

基于随钻测井资料的地层孔隙压力监测方法及应用

叶 志¹, 樊洪海¹, 纪荣艺¹, 李朝玮¹, 蔡 军²

(1. 石油工程教育部重点实验室(中国石油大学(北京)), 北京 102249; 2. 中海石油(中国)有限公司湛江分公司, 广东湛江 524057)

摘 要: 为了在钻井过程中实时准确地监测地层孔隙压力, 保障钻井安全, 研究了一种基于随钻测井资料的地层孔隙压力监测方法。以 WITS 数据格式和 TCP 传输方式为基础, 研发了实时数据采集与处理程序, 实现了随钻测井数据的采集与远程传输; 根据随钻测井数据的传输特性, 建立了一种基于单点算法的地层孔隙压力监测模型。该模型将随钻测井数据离散化, 可以实时计算各数据点对应的地层孔隙压力, 同时兼顾了压力监测的准确性与实时性。南海莺琼盆地数口井的应用表明, 孔隙压力监测精度较高, 与实测压力相比, 误差均在 10% 以内。研究结果表明, 该方法能够提供准确的孔隙压力实时监测数据, 可以为钻井工程设计与施工提供指导。

关键词: 随钻测井资料 孔隙压力 实时监测 单点算法 数据采集

中图分类号: TE271 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-0890(2014)02-0041-05

Investigation and Application of Pore Pressure Monitoring Method Based on LWD Data

Ye Zhi¹, Fan Honghai¹, Ji Rongyi¹, Li Chaowei¹, Cai Jun²

(1. MOE Key Laboratory of Petroleum Engineering (China University of Petroleum (Beijing)), Beijing, 102249, China; 2. Zhanjiang Branch, CNOOC, Zhanjiang, Guangdong, 524057, China)

Abstract: To accurately monitor pore pressure while drilling and improve drilling safety, this paper presented a pore pressure monitoring method based on logging while drilling (LWD) data. Firstly, a real-time data collection and processing program was developed based on WITS data standard and TCP transmission mode, which was able to realize the acquisition and transmission of LWD data. Then, according to the transmission characteristics of LWD data, a pore pressure monitoring model was established based on single-point algorithm. In this model, LWD data were discretized and used to estimate corresponding pore pressure values in real time. The application of this method in several wells of an overpressure basin of South China Sea showed the arithmetical differences between monitoring results and real measured pore pressure values were no more than 10%, proving the method could provide accurate pore pressure data in real time, meet current field requirements, and guide drilling design and operation.

Key words: LWD data; pore pressure; real-time monitoring; single point algorithm; data acquisition

在石油钻井工程中, 地层孔隙压力与钻井安全和效率密切相关。准确地评估地层孔隙压力, 有助于确定合理的套管层次和钻井液密度, 减少和预防井下故障的发生。按照钻井的先后顺序, 通常将地层孔隙压力评价方法分为 3 类: 钻前预测、随钻监测和钻后检测^[1-5]。相比于钻前预测和钻后检测, 随钻监测能够实时提供较为准确的孔隙压力信息。

目前常用的孔隙压力监测方法大多是基于录井资料, 例如 d_c 指数法^[6]、泥页岩密度法^[7]、标准钻速法^[8]等。但在遇到某些复杂地层或者采用特殊钻井

工艺时, 因受多种因素影响, 监测精度很难满足现场需要。随钻测井是在钻井过程中对岩石物性参数进行测量, 具有准确性、实时性和适用性等优点。目前随钻测井已几乎涵盖所有的电缆测井项目, 并且服务成本也在逐步降低^[9-11], 因此利用随钻测井资料

收稿日期: 2013-03-13; 改回日期: 2014-01-02。

作者简介: 叶志(1985—), 男, 湖北黄冈人, 2007年毕业于长江大学机械工程专业, 2012年获中国石油大学(北京)油气井工程专业博士学位, 主要从事岩石力学、钻井信息工程等方面的研究。

联系方式: (010)89733221, yezhi1985@126.com。

监测孔隙压力是未来发展的趋势。国外已经开展了该技术的研究和应用,而国内尚处于起步阶段。

笔者研究了一种基于随钻测井资料的地层孔隙压力监测方法,该方法将随钻测井数据离散化,实时计算各数据点对应的地层孔隙压力;此外,可以在监测过程中实时校正计算结果和模型,提高孔隙压力随钻监测的精度。

