

示功图量油技术的探索应用

张语哲, 张 恒

重庆科技大学石油与天然气工程学院, 重庆

收稿日期: 2025年1月7日; 录用日期: 2025年3月20日; 发布日期: 2025年5月30日

摘 要

齐108块地处欢喜岭油田北部, 1989年投入开发, 经历多次滚动部署、侧钻、调层及层系互换, 目前处在蒸汽驱 + 蒸汽吞吐开发阶段。但受地质条件所限, 部分油井蒸汽驱受效差存在低产低液、间出情况; 油井投产时间长, 进站管线老化腐蚀, 合走井较多; 齐108块计量多采用玻璃管量油方式, 导致计量困难、误差较大。其他计量方式如单井计量器、三项计量器需要购进设备并进行工艺改造, 投入较高。对比其他方式, 示功图量油成本投入最低。示功图量油没有适用于齐108块的计算公式, 为此设计了相关参数, 现场试验准确度较高, 是对玻璃管和计量器的有效补充, 在齐108块具有广阔的应用前景。

关键词

示功图, 量油, 有效冲程, 漏失量, 修正参数

Exploration and Application of Indicator Diagram Oil Measurement Technology

Yuzhe Zhang, Heng Zhang

Oil and Gas Engineering College, Chongqing University of Science and Technology, Chongqing

Received: Jan. 7th, 2025; accepted: Mar. 20th, 2025; published: May 30th, 2025

Abstract

Block Qi 108 is located north of the Huanxiling oilfield. It was put into development in 1989 and has experienced rolling deployment, sidetracking, layer adjustment and layer series exchange many times. It is currently in the stage of steam drive + steam stimulation development. However, limited by geological conditions, steam flooding in some oil wells has poor effect, with low production, low liquid and intermittent production; The oil wells have been put into operation for a long time, the incoming pipelines are aging and corroded, and there are many combined wells; The measurement of Qi 108 block mostly adopts the method of measuring oil with glass tube, which leads to difficult measurement and large error. Other metering methods, such as single well metering and three-item

metering, require the purchase of equipment and the transformation of processes, with high investment. Compared with other methods, the cost of indicator diagram oil measurement is the lowest. There is no calculation formula applicable to the Qi 108 block for indicator diagram oil measurement. Therefore, relevant parameters are designed. The accuracy of the field test is high, which is an effective supplement to glass tubes and meters, and has broad application prospects in Qi 108 block.

Keywords

Indicator Diagram, Measuring Oil, Effective Stroke, Leakage, Correction Parameters

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 前言

齐 108 块地处欢喜岭油田北部, 1989 年投入开发, 经历多次滚动部署、侧钻、调层及层系互换, 目前处在蒸汽驱 + 蒸汽吞吐开发阶段[1] [2]。但受地质条件所限, 部分油井蒸汽驱受效差存在低产低液、间出情况; 油井投产时间长, 进站管线老化腐蚀, 合走井较多; 齐 108 块计量多采用玻璃管量油方式, 导致计量困难、误差较大。为此开展了示功图量油技术的探索应用, 结合生产实际设计了相关参数, 现场应用准确度较高, 是对现有计量方式的补充, 在齐 108 块具有广阔推广前景[3] [4]。

2. 实施背景

2.1. 区块概况

齐 108 块地处欢喜岭油田北部, 行政上隶属于盘锦市大岗子村管辖, 构造上位于辽河坳陷盆地西部凹陷西斜坡中段欢曙上台阶的上倾部位, 东北部与曙一区杜 212 块相接, 西邻齐 40 块。齐 108 块是在斜坡背景下发育的、被断层复杂化的断裂背斜构造, 该块于 1989 年投入开发, 经历多次滚动部署、侧钻、调层及层系互换, 2018 年开始在主力断块进行 27 个井组的蒸汽驱试验, 目前区块采取蒸汽驱+蒸汽吞吐的开发方式。

2.2. 存在问题

齐 108 块莲花油层主体部位压力低于边部, 莲I油层地层压力约为 3.0~4.2 MPa, 莲II油层地层压力约为 2.6~4.8 MPa, 单井产量计量存在以下问题:

(1) 玻璃管量油井数较多, 不能及时计量

齐 108 块共有玻璃管量油 132 口, 每天量油工作量较大, 不能保证所有井每天都能够计量。

(2) 低产井较多, 量油时间较长

齐 108 块油井日产液 15 t 以下油井 151 口, 由(1)可知 15t 油井量油需要 32 分钟, 单次计量时间较长。

$$Q = \frac{1400\pi D^2 H}{4t} \quad (1)$$

(3) 油井间出明显, 玻璃管计量不上

齐 108 块吞吐区块间出井较多, 出液时间不定, 玻璃管量油所需计量时间长、误差大。

(4) 合走井产量计量困难

区块油井投产时间较长, 单井进站管线普遍存在老化腐蚀, 管线腐蚀泄漏后只能合走进站。共有合走井 58 口, 只能关井单独计量, 影响油井生产时率。

2.3. 技术思路

针对上述问题, 玻璃管量油存在的弊端可以通过更换其他计量方式来解决。对比其他计量方式, 示功图量油成本较低[5]; 但没有适用于齐 108 块的计算公式, 直接计算准确性较差, 为此设计了相关参数, 提高计算准确性。

3. 示功图量油技术的研究

3.1. 理论排量计算

泵的理论排量是在理想条件下得出的井口产液量。其计算公式为:

$$Q_{理} = 1440S_rNA \quad (2)$$

式中: $Q_{理}$ 为理论排量, m^3/d ;

N 为抽油机冲次, min^{-1} ;

S 为抽油机冲程, m ;

A 为泵柱塞横截面积 m^2 。

3.2. 实际产液量计算

实际产液量即为脱气后地面实际产量, 其计算公式为:

$$Q_{实} = \alpha Q_{理} \quad (3)$$

式中: $Q_{实}$ 为实际产液量, m^3/d ;

α 为排量系数, 即为泵效。

泵效的影响因素主要有冲程损失、充满程度、漏失程度、混合流体体积系数影响几个方面。暂时忽略体积系数影响, 以上几个因素对泵效的影响关系可表示为:

$$\alpha = \eta_s \eta_f \eta_l \quad (4)$$

式中: η_s 为柱塞冲程系数, 是柱塞冲程 S_p 与悬点冲程 S_r 之比, $\eta_s = S_p / S_r$;

η_f 为泵筒充满系数, 是柱塞有效冲程 S_{pe} 与柱塞冲程 S_p 之比, $\eta_f = S_{pe} / S_p$;

η_l 为泵漏失系数, 是一个抽汲周期内实际排液体积 $V_p - \Delta V_p$ 与理论排液体积 V_p 之比, $\eta_l = (V_p - \Delta V_p) / V_p$;

将(2)(4)带入(3)可以得出, 实际产量计算公式为:

$$Q_{实} = 1440N_s (S_{pe} A - \Delta Q_p) \quad (5)$$

由(5)可以看出实际产液量的计算主要需要解决两个问题: (1) 计算柱塞有效冲程 S_{pe} ; (2) 计算泵漏失量 ΔQ_p 。

3.3. 柱塞有效冲程计算

在柱塞的一个冲程内, 由于气体影响、柱塞脱出泵筒的情况影响, 有一部分行程没有起到作用, 这部分行程称为无效冲程; 反之, 将真正起到作用的冲程称为有效冲程。

3.3.1. 柱塞有效冲程与阀开闭点之间的关系

抽油泵的吸入过程从固定阀打开到固定阀关闭结束, 柱塞这段行程即为固定阀开闭点间的距离, 记为 S_{foc} ; 排出过程从游动阀打开到游动阀关闭结束, 柱塞这段行程即为游动阀开闭点之间的距离, 记为 S_{moc} ; 一般情况下, S_{foc} 并不等于 S_{moc} , 主要有以下两种情况:

1) $S_{foc} > S_{moc}$ 主要由于泵充不满、气体影响、固定阀漏失等原因引起。在泵充不满、泵内充气的情况下, 下行程开始柱塞首先相对于泵筒走过一段距离压缩空间, 使泵内压力增大到一定程度顶开游动阀开始排液, 造成 $S_{foc} > S_{moc}$; 在固定阀漏失的情况下, 柱塞向下运动时固定阀漏失, 泵内压力增长缓慢, 柱塞走过一段距离后, 泵内压力才足以顶开游动阀开始排液 $S_{foc} > S_{moc}$ 。以上情况下柱塞有效冲程为 S_{moc} (如图 1 所示)。

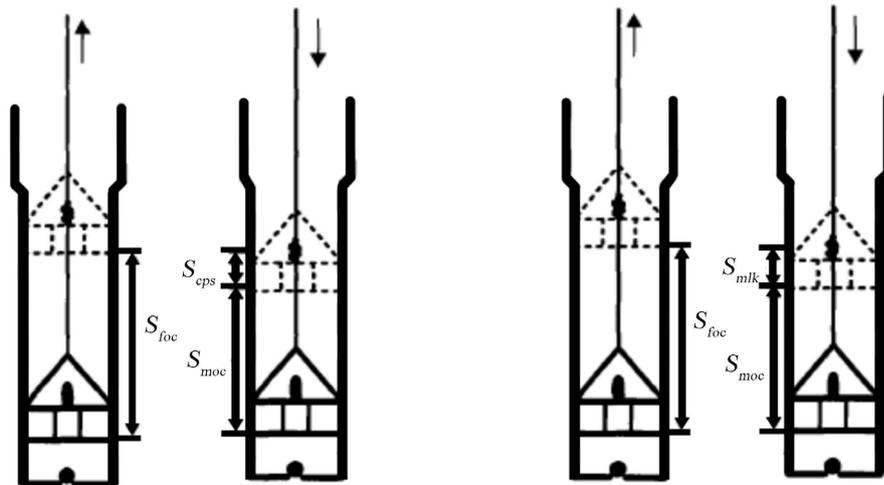


Figure 1. Pump undercharge, gas influence, and leakage of fixed valve
图 1. 泵充不满、气体影响、固定阀漏失情况

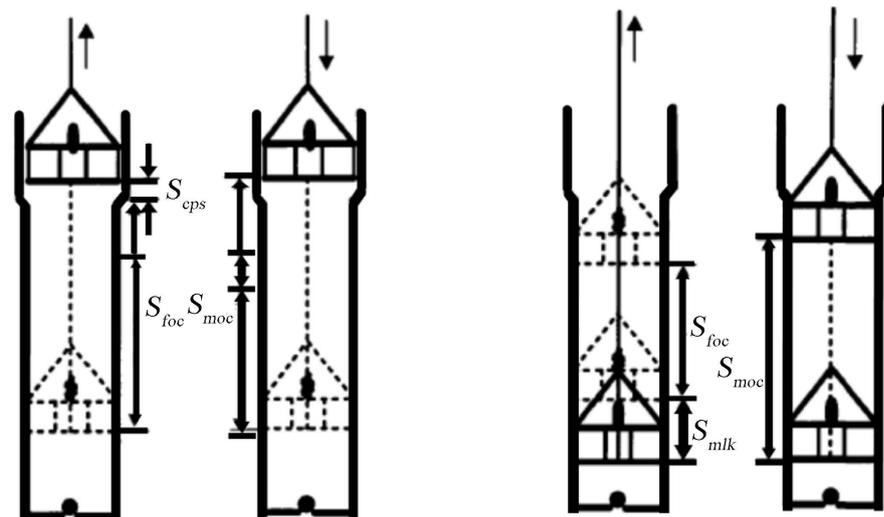


Figure 2. Leakage of plunger out of pump barrel and swimming valve
图 2. 柱塞脱出泵筒、游动阀漏失情况

2) $S_{foc} < S_{moc}$ 主要由于柱塞脱出泵筒、游动阀漏失等原因引起。柱塞脱出泵筒时, 固定阀提前关闭,

下行程一开始游动阀即打开造成 $S_{foc} < S_{moc}$; 游动阀漏失时, 泵腔内压力下降缓慢, 柱塞走过一段距离后井底压力才能顶开固定阀开始吸液, $S_{foc} < S_{moc}$ 。以上情况下柱塞有效冲程为 S_{foc} (如图 2 所示)。

