

分类号 _____
U D C _____

密 级 _____
编 号 10486

武 汉 大 学
硕 士 学 位 论 文

波形拟合反演震源机制的定权研究及误差评定

研 究 生 姓 名: 邓东平

学 号: 2013202140004

指导教师姓名、职称: 朱良保 教授

专 业 名 称: 固体地球物理学

研 究 方 向: 地震学

二〇一六年四月

Weighting improvement and error estimation for inversion of mechanism from waveform

Candidate: DENG DONGPING

Student Number: 2013202140004

Supervisor: PROF. ZHU LIANGBAO

Major: Solid Geophysics

Speciality: Seismology



School of Geodesy and Geomatics

WUHAN UNIVERSITY

April, 2016

郑 重 声 明

本人的学位论文是在导师指导下独立撰写并完成的, 学位论文没有剽窃、抄袭、造假等违反学术道德、学术规范和侵权行为, 否则, 本人愿意承担由此而产生的法律责任和法律后果, 特此郑重声明.

学位论文作者 (签名):

年 月 日

摘 要

本文主要介绍和讨论了武汉大学硕士毕业论文的 \LaTeX 模板. 指明了编译方法, 强调了公式排版的一些细节问题, 也指出了一些常见的排版错误.

关键词: 毕业论文, \LaTeX , 模板,

ABSTRACT

This thesis is a study on the theory of

Key words: L^AT_EX, ...

目 录

摘要	I
ABSTRACT	II
第一章 引言	1
1.1 研究发展历程	1
1.2 研究现状及问题	1
1.3 本文设定目标及方案	2
第二章 原理分析	4
2.1 震源基础	4
2.2 反演方法	4
2.2.1 波形分解	4
2.2.2 格林函数库	6
2.2.3 格点搜索	8
2.3 定权优化	9
2.4 误差评定	11
第三章 理论实验	13
3.1 封面相关	13
3.2 字体命令	13
3.3 表格样本	14
3.3.1 基本表格	14
3.3.2 复杂表格	14
第四章 实例应用	18

4.1	封面相关	18
4.2	字体命令	18
4.3	表格样本	19
4.3.1	基本表格	19
4.3.2	复杂表格	19
第五章	总结和展望	23
5.1	封面相关	23
5.2	字体命令	23
5.3	表格样本	24
5.3.1	基本表格	24
5.3.2	复杂表格	24
	参考文献	28
	致谢	31

第一章 引言

众所周知地震灾害是关系到国计民生的重大自然灾害，虽然极具破坏的大地震发生频率很低，但是一次地震所爆发的能量却是与吨级核爆相当 (Stein and Wysession, 2003)，其破坏性不言而喻。2008 年 5 月 12 号的汶川地震是自唐山地震以来在我国发生的导致直接死亡人数最多，经济损失最大的重大地震。然而，另一方面，地震的高能量所激发的高穿透力的地震波却是地震学家研究地球结构的福音，是人类目前研究地球内部结构的最有力工具。所以，无论从人民生活安全，经济保障，还是从科学探索的角度看，地震学研究都是很有意义的。

地震学研究的主要内容是震源以及地下结构研究，震源机制是震源最基本的参数，其结果可进一步应用于理论震动图计算 (Wald, 2005)、海啸模拟 (Satake, 2007)、库仑应力转移估计 (King and Devès, 2007)、区域的应力分析和震源破裂过程反演中 (Kilb, 2001)。此外，利用已知震源机制计算得到面波震动图，用于在介质结构研究中代替到时或面波频散数据，以获得更多约束信息，直接拟合实际波形反演地下结构的方法也得到了广泛应用 (Nolet, 1990; Manaman et al., 2011; Friederich, 2003; Zielhuis and Nolet, 1994; Cao et al., 2001; Lee and Nolet, 1997)。因而在地震发生后，获得可靠的震源机制是有益且必要的。

1.1 研究发展历程

用地震波形拟合反演震源机制时，由于待求参数少、解空间有限且波形与震源机制的关系是非线性的，所以该问题非常适合用非线性反演中的全局搜索算法。在实践中，得到广泛应用的 CAP(Cut and Paste 的简称)(Zhao and Helmberger, 1994; Zhu and Helmberger, 1996; Tan et al., 2006) 和 CPS(Computer Programs in Seismology 的简称)(Herrmann, 1989) 等波形拟合反演程序充分说明了全局搜索在震源机制反演问题中的有效性。

1.2 研究现状及问题

Herrmann 开发的 CPS 软件包中用于震源机制反演子程序的方法 (Herrmann, 1989) (为方便本文简称 CPS 方法) 和 CAP 方法 (Zhao and Helmberger, 1994; Zhu and

Helmberger, 1996; Tan et al., 2006) 均为震源机制格点搜索方法, 由于二者的实用性和开源性, 被广泛应用于震源机制研究中。然而 CAP 和 CPS 方法加权的侧重点不同, 前者考虑几何扩散导致波形振幅的衰减, 给较低振幅的波形加大权重, 以平衡不同振幅波形在反演中的影响力; 后者则关注传播过程中信噪比的降低, 赋予高信噪比数据较大权重。考虑到波形振幅及信噪比与震中距间的关系, Zhu 等 (Zhu and Helmberger, 1996) 在 CAP 中将权重设置为关于震中距递增的幂函数, 而 CPS 方法中使用震中距的反比例函数作为权重值。幂函数和反比例函数的单调性恰巧相反, 导致从数值上看, 两种方法对同一套数据波形所定权重大小相互矛盾——CPS 定权震中距较近台站权重较高, 而 CAP 定权中则震中距较远台站相对权重较大。此外, 通过实例计算及理论分析发现, 实际观测波形的振幅及信噪比与震中距的关系较为复杂, 难以用简单的初等函数进行描述, 且函数中包含的参数赋值因人而异。因此无论利用幂函数或反比例函数估算的振幅和信噪比均较粗糙, 无法准确体现数据的真实性和客观性。

另一方面, 随着 CAP, CPS 等用波形非线性反演震源机制的算法得到广泛应用 (Luo et al., 2015; D' Amico et al., 2014; 赵博 et al., 2013), 其非线性反演中误差缺失的问题逐渐受到了关注。考虑到误差评价的重要性, 国内外学者均对震源机制反演的误差估计问题进行了研究, Duputel 等 (Duputel et al., 2012) 从误差的来源入手, 对震源机制进行误差评价, 但其方法只适用于估计线性反演的震源机制误差。考虑到目前应用最广泛的全局搜索反演, 本文旨在探究能应用于非线性反演算法的误差评估方法。对于非线性反演, 最常见的方法是对目标函数的极值人为给定一个阈值, 满足该条件的所有解构成误差范围内解集 (简称为阈值法), 该方法简洁直观, 能快速发现不同模型参数的误差大小关系, 但是阈值的给定有主观性, 导致定量结果难以让人信服。郑建常等 (郑建常 et al., 2015) 借鉴 Bootstrap (Efron 1979) 的思想, 对数据集随机多次选取子集进行独立反演并对解集样本用一定方法分析, 以评估其整体误差及解, 为使样本能反映整体。但是统计分析不仅要求样本抽取的随机性, 还对原始样本大小有一定要求, 当可用的地震记录数量不是很大时基于重抽样的该方法便不适用了。

1.3 本文设定目标及方案

针对以上分析, 为了解决 CPS 和 CAP 反演定权方法出现的矛盾以及误差缺失问题, 本文分别尝试进行权重优化以及误差评定。对于定权, 结合 CPS 与 CAP, 综合考虑振幅衰减和信噪比差异影响, 将二者统一计算权重, 从而解决上述的权重数值矛盾问题。其次, 计算时摒弃了用震中距简单函数估算振幅或信噪比方案, 而是基于每道波形数据自身的信息, 准确评估振幅和噪声。由于没有人工干预, 在提高精确度的同时有效保证了客观性。

为了解决反演震源机制时误差估计的问题, 本文借鉴了Hardebeck and Shearer (2002) 对 P 波初动极性反演方法改进的思路——首先估计观测数据的随机误差大小, 据此模拟随机误差, 并将其加入原始数据生成多组模拟数据集, 最终反演得到一系列误差范围内的解集。该方法不仅估计了误差, 且使得反演结果更稳定 (Hardebeck and Shearer, 2002)。将该思想应用到波形反演震源机制的问题中, 利用评估噪声随机模拟多套波形数据集, 并用每套数据分别进行反演, 得到包含多次反演结果的解集, 并对解集统计分析得到解的误差 (为方便叙述称其为模拟分析法)。本文方法与重采样类方法 (郑建常 et al., 2015; Efron, 1979) 不同的是每次反演的数据并非原始数据集的子集, 而是与数据集等价的模拟数据集, 保留了原数据集的样本大小, 更重要的是每套数据均具有一致的数据分布结构。所以对观测数据的数量要求相对降低, 能比重采样类方法更好应用于台站记录较稀少的地震事件。

为了验证本文提出权重优化方案和误差评价方法的有效性, 基于 CPS 反演程序进行了一系列理论试验, 分别检验权重优化效果和误差估计与理论预测是否吻合。对同一个设定条件下的模拟地震进行了三次试验, 分别测试误差评价时重复反演次数的设定值, 误差评定方法对噪声的反应情况, 权重优化的效果。第一次试验研究误差评价时反演的重复次数对最终结果的影响, 用以为该方法在应用时选择合适的反演次数。试验分别尝试了重复 20 次, 40 次, 60 次, 80 次和 100 次, 结果发现该方案对反演次数不是特别敏感, 结果基本一致且可信。为保证样本量充足, 选定 100 次为默认反演次数。第二次试验测试结果误差对数据噪声的反应是否合理, 对理论事件加噪时分别加了低, 中, 高, 超高强度噪声, 反演结果确实体现了误差由低到高的趋势, 而且理论真值均在误差范围内, 表明了本文误差估计的真实性和稳定性。第三次试验则分别设定了单独信噪比加权, 单独振幅调节加权, 信噪比和振幅调节联合定权三组对照组。三组对照组反演结果均在误差范围内包含真值, 但是综合看来联合定权的平均误差是最小的, 体现了联合定权的优越性。

