

引用格式:葛兰,蒲谢洋.页岩气田智能化生产辅助决策系统应用效果评价[J].油气藏评价与开发,2021,11(4):621-627.

GE Lan, PU Xieyang. Evaluation of application effect of an intelligent production assistant decision system for shale gas field[J]. Petroleum Reservoir Evaluation and Development, 2021, 11(4): 621-627.

DOI: 10.13809/j.cnki.cn32-1825/te.2021.04.019

页岩气田智能化生产辅助决策系统应用效果评价

葛兰,蒲谢洋

(中国石化重庆涪陵页岩气勘探开发有限公司,重庆408100)

摘要:页岩气的成功开发,有效推动了中国能源结构优化,但在页岩气井生产规律、合理生产制度、现场管理等方面,传统的人工+计算机模式已无法满足同步跟踪分析及精细气藏管理的需要,且国内外尚无成熟的理论、技术和经验供借鉴。为实现异常的快速反应、气藏的高效管理,在涪陵页岩气田的开发过程中,同步启动了生产辅助决策系统的开发与建设工作。从低压、积液、生产制度变化等方向开展了预警研究,并对单井的生产规律变化进行短期、中期、长期分析与预测,实现了数据变信息,信息促决策的智能化目标,有效支撑了页岩气田现场管理,并保障了涪陵页岩气田持续稳产。涪陵页岩气田率先探索的页岩气田智能化建设及应用,为我国页岩气精细化气藏管理奠定了良好基础,具有重要的参考价值 and 推广应用前景。

关键词:智能化;辅助决策;决策系统;精细化管理;页岩气田

中图分类号:TE33

文献标识码:A

Evaluation of application effect of an intelligent production assistant decision system for shale gas field

GE Lan, PU Xieyang

(Sinopec Chongqing Fulin Shale Gas Exploitation and Development Co., LTC, Chongqing 408100, China)

Abstract: The successful development of shale gas has effectively promoted the optimization of China's energy structure. However, in terms of shale gas well production rules, reasonable production systems and on-site management, the traditional manual and computer operating mode can no longer meet the needs of simultaneous tracking analysis and fine gas reservoir management. Meanwhile, there is no mature theory, technology and experience for reference at home and abroad. In order to achieve rapid response for abnormal situation and efficient management of gas reservoirs, the development of the production auxiliary decision-making system has been initiated simultaneously during the development of Fuling Shale Gas Field. The early warning research has been carried out from the direction of low pressure, liquid loading, production system changes, etc., and the short-term, mid-term and long-term analysis and the prediction of production decreasing trend of a single well have been carried out either. The management goal to obtain useful information by data mining for decision-making promotion is realized. This system effectively supports the on-site management of the shale gas field and ensured the continued stable production of the shale gas wells in Fuling Shale Gas Field. The intelligent construction and application of shale gas fields pioneered in Fuling Shale Gas Field has laid a good foundation for the refined management of shale gas reservoirs in China, and has important reference value and application prospects.

Keywords: shale gas field, intelligence, auxiliary decision-making, decision-making system, refined management

收稿日期:2021-03-10。

第一作者简介:葛兰(1988—),女,硕士,工程师,从事油气藏开发、气藏工程研究工作。地址:重庆市涪陵区李渡街道中国石化涪陵页岩气基地,邮政编码:408100。E-mail:gelan.jhyt@sinopec.com

基金项目:国家科技重大专项“涪陵页岩气开发示范工程”(2016ZX05060)。

2013年,中国页岩气正式进入商业化开发阶段,近年来的高速发展,不仅推动了钻井、压裂工程工艺技术及配套装备的加速进步^[1-2],而且在数据自动采集、视频监控系统、信息化建设应用方面不断升级^[3-4],随着大数据、智能化的兴起,油气田智能化建设也进入公众视野。国内外学者在油气田信息化智能化建设的基本框架、理论与技术、解决方案等方面开展了相关研究^[5-9]。但页岩气田智能化建设国内尚无先例,如何高效利用获取的页岩气田大量数据资源,从中挖掘出数据价值,并实现快速判断与响应,打造“快速获取、及时响应、趋势预测、智能决策”的智能化气田,成为推动我国页岩气实现高效开发亟需解决的关键问题。

