

文章编号: 1001-1986(2009)04-0068-04

基于小波分析的精细地层划分对比在庄9井区的应用

赵军龙¹, 李新胜²

(1. 西安石油大学油气资源学院, 陕西 西安 710065;
2. 陕西省地矿局物化探队, 陕西 西安 710043)

摘要: 为了满足庄9井区低渗透油藏描述中建立精细地层对比格架的要求, 从研究区多种资料和小波系数模极值点、过零点与信号突变点数学模型出发, 选用小波分析技术开展精细地层划分对比。通过对常规典型测井曲线小波变换, 选用第3层细节信号重构测井曲线, 将小波重构曲线与常规曲线结合起来, 对比分析建立研究区精准地层对比剖面, 并将此技术引入到储层隔夹层分析。研究表明, 基于小波分析的地层划分对比与隔夹层分析结果可靠, 满足高分辨率层序地层划分要求, 效果好于传统的测井曲线分层对比方法。

关键词: 庄9井区; 小波分析; 重构测井曲线; 地层划分; 对比; 隔夹层

中图分类号: P631.3 文献标识码: A DOI: 10.3969/j.issn.1001-1986.2009.04.018

Application of fine stratigraphic division and comparison based on wavelet analysis in Zhuang 9 block

ZHAO Junlong¹, LI Xinsheng²

(1. School of Petroleum Resources, Xi'an Shiyou University, Xi'an 710065, China;
2. Geophysical-Chemical Prospecting Team, Shaanxi Geology Mineral Bureau, Xi'an 710043, China)

Abstract: For meeting the demand of building fine geologic correlation framework, the wavelet analysis technique was chosen to study the stratigraphic division and comparison, according to the plentiful data and the feature of mode extreme point of wavelet factor and zero crossing point and signal discontinuity model. By means of the wavelet changing on conventional logging curves, through selecting detail signals of third layer, log was reconstructed. Then the fine correlation section was built by combining the new log curves and the conventional log curves. Moreover, the technique was introduced for analysis of barrier and interbed. The study indicated that the result of stratigraphic division and comparison and analysis on barrier and interbed is reliable, the research meets well the demand of high definition sequence division, the effect is better than the traditional method.

Key words: Zhuang9 block; wavelet analysis; reconstituted log; stratigraphic division; comparison; barrier and interbed

储层划分对比的细致程度和对比可靠程度是油藏描述成败的关键。目前用于地层对比的方法有很多, 包括年代地层对比、岩性对比、岩相对比、古生物组合对比、重矿物组合对比等^[1-2]。随着开发的不断深入和井点增加, 测井曲线在地层对比中的作用日益加强, 但传统的测井曲线划分地层和对比方法主要依赖对测井曲线直观分析, 对于曲线包含的丰富的地层信息忽略了, 难以模拟“由粗到细, 逐级分层”, 人工测井解释, 往往在一个视觉层次上就完成了全部地层划分, 使地层整体信息与局部信息混合在一起, 难以分辨清楚。同时对于三角洲前缘、浊积扇等低能沉积环境下的地层划分对比显得力不从心。现有研究成果^[3-6]中提出用小波变换系数极大

点开展地层划分、用小波系数震荡点来揭示不同旋回的变化面等, 但都很少涉及测井曲线小波变换重构测井曲线以进行地层划分与对比。

本文从研究区区域沉积背景出发, 在继承前人研究成果基础上, 注重运用区域性标志层、辅助标志层控制划分地层, 借助小波分析技术对研究区典型测井曲线开展测井曲线小波分析, 选用恰当的细节信号重构测井曲线, 把重构的测井曲线与常规曲线结合起来, 以实现研究区高精度地层划分与对比, 同时还开展了基于小波分析技术的隔夹层分析。

1 研究区沉积背景及地层划分标志层

鄂尔多斯盆地延长组为一套典型的内陆湖泊淡

收稿日期: 2008-09-16

作者简介: 赵军龙(1970—), 陕西长安人, 博士, 副教授, 主要从事矿产与能源地球物理研究。

水河流-湖泊三角洲沉积，延长组由下至上依次分为10个油组，即长1—长1^[7]。相关研究表明^[8]，庄9井区在延长组长8期间，主要受到西南、东南和东北3个方向物源的影响，接受了一套三角洲前缘水下沉积，岩石物性差，砂体非均质性强，为典型的低渗透油藏。

