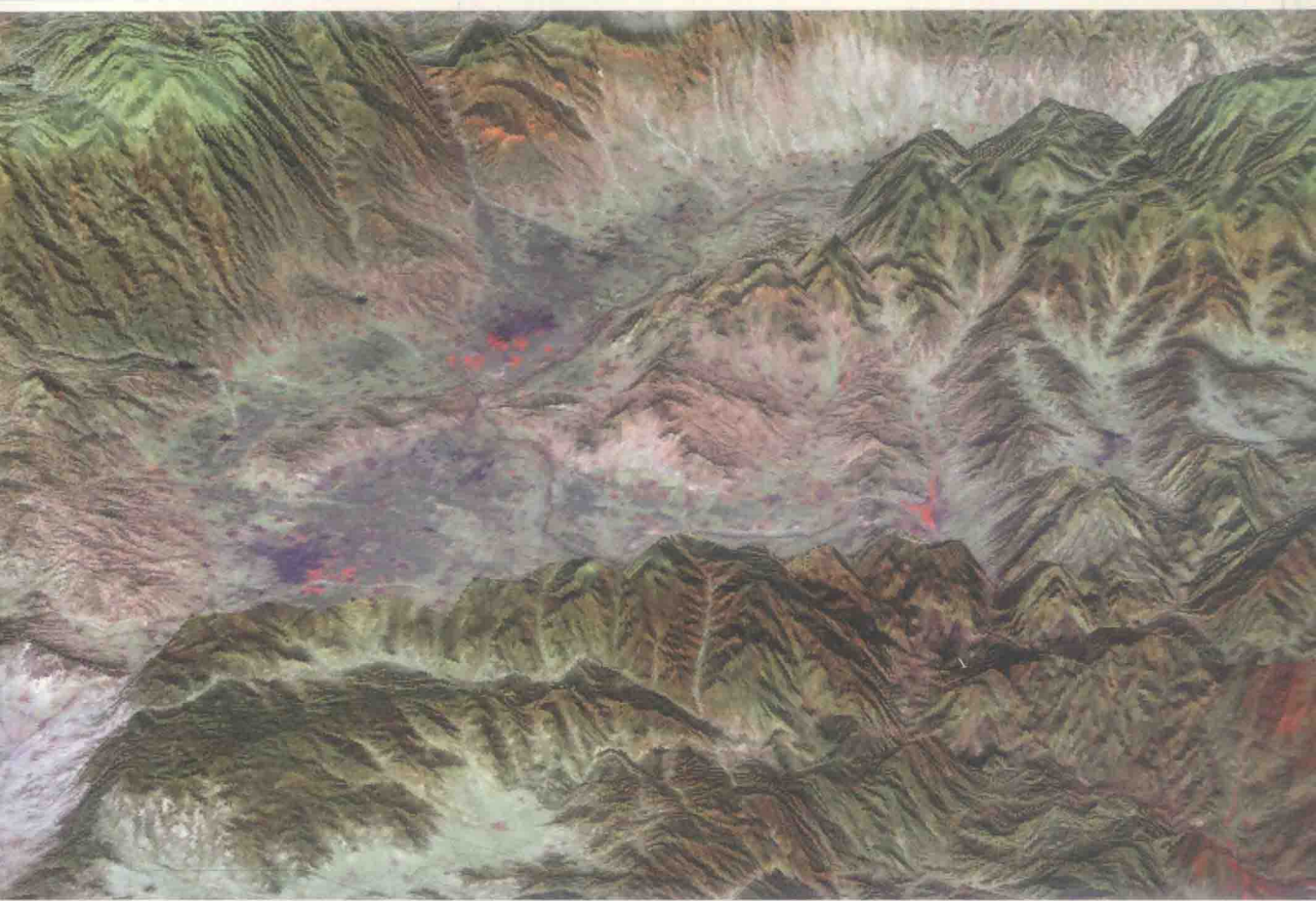


25

地壳构造与地壳应力文集

中国地震局地壳应力研究所 编



地震出版社

地壳构造与地壳应力文集(25)

中国地震局地壳应力研究所 编

地震出版社

2013

图书在版编目(CIP)数据

地壳构造与地壳应力文集(25)/中国地震局地壳应力研究所编.

—北京:地震出版社,2013.9

ISBN 978-7-5028-4337-3

I. ①地… II. ①中… III. ①地壳构造-文集 ②构造地应力-文集

IV. ①P313.2-53

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2013)第 213937 号

地震版 XM2924

内 容 提 要

本书为中国地震局地壳应力研究所连续性学术论文集的第 25 集。全书包括地壳动力学研究、地震地质、工程地震、遥感地质和钻孔应力应变观测仪器等方面的内容。

本书可供地震地质、工程地质、地应力测量技术及应用等领域的人员及有关大专院校的师生阅读。

地壳构造与地壳应力文集(25)

