

# 旋转磁场井间随钻测距导向系统中 微弱频变信号的检测方法

梁华庆<sup>1</sup>, 耿敏<sup>1</sup>, 时东海<sup>1</sup>, 史超<sup>1</sup>, 高德利<sup>2</sup>

(1. 中国石油大学地球物理与信息工程学院, 北京 102249; 2. 中国石油大学石油工程学院, 北京 102249)

**摘要:**针对旋转磁场信号的微弱且频变的特点,提出并实现一种基于离散傅里叶变换(DFT)双谱峰的频率重构方法。在信号幅度谱主瓣内搜索两个谱峰,以此重构信号频率的初值,运用牛顿迭代算法求解信号的真实频率,恢复信号幅度。通过计算机仿真和室外模拟对算法进行测试。结果表明:仿真结果优于基于DFT的单谱峰方法,模拟试验结果符合磁场信号随距离变化的规律,验证了所提方法的有效性和准确性;该方法能够准确锁定变化的磁场频率,滤除其他频率的杂波和噪声,精确提取出微弱的磁场幅度。

**关键词:**信号检测;微弱频变信号;频率重构;离散傅里叶变换;旋转磁场;测距导向系统

中图分类号:TE 243

文献标志码:A

## A weak and frequency-varying signal detection method for rotating magnet ranging system

LIANG Hua-qing<sup>1</sup>, GENG Min<sup>1</sup>, SHI Dong-hai<sup>1</sup>, SHI Chao<sup>1</sup>, GAO De-li<sup>2</sup>

(1. College of Geophysics and Information Engineering in China University of Petroleum, Beijing 102249, China;

2. College of Petroleum Engineering in China University of Petroleum, Beijing 102249, China)

**Abstract:** According to the weak and frequency-varying characteristics of rotating magnetic signal, a filtering method was developed based on discrete Fourier transform (DFT) double-peak spectrum value. Firstly, the frequencies of two peaks in the main-lobe of signal amplitude spectrum were searched. Secondly, the initial frequency value was reconstructed based on the two frequencies and the true frequency value was solved by Newton's method. Finally, the signal amplitude was recovered. The proposed method was tested by computer simulation and outdoor experiments. The simulation results show that the double-peak method is much better than the single-peak method based on DFT. The experimental results agree well with the variation law of magnetic field strength with distance. The proposed method is proved to be effective and accurate. The method can track the varying frequency accurately and extract the weak amplitude precisely.

**Key words:** signal detection; weak and frequency-varying signal; frequency reconstruction; discrete Fourier transform (DFT); rotating magnetic field; rotating magnet ranging system (RMRS)

复杂结构井是可以大幅度提高油气井产量和最终采收率的前沿技术,它是水平井为基本特征的系列井型,包括双水平井、多分支井、连通井、U型井及多功能组合井等,在发达国家已成主流井型<sup>[1]</sup>,并在世界范围内得到大力的推广应用<sup>[2-3]</sup>。目前,国内外在利用双水平井及多功能组合井技术开发稠油油藏、利用连通井及多分支井技术开发煤层气、利用

丛式井和加密井开发低渗(特低渗)油藏等方面均取得了显著效益<sup>[4-12]</sup>。这些复杂结构井钻采技术都要求精确探测相邻井之间的相对距离和方位信息,以使相邻两口井连通或按设计轨迹钻进。但是,依靠现有的随钻测量工具(MWD)无法达到上述复杂结构井高精度井眼轨迹控制的要求。目前国外学者研制的井间随钻测距仪器主要有旋转磁场井间测距

系统(rotating magnet ranging system, RMRS)和磁场定位导向工具 MGT(magnetic guidance tool)两种。这两种仪器在技术上的难点之一是微弱磁场信号的准确提取问题。在均匀介质中,磁场信号强度随传播距离的三次方急速衰减。当距离较远时,微弱的磁场信号完全被环境电磁干扰和检测电路本身的固有噪声所淹没,无法准确检测。笔者针对 RMRS 信号的特点,提出并实现一种大噪声强干扰下微弱的频变信号的检测算法,以达到实时跟踪锁定变化的磁场频率,精确提取磁场信号幅值的目的。

