

复杂地形条件下静校正的综合寻优

林依华¹ 张中杰¹ 尹成² 周熙襄³

1 中国科学院地质与地球物理研究所,北京 100101

2 西南石油学院物探系,四川南充 637001

3 成都理工学院物探系,成都 620061

摘要 复杂地形,特别是山地条件下地震勘探中的大静校正问题是一个非线性的、具有多参数多极值的全局优化难题. 本文综合利用最大能量法、模拟退火与遗传算法的各自优势,提出一种具有局部收敛速度快、全局搜索能力强的综合寻优反演方法. 其中对产生伪静校正量的零空间现象进行空间平滑滤波剔除. 理论数值计算及实际资料的处理说明本方法适应能力强、静校正效果较好.

关键词 山地勘探 全局寻优 静校正 零空间现象

文章编号 0001-5733(2003)01-101-06 中图分类号 P631 收稿日期 2001-12-12,2002-07-29 收修定稿.

HYBRID OPTIMIZATION OF STATIC ESTIMATION IN COMPLEX TOPOGRAPHY

LIN YIHUA¹ ZHANG ZHONGJIE¹ YIN CHENG² ZHOU XIXIANG³

1 Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China

2 Geophysical Exploration Department of Southwest Petroleum University, Nanchong 637001, China

3 Geophysical Exploration Department of Chengdu Physical and Chemical University, Chengdu 620061, China

Abstract For the areas of complex topography, especially mountain area, static is a non-linear hybrid optimization problem with the presence of multi-parameters and multi-extremes. A hybrid optimization inversion method is developed to calculate large static by integrating stack power maximization, stimulated annealing and genetic algorithms. This method has a series of advantages, such as high-speed regional convergence and efficient global searching ability. A special smooth filtering operator is used to eliminate the pseudo-static null space phenomenon. Checking with synthetic and real seismic data shows that this method is adaptable and effective to process seismic data acquired in the areas with complex tomography.

Key words Seismic prospecting in mountainous areas, Global optimization, Static, Null space.

1 引言

地震探测中,静校正的准确性极大地影响着地球内部构造的分辨率与地震波速度求取的准确度^[1~3]. 对于山地等复杂地形条件下的地震探测,静校正问题更为突出. 尽管现在发展了诸如相关

法、广义线性反演法、非线性反演法等静校正方法^[4~12],但这些尚不足以处理复杂地形条件下即大静校正量的静校正问题. 已有研究表明静校正问题是一个具有多参数、多极值的全局优化问题,一项好的静校正技术最好具备全局寻优的能力. 为此,我们期望采用模拟退火和遗传算法具有全局寻优能力和最大能量法局部收敛能力强的特性,利用叠加能

基金项目 国家自然科学基金杰出青年基金项目(49825108).

作者简介 林依华,男,1962年生,1979年毕业于西南石油学院地球物理勘探专业,2000年6月在成都理学院获博士学位,现在中国科学院地质与地球物理所博士后研究,主要从事地震勘探数字处理方面的研究. E-mail:Linyh2001@sina.com

量最大准则进行复杂地形条件下大静校正量的校正。

2 基本思路

模拟退火法(SA)是根据优化问题的求解与物体退火过程的相似性为基础,利用 Metropolis 算法,并用温度更新函数适当控制温度的下降过程实现模拟退火,从而达到全局优化的目的^[13,14]。模拟退火具有在概率指导下进行双向搜索的能力,并被证明以概率 1 收敛于全局最优,但要经过无限次的变化,且初始温度及温度更新函数不易控制,要么计算时间太长,要么陷入局部解。

遗传算法(GA)是模拟生物进化过程全局寻优搜索算法^[15~17],它简单通用,易于实现,全局搜索能力强,但局部搜索能力弱,且没有判断当前解是否达到最优解的合理准则(从而没有合理的停机准则)。

很多学者认识到在现有情况下给出关于 SA 和 GA 的控制参数选择具有普遍指导意义的定量关系式是不现实的,从而提出将 SA 和 GA 相结合形成更有效的随机搜索算法^[10,18,19]。

虽然退火遗传算法比单纯的模拟退火方法、单纯的遗传算法具有更快的收敛速度,能以更高的概率达到全局极值。但收敛速度仍然较慢,迭代次数依然较多,离实际大规模应用尚有一定距离。

