

微地震监测新技术与新方法

THE NEW TECHNOLOGY AND METHOD FOR MICROSEISMIC MONITORING

宋维琪 著

 中国石化大学出版社
CHINA UNIVERSITY OF PETROLEUM PRESS

微地震监测新技术与新方法

THE NEW TECHNOLOGY AND METHOD
FOR MICROSEISMIC MONITORING

宋维琪 著

 中国石油大学出版社
CHINA UNIVERSITY OF PETROLEUM PRESS

图书在版编目(CIP)数据

微地震监测新技术与新方法/宋维琪著. —东营:
中国石油大学出版社, 2013. 2

ISBN 978-7-5636-3958-8

I. ①微… II. ①宋… III. ①地震勘探—研究 IV.
①P631.4

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2013)第 053400 号

书 名: 微地震监测新技术与新方法

作 者: 宋维琪

责任编辑: 王金丽(电话 0532—86983567)

封面设计: 悟本设计

出 版 者: 中国石油大学出版社(山东 东营 邮编 257061)

网 址: <http://www.uppbook.com.cn>

电子信箱: shiyoujiaoyu@126.com

印 刷 者: 山东临沂新华印刷物流集团有限责任公司

发 行 者: 中国石油大学出版社(电话 0532—86981532, 86983437)

开 本: 185 mm×260 mm 印张: 19.75 字数: 482 千字

版 次: 2014 年 6 月第 1 版第 1 次印刷

定 价: 85.00 元

序 一

随着油气地震勘探逐渐向第二深度空间(5 000~10 000 m)的“挺进”和页岩油气勘探对地下岩层加压微破裂事件监测的需求,近年来微地震监测这一新技术、新方法得到了迅速发展。

该书基于微地震事件信噪比较低、常规滤波方法尚难以起到理想效果的情况,分析了时域、频域不同的极化滤波方法;研究了多阶窗函数,设计了多窗谱极化滤波和自适应滤波等方法,在低信噪比情况下取得了较理想的效果。在分析微地震有效信号与压裂监测噪声的基础上,在有效信号多级检波器分布特征约束下,研发了高效微地震事件拾取方法。传统的微地震震源定位方法需要利用初至信息进行反演,为避免初至拾取对微地震数据处理流程中数据处理速度的影响,提出了利用空间扫描叠加对微地震震源进行定位的方法。

针对地面微地震浅地表干扰问题,研究了适用于地面微地震监测的静校正方法,使其静校正问题得以优化。通过模型和实际数据检验,给出了不同检波器有效信号视速度复杂变化情况下地面微地震有用信号的提取。针对地面微地震接收信号特征,提出了基于模式搜索算法的逐段迭代射线追踪方法,在对已有反演算法综合分析的基点上,改善了其收敛性和可靠性,提高了定位精度。

研究表明,通过微地震监测,可以对井下压裂范围、裂缝发育走向和尺度进行追踪、定位,以便评价压裂工程的效果。这在油田的生产开发中可提供优化设计方案,并提高油、气采收率。

作者宋维琪教授经过多年的潜心研究,以多个油田地区的压裂微地震事件监测实践为基础,并在综合研究的基础上编写了《微地震监测新技术与新方法》一书。该书的出版将会为压裂微地震监测技术及效应提供有益的指导,并希望通过该技术的推广应用能对我国在低渗储层油气勘探和开发进程中有所贡献!

中国科学院院士



2014年5月26日

内容提要

微地震监测能够监测由注水压裂、油气开采等因素引发地下应力场变化从而导致岩层开裂或错断产生的微地震信号,实现对裂缝或油藏的监测。目前国内用微地震主要对水力压裂进行监测,对流体压裂前缘进行成像,对压裂效果进行评价,以便指导下一步的生产开发,并为油藏工程的调整提供依据。

随着勘探开发任务需求的增加和微地震监测技术的不断进步和发展,对压裂微地震监测提出了新的任务要求,例如如何把微地震监测实用化,并切实解决压裂后能够快速有效、准确地解释裂缝的分布情况,进而更好地指导压裂施工。本书围绕上述问题,在以往微地震监测技术方法研究实践的基础上,详细介绍了微地震监测新技术与新方法。