## 1 信号特性分析

### 1.1 测量原理

旋转磁场导向系统 RMRS<sup>[5, 12]</sup>由美国的 Vector Magnetics 公司 1995 年研制生产。该系统由 RMRS 磁源、RMRS 接收装置和地面计算分析系统组成。图 1 为 RMRS 用于煤层气开采中水平井与直井连通时的测量原理示意图。位于正钻井钻头后方无磁钻铤中的 RMRS 磁源随钻头的旋转而产生三轴交变磁场, 交变频率即是钻头的转速; RMRS 接收装置位于已钻井中的靶点位置, 测量三轴交变磁场信号, 并将数据传输到地面; 地面计算分析系统计算出钻头与靶点之间的相对矢量距离, 包括距离、顶角和方位偏差, 引导钻头钻进<sup>[12]</sup>。三轴交变磁场检测信号是矢量距离计算的依据, 因此三轴信号幅度的准确提取对矢量距离的正确计算起到决定性的作用。

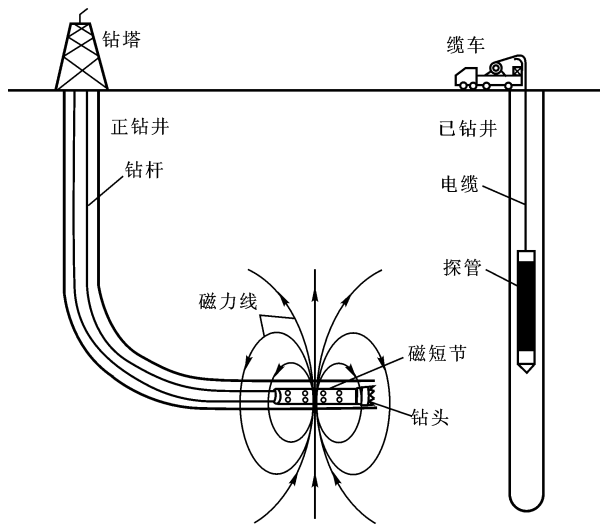


图 1 RMRS 在 CBM 连通井中的应用原理  
Fig.1 Schematic diagram of RMRS in CBM connected wells

### 1.2 信号特性

RMRS 磁源可以等效为正交的磁偶极子<sup>[13]</sup>, 根

据毕奥-萨伐尔定律, 磁偶极子的磁场强度随传播距离的三次方急速衰减, 而为了能精确导向, 准确中靶, 实现连通目标, 一般需要在远距靶点 50 m 外开始对钻头进行导向, 此时 RMRS 接收装置收到的磁源产生的磁场信号极其微弱, 极易被环境噪声和干扰淹没。在室外模拟试验场, 用自制的磁短节模拟 RMRS 磁源, 产生频率约为 2 Hz 的低频旋转磁场信号, 在距磁短节 15、20、30 m 的位置, 磁场传感器接收到的磁场信号时域波形如图 2(a) 所示, 信号相应的傅里叶频谱如图 2(b) 所示, 箭头标记处为磁场信号。从图 2(a) 可以看出, 随着距离增大, 磁场信号幅度急剧衰减, 当距离超过 30 m 后, 磁场信号已被环境电磁干扰(主要是 50 Hz 工频)和噪声所淹没, 难以分辨。从图 2(b) 可以看出, 磁场信号的幅度随着距离的增加近似按三次方衰减规律变化。

