

基于 ISSA 的有杆泵抽油井产量计量方法

李翔宇, 闫浩, 袁春华

(沈阳理工大学 自动化与电气工程学院, 沈阳 110159)

摘要: 油井产量计量是油田开采过程中最重要的工作之一, 准确计量产量对提高油田开采效率和经济效益至关重要。传统翻斗、两相分离式和示功图等量油技术存在投入大、维护成本高和适应性差等问题。为解决上述问题, 提出一种基于改进松鼠搜索算法(improved squirrel search algorithm, ISSA)的油井产量计量方法。通过分析抽油井的工作过程, 提出一组描述抽油泵漏失和充满度的故障参数, 建立故障条件下的抽油系统过程仿真模型。针对油井故障参数优化问题, 提出一种基于食物定位因子的改进松鼠搜索算法, 建立基于 ISSA 的产量计量模型。采用大庆油田数据验证模型, 算法平均预测精度为 94.52%, 表明本方法可为低成本数字油田建设提供支撑。

关键词: 抽油井; 产量计量; 松鼠搜索算法; 电功图

中图分类号: TP18 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1003-1251.2024.03.008

A Method for Measuring Oil Production in Pumping Wells Based on ISSA

LI Xiangyu, YAN Hao, YUAN Chunhua

(Shenyang Ligong University, Shenyang 110159, China)

Abstract: Oil well production measurement is one of the most important tasks in the process of oil field development. Accurately measuring production is crucial for improving the efficiency and economic benefits of oilfield exploitation. However, in traditional technologies such as bucket elevators, two-phase separation systems, and display graphs there some issues of high investment costs, maintenance expenses, and poor adaptability. To address these problems, a method for oil well production measurement based on the improved squirrel search algorithm (ISSA) was proposed. By analyzing the working process of pumping wells, a set of fault parameters describing pump leakage and filling degree were presented, and a process simulation model of the pumping system under failure conditions was established. Using SSA to optimize the fault parameters of the oil well, a production measurement model based on electric work graphs was established, and a food position factor was proposed to improve this algorithm. An improved squirrel search algorithm using food location factors was proposed for optimizing fault parameters of oil wells. A production measurement model based on ISSA was also established. Finally, using Daqing oilfield data for verification, the results show that the average prediction accuracy is 94.52%, which provides technical support for low-cost digital oilfield construction.

Key words: pumping well; production metering; squirrel search algorithm; electrical diagrams

收稿日期: 2023-06-13

基金项目: 国家自然科学基金项目(62173073); 辽宁省教育厅高等学校基本科研项目(LJKMZ20220618); 辽宁省本科教改优质教学资源建设与共享项目(SBKJGYZ-2021-06)

作者简介: 李翔宇(1982—), 男, 副教授, 博士, 研究方向为复杂工业过程建模、诊断与控制; 袁春华(1987—), 通信作者, 女, 副教授, 博士, 研究方向为复杂工业过程建模、诊断与控制。

准确计量油井产量对提高油田开采效率和经济效益至关重要^[1]。获取准确的油井产量数据可以为生产者提供有力的决策支持,帮助生产者制定最优开采方案,最大限度地发掘油田潜力。

传统的油井计量方法主要包括翻斗量油^[2]、玻璃管量油^[3]和液位自动量油^[4],其共同点是采用固定时间区间的周期性计量策略完成多口油井的产量测算。然而,通过部分时段计算的产量推测全天产量的方法,忽略了油井状态的动态变化规律,导致得到的计量结果存在一定的偏差。此外,上述传统计量方法还需占用一定的人工和物资,提高了油田的开采成本。为降低开采成本,提高计量精度,方圆等^[5]提出基于示功图的量油技术。该技术是建立抽油杆柱、油管 and 井液的三维振动模型,通过求解模型以获取有效冲程和油井产量。Lv等^[6-7]提出了漏失因子模型,用于计算泵的漏失程度,但该模型求解过程复杂,对有效冲程的计算精度有一定影响。此外,该方法设备维护成本高、数据获取繁琐,实用性得不到保障。

考虑到电功率数据具备经济实用、实时获取和易采集等诸多优点,Xing^[8]通过分析地面单元各种时变特性因素以及抽油杆柱纵向振动对系统效率的影响,阐述了电机功率、冲次、气油比和淹没深度等参数与系统效率的关系;文献[9-10]通过电功图反演示功图,并结合一维阻尼波动方程对泵功图进行求解,成功消除了抽油杆柱振动对数据的影响;陈德春等^[11]通过分析泵功图曲率特征,成功计算出泵阀开闭点位置,进一步提高了有效冲程计算精度。然而,抽油井工作环境恶劣,常处于不同程度的故障状态,限制了上述基于正常工况方法的使用范围。因此,分析抽油系统的故障工况特性对提高产量的计量精度十分必要。

为此,本文提出一种基于改进松鼠搜索算法(improved squirrel search algorithm,ISSA)的抽油井产量计量方法。通过分析有杆泵抽油井的工作过程,提出一组描述泵漏失、充满度的故障参数,用于生成符合现场工况的功率数据;提出食物定位因子改进松鼠搜索算法,用于优化故障参数,并根据优化的故障参数计算工况特征和产量,实现电功图直接计算油井产量的目的。

