

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2514046

基于抽油机悬点载荷的油井动液面软测量方法*

赵怀军¹, 姬永晟¹, 胡定兴², 赵东升³, 聂小兵¹

(1. 西安理工大学机械与精密仪器工程学院 西安 710048; 2. 西安华瑞网电科技股份有限公司 西安 710075;
3. 中石油长庆油田分公司发展计划部 西安 710018)

摘要: 动液面深度的准确测量是分析油田生产运行动态、制定和调整油田开发方案的关键技术。针对常规浮筒法和声波反射法等因套管环空空间的影响无法适用于斜井、示功图算法因其测力传感器受持续交变载荷影响稳定性差、动液面预测法计算量较大的问题,从电能“既是动力源又是信息源”的双源特性出发,提出一种从地上电动机工作电参数—抽油机悬点载荷—地下油井动液面深度跨域关联的软测量方法。首先根据游梁式抽油机抽油过程中的能量流通传递机理,建立由地面电动机输入电参数、四连杆机构参数以及游梁倾角位移,计算其驴头悬点载荷的数学模型,其次基于抽油泵在上冲程固定阀开启瞬间以及下冲程过程中,油液流在其固定阀的压力降呈现零值的特征,在获得的悬点载荷数据域中,动态截取其首波峰点与首波谷点之间的区域作为上静载荷最优观测区,求取多个冲程中本观测区内的载荷均值作为上静载荷,同时求取多个冲程中下冲程的载荷均值作为下静载荷,最后根据动液面深度与抽油机悬点上、下静载荷的关联关系,建立动液面软测量数学模型,将采集的电动机输入电参数代入计算,求出动液面深度的软测量值。工程实验与应用结果表明,该法稳定性好,工程实用性强,能适用于电驱井,相对测量误差 $\leq \pm 8\%$ 。

关键词: 电能;油井;动液面;软测量

中图分类号: TE937 TH89 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 460.40

Soft-sensing method of dynamic fluid level in oil well based on load of hanging point of pumping unit

Zhao Huaijun¹, Ji Yongsheng¹, Hu Dingxing², Zhao Dongsheng³, Nie Xiaobing¹

(1. School of Mechanical & Precision Instrument Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China;
2. Xi'an Hi-Rate Network Technology Co., Ltd., Xi'an 710075, China; 3. Development Planning Department of PetroChina Changqing Oilfield Company, Xi'an 710018, China)

Abstract: The accurate measurement of dynamic liquid depth is a key technology to analyze the production and operation dynamics of oilfields, and to formulate and adjust oilfield development plans. Because of the conventional pontoon method and acoustic wave reflection method, which cannot be applied to inclined wells due to the influence of the casing annular space, the dynamometer calculation method has poor stability due to the influence of continuous alternating load, and a large amount of calculation is required in the dynamic liquid level prediction method. Starting from the dual-source characteristics of electric energy as both a power source and an information source, a soft measurement method is proposed to correlate the cross-domain correlation between the working electrical parameters of the above-ground motor, the suspension load of the pumping unit, and the dynamic surface depth of the underground oil well. Firstly, according to the energy flow and transfer mechanism of the beam pumping unit during the pumping process, a mathematical model of the donkey head suspension load is formulated by the input electrical parameters of the ground motor, the parameters of the four-link mechanism, and the inclination displacement of the beam. Secondly, based on the fact that the pressure drop of the oil flow in the fixed valve of the pump presents zero value at the moment of opening of the fixed valve of the upstroke and the process of the downstroke, the area between the peak point of the first wave and the trough point of the first wave is dynamically intercepted as the

收稿日期:2025-05-16 Received Date: 2025-05-16

* 基金项目:陕西省重点研发计划(2025CY-YBXM-620)项目资助

optimal. Finally, according to the correlation between the depth of the dynamic liquid level and the static load on and below the suspension point of the pumping unit, the mathematical model of soft measurement of dynamic liquid level is established, and the input electrical parameters of the collected motor are substituted into the calculation to obtain the soft measurement value of dynamic liquid level depth. The results of engineering experiments and applications show that the method has good stability and strong engineering practicability. It can be applied to electric drive wells. The relative measurement error is not more than $\pm 8\%$.

