

分离多次波的独立分量分析法

耿建华¹, 杨学奇^{1,3}, 张敏强², 高顺莉²

(1. 同济大学 海洋地质国家重点实验室, 上海 200092; 2. 中海石油(中国)有限公司上海分公司, 上海 200030;
3. 中海石油(中国)有限公司深圳分公司, 深圳 510620)

摘要: 将独立分量分析(ICA)法与逆散射级数多次波预测法结合起来压制多次波. 用逆散射级数法预测与自由表面相关的各阶多次波, 并与原始地震记录组成多个观测量, 通过独立分量分析方法, 将与自由表面相关的多次波从原始地震记录中分离出来. 理论合成数据试验表明, 即使预测多次波与原始记录中的多次波能量不能很好匹配, ICA 法分离多次波也能取得较好的效果, 但是, 原始资料的低信噪比使得 ICA 法分离多次波具有不确定性.

关键词: 独立分量分析; 逆散射级数; 多次波预测; 多次波分离; 匹配滤波; 信噪比

中图分类号: P631

文献标志码: A

Separating Multiples by Independent Component Analysis Method

GENG Jianhua¹, YANG Xueqi^{1,3}, ZHANG Minqiang², GAO Shunli²

(1. State Key Laboratory of Marine Geology, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. China National Offshore Oil Co. Ltd., Shanghai, Shanghai 200030, China; 3. China National Offshore Oil Co. Ltd., Shenzhen, Shenzhen 510620, China)

Abstract: The independent component analysis (ICA) for separating multiples is combined with the inverse scattering series (ISS) for predicting multiples to suppress surface-related multiples. Multiples predicted by ISS and raw seismic records make up several observation components, and ICA is applied to separating multiples from the raw seismic records. Tests on synthetic data by convolution and finite-difference modeling show the advantages of ICA in multiples separation even mismatching in amplitude between the predicted multiples and raw seismic data. But there are uncertainties in multiples separation by ICA in case of low signal-to-noise ratio of raw seismic data.

Key words: independent component analysis; inverse

scattering series; multiple prediction; multiples separation; matching filter; signal-to-noise ratio

多次波衰减方法大体上可分为两类, 一类是基于信号分析的滤波方法, 另一类是基于多次波预测的减去法^[1]. 传统的滤波方法假设多次波具有周期性或一次波反射波与多次波的视速度存在差异, 当这些假设不能得到满足时, 传统的滤波方法不能取得好的效果; 基于多次波预测的减去法在压制与自由表面相关的多次波方面取得良好效果, 由于多次波预测方法已比较成熟, 如基于模型驱动的波动方程预测方法以及基于数据驱动迭代反馈法与逆散射级数法^[2-5], 这样自适应相减成为多次波预测减去法的关键环节^[6]. 预测减去法中一般基于最小二乘准则, 要求预测多次波与实际地震观测记录中的多次波在能量和相位上完全匹配, 这样才能实现完美的多次波压制^[6]. 但是实际上, 预测的多次波与实际地震观测记录中的多次波或多或少在能量和相位上不完全匹配, 例如由于鬼波、各种转换波以及散射波等干扰导致相减后反射波中仍有残留多次波或者甚至损伤了一次反射波.

独立分量分析 (independent component analysis, ICA) 是一种盲信号分离技术, 进行信号分离的目标是使分离出来的信号尽可能独立, 并假定独立成分是统计独立、非高斯分布的^[7]. Walden^[8] 根据测井资料统计分析认为, 地震记录满足统计独立和非高斯性这一要求, 所以独立分量分析法能在地震数据处理中应用. 刘喜武等^[9] 用独立分量分析法分离地震台站接收到的转换波和多次波; 为克服基于最小二乘自适应减去法压制多次波过程中能量无法很好匹配的问题, 陆文凯等^[10] 将独立分量分析法

用于多次波压制,之后又提出“几何独立分量分析法”^[11-12]. Kaplan 等^[13]也将 ICA 法用于多次波分离,在未知地震子波和存在鬼波的情况下取得了较好效果.在多次波衰减的问题中,独立分量分析法把所有一次反射波看成一个记录分量,预测的各阶多次波看成其他记录分量,原始地震记录和预测的各阶多次波组成 ICA 法的多个观测量,通过极大化负熵把一次反射波从含有多次波的原始地震记录中分离出来.

由于逆散射级数法预测多次波不仅不需要地下的速度结构信息,而且能预测出高阶多次波,这样预测的各阶多次波与原始地震记录组成多个输入观测量,满足 ICA 法分离多次波的要求.基于前人的研究工作,本文将 ICA 法与逆散射级数法预测多次波结合起来分离多次波,通过对模拟数据分析发现,当预测的多次波与原始记录上的多次波存在能量差异但没有相位差异或相位差异较小时,ICA 分离多次波的方法比匹配相减分离多次波的方法效果明显,但是,当原始地震记录的信噪比较低时,ICA 分离多次波具有不确定性.

1 方法原理

1.1 独立分量分析法

独立分量分析法考虑如下问题:假设有 n 个输出观测量 x_1, \dots, x_n ,而这些输出观测量由相互独立的输入量 s_{i1}, \dots, s_{im} ($i=1, 2, \dots, m$) 线性组合得到.在不考虑噪音干扰时,输出与输入之间可表示成:

$$x_i = a_{i1}s_{i1} + a_{i2}s_{i2} + \dots + a_{im}s_{im} \quad (1)$$

式中, $a_{i1}, a_{i2}, \dots, a_{im}$ 为输入观测量的线性组合系数.写成矩阵形式如下:

$$\mathbf{X} = \mathbf{A}\mathbf{S} \quad (2)$$

如果要从 n 个输出观测量 x_1, \dots, x_n 中分离出相互独立的输入量 s_{i1}, \dots, s_{im} ,实际上是寻找一个矩阵 \mathbf{B} 使得 $\mathbf{Y} = \mathbf{B}\mathbf{X}$,当 \mathbf{B} 为 \mathbf{A} 的逆时可以得到输入观测量 \mathbf{S} .当 \mathbf{A} 为方阵时($m=n$),可以通过求 \mathbf{A} 的逆来恢复源信号.但是对矩阵 \mathbf{A} 的构成不完全了解,分离矩阵 \mathbf{B} 需要通过估计得到.ICA 法就是通过寻找矩阵 \mathbf{B} 使得 $\mathbf{Y} = \mathbf{B}\mathbf{X}$,且 \mathbf{Y} 的各个成分尽可能独立,此时 $\mathbf{Y} = \mathbf{P}\mathbf{S}$, \mathbf{P} 表示 \mathbf{Y} 和 \mathbf{S} 有幅度和次序上的差别.