最大能量法是将叠加能量作为静校正优化问题的目标函数,将炮点和检波点静校正量作为模型参数,通过对静校正量参数进行扫描,求得最大叠加能量,从而求得炮点和检波点校正量。最大能量法具有收敛速度快、局部收敛能量强的特点。显然,这 3 种方法各有利弊。基于此,我们综合这 3 种算法的各种优势,发展了新的交替式混合寻优静校正算法——综合寻优法。

模拟退火寻优算法中,某个参变量对能量函数(目标函数)的重要性,通过概率分布函数即可完全反映。因此可以利用模拟退火产生新解的办法,通过概率分布函数随机地产生该参变量的若干个候选值,每个参数均这样提取后,就可以随机地组成遗传算法群体中每个个体的初始状态,作为初始群体的候选解。

最大能量法实质上是迭代改进寻优法,在经过一定迭代次数后,将后几次不同迭代次数的局部解集合作为遗传算法的初始群体候选解。

对最大能量法和模拟退火产生的初始群体根据

目标函数大小的指导准则进行优选,确定遗传算法的初始群体。这样使得遗传算法的群体规模较小,个体针对性强,并且保持了解的广泛性和多样性,对遗传算法的搜索效率非常有利。

遗传算法同时保持若干个解,通过选择、交叉重组或变异生成新的解。遗传算法的运算一定程度上保证了解的多样性和广泛搜索的作用。但遗传算法缺乏集中搜索的机制,为了改善这个不足,对遗传算法演化解再利用最大能量法和模拟退火法的局部搜索和随机搜索的能力,强化对遗传算法演化解进行集中搜索和广泛搜索,即弥补了遗传算法缺乏局部搜索的缺陷,又增强了算法逃逸局部解的能力。

3 种搜索法的目标函数即能量函数定义为

$$E(t) = \frac{1}{2} [F(t) + H(t)]^2 \\ = \frac{1}{2} [F^2(t) + H^2(t) + 2F(t)H(t)], \quad (1)$$

其中: $F(t)$ 为数据道, $H(t)$ 为相应 CMP 叠加而得的模型道, $\frac{1}{2}$ 为静校正量。

模拟退火和遗传算法中所需要的概率值定义为:

$$P(X_m = p) = \frac{\exp\{E_m(p)/T\}}{\sum_{p=1}^N \exp\{E_m(p)/T\}}, \quad (2)$$

式中: N 为静校正未知量个数; E_m 表示时移量为 p 时的能量; T 为温度。

模拟退火中温度更新函数为

$$T_k = \left[\frac{k-1}{k} \right]^3 T_{k-1}, \quad (3)$$

式中: k 为迭代次数,起始温度 $T_0 = 0.5$,这样可保证概率分布值小于 0.1,从而满足空间搜索过程的遍历性原则。

综合全局快速寻优法的收敛能力和收敛速度都明显优于最大能量法和退火遗传算法(见表 1)。

表 1 方法效果对比表

Table 1 Comparison of the methods and effect			
方法	运算时间(s)	迭代次数	收敛能量(%)
最大能量法	5	12	41.53
退火遗传法	1270	3338	87.62
综合寻优法	27	83	96.50

3 零空间现象的处理

所谓零空间现象,即为在一定范围内炮点和(或)

检波点静校正量同时移动采样率的整倍数(上移和下移)而叠加能量不变. 而全局寻优求解静校正都是以叠加能量作为目标函数的,都存在零空间现象. 零空间现象的存在会给炮点和检波点静校正量的求取带来虚假成分,降低求取静校正量的可靠度. 全局优化求解静校正时,消除零空间现象是非常关键的. 零空间产生的根本原因在于复杂地形条件下静校正时移量很大,实际记录中存在着各种类型的噪声,同时动校正道集上存在着有剩余动校正量. 因此求出的静校正量中除了地表一致性成分的静校正分量(正确的静校正量)外,还包含有非地表一致性引起的伪静校正分量,正是由于这部分非地表一致性分量的存在,产生零空间现象. 为了消除零空间现象,拟从所求静校正量中伪静校正分量剔除入手. 下面简要介绍剔除零空间现象的空间平滑滤波法.