涪陵页岩气田作为我国首个大型页岩气田和国家级页岩气示范区,在气田建设伊始,便致力于建设智能化气田。采气井场和集气站均按照无人值守设计,逐步建成了数据采集、自动控制、光纤通信、安防系统,视频监控系统与其他安防、SCADA系统可进行联动,实现了气田的全井、全流程、全参数的监控。在数据采集的基础上,从顶层设计并建设了涪陵页岩气田勘探开发一体化数据库。基于勘探开发一体化数据库,采用大数据分析、机器学习等技术,建设了涪陵页岩气田智能化生产辅助决策系统,为气田精细管理提供了强有力的技术支撑,保障了气田持续稳产。

1 建设背景及系统设计

1.1 建设背景

在页岩气田生产管理中,制约气藏高效管理主要有3个方面问题:①快速生产预测方法欠缺,影响因素识别困难。页岩气勘探开发难度大,基础理论研究不足,生产规律认识不深^[10]。如何选择最优的生产方式,制定合理工作制度,有效控制递减并提高单井可采储量等问题,需要持续优化与提高。②异常识别与治理不及时、不准确。页岩气井递减快、规律变化快^[11],现有软件无法快速准确地进行生产分析与预测,且影响因素识别困难,制约着气井最优对策的制定,其控递减措施也相对滞后。③安全参数设置仍处于人工干预阶段。虽然气田获取了大量开发、生产数据,但未有效利用,安全风险识别及参数设置仍处于人工限制阶段,不能满足各关键节点快速变

化,联动响应的需要。

使页岩气开发数据快速信息化,实现有效增值,支撑气田的高效开发及管理是建立该系统的初衷。基于对海量页岩气数据的深度挖掘,开展页岩气田智能生产预测预警系统的设计与研发,帮助页岩气田开发及管理机构,提升气井生产效率及气藏精细化管理能力,提高单井可采储量及气藏采收率是搭建该系统的目的。涪陵页岩气田智能化生产辅助决策系统是以页岩气一体化数据库为基础,可对页岩气田的地质、测录井、分析化验、压裂试气、页岩气生产等多维、多源数据开展大数据分析。从数据粒度细化、多维分析、降维、数学建模、模型应用等多个环节开展“数据变信息”研究及应用开发,以满足页岩气开发生产需求,实现辅助决策(图1)。

该系统采用前沿大数据分析技术,对页岩气田积累的多维、多源生产数据进行关联分析、回归分析、聚类与分类、预测、时间序列分析,开展机器学习,挖掘出主要生产指标的变化规律,对气井生产趋势进行学习及预测,并对异常变化情况进行筛选,自动判断异常原因,并制定调整对策,通过人机交互体系,在不断学习与调整过程中,增加判断经验,接近人工判断并超越人工判断,最终实现智能化决策与控制。

通过该系统,可实现人工盯防施策向自动预警决策的转变,大幅降低人工误差率,提升气井产能及生产效率,实现创效,并将填补国内页岩气开发管理大数据分析方面的技术空白,为油田企业高效经济页岩气开发,提供科学决策工具和平台、技术支撑与

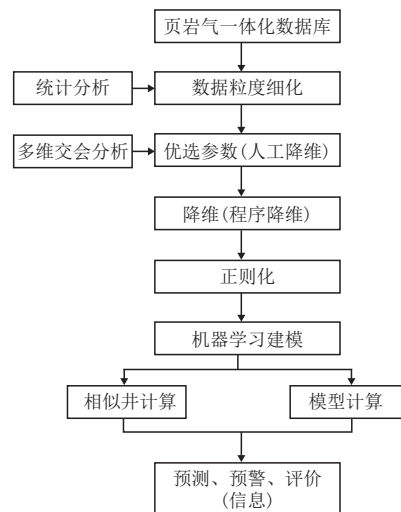


图1 “数据变信息”总体技术思路

Fig. 1 Overall technical idea frame of data to information

经验借鉴。同时占领国内市场,为国内页岩气田提供技术服务、系统构建或合作开发,预计单气田的推广效益超千万元,具有良好的市场推广前景。

1.2 系统设计

页岩气田智能化生产辅助决策系统重点在于异常情况的提前预知,实时问题的及时直观反映和防控治理对策与联动响应。基于页岩气田勘探开发数据资源湖,从顶层设计,初步建成生产预测、智能预警、异常提示、辅助决策、联动控制五大模块(图2)。

同时,为了满足个性化分析研究工作的需要,利用实时数据库内置定制函数、多维数据联动等技术建设数据定制查询模块,实现钻井、压裂、生产等多维数据联动函数式查询和输出,以满足科研技术人员个性化数据统计分析需求。