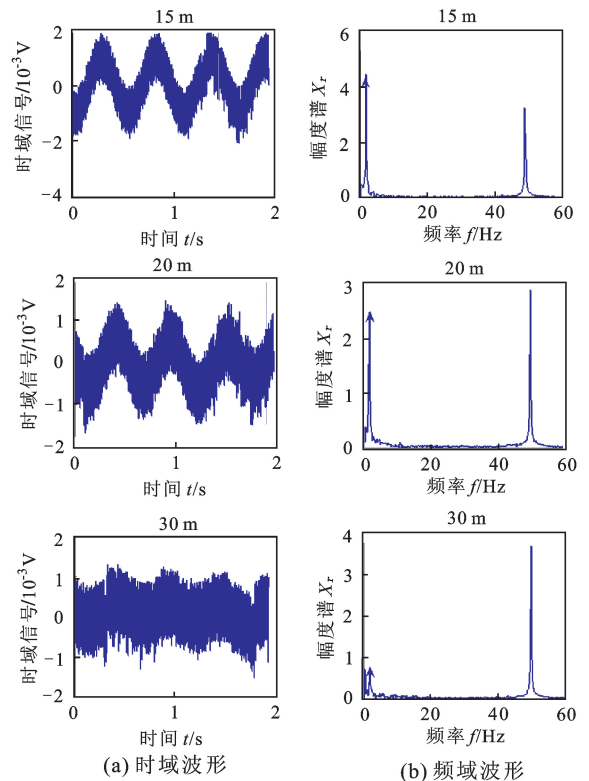


图 2 RMRS 磁场信号随距离的变化  
Fig.2 Variation of RMRS magnetic signal waveform with distance

RMRS 磁源安装在钻头后方无磁钻铤中, 随钻头旋转而产生交变磁场, 交变磁场频率随钻头转速变化而改变。根据实际钻井情况, 磁场信号的频变范围约为 1 ~ 4 Hz。

RMRS 测距导向是在钻进过程中测量钻头与靶点之间的矢量距离, 并及时调整钻进方向, 因此要求导向系统满足实时测量的要求, 这样每次更新计算

结果所采集到的磁场信号点数就较少。

综上所述, RMRS 磁场信号具有微弱、频变、窄带和数据量少 4 个特点。

## 2 信号检测算法

对于几赫兹以下的超低频信号, 硬件检测电路的噪声主要受  $1/f$  噪声的影响。放大器的固有噪声是与频率成反比的, 频率越低, 电路固有噪声越大<sup>[14]</sup>, 国际上超低噪声放大器其自身的输入短路噪声在几赫兹处已达到 100 nV 以上。因此, 仅依靠硬件滤波电路无法实现超低频、极微弱信号的准确检测, 根据磁场信号特性, 设计有效的检测算法在 RMRS 磁场信号检测中至关重要。

### 2.1 算法原理

提出一种基于离散傅里叶变换(DFT)的双谱峰信号频率重构算法。

鉴于磁场信号  $x(n)$  为频率在 1 ~ 4 Hz 范围内变化的正弦信号, 其理想的傅里叶幅度谱  $X_r(\omega)$  是在其数字角频率  $\pm\omega_0$  处的  $\delta$  函数, 如图 3(a) 所示。由此可在信号变化频率范围内通过谱峰搜索, 求得频率  $\omega_0$  并加以锁定, 从而滤除有用信号频率范围内的其他干扰和噪声, 恢复出纯净的正弦信号。

但是在实际测量中, 采集的  $x(n)$  的数据长度  $N$  为有限值, 且为了满足实时测量要求,  $N$  较小。这相当于给  $x(n)$  乘上了一个长度为  $N$  的矩形窗  $w(n)$ ,  $w(n) = 1, n = 0, 1, \dots, N-1$ , 矩形窗的幅度谱为

$$W_r(\omega) = \sin\left(\frac{N\omega}{2}\right) / \sin\left(\frac{\omega}{2}\right), \quad -\pi \leq \omega < \pi. \quad (1)$$

如图 3(b) 所示, 其主瓣宽度  $\Delta\omega = 4\pi/N$ 。数据长度  $N$  越小, 主瓣宽度越大。实际有限长信号的幅度谱  $\hat{X}_r(\omega)$  是无限长信号的理想幅度谱与矩形窗幅度谱  $W_r(\omega)$  的卷积。

$$\hat{X}_r(\omega) = \frac{1}{2\pi} [X_r(\omega) * W_r(\omega)] = \frac{A}{2} \frac{\sin\left[\frac{N(\omega-\omega_0)}{2}\right]}{\sin\left[\frac{(\omega-\omega_0)}{2}\right]}, \quad (2)$$

$0 \leq \omega < \pi$ .

