

“构造地质学的理论方法与实践”丛书

教育部长江三峡库区地质灾害研究中心
国家自然科学基金(40174024) 联合资助
华中构造力学研究中心

非线性动力学有限元 在地震学中的应用

郑文衡 曾佐勋 著



中国地质大学出版社有限责任公司
ZHONGGUO DIZHI DAXUE CHUBANSHE YOUXIAN ZEREN GONGSI

“构造地质学的理论方法与实践”丛书 曾佐勋 主编
教育部长江三峡库区地质灾害研究中心
国家自然科学基金(40174024) 联合资助
华中构造力学研究中心

非线性动力学有限元 在地震学中的应用

郑文衡 曾佐勋 著



中国地质大学出版社有限责任公司

ZHONGGUO DIZHI DAXUE CHUBANSHE YOUXIAN ZEREN GONGSI

内 容 简 介

本书首先介绍了有限元模拟领域的最新成就:非线性动力学有限元方法。它既不同于传统的静态有限元方法,在计算中首次涉及时间;也不同于后来有人用过的伪动态模拟(一系列时间的静态结果,连接起来看,在一定程度上反映变化趋势);非线性动力学考虑加速度和惯性的影响。

在非线性动力学有限元理论上,重点介绍了它在地震学中的应用,其中包括地壳应力对海潮的响应、地震波在断层上的反射、动态应力对库伦等效应力以及断层摩擦力的影响,以及由此涉及的一种可能的地震机理;在地震波模拟研究的基础上,提出了仿真地震图的概念和方法。本书侧重理论表述、方法论以及地震学应用的探讨。

图书在版编目(CIP)数据

非线性动力学有限元在地震学中的应用/郑文衡,曾佐勋著. —武汉:中国地质大学出版社有限责任公司,2012.5

ISBN 978-7-5625-2872-2

I. ①非…

II. ①郑…②曾…

III. ①非线性力学-动力学-有限元法-应用-地震学-研究

IV. ①O322②P315

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2012)第 082678 号

非线性动力学有限元在地震学中的应用

郑文衡 曾佐勋 著

责任编辑:段连秀

策划编辑:段连秀

责任校对:戴莹

出版发行:中国地质大学出版社有限责任公司(武汉市洪山区鲁磨路 388 号) 邮政编码:430074

电 话:(027)67883511

传 真:67883580

E-mail:cbb@cug.edu.cn

经 销:全国新华书店

<http://www.cugp.cug.edu.cn>

开本:787 毫米×1 092 毫米 1/16

字数:180 千字 印张:6.5

版次:2012 年 5 月第 1 版

印次:2012 年 5 月第 1 次印刷

印刷:武汉教文印刷厂

印数:1—1 000 册

ISBN 978-7-5625-2872-2

定价:30.00 元

如有印装质量问题请与印刷厂联系调换

序

前华中构造力学研究中心副主任杨巍然教授在《构造地质学的理论方法与实践》丛书序言中指出:随着科学技术的发展,构造地质学正在逐步朝着解析构造学和定量化构造研究方向发展。解析构造学要求加强力学的研究,将构造几何学、运动学、流变学和动力学有机结合起来进行综合研究;定量化构造研究则要求运用先进技术,不断改进和完善定量化研究手段和方法,以加深对构造过程和构造形成机制的认识。

这些年来,华中构造力学研究中心的师生们正是朝着这样的目标在不断前进。主要表现在以下几个方面:

(1)积极探索利用天然构造变形恢复岩石古流变参数的方法,即构造流变计,正在逐步形成天然岩石流变学研究的新方向,与高温高压实验岩石流变学形成互补。

(2)积极探索构造微分几何学方法,并应用于褶皱分析和油气田的裂缝预测。

(3)探索和应用岩石有限应变测量和涡度计算在小构造成因机制方面的应用研究,特别是在不同石香肠构造形成机制的研究方面取得系列成果。

(4)将 MAPGIS 技术和影像云纹法应用于缝合线的分析,取得三维缝合线研究的新进展。

(5)将有限元数值模拟技术应用于不同尺度构造研究;应用于成矿预测、工程场地稳定性和区域稳定性分析;应用于油气田断层封堵性、裂缝预测和油气成藏有利部位预测;应用于行星构造研究和地震研究等。

