

利用功图计算液面的研究与应用

刘燕平, 李海硕, 田磊

(中国石化 西北油田分公司 采油三厂, 新疆 轮台 841600)

摘要:从机抽井示功图形成机理、功图载荷分析入手,研究利用功图计算液面的方法,并选取塔河油田工区内的试验井,试验对比不同方法计算液面的准确度。对比得出,针对功图载荷无异常波动,工作制度、含水率稳定的机采井,利用交变载荷线性回归法计算结果准确度较高。交变载荷线性回归法求取液面的主要影响因素有载荷、工作制度及含水率,因此,载荷异常波动大、含水变化大、工作制度调整频繁及泵况异常油井,不适合应用该方法计算液面。

关键词:功图;载荷;动液面;塔河油田

中图分类号:TE353

文献标识码:A

Research and application of power chart in liquid level calculation

Liu Yanping, Li Haishuo, Tian Lei

(No.3 Oil Production Plant, SINOPEC Northwest Company, Luntai, Xinjiang 841600, China)

Abstract: In this paper, the method of calculating liquid level using power chart was studied. We selected some test wells in the Tahe oilfield, and compared the accuracy of liquid level calculation with different methods. For those wells with normal power chart, stable working system and water content, alternating load linear regression method is recommended. This method can be influenced by load, working system and water content. As a result, the wells with abnormal power chart, changing water content, frequently-adjusting working system and abnormal pumping are not suitable for the alternating load linear regression method.

Key words: power chart; load; liquid level; Tahe oilfield

油田的动液面参数直接反映了地层的供液情况及井下供排关系,是进行采油工艺适应性评价和优化的关键数据之一。在传统管理模式下,动液面的测量主要是利用声波法,需由工人定期到井口进行测量,除了劳动强度大,测量误差也相对较大,同时不能实现实时监测,这在一定程度上降低了油田的管理水平。随着数字油田和智能油田建设的推进,对于实现油井动液面的监测需求日益增大^[1-4],而借助功图、液面分析机抽井工况是机采井管理的一项重要内容。测试工作量大、费用高,在当前油价持续低位运行的大环境下,如何降低低压测试费用已成为机采井管理的一项重要工作。优化低压测试工作量成为控制低压测试费用的主要手段。

随着油田信息化建设工作的推进,目前西北油田采油三厂机采井功图远传功能已全部覆盖。根据功图原理,机抽井功图现状与机抽井动液面和工作制度有关,理论上通过功图可以计算出油井动液面。但由于中间影响因素很多,如何通过功图计算

动液面目前还没有有效方法,各油田也没有开展应用。为适应寒冬期提质增效的需要,有必要开展利用机抽井功图计算液面技术研究,以降低机采井液面测试费用。

1 示功图简介

1.1 理论示功图

理论示功图主要分为 4 类。第一类是刚性抽油杆静载示功图(图 1a),最大的特点是形状呈长方形,泵较浅、冲次较低井的功图可能呈现此类形状;第二类是弹性抽油杆静载示功图(图 1b),最大的特点是形状呈平行四边形,冲次较低井的功图一般表现为此类形状;第三类是弹性抽油杆+惯性载荷示功图(图 1c),受惯性载荷影响,它最大的特点是较正常示功图产生了顺时针旋转;第四类是弹性抽油杆+惯性+振动载荷示功图(图 1d),受惯性+振动载荷复合影响,它最大的特点是形状发生顺时针旋转,并且上、下冲程线不再平直,成波浪状,这也是采油三厂工区内最常见的示功图类型。