1 随钻测井数据的实时采集与处理

1.1 数据传输

1) 测井传感器测量地质参数,并将测量结果传送给井下下位机(编码器)。下位机对随钻测井数据进行编码,将其转换为可以传输的特定信号,如钻井液脉冲信号、电磁信号等。

2) 随钻测井信号通过特定传输方式传送至地面井口,由地面上位机(解码器)进行接收,并对信号进行解码,将其转换为随钻测井数据,提供给井场服务器。

3) 井场服务器根据需要将各种随钻测井数据按照 WITS 格式的数据结构进行编排,再利用通讯设施进行传输。

4) 根据采集的随钻测井数据实时监测地层孔隙压力。

1.2 数据处理方法

由于受随钻测井仪器、野外作业环境、井壁坍塌以及钻井液侵入等多种因素的影响,随钻测井数据存在着误差和波动,甚至会出现一些错误的异常点。为了获得准确可靠的随钻测井数据,需要对随钻测井资料进行处理。根据地层孔隙压力监测对随钻测井数据的要求,制定了随钻测井数据处理的基本流程:

1) 范围检查。根据经验或统计方法确定实时数据的有效范围(最大值和最小值),在实时监测过程中根据数据范围自动剔除超出范围的数据点。

2) 环境因素校正。在随钻测井过程时,测量的数据除了与地质因素相关,还受到温度、井径、围岩、钻井液侵入等环境因素的影响,为了得到准确的随钻测井数据,需要进行环境因素校正。

3) 平滑、滤波和插值。由于施工作业的影响,随钻测井数据会出现一些与地层性质无关的波动和信号干扰,可以通过平滑或滤波有效地抑制和消除信号干扰。另外,随钻测井数据受机械钻速不均匀以及传输方式的影响,传输间隔并不一致,有时候单

位深度内采集到的测井参数数据点太少,此时可以借助插值算法进行插值计算。

4) 时深转换与校正。如果测井仪器没有提供深度域的测井资料,需要结合录井和钻井上获取的时间深度数据,进行时深转换和校正。

5) 标准化。由于不同测井仪器间以及不同测井参数之间的差异,各测井参数之间刻度标准和单位标准等会有一些的差别,有必要对测井曲线进行标准化处理。

1.3 实时数据采集与处理程序

针对随钻测井数据的保密性和需求重复性,研发了基于 WITS 格式和 TCP 传输方式的实时数据采集与处理程序。该程序主要具备以下几个特点,可以很好地满足随钻测井数据的需求:

1) 数据采集。通过井场数据服务器分配的 IP 地址和端口号进行连接,可以实现随钻测井数据的远程传输,在联网的情况下可以在任何地点实时监测地层孔隙压力。

2) 数据共享。采集到数据之后,借助网络通讯技术实现网络内的数据共享和同步,可供多个用户同时利用采集到的数据进行工程计算,解决了资源紧张的问题。

3) 数据应用。该程序处于数据流的中间层,能够避免各个工程计算程序直接采集数据而造成冲突。

4) 数据处理。在进行地层孔隙压力监测之前,提供给用户一个可操作的数据处理界面,实现必要的数据处理。

实时数据采集与处理程序的软件体系结构如图 1 所示,图中最外层虚线框表示单个用户界面,各用户界面内的粗实线框表示单个程序进程,细实线框表示进程内的各个功能模块。首先通过远程传输将实时数据采集到系统内,然后根据需要可以通过网络通讯实现网络内的数据共享,最后通过控制台完成数据处理,并实时将准确的随钻测井数据用于地层孔隙压力监测^[12-13]。