(6)探索构造物理模拟实验技术方法并应用于理论构造学和应用构造学研究。

(7)积极配合国家 985 平台建设,综合利用次声波、卫星热红外技术、宽频地震仪、地应力测量、地球排气、地倾斜等监测资料进行地震前兆信息分析,探索地震成因机制,服务于地震监测与预测。

《非线性动力学有限元在地震学中的应用》一书,是在教育部长江三峡库区地质灾害研究中心支持下出版的,是由华中构造力学研究中心组织出版的《构造地质学的理论方法与实践》丛书的新奉献,是有限元法应用于地震学研究的新尝试。

众所周知,构造与力学的结合不是一件轻而易举的事情;然而这又是大势所趋。“华中构造力学研究中心”正在朝着自己的目标不懈努力,相信将会有更多的新成果奉献给读者。

曾佐勋

华中构造力学研究中心主任

《构造地质学的理论方法与实践》丛书主编

2011 年 10 月

前 言

非线性动力学有限元方法,既不同于传统的静态有限元方法,在计算中首次涉及时间;也不同于后来有人用过的伪动态模拟(一系列时间的静态结果,连接起来看,在一定程度上反映变化趋势)。非线性动力学考虑了加速度和惯性的影响。本书在介绍非线性动力学有限元理论的基础上,重点介绍它在地震学中的应用,其中包括地壳应力对海潮的响应、地震波在断层上的反射、动态应力对库伦等效应力以及断层摩擦力的影响,以及由此涉及的一种可能的地震机理;在地震波模拟研究的基础上,提出了仿真地震图的概念和方法。

地震学是一门观察的科学,因此地震学和地球物理学观测数据是本书的基本科学依据。而固体地球物理学属于理论范畴,涉及到反演方法。本书提出的仿真地震图,就是一种理论上的拓展与探讨。

在应用研究中,大陆地壳对海洋潮汐的响应、断裂面对地震波影响的参数设置仍为线性范围,其他的数值模拟涉及到非线性领域。非线性包括以下四个方面:几何非线性、材料非线性、边界条件非线性、动力学非线性。

本书系统地探讨了动力学有限元方法与地球物理学相结合的研究方法。其内容包括三个部分:一是提出一种计算地球物理的思路;二是在理论框架下论述地震触发的动力学机理;三是对地壳中的力学现象从应力的传播和影响角度作出物理解释。同时,探讨了计算力学与地球物理观测相结合的可行性。

第一部分内容包括:研究大陆地壳对海洋潮汐的响应,建立一个全球有限元模型,提出仿真地震图概念;第二部分包括:断层对地震波的影响、动应力对断层错动的影响,并在此基础上,进一步研究了由此形成的地震波与断层活动之间的正反馈关系,且基于上述内容,探讨了地震触发的动力学机理;第三部分包括计算力学与计算地球物理的一般问题。

本书的主要内容包括:

(1)三维非线性动力有限元分析的基本原理、有关的定理和数值方法。

(2)将三维动态有限元方法应用于地球动力学分析,研究了大尺度的地球物理对象。

本书致力于深入地进行三维动力学分析与固体地球的动力学过程的联合研究,在方法上着眼于地球物理的动力学现象,对地球物理现象作动力学机理的探讨。

地球物理的研究对象具有大尺度特征,通常的研究往往着眼于缩小的模型,再外推到大尺度的实际情况,外推必须非常谨慎。研究小尺度模型而外推到大尺度,涉及到相似性分析,其正确性还需要论证,比较繁琐。本书利用了动态有限元建模,直接研究大尺度的对象。在大陆地壳对海洋潮汐的响应、仿真地震图、全球模型、断裂面对地震波的影响、动应力对断层错动的影响等问题的研究中,均采用真实尺寸地壳建模,进行仿真计算,得到了直观的结果。

(3)利用反演思想实现了仿真地震图研究。基于传统的理论地震图的研究方法,本书提出仿真地震图方法。针对地壳的有限元模型,作了实际的仿真地震图分析,与地震观察结果进行对比研究。理论地震图是一种解析方法,而仿真地震图基于数值方法。前者采用一种解析的格林函数,代表波在地壳中的传播特性,而后者对地壳介质及其结构具有明确的定义,对波的传播过程具有具体的描述。仿真地震图属于反演方法,通过假设介质和震源参数,得到理论上的仿真地震图,将实际观察到的地震图与之比较,用试错法调整介质和震源参数,最终使仿真地震图与观察到的地震图符合较好,这时的介质和震源参数就是所求出的未知量。