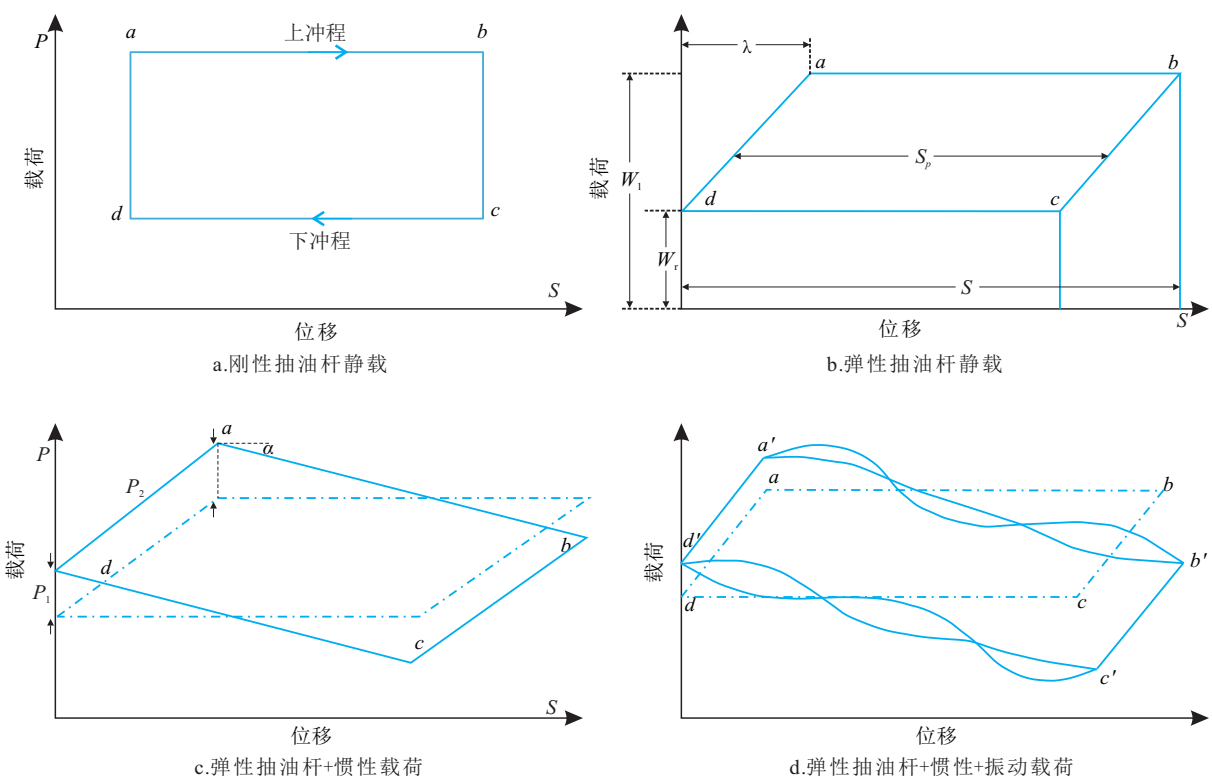


图1 常见理论示功图

Fig.1 Common theoretical work diagram

1.2 功图计算液面原理

1.2.1 功图与液面联系

图2中4个功图与塔河油田TP27X井一个注水周期内的液面变化对应。对比可以看出,随着功图载荷不断变大,其液面逐渐下降,功图载荷与液面存在一定联系,通过功图计算动液面具有可行性,需要寻求方法通过功图较准确地计算液面。

1.2.2 功图载荷组成分析

功图中最有用的就是悬点最大载荷和最小载荷(图3)。2个载荷可以通过示功图直接获取。通过受力分析可知,最大载荷 $P_{\max}$ 为抽油杆在空气中的重量、作用在柱塞上的液柱载荷、惯性载荷、井口回压造成的悬点载荷、摩擦载荷、振动载荷及上冲程吸入压力作用在活塞上产生载荷的综合体现;最小载荷 $P_{\min}$ 为抽油杆在油管内液体中的重量、惯性载荷、井口回压造成的悬点载荷、摩擦载荷、振动载荷的综合体现^[2]。

$$P_{\max} = W_r + W_l + I_u + P_{hu} + F_u + P_v - P_i \quad (1)$$

$$P_{\min} = W'_r + I_d - P_{hd} - F_d - P_v \quad (2)$$

式中: $P_{\max}$ 、 $P_{\min}$ 分别为悬点最大和最小载荷,kN; W_r 、 W'_r 分别为上、下冲程中作用在悬点上的抽油杆柱载荷,kN; W_l 为作用在柱塞上的液柱载荷,kN; I_u 、 I_d 为上、下冲程中作用在悬点上的惯性载

荷,kN; P_{hu} 、 P_{hd} 为上、下冲程中井口回压造成的悬点载荷,kN; F_u 、 F_d 为上、下冲程中的最大摩擦载荷,kN; P_v 为震动载荷,kN; P_i 为上冲程吸入压力作用在活塞上产生的载荷,kN。

目前,塔河油田采油三厂大部分抽油机为14型前置式游梁抽油机(244口),采用四连杆结构传递动力。考虑摩擦载荷及振动载荷均较小,井口回压与套压基本可以抵消,通过将抽油机悬点运动简化为简谐运动,忽略摩擦载荷及振动载荷,忽略井口回压与套压。