2 地层孔隙压力监测方法

2.1 单点算法

随钻测井数据一般是以等时间或者深度间隔采用 WITS 格式进行传输。例如,采用 EcoScope 工具进行随钻密度测井时,采样间隔为 0.152 4 m,这

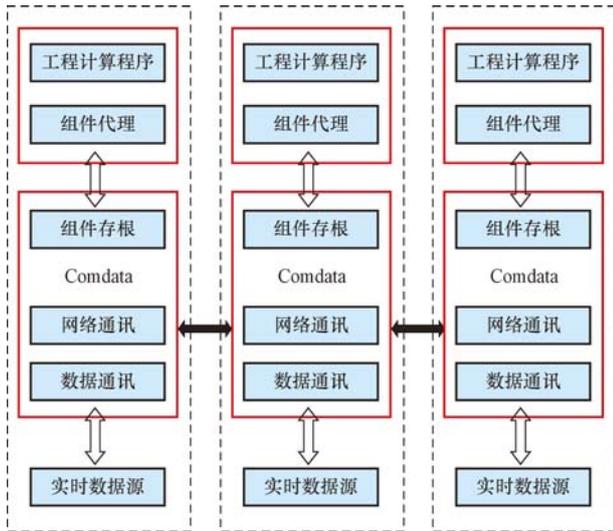


图 1 实时采集与处理程序的软件体系结构

Fig. 1 Architecture of real time data acquisition & processing program

样每次采集的就是单个测井密度点,采集的信息包括数据点对应的深度以及密度测井值等。

针对随钻测井数据的采样特点,提出了一种单点算法。该算法假设每一个随钻测井数据点(可以是声波、密度或者电阻率)对应一个地层孔隙压力点,每一个地层孔隙压力点只与该点对应的随钻测井数据相关,不考虑前后采样点之间的互相影响和逻辑关系,在确定地层孔隙压力计算模型之后,每采集一个随钻测井数据点,计算出一个地层孔隙压力点,这样即可根据实时采集的数据点逐点对地层孔隙压力进行随钻监测。

2.2 地层孔隙压力监测模型

随钻测井和常规电缆测井都是对岩石物理参数进行测量,利用这些参数的变化来评估地层孔隙压力。因此,基于常规电缆测井资料的地层孔隙压力计算与分析模型同样适用于随钻测井资料,唯一不同的是用实时的随钻测井数据代替电缆测井数据。根据邻近已钻井资料和区域地质信息进行分析,优选出合适的地层孔隙压力计算模型,将其应用于目标井的随钻地层压力监测。以利用声波资料评估地层孔隙压力的简易方法为例^[14],基于单点算法的思路,得到如下形式的单点压力监测模型:

$$\begin{cases} v_i = a + k\sigma_i - be^{-d\sigma_i} \\ p_{pi} = p_{oi} - \sigma_i \end{cases} \quad (1)$$

式中: v_i 为任一随钻声波测井数据点 i 对应的声波传播速度, km/s; σ_i 为利用 i 点随钻声波测井数据

计算出来的有效应力, MPa; a, k, b, d 为模型参数; p_{pi} 为任一随钻声波测井数据点 i 对应的地层孔隙压力, MPa; p_{oi} 为 i 点所在深度地层对应的上覆岩层压力, MPa。

当然,基于随钻测井资料的地层孔隙压力监测不局限于特定的模型,也不局限于随钻声波数据,也可以利用随钻密度数据或者随钻电阻率数据进行孔隙压力监测。采用何种模型和何种随钻测井数据来实时监测地层孔隙压力,需要对目标井所在区域的地质情况、异常高压成因以及随钻测井项目等多种因素进行综合分析,然后再作出合适的选择。

2.3 监测流程

基于随钻测井资料的地层孔隙压力监测方法的技术流程如图 2 所示,主要包括以下步骤:

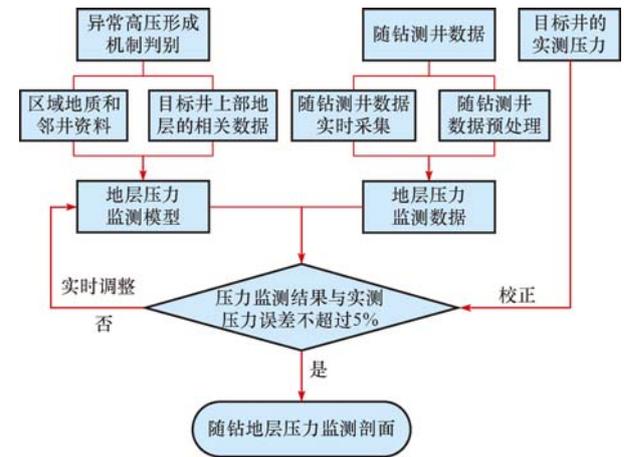


图 2 基于随钻测井资料的地层压力监测方法的技术流程

Fig. 2 Technical processes of pore pressure monitoring method based on LWD data

1) 建立初始地层孔隙压力监测模型。根据区域地质信息和邻井资料选择合理的初始地层孔隙压力监测模型,并利用邻井或者目标井上部地层的电缆测井、地层压力计算结果以及实测压力等数据确定出合适的模型参数。