根据本区沉积韵律，将庄9井区长8₂含油层组划分为3个小层，即长8₂¹、长8₂²、长8₂³。其标志层特征见表1。

为了提高庄9井区低渗油藏采收率，需要做好工区精细油藏描述和地质建模。该区地层划分对比的关键是精确划分目的层岩性界面，准确进行地层

横向对比与对比剖面闭合研究，以建立精准地层对比格架和小层静态数据库。由于长8地层测井响应对地层界面反映不够清晰，为了开展好地层划分对比工作，需要寻求新的思路方法以提高地层划分与对比的精度和效率。

2 研究区地层划分与对比的技术优选

2.1 小波分析及其用于地层划分的原理

小波分析具有良好的局域化性质，通过对测井曲线小波变换，可以把测井曲线中包含的不同尺度的信息揭示出来，以实现“由粗及细、由宏观到微观”的不同尺度研究。

表1 庄9井区地层划分对比标志层特征

Table 1 The feature of marker bed for stratigraphic classification and correlation in Zhuang9

标志层	标志层特征
K1	延长组长7油层组下部的黑色泥岩、页岩、碳质泥岩、凝灰质泥岩，主要为油页岩，厚度为10~20 m。在电性上，该层以高阻出现，称为上高阻段。在测井曲线上还表现为高声波时差、高伽马、自然电位靠近基线等特点。该段泥岩在盆地内分布比较稳定。
K0	位于长9顶部，岩性为灰黑色泥岩、油页岩，局部变为砂质泥岩。由电阻、井径、声速、自然伽马组成一个电性特征标志层。高阻页岩在盆地南部发育，俗称李家畔页岩，是三叠系地层对比的一个重要标志层。

设 $\theta(t)$ 是某一起平滑作用的二次可导低通平滑函数，满足条件 $\int_{-\infty}^{\infty} \theta(t)dx = 1$ ， $\lim_{|t| \rightarrow \infty} \theta(t) = 0$ ，并且定义 $\Psi^{(1)}(t)$ 和 $\Psi^{(2)}(t)$ 分别为 $\theta(t)$ 的一阶、二阶导数。则函数 $\Psi^{(1)}(t)$ 和 $\Psi^{(2)}(t)$ 满足小波可容许性条件，可以作为小波母函数^[9-11]。

由于小波变换是通过将原信号 $f(t)$ 同伸缩小波卷积得到，分别以 $\Psi^{(1)}(t)$ 、 $\Psi^{(2)}(t)$ 为小波函数，函数 $f(t)$ 在尺度 a 、位置 t 处的卷积型小波变换定义易得

$$W_a^{(1)}f(t) = f * (a \frac{d\theta_a}{dt})(t) = a \frac{d}{dt}(f * \theta_a)(t) ;$$

$$W_a^{(2)}f(t) = f * (a^2 \frac{d^2\theta_a}{dt^2})(t) = a^2 \frac{d^2}{dt^2}(f * \theta_a)(t) .$$

由于 $f * \theta_a(t)$ 可以看成是低通平滑函数 $\theta(t)$ 在尺度 a 下对函数 $f(t)$ 进行平滑的结果，则小波变换 $W_a^{(1)}f(t)$ 与 $W_a^{(2)}f(t)$ 分别是函数 $f(t)$ 在尺度 a 下由 $\theta(t)$ 平滑后再取一阶与二阶导数。因此，当小波函数看作某一平滑函数的一阶导数时，信号小波变换模的局部极值点对应于信号的突变点(或边缘)；当小波函数看作某一平滑函数的二阶导数时，信号小波变换模的过零点则对应于信号突变点(或边缘)。

信号的奇异性通常可分为2种情况：一是信号在某一时刻幅值发生突变，引起信号不连续，则突变处是第一类型间断点；另一种是信号外观上很光滑，幅值没有突变，但在信号一阶微分上有突变产

生，且一阶微分不连续，称为第二类型间断点。这2类间断点都可以通过小波变换进行检测和识别。一般而言，层序界面是物性突变面，对应测井曲线为第一种、第二种类型间断的复合，故可采用小波变换系数模的局部极大值或者过零点来进行测井曲线的高分辨率层序分析。