独立性可以用非高斯性来度量,这里使用负熵来度量非高斯性.分离信号 \mathbf{Y} 的负熵定义如下:

$$J(\mathbf{Y}) = H(\mathbf{Y}_G) - H(\mathbf{Y}) \quad (3)$$

其中, \mathbf{Y}_G 是 \mathbf{Y} 与有相同协方差的高斯随机向量.通过

最大化 \mathbf{Y} 的负熵来实现相互独立信号的恢复,这里采用 Hyvärinen 等^[14]对负熵的近似计算:

$$J(\mathbf{Y}) \propto [E\{G(\mathbf{Y})\} - E\{G(\mathbf{V})\}]^2 \quad (4)$$

式中: $E(\cdot)$ 表示变量的期望; \mathbf{V} 是与 \mathbf{Y} 具有相同协方差并且方差为 1、均值为零的高斯向量; $G(\cdot)$ 可以是任意的非二次函数,这里取 $G(\mathbf{Y}) = \tanh(\mathbf{Y})$.式(4)的最大化本文中采用 fastICA 固定点法^[15],这样分离矩阵表示为

$$\Delta \mathbf{u}_i \propto \frac{\partial J(\mathbf{Y}_i)}{\partial \mathbf{u}_i} = \eta E(\mathbf{Z}_g(\mathbf{u}_i^T \mathbf{Z})) \quad (5)$$

其中, $\eta = E[G(\mathbf{Y}_i)] - E[G(\mathbf{V})]$, $g(\cdot)$ 是 $G(\cdot)$ 的导数. \mathbf{Z} 由输出观测量 \mathbf{X} 经过去均值与正交化处理得到.进入稳态时 $\Delta \mathbf{u}_i = 0$,提取独立分量 $\mathbf{Y}_i = \mathbf{u}_i^T \mathbf{Z}$.在多次波压制问题中,在分离出多个独立分量(一次反射波以及各阶多次波)后,由于这些独立分量没有次序之分,因此需要提取一次反射波.

1.2 逆散射级数多次波预测算法

ICA 分离多次波法除需要含有多次波的原始地震记录作为输入观测量外,还需要有多个预测的多次波作为输入观测量.由于逆散射级数法能在不需要速度模型的情况下预测出与自由表面相关的各阶多次波,因此,本文采用逆散射级数法预测多次波.在去除鬼波后逆散射级数法预测多次波预测算法如下^[4,16-17]:

$$\mathbf{D}_n(k_g, k_s, \omega) = \frac{1}{i\pi\rho_0 \mathbf{S}(\omega)} \int_{-\infty}^{+\infty} dk_q e^{iq(z_g + z_s)} \cdot$$

$$\mathbf{D}_1(k_g, k, \omega) \mathbf{D}_{n-1}(k, k_s, \omega), n \geq 2 \quad (6)$$

式中: \mathbf{D}_1 为去除鬼波后包含多次波的原始地震记录; \mathbf{D}_n ($n \geq 2$) 为预测的与自由表面相关的各阶多次波; ρ_0 为海水的密度; $\mathbf{S}(\omega)$ 是震源子波; ω 为频率; z_s 和 z_g 分别为炮点和检波点的深度; k_g 和 k_s 分别是共检波点道集和共炮点道集的水平波数; $q = \sqrt{(\omega/c)^2 - k_x^2}$, 其中, k_x 是水平波数, c 是声波在海水中的速度.式(6)描述了共炮点道集和共检波点道集在频率-波数域中相同频率、不同空间波数对应的波场相乘累加的过程, k 表示累加步数.散射场序列是一种无穷序列,高阶序列的计算需考虑到它的稳定性和序列的收敛性.式(6)中海水密度、声波在海水中的速度,炮点、检波点的深度均已知,只有子波是未知项.在处理实际资料时,子波可从实际地震资料中提取.由于地震子波精确提取是一个很困难的问题,因此,暂不考虑子波的影响,在处理模拟数据时,采用模拟用子波.

1.3 ICA 法分离多次波的算法模型

ICA 分离多次波方法的多个输入观测量由预测

的各阶多次波和原始地震记录组成. 由于预测的多次波和原始地震记录中的多次波之间存在子波、振幅和相位差异, 因此需要进行匹配滤波才能用减法压制多次波^[6,18]. 设去除鬼波的原始地震记录为 D_1 , D_1 由一次反射波 P 和各阶多次波 M_i , $i=1, 2, \dots, n-1$ 组成:

$$D_1 = P + M_i \quad (7)$$

一般情况下, 预测的各阶多次波 D_n ($n \geq 2$) 与原始地震记录中的各阶多次波 M_i 之间存在能量与相位差异, 直接进行 $D_1 - D_n$ 无法达到压制多次波的目的. 为消除预测的多次波 D_n ($n \geq 2$) 与实际地震记录中的多次波 M_i 之间存在的相位与能量差异, 一般基于最小二乘准则构造匹配滤波器 α_n , 使得:

$$\min(E_\alpha) = \|D_1 - \alpha_n * D_n\|_2, \quad n \geq 2 \quad (8)$$

式中, “*” 表示褶积运算, 由此获得匹配滤波后预测的多次波:

$$D'_n = \alpha_n * D_n, \quad n \geq 2 \quad (9)$$

但是, 上述匹配滤波往往在能量和相位上不能同时达到最佳匹配. 若预测的多次波经过匹配滤波后与原始地震记录中的多次波已不存在相位差异, 但存在能量差异, 则 D'_n 与 M_i 之间的关系可表示为

$$D'_n = aM_i \quad n \geq 2 \quad (10)$$

式中, a 为尺度系数, 表示预测的多次波经过匹配滤波后和实际地震记录中的多次波存在的能量差异. 若用 d_1 表示原始地震数据 D_1 中得任意一道地震记录道, $d_1 = P + M_1 + M_2 + \dots + M_{n-1}$, d_n ($n \geq 2$) 表示预测的多次波 D_n ($n \geq 2$) 中的任意一个记录道, 则式(9)和(10)可写成:

$$\begin{aligned} \alpha_2 * d_2 &= a_{22}M_1 + \dots + a_{2n}M_{n-1} \\ \alpha_3 * d_3 &= a_{33}M_2 + \dots + a_{3n}M_{n-1} \\ &\vdots \\ \alpha_n * d_n &= a_{nn}M_{n-1} \end{aligned} \quad (11)$$

式(11)即为原始地震记录 d_1 与预测的各阶多次波经匹配滤波后组成 ICA 分离多次波模型. 相互独立的观测量 X 为

$$X^T = [d_1 \quad \alpha_2 * d_2 \quad \alpha_3 * d_3 \cdots \alpha_n * d_n] \quad (12)$$

而相互独立的输入量 S 为

$$S^T = [P \quad M_1 \quad M_2 \cdots M_{n-1}] \quad (13)$$

这样, 混合矩阵 A 可表示为

$$A = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & \cdots & 1 & 1 \\ 0 & a_{22} & a_{23} & \cdots & a_{2(n-1)} & a_{2n} \\ 0 & 0 & a_{33} & \cdots & a_{3(n-1)} & a_{3n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \cdots & a_{(n-1)(n-1)} & a_{(n-1)n} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & a_{nn} \end{bmatrix} \quad (14)$$

由此, 独立分量分析方法分离多次波模型写成矩阵形式可表示为 $X=AS$, 观测量 X 为原始地震记录以及预测的多次波经过匹配滤波后的记录, 独立的源信号 S 为希望获得的一次反射波以及各阶多次波. 理论上, 多次波有 n 阶, 但是为了减少计算量, 预测的多次波阶数要尽可能减少, 实践证明, 高阶多次波能量已经很弱, 一般取 3~4 阶多次波已经满足精度要求.

但是, ICA 法本身固有的问题是对分离出来成分的次序和幅度不能确定. 首先, 解决次序不确定问题是将分离出来各个独立分量与地震记录进行相关, 与地震记录相关系数最大的即是一次反射波; 其次, 虽然分离出来的信号振幅改变了, 但是其相对关系没有改变, 这在地震数据处理中是可以接受的, 造成振幅不确定的原因表示如下:

$$X = (\zeta A) \left(\frac{1}{\zeta} S \right) \quad (15)$$

式中, ζ 为系数. 由式(15)可知, 源信号振幅改变 $1/\zeta$ 后, 在混合矩阵对应的列乘以相应的互为倒数的系数 ζ , 所得观测量不变. 那么, 分离出来的一次反射波可通过调整一个比例系数恢复振幅值, 使得分离出来的一次波尽可能接近原始地震记录的振幅. 记 $Y = AS$ 为分离出来的一次波, Y 与 D_1 中的一次反射波相差的比例系数 β 为

$$\beta = \frac{D_1(\omega)Y(\omega)^*}{Y(\omega)Y(\omega)^*} \quad (16)$$

式中, 上标“*”表示复数共轭, Y 乘以 β 可得到更接近真实的振幅值.

2 理论合成数据实验

2.1 褶积模型合成数据实验

为分析问题方便, 首先使用褶积模型获得的合成记录来比较匹配滤波减法与 ICA 法分离多次波的差异, 原始地震记录和预测的多次波均采用褶积模型合成.

考虑第一种情况, 当多次波与一次波之间存在很大时差, 同时原始地震记录中多次波与一次波的能量、预测的多次波与原始地震记录中多次波的能量都具有差异. 图 1a 为利用褶积模型合成的一次波与多次波相交的地震记录, 两者旅行时差较大, 但是多次波的能量比一次波能量弱; 图 1b 是理论合成的多次波, 与图 1a 中的多次波相比没有子波、相位差异, 但在振幅能量上相差一个比例因子, 图 1b 中的多次波的振幅是图 1a 中多次波的振幅的 10 倍, 图

1c 是使用单道匹配滤波相减法获得的去除多次波后的结果,匹配滤波时窗 150 ms;图 1d 是未经匹配滤波处理直接用 ICA 分离获得的一次反射波. 比较图 1c 和图 1d 可以看出,单道匹配滤波相减法在多次波与一次反射波相交处由于能量关系没有很好匹配,相减后导致在多次波与一次相交处一次波能量损失,而 ICA 法则不受一次反射波与多次波能量差异的影响,一次反射波能量几乎没有任何损失,图 1 中箭头指示了同相轴交叉处振幅处理效果对比.