为了体现本文方法的实际应用性, 以 2013 年 4 月 20 日的芦山地震为例, 分别采取单独振幅调节加权、单独信噪比加权以及振幅调节和信噪比调节联合加权的策略进行三次反演, 并利用本文的误差估计方法对三次反演的结果进行评价。通过对结果的合理性及平均误差两方面进行讨论, 以真实案例证实本文联合加权策略反演结果最优, 对应的震源机制解为 (走向 200° , 倾角 38° , 滑动角 89°), 震源深度 18km, 与其它研究者的研究成果有很好的一致性, 且与震源区的应力及地质构造情况均相互吻合。

第二章 原理分析

2.1 震源基础

1906 年旧金山发生了一次在地震学上具有重在研究意义的地震,地震前后对圣安德烈亚斯断层的研究结果 (Milne, 1910) 使人们普遍认为发生地震的原因是震源处的断层发生了滑移错动,巨大的势能转化为了热能及地震波等能力。这种错动可由位错理论进行解释,位错理论认为地震的发生是因为应力长期缓慢的大量积累,最终达到了断层锁定的极限,引发断层面(原有断层或地震新生断层)两侧发生突然的位错,导致了应力释放并形成地震。自此以后,对于地震震源的研究就开始集中到断层面的研究上。通常认为断层面两侧的应力在地震发生前后都是连续的,只有位移在断层面两侧突然间断,所以研究清楚断层面上的所有运动学信息是研究整个震源过程的主要内容。如果进一步简化,将地震发生时断层的位错视为纯剪切的点源位错(事实证明该简化很多情况下是合理的,且本文只讨论该情况),则利用三个描述断层的参数便可完整描述震源的物理过程(不考虑时间函数),并称该三参数为震源的机制解。求解震源机制的过程便是求解该三个参数的过程,该三参数具体定义如图2.1所示(程万正 et al., 2006)。

2.2 反演方法

2.2.1 波形分解

理论研究表明,同步地震点源 (Silver and Jordan, 1982) 所激发的地震波场如公式2.1(Jost and Herrmann, 1989)。

$$d_n(x, t) = M_{ki}[G_{nk,i} * s(t)] \quad (2.1)$$

其中 $s(t)$ 为震源时间函数, M_{kj} 为地震矩张量, $G_{nk,i}$ 为格林函数,从上式可知理论波形 d 与 M_i 为线性关系。根据Kikuchi and Kanamori (1991) 的分解方法,任意地震矩张量均可由 6 个简单地震矩张量通过线性组合而成,如公式2.2。

$$M = \sum_{k=1}^6 a_k M_k \quad (2.2)$$

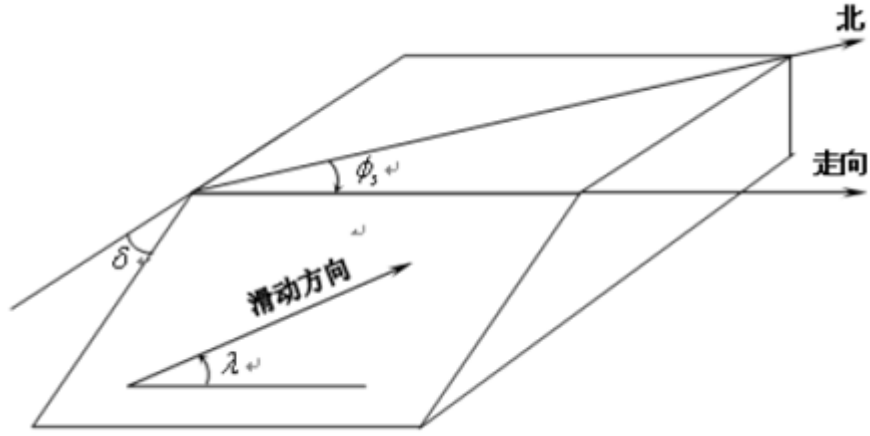


图 2.1: 震源机制三个参数的具体意义

公式2.2中等式右边的 M_k 如公式2.3所示。

$$\begin{aligned}
 M_1 &= \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} & M_2 &= \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} & M_3 &= \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \\
 M_4 &= \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} & M_5 &= \begin{bmatrix} -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} & M_6 &= \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}
 \end{aligned} \tag{2.3}$$

M_1 - M_6 为 6 个简单的地震源，其中 M_6 代表爆炸源，其余 5 个均为剪切位错源，根据公式2.2和公式2.3推导可知系数 a 与 M 各分量间的对应关系如公式2.4和公式2.5。

$$M = \begin{bmatrix} a_2 - a_5 + a_6 & a_1 & a_4 \\ a_1 & -a_2 + a_6 & a_3 \\ a_4 & a_3 & a_5 + a_6 \end{bmatrix} \tag{2.4}$$

$$\begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \\ a_3 \\ a_4 \\ a_5 \\ a_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} M_{12} \\ (M_{11} + M_{33} - 2M_{22})/3 \\ M_{23} \\ M_{13} \\ (2M_{33} - M_{11} - M_{22})/3 \\ (M_{11} + M_{22} + M_{33})/3 \end{bmatrix} \tag{2.5}$$

将公式2.2代入公式2.1，并省略波形分量指标 n 可得到公式2.6。

$$d = \sum_{k=1}^6 a_k d_k \quad (2.6)$$

再将公式2.5所示的 a 与 M 关系代入公式2.6可得到 d 关于 M 与 d_k 的公式2.7。

$$\begin{aligned} d = & M_{11}(1/3d_2 - 1/3d_5 + 1/3d_6) + M_{12}d_1 + M_{13}d_4 \\ & + M_{22}(-2/3d_2 - 1/3d_5 + 1/3d_6) + M_{23}d_3 \\ & + M_{33}(1/3d_2 + 2/3d_5 + 1/3d_6) \end{aligned} \quad (2.7)$$

为进一步简化,将公式2.7中 M 矩阵的 6 个分量依次记为 $M_1, M_2, M_3, M_4, M_5, M_6$, 并将与 M_i 相乘的关于 d_k 的多项式简记为 G_i , 于是得到了简洁的 6 项求和的理论波形公式2.8。在此我们按照Stein and Wyss (2003) 专著中关于地震矩反演章节中对格林函数的推广定义,将公式2.8中的 G_i 也称为格林函数,此格林函数即是我们之后在 CPS 反演中需要用到的。

$$d = G_i M_i (i = 1, 2, \dots, 6) \quad (2.8)$$

于是任意地震矩产生的波形均可由其矩张量矩阵和 6 个格林函数线性叠加得到,而格林函数又可由 6 个已知基本地震矩激发的波形 $d_k (k = 1, 2, \dots, 6)$ 叠加得到。由于以上运算均是线性运算,在 d_k 已知的情况下,在计算机中经两次迭加得到 d 速度非常快。

至此,我们已经将任意剪切位错源的波形分解为 6 个基本震源波形的线性叠加,而叠加的系数可由该位错源的震源机制唯一确定。现在的关键问题转化为计算 6 个基本震源对应的理论波形 d_k , 这可通过之后要介绍的格林函数库快速实现。

2.2.2 格林函数库

通常情况下天然地震由断层间错动造成,震源均近似纯剪切位错源。习惯上人们用破裂断层的三个角度参数——走向,倾角和滑动角来更直观地描述震源机制,地震

矩张量与震源机制三个参数的对应关系如公式2.9所示 (Aki and Richards, 1980)。

$$\begin{cases} M_{11} = -M_0(\sin\delta\cos\lambda\sin2\phi_s + \sin2\delta\sin\lambda\sin^2\phi_s) \\ M_{12} = M_0(\sin\delta\cos\lambda\cos2\phi_s + 1/2\sin2\delta\sin\lambda\sin2\phi_s) \\ M_{13} = -M_0(\cos\delta\cos\lambda\cos\phi_s + \cos2\delta\sin\lambda\sin\phi_s) \\ M_{22} = M_0(\sin\delta\cos\lambda\cos2\phi_s - \sin2\delta\sin\lambda\cos^2\phi_s) \\ M_{23} = -M_0(\cos\delta\cos\lambda\sin\phi_s - \cos2\delta\sin\lambda\cos^2\phi_s) \\ M_{33} = M_0\sin2\delta\sin\lambda \end{cases} \quad (2.9)$$

其中, ϕ_s 是走向, δ 是倾角, λ 是滑动角。 M_0 是最早由Aki (1966) 提出的用来度量震源长周期辐射的强度, 最初称为地震矩。由于是一个标量, 现在又叫作标量地震矩, 代表了地震的强度。将公式2.9代入公式2.8即将公式转化为了理论波形关于震源机制三参数的形式。