(4)研究了地震触发的动力学机理。地震机理有很多模式,本书提出了一种可能的模式。这个模式指出,库伦应力的变化可能触发地震。动态应力的传播即地震波,波在自由面上反射会发生半波损失。也就是说,压缩波会变成拉伸波,因此,无论是压缩波还是拉伸波,都有可能激发应力下降。而应力下降将会减小(内)摩擦,导致库伦-莫尔断裂准则中的库伦等效应力增大,从而触发岩石破裂现象。岩石的破裂会导致地震波的辐射,因此,应力的下降和岩石的破裂会相互激发,形成一个正反馈环路,最终触发大规模的岩石破裂事件,这就是大地震。本项研究从冲击载荷下的断裂现象入手,论述拉伸波的作用,考虑到围压的影响,指出拉伸波虽然可以在爆破中直接引起岩石的断裂,但是在地层深处,不能直接引起断裂事件。因此,引出了内摩擦和库伦应力的影响机理。在此基础上,理解到大地震的触发,为一个不断通过内摩擦改变形成的正反馈过程,解释了大地震发生有一个漫长的地应力下降过程和局部变形过程这一实际现象,从而对已有的地震的触发机理给出了合理的补充。

作者

2011年12月

目 录

第 1 章 绪论	(1)
1.1 地震学的研究对象、任务和内容.....	(1)
1.2 地震波研究	(3)
1.3 研究内容和主要思路	(5)
第 2 章 非线性动力学有限元原理	(9)
2.1 非线性动力学有限元的特点	(9)
2.2 动力学有限元的数学原理.....	(10)
2.3 总体控制方程.....	(11)
2.4 计算方案.....	(13)
2.5 软件功能介绍.....	(20)
2.6 小结.....	(22)
第 3 章 中国中北部地壳对潮汐的响应	(23)
3.1 研究内容和方案.....	(23)
3.2 建立模型.....	(24)
3.3 载荷条件.....	(26)
3.4 计算结果及分析.....	(27)
3.5 海潮应力与地震的关系.....	(37)
3.6 模拟结果与孕震体应力环境的关系.....	(43)
3.7 海洋潮汐载荷与地震孕育过程的关系.....	(44)
3.8 与孕震介质的关系.....	(45)
3.9 小结.....	(46)
第 4 章 仿真地震图	(47)
4.1 研究背景和研究方案.....	(47)
4.2 有限元仿真研究.....	(49)
4.3 仿真地震图实施过程.....	(50)
4.4 小结.....	(52)

第 5 章 断裂面对动态应力传播的影响	(54)
5.1 概述	(54)
5.2 断层面反射模型	(55)
5.3 模拟结果	(57)
5.4 一个形状不规则的模型	(58)
5.5 结合观测的分析	(66)
5.6 小结	(71)
第 6 章 动应力对断层摩擦力的影响	(72)
6.1 研究内容和技术路线	(72)
6.2 建模和计算仿真	(72)
6.3 对模拟结果的物理解释	(74)
6.4 小结	(75)
第 7 章 展望	(76)
7.1 环球剪切带	(76)
7.2 动量矩迁移	(77)
7.3 全球模型	(78)
7.4 小结	(81)
第 8 章 结束语	(82)
8.1 广阔的应用前景	(82)
8.2 可行的技术路线	(83)
8.3 地学研究任重道远	(84)
参考文献	(85)
后记	(93)

第1章 绪论

1.1 地震学的研究对象、任务和内容

地壳是固体地球的最外层,地震就发生在这一个圈层内。由于是固体,相对比较稳定,岩石内部的信息可以保留很长时间,这个时间以百万年计;然而,它可以变形,当地壳运动将深处的岩石移动到地表时,带有很多地球内部的原始信息,因此,地球科学家对地壳已经有了较深入的研究。实际上,对地球这颗行星演化的许多推断都是基于对大陆地壳的认识。地球的重力导致地壳具有不可入性,目前最深的钻井记录也只有10km左右。大多数地壳深部以及地球的更深圈层的信息,往往来自地震台记录的地震波。有道是“一次地震就像一支蜡烛,把地球内部照亮”。由于地壳是矿产资源、全部可耕地以及淡水的基本来源,所以对地壳的认识具有重要的实际意义。

