

tomoDD_SP 使用手册

讲解：杨浩, 导师：张海江

中国科学技术大学 地球和空间科学学院

Email: young_h_geo@mail.ustc.edu.cn

摘要： V_p/V_s （波速比）对识别地壳介质的岩性、裂隙与含流体性具有一线指标意义，其与泊松比直接相关，因此获得稳健、细致的三维 V_p/V_s 模型是解释断层力学与震源行为的关键前提。本手册所述程序在统一框架下联合利用绝对与差分到时（含 P、S 与 S-P），进行事件重定位与三维成像，并将 S-P 到时差作为独立观测量以直接反演 V_p/V_s ，避免了由分别求解 V_p 与 V_s 再相除所带来的分辨率偏差；同时，S-P 观测天然消除了同一事件的起时项，从源头上减弱了与起时和部分系统误差的耦合。已经发表的一些工作表明，在同时使用绝对与差分 P、S、S-P 到时的框架内，可以更稳健地求解震源与介质参数并得到更可靠的 V_p/V_s 成像；其中 S-P 到时差为 V_p/V_s 提供了直接约束，而差分策略有效提升了源区的分辨率与抗异常能力。进一步的应用显示，高分辨率的 V_p/V_s 成像能够揭示断层带内多尺度的结构变化，并与地震行为（如破裂分段、障壁与小震时空演化）具有内在对应关系，这也支撑了本程序在研究不同构造环境下震源与介质耦合过程中的适用性与必要性。本手册将系统讲解 tomoDD_SP 程序相关的数据整理、编译、运行，以及常见问题。

0. 快速上手（建议先读）

准备数据与模型：station.dat、event.dat、absolute.dat、可选 dt.ct / dt.cc，以及本版新增的 absolute_sp.dat、可选 dt_sp.ct / dt_sp.cc；并在工作目录放置初始三维模型文件 MOD。

编辑控制文件：tomoDD_SP.inp（本文第 5 章逐项解释）。

运行：./tomoDD_SP tomoDD_SP.inp。

检查与迭代：查看 *.res / *.sta / *.loc / *.reloc 与 Vp_model.dat / Vs_model.dat / VpVs_model.dat；按第 7 章建议，逐步收紧权重与阈值，获得稳定解。

1. 方法与程序概览

1.1 目标

联合反演：在三维网格上同时求解 Vp 与 Vs 和 Vp/Vs，并重定位事件（震源位置与发震时刻）。

数据类型：绝对到时、目录差分到时、互相关差分到时，以及本版新增 S-P 的绝对/差分到时/互相关差分到时。

思想：采用分阶段（成组）迭代与再加权，先依赖绝对到时恢复大尺度结构，再逐步提高差分与互相关的权重以细化局部结构与相对定位。

1.2 网格与射线

三维规则网格表示速度与波速比模型。

射线追踪可选择不同实现以兼顾局地与区域尺度应用（详见参数 RayTracing）。

1.3 S-P 的作用

S-P 绝对到时（absolute_sp.dat）直接约束 Vp/Vs；

S-P 差分到时（dt_sp.ct / dt_sp.cc）进一步降低起时与路径系统误差对 Vp/Vs 的耦合。

2. 安装与运行

编译: `make clean; make;`

可执行程序: `tomoDD_SP`。

运行语法: `./tomoDD_SP tomoDD_SP.inp`

工作目录: 需要包含

`./Input_Files/`

`absolute.dat, absolute_sp.dat, dt.ct, dt_sp.ct, event.dat, station.dat, dt.cc(可选), dt_sp.cc(可选)`

`./Output_Files/`。

`./MOD`

`./tomoDD_SP`

`./tomoDD_SP.inp`

`./ak135.15.SKs`

`./layer-16.dat`

3. 数据准备流程

- 所需准备数据文件:

`station.dat` (台站坐标与深度), `phase.dat` (震相数据), `MOD`

`dt.cc` (波形互相关数据, 可选)。

- 利用 `ph2dt` 生成 `absolute.dat`, `dt.ct`, `event.dat` 等

执行语句 `./ph2dtN3 ph2dt.inp`

该部分与 `hypoDD` 相同, 使用说明见 `hypoDD.pdf`。

- S-P 到时差数据提取, 获得 `absolute_sp.dat`, `dt_sp.ct` :

