

*Seismic Wave
Analysis System*

朱新运◎著 ZHU Xinyun

数字地震波 分析系统

数字地震波分析系统涵盖衰减分析、场地响应评估、地震定位、震源参数计算及S波分
等功能模块，操作简单、性能稳定。本书详细介绍了该软件的设计思路、理论原理、
现方法及资料处理过程。



ZHEJIANG UNIVERSITY PRESS

浙江大学出版社

数字地震波分析系统

朱新运 著



ZHEJIANG UNIVERSITY PRESS

浙江大学出版社

图书在版编目(CIP)数据

数字地震波分析系统 / 朱新运著. —杭州: 浙江大学出版社, 2013. 12

ISBN 978-7-308-12437-9

I. ①数… II. ①朱… III. ①数字技术—应用—地震波—波谱分析 IV. ①P315.3

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2013) 第 255673 号

数字地震波分析系统

朱新运 著

责任编辑	许佳颖
文字编辑	陈慧慧
封面设计	续设计
出版发行	浙江大学出版社 (杭州市天目山路 148 号 邮政编码 310007) (网址: http://www.zjupress.com)
排版	杭州中大图文设计有限公司
印刷	杭州杭新印务有限公司
开本	880mm×1230mm 1/32
印张	7.25
字数	195 千
版次	2013 年 12 月第 1 版 2013 年 12 月第 1 次印刷
书号	ISBN 978-7-308-12437-9
定价	30.00 元

版权所有 翻印必究 印装差错 负责调换

浙江大学出版社发行部联系方式: 0571-88925591; <http://zjdxcbbs.tmall.com>

前 言

以为基层地震工作人员开发简单适用的软件为目的,凭借作者多年的软件研制经验,得益于业内专家、学者的指导,同时采纳了软件使用者提出的建议与意见,开发完善了地震波分析系统,英文名“Seismic wave analysis system”,缩写“SWAS”。该软件功能涵盖衰减分析、场地响应评估、地震定位、震源参数计算及 S 波分裂等几个重要方面。本书为该软件系统使用说明书。

该软件系统是在 MATLAB 平台上操作的。得益于 MATLAB 强大的计算功能、种类丰富又便于应用的函数库及简洁界面设计能力,本软件系统操作简单、性能稳定,使用大量图件以展示中间过程,可视化程度高。

在软件设计过程中,作者忠实于已有成熟的地球物理模型,将行业内较为认可的参数关系设置为默认状态。比如几何扩散 r^{-n} 模型中,对体波处理时采用 $n=1$,对面波处理时采用 $n=1/2$,这样一来,即使对该理论不太熟悉的地震工作者也可以用默认参数得到在行业内认可的研究结果;对于高层次研究者,可以对不同参数进行修改、比较及验证。对于具有争议的研究议题,该软件系统也给出了数据验证的通道。比如在小震震源参数研究中,有人认可 ω^2 模型,有人认可 ω^3 模型,研究者可以在这两种模型中选择。

对可以有不同实现方式的同一数据处理过程,作者尽可能设计出所有的实现方式,让研究者自己决定采用何种方式实现该过程。比如在研究尾波衰减参数时,我们针对地震波滤波设计了高斯滤波器、切比雪夫滤波器或巴特沃斯滤波器,而且提供了对滤波器参数设



置的途径,用户可以根据自己的研究需求改变滤波器或滤波器参数。在使用 Aki 模型计算尾波衰减参数计算软件设计中,我们除设计了大家常采用的定时间窗采样的方法外,也引入了动态采样的方法,并对两种采样的优劣进行了比较。

