

长庆油田水平井二流量试井数据去噪方法

何生平,柳良仁,谭习群,杨军,安小平

中国石油长庆油田分公司勘探开发研究院 陕西西安 710021

通讯作者:Email:lje_sol@126.com

项目支持:中国石油长庆油田公司勘探开发研究院科研项目“水平井试井解释模型研究及软件编制”(技 2016-30)

引用:何生平,柳良仁,谭习群,等.长庆油田水平井二流量试井数据去噪方法[J].油气井测试,2019,28(4):7-13.

Cite: HE Shengping, LIU Liangren, TAN Xiqun, et al. Denoising method for two-flow well testing data of horizontal wells in Changqing Oilfield [J]. Well Testing, 2019, 28(4): 7-13.

摘要 长庆油田水平井二流量测试中存在着测试数据质量差、试井解释难度大、解释结果偏差较大等问题。在研究分析 104 井次测试数据质量的基础上,针对试井分析资料,提出一种基于最小二乘曲线拟合原理的数据去噪处理方法,对曲线形态较好、光滑性较差的数据进行去噪处理。将一口井二流量测试数据去噪前后的解释结果与同一口井的压力恢复测试解释结果进行对比,结果表明,去噪前的解释结果与压力恢复解释结果差异较大,最大相对误差可达 95%;而去噪后的解释结果与压力恢复解释结果较为接近,最大相对误差仅为 7.9%,验证了该处理方法的准确性。该方法有效挖掘了质量较差的测试资料中的有用数据,提高了长庆油田水平井二流量测试数据解释结果的可靠性。

关键词 长庆油田;二流量测试;压力恢复测试;试井解释;最小二乘法;数据去噪;光滑度

中图分类号:TE353 **文献标识码**:A **DOI**:10.19680/j.cnki.1004-4388.2019.04.002

Denoising method for two-flow well testing data of horizontal wells in Changqing Oilfield

HE Shengping, LIU Liangren, TAN Xiqun, YANG Jun, AN Xiaoping

Exploration and Development Research Institute of Changqing Oilfield Company, PetroChina, Xi'an, Shaanxi 710021, China

Abstract: There are problems in the two-flow testing of horizontal wells in Changqing Oilfield, such as poor quality of testing data, difficulty in well test interpretation, and serious deviation of interpretation results. After analyzing the data quality of 104 wells test, a data denoising method based on the principle of least squares curve fitting for the well test analysis data was proposed, which can denoise the data with better curve shape and worse smoothness. In practical application, the interpretation results of the two-flow testing data before and after denoising of the same well was compared with the results of its pressure build-up test interpretation. The results show that the interpretation result before denoising was significantly different from the pressure build-up interpretation result, and the maximum relative error can be up to 95%; however, after denoising, the interpretation result was close to the pressure build-up interpretation result, and the maximum relative error was only 7.9%. This comparison verified the accuracy of the processing method. This method effectively excavated useful data from test data with poor quality and improved the reliability of interpretation results of two-flow testing data of horizontal wells in Changqing Oilfield.

Keywords: Changqing Oilfield; two-flow testing; pressure build-up test; well testing interpretation; least square method; data denoising; smoothness

二流量测试技术目前在油田应用较多,对于二流量测试方法的原理以及现场应用,许多学者进行了研究^[1-2]。早在 1963 年,Russell D. G.提出了二流量测试方法的理论推导以及实际应用方法^[3]。1974 年,Odeh A. S.等基于 Russell D. G.提出的二流量方法,通过现场的实例应用说明了二流量测试方法的可行性^[4]。近年来,张遂、薛波、钟诚等研究了二流量测试在国内油田上的实际区块的应用效果^[5-7]。研究结

果表明,二流量试井技术是常规试井技术的有效补充。但是,上述研究中均未考虑到由于测试数据质量差导致最终解释多解性强、解释结果不可靠的问题。

针对测试数据质量差的问题,也有许多学者进行了研究。早期,李论、强琳、成绥民等基于神经网络识别试井数据^[8-10],但该方法有训练时间长、容量少的缺点,需要进一步研究解决。张杰等利用拉普拉斯变换方法处理离散试井数据^[11],方法简单实

用,但仅适用于低产低压井早期短时测试资料的分析。王正茂、聂法健、申颖浩等采用 B 样条曲线对实测数据磨光,数据磨光效果较好^[12-14],但针对不同数据选择合适的磨光次数难度较大。孙达提出了试井解释数据预处理技术,归纳出数据预处理时,应剔除非点、选取初始点、加载生产时间、筛选数据点、适度“光滑化”导数曲线,保证试井曲线形态正确^[15]。近年来,小波变换方法在试井数据处理中应用较多,杨济源、梁水波、许彦凯、张冰等利用小波变换法处理试井数据,应用效果较好^[16-20]。但是,小波无法捕捉到试井数据中的奇异信号,需要多尺度的分析试井信号,方法较复杂,不易实现。