炮点(或检波点) i 的静校正量可表示为

$$S_i = S_{is} + S_i, \quad (4)$$

式中 S_{is} 是真正的静校正分量, S_i 是伪静校正分量. 即正确的静校正量为

$$S_{is} = S_i - S_i. \quad (5)$$

显然如果求出式中的伪静校正分量 S_i , 就可以消除零空间现象, 获得正确的静校正量.

根据剩余静校正的第二个假设条件, 即测线上炮点或检波点的剩余静校正值是随机的, 在一定范围统计均值为 0, 以炮点(或检波点) i 为中心, 在一

定空间范围内进行统计, 其均值为

$$\begin{aligned} \bar{S} &= \frac{1}{M} \sum_{j=i-M/2}^{i+M/2} (S_j) = \frac{1}{M} \sum_{j=i-M/2}^{i+M/2} (S_{js} + S_j) \\ &= \frac{1}{M} \sum_{j=i-M/2}^{i+M/2} S_j, \end{aligned} \quad (6)$$

式中 M 为空间样点数. \bar{S} 可以认为是炮点(或检波点) i 的伪静校正分量 S_i .

所以炮点(或检波点) i 的正确的静校正分量为

$$S_{is} = S_i - \bar{S} = S_i - \frac{1}{M} \sum_{j=i-M/2}^{i+M/2} S_j, \quad (7)$$

上式可以理解为空间平滑滤波处理, 空间滤波数为空间样点数 M , $S_j (j = i - M/2, \dots, i, \dots, i + M/2)$ 为滤波前的静校正量.

4 模型计算与实际应用

利用上述方法, 分别对理论模型数据与实际资料进行了试处理, 其中理论模型的相关参数为 端点共放 57 炮, 每炮 48 道接收, CMP 个数为 160, 24 次覆盖, 检波点个数为 104, 采样率为 4ms, 记录长度为 400ms. 地质模型中, 第一个界面为水平反射层, 第二个界面为起伏反射面. 图 1a 是理论模型的叠加剖面. 图 1b 为存在期望炮点和检波点静校正量的叠加剖面, 期望静校正量如图 2 所示. 由于静校正量的存在, 构造形态清楚的反射图像面目全非.

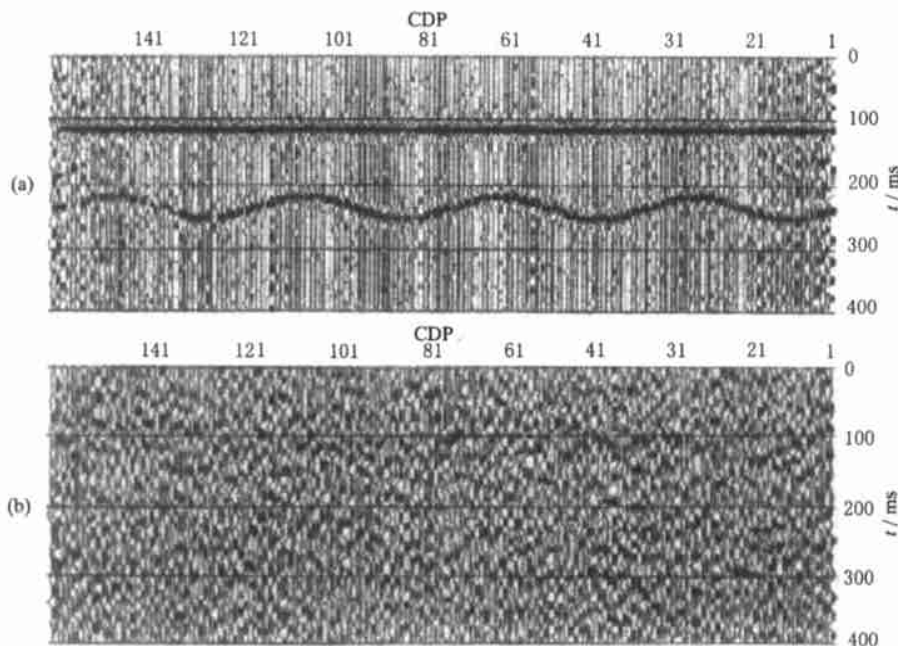


图 1 叠加剖面图

(a) 理论模型; (b) 应用期望静校正.