基于虚波走时方程设计的地震定位软件,将非线性方程线性化,求解获得震源位置及虚波速度初值,之后计算初值走时残差,由走时残差的标准偏差的 2 倍计算在经度、纬度、深度及虚波速度上产生的最大误差,构造遗传种群,利用遗传算法进行二次定位,获得地震定位的最终结果,这是一种普通定位方法。该方法与其他定位方法无法比较优劣,但在地震定位看似简单却极具不确定性的问题解决方面提供了一个不同的认知角度。在谱比法基础上,利用路径衰减与台站震中距有关、而场地效应与震中距无关这一特点,实现衰减参数项与场地效应项分离,作为地球物理反演方面的尝试。我们论证了理论原理的合理性,设计了算法,研制了软件,并实例证明了软件的可用性。

全书按软件功能设置了 12 章,第 1、2、3 章分别介绍相关研究动态及地震波处理基础知识,第 12 章是辅助作图模块,其余各章每章介绍一个计算模块。介绍每个模块章节的行文风格基本一致,大致包含了算法原理、模块界面布局、控件功能及较为详细的软件操作方法等内容,部分推出时间较长且已有大量应用的模块,在相应章节还提供了应用实例。

软件开发研制工作得到中国地震局星火计划项目(41090291)、中国地震局行业专项(200808068)及浙江省人民政府社会发展计划项目(2007C33060)资助。

欢迎本行业工作者使用 SWAS 系统,对软件使用中出现的問題希望及时反馈给作者,作者将对软件使用中存在的问题及时进行修改。

朱新运

2013 年 10 月杭州

序 言

由地震波资料提取关于震源、地震波传播与衰减、地震台站场地效应、区域应力场、应变场等信息是地震研究的基础性工作,通过这些工作可以探索地震孕育、发生、发展的过程,可以以研究高分辨率确定地壳深部断层,揭示区域应力场和深部构造的特征,评估岩石中应力张量的变化,等等。因此,这些基础性工作已成为目前地震研究的热门课题。

地震波分析软件是地震波资料处理的重要工具。本书作者开发研制的地震波分析系统 SWAS 涵盖了地震波衰减、震源参数、横波分裂、地震定位以及场地效应等地震研究的重要方面,是一套系统化、可视化的地震波分析的集成系统。该系统使用方便、性能稳定,既可以用于日常数据处理,也可以用于研究工作,是一套不可多得的数字地震波形资料的处理工具。

SWAS 在计算模型选择及参数设置方面既沿用了传统的地震学经典结果,又吸纳了许多地震科学的最新研究成果。对一些地震科学界仍有争议的前沿问题,在软件研制上分别给出了处理方法。例如在小震震源参数测定中,一些专家倾向于 ω^2 震源模式,另一些专家则倾向于 ω^3 震源模式,考虑到这一情况,软件提供了可供模型选择的控件。对可以有不同实现方式的同一数据处理过程,作者尽可能设计出已有的各种实现方式,使用者可以根据研究目的自行决定采用何种方式实现该数据处理过程。

作为一门交叉学科,地震科学系统庞大、分支众多、发展迅猛,在地震资料处理方面,SWAS 自然无法穷其万一,难免挂一漏万。但



是作为数字地震波形记录的数据处理工具,该系统覆盖面广,具有较强的适用性。本书作为 SWAS 的使用说明,不仅详尽介绍了软件的使用方法,还对相关的地震科学原理有简明的介绍。我很高兴将本书及软件系统介绍给广大地震科技工作者,希望对从事日常数据处理和研究的地震工作者均有所裨益。

陈运泰

中国科学院院士
发展中国家科学院院士

2013 年 10 月

目 录

第 1 章 绪 论	(1)
1.1 概 述	(1)
1.2 软件开发过程	(3)
1.3 软件开发目标	(3)
1.4 软件实现的功能	(4)
第 2 章 软件安装及使用约定	(6)
2.1 软件使用权限约定	(6)
2.2 软件安装	(7)
第 3 章 波形文件格式转化及时间服务	(10)
3.1 引 言	(10)
3.2 功能模块	(11)
3.3 波形格式转化	(12)
3.4 时间服务模块	(18)
第 4 章 地震信号处理基础	(22)
4.1 系统基本构架	(22)
4.2 仪器响应分析	(23)
4.3 窗函数	(28)
4.4 滤波器	(36)

