

基于高维小波变换的高抗噪性边缘检测技术

王清振* 张金森 姜秀娣 翁斌 朱振宇 丁继才

(中海油研究总院,北京 100028)

王清振,张金森,姜秀娣,翁斌,朱振宇,丁继才. 基于高维小波变换的高抗噪性边缘检测技术. 石油地球物理勘探,2016,51(5):889-893.

摘要 基于高维小波变换提出了一种高抗噪性的断层及地质体边缘检测技术。首先对三维地震数据体进行希尔伯特变换得到复地震道,求取相位余弦属性;然后利用高维小波变换把相位余弦变换到包含三维坐标(3个变量)、倾角、方位角和尺度等6个变量的高维空间,通过固定坐标和尺度,扫描倾角和方位角得到高信噪比的不连续性检测结果,以有效压制倾斜地层层间不连续带来的伪边界信息。模型试验和实际资料算例表明,该技术与常用的C3算法相比,能够更好地检测小断层、小河道等地质体边界信息,并且具有较强的抗噪性能。

关键词 相干 小波变换 不连续性检测 希尔伯特变换 相位余弦

中图分类号:P631 文献标识码:A doi: 10.13810/j.cnki.issn.1000-7210.2016.05.007

1 引言

在地震勘探中,断层的检测和识别有着非常重要的意义。多年来,许多学者从不同的角度提出了利用地震数据相干性来检测不连续性地质结构的各种算法。Bahorich等^[1]提出了第一代相干体算法C1,这是地震资料解释发展史上的一个重大突破,此算法基于二阶统计量,简单、高效、易于实现,但它在处理带噪声数据时的鲁棒性不强。Marfurt等^[2]提出了利用多个地震道的C2算法,可以利用任意数目的地震道来估计相干性,对噪声的抑制能力明显提高,但是分辨率会降低,计算量也会显著增加。Gersztenkorn等^[3]提出了一种基于特征结构的相干估计算法(C3),首先构建一个三维数据块并用这个数据块构成一个协方差矩阵,然后用协方差矩阵的最大特征值和矩阵迹的比值作为相干估计值,C3算法比C1、C2算法更能抑制数据中的噪声。然而,由于C3算法要构造规模较大的协方差矩阵并计算其主特征值,所以计算量很大。另外,C3算法没有考虑倾角对相干估计值的影响,因此,在有很大倾角

的区域,C3算法不能给出好的相干估计值。Marfurt^[4]提出改进的C3算法,这一方法先用C2算法估计出倾角并对倾角估计值进行平滑,然后用平滑后的倾角值计算相干值,但这一改进算法的计算量很大。Cohen^[5]提出一种估计局部结构熵的算法(LSE),具备很高的计算效率,又能较好地抑制噪声,在选择不同大小的分析单元后,可检测不同尺度下的不连续性。进一步,通过把由不同大小的分析单元所得到的局部结构熵组合起来,可以得到分辨率较高的结果。但对于细小的不连续性结构,局部结构熵算法的分辨率较低。

近年来,国内众多学者针对地震相干体技术提出了一系列改进方法。王西文等^[6]引入小波分析技术,利用小波域分频方法进行分频重构,有效地突出了小断层信息;孙夕平等^[7]利用乘幂法求取矩阵特征值,显著提高了C3相干算法的计算效率;宋维琪等^[8]克服了单一属性相干算法信息量不全的缺陷,提出了基于特征值结构的地震多矢量属性相干数据体的计算方法;高静怀等^[9,10]构造了适用于地震数据的三参数物理小波,提出了利用二维连续小波变换进行属性提取和断层检测的技术,加入了地层倾角因素,可以

* 北京市朝阳区太阳宫南街6号海油大厦B810中海油研究总院,100028。Email:wangqzh2@cnooc.com.cn

本文于2015年12月3日收到,最终修改稿于2016年8月10日收到。

本研究受国家重大科技专项课题(2011ZX05023-005)资助。

同时得到不连续和倾角两种属性。但是由于振幅的影响,对地震数据直接进行小波变换的方法对小断层等微弱的不连续信息不敏感,同时二维小波变换应用于三维地震数据也有局限性。