本书包括两部分内容:第一部分为井中微地震压裂监测,第二部分为地面微地震监测。对于井中微地震压裂监测,在以前研究的基础上,在微地震信号的特殊处理、有效事件和震相的识别、复杂模型的射线追踪正演和反演定位方法、解释及实时监测等方面,研究了实用的新技术与新方法;对于地面微地震监测,研究了基于排列观测方式的微地震监测技术方法,包括地面微地震监测观测系统、信号特征、静校正、噪音压制、信号处理、正反演方法等。

本书中的研究方法是在理论模型论证基础上,通过大量实际资料的试算和测试,经过反复研究,逐步完善并形成的。这些研究方法适应性好,技术方法涉及的计算方法算法稳定、实际应用效果明显。

Preface(I)

With oil and gas seismic exploration expanding gradually to the second deep space (5 000~10 000 m) and more demand of underground rock pressing for microfracture event detection to explore shale oil and gas, the new technology and method of micro-seismic monitoring has developed rapidly in recent years.

According to the lower SNR of microseismic data and the unsatisfactory result of conventional filtering methods, polarization filtering methods are analyzed in different time and frequency domain, multistage window function and the methods of multistage window polarization filtering and adaptive filtering are studied, and they have achieved relatively perfect results in the low SNR. On the analysis of the micro-seismic signals effectively and fracturing monitoring noise, on the basis of the effective signal multiclass geophones distribution constraints, picking up method developed efficient micro-seismic events. The traditional micro-seismic source localization method need to use first arrival information to inverse. To avoid the influence of the collection of first arrival information on the speed of seismic data processing, put forward source localization method of superposition of spatial scanning was the seismic.

According to micro-seismic ground shallow surface interference problem, the static correction method which can be applied to the micro seismic monitoring was studied. Through the model and actual data validation, this method solve the extraction problem of useful signal from the ground micro seismic data under the complex changes of the apparent velocity of effective signal in different detector. Based on terrestrial micro-seismic characteristics of the received signal, The pattern search algorithm of piecewise iterative ray tracing method was put forward. On the basis of comprehensive analysis of existing inversion algorithm, we not only improve the convergence and reliability but also increase the positioning accuracy.

The book shows that the fracturing-range and fractures orientation and size can be effectively traced and located based on the micro-seismic monitoring. It can not only objectively evaluate the effect of fracturing engineering but also provide effective guidance for production and development of oil fields.

Based on his painstaking researches and his rich practical experience of micro-seismic monitoring in many years, the author of Song Weiqi summarized and wrote the monograph of the “micro-seismic monitoring new technologies and new methods”. The publication of the book will provide beneficial guidance for the fracturing micro-seismic monitoring technology and effect. And we hope that through the popularization and application of this technology, it can contribute to oil and gas exploration and development in the low permeability reservoir.

The academician of Chinese Academy of Sciences

Teng Jiwen

May 26, 2014

序 二

针对微地震资料信噪比较低、常规滤波方法无法起到理想效果的情况,分析了时域、频域不同的极化滤波方法,研究了多阶窗函数,设计了多窗谱极化滤波、自适应滤波等新方法,在低信噪比情况下取得了比较理想的效果。在分析微地震有效信号与压裂监测噪声的基础上,设计了以长短时窗能量比法为基础并结合偏振分析的微地震有效事件自动识别方法,并根据多级检波器之间有效信号的出现规律对识别结果进行约束。传统的微地震震源定位方法需要利用初至信息进行反演,为避免初至拾取对微地震数据处理流程中数据处理速度的影响,提出了利用空间扫描叠加对微地震震源进行定位的方法。

结合实际微地震信号,在分别讨论了网格搜索法、共轭梯度法及遗传算法等反演算法各自对微地震事件反演精度、适用性等问题后,综合考虑了上述反演算法的优缺点,提出了解域约束下的网格搜索法和遗传算法联合反演,较好地改善了反演过程对速度变化和到时初至扰动的敏感性问题,使反演过程更加稳定可靠。

针对地面微地震浅地表干扰问题,研究了适用于地面微地震监测的静校正方法;并从初至拾取、速度模型建立校正等细节问题入手,进行地面微地震静校正方法研究,成功地解决了地面微地震监测中的静校正问题。根据地面微地震的采集方式,创新性地研究了自适应F-K方法,并从方法设计、参数选取等细节方面进行了详细研究。通过模型和实际数据验证,该方法较好地解决了不同检波器有效信号视速度复杂变化情况下地面微地震资料的有用信号的提取问题。针对F-K滤波无法解决的“蚯蚓化”问题,研究了自动追踪SVD方法去除地面微地震资料中的相干噪声。该方法在自动扫描相干噪声方向和小窗口处理结合的基础上,能够有效地去除线性或双曲状相干噪声。