简化后得到关于最大载荷及最小载荷比较精确的表达式。最大载荷 $P_{\max}$ 可表示为公式(3),主要包含 ρ 、 ρ_l 、 L_l 和 α 4个变量, α 为加速度因子,与冲程、冲次有关;最小载荷 $P_{\min}$ 可表示为公式(4),主要包含 ρ 、 α 变量,这2个公式合称为MILLS公式^[3]。最大载荷与最小载荷之差为交变载荷,见公式(5),主要包含 ρ 、 ρ_l 、 L_l 和 α 4个变量。

$$P_{\max} = W_l + W_{rl}(1 + 0.6\alpha) = (A_p - A_r)\rho g H - \rho t g A_p (H - L_l) + W_{rl}(1 + 0.6\alpha) \quad (3)$$

$$P_{\min} = W_{rl} - \rho g H A_r - 1.4 W_{rl} \alpha \quad (4)$$

$$\begin{aligned} \delta P &= P_{\max} - P_{\min} \\ &= \rho t g A_p L_l + 2 W_{rl} \alpha + (\rho - \rho_l) g H A_p \end{aligned} \quad (5)$$

式中: W_l 为作用在柱塞上的液柱载荷,kN; W_{rl} 为

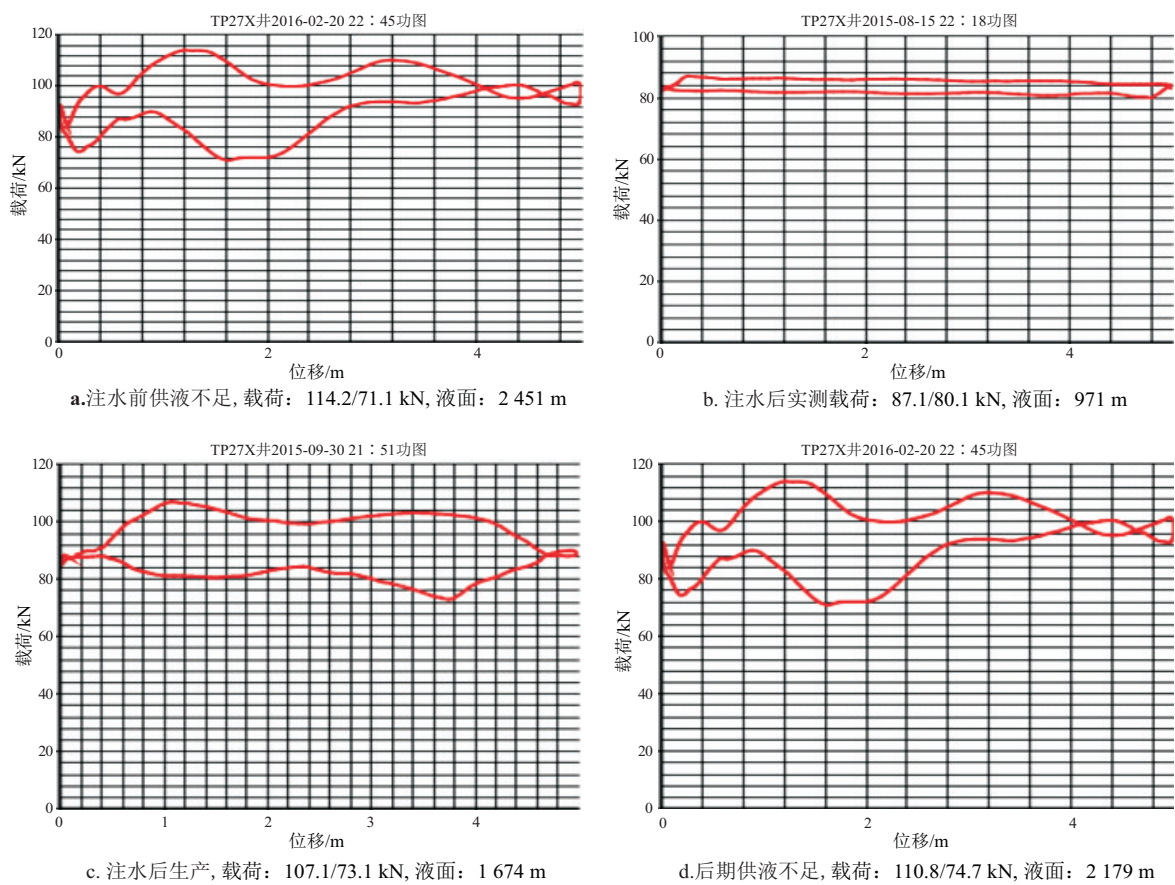


图 2 塔河油田 TP27X 井一个注水周期内与液面变化对应的示功图

Fig.2 Power chart corresponding to liquid surface change within a flooding cycle, well TP27X, Tahe oilfield