为此提出了一种基于高维小波变换的不连续性检测技术:首先对三维地震数据体进行希尔伯特变换得到复地震道,求取相位余弦属性;然后对相位余弦进行高维小波变换得到包含三维坐标(3个变量)、倾角、方位角和尺度等6个变量的高维空间,通过固定坐标,扫描倾角和方位角,得到高信噪比的不连续性检测结果。模型试验和实际资料算例表明,该技术与常用的C3算法相比,能够更好地检测小断层、小河道等地质体边界信息。

2 技术原理

记三维地震数据体为 $f(x, y, t)$, 用向量 \mathbf{p} 表示三维地震数据体中某点的坐标, 即 $\mathbf{p} = (x, y, t)$, 那么三维地震数据体可简单记为 $f(\mathbf{p})$ 。其中: x, y 表示位置坐标; t 表示时间轴。对三维地震数据体 $f(\mathbf{p})$ 每道进行希尔伯特变换, 得到复地震道

$$F(\mathbf{p}) = f(\mathbf{p}) + i \int_{-\infty}^{+\infty} f(\mathbf{p}) \frac{1}{t - \tau} d\tau \quad (1)$$

式中 τ 表示时间的临时变量。

提取瞬时相位得到三维瞬时相位数据体

$$\text{Phase}(\mathbf{p}) = \tan^{-1} \left[\frac{\text{imag}(F(\mathbf{p}))}{\text{real}(F(\mathbf{p}))} \right] \quad (2)$$

式中: $\text{imag}(F(\mathbf{p}))$ 表示对 $F(\mathbf{p})$ 复地震道取虚部; $\text{real}(F(\mathbf{p}))$ 表示对 $F(\mathbf{p})$ 取实部。

进而获得三维相位余弦数据体

$$\text{PhC}(\mathbf{p}) = \cos[\text{Phase}(\mathbf{p})] \quad (3)$$

对三维相位余弦数据体 $\text{PhC}(\mathbf{p})$ 进行分块, 记第 n 块三维分块相位余弦数据体为 $\text{PhCP}(n, \mathbf{p})$, 分别对每个三维相位余弦数据体的子块 $\text{PhCP}(n, \mathbf{p})$ 进行三维连续小波变换

$\text{CWT_3D}(n, a, \mathbf{p}, \theta, \varphi)$

$$\begin{aligned} &= \int_{R^3} \text{PhCP}(n, \mathbf{b}) a^{-3} \Psi[a^{-1} R_{\theta, \varphi}(\mathbf{b} - \mathbf{p})] d^3 \mathbf{b} \\ &= \int_{R^2} \text{PhCP_k}(n, \mathbf{k}) \widehat{\Psi}[a R_{\theta, \varphi}(\mathbf{k})] e^{i \mathbf{p} \cdot \mathbf{k}} d^2 \mathbf{k} \end{aligned} \quad (4)$$

式中: $\Psi(\mathbf{p})$ 为三维母小波函数; a 表示三维连续小波变换的尺度因子; θ 表示地质目标选择倾角; φ 表示地质目标选择方位角; $R_{\theta, \varphi}$ 表示与倾角及方位

角有关的旋转算子; $\text{PhCP_k}(n, \mathbf{k})$ 是 $\text{PhCP}(n, \mathbf{p})$ 的波数域形式; $\widehat{\Psi}(\mathbf{k})$ 是 $\Psi(\mathbf{p})$ 的波数域形式, 其中 \mathbf{k} 为波数; \mathbf{b} 表示空间位置坐标的临时变量。

利用每个三维相位余弦数据体子块的三维连续小波变换系数 $\text{CWT_3D}(n, a, \mathbf{p}, \theta, \varphi)$ 进行三维地震资料的不连续性检测, 首先利用三维连续小波变换系数来确定地震资料不连续性的方向

$$\begin{aligned} &[\theta_{\text{dis}}(n, a, \mathbf{p}), \varphi_{\text{dis}}(n, a, \mathbf{p})] \\ &= \arg \max_{[\theta, \varphi]} |\text{CWT_3D}(n, a, \mathbf{p}, \theta, \varphi)| \end{aligned} \quad (5)$$