现在我们进一步研究 d_k 如何计算, 在均匀介质 (Ben-Menahem, 1963) 和层状介质 (Haskell, 1964) 模型的面波波场辐射理论基础上, Wang and Herrmann (1980) 进一步得到了剪切位错源在层状速度模型中所激发的地震波场, 在柱坐标频域下的表示, 如公式2.10所示。

$$\begin{cases} U_z(r, \phi, 0, \omega) = Z_{SS} \cdot s_2 + Z_{DS} \cdot s_3 + Z_{DD} \cdot s_1 \\ U_r(r, \phi, 0, \omega) = R_{SS} \cdot s_2 + R_{DS} \cdot s_3 + R_{DD} \cdot s_1 \\ U_\phi(r, \phi, 0, \omega) = T_{SS} \cdot t_2 + T_{DS} \cdot t_1 \end{cases} \quad (2.10)$$

公式2.10中各符号意义如2.11所示, 2.11中 ϕ 是地震观测台站相对震源的方位角, λ, δ, ϕ_s 分别代表断层滑动角, 倾角, 走向。公式2.10中的 Z_{SS}, R_{SS}, T_{SS} 分别对应于 $\delta = 90^\circ, \lambda = 0^\circ$ 的纯走滑型断裂的理论地震图的垂向、径向、切向分量; Z_{DS}, R_{DS}, T_{DS} 分别代表 $\lambda = 90^\circ, \delta = 90^\circ$ 的纯倾滑型逆冲断层激发的地震波的垂向、径向、切向分量; Z_{DD} 和 R_{DD} 分别对应于倾角 $\delta = 45^\circ$, 滑动角 $\lambda = 90^\circ$ 的逆冲断层激发的理论地震波的垂向、径向分量。它们 8 个是合成任意剪切位错源理论地震图所需要的全部基本函数, 它们是对波数 K 的积分表达 (Wang and Herrmann, 1980)。格林函数库即由大量的不同震中距, 不同震源深度对应的这 8 个基本函数组成。

$$\begin{cases} s_1 = 1/2\sin\lambda\sin2\delta \\ s_2 = \cos\lambda\sin\delta\sin2(\phi - \phi_s) + 1/2\sin\lambda\sin2\delta\cos2(\phi - \phi_s) \\ s_3 = -\cos\lambda\cos\delta\cos(\phi - \phi_s) + \sin\lambda\cos2\delta\sin(\phi - \phi_s) \\ t_1 = \cos\lambda\cos\delta\sin(\phi - \phi_s) + \sin\lambda\cos2\delta\cos(\phi - \phi_s) \\ t_2 = \cos\lambda\sin\delta\cos2(\phi - \phi_s) - 1/2\sin\lambda\sin2\delta\sin2(\phi - \phi_s) \end{cases} \quad (2.11)$$

利用公式2.9可推算出公式2.3中所示 6 个基本地震所对应的震源机制，即各地震的 3 个角度参数，将其代入公式2.10，并积分变换到时间域，便得到了 d_k ，进而得到 d 。而根据公式2.11知 s_1 、 s_2 、 s_3 、 t_1 、 t_2 等量均与 ω 无关，结合公式2.10可推得时间域的 Z_{SS} ， R_{DD} 等量与 d_k 的关系也是线性的，可通过快速线性叠加得到。综上分析知，计算 d 的关键在于得到该速度模型下，对应震中距和震源深度的 Z_{SS} ， R_{DD} 等基本函数。而计算该函数由于要经过大量积分运算，计算速度非常慢，在迭代或搜索反演过程中实时计算一系列该基本函数是不可取的。在实际工作中通过将研究区域按一定精度格点划分，并事先计算好各格点的基本函数，并将大量的各点所对应的基本函数归档存储为格林函数库。之后理论波形数值计算需要时，直接在格林函数库中调用对应震中距和震源深度的基本函数即可，这样便实现了 d 的快速计算。经检验，这样叠加计算理论波形的速度非常快，能满足格点搜索时大量理论波形图计算的需要。

2.2.3 格点搜索

CAP 与 CPS 方法计算波形的拟合度时使用了不同的目标函数，CAP 方法先将理论波形与实测波形通过互相关运算进行时差调整，再计算调整后的波形间残差范数 (L1 或 L2) (Zhao and Helmberger, 1994)，该残差范数定为为最终的目标函数，CPS 方法则直接将理论与实测波形的互相关函数作为目标函数。为了单独分析权重因素对反演的影响，对比 CPS 与 CAP 不同定权的差异，后文反演试验及讨论均基于 CPS 的目标函数方案。CPS 方法中的互相关目标函数 Fit 如公式2.12定义。

$$Fit = (\int_{Tb}^{Te} Y(t)G(t)dt)^2 / (\int_{Tb}^{Te} Y(t)Y(t)dt * \int_{Tb}^{Te} G(t)G(t)dt) \quad (2.12)$$

在计算机中进行数值计算时使用公式2.13所示离散形式：

$$Fit = [\sum_{j=1}^N \sum_{m=1}^6 yg(j, m, k)M_m]^2 / [\sum_{j=1}^N yy(j)] [\sum_{j=1}^N \sum_{m=1}^6 \sum_{n=1}^6 gg(j, m, n)M_mM_n] \quad (2.13)$$

公式2.13中各符号表示的含义如公式2.14和公式2.15所示。

$$\left\{ \begin{array}{l} yy(j) = \sum_{h=1}^{H(j)} y(j, h)y(j, h)wt(j) \\ gg(j, m, n) = \sum_{h=1}^{H(j)} g_m(j, h)g_n(j, h)wt(j) \\ yg(j, m, k) = \sum_{h=1}^{H(j)-|k|} y'(j, h)g'_m(j, h)wt(j) \end{array} \right. \quad (2.14)$$

$$\begin{cases} y'(j, h) = y(j, h + k) & k \geq 0 \\ g'(j, h) = g(j, h) & k \geq 0 \\ y'(j, h) = y(j, h) & k < 0 \\ g'(j, h) = g(j, h - k) & k < 0 \end{cases} \quad (2.15)$$

N 为参与反演的观测波形总道数, $H(j), wt(j)$ 分别为第 $j(j = 1, 2, \dots, N)$ 道波形的总采样点数及权重因子, $y(j, h), g(j, h)$ 分别为公式2.8中, 第 j 道观测波形 $d(j)$ 及其对应的格林函数 $Gi(j)$ 经过相同的数据处理 (去噪等), 可直接用于反演的波形的第 $h(h = 1, H)$ 个采样点, k 为使 $yg(j, m, k)$ 取得最大值的整数, 它是 Tan 等 (Tan et al., 2006) 提出的到时差平移参数, 可以有效地减小系统性误差的影响。本文计算的矩震级 M_w 是由波形振幅比值计算得到的标量矩转换得到的, 采用如公式2.16所示 2005 年被 CoSOI (Commission on Seismological Observation and Interpretation) 采纳的 IASPEI 标准, 其中 M_0 的单位为 dyne-cm。

$$M_w = 2/3(\log M_0 - 16.1) \quad (2.16)$$

理论地震图可用多种方法计算, 本文通过之前章节所述的用格林函数库快速合成理论波形, 而格林函数库则用 CPS 软件包中的 hprep96, hspec96, hpulse96 子程序计算得到, 该子程序的基本原理是波数积分法。反演时考虑到震源机制解的全空间 (走向 0° - 360° , 倾角 0° - 90° , 滑动角 -180° - 180°) 较小, 通常采用全空间格点搜索法。格点搜索法将全空间划分为一定精度间隔的格点, 并依次遍历全部格点找寻目标函数最值点, 最值处对应格点即为最优解。本文如公式2.13所示目标函数 Fit 的具体计算过程如下, 将遍历到的格点震源机制转换为等价地震矩张量 (Jost and Herrmann, 1989), 同时用格林函数库快速求出公式2.8中对应的格林函数 Gi , 将格林函数 Gi , 观测波形 d 进行必要且相同的滤波、截取时窗处理, 并将处理后格林函数 g , 观测波形 y 和地震矩张量 M 与代入公式2.13, 计算即可求得该格点处的拟合度 Fit。

2.3 定权优化

反演通常采用大量波形数据, 而数据在反演中所占权重会对最终结果有决定性影响, 因此合理设置 wt 值非常重要。CPS 方法从数据的信噪比着手定权, 考虑到信噪比随震中距增加而下降的趋势, 将权重设为震中距的反比例函数, 台站震中距越远的数据权重越小。CAP 方法 (Zhu and Helmberger, 1996) 则注意到波形间振幅的差异, 高振幅的波形数据对反演结果起主导作用, 导致低振幅波形的数据信息得不到充分利

用。考虑到几何扩散是导致振幅衰减的重要原因，CAP 令 wt 为震中距的幂函数，使得震中距远的台站权重相对较大，以补偿振幅的衰减。综上可知 CAP 和 CPS 方法的权重分别侧重考虑调节波形振幅和信噪比的差异。振幅调节的作用是当有振幅差异较大的多道波形参与反演时，防止强振幅的波形主导反演结果，使不同振幅的波形对反演具有相当的贡献，所以当有大量有振幅差异的波形数据参与反演时，为充分利用各道波形的信息约束反演结果必须设置振幅调节权重因子。但另一方面，振幅调节权重会进一步放大数据信噪比的差异，所以还应合理考虑信噪比定权，使高信噪比数据在反演中具有较大的影响力。基于上述分析，本文联合 CPS 与 CAP 的加权方案，将信噪比权重项 $wt1$ 与振幅调节权重因子 $wt2$ 的乘积设为最终的权重因子 wt 。

wt 对反演具有决定性影响，CPS 方法将其设为与震中距负相关的信噪比权重因子，对质量不同的数据给予不同权重，Zhu 等 (Zhu and Helmberger, 1996) 的 CAP 方法则令 wt 为与震中距正相关的振幅调节权重因子，振幅调节的作用是当有振幅差异较大的多道波形参与反演时，防止强振幅的波形对反演具有决定性作用，使不同振幅的震相对反演具有相当的贡献。所以当有大量有振幅差异的波形数据参与反演时，为充分利用各道波形的信息约束反演结果必须考虑振幅调节权重因子，但振幅调节因子会进一步放大数据质量的差异，所以还应考虑信噪比权重因子。综上分析，本文综合 CPS 与 CAP 的加权思想，将信噪比加权项 $wt1$ 与振幅调节权重因子 $wt2$ 的乘积作为最终的权重因子 wt 。