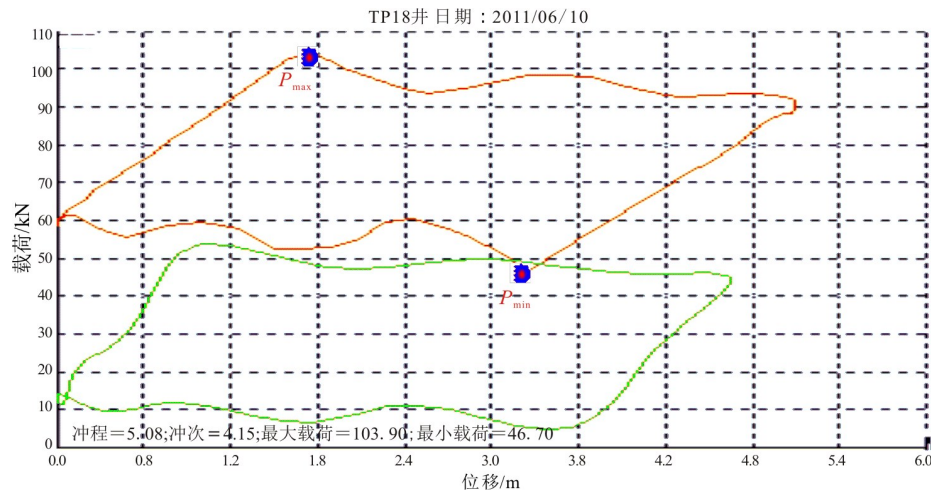


图 3 功图中的最大和最小载荷

Fig.3 Maximum and minimum loads of power chart

空气中抽油杆载荷, kN; α 为加速度因子 ($\alpha = Sn^2 / 1\,790$); S 为光杆冲程, m; n 为冲次, min^{-1} ; A_p 为柱塞截面积, mm^2 ; A_r 为抽油杆截面积, mm^2 ; ρ 为油管内液体密度, g/cm^3 ; H 为泵挂深度, m; ρ_l 为环空液体密度, g/cm^3 ; δP 为交变载荷, kN; L_l 为动液面, m。

1.2.3 利用功图计算液面方法

由于最大载荷 $P_{\max}$ 、交变载荷 δP 里都含有液面

这个变量,因此可以通过最大载荷和交变载荷来推算液面,同时从这 2 种计算方法的公式可以看出,在变量 ρ 、 ρ_l 、 α 不变的前提下,液面与最大载荷、交变载荷呈线性关系,因此可衍生出最大载荷线性回归法、交变载荷线性回归法等 2 种计算方法。

(1) 对于最大载荷法,从计算公式可以看出,主要影响因素为 ρ 、 ρ_l 、 α ,其他潜在影响因素为摩擦

载荷、振动载荷、设备因素等(设备因素主要指远传最大载荷不稳定,时刻在发生变化或者最大载荷直接不准确);(2)对于交变载荷法,其主要影响因素与最大载荷法相同,其他影响因素里则减少了设备影响因素,因为虽然最大载荷在发生变化,但交变载荷值基本上维持稳定;(3)最大载荷线性回归法除了受 ρ 、 ρ_l 、 α 影响外,主要还受设备因素影响,但可以消除摩擦载荷及振动载荷影响;(4)交变载荷线性回归法则主要受 ρ 、 ρ_l 、 α 影响。以下公式(6)、(7)、最大载荷线性回归曲线、交变载荷线性回归曲线等分别是4种通过功图载荷计算动液面的方法。

(1)最大载荷法:

$$P_{\max}=W_l+W_r(1+0.6\alpha)=(A_p-A_r)\rho gH-\rho_l gA_p(H-L_l)+W_r(1+0.6\alpha)$$
$$L_l=(P_{\max}-((A_p-A_r)\rho-\rho_l A_p)gH-W_r(1+0.6\alpha))/\rho_l gA_p$$