针对地面微地震接收信号特点,在讨论了现有逐段迭代法射线追踪算法在射线正演存在某些缺陷和问题的基础上,提出了基于模式搜索算法的逐段迭代射线追踪方法,对局部射线方程的求取进行了改善,不要求界面函数二阶可导,对射线方程直接求取最小值而不是一阶近似,适应性更强,稳定性更高;并对二维结构模型和三维结构模型进行了模型试算。

结合实际地面微地震信号,在分别讨论了单纯形替换法、差分进化算法等反演算法各自对微地震事件反演精度、适用性等问题后,综合考虑了上述反演算法的优缺点,运用基于单纯形替换的差分进化混合反演算法,较好地改善了反演过程收敛问题和较好地避免了反演所求解为局部最优解的问题,使反演结果更加稳定可靠。将基于单纯形替换的差分进化混

合反演算法成功地用于地面微地震事件的初定位、震源位置和速度结果联合反演的重新定位,减小了定位误差。

该书中所提出的技术方法新颖,理论正确合理,涵盖了微地震监测的方方面面,具有较高的理论水平和实际应用价值。该书的出版将为我国的微地震监测理论技术增添新的华章,并将为国内外压裂微地震监测提供有力指导和有益借鉴。

CNPC 物探重点实验室主任、
国家“千人计划”特聘专家



2014 年 5 月 30 日

Preface(II)

Micro-seismic data are often of low signal noise (S/N) ratio, and the use of conventional filtering methods does not yield satisfactory results. In this book, different polarization filtering methods are analyzed in time and frequency domains, and multistage window function, the methods of multistage window polarization filtering and adaptive filtering are studied, which gives rise to relatively satisfactory results in the case of low S/N ratio. Through the analysis of micro-seismic signal and hydro-fracturing noise, a method based on the long-to-short windows energy ratio and polarization analysis is developed for automatic detection of micro-seismic events. The results are further constrained by micro-seismic events detected from adjacent detectors. Note that it is often to use the first arrivals to determine the source locations of the micro-seismic events. However, first arrival picking can be time consuming. In order to avoid this, a stacking method based on spatial scanning is developed for determining source locations.

The book discussed the accuracy and applicability of different inversion methods such as grid searching method, conjugate gradient method and genetic algorithm for locating micro-seismic events using real data. After considering the pros and cons of these methods, a hybrid method combined grid-searching and genetic algorithm is proposed within the solution domain. This method reduces the sensitivity to velocity errors and first arrival perturbations, making the inversion process more stable.

The book also studied the near-surface problem during micro-seismic data processing, and developed specific static correction method for micro-seismic monitoring. This includes first break picking and velocity model updating, made good progress in solving the static problem during micro-seismic monitoring. For surface micro-seismic monitoring, an innovative self-adaptive F-K filtering method is developed, including details of how to design the work flow and select appropriate processing parameters. Verified by synthetic and field micro-seismic data, this method can extract useful signals from the noisy surface micro-seismic data even under complex changes of the apparent velocity of the micro-seismic events in different detectors. Since F-K filtering induces worm-like noise in the data, an automatic tracking SVD method is developed to remove the coherent noise in surface micro-

seismic data. Through automatically scanning the direction of the coherent noise and small window processing, this method can effectively remove the linear or hyperbolic coherent noise in the micro-seismic data.

Furthermore, the book discussed some existing defects and problems in the current piecewise-iteration ray tracing algorithm during forward modelling of surface micro-seismic monitoring. A pattern-searching based piecewise-iteration ray tracing method is presented in the book, which improves the accuracy in solving the local ray tracing equation. This method does not require the assumption of second-order differentiable interface functions, and calculates the minimum travel time directly during ray tracing rather than its first-order approximation, which is more adaptable and stable. Both 2D and 3D structural models are used to test the new method.

Last but not the least, with real surface micro-seismic data, the book discussed the simplex substitution method and the differential evolution algorithm as well as their accuracy and applicability for inverting the micro-seismic events. Again after considering the pros and cons of these methods, a hybrid method combined the simplex substitution method and the differential evolution algorithm is developed in the book. This method improves the convergences of the inversion process, and avoids the local minima during inversion, making the inversion results more stable and reliable. As a result, the simplex-substitution based hybrid inversion method with the differential evolution algorithm is successfully applied to surface micro-seismic data for initial location and relocation of micro-seismic events with focal mechanism and velocity inversion, which reduces the positioning error.