Fig. 1 Stack section

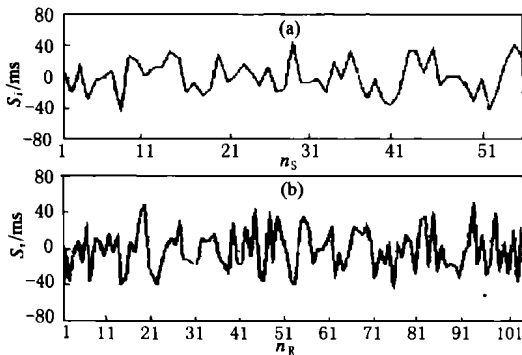


图2 期望输出的静校正量
(a) 炮点静校正量, n_s 为炮点号; (b) 检波点静校正量, n_r 为检波点号.

Fig. 2 The expected export statics

图 3a 是不加空间滤波寻优静校后的叠加剖面, 虽然反射界面得到成像, 但构造形态上存在空间上的漂移, 即零空间现象所造成的错误. 图 3b 是应用空间滤波后的叠加剖面, 构造形态、空间位置与期望叠加完全一样, 零空间现象的影响得到消除.

在搜索寻优过程中, 系统进行了多次空间滤波以去除伪静校正的影响. 图 4 是对图 1b 所示模型资料进行寻优求解静校正过程中第一次和最后一次滤掉的伪静校正分量, 粗线条表示第一次空间滤波所滤掉的伪静校正分量, 主要是低频分量. 细线条表示最后一次空间滤波所滤掉的伪静校正分量, 主要是高频分量.

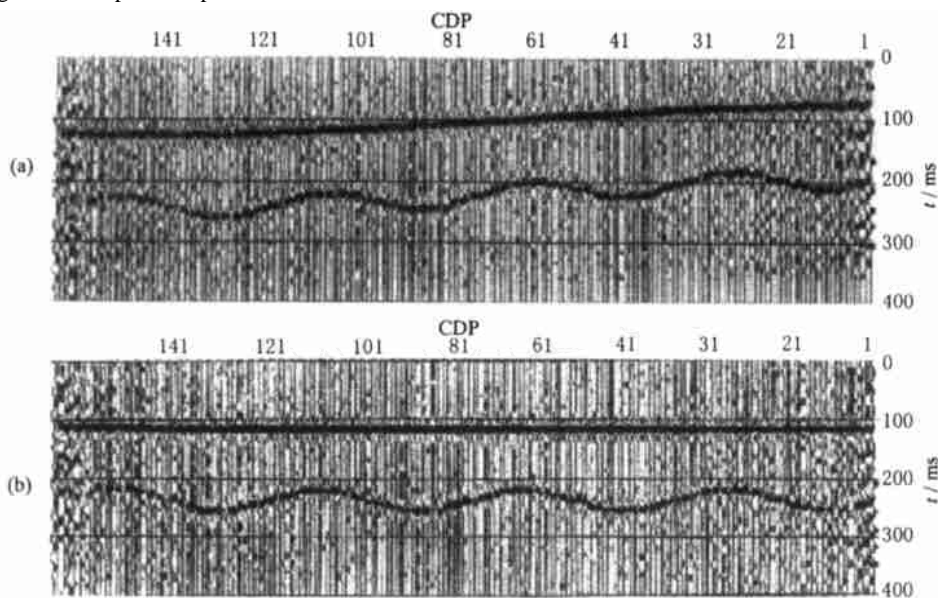


图3 叠加剖面图
(a) 常规寻优的叠加剖面; (b) 应用空间滤波后的叠加剖面.

Fig. 3 Stack section

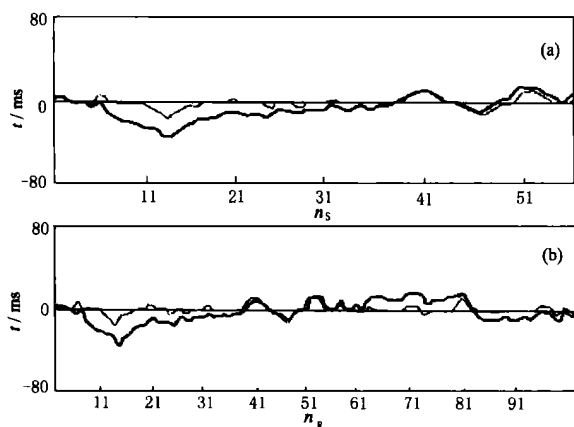


图4 滤掉的伪静校正分量
(a) 炮点静校正量; (b) 检波点静校正量.
粗线: 第一次滤掉的伪静校正分量, 细线: 最后一次滤掉的伪静校正分量.