1 有杆泵抽油系统建模

假设电机匀速运动、忽略抽油杆横向振动和油管振动,通过分析电机、四连杆机构、抽油杆、抽油泵等单元的工作过程,建立有杆泵抽油系统在故障条件下的工作过程仿真模型。

1.1 正常工况

1) 电机单元。为减少电机内部损耗对机理模型的影响,利用 $d-q$ 参照系分析感应电机的动态输出扭矩。变换示意图如图1所示。

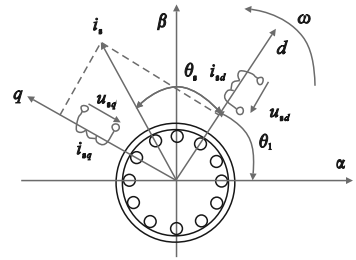


图1 $d-q$ 变换示意图

Fig. 1 Schematic diagram of $d-q$ transform

图中: ω 是 $d-q$ 旋转坐标系相对于 $\alpha-\beta$ 静止坐标系的电气角速度; i_{sd} 和 i_{sq} 分别是定子电流 i_s 在 d 轴和 q 轴的分量; u_{sd} 和 u_{sq} 分别是 d 轴和 q 轴上的等效电压; θ_s 是定子电流 i_s 与 d 轴的夹角; θ_1 是 d 轴与 α 轴间的角度。经坐标变换后,感应电机的运动方程为

$$\frac{J}{P} \frac{d\omega}{dt} = T_c - T_{LT} \quad (1)$$

式中: J 是转子转动惯量; P 是极数; ω 是电角速度; t 是时间步长; T_c 是电磁转矩; T_{LT} 是负载转矩。

2) 地面传输系统。通过四连杆机构将曲柄轴处的旋转力矩转化为驴头处的直线往复力矩。以曲柄平衡方式为例,曲柄轴上的净扭矩 M_n 为

$$M_n = \overline{TF}(F - B) - M \sin(\theta - \tau) \quad (2)$$

式中: \overline{TF} 是扭矩因数; F 是悬点载荷; B 是不平衡重; M 是最大平衡重; θ 是曲柄转角; τ 是平衡重偏角。

3) 井下泵送系统。驴头的往复运动通过抽油杆柱传递到柱塞处,带动泵筒完成周期性的原油抽排工作。由于抽油杆柱常受动态载荷影响,抽汲过程中常伴随纵向振动^[12-13]。因此,将其等效为弹簧阻尼系统,在 t 时刻的状态方程为

$$\mathbf{M}\ddot{x}(t) + \mathbf{D}\dot{x}(t) + \mathbf{K}x(t) = \mathbf{u}(t) \quad (3)$$

式中: \mathbf{M} 是质量矩阵; \mathbf{D} 是阻尼矩阵; \mathbf{K} 是刚度矩阵; $x(t)$ 是位移; $\dot{x}(t)$ 是速度; $\ddot{x}(t)$ 是加速度; $\mathbf{u}(t)$ 是载荷。柱塞上下表面压力产生的柱塞载荷 F_{PL} 为

$$F_{PL} = A_p(P_d - P(t)) + d\dot{x}(t) \quad (4)$$

式中: A_p 是柱塞直径; P_d 是排出压力; $P(t)$ 是泵压。流体进泵的动态平衡方程可表示为

$$P(t+dt)[A_{PL}(S_{\text{gas}}+d_{S_{\text{gas}}})]^k = P(t)(A_{PL}S_{\text{gas}})^k + P_d \left[\frac{R(q_{\text{tv}}+q_{\text{PL}})dt}{(1+R)} \right]^k - P(t) \left[\frac{R'q_{\text{sv}}dt}{1+R'} \right]^k \quad (5)$$

式中: A_{PL} 是柱塞有效面积; S_{gas} 是气体高度; k 是压缩指数; R' 、 R 分别是泵腔内与出口处的气液比; q_{tv} 、 q_{PL} 、 q_{sv} 分别是游动阀、柱塞连接缝隙和固定阀的瞬时流量。

假设泵抽排过程中瞬时动液面保持不变,则瞬时沉没压力 P_{sub} 和瞬时排出压力 P_d 的计算式为

$$\begin{cases} P_{\text{sub}} = P_c + \rho_o g(L - H_{\text{dis}}) \\ P_d = P_0 + \rho_o gL \end{cases} \quad (6)$$

式中: P_c 是井口套压; ρ_o 是原油密度; L 是下泵深度; H_{dis} 是动液面深度; P_0 是井口压力。

1.2 故障工况

1)漏失工况。主要原因是固定阀、游动阀和柱塞部件老化导致连接处出现漏油孔隙。其中,柱塞漏失是在上冲程起始段,柱塞上、下两端产生负向压差,导致油管液体从柱塞密封处缝隙流入泵筒。因此,根据同心圆柱体的泄漏理论分析,柱塞瞬时泄漏表达式为

$$q_{\text{PL}} = \xi_{\text{PL}} [P_d - P(t)] \quad (7)$$

式中 ξ_{PL} 是柱塞漏失系数。

游动阀漏失和柱塞漏失原理相似,在上冲程起始段,游动阀的上、下两端产生负向压差,使油管液体从游动阀的孔隙中流入泵筒。所以,游动阀瞬时漏失量可由排出压力 P_d 与泵压 $P(t)$ 表示为

$$q_{\text{tv}} = \xi_{\text{tv}} \xi_{\text{PL}} [P_d - P(t)]^{e_{\text{tv}}} \quad (8)$$