Keywords: electric energy; oil well; dynamic fluid level; soft-sensing

0 引言

油井动液面深度(简称油井动液面)是指抽油井在正常生产过程中,油管 and 套管环形空间的流体在动态平衡状态下,形成的液面距离井口的深度。它既是反映地层供液能力的重要指标,更是确定油泵合理沉没深度和抽油机抽汲参数、制定科学工作制度以及诊断油井故障的基本依据^[1-5]。生产作业时实时准确地测量油井动液面,在线调整油井工作制度,使其精确匹配地层供液能力,提高油田采收率和降低举升成本,是当今新质生产力发展趋势下,油田行业提质增效技术研究的热点之一。

目前常规动液面的测量方式主要有4类:1)声波反射技术,该技术通过井口处设置的白噪声波、氮气驱动声波等声源装置发射声波脉冲,根据次脉冲的传播速率及其在液面处的反射时间,推算油井动液面的深度,然而,该方法易受套管环形空间内死油沉积、稠油存在、泡沫油形成以及蜡质环积聚等多种因素的制约,测量精度不高,尤其无法适用于斜井场景;2)示功图算法^[3-5],其利用抽油机示功仪测得的地面示功图^[6]与动液面变化之间的能量转换关系获得动液面值,此法中示功仪的测力传感器长期受交变载荷影响,稳定性较差、准确性低;3)利用大量历史动液面数据进行模型训练的动液面预测法^[7-12],该法计算量较大,其模型精度尚需进一步提高;4)其他常规方法,包括浮筒法^[13]、压力计探测法^[14-15]、物质平衡法^[15]等,此类方法受到套管环空空间限制,安装不方便,工程实用性较差。

利用电能“既是动力源又是信息源”的双源特性,即机采系统驱动电机使用的电能兼具动力供给与信息承载的双重属性,提出一种从地上电动机工作的电参数—抽油机悬点载荷—地下的动液面深度跨域关联软测量方法。首先,基于地面电动机输入电参数、抽油机四连杆机构参数以及游梁倾角位移,构建抽油机悬点载荷的数学模型;其次,考虑到油井筒中液流通过油泵固定阀产生的压力降对动液面深度测量的影响,且该压力降在油田现场难以直接测量,但其在抽油泵上冲程固定阀开启瞬间及下冲程呈现零值特征等各种因素和特点,在获得的悬点载荷中,动态截取其首波峰点与首波谷点间的载荷数据区域,作为悬点上静载荷的最优观测区,并以多冲程最优观测区内的载荷

均值作为上静载荷,同时以多冲程的下冲程载荷均值作为下静载荷;最后,根据动液面深度与载荷的相关关系,建立动液面软测量数学模型,将采集的电动机输入电参数代入计算,求出动液面深度的软测量值。

1 抽油机悬点载荷软测量数学模型建立

典型油井机采系统组成示意图如图1所示。油泵抽汲过程示意图如图2所示。

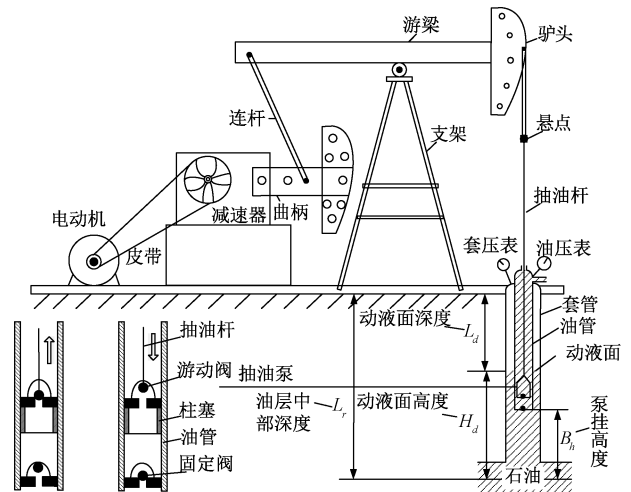


图1 油井机采系统组成示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the composition of the oil well machine production system

