

基于DEA决策的调剖选井方法研究与应用

张志军¹, 郭梦全¹, 华科良¹, 赵桂超², 魏俊¹, 王舜¹, 段一凡¹

(1. 中海油能源发展股份有限公司工程技术分公司, 天津 300452; 2. 太重(天津)滨海重型机械有限公司, 天津 300452)

摘要:针对目前已有的调剖选井决策方法考虑参数过于简单且区分度小、可比性差等带来的调剖选井误差问题,提出了一种DEA决策法,用以指导调剖选井。DEA决策法筛选指标覆盖油水井静动态参数,多指标、更全面,操作简单,无需人为赋予权重或提前设定生产函数形式,能够更加准确地指导调剖选井。研究表明:DEA决策法通过定量表征注采参数响应程度来反映井组调剖的需求程度;注采参数响应程度范围在0~1,越接近1,井组越需要调剖。矿场应用结果表明,DEA决策将传统的PI决策方法作为一个考虑因素,能准确地指导注入井调剖选井,其准确性高于PI决策法。研究成果为油田调剖选井提供了重要的技术支持,可进一步推广应用。

关键词:DEA决策法;注入参数;产出参数;响应程度;调剖选井

中图分类号:TE357.2 **文献标志码:**A

Research and application of DEA decision-making technology in profile control well selection

ZHANG Zhijun¹, GUO Mengquan¹, HUA Keliang¹, ZHAO Guichao²,

WEI Jun¹, WANG Shun¹, DUAN Yifan¹

(1. CNOOC Ener. Tech. Drilling & Production Co., Tianjin 300452, China; 2. TZ (Tianjin) Binhai Heavy Machinery Co., Ltd., Tianjin 300452, China)

Abstract: The DEA decision method is proposed to guide the selection of profile control wells due to the existing decision-making methods of profile control well selection considering too simple parameters with little differentiation and poor comparability. The screening indexes of the DEA decision method cover the static and dynamic parameters of oil and water wells, which are multi-indicator, more comprehensive, simple to operate, and do not require manually assigned weights or setting the form of production function in advance, and can guide the well selection for profile control more accurately. The research result shows that the DEA decision-making method reflects the demand for the profile control of well group by quantitatively characterizing the response degree of injection-production parameters. The response degree of injection-production parameters ranges from 0 to 1, the closer the response degree of injection-production parameters is to 1, the more the well group needs profile control. The field application results show that the DEA decision-making method, considering the traditional PI decision method, can accurately guide the profile control well selection of injection wells, and its accuracy is higher than that of the PI decision method. The research results provide important technical support for profile control well selection in oilfields and can be further promoted and applied.

Key words: DEA decision method; injection parameters; output parameters; responsiveness; profile control well selection

引用格式: 张志军, 郭梦全, 华科良, 等. 基于DEA决策的调剖选井方法研究与应用[J]. 复杂油气藏, 2023, 16(2): 225-229.

ZHANG Zhijun, GUO Mengquan, HUA Keliang, et al. Research and application of DEA decision-making technology in profile control well selection[J]. Complex Hydrocarbon Reservoirs, 2023, 16(2): 225-229.

我国大多数油田水驱开发都已进入了高含水期,剩余油分散,挖潜难度大,产量递减快等问题成为油田工作者面临的主要难题^[1-4]。调剖技术作为一种稳油控水措施,已在油田广泛应用,但如何筛选调剖井组,成为油田管理者需要解决的难题之一。

目前,国内外学者针对井组调剖提出了各种筛

选研究方法,如赵福麟^[5]提出利用压力指数PI、FD来指导调剖选井,该方法虽然简单但存在数值范围

收稿日期:2022-02-25;改回日期:2022-06-24。

第一作者简介: 张志军(1989—),硕士,高级工程师,现从事提高采收率技术研究。E-mail: zhangzhj43@cnooc.com.cn。

基金项目:“十三五”国家科技重大专项示范工程58“渤海油田高效开发示范工程”(编号2016ZX05058)经费资助。

小、可比性差、易引起误判、受测试计算时间影响大等问题。李宜坤等^[6]提出修正注水井PI与地层参数和流体物性参数的方法,但未考虑压降速率对压力指数值的影响且受选取时间对压力指数的影响。陈存良等^[7-8]虽完善了压力指数,但并未考虑储层物性及注入流体性质对压力指数的影响。房灵太等^[9]提出模糊综合评判法指导调剖选井,但各参数权重的确定有较大的人为干预。靳彦欣等^[10]利用数值模拟方法指导调剖选井,虽然选井的准确性增强,但操作复杂,可操作性大大降低。