(6)

主要影响因素: ρ 、 ρ_l 、 α 。其他影响因素:摩擦载荷、振动载荷、设备因素等。

(2)交变载荷法:

$$\delta P=P_{\max}-P_{\min}=W_l+2W_r\alpha+\rho gHA_r$$
$$L_l=(\delta P-(\rho-\rho_l)gHA_p-2W_r\alpha)/\rho_l gA_p$$

(7)

主要影响因素: ρ 、 ρ_l 、 α 。其他影响因素:摩擦

载荷、振动载荷。

(3)最大载荷线性回归法(图 4a),主要影响因素: ρ 、 ρ_l 、 α 。其他影响因素:设备因素。

(4)交变载荷线性回归法(图 4b),主要影响因素: ρ 、 ρ_l 、 α 。其他影响因素:无。

2 功图计算液面试验

2.1 确定计算方法评价标准

要证明哪一种功图计算液面方法最优,首先需要确立一个评价标准。图 5 是 TK835CH 井同天 2 次实测液面;图 6 为 TK1136X 井同天实测液面与远传液面对比。

通过对比发现,油井在较短时间间隔内 2 次实测液面或实测液面与远传液面均可能出现较大差值,平均值在 200 m 左右。因此,在此人为规定计算液面值与实测液面值差值在 200 m 范围内属于达标,通过功图计算液面的试验结果,以达标率来评价不同方法的优劣。

2.2 利用功图计算液面试验情况

通过对选取的 4 口试验井累计进行 25 井次的试验,最大载荷法达标率 65.2%,交变载荷法达标率 67.6%,最大载荷线性回归法达标率 83.6%,交变载荷线性回归法达标率 88.9%。其中交变载荷线性回归法达标率最高。以试验井 TP27X 井为例,具体说明用 4 种方法分别计算该井 7 次不同时间

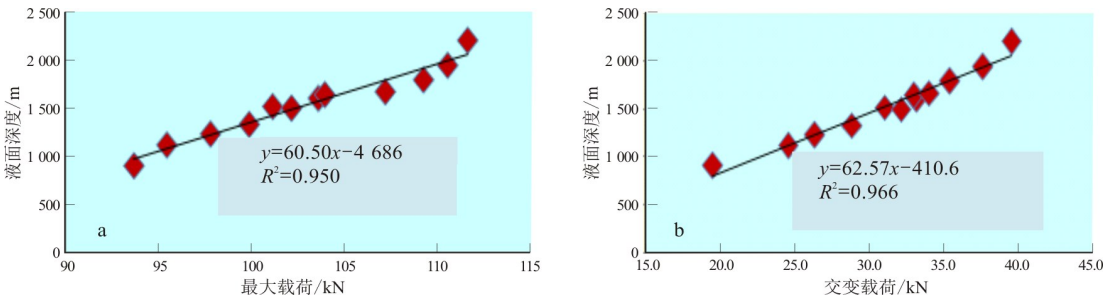


图 4 最大载荷和交变载荷线性回归曲线
Fig.4 Maximum load and alternating load linear regression curves

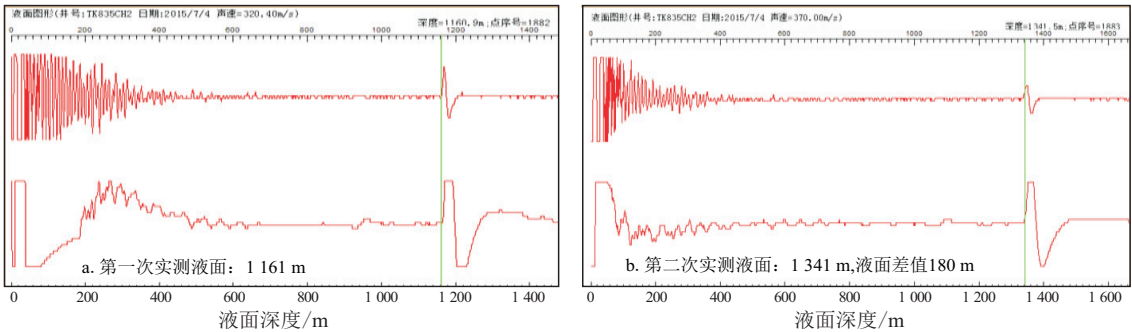


图 5 TK835CH 井同天两次实测液面对比
Fig.5 Liquid levels measured twice in the same day, well TK835CH

