

测绘科技专著出版基金资助

非连续变形分析与现代地壳运动

Discontinuous Deformation Analysis and Recent Crustal Motion

王泽民 著



测绘出版社

内容简介

测绘科技专著出版基金资助

非连续变形分析与 现代地壳运动

Discontinuous Deformation Analysis and
Recent Crustal Motion

王泽民 著

测绘出版社

· 北京 ·

内 容 简 介

本书系统地探讨了非连续变形分析与现代地壳运动的理论和应用。从球坐标系位移与变形的基本关系式出发,采用严密的向量运算方法,建立了球面上块体任一点的位移与位移不变量之间的函数关系,进而在总势能最小化原理下建立了平衡方程式以及球面上由多个块体组成的块体系统运动学方程。系统地介绍了开发研制的球面 DDA 数值分析软件,它可以广泛适用于球面不连续力学问题的研究。应用球面 DDA 数值方法研究了新疆伽师地区的地震活动特征,科学合理地解释了伽师强震群发生的必然性,并预测伽师地区仍有很大可能再次发生地震。利用高精度 GPS 地壳监测网的资料,计算出中国目前较为完整的框架统一的 GPS 地壳运动速度图像,进而建立了中国大陆现今地壳运动的速度场。根据珠穆朗玛峰及青藏地区的多期大地测量资料和地震资料,对该地区的地壳运动进行了研究,探讨了地壳运动在时间上和空间上的非平稳性与地震活动之间的关系。

本书可供从事固体地球物理、地震、地质、大地测量以及工程力学的科学技术人员和大专院校相关专业的师生参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

非连续变形分析与现代地壳运动/王泽民著. —北京:
测绘出版社, 2002. 12

ISBN 7-5030-1136-X

I. 非... II. 王... III. 地壳运动 —计算方法 —应用软件, DDA IV. P542

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2002) 第 059771 号

测绘出版社出版

社址: 北京宣武区白纸坊西街 3 号 邮编: 100054

E-mail: ccph @ public. bta. net. cn

河北三河市艺苑印刷厂印刷 · 新华书店经销

2002 年 12 月第一版 · 2002 年 12 月第一次印刷

开本: 184×260 1/16 · 印张: 7

字数: 162 千字 · 印数: 0001—3000 册

定价: 16.80 元

前 言

现代地壳运动, 作为一门独立的学科和学术领域范畴而出现, 既有它的理论和学术意义, 也是人类社会发展的实际需要。其研究的内容相当广泛, 核心是研究如何定量确定地壳运动和变形的空间分布、时间过程、运动学与动力学模型, 以及在预测和减轻自然灾害中的应用。本书针对采用现代测量手段获得的大量地壳运动监测数据, 如何分析研究, 如何进行深层次的加工并揭示其蕴涵的内部机理, 这一项亟待解决的重点、难点问题, 采用数值分析方法, 对特定区域的地壳运动、应力分布及演化规律进行了深入研究。

数值分析方法在现代地壳运动研究中起着至关重要的作用, 现实世界的客观描述无一不是建立在物理模型的精确数学表达上。板块构造学说的提出, 促进了用刚体运动模型来描述地壳宏观大尺度的机械运动, 该模型在解释过去几百万年全球总体构造运动方面是成功的, 但在局部区域 (例如大陆板块边界及内部) 则误差很大。另一类描述地壳运动的物理数学模型是固体变形模型, 在数值计算中多采用有限元法 (FEM), 对于连续介质力学问题, 有限元法获得很大成功。事实上, 无论是大到全球 (可分为数个大板块), 还是小到一块岩石 (充满着节理), 都是不连续的块体系统, 在变形运动过程中都是不连续的。因此, 采用块体系统非连续变形数值分析方法来研究地壳运动更科学, 而用有限元法处理众多的断裂和不连续裂缝则是相当困难的。

非连续变形分析 (DDA) 方法是从岩石力学分析中发展起来的一种全新的数值方法。这种方法用位移作为未知数, 解平衡方程时则是用与有限单元法中结构矩阵分析相同的方法。非连续变形分析以严格遵循经典力学规则为基础, 它可用来分析块体系统的力和位移的相互作用, 对各块体允许有位移、变形和应变; 对整个块体系统, 允许滑动和块体界面间张开或闭合。如果知道每个块体的几何形状、荷载及材料特性常数, 以及块体接触的摩擦系数、粘着力和阻尼特征, DDA 方法便可计算应力、应变、滑动、块体接触力和块体位移。