生产趋势的预测,对了解气井生产状况,及时开展人工干预,提升气井阶段产量及保持稳定生产均具有重要意义。页岩气井具有“一井一藏”特点,生产规律差异大^[12-13],因此,定制化分析与预测尤为重要。涪陵气田页岩气井一般采用定产生产制度,经历稳产降压及定压递减两个生产阶段。其中定压递减阶段又分为连续递减、间歇生产、辅助排采及增压开采3个阶段。定产降压阶段主要以气井压力下降规律为主,在该阶段,气井以分析判断压力变化规律和趋势为主要目标,连续递减阶段压力相对固定产量连续递减,但由于页岩气井的生产始终伴随着压裂液的返排,当产量无法满足气井连续带液需求的

时候,气井需要通过关井或者放大压差排液的方式进行管理和生产,此阶段气井产量和压力变化较大,但整体气井仍具有一定的产量递减规律,这也为趋势预测带来一定难度。系统通过油套压力、产量、压降、产液等情况,自动判断气井生产阶段和主要变化参数,对气井历史规律进行分析,明确并制定多种递减模型,形成短期、中期、长期预测。

智能预警与异常提示,页岩气田产建速度快,气井数量增长速度快、数量大,人工查找生产井异常效率低,气井管理工作任务繁重。通过开展智能预警与异常提示,自动推送气井预警与异常信息,对提高气藏管理效率具有重要意义。以产气量、产水量、油压、套压4个参数作为主要预警指标,在生产趋势预测的基础上,采用分级分时段预警模式,匹配对比设定的预警与异常标准,及时作出预警与提示,如低压预警、积液预警、压裂干扰等,并推送至系统桌面,方便技术人员分析和气藏管理人员处理。

辅助决策,基于智能预警与异常提示,按照设计业务 workflow(图3),在异常预警提示后,推送给相关研究单位和部门,开展下一步的分析和安排。期间可协同启动开关井模块、专家知识库、措施优选模块等辅助决策模块,指导下步异常治理工作决策。

联动控制系统,基于智能运算,实现快速连锁反应,保障气田安全平稳生产。在气田管网运行条件与气井生产规律准确认识的前提下,当站内或管网发生压力较大变化,气井出现明显异常波动的情况下,可通过自动联动控制,实现气井自动紧急切断,

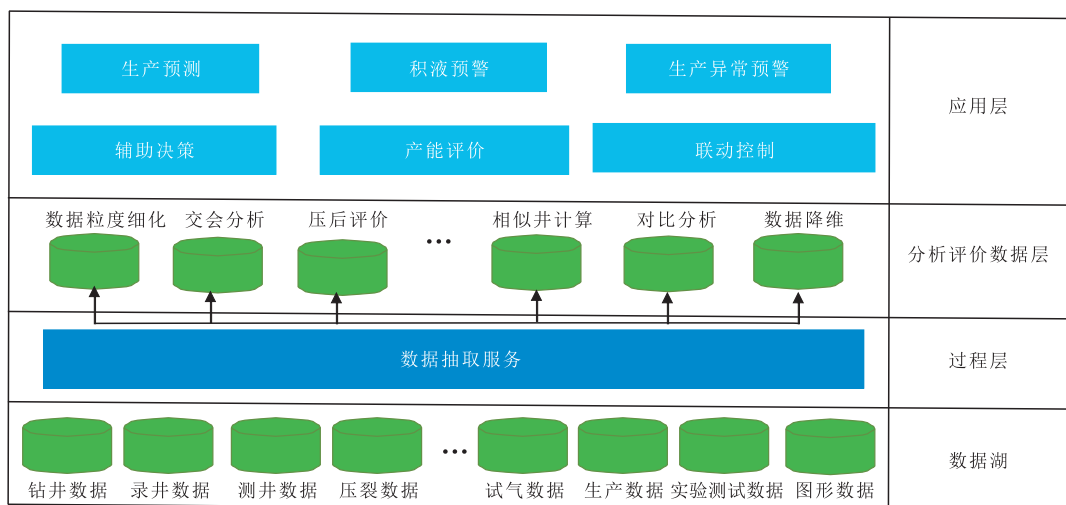


图2 涪陵页岩气田智能化生产辅助决策系统整体架构设计

Fig. 2 Overall architecture design of AI assistant decision-making system of Fuling Shale Gas Field