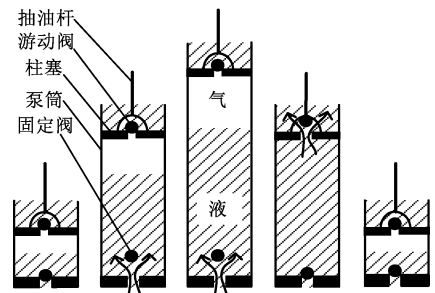


图2 油泵抽汲过程示意图

Fig. 2 Schematic diagram of oil pump pumping process

油泵工作原理为:在上冲程时,游梁式抽油机的驴头带动抽油杆、油泵柱塞向上移动,泵内压力低于沉没压

力,油液会顶开固定阀进入泵筒内,游动阀处于关闭状态,完成泵内液体吸入与泵上液体排出过程;在下冲程时,抽油机的驴头带动抽油杆、油泵柱塞向下移动,固定阀关闭,防止泵筒内油液回流到油井中,随着柱塞下移泵内压力增大,超过柱塞上方液柱产生的压力,游动阀开启,原油进入油管。

在游梁式抽油机中,电网的电能通过驱动电动机变成输出转矩,此转矩经过曲柄轴传递变为输出转矩,进一步由四连杆机构转换为作用在光杆悬点上的垂直拉力,驱动抽油杆上下运动。据此能量流通机理,建立电动机输入电参数、四连杆机构参数以及悬点载荷之间的关联关系模型,实现对悬点载荷的准确软测量。

1.1 基于游梁倾角的扭矩因数数学模型建立

扭矩因数是指单位悬点载荷在抽油机曲柄轴上所引发的扭矩值,其量值大小与抽油机的几何尺寸以及曲柄、连杆、后臂三者之间的位置有关系,采用符号 \overline{TF} 来表示。抽油机四连杆结构如图 3 所示。

$$\overline{TF} = \frac{A}{C}R \frac{\sin \alpha}{\sin \beta} \quad (1)$$

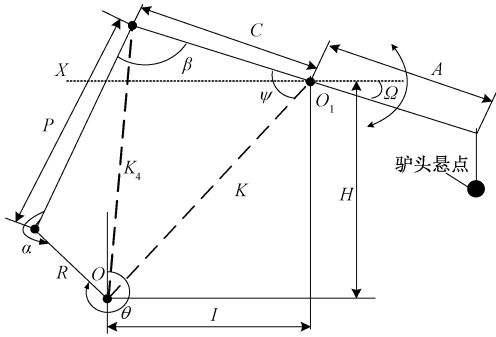


图 3 抽油机四连杆结构

Fig. 3 Four link structure diagram of pumping unit

在式(1)和图 3 中: A 为游梁前臂长度, C 为游梁后臂长度, R 为曲柄长度, P 为连杆长度,单位均为米(m); H 为游梁支承中心到减速器输出轴中心的垂直间距, I 为游梁支承中心到减速器输出轴中心的水平间距, K 、 K_4 为各虚线的长度,单位为米(m); Ω 为游梁倾角(游梁前臂与水平线 X 的夹角),单位为度($^\circ$),通过装设在游梁 O_1 处的倾角传感器实时测量; α 为连杆与曲柄之间的夹角, β 为游梁后臂与连杆的夹角, θ 为曲柄转角, ψ 为游梁后臂 C 与基杆 K 之间的夹角,单位为度($^\circ$)。

通过分析图 3 所示的抽油机四连杆结构图,可以建立下式所示的基于游梁倾角 Ω 的扭矩因数数学模型^[16-17],规定当游梁前臂在水平线以下时 Ω 为负,反之 Ω 为正。

$$\psi = \arctan \frac{H}{I} - \Omega \quad (2)$$

$$K_4 = \sqrt{C^2 + K^2 - 2CK\cos\psi} \quad (3)$$

$$\alpha = -\arcsin \left[\frac{K_4}{P} \sqrt{1 - \left(\frac{R^2 + K_4^2 - P^2}{2RK_4} \right)^2} \right] \quad (4)$$

$$\beta = \alpha - \arctan \left(\frac{C\sin\psi}{K - C\cos\psi} \right) - \arccos \left(\frac{R^2 + K_4^2 - P^2}{2RK_4} \right) - \psi \quad (5)$$