地壳定义为地球上海洋以下深约12km、大陆之下深约20~80km的显著地震界面以上的一层。地震界面是地震波明显发生反射和折射的界面,后来认定是地幔和地壳的界面。这个面由莫霍洛维奇于1909年发现,后来以发现者的名字命名,简称莫霍面。在该表面地震波速度有一个明显的突变,故认为该面肯定与基本地质变化有关,可能是低密度的富硅质岩石到高密度的富含橄榄岩的界面。因为在所有开展地震观测的地区都发现了莫霍面,所以公认一个具有全球普遍性的界面称为莫霍面(Mooney, 2004)。

固体地壳主要由地幔的粘性支持,而地幔的浮力是次要因素。地壳与地幔的顶层一起构成了岩石圈。岩石圈定义为地球的冷的、硬的、作为可变形固体的最外部分。有时,岩石圈也定义为地球中内部热量仅以传导方式而不能以对流方式传输的部分。按后者的定义,大陆岩石层的厚度约为50~350km,决定于岩石层年龄和新构造史。因此,考虑大陆地壳的演化,必须考虑整个岩石圈的演化(Mooney, 2004)。

20世纪正式采用“地球物理学”一词,这个词界定了一个综合性学科,它用物理学的观点和方法研究固体地球的运动、作用力、物理状态、物质组成和其他各种物理过程(包括磁性、导电性等)。本书主要考虑应力及其在地壳中的传播,属于地震学范畴,地震学是固体地球物理早期的三大基础性学科之一,所以有必要介绍固体地球物理的研究对象和任务。固体地球是相对于大气和海洋而言的。在20世纪50年代地球物理学取得了很大发展,形成了四个大的分支:大气物理学、海洋物理学、空间物理学和固体地球物理学。

研究岩石层或岩石圈的受力、惯性以及运动状态,属于固体地球物理学的范畴。固体地球物理学把地壳作为一个可变形固体来研究,包括观测实验研究和理论研究两个领域。按照研究的性质来划分,可以分为理论地球物理、实验地球物理、地球物理观测等。

固体地球物理学有三个发展较早的基础性学科:重力和大地测量学、地震学以及地磁学。固体地球物理学还包含地电学和地热学,但这两个学科的发展历史不长,正在进一步发展之中。

重力和大地测量之间有很密切的关系。重力学研究地球重力场。大地测量学研究测定地球的形状、大小以及测定地面点几何位置。大地测量的历史悠久,比如中国唐代高僧一行曾算出地球子午线一度对应的地面距离。重力和大地测量是国家建设的重要项目,关系到国土管理、矿产开发和航天事业的发展。

地震学研究固体地球介质中地震的发生、地震波的传播以及地震的宏观效果。它既是一门综合性学科,又是地质学和物理学的边缘学科。地震学主要研究地震发生的规律和人类抗御地震灾害的方法,同时它又以地震波为工具研究地球内部构造。在石油勘探、冶金矿产勘探、大型建筑场址的地质调查、地下核试验结果的测量、国际核试验的监督中具有广泛的应用。地震学的研究成果在许多方面也有广泛的应用。

地震学是一门观测的科学,由于地震仪的发明,地震学研究很早就开始了,随着地震仪器的改进,这一领域取得了举世公认的成就,震中、震源的定位,震级的定义和计算显示了早期科学家的智慧,J-B 走时表、大森公式、古登堡定律都是地震学发展过程中毋庸置疑的里程碑。

根据大量的地震波形记录,又发展了震源理论、地震波理论及反演理论。

震源理论已经可以推断地震发生的一些细节,提出了双剪切模型(天然地震),以及体膨胀模型(地下核试验),得出了利用地震波反演震源机制解的通用方法,定义了地震矩等定量指标。最近,还开展了基于多参数地震目录的综合研究。虽然目前已经可以求出震源机制解,但从本质上看,还只是一个观测结果,震源机制涉及到较多的力学和物理解释,还有很多工作要做。

地震波理论基于丰富的地震记录,这些第一手资料已经完全包括了地壳、地幔、地核内所有宏观和细节信息,但是目前还没有充分解读这些信息,可以根据地震波推算地震能量(震级)、地点(震中、震源)和发震时间等。

反演理论基于物质世界的一条基本规律,即因果律。因果律是比伽利略的地面物体运动规律、开普勒的行星运行基本规律、牛顿三大定律都更加基本的规律。虽然在牛顿的理论体系中可以把时间设为负值,实现所谓反演,但是基于因果律,我们不能做时间为负值的演算,而是要假设初始条件,用尝试法作正演,将结果与观测或实验结果比较,不断校正初始条件从而实现反演。理论地震图是成功的反演理论,是较完善、理论性较强的理论研究领域。本书在理论地震图的基础上,提出了仿真地震图的概念。