2) 实时采集和处理随钻测井数据。利用开发的实时数据采集与处理程序采集处理随钻测井数据,为地层压力监测提供可靠度较高的随钻测井数据。

3) 监测随钻地层孔隙压力。将处理后的随钻测井数据导入地层孔隙压力监测模型,对地层孔隙压力进行实时监测,获取实时的地层孔隙压力监测结果。

4) 实时校正和调整。根据钻井过程中获取的实测地层孔隙压力或钻井液密度,调整和校正地层孔隙压力的监测结果。根据已获取的随钻测井数据

和压力监测结果自动回归压力监测模型的参数,并将其用于下部待钻开地层的孔隙压力监测,从而保证压力监测的精度。

3 现场应用

在理论方法研究的基础上,开发出随钻地层孔隙压力监测系统软件。该软件集随钻测井数据的实时采集与处理、地层孔隙压力的随钻监测、地层孔隙压力监测模型的确定、实时曲线显示以及压力剖面输出等功能于一体,便于现场应用。2010年3—12月,在南海莺琼盆地进行了现场测试和全程实时监测。

目前,EcoScope 和 sonicVISION 随钻测井仪在南海应用最为广泛。其中,EcoScope 仪器的随钻测井参数包括自然伽马、井径、密度和电阻率等,而 sonicVISION 仪器的随钻测井参数包括声波、自然伽马和电阻率等。鉴于在评估地层孔隙压力时,密度和电阻率资料的敏感性稍差,有时不能反映孔隙压力的变化。因而,在进行孔隙压力随钻监测时应优先选用声波数据,其次选择密度和电阻率数据。

3.1 YC_A 井

YC_A 井位于琼东南盆地崖南凹陷崖城 26-2 背斜构造上,是一口典型的高温高压井。YC_A 井应用了 sonicVISION 随钻声波测井仪器,测量深度 3 400~4 512 m。利用邻近已钻井的相关数据确定了地层孔隙压力监测模型,监测模型选用 Bowers 模型^[3],并回归出了适合该区块的模型系数,具体形式如下:

$$\begin{cases} v_i = v_0 + A\sigma_i^B = 1\,524 + 0.33\sigma_i^{0.74} \\ p_{pi} = p_{oi} - \sigma_i \end{cases} \quad (2)$$

式中: v_0 为泥线附近的声波传播速度,Bowers 模型中给定值为 1 524 m/s(5 000 ft/s); A 和 B 为 Bowers 模型的参数。

确定监测模型后,利用随钻地层压力监测系统软件对其地层孔隙压力进行了实时监测,监测结果见图 3。为符合工程习惯,并与钻井液密度对比,在该监测软件中孔隙压力与上覆岩层压力均用钻井液当量密度表示。

3.2 DF_B 井

DF_B 井位于莺歌海盆地西北部的东方 1-1 构造上,该井采用 EcoScope 随钻测井仪器,测量深度 2 400~3 000 m。由于该仪器不包括随钻声波资料