式中 ξ_{tv} 与 e_{tv} 分别是游动阀的泄露系数与指数。

固定阀漏失是在下冲程起始段,固定阀的上、下两端产生正向压差,使泵筒内液体从固定阀封闭处的孔隙中流入套管。所以,固定阀瞬时漏失量可由沉没压力 P_{sub} 与泵压 $P(t)$ 决定,表示为

$$q_{\text{sv}} = \xi_{\text{sv}} \xi_{\text{PL}} [P(t) - P_{\text{sub}}]^{e_{\text{sv}}} \quad (9)$$

式中: ξ_{sv} 与 e_{sv} 分别是固定阀的泄露系数与指数。

2)供液不足。由于地层压力较小,地层渗透率下降,使流体渗流到套管的流速下降,沉没压力和泵筒压力之间的正向压差减小,从而导致泵吸入流体减少。

3)气体影响。随着油田开采时间增加,地层压力减小,导致井底流压降低,当井底流压小于饱和压力时,流体中的气体析出,出现气液两相流。泵吸入含有气相的多相流体,使固定阀和游动阀的开启滞后,导致泵的加载和卸载过程延缓,从而

减少泵吸入和排出的流体。

1.3 产量计算建模

上述所建立的地面传输系统和井下泵送系统,构成了有杆泵抽油井的动力学仿真模型,根据ISSA优化的故障参数计算工况特征,固定阀和游动阀的漏失量可通过瞬时流量积分计算,泵筒含气量 η_{gas} 可由气液比计算,分别表示为

$$\begin{cases} [Q_{\text{sv}}, Q_{\text{tv}}, Q_{\text{PL}}] = \int [q_{\text{sv}}, q_{\text{tv}}, q_{\text{PL}}] dt \\ \eta_{\text{gas}} = R/(1+R) \end{cases} \quad (10)$$

泵的排量系数计算式为

$$\begin{cases} \eta_{\text{st}} = \frac{S_{\text{PL}}}{S_{\text{LP}}} \\ \eta_{\text{FL}} = 1 - \frac{S_{\text{gas}}}{S_{\text{PL}}} \\ \eta_{\text{leak}} = 1 - \frac{Q_{\text{sv}} + Q_{\text{tv}} + Q_{\text{PL}}}{S_{\text{PL}} A_{\text{PL}}} \\ \eta_{\text{v}} = \frac{1}{n_w B_w + (1 - n_w) B_o} \end{cases} \quad (11)$$

式中: η_{st} 、 η_{FL} 、 η_{leak} 和 η_{v} 分别是冲程、充满度、漏失和体积系数; S_{PL} 是柱塞位移; S_{LP} 是光杆位移; S_{gas} 是气体高度; n_w 是混合液体的含水率; B_w 是泵中水的体积系数; B_o 是泵中油的体积系数。因此,抽油井的产液量 Q 计算式为

$$Q = 1440 A_{\text{PL}} \cdot S_{\text{LP}} \cdot N \cdot \eta_{\text{st}} \cdot \eta_{\text{FL}} \cdot \eta_{\text{leak}} \cdot \eta_{\text{v}} \quad (12)$$

式中 N 为抽油机冲数。

2 基于 ISSA 的产量计量方法

2.1 方法框架

通过已建立的有杆泵抽油井动力学仿真模型,可模拟故障条件下的工作过程,生成故障状况下的电功图。采用图2所示的反演方法获取有杆泵抽油系统的最优故障参数,并结合故障条件下的产量计算模型,可计算出抽油井的实时产量。

故障参数反演是根据现场实测电功图与模型生成电功图的最小值为优化目标。在可行域内通过ISSA算法搜索最优方案,获取最接近现场工况的故障参数组。目标优化模型 X^* 表示为

$$X^* = \min \left\{ \frac{\|P_G(X, t) - P_r(t)\|}{(P_{\text{rmax}} - P_{\text{rmin}})} \right\} \quad (13)$$

式中: P_G 和 P_r 分别是模型生成电功率和实测电功率; P_{rmax} 和 P_{rmin} 分别是实测功率的最大峰值与最小值; X 是故障参数,表示为

$$X = [H_{\text{dis}}, \xi_{\text{sv}}, e_{\text{sv}}, \xi_{\text{tv}}, e_{\text{tv}}, \xi_{\text{PL}}, R] \quad (14)$$

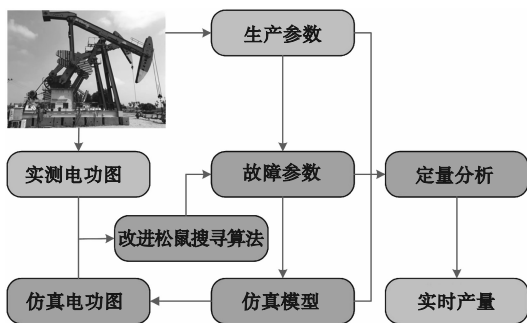


图2 产量实时计量过程

Fig.2 Real-time measurement process for oil production

2.2 改进松鼠搜索算法 (ISSA)