执行语句 `python extract_sp_times.py`。

- 互相关差分 (可选): 生成 `dt.cc`; 利用 `python extract_sp_times.py` 生成 `dt_sp.cc`。

- 初始模型：编写 MOD（含网格坐标与初始 V_p 与 V_p/V_s 模型；程序可据此派生 V_s ）。
- 最终文件汇总：

absolute.dat, absolute_sp.dat, dt.ct, dt_sp.ct, event.dat, station.dat, dt.cc(可选), dt_sp.cc(可选),
MOD

4. 输入文件格式（逐一说明与示例）

以下所有文件采用 ASCII 文本，字段以空格/制表符分隔；以 # 或 * 开头的行为注释。

4.1 台站文件 station.dat

作用：定义台站位置与高程/深度。

字段：

STA LAT(°) LON(°) DEP(m)

STA：台站名（不含空格）。

DEP：相对海平面高度（m），海拔为正，水下为负。

示例：

ABCD 35.1234 103.4567 1350

EFGH 35.5432 103.9876 250

4.2 事件文件 event.dat

作用：提供事件的初始信息。

字段：

YYYYMMDD HHMMSSFF LAT(°) LON(°) DEP(km) MAG EH(km) EV(km) RMS(s) ID
TYPE

TYPE：事件类型，‘0’代表天然地震，‘1’代表 shot data（发震时刻和位置已知），‘2’代表 blast data（位置已知）。

示例：

20210803 12452323 35.4321 103.7654 6.3 2.1 1.2 1.5 0.35 1000123 0

4.3 绝对到时 **absolute.dat**

作用：每个事件的台站到时列表。

结构：事件为单位块，头行以 # 开头，随后若干体行。

格式：

ID

STA TT(s) WGHT PHA

...

WGHT：拾取质量权重（0~1 或其他自定义标度；与控制文件中的权重会相乘）。

PHA：P 或 S。

示例：

1000123

ABCD 12.345 1.0 P

EFGH 22.678 0.8 S

4.4 目录差分到时 **dt.ct**

作用：事件对在同一台站的目录差分（使用台站拾取的到时）。

结构：按“事件对”为单位块。

格式：

ID1 ID2

STA TT1(s) TT2(s) WGHT PHA

...

TT1/TT2: 两事件在该台的绝对到时 (共用统一时间基准);

WGHT: 该条目的相对权重;

PHA: P 或 S。

示例:

```
# 1000123 1000456
```

```
ABCD 12.345 12.789 1.0 P
```

```
EFGH 22.678 22.990 0.8 S
```

4.5 互相关差分到时 **dt.cc** (两种体例, 由 **CC_format** 指定)

作用: 事件对在同一台站的互相关差分 (更高精度)。

体例 1 (**CC_format=1**): 块状头-体结构

```
# ID1 ID2 OTC
```

```
STA DT(s) WGHT PHA
```

```
...
```

OTC: 与目录时间基准的校正 (未知可填 0 或 -999, 须在全局保持一致)。

DT: 该台站互相关差分到时 ($ID2 - ID1$)。

体例 2 (**CC_format=2**): 每行一观测

```
ID1 ID2 STA DT(s) WGHT PHA
```

示例 (体例 2):

```
1000123 1000456 ABCD 0.438 1.0 P
```

```
1000123 1000456 EFGH 0.312 0.8 S
```

4.6 S-P 绝对到时 **absolute_sp.dat**

作用：使用 S-P（同一事件、同一台）替代绝对 P/S，到时定义为 $T_S - T_P$ 。

结构与 absolute.dat 相同，TT 为 S-P。

示例：

```
# 1000123
```

```
ABCD 10.333 1.0
```

```
EFGH 8.115 0.9
```

4.7 S-P 目录差分 dt_sp.ct

作用：两事件的 S-P 差分（目录级）。

结构与 absolute_sp.dat 相似，但 TT 为事件对在该台的 S-P 到时差。

示例：

```
# 1000123 1000456
```

```
ABCD 2.56 1.0
```

4.8 S-P 互相关差分 dt_sp.cc

作用：两事件在同一台的 S-P 互相关差分。

体例与 dt.cc 相同（由 CC_format 决定），DT 表示 (S-P) 的差分。

4.9 初始模型 MOD（必须存在于工作目录）

作用：提供初始三维速度与波速比模型及网格坐标。

格式（建议）：

```
bld = <float>  nx = <int>  ny = <int>  nz = <int>
```

```
x1 x2 ... x_nx (km)
```

```
y1 y2 ... y_ny (km)
```

```
z1 z2 ... z_nz (km, 正向下)
```