CPS 和 CAP 的权重均用震中距的函数进行计算定值，这主要考虑到地震波有衰减和几何扩散效应，随着震中距增大波形的振幅会减小，从而数据信噪比也降低。但实例计算发现简单的函数难以精确描述波形振幅或信噪比与震中距的关系，本文以 2013 年芦山地震未经滤波处理的远场地震波数据为例，计算分析信噪比及振幅随震中距变化的情况。首先假设 P 波之前的噪声数据为该台站观测数据的噪声平均样本，并设其为高斯白噪声，我们分别用观测波形的标准差 (WaveStd) 和噪声的标准差 (NoiseStd) 来衡量其振幅强度，并用比值 (NoiseStd/WaveStd) 评估数据的相对误差。计算得到波形相对误差随震中距变化的关系如图 2.2(a) 所示，可以看到相对误差随震中距变化比较散乱。为了使图像更直观展示相对误差随震中距的变化趋势，图 2.2(c) 对图 2.2(a) 中数据点进行最小二乘线性回归分析，将数据点进行连线并用虚线表示其回归直线，可以发现相对误差随着震中距增大而明显增加，表明信噪比确实随着震中距增大而降低。另一方面，如图 2.2(d) 所示，地震波传播的几何扩散效应导致波形振幅强度随着震中距增大逐渐降低。

虽然上述的线性回归分析表明震中距与波形的信噪比或者振幅存在一定负相关性，但从图 2.2(c) 和 (d) 中也明显看到相对误差和波形振幅强度随着震中距单调趋势变化过程中均有着不可忽视的波动性，导致它们与震中距的关系难以用简单的初等函

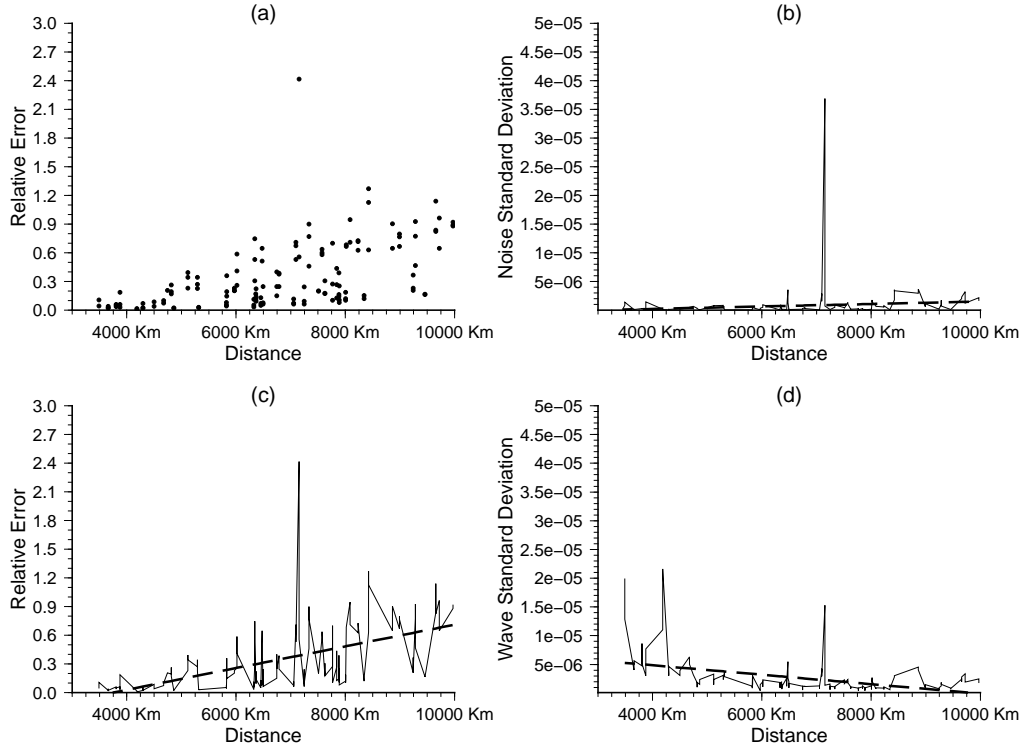


图 2.2: (a) 不同震中距相对误差的分布, (b)(c)(d) 分别为噪声、相对误差及波形振幅与震中距关系及统计回归线 (虚线)

数进行描述。这主要是因为波形振幅不仅仅由震中距完全决定, 地下浅层结构的复杂性等因素也会对振幅造成难以估计的影响, 所以尽管图2.2(b) 所示的随机噪声强度随震中距变化一直较平稳, 但是作为波形噪声与振幅比值的相对误差却如图2.2(c) 所示有很大的波动性。综上分析, 通过震中距的函数计算得到的信噪比或振幅调节权重因子是粗糙的, 此外函数的具体确定也有较强主观性, 如 Zhu 等使用的振幅调节因子中的 $r_{0,p}$ 参数的赋值可能因人而异。鉴于以上原因, 本文舍弃用震中距表示权重的方法, 而利用每道波形本身的数据信息直接进行针对性定权, 对数据处理后的每道波形, 用前文标准差比值的方法评估相对误差 $RelativeError$, 并设 $|1 - RelativeError|$ 为信噪比权重因子 $wt1$, 用波形的 L2 范数 $L2norm$ 估计平均振幅, 并构造表达式 $1/L2norm$ 作为振幅调节权重因子 $wt2$, 最终权重 wt 即定为 $(1 - NoiseStd/WaveStd)/L2norm$ 。

2.4 误差评定

实际工作中利用随机样本分析总体的统计学原理, 主要分为三步。

1 数据噪声评估: 首先假定在台站接收特定地震事件波形的那一小段时间, 台站附近的噪声是相对稳定的, 且仪器接收到的噪声序列为高斯白噪声, 通过对地震波到

达该台站前所记录的噪声序列样本进行参数估计，便能得到各台站数据噪声的概率分布函数 $F(x)$ ；2 模拟数据样本：利用数据噪声的分布函数 $F(x)$ 可模拟出 N 个随机噪声样本 $NOISE1, NOISE2 \dots NOISEN$ ，任一个噪声样本 $NOISE_i (i=1,2,3 \dots N)$ 中均包含有对应于各观测台站的随机噪声，将 $NOISE_i (i=1,2,3 \dots N)$ 分别加回到原始数据样本 $DATA0$ ，便生成了包含合理随机噪声的 N 个数据样本 $DATA1, DATA2 \dots DATAN$ ；3 震源机制误差估计：利用每个数据样本 $DATA_i (i=1,2,3 \dots N)$ 分别独立进行震源机制反演，可以得到误差范围内随机分布的多个震源机制 $M1, M2 \dots MN$ ，所有 $M_i (i=1,2,3 \dots N)$ 组成了一个解集样本 $MECH$ 。当样本 $MECH$ 容量 N 足够大，且包含的震源机制随机性足够好时，由统计学原理可知，样本 $MECH$ 的分布可以表征原问题中震源机制的误差情况。

第三章 理论实验

这是的示例文档，基本上覆盖了模板中所有格式的设置。建议大家在使用模板之前，除了阅读《用户手册》，这个示例文档也最好能看一看。

小老鼠偷吃热凉粉；短长虫环绕矮高粱。¹

3.1 封面相关

封面的例子请参看 `cover.tex`。主要符号表参看 `denation.tex`，附录和个人简历分别参看 `appendix01.tex` 和 `resume.tex`。里面的命令都非常简单，一看即会。²

3.2 字体命令

苏轼 (1037-1101)，北宋文学家、书画家。字子瞻，号东坡居士，眉州眉山（今属四川）人。苏洵子。嘉佑进士。神宗时曾任祠部员外郎，因反对王安石新法而求外职，任杭州通判，知密州、徐州、湖州。后以作诗“谤讟朝廷”罪贬黄州。哲宗时任翰林学士，曾出知杭州、颖州等，官至礼部尚书。后又贬谪惠州、儋州。北还后第二年病死常州。南宋时追谥文忠。与父洵弟辙，合称“三苏”。在政治上属于旧党，但也有改革弊政的要求。其文汪洋恣肆，明白畅达，为“唐宋八大家”之一。其诗清新豪健，善用夸张比喻，在艺术表现方面独具风格。少数诗篇也能反映民间疾苦，指责统治者的奢侈骄纵。词开豪放一派，对后代很有影响。《念奴娇·赤壁怀古》、《水调歌头·丙辰中秋》传诵甚广。

坡仙擅长行书、楷书，取法李邕、徐浩、颜真卿、杨凝式，而能自创新意。用笔丰腴跌宕，有天真烂漫之趣。与蔡襄、黄庭坚、米芾并称“宋四家”。能画竹，学文同，也喜作枯木怪石。论画主张“神似”，认为“论画以形似，见与儿童邻”；高度评价“诗中有画，画中有诗”的艺术造诣。诗文有《东坡七集》等。存世书迹有《答谢民师论文