中国地震局地壳应力研究所 编

责任编辑:张宝红

责任校对:王忠东

出版发行: 地震出版社

北京民族学院南路 9 号

邮编: 100081

发行部: 68423031 68467993

传真: 88421706

门市部: 68467991

传真: 68467991

总编室: 68462709 68423029

传真: 68455221

专业部: 68467982 68721991

<http://www.dzpress.com.cn>

经销: 全国各地新华书店

印刷: 北京地大天成印务有限公司

版(印)次: 2013 年 9 月一版 2013 年 9 月第一次印刷

开本: 787×1092 1/16

字数: 218 千字

印张: 8.5

印数: 0001~1000

书号: ISBN 978-7-5028-4337-3/P(5026)

定价: 25.00 元

版权所有 翻印必究

(图书出现印装问题,本社负责调换)

编 委 会

主 编：谢富仁

副主编：陆 鸣 陈 虹 刘耀炜 杨树新

编 委：（按拼音排列）

陈 虹	陈连旺	崔效锋	付子忠	郭啟良	黄锡定
黄忠贤	江娃利	雷建设	李海亮	李 宏	陆 鸣
陆远忠	吕悦军	马保起	欧阳祖熙	邱泽华	宋富喜
唐荣余	田家勇	王恩福	王建军	王兰炜	王子影
吴荣辉	谢富仁	谢新生	杨树新	杨选辉	张宝红
张国宏	张鸿旭	张景发	张世民	周振安	朱守彪

目 录

利用震源机制解数据反演构造应力张量算法改进的

初步探讨 朱敏杰 崔效锋 (1)

地壳动力学能量场 安 欧 (12)

地壳力学基本方程问题 安 欧 (22)

地震活动性参数 b 值的研究 陈 阳 吕悦军 谢卓娟 潘 龙 (38)

水压致裂原地应力测量在高黎贡山越岭隧道

建设中的应用 周龙寿 郭啟良 毛吉震 (48)

三维水压致裂原地应力测试技术新

进展 邢博瑞 王成虎 陈永前 宋成科 (60)

基于纹理与几何特征的高分辨率遥感影像

建筑物提取 李 强 张景发 (76)

InSAR 时序分析技术及其在地表形变监测中的应用 刘志敏 张景发 (83)

低温热年代学及其在青藏高原研究中的应用 沈晓明 (92)

河流阶地及其在活动构造研究中的应用 沈晓明 (102)

低频地质雷达在活断层探测的应用 何仲太 (116)

长治地震台体应变的水泥耦合过程分析 马京杰 李海亮 马相波 (125)

Content

Preliminary Investigation on the Improvement of Inversion of Tectonic Stress Tensor	
Using Focal Mechanism Solution Data	Zhu Minjie Cui Xiaofeng (11)
Geocrustal Dynamics Energy Field	An Ou (21)
Troubles of Fundamental Equations of Geocrustal Mechanics	An Ou (37)
Review of the Study of Seismicity Parameter B-value	
.....	Chen Yang Lv Yuejun Xie Zhuojuan Pan Long (47)
Hydraulic Fracturing Stress Measurements in Deep Boreholes and Its Application in	
Gaoligongshan Mountain Tunnel	Zhou Longshou Guo Qiliang Mao Jizhen (59)
New Advance of Three-dimensional Hydraulic Fracturing Technique	
.....	Xing Borui ^{1,2} Wang Chenghu ¹ Chen Yongqian ¹ Song Chengke ¹ (75)
Building Extraction from High Resolution Remote Sensing Images Based on Texture and	
Shape Features	Li Qiang ^{1,2} Zhang Jingfa ² (82)
Time Series InSAR Technology and Its Application in Monitoring Ground	
Deformation	Liu Zhimin Zhang Jingfa (91)
Low-temperature Thermochronology and Its Applications to Tibetan Plateau	
.....	Shen Xiaoming (101)
River Terrace and Its Application to Active Tectonics	Shen Xiaoming (115)
The Application of Low-frequency Ground Penetrating Radar to Active	
Fault Detection	HE Zhongtai (124)
The Analysis of Cement Coupling Process of Body-strain Meter in Changzhi	
Seismic Station	Ma Jingjie Li Hailiang Ma Xiangbo (129)

利用震源机制解数据反演构造应力张量算法改进的初步探讨

朱敏杰 崔效锋^①

(中国地震局地壳应力研究所 北京 100085)

摘 要 基于滑动方向拟合法的基本思想,国内外学者提出多种利用震源机制解数据反演构造应力张量的具体算法。本文在对其中的两种典型算法的原理思路进行介绍的基础上,着重分析了两种典型算法的特点和优点,以及不足之处。依据人工数值试验的一些初步结果,对两种典型算法有针对性地提出了相应的改进思路,以期利用震源机制解数据反演构造应力张量算法的改进完善以及合理应用提供借鉴。

关键词 应力张量 反演算法 震源机制解 滑动方向拟合法

一、引 言

构造应力是地壳最重要的性质之一,地壳表面和内部发生的各种地质构造现象及其伴生的各种物理与化学现象,包括深部矿产资源的形成和赋存规律,都与地壳应力作用密切相关。因此,了解地壳构造应力分布状态,特别是地壳深部应力状态,是解决地球动力学有关科学问题的基础,如板块驱动机制、地震发生机制、区域地壳稳定性、地震预测研究等(杨树新等,2012a)。