即将三维连续小波模最大值对应的倾角 $\theta_{\text{dis}}(n, a, \mathbf{p})$ 及方位角 $\varphi_{\text{dis}}(n, a, \mathbf{p})$ 定义为 \mathbf{p} 点的不连续性的方向, 那么 \mathbf{p} 点的不连续性度量为

$\text{Discon}(n, a, \mathbf{p})$

$$= |\text{CWT_3D}(n, a, \mathbf{p}, \theta_{\text{dis}}(n, a, \mathbf{p}), \varphi_{\text{dis}}(n, a, \mathbf{p}))| \quad (6)$$

将生成的各个子块的不连续性数据体 $\text{Discon}(n, a, \mathbf{p})$ 进行拼接, 得到整个地震资料的不连续性数据体。

3 模型实验

选取推覆体模型进行实验, 纵测线和横测线分别有 401 道, 道长 185ms, 采样间隔为 1ms。图 1a 是第 320 条横测线速度剖面, 可以看出, 推覆体模型含有高角度地层、多条断层和河道等地质信息, 可以用来检测算法对倾斜地层、断层和小河道的检测能力。图 1b 是应用主频为 30Hz 的子波得到的正演模型地震剖面, 可以看到, 由于主频较低, 河道信息在地震记录上表现不是很明显。用常规 C3 算法和本文提出的算法分别进行不连续性检测, 图 1c 和图 1e 是本文方法检测结果, 图 1d 和图 1f 是 C3 算法检测结果。从剖面上可以看出, C3 算法受地层结构影响较大, 大倾角地层存在较强的层间不连续性, 影响了平面上断层和河道的检测。对比平面和剖面可以看出, 图 1f 中 A 点、B 点和 D 点处的不连续性是由大倾角地层引起的, 不是真实的断层和岩性边界, C 点和 E 点是真实的断层信息。图 1c 和图 1d 中则削弱了倾斜地层的影响, 平面上只有 C 点和 E 点处的断层检测出来, 检测结果如实反映了真实的断层和河道等地质体边界信息。

为检验高维小波不连续性检测技术的抗噪性, 给正演地震记录模型加上了部分高斯白噪声, 然后

对含噪数据分别用本文算法和 C3 算法进行不连续性检测。图 1g 是本文算法计算结果,图 1h 是 C3 算法计算结果。通过对比,发现本文算法的计算结果对噪声不敏感,含噪数据和不含噪数据检测结果