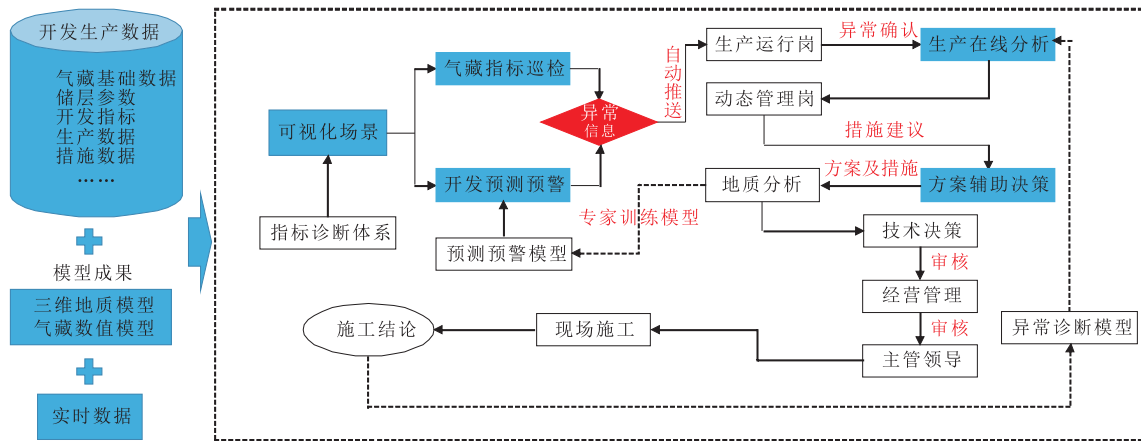


图3 气藏动态管理岗位业务流框架

Fig. 3 Framework of workflow of gas reservoir dynamic management

最大程度的保障生产安全。同时系统基于对管网运行压力的全面模拟,自动分析各站点合理压力范围,联动设置警戒系统的上下限,实现安全联动反应。但异常的判断,降低误报的准确性是联动控制系统的关键。

2 应用情况

2.1 积液预警

随着页岩气井生产进入中后期,地层能量降低,井筒积液现象愈发严重,影响气井产能释放,降低气井生产时率。以往采用传统的如李闯模型、Turner模型等数学计算方法判断页岩气井积液情况特别是水平段积液准确度不高。采用K-mean聚类算法和神经网络算法等^[14-15]机器学习技术处理气田几百口气井生产数据,训练机器学习模型,结合传统井筒积液数学模型计算判别方法,输出每口井的积液情况初步判断结果(图4)。调用涪陵页岩气田专家知识库,匹配进一步确定井筒积液状况的经验做法,最终输出下一步解决井筒积液问题的措施建议。应用井筒积液预警功能,实现了准确判断200余口气井井筒的积液情况(图5),准确率达90%以上,指导优化了涪陵页岩气田210口井排采措施,措施有效率达80%以上,措施井平均生产时率提升25%。

2.2 生产预测预警

通过采用页岩气井常见参数自动识别生产方式,对生产阶段自动分段,实现计算机自动进行页岩

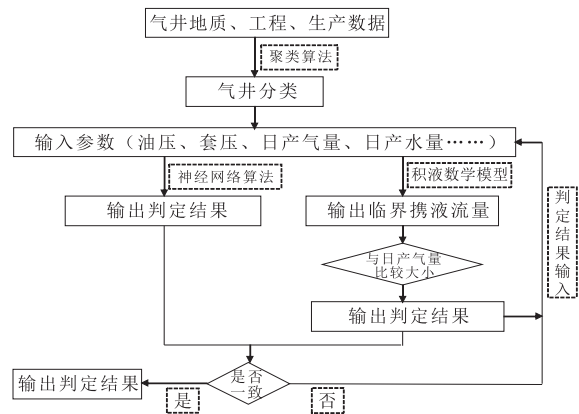


图4 积液判别算法逻辑框架

Fig. 4 Algorithm framework of shale gas well liquid loading

气动态储量信息预测,有效避免人为主观因素对产量预测影响,并提高预测准确性和效率。

综合多个预警指标参数计算得出气井生产异常指数,形成了短期、中期、长期预警序列(图6),依据生产异常指数大小给出异常程度,辅助气藏管理人员及技术人员发现异常,分析异常原因,及时给出下步调整及措施建议,保障气井稳定连续生产。该功能模块上线运行后,共应用井次200余井次,准确率达85%以上。