随着地球动力学研究的不断深入,对构造应力进行分析的方法取得了很大发展,由少量单一应力数据简单定性分析构造应力场特征,发展为利用大量多种应力数据深入分析构造应力场细结构(谢富仁等,2004;崔效锋等,2006a;杨树新等,2012b)。例如,利用深孔地应力测试数据分析地壳浅部应力随深度的变化规律;利用GPS和大地形变观测资料反演构造应力场及其变化特征;利用地震活动资料或地震波记录对地壳深部构造应力及其变化进行推断等。由于计算机技术的飞速发展及其在地学研究中的广泛应用,使得人们能够借助计算机技术对地壳应力状态进行深入的反演分析。其中,利用大量观测数据反演拟合地壳平均构造应力张量方法(也称滑动方向拟合法)的提出,避免了由单个数据刻画地壳应力的偏差和受应力场调整变化带来的不确定性。本文在简要总结滑动方向拟合法

^① 作者简介:朱敏杰,硕士研究生,主要研究方向为地球动力学、现代构造应力场。
基金项目:国家科技支撑计划:地震应力环境探测技术与方法研究(2012BAK19B03)、深部探测技术与实验研究专项构造应力分析方法研究与应力探测数据集成(SinoProbe-06-04)共同资助。

的起源和发展历程的基础上,对最具代表性的利用震源机制解数据反演构造应力张量的两种典型算法的基本原理、优点以及不足进行了分析,并提出了可能的改进方向,以此希望为构造应力张量反演算法的改进完善和合理应用提供借鉴。

二、断层滑动反演构造应力张量方法简介

利用断层滑动矢量反演构造应力张量的基本思想最初始于 Bott (1959) 的断层滑动机制分析。对于产状一定的断层,当满足滑动条件时,向哪个方向滑动,是受断层所在地区构造应力张量控制的。与地层记录着地球沧海桑田的变化一样,活动构造形迹(如断层擦痕)记录着在某一地质时期断层的滑动方向。Carey 等(1974; 1976)根据 Bott 的原则提出了由断层滑动矢量反演构造应力张量的设想和计算方法,即依据一组地质断层上滑动方向的观测数据(断层擦痕),去推断某一构造活动时期作用于该组断层上的平均应力张量的方法。该方法的实质是用计算出的断面上剪应力方向去拟合断面上的滑动方向,所以也叫滑动方向拟合法。此后,Armijo 等(1978)、Angelier (1979; 1984)、Etchecopar 等(1981)对该方法不断予以改进,并作了进一步的研究分析,使之逐步完善。

在滑动方向拟合法提出的初期,该方法主要用于利用地质断层滑动数据(断层擦痕)反演平均构造应力张量。实际上除断层擦痕外,还有其它一些数据能够展现断层滑动机制,如震源机制解、跨断层形变观测数据等。震源机制解的两个节面及滑动角实质上反映了震源区断层及其运动特征,有学者对滑动方向拟合法的应用进行了拓展,提出了利用震源机制解数据反演构造应力张量的具体算法(Ellsworth et al., 1980; Gephart et al., 1984; 许忠淮, 1985)。多年以来,国内外不少学者运用滑动方向拟合法,利用断层擦痕、震源机制解、跨断层形变观测资料等多种数据,对不同地区构造应力张量进行了研究,并取得重要成果(Ellsworth, 1982; Zoback, 1983; Carey et al., 1987; Mercier et al., 1987; 许忠淮等, 1984; 谢富仁等, 1989, 1993, 2001; Plenafisch et al., 1997; 崔效锋等, 1999, 2006a, 2006b; 张红艳等, 2007),使之成为目前研究构造应力场最有效的方法手段之一。

滑动方向拟合法的基本假定条件是:①所研究区域的应力场是均匀的,这种均匀性包括了构造事件在空间和时间上的相对稳定和持续;②断层滑动相互独立,即断层的存在不改变应力场的均匀性;③介质是各向同性的。在上述假定条件下,该方法的目的是寻找一个适当的应力张量,使作用在每个断层面上的剪应力矢量与断层滑动矢量之间的偏差最小。不难证明,断层面上的剪应力矢量是由应力张量中的偏应力张量部分决定的,也就是说,断层面上的剪应力方向只取决于应力张量的四个参量,它们是三个主应力方向和一个反映主应力比值结构的应力形因子 $R = (\sigma_2 - \sigma_3) / (\sigma_1 - \sigma_3)$, 其中 σ_1 、 σ_2 、 σ_3 分别代表最大、中间、最小三个主压应力。因此,滑动方向拟合法可以给出断层所在区域构造应力的四个特征参数,即三个主应力的方向和一个反映主应力相对大小的应力形因子 R 。