In summary, this book gives a comprehensive study of the various aspects of micro-seismic data processing, and the presented technical methods and theory are interesting and innovative with a high level of theoretical and practical values. It is in no doubt that the book adds new insights into micro-seismic monitoring, and provides good guidance and useful references for micro-seismic monitoring in China and worldwide.

The director of CNPC Key Laboratory of Geophysical,
the expert of National “Thousands of People Plan”

Li Xiangyang

May 30, 2014

前言

Foreword

本书在以往微地震资料处理方法研究基础上,针对微地震资料信噪比较低、常规滤波方法无法起到理想效果的情况,分析时域、频域不同的极化滤波方法,引入多阶窗函数,设计了多窗谱极化滤波方法,在低信噪比情况下取得了比较理想的效果。在分析微地震有效信号与压裂监测噪声的基础上,设计了以长短时窗能量比法为基础且结合偏振分析的微地震有效事件自动识别方法,并根据多级检波器之间有效信号的出现规律对识别结果进行约束。然后根据直达波的偏振特性以及微地震震源位置的先验范围,对微地震直达波的震相进行初步判断。

传统的微地震震源定位方法需要利用初至信息进行反演,为克服初至拾取对微地震数据处理流程中花费大量时间的影响,研究了利用空间扫描叠加对微地震震源进行快速定位的方法。讨论了扫描叠加的叠加准则,同时引入跟踪分量的思想,充分利用三分量能量信息,并且使方法具有较强的抗噪性能力。通过对模型数据以及实际监测资料的计算,验证了这种扫描叠加的定位方法的可靠性。

最终根据微地震裂缝的自动识别和定位结果、裂缝破裂时序以及震源的相对能量,结合地质情况对水力压裂注水前缘以及压裂裂缝分布进行了裂缝属性的解释技术研究。

通过对模型的试算以及实际资料的处理,可以表明本书中设计的自动识别以及快速定位方法能够比较准确地实现微地震实时监测。

针对井中微地震监测特点,在讨论了试射法、迭代法和弯曲法各自的优缺点后,重点研究了倾斜层状模型下的迭代法射线追踪正演,并分别利用迭代法对倾斜模型下的透射波、反射波和折射波进行了正演模拟。模拟结果用水平层状模型进行了验证分析,结果正确可靠,并且具有较高的精度和计算效率。

结合分析微地震信号的特点,在分别讨论了网格搜索法、共轭梯度法及遗传算法等反演算法各自对微地震事件反演精度、适用性等问题后,结合上述反演算法的优缺点,提出了解域约束下的网格搜索法和遗传算法联合反演,较好地改善了速度结构变化及到时初至扰动变化等对反演结果的敏感性问题,使反演结果更加稳定可靠。

针对压裂后期微地震记录中大量出现的单震相事件,通过分析影响到时时差变化的震源位置、检波器坐标位置及层间速度等因素,提出了一种利用任意两道间时差变化规律来识别微地震事件震相的理论方法。对识别出单震相P波或S波事件,利用所能得到的P波测井资料和射孔资料,形成了一套S波反演理论体系。对实际微地震事件反演,比较识别前后

的反演结果,验证单震相 S 波识别与反演理论体系。

对实际资料反演中所遇到的初至扰动以及压裂前后地层速度变化等问题进行探讨,设计了选取道加权因子、构建单值函数、选择稳定的反演算法等方法,来提高整个反演过程的稳定性。对国内某地区的实际微地震资料进行反演,结合事件的发育特点、聚散特性以及压裂地区的构造特征,分析裂缝定位的可靠性,并与 Pannical 公司的监测结果进行对比,验证整套微地震反演体系的可靠性。

地面微地震资料信噪比低,各种干扰发育特别是地表及浅地表干扰复杂,因此地面微地震资料处理和有用信号提取是地面微地震监测的关键问题。本书分析了实际地面微地震资料有用信号、噪音特点,总结了地面微地震资料中有效信号的频率和能量特征,并对噪声类型和特征进行了总结和分析,为研究处理方法奠定了基础;同时研究设计了地面微地震资料的处理流程。