在生产压力预测方面,采用基于加权聚类的时间序列多模型算法。首先利用基于加权策略的扭曲K均值算法(WWKM)^[16]对生产压力进行聚类,根据聚类结果建立贝叶斯判别器,利用Elman算法^[17]对每一类样本和未分类之前数据分别建立局部和整体模型。压力预测时,通过贝叶斯判别检索与预测时刻

日期: 2021-01-29		查询		输出																
				管柱异常并汇总																
序号	井号	生产方式	当前排采措施	初步判断	油管外径 (mm)	油管壁厚 (mm)	中部深度 (m)	油管内径 (mm)	油管下深 (m)	B-A深差 (m)	套压 (MPa)	油压 (MPa)	日产气 (m³/d)	日产水 (m³/d)	实际油套压差 (MPa)	合理油套压差 (MPa)	计算井底流压 (MPa)	临界携液流量 (m³/d)	排查方法	措施建议
1	A	油管自喷		水平段积液	73.02	5.51	3120.82	62	3441.35	134	5.36	4.93	23032	2.93	0.43	2.74	9.34	51895	1、核数据;2、关井测液面	防止积液
2	B	油管自喷		水平段积液	60.32	4.83	3263.75	50.66	3449.72	156.8	7.38	7.17	10652	0	0.21	2.13	11.33	33772	1、核数据;2、关井测液面	防止积液
3	C	油管自喷		水平段积液	60.32	4.83	3437.03	50.66	3564.77	101.08	1.97	1.85	9660	0	0.12	4.19	7.4	29300	1、核数据;2、关井测液面	防止积液
4	D	油管自喷		油管堵塞	60.32	4.83	2540.955	50.66	2645.78	140.57	6.59	2.88	76762	3.01	3.71	2.45	6.19	23878	1、核数据;2、正常解堵	防止积液
5	E	油管自喷	同心管	油管堵塞	50.8	4.45	2887.078	40.44	2698.08	77.13	6.47	2.48	30521	2.83	3.99	2.66	5.98	14770	1、核数据;2、正常解堵	防止积液
6	F	油管自喷		油管积液	60.32	4.83	3445.588	50.66	3636.42	206.75	6.87	1.83	1720	0.15	5.04	2.42	4.46	22273	1、核数据;2、测油压	防止积液
7	G	油管自喷		油管积液	60.32	4.83	3265.261	50.66	3783.08	47.06	6.97	0.99	153	0.03	5.98	2.37	4.15	22447	1、核数据;2、测油压	防止积液

图5 辅助决策系统预警井筒积液展示

Fig. 5 Predicting result of shale gas well liquid loading by AI assistant decision-making system

生产预测预警		输出											
递减模型预测		序号	井号	日产气量								异常指数	差值
低压预警	起始日期			终止日期	天数	梯度	截距	估计偏差	标准偏差	平稳度			
开关井预警	1	H	20210105	20210131	27	-372.3663	88657.058	-3696.466	6003.6396	0.9284	0.3192	-160	
井筒积液预警	2	I	20210124	20210131	8	-0.0952	85392.333	675.6667	2313.9637	0.9729	0.3138	-844	
预警汇总	3	J	20210114	20210131	18	7.8276	65014.194	26803.264	14545.464	0.7765	0.4807	-21664	
单井趋势预测预警	4	K	20210104	20210131	21	-201.0114	58747.308	9722.0788	7434.0741	0.8690	0.3545	-5635	
生产指标预测	5	L	20210112	20210131	20	127.3781	36026.345	824.5283	2159.1986	0.9420	0.3167	488	
临界值管理	6	M	20201224	20210131	39	-85.1466	66785.789	210.2177	7874.6803	0.8792	0.3328	1920	
短期预警指标	7	N	20201212	20210131	25	603.0918	12263.119	13533.323	11795.968	0.3951	0.4742	-3305	
中期预警指标	8	O	20210114	20210131	16	-1270.722	70973.013	-8506.545	19026.457	0.6903	0.4341	5242.7227	
长期预警指标	9	P	20210109	20210131	23	607.7819	50549.908	861.1103	2354.4011	0.9589	0.3579	1580	
区域预警指标报表	10	Q	20210116	20210131	16	317.9262	57954.723	723.6165	2317.618	0.9616	0.3460	-1840	
单井预警指标曲线	11	R	20210109	20210131	23	-2.1612	51595.265	-1662.281	1408.571	0.9727	0.3563	4100	
多因素交会分析	12	S	20210102	20210131	27	-532.3745	52848.55	-10406.52	14434.241	0.6857	0.3761	-6008.668	
异常指数预警	13	T	20201223	20201231	9	-703.6863	69836.878	-7633.612	8811.0233	0.8685	0.3460	718.7109	