3.3.2. 阀开闭点位置与示功图的关系

根据泵的工作过程可知, A、B、C、D 点依次为游动阀关闭点、固定阀开启点、固定阀关闭点、游动阀开启点。BC 段为泵吸入过程、CD 段为泵排液过程(如图 3 所示)。

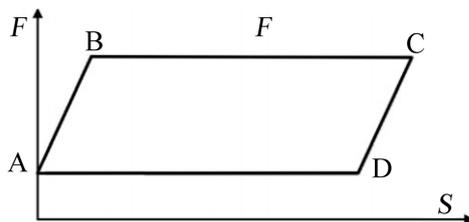


Figure 3. Theoretical indicator diagram of the oil pump
图 3. 抽油泵理论示功图

3.3.3. 柱塞有效冲程计算方法

柱塞的有效冲程 S_{pe} 取游动阀和固定阀开闭点对应的柱塞行程的较小值。由抽油泵工作原理可知阀开闭点处示功图曲率变化最大, 通过功图几何特征即可确定阀开闭点, 进而计算有效冲程(如图 4 所示)。

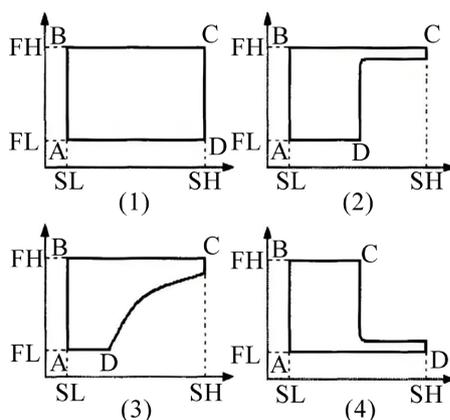


Figure 4. The relationship between the typical dynamometer card of the oil pump and the valve opening and closing points
图 4. 抽油泵典型示功图与阀开闭点的关系

3.4. 井下泵实际排量计算

3.4.1. 漏失量计算

抽油泵漏失主要分三类: 阀漏失、柱塞与泵筒间漏失、油管漏失。其中阀漏失在计算有效冲程时已经考虑在内、油管漏失量与施工质量有关不予考虑, 柱塞与泵筒间漏失量可由以下公式计算:

$$\Delta Q_p = \frac{\pi D_p \delta^3 (p_d - p_s)}{12 \mu l_z} \left[1 + \frac{3}{2} \left(\frac{e}{\delta} \right)^2 \right] - \frac{\pi D_p \delta \bar{v}_u}{2} \quad (6)$$

式中 ΔQ_p 为抽油泵在一个抽汲周期内漏失量, m^3/d ; D_p 为柱塞直径, m ; l_z 为柱塞长度, m ; δ 为柱塞与泵筒之间半径方向的平均间隙 m ; e 为柱塞与泵筒轴线之间偏心距, m ; μ 为井内液体粘度, $KPa \cdot s$; P_d 为抽油泵排出压力, KPa ; P_s 为抽油泵吸入压力, KPa ; v_u 为柱塞上冲程平均速度, m/s 。

3.4.2. 漏失量计算中参数 δ 和 e 的取值方法与依据

(1) 柱塞与泵筒半径方向平均间隙(δ)

定义与计算： δ 为柱塞与泵筒内径的半径差，即

$$\delta = \frac{D_{\text{pump}} - D_{\text{plunger}}}{2} \quad (7)$$

其中， D_{pump} 为泵筒内径， D_{plunger} 为柱塞外径。

取值依据：

- ① 制造公差：根据 API 标准以及设计手册推荐的配合公差， δ 通常为 0.02~0.10 mm。
- ② 磨损影响：长期运行后，柱塞与泵筒因磨粒磨损导致间隙增大，可通过定期测量或经验模型估算。
- ③ 热膨胀修正：高温工况下，材料热膨胀系数需纳入计算。例如，钢的热膨胀系数为 $11.2 \times 10^{-5}/^{\circ}\text{C}$ ，若温度升高 100 $^{\circ}\text{C}$ ，径向间隙变化为：

$$\Delta\delta = \alpha\Delta T D_{\text{plunger}}/2 \quad (8)$$

- ④ 实测数据：使用内径千分尺测量泵筒内径，外径千分尺测量柱塞直径，取多组数据的平均值。

(2) 柱塞与泵筒轴线偏心距(e)

