

DOI:10.19651/j.cnki.emt.2005535

# 一种基于数据压缩传输的高速大满贯测井系统

胡荣维 冯龙飞 刘君华 徐宁 白雪原  
(中国石油集团测井有限公司长庆分公司 西安 710201)

**摘要:** 针对目前大满贯测井系统受限于电缆传输带宽,不能实现大数据量快速、实时采集的问题,设计了一种专用于大满贯测井系统的井下遥测传输短节。在分析大满贯测井采样数据相关性的基础上,在遥测传输短节中通过硬件电路设计和算法的嵌入式开发,将大满贯组合中各种井下仪的上传数据帧按采样时间进行缓存,形成深度对齐的二维数据阵列,根据图像无损压缩原理,采用基于 CALIC 算法的自适应预测模型,对数据阵列进行无损压缩后上传。在 SL 油田 4 口井的大满贯实测数据上的仿真实验结果显示,所提方法较目前主流的测井数据压缩方法-LZW 算法数据压缩率平均提升了约 30%;在 SL 油田 5 口井的大满贯实际测井作业的应用测试结果为新的大满贯系统作业效率平均提升约 22%。结果表明,新的硬件设计和数据压缩传输算法极大提升了大满贯测井时效,实现了大满贯系统的高速测量,保证了大满贯测井在节约勘探开发成本方面的巨大经济优势。

**关键词:** 大满贯测井;无损压缩编码;自适应预测编码

**中图分类号:** TP391.41 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.4030

## High-speed slam well logging system based on data compression

Hu Rongwei Feng Longfei Liu Junhua Xu Ning Bai Xueyuan  
(Changqing Branch of CNPC Logging Co., Ltd., Xi'an 710201, China)

**Abstract:** Pointing to the problem that slam well logging system cannot realize rapid and real-time acquisition of large volume data under the limit of transmitting bandwidth of logging cable at present, a down-hole telemetry transmitting sub dedicated to slam logging is designed in this paper. Based on the correlation analysis of sampling data, depth aligned two dimensional data array is formed by up-loaded data frames buffering according to sampling time from different tools in combination of slam logging. According to image lossless compression theory, adaptive predicting model based on CALIC algorithm are utilized to up load data array after lossless compression by hardware circuit design and embedding programming development. Simulation experimental result is that data compression ratio is improved by about 30% compared with current mainstream compression method-LZW on actual data of slam logging from 4 wells of SL oilfield. Application testing result is that efficiency of new slam logging is improved by about 22% on actual slam logging operations of 5 wells from SL oilfield. Result shows that efficiency is greatly improved by new hardware design and data compression and transmitting algorithm which realizes high-speed data acquisition and insures huge economical advantage of slam logging in saving the cost of exploring and developing oilfields.

**Keywords:** slam well logging; lossless compression encoding; adaptive predicting encoding

## 0 引言

大满贯测井将电极系、声波、电法和放射性等各种不同物理测量原理的井下仪器组合在一起,形成长度在 14 m 以上的超长仪器串。在一次下井测量过程中,就可以采集微电极、微梯度、井径、自然伽玛、自然电位,双侧向/感应、微球、补偿中子、补偿密度和声波等多项常规测井数据,可避免多次的下井作业,减少测井作业占用井口的时间,具有很高的

测井生产时效和减少油田勘探成本的巨大经济效益优势<sup>[1]</sup>。大满贯测井已经成为国内多个测井平台,如 SDZ3000<sup>[2-3]</sup>的快速测井最佳标准方式。大满贯测井作业时,地面系统根据绞车传来的电缆深度信号向井下仪器发送数据采集命令,井下遥测短节通过井下仪器总线收集各个井下仪采集的物理量形成数据帧,经 PCM 编码后,由测井电缆上传到地面系统。但由于实际电缆传输速率最高只有 20.83 kps 左右,造成当测井速度超过 800 m/h 后,上一