本书的核心内容是研究非连续变形分析与现代地壳运动的理论和应用。在系统地阐述了现代地壳运动的研究内容、方法和技术手段的基础上, 针对现代地壳运动研究数值分析方法的局限性, 采用 DDA 方法来研究地壳运动。为了科学有效的把 DDA 方法应用于地壳运动研究, 本书首先把 DDA 方法从平面数值模型发展到适用于大范围地壳运动研究的球面数值模型。在此基础上, 编制了球面非连续变形分析 (SDDA) 数值分析软件, 并应用该软件对新疆伽师地区的地震活动进行了数值模拟研究, 得出一些有益的结论。应用该软件还对青藏高原及中国大陆其它地区的地壳运动特征进行了数值模拟, 得到了许多新的

认识。结合多期 GPS 观测资料,用球面 DDA 模型拟合出了中国大陆地壳运动速度场模型。此外,利用大地测量资料和地震资料对珠穆朗玛峰及邻近地区的地壳运动特征进行了深入的分析,得出了一些新的结论。

本书以笔者结合国家重大基础研究项目(攀登计划)“现代地壳运动与地球动力学研究”而作的博士论文为基础完善而成。书中有关研究工作得到了武汉大学刘经南院士的指导和帮助,还得到国家测绘局陈俊勇院士、国家地震局汪一鹏研究员的指导和帮助;此外,由于测绘科技专著出版基金的资助才使本书得以出版,在此一并表示感谢!

由于作者水平有限,错误和不足之处在所难免,敬请读者指正。

作者

2002 年 2 月

目 录

第一章 绪 论	(1)
§ 1.1 现代地壳运动研究的意义和内容	(1)
§ 1.2 现代地壳运动的研究方法和技术手段	(3)
§ 1.3 现代地壳运动研究的数值分析方法	(4)
§ 1.4 非连续变形分析 (DDA) 方法概述	(6)
§ 1.5 本书研究的主要内容	(9)
第二章 球面坐标系中块体的位移和变形	(11)
§ 2.1 球坐标系中弹性力学的基本方程组	(11)
§ 2.2 球面上块体的变形	(12)
§ 2.3 球面上块体变形的矢量运算推导	(14)
第三章 球面坐标系中的联立方程式	(16)
§ 3.1 球面联立方程的建立	(16)
§ 3.2 球面上单一块体的应力、应变及荷载分析	(16)
§ 3.3 单一块体的惯性力子矩阵	(20)
§ 3.4 粘性力子矩阵	(23)
§ 3.5 位移观测量对块体运动和变形的约束	(24)
§ 3.6 长度基线观测量对块体系统的约束	(26)
第四章 块体系统运动学	(32)
§ 4.1 块体间接触的概念	(32)
§ 4.2 块体间的相互嵌入	(35)
§ 4.3 法向弹簧子矩阵	(37)
§ 4.4 切向弹簧的设置及其子矩阵	(42)
§ 4.5 摩擦力的处理	(45)
§ 4.6 弹簧的施加原则	(47)
第五章 球面 DDA 软件的设计及功能分析	(48)
§ 5.1 球面 DDA 软件的模型	(48)
§ 5.2 球面 DDA 软件中的一些基本假定和约束	(48)
§ 5.3 球面 DDA 软件程序设计流程图	(50)
§ 5.4 球面 DDA 软件程序模块简介	(51)
§ 5.5 球面 DDA 软件的主要特点	(52)
§ 5.6 球面 DDA 软件的运行环境及算例	(53)

第六章 新疆伽师地区地震活动的数值模拟研究	(55)
§ 6.1 伽师地区的地震地质活动和现今地壳运动概况	(55)
§ 6.2 用 DDA 方法数值模拟伽师地区的块体运动变形特征	(58)
§ 6.3 结果分析	(69)
第七章 青藏高原及中国大陆其它地区的现今地壳运动特征	(72)
§ 7.1 青藏高原的变形运动特征及新构造运动分区	(72)
§ 7.2 大地测量资料所反映的青藏高原及中国大陆其它地区的现今地壳 水平运动特征	(75)
§ 7.3 珠峰地区及青藏高原地壳垂直运动特征研究	(79)
§ 7.4 利用地震矩张量和 GPS 速度反演喜马拉雅块体现今运动学特征	(85)
§ 7.5 利用 DDA 方法数值模拟青藏高原及中国大陆其它地区的构造变形 与地壳应力场	(92)
§ 7.6 利用 GPS 资料采用 DDA 模型求定中国大陆地壳运动速度场	(98)
第八章 结论与建议	(100)
§ 8.1 主要研究成果和结论	(100)
§ 8.2 几点建议	(102)
参考文献	(103)