综合分析可知,目前已提出的筛选方法仅考虑部分油藏静态参数,未考虑生产动态参数,对受效井组调剖效果预测作用较弱,这样势必会给调剖选井带来较大误差。同时考虑较为完善的模糊综合评判法、数值模拟法有较大的人为干预因素,未必能准确反映井组调剖的需求程度。本文基于已有选井方法,考虑油水井静态参数,提出了一种既操作简单又考虑参数全面的新型调剖选井方法——DEA决策法。

DEA决策法利用数据包络分析法^[11-13],通过分析各井组的注入参数与产出参数的相关性,得到注采参数间响应程度的定量化指标,从而筛选出调剖井组。响应程度分布范围0~1,越接近1,代表注采参数响应程度高,即注入参数越大,对应受益井开发效果越差;越接近0,代表注采参数响应程度低,即注入参数越小,对应受益井开发效果越好。该方法无需预先确定带有参数的生产函数形式以及参数权重,避免了人为干预参数权重而带来误差。

1 DEA决策方法评价因素筛选

1.1 调剖井组的确定

调剖井组的确定可以根据区块大小、各井组资料完整程度等挑选合适数量的井组。但根据数据包络分析法的要求,井组数量应达到注入、产出参数之和的2~3倍。

1.2 注入参数、产出参数确定

注入参数代表注入井生产特征的参数,包括渗透率变异系数、米吸水指数、吸水剖面级差、PI值,产出参数为表征生产井特征的参数,包括井组生产井含水率变异系数、井组生产井产液变异系数、井组剩余储量^[14]。

1.2.1 注入参数

渗透率变异系数:表征储层渗透率差异的大

小,其值越大,储层非均质性越强,井组注入不均衡的程度越大,渗透率低的层位动用程度越低。因此,在调剖选井过程中,要优先选择渗透率变异系数大的井组进行调剖。

米吸水指数:表示注入井单位压力下的吸水能力,其值越大,说明注入水沿某小层突进的可能性越大,井组生产井含水差异越大,井组调剖需求越大。

吸水剖面变异系数:反映注入井各层吸水的差异,其值越大,说明注入水在某些层位的突进越严重,水流优势通道发育程度越高,故需对此进行调剖。

PI值:基于注入井的井口压降曲线,也是常用的调剖选井方法之一。该值反映目前储层的渗流能力,值越小,目前储层的渗流能力越强,越应进行调剖。

1.2.2 产出参数

井组生产井含水率变异系数:水驱开发井组中,各井含水率差异越大,表示注入水在油藏中的不均衡突进越明显,井组越需要调剖。

井组生产井产液变异系数:在一定的注水速度条件下,井组产液量差异越大,表示注入水在该油井方向突破较快,对应层位的吸水剖面分布不均匀,需进行调剖措施。

井组剩余储量:代表调剖潜力的大小,剩余储量越大,说明储层动用程度越低,驱替均衡性差,需进行调剖措施。

2 DEA模型及调剖选井决策流程

2.1 DEA模型简介

DEA方法的常用模型是CCR(Charnes-Cooper-Rhodes)和BCC(Banker-Charnes-Cooper)模型。CCR模型如式(1)所示。在CCR模型中增加约束条件 $\sum \lambda_j = 1$,得到BCC模型。假设以 n 口注入井的调剖需求作为决策单元,每口注入井组对应4个注入参数和3个产出参数,则决策单元中的注入、产出参数的向量分别为 $x_j = (x_{1j}, x_{2j}, x_{3j}, x_{4j}) > 0, y_j = (y_{1j}, y_{2j}, y_{3j}) > 0, j = 1, 2, \dots, n$ 。

$$\begin{cases} \min \theta \\ s.t. \sum_{j=1}^m \lambda_j x_{ij} \leq x_{ik}, i = 1, 2, 3, 4 \\ \sum_{j=1}^m \lambda_j y_{kj} \geq 0, y_{kj}, k = 1, 2, 3 \\ \sum_{j=1}^m \lambda_j \geq 0, i = 1, 2, 3, 4 \end{cases} \quad (1)$$