针对地面微地震浅地表干扰问题,研究了适用于地面微地震监测的静校正方法;并从初至拾取、速度模型建立、校正等细节问题入手,进行地面微地震静校正方法研究,成功地解决了地面微地震监测中的静校正问题,为后续去噪处理创造了条件,并有效地提高了微地震资料的信噪比。

地面微地震资料的噪声压制是处理关键问题。根据地面微地震的采集方式,在研究了常规 F-K 滤波处理在地面微地震资料处理中的应用后,根据不同检波器有效信号视速度变化不同的特点,创新性地研究了自适应 F-K 方法,从方法设计、参数选取等细节方面进行了详细研究。该方法利用给定的速度模型和地面微地震事件发生范围的先验信息,根据不同的数据道在频率波数域找出依数据道变化的滤波区域。模型和实际数据验证表明,该方法较好地解决了不同检波器有效信号视速度复杂变化情况下地面微地震资料的有用信号的提取问题。

针对 F-K 滤波无法解决的“蚯蚓化”问题,研究了自动追踪 SVD 方法去除地面微地震资料中的相干噪声。该方法在自动扫描相干噪声方向和小窗口处理结合的基础上,能够有效去除线性或双曲状相干噪声。研究的相关判定的准则和小波分频处理使自动追踪 SVD 去噪方法在有效去除包含在数据中的相干噪声的同时能够保护有效信号信息。

余弦函数自相关法在不需要人为确定单频干扰频率、相位、振幅的情况下,利用单频干扰自相关函数仍具有单频性的特点,可以自动识别单频干扰存在,并通过在受噪声污染数据道中减去模拟出的单频噪声来达到去除地面微地震资料中工业干扰和钻井噪声等单频干扰的目的。

分频中值压制滤波方法能够自动识别出强能量噪声所出现的地震道和时间段,对微地震数据进行时变、空变的处理。

针对信噪比极低、处理后仍无法检测出的地面微地震资料弱有效信号,研究了基于波形相关叠加准则的扫描叠加检测方法。通过对实际数据的处理,成功检测出了在地面微地震资料中常规方法无法检测出的弱有效信号。

通过对模型的试算以及实际资料的处理,可以表明本书中研究的地面微地震处理方法能够有效地解决低信噪比地面微地震资料的处理问题。

针对地面微地震接收信号特点,在讨论了现有逐段迭代法射线追踪算法在射线正演存在某些缺陷和问题的基础上,提出了基于模式搜索算法的逐段迭代射线追踪方法,对局部射线方程的求取进行了改善,不要求界面函数二阶可导,对射线方程直接求取最小值而不是一

阶近似,适应性更强,稳定性更高;并对二维结构模型和三维结构模型进行了模型试算。

结合实际地面微地震信号,在分别讨论了单纯形替换法、差分进化算法等反演算法各自对微地震事件反演精度、适用性等问题后,综合考虑了上述反演算法的优缺点,运用基于单纯形替换的差分进化混合反演算法,较好地改善了反演过程收敛问题并较好地避免了反演所求解为局部最优解的问题,使反演结果更加稳定可靠。将基于单纯形替换的差分进化混合反演算法成功地用于地面微地震事件的初定位和震源位置及速度结果联合反演的重新定位,减小了定位误差。

对实际资料中的地面微地震事件反演定位,利用测井资料建立速度模型;然后利用射孔资料和强事件对初始速度模型进行校正标定;最后利用校正速度模型对地面微地震事件进行反演定位。反演定位结果与美国 Microseismic 公司的监测结果进行对比,分析了裂缝定位的可靠性,从而验证整套地面微地震反演方法的可行性。

本书分为井中微地震压裂监测和地面微地震监测技术方法两篇。第一篇共五章。第1章,介绍了井中微地震监测的记录资料的特殊处理方法。第2章,重点阐述微地震监测有效事件和震相的识别方法,针对以往识别方法存在的不足,研究了适应性更好、识别能力更强的识别方法。第3章,论述了正演模拟方法,解剖了倾斜层状模型的射线追踪正演方法,介绍了反演定位方法,详细介绍了解的评价方法。第4章,结合理论模型和实际资料,探讨了微地震监测的裂缝解释方法。第5章,概要介绍了实时微地震监测技术方法。第二篇共八章。第6章,介绍了地面微地震监测原理与资料分析。第7章,介绍了微地震资料的预处理方法。第8章,阐述了地面微地震资料有效事件的识别方法。第9章,阐述了地面微地震监测的静校正方法,探讨了基于射孔资料和信噪比较高事件资料及声波测井资料地面微地震静校正方法。第10章,论述了地面微地震资料去噪方法,具体包括随机噪音的压制方法、单频噪音的压制方法、相关噪音的压制方法等,详细讨论了自适应 F-K 滤波方法、高阶统计量方法等。第11章,介绍了地面微地震射线追踪正演方法。第12章,结合地面微地震观测方式,论述了地面微地震反演定位的方法,重点阐述了非线性反演方法。第13章,概要介绍了地面微地震监测的结果分析。

