性因素；另外，岩土介质的力学机理复杂，其力学行为的定量指标与实际状态存在较大的差异。这些特点造成岩土力学行为很难定量预测，即使是进行现场大型岩土力学试验，也只能了解局部的尺度有限的岩土力学行为，更大范围的岩土力学行为几乎无法了解，因此用数值方法或引入其他学科的方法来预测岩土的力学行为具有广阔的前景。

对于数值模拟方法，国内外发展了多种方法，例如：有限元、离散元、边界元及流形元等，但是由于岩土力学行为受很多因素的影响，若考虑的因素少，则计算模型和结果与实际情况差别较大；若考虑因素较多，则岩土力学行为是非常复杂和高度非

线性的。总之，非线性是岩土力学行为的本质特征^[3,4]，岩土的本构模型是高度非线性的，岩土的力学参数之间也存在着非常复杂的非线性关系，从而造成岩土的力学行为很难用精确的数学模型来表达。

由于岩土介质的复杂性和非线性，造成岩土工程的“信誉不高”。郑颖人院士指出有两种途径来改善这一问题^[4]：一是对经典力学进行改造和扩展，使它适应岩土的特性；二是进行思维变革和科学更新，建立起适合于岩土力学特殊性的基础理论；并且指出后者应引起岩土力学界的重视。冯夏庭教授提出的智能岩石力学为解决复杂的岩土力学问题开辟了新的途径^[3]。本书采用这一思路，利用支持向量机方法对岩土力学与工程进行了分析与研究。

0.2 国内外研究现状

0.2.1 岩土结构变形特征分析

位移是岩土结构在开挖或变形过程中反馈出的重要信息之一，由于岩土介质的复杂性，在对它的物理、力学机理不很清楚的情况下，通过其变形行为对其研究是一种简单、易行的途径。通过监测岩土结构位移的变化，可以及时了解岩土结构的稳定状态，从而可以根据需要对其进行稳定性控制；并且还可以根据位移的未来变化值通过反算来预测岩土结构荷载的未来变化情况。因此，用监测到的历史位移值进行建模以对其未来演化规律、发展趋势等进行预测，及时掌握岩土的变化规律，无论在理论研究还是工程上均具有十分重要的意义。

孙均院士首次将岩土变形预报作为一种理论提出，并对预报方法进行了总结和分类^[5]，主要分为：现场观测、经验回归的预报方法、物理机制方法、数值方法及反分析方法等。Ogata 和 Tomishima 对两个煤矿的硐室开挖前后进行了现场围岩变形量测，考察了岩体的变形及性态的预报，表明硬岩变形是弹性位移的积累，而软岩变形是时间及开挖距离的函数^[6]。李斯海在对枫林

一号隧道施工监测时提出了三种围岩变形回归函数——对数函数、指数函数和双曲函数，采用预报误差最小的函数进行变形规律分析并对围岩稳定性作出了评价^[7]。Panet, Sulem, Guenot 及近腾达敏视围岩介质为黏弹性体，用 Kelvin - Voigt 三单元流变模型推导了围岩变形的预报公式，表明变形是时间和岩体地应力、岩石力学特性参数的函数，并成功地应用于具有流变性态的地下工程中。近腾达敏还采用黏弹性理论根据开挖隧道变形的实测值，作为推求最终变形的办法，提出了“2 倍时间变形法”来预报任意时间变形值。Guenot Panet 和 Sulem 分别就非黏弹塑性介质和依时性掩体位移-时间关系进行了研究。Minh 采用黏弹性模型和应变软化模型特性，并与经验对数定律 $U = Ua + blg \frac{t}{a}$ 相比较，证实了 Bingham 预报变形没有应变软化模型更能适应导硐的变形预报。刘怀恒视岩体为一灰色系统，应用灰色预测理论研究变形预报问题，采用的是 GM (1, 1) 模型。李文秀根据岩土工程中大量观测资料的统计分析，认为开挖导致的岩体移动变形是一个极为复杂的物理力学过程，具有一定的模糊性，因此利用模糊概率测度理论，建立了具有普遍意义的岩体移动变形模糊数学模型，并有效地应用于预报地下开挖引起的地表移动变形^[8]。陈子荫认为隧洞围岩变形的依时性过程为一随机过程，将量测的位移时序看做一随机过程样本，应用时间序列分析研究了在新奥法施工中变形的预报问题，他认为时间序列分析实质上是自回归或（和）滑动平均模型，是研究非平稳随机时序的一种较好方法。高玮博士采用灰色系统-进化神经网络的混合算法对变形时序进行了研究^[9]。随着智能岩石力学的发展，冯夏庭、张治强采用智能岩石力学的思想，用进化神经网络方法对卧龙寺滑坡、新滩滑坡、三峡永久船闸边坡的变形行为进行了研究^[10-13]。