定义： e 为两轴线间的最大偏移距离，理想值为 0。

取值依据：安装精度，API Spec 11AX 规定抽油泵安装的同轴度误差应小于 0.05 mm/m， e 通常为 0.1~0.5 mm。动态偏心，运行中因振动或受力不均导致瞬时偏心，可通过加速度传感器监测并取均方根值。

经验公式：偏心距与泵速的平方成正比，即

$$e = k\omega^2 \quad (9)$$

其中， k 为系统刚度系数， ω 为曲柄角速度。

3.4.3. 吸入压力计算

抽油泵吸入口压力主要由井口套压 P_s 与液柱压力构成。

$$p_s = P_s + \rho_o g (H_p - H_d) \quad (10)$$

式中： ρ_o 为原油密度， kg/m^3 ； H_p 为泵挂深度， m ； H_d 为动液面深度， m 。

3.4.4. 排出压力计算

排出压力 p_d 主要由井口油压 P_d 与液柱压力构成。

$$p_d = P_d + \rho_o g H_p \quad (11)$$

式中： ρ_o 为原油密度， kg/m^3 ； H_p 为泵挂深度， m 。

3.5. 修正参数计算

示功图产量与玻璃管量油产量对比，发现存在较大误差，主要是忽略混合流体体积系数、未引入泵示功图造成的，经过计算引入修正参数：

$$\eta_v = \frac{\sum_{i=1}^n Q_{di}}{\sum_{j=1}^n Q_{ji}} \quad (12)$$

3.5.1. 误差原因分析

示功图产量(Q_{dyn})与玻璃管量油产量(Q_{actual})差异主要由以下因素引起：① 混合流体体积系数(B)，未

考虑地下流体(油、气、水)与地面标准体积的差异。② 泵效损失, 气体压缩性、充不满效应、漏失量等导致实际排量降低。

3.5.2. 理论模型构建

(1) 实际产量公式

$$Q_{\text{actual}} = Q_{\text{res}}/B\eta_{\text{pump}} - Q_{\text{leak}} \quad (13)$$

其中, Q_{res} 为地下体积排量, η_{pump} 为泵效, Q_{leak} 为漏失量。

(2) 示功图理论产量

$$Q_{\text{dyn}} = A_p S_p N \eta_{\text{eff}} \quad (14)$$

A_p 为柱塞截面积, S_p 为冲程, N 为冲次, η_{eff} 为有效冲程系数。

(3) 修正参数 η 的表达式

联立两式并忽略漏失量(或纳入泵效), 得:

$$\eta = \frac{Q_{\text{actual}}}{Q_{\text{dyn}}} = \frac{\eta_{\text{pump}}}{B\eta_{\text{eff}}} \quad (15)$$

(4) 针对吞吐区块和蒸汽驱区块分别计算

吞吐井修正参数: 蒸汽加热使原油体积膨胀, $B \approx 1.25$, 泵效 $\eta_{\text{pump}} \approx 0.85$, 有效冲程系数 $\eta_{\text{eff}} \approx 0.85$, 则: $\eta = 0.85/1.25 * 0.85 = 0.8$ 。

汽驱受效井修正参数: 温度较低, $B \approx 1.11$, 泵效 $\eta_{\text{pump}} \approx 0.95$, 有效冲程系数 $\eta_{\text{eff}} \approx 0.95$, 则: $\eta = 0.95/1.11 * 0.95 = 0.9$ 。

确定吞吐井修正参数为 0.8、蒸汽驱受效井修正参数为 0.9。

修正后的实际产液量计算公式:

$$Q_{\text{actual}} = Q_{\text{res}} * \eta_{\text{pump}} * \eta_{\text{eff}} * \eta \quad (16)$$