长庆油田水平井产量较高,常规试井方法关井时间长,对产量影响较大,其试井方法大多采取二流量试井分析方法^[21-23]。但是,由于测试数据质量不高等原因,造成二流量试井解释结果不合理等问题,急需一种操作简单、结果可靠的数据处理方法。因此,本文在分析长庆油田水平井二流量测试资料质量的基础上,结合试井分析资料,提出一种处理测试数据的方法,即对数据进行去噪处理的方法,挖掘质量较差的测试资料中可靠的数据。通过实例对比分析,证明了数据去噪处理方法的实用性。

1 测试资料质量分析

统计了 104 井次水平井的二流量试井资料,其压力数据特征主要表现为:压力波动大,数据差,测试有效性差,104 井次二流量试井资料中,62 井次数据曲线形态好,但数据波动较大,占比 59.6%;有 25 井次数据差,无法解释,占比 24%。按照测试资料的压力数据特征,将 104 井次试井资料分为五类,统计结果见表 1。

表 1 压力数据特征统计表

Table 1 Statistical table of pressure data characteristics

类别	数据特征	井次	占比/%
I	曲线形态好,但光滑性差	62	59.6
II	数据差,曲线杂乱	25	24.0
III	曲线呈台阶型	6	5.8
IV	曲线光滑(处理过)	3	2.9
V	增大流量型,曲线光滑性差(压降测试)	8	7.7

从表 1 可以看出,五类试井资料的数据特征分别为:I 类数据曲线形态较好,但光滑性差;II 类数据差,曲线杂乱,无法解释;III 类数据曲线呈台阶状;IV 类数据很光滑(处理过);V 类采用增大产量试井,光滑性差。五类试井资料的典型数据示意图如图 1~5 所示。