质量相差不大,而 C3 算法对噪声要敏感得多,在对含噪数据的检测结果中,河道边界变得非常模糊,特别是左下方河道与断层交错的位置,河道边界不可辨识。

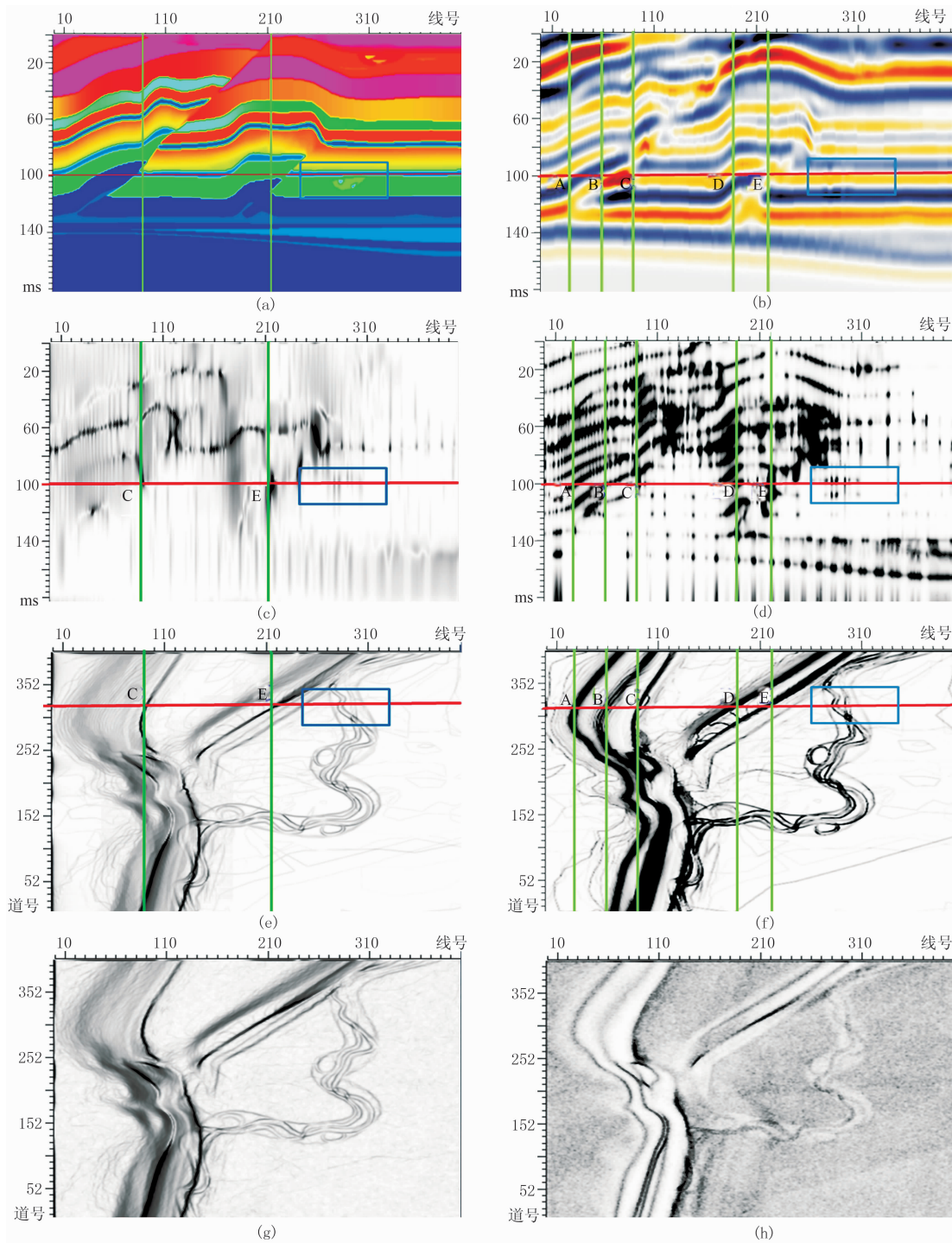


图 1 数值模型实验

(a)三维速度模型第 320 条横测线的速度剖面;(b)对应的合成地震记录;(c)基于高维小波变换边缘检测技术计算的不连续性数据体第 320 条横测线的剖面;(e)图 c 中第 100ms 处时间切片;(d)C3 算法计算结果的第 320 条横测线的剖面;(f)图 d 中第 100ms 处时间切片;(g)对加噪声模型应用高维小波变换进行不连续性检测的切片结果;(h)对加噪声模型应用 C3 算法进行不连续性检测的切片结果

4 实际资料处理

针对渤海某油田河道和断层比较发育的地区进行实际资料处理,分别利用 C3 算法和本文提出的算法进行不连续性检测。图 2 为实际资料不连续性检测结果,图 2a 是本文算法得到的断层检测结果,图 2b 是 C3 算法结果。通过对比可以很明显地看

出,由本文算法得到的结果无论是信噪比还是断层的连续性与可识别性都优于 C3 算法计算的结果。图 2b 中出现的大片的焦糊状现象都是由倾斜地层间的不连续性引起的,对比图 2c 和图 2d 可以明显看出,C3 计算的相关剖面带有大量沿层分布的不连续性信息,这些信息严重影响断层在平面上的清晰度和可识别度,而本文算法则很好地解决了这个问题。