Vp(按 z 层，逐层写满 nx*ny 个) 单位 km/s

VpVs(按 z 层，逐层写满 nx*ny 个) 无量纲

bld: 边界层厚度 (km)，用于外插/边界延拓；

x/y/z: 网格节点坐标；必须覆盖所有台站与事件；

VpVs: Vp/Vs (非 Vs)。程序可据此派生 $V_s = V_p / (V_p/V_s)$ 。

示例 (节选):

```
0.1 12 14 11

96.00 101.00 101.50 102.00 102.50 103.00 103.50 104.00 104.50 105.00 105.50 110.00

23.00 27.00 27.50 28.00 28.50 29.00 29.50 30.00 30.50 31.00 31.50 32.00 32.50 38.00

-100.00 0.00 5.00 10.00 17.50 25.00 35.00 45.00 65.00 90.00 300.00

...
```

之后写入逐层 Vp，再写入逐层 VpVs。模型的最外侧为边界，不参与反演，需要设置一个宽的边界以包含整个研究区域。

5. 控制文件 tomoDD_SP.inp (逐项解释)

行首 * 为注释；字段之间以空格分隔；顺序建议与下述一致。

5.1 输入/输出文件选择

*--- input file selection

说明与建议

某类数据若暂不使用，可留空行或不填对应文件。

模型输出与 MOD 同构，便于对比。

5.2 数据类型选择

*--- data type selection:

* IDAT: 0=synthetics; 1=cross corr; 2=catalog; 3=cross & cat

* IPHA: 1=P; 2=S; 3=P&S

* DIST: max dist [km] between cluster centroid and station

IDAT IPHA DIST

2 3 8000

参数解释与建议

IDAT: 运行启用的数据大类。

0 合成测试; 1 仅互相关差分; 2 仅目录差分; 3 两者并用。

IPHA: 相位类型。

1=仅 P; 2=仅 S; 3=P 与 S。若使用 S-P, 一般仍取 3。

DIST: 事件簇质心到台站的最大距离 (km)。

距离过大将引入远台、增加路径复杂度; 过小可能丢失约束。

5.3 事件聚类

*--- event clustering:

* OBSCC: min # of obs/pair for cross-time data (0= no clustering)

* OBSCT: min # of obs/pair for catalog data (0= no clustering)

* Air_dep: shallowest depth (km), events shallower than this are dropped

OBSCC OBSCT Air_dep

0 0 -4.0

参数解释与建议

OBSCC/OBSCT: cluster 分析的参数, 给 0 的话就是每个地震都单独定位, 如果给其他数的话, 程序会根据这个数寻找可以组成一个 cluster 的事件群, 然后对这个事件群进行定位。通常情况下给 0。

Air_dep: 浅于该深度 (km) 的事件判为不可信 (“空气地震”) 并剔除。

5.4 求解与模型控制

*--- solution control:

* ISTART ISOLV NSET RayTracing PSratio DISTratio

2 2 8 2 10.0 0.05

* iuses iuseq invdel stepl

2 0 0 0.5

* wlat wlon rota CC_format

30.3 103.3 0 1

* minVp maxVp minVs maxVs minVpVs maxVpVs maxdVp maxdVs maxdVpVs

0.5 8.5 0.01 6.0 1.4 3.0 0.4 0.2 0.05

* wt_vp1 wt_vp2 wt_vp3 wt_vs1 wt_vs2 wt_vs3 wt_vpvs1 wt_vpvs2 wt_vpvs3

15 15 15 15 15 15 15 15 15

参数解释

ISTART: 初始位置来源。1=从簇单源/质心; 2=使用 event.dat。一般取 2。

ISOLV: 线性求解器。1=SVD (小规模、稳健); 2=LSQR (大规模, 高效, 需要 DAMP)。通常使用 2。

NSET: 成组迭代的组数; 需与 §5.5 的权重段落数量一致。

RayTracing: 射线追踪器。1=直角坐标局地追踪; 2=适用于较大范围/包含更复杂路径的实

现。

PSratio: 波速比一致性约束权重，即让程序直接反演得到的波速比与程序分别反演得到的 V_p 与 V_s 相除得到的波速比尽可能一致，一般给 4-10。

DISTratio: 对判断 P 和 S 射线路径是否相近的阈值参数，给 0.05 就是如果 P 和 S 的路径差异在总路径长度的 5% 之内的话，就认为它们路径是相近的，如果大于了这个数就舍弃该数据。

iuses: 介质参数开关。1=仅反演 V_p ；2=反演 V_p 与 V_s /（或 V_p 与 V_p/V_s ）。

iuseq: 为 0 时表明 MOD 后半部分为 V_p/V_s ，若为其他值，则后半部分为 Q 值

invdel: 数据时标一致时默认 0。

stepl: 每步模型更新的步长因子（0.1–5）。

wlat/wlon/rota: 坐标原点与平面旋转角（度，顺时针为正）。若不需要，设为 0，球坐标系版本中旋转参数不起作用。

CC_format: 互相关文件体例。1=头-体；2=逐行。必须与 `dt.cc/dt_sp.cc` 一致。

minVp/maxVp、minVs/maxVs、minVpVs/maxVpVs: 物理可行范围（硬约束）。

典型： V_p 0.5–8.5 km/s， V_s 0.01–6.0 km/s， V_p/V_s 1.4–3.0。

maxdVp/maxdVs/maxdVpVs: 单次迭代参数最大改变量（避免发散）。

典型： $V_p \leq 0.4$ km/s， $V_s \leq 0.2$ km/s， $V_p/V_s \leq 0.05$ 。

wt_vp1/2/3、wt_vs1/2/3、wt_vpvs1/2/3: X（经向）/Y（纬向）/Z（深向）三方向一阶平滑权重。

含义：权重越大，模型越平滑。平滑过弱：数据噪声被当作细节放大；过强：真实结构被抹平。通过 L-curve 选择合适的参数。

5.5 数据加权与再加权（成组段落）

*--- data weighting and re-weighting:

* --- CROSS DATA -----CATALOG DATA ----

* NITER WTCCP WTCCS WRCC WDCC WTCTP WTCTS WRCT WDCT WTDD DAMP

JOINT THRE_vp THRES_vpvs

1 -9 -9 -9 -9 0.1 0.08 8 -9 10.0 20 1 0.05 0.05

2 -9 -9 -9 -9 0.1 0.08 7 -9 10.0 20 0 0.05 0.05

1 -9 -9 -9 -9 0.1 0.08 7 -9 10.0 20 1 0.05 0.05

2 -9 -9 -9 -9 0.1 0.08 6 -9 10.0 20 0 0.05 0.05

1 -9 -9 -9 -9 1.0 0.8 6 -9 0.1 20 1 0.05 0.05

2 -9 -9 -9 -9 1.0 0.8 6 -9 0.1 20 0 0.05 0.05

1 -9 -9 -9 -9 1.0 0.8 5 -9 0.1 20 1 0.05 0.05

2 -9 -9 -9 -9 1.0 0.8 5 -9 0.1 20 0 0.05 0.05

字段定义

NITER: 本组内迭代次数 (整数 ≥ 1)。

WTCCP / WTCCS: 互相关差分 P/S 的数据权重 (>0 生效; -9 表示不用)。

WRCC: 互相关差分的残差阈值 (s), 超过则降权/剔除; -9 关闭。

WDCC: 互相关差分的事件对最大距离 (km), 超过则降权/剔除; -9 关闭。

WTCTP / WTCTS: 目录差分的数据类型权重。

WRCT / WDCT: 目录差分的残差/距离加权 (同上)。

WTDD: 绝对到时 vs 差分到时的相对权重 (>1 侧重绝对; <1 侧重差分)。

DAMP: 仅在 ISOLV=2 时生效的阻尼系数。

JOINT: 1=位置与速度联合求解; 0=仅重定位。

THRE_vp / THRES_vpvs: DWS (射线加权计数) 阈值系数: 阈值=系数 \times 全局平均 DWS。

低于阈值的网格节点在本段迭代被固定（不更新）。

建议 0.03–0.10，数据稠密区可取小、稀疏区取大。

推荐流程

早期组：大 WTDD（例如 10），WTCT* 小（0.05–0.2），WTCC*=-9，JOINT=1，用以建立大尺度模型；每组后可插入 JOINT=0（仅定位）稳住位置。

中期组：逐步提高 WTCT*、收紧 WRCT（如 8 → 6），WTDD 下降（10 → 0.1）。

末期组：若有 dt.cc，开启/提高 WTCC*，同时视噪声收紧 WRCC；适当减小平滑与 maxd* 释放细节。

常见误用

DAMP 过小：解不稳定、震源飘移、模型振荡。

WR* 过严：有效数据大量被丢弃，解退化。

一开始就给大 WTCC*，可能错误牵引模型。

5.6 事件/簇选择

*--- event selection:

* CID

0

* ID

#（每行最多 8 个事件 ID；留空表示全部）

CID：簇编号（0 表示全部簇）。

ID：仅重定位列出的事件（可分行）。

6. 输出文件（含义与检查要点）

tomoFDD.loc: 原始位置（运行前的事件清单，便于对照）。

tomoFDD.reloc: 重定位结果（包含经纬度、深度、起时、位置不确定度、RMS 等）。

stares.dat: 台站统计（每站观测条数、P/S 残差、RMS）。

initial.res / res: 数据残差（最后一次迭代写出；含 STA, DT/TT, ID1, ID2, IDX, WGHT, RES, WT, DIST 等字段）。

initial_SP.res / res_SP: S-P 通道残差（用于诊断 V_p/V_s 拟合）。

Vel.out: 求解日志/概要（每组条件数、RMS 变化、去权比例等）。

Vp_model.dat / Vs_model.dat / VpVs_model.dat: 最终模型（与 MOD 同构）。

检查要点

RMS 是否随组/迭代单调或总体下降；

台站 RMS 分布是否合理（异常站需复核拾取/响应）；

位置与起时改变量是否逐渐变小；

模型切片是否与构造/已知速度对比合理，是否存在非物理高梯度。

7. 调参与最佳实践

分阶段：先绝对到时主导（WTDD 大），再目录差分，末期互相关细化。

平滑与阻尼：初期强阻尼，中后期逐步减小微调阻尼。

步长：step1 0.5 起步；若出现震源抖动或模型“棋盘”，先减小到 0.3–0.4。

范围/限幅：min/max 合理，maxd* 不宜过大；V 变化每步 $V_p \leq 0.3\text{--}0.4\text{ km/s}$ 、 $V_p/V_s \leq 0.03\text{--}0.05$ 较稳健。

8. 常见问题与排错

大量“空气地震”：检查 Air_dep、近地表速度过低、台站高程；适度增大 DAMP。

条件数过大/不收敛：增加 DAMP、提高平滑权、放宽 WR*、减小 maxd*、缩小 DIST。

条件数过小/过阻尼：减小 DAMP、降低平滑、适当提高 WTCT*/WTCC*。

互相关与目录时间基准不一致：统一 OTC 约定（统一置 0 或 -999，并在程序开关中一致处理）。

S-P 异常：检查 P、S 对的配对是否严格同一台同一事件；异常常由遗漏/错配引起。

9. 示例控制文件（可直接修改使用）

```
*===== tomoDD-SP Example =====*
* RELOC.INP:
*--- input file selection
* cross correlation diff times:

** cross correlation diff times(S_P)

*catalog P diff times:
Input_Files/dt.ct
** catalog P diff times (S-P)
Input_Files/dt_sp.ct
* event file:
Input_Files/event.dat
*
* station file:
Input_Files/station.dat
*
*--- output file selection
* original locations:
Output_Files/tomoFDD.loc
* relocations:
Output_Files/tomoFDD.reloc
* station information:
Output_Files/stares.dat
*initial residual information:
Output_Files/initial.res
*initial residual information:(S-P)
Output_Files/initial_SP.res
* residual information:
Output_Files/res
* residual information:(S-P)
Output_Files/res_SP
```