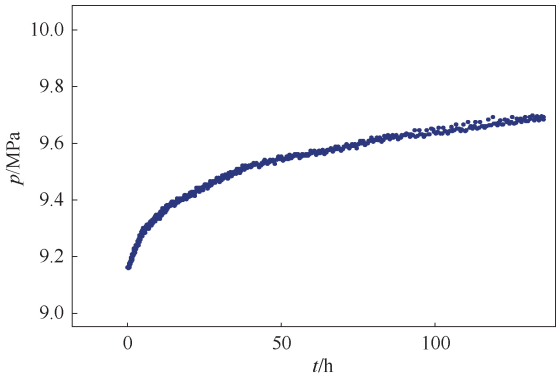


图 1 GP30-24 井压力测试数据(I 类)
Fig.1 Pressure test data (Class I) for Well GP30-24

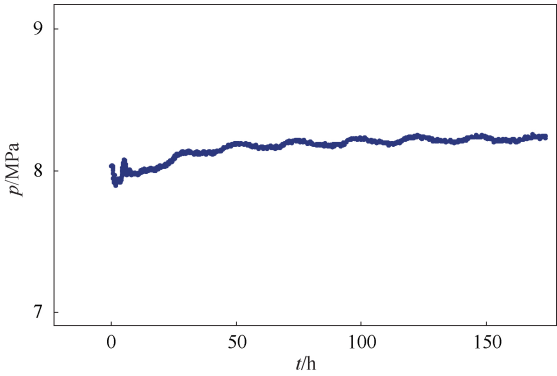


图 2 QP48 井压力测试数据(II 类)
Fig.2 Pressure test data (Class II) for Well QP48

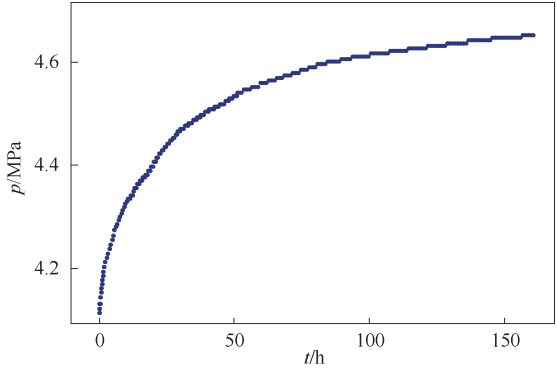


图 3 GP21-30 井压力测试数据(III 类)
Fig.3 Pressure test data (Class III) for Well GP21-30

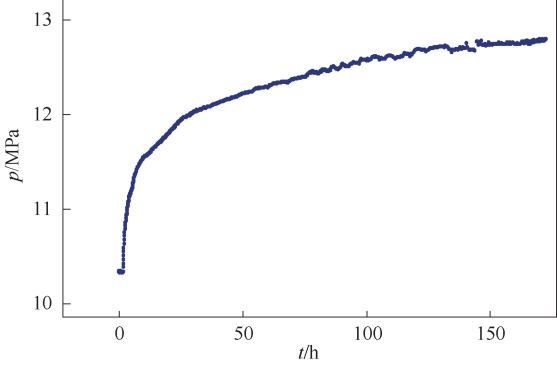


图 4 GP25-15 井压力测试数据(IV 类)
Fig.4 Pressure test data (Class IV) for Well GP25-15

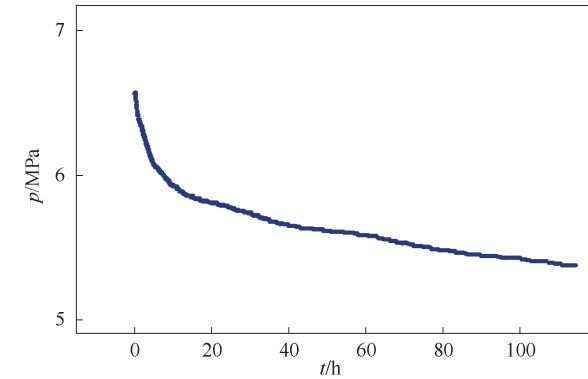


图 5 GP28-20 井压力测试数据 (V 类)
Fig.5 Pressure test data (Class V) for Well GP28-20

从测试资料统计结果(表 1)以及五类数据特征图可以看出(图 1~5),测试数据中占主体的为第 I 类,即曲线整体形态趋势较好,但光滑性较差,测试数据点上下波动情况较严重,这对后续试井分析造成了一定的难度。

应用 Swift 试井分析软件中的有关模型,对 7 口井进行二次试井解释。对比前后解释结果发现,两次解释结果差异较大。图 6 和图 7 分别为同一口井两次解释的双对数拟合图。从图中可以看出,测试的压力数据点分布较乱,上下波动较大,两次解释的拟合效果均差不多,拟合双对数曲线形态差异不大。

但是从两次解释的拟合结果对比表中可以看出(表 2),由于前端数据点波动较大,导致两次解释

模型选择不同,从而,最终解释结果中,一次解释的参数偏小,两次解释的参数区别较大,说明了由于数据质量较差的原因导致试井解释的多解性增强,同时也导致了拟合效果相对较差。

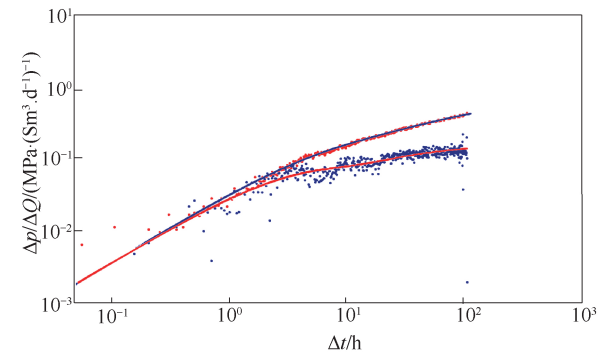


图 6 一次解释双对数图
Fig.6 Double logarithmic graph of the first interpretation

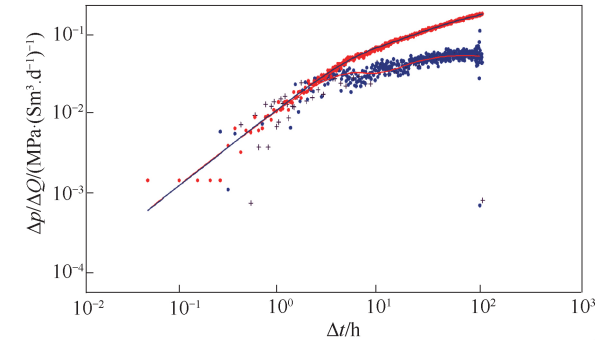


图 7 二次解释双对数图
Fig.7 Double logarithmic graph of the second interpretation

表 2 拟合结果对比表							
Table 2 Comparison of fitting results							
解释情况	选用模型	平均渗透率/mD		井筒储集系数/ (m³·MPa⁻¹)	总表皮系数	拟合目前地层 压力/MPa	水平段有效 长度/m
		水平	垂向				
一次	变井储+均质+无限大	0.739	0.151	2.413	3.459	11.579	65.0
二次	H 变+均质+无限大	2.433	0.592	7.986	-1.377	9.007	106.8

2 数据去噪处理方法

根据测试资料的质量分析,得知长庆油田该区块二流量测试目前存在的主要问题为近六成压力测试数据曲线形态较好,但光滑性较差,数据上下波动较明显,会造成后期试井解释结果不准确。