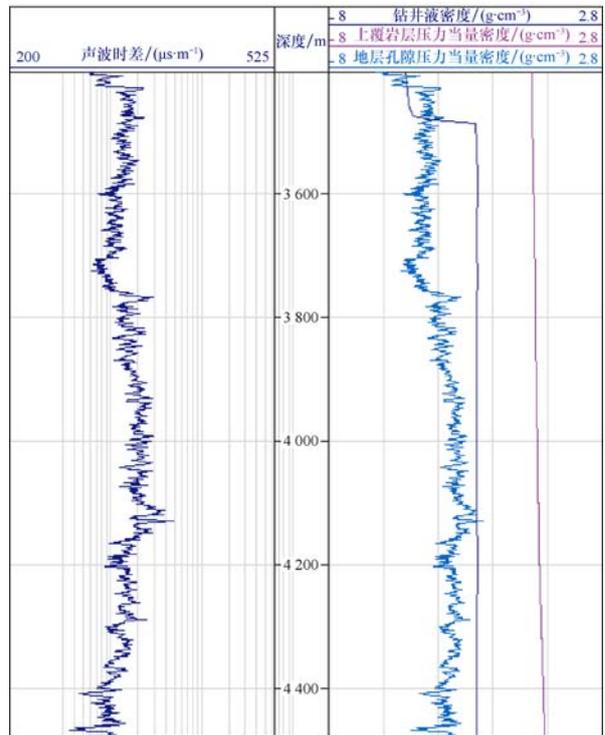


图 3 YC_A 井地层孔隙压力监测剖面

Fig. 3 Pore pressure monitoring profiles of Well YC_A

项目,并且密度资料的敏感性稍差,所以采用电阻率测井资料进行压力监测。利用邻井资料和该井上部地层的电阻率等资料确定了正常趋势线,并选用了 Eaton 电阻率模型进行压力监测^[15],单点 Eaton 电阻率模型计算公式为:

$$p_{pi} = p_{oi} - (p_{oi} - p_{ni}) \left(\frac{R_i}{R_{ni}} \right)^{1.2} \quad (3)$$

式中: p_{ni} 为 i 点对应的正常孔隙压力,MPa; R_i 任一随钻电阻率测井数据点 i 对应的电阻率, $\Omega \cdot m$; R_{ni} 为 i 点对应的正常趋势线上的正常趋势电阻率, $\Omega \cdot m$ 。

利用随钻地层压力监测系统软件对 DF_A 井进行全程的地层孔隙压力监测,监测结果如 4 所示,图中孔隙压力与上覆岩层压力均用钻井液当量密度表示。

3.3 监测结果分析

收集了 YC_A 井和 DF_B 井 2 口井的实测压力数据,并与地层孔隙压力监测值进行对比,对比结果如表 1 所示。从表 1 可知,2 口井压力监测结果最大误差为 7.54%,最小误差为 0.86%,在 10% 以内,表明地层孔隙压力监测能够满足精度要求,可以满足工程需要。现场应用效果表明,该方法能够利用随钻测井资料实时监测地层孔隙压力,并且具有较高的监测精度和适用性,可以进行推广应用。

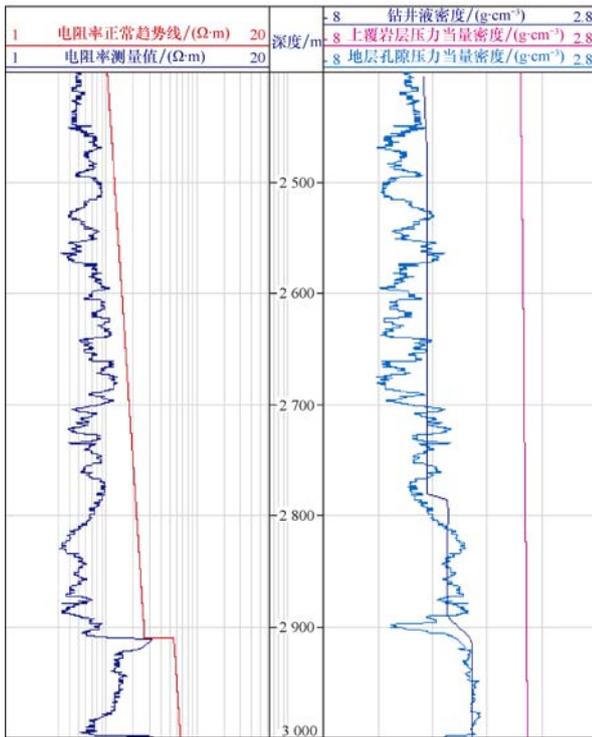


图 4 DF_B 井地层孔隙压力监测剖面

Fig. 4 Pore pressure monitoring profiles of Well DF_B

表 1 2 口井的地层孔隙压力监测结果

Table 1 Pore pressure monitoring results of 2 wells

井名	深度/m	孔隙压力当量密度/(g·cm ⁻³)		相对误差, %
		实测值	监测值	
YC_A	3 236	1.624	1.61	0.86
	3 239	1.618	1.74	7.54
	2 912	1.90	1.78	6.32
DF_B	2 935	1.91	1.85	3.14
	2 939	1.91	1.88	1.57
	2 945	1.91	1.87	2.09