* source parameter information:

* Velocity file

Output_Files/Vel.out

* Vp Model

Output_Files/Vp_model.dat

* Vs Model

Output_Files/Vs_model.dat

* Vp/Vs model

Output_Files/VpVs_model.dat

* Absolute file

Input_Files/absolute.dat

* absolute data (S-P)

Input_Files/absolute_sp.dat

*

*--- data type selection:

* IDAT: 0 = sichuanthetics; 1 = cross corr; 2 = catalog; 3 = cross & cat

* IPHA: 1 = P; 2 = S; 3 = P&S

* DIST: max dist [km] between cluster centroid and station

* IDAT IPHA DIST

2 3 8000

*

*--- event clustering:

* OBSCC: min # of obs/pair for crosstime data (0 = no clustering)

* OBSCT: min # of obs/pair for network data (0 = no clustering)

* OBSCC OBSCT Air_dep

0 0 -4.0

*

*--- solution control:

* ISTART: 1 = from single source; 2 = from network sources

* ISOLV: 1 = SVD, 2 = lsqr

* NSET: number of sets of iteration with specifications following

* RayTracing 1 = Hols's; 2 = Lomax's

* ISTART ISOLV NSET RayTracing PSratio DISTratio

0 2 8 2 10.0 0.05

* iuses iuseq invdel stepl

2 0 0 0.5

* wlat wlon rota CC_format

30.3 103.3 0 1

* minVp maxVp minVs maxVs minVpVs maxVpVs maxdVp maxdVs maxdVpVs

0.5 8.5 0.01 6 1.4 3.0 0.4 0.2 0.05

* wt_vp1 wt_vp2 wt_vp3 wt_vs1 wt_vs2 wt_vs3 wt_vpvs1 wt_vpvs2 wt_vpvs3


```

15 15 15 15 15 15 15 15 15
*
*--- data weighting and re-weighting:
* NITER:          last iteration to used the following weights
* WTCCP, WTCCS:   weight cross P, S
* WTCTP, WTCTS:   weight catalog P, S
* WRCC, WRCT:     residual threshold in sec for cross, catalog data
* WDCC, WDCT:     max dist [km] between cross, catalog linked pairs
* DAMP:           damping (for lsqr only)
*   --- CROSS DATA -----CATALOG DATA ----
* NITER WTCCP WTCCS WRCC WDCC WTCTP WTCTS WRCT WDCT WTDD DAMP JOINT THRE_vp
THRES_vpvs
1  -9 -9 -9 -9 0.1 0.08  8 -9 10.0 20  1  0.05  0.05
2  -9 -9 -9 -9 0.1 0.08  7 -9 10.0 20  0  0.05  0.05
1  -9 -9 -9 -9 0.1 0.08  7 -9 10.0 20  1  0.05  0.05
2  -9 -9 -9 -9 0.1 0.08  6 -9 10.0 20  0  0.05  0.05
1  -9 -9 -9 -9 1 0.8  6 -9 .1 20  1  0.05  0.05
2  -9 -9 -9 -9 1 0.8  6 -9 .1 20  0  0.05  0.05
1  -9 -9 -9 -9 1 0.8  5 -9 .1 20  1  0.05  0.05
2  -9 -9 -9 -9 1 0.8  5 -9 .1 20  0  0.05  0.05
*--- event selection:
* CID:   cluster to be relocated (0 = all)
* ID:    cusps of event to be relocated (8 per line)
* CID
0
* ID
=====*
```

10. 术语简表（便于查阅）

绝对到时：单事件在某台的到时。

目录差分：两事件在同一台的到时差（目录拾取）。

互相关差分：两事件在同一台的互相关到时差。

S-P：同一事件在同一台的 $T_S - T_P$ ；也可做事件间差分。

DWS：路径覆盖度指标（加权射线条数）；用于节点可更新性判断。

条件数：线性系统稳定性度量；过大不稳，过小过阻尼。