针对该问题,提出相对应的处理方法,即对曲线形态较好、光滑性较差的数据进行去噪处理。

去噪处理的思想主要为利用最小二乘曲线拟合方法对离散数据点进行拟合,将拟合结果与原始数据对比,去除与拟合结果差异较大的点,从而达到数据去噪的效果。

已知在离散点 $x = x_i (i = 0, 1, \dots, m)$ 处的值 $y_i = f(x_i)$, 最小二乘拟合的思想是找到对 $f(x)$ 的最佳逼近元 $s^*(x)$ [24~27], 使得:

$$\begin{aligned} \sum_{i=0}^m [y_i - s^*(x_i)]^2 &= \sum_{i=0}^m \left[f(x_i) - \sum_{j=0}^n c_j^* \varphi_j(x_i) \right]^2 \\ &= \min \sum_{i=0}^m [y_i - s(x_i)]^2 \\ &= \min \sum_{i=0}^m \left[f(x_i) - \sum_{j=0}^n c_j \varphi_j(x_i) \right]^2 \end{aligned} \tag{1}$$

引用范数表达式,上式可写为范数形式,即

$$\begin{aligned} \|f(x) - s^*(x)\| &= \min \|\delta(x)\| \\ &= \min \|f(x) - s(x)\| \end{aligned} \tag{2}$$

对于最小二乘拟合,可得其最佳平方逼近元,
应满足法方程式(3),即

$$GC = F \tag{3}$$

其中

$$G = \begin{bmatrix} (\varphi_0(x), \varphi_0(x)) & (\varphi_1(x), \varphi_0(x)) & \cdots & (\varphi_n(x), \varphi_0(x)) \\ (\varphi_0(x), \varphi_1(x)) & (\varphi_1(x), \varphi_1(x)) & \cdots & (\varphi_n(x), \varphi_1(x)) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ (\varphi_0(x), \varphi_n(x)) & (\varphi_1(x), \varphi_n(x)) & \cdots & (\varphi_n(x), \varphi_n(x)) \end{bmatrix}$$
$$F = ((f(x), \varphi_0(x)), (f(x), \varphi_1(x)), \cdots, (f(x), \varphi_n(x)))^T$$

$$C = (c_0, c_1, \cdots, c_n)^T$$
$$(\varphi_i(x), \varphi_j(x)) = \sum_{k=0}^m \varphi_i(x_k) \varphi_j(x_k)$$
$$(f(x), \varphi_j(x)) = \sum_{k=0}^m f(x_k) \varphi_j(x_k)$$

法方程(3)存在唯一解的充要条件是系数矩阵 G 非奇异,为了使系数矩阵非奇异,需加上额外条件,即 Haar 条件,其指的是 $\varphi_0(x), \varphi_1(x), \cdots, \varphi_n(x)$ 的任意线性组合在点集 $X = \{x_i\}_{i=0}^m$ 上至多只有 n 个不同零点。

特别地,当给定 $\varphi_j(x) = x^j (j = 0, 1, \cdots, n)$ 时,显然 $\varphi_0(x)$ 满足 Haar 条件。因此,法方程存在唯一解,或者说存在唯一的最小二乘解。此时,可以构造出矩阵 A , 即

$$A = \begin{bmatrix} \varphi_0(x_0) & \varphi_1(x_0) & \cdots & \varphi_n(x_0) \\ \varphi_0(x_1) & \varphi_1(x_1) & \cdots & \varphi_n(x_1) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \varphi_0(x_m) & \varphi_1(x_m) & \cdots & \varphi_n(x_m) \end{bmatrix} \tag{4}$$

由矩阵乘法可知:

$$G = A^T A, F = A^T Y \tag{5}$$

则式(3)变为

$$A^T A C = A^T Y \tag{6}$$

式中: $A^T A$ 为 $(n + 1) \times (n + 1)$ 的对称正定阵。

因此,法方程常常为病态方程组。本文采用广义逆的方法进行求解,可求解出系数 C 的结果,即

$$C = (pinv(A^T A))(A^T Y) \tag{7}$$

通过最小二乘拟合得到离散数据的拟合结果后,还需给定一个控制精度。对比拟合结果与原始数据的差异,若差异大于所给定的控制精度,则去除该原始数据点;若差异小于控制精度,则保留原始数据点,从而得到最终去噪后的数据点系列。

图 8 展示了一组离散数据点去除噪点后的示意图。其中,蓝色散点为原始数据点,绿色数据点为去除噪点后得到的数据点。可以看出,原始数据点分布较乱,数据波动较大,没有较明显的曲线形态;去噪后的数据点分布较规律,表现出较明显的曲线