式中,  $A$  为  $x(n)$  幅度。  $\hat{X}_r(\omega)$  如图 3(c) 和 3(d) 所示。

而  $x(n)$  的 DFT 幅度谱  $X_r(k)$  是对  $\hat{X}_r(\omega)$  在  $0 \sim 2\pi$  范围内的  $N$  等分采样值。采样点频率间隔为  $2\pi/N$ ,  $0 \leq \omega < \pi$  区间内采样值为

$$X_r(k) = \hat{X}_r(\omega) \Big|_{\omega = \frac{2\pi k}{N}} = \frac{A}{2} \frac{\sin\left[N\pi\left(\frac{k}{N} - f_0\right)\right]}{\sin\left[\pi\left(\frac{k}{N} - f_0\right)\right]},$$

$$k = 0, 1, \dots, N/2 - 1; f_0 = \omega_0 / 2\pi. \quad (3)$$

式中  $f_0$  为信号的数字频率。

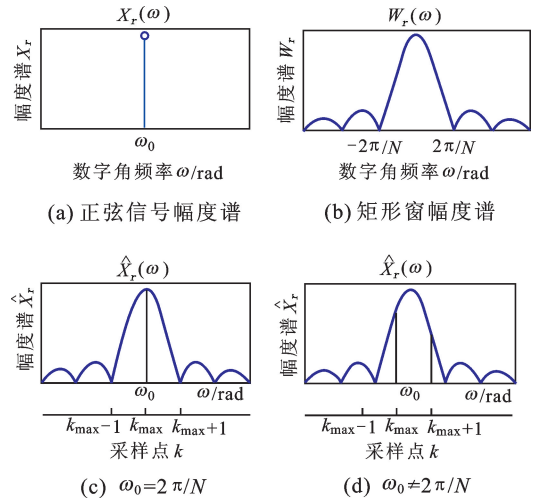


图3 信号的理想频谱和实际频谱

Fig. 3 Ideal and practical spectrum of signal

若信号的角频率  $\omega_0$  刚好等于  $2\pi/N$  的整数倍, 则在主瓣内将只有 1 个位于主瓣中心的采样点  $k_{\max}$  (见图 3(c)),  $k_{\max}$  为幅度谱最大值所对应频率的序号, 通过谱峰搜索, 即可准确无误地求得信号的真实频率  $\omega_0$ ; 但在一般情况下, 信号的角频率  $\omega_0$  不等于  $2\pi/N$  的整数倍, 在主瓣内将会有两个采样点  $k_{\max}$  和  $k_{\max+1}$  (见图 3(d)),  $k_{\max+1}$  为与最大值相邻的次最大值所对应频率的序号, 且有  $k_{\max+1} = k_{\max} \pm 1$ 。此时若仍通过单谱峰搜索求信号的频率  $\omega_0$ , 则会产生误差。数据长度  $N$  越小, 误差将越大。为此提出了更精确的基于 DFT 双谱峰的信号频率重构算法。

在 RMRS 系统中, 旋转磁场信号频率变化范围为 1 ~ 4 Hz, 信号经过截止频率为 10 Hz 的模拟低通滤波后, 以频率  $f_s$  (50 Hz) 进行采样, 则信号的数字频率  $f_0$  变化范围为 0.02 ~ 0.08。对于  $N \gg 1, f_0 < 0.1$ , 有  $\sin[\pi(k/N - f_0)] \approx \pi(k/N - f_0)$ , 则式(3)改写为

$$X_r(k) \approx \frac{A}{2} \frac{\sin\left[N\pi\left(\frac{k}{N} - f_0\right)\right]}{\pi\left(\frac{k}{N} - f_0\right)}. \quad (4)$$