4 结论及建议

1) 为了提高地层孔隙压力随钻监测的精度,提出了基于随钻测井资料的地层孔隙压力监测方法。根据随钻测井数据的实时单点传输特性,采用单点算法进行计算,实现了地层孔隙压力的随钻实时监测。

2) 现场应用表明该方法具有较高的精度。此外,在进行地层孔隙压力监测时,随钻声波测井资料要优于随钻密度和电阻率测井资料。

3) 在今后的研究中,需要考虑地层岩性的变化以及不同成压机理的影响,以进一步提高地层孔隙压力的监测精度。

参 考 文 献

References

[1] Hottmann C E, Johnson R K. Estimation of formation pres-

sures from log-derived shale properties[J]. Journal of Petroleum Technology, 1965, 17(6): 717-722.

[2] Fertl W H. Abnormal formation pressures: developments in petroleum science[M]. Amsterdam: Elsevier Sci, 1976.

[3] Bowers G L. Pore pressure estimation from velocity data: accounting for overpressure mechanisms besides undercompaction[J]. SPE Drilling & Completion, 1995, 10(2): 89-95.

[4] 叶志, 樊洪海, 蔡军, 等. 一种异常高压形成机制判别方法与应用[J]. 中国石油大学学报: 自然科学版, 2012, 36(3): 102-107. Ye Zhi, Fan Honghai, Cai Jun, et al. Investigation and application of a discrimination method for abnormal high formation pressure forming mechanism[J]. Journal of China University of Petroleum: Edition of Natural Science, 2012, 36(3): 102-107.

[5] 叶志. 提高地层孔隙压力计算精度新方法研究与应用[D]. 北京: 中国石油大学(北京), 2012. Ye Zhi. Research and application of new methods to improve formation pore pressure calculation precision[D]. Beijing: China University of Petroleum(Beijing), 2012.

[6] Rehm B, McClendon R. Measurement of formation pressure from drilling data[R]. SPE 3601, 1971.

[7] Griffin D G, Bazer D A. A comparison of methods for calculating pore pressures and fracture gradients from shale density measurements using the computer[J]. Journal of Petroleum Technology, 1969, 21(11): 1463-1474.

[8] Vidrine D J, Benit E J. Field verification of the effect of differential pressure on drilling rate[J]. Journal of Petroleum Technology, 1968, 20(7): 675-682.

[9] 刘之的. 随钻测井响应反演方法及应用研究[D]. 成都: 西南石油大学, 2006. Liu Zhidi. Studying on inversion method and application of logging while drilling response[D]. Chengdu: Southwest Petroleum University, 2006.

[10] Briggs V, Rao R V N, Grandi S K, et al. A comparison of LWD and wireline dipole sonic data[R]. Cambridge: Massachusetts Institute of Technology, Earth Resources Laboratory, 2004.

[11] Alford J, Goobie R B, Sayers C M, et al. A sound approach to drilling[J]. Oilfield Review, 2005, 17(4): 68-78.

[12] 樊洪海. 钻井工程实时监测与井场信息系统开发[J]. 石油钻探技术, 2003, 31(5): 17-19. Fan Honghai. Monitoring of real-time drilling engineering and development of field data service system[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2003, 31(5): 17-19.

[13] 纪荣艺, 樊洪海, 杨皆平, 等. 井场实时数据采集的组件化软件设计[J]. 石油钻探技术, 2007, 35(3): 58-62. Ji Rongyi, Fan Honghai, Yang Jieping, et al. Software design for real-time data acquisition in well site[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2007, 35(3): 58-62.

[14] 樊洪海. 利用声速检测欠压实泥岩异常高压的简易方法与应用[J]. 石油钻探技术, 2001, 29(5): 9-11. Fan Honghai. A simple pore pressure estimation method for a disequilibrium compaction shale using sonic velocity[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2001, 29(5): 9-11.

[15] Eaton B A. The equation for geopressure prediction from well logs[R]. SPE 5544, 1975.

[编辑 滕春鸣]