

应力场反演软件包使用手册

开发作者：张苏祥 (1041573288@qq.com), Vavryčuk Vaclav

- 目录
- 软件简介
- 理论背景
- 快速开始
- 详细使用指南
- 参数说明
- 结果解释
- 常见问题
- 技术细节
- 参考文献

1. 软件简介

1.1 功能概述

本软件包是一个专业的地震应力场反演工具，用于从地震震源机制数据推断区域构造应力场。主要功能包括：

应力张量反演：从多个震源机制解反演区域应力场

智能节面选择：使用两阶段策略自动识别真实发震断层面

不确定性评估：通过蒙特卡洛方法评估结果的可靠性

可视化输出：生成专业的应力分析图表

1.2 版本特色

改进版新增功能：

两阶段节面选择策略，提高断层面识别准确率

图形用户界面 (GUI)，操作更加便捷

自动质量控制，剔除低质量数据

1.3 适用范围

区域应力场研究

地震危险性评估

构造地质研究

油气田地应力分析

2. 理论背景

2.1 应力场反演原理

应力场反演基于以下基本假设：

研究区域内应力场均匀

地震发生在预存断层上

滑动方向与剪应力方向一致 (Wallace-Bott 假设)

数学原理：

应力张量 τ 与滑动方向 u 的关系: $\tau \cdot n \propto u$

其中 n 为断层面法向量

2.2 节面选择策略

震源机制解包含两个共轭节面，只有一个真实发震断层。本软件采用两阶段选择策略：

第一阶段：不稳定性比值判别

如果 $I_1/I_2 \geq 1.4$ ：

选择不稳定性更高的节面（该阈值来自 Chang(2014, GJI)的研究成果）

不稳定性计算基于摩尔-库仑破裂准则：

$$I = (\tau_{\text{shear}} - \mu(\tau_{\text{normal}} - 1)) / (\mu + \sqrt{1 + \mu^2})$$

第二阶段：滑动方向偏差角判别

如果一个节面的偏差角 $< 20^\circ$ 且另一个 $> 30^\circ$ ：

选择偏差角较小的节面

否则：

舍弃该数据（该节面选择策略来自下述研究成果：Matsumoto, S., Iio, Y., Sakai, S. et al. Strength dependency of frequency-magnitude distribution in earthquakes and implications for stress state criticality. Nat Commun 15, 4957 (2024). <https://doi.org/10.1038/s41467-024-49422-7>)

2.3 不确定性评估

通过添加随机噪声的蒙特卡洛方法评估结果稳定性：

对输入震源机制添加正态分布噪声（标准差 5° ）

重复反演 100 次

统计结果分布，给出置信区间

3. 快速开始

3.1 安装要求

系统要求：

Python 3.6 或更高版本

Windows/Linux/macOS

依赖包：

`pip install numpy matplotlib scipy`

或运行安装脚本：

`python install_dependencies.py`

3.2 快速运行

方法 1：图形界面（推荐新手）

Windows

双击 `run_stress_inversion_windows.bat`

Linux/Mac

`./run_stress_inversion_unix.sh`

方法 2：Python 命令（推荐）

`python run_stress_inversion_gui.py`

3.3 测试运行

使用提供的测试数据验证安装：

运行程序

选择 `***.dat`

使用默认参数

查看输出结果

4. 详细使用指南

4.1 数据准备

输入数据格式

文本文件，每行包含一个震源机制的三个参数：

走向(°) 倾角(°) 滑动角(°)

120.5 65.0 -85.0

245.0 80.0 -88.0

...