三、利用震源机制解数据反演构造应力张量的两个典型算法

在利用地质断层滑动数据（断层擦痕）反演平均构造应力张量时，每条断层滑动数据，包括断层产状和滑动方向，都是唯一已知的。而对于震源机制解数据，一条震源机制解数据给出了两个节面，也就是说，一条震源机制解数据给出了两个可能的断层面及滑动方向，并且在大多数情况下（尤其是中小地震震源机制解）是不能从两个节面中判定哪个是实际断层面的。因此，对一个震源机制解两个节面如何处理，就成为将滑动方向拟合法用于震源机制解反演构造应力张量时需要解决的一个主要问题。

就上述问题的解决，不同的学者提出了不同的方法，并给出了具体算法。Ellsworth 等（1980）提出将震源机制解的两个节面都作为可能的地震断层面进行尝试的计算方法，本文称其为节面试算法。Gephart（1984）提出了将四个应力参数（三个主应力方向和应力形因子 R ）的任何一种组合都作为一个应力模型，利用全空间网格搜索确定最佳应力模型的计算方法，本文称其为网格搜索法。上述两种算法是最具代表性的利用震源机制解数据反演构造应力张量的两种典型算法。

1. 节面试算法

节面试算法最早是由 Ellsworth 等提出的（Ellsworth et al., 1980; 许忠淮, 1985）。该算法将两个节面同等权重看待，都作为地震事件可能的实际断层面，将参与反演计算的一组震源机制解的两个节面全部进行枚举组合， m 个地震共有 2^m 个可能的组合，对每一组合，以断层滑动方向与断层面上剪应力方向间的偏差为约束，采用滑动方向拟合法反演求解该组合的拟合应力张量，并以反演结果的状态数作为依据，选取状态数较大的 31 种组合，对这 31 种组合给出的应力张量进行平均，以平均应力张量作为最终结果。节面试算法的基本原理和计算步骤如下：

（1）以滑动方向与剪应力方向的偏差为约束求解拟合应力张量。

设 n 为断层面单位法向矢量， u 为断层滑动方向的单位矢量，控制断层滑动的应力张量为 S （图 1），则作用于断层面单位面积上的力 f 为

$$f = S \cdot n \quad (1)$$

断层面的剪应力 τ 为

$$\tau = f - (f \cdot n)n \quad (2)$$

对于一组震源机制解，如果每个震源机制解任选一个节面参数（节面的走向、倾角和滑动角）作为断层滑动数据，那么， m ($m \geq 4$) 个地震震源机制解即可构成一组总数为 m 的断层滑动数据，此时，可以运用滑动拟合法的思想，对控制这组地震事件的应力张量进行反演计算。即寻找一个适当应力张量 S ，使得作用于每个断层面的剪应力 τ_i ($i = 1$,

2, $\dots m$) 与该面上的滑动方向 u_i 之间的夹角 α_i (图 1) 尽可能地小。

为使 α_i 尽可能地小, 一个可能的方法是使量

$$Q = \sum_{i=1}^m \cos \alpha_i \quad (3)$$

达极大值, 然而求式 (3) 的极值涉及求解非线性方程组问题。为了用线性问题代替非线性问题, 许忠淮等 (1984) 提出可以将求解断层面上的剪应力 τ_i 与该面上的滑动方向 u_i 之间达到最佳拟合的问题转化为求解量

$$Q = \sum_{i=1}^m f_{u_i}^2 - \sum_{i=1}^m f_{b_i}^2 \quad (4)$$

的极大值问题。式 (4) 中的和分别是 f_i 在 u_i 和 b_i 方向的分量 (图 1), b_i 的方向与滑动方向 u_i 垂直。

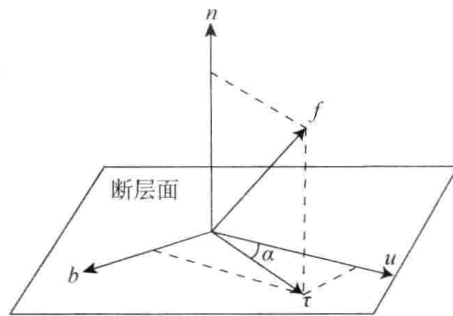


图 1 断层面上应力示意图

以式 (4) 为目标函数, 可以建立求解应力张量 S 的方程组, 并求解出应力张量 S 中的三个主应力方向和一个反映主应力比值结构的应力形因子 R 。具体求解的数学步骤详见许忠淮等 (1984) 一文。

(2) 最终拟合应力张量的确定。

上述反演计算得到的拟合应力张量 S , 只是对一组震源机制解中每个震源机制解任选一个节面而言的, 我们知道, 一条震源机制解数据给出了两个节面, 也就是说, 一条震源机制解数据给出了两个可能的断层面及滑动方向。对此, Ellsworth 等提出了将震源机制解的两个节面都作为地震事件可能的实际断层面进行尝试的办法 (Ellsworth et al., 1980; 许忠淮, 1985)。也就是对一组震源机制解的两个节面进行枚举组合, m 个地震震源机制解共有 2^m 个可能的组合, 对每一组合, 均采用上述方法反演计算拟合应力张量 S , 这样可以得到 2^m 个拟合应力张量 S 。