第一章 绪 论

§ 1.1 现代地壳运动研究的意义和内容

1.1.1 现代地壳运动研究的意义

现代地壳运动，作为一门独立的学科和学术领域范畴而出现，既有它的理论和学术意义，也是人类社会发展的实际需要。人们从对漫长的地质时期的地壳运动研究，发展到新构造运动的研究，进而必然发展到探索最近时期的地壳运动。现代地壳运动是地球活动的一部分，是亿万年地壳运动发展至目前的自然延伸，它还是地球动力学研究的重要内容和基础。因为要研究地球动力学的演化和规律，首先要研究岩石圈的组成和运动，而现代地壳运动正是上述诸方面的可以直接察觉、观测的反映。地壳运动研究的趋势，也从定性研究走上定量研究，而现代地壳运动正是发生在不久的过去时期和现今，可以用仪器直接进行观测。大地测量学和地球物理学也确实观测到大量地壳运动的信息数据，发现许多与地壳运动有关的重要现象，都需要得到解释，这就必然促使“现代地壳运动”作为独立学科而提出并得以快速发展。

人类生活在地球上，无时无刻不受到现代地壳运动的影响和制约。其中一个重要问题是地震灾害。地震是现代地壳运动的表现形式之一，它直接威胁人类的生存、生活和各项建设事业，要提高地震预测预报的准确率，减轻地震带来的危害，就必须研究现代地壳运动的时空规律。尽管人们可以从各自的学科，利用不同的手段、方法去研究，但其中心都是探索现代地壳运动的机制和规律。

城市建设、水工建设和矿山建设都存在一个稳定性问题，这也涉及现代地壳运动的研究。人类的活动又反过来影响地壳运动，如水利建设或其它工程建设会诱发地震或增强地震活动的强度和频度，大规模矿产和石油开发会造成现代地壳运动的不均衡和重新调整，城市生活、工业用水可能引起地面大面积沉降。如我国天津、上海等沿海城市因过度开采地下水使地面持续沉降，速率达 5 cm/a。这些都与地壳运动平衡状态遭到破坏有关。

总之，现代地壳运动直接影响人类的生存和生活，对此进行研究意义重大。

1.1.2 现代地壳运动研究的主要内容

现代地壳运动研究的内容是相当广泛的。从学科上，包括地质学、地球物理学、大地测量学、海洋学、天文学、考古学等多种学科。其核心是研究如何定量确定地壳运动和变形的空间分布、时间过程、运动学与动力学模型以及在预测和减轻自然灾害中的应用。从研究的问题上看，既包括运动学，也包括动力学，以及引起地壳运动的各种因素，还包括

观测地壳运动的方法手段。

现代地壳运动作为独立的学科领域，首先要研究现代地壳运动的基本性质和基本类型。过去将地壳运动划分为垂直运动和水平运动两种基本类型，但实际上的运动类型要复杂得多，例如还有掀斜运动、旋转运动等。

现代地壳运动在时间上所表现的特征极为复杂。它几乎囊括了各种不同时间尺度的运动，长至几百年、几十年，短至几秒钟。针对不同类型的运动，应该采取不同的研究方法和观测手段。此外，还有一种突发性运动，它不依赖于运动的逐步演化和加速，在目前尚不完全掌握的某种触发因素作用下，在任何时间突然发生急速运动。地震活动作为地壳运动的一种表现形式既可能是一种逐步演化加速的快速运动，也可能是一种突发性运动，或二者兼而有之。

另一重要研究方面就是全球运动和区域运动特征的研究。全球运动有它的统一性，可能与作为星球之一的地球本身运动有关，如地球自转、地极运动。区域运动对人们的关系更加直接。不同区域的运动性质不同，我国东部与西部的现代地壳运动有显著差别，这与不同区域的大地构造位置和属性及其动力学环境有关。

要了解现代地壳运动的本质，必须重视现代地壳运动与现代地球物理作用及深部介质的关系，包括重力场、地磁场、热流场的观测和以了解地壳介质结构为目的的地震测深和大地电磁探测。我国以南北构造带为界，东西两地区的现代地壳运动截然不同。这与深部介质特征和地壳结构有关，两侧不仅地壳厚度差别很大，而且地壳介质特征和细部结构也不同。人类活动对现代地壳运动的作用和影响，不仅是一理论课题，更重要的是一实际问题。大规模的工程建设、城市建设、矿产和油田的开采、地下水的抽取，都影响到地壳运动的均衡和地壳的稳定。这一影响作用的机制和规律，也是现代地壳运动研究的重要课题。

归纳起来现代地壳运动研究方向主要有：

- 现今地壳运动多维图像；
- 大陆地壳形变与模型；
- 区域地壳形变与模型；
- 块体边界带（断层带）地壳形变与模型；
- 定点台阵连续变形与地球固体潮汐及形变波传播；
- 现今地壳形变与大陆动力学、边缘海动力学和现今地球动力学；
- 地震孕育过程中的地壳形变与动力学；
- 地壳稳定性评价与区划；
- 海平面变化与城市地面沉降；
- 对自然灾害和工程灾害的地壳形变监测与预测；
- 空间、地面与深部相结合的地壳运动观测技术；
- 多层次多尺度时空动态数据处理、地壳运动与灾害孕育过程信息提取技术。