参数定义：

走向 (Strike)：0-360°，从正北顺时针测量

倾角 (Dip)：0-90°，断层面与水平面的夹角

滑动角 (Rake)：-180°到 180°，滑动方向在断层面的角度

数据质量要求：

建议数据量 > 20 个

震源机制解误差 < 10°

空间分布相对均匀

4.2 参数设置

启动程序后，在 GUI 窗口中设置参数：

基本设置

输入文件：点击"浏览"选择数据文件

输出目录：默认为 `Output_improved/`

图形目录：默认为 `Figures_improved/`

节面选择参数

不稳定性比值阈值（默认 1.4）

建议范围：1.2-1.8

越大越严格，保留数据越少

偏差角阈值

好阈值（默认 20°）：小于此值认为拟合良好

坏阈值（默认 30°）：大于此值认为拟合较差

不确定性分析参数

噪声实现次数（默认 100）

建议范围：50-500

越多结果越稳定，但计算时间越长

震源机制误差（默认 5°）
输入数据的预期误差水平

反演参数
迭代次数（默认 6）：通常 6 次足够收敛
摩擦系数范围（默认 0.4-1.0）：岩石的内摩擦系数范围

4.3 运行分析
参数检查：确认所有参数设置正确
开始运行：点击"开始运行"按钮
监控进度：观察控制台输出
等待完成：通常需要几分钟到几十分钟

4.4 结果查看
程序完成后，查看输出文件夹中的结果。

5. 参数说明

5.1 节面选择参数详解

参数	默认值	建议范围	说明
不稳定性比值阈值	1.4	1.2-1.8	两个节面不稳定性的比值阈值
偏差角好阈值	20°	15-25°	认为拟合良好的偏差角上限
偏差角坏阈值	30°	25-40°	认为拟合较差的偏差角下限

参数选择建议：
数据质量高：使用较严格的参数（比值 1.6，偏差角 15°/25°）
数据质量一般：使用默认参数
数据较少：适当放宽参数（比值 1.2，偏差角 25°/35°）

5.2 不确定性分析参数

参数	默认值	建议范围	说明
噪声实现次数	100	50-500	蒙特卡洛模拟次数
震源机制误差	5°	3-15°	输入数据的标准误差

5.3 反演控制参数

参数	默认值	建议范围	说明
迭代次数	6	4-10	应力反演迭代次数
初始反演次数	10	5-20	随机初始化次数
摩擦系数最小值	0.4	0.2-0.6	搜索范围下限
摩擦系数最大值	1.0	0.8-1.5	搜索范围上限
摩擦系数步长	0.05	0.01-0.1	搜索步长

6. 结果解释

6.1 控制台输出

节面选择统计:

- 总震源机制数: 30
- 通过不稳定性比值选择: 15
- 通过滑动方向偏差角选择: 8
- 被舍弃的数据: 7
- 最终使用的数据: 23 (76.7%)

最优摩擦系数: 0.60

应力形状比 R: 0.432

主应力轴方向:

σ_1 : 方位角 245.3°, 倾伏角 15.2°

σ_2 : 方位角 152.1°, 倾伏角 8.5°

σ_3 : 方位角 45.8°, 倾伏角 72.3°

解释:

数据使用率: > 60%为正常, < 40%需要检查数据质量

应力形状比 R: 0=轴对称拉张, 0.5=纯剪切, 1=轴对称挤压

主应力轴: σ_1 最大压应力, σ_3 最小压应力

6.2 输出文件

数据文件

*_output_mechanisms.dat

最终选定的断层面参数

格式: 走向 倾角 滑动角

*_output_selection_info.dat

详细的节面选择信息

格式: 序号 选择方法 节面 1 参数 节面 2 参数

选择方法: 0=舍弃, 1=不稳定性, 2=偏差角

*_principal_mechanisms.dat

理论主震源机制 (最优破裂面)

*_output.mat

MATLAB 格式完整结果

图形文件

P/T 轴分布图 (*_P_T_axes.png)

红圈: P 轴 (压缩)

蓝十字: T 轴 (拉张)

绿色符号: 主应力轴

用途: 验证应力场与震源机制的一致性

莫尔圆图 (*_Mohr_circles.png)

显示断层面在应力空间中的分布

用途: 评估断层稳定性

应力轴置信区间图 (*_stress_directions.png)

点云密度表示不确定性
用途：评估结果可靠性
应力形状比分布图 (*_shape_ratio.png)
直方图显示 R 值分布
红线：最优值
用途：评估 R 值稳定性

6.3 结果质量评估

好的结果特征
数据使用率 > 70%
主应力轴置信区间 < 15°
R 值标准差 < 0.1
P/T 轴分布与应力轴一致
需要注意的情况
大量数据被舍弃：检查数据质量或调整参数
应力轴分散：可能存在应力场不均匀
R 值不稳定：数据量不足或质量问题

7. 常见问题

7.1 安装问题

Q: tkinter 未安装怎么办?

Ubuntu/Debian

```
sudo apt-get install python3-tk
```

macOS (通常已包含)

Windows (通常已包含)

Q: 程序无法启动?

检查 Python 版本: `python --version`

检查依赖包: `pip list`

查看错误信息

7.2 数据问题

Q: 大量数据被舍弃?

检查输入数据格式

查看选择信息文件，分析舍弃原因

适当放宽选择参数

检查是否存在异常数据

Q: 结果不稳定?

增加数据量 (建议>30 个)

提高数据质量

增加噪声实现次数

7.3 参数调整

Q: 如何选择合适的参数?