将式(4)、(5)代入式(1)有:

$$\overline{TF} = -\frac{ARK_4}{CP} \times \frac{1}{\sin \left[\alpha - \arctan \left(\frac{C\sin\psi}{K - C\cos\psi} \right) - \arccos \left(\frac{R^2 + K_4^2 - P^2}{2RK_4} \right) - \psi \right]} \sqrt{1 - \left(\frac{R^2 + K_4^2 - P^2}{2RK_4} \right)^2} \quad (6)$$

在式(6)中, A 、 C 、 R 、 P 、 H 、 I 均取决于抽油机固有的机械结构,对于确定型号的抽油机,这些参数均为已知值,故扭矩因数 \overline{TF} 仅是游梁倾角 Ω 的函数。将实时测得 Ω 代入该模型,就获得了扭矩因数 \overline{TF} 。

1.2 曲柄轴扭矩与抽油机悬点载荷关联模型建立

游梁式抽油机的平衡方式主要分为 3 类,分别为游梁平衡、曲柄平衡以及复合平衡。本研究以曲柄平衡方式的游梁式抽油机为例分析,其他平衡方式的抽油机分析方法具有相似性,可类推之。如图 4 所示为抽油机受力分析图。

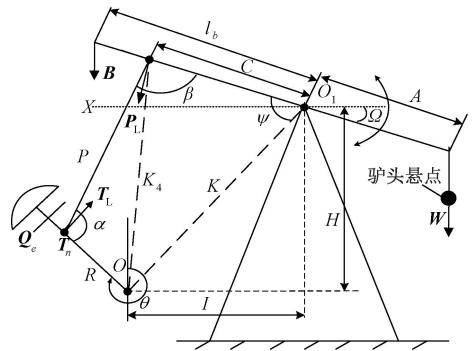


图 4 曲柄平衡的抽油机受力分析

Fig. 4 Force analysis diagram of crankshaft balanced pumping unit

在图 4 中, W 是悬点载荷,单位为千牛(kN);其余符号定义与 1.1 节相同。

1) 以 O_1 为游梁旋转中心,进行连杆 P 的受力分析,连杆力 P_L 为:

$$P_L = W \frac{A}{C} \frac{1}{\sin \beta} \quad (7)$$

连杆力 P_L 在曲柄切向上的分力 T_L 为:

$$T_L = -W \frac{A \sin \alpha}{C \sin \beta} = -\frac{WTF}{R} \quad (8)$$

2)以曲柄为研究对象,忽略抽油机游梁、驴头、连杆和横梁等结构部件的自重,则曲柄轴产生的扭矩 T_n ^[18] 为:

$$T_n = \overline{TFW} - Q_e R \sin \theta \quad (9)$$

其中, Q_e 为曲柄平衡块重力与曲柄自重的等效载荷; $Q_e R \sin \theta$ 为该等效载荷在曲柄轴上所产生的平衡扭矩。

3)在图4中,曲柄转角 θ 为:

$$\theta = -\arctan\left(\frac{C \sin \psi}{K - C \cos \psi}\right) - \arccos\left(\frac{R^2 + K_4^2 - P^2}{2RK_4}\right) + \arctan \frac{I}{H} \quad (10)$$

4)忽略游梁摆角所带来的影响,把抽油机固有的结构不平衡重 B 纳入计算时,则式(9)变为:

$$T_n = \overline{TF}[(W - B)] - Q_e R \sin \left[-\arctan\left(\frac{C \sin \psi}{K - C \cos \psi}\right) - \arccos\left(\frac{R^2 + K_4^2 - P^2}{2RK_4}\right) + \arctan \frac{I}{H} \right] \quad (11)$$