图6 生产预测预警模块功能展示

Fig. 6 Predicting result of shale gas well performance

最近的样本集和对应局部模型,构造时间序列加权预测模型(图7)。预测模型的生产压力预测结果如图8所示。通过生产压力预测,开展气井低压预警,协同启动开关井模块,辅助气藏管理人员科学高效地管理气井,共应用80余井次,气井生产时率平均提升25%。

页岩气井压裂施工过程中会对周缘生产井造成影响,表现为生产井井口压力波动,产水量和产气量变化,严重时会导致生产井水淹停产,因此,需及时准确地开展压裂影响预警,动态调整生产井生产制度,避免生产井水淹。压裂干扰,井距是关键的影响因素,生产压力波动值是压裂干扰程度核心表征指标。通过实时自动拾取压裂井、生产井数据,采用最短路径算法计算当前压裂段与生产井之间最短水平距离,比较计算值与不同级别设定值大小,结合生产压力波动值判断,最终输出判定结果(图9)。利用邻井压裂智能预警模块(图10),实现了气藏管理人员实时在线掌握压裂井影响情况,对生产井及时精准采取防御性关井措施,关井时机由人工跟踪决策的压裂前1~2 d下降至压裂前2 h,平均单口生产井受压裂影响时间下降20%,单口新井压裂期间影响产

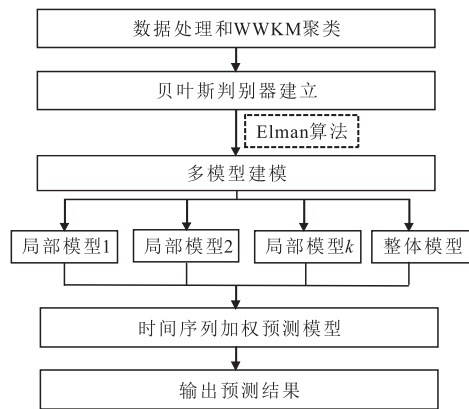


图7 压力预测模型算法框架

Fig. 7 Algorithm framework of well pressure prediction

量下降38%,合计影响气产量减少约 $1.0 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。

3 结论与建议

1) 基于涪陵页岩气田勘探开发数据资源湖,从顶层设计建设了涪陵页岩气田勘探开发一体化数据库。在此基础上,采用大数据、机器学习技术建设了气田智能化辅助决策系统。该系统初步实现了在线

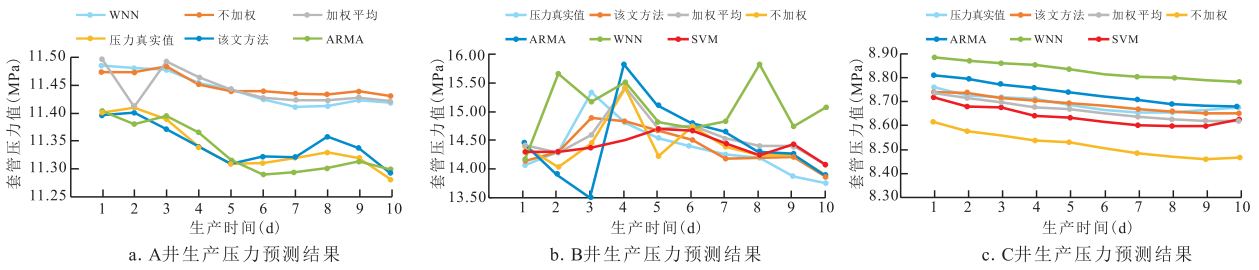


图8 涪陵页岩气田典型气井生产压力预测结果

Fig. 8 Well pressure predicting result of a typical gas well in Fuling Shale Gas Field