4.5	单段波形谱分析	(41)
第5章	基于 Brune 模型的中、小震震源参数计算	(48)
5.1	引 言	(48)
5.2	理论原理	(49)
5.3	软件设计思路及控制参数设置	(50)
5.4	软件使用说明	(52)
5.5	应用实例:珊溪水库小震震源参数研究	(60)
第6章	基于 Aki 模型尾波衰减参数计算	(71)
6.1	引 言	(71)
6.2	数据分析原理	(73)
6.3	功能控件基本介绍	(74)
6.4	数据预处理	(76)
6.5	参数及文件输入	(76)
6.6	尾波 Q 值计算过程及结果输出	(77)
6.7	相关控制参数默认值问题	(81)
6.8	数据计算小结	(98)
6.9	区域性衰减参数分析	(99)
6.10	应用实例:宁夏区域尾波 Q_c 值研究	(102)
第7章	基于 Sato 模型尾波衰减参数计算	(108)
7.1	理论方法	(108)
7.2	功能控件基本介绍	(109)
7.3	数据预处理	(111)
7.4	尾波 Q 值计算过程及结果输出	(111)
7.5	程序设计中涉及到的需要说明的问题	(116)
7.6	Q 值结果的综合分析	(119)
7.7	应用实例一:浙江珊溪水库尾波 $Q_c(f)$ 值研究	(123)



7.8	应用实例二:宁夏区域尾波 $Q_c(f)$ 值研究	(126)
第 8 章	单台叠加频谱比法求解 Lg 波尾波衰减参数	(131)
8.1	引 言	(131)
8.2	理论原理	(132)
8.3	软件基本控件介绍	(133)
8.4	软件基本操作	(136)
8.5	数据输入、输出及参数修改	(136)
8.6	过程、结果展示及输出	(136)
8.7	可用性说明	(140)
第 9 章	S 波分裂参数计算	(143)
9.1	引 言	(143)
9.2	理论方法	(144)
9.3	软件实现	(147)
9.4	软件基本操作	(148)
9.5	算 例	(154)
第 10 章	基于遗传算法的地震定位	(158)
10.1	引 言	(158)
10.2	基于虚波速度走时方程的初始解	(159)
10.3	基于遗传算法的二次解	(159)
10.4	软件设计	(161)
10.5	数据格式	(165)
10.6	应用实例:珊溪水库小震定位研究	(166)
第 11 章	基于谱比法的路径衰减与场地响应联合反演	(170)
11.1	引 言	(170)
11.2	理论与方法	(172)

11.3	软件实现.....	(176)
11.4	文件操作.....	(180)
11.5	软件控件说明.....	(185)
11.6	软件操作及过程控制.....	(195)
11.7	应用实例:首都圈台站场地响应及相应区域衰减 参数研究.....	(198)
第 12 章	辅助作图软件	(212)
12.1	三维图形.....	(212)
12.2	二维图形.....	(214)
索 引		(219)

第1章 绪 论

本章主要简述与本书相关软件的研制背景和目标、软件研制过程、软件可实现的功能。

1.1 概 述

随着数字技术在地震观测台网中的应用,从数字地震波中提取关于震源、传播衰减、台站响应、地震构造区域应力、应变场等信息已经成了开展地震基础研究,探索地震预报方法,提高抗震设防技术的基础性工作。

1991年,欧洲地震委员会在冰岛南部开辟了多国合作的多学科地震研究实验区,建立了一个微震资料获取和参数测定的SIL系统,为认识地壳运动过程提供半实时信息。在此基础上,1996年正式启动了新欧洲地震预测计划——天然实验的地震预测研究,研究内容涵盖震源机制、震源参数、场地参数、弹性与非弹性衰减、地震定位、S波分裂等。该计划科学、高分辨率解释地震孕育、发生、发展全过程,力图用准确的高分辨率勾画深部断层,揭示区域应力场和构造特征,评估岩石应力张量的变化能力等,取得了非常有意义的研究成果,成为开展地震综合研究的典范。