从默认参数开始

根据数据使用率调整

观察结果稳定性

参考类似研究的参数

Q: 摩擦系数如何确定?

沉积岩: 0.4-0.7

火成岩: 0.6-1.0

变质岩: 0.5-0.8

断层泥: 0.2-0.5

7.4 结果解释

Q: 应力形状比 R 的地质意义?

$R \approx 0$: 正断层环境

$R \approx 0.5$: 走滑断层环境

$R \approx 1$: 逆断层环境

Q: 如何判断结果可靠性?

查看不确定性分析结果

对比区域地质构造

与 GPS、钻孔数据对比

检查内部一致性

8. 技术细节

8.1 算法流程

1. 数据读取

- └─ 解析震源机制参数
- └─ 计算共轭节面

2. 初始应力估计

- └─ Michael 方法随机选择节面
- └─ 线性反演初始应力张量

3. 迭代优化

- └─ 节面选择 (两阶段策略)
- └─ 应力反演
- └─ 收敛判断

4. 摩擦系数优化

- └─ 网格搜索
- └─ 最大化平均不稳定性

5. 不确定性分析

- └─ 添加噪声
- └─ 重复反演
- └─ 统计分析

6. 结果输出

- └─ 数据文件
- └─ 可视化图形

8.2 关键算法

线性应力反演 (Michael, 1984)

最小二乘法求解超定方程组

约束条件: 零迹 ($\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3 = 0$)

稳定性准则 (Vavrycuk, 2014)

基于断层不稳定性的物理准则

结合摩尔-库仑破裂理论

不确定性评估

Bootstrap 方法评估参数误差

蒙特卡洛模拟传播误差

8.3 程序结构

主程序

- └─ GUI 界面模块
 - └─ 参数设置
 - └─ 文件选择
- └─ 数据处理模块
 - └─ 读取震源机制
 - └─ 计算共轭解
- └─ 反演核心模块
 - └─ 节面选择策略
 - └─ 线性反演
 - └─ 迭代优化
- └─ 不确定性分析模块
 - └─ 噪声生成
 - └─ 统计分析
- └─ 可视化模块
 - └─ 应力图
 - └─ 莫尔圆
 - └─ 统计图

8.4 性能优化

使用 NumPy 矢量化计算

预分配内存减少开销

并行化潜力 (未来版本)

9. 参考文献

核心文献

Vavryčuk, V. (2014). Iterative joint inversion for stress and fault orientations from focal mechanisms. *Geophysical Journal International*, 199(1), 69-77.

Michael, A.J. (1984). Determination of stress from slip data: faults and folds. *Journal of Geophysical Research*, 89(B13), 11517-11526.

Michael, A.J. (1987). Use of focal mechanisms to determine stress: a control study. *Journal of Geophysical Research*, 92(B1), 357-368.

相关文献

Wallace, R.E. (1951). Geometry of shearing stress and relation to faulting. *Journal of Geology*, 59(2), 118-130.

Bott, M.H.P. (1959). The mechanics of oblique slip faulting. *Geological Magazine*, 96(2), 109-117.

Gephart, J.W. & Forsyth, D.W. (1984). An improved method for determining the regional stress tensor using earthquake focal mechanism data. *Journal of Geophysical Research*, 89(B11), 9305-9320.

Chang, C., 2024. Identifying subsurface fault planes via a stress inversion of earthquake focal mechanisms. *Geophysical Journal International*, 236, 1106-1124.
<https://doi.org/10.1093/gji/ggad474>.

附录

A. 文件列表

核心程序文件：

StressInverse_improved.py - 改进版主程序

advanced_stability_criterion.py - 节面选择策略

stress_inversion_improved.py - 改进的反演函数

GUI_Input_parameters.py - 图形界面

辅助文件：

run_stress_inversion_gui.py - 启动脚本

install_dependencies.py - 安装脚本

test_focal_mechanisms.dat - 测试数据

B. 更新日志

v2.0 (2024) - 添加两阶段节面选择策略和 GUI

v1.1.3 (2020) - 添加滑动偏差计算

v1.1.2 (2019) - 修复特征向量排序问题

v1.1.1 (2018) - 修正莫尔圆半平面选择

v1.1 (2014) - 移除统计工具箱依赖

v1.0 (2014) - 初始版本

C. 联系信息

原始算法开发：Václav Vavryčuk

软件包改进：张苏祥

技术支持：1041573288@qq.com

声明：本软件仅供研究使用。使用本软件请严格遵守引用及声明。

如有任何问题可联系我：

张苏祥 (1041573288@qq.com)