事实上, $2m$ 个组合 (或拟合应力张量 S) 中只有一个对应于 m 个地震全取实际断层滑动的情况, 称其为组合 G 。如何找到组合 G (对应的拟合应力张量 S) 就成为节面试算法中的一个关键问题。对此, 许忠淮 (1985) 提出可以通过状态数 C 这一参量来确定组

合 G ，状态数 C 是由式 (4) 构建的方程组计算得到的，每一组合都有对应的状态数 C ， C 愈大，表示求解结果愈好。如果不考虑震源机制解参数（节面的走向、倾角和滑动角）的误差和构造应力场实际不均匀性的影响，理论上 2^m 个组合中，组合 G 的状态数 C 必为最大（许忠淮，1985）。由于误差的存在，与组合 G 对应的状态数 C 有可能不是最大的。于是许忠淮（1985）提出，在实际计算中可选取 31 个较大的状态数 C ，找出对应的拟合应力张量，求取这些张量的平均张量作为最后结果。具体求解数学步骤详见许忠淮（1985）一文。

由上述基本原理和计算步骤可以看出，节面试算法具有以下特点和优点：①注重物理意义上的力学约束，从滑动方向拟合法的 basic 思想出发，以断层滑动方向与断层面上剪应力方向间的偏差为目标函数，反演拟合构造应力张量；②将非线性问题转化为简单的线性反演，易于实现反演计算的程序编制；③将震源机制解的两个节面同等权重对待，采用枚举组合的方法，并巧妙地引入状态数 C ，解决了利用震源机制解反演构造应力张量中的一些技术难点。

2. 网格搜索法

网格搜索法是由 Gephart (1984) 最早提出的，虽然其基本思想也是源于滑动方向拟合法，但具体算法思路完全不同于之前 Angelier (1979)、许忠淮 (1985) 等的算法思路。网格搜索法没有直接以断层滑动方向与断层面上剪应力方向间的偏差为目标函数进行反演计算，而是对应力张量全空间进行离散化，将离散化后的四个应力参数（三个主应力方向和应力形因子 R ）的任何一种组合都作为一个应力模型，利用全空间网格搜索的方法，计算所有应力模型与震源机制解的符合程度，最终确定最佳应力模型。其中，应力模型与震源机制解的符合程度用最小转动角描述。对于一个给定的应力模型（应力张量），可以通过转动节面（断层面），使给定的应力模型作用在该断层面的剪应力方向与震源机制解给出的滑动方向相一致，那么，这个节面（断层面）所转动的最小转动角可以用来描述该节面（或者说是震源机制解）与给定的应力模型的符合程度，即用最小转动角作为应力模型与震源机制解的错配（misfit）。对于一组震源机制解来说，在离散化的全应力张量空间中，可以用最小转动角得到的错配为参量，利用成熟的统计学方法，构建其分布函数、期望以及方差，计算各应力模型的置信水平，并给出最优拟合应力张量。网格搜索法的具体算法流程如下：

(1) 为了能够采用网格搜索法对应力张量进行全空间搜索计算，首先需要对应力张量全空间进行离散化，离散化后的每个应力张量即为一个应力模型。由于断层面的剪应力方向只取决于应力张量的四个参量，即三个主应力方向和应力形因子，因此，每个应力模型可用四个参数（ Φ 、 δ 、 Ψ 和 R ）表达， Φ 、 δ 和 Ψ 确定了应力张量中三个应力主轴的方向， R 为应力形因子。它们的搜索范围分别为： $0^\circ \leq \Phi \leq 360^\circ$ 、 $0^\circ \leq \delta \leq 90^\circ$ 、 $0^\circ \leq \Psi \leq 180^\circ$ 、 $0 \leq R \leq 1$ 。

(2) 针对每个搜索的应力张量（应力模型），转动震源机制解的节面并计算其最小转动角，使应力张量作用在节面上的剪应力方向与震源机制解给出的滑动方向相一致。震源机制解的两个节面可以得到两个最小转动角，取其较小者作为该应力张量与该震源机制解的错配。对于一组震源机制解，可以得到一组与某个应力张量相对应的错配，求取这些错

配的绝对值之和作为某个应力张量与该组震源机制解的整体错配 Σ_i 。

(3) 依据第(1)步确定的离散化的应力张量 S_i ，按照第(2)步计算方法，采用网格搜索法计算每个应力张量 S_i 与一组震源机制解的整体错配 Σ_i ，找出所有 Σ_i 中的最小值，记为 $\Sigma_{\min}$ ，并通过 $\Sigma_{\min}$ 构建 Σ_i 的分布函数，利用成熟的统计学方法，计算各应力张量 S_i 的置信水平。