¹韩愈 (768-824)，字退之，河南河阳（今河南孟县）人，自称郡望昌黎，世称韩昌黎。幼孤贫刻苦好学，德宗贞元八年进士。曾任监察御史，因上疏请免关中赋役，贬为阳山县令。后随宰相裴度平定淮西迁刑部侍郎，又因上表谏迎佛骨，贬潮州刺史。做过吏部侍郎，死谥文公，故世称韩吏部、韩文公。是唐代古文运动领袖，与柳宗元合称韩柳。诗力求险怪新奇，雄浑重气势。

²你说还是看不懂？怎么会呢？

帖》、《祭黄几道文》、《前赤壁赋》、《黄州寒食诗帖》等。画迹有《枯木怪石图》、《竹石图》等。

易与天地准，故能弥纶天地之道。仰以观於天文，俯以察於地理，是故知幽明之故。原始反终，故知死生之说。精气为物，游魂为变，是故知鬼神之情状。与天地相似，故不违。知周乎万物，而道济天下，故不过。旁行而不流，乐天知命，故不忧。安土敦乎仁，故能爱。范围天地之化而不过，曲成万物而不遗，通乎昼夜之道而知，故神无方而易无体。

履而泰，然后安，故受之以泰；泰者通也。物不可以终通，故受之以否。物不可以终否，故受之以同人。与人同者，物必归焉，故受之以大有。有大者不可以盈，故受之以谦。有大而能谦，必豫，故受之以豫。豫必有随，故受之以随。以喜随人者，必有事，故受之以蛊；蛊者事也。

有无妄然后可畜，故受之以大畜。物畜然后可养，故受之以颐；颐者养也。不养则不可动，故受之以大过。物不可以终过，故受之以坎；坎者陷也。陷必有所丽，故受之以离；离者丽也。

3.3 表格样本

3.3.1 基本表格

模板中关于表格的宏包有三个：`booktabs`、`array` 和 `longtabular`，命令有一个 `\hlinewd`。三线表可以用 `booktabs` 提供的 `\toprule`、`\midrule` 和 `\bottomrule`。它们与 `longtable` 能很好的配合使用。如果表格比较简单的话可以直接用命令 `\hlinewd{xpt}` 控制。

首先来看一个最简单的表格。表 5.1 列举了本模板主要文件及其功能。请大家注意三线表中各条线对应的命令。这个例子还展示了如何在表格中正确使用脚注。由于 \LaTeX 本身不支持在表格中使用 `\footnote`，所以我们不得不将表格放在小页中，而且最好将表格的宽度设置为小页的宽度，这样脚注看起来才更美观。

3.3.2 复杂表格

我们经常会在表格下方标注数据来源，或者对表格里面的条目进行解释。前面的脚注是一种不错的方法，如果你不喜欢脚注。那么完全可以在表格后面自己写注释，比如表 5.2。

此外，表 5.2 同时还演示了另外两个功能：1) 通过 `tabularx` 的 `|X|` 扩展实现表格自动放大；2) 通过命令 `\diagbox` 在表头部分插入反斜线。

表 3.1: 模板文件。如果表格的标题很长，那么在表格索引中就会很不美观，所以要像 *chapter* 那样在前面用中括号写一个简短的标题。这个标题会出现在索引中。

文件名	描述
thuthesis.ins	L ^A T _E X 安装文件，docstrip ^a
thuthesis.dtx	所有的一切都在这里面 ^b 。
thuthesis.cls	模板类文件。
thuthesis.cfg	模板配置文。cls 和 cfg 由前两个文件生成。
thubib.bst	参考文献 Bibtex 样式文件。
thutils.sty	常用的包和命令写在这里，减轻主文件的负担。

^a表格中的脚注

^b再来一个

表 3.2: 复杂表格示例 1

注：数据来源《使用手册》。

*：东部

**：西部

为了使我们的例子更接近实际情况，我会在必要的时候插入一些“无关”文字，以免太多图表同时出现，导致排版效果不太理想。第一个出场的当然是我的最爱：风流潇洒、骏马绝尘、健笔凌云的**李太白**了。

李白，字太白，陇西成纪人。凉武昭王暕九世孙。或曰山东人，或曰蜀人。白少有逸才，志气宏放，飘然有超世之心。初隐岷山，益州长史苏颋见而异之，曰：“是子天才英特，可比相如。”天宝初，至长安，往见贺知章。知章见其文，叹曰：“子谪仙人也。”言于明皇，召见金銮殿，奏颂一篇。帝赐食，亲为调羹，有诏供奉翰林。白犹与酒徒饮于市，帝坐沉香亭子，意有所感，欲得白为乐章，召入，而白已醉。左右以水颺面，稍解，援笔成文，婉丽精切。帝爱其才，数宴见。白常侍帝，醉，使高力士脱靴。力士素贵，耻之，摘其诗以激杨贵妃。帝欲官白，妃辄沮止。白自知不为亲近所容，恳求还山。帝赐金放还。乃浪迹江湖，终日沉饮。永王璘都督江陵，辟为僚佐。璘谋乱，兵败，白坐长流夜郎，会赦得还。族人阳冰为当涂令，白往依之。代宗立，以左拾遗召，而白已卒。文宗时，诏以白歌诗、裴旻剑舞、然后就是忧国忧民，诗家楷模杜工部了。杜甫，字子美，其先襄阳人，曾祖依艺为巩令，因居巩。甫天宝初应进士，不第。后献《三大礼赋》，明皇奇之，召试文章，授京兆府兵曹参军。安禄山陷京

师，肃宗即位灵武，甫自贼中遁赴行在，拜左拾遗。以论救房琯，出为华州司功参军。关辅饥乱，寓居同州同谷县，身自负薪采椽，餽糒不给。久之，召补京兆府功曹，道阻不赴。严武镇成都，奏为参谋、检校工部员外郎，赐绯。武与甫世旧，待遇甚厚。乃于成都浣花里种竹植树，枕江结庐，纵酒啸歌其中。武卒，甫无所依，乃之东蜀就高适。既至而适卒。是岁，蜀帅相攻杀，蜀大扰。甫携家避乱荆楚，扁舟下峡，未维舟而江陵亦乱。乃溯沿湘流，游衡山，寓居耒阳。卒年五十九。元和中，归葬偃师首阳山，元稹志其墓。天宝间，甫与李白齐名，时称李杜。然元稹之言曰：“李白壮浪纵恣，摆去拘束，诚亦差肩子美矣。至若铺陈终始，排比声韵，大或千言，次犹数百，词气豪迈，而风调清深，属对律切，而脱弃凡近，则李尚不能历其藩翰，况堂奥乎。”白居易亦云：“杜诗贯穿古今，尽工尽善，殆过于李。”元、白之论如此。盖其出处劳佚，喜乐悲愤，好贤恶恶，一见于诗。而又以忠君忧国、伤时念乱为本旨。读其诗可以知其世，故当时谓之“诗史”。旧集诗文共六十卷，今编诗十九卷。

表 3.3: 并排子表格

不可否认 \LaTeX 的表格功能没有想象中的那么强大，不过只要你足够认真，足够细致，那么同样可以排出来非常复杂非常漂亮的表格。请参看表 ??。

最后就是清新飘逸、文约意赅、空谷绝响的王大侠了。王维，字摩诘，河东人。工书画，与弟缙俱有俊才。开元九年，进士擢第，调太乐丞。坐累为济州司仓参军，历右拾遗、监察御史、左补阙、库部郎中，拜吏部郎中。天宝末，为给事中。安禄山陷两都，维为贼所得，服药阳喑，拘于菩提寺。禄山宴凝碧池，维潜赋诗悲悼，闻于行在。贼平，陷贼官三等定罪，特原之，责授太子中允，迁中庶子、中书舍人。复拜给事中，转尚书右丞。维以诗名盛于开元、天宝间，宁薛诸王驸马豪贵之门，无不拂席迎之。得宋之问辋川别墅，山水绝胜，与道友裴迪，浮舟往来，弹琴赋诗，啸咏终日。笃于奉佛，晚年长斋禅诵。一日，忽索笔作书数纸，别弟缙及平生亲故，舍笔而卒。赠秘书监。宝应中，代宗问缙：“朕常于诸王坐闻维乐章，今存几何？”缙集诗六卷，文四卷，表上之。敕答云，卿伯氏位列先朝，名高希代。抗行周雅，长揖楚辞。诗家者流，时论归美。克成编录，叹息良深。殷璠谓维诗词秀调雅，意新理惬。在泉成珠，著壁成绘。苏轼亦云：“维诗中有画，画中有诗也。”今编诗四卷。

要想用好论文模板还是得提前学习一些 $\text{\TeX}/\text{\LaTeX}$ 的相关知识，具备一些基本能力，掌握一些常见技巧，否则一旦遇到问题还真是比较麻烦。我们见过很多这样的同学，一直以来都是使用 Word 等字处理工具，以为 \LaTeX 模板的用法也应该类似，所以就沿袭同样的思路来对待这种所见非所得的排版工具，结果被折腾的焦头烂额，疲惫不堪。

如果您要排版的表格长度超过一页，那么推荐使用 `longtable` 或者 `supertabular`。默认的列表环境上下间距很大，模板将其重定义为 `paralist` 中的压缩环境，看起来要好一些。如果还是不满意，自己也可以调 `\itemsep` 的。`paralist` 还可以方便的指定标签的样式。