Fig. 4 The pseudo statics component after space filtering

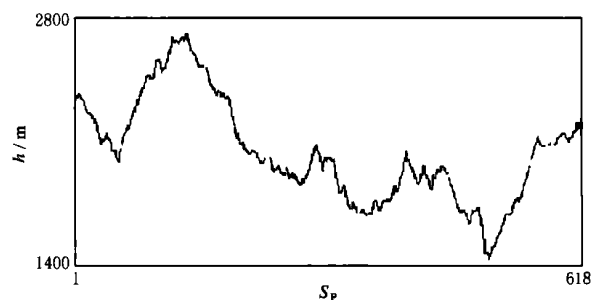


图5 云南楚雄某测线地表高程图
(h 为高度, S_p 代表测站号)

Fig. 5 The surface elevation of a line in Yun Nan Chu Xiong

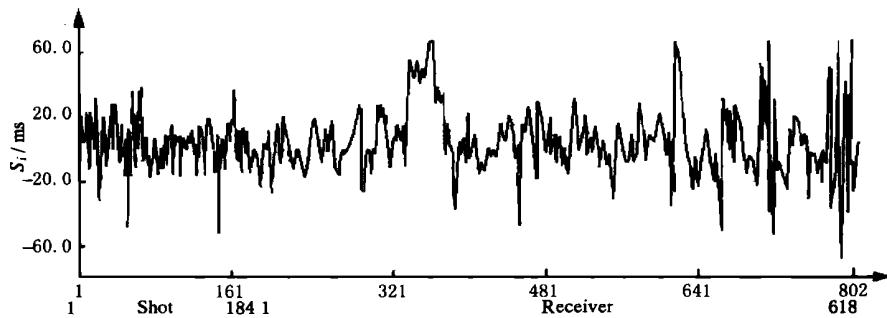


图 6 寻优求出的静校正

Fig. 6 The statics after optimization

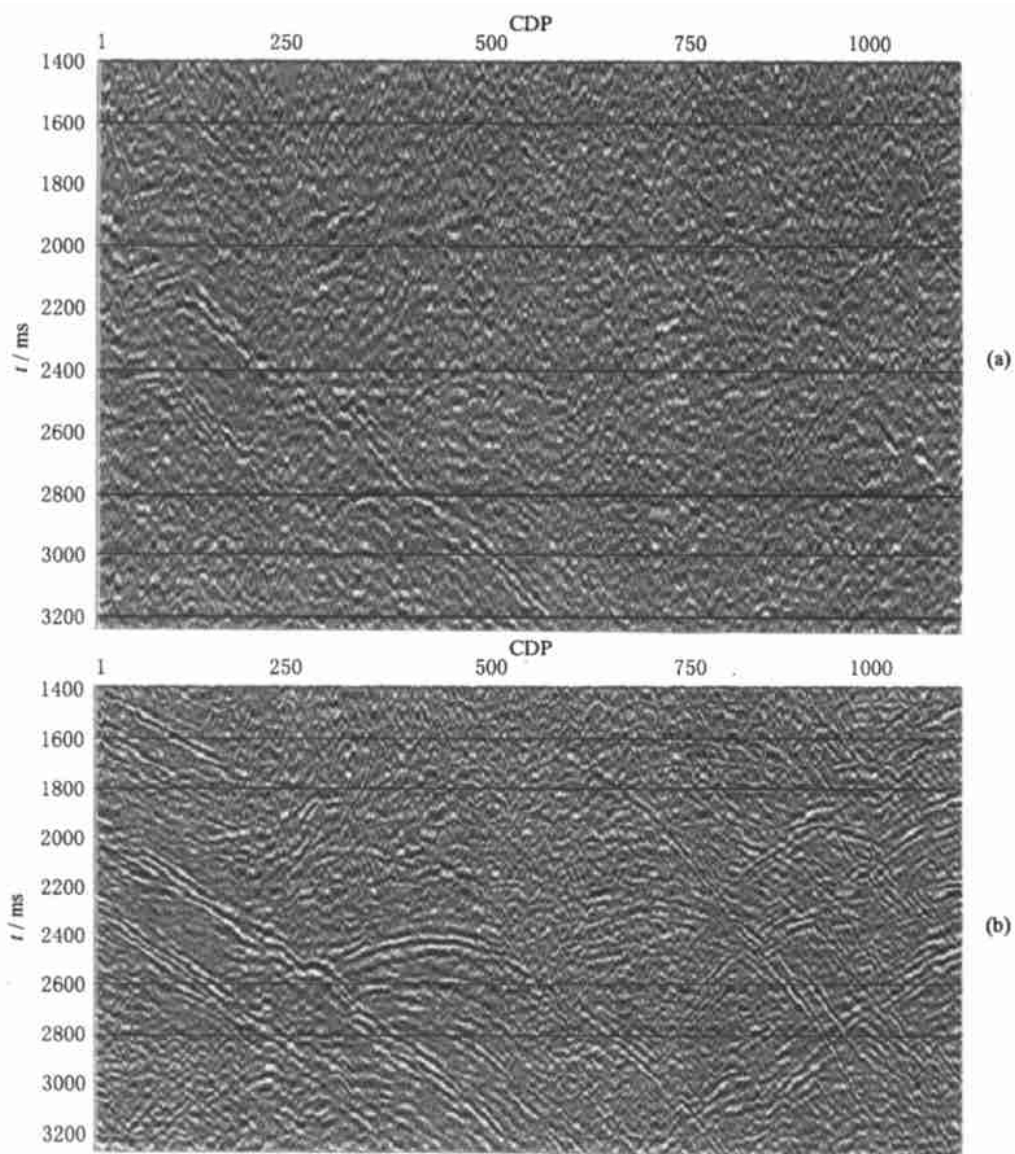


图 7 叠加剖面图

(a) 仅作高程校正的叠加剖面; (b) 综合寻优的叠加剖面.

Fig. 7 Stack section

实际资料试处理中,我们采用云南楚雄某测线地震资料. 该测线地表起伏,变化剧烈. 海拔高度最