(4) 选取一定置信水平下的应力张量作为初选结果，依据岩石摩擦滑动准则，确定最优拟合应力张量。并通过置信限定量描述反演结果的不确定度(图2)。

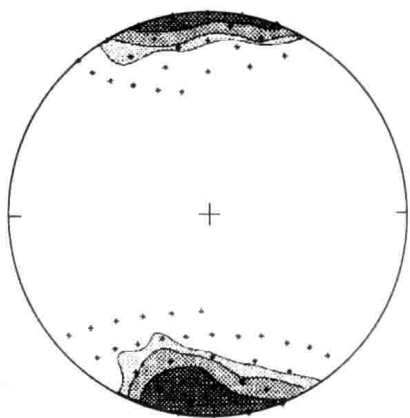


图2 网格搜索法反演结果示例(据 Gephart, 1984)

由上述基本原理和计算步骤可以看出，网格搜索法具有以下特点和优点：①对震源机制解各参数的测定误差，特别是节面参数的测定误差，进行了全面考虑；②注重概率统计学约束；③对应力张量全空间进行了网格搜索，采用置信限对反演结果的不确定度给予了定量描述。

四、两种典型算法的不足之处与可能的改进方向

1. 不足之处

节面试算法和网格搜索法作为利用震源机制解数据反演构造应力张量的两种最具代表性的算法，几十年来被广泛采用，取得了大量研究成果(崔效锋等, 1999; 张红艳等, 2007; 郝平等, 2012; 盛书中等, 2012)，推动了构造应力场的深入研究。这也从侧面说明了两种算法思想的提出具有开创性。然而，为了算法理论上的简洁以及受算法提出时代的计算机技术的限制，节面试算法和网格搜索法也存在着不足之处。

(1) 节面试算法的不足。

由于震源机制解数据本身存在误差，因此在实际计算中，节面试算法选取 31 个较大的状态数所对应的拟合应力张量，求取这些张量的平均张量作为最后结果(许忠淮, 1985)。在实际应用中我们发现，在多数情况下选取的 31 个拟合应力张量比较接近，离散

性并不大，此时将 31 个拟合应力张量的平均值作为最后结果有其合理性。由于节面试算法是通过节面组合来反演拟合应力张量的，参与反演计算的震源机制解数据不同，节面组合也就不同，反演给出的 31 个拟合应力张量（三个主应力方向和应力形因子）会出现比较离散的情况，甚至出现多个“团簇”状分布（图 3），对于这种情况，仍采用平均的办法求取最终的反演结果，显然不尽合理。由于受 20 世纪 80 年代计算机技术的限制，原节面试算法程序（许忠淮，1985）只将 31 个拟合应力张量作为反演结果数据文件保留了下来，仅凭这 31 个解往往不能反映反演结果的总体分布情况。另外，原节面试算法缺少对所得反演结果的误差的定量描述。

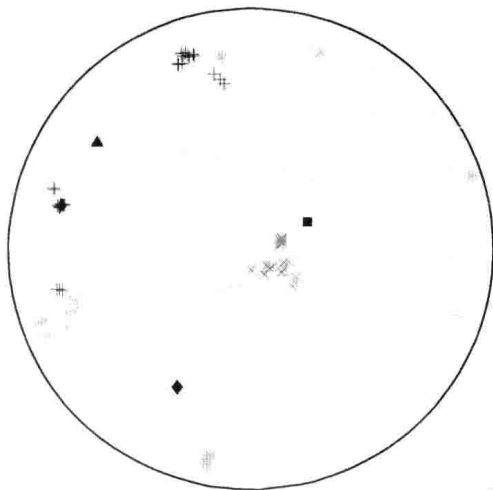


图 3 节面试算法反演结果示例

浅灰色*：最大主应力；中度灰色×：中间主应力；深灰色+：最小主应力
实心菱形：平均解的最大主应力；实心方块：平均解的中间主应力；实心三角：平均解的最小主应力

（2）网格搜索法的不足。

对震源机制解两个节面如何处理，是利用震源机制解数据反演构造应力张量时需要解决的一个主要问题，网格搜索法选取最小转动角较小的节面作为实际断层面参与分析计算，这种处理方法是否对任何震源机制解数据都适用，值得商榷（Wyss，1992）。

由于网格搜索法计算量很大，为了降低计算量，原网格搜索法采用了一些特殊的处理技术，如在进行网格搜索时需给定应力张量的搜索初始值，通过经验方法和精确方法两个步骤计算最小转动角。这些或多或少地直接影响到最终的反演结果。另外，为了降低计算量，原网格搜索法设定的搜索网格太粗，步长只有 10°和 5°两种，难以满足对构造应力场进行细结构研究的需求。

在绝大多数情况下，该方法得到的置信区间严重偏大，例如，往往在给定的数值实验中，68% 的置信限内应力张量就近乎完全地包含了 90% ~ 95% 置信限内的应力张量。在轴对称的情况下（即应力形因子 $R=0$ 或 1），该方法得到的置信限又明显太小了（Hardebeck et al.，2001）。

2. 可能的改进方向

显然,通过对两种典型算法的一些技术细节的改进,可以在更好地发挥两种典型算法特点和优点的同时,弥补其不足,提高利用震源机制解数据反演构造应力张量的可靠性和准确性。我们在此仅提出改进两种算法的一些思路。