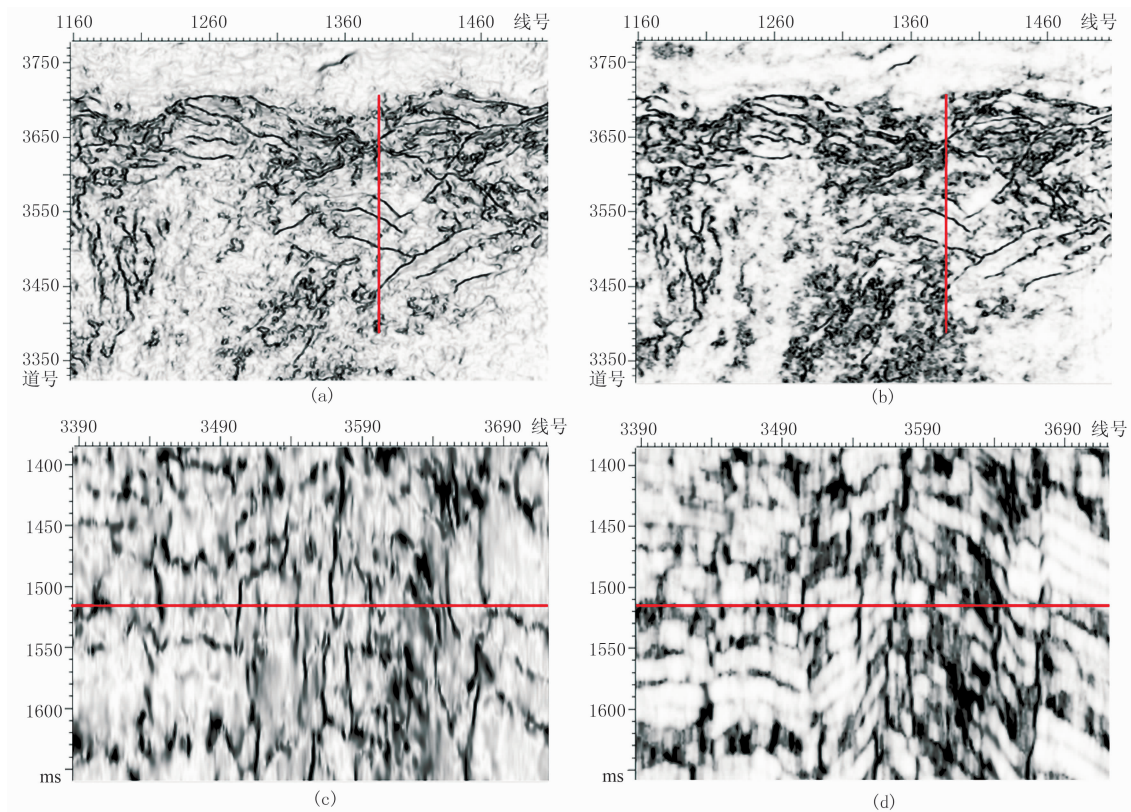


图 2 实际资料不连续性检测

(a)本文算法不连续性检测结果第 1516ms 时间切片;(b)C3 算法不连续性检测结果第 1516ms 时间切片;
(c)本文算法不连续检测结果第 1384 条纵测线剖面;(d)C3 算法不连续检测结果第 1384 条纵测线剖面

5 结论和认识

本文提出了一种有效的不连续性检测方法,以高维小波变换为工具,将地震资料的相位余弦体变换到高维空间,给出用倾角、方位角、尺度及空间位置等量刻画地震信号变化的方法,进行断层、裂缝、河道等地质体边缘信息的监测。这项技术将三维空间位置、倾角、方位角和不连续性统一到一个方程中,能够充分利用三维地震资料空间信息,有效去除高倾角地层对断层检测的影响,得到合理可靠的不

连续检测平面结果,并且算法本身具有良好的抗噪性,与常规 C3 等相干算法相比,更适用于低信噪比数据的不连续性检测。但是该算法得到的剖面纵向分辨率较低,平面上地质体边界的深度信息不能非常精确的定位,需要进一步进行攻关研究。

感谢中国石油大学(北京)袁三一博士提供推覆体模型数据,感谢西安交通大学王晓凯博士在高维小波变换理论方面给予的指导和帮助!