趋势。对于试井分析来说,数据点曲线趋势越明显,越有利于试井解释拟合。

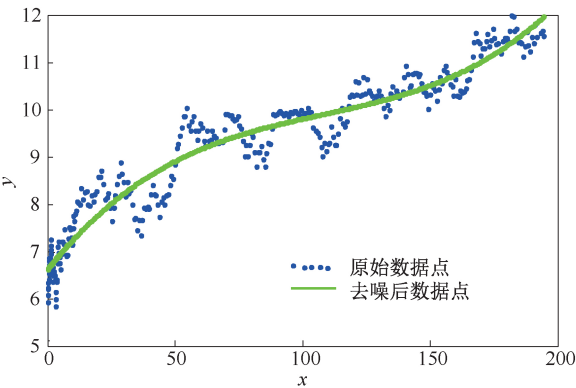


图 8 去除噪点示意图
Fig.8 Schematic diagram of noise removal

3 实例验证

选取一口现场水平井的试井解释资料,进行数据去噪处理方法效果的验证。

该井是庄 211 区块上的一口油井(水平井),油层厚度 10 m,井径 0.108 m,地层孔隙度 8.78%,流体黏度 1.09 mPa·s,综合压缩系数 $14.0 \times 10^{-4} \text{ MPa}^{-1}$,体积系数 1.3038。该井于 2016 年 8 月 27 日~9 月 10 日进行压力恢复测试,产液 $2.24 \text{ m}^3/\text{d}$,含水 8.8%;于 9 月 15~20 日进行二流量测试,第一产液量 $3.05 \text{ m}^3/\text{d}$,第二产液量 $2.02 \text{ m}^3/\text{d}$;第一制度含水 90.1%,第二制度含水 90.1%。小层数据见表 3。

表 3 长 6 层位各小层数据表

Table 3 Data sheet of each layer of Chang 6 Formation		
油层井段/m	厚度/m	射孔井段/m
1 928. 6~1 941. 4	12. 8	1 926. 45~1 946. 31
1 941. 4~1 978. 0	36. 6	
1 988. 0~2 017. 0	29. 0	1 994. 00~2 013. 56
2 028. 6~2 113. 3	84. 7	2 070. 70~2 090. 26
2 148. 5~2 156. 3	7. 8	2 148. 02~2 167. 58
2 156. 3~2 176. 3	20. 0	
2 233. 5~2 255. 6	22. 1	2 233. 76~2 253. 32
2 348. 0~2 394. 8	46. 8	2 370. 72~2 390. 28
2 403. 0~2 582. 0	179. 0	2 455. 57~2 475. 13
		2 535. 40~2 554. 96