2.2 地层划分对比的技术选择

不同沉积环境的地层单元划分方法不同。一般根据研究需要采用不同地层划分方法，根据岩性资料、电性特征和古生物资料进行。事实上，测井曲线已成为地层划分的主要信息。但由于地质与地球物理信息受到外界条件干扰，直接根据测井曲线进行地层划分无法实现高分辨率识别与划分要求。小波变换具有良好时间和尺度特性，对测井曲线进行小波变换后，曲线上不同频率(周期)信号在相应尺度上清晰显现，可以实现由粗及细、不同级次层序地层界面划分和测井相研究，为运用测井信息实现高分辨率层序地层研究提供了良好技术保证。赵军龙(2006)提出选用小波变换重构的第三层细节信号可以进行地层界面与岩性划分。这里选择正则性好的Symlet6小波对庄9井区典型测井曲线进行小波变换，利用第三层小波系数重构测井曲线，并与常规测井曲线组合分析，进行地层划分。

石油勘探开发中地层对比的一般原则包括：采用地震、测井、岩性、古生物资料综合划分对比地

层；在充分研究地震反射波结构特征及沉积相的基础上，确定各层段的沉积环境，针对不同的沉积环境，具体确定划分与对比的不同方法；严格遵守地层层序约束，即地层对比过程中不能出现交叉对比；先识别标准层及逐井对比。由于研究区缺乏地震资料，但岩性、测井资料丰富，故这里主要根据测井信息进行地层对比。由于重构的测井曲线对层序界面反映灵敏，但对岩性本身无直观指示意义，这里将常规典型测井曲线良好的岩性指示特性与小波重构曲线对岩性界面反映灵敏特征相结合，建立新的地层对比

剖面，实现研究区地层对比剖面的精确闭合。

3 研究区地层划分与对比成果分析

3.1 关键井的地层划分

研究区共有取心井 4 口(庄 9、X131、X133、X166)，这里综合分析其岩心、录井、地质及测井资料，建立了关键井的地层与岩性划分柱状及划分标准，见图 1。图中 SPd3、GRd3、ACd3、RILDd3 分别为用第三层小波系数重构的自然电位、自然伽马、声波时差和深感应电阻率测井曲线。