§ 1.2 现代地壳运动的研究方法和技术手段

地球科学及其所属的各级子学科本质上都是观测和分析归纳的科学。观测技术的革命必将导致学科自身的进步,分析的深入使认识得以升华。当代信息技术,尤其是空间测地新技术群的飞速发展,赋予了现代地壳运动研究实际揭示和定量研究的手段。

现代地壳运动研究采用多种先进的测地技术,可以精确测定时间尺度由秒至百年、空间尺度由定点至数千公里的地壳运动及其时空动态过程,严谨处理数据,建立物理-数学模型,并对结果做出动力学解释和未来变化预测;揭示导致地震等灾害性的地壳形变过程以及由于灾害事件而造成的形变结果。其特有的研究领域,使其成为一门新兴的应用基础学科,并在地球动力学和大陆动力学的研究中扮演重要角色。

随着观测技术的发展,一个空间、地面、深部相结合的立体测地系统正在形成,它具有宽频域、多尺度、多圈层、全景实时、精确定量等特征,具有空前强大的测地能力。归纳起来包括以下测地新技术和立体测地系统。

1. 精密定位技术

全球和局域大陆的地壳运动以及地震错动,一般是水平运动显著大于垂直运动,水平力是孕震过程中主要的作用力。由于经典大地测量能力的限制,长期以来无法对大空间范围内的地壳水平运动实施精密测量。随着空间测量技术的发展,特别是 GPS (Global Positioning System) 测量技术的日益成熟和其所达到的高精度、低成本、高效率,使其在现代地壳运动研究中扮演了重要角色,它能在 $1\sim 10\,000\text{ km}$ 的范围内工作,测量精度高达 10^{-9} (相对中误差)。通过设立常年 GPS 跟踪站,可以几乎实时地测定地体的运动速度。这些观测数据为地壳运动的深入研究提供了可能。我国正在开展的科学工程“中国地壳运动观测网络”就是主要依靠 GPS 技术。它能精确测定板块、亚板块、构造系的位移场、速度场和应变场。此外,前苏联也发展了一种可与 GPS 相竞争的 GLONASS 系统。国际民航组织正在发展 GNSS 系统。综合利用多种系统组合定位,将取得高于前两系统的精度和可靠性。

2. 地面形变全景测量技术

目前全球定位系统只能逐点测量,测定高程的精度尚不理想。D-INSAR (Differential Synthetic Aperture Radar Interferometry) 技术正在快速发展中,其精度可达雷达微波波长的一半,与 GPS 相比除高程变化测量更为精确外,更重要的是能同时获取地面每一点的动态变化信息。D-INSAR 技术已成功地应用于美国、希腊、日本等多个强震的同震和震后形变测定,监测火山活动导致的地面膨胀及冰川进退等。GPS 与 INSAR 的集成组合系统,实现了两者的优势互补,从离散点位测定进入到四维形变场的整体动态精确测定。

3. 重力场和地磁场的微动态空间探测技术

空间测地技术不仅能精确测定地表的形变,也能精确测定深部物理过程导致的重力场、磁场微量动态变化。NASA 于 2000 年前后把超导重力仪安置在卫星上,实施超导重

力梯度测量任务 (SGGM, Superconducting Gravity Gradiometer Mission); 还将通过一组特别的小卫星实施重力与磁力试验卫星任务 (GAMES, Gravity and Magnetism Experiment Satellite for Oceanography and Solid Earth Science), 从而以很高的精度测定重力场和地磁场的微动态变化。它们为地球内部物理过程的动态反演和地震短临预报提供了新手段。

各种测地新技术相结合构成的立体测地系统有以下几种。

1. 空间测地系统

国家大型科学工程——中国地壳运动观测网络 (CMONOC) 正在全面开展。以 GPS 为主, 辅以甚长基线射电干涉测量 (VLBI) 和人卫激光测距 (SLR) 等空间测地技术, 结合精密重力和精密水准测量构成大范围、高精度、高时空分辨率的地壳运动观测网络, 以监测现今地壳运动, 服务于地震预测, 兼顾大地测量和国防需求。基准网由 25 个 GPS 连续观测站构成, 其中部分站并置有 VLBI、SLR, 其 GPS 相邻站间基线长度年变化率测定精度优于 2 mm , 绝对重力测定精度优于 $5 \times 10^{-8} \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$ 。基本网由 56 个定期复测的 GPS 观测站构成。区域网由 1 000 个不定期复测的 GPS 观测站组成, 沿主要构造带、地震危险区及沿海经济发展地区布设。数据传输与处理分析系统有一个数据中心和三个子系统组成。