式(11)表明了悬点载荷 W 及曲柄平衡重在曲柄轴上产生的扭矩,式(11)中除了悬点载荷 W 外,其余均为抽油机固有的机械结构参数。

1.3 悬点载荷与电动机输入电参数关联模型建立

为了降低采油井场低压电网三相电压不对称现象对电动机输出转矩计算的影响,用基于对称分量法计算得到的正序功率 P_1 作为电动机输入功率。

设电动机输入端的三相瞬时电压、电流值为 (u_a, u_b, u_c) 、 (i_a, i_b, i_c) ,正序电压 u_+ 、电流 i_+ 和平均正序有功功率 P_1 为:

$$\begin{cases} u_+ = \frac{1}{3}(u_a + \alpha u_b + \alpha^2 u_c) \\ i_+ = \frac{1}{3}(i_a + \alpha i_b + \alpha^2 i_c) \\ P_1 = \int_0^T u_+^T i_+ dt = U_+ I_+ \cos \phi^+ \end{cases} \quad (12)$$

其中, $\alpha = e^{j120^\circ}$, $\alpha^2 = e^{-j120^\circ}$, α 为方向角 120° 的单位向量, ϕ^+ 为功率因数角。

电动机在曲柄轴上产生的扭矩 M_{ed} 为:

$$M_{ed} = \frac{30P_1 \eta \eta_E}{n \pi} \quad (13)$$

式中: η 为电动机效率,无因次; n 为电动机轴转速,单位为 r/min ; η_E 为电动机至曲柄轴的传动效率。

对于游梁式抽油机,由悬点载荷及曲柄平衡重产生的扭矩,和电动机输出扭矩维持一个平衡的状态^[19],即有:

$$M_{ed} = T_n \quad (14)$$

综合式(11)、(13)、(14),即:

$$W = \frac{30P_1 \eta \eta_E}{n \pi \overline{TF}} + B + \frac{Q_e R}{\overline{TF}} \sin \left[-\arctan\left(\frac{C \sin \psi}{K - C \cos \psi}\right) - \arccos\left(\frac{R^2 + K_4^2 - P^2}{2RK_4}\right) + \arctan \frac{I}{H} \right] \quad (15)$$

其中,三相电压电流检测模块通过动态数据采集与在线运算,可实现电动机输入端正序有功功率 P_1 的实时计算; η 、 η_E 、 n 作为电动机动平衡设计的核心参数,曲柄平衡块质量与曲柄自重间存在等效质量转换关系,其中平衡系数 Q_e 表征为二者的质量比值,该参数在特定工况下是一定值。 R 、 H 、 I 、 B 等都是抽油机机械参数,对于给定型号的游梁式抽油机,这些参数都是已知的; \overline{TF} 可通过式(6)求出; Ω 是游梁倾角。至此建立了以地面电动机输入电参数、游梁倾角位移为输入的悬点载荷计算数学模型。

2 油井动液面软测量数学模型建立

抽油机驴头悬点载荷依据其运动特性分为静载荷与动载荷,如图5所示。

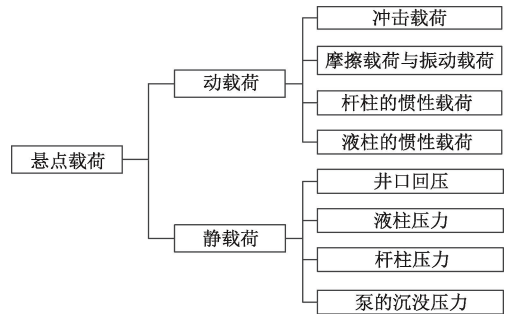


图5 悬点载荷分类分析

Fig. 5 Classification analysis diagram of overhanging load

为简化分析,忽略摩擦载荷、振动载荷、冲击载荷、杆柱及液柱的惯性载荷效应,仅考虑静载荷。同时,考虑到动液面软测量模型在工程应用中的便利性,可认为井筒油液是均匀混合液,则动液面深度计算公式^[11]可简化为:

$$L_d = \frac{4(W_{\text{上}} - W_{\text{下}})}{\rho_{\text{液}} g \pi D^2} - \frac{J_h - J_t + \Delta W}{\rho_{\text{液}} g} \quad (16)$$