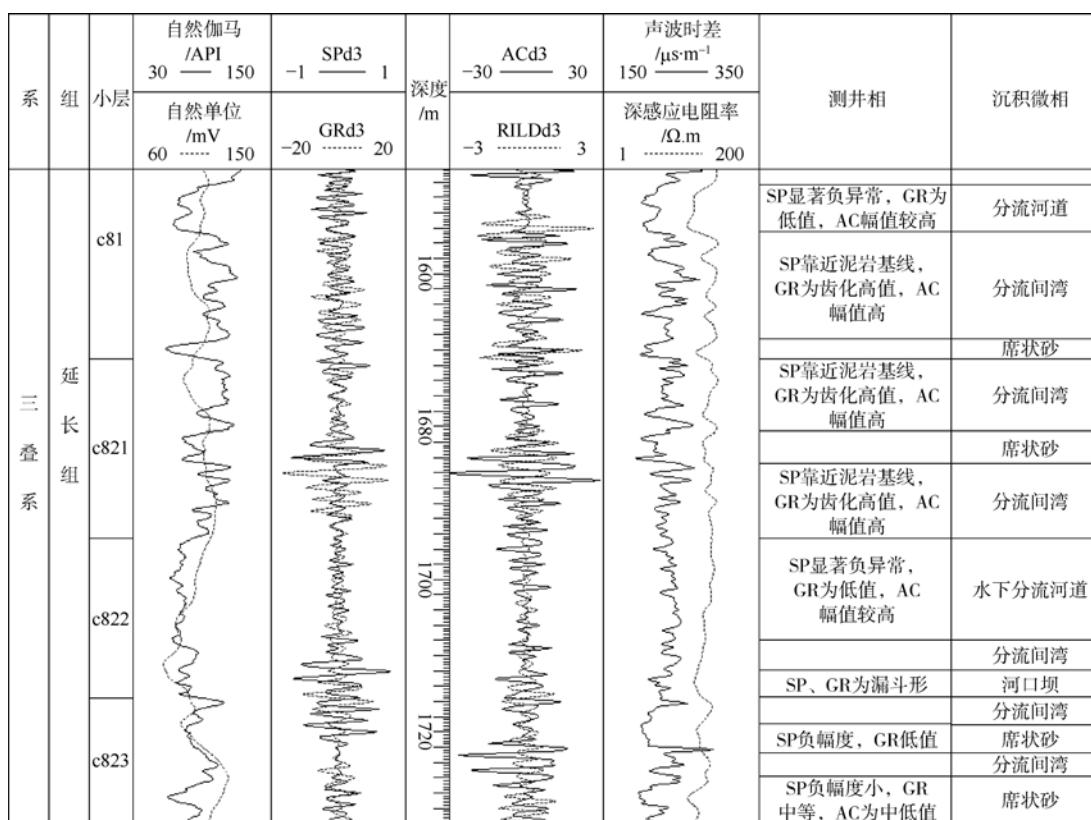


图 1 研究区庄 9 井高分辨率地层划分柱状图

Fig.1 The column of fine resolution stratigraphic classification of Zhuang9 well

从图 1 可见，地层界面和岩性界面在小波系数重构曲线上清晰的显示出来了，将典型测井曲线小波重构曲线与常规曲线相结合，很容易实现地层划分，分辨率明显好于传统的只根据常规测井曲线进行地层划分。

3.2 基于小波分析技术建立的地层对比剖面

从关键井出发，开展地层划分并确定划分标准，再进行骨干剖面对比分析，见图 2。在此基础上，进行全区地层对比剖面闭合和分析。从图 2 可见，将小波重构测井曲线与常规测井曲线相结合，可以很好地实现地层划分与对比，重构测井曲线用于地层对比，直观简洁。基于小波分析的地层对比完全满足建立研究区精准地层格架的要求。

3.3 基于小波分析的隔夹层划分

隔夹层的划分研究是储层非均质性研究重要内容之一。传统的隔夹层划分主要是根据不同隔夹层的电性特征直接划分。由于长 8 储层为水下分流河道沉积的低渗透储层，非均质性强，需要提高隔夹层划分的精度，以满足长 8 低渗透储层的开发需求。

该区隔夹层主要为泥质隔夹层和物性隔夹层。这里选用重构的声波时差和微电位曲线，结合常规测井曲线综合划分隔夹层，见图 3。可以看出，图 3 中第三道中重构的测井曲线直观、精确地指示出了电性变化的层段，再结合常规测井曲线，很容易划分出隔夹层的界面。这样的做法效果明显好于传统方法。

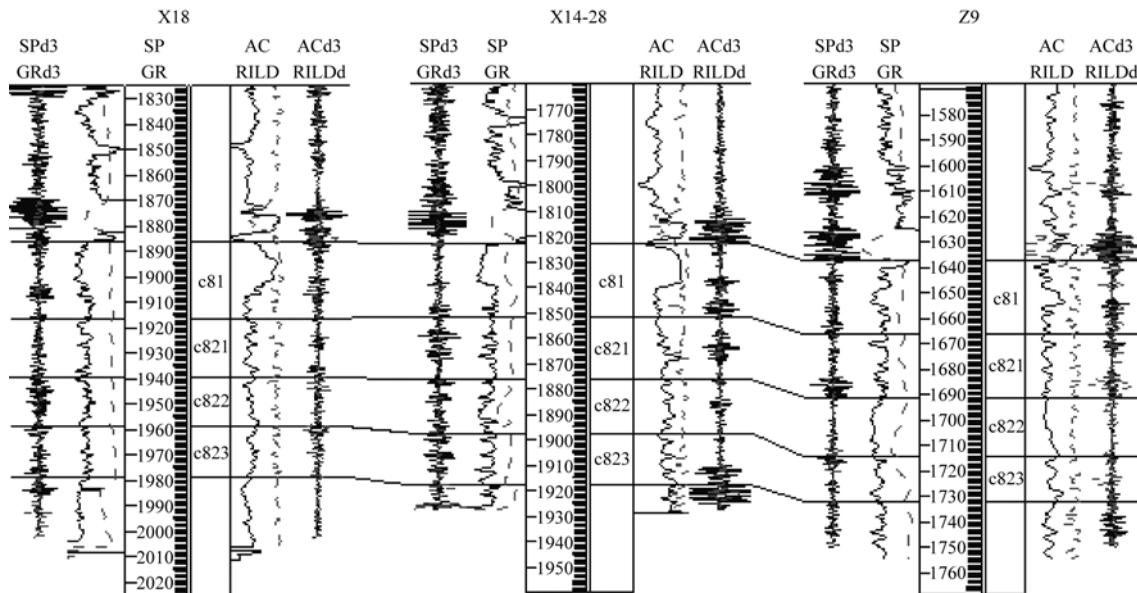


图2 研究区高分辨率地层对比剖面(南北向)