收稿日期:2020-12-13

深度采样帧的数据还没有完全发送,当前深度点的数据已送达遥测短节,导致上传数据缺失或数据遭到破坏,在地面系统表现为有的测量曲线发生严重畸变<sup>[2]</sup>。因此,采用数据压缩算法,减少井下采集数据的上传大小是增加测井系统传输带宽的有效方式<sup>[4]</sup>,而无损压缩是保证地面系统解码后数据不失真的必要条件。

数据无损压缩算法如 ZLIB,已应用于故障诊断数据压缩<sup>[5]</sup>、波形数据压缩<sup>[6]</sup>、图像解混<sup>[7]</sup>和图像远距离传输<sup>[8]</sup>等场景。目前主流的测井数据无损压缩方法是 LZW 算法<sup>[9-11]</sup>,特别在声波测井数据压缩<sup>[12-14]</sup>方面应用得非常广泛。LZW 算法为一种基于字典的编码方法,在编码的同时,不断更新初始编码字典,通过字典的映射关系,将数据中出现的字符串用字典中对应的字符串编码代替,减少重复字符串的冗余。但在本文研究中发现 LZW 算法没有考虑测井数据在不同类型之间和深度上的相关性,导致压缩程度不高。

本文在分析不同类型测井数据行、列相关性的基础上,采用高速 DSP 和 FPGA 芯片,设计和开发了新的大满贯测井遥测传输短节的软硬件系统。在遥测短节中通过 FIFO 缓存,存入在一定采样时间内测量的所有数据,并根据深度对齐,形成二维数据阵列(每个测量类型的数据占用一列,行方向上即为深度变化),再根据图像无损压缩原理,采用基于 CALIC 算法的自适应预测模型,解除数据的高度相关,最后将预测差值进行自适应熵编码,形成压缩后的比特流上传。通过 SL 油田大满贯实测数据的仿真实验及实际作业的应用测试,验证本文软硬件系统在提升数据压缩率和井下数据传输带宽、提高大满贯测井作业时效等方面的有效性。本文软硬件系统的设计和开发有望在保证传输数据不失真的情况下,提升大满贯测井的施工速度,为大满贯测井发挥其自身优势提供有力的技术支撑。

## 1 测井数据相关性分析及数据压缩策略

本文首先对不同类型测井数据进行相关性分析,发现一类测井数据,如自然电位,在深度上连续、缓慢变化,两个相邻深度的测量值变化很小,具有很强的相关性,称之为行相关,这是由地层物性参数的连续性造成的。另一类数据,如微电极,在深度上剧烈变化,相邻采样点数据弱相关。但此类数据在不同类型之间的某个深度上,具有横向相关性,即在某些深度层段,不同测量类型如微球聚焦、深中感应等不同井眼径向探测范围的数据,表现为固定的数值搭配,这是由测量地层的储集特性决定的,称之为列相关。

图 1 所示为 Y17-XG31 井 2 298~2 320 m 井段的实测测井曲线。由图 1 中可以看到,作为泥质指示曲线的自然电位、井径和自然伽马曲线在纵向上起伏缓和,变化平缓,而电阻率曲线同样呈现出这一特征,说明纵向深度上相关性很强,即行相关。同时,从图中可以看出,自然伽马、自

然电位、数字聚焦、深感应和中感应曲线在横向上,具有很好的地层层位对应性,它们的变化趋势几乎相同。设同一深度上不同测量类型的采样值分别为  $S_1, S_2, \dots, S_N$ , 将第  $N$  个测量类型采样值的估计  $\hat{S}_N$  用其他类型采样值的线性组合表征,即  $\hat{S}_N = \alpha S_1 + \beta S_2 + \dots + \gamma S_{N-1}$ , 则必然存在系数  $\alpha, \beta, \dots, \gamma$ , 使误差  $e = S_N - \hat{S}_N$  最小化。对于第  $i (i \neq N)$  个测量类型采样值,同样有上述结论,说明不同类型采样值具有很强的横向相关性,即列相关。图 1 中,数字聚焦电阻率、中感应和深感应代表了井眼中同一深度不同的径向探测范围,分别测量的冲洗带、过渡带和原状地层电阻率。