对于网格搜索法,可以在以下两个方面进行改进:

(1) 采用更为精细化的网格,对拟合应力张量进行细致搜索。可考虑把原本的搜索步长由 5° 和 10° 调整为 $1^{\circ} \sim 2^{\circ}$,同时在搜索计算过程中,尽量减少人工设定的初始值,以降低人为因素的干扰,提高反演结果的可靠性和准确性。这样会带来计算量的大幅增加,如相对原搜索网格,采用更为精细化的网格进行搜索计算时,计算量会呈数量级的增长,依据目前计算机技术的水平,将能够解决大计算量的问题。

(2) 由于震源机制解的求解方法和使用数据的不同,不同的地震事件震源机制解的可靠性和误差也就不同。在搜索计算时,可以考虑根据震源机制解数据的可靠性和误差的不同,赋予不同的权重,并由此计算更合理的错配的概率密度,以提高反演结果的可靠性。

对于节面试算法,放弃原算法中只通过 31 个状态数较大的拟合应力张量求取最终反演结果的做法,增加反演计算步骤,实现对原算法的改进:

(1) 首先,以断层面上剪应力与滑动方向间的夹角、反演方程组给出的状态数为初选参数,合理建立初选条件,对 2^m 个组合计算得到拟合应力张量进行初选,获取初选应力张量集。

(2) 考察分析初选应力张量集的分布状况,如果初选应力张量集出现多个“团簇”

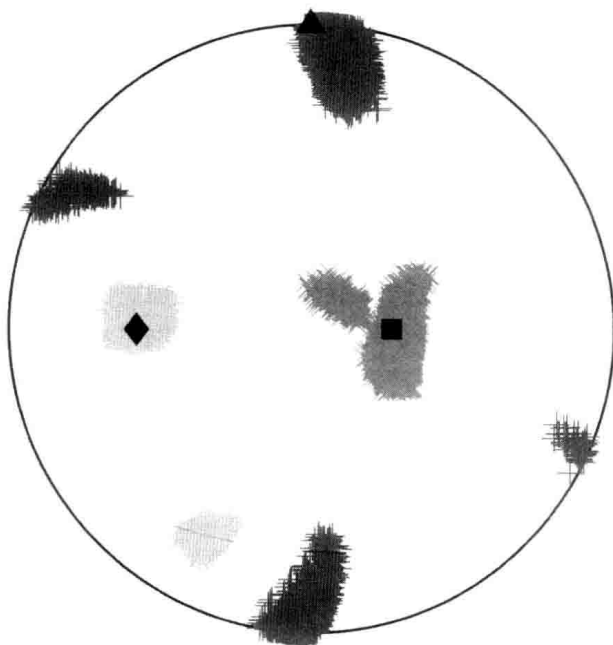


图4 节面试算法人工数值试验示例(各符号同图3)

状分布,通过聚类分析,引入断层摩擦滑动准则等,从多个“团簇”解中选取一个“团簇”解作为终选应力张量(或称优解簇),对终选应力张量进行平均,作为最终反演计算给出的拟合应力张量。

(3) 考察终选应力张量(或称优解簇)的分布特征,借助概率统计的方法,对终选应力张量进行计算分析,以置信水平或误差分布的方式定量描述反演结果的可靠性。

依据上述对节面试算法的改进思路,笔者重新编制了节面试算法的主体计算模块,初步开展了人工数值试验。图4是我们人工数值试验得到的初选应力张量集的一个示例。从中可以看出,初选应力张量集能够很好地展现反演计算结果的全貌,并且,优解簇与人工数值试验设定的应力张量(即真解)有很好的对应。

本文在对利用震源机制解数据反演构造应力张量的两种典型算法的原理思路介绍的基础上,着重分析了两种典型算法的特点和优点,以及不足之处,并据此提出了对两种典型算法的改进思路,我们下一步的工作是按照本文提出的思路,对利用震源机制解数据反演构造应力张量的算法进行改进完善。