Fig. 2 The HR correlation profile in the study zone (north to south)
(图中：SP, SPd3, AC, ACD3 均为虚线；GR, GRd3, RILD, RILDd3 均为实线)

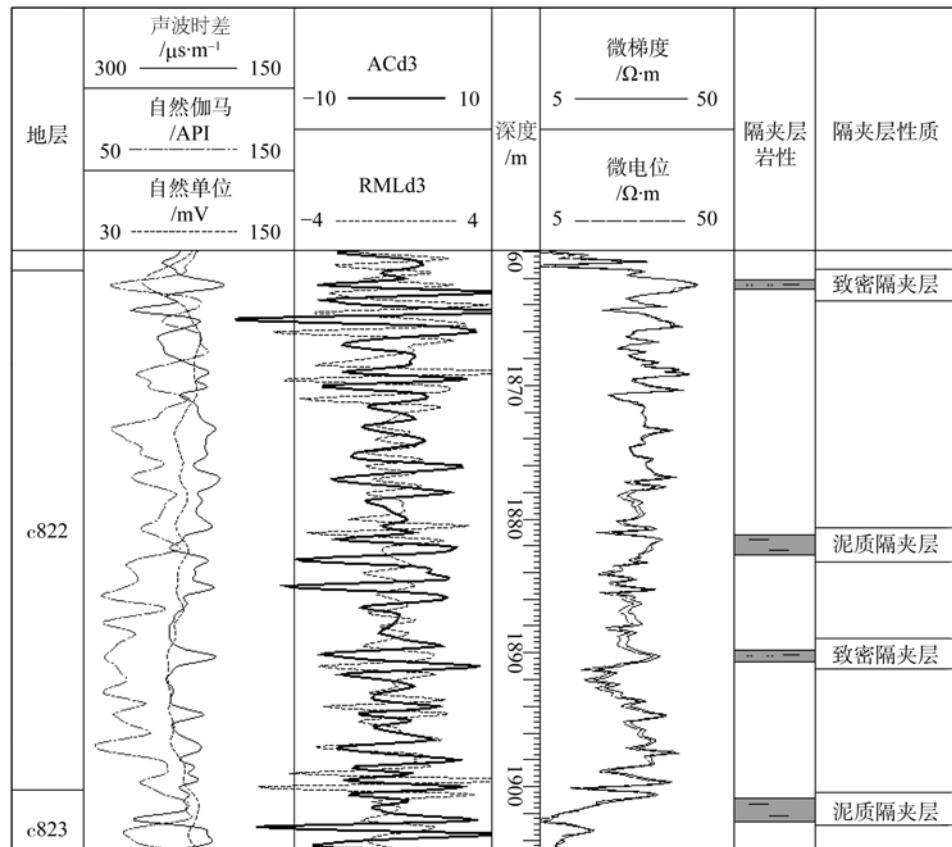


图3 研究区X165井隔夹层划分柱状图

Fig. 3 The column of lag and interbed classification of well X165

4 结语

从研究区多种资料实际出发，选用测井曲线小波变换后的第三层小波系数重构的测井曲线与常规测井曲线相结合，进行高分辨率地层划分和地层对

比，以及隔夹层分析表明，选用第三层小波系数重构的测井曲线可以直观、精确地反映岩性界面和层系界面；传统的测井曲线具有岩性和物性指示意义，

(下转第 73 页)

拉直，便形成了图2b所示的直线电机^[1]。这台直线电机的三相绕组中通入三相对称正弦电流后(电机内部有整流变换电路)也会产生气隙磁场^[1]。当不考虑由于铁心两端开断而引起的纵向边端效应时，这个气隙磁场的分布情况与旋转电机相似，即可看成沿展开的直线方向成正弦形分布。当三相电流随时间变化时，气隙磁场将按A、B、C相序沿直线移动。显然气隙磁场的移动速度与旋转磁场在定子内圆表面上的线速度是一样的，即为 v_s ，称为直线电机的同步速度(m/s)，且 $v_s = 2f\tau$ 。