为了界定固体地球物理的范畴,此处顺便提及地磁学,它研究的是地磁场的时间变

化、空间分布、起源及其应用。地磁场研究历史悠久,中国在战国时期就对磁石的性质有较多了解。地磁学注重观测,也运用数理分析方法。地磁场的起源牵涉到地球内部的物理过程。由于地面磁场受空间电流影响很大,地磁学和地球内部物理学以及空间物理学有着紧密的联系。

在固体地球物理学范围内还有三个学科名称,它们都是对固体地球作综合性和整体性研究的。它们彼此之间的差别很小。其一,大地构造物理学在20世纪30年代只讨论岩石和矿物形成的物理条件和过程,近年来其研究领域已由地球表层逐渐扩大到地球内部。其二,地球内部物理学是研究地球内部物质结构、组成和物理过程的学科分支。其三,地球动力学原是研究地球内部的作用力、物质对作用力的响应特性及有关的变化过程的。随着20世纪60年代板块大地构造学说的兴起,有关地球的整体性运动的问题,丰富了地球动力学的研究内容,是比较活跃的研究领域。

地球动力学研究地球大尺度运动或整体性运动的力学过程以及力源和介质的力学性质。A. E. H. 洛夫的著作《地球动力学的若干问题》,最早使用了“地球动力学”这个词,时间是1911年。而在19世纪末,开尔文研究过地球的整体刚度,属于地球动力学的研究内容,不过他没有用“地球动力学”这个词。

20世纪60年代有人提出板块大地构造学说,新的研究课题和一些老课题纷纷使用“地球动力学”一词。地幔对流、海底扩张、大陆漂移等是地球动力学的主要内容,固体潮和地球自由振荡进一步充实了地球动力学,大地构造物理学是地球动力学中很富有朝气的一部分。当然,作为新兴的研究领域仍然有很多发展和完善的余地;随着动力学有限元计算技术的发展,地球自转问题,原来属于地理学及天文学范围的古老问题,现也成为地球动力学中引人入胜的篇章。

地震波理论是固体地球物理学研究的重要基础。地震波研究领域的任何实质性进展都会促进地球物理学的发展。当前地震波研究领域的重要课题包括(Reid, 1910):

- (1) 复杂地球介质中地震波激发与传播理论。
- (2) 高效计算三维介质中地震波传播的数值方法。
- (3) 利用先进的地震波数值模拟方法,开展设定地震与强地面运动的数值模拟研究,为精细的地震危险性分析与预测奠定基础。

我们的研究正是为适应当前地球物理学研究的需要而开展的。

1.2 地震波研究

1.2.1 地震机理

地震机制又称震源机制,是指震源区在地震发生时的力学过程,实际上就是研究地震的发生方式,从而推断地震的直接成因。在探测震源破裂过程方面,最可靠的信息就是地

震波。现代大地构造理论认为,地震可能因承受大地构造载荷发生,也可能归因于其他地震引起的动、静应力的重新分布或转移。

尽管根据地震仪记录到的地震波,可以定位震中、震源,定出发震时间,确定震级,还可以推算出震源机制,它包括震源的几何与运动学细节:断裂面的方位角、倾角、大小及断面的运动方向。但是,对于断裂发生出的动力学过程,却几乎完全未知。这是一个很尴尬的局面:我们知道一个问题的解,却不知道这个问题本身。到目前为止,地震机理仍是困扰地震学的一大难题。我们无法知道在什么地方、什么时候、将以多大的规模发生地震。迄今“地震预报”停留在猜测的水平上。研究地震机理将填补科学研究的空白,同时将解决地震预报这个科学难题。可以断言,这将是好几个世纪的持久战。

对于构造载荷和(或)静应力作用发生地震,研究较早,文献较多,思路也较成熟。1910年美国地震学家瑞德提出的弹性回跳模式(Reid, 1910),它是世界上第一个较完整的地震孕育模式,极大地影响了人们对地震发生、孕育的认识;比较有影响的模式还有,美国地震学家奴尔(Nur, 1972)提出的扩容模式;Myachkin等(1975)提出的裂缝串通模式,我国学者郭增建等(1973)提出的组合模式,以及牛志仁(1978)提出的膨胀-蠕动模式等都是基于构造载荷,即静应力作用机制。根据观测资料和理论分析,在地震预报领域早就提出了长期预报和短临预报的概念,但是这种经验性的时段划分,一直没有明确的定义。