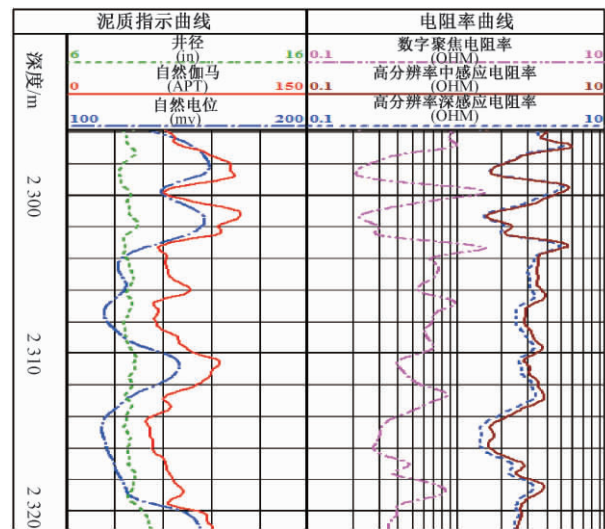


图 1 Y17-XG31 井 2 298~2 320 m 实测测井曲线

数据压缩时,要考虑测井数据的行、列相关性,对数据解相关,才能得到较高的压缩率,为此本文设计了一种大满贯测井数据压缩策略,如图 2 所示。

图 2 中,井下仪  $N$  在  $t$  时刻通过井下仪器总线传输到遥测短节中的数据为  $D_N$ , 则在遥测短节内使用 FIFO 缓存从  $1 \sim t$  时刻的所有井下仪采集数据,形成二维数据阵列,每一列为一种仪器的采样数据;这里,由于井下仪的时间采样率有所不同,因此,根据时深转换将二维阵列数据的深度对齐。这样,二维阵列的每一行表征了同一深度点上的采样数据。井下仪采集的数据一般为模数转换后的 16 位字节整型值,因此,可以将二维数据阵列,看作是一幅图像,采用图像无损压缩原理对二维阵列压缩编码,形成图 2 所示的上行数据帧,再经 PCM 调制后,发送到地面系统。本文没有采用各个井下仪采集数据分别压缩后,再传输到遥测短节的压缩策略,而是在遥测短节内对各个井下仪的原始采集信号混合压缩,综合考虑了数据的行、列相关性,同时降低了仪器硬件设计的复杂程度。相比于针对每种井下仪的数据类型,设计相应的压缩算法,本文的压缩策略具有更强的算法通用性。

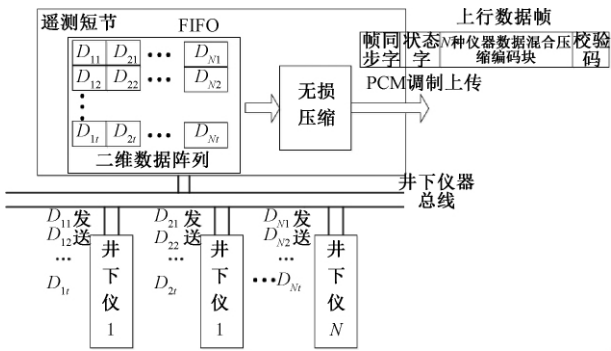


图2 大满贯测井数据压缩策略

### 2 CALIC 自适应预测无损压缩方法

由第1节的测井数据相关性分析可知，二维数据阵列中某个坐标点的数据值可以由纵向和横向上的邻近数据值预测出来，且预测误差较小。因此可以最大化相邻数据值间的相关性，从而实现当前坐标点数据值的预测<sup>[15]</sup>。

CALIC 算法<sup>[16-17]</sup>充分利用了邻近数据值间的相关性，采用梯度自适应预测器预测源数据值，在这一过程中，使用上下文选择，在梯度自适应预测器中加入预测误差修正值，梯度自适应预测器输出经过修正的预测误差，最后采用自适应熵编码对预测误差进行编码压缩，其算法如图3所示。CALIC 算法已经成为一种图像无损压缩国际标准，具有良好的图像无损压缩效果。