考虑第二种情况,当多次波与一次反射波时差很小,两者几乎混叠,同时原始地震记录中的多次波与一次反射波能量、预测的多次波与原始地震记录中的多次波的能量都具有差异. 图 2a 为利用褶积模型合成的包含两个一次反射波和三个多次波同相轴的地震记录(图中箭头所指同相轴为多次反射波),多次波和一次波时差很小,几乎混叠在一起,并且记录能量存在差异,各同相轴的相对振幅水平如图中数值所示;图 2b、2c 和 2d 分别为利用褶积模型合成的多次波,这些多次波分量与图 2a 中的多次波相比没有时差,但是存在振幅差异,多次波同相轴相对振幅值如图中数字所示. 由于多次波与一次反射

波几乎混叠在一起,采用分块匹配滤波法匹配滤波的时窗很难选择,这里选择统一的匹配滤波时窗长度为 300 ms;图 2e 为匹配滤波后自适应相减的结果,显然剩余多次波很明显,图中箭头指示了剩余多次波能量;图 2f 为未经匹配滤波处理但以图 2a—2d 作为输入利用 ICA 分离获得的一次反射波,可以看到多次波分离干净. 由此可以看出,当预测多次波与原始地震记录中多次波不存在相位差异但存在能量差异时,ICA 分离多次波的效果要明显好于自适应减去法.

为测试方法的抗噪能力和对低信噪比的适应性,在图 2a—2d 所示模型中均加入高斯白噪声,信噪比为 1 dB,如图 3a—3d 所示. 图 3e 为匹配滤波后自适应相减的结果,显然剩余多次波很明显,图中箭头指示的是剩余的多次波;图 3f 为以图 3a—3d 作为 ICA 输入分离获得的一次反射波,可以看到多次波分离干净. 但是,由于信噪比较低,分离出来的独立分量中多次波分量与原始地震数据相关系数可能比一次波分量与原始地震数据相关系数大,这种情况下选取相关系数最大的分量就有可能找不到一次反射波,如图 3f 方框所示,第 59 道找到了多次波分量,方法失效.

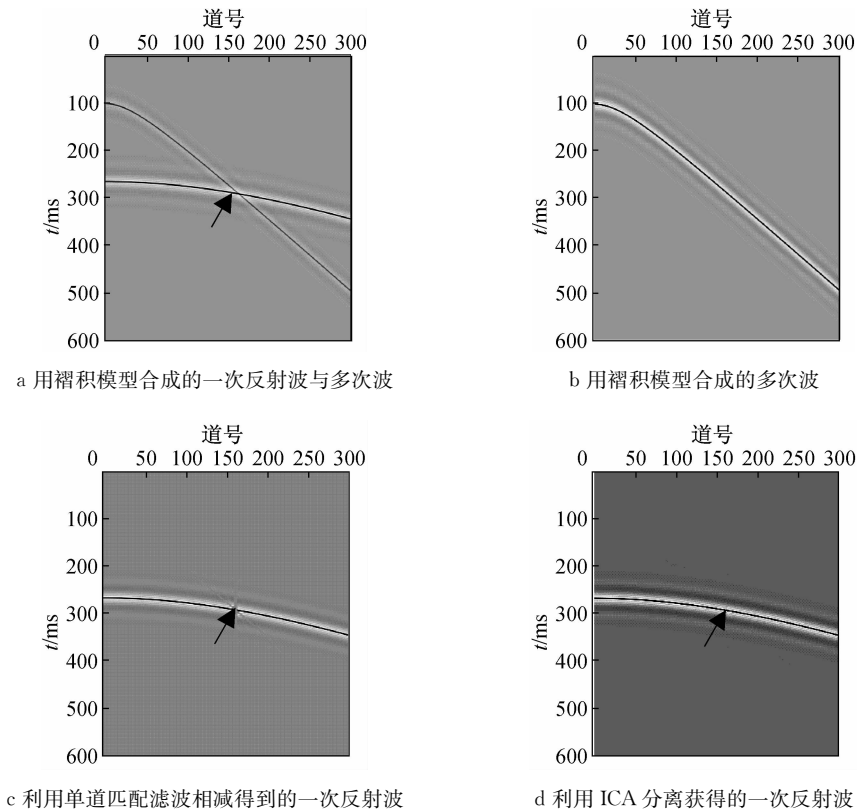


图 1 一次反射波与多次波时差很大时 ICA 与自适应相减法分离多次波对比

Fig. 1 Comparison of multiples separation by ICA and the adaptive subtraction in case the primaries and multiples have large moveout