本书集中了微地震监测多年的研究成果,是师生共同智慧的结晶。本书的出版发行,得到了中国石油化工股份有限公司、中国石油天然气集团公司、中石化石油工程地球物理有限公司胜利分公司、中国石油化工股份有限公司石油物探技术研究院、中国石油化工股份有限公司胜利油田分公司物探研究院、中国石油集团川庆钻探工程有限公司地球物理勘探开发公司、中国石油集团东方地球物理有限责任公司的支持与帮助,在此表示诚挚的感谢。

由于微地震监测是一门相对研究起步较晚的方法技术,加之作者研究能力有限,因此,在许多技术方法方面还存在不足,甚至有谬误之处,敬请读者提出批评和指正。

著者

2013年3月

目 录

Contents

第一篇

井中微地震压裂监测

第 1 章	微地震信号的特殊处理方法	3
1.1	多窗谱极化滤波方法	3
1.2	改进自适应滤波方法	9
1.3	高阶矩方法	14
1.4	分形分维方法	19
1.5	独立分量方法	25
1.6	斜井微地震影响因素及校正方法	29
第 2 章	有效事件识别和震相识别	33
2.1	微地震有效事件自动识别技术	33
2.2	微地震事件的震相识别	42
第 3 章	微地震正反演方法	46
3.1	水平层状模型的微地震弹性波场正演	46
3.2	二维射线追踪正演	50
3.3	微地震反演算法	64
第 4 章	微地震解释方法	97
4.1	震源性质	97
4.2	确定震源能量 b 值方法	98
4.3	微地震属性分析与提取方法	99
4.4	裂缝解释的模糊 C 均值聚类算法	106
4.5	微地震裂缝结果分析	112

第 5 章 微地震实时监测	117
5.1 方法原理	117
5.2 理论模型验证	119
5.3 实际资料分析	128
参考文献	133

第二篇

地面微地震压裂监测

第 6 章 地面微地震监测原理与资料分析	143
6.1 地面微地震监测原理	143
6.2 地面微地震资料分析	144
第 7 章 微地震资料的预处理	152
7.1 去直流处理	152
7.2 带通滤波	153
7.3 带陷滤波	153
7.4 振幅均衡处理	154
第 8 章 微地震有效事件自动识别技术	156
8.1 自动识别理论基础	156
8.2 实际资料应用	157
第 9 章 静校正处理	159
9.1 基本思路	159
9.2 静校正方法	160
9.3 总静校正量计算	163
9.4 实际数据应用结果	164
第 10 章 地面微地震资料去噪方法研究	166
10.1 去噪基本原理	166
10.2 中值压制滤波法	167
10.3 余弦函数自相关滤波法	169
10.4 自适应 F-K 滤波法	178
10.5 自动追踪 SVD 去噪法	195
10.6 微地震卡尔曼滤波法	204

10.7	地面微地震资料弱信号提取方法	209
10.8	多次互相关滤波法	215
10.9	自适应噪声抵消法	218
10.10	倾斜叠加与倾斜中值滤波及自适应切除滤波方法	221
第 11 章	地面微地震射线追踪正演	224
11.1	射线路径计算的主要方法	224
11.2	逐段迭代射线追踪方法	225
11.3	基于模式搜索算法的逐段迭代射线追踪方法	229
第 12 章	地面微地震反演定位算法	238
12.1	残差的计算及误差统计	238
12.2	单纯形替换法	241
12.3	差分进化法	248
12.4	等效速度反演定位方法	260
12.5	贝叶斯震源定位反演	268
第 13 章	地面微地震反演实现与结果分析	275
13.1	理论模型先验信息分析与解特征研究	275
13.2	射孔资料标定分析	278
13.3	射孔信息反演速度模型	281
13.4	实际微地震事件反演	283
参考文献		289