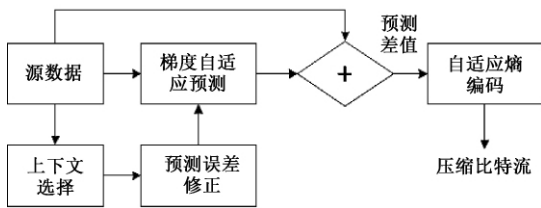


图3 CALIC 算法

梯度自适应预测器采用非线性预测模板，如图4所示，图中X为当前需要预测的数据。在计算X的水平 and 垂直局部梯度后，梯度自适应预测器根据水平梯度和垂直梯度的差值，经过非线性区间映射和对x邻近数据的加权，确定x的预测值。CALIC 算法根据预测数据的邻域数据位置选择，形成纹理上下文，表征空间纹理模式；同时，定义如下误差能量估计子：

$$\Delta = ad_h + bd_v + c |e_w| \quad (1)$$

式中： $d_h$  为水平梯度； $d_v$  为垂直梯度； $e_w$  为前一个数据的预测差值；系数  $a, b$  和  $c$  可以通过离线的标准线性回归方法，使得  $\Delta$  为基于  $d_h, d_v$  和  $e_w$  的误差强度  $|e|$  的最小均方估计求得。 $\Delta$  作为误差能量上下文和纹理上下文一起构成复合上下文，根据上下文量化，将复合上下文划分为多个类型，并在编码过程中，统计每个上下文类型出现的次数，并

累加该类型上下文对应的预测误差值，计算样本均值作为该类型上下文的条件期望。这样，在编码时，根据预测数据选择对应的上下文类别，计算的条件期望即为预测误差修正值。同时，CALIC 算法在自适应熵编码中，通过条件化在  $\Delta$  上的预测误差分布，将预测误差分为具有不同方差的类别。这样，使用估计的条件概率  $p(e | \Delta)$  比使用预测误差概率  $p(e)$  具有更高的编码效率。

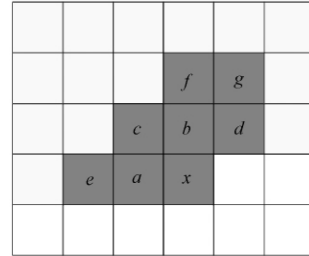


图4 梯度自适应预测器模板

### 3 大满贯测井遥测传输短节硬件设计

图5所示为遥测短节的硬件设计原理框图。其工作原理为，地面系统下发的各种仪器指令和数据在遥测短节首次经过模式变压器，差分输入、高、低通滤波，在程控增益的调节下，进行A/D转换后，数据送入FPGA完成PCM解码，再放入FPGA内部的FIFO，此时FPGA通知井下仪器总线控制器，读入FIFO内数据，经仪器总线，将指令和数据转发个井下各个仪器。这里，由FPGA软件编程，实现程控增益。当各个仪器数据上传时，由总线控制器将数据送入FPGA内的FIFO，FPGA由时钟脉冲，在FIFO内放入一定采样时间内的所有测量类型数据，FPGA根据深度对齐，形成二维数据阵列。此时，FPGA通知DSP，将数据阵列读入DSP片内RAM，运行预先读入RAM的外部FLASH内的数据压缩程序。压缩完成后，DSP将结果送回FPGA内的FIFO，由FPGA进行PCM编码调制，经D/A转换，低通滤波和差分驱动，以及模式变压，送入电缆，传回地面系统。为保证压缩算法的实时性和高效性，优选主频高，片内RAM容量大的DSP芯片。这样的硬件设计，FPGA和DSP分工明确，由DSP承担核心压缩任务，而FPGA担负计算量较少的数据转发，解码、编码以及各种控制逻辑的实现。

### 4 实验结果分析及应用实例

本文首先进行了仿真实验，在CPU主频2.5GHz，内存4G的PC机上，对SL油田Y17-XG31井等4口井的大满贯实测数据进行了LZW和本文压缩方法的实验对比，各种测量类型数据按照深度，形成本文中的二维数据阵列，结果如表1所示。