图 9 为原始的压力测试数据,其整体的形态较好。但是,数据点上下波动较大,而试井解释双对数图进一步放大压力变化规律,这种数据波动会造成双对数图的曲线形态差。

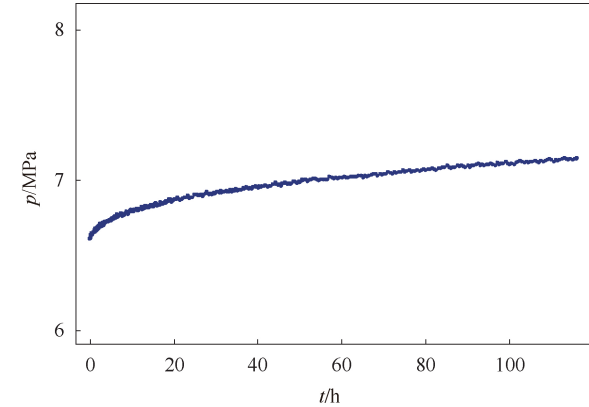


图 9 去噪前压力测试数据
Fig.9 Pressure test data before denoising

利用该数据得到对应的有因次双对数图可以看出(图 10),其数据规律较差,尤其压力导数曲线,分布散乱,解释难度较大,多解性较强,可能导致解释结果较差。

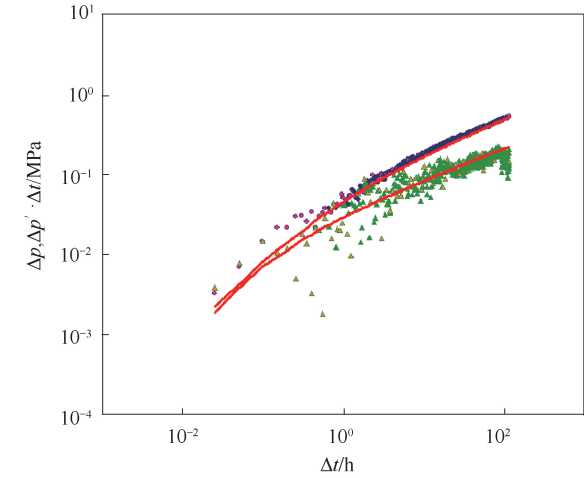


图 10 去噪前有因次双对数图
Fig.10 Double logarithm before denoising

针对数据质量差的情况,对该井测得的二流量压力数据基于最小二乘原理进行去噪处理,可以得到新的二流量压力测试数据(图 11)。

根据去噪后的压力测试数据,可以得到新的有因次双对数图(图 12),数据规律性明显增强,大大降低了试井解释的多解性。

为了验证去噪方法的可靠性,由于该井在二流量测试之前进行了一次压力恢复测试,可以利用压力恢复测试解释结果来验证去噪前后的解释结果的正确性。图 13 为压力恢复测试的有因次双对数图。

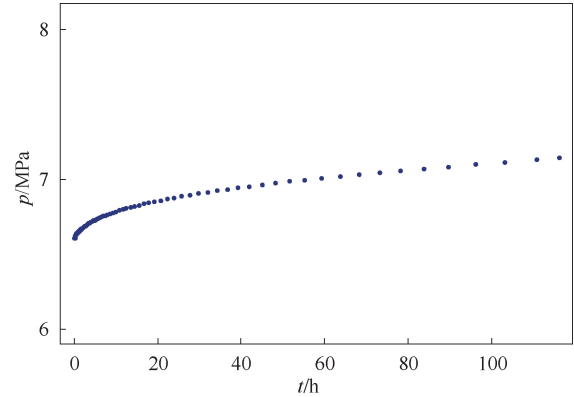


图 11 去噪后压力测试数据
Fig.11 Pressure test data after denoising

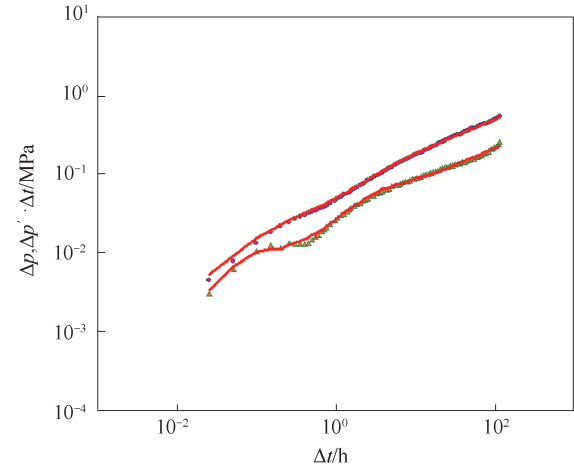


图 12 去噪后有因次双对数图
Fig.12 Double logarithm after denoising

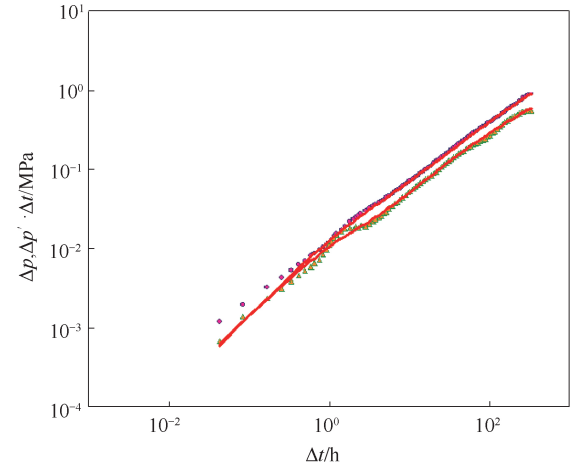


图 13 压力恢复有因次双对数图
Fig.13 Double logarithm of pressure build-up

三组数据均采用水平井达西流有限导流垂直裂缝模型进行解释,解释结果见表 5。

通过对比可以看出,去噪前的结果与压力恢复解释结果差异较大,尤其是渗透率、裂缝半长及裂缝间距三个关键参数差异较明显,其最大相对误差可达

95%;而去噪后的解释结果与压力恢复解释结果较为接近,在渗透率、裂缝半长及裂缝间距三个参数中,其

最大相对误差仅为 7.9%。因此,对数据进行去噪处理能提升试井解释结果的准确性和可靠性。

表 5 解释参数对比表
Table 5 Comparison table of interpretation parameters

分析结果		井筒储集系数/ ($\text{m}^3 \cdot \text{MPa}^{-1}$)	平均地层有效 渗透率/mD	总表皮系数	拟合目前地层 压力/MPa	裂缝半长/ m	裂缝间距/ m
二流量数据 Swift 分析	去噪前	0.004 0	0.190	0.000 844	10.320	1.54	26.77
	去噪后	0.001 0	0.435	0.000 038	11.483	34.96	184.83
压恢数据 Swift 分析		0.000 2	0.465	0.000 690	8.280	32.39	179.73