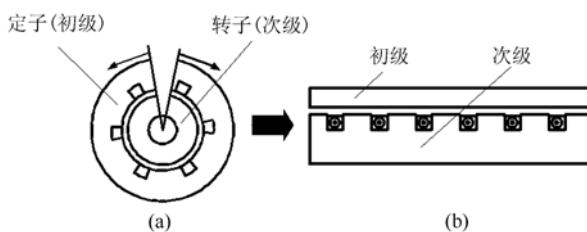


图2 直线电机原理

Fig. 2 The principium of line electromotor
a—沿径向剖开; b—把圆周展开成直线

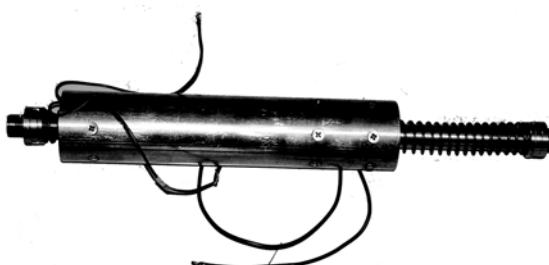


图3 直线冲击电机实物图

Fig. 3 Outline of line percussive electromotor

(上接第71页)

将二者相结合可建立新的地层划分与对比剖面，实现高分辨率岩性划分与地层对比。这种地层划分与对比方法，对低能沉积环境三角洲前缘沉积地层划分与对比取得了良好的效果。将这种方法引入到低渗透储层非均质性研究，可以很好地满足隔夹层划分与评价要求。

参考文献

- [1] 雍世和, 张超模. 测井数据处理与综合解释[M]. 山东东营: 石油大学出版社, 1996: 468-469.
- [2] 朱强, 毕彩芹. 陆相地层精细对比方法及应注意的问题[J]. 油气地质与采收率, 2002, 9(3): 27-30.
- [3] 房文静, 范宜仁, 邓少贵, 等. 测井多尺度分析方法用于准层序自动划分研究[J]. 地球物理学进展, 2007, 22(6): 1809-1814.
- [4] 焦翠华, 李冰. 零通小波用于测井曲线多尺度分层[J]. 测井技术, 1999, 23(3): 173-175.
- [5] 余继峰, 李增学. 测井数据小波变换及其地质意义[J]. 中国矿业大学学报, 2003, 32(3): 336-339.
- [6] 赵军龙, 谭成仟, 李娜, 等. 小波分析在高分辨率层序地层研究中的应用[J]. 地球科学与环境学报, 2007, 29(1): 90-94.
- [7] 何自新. 鄂尔多斯盆地演化与油气[M]. 北京: 石油工业出版社, 2003.
- [8] 罗静兰, 李继红. 西峰油田长 8 沉积相研究[D]. 西安: 西北大学, 2004: 123-127.
- [9] 彭玉华. 小波变换与工程应用[M]. 北京: 科学出版社, 1999.
- [10] 飞思科技产品研发中心. 小波分析理论与 MATLAB7 实现[M]. 北京: 电子工业出版社, 2005.
- [11] 朱光明, 李庆春, 胡建平. 数字信号分析与处理[M]. 西安: 陕西人民教育出版社, 2003.

由于现有的直线电机不能满足钻探机具的尺寸要求，这里进行了相应的改进。改进后的的主要技术参数为：加速度 15 g；最大推力 500 N。其实物如图3。

2 钻具试验

2.1 台架试验

钻具的安装调试在2008年8月下旬完成，随后在“中国地质大学(武汉)钻探实验大厅”进行了钻具的台架试验。在试验中测得如下参数：最大冲击功为20 J；最大冲击频率为10 Hz；动力电池有效工作时间为2 h。

2.2 孔内试验

2008年9—10月，在某矿区进行了孔内试验。试验采用Φ89钻具，该矿区岩石的可钻性为一级的中硬岩石。结果表明，孔底电动冲击回转钻具表现出可靠的工作稳定性，平均机械钻速达6.8 m/h，与同矿区未加孔底电动冲击回转钻具的同口径普通钻具相比机械钻速增长了36%。

3 结语

孔底电动冲击回转钻具取得了良好的实验效果，克服了传统液动气动冲击器存在的结构复杂、现场组装调试困难、循环介质要求高(如含砂量)、泵(风机)排量和压力要求很大等缺点。同时，孔底电动冲击回转钻具实现了在不提钻情况下改变冲击功和冲击频率，从而提高了钻进效率，节省了钻进成本，具有很好的应用前景。

参考文献

- [1] 叶云岳. 直线电机技术手册[M]. 北京：机械工业出版社，2003：10-11.