0.2.2 岩土工程中的位移反分析

由于岩土材料的非均质、非线性、非连续以及各种工程、施

工等因素的影响,企图用解析方法进行求解几乎是不可能的。随着计算机技术在岩土力学中的应用和推广,岩土力学的数值理论和方法已日趋成熟,并在岩土工程中有不少成功的应用实例。然而,数值方法即使有较合理的计算模型,输入参数也很难作合理的估值,由室内试验或现场试验确定的岩土力学参数都与实际岩土参数有较大偏差,加之岩土的非均质性以及节理、裂隙的影响,使得试验结果不具有代表性。用这样的参数作为计算输入参数进行数值分析,所得结果往往与实际情况有一定的误差,难于在工程实践中采用,且不同程度地阻碍了数值方法在岩土工程中的进一步推广应用。近几十年发展起来的以现场量测位移作为基础的位移反分析法,是解决这一难题的重要手段之一。它既依赖于工程地质和岩土力学理论,又依托于岩土工程的现场实际量测,是理论性和实践性都很强的一种实用技术,也是联系理论与实际的桥梁^[14]。

在岩土工程中,利用工程现场量测得到的反映岩土力学行为的某些物理量来推算岩土的参数,这种问题通常被称为反分析法。其中反映岩土力学行为的现场观测物理量,被称为反分析法的基础信息;而被反算的参数一般包括初始地应力、力学参数等。根据反分析时所利用的基础信息不同,反分析法可分为应力反分析法、位移反分析法和混合反分析法。由于位移量测比应力量测更经济、方便,且较易获取,因此位移反分析法在工程中被广泛采用。位移反分析法按照其采用的计算方法又可分为解析法和数值法。解析法只适用于简单几何形状和边界条件的问题,因此难于在复杂的岩土工程中被广泛采用;数值方法具有普遍的适应性。根据数值方法实现反分析的过程其又可分为三类,即逆解法、直接法和图谱法。

逆解法是直接利用量测位移求解由正分析方程反推得到的逆方程,从而得到待定参数。简单地说,逆解法即是正分析的逆过程。此法基于各点位移与弹性模量呈反比,与荷载呈正比的基本假设,仅适用于线弹性等比较简单的问题。其优点是计算速度

快, 占用计算机内存少, 可一次解出所有的待定参数。

直接法是把参数反演问题转化为一个目标函数的寻优问题。直接利用正分析的过程和格式, 通过迭代最小误差函数, 逐次修正未知参数的试算值, 直至获得“最佳值”。这类方法的优点是可用于线性及各类非线性问题的反分析, 具有很宽的适用范围; 其缺点是通常需给出待定参数的试探值或分布区间等, 同时, 计算工作量大, 解的稳定性差, 特别是待定参数的数目较多时, 费时、费工, 收敛速度缓慢。

图谱法是中国科学院地质与地球物理研究所杨志法教授等提出的一种位移图解反分析法^[15]。该法以预先通过有限元计算得到的对应于各种不同弹性模量和初始地应力与位移的关系曲线, 建立简便的图谱和图表。根据相似原理, 由现场量测位移通过图谱和图表的图解反推初始地应力和弹性模量。目前这一方法已发展为用计算机自动检索, 使用时只需输入实际工程的尺寸与荷载相似比, 即可得到所需的参数。该方法简便实用, 对于线弹性反分析更方便实用, 且具有较好的精度。

20 世纪 70 年代人们开始注意由现场量测信息确定各类计算参数的研究。KavMaghi 和 Clough 发表反演弹性固体的弹性模量的有限元法之后^[16], 在 1976 年约翰内斯堡 (Johannesburg) 的岩土工程勘测研讨会上 Kirsten 提出了量测变形反分析法^[17], 随后 G. Maler 提出了岩石力学中的模型辨识问题; Gioda 提出采用单纯形等优化方法求解岩体的弹性及弹塑性力学参数, 并讨论了不同优化方法在岩土工程反分析中的适用性^[18], Gioda 等人利用实测位移反算作用在柔性挡土结构上的土压力^[19]; Arai 采用二次梯度法求解弹性模量 E 和泊松比 μ 的方法; Kovari 则提出了反算地层压力参数的方法; 而 Sakurai 提出了反算隧洞围岩地应力及岩体弹性模量的逆解法^[20]; 杨林德较全面地阐述了反分析方法的原理和工程应用情况, 并用边界元反演硐室围岩初始地应力及其黏弹性模型参数, 开辟了反分析求解的新方法^[21]; 龚晓南用有限元正分析方法确定了固结过程中土的非线性力学参数; 孙均