式中:

Q_{res} 为地下体积排量; η_{pump} 为泵效; η_{eff} 为有效冲程系数; η 为修正参数。

4. 现场试验情况

Table 1. Field comparison test of the dynamometer card for oil quantity measurement

表 1. 示功图量油现场对比试验

序号	井名	玻璃管计量产量 t	示功图计算产量 t	差值
1	齐 108-a	8.3	8	3.6%
2	齐 108-b	5	4.6	8.0%
3	齐 108-c	9.9	9.2	7.1%
4	齐 108-d	12.5	12.8	2.4%
5	齐 108-e	8.2	7.8	4.9%
6	齐 108-f	8.9	8.2	7.9%
7	齐 108-g	5	5.8	16.0%
8	齐 108-h	9.1	9.5	4.4%
9	齐 108-i	14.9	14	6.0%
10	齐 108-g	13.4	12.8	4.5%
合计				6.4%

根据表 1 数据所示: 大部分井的示功图计量与玻璃管计量误差在 10% 以内, 表明示功图量油技术具有较高的准确性。部分井误差较大, 可能受泵效损失、流体体积系数、气体影响、泵筒腐蚀等多种因素影响, 需进一步分析并采取相应措施。示功图量油技术具有减少计量工作量、节省量油时间、成本低等优点, 在齐 108 块具有广阔的应用前景。

该项技术优点主要有: 误差小可靠性高; 可以减少计量工作量, 节省量油时间; 成本低, 不需要购买量油设备或铺设进站管线; 可以在不关井的前提下实现合走井的单独计量。

5. 经济效益分析

合走井节约单井计量器 5 个, 节约成本 55 万元; 合走井不需关井计量产量, 提高生产时率增油 52.5 t, 创效 11.3 万元; 累计创效 62 万元。

经济效益计算如下:

$$\begin{aligned} E_1 &= (1 - 30\%) \times F \times Q \times (P - T) \\ &= 0.7 \times 1 \times 52.5 \times (2121 - 113.5) \\ &= 73,776 \text{ 元。} \end{aligned}$$

式中: E_1 : 成果直接经济效益, 元;

F: 分成系数, 1;

Q: 增加的油气产量, 52.5 吨;

P: 原油价格; 2121 元/吨(不含税)。

T: 税金(城市维护建设税、教育费附加、资源税), 113.5 元/吨。

$$E_2 = \text{单井计量器费用} \times \text{节约数量} = 11 \times 5 = 550,000 \text{ 元。}$$

$$E = E_1 + E_2 = 623,776 \text{ 元。}$$

6. 结论

齐 108 块开发 30 余年, 历经多次调整部署, 目前采用蒸汽驱 + 蒸汽吞吐方式进行开发。低产井增多, 玻璃管量油所需时间较长; 油井间出明显, 计量不上; 管线老化腐蚀, 合走井数增加, 单独计量困难。急需寻找适合的计量方式。

其他计量方式如单井计量器、三相计量器需要购进设备并进行工艺改造, 投入较高。对比其他方式, 示功图量油成本投入最低。

示功图量油没有适用于齐 108 块的计算公式, 为此设计了相关参数, 现场试验准确度较高, 是对玻璃管和计量器量油的有效补充, 在齐 108 块具有广阔的应用前景。

参考文献

- [1] 杨瑞, 王永全. 功图法计量技术在长庆油田的应用[J]. 油气地面工程, 2010(2): 55-57.
- [2] 铁成军, 燕云, 等. 长庆八厂功图计量系统校正方法研究与应用[J]. 石油工程技术, 2011(3): 57-59.
- [3] 王伟, 杨若谷, 等. 大庆油田提高功图 M 油精度的研究[J]. 石油工程技术, 2011(9): 56-58.
- [4] 杨伟. 功图法在油井产量计量重点应用研究[J]. 中国工程机械学报, 2011, 4(3): 4-8.
- [5] 和雷. 功图量油在敖南油田的适应性分析[J]. 内蒙古石油化工, 2011(11): 45-46.