式中, θ 为第 j 个井的调剖决策值, x_{ij} 为第 j 个井的第 i 个注入参数值, y_{kj} 为第 j 个井的第 k 个产出参数值。

2.2 DEA 决策流程

DEA 决策方法步骤包括确定调剖井组范围、建立注采指标体系、指标体系数据整理、选定 DEA 模型、评价分析及确定目标井组。工作步骤如图 1 所示。

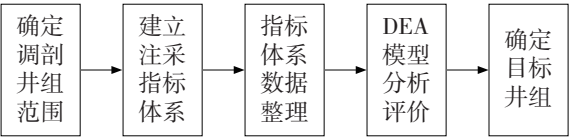


图 1 DEA 方法工作步骤流程

调剖井组可根据井区范围进行确定,注采指标体系在 1.2 小节中已进行阐述。

在指标体系数据整理中,由于 PI 值对开发效果的影响与其他注入井参数的影响是相反的,即 PI 值越小,井组越需调剖,因此通过取倒数再归一化处理的方式来表征 PI 值。而井组剩余储量需要通过归一化处理来实现无量纲化,这里取各井组剩余储量与剩余储量最大值的比来处理。

DEA 模型分析评价则主要是利用 DEAP 软件,基于注采指标体系进行计算,得到各注入井组的调剖决策值,通过对比值大小来指导调剖井组的筛选。值越大,说明注采参数响应程度越高,井组调剖的需求越强。

通过建立 DEA 决策方法可知:该方法不需考虑注入、产出之间的函数关系,不需预先估计参数,不需做任何人为的权重假设,直接通过产出与注入之间加权之和之比,计算决策筛选出调剖井组。

与其他统计方法相比,DEA 处理不同类型的多注入产出参数问题的能力具有很大优势,而且评价只依赖注入与产出数据,可以有效解决评分赋值主

观性的弊病。

2.3 DEAP 软件简介

DEAP 软件包括 DEAP.exe、DEAP.000、eg.ins、eg.out 及 eg.dta。其中 DEAP.exe、DEAP.000 两个文件是软件运行所必需的,计算时无需改动。

eg.dta 文件为参与计算的各筛选井组的产出、注入参数,其中先输入注入参数,再输入产出参数。

eg.ins 文件用来进行参数设置,参数设置时,只更改每一行的前面小部分内容即可,文件所含内容如下所示:

- DATA FILE NAME 数据文件名称(eg.dta);
- OUTPUT FILE NAME 计算结果文件名称;
- NUMBER of FLRMS 决策单元数量;
- NUMBER OF OUTPUTS 产出参数种类数目;
- NUMBER OF INPUTS 注入参数种类数目;
- CRS 总井组数不变模型(数值为 0);
- DEA MODEL TYPE DEA 模型类型(数值为 0);

eg.out 文件是一个计算结果文件,存放着 DEA 分析之后的结果。

软件在使用过程中,首先制作好 eg.dta、eg.ins 文件,然后将 eg.ins 文件输入到 DEAP.exe 程序中运行计算,即可得到 eg.out 文件,即 DEA 分析法得到的调剖井组筛选结果。

3 实例应用

渤海 C 油田是河流三角洲沉积复合体,储层非均质严重,地下原油黏度 80~150 mPa·s。由于地下原油黏度较大,水驱开发含水突破速度快,井组动用程度差异较大,需要对窜流严重的注入井进行调剖,改善开发效果,从而达到稳油控水的目的。

为筛选出调剖井组,对注入、产出参数进行整理并做归一化处理,得到指标体系如表 1 所示。

表 1 C 油田不同方法调剖选井决策对比

井组	注入参数				产出参数		
	渗透率变异系数	米吸水指数	吸水剖面变异系数	压降系数	含水变异系数	产液变异系数	井组潜力
C4	0.59	0.43	0.17	1.00	0.16	0.02	0.80
C7	0.55	0.87	0.13	0.34	0.18	0.03	0.70
C9	0.74	0.86	0.40	0.19	0.49	0.04	0.60
C12	0.65	0.43	0.11	0.20	0.93	0.89	0.95
C14	0.83	0.21	0.64	0.81	0.28	1.00	0.95
C17	0.49	0.88	0.69	0.12	0.67	0.06	0.60