提出了局部最优解和全局最优解的概念。

随着岩土工程的发展,国内外众多研究者采用不同方法对反分析法及其应用做了大量研究。考虑初始地应力由构造应力及自重应力组成进行线性和非线性位移反分析,利用少量实测位移由拉格朗日插值法反算黏弹性地层初始地应力或在应力空间及应变空间用边界元法进行弹塑性位移反分析;在考虑时间相关性、空间效应、消除量测前丢失位移的影响等方面,王芝银提出了逆解回归法和逆解优化法^[22];朱维申考虑时空效应对三个地下巷道或隧道进行了反演分析^[23]。

在二维和三维的弹性、弹塑性、黏弹性及黏弹塑性的反演计算和初始地应力的均匀分布、线性分布、函数分布以及均质、非均质材料的反分析等方面取得显著进展的同时,位移反分析法在许多岩土工程中得到了成功应用,如利用大坝观测资料反算坝体的渗透系数,将反分析法用于确定地基土的土性参数和地下巷道与隧道围岩地应力及力学参数,求解引水隧道围岩地应力和部分力学参数及立井变形参数等。

反分析的目的不仅仅在于对工程范围内岩土体初始地应力和力学特性参数的估计,更重要的是同现场监控技术及工程稳定性分析相结合,对工程的可靠度作出合理的评价和符合实际的预测,并对施工中的工程进行支护参数和方案的反馈设计等,使数值解答能有效地应用于工程决策中。

自从 S. Sakurg 提出一种现场量测辅助设计技术之后,即用现场量测位移反算岩体弹性模量和初始地应力,然后应用这些参数进行正分析或设计初次支护的参数,国内外不少研究者注意到了反分析结果的应用问题。从围岩、支护的弹性及弹塑性变形预测,到利用考虑时空效应的流变反分析结果,进行黏弹性、黏弹塑性分析,预测围岩或支护后期变形及安全度,对工程给出事先的预测。事实上,复杂的岩体工程问题本身具有许多不确定的未知因素,将其视为灰色系统,将反分析看做是一种灰色逆过程,则可以用灰色系统理论,通过灰色动态模型或灰色预测模型预测

未来的位移,并由所预测的位移进行位移反分析后,再利用正分析对围岩或支护的安全度作出超前预测。刘怀恒以此为基础提出了一种监测分析-预报系统,其实质是:在现场监测过程中建立动态反演与预测模型,利用已获取的量测数据反演参数,并及时进行预测。当预测值与后继量测位移发生偏差时,利用新数据修改反演模型,以获取新的参数继续预测,这样不断反演与预测形成动态反演建模预测法。

近十几年来,运用系统论、信息论以及模型识别技术,对岩土介质系统物理本构关系的反演建模、模型可信度分析、模型鉴别、检验理论和逆问题统一理论的建立等也有不少研究。袁勇以系统辨识理论和连续介质力学原理为根据,较系统地阐述了岩土介质系统逆问题的建模、参数优化辨识及目标函数构造的原则和方法,进一步完善了概率反分析理论^[24]。刘维宁基于信息论的观点给出了关于被反演参数的更高信息含量的信息表达,并在此理论上研究了认识系统参数后验信息的技术途径及反分析结果的唯一性和稳定性问题^[25]。孙均则基于 Bayes 原理考虑荷载、变形的不确定性及参数的先验信息,以随机过程理论为基础提出了广义参数反分析法。这种方法可推广到现有的几种不确定性反分析上去,如 Bayes 反分析、最大似然反分析等。除随机反分析外,非确定性反分析还有模糊反分析、扩张卡尔曼滤波器有限元反分析及神经网络反分析等^[26~31]。总之,这些研究考虑了岩体工程中量测信息的随机性、模糊性和现场量测环境的复杂性,较全面地描述了反分析法的实质和解释了反分析应用中的一些现象,这些方法既归属于不确定性反分析法,又包含了确定性反分析,为逆问题的模型辨识、形成统一的反演理论、解决反分析问题中的一些理论问题奠定了一定的理论基础。

冯夏庭教授针对岩土工程研究中的“机理不清”和“参数给不准”两个瓶颈问题,创造性地提出了智能岩石力学的思想,目前已成为岩土力学发展中一个新的学科分支。依据智能岩石力学的理论,采用神经网络与数值计算相结合的方法,提出了参数