从表1可以看出，本文方法由于考虑了数据之间的相

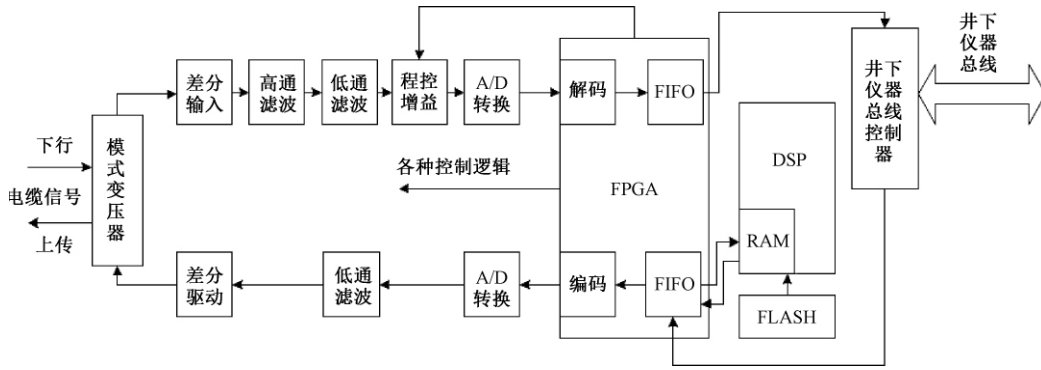


图 5 遥测短节硬件原理

表 1 仿真实验结果对比

井号	数据大小/MB	LZW 压缩率/%	LZW 用时/s	本文方法 压缩率/%	本文方法 用时/s
Y17-XG31	21	19.7	0.098	48.1	0.125
	53	20.1	0.254	49.6	0.314
Y25	10	19.2	0.047	47.9	0.060
	32	19.5	0.153	49.4	0.190
KD32	15	42.5	0.070	63.5	0.089
	41	29.8	0.196	61.7	0.243
ZX169	34	21.6	0.163	50.2	0.201
	67	21.8	0.321	51.1	0.397

关性,其压缩率明显优于 LZW 方法,在两个不同大小的数据文件上,压缩率平均提升了约 30%。可以看到,随着数据文件变大,LZW 方法的压缩率有所提升,这是由于数据文件中重复字符串的增多,使得字典中对应字符串编码缩短导致的。而本文方法则是由于数据量的增多,导致随深度各种测量数据相关性加强,使得其压缩率也有小幅增加。从 KD32 井 15 MB 大小数据上的实验发现,LZW 算法的压缩率达到 42.5%,远高于在其它实验数据上的 LZW 算法压缩率;经该实验数据研究发现,该测量数据对应地层中的大段泥岩层,自然电位、自然伽马等反映地层物性的曲线起伏很小,近似于直线,说明多种类型的测量值在深度上差异很小,使得 LZW 算法在这类数据上构造的编码字典大幅度减小,进一步导致压缩率大幅度增加。KD32 井 41 MB 大小的数据包含了这段地层对应的 15 MB 数据,但对应的其它地层物性正常变化,各种类型的测量

值出现较大起伏,因此 LZW 算法的压缩率出现急剧下降。这说明 LZW 算法的性能与地层变化密切相关,在实际应用中会出现性能不稳定的情况。而对于本文压缩方法来说,地层中大段泥岩层导致的深度上测量值近乎相似,表现为数据相关的极致形式,导致本文方法的数据解相关作用降低,因此相比 LZW 算法的结果,本文方法的压缩率提升不大。但在 41 MB 大小的数据实验中,由于本文方法对其他地层较大起伏的各种类型测量值进行了解相关,压缩性能不像 LZW 算法出现明显下降,压缩率比 LZW 算法同样提升了约 30%,说明本文方法具有更强的鲁棒性和更好的适用性。比较两种方法的用时,LZW 由于算法简单,因此用时比本文方法要少,但本文方法由于压缩率的大幅增加,一次传输的有效数据量随之增加,可以有效抵消井下遥测短节压缩算法的时间损耗。