参 考 文 献

- 崔效锋,谢富仁.1999.利用震源机制解对中国西南及邻区进行应力分区的初步研究.地震学报,21(5):513~522.
- 崔效锋,谢富仁,张红艳.2006a.川滇地区现代构造应力场分区及动力学意义.地震学报,28(5):451~461.
- 崔效锋.2006b.伽师及周围地区现代构造应力场特征研究.地震学报,28(4):347~356.
- 郝平,吕晓健,田勤俭,等.2012.中国西部及邻区活动地块边界带现代构造应力场.地震学报,34(4):439~450.
- 盛书中,万永革,程佳,等.2012.2011年日本9.0级大地震的应力触发作用初步研究.地震地质,34(2):325~337.
- 谢富仁,崔效锋,赵建涛,等.2004.中国大陆及邻区现代构造应力场分区.地球物理学报,47(4):654~662.
- 谢富仁,刘光勋.1989.阿尔金断裂带中段区域新构造应力场分析.中国地震,5(3):26~36.
- 谢富仁,苏刚.2001.滇西南地区现代构造应力场分析.地震学报,23(1):17~23.
- 谢富仁,祝景忠,梁海庆,等.1993.中国西南地区现代构造应力场基本特征.地震学报,15(4):407~417.
- 许忠淮,戈澍漠.1984.用滑动方向拟合法反演富蕴地震断裂带应力场.地震学报,6(4):395~404.
- 许忠淮.1985.用滑动方向拟合法反演唐山余震区的平均应力场.地震学报,7(4):349~361.
- 杨树新,陆远忠,陈连旺,等.2012a.用单元降刚法探索中国大陆强震远距离跳迁及主体活动区域转移.地球物理学报,55(1):106~116.
- 杨树新,姚瑞,崔效锋,等.2012b.中国大陆与各活动地块、南北地震带实测应力特征分析.地球物理学报,55(12):4207~4217.
- 张红艳,谢富仁,焦青,等.2007.首都圈地区跨断层形变观测与地壳应力场.地震地质,29(4):706~715.
- Angelier J. 1979. Determination of the mean principal direction of stresses for a given fault population. Tectonophysics, 56: 17~26.

- Angelier J. 1984. Tectonic analysis of fault slip data sets. *J. Geophys. Res.*, 89 (B7): 5835 ~ 5848.
- Armijo R, Cisternas A. 1978. Un problème inverse en microtectonique cassante. *C. R. Acad. Sci. Paris*, D287: 595 ~ 598.
- Bott M H P. 1959. The mechanism of oblique slip faulting. *Geological Magazine*, 96 (2): 09 ~ 11.
- Carey E, Brunier B. 1974. Analyse théorique et numérique d'un modèle mécanique élémentaire appliqué à l'étude d'une population de failles. *C. R. Acad. Sci. Paris*, D279: 891 ~ 894.
- Carey E. 1976. Analyse numérique d'un modèle mécanique élémentaire appliqué à partir des stries de glissement. Thèse de 3^{ème} cycle. Tectonique Générale. Univ, Paris-Sud, 138.
- Carey E, Mercier J. 1987. A numerical method for determining the state of stress using focal mechanisms of earthquake populations: application to Tibetan teleseisms and microseismicity of Southern Peru. *Earth and Planetary Science Letters*, 82: 65 ~ 179.
- Ellsworth W L. 1982. A general theory for determining the state of stress in the earth from fault slip measurements. *Terra Cognita*, 2: 170.
- Ellsworth W L, Xu Zhonghui. 1980. Determination of the stress tensor from focal mechanism data. *Eos Trans AGU* 61.1: 117.
- Etchecopar A, Vasseur G, Daignieres M. 1981. An inverse problem in microtectonics for the determination of stress tensors from fault striation analysis. *J. Struct. Geol.*, 3 (1): 51 ~ 55.
- Gephart J W, Forsyth D W. 1984. An improved method for determining the regional stress tensor using earthquake focal mechanism data: application to the San Fernando earthquake sequence. *J. Geophys. Res.*, 89: 9305 ~ 9320.
- Hardebeck, Jeanne L, Egill H. 2001. Stress orientations obtained from earthquake focal mechanisms: what are appropriate uncertainty estimates? *Bulletin of the Seismological Society of America*, 91 (2): 250 ~ 262.
- Mercier J L, Armijo R, Tapponnier P, et al. 1987. Change from late Tertiary compression to Quaternary extension in southern Tibet during the India-Asia collision. *Tectonics*, 6: 275 ~ 304.
- Plenefisch T, Bonjer K P. 1997. The stress field in the Rhine Graben area inferred from earthquake focal mechanisms and estimation of frictional parameters. *Tectonophysics*, 275: 71 ~ 97.
- Wyss M, Liang B, Tanigawa W R, et al. 1992. Comparison of orientations of stress and strain tensors based on fault plane solutions in Koaiki, Hawaii. *J. Geophys. Res.*, 97: 4769 ~ 4790.
- Zoback M L. 1983. Structure and Cenozoic tectonism along the Wasatch fault zone, Utah. *Geol. Soc. Am. Mem.*, 157: 3 ~ 27.

Preliminary Investigation on the Improvement of Inversion of Tectonic Stress Tensor Using Focal Mechanism Solution Data

Zhu Minjie Cui Xiaofeng

(Institute of Crustal Dynamics, CEA, Beijing 100085, China)

Abstract: Based on the principles of slip-directions-fitting method, domestic and overseas scholars have developed a number of tectonic stress tensor inversion algorithms. In this paper we first give an introduction to the fundamentals of two typical inversion algorithms, and then investigate their specific features, advantages and defects respectively. Inspired by the preliminary results of some artificial numerical experiments, here we suggest two improved approaches accordingly, in order to provide some suggestions on the improvements and more proper use of these particular tectonic stress tensor inversion algorithms using focal mechanism data.

Keywords: stress tensor; inversion algorithm; focal mechanism; slip-directions-fitting method