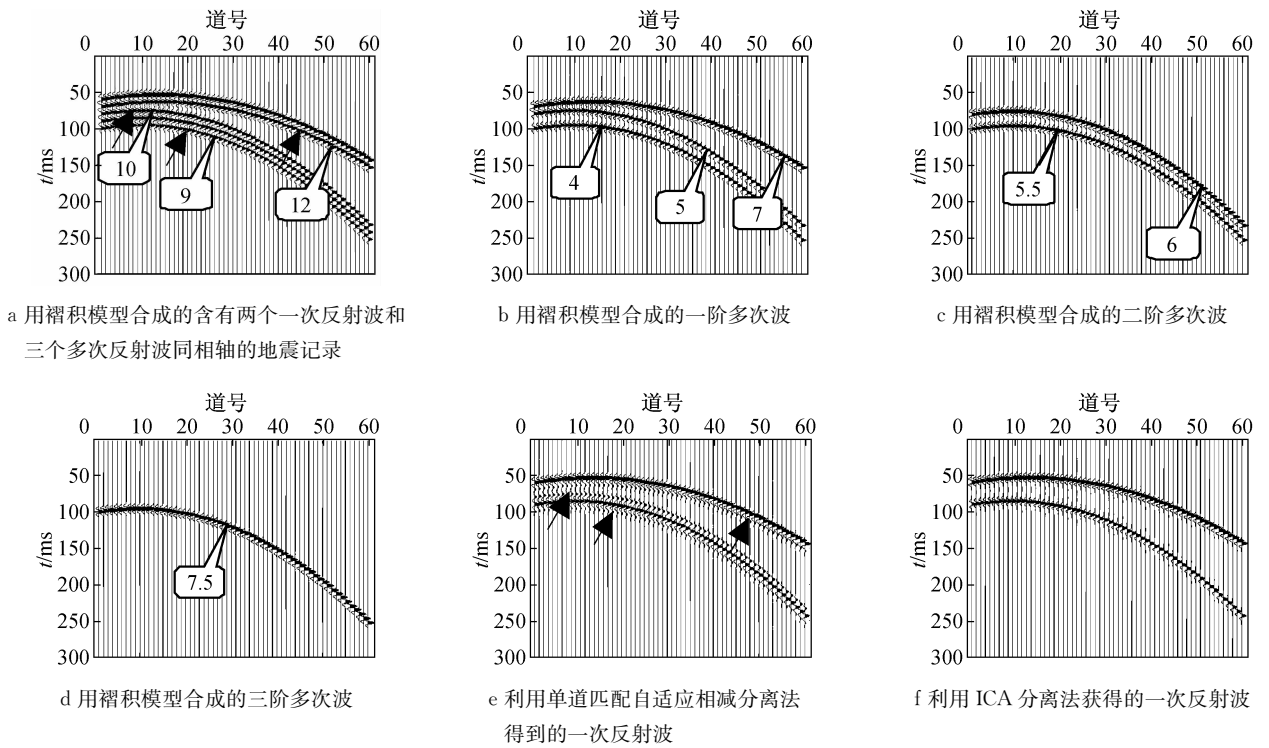


图 2 不含噪音褶积模型合成记录一次反射波与多次波同相轴时差很小但振幅存在差异时 ICA 与自适应相减法分离多次波对比

Fig.2 Comparison of multiples separation by ICA and the adaptive subtraction in case the synthetic primaries and multiples by convolution have different amplitude levels and small moveout without noise

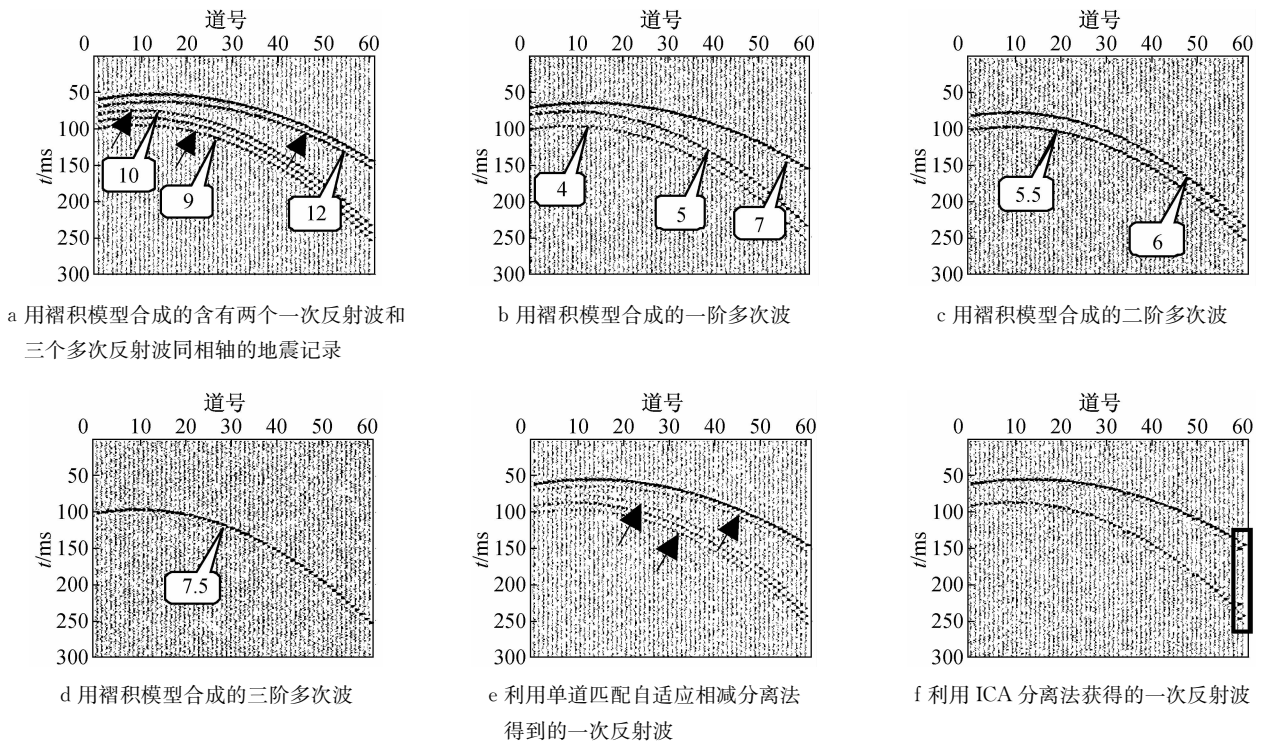


图 3 含噪音 ($S/N=1$) 褶积模型合成记录一次反射波与多次波时差很小但振幅存在差异时 ICA 与自适应相减法压制多次波对比

Fig.3 Comparison of multiples separation by ICA and adaptive subtraction in case the synthetic primaries and multiples by convolution have different amplitude levels and small moveout with noise ($S/N=1$)

2.2 波动方程模拟合成数据实验

为了检验逆散射级数多次波预测+ICA 分离多次波方法,考虑用全波动方程模拟数据对方法进行检验.图 4 是一个 4 层水平层状模型,图 5a 为用图 4 所示速度模型基于声波方程有限差分方法合成的模拟地震记录.进一步比较不同信噪比情况下的处理结果.图 6 为信噪比为 5 dB 的试验结果.