松鼠搜索 (squirrel search algorithm, SSA) 优化算法是一种新兴的生物启发式优化算法^[14], 通过模拟松鼠觅食的行为解决优化问题。然而, SSA 存在过早收敛和易陷入局部最优解等问题。

为解决上述问题, 引入启发式初始化方法在搜索空间内随机初始化多个搜索起点, 从而增加搜索空间的覆盖面, 减少错过全局最优解的可能。其中, 改进后的初始搜索位置表示为

$$x_{k,m} = x_{k-1,m} + \alpha_{k,m} \cdot \varepsilon_m \quad (15)$$

式中: $x_{k,m}$ 是 k 次迭代第 m 只松鼠的初始位置; $\alpha_{k,m}$ 是搜索步长; ε_m 是第 m 只松鼠的随机初始路径。

采用自适应步长方法根据搜索过程中的变化情况调整步长, 加快算法的收敛速度。改进后的搜索步长表示为

$$\alpha_k = \alpha_{k-1} \cdot (1 + \beta_k \cdot |f(x_k) - f(x_{k-1})|) \quad (16)$$

式中: $f(x_k)$ 是搜索步长 x_k 的目标优化函数; β_k 是自适应因子。若 $|f(x_k) - f(x_{k-1})| > \lambda$ (λ 为搜索步长的变化阈值), 则表示松鼠搜索附近存在较大变化, 此时应减小搜索步长, 因此取 $\beta_k = -|\beta_{k-1}|$; 若 $|f(x_k) - f(x_{k-1})| < \lambda$, 则表示搜索附近变化较小, 因此应适当增加搜索步长, 取 $\beta_k = |\beta_{k-1}|$; 除此之外, 保持 β_k 不变, 取 $\beta_k = \beta_{k-1}$ 。

增加食物位置因子 x_f , 使松鼠每次都会朝着食物方向移动, 而不是随机选择方向, 从而加速搜索过程的收敛。同时, 结合自适应步长 $\alpha_{k,m}$, 能快速跳出局部最优, 增强全局搜索能力。改进后的搜索位置 $x_{k,m}$ 为

$$x_{k,m} = x_{k-1,m} + \alpha_{k,m} \cdot \text{sign}(x_f - x_{k-1,m}) \quad (17)$$

3 仿真实验

3.1 有杆泵抽油系统仿真

基于已建立的有杆泵抽油系统动力学仿真模型, 采用大庆油田 5 种典型工况的油井数据, 分析

故障工况对抽油系统的影响。加载典型生产参数并设置工况参数, 生成不同工况条件下的电功图。模型生成的正常工况下的电功图如图 3 所示。

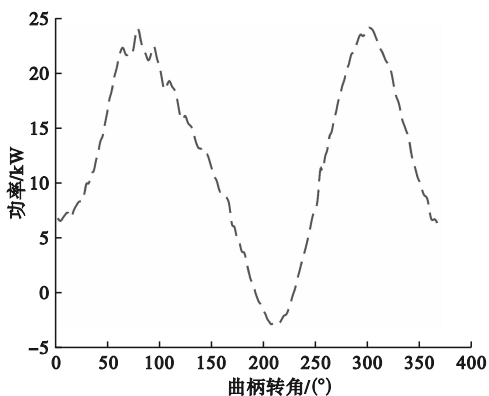


图3 正常工况的电功图

Fig.3 Electric work graph under normal working conditions

在正常情况下, 泵筒液体接近满泵状态, 使示功图呈现为一个近似平行的四边形。在扭矩因数和平衡载荷的共同作用下, 电功率在扭矩因数为最大或最小时出现“波峰”, 但上、下两冲程中的运动并非完全对称, 上、下两冲程的功率峰值比范围为 0.8 ~ 1.2。

固定阀漏失工况电功图如图 4(a) 所示, 在下冲程开始后, 固定阀漏失使泵筒压力升高过程变缓, 导致卸载过程延缓。同时, 游动阀开启滞后, 使有效冲程减小。因此, 实测示功图的卸载线坡度变缓, 且卸载时间加长。此时扭矩因数为负, 使下冲程功率减小, 上、下两冲程的功率峰值大于 1.2, 且峰值随漏失情况呈现不同幅度变化。

游动阀漏失工况电功图如图 4(b) 所示, 在加载阶段, 泵筒压力降低, 柱塞两端产生负向压差, 使油管液体漏失到泵筒中。由于柱塞受到漏失液体的“顶脱”作用, 使示功图的加载线斜率和最大载荷减小。但该阶段的扭矩因数为正, 功率曲线第一波峰减小且上、下两冲程功率峰值小于 0.8。

供液不足工况电功图如图 4(c) 所示, 当油井动液面过小时, 沉没度降低使井底液体不能充满泵筒, 导致示功图的卸载阶段载荷下降延缓, 当柱塞接触到液面时, 载荷曲线迅速减小。因此, 实测示功图呈“刀把”状。因该阶段扭矩因数为负, 所以功率曲线的第二波峰减小且伴随一定的波动, 上、下两冲程功率峰值比大于 1.2。