低 1400m,最高近 2800m,相对高差 1300m,是典型的碳酸岩地貌特征(如图 5 所示)。该测线炮点数为 184,检波点数为 618,每炮接收道数为 120,采样间隔为 4ms,记录长度为 6000ms。整条测线的 CMP 数为 1136 个,由于野外观测时变观剧烈,所以 CMP 覆盖次数变化很大,从 24 到 60 不等。

我们利用本文综合全局快速寻优法处理该测线资料,处理时窗是从 1600ms 到 3200ms,时窗长度为 1600ms。图 6 是所求出的剩余静校正量,求出的最大校正量约为 ± 70 ms,这是常规剩余静校正方法根本无法求得的。图 7a 是该测线仅作高程校正的叠加剖面,除边端见到反射的影子外,其余部分一片杂乱,叠加效果不好。图 7b 是综合全局快速寻优的叠加结果,符合该区地质构造。与图 7a 比较可见,利用本文方法寻优求解静校正后,反射清楚,构造可靠,成像效果明显。

5 结 论

本文提出的综合寻优法充分利用最大能量法、模拟退火法与遗传算法的各自优点,具有快速收敛、能量有效叠加、可处理复杂地形(大静校正量)静校正的能力,同时所提出的空间平滑滤波方法具有很强的处理零空间现象的能力。模型验证与实际资料的处理结果表明本方法具有适应能力强、能快速收敛于大静校正量最优解的优点,是一项复杂地形条件下有力的静校正方法。