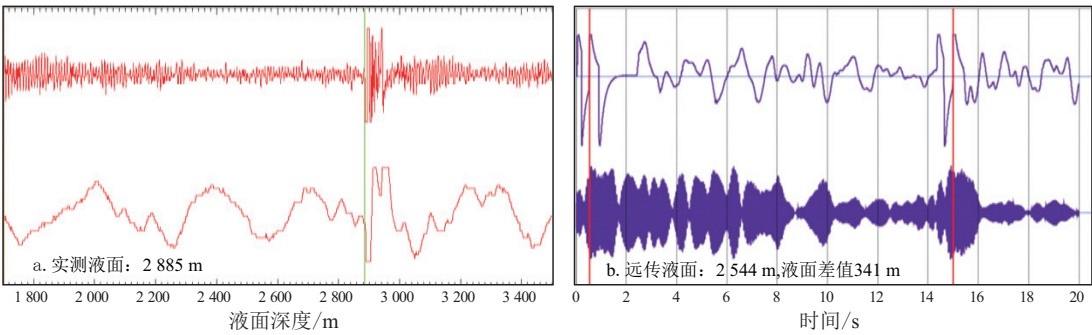


图 6 TK1136X 井同天实测液面与远传液面对比

Fig.6 Measured and wireless liquid levels in the same day, well TK1136X

的液面,其中,最大载荷法达标 4 井次,占比 57.1%,平均相对误差 250 m;交变载荷法达标 5 井次,占比 71.4%,平均相对误差 176 m;最大载荷线性回归法达标 4 井次,占比 57.1%,平均相对误差 138 m;交变载荷线性回归法达标 6 井次,占比 85.7%,平均相对误差 83 m(表 1-4)。不难看出单井试验数据中,交变载荷线性回归法达标井次最多,平均相对误差最低,相对较能准确利用功图计算液面。

2.3 影响因素分析及试验结论

通过上述试验情况,确定了交变载荷线性回归法为较优功图计算液面计算方法。从公式(6)、(7)可以看出,计算液面准确度主要影响因素为 ρ 、 α ,

即含水率、工作制度发生变化将对该方法的计算结果产生影响。下面以试验井 TP105 井分别以工作制度不变、含水小幅度波动,工作制度变化、含水小幅度波动 2 种生产状态进行试验评价(表 5,6)。

从 TP105 井试验情况看,工作制度不变,含水在小幅范围内(约 5%)波动,利用交变载荷线性回归法计算液面准确度较高,达标率 100%;从 TP264 井试验情况看,含水在小幅范围内(约 5%)波动,工作制度发生变化,利用交变载荷线性回归法计算液面准确度降低,达标率仅 40%,试验结果与理论分析相符。

总之,工作制度不变、含水小幅波动油井(5%以内),利用交变载荷线性回归法计算液面准确度

表 1 塔河油田 TP27X 井最大载荷法计算液面

Table 1 Liquid level calculated with maximum load method, well TP27X, Tahe oilfield

井号	序号	实测液面/m	计算液面/m	相对误差/m
TP27X	1	1 504	1 650	146
	2	1 606	1 750	144
	3	1 644	1 770	126
	4	1 674	2 030	356
	5	1 797	2 230	433
	6	1 947	2 300	353
	7	2 206	2 400	194
合计		1 768	2 019	250

表 2 塔河油田 TP27X 井交变载荷法计算液面

Table 2 Liquid level calculated with alternating load method, well TP27X, Tahe oilfield

井号	序号	实测液面/m	计算液面/m	相对误差/m
TP27X	1	1 504	1 720	216
	2	1 606	1 780	174
	3	1 644	1 790	146
	4	1 674	1 870	196
	5	1 797	1 980	183
	6	1 947	2 160	213
	7	2 206	2 310	104
合计		1 768	1 944	176

表 3 塔河油田 TP27X 井最大载荷线性回归法计算液面

Table 3 Liquid level calculated with maximum load linear regression method, well TP27X, Tahe oilfield

井号	序号	实测液面/m	计算液面/m	相对误差/m
TP27X	1	1 504	1 558	54
	2	1 606	1 664	58
	3	1 644	1 689	45
	4	1 674	1 928	254
	5	1 797	2 079	282
	6	1 947	2 174	227
	7	2 206	2 253	47
合计		1 768	1 906	138