续表 1 C 油田不同方法调剖选井决策对比

井组	注入参数				产出参数		
	渗透率变异系数	米吸水指数	吸水剖面变异系数	压降系数	含水变异系数	产液变异系数	井组潜力
C21	0.84	0.89	0.09	0.18	0.11	0.33	0.40
C24	0.38	0.69	0.30	0.15	0.04	0.38	0.50
C33	0.51	0.62	0.58	0.15	0.03	0.17	0.50
C38	0.63	1.00	0.94	0.20	0.02	0.28	0.35
C39	0.62	0.30	0.87	0.28	0.03	0.22	0.35
C40	1.00	0.56	1.00	0.12	0.83	1.00	0.95
C53	0.60	0.45	0.93	0.10	0.03	0.17	0.66
C54	0.31	0.32	0.80	0.32	0.02	0.03	0.66
C55	0.42	0.33	0.59	0.15	0.02	0.02	0.32
C56	0.50	0.29	0.84	0.21	0.02	0.03	0.35
C57	0.55	0.85	0.49	0.08	1.00	0.94	1.00
C58	0.51	0.32	0.44	0.23	0.03	0.03	0.50

利用表 1 中数据,结合 DEA 决策方法,得到各井组注采参数响应程度;同时利用传统 PI 决策法,得到需要调剖的井组(如表 2 所示)。

表 2 C 油田调剖井组各类方法决策结果

井组	PI 决策	结论	DEA 决策法	结论
C4	2.43	不调剖	0.901	不调剖
C7	0.57	调剖	0.851	不调剖
C9	1.03	不调剖	0.493	不调剖
C12	1.00	调剖	1	调剖
C14	0.24	调剖	1	调剖
C17	1.57	不调剖	0.752	不调剖
C21	1.10	不调剖	0.515	不调剖
C24	1.28	不调剖	0.744	不调剖
C33S1	1.29	不调剖	0.563	不调剖
C38	0.16	调剖	0.299	不调剖
C39	0.70	调剖	0.461	不调剖
C40	1.64	不调剖	1	调剖
C53	1.93	不调剖	0.907	不调剖
C54	0.62	调剖	1	调剖
C55	1.28	不调剖	0.489	不调剖
C56	0.09	调剖	0.506	不调剖
C57	0.20	调剖	1	调剖
C58	0.86	调剖	0.671	不调剖

对比 PI 决策与 DEA 决策结果可知,部分井结论存在差异,现分两类进行分析。一类是 PI 决策需要

调剖而 DEA 决策无需调剖的井组,如 C7、C38、C39、C56、C58 井组,这类井组含水、产液差异小,剩余储量较小,调剖需求程度相对较弱;另一类是 PI 决策无需调剖而 DEA 决策需要调剖的井组,如 C40 井组。C40 井非均质性强,吸水剖面差异大,对应受益井产液、含水差异大,井组剩余储量大,调剖作业需求程度大。综合以上分析可知:DEA 决策法较 PI 决策法更加准确,主要是 DEA 决策法从注采两方面同时考虑,综合评价,使得调剖井组的筛选更加准确。

分析 DEA 决策法结果可知,注入参数越大,说明注水越不均衡,对应生产井开发效果越差,即注采响应程度越大。结合注采响应程度,推荐 C12、C14、C40、C54、C57 井组进行调剖。

根据井组筛选结果及调剖体系研究,结合油田生产情况和调剖效果最大化,优先实施 C12、C14、C57、C40 井组。调剖作业后,4 口井 PI 值如表 3 所示。由表 3 可知,调剖后 PI 指数均有大幅提高,说明在注入端起到了较好的封堵效果。

