

# 基于电功图的油井动液面及产液量预测

张瑞超<sup>1</sup>, 陈德春<sup>2</sup>, 王欣辉<sup>3</sup>, 李永强<sup>3</sup>, 姚 亚<sup>2</sup>, 肖良飞<sup>2</sup>

(1. 中国石油大学胜利学院油气工程学院, 山东 东营 257000; 2. 中国石油大学(华东)石油工程学院, 山东 青岛 266580;

3. 中国石化胜利油田分公司胜利采油厂, 山东 东营 257000)

**摘要:**针对目前部分油田地面示功图实时采集系统不完善, 维护成本高, 少数油区因周边环境、气候等条件不宜安装实时采集系统, 无法利用示功图实时推算油井动液面及产液量等问题, 考虑曲柄实际角速度、四连杆机构的惯性、摩擦等因素, 推导了基于电机电功图的光杆示功图计算模型, 并运用一维带 Gibbs 阻尼波动方程求解泵功图, 分析泵功图曲线各点曲率, 确定固定阀和游动阀关闭点位置, 形成了基于电功图的抽油机井动液面及产液量预测模型, 并编制了计算软件。油田现场 10 口不同工况油井的计算分析结果表明, 基于电功图的油井动液面及产液量计算模型具有较高的精度, 能够实现油井动液面及产液量的实时、准确计量, 提高了油井生产分析的智能化, 有利于油井实时优化运行和增效。

**关键词:**电功图 转换模型 动液面 产液量 实时监测 抽油机井

中图分类号: TE327

文献标识码: A

## Prediction of dynamic liquid level and liquid production rate of oil wells based on electrical diagrams

ZHANG Ruichao<sup>1</sup>, CHEN Dechun<sup>2</sup>, WANG Xinhui<sup>3</sup>, LI Yongqiang<sup>3</sup>,  
YAO Ya<sup>2</sup>, XIAO Liangfei<sup>2</sup>

(1. College of Petroleum Engineering of Shengli College, China University of Petroleum, Dongying 257000, China;

2. China University of Petroleum, Qingdao 266580, China; 3. Shengli Oil Plant, Shengli Oilfield, Sinopec, Dongying 257000, China)

**Abstract:** There are imperfect real-time acquisition system of ground dynamometer card and high maintenance cost in some oilfields. Because of without the real-time acquisition system in minority oil-production area due to unfavorable environment, climate and other issues, the dynamic liquid level and liquid production rate can not be predicted on real-time. Aiming at these problems, considering influencing factors of the actual angular velocity of crank, the inertia and friction of four-bar mechanism, etc., a new model was proposed for calculating surface dynamometer cards based on electrical diagrams. The pump dynamometer card was calculated by using Gibbs's one dimensional damped wave equation. And then the positions of opening and closing points of travel and fixed valves were defined by analyzing the curvature of the pump dynamometer card. Finally, a new model was established for predicting the dynamic liquid level and liquid production rate based on electrical diagrams, and a set of calculating software was compiled. From 10 wells under different working conditions, the calculation and analysis results indicated that this model has high accuracy, and can predict the dynamic liquid level and liquid production rate on real-time, improving the intelligence of oil wells production analysis, which is beneficial to optimizing operation of oil wells on real-time.

**Key words:** electrical diagrams; transform model; dynamic liquid level; liquid production rate; real-time monitoring; rod pumping well

油井动液面反映了地层供液与能量状况及供排协调关系, 是抽油机井生产管理与评价的重要参数<sup>[1-3]</sup>。目前动液面可以通过地面示功图推算得到<sup>[4,5]</sup>, 但是传统的地面示功图测量方法测量示功

收稿日期: 2017-06-09; 改回日期: 2017-10-28。

第一作者简介: 张瑞超(1990—), 助教, 现从事采油工程理论与技术的研究与教学工作。E-mail: zrcupe@slcupe.edu.cn。

图次数少、传感器寿命短、测量成本高、反馈信息慢,不能实时获取地面示功图进而及时推算油井动液面及产液量,影响油田生产分析的及时性和智能化;而电功图(电参数)测取方便,安装及维护成本低,能够长期连续测量。因此,将电功图转化为地面示功图,并求解井下泵功图,消除振动、惯性和摩擦等动载荷的影响,利用泵功图推算油井动液面及产液量,经应用检验具有较高的精度,结合电功图在线实时采集,实现动液面及产液量的自动实时监测,以及油井生产分析与运行优化的智能化。