气体影响工况电功图如图 4(d) 所示, 在加载阶段, 泵余隙内的压缩气体膨胀, 使泵压降低变

缓;相反,在卸载阶段气体被压缩,使泵压提升延缓,导致游动阀开启滞后,示功图卸载线的斜率减小,且余隙越大,泵筒进气量越大,游动阀开启的滞后现象越严重,导致示功图的“刀把”特征越明

显。此外,增大油井的冲次,柱塞撞击液面会在悬点处产生较大的冲击应力,会使示功图和电功图的下冲程曲线出现较大波动,且电功图的上、下冲程功率峰值比大于1.2。

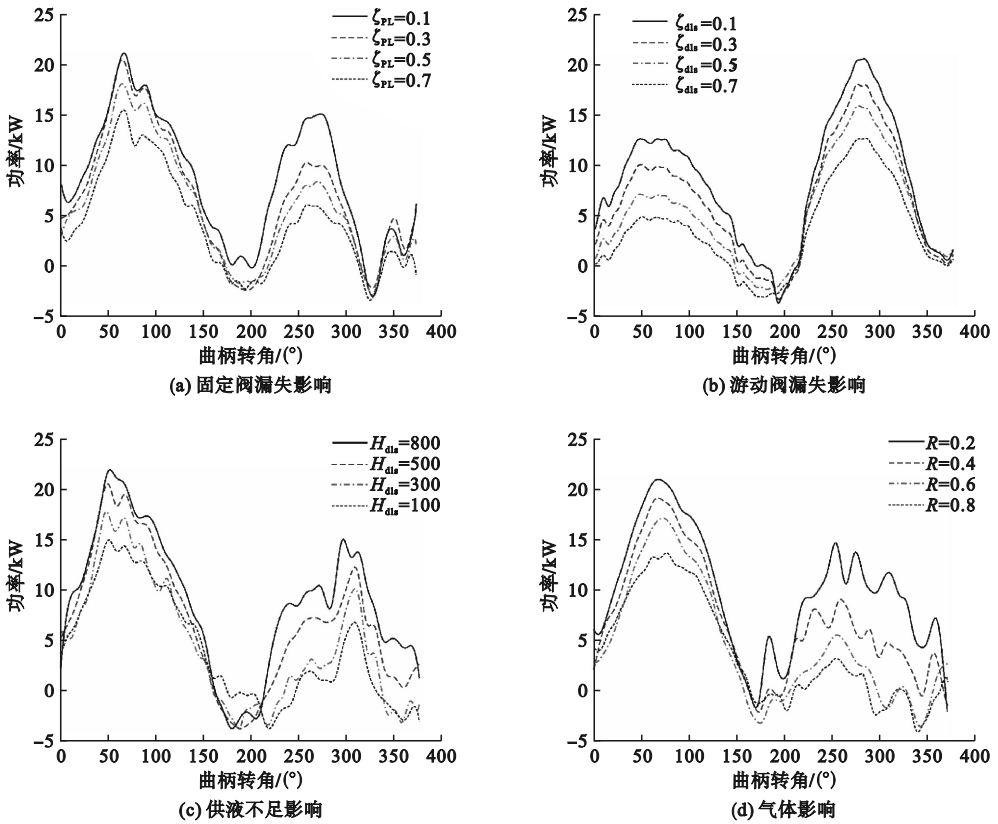


图4 单一故障对电功图的影响

Fig.4 Influence of single failure on electrical diagrams

3.2 基于 ISSA 的故障参数反演仿真

为验证 ISSA 反演故障参数的有效性,选择大庆油田4种不同工况典型油井的实测数据,通过采用 SSA 和本文改进算法 ISSA 的结果对比,验证改进算法的有效性。基于实测电功图并应用算法反演故障参数,生成电功图如图5所示。显然,ISSA 优化故障参数反演的电功图与实测电功图有更好的一致性。

实验对比结果显示,提出食物位置信息因子、启发式初始化参数和自适应步长改进 SSA 算法是有效的,改进后算法是增加收敛速度和搜索空间的覆盖面,具有更好的性能。

4 实验结果与分析

4.1 数据准备

为验证提出方法计量产量的准确性,从大庆油田的数据库中获取了64口来自不同生产区域

和不同型号的抽油井数据,数据涵盖正常工况、固定阀漏失工况、游动阀漏失工况、供液不足工况和气体影响工况的产量、电功图和生产数据。油井部分参数如表1所示。

4.2 结果与分析

4.2.1 故障参数反演

为进一步验证基于 ISSA 的抽油井故障参数反演算法的准确性,以上述64口油井数据进行故障参数反演实验,计算抽油井实测电功图与生成电功图的功率误差,对比结果如图6所示。图中横坐标为不同工况,左侧纵坐标为井口数,右侧纵坐标为反演故障参数生成的电功率与实测电功率的平均准确率。在64口井的反演结果中,ISSA 方法优化故障参数生成的电功图与实测电功图的功率平均准确率为98.16%,对比 SSA 算法,反演精度同比提升6.47%。部分典型油井的故障参数反演结果如表2所示,可见最小精度为94.67%,故本文的 ISSA 算法有效。