4 结论

(1)本文分析了长庆油田低渗透油藏已有水平井二流量测试的质量情况,共分析 104 井次,其中 60%数据光滑性差,24%数据质量差,曲线杂乱,总体数据质量情况较差。

(2)在测试资料质量分析以及试井分析的基础上,提出一套基于最小二乘拟合原理的数据去噪处理方法。

(3)通过实例对比,分析了一组二流量测试数据去噪前后的解释结果,以及同一口井的压力恢复测试解释结果,认为数据去噪能提升二流量测试试井解释结果的准确性,为长庆油田水平井二流量测试数据处理提供可靠的处理方法。

致谢:感谢长庆油田分公司勘探开发研究院同意该论文的发表。

参考文献

[1] 王汉鹏,孙波,尹红军. 二流量试井工艺及资料解释分析方法[J]. 油气井测试,2002,11(6):17-19.
WANG Hanpeng, SUN Bo, YIN Hongjun. Double flow rate well testing techniques and way of the data interpretation [J]. Well Testing, 2002,11(6):17-19.

[2] 付春权,马水龙,尹洪军,等. 二流量试井压力动态特征与分析方法[J]. 大庆石油学院学报,2002,26(4):22-25.
FU Chunquan, MA Shuilong, YIN Hongjun, et al. Pressure transient characteristics of two-rate flow test and its analysis method [J]. Journal of Daqing Petroleum Institute, 2002, 26(4):22-25.

[3] RUSSELL D G. Determination of formation characteristics from two-rate flow tests [J]. Journal of Petroleum Technology, 1963,15(12):1347-1355.

[4] ODEH A S, JONES L G. Two-rate flow test, variable-rate case application to gas-lift and pumping wells [J]. Journal of Petroleum Technology, 1974,26(1):93-99.

[5] 张遂,张金,刘渊,等. 二流量不停产试井工艺在安塞油田压力测试中的适用性评价[J]. 石油天然气学报,2012,34(5):248-251.

ZHANG Sui, ZHANG Jin, LIU Yuan, et al. Applicability evaluation of two flow non-stop well test technology in Ansai oilfield pressure test [J]. Journal of Oil and Gas Technology, 2012,34(5):248-251.

[6] 薛波,邵振鹏,秦远成,等. 二流量试井技术在延气一厂的应用[J]. 油气井测试,2016,25(3):38-41.
XUE Bo, SHAO Zhenpeng, QIN Yuancheng, et al. Application of two flow well test technology in the first Yan gas plant [J]. Well Testing, 2016,25(3):38-41.

[7] 钟诚. 二流量试井技术研究[J]. 国外测井技术,2016(1):54-55.
ZHONG Cheng. Research of two-output testing technology [J]. World Well Logging Technology, 2016(1):54-55.

[8] 李论,何光渝,强琳. 基于神经网络的试井解释模型识别方法研究[J]. 油气井测试,1996,5(2):11-14.
LI Lun, HE Guangyu, QIANG Lin. Identification method of well testing interpretation model based on neural network [J]. Well Testing, 1996,5(2):11-14.

[9] 强琳,李论,何光渝,等. 应用人工神经网络识别试井解释模型[J]. 西安石油学院学报(自然科学版),1996,11(6):32-35.
QIANG Lin, LI Lun, HE Guangyu, et al. Recognition of well test interpretation model by artificial neural network [J]. Journal of Xi'an Petroleum Institute (Natural Science Edition), 1996,11(6):32-35.

[10] 成绥民,李论,孙志林,等. 神经网络专家系统在试井解释中的应用[J]. 西安石油学院学报(自然科学版),1997,12(2):32-33,55.
CHENG Suimin, LI Lun, SUN Zhilin, et al. Application of neural networks and expert system in the interpretation of well test [J]. Journal of Xi'an Petroleum Institute (Natural Science Edition), 1997,12(2):32-33,55.

[11] 张杰,李翠楠,张向阳,等. 试井分析中的离散数据拉普拉斯变换方法[J]. 天然气工业,2004,24(3):100-102.
ZHANG Jie, LI Cuinan, ZHANG Xiangyang, et al. Laplace transform method of discrete data in well test analysis [J]. Natural Gas Industry, 2004, 24(3):100-102.