参考文献

[1] Bahorich M, Fanner S. 3-D seismic discontinuity for

- faults and stratigraphic features; The coherence cube. *The Leading Edge*, 1995, 14(10):1053-1058.
- [2] Marfurt K J, Kirlin R L, Farmer S L et al. 3-D seismic attributes using a semblance-based coherency algorithm. *Geophysics*, 1998, 63(4):1150-1165.
- [3] Gersztenkorn A, Marfurt K J. Eigenstructure-based coherence computations as an aid to 3-D structural and stratigraphic mapping. *Geophysics*, 1999, 64(5):1468-1479.
- [4] Marfurt K J, Sudhaker V, Gersztenkorn A et al. Coherency calculations in the presence of structural DIP. *Geophysics*, 1999, 64(1):104-111.
- [5] Cohen I, Coifmain R R. Local discontinuity measures for 3-D seismic data. *Geophysics*, 2002, 67(6):1933-1945.
- [6] 王西文, 杨孔庆, 周立宏等. 基于小波变换的地震相干体算法研究. *地球物理学报*, 2002, 45(6):847-852.
Wang Xiwen, Yang Kongqing, Zhou Lihong et al. Methods of calculating coherence cube on the basis of wavelet transform. *Chinese Journal of Geophysics*, 2002, 45(6):847-852.
- [7] 孙夕平, 杜世通. 乘幂法在地震属性分析中的应用. *物探化探计算技术*, 2000, 22(4):316-321.
Sun Xiping, Du Shitong. An application of power algorithm in the seismic attribute analysis. *Computing Techniques for Geophysical and Geochemical Exploration*, 2000, 22(4):316-321.
- [8] 宋维琪, 刘江华. 地震多矢量属性相干数据体计算及应用. *物探与化探*, 2003, 27(2):128-130.
Song Weiqi, Liu Jianghua. The calculation and application of coherence data body of seismic multi-vector attributes. *Geophysical and Geochemical Exploration*, 2003, 27(2):128-130.
- [9] Gao J H, Dong X L, Wang W B et al. Instantaneous parameters extraction via wavelet transform. *IEEE Transactions On Geoscience and Remote Sensing*, 1999, 37(2):867-870.
- [10] 高静怀, 汪文秉, 朱光明. 小波变换与信号瞬时特征分析. *地球物理学报*, 1997, 40(6):821-832.
Gao Jinghuai, Wang Wenbing, Zhu Guangming. Wavelet transform and instantaneous attributes analysis. *Chinese Journal of Geophysics*, 1997, 40(6):821-832.

(本文编辑:刘英)

作者简介



王清振 工程师, 1983 年生; 2005 年毕业于中国石油大学(华东)勘查技术与工程专业, 获学士学位; 2008 年获中国石油大学(华东)地球探测与信息技术专业硕士学位; 现在中海油研究总院从事地震资料解释、属性分析、反演等方面技术研究及相关软件研发工作。

(上接第 888 页)

- [15] Michael B, Tonellot T. Sparse seismic deconvolution by method of orthogonal matching pursuit. 72nd EAGE Conference and Exhibition Incorporating SPE EUROPEC, 2010, 395-399.
- [16] Tropp J A, Gilbert A C. Signal recovery from random measurements via orthogonal matching pursuit. *IEEE Transaction on Information Theory*, 2007, 53(12):4655-4666.
- [17] Needell D, Vershynin R. Signal recovery from incomplete and inaccurate measurements via regularized orthogonal matching pursuit. *IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing*, 2010, 4(2):310-316.
- [18] 张繁昌, 李传辉. 基于正交时频原子的地震信号快速匹配追踪. *地球物理学报*, 2012, 55(1):277-283.
Zhang Fanchang, Li Chuanhui. Orthogonal time-frequency atom based fast matching pursuit for seismic signal. *Chinese Journal of Geophysics*, 2012, 55(1):277-283.
- [19] 候世英, 张文玉, 孙韬等. 基于正交优化时频原子分

解算法的电能质量扰动匹配特性分析. *电网技术*, 2013, 37(3):647-652.

Hou Shiyang, Zhang Wenyu, Sun Tao et al. Analysis on matching features of power quality disturbances based on orthogonal optimization of time-frequency atom decomposition. *Power System Technology*, 2013, 37(3):647-652.

(本文编辑:金文昱)

作者简介



王珺 副教授, 1973 年生; 1995 年毕业于中国石油大学(华东)应用地球物理专业, 获学士学位; 2005 年毕业于中国科学院地质与地球物理研究所固体地球物理专业, 获博士学位。目前在中国石油大学(华东)从事教学工作和地震信号处理方面的研究。