最近,马谨(2010)根据岩石加载试验的特性曲线定义了长期孕震过程和地震发生的短临过程,以破裂和粘滑作为地震发生的基本机制,强调了用稳定性而不是强度来解释地震机制,指出地震的发生存在一定程度的不确定性。她的论点更新了一个传统观念,即地震的发生是岩石的强度问题。根据这种传统观念,只要对某地的岩石块体充分观测与细致研究,原则上总可以确定某地点在什么时间会发生多大的事件。她指出,“近年来的一些观测事实表明,一些地区的小地震可以由远处大震面波的通过而触发。实验室的研究表明很小的法向扰动可以改变断层原有失稳错动的规律”。

本书在研究断裂面对动态应力影响的基础上,提出了地震动力学触发模式。

对于复杂的科学问题,首先是要抓住它的本质,并将它简化,甚至用一个简单的模型来等效地取代它。在这方面,欧拉和他所做的工作是一个光辉的典范。压杆的稳定性在当时是个极复杂的问题,现在看来也是一个无穷自由度的问题。失稳的原因在当时大家都知道,是因为杆不是绝对地直,压力有稍许偏心,而且材质会有少许不均匀。这三个因素极微小,而且极复杂,无法研究。所以,欧拉研究了一个理想的杆:它直、不偏心,而且均匀。这样一个杆实际上不会被压弯,只会被压短、屈服。于是他在杆的侧面加上一个力,使杆稍微弯曲后撤消这个力,由此导出了临界失稳压力公式。

由于他的研究在思想上产生了巨大的飞跃,当时的科学家乃至工程师不理解,不赞同,不承认。但是这个公式与实验结果相符,最终还是被认可了,这就是著名的欧拉公式。

在非线性科学界,这个压杆稳定性问题被称为欧拉弹性曲线(Euler's elastica),是一个著名的问题。欧拉弹性曲线反映了现象的一个基本特征,就是初始条件敏感性,欧拉正

是抓住了这一点,在理论上取得了重大突破。如果他纠缠在“不直”、“偏心”、“不均匀”等复杂性质上,会使他自己陷入平庸的境地。

科学发现和科学创新的关键就在于认识上的飞跃。许多复杂性问题就在我们身边,大家都知道是怎么回事,一旦想定量描述和研究,就会碰到巨大的困难,比如地震机理,就是这样一个复杂性问题(陈剑雄等,2011)。

1.2.2 理论地震图

理论地震图是一种反演方法(Zhang等,2001;杨克绳等,2009),根据已知地震,提出假设的震源参数,用一个表示介质特性的函数——格林函数,代表介质的行为,因此理论上推算出某台站收到的地震波应该是什么样子,一般给出的是解析表达,也可以是离散的结果。用这个结果与真实地震波比较,如果震源是已知的,比如说,是一次大的人工爆破,则可以由此定出一个区域的格林函数。在此基础上,根据已知的格林函数(张海明等,2003;Leven,1985),可以修正震源参数,由此得出震源的细节。

作为地震波传播研究的经典问题,层状均匀介质中的地震波传播问题受到广泛关注(陈剑雄等,2011;姚陈等,2010),不仅在传统的反射率算法方面有所改进,一些研究者还尝试从新的角度研究这一经典问题(张海明等,2003;郑文衡等,2005)。

地震波研究取得了很多的进展,但是,上述各种方法都是基于传统理论地震图研究的思想,由于运用一个函数来代表介质的性质,因此缺少一个系统化的、具有整体性的物理结构图景,缺乏物理上的真实性和直观性;另外,上述研究现状局限于层状介质,较少考虑横向不均匀性。为此我们基于非线性动态有限元,通过建立具有明确物理意义的模型,从计算力学的角度,得出了仿真地震图。在研究中主要考虑了横向不均匀性,建立了带有断层带的三维动态有限元模型,探讨了仿真地震图作为一种有物理背景的反演方法的可行性。

1.3 研究内容和主要思路

1.3.1 研究目的

探讨计算力学与地球物理学相结合这样一种综合研究方法。运用三维非线性动态有限元方法,研究地球介质中应力的传播特性,初步探讨了大尺度对象的物理规律。

1.3.2 研究内容

本书的研究内容包括:

(1)考察非线性动力学有限元基本原理及其算法对大尺度地球科学问题的实用性。由于研究中采用了现有的软件,为了论证其基本原理和有关算法对地学问题的实用性,通过较多的算例,与地球物理观测结果对比,从空间尺度、时间尺度和加载速率等方面考察

既有软件能否用于地球动力学分析,得到软件的适用范围和适用条件。

(2)验证地球物理建模的可行性。通过与实测对比验证了地球物理建模的可行性,并为后继工作提供了可信的建模基础。选取大陆地壳对海洋潮汐的响应作为建模研究的具体对象,同时研究了两个抽象模型:断裂面反射模型以及由静摩擦力自锁的地壳块体的失稳滑动模型。

(3)实现仿真地震图。理论地震图是地震波反演的理论基础,它用格林函数描述介质的性质,它是一个黑箱,反映波的输入与输出的函数关系,忽略波传播中间过程。本书拟采用地壳的力学模型,对波的传播进行有限元模拟,得到实际过程的仿真图景。

通过反演,可以得到地壳深处的力学参数,作为一个例子,本书定量地得到了地壳深处弹性模量的上限。

(4)探讨地震触发的动力学模式。迄今所有的地震触发模式,都是建立在静力学基础上的。动态触发模式涉及到拉伸应力的产生、叠加,库伦等效应力的影响等。为此拟开展两方面的研究:其一是断层对动态应力的影响;其二是动应力对断层运动的影响。在此基础上,揭示应力与断层之间存在反馈关系。

(5)基于全球模型,探讨地震内力产生机理。地球的动力学行为具有巨大能量,即使是局部的行为,例如地震,也伴随着巨大能量的释放。能量积累过程和机理,以及动力来源的追踪,是本项研究的内容之一。

1.3.3 研究目标

研究目标是探讨计算仿真理论和方法以及在地球科学中的应用。将这方面的研究推进一步,通过研究将了解地球物理建模的正确性,通过反演思想实现仿真地震图,进而探讨地震机理。

1.3.4 本书致力于阐述以下内容

通过研究大陆地壳对海洋潮汐的应力响应,探讨地壳中的动态过程。地壳中的现象比如地震,若归结为动力学或静力学成因,其图景是大不一样的。研究中形成了动力学成因的观点。过去实验室尺度的研究,研究对象往往是厘米到米量级,岩石断裂的规律,用静力学解释更为合理。静力学在这种尺度下起主要作用。而动应力的传播速度大约为 $6\ 000\text{m/s}$ 左右,在实验室尺度下,动应力在极其多次的反射中混淆在一起并平均化,从而不能在实验中反映出来。相反,大尺度对象不然,由于波的辐射率与频率的4次方成正比,地震波可以传播很远,动力学机理在大尺度现象中起主要作用。因此,涉及到地壳尺度的地球物理规律,必须从动力学机理入手,并从应力波的传播特性来加以研究。

地壳中典型的应力波就是地震波,因此,进行了有关地震波的研究。在研究中侧重三个方面进行计算仿真分析:一是借鉴理论地震图的思想,进行仿真地震图的研究;二是地震波的反射;三是正应力对内摩擦力的影响,改变库伦等效应力,从而导致地壳中的各种

现象。

下面分别简述地震机理和理论地震图。

关于仿真地震图的探讨,计算仿真的结果显示,可以分离出S波和P波,即横波和纵波。S波和P波的分离是由于波速度不同,在传播了很长的距离后,P波超前S波很长一段时间。这在实验室小尺度试验中是看不到的。S波和P波的走时差(从震源穿过地壳到达观测站的时间差),可以用来确定源-站的距离。在实际问题中,距离是已知的,可以反演确定波速度和发震时间。根据波速度,可以进一步了解地壳介质的力学模量(杨氏模量和剪切模量)和密度的相对值。因此,走时分析的先决条件是辨别出S波和P波。我们的计算仿真结果,可以分辨出S波与P波,表明结果具有实际意义,可以结合实际进行研究。另外,S波与P波的分离,是大尺度研究对象特有的结果,在小尺度模型上是不会出现的,因此,反映了有限元模拟在分析地学研究中的优越性。