[12] 王正茂,闫存章,杨满平. 降低测试数据噪音的数值算法[J]. 钻采工艺,2005,28(1):37-38.
WANG Zhengmao, YAN Cunzhang, YANG Manping. Nu-

- merical algorithm for reducing the noise of test data [J]. Drilling & Production Technology, 2005, 28 (1): 37-38.
- [13] 聂法健. 变流量凝析气试井[D]. 青岛:中国石油大学(华东), 2010.
- NIE Fajian. Gas condensate well test analysis of variable rate [D]. Qingdao: China University of Petroleum (East China), 2010.
- [14] 申颖浩, 何顺利, 张红玲, 等. B样条反褶积方法在试井解释中的应用[J]. 油气井测试, 2011, 20(3): 7-9.
- SHEN Yinghao, HE Shunli, ZHANG Hongling, et al. The application of B-spline deconvolution in well-test interpretation [J]. Well Testing, 2011, 20(3): 7-9.
- [15] 孙达. 油气井压力恢复试井解释关键技术[J]. 油气井测试, 2018, 27(6): 73-77.
- SUN Da. Key technologies for oil and gas well pressure buildup test interpretation [J]. Well Testing, 2018, 27(6): 73-77.
- [16] 杨济源, 李晓平. 小波变换在试井数据处理中的应用[J]. 钻采工艺, 2009, 32(5): 42-44.
- YANG Jiyuan, LI Xiaoping. Application of wavelet transform in well test data processing [J]. Drilling & Production Technology, 2009, 32(5): 42-44.
- [17] 梁水波, 毕研鹏. 自动拟合试井分析新方法[J]. 能源与节能, 2014(4): 188-190.
- LIANG Shuibao, BI Yanpeng. New method of automatic fitting well test analysis [J]. Energy and Energy Conservation, 2014(4): 188-190.
- [18] 徐彦凯, 双凯, 王玉玺. 基于提升小波的试井信号降噪研究[J]. 计算机工程与科学, 2014, 36(1): 186-190.
- XU Yankai, SHUANG Kai, WANG Yuxi. Signal denoising by lifting wavelet in well test [J]. Computer Engineering & Science, 2014, 36(1): 186-190.
- [19] 梁水波. 油井不稳定试井自动拟合算法研究[D]. 成都:西南石油大学, 2014.
- LIANG Shuibao. Research on transient well testing automatic fitting algorithm of oil wells [D]. Chengdu: Southwest Petroleum University, 2014.
- [20] 张冰. 智能井井下数据采集与处理分析技术研究[D]. 成都:西南石油大学, 2017.
- ZHANG Bing. Research on downhole data acquisition and processing technology of intelligent well [D]. Chengdu: Southwest Petroleum University, 2017.
- [21] 李琳琳, 郭志芳, 周爱兰, 等. 二流量试井评价技术与应用[J]. 油气井测试, 2009, 18(5): 26-29.
- LI Linlin, GUO Zhifang, ZHOU Ailan, et al. Two-flow well test and evaluation technology and its application [J]. Well Testing, 2009, 18(5): 26-29.
- [22] 刘喆, 于锋, 朱建斌, 等. 二流量(不关井)测试技术应用研究[J]. 油气井测试, 2009, 18(2): 24-26.
- LIU Zhe, YU Feng, ZHU Jianbin, et al. Application of dual flow rate (no build-up) test technique [J]. Well Testing, 2009, 18(2): 24-26.
- [23] 刘克云, 李延方, 冀承智, 等. 二流量试气技术研究及应用[J]. 油气井测试, 2003, 12(5): 29-31.
- LIU Keyun, LI Yanfang, JI Chengzhi, et al. The study and application of two-flow-rate of gas well testing technology [J]. Well Testing, 2003, 12(5): 29-31.
- [24] 文世鹏, 张明. 应用数值分析[M]. 北京:石油工业出版社, 2005: 250-264.
- [25] 马昌凤, 柯艺芬, 谢亚君. 最优化计算方法及其 MATLAB 程序实现[M]. 北京:国防工业出版社, 2015: 96-107.
- [26] 王泽文, 邱淑芳, 阮周生. 数值分析与算法[M]. 北京:科学出版社, 2016: 33-35.
- [27] 吕喜明, 李明远. 最小二乘曲线拟合的 MATLAB 实现[J]. 内蒙古民族大学学报(自然科学版), 2009, 24(2): 125-127.
- LYU Ximing, LI Mingyuan. The realization of curve fitting with Matlab [J]. Journal of Inner Mongolia University for Nationalities (Natural Sciences), 2009, 24(2): 125-127.

编辑 刘述忍

第一作者简介:何生平,男,1983年出生,工程师,2008年毕业于吉林大学地球科学学院资源勘察工程(石油天然气)专业,主要从事油田开发及动态监测相关工作。电话:029-86591561;Email:hsp_cq@petrochina.com.cn。通信地址:陕西省西安市未央区兴隆园小区,邮政编码:710018。