第四章 实例应用

这是的示例文档，基本上覆盖了模板中所有格式的设置。建议大家在使用模板之前，除了阅读《用户手册》，这个示例文档也最好能看一看。

小老鼠偷吃热凉粉；短长虫环绕矮高粱。¹

4.1 封面相关

封面的例子请参看 `cover.tex`。主要符号表参看 `denation.tex`，附录和个人简历分别参看 `appendix01.tex` 和 `resume.tex`。里面的命令都非常简单，一看即会。²

4.2 字体命令

苏轼 (1037-1101)，北宋文学家、书画家。字子瞻，号东坡居士，眉州眉山（今属四川）人。苏洵子。嘉佑进士。神宗时曾任祠部员外郎，因反对王安石新法而求外职，任杭州通判，知密州、徐州、湖州。后以作诗“谤讟朝廷”罪贬黄州。哲宗时任翰林学士，曾出知杭州、颖州等，官至礼部尚书。后又贬谪惠州、儋州。北还后第二年病死常州。南宋时追谥文忠。与父洵弟辙，合称“三苏”。在政治上属于旧党，但也有改革弊政的要求。其文汪洋恣肆，明白畅达，为“唐宋八大家”之一。其诗清新豪健，善用夸张比喻，在艺术表现方面独具风格。少数诗篇也能反映民间疾苦，指责统治者的奢侈骄纵。词开豪放一派，对后代很有影响。《念奴娇·赤壁怀古》、《水调歌头·丙辰中秋》传诵甚广。

坡仙擅长行书、楷书，取法李邕、徐浩、颜真卿、杨凝式，而能自创新意。用笔丰腴跌宕，有天真烂漫之趣。与蔡襄、黄庭坚、米芾并称“宋四家”。能画竹，学文同，也喜作枯木怪石。论画主张“神似”，认为“论画以形似，见与儿童邻”；高度评价“诗中有画，画中有诗”的艺术造诣。诗文有《东坡七集》等。存世书迹有《答谢民师论文

¹韩愈 (768-824)，字退之，河南河阳（今河南孟县）人，自称郡望昌黎，世称韩昌黎。幼孤贫刻苦好学，德宗贞元八年进士。曾任监察御史，因上疏请免关中赋役，贬为阳山县令。后随宰相裴度平定淮西迁刑部侍郎，又因上表谏迎佛骨，贬潮州刺史。做过吏部侍郎，死谥文公，故世称韩吏部、韩文公。是唐代古文运动领袖，与柳宗元合称韩柳。诗力求险怪新奇，雄浑重气势。

²你说还是看不懂？怎么会呢？

帖》、《祭黄几道文》、《前赤壁赋》、《黄州寒食诗帖》等。画迹有《枯木怪石图》、《竹石图》等。

易与天地准，故能弥纶天地之道。仰以观於天文，俯以察於地理，是故知幽明之故。原始反终，故知死生之说。精气为物，游魂为变，是故知鬼神之情状。与天地相似，故不违。知周乎万物，而道济天下，故不过。旁行而不流，乐天知命，故不忧。安土敦乎仁，故能爱。范围天地之化而不过，曲成万物而不遗，通乎昼夜之道而知，故神无方而易无体。

履而泰，然后安，故受之以泰；泰者通也。物不可以终通，故受之以否。物不可以终否，故受之以同人。与人同者，物必归焉，故受之以大有。有大者不可以盈，故受之以谦。有大而能谦，必豫，故受之以豫。豫必有随，故受之以随。以喜随人者，必有事，故受之以蛊；蛊者事也。

有无妄然后可畜，故受之以大畜。物畜然后可养，故受之以颐；颐者养也。不养则不可动，故受之以大过。物不可以终过，故受之以坎；坎者陷也。陷必有所丽，故受之以离；离者丽也。

4.3 表格样本

4.3.1 基本表格

模板中关于表格的宏包有三个：`booktabs`、`array` 和 `longtabular`，命令有一个 `\hlinewd`。三线表可以用 `booktabs` 提供的 `\toprule`、`\midrule` 和 `\bottomrule`。它们与 `longtable` 能很好的配合使用。如果表格比较简单的话可以直接用命令 `\hlinewd{xpt}` 控制。

首先来看一个最简单的表格。表 5.1 列举了本模板主要文件及其功能。请大家注意三线表中各条线对应的命令。这个例子还展示了如何在表格中正确使用脚注。由于 \LaTeX 本身不支持在表格中使用 `\footnote`，所以我们不得不将表格放在小页中，而且最好将表格的宽度设置为小页的宽度，这样脚注看起来才更美观。

4.3.2 复杂表格

我们经常会在表格下方标注数据来源，或者对表格里面的条目进行解释。前面的脚注是一种不错的方法，如果你不喜欢脚注。那么完全可以在表格后面自己写注释，比如表 5.2。

此外，表 5.2 同时还演示了另外两个功能：1) 通过 `tabularx` 的 `|X|` 扩展实现表格自动放大；2) 通过命令 `\diagbox` 在表头部分插入反斜线。

表 4.1: 模板文件。如果表格的标题很长，那么在表格索引中就会很不美观，所以要像 *chapter* 那样在前面用中括号写一个简短的标题。这个标题会出现在索引中。

文件名	描述
thuthesis.ins	L ^A T _E X 安装文件，docstrip ^a
thuthesis.dtx	所有的一切都在这里面 ^b 。
thuthesis.cls	模板类文件。
thuthesis.cfg	模板配置文。cls 和 cfg 由前两个文件生成。
thubib.bst	参考文献 Bibtex 样式文件。
thutils.sty	常用的包和命令写在这里，减轻主文件的负担。

^a表格中的脚注

^b再来一个

表 4.2: 复杂表格示例 1

注：数据来源《使用手册》。

*：东部

**：西部

为了使我们的例子更接近实际情况，我会在必要的时候插入一些“无关”文字，以免太多图表同时出现，导致排版效果不太理想。第一个出场的当然是我的最爱：风流潇洒、骏马绝尘、健笔凌云的**李太白**了。

李白，字太白，陇西成纪人。凉武昭王暠九世孙。或曰山东人，或曰蜀人。白少有逸才，志气宏放，飘然有超世之心。初隐岷山，益州长史苏颋见而异之，曰：“是子天才英特，可比相如。”天宝初，至长安，往见贺知章。知章见其文，叹曰：“子谪仙人也。”言于明皇，召见金銮殿，奏颂一篇。帝赐食，亲为调羹，有诏供奉翰林。白犹与酒徒饮于市，帝坐沉香亭子，意有所感，欲得白为乐章，召入，而白已醉。左右以水颺面，稍解，援笔成文，婉丽精切。帝爱其才，数宴见。白常侍帝，醉，使高力士脱靴。力士素贵，耻之，摘其诗以激杨贵妃。帝欲官白，妃辄沮止。白自知不为亲近所容，恳求还山。帝赐金放还。乃浪迹江湖，终日沉饮。永王璘都督江陵，辟为僚佐。璘谋乱，兵败，白坐长流夜郎，会赦得还。族人阳冰为当涂令，白往依之。代宗立，以左拾遗召，而白已卒。文宗时，诏以白歌诗、裴旻剑舞、然后就是忧国忧民，诗家楷模杜工部了。杜甫，字子美，其先襄阳人，曾祖依艺为巩令，因居巩。甫天宝初应进士，不第。后献《三大礼赋》，明皇奇之，召试文章，授京兆府兵曹参军。安禄山陷京

师，肃宗即位灵武，甫自贼中遁赴行在，拜左拾遗。以论救房琯，出为华州司功参军。关辅饥乱，寓居同州同谷县，身自负薪采椽，餽糒不给。久之，召补京兆府功曹，道阻不赴。严武镇成都，奏为参谋、检校工部员外郎，赐绯。武与甫世旧，待遇甚厚。乃于成都浣花里种竹植树，枕江结庐，纵酒啸歌其中。武卒，甫无所依，乃之东蜀就高适。既至而适卒。是岁，蜀帅相攻杀，蜀大扰。甫携家避乱荆楚，扁舟下峡，未维舟而江陵亦乱。乃溯沿湘流，游衡山，寓居耒阳。卒年五十九。元和中，归葬偃师首阳山，元稹志其墓。天宝间，甫与李白齐名，时称李杜。然元稹之言曰：“李白壮浪纵恣，摆去拘束，诚亦差肩子美矣。至若铺陈终始，排比声韵，大或千言，次犹数百，词气豪迈，而风调清深，属对律切，而脱弃凡近，则李尚不能历其藩翰，况堂奥乎。”白居易亦云：“杜诗贯穿古今，尽工尽善，殆过于李。”元、白之论如此。盖其出处劳佚，喜乐悲愤，好贤恶恶，一见于诗。而又以忠君忧国、伤时念乱为本旨。读其诗可以知其世，故当时谓之“诗史”。旧集诗文共六十卷，今编诗十九卷。