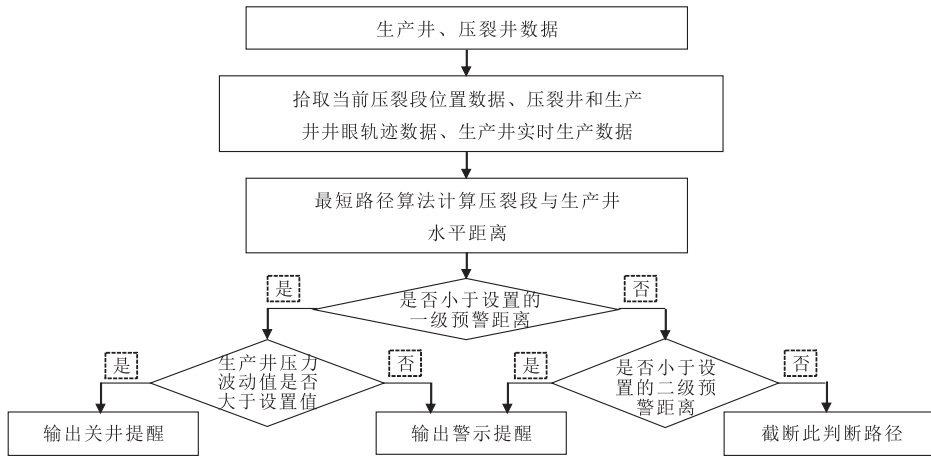


图9 压裂干扰预警模块算法框架

Fig. 9 Algorithm framework of frac hit warning

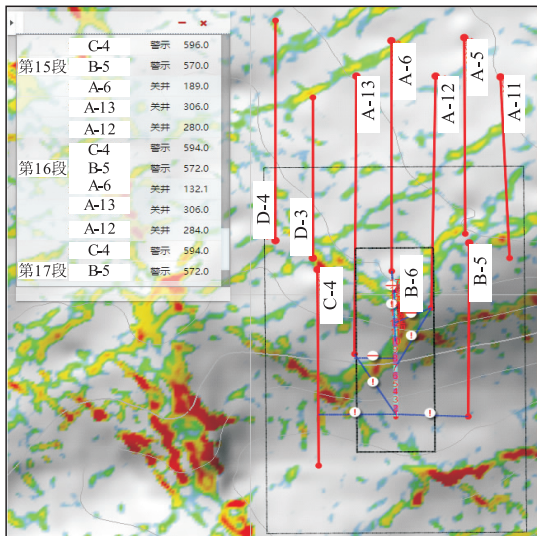


图10 涪陵页岩气田压裂智能预警模块功能展示

Fig. 10 Result of frac hit warning

生产预测和异常智能预警,全面支撑了气藏管理人员对异常的快速反应和对气藏的高效管理,系统上线后,气井生产时率平均提高了20%以上。

2) 针对油公司模式下的页岩气藏管理,利用智能化生产辅助决策系统实现了涪陵页岩气田高效精准的低压、积液、邻井压裂干扰预警,有效优化了气井开关井,指导排水采气措施优选,提高了气井生产时率,有力支撑了气田稳产上产,累计增产达 $1.5 \times 10^8 \text{ m}^3$ 以上。

3) 页岩气田产能建设速度快,勘探开发数据量快速增长,在前期数据库建设中应充分考虑数据加载和数据库性能稳定性问题,加大大数据特征工程研究,实现“数据大”到“大数据”的转变,为智能化生产辅助决策奠定坚实数据基础。同时,应针对页岩气勘探开发特征,加强核心算法研究与应用,进一步提升智能化生产辅助决策系统功能与性能,促进智能化生产辅助决策系统赋能页岩气藏管理。

参考文献

[1] 艾军,张金成,臧艳彬,等.涪陵页岩气田钻井关键技术[J].石油钻探技术,2014,42(5):9-15.