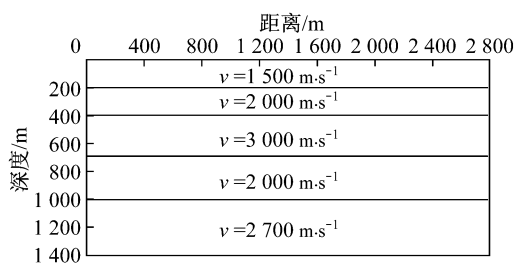


图 4 4 个反射层速度模型

Fig.4 The velocity model with four horizontal layers

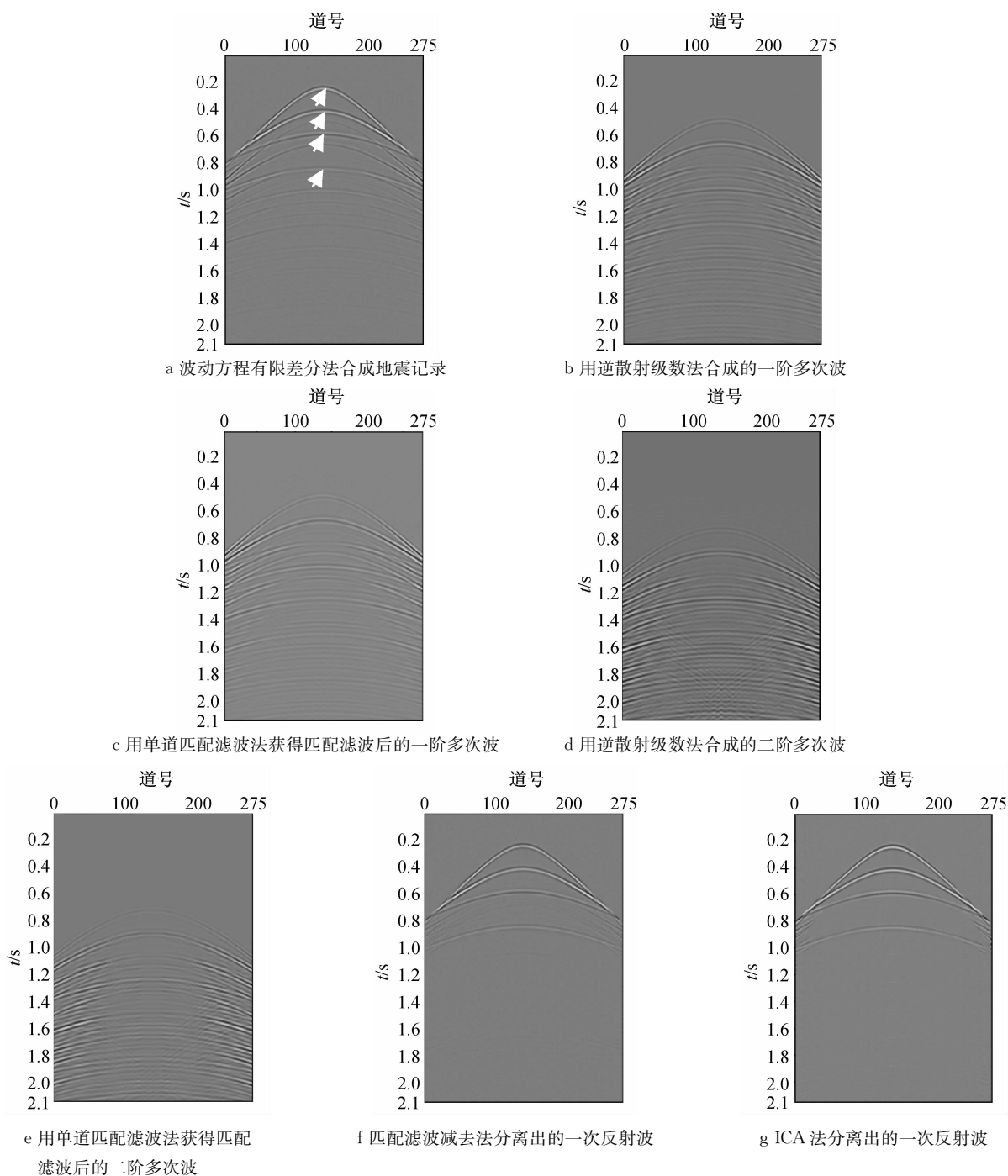


图 5 含有噪声 ($S/N = 10$) 波动方程模拟合成记录自适应相减法与 ICA 分离多次波对比

Fig.5 Multiples separation by ICA compared with adaptive subtraction applied to wave-equation-based modeling data with noise ($S/N = 10$)