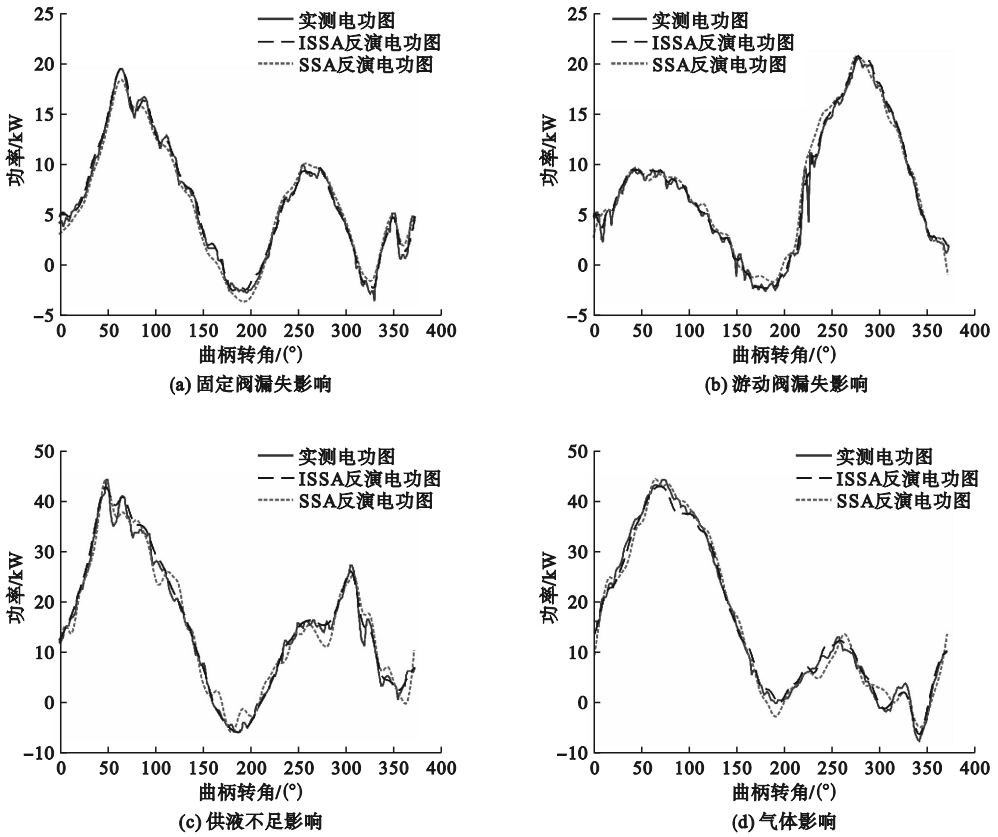


图5 实测电功图与反演电功图对比

Fig. 5 Comparison between measured electrical diagrams and inverted electrical diagrams

表1 油井部分参数

Table 1 Partial parameters of oil well

结构参数	1#	2#	3#	...
游梁前臂/m	5.52	4.37	3.01	...
游梁后臂/m	3.14	2.69	2.40	...
连杆长度/m	5.01	3.81	3.35	...
曲柄偏置角/(°)	0	-9	0	...
曲柄旋转半径/m	1.45	1.19	1.00	...
抽油泵直径/mm	57	44	38	...
泵挂深度/m	1 496	1 496	1 800	...
套管压力/MPa	2	1.5	2	...
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮

根据优化的故障参数,计算抽油井的工况特征参数,部分典型工况的特征计算结果如表3所示。1#、2#和3#的充满度 η_{FL} 为 0.99,含气量 η_{gas} 为 0.01,表明泵筒是近似的满泵状态,且筒内不含气体;2#的固定阀漏失量 Q_{sv} 为 $0.008\ 39\ m^3/N$,表明该井出现了较为严重的固定阀漏失现象;3#的 Q_{iv} 为 $0.004\ 17\ m^3/N$,表明该井出现了较为严重的游动阀漏失现象;4#和5#的 η_{FL} 均小于 0.6,表明这两口油井都有供液不足现象,其中5#属于严重供液不足,且伴随着气体影响($\eta_{gas}=0.21$)。

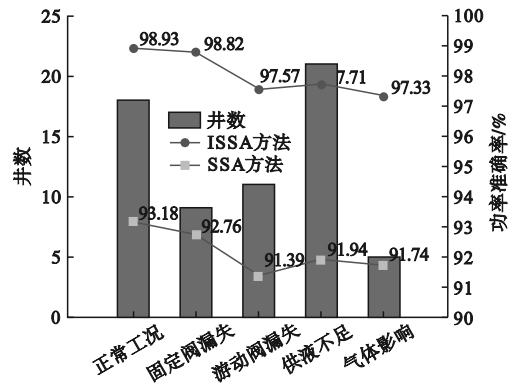


图6 不同工况下的反演结果

Fig. 6 The inversion results under different working conditions

表2 故障参数优化结果

Table 2 Optimization results for failure parameters

井号	故障参数设置 [$H_{dis}, \xi_{sv}, e_{sv}, \xi_{iv}, e_{iv}, \xi_{PL}, R$]	反演电功图精度/%	
		最小	平均
1#	[2 200, 0.01, 1, 0.01, 1, 0.01, 0.01]	95.53	97.85
2#	[2 430, 0.27, 1, 2, 0.01, 1, 0.01, 0.01]	94.81	97.47
3#	[1 664, 0.01, 1, 0.15, 1, 0.05, 1, 0.01]	95.35	96.84
4#	[119, 0.01, 1, 0.01, 0.85, 1, 0.01]	94.95	96.22
5#	[430, 0.01, 1, 0.01, 1, 0.01, 0.683]	94.67	96.69
⋮	⋮	⋮	⋮