此外, 国家攀登计划“现代地壳运动与地球动力学研究”, 各有关部门和单位也为不同目的建立了各自的空间测地网络, 它们构成了我国的空间测地系统。

2. 地面测地系统

为了防震减灾的需要, 国家地震局在我国大陆各主要构造带和地震危险区布置了精密水准测量网和高精度重力测量网, 并建立了 200 余个以监测地球固体潮汐和非潮汐随时间变化为目的的定点连续观测台站, 以及近 30 个跨断层形变定点台站和近 300 处跨断层形变流动测量场地, 构成了我国地面测地系统。

3. 深部动态探测系统

中国数字地震观测系统的建成, 将能够以更高的分辨率探测地球深部结构, 该项工程被喻为以地震波作为照亮地球内部的“光”的“构造透镜工程”。

组合重力位变化和观测点位置变化的时间序列, 便可以反演出地球内部不同深度的介质层密度及其随时间的变化。

应用“中国地壳运动观测网络”的 25 个 GPS 连续观测站以及国际 GPS 服务 (IGS, International GPS Service) 站的数据, 可以进行深部介质动态探测。

这三方面的工作构成了我国地学深部动态探测系统。

§ 1.3 现代地壳运动研究的数值分析方法

1.3.1 数值分析方法分类

对于采用现代测量手段获得的大量地壳运动监测数据, 如何分析研究, 进行深层次的加工, 揭示蕴涵的内部机理, 是一项亟待解决的重点、难点问题。归纳各种数值分析研究

成果, 可以用两种力学方法描述地球物质宏观大尺度的机械运动, 即物体位置在时间空间中的变动。

(1) 刚体运动, 包括平动和转动。

(2) 固体变形, 有弹性和塑性之分。

变形与刚体运动的主要区别在于相对于参考系物体内部位移分布是否均匀, 一般情况下变形体靠近外力作用点处位移较大, 远离外力作用点或在固定约束边界附近位移较小; 其次是作用于固体边界的外力通过变形转换为内部的应力, 刚体则是通过整体运动传递外力作用。

板块构造学说指出全球以及近似的构造可用板块模型描述, 即把地球外壳划分成若干个刚性板块, 这些板块在球面上作相对运动, 可用欧拉定律描绘为一种球面上的绕轴旋转运动。在全球范围内, 板块沿分离型边界的扩张增生, 与沿汇聚型边界的压缩消亡相互补偿抵消, 从而使地球半径保持不变。此模型在解释过去几百万年全球总体构造运动方面和大地测量数据所反映的现今板块运动总体特征方面是成功的, 但在局部区域对某些大陆板块是不成立的, 它不能解释大陆内部板块边界的扩散特征, 也不符合板块内部运动、变形以及大量分散地震活动的证据。

鉴于此, 许多学者在研究板内地壳运动时都采用固体变形模型, 最具代表性的有 Molnar 和 Tapponnier 发表的关于板内构造的论文 (Molnar, 1975; Tapponnier, 1976, 1977), 用大陆碰撞模式对亚洲的新生代构造提出统一的力学解释。他们把印度板块向亚洲大陆的挤入简化为平面刚塑性问题, 用塑性滑移线模拟 3/5 中国西部的走滑断层, 而把贝加尔裂谷和山西地堑解释为剪切带末端的张性破裂或远离挤入体的对面边界次级拉张破裂。但用这个平面力学模型不能解释中国东部的隆起与凹陷构造。

1.3.2 现代地壳运动研究中的有限元法

在数值计算方法中, 众多研究者采用有限元法。有限元法 (FEM, Finite Element Method) 是一种非常有效的解决正演问题的数值计算方法, 有限元方法由 R. Courant 于 1943 年首次提出的。自 50 年代起在弹性力学中得到了迅速发展。其主要优点是适用于物性参数复杂分布的区域, 且解算过程规范。到目前为止, 有限元法在地球科学尤其在地球物理和大地测量反演领域得到了非常广泛的应用 (殷有泉, 1987)。

从数学角度看, 有限元法是以变分原理和剖分插值为基础的数值计算方法。变分法是研究泛函极值的一种方法。在大地测量、地球物理等反演计算中, 必然涉及正演问题的解算, 这种正演问题大多数情况下可用偏微分方程及相应的边界条件来描述。由偏微分方程及边界条件便组成了所谓的边值问题, 解边值问题相当于解变分问题。里兹 (Ritz) 法是求解变分问题的古典方法, 它用在全区域内选择近似函数的方法解变分问题。对于复杂边界条件, 里兹法的缺陷是非常明显的。有限元法则把作用域剖分为足够小的单元, 在单元内选择近似函数, 在解算中先对每个单元进行分析, 然后通过连接单元的节点对作用域作整体分析, 从而把一个复杂的偏微分方程的求解问题, 变成了线性方程组的解算问题。