主瓣内的两个峰点  $k_{\max}$  和  $k_{\max+1}$  满足

$$\left(\frac{k_{\max}}{N} - f_0\right) X_r(k_{\max}) + \left(\frac{k_{\max+1}}{N} - f_0\right) X_r(k_{\max+1}) = \frac{A}{2} \frac{\sin\left[N\pi\left(\frac{k_{\max}}{N} - f_0\right)\right]}{\pi} + \frac{A}{2} \frac{\sin\left[N\pi\left(\frac{k_{\max+1}}{N} - f_0\right)\right]}{\pi} = 0. \quad (5)$$

则基于 DFT 双谱峰重构出的信号真实频率的估计值为

$$\hat{f}_0 = \frac{f_s}{N} \frac{k_{\max} X_r(k_{\max}) + k_{\max+1} X_r(k_{\max+1})}{X_r(k_{\max}) + X_r(k_{\max+1})}. \quad (6)$$

以  $f_0$  作为初始值,用牛顿迭代法逼近真实频率。构造如下的逼近函数:

$$f(x) = \frac{\sin\left[N\pi\left(\frac{k_{\max}}{N}-x\right)\right]}{\sin\left[\pi\left(\frac{k_{\max}}{N}-x\right)\right]} \cdot \frac{\sin\left[\pi\left(\frac{k_{\max0}}{N}-x\right)\right]}{\sin\left[N\pi\left(\frac{k_{\max0}}{N}-x\right)\right]}$$

$$\frac{X_r(k_{\max})}{X_r(k_{\max0})} \quad (7)$$

进行牛顿迭代,即可求得更精确的真实频率  $f_0$ 。再由式(3),恢复出信号的幅度为

$$A = 2X_r(k_{\max}) \frac{\sin\left[\pi\left(\frac{k_{\max}}{N}-f_0\right)\right]}{\sin\left[N\pi\left(\frac{k_{\max}}{N}-f_0\right)\right]} \quad (8)$$

### 2.2 算法模拟

为了滤除现场 50 Hz 的强干扰,实测磁场信号在幅度提取前先经过截止频率为 10 Hz 的模拟低通滤波,因此信号中含有 10 Hz 以下的有色噪声。根据信号的实际特点,计算机模拟产生正弦信号 X、Y、Z,幅度分别是 2、3、4 V,频率分别为 1、2、3 Hz,并均施加 10 Hz 以下的有色噪声,信噪比分别为 1、2.25、4 dB,采样频率 50 Hz,采样数据长度为 512。一次仿真实验得到的原始信号时域波形如图 4(a) 所示,采用本文基于 DFT 双谱峰的频率重构算法,恢复出的纯净正弦的检测信号时域波形如图 4(b) 所示。

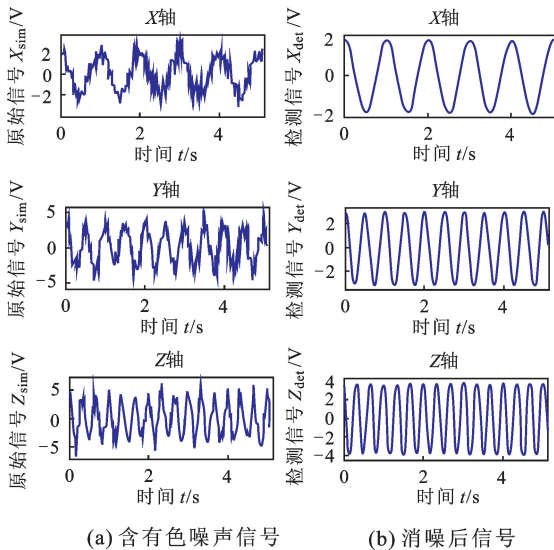


图4 含有色噪声正弦信号的处理结果

Fig. 4 Processing results of sine signal with color noise

仿真实验重构的信号频率、幅度均值及其相对误差列于表 1、2 中,并与基于 DFT 单谱峰的信号检测结果对比,双谱峰检测方法实现了精确的频率锁定和幅度提取,检测精度明显优于单谱峰检测方法。