表 3 故障特征参数

Table 3 Fault characteristic parameters

井号	采集时间	η_{FL}	η_{gas}	$Q_{sv}/(m^3 \cdot N^{-1})$	$Q_{lv}/(m^3 \cdot N^{-1})$
1#	2019-6	0.99	0.01	0.000 37	0.000 32
2#	2017-9	0.99	0.01	0.008 39	0.000 14
3#	2014-7	0.99	0.01	0.000 23	0.004 17
4#	2013-6	0.52	0.02	0.000 21	0.000 23
5#	2013-7	0.37	0.21	0.000 42	0.000 24
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮

4.2.2 计量结果分析

将电功图数据传送到产量计量模型中,同时加载结构参数与生产数据,经 ISSA 反演故障参数并输出故障特征,完成产量的计算。计算结果如图 7 所示,图中横坐标为样本数,纵坐标为产量值。结果显示,本文所提方法计算产量与实测产量基本一致。

为进一步验证本文方法的可靠性,计算预测产量的精度,结果如图 8 所示。64 口油井的平均预测精度为 94.52%。本文提出的油井产量计量方法对 5 种不同工况的抽油井均具备较好的适应性。

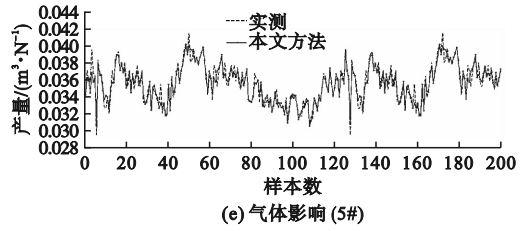


图 7 产量预测结果

Fig. 7 Production forecast results

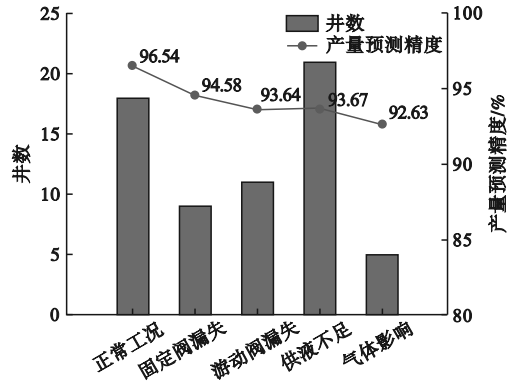


图 8 不同工况下的预测结果

Fig. 8 Predicted results under different working conditions

5 结论

本文提出了有杆泵抽油井产量计量方法,通过方法分析和现场数据验证,得出以下结论。

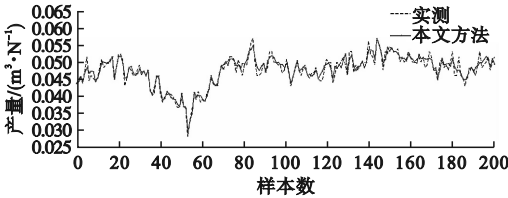
1)建立了有杆泵抽油系统动力学仿真模型。通过该模型可生成正常工况、固定阀漏失、游动阀漏失、供液不足和气体影响工况条件下的电功图。

2)提出一种油井产量计量方法。该方法以抽油系统动力学仿真模型为基础,结合 ISSA 算法,可实现利用电功图直接计算抽油井产量的目的。实验结果表明,所提方法在 64 口油井的计量结果中,平均计量精度为 94.52%,可以有效地测算单一故障抽油井的产量,对故障油井的产量计量、工况分析和健康管理具有一定的参考意义。

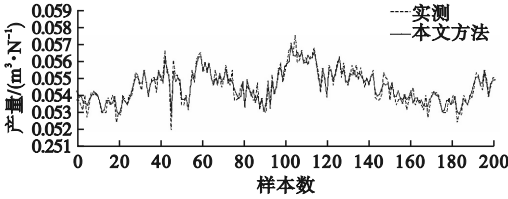
虽然本文方法可以利用电功图直接计算产量,但工况特征提取方法仍是人工提取,可能会限制计量精度的提高。下一步将采用深度学习方法自动提取电功图特征,进一步提高电功图直接计算产量的精度。

参考文献 (References):

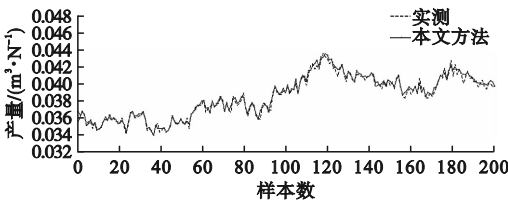
[1] 李杰训,贾贺坤,宋扬,等. 油井产量计量技术现状与发展趋势[J]. 石油学报,2017,38(12):1434-1440.