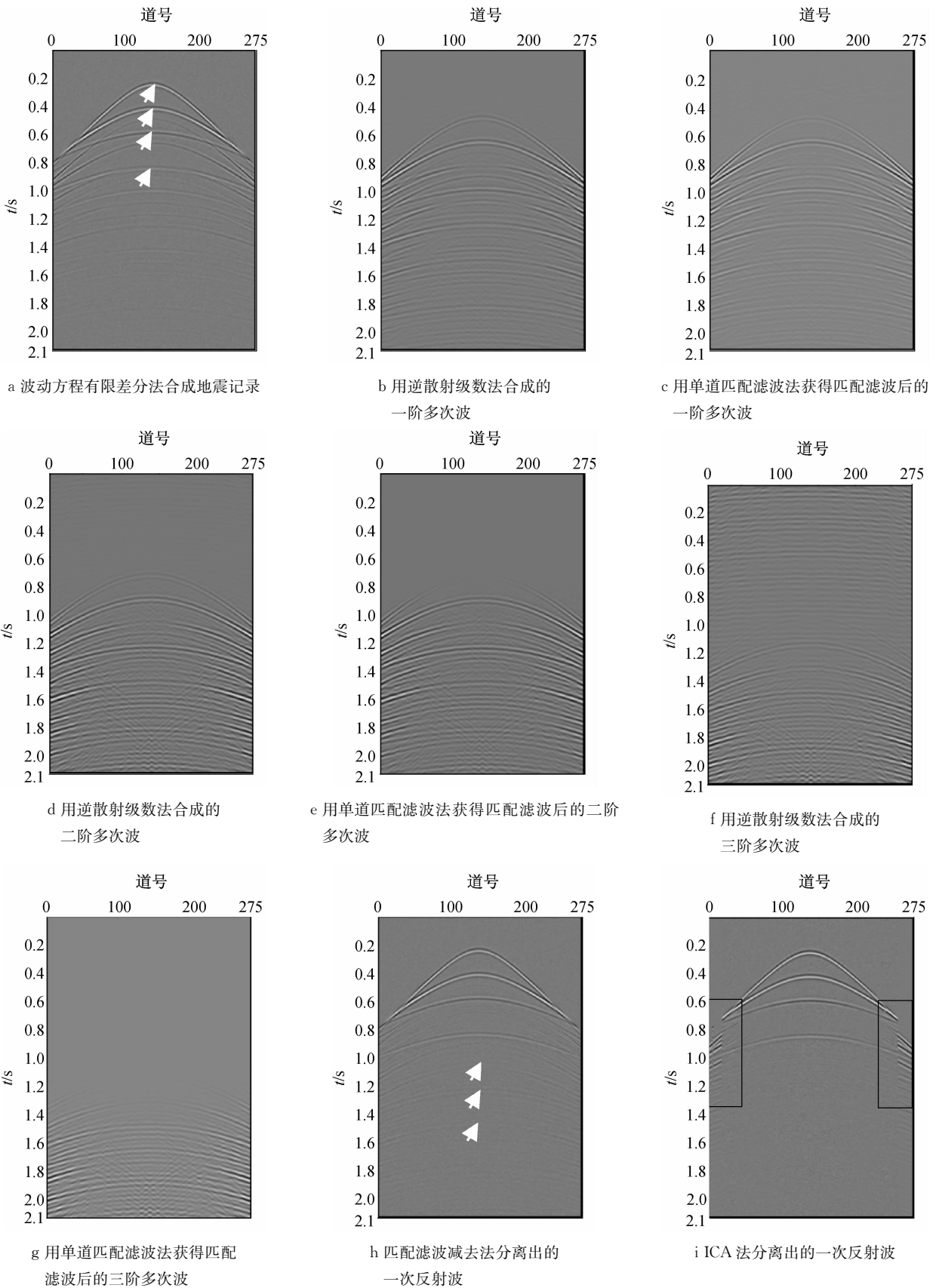


图 6 含有噪声 ($S/N=5$) 波动方程模拟合成记录自适应相减法与 ICA 分离多次波对比
 Fig.6 Comparison of multiples separation by ICA and adaptive subtraction applied to wave-equation-based modeling data with noise ($S/N=5$)

从图 5a 可以看出,与自由表面相关的多次波非常发育,图中箭头所指的 4 个同相轴为一次反射波,其余均为多次波,为检验方法的抗噪性,加入高斯随机噪音,信噪比为 10 dB. 图 5b、5d 是使用逆散射级数法预测的一阶与二阶多次波. 用时窗长度为 400 ms 单道匹配滤波方法将预测的多次波与模拟记录中的多次波匹配,图 5c、5e 是匹配滤波后的一阶与二阶多次波;图 5f 为图 5a 减去图 5c 和 5e 获得的一次反射波,可以看出图 5f 中仍有多次波残留,如图中箭头所示;图 5g 是用图 5a、5c、5e 组成输入分量进行 ICA 分离获得的一次反射波,与图 5f 相比,可以看出同样匹配滤波的情况下,ICA 分离多次波的效果比自适应相减法有较好的改进.

图 6b、6d、6f 分别是用逆散射级数法预测的一阶、二阶与三阶多次波. 用时窗长度为 400 ms 单道匹配滤波方法将预测的多次波与模拟记录中的多次波进行匹配,图 6c、6e、6g 分别为匹配滤波后的一阶、二阶与三阶多次波;图 6h 为图 6a 减去图 6c、6e 和 6g 获得的一次反射波,可以看出图 5f 中仍有多次波残留,如图中箭头所示;图 6i 是用图 6a、6c、6e 和 6g 组成输入分量进行 ICA 法分离获得的一次反射波,与图 6h 相比,可以看出同样匹配滤波的情况下,ICA 分离多次波的效果比自适应相减法有较好的改进.

低信噪比情况下自适应相减结果较差,而多观测量 ICA 法分离多次波仍有较好的效果. 但是,在信噪比为 5 dB 时,从图 6i 可看出,由于噪音的影响,相关法判别一次反射波出现误判,图 6i 中方框中显示误将多次波识别为一次波了,显示了在低信噪比情况相关法判别一次反射波存在不确定性.

3 结论

本文研究了基于多个观测量的 ICA 分离多次波的方法. 由于逆散射级数法可以方便预测出各阶多次波,与原始地震记录组成了 ICA 分离多次波的多个观测量,由此获取相互独立的包括一次反射波以及高阶多次波在内的信息. 文中展示的模拟数据试算结果表明,在预测的多次波与原始地震记录中多次波同样匹配情况下,使用 ICA 法分离比自适应相减的效果要好,并且当预测的多次波与原始地震记录中多次波相位达到匹配而能量存在差异时,ICA 分离多次波比自适应相减法的效果更加显著. 但是,需要说明的是,在利用 ICA 法获得包含有一次反射

波与高阶多次波等相互独立的信息后,需要将获得的每个独立信息与原始地震记录做互相关,以互相关系数最大为准则选取一次反射波,当数据的信噪比较低时,选取的一次反射波具有不确定性. 此外,本文只试验了单道匹配滤波方法,为了提高匹配精度,一些文献提出使用多道匹配和分块匹配方法. 另外,本文没有考虑鬼波及地震子波的影响,这些问题需要进一步开展深入研究.