重新设计 SL3000 型测井系统的遥测传输短节,在基于 DSP 和 FPGA 的硬件架构基础上,由嵌入式编程开发,实现了应用本文无损压缩算法的 SL3000 型系统大满贯测井专用遥测传输短节,并在 SL 油田 GuGu8 井等测井作业井眼环境较好的 5 口井进行了大满贯实际作业应用测试。在应用测试过程中,对于同一口井分别采用原有的 SL3000 型大满贯模式和新的快速大满贯测井系统进行测井时效对比测试。两种大满贯系统在井底开始测量时,先采用理论最高测井速度,再观察地层系统接收数据的失真程度,逐步调整测井速度,在保证遥测数据不失真的条件下,对比两个系统调整后的最高测井速度。

表 2 所示为 5 口井的测井井段长度、两个系统的最高测井速度,测井作业耗时以及采集数据的平均误差。

表 2 测井时效对比

井号	GuGu8	CB213	ZG473	N55	L801
井段长度/m	3 000	2 500	3 100	2 200	3 650
原有系统最高测井速度/(m·h <sup>-1</sup> )	750	730	758	760	745
原有系统作业耗时/h	4.00	3.42	4.09	2.89	4.90
新系统最高测井速度/(m·h <sup>-1</sup> )	917	892	921	931	905
新系统作业耗时/h	3.27	2.80	3.37	2.36	4.03
测量数据平均误差/%	1.02	0.85	0.94	0.89	0.97

由表2可以看出,两个系统的测量数据平均误差在测井重复测量标准规定的误差范围内,说明两个系统的测量数据几乎相同。在这种情况下,新的大满贯系统的最高测井速度整体高于原有系统,测井作业耗时大幅度缩短。经数据统计计算,新系统的测井效率较原有系统,平均提升了约22%。

新的大满贯测井系统圆满完成了FJ油区FY1重点超深探井的测井作业任务,在为测井解释提供真实、可靠的测井数据的同时,对于中间加完井合计6320m的测量井段,将常规的两趟仪器下井作业合并为一趟,比常规测井

作业时间节省约12h,大幅度减少测井作业占用井口时间,缩短了一次开钻和二次开钻的时间间隔以及FY1井钻井、测井和录井勘探工程向甲方单位的交付时间,并节省甲方单位的勘探成本约15万元。图6所示为FY1井3437~3455m井段的大满贯部分实测曲线及测井解释结论。其中根据大满贯实测数据反映的地层物性和储集流体性质,将33号层、35号层和37号层解释为油层;对这些层段进行试油,日产油2.5t,水0.3m<sup>3</sup>,符合测井解释结论,验证了新的大满贯测井系统在提升测井作业时效的同时,测量数据的真实性和可靠性。