表 4.3: 并排子表格

不可否认 \LaTeX 的表格功能没有想象中的那么强大，不过只要你足够认真，足够细致，那么同样可以排出来非常复杂非常漂亮的表格。请参看表 ??。

最后就是清新飘逸、文约意赅、空谷绝响的王大侠了。王维，字摩诘，河东人。工书画，与弟缙俱有俊才。开元九年，进士擢第，调太乐丞。坐累为济州司仓参军，历右拾遗、监察御史、左补阙、库部郎中，拜吏部郎中。天宝末，为给事中。安禄山陷两都，维为贼所得，服药阳喑，拘于菩提寺。禄山宴凝碧池，维潜赋诗悲悼，闻于行在。贼平，陷贼官三等定罪，特原之，责授太子中允，迁中庶子、中书舍人。复拜给事中，转尚书右丞。维以诗名盛于开元、天宝间，宁薛诸王驸马豪贵之门，无不拂席迎之。得宋之问辋川别墅，山水绝胜，与道友裴迪，浮舟往来，弹琴赋诗，啸咏终日。笃于奉佛，晚年长斋禅诵。一日，忽索笔作书数纸，别弟缙及平生亲故，舍笔而卒。赠秘书监。宝应中，代宗问缙：“朕常于诸王坐闻维乐章，今存几何？”缙集诗六卷，文四卷，表上之。敕答云，卿伯氏位列先朝，名高希代。抗行周雅，长揖楚辞。诗家者流，时论归美。克成编录，叹息良深。殷璠谓维诗词秀调雅，意新理惬。在泉成珠，著壁成绘。苏轼亦云：“维诗中有画，画中有诗也。”今编诗四卷。

要想用好论文模板还是得提前学习一些 \TeX / \LaTeX 的相关知识，具备一些基本能力，掌握一些常见技巧，否则一旦遇到问题还真是比较麻烦。我们见过很多这样的同学，一直以来都是使用 Word 等字处理工具，以为 \LaTeX 模板的用法也应该类似，所以就沿袭同样的思路来对待这种所见非所得的排版工具，结果被折腾的焦头烂额，疲惫不堪。

如果您要排版的表格长度超过一页，那么推荐使用 `longtable` 或者 `supertabular`。默认的列表环境上下间距很大，模板将其重定义为 `paralist` 中的压缩环境，看起来要好一些。如果还是不满意，自己也可以调 `\itemsep` 的。`paralist` 还可以方便的指定标签的样式。

第五章 总结和展望

这是的示例文档，基本上覆盖了模板中所有格式的设置。建议大家在使用模板之前，除了阅读《用户手册》，这个示例文档也最好能看一看。

小老鼠偷吃热凉粉；短长虫环绕矮高粱。¹

5.1 封面相关

封面的例子请参看 `cover.tex`。主要符号表参看 `denation.tex`，附录和个人简历分别参看 `appendix01.tex` 和 `resume.tex`。里面的命令都非常简单，一看即会。²

5.2 字体命令

苏轼 (1037-1101)，北宋文学家、书画家。字子瞻，号东坡居士，眉州眉山（今属四川）人。苏洵子。嘉佑进士。神宗时曾任祠部员外郎，因反对王安石新法而求外职，任杭州通判，知密州、徐州、湖州。后以作诗“谤讟朝廷”罪贬黄州。哲宗时任翰林学士，曾出知杭州、颖州等，官至礼部尚书。后又贬谪惠州、儋州。北还后第二年病死常州。南宋时追谥文忠。与父洵弟辙，合称“三苏”。在政治上属于旧党，但也有改革弊政的要求。其文汪洋恣肆，明白畅达，为“唐宋八大家”之一。其诗清新豪健，善用夸张比喻，在艺术表现方面独具风格。少数诗篇也能反映民间疾苦，指责统治者的奢侈骄纵。词开豪放一派，对后代很有影响。《念奴娇·赤壁怀古》、《水调歌头·丙辰中秋》传诵甚广。

坡仙擅长行书、楷书，取法李邕、徐浩、颜真卿、杨凝式，而能自创新意。用笔丰腴跌宕，有天真烂漫之趣。与蔡襄、黄庭坚、米芾并称“宋四家”。能画竹，学文同，也喜作枯木怪石。论画主张“神似”，认为“论画以形似，见与儿童邻”；高度评价“诗中有画，画中有诗”的艺术造诣。诗文有《东坡七集》等。存世书迹有《答谢民师论文

¹韩愈 (768-824)，字退之，河南河阳（今河南孟县）人，自称郡望昌黎，世称韩昌黎。幼孤贫刻苦好学，德宗贞元八年进士。曾任监察御史，因上疏请免关中赋役，贬为阳山县令。后随宰相裴度平定淮西迁刑部侍郎，又因上表谏迎佛骨，贬潮州刺史。做过吏部侍郎，死谥文公，故世称韩吏部、韩文公。是唐代古文运动领袖，与柳宗元合称韩柳。诗力求险怪新奇，雄浑重气势。

²你说还是看不懂？怎么会呢？

帖》、《祭黄几道文》、《前赤壁赋》、《黄州寒食诗帖》等。画迹有《枯木怪石图》、《竹石图》等。

易与天地准，故能弥纶天地之道。仰以观於天文，俯以察於地理，是故知幽明之故。原始反终，故知死生之说。精气为物，游魂为变，是故知鬼神之情状。与天地相似，故不违。知周乎万物，而道济天下，故不过。旁行而不流，乐天知命，故不忧。安土敦乎仁，故能爱。范围天地之化而不过，曲成万物而不遗，通乎昼夜之道而知，故神无方而易无体。

履而泰，然后安，故受之以泰；泰者通也。物不可以终通，故受之以否。物不可以终否，故受之以同人。与人同者，物必归焉，故受之以大有。有大者不可以盈，故受之以谦。有大而能谦，必豫，故受之以豫。豫必有随，故受之以随。以喜随人者，必有事，故受之以蛊；蛊者事也。

有无妄然后可畜，故受之以大畜。物畜然后可养，故受之以颐；颐者养也。不养则不可动，故受之以大过。物不可以终过，故受之以坎；坎者陷也。陷必有所丽，故受之以离；离者丽也。

5.3 表格样本

5.3.1 基本表格

模板中关于表格的宏包有三个：`booktabs`、`array` 和 `longtabular`，命令有一个 `\hlinewd`。三线表可以用 `booktabs` 提供的 `\toprule`、`\midrule` 和 `\bottomrule`。它们与 `longtable` 能很好的配合使用。如果表格比较简单的话可以直接用命令 `\hlinewd{xpt}` 控制。

首先来看一个最简单的表格。表 5.1 列举了本模板主要文件及其功能。请大家注意三线表中各条线对应的命令。这个例子还展示了如何在表格中正确使用脚注。由于 \LaTeX 本身不支持在表格中使用 `\footnote`，所以我们不得不将表格放在小页中，而且最好将表格的宽度设置为小页的宽度，这样脚注看起来才更美观。

5.3.2 复杂表格

我们经常会在表格下方标注数据来源，或者对表格里面的条目进行解释。前面的脚注是一种不错的方法，如果你不喜欢脚注。那么完全可以在表格后面自己写注释，比如表 5.2。

此外，表 5.2 同时还演示了另外两个功能：1) 通过 `tabularx` 的 `|X|` 扩展实现表格自动放大；2) 通过命令 `\diagbox` 在表头部分插入反斜线。

表 5.1: 模板文件。如果表格的标题很长，那么在表格索引中就会很不美观，所以要像 *chapter* 那样在前面用中括号写一个简短的标题。这个标题会出现在索引中。

文件名	描述
thuthesis.ins	L ^A T _E X 安装文件，docstrip ^a
thuthesis.dtx	所有的一切都在这里面 ^b 。
thuthesis.cls	模板类文件。
thuthesis.cfg	模板配置文。cls 和 cfg 由前两个文件生成。
thubib.bst	参考文献 Bibtex 样式文件。
thutils.sty	常用的包和命令写在这里，减轻主文件的负担。

^a表格中的脚注

^b再来一个

表 5.2: 复杂表格示例 1

注：数据来源《使用手册》。

*：东部

**：西部

为了使我们的例子更接近实际情况，我会在必要的时候插入一些“无关”文字，以免太多图表同时出现，导致排版效果不太理想。第一个出场的当然是我的最爱：风流潇洒、骏马绝尘、健笔凌云的**李太白**了。

李白，字太白，陇西成纪人。凉武昭王暠九世孙。或曰山东人，或曰蜀人。白少有逸才，志气宏放，飘然有超世之心。初隐岷山，益州长史苏颋见而异之，曰：“是子天才英特，可比相如。”天宝初，至长安，往见贺知章。知章见其文，叹曰：“子谪仙人也。”言于明皇，召见金銮殿，奏颂一篇。帝赐食，亲为调羹，有诏供奉翰林。白犹与酒徒饮于市，帝坐沉香亭子，意有所感，欲得白为乐章，召入，而白已醉。左右以水颺面，稍解，援笔成文，婉丽精切。帝爱其才，数宴见。白常侍帝，醉，使高力士脱靴。力士素贵，耻之，摘其诗以激杨贵妃。帝欲官白，妃辄沮止。白自知不为亲近所容，恳求还山。帝赐金放还。乃浪迹江湖，终日沉饮。永王璘都督江陵，辟为僚佐。璘谋乱，兵败，白坐长流夜郎，会赦得还。族人阳冰为当涂令，白往依之。代宗立，以左拾遗召，而白已卒。文宗时，诏以白歌诗、裴旻剑舞、然后就是忧国忧民，诗家楷模杜工部了。杜甫，字子美，其先襄阳人，曾祖依艺为巩令，因居巩。甫天宝初应进士，不第。后献《三大礼赋》，明皇奇之，召试文章，授京兆府兵曹参军。安禄山陷京