在国家财政支持下,我国的地震监测事业得到了长足发展,始于20世纪80年代的数字地震观测网络建设,目前已取得了巨大成功,

组建了包括国家数字地震台网、区域数字地震台网、火山数字地震台网和流动数字地震台网的新一代中国数字地震观测系统, 台站数量达到上千个。“十五”及“十一五”期间, 以烈度速报为目的的强震观测系统也得到了发展。地震观测网络的发展为地震研究积累了大量的地震数据, 处理海量地震数据需要有方便、快捷的资料分析软件。

随着地震科技的发展, 地震工作者开发了大量地震波处理软件, 用于数据回放、到时读取、震源定位、各向异性介质中理论地震图计算、矩张量反演、三维地壳速度结构反演、确定震源时间函数的正则化方法和反褶积方法、加速度曲线拟合、地震动反应谱, 等等。这些软件在数字地震学研究中发挥了很大的作用, 但大部分主要面向高层次专业研究人员, 操作繁琐, 一般的地震工作者难以掌握, 面向普通地震工作者日常应用的软件, 功能相对简单, 以低采样率、低动态范围(多为模拟记录转化波)波形分析为主, 难以适应目前广泛使用的数字地震仪器记录的高采样率、大动态范围地震波处理, 有时甚至出现计算性畸变。

处理复杂的地震数据已成为现代地震日常分析工作的一部分, 地震工作者有广泛参与的可能。这就要求复杂的地震数据处理方法及过程通过界面更友好、操作更简单的计算机软件实现。随着对地震现象认知的深入, 一些经典科学理论在计算机技术迅速发展的今天衍生出各种地震学研究及数字信号处理的方法, 可对已有的计算方法进行必要的补充、发展, 对零散的计算方法进行整合、优化、集成。

在地震工作中, 一般科研人员是地震工作者的主体, 特别是在地震台站、观测台网直接对地震波分析的人员。就目前状况而言, 科研人员除了对地震数据进行日常速报、编目之外, 很难有机会进一步掌握地震波分析技术和手段; 大部分省局的地震预报人员的主要工作也是反复进行地震目录研究, 预报手段相对单一。地震预报作为探索性的工作, 需要通过多样的技术手段来完成, 因此, 为一线地震工作人员开发适用、便捷、功能完善的地震波分析软件是一项非常有意义

义的工作;对基于海量地震数据探索地震预测预报方法,提高地震一线科研人员地震科研水平具有重要的现实意义。

因此,笔者历经数年研制了 SWAS (Seismic wave analysis system)地震波分析系统。

本书将详细介绍软件的使用说明。

1.2 软件开发过程

1998年,笔者从中学教师岗位考取中国地震局兰州地震研究所硕士研究生,师从荣代潞研究员学习地震学基本知识及地震资料处理的基本技能。2001年毕业后,在浙江省地震局从事台网资料分析及地震预测预报工作至今。2003年,加入中国地震局地震预测研究所数字地震实验室研究团队,得到陈章立、郑斯华和刘杰等老师指导,开始软件研制工作,并初次研制了基于 Sato 模型的尾波衰减计算软件。该软件研制完成即得到了数字地震实验室老师的认可,2005年,在中国地震局和人事部联合主办的“数字地震高级研修班(新疆)”进行推广。2005年考取中国地震局地球物理研究所博士研究生,师从陈运泰院士开展了大量的科研工作,进一步夯实了理论与技术功底。之后陆续开发了小震震源参数计算、S波分裂软件、场地响应与衰减联合反演及地震定位软件,并最终集成为地震波分析系统(Seismic wave analysis system, SWAS)。该软件系列被同行高度认可,已被国内多个省局应用于日常地震分析及地震科学研究中,并取得了较好的成绩。