## 1 电功图计算示功图的转换模型

### 1.1 电机功率计算悬点载荷的数学模型

在充分考虑曲柄的实际角速度、四连杆机构的惯性、转动惯量、摩擦、抽油机结构不平衡以及电机和减速箱的效率等影响因素的基础上,得出根据电功图电功率计算示功图悬点载荷的转换模型:

$$P_A = \frac{N_d \eta - \left( \sum_{i=1}^3 m_i g v_{iy} + \sum_{i=1}^3 m_i a_i v_i + \sum_{i=1}^3 J_i \varepsilon_i \omega_i \right) \times 10^3}{v_A} + \frac{\sum_{i=1}^4 M_{Fi} \Delta \omega_i + W_b v_{by} + TFB \omega}{v_A} \quad (1)$$

式中,  $P_A$  为悬点载荷, kN;  $\eta$  为总传动效率, 无因次;  $m_i$  为部件  $i$  的质量, kg (其中, 部件 1 为曲柄, 部件 2 为连杆, 部件 3 为游梁);  $g$  为重力加速度,  $g = 9.81 \text{ m/s}^2$ ;  $v_{iy}$  为部件  $i$  的质心速度在  $y$  方向上的速度分量, m/s;  $v_i$  为构件  $i$  的质心的速度, m/s;  $a_i$  为构件  $i$  的质心的加速度,  $\text{m/s}^2$ ;  $\omega_i$  为构件  $i$  的质心的角速度,  $\text{rad/s}$ ;  $\varepsilon_i$  为构件  $i$  的质心的角加速度,  $\text{rad/s}^2$ ;  $M_{Fi}$  为运动副  $i$  中的摩擦力矩,  $\text{kN} \cdot \text{m}$ ;  $\Delta \omega_i$  为运动副  $i$  连接的两构件之间的角速度差,  $\text{rad/s}$ ;  $N_d$  为电机功率, kW;  $v_A$  为悬点速度, m/s;  $W_b$  为平衡重, kN;  $v_{by}$  为平衡重的质心速度在  $y$  方向上的速度分量, m/s;  $TF$  为扭矩因数, m;  $B$  为结构不平衡值, kN。

### 1.2 计算示功图步骤

根据电机电功图计算光杆示功图步骤如下:

(1) 根据电功图位移数据以及抽油机四连杆几何关系, 计算出各位移点对应的曲柄转角  $\theta_{(i)}$ 。

(2) 根据曲柄转角, 应用动力学微分方程与四阶龙格库塔法<sup>[6-9]</sup>计算抽油机实际曲柄角速度。具体计算流程如图 1 所示。

(3) 根据计算所得的实际角速度, 按照四连杆机构的封闭矢量关系的复变矢量法<sup>[10,11]</sup>, 确定四连

杆机构的角速度、角加速度、构件质心速度、质心加速度、悬点速度及其加速度以及扭矩因数等数据。

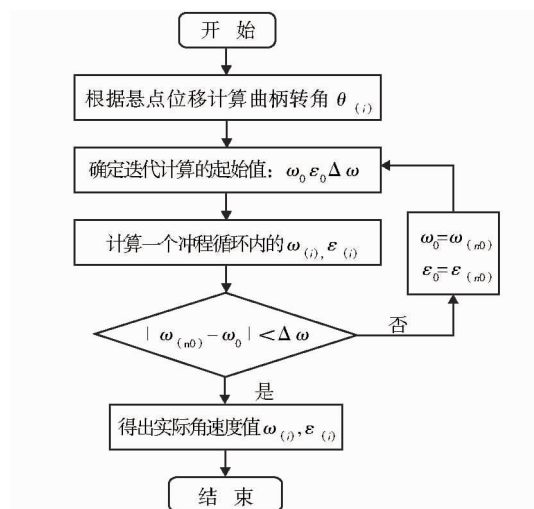


图 1 实际曲柄角速度计算流程

(4) 根据(3)中计算所得的实际角速度、四连杆机构的角速度、角加速度、构件质心速度等数据, 代入悬点载荷计算模型式(1), 得出各点对应的悬点载荷之后, 再结合已知的位移数据, 即可得到示功图。