尽管有限元法在数值分析中发挥着重要作用, 且被广泛采用, 但是在应用有限元方法

进行数值解算时,是把介质看成近似均一的,模拟出连续的位移场。事实上,无论是大到全球(可分为数个大板块)或小到一块岩石(充满着节理),都是不连续的块体系统,在变形运动过程中都是不连续的。因此,采用块体系统非连续变形数值分析方法来研究地壳运动更科学。而用有限元法处理众多的断裂和不连续裂缝则是相当困难的。

§ 1.4 非连续变形分析 (DDA) 方法概述

模拟介质不连续缝的历史可追溯到 30 年前的古德曼 (Goodman)、泰勒 (Taylor) 和勃利克 (Brekke) 等教授发展的节理单元,对岩土裂缝的数值计算已在岩土工程中得到广泛应用。肯达尔 (Cundall) 介绍的离散元法现在被广泛应用于节理或块状岩石。两者是用虚拟力来调整滑动和阻止块体重叠的一种力法,有时候可达到稳定。1993 年由石根华博士发展的非连续变形分析 (DDA, Discontinuous Deformation Analysis) 是全新的数值方法。这种方法用位移作为未知数,解平衡方程时则是用与有限单元法中结构矩阵分析相同的方法。非连续变形分析以严格遵循经典力学规则为基础。它可用来分析块体系统的力和位移的相互作用,对各块体允许有位移、变形和应变;对整个块体系统,允许滑动和块体界面间张开或闭合。如果知道每个块体的几何形状、荷载及材料特性常数,以及块体接触的摩擦系数、粘着力和阻尼特征,DDA 方法便可计算应力、应变、滑动、块体接触力和块体位移。

1.4.1 DDA 方法中块体的位移和变形

在 DDA 方法中,块体系统的大位移和大变形是通过分步迭代计算的小位移和小变形累加来实现的。由于每一步都是小位移,因此可以设每一块体在每一步过程中具有常应力和常应变,平面上块体任一点 (x, y) 的位移 (u, v) 可用 6 个位移不变量 $(u_0, v_0, r_0, \epsilon_x, \epsilon_y, \gamma_{xy})$ 来表示。

(u_0, v_0) 是块体内特殊点 (x_0, y_0) (比如块体的重心) 的刚体位移,角 r_0 是块体绕转动中心 (x_0, y_0) 的转动角 (以弧度为单位); $\epsilon_x, \epsilon_y, \gamma_{xy}$ 是块体的法向应变和切向应变。则可推导出 (石根华, 1987)

$$\begin{bmatrix} u \\ v \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & -(y-y_0) & (x-x_0) & 0 & \frac{y-y_0}{2} \\ 0 & 1 & (x-x_0) & 0 & (y-y_0) & \frac{x-x_0}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_0 \\ v_0 \\ r_0 \\ \epsilon_x \\ \epsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{bmatrix} \quad (1.1)$$

可以证明上述位移函数是块体变形的全一阶近似。

平面上非连续变形分析的平衡方程式由总势能最小化原理来建立,即由各种力和应力产生的总势能 Π 趋于最小来推导。

$$\Pi = \min \quad (1.2)$$

则得到平衡方程

$$\frac{\partial \Pi}{\partial d_{ri}} = 0 \quad (1.3)$$

式(1.3)中:角标 i 代表第 i 个块体; d_{ri} 是块体 i 的位移变量; $r=1, 2, 3, 4, 5, 6$, 对应于上述 6 个位移不变量。

方程式(1.4)

$$\frac{\partial \Pi}{\partial u_0} = 0, \quad \frac{\partial \Pi}{\partial v_0} = 0 \quad (1.4)$$

分别代表作用于块体 x, y 方向上所有荷载和接触力平衡。

方程式(1.5)

$$\frac{\partial \Pi}{\partial r_0} = 0 \quad (1.5)$$

代表作用于块体 i 上的所有荷载和接触力的力矩平衡。

方程式(1.6)

$$\frac{\partial \Pi}{\partial \epsilon_x} = 0, \quad \frac{\partial \Pi}{\partial \epsilon_y} = 0, \quad \frac{\partial \Pi}{\partial \gamma_{xy}} = 0 \quad (1.6)$$

代表沿 x, y 方向块体 i 上的所有外力和应力的平衡。

平衡方程式(1.3)的系数由下列微分求得

$$\frac{\partial^2 \Pi}{\partial d_{ri} \partial d_{sj}} \quad (r, s = 1, 2, 3, 4, 5, 6) \quad (1.7)$$

式(1.7)中,当 $i=j$ 时,则为块体 i 的系数元素,由块体 i 的材料特性和相关块体的相互作用决定,构成 6×6 阶对称阵。当 $i \neq j$ 时,则为块体系统中块体 i 的相关联元素,即由块体 i 和块体 j 之间的接触所决定,也构成 6×6 阶阵。