表 1 含有色噪声正弦信号频率检测结果

Table 1 Frequency detection results of sine signal with color noise

信号	真实值 $f$ / Hz	本文方法		单谱峰方法	
		检测值 $f_d$ /Hz	相对误差 $\delta_d$ /%	检测值 $f_m$ /Hz	相对误差 $\delta_m$ /%
X	1	0.998 0	0.200 0	0.976 6	2.340 0
Y	2	2.001 8	0.090 0	1.967 8	1.610 0
Z	3	3.000 2	0.006 7	3.027 3	0.910 0

表 2 含有色噪声正弦信号幅度检测结果

Table 2 Amplitude detection results of sine signal with color noise

信号	真实值 $A$ / V	本文方法		单谱峰方法	
		检测值 $A_d$ /Hz	相对误差 $\delta_d$ /%	检测值 $A_m$ /Hz	相对误差 $\delta_m$ /%
X	2	2.049 0	2.450 0	1.821 1	8.945 0
Y	3	3.071 1	2.370 0	1.958 1	34.730 0
Z	4	4.001 0	0.025 0	3.510 7	12.232 5

### 2.3 算法应用

利用 RMRS 模拟装置,在试验井进行连通井模拟试验。用电机带动自制磁短节旋转产生磁场信号,信号经过磁场接收传感器后,用自制的截止频率为 10 Hz 的低通滤波放大电路采集三轴磁场信号,测试双谱峰信号频率重构算法在 RMRS 系统中的实际应用效果。图 5 为磁短节与磁场接收传感器相

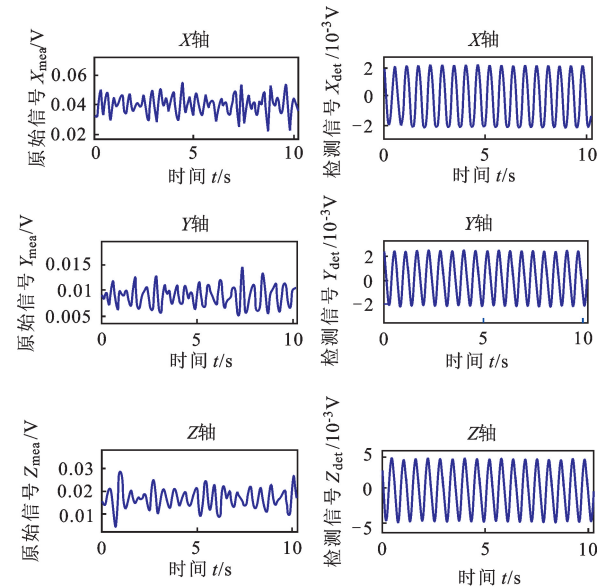


图5 实测信号处理结果

Fig. 5 Processing results of measured signal

距 50 m 时采集到的原始信号以及经过本文方法处理后得到的检测信号。可见杂波干扰完全消除,恢复出了干净的正弦信号。

改变磁短节与磁场接收传感器之间的距离,采



集磁场信号,并用本文检测算法处理,得出 $X$ 、 $Y$ 、 $Z$ 三轴磁场信号峰-峰值随距离变化的曲线,如图6所示。信号峰-峰值和距离的立方近似成反比关系,与理论分析吻合。RMRS测距导向中,根据检测出的三轴信号大小,依据相关算法<sup>[15]</sup>,即可求出磁短节的距离和方位。