### 1.3 上、下死点附近曲线的处理

在运用电机功率计算悬点载荷时, 在上、下死点附近, 由于加速度反向以及扭矩系数非常小, 会导致在上、下死点附近示功图产生不闭合现象, 即计算的悬点载荷在上、下死点附近出现异常值。为了使计算结果在上、下死点处更符合实际, 计算前, 对上、下死点的功率值进行了圆滑处理, 计算后, 运用前后正常段向后逼近的方法进行处理, 从而得到合理的悬点载荷值。

## 2 油井动液面及产液量计算模型

泵功图的计算: 以地面位移与载荷(地面功图)为边界条件, 利用傅里叶级数法求解一维带阻尼波动方程<sup>[12,13]</sup>。

由泵功图分析, 阀开闭点位于泵功图曲线曲率变化显著处; 固定阀的开闭点位于泵功图上冲程段, 游动阀的开闭点位于泵功图下冲程段; 通过在上下冲程段分别求出 4 个曲率变化最大的点来确定游动阀与固定阀开闭点位置<sup>[14]</sup>。

由于采用数值计算方法得到的泵示功图封闭曲线中含有大量高频部分, 故在实际计算中采用五点平均法消除或降低其引起的曲率变动, 以提高计算曲率的精度。

2.1 动液面计算模型

分析抽油机工作过程中, 阀开闭前后泵腔内压力及泵载的变化规律, 得到沉没压力表达式:

$$P_n = (p_p + \Delta p_t + \Delta p_s) - \frac{F_{pu} - F_{pd}}{f_p} + \frac{2f}{f_p} \quad (2)$$

式中,  $p_n$  为沉没压力, Pa;  $p_p$  为泵排出口压力, Pa;  $\Delta p_s$  为流体通过固定阀孔产生的压力降, Pa;  $\Delta p_t$  为流体通过游动阀孔产生的压力降, Pa;  $F_{pu}$  为固定阀打开到关闭前抽油杆柱最下端面承受的载荷, N;  $F_{pd}$  为游动阀打开到关闭前抽油杆柱最下端面承受的载荷, N;  $f_p$  为柱塞的截面积,  $m^2$ ;  $f$  为柱塞与泵筒间的摩擦力, N。

因此, 可由泵功图的载荷差求出沉没压力  $p_n$ , 结合井筒及环空流体压力分布计算相关式<sup>[15,16]</sup>, 计算泵的沉没度及动液面深度。泵功图上下载荷差为固定阀开闭点间平均载荷减去游动阀开闭点间平均载荷。动液面计算具体流程为:

- (1) 运用一维带阻尼波动方程根据地面示功图计算井下泵功图;
- (2) 确定 4 个阀开闭点, 计算泵功图上下载荷差;
- (3) 由式(2)计算沉没压力  $p_n$ ;
- (4) 先假设一动液面  $L_f$ ;
- (5) 根据井筒及环空流体压力分布计算相关式, 计算沉没压力  $p'_n$ ;
- (6) 若  $|p_n - p'_n| \leq \varepsilon$ ,  $L_f$  为动液面深度, 否则令  $L_f = L_f + \Delta L_f$ , 重复 4 - 6 步, 直到满足指定的精度。

2.2 产液量计算模型

油井的实际产液量是指井口原油脱气后的地面实际产液量, 记作  $Q$ , 其计算公式为:

$$Q = \eta_v 1\,440 S_{PE} N A_p \quad (3)$$

式中,  $Q$  为油井的实际产量,  $m^3/d$ ;  $\eta_v$  为混合物的体积系数,  $m^3/m^3$ ;  $S_{PE}$  为柱塞有效冲程, m;  $N$  为抽油机的冲次,  $min^{-1}$ ;  $A_p$  为柱塞横截面积,  $m^2$ 。

油管混合物体积系数  $\eta_v$  是指地面液体体积与地层条件下油管内混合液体积的比值:

$$\eta_v = \frac{1}{(1 - n_w) B_o + n_w B_w} \quad (4)$$

式中,  $n_w$  为标准条件 ( $P_{st}, T_{st}$ ) 下混合液的含水率, %;  $B_o$  为地层条件下原油的体积系数,  $m^3/m^3$ ;  $B_w$  为地层条件下水的体积系数,  $m^3/m^3$ 。

柱塞有效冲程为固定阀开闭点间位移与游动阀开闭点间位移较小者。产液量计算具体流程为:

- (1) 运用一维带阻尼波动方程根据地面示功图

- 计算井下泵功图;
- (2) 确定 4 个阀开闭点, 根据“取小”原则, 确定柱塞有效冲程  $S_{PE}$ ;
- (3) 计算混合液体积系数  $\eta_v$ ;
- (4) 根据实际产液量计算模型式(3)求解油井产液量。

3 油井实例计算与分析

以胜利油田 H1 油井(直井)为例, 基础数据见表 1, 现场实测电功图见图 2。

表 1 油井基础数据

参数	数值	参数	数值
抽油机类型	CYJ12-4.2-73HB	电机额定功率/kW	37
质量含水率, %	94.3	曲柄平衡半径/m	1.13
冲程/m	4	实测动液面深度/m	1 050
冲次/ $min^{-1}$	3	井口产液量/ $(m^3 \cdot d^{-1})$	36.2
杆级数	2	井口油压/MPa	0.5
一级杆径/mm	25	井口套压/MPa	0
一级杆长/m	495	脱气原油密度/ $(kg \cdot m^{-3})$	950.3
二级杆径/mm	22	原油粘度/ $(mPa \cdot s)$	1 753
二级杆长/m	1 193	泵径/mm	56
油管内径/mm	62	天然气密度/ $(kg \cdot m^{-3})$	0.64
下泵深度/m	1 688	生产汽油比/ $(m^3 \cdot m^{-3})$	20

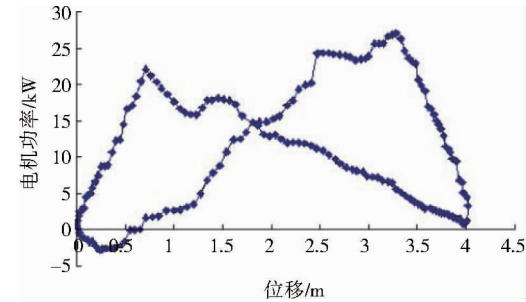


图 2 地面实测电功图

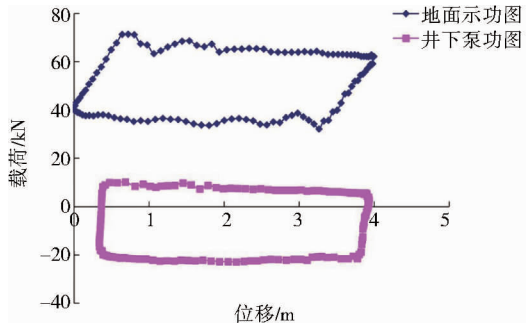


图 3 地面示功图(电功图转化)及计算井下泵功图

由地面实测电功图(见图 2)转化得到地面示功图, 根据地面示功图计算得到井下泵功图(见图 3)。分析泵功图得到固定阀开启点(0.42, 9.1)、固定阀关闭点(3.93, 5.1)、游动阀开启点(0.35, -19.8)、

游动阀关闭点(3.72, -20.6)。泵功图上下载荷差为 27.2 kN, 计算动液面深度为 1 080 m, 实测动液面深度为 1 050 m, 相对误差为 2.86%; 泵功图有效冲程长度为 3.37 m, 计算产液量为 35.9 m<sup>3</sup>/d, 实测产液量为 36.2 m<sup>3</sup>/d, 相对误差为 0.83%。

对胜利油田 10 口油井(直井)进行了计算分析(见表 2 和表 3), 可以看出动液面计算最大相对误差为 10.27%, 最小相对误差为 0.31%, 平均相对误差为 2.97%; 产液量计算最大相对误差为 8.82%, 最小相对误差为 0.83%, 平均相对误差为 3.25%, 表明基于电功图的油井动液面及产液量计算模型具有较高的精度。

表 2 动液面井例计算结果

井号	功图测试时间 /yy. mm. dd	计算动液面 深度/m	实测动液面 深度/m	相对误差/ %
H1	2015. 10. 20	1 080	1 050	2.86
H2	2015. 10. 20	1 120	1 093	2.47
H3	2015. 10. 20	1 040	1 006	3.38
H4	2015. 10. 20	1 120	1 160	3.45
H5	2015. 10. 20	131	146	10.27
H6	2015. 10. 20	1 276	1 280	0.31
H7	2015. 10. 20	1 383	1 358	1.84
H8	2015. 10. 20	760.1	736.5	3.20
H9	2015. 10. 20	250.1	247.8	0.93
H10	2015. 10. 20	600.1	594.0	1.03