表 3 调剖前后四口井 PI 值对比

井号	PI_{90}	
	调剖前	调剖后
C12	1.0	3.2
C14	0.2	4.0
C57	0.2	0.9
C40	0.1	2.2

调剖作业后,生产端降水增油效果明显,目前井组累增油 25 392.3 m³,最大降水幅度 5%,最大日

增油 25.3 m³。但调剖后期多口受益井因出砂、泵故障等问题,调剖效果转弱。井组生产曲线见图2。

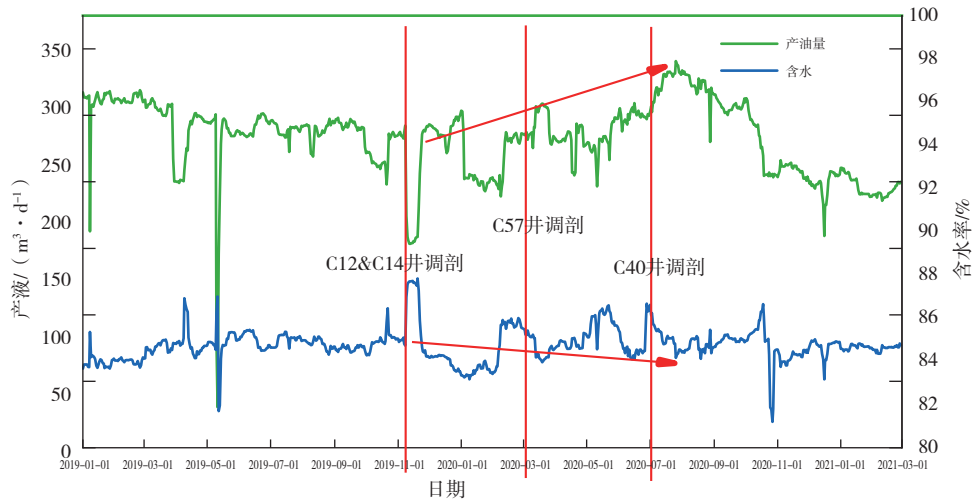


图2 C区调剖井组生产曲线

4 结论

(1)针对目前调剖选井决策技术的不足,提出DEA决策法指导调剖选井,该方法操作简单、筛选指标覆盖油水井静态参数,多指标、更全面。同时该方法不需预先确定带有参数的生产函数形式以及参数权重,避免了人为干预参数权重而带来误差。

(2)分析DEA决策法可知,注采参数响应程度范围为0~1,注采参数响应程度越接近1,注采响应越明显,井组越需要调剖。

(3)矿场应用表明,DEA决策法较PI决策法更加准确,对现场综合治理工作具有重要指导,具有更好的经济效益与社会效益,可进一步推广应用。

参考文献:

- [1] 孟祥海,赵鹏,王宏申,等.多段塞组合调驱在聚驱后油田的研究与应用[J].复杂油气藏,2020,13(4):81-85.
- [2] 李宜坤,李宇乡,彭杨,等.中国堵水调剖60年[J].石油钻采工艺,2019,41(6):773-787.
- [3] 梁守成,李强,吕鑫,等.多级调剖调驱技术效果及剩余油分布[J].大庆石油地质与开发,2018,37(6):108-115.
- [4] 吕鹏,阚亮,王成胜,等.海上油田在线组合调驱提高采收率技术——以渤海C油田E井组为例[J].科学技术与工程,2017,17(9):164-167.
- [5] 赵福麟.压力指数决策技术及其应用进展[J].中国石油大学学报(自然科学版),2011,35(1):82-88.
- [6] 李宜坤,赵福麟,刘一江.区块整体调剖的压力指数决策技术[J].石油大学学报(自然科学版),1997,21(2):41-44,118.
- [7] 陈存良,刘英宪,周凤军,等.基于新型压力指数的调剖选井决策方法研究[J].特种油气藏,2019,26(3):105-108.
- [8] 冯其红,王森,陈存良,等.低渗透裂缝性油藏调剖选井无因次压力指数决策方法[J].石油学报,2013,34(5):932-937.
- [9] 房灵太,陈月明,闫军,等.基于变权的模糊层次分析法在低渗油藏调剖选井中的应用[J].特种油气藏,2007,(3):81-84,94.
- [10] 靳彦欣,史树彬,付玮,等.特高含水油藏深部调剖技术界限研究[J].特种油气藏,2015,22(3):77-80.
- [11] 曲珊珊.油田增产措施效果评价及优化研究[D].青岛:中国石油大学,2010.
- [12] 鲁柳利,谢祥俊.基于DEA的油藏经营管理有效性评价研究[J].西南石油大学学报(社会科学版),2009,2(5):18-21.
- [13] 安贵鑫,彭修娟,张在旭.基于DEA的石油资源开发效率评价[J].工业技术经济,2009,28(1):65-68.
- [14] 殷代印,何瑞,汪勇.榆树林油田模糊综合评判经济调剖选井方法[J].特种油气藏,2020,27(3):82-87.

(编辑 谢 葵)