式中: $W_{\text{上}}$ 表示悬点上静载荷,包含抽油杆柱在空气中重力、上冲程时柱塞上液柱载荷、井口回压在上冲程产生的载荷,同时扣除柱塞底部托浮力,单位为千牛(kN); $W_{\text{下}}$ 表示悬点下静载荷,是抽油杆柱在油液中重力减去井口回压在下冲程产生的载荷,单位为千牛(kN); J_h 表示井口回压,单位为 kPa; J_t 表示井口套压,单位为 kPa; $\rho_{\text{液}}$ 表

示油井液体密度,单位为 g/cm^3 ; g 表示重力加速度, $9.8 \text{ m}/\text{s}^2$; ΔW 表示液流通过固定阀产生的压力降,单位为 kPa ; D 是泵径,单位为 m ; L_d 表示动液面深度,单位为 m 。

理论分析表明,在抽油机上冲程油泵固定阀开启瞬间、抽油机下冲程过程中,液流通过固定阀产生的压力降^[20] ΔW 是 0,所以式(16)可变为:

$$L_d = \frac{4(W'_\text{上} - W_\text{下})}{\rho_\text{液} g \pi D^2} - \frac{J_h - J_l}{\rho_\text{液} g} \quad (17)$$

式中: $W'_\text{上}$ 表示上冲程固定阀开启瞬间的悬点上静载荷,单位为千牛(kN)。

由抽油机悬点的受力分析可知,在上冲程中固定阀开启瞬间的悬点上静载荷 $W'_\text{上}$,应在悬点载荷曲线的首波峰点与首波谷点之间,即如图 6(长庆油田王 9-182 井的悬点载荷实测软测量曲线)所示中的 $p-v$ 段,本文在悬点载荷曲线上动态寻找并截取此段作为悬点上静载荷的最优观测区,以区内的载荷均值作为上静载荷、以下冲程载荷均值作为下静载荷。

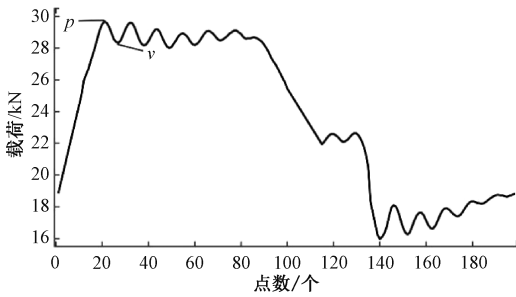


图 6 王 9-182 井悬点载荷软测量曲线

Fig. 6 Soft measurement curve of suspended load for Well Wang 9-182

为了减少误差,以多冲程最优观测区内的悬点载荷均值 W_{apv} ,替代上述 $W'_\text{上}$,以多冲程的下冲程悬点载荷均值 W_{adown} ,替代上述 $W_\text{下}$,如式(18)所示。

$$\left\{ \begin{aligned} W_{apv} &= \frac{\sum_{j=1}^z \sum_{i=1}^{n_{pv}} W_{ij}}{zn_{pv}} \\ W_{adown} &= \frac{\sum_{j=1}^z \sum_{k=1}^{n_{\text{下}}} W_{kj}}{zn_{\text{下}}} \end{aligned} \right. \quad (18)$$

式中: z 表示冲程的个数, $j = 1, 2, 3, \dots, z$; n_{pv} 表示一个最优观测区内的采样点数, $i = 1, 2, 3, \dots, n_{pv}$; $n_{\text{下}}$ 表示一个冲程内下冲程悬点载荷的采样点数, $k = 1, 2, 3, \dots, n_{\text{下}}$; W_{ij} 表示最优观测区内的实时悬点载荷,单位为千牛(kN); W_{kj} 表示下冲程的实时悬点载荷,单位为千牛(kN)。

至此,式(17)变为:

$$L_d = \frac{4(W_{apv} - W_{adown})}{\rho_\text{液} g \pi D^2} - \frac{J_h - J_l}{\rho_\text{液} g} \quad (19)$$

其中, W_{apv} 、 W_{adown} 可由第 1 章通过电动机输入电参数计算间接获得,泵径 D 在抽油泵型号确定时也是已知的,井口回压 J_h 、井口套压 J_l 、油井液体密度 $\rho_\text{液}$ 可通过测量获取,这就获得了基于抽油机悬点载荷的油井动液面软测量模型。