表 3 产液量井例计算结果

井号	功图测试时间 /yy. mm. dd	实测产液量/ (m <sup>3</sup> · d <sup>-1</sup> )	计算产液量/ (m <sup>3</sup> · d <sup>-1</sup> )	相对误差/ %
H1	2015. 10. 20	32.1	31.8	0.94
H2	2015. 10. 20	35.9	36.2	0.83
H3	2015. 10. 20	14.9	14.4	3.47
H4	2015. 10. 20	6.2	5.8	6.90
H5	2015. 10. 20	20.9	21.2	1.42
H6	2015. 10. 20	33.2	32.4	2.46
H7	2015. 10. 20	3.1	3.4	8.82
H8	2015. 10. 20	19.9	20.3	1.86
H9	2015. 10. 20	34.2	35.1	2.56
H10	2015. 10. 20	31.2	32.2	3.22

## 4 结论

(1)在考虑曲柄实际角速度、四连杆机构的惯性、摩擦等因素的基础上, 推导了基于电机电功图的光杆示功图计算模型, 通过该模型实现电机电功图转换地面示功图, 并运用一维带阻尼波动方程求解泵功图, 分析泵功图曲线各点曲率, 确定固定阀和游

动阀开闭点位置, 得到泵功图上下冲程载荷差和柱塞有效冲程, 结合动液面及产液量计算模型, 形成基于电功图的抽油机井动液面及产液量预测模型。

(2)油田现场 10 口不同工况油井的计算分析结果表明, 基于电功图的油井动液面及产液量计算模型具有较高的精度, 能够为油田现场提供较好的技术支持, 并结合地面电功图的在线实时采集, 可实现动液面及产液量的自动实时监测和油井生产分析与优化运行的智能化。

### 参考文献:

- [1] 崔振华, 余国安. 有杆抽油系统[M]. 北京: 石油工业出版社, 1994: 140 - 158.
- [2] 于小明, 何贯中, 金英兰. 抽油机井间抽制度合理性研究[J]. 大庆石油地质与开发, 2006, 25(4): 78 - 79.
- [3] 谢朝阳, 周好斌. 基于动液面控制的抽油机变频控制系统[J]. 石油机械, 2009, (37)9: 122 - 124.
- [4] 杨丽萍. 用示功图计算抽油机井动液面深度[J]. 石油地质与工程, 2010, 24(5): 101 - 103.
- [5] 张胜利, 罗毅, 吴赞美, 等. 抽油机井示功图计算动液面的修正算法[J]. 石油钻采工艺, 2011, 33(6): 122 - 124.
- [6] 刘卓钧, 李锡光, 李文方. 有杆抽油泵机械系统运动方程的数值解法[J]. 石油机械, 1990, 18(10): 1 - 10.
- [7] 刘明尧, 吴修德, 汪建华. 游梁式抽油机精确动力学分析的新方法[J]. 石油机械, 1997, 25(11): 4 - 7.
- [8] 杜小平. 抽油机机械系统真实运动规律的求解[J]. 石油机械, 1994, 22(11): 34 - 39.
- [9] 蔺小林, 蒋耀林. 现代数值分析[M]. 北京: 国防工业出版社, 2004: 304 - 312.
- [10] 张刚. 电流法间接示功图测量方法研究[D]. 大庆: 大庆石油学院, 2009.
- [11] Svinos J G. Exact kinematic analysis of pumping units[C]//SPE Annual Technical Conference and Exhibition. Society of Petroleum Engineers, 1983.
- [12] Gibbs S G. Predicting the behavior of sucker - rod pumping Systems[J]. JPT, 1963(7): 769 - 778.
- [13] 张琪, 吴晓东. 抽油井计算机诊断技术及其应用[J]. 华东石油学院学报, 1984(2): 145 - 159.
- [14] 薛建泉, 岳广韬, 张国栋. 抽油机井地面示功图量油技术研究[J]. 石油钻采工艺, 2012, 34(3): 61 - 66.
- [15] 廖锐全, 汪崎生, 张柏年. 用多相管流理论计算抽油井井底流压[J]. 江汉石油学院学报, 1995, 17(4): 44 - 47.
- [16] 陈德春, 薛建泉, 廖建贵. 抽油泵合理沉没压力的确定方法[J]. 石油钻采工艺, 2003, 25(5): 75 - 77.

(编辑 韩 枫)