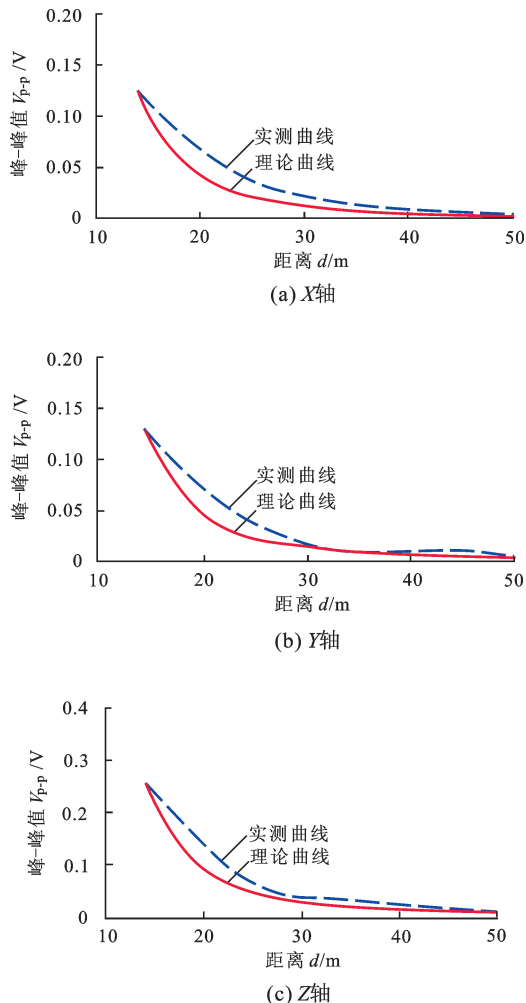


图6 三轴信号幅度随井间距离变化曲线

Fig. 6 Amplitude variation of three axes signal with distance between wells

### 3 结论

(1) 实现了基于DFT双谱峰的频率重构算法,有效解决了强干扰大噪声背景下微弱频变的磁场信号的高精度检测问题。

(2) 基于DFT双谱峰的频率重构算法在信号频率和幅度的检测精度上明显优于传统的单谱峰方法。

(3) 基于DFT双谱峰的频率重构算法检测距离可达50 m,幅度检测结果随距离增加按三次方规律

衰减,与理论分析相符。

(4) 基于DFT双谱峰的频率重构算法可以满足煤层气连通井钻井工程的实际需求。

### 参考文献:

- [1] 张绍槐. 现代导向钻井技术的新进展及发展方向[J]. 石油学报, 2003, 24(3): 82-85.  
ZHANG Shao-huai. New progress and development direction of modern steering drilling techniques [J]. Acta Petrolei Sinica, 2003, 24(3): 82-85.
- [2] 沈忠厚, 黄洪春, 高德利. 世界钻井技术新进展及发展趋势分析[J]. 中国石油大学学报: 自然科学版, 2009, 33(4): 64-70.  
SHEN Zhong-hou, HUANG Hong-chun, GAO De-li. Analysis on new development and development trend of worldwide drilling technology [J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2009, 33(4): 64-70.
- [3] STEVEN F, ADRIANO C. The use of multilateral well designs for improved recovery in heavy oil reservoirs [R]. SPE 112638, 2008.
- [4] LOPAREV DENID. Construction method of horizontal steam-injection and producing oil wells on the test sections OPU-4 and OPU-5 Yarega heavy oil deposit [R]. SPE 117378, 2008.
- [5] GRILLS T L. Magnetic ranging technologies for drilling steam assisted gravity drainage well pairs and unique well geometries—a comparison of technologies [R]. SPE 79005, 2002.
- [6] KUCKES A F, HAY R T, MCMAHON J, et al. New electromagnetic surveying/ranging method for drilling parallel horizontal twin wells [J]. SPE Drilling & Completion, 1996, 11(2): 85-90.
- [7] 乔磊, 申瑞臣, 黄洪春, 等. 煤层气多分支水平井钻井工艺研究[J]. 石油学报, 2007, 28(3): 112-115.  
QIAO Lei, SHEN Rui-chen, HUANG Hong-chun, et al. Drilling technology of multi-branch horizontal well [J]. Acta Petrolei Sinica, 2007, 28(3): 112-115.
- [8] 杨明合, 夏宏南, 屈胜元, 等. 磁导向技术在SAGD双水平井轨迹精细控制中的应用[J]. 钻采工艺, 2010, 33(3): 12-14.  
YANG Ming-he, XIA Hong-nan, QU Sheng-yuan, et al. MGT system applied to accuracy well tracks controlling in SAGD horizontal twin wells [J]. Drilling & Production Technology, 2010, 33(3): 12-14.

(下转第99页)