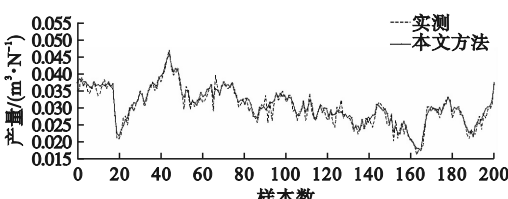
(a) 正常工况(1#)



(b) 固定阀漏失影响(2#)



(c) 游动阀漏失影响(3#)



(d) 供液不足影响(4#)

- LI J X, JIA H K, SONG Y, et al. Current technical status and development trend of oil well production measurement [J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2017, 38 (12): 1434 - 1440. (in Chinese)
- [2] 高帅,唐浩然,万雯绯,等. 翻斗称重式采油井产量计量系统设计与关键技术研究[J]. *传感器与微系统*, 2021, 40 (4): 45 - 47, 51.
- GAO S, TANG H R, WAN W F, et al. Design and key technology research of production measurement system for tipping bucket weighing type oil production well [J]. *Transducer and Microsystem Technologies*, 2021, 40 (4): 45 - 47, 51. (in Chinese)
- [3] 赵晶,王祎楠. 玻璃管量油与U型连续量油电动装置量油对比[J]. *油气田地面工程*, 2012, 31 (7): 66.
- ZHAO J, WANG Y N. Comparison between glass tube oil measurement and U-shaped continuous oil measurement electric device [J]. *Oil-Gasfield Surface Engineering*, 2012, 31 (7): 66. (in Chinese)
- [4] 李然,刘兴华,谢奎. 非分离式计量技术在页岩气地面测试中的应用研究[J]. *钻采工艺*, 2021, 44 (5): 74 - 78.
- LI R, LIU X H, XIE K. Research on application of non-separated metering technology in shale gas surface testing [J]. *Drilling & Production Technology*, 2021, 44 (5): 74 - 78. (in Chinese)
- [5] 方圆,王舒华,鲁明晶,等. 基于示功图理论的有杆泵采油产液量计算[J]. *数学的实践与认识*, 2013, 43 (15): 13 - 19.
- FANG Y, WANG S H, LU M J, et al. Production liquid calculation based on dynamometer card theory in sucker rod pumping [J]. *Mathematics in Practice and Theory*, 2013, 43 (15): 13 - 19. (in Chinese)
- [6] LV X X, WANG H X, LIU Y X, et al. A novel method of output metering with dynamometer card for SRPS under fault conditions [J]. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2020, 192: 107098.
- [7] LV X X, WANG H X, ZHANG X, et al. An evolutionary SVM method based on incremental algorithm and simulated indicator diagrams for fault diagnosis in sucker rod pumping systems [J]. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2021, 203: 108806.
- [8] XING M M. Response analysis of longitudinal vibration of sucker rod string considering rod buckling [J]. *Advances in Engineering Software*, 2016, 99: 49 - 58.
- [9] ZHANG R C, YIN Y Q, XIAO L F, et al. A real-time diagnosis method of reservoir-wellbore-surface conditions in sucker-rod pump wells based on multidata combination analysis [J]. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2021, 198: 108254.
- [10] 张瑞超,陈德春,王欣辉,等. 基于电功图的油井动液面及产液量预测[J]. *复杂油气藏*, 2017, 10 (4): 69 - 72.
- ZHANG R C, CHEN D C, WANG X H, et al. Prediction of dynamic liquid level and liquid production rate of oil wells based on electrical diagrams [J]. *Complex Hydrocarbon Reservoirs*, 2017, 10 (4): 69 - 72. (in Chinese)
- [11] 陈德春,姚亚,张瑞超,等. 基于泵功图的油井产液量实时计量新模型[J]. *科技通报*, 2017, 33 (11): 77 - 81.
- CHEN D C, YAO Y, ZHANG R C, et al. A new model based on pump diagram for measuring liquid production rate of oil wells in real-time [J]. *Bulletin of Science and Technology*, 2017, 33 (11): 77 - 81. (in Chinese)
- [12] ZHENG B Y, GAO X W, LI X Y. Diagnosis of Sucker Rod Pump based on generating dynamometer cards [J]. *Journal of Process Control*, 2019, 77: 76 - 88.
- [13] 李翔宇,袁春华,高宪文. 有杆泵抽油井采油过程建模[J]. *沈阳理工大学学报*, 2021, 40 (1): 12 - 18.
- LI X Y, YUAN C H, GAO X W. Modelling of sucker-rod pumping process [J]. *Journal of Shenyang Ligong University*, 2021, 40 (1): 12 - 18. (in Chinese)
- [14] 赵业和,刘达新,刘振宇,等. 基于多种群竞争松鼠搜索算法的机械臂时间最优轨迹规划[J]. *浙江大学学报(工学版)*, 2022, 56 (12): 2321 - 2329, 2402.
- ZHAO Y H, LIU D X, LIU Z Y, et al. Time-optimal trajectory planning of manipulator based on multi-group competition squirrel search algorithm [J]. *Journal of Zhejiang University (Engineering Science)*, 2022, 56 (12): 2321 - 2329, 2402. (in Chinese)

(责任编辑:和晓军)