理论上的原理很简单。而实际上由于波速度沿着深度的变化,波在传播时发生连续不断地折射,波射线实际上是一条向地心方向弯曲的曲线,不同震中距的波射线,所到达的最大深度也不同,因此,地震走时以及走时差和震中距的关系不是线性关系。为此,Jeffery 和 bolus 根据实际调查,得出了J-B走时表,(根据走时表,还可以查出地震发生的时刻,这个时刻不可能被实测,而是反推的结果,因此,天然地震的发震时刻是不准确的)。到现在J-B走时表仍然在各个地震台站使用。在实现了地震观测数字化以后,结合J-B走时表,进行走时分析,认识到地壳介质在高压下具有较高的等效杨氏模量,这与实际观测结果相符。物理解释如下:地壳介质呈多孔隙且含有孔隙流体,在高压下,孔隙被压紧、密实,因此提高了杨氏模量。

从海洋潮汐的动应力模拟到仿真地震图的研究,非线性有限元方法显示出适合研究大尺度物理对象的优越性。这些研究反映了大尺度下应力效应,加深了对地壳介质非均匀性和高度非均匀条件下波动特性的认识。但是,地壳非均匀的细节,即不同尺度的非连续面——断层或裂隙,将怎样影响波动,而波动又怎样影响断层的运动和动力学行为,就自然地成为必须解答的问题。为此,我们做了“断裂面对地震波的影响”以及“动应力对断层错动的影响”这两方面的研究。

基于上述认识,首先研究了断裂面对地震波的影响,在此特别注重自由面的影响。实际上,大的充满断层泥的断层面、充满孔隙流体的裂隙、从波速小到波速大的连续交界面都可看作自由面。研究显示了波在反射时的半波损失,也就是说,压缩波反射将变成拉伸波,而拉伸波反射变成压缩波。这一点是与实验和观察相符的:手榴弹或其他炸弹的铸铁外壳,往往刻有刻槽,按照静态应力分析,断裂应发生在刻槽处。但是,虽然刻槽处最薄弱,断裂却很规则地发生在两个刻槽之间最厚实的地方,原因是压应力不能导致破坏,刻槽的作用是反射动态的压应力,使之变成拉伸应力,两列拉伸波在刻槽之间最厚实的地方相遇、叠加达到两倍的拉应力,从而使铁质外壳破裂。在模拟研究中,岩石也能发生这样的破裂过程。但是,由于地壳中巨大的围压呈压应力性质,很难在地壳深处得到拉伸应力

状态。考虑到平均正应力的下降,将会减小摩擦(内摩擦),从而增大库伦应力,因此,地壳中动应力的破坏效应,可能是通过减小内摩擦来实现的。观测结果支持这一观点:在大震前往往伴随着应力下降。虽然这些应力下降并不都是反射的压应力引起的,动应力在地壳岩石破坏事件中所起的作用已经可以确认了。研究还表明,由于反射的作用,地壳块体的形状及断层的几何形态,对地震的发生将会有较大影响。

地壳的间断面对动应力的行为有较大影响,而相反的影响也是存在的,即动态应力对断层的运动学、动力学行为也有明显的影响,这就形成了反馈关系。为此,需要探讨动应力对断层错动的影响。

为了研究动应力在减小摩擦,并引起断裂面滑动的机理,我们设计了一个有摩擦力的模型,系统在摩擦力作用下处于稳定状态,加上一个动态的冲击压应力,当压应力在边界上反射后,变成了拉应力,叠加在静态的压应力上,减小了摩擦力,从而引起了滑动。

通过上述一系列的研究,得到了一个新的认识。对于大尺度的地壳块体,过去实验室尺度的假设在推广应用时应持谨慎态度。对于实验室尺度的试样,观测到的现象具有静力学的机理;而大尺度的块体,实际表现出的现象,具有动力学机制,静应力假设有局限不是主要因素,所以,着眼于动应力的理论探讨是合理的。为了研究动力学机理,就要采用动态有限元进行动力学分析。因此,波的效应成为瞩目的焦点,在考虑波的影响的时候,动态应力会影响地壳中的构造稳定性,而构造的失稳会激发波,也就是动态应力,并以此形成反馈关系。在此基础上,进一步研究了全球模型。

本书探讨计算力学与地球物理学综合研究的方法论问题,研究计算力学应用于地球科学的可行性以及一般技术路线。通过研究,得到对固体地球典型动力学问题的一般认识。地球科学具有丰富的观测资料,作为大尺度物理对象,很多问题有待解决;而计算力学随着电子计算机的进步,得到了长足的发展,因此,两者的结合不仅是一种边缘学科的生长点,而且是未来这两个学科发展的必然趋势。