参考文献:

- [1] Weglein A B. Multiple attenuation: an overview of recent advances and the road ahead [J]. *The Leading Edge*, 1999, 18(1):40.
- [2] Wiggins J W. Attenuation of complex water-bottom multiples by wave equation based prediction and subtraction [J]. *Geophysics*, 1988, 53(12):1527.
- [3] Verschuur D J, Berkhout A J. Estimation of multiple scattering by iterative inversion. Part II: practical aspects and examples [J]. *Geophysics*, 1997, 62(5):1596.
- [4] Weglein A B, Gasparotto F A, Carvalho P M, et al. An inverse-scattering series method for attenuating multiples in seismic reflection data [J]. *Geophysics*, 1997, 62(6):1975.
- [5] Weglein A B, Araujo F V, Carvalho P M, et al. Inverse scattering series and seismic exploration [J]. *Inverse Problems*, 2003, 19(6):R27.
- [6] Verschuur D J, Berkhout A J, Wapenaar C P. Adaptive surface-related multiple elimination [J]. *Geophysics*, 1992, 57(9):1166.
- [7] Common P. Independent component analysis, a new concept? [J]. *Signal Processing*, 1994, 36: 287.
- [8] Walden A T. Non-Gaussian reflectivity, entropy, and deconvolution [J]. *Geophysics*, 1985, 50(12):2862.
- [9] 刘喜武, 刘洪, 郑天愉. 用独立分量分析方法实现地震转换波与多次波分离 [J]. *防灾减灾工程学报*, 2003, 23(1):11. LIU Xiwu, LIU Hong, ZHENG Tianyu. Separation of converted-wave from seismic multiples by independent component analysis [J]. *Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering*, 2003, 23(1):11.
- [10] 陆文凯, 骆毅, 赵波, 等. 基于独立分量分析的多次波自适应相减技术 [J]. *地球物理学报*, 2004, 47(5):886. LU Wenkai, LUO Yi, ZHAO Bo, et al. Adaptive multiple wave subtraction using independent component analysis [J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2004, 47(5):886.
- [11] LU Wenkai. Adaptive multiple subtraction using independent component analysis [J]. *Geophysics*, 2006, 71(5): S179.
- [12] LU W K, LIU L. Adaptive multiple subtraction based on constrained independent component analysis [J]. *Geophysics*, 2009, 74(1): V1.
- [13] Kaplan S T, Innanen K A. Adaptive separation of free-surface multiples through independent component analysis [J]. *Geophysics*, 2008, 73(3): V29.
- [14] Hyvärinen A, Oja E. Independent component analysis: Algorithms and applications [J]. *Neural Networks*, 2000, 13(4-5):411.
- [15] Hyvärinen A, Karhunen J, Oja E. Independent component analysis [M]. Finland: John Wiley & Sons Inc, 2001.

- [16] Carvalho P M, Weglein A B. Nonlinear inverse scattering for multiple suppression: part I [C] // SEG 62nd Annual International Meeting Expanded Abstracts. [S. l.]: SEG, 1992: 1093-1095.
- [17] 李翔,胡天跃. 逆散射级数法去除自由表面多次波[J]. 地球物理学报, 2009, 52(6): 1633.

LI Xiang, HU Tianyue. Surface-related multiple removal with inverse scattering series method [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2009, 52(6): 1633.

- [18] WANG Y H. Multiple subtraction using an expanded multichannel matching filter[J]. Geophysics, 2003, 68(1): 346.

(上接第 389 页)

响的分条分层总和法,并以算例分析说明其计算步骤. 通过对比两种方法的计算结果,说明分条分层总和法计算路基土永久变形更准确更符合实际.

对黏质路基土永久变形预估模型和永久变形计算方法的研究,可为完善我国的沥青路面设计方法提供借鉴.

参考文献:

- [1] 邓学均. 路基路面工程[M]. 北京:人民交通出版社, 2002.
DENG Xuejun. Subgrade and pavement engineering [M]. Beijing: China Communications Press, 2002.
- [2] 高启聚,郭忠印,丛林,等. 重复荷载作用下粘性路基土的永久变形预估[J]. 同济大学学报:自然科学版, 2008, 36(11): 1521.
GAO Qiju, GUO Zhongyin, CONG Lin, et al. Evaluation of permanent deformation of clayed subgrade soils under cyclic loading [J]. Journal of Tongji University: Natural Science, 2008, 36(11): 1521.
- [3] 丛林,郭忠印,高启聚,等. 重复荷载下粉性路基土永久变形特性和预估模型[J]. 公路交通科技, 2010, 27(4): 12.
CONG Lin, GUO Zhongyin, GAO Qiju, et al. Permanent deformation characteristics and prediction model of silty subgrade soil under repeated loading [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2010, 27(4):

12.

- [4] 曹林涛,李立寒,孙大权. 基于车辙试验的沥青层永久变形预估[J]. 建筑材料学报, 2009, 12(5): 554.
CAO Lintao, LI Lihan, SUN Daquan. Permanent deformation Estimation of asphalt layers based on rutting test [J]. Journal of Building Materials, 2009, 12(5): 554.
- [5] 邱延峻,孙振堂. 柔性路面路基土的永久变形[J]. 西南交通大学学报, 2000, 35(2): 116.
QIU Yanjun, SUN Zhentang. Permanent deformation of subgrade soils in flexible pavement [J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2000, 35(2): 116.
- [6] 周俊,刘定涛,张义朋,等. 重轴载条件下沥青路面竖向永久变形分析[J]. 武汉理工大学学报:交通科学与工程版, 2010, 34(4): 818.
ZHOU Jun, LIU Dingtao, ZHANG Yipeng, et al. Vertical permanent deformation of asphalt pavement under heavy axle load [J]. Journal of Wuhan University of Technology: Transportation Science & Engineering, 2010, 34(4): 818.
- [7] Monismith C L, Ogawa N, Freeme C R. Permanent deformation characteristics of subgrade soils due to repeated loading[J]. Transportation Research Record, 1975, 537: 1.
- [8] Tseng K H, Lytton R L. Prediction of permanent deformation in flexible pavement materials[J]. Implication of Aggregates in the Design, Construction, and Performance of Flexible Pavements, 1989, 5: 154.
- [9] AASHTO. Guide for mechanistic-empirical design of new and rehabilitated pavement structures-final report[R]. Washington D C: National Cooperative Highway Research Program, 2004.