把块体系统中所有自身的系数子阵和块体间的相关联子阵叠加,则构成总体平衡方程。

$$\begin{bmatrix} K_{11} & K_{12} & K_{13} & \cdots & K_{1n} \\ K_{21} & K_{22} & K_{23} & \cdots & K_{2n} \\ K_{31} & K_{32} & K_{33} & \cdots & K_{3n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & & \vdots \\ K_{n1} & K_{n2} & K_{n3} & \cdots & K_{nn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} D_1 \\ D_2 \\ D_3 \\ \vdots \\ D_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F_1 \\ F_2 \\ F_3 \\ \vdots \\ F_n \end{bmatrix} \quad (1.8)$$

式(1.8)中每个系数元素 K_{ij} 都是 6×6 阶子矩阵。 $[D_i]$ 、 $[F_i]$ 是 6×1 阶子矩阵, $[D_i]$ 代表块体 i 的变形变量 ($d_{1i}, d_{2i}, d_{3i}, d_{4i}, d_{5i}, d_{6i}$); $[F_i]$ 是块体 i 上分配给 6 个变形变量的荷载,它可由下式求出。

$$-\frac{\partial \Pi(0)}{\partial d_{ri}} \quad (r = 1, 2, 3, 4, 5, 6)$$

1.4.2 DDA 方法中块体系统运动的处理

非连续变形分析发展了一种完善的运动学理论,在块体没有被别的块体嵌入的条件

下,它可以计算出许多块体的大变形结果。非连续变形方法用加约束弹簧的方式,克服了块体系统中块体间的相互侵入问题。数学处理上通过引入“弹簧子矩阵”,使严格的不等式成为线性方程系统。

平衡方程式通过用加刚度很大的弹簧在一个或两个方向上锁住块体的运动。如果两个块体之间有接触拉力,在锁定撤离后它们将被分开。总方程式在选择锁定位置时必须反复求解。用此方法,块体系即使有拉力和嵌入,仍可在极短时间内正确选定锁定位置。此外,块体的接触力在非连续变形分析中可精确计算。

DDA 的数学模型采用隐式算法,既考虑到静力学又考虑到动力学。时间步用于静力学和动力学两者,唯一的差别是静力学计算假定每一时间步开始速度为零,而动力学计算则保持前一时间步的速度。在大变形情况下,DDA 方法的每一步由前一步形成的变形了的块体形状和位置开始,而建立和求解的平衡方程式是针对当前块体的几何形状和受力状态。

1.4.3 DDA 方法与有限元方法的比较

DDA 方法是与有限元方法相平行的一种数值分析方法。它解算的网格与有限单元类型相似,但所有单元是被事先存在的不连续缝所包围的实际隔离块体,这是非连续变形分析显著超过有限元分析的优点。非连续变形分析在块体边界不是连续体,形成网格单元的块体可以是任意条边的,凸状形或非凸状形的,甚至可以是带孔的多接点的多边形;块体网格不要求块体顶点与另一块体顶点相接触。而有限元方法限定只能用标准形状的单元,且顶点相接。此外,在 DDA 方法中,当块体接触时,库仑定律可用于接触面,而联立平衡方程式是对每一荷载或时间增量来选择和求解的。在有限元法的情况下,未知数是所有节点的自由度之和。在 DDA 方法的情况下,未知数是所有块体的自由度之和。从理论观点看,DDA 方法是有限元方法的广义化。

虽然 DDA 方法类似于离散单元法,但它更接近于与有限元法相平行的一种方法,因其:①采用总势能最小化来建立平衡方程式;②选择位移作为联立方程式的未知数;③把刚度、质量和荷载的子矩阵采用叠加的方式加到联立方程的系数矩阵中去。

非连续变形分析的块体刚度矩阵比有限单元分析的单元刚度矩阵更加简单。该方法把接触块体的位移锁定以及附加的杆单元应用到有限元分析中去。

非连续变形分析的突出特点是:完全的运动学及其数值可靠性、完全一阶位移近似、严格的平衡要求、正确的能量守恒和高计算效率。这一方法可靠的原因是分析非常接近实际,力学现象的数学和数值描述与块体运动相一致。

在不连续情况中大位移和大变形是更为复杂和重要的问题。DDA 方法通过位移步和时间步的分步迭代计算使其成为可能。当块体移动或变形时,变形后的块体形状和位置将在比连续力学更为敏感的方式下产生不同的块体接触和影响破坏模式。这使得该方法在力和位移的传递上比有限元方法更可靠。

§ 1.5 本书研究的主要内容

本书研究的主要内容分为两大方面。一是理论模型研究,即根据现代地壳运动研究的需要,建立了球面坐标系中的非连续变形分析数学模型。二是应用研究,即应用大地测量为主要观测手段获取的现代地壳运动信息,分析地震活动、地壳运动的特征及机制问题。上述两者紧密结合,理论模型在应用研究中发挥了重要作用;理论模型的提出和观测量模型的建立又都依赖于具体应用问题的需要。