参考文献

- [1] 何樵登. 地震勘探原理和方法. 北京:地质出版社, 1986
HE Qiaodeng. Theory and Method of Seismic Exploration. Beijing: Geology Publishing house, 1986
- [2] 杨宝俊. 勘探地震学导论(下). 长春:吉林科技出版社, 1992
YANG Baojun. Exploration Seismology (part). Changchun: Jilin Science & Technology Publishing House, 1992
- [3] 张中杰. 多分量地震资料的各向异性处理和解释方法. 哈尔滨:黑龙江教育出版社, 2002
ZHANG Zhongjie. Anisotropy Processing and Interpretation of Multicomponent Seismic Data. Haerbin: Heilongjiang Educational Publishing House, 2002
- [4] Hileman J A, Embree P, Pflueger J C. Automated static corrections. *Geophysical Prospecting*, 1968, **16**:326 ~ 358
- [5] Wiggins R A, Lerner K L, Wisecup R D. Residual static analysis as a general linear inverse problem. *Geophysics*, 1976, **41**(5):922 ~ 938
- [6] Ronen J, Claerbout J F. Surface consistent residual statics estimation by stack-power maximization. *Geophysics*, 1985, **5**(1):2759 ~ 2767
- [7] Rothman D H. Nonlinear inversion, static mechanics and residual static estimation. *Geophysics*, 1985, **50**(12):2797 ~ 2807
- [8] Rothman D H. Automatic estimation of large residual statics correction. *Geophysics*, 1986, **51**(2):332 ~ 346
- [9] Wilson W G, Laidlaw W G, Vasudevan K. Residual statics estimation using the genetic algorithms. *Geophysics*, 1994, **59**(5):766 ~ 774
- [10] 尹成. 非线性全局最优化反演剩余静校正研究[博士论文]. 成都:成都理工学院, 1997
YIN Cheng. Study of nonlinear global optimization inversion residual statics [Doctorate thesis]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 1997
- [11] Dubose J B. Practical steps toward realizing the potential of Monte Carlo automatic statics. *Geophysics*, 1993, **58**(3):399 ~ 407
- [12] 程金星, 董敏煜, 秦顺亭等. 三种算法联合迭代反演求取最佳剩余静校正量. 地球物理学报, 1996, **39**(3):416 ~ 422
CHENG Jinxing, DONG Minyu, QIN Shunting, et al. Residual statics optimum estimation by iterative inversion of three organized algorithms. *Chinese J. Geophys.*, 1996, **39**(3):416 ~ 422
- [13] 康立山, 谢云, 龙矢勇等. 非数值并行算法. 第一册, 模拟退火算法. 北京:科学出版社, 1994
KANG Lishan, XIE Yun, LONG Shiyong, et al. Stimulated Annealing, First volume: Non-numerical Value Parallel Computing Method. Beijing: Science Press, 1994
- [14] 姚姚. 地球物理非线性反演模拟退火法的改进. 地球物理学报, 1995, **38**(5):643 ~ 650
YAO Yao. Improvement on nonlinear geophysical inversion simulated annealing. *Chinese J. Geophys.*, 1995, **38**(5):643 ~ 650
- [15] 陈国良, 王熙法, 庄镇泉等. 遗传算法及其应用. 北京:人民邮电出版社, 1996
CHEN Guoliang, WANG Xifa, ZHUANG Zhenquan, et al. Genetic Algorithm and Its Application. Beijing: People's Posts & Telecommunications Publishing House, 1996
- [16] 石耀霖. 遗传算法在地球物理反演问题中的一些应用. 地球物理学报, 1992, **35**(增):367 ~ 371
SHI Yaolin. Some application of genetic algorithm in geophysical inversion problems. *Chinese J. Geophys.*, 1992, **35**(Suppl.):367 ~ 371
- [17] 石耀霖, 金文. 面波频散反演地球内部构造的遗传算法. 地球物理学报, 1995, **38**(2):190 ~ 198
SHI Yaolin, JIN Wen. Genetic algorithms inversion of lithospheric structure from surface wave dispersion. *Chinese J. Geophys.*, 1995, **38**(2):190 ~ 198
- [18] 张讲社, 徐宗本, 梁怡. 整体退火遗传算法及其收敛充要条件. 中国科学, 1997, **27**(2):154 ~ 164
ZHANG Jianshe, XU Zongben, Liang Yi. Integrated annealing genetic algorithm and its convergence condition. *Science in China*, 1997, **27**(2):154 ~ 164
- [19] 王雪梅, 王义和. 模拟退火与遗传算法的结合. 计算机学报, 1997, **20**(4):381 ~ 384
WANG Xuemei, WANG Yihe. The combination of simulated annealing and genetic algorithms. *The Chinese Journal of Computers*, 1997, **20**(4):381 ~ 384