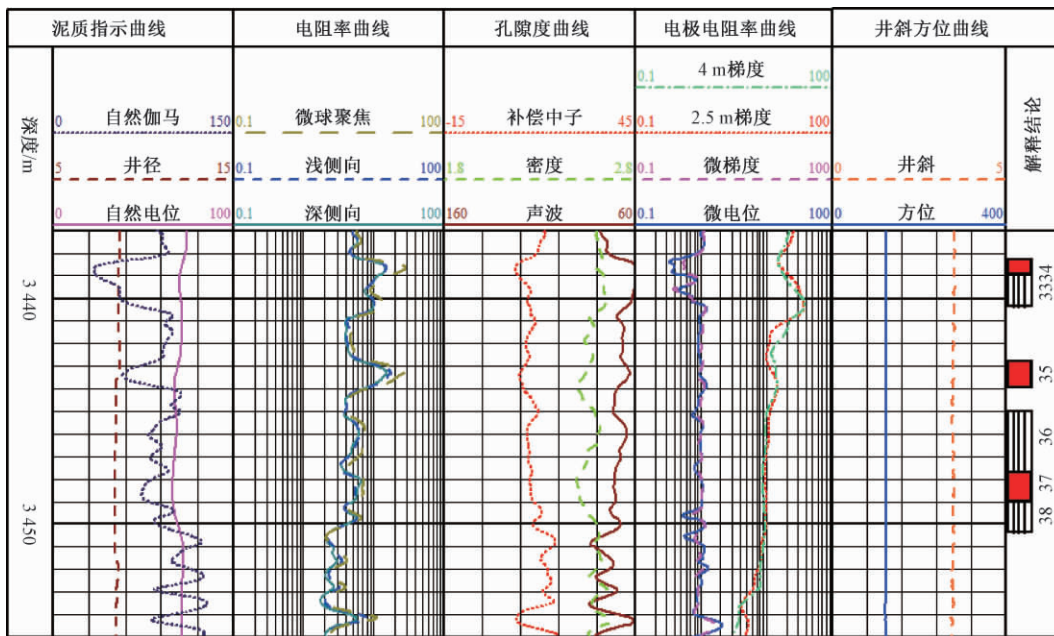


图6 FY1井3437~3455m井段的大满贯部分实测曲线及测井解释结论

## 5 结 论

本文针对大满贯测井数据存在的行、列相关性,通过对形成的二维数据阵列,采用基于自适应预测编码的数据无损压缩算法,有效提升数据压缩率,增加大满贯遥测短节单位时间内的上传数据量,提高了仪器传输带宽和测井时效,避免了大满贯测井在测速过高的情况下出现的上传数据缺失或破坏情况。通过硬件设计和嵌入式编程开发,对SL3000型测井系统遥测短节进行重新改造,极大提升了其大满贯测井模式的整体性能,使大满贯测井在油田的勘探开发中发挥更加重要的作用。

### 参考文献

- [1] 信召玲, 苏鹤成, 李金宜, 等. 大满贯测井方式在渤海油田探井中的应用原则探讨[J]. 云南化工, 2018, 45(1):144.
- [2] 刘文. SDZ3000快速测井平台的几个典型问题及解决办法探析[J]. 中国石油和化工标准与质量, 2018,

38(19):111-112.

- [3] 张正虎. SDZ-3000测井平台在中原油田的成功应用[J]. 石油仪器, 2011, 25(3):45-48.
- [4] 陈建华. 数据无损压缩传输方法在阵列声波测井仪中的应用[J]. 电子测量技术, 2020, 43(13):81-84.
- [5] 陈佳楠, 马永涛, 李松, 等. 嵌入式存储器动态故障诊断数据压缩设计[J]. 电子测量与仪器学报, 2020, 34(7):203-209.
- [6] 高翠云, 陈思伟, 常玉, 等. 基于相似度分段的自适应波形数据压缩方法[J]. 电子测量与仪器学报, 2019, 33(4):178-185.
- [7] 闫钧华, 黄伟, 张寅, 等. 基于空间约束的高光谱图像解混算法[J]. 仪器仪表学报, 2019, 40(3):188-195.
- [8] 薛时凯, 张新玉. 基于ADV212的图像远距离传输系统的设计[J]. 国外电子测量技术, 2020, 39(1):109-113.
- [9] 刘玉梅, 卢结成. 测井数据的实时无损压缩研究和硬件实现[J]. 电子技术, 2011(3):54-55,51.

- [10] 刘玉梅. 基于 FPGA 的实时无损压缩算法的研究与设计[D]. 合肥:中国科学技术大学, 2011.
- [11] 张宏振. 基于测井数据的无损压缩算法研究及实现[D]. 南京:南京邮电大学, 2016.
- [12] 邹学玉,冯振,张少华,等. 基于 LZW 算法的声波测井数据压缩研究[J]. 测井技术, 2013, 37(3):294-296.
- [13] 苏扬,曹芳彤,苏彤. 声波测井数据压缩算法的研究与实现[J]. 计算机测量与控制, 2015, 23(12):4114-4116.
- [14] 冯振. 基于 LZW 的数据压缩硬件系统设计[D]. 荆州:长江大学, 2013.
- [15] 马智忠. 基于位图的彩色图像无损压缩算法研究[D]. 兰州:兰州大学, 2017.
- [16] 李清. 基于预测的无损彩色图像压缩算法研究[D]. 重庆:重庆大学, 2015.
- [17] 滕涛. 基于上下文的静止图像和极光图像压缩[D]. 西安:西安电子科技大学, 2012.

#### 作者简介

胡荣维,本科,工程师,主要研究方向为石油测井资料采集与处理。

E-mail:glxjgy@126.com