1.5.1 理论模型研究

DDA 方法起源于岩石力学分析,如何科学有效地把 DDA 方法用于地壳运动研究,既是一个理论问题,也是一个应用问题。要实现这一点必须首先研究 DDA 方法的适用性问题,目前 DDA 的数值模型还仅限于二维平面块体运动的方程,它能解决的问题也仅限于小范围的二维平面问题,而地壳运动的范围可能大到整个板块乃至全球。因此,本书首先把 DDA 方法从平面数值模型发展到适应于大范围地壳运动的球面数值模型。在这项研究中所作的创造性工作有以下 4 个方面。

1. 建立球面上块体任一点的位移与位移不变量之间的函数关系。首先,从球坐标系位移与变形的基本关系式出发,通过设定块体位移的全一阶近似表达式,建立球面上的位移与位移不变量之间的函数关系。其次,从球面块体变形的初始定义出发,采用更加严密的向量运算方法,得出了与上述推演方法相同的位移与位移不变量的函数关系式。这是建立球面坐标系中的非连续变形分析数学模型的基本关系式。

2. 在总势能最小化原理下建立平衡方程式。分别求出弹性应力、初始应力、点荷载、体积荷载、惯性力、粘性力等的势能表达式,再通过对之微分解出系数子矩阵,以叠加方式加到联立方程式中。

3. 建立了点位移观测量、基线长度观测量对块体系统约束的数学方程。在地壳水平运动研究中,大地测量观测量主要是测点位移和测点间的基线长度变化。为了把观测量引入 DDA 的平衡方程中,本书研究了加物理弹簧约束法和最小二乘约束法,给出了详细的数学计算公式,并进一步证明了上述两种方法的一致性,揭示出物理弹簧的刚度与位移和长度观测量的权相等价,丰富和发展了约束弹簧的数学意义。

4. 建立球面上由多个块体组成的块体系统运动学方程。在上述联立方程式建立后,块体系统中块体之间的相互作用问题,必须给以精确的数学描述。首先是块体间不允许侵入,通过在边界上加刚性弹簧可以在很高的精度上满足不侵入的问题。刚性弹簧的添加需要通过块体边界的嵌入距离来判定,对于在球面坐标系中计算侵入距离将很复杂,为了使该项计算简便高效,选用了局部平面投影坐标系,把球面问题转化为与平面相类似的问题。

1.5.2 应用研究

在上述理论模型的基础上进行了广泛的应用研究。结合目前地学研究的热点问题,在以下领域进行了研究分析。

1. 针对地壳运动研究的需要,开发研制了球面 DDA 数值分析软件系统。它对研究球面非连续块体运动中的块体应力、应变及位移变化和球面块体的正反演具有显著的优越性。它同样适用于其它情况的球面不连续力学的问题研究。

2. 应用非连续变形数值方法研究新疆伽师地区的地震活动特征。数值模拟了该地区从应力聚集到应力释放(地震发生),到再次应力聚集的全过程。针对伽师强震群的特征,依据该地区的地质构造资料和 GPS 形变监测数据,通过建立 DDA 数值模型,模拟了该地区应力分布特征和演化规律。科学合理地解释了伽师强震群发生的必然性。

3. 利用 1992 年以来我国所进行的 6 项不同规模高精度 GPS 地壳监测网的资料,采用统一的数据处理方案进行了数据处理,并进行了整体平差,归算到统一的 ITRF (International Terrestrial Reference Frame) 97 坐标框架基准,得到了中国目前较为完整的框架统一的 GPS 地壳运动速度图像。

4. 根据珠穆朗玛峰及青藏地区的多期精密水准测量资料对该地区的地壳运动进行了研究。认为该地区地壳垂直运动在时间上和空间上都存在非平稳性,并发现其在时间上的非平稳性与地震学家提出的地震活跃幕有一定相关性。

5. 利用 1992 年、1998 年在珠峰地区施测的 GPS 数据资料,解算了重合点的水平运动速度。根据 GPS 地壳应变率计算公式,计算了该地区的地应变率场,初步探讨了喜马拉雅块体现今形变特征。

6. 根据中国大陆及周边地区的板块边界和活动断裂分布,建立了中国大陆的球面 DDA 数值分析块体模型。通过施加位移边界条件,模拟出了中国大陆的地壳运动特征和应力分布特征;以 GPS 观测得到速度值作约束,给出了中国大陆地壳的应力分布图像和水平运动图像。

7. 考虑到 DDA 方法在模拟地壳运动方面的优越性,利用本书建立的中国大陆数值模型,以 GPS 资料作约束,拟合出了中国大陆现今地壳运动的速度场。该速度场模型较地质构造速度模型、离散点速度模型、刚体转动速度模型、配置拟合速度模型有明显的优越性。