- AI Jun, ZHANG Jincheng, ZANG Yanbin, et al. The key drilling technologies in Fuling Shale Gas Field[J]. *Petroium Drilling Techniques*, 2014, 42(5): 9-15.
- [2] 王志刚. 涪陵焦石坝地区页岩气水平井压裂改造实践与认识[J]. *石油与天然气地质*, 2014, 35(3): 425-430.
WANG Zhigang. Practice and cognition of shale gas horizontal well fracturing stimulation in Jiaoshiba of Fuling Area[J]. *Oil & Gas Geology*, 2014, 35(3): 425-430.
- [3] 汪宏金, 邢克, 夏钦锋. 涪陵页岩气田无人值守集气站建设[J]. *油气田地面工程*, 2019, 38(3): 69-74.
WANG Hongjin, XING Ke, XIA Qinfeng. Construction of the unattended gas gathering stations in Fuling Shale Gas Field[J]. *Oil-Gasfield Surface Engineering*, 2019, 38(3): 69-74.
- [4] 李海, 任惠琴, 夏维嘉, 等. 数据集成功力页岩气勘探开发[J]. *中国管理信息化*, 2019, 22(3): 72-74.
LI Hai, REN Huiqin, XIA Weijia, et al. Data integration helps shale gas exploration and development[J]. *China Management Informationization*, 2019, 22(3): 72-74.
- [5] 王洪峰, 王胜军, 朱松柏, 等. “互联网+”时代智慧油气田建设的构想与探索[J]. *油气田地面工程*, 2018, 37(8): 1-5.
WANG Hongfeng, WANG Shengjun, ZHU Songbai, et al. Conception and exploration of the smart oil and gas field construction in "Internet + " Era[J]. *Oil-Gasfield Surface Engineering*, 2018, 37(8): 1-5.
- [6] 李阳, 廉培庆, 薛兆杰, 等. 大数据及人工智能在油气田开发中的应用现状及展望[J]. *中国石油大学学报(自然科学版)*, 2020, 44(4): 1-11.
LI Yang, LIAN Peiqing, XUE Zhaojie, et al. Application status and prospect of big data and artificial intelligence in oil and gas field development[J]. *Journal of China University of Petroleum*, 2020, 44(4): 1-11.
- [7] 胡耀义. 一种智能化油气田建设的解决方案[J]. *信息系统工程*, 2020(2): 148-149.
HU Yaoyi. A Solution for intelligent oil and gas field construction[J]. *Information System Engineering*, 2020 (2): 148-149.
- [8] NOSHI C I, ASSEM A I, SCHUBERT J J. The role of big data analytics in exploration and production: A review of benefits and applications[C]// Paper SPE-193776-MS presented at the SPE International Heavy Oil Conference and Exhibition, Kuwait City, Kuwait, December 2018.
- [9] MOHAGHEGH S D. Shale descriptive analytics: Which parameters are controlling production in shale[C]// Paper SPE-196226-MS presented at the SPE Annual Technical Conference and Exhibition, 2019.
- [10] 王强, 叶梦旎, 李宁, 等. 页岩气藏数值模拟模型研究进展[J]. *中国地质*, 2019, 46(6): 1284-1299.
WANG Qiang, YE Mengni, LI Ning, et al. Research progress of numerical simulation models for shale gas reservoirs[J]. *Geology in China*, 2019, 46(6): 1284-1299.
- [11] 沈金才, 刘尧文. 涪陵焦石坝区块页岩气井产量递减典型曲线应用研究[J]. *石油钻探技术*, 2016, 44(4): 88-95.
SHEN Jincai, LIU Yaowen. Application study on typical production decline curves of shale gas wells in the Fuling Jiaoshiba Block[J]. *Petroium Drilling Techniques*, 2016, 44(4): 88-95.
- [12] 郭建林, 贾爱林, 贾成业, 等. 页岩气水平井生产规律[J]. *天然气工业*, 2019, 39(10): 53-58.
GUO Jianlin, JIA Ailin, JIA Chengye, et al. Production laws of shale-gas horizontal wells[J]. *Natural Gas Industry*, 2019, 39(10): 53-58.
- [13] 蔡勋育, 赵培荣, 高波, 等. 中国石化页岩气“十三五”发展成果与展望[J]. *石油与天然气地质*, 2021, 42(1): 16-27.
CAI Xunyu, ZHAO Peirong, GAO Bo, et al. Sinopec's Shale Gas Development Achievements during the "Thirteenth Five-Year Plan" Period and Outlook for the Future[J]. *Oil & Gas Geology*, 2021, 42(1): 16-27.
- [14] LEIVA L A, VIDAL E. Warped K-Means: An algorithm to cluster sequentially-distributed data[J]. *Information Sciences*, 2013, 237: 196-210.
- [15] MEOR HASHIM, MEOR M, YUSOFF M, et al. Utilizing artificial neural network for real-time prediction of differential sticking symptoms[C]. IPTC21221, 2021.
- [16] DIAZ S P, VILAR J A. Comparing several parametric and nonparametric approaches to time series clustering: A simulation study. *Journal of Classification*. 2010, 27(3): 333-362.
- [17] XU R, ZHOU M L. Elman neural network-based identification of Krasnosel'skii-Pokrovskii model for magnetic shape memory alloys actuator[J]. *IEEE Transactions on Magnetics*, 2017: 1-1.

(编辑 常燕)