表 4 塔河油田 TP27X 井交变载荷线性回归法计算液面

Table 4 Liquid level calculated with alternating load linear regression method, well TP27X, Tahe oilfield

井号	序号	实测液面/m	计算液面/m	相对误差/m
TP27X	1	1 504	1 537	33
	2	1 606	1 592	-14
	3	1 644	1 581	-63
	4	1 674	1 635	-39
	5	1 797	1 708	-89
	6	1 947	1 822	-125
	7	2 206	1 921	-285
合计		1 768	1 685	-83

表 5 塔河油田 TP105 井生产数据

Table 5 Production data of well TP105, Tahe oilfield

井号	序号	日产液/t	日产油/t	含水/%	工作制度/ (m·r·min ⁻¹)	液面/m	计算液面/m	相对误差/m
TP105	1	19.2	19.2	0.1	5*3	2 234	数据拟合计算公式	
	2	20	19.9	0.6	5*3	2 345		
	3	19.5	19.5	0	5*3	2 460		
	4	19.5	19.5	0	5*3	2 515	2 406	-109
	5	20.3	20.3	0.2	5*3	2 585	2 577	-8
	6	19.2	19.2	0	5*3	2 640	2 682	42
	7	19.6	18.9	3.6	5*3	2 698	2 795	97
	8	18.8	18.8	0	5*3	2 705	2 865	160
	9	16.8	16.8	0	5*3	2 725	2 806	81
	10	17.7	17.7	0	5*3	2 673	2 841	168
	11	18.4	18.4	0.2	5*3	2 994	3 145	151
合计		19	18.9	0.4		2 598	2 765	167

表 6 塔河油田 TP264 井生产数据表

Table 6 Production data of well TP264, Tahe oilfield

井号	序号	日产液/t	日产油/t	含水/%	工作制度/ (m·r·min ⁻¹)	实测液面/m	计算液面/m	相对误差/m
TP264	1	18.4	18.1	1.5	5*3	837	数据拟合计算公式	
	2	16	15.1	4.7	5*3	1 041		
	3	15.8	15.8	0	5*3	1 417		
	4	20.1	20.1	0.2	5*4	1 710		
	5	19.4	18.9	2.7	5*4	2 262	2 486	-266
	6	10.6	10.6	0	5*2.5	2 752		
	7	13.8	13.7	0.61	5*2.5	2 530		
	8	11	11	0	5*2.5	2 388		
	9	13.3	13.3	0	5*2.5	1 827		
	10	13.8	13.8	0	4.2*2.5	1 436		
合计		15.2	15	1.1		2 187	1 938	-249

较高。工作制度变化、含水小幅波动油井(5%以内),利用交变载荷线性回归法计算液面准确度相对较低。

2.4 经济效益

通过功图计算液面,采油三厂可减少液面测试井次约 10 井次/d,测试单价按 204.7 元/井次计算,季度可创造效益 18.42×10⁴ 元,具体经济效益计算如下:(1)投入费用:通过功图计算液面不需额外花费成本,投入费用为 0;(2)产出效益:低压测试单价按照 204.7 元/井次计算,每天创收为 204.7×10=2 047 元;(3)净效益:折算季度净经济效益为 2 047×3×30-0=18.42×10⁴ 元。

3 结论与建议

(1)通过理论推导,利用功图计算液面,具备一定可操作性。

(2)试验结果表明,利用交变载荷线性回归法计算液面误差最小,功图计算液面相对误差可较好

地控制在 200 m 范围内。

(3)针对功图载荷无异常波动,工作制度、含水率基本不变(波动范围不超过 5%)的油井,利用交变载荷线性回归法计算液面的准确度较高。

(4)交变载荷线性回归法求取液面的主要影响因素有载荷、工作制度及含水率,因此,载荷异常波动大、含水变化大、工作制度调整频繁及泵况异常油井,不适合应用该方法计算液面。

参考文献:

[1] 任桂山,李强,闫学峰,等.利用示功图计算动液面方法研究及应用[J].石油工程技术,2012,20(1):47.

[2] 张琪.抽油机悬点最大载荷计算[J].华东石油学院学报,1981,30(3):20-21.

[3] 高国华,彭勇,余国安.有杆抽油井泵示功图的定量分析方法[J].石油学报,1993,97(4):142-143.

[4] 刘柏希,原大宁.一种利用地面示功图计算抽油泵泵效的方法[J].机械设计与研究,2006(专刊):278-279.

(编辑 黄 娟)