师，肃宗即位灵武，甫自贼中遁赴行在，拜左拾遗。以论救房琯，出为华州司功参军。关辅饥乱，寓居同州同谷县，身自负薪采椽，餽糒不给。久之，召补京兆府功曹，道阻不赴。严武镇成都，奏为参谋、检校工部员外郎，赐绯。武与甫世旧，待遇甚厚。乃于成都浣花里种竹植树，枕江结庐，纵酒啸歌其中。武卒，甫无所依，乃之东蜀就高适。既至而适卒。是岁，蜀帅相攻杀，蜀大扰。甫携家避乱荆楚，扁舟下峡，未维舟而江陵亦乱。乃溯沿湘流，游衡山，寓居耒阳。卒年五十九。元和中，归葬偃师首阳山，元稹志其墓。天宝间，甫与李白齐名，时称李杜。然元稹之言曰：“李白壮浪纵恣，摆去拘束，诚亦差肩子美矣。至若铺陈终始，排比声韵，大或千言，次犹数百，词气豪迈，而风调清深，属对律切，而脱弃凡近，则李尚不能历其藩翰，况堂奥乎。”白居易亦云：“杜诗贯穿古今，尽工尽善，殆过于李。”元、白之论如此。盖其出处劳佚，喜乐悲愤，好贤恶恶，一见于诗。而又以忠君忧国、伤时念乱为本旨。读其诗可以知其世，故当时谓之“诗史”。旧集诗文共六十卷，今编诗十九卷。

表 5.3: 并排子表格

不可否认 \LaTeX 的表格功能没有想象中的那么强大，不过只要你足够认真，足够细致，那么同样可以排出来非常复杂非常漂亮的表格。请参看表 ??。

最后就是清新飘逸、文约意赅、空谷绝响的王大侠了。王维，字摩诘，河东人。工书画，与弟缙俱有俊才。开元九年，进士擢第，调太乐丞。坐累为济州司仓参军，历右拾遗、监察御史、左补阙、库部郎中，拜吏部郎中。天宝末，为给事中。安禄山陷两都，维为贼所得，服药阳喑，拘于菩提寺。禄山宴凝碧池，维潜赋诗悲悼，闻于行在。贼平，陷贼官三等定罪，特原之，责授太子中允，迁中庶子、中书舍人。复拜给事中，转尚书右丞。维以诗名盛于开元、天宝间，宁薛诸王驸马豪贵之门，无不拂席迎之。得宋之问辋川别墅，山水绝胜，与道友裴迪，浮舟往来，弹琴赋诗，啸咏终日。笃于奉佛，晚年长斋禅诵。一日，忽索笔作书数纸，别弟缙及平生亲故，舍笔而卒。赠秘书监。宝应中，代宗问缙：“朕常于诸王坐闻维乐章，今存几何？”缙集诗六卷，文四卷，表上之。敕答云，卿伯氏位列先朝，名高希代。抗行周雅，长揖楚辞。诗家者流，时论归美。克成编录，叹息良深。殷璠谓维诗词秀调雅，意新理惬。在泉成珠，著壁成绘。苏轼亦云：“维诗中有画，画中有诗也。”今编诗四卷。

要想用好论文模板还是得提前学习一些 \TeX / \LaTeX 的相关知识，具备一些基本能力，掌握一些常见技巧，否则一旦遇到问题还真是比较麻烦。我们见过很多这样的同学，一直以来都是使用 Word 等字处理工具，以为 \LaTeX 模板的用法也应该类似，所以就沿袭同样的思路来对待这种所见非所得的排版工具，结果被折腾的焦头烂额，疲惫不堪。

如果您要排版的表格长度超过一页，那么推荐使用 `longtable` 或者 `supertabular`。默认的列表环境上下间距很大，模板将其重定义为 `paralist` 中的压缩环境，看起来要好一些。如果还是不满意，自己也可以调 `\itemsep` 的。`paralist` 还可以方便的指定标签的样式。

参考文献

- Stein S, Wyssession M, 2003, Malden: Blackwell Publishing.
- Wald D J, 2005, US: US Geological Survey.
- Satake K, 2007. Tsunamis[J]. Treatise on geophysics, 4:483–511.
- King G, Devès M, 2007. Fault interaction, earthquake stress changes, and the evolution of seismicity[J]. Treatise on geophysics, 4:225–256.
- Kilb D. Fault Parameter Constraints Using Relocated Earthquakes: Implications for Stress Change Calculations[C]. In: AGU Fall Meeting Abstracts. 2001.
- Nolet G, 1990. Partitioned waveform inversion and two-dimensional structure under the network of autonomously recording seismographs[J]. Journal of Geophysical Research: Solid Earth (1978–2012), 95(B6):8499–8512.
- Manaman N S, Shomali H, Koyi H, 2011. New constraints on upper-mantle S -velocity structure and crustal thickness of the Iranian plateau using partitioned waveform inversion[J]. Geophysical Journal International, 184(1):247–267.
- Friederich W, 2003. The S-velocity structure of the East Asian mantle from inversion of shear and surface waveforms[J]. Geophysical Journal International, 153(1):88–102.
- Zielhuis A, Nolet G, 1994. Shear-wave velocity variations in the upper mantle beneath central Europe[J]. Geophysical Journal International, 117(3):695–715.
- Cao X L, Zhu J S, Zhao L F, et al, 2001. Three dimensional shear wave velocity structure of crust and upper mantle in South China Sea and its adjacent regions by surface waveform inversion[J]. Acta Seismologica Sinica, 14(2):117–128.
- Lee S v d, Nolet G, 1997. Upper mantle S velocity structure of North America[J]. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 102(B10):22815–22838.
- Zhao L S, Helmberger D V, 1994. Source estimation from broadband regional seismograms[J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 84(1):91–104.

- Zhu L, Helmberger D V, 1996. Advancement in source estimation techniques using broadband regional seismograms[J]. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 86(5):1634–1641.
- Tan Y, Zhu L, Helmberger D V, et al, 2006. Locating and modeling regional earthquakes with two stations[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth* (1978–2012), 111(B1):B01306.
- Herrmann R B, 1989, Missouri: Saint Louis University.
- Luo Y, Zhao L, Zeng X, et al, 2015. Focal mechanisms of the Lushan earthquake sequence and spatial variation of the stress field[J]. *Science China Earth Sciences*, 58(7):1148–1158.
- D’ Amico S, Cammarata L, Cangemi M, et al, 2014. Seismic moment tensors and regional stress in the area of the December 2013–January 2014, Matese earthquake sequence (Italy)[J]. *Journal of Geodynamics*, 82:118–124.
- 赵博, 高原, 黄志斌, et al, 2013. 四川芦山 Ms7.0 地震余震序列双差定位, 震源机制及应力场反演 [J]. *地球物理学报*, 56(10):3385–3395.
- Duputel Z, Rivera L, Fukahata Y, et al, 2012. Uncertainty estimations for seismic source inversions[J]. *Geophysical Journal International*, 190(2):1243–1256.
- 郑建常, 林眉, 王鹏, et al, 2015. CAP 方法反演震源机制的误差分析: 以胶东半岛两次显著中等地震为例 [J]. *地球物理学报*, 58:453–462.
- Hardebeck J L, Shearer P M, 2002. A new method for determining first-motion focal mechanisms[J]. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 92(6):2264–2276.
- Efron B, 1979. Bootstrap methods: another look at the jackknife[J]. *The annals of Statistics*, 7:1–26.
- Milne J, 1910. The California Earthquake of April 18, 1906[J]. *Nature*, 84(2128):165–166.
- 程万正, 阮祥, 张永久, 2006. 川滇次级地块震源机制解类型与一致性参数 [J]. *地震学报*, 28(6):561–573.
- Silver P G, Jordan T H, 1982. Optimal estimation of scalar seismic moment[J]. *Geophysical Journal International*, 70(3):755–787.

- Jost M u, Herrmann R, 1989. A student' s guide to and review of moment tensors[J]. Seismological Research Letters, 60(2):37–57.
- Kikuchi M, Kanamori H, 1991. Inversion of complex body waves—III[J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 81:2335–2350.
- Aki K, Richards P G, 1980, San Francisco: Freeman.
- Aki K, 1966. Generation and Propagation of G Waves from the Niigata Earthquake of June 16, 1964. : Part 2. Estimation of earthquake moment, released energy, and stress-strain drop from the G wave spectrum.[J]. 東京大学地震研究所彙報, 44:73–88.
- Ben-Menahem A, 1963. Radiation Pattern of Rayleigh Waves from a Fault of Arbitrary Dip and Direction of Motion in a Homogeneous Medium[J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 53(3):125–148.
- Haskell N, 1964. Total energy and energy spectral density of elastic wave radiation from propagating faults[J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 54(6A):1811–1841.
- Wang C, Herrmann R, 1980. A numerical study of P-, SV-, and SH-wave generation in a plane layered medium[J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 70(4):1015–1036.

致 谢

感谢你, 感谢他和她, 感谢大家.

武汉大学学位论文使用授权协议书

本学位论文作者愿意遵守武汉大学关于保存、使用学位论文的管理办法及规定,即:学校有权保存学位论文的印刷本和电子版,并提供文献检索与阅览服务;学校可以采用影印、缩印、数字化或其它复制手段保存论文;在以教学与科研服务为目的前提下,学校可以在校园网内公布部分及全部内容.

- 1、 在本论文提交当年,同意在校园网内以及中国高等教育文献保障系统 (CALIS) 高校学位论文系统提供查询及前十六页浏览服务.
- 2、 在本论文提交 ☐ 当年 / ☐ 一年 / ☐ 两年 / ☐ 三年 / ☐ 五年以后,同意在校园网内允许读者在线浏览并下载全文,学校可以为存在馆际合作关系的兄弟高校用户提供文献传递服务和交换服务.(保密论文解密后遵守此规定)

论文作者 (签名): _____

学 号: _____

学 院: _____

日期: _____ 年 _____ 月 _____ 日