1.3 软件开发目标

该软件系统的开发以普适性、开放性和研究性为基本要求。

普适性指可以作为普通地震工作人员解决一般的、定论性问题的数据运算工具,也可作为高层次专业研究人员的研究工具。普适性也指可处理数据格式的兼容性,可处理包括 EVT、SAC 等通用格式地震波文件,软件用户提供数据结构时,可单独提供相应二进制格式识读模块。根据地震研究最新成果设置合理的缺省功能参数,为可变的关键控制参数提供数据接口,界面设计合理、操作方便。

开放性指以世界地震学界权威地震杂志、期刊所提供的最新的地震学原理、理论为指导,不断改进处理方法,不断扩充运算功能。研究性指对一些有争议的方法同样提供方便的数据实现,供专业人员对相关方法进行论证和完善。

1.4 软件实现的功能

SWAS 从地震波研究的实际需求出发,主要设置了以下模块。

1. 波形分析基本功能

集成频谱分析、信号滤波、仪器校正、图形简单处理等地震波处理的基本功能,方便实现数据输入输出、图像存储等操作。与 SAC (Seismic Analysis Coda)、SeisGram、PITSA (Package of Interactive Tools for Seismic Analysis) 及 ARS (Analyst Review Station) 的相应功能相比较,SWAS 操作更方便,可视化程度更高。

2. 地震波衰减参数计算

用地震尾波进行的区域介质衰减研究是地震波研究的重要内容,SWAS 开发了基于 Aki 模型、Sato 模型及使用单台叠加频谱比(SSR)法计算衰减参数的计算模块。

3. 震源参数计算

在频率域,SWAS 对台站记录的地震波资料进行场地响应、仪器响应、几何扩散、非弹性及非均匀性衰减、震源辐射方向性因子校

正之后,采用 Brune 模型,获得低频极限、拐角频率等固有参数,进而根据一定的理论公式计算应力降、震源半径、地震矩等。

4. S 波分裂

SWAS 使用相关系数法,长、短轴投影比及作图法求近震 S 波体波、SKS 和 SKKS 波等分裂参数。

5. 地震波衰减参数与场地响应研究

SWAS 在谱比法基础上,根据地震波衰减对传播路径的依赖性,以及台站场地响应仅与场地台基下方介质属性相关的特点,设计了场地响应与地震波衰减联合反演方法。

6. 利用遗传算法基于虚波速度进行地震定位

基于虚波走时方程,将非线性方程线性化,求解获得震源位置及虚波速度初值,之后计算初值走时残差,根据走时残差的标准偏差的 2 倍计算经度、纬度、深度及虚波速度产生的最大误差,构造遗传种群,利用遗传算法进行二次定位,获得地震定位的最终结果。

第 2 章 软件安装及使用约定

本章主要介绍软件系统的安装、使用权限、知识产权保护,软件系统的更新及推广等相关内容。

2.1 软件使用权限约定

地震波分析系统(Seismic wave analysis system, SWAS)在 MATLAB 平台运行,软件功能涵盖衰减分析、地震定位、震源参数计算及 S 波分裂等几个重要方面。软件使用者在使用本软件进行数据处理并形成文章、报告等公开成果时,应对软件使用加以说明,或对软件开发者发表的文章进行引用(文章目录见本章参考文献)。软件已申请知识产权保护,任何用于商业目的或对软件改装、代码段落摘取等均视为侵权。由于使用本软件引起对 MATLAB 的侵权责任,与 SWAS 系统开发者无关。

根据需要,软件研制者可能对本系统进行以增加或改善功能为目的的更新和升级,本书仅介绍系统目前已有功能及使用方法,软件新增功能或改善功能可能与本书介绍不一致。用户可通过电子邮件(zhuxinyun@126.com)索取软件(或升级版)或加入 235805732 (SWAS)QQ 群下载。用户在使用中遇到的问题或建议可通过 QQ 群提交,软件开发者承诺及时答疑,根据相关合理意见及时修改软件。