在实际油井生产中,动液面深度与载荷的相关关系受油井液体密度^[21] 时变特性、抽油机传动效率^[22] 衰减的影响,会呈现出一定的非线性特征。本研究构建的动液面软测量模型对上述时变要素进行了合理近似处理:

- 1) 将油井液体密度简化为定值,忽略其受温度、含水率影响的非线性变化;
- 2) 假设抽油机传动效率为恒定参数,暂未考虑设备磨损导致的效率衰减时变特性。

该近似处理在降低模型复杂度与计算量的同时,不可避免地引入了测量误差,但这些误差均在当前实际工程应用要求的范围内。

3 油井动液面软测量油田现场试验

3.1 油井动液面软测量测控平台的搭建

为了对上述建立的动液面软测量模型进行工程实践验证,构建如图 7 所示的油井动液面软测量智能测控装置,包括参量采集单元、参量处理单元、人机接口单元、数据通讯传输单元 4 部分。

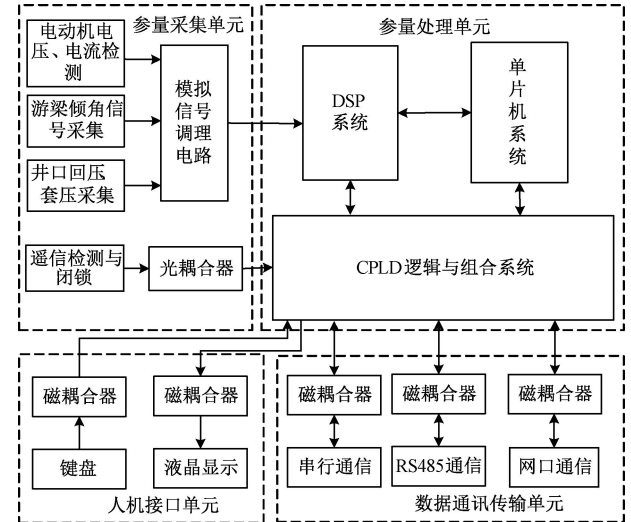


图 7 油井动液面软测量智能测控装置结构

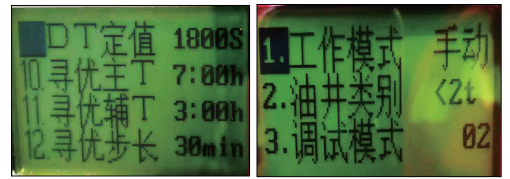
Fig. 7 Structure of intelligent measurement and control device for oil well dynamic liquid level soft measurement

工作时,参量采集单元通过电压、电流互感器采集三相瞬时电压值 (u_a 、 u_b 、 u_c) 和三相瞬时电流值 (i_a 、 i_b 、 i_c),

通过倾角传感器(MSH527)采集游梁倾角实时值,通过压力传感器(ZY6000F)采集井口回压和套压。参量处理单元主要完成电动机输入正序平均有功电功率的计算,游梁倾角、井口回压、井口套压等数据的测量处理,以及根据已搭建的油井动液面与电动机输入电参数关联模型计算动液面深度等,其采用“数字信号处理器(digital signal processor, DSP)+复杂可编程逻辑器件(complex programmable logic device, CPLD)+微控制器单元(microcontroller unit, MCU)”异构架构, DSP采用高精度三相电能计量芯片ATT7022E,单片机采用dsPIC30F6014A, CPLD采用EPM7128。人机接口单元实现智能测控装置的人机交互,数据通讯传输单元完成数据远程传输和监控。

3.2 油井动液面软测量现场试验及分析

将油井动液面软测量智能测控装置安装在抽油机电控柜中,连接好所需信号与控制连线,在长庆油田王窑作业区选择了30口不同地点、不同工况、使用不同型号抽油机设备的油井进行了现场实验与应用,如图8所示为部分现场实验照片,如图9所示为油井动液面软测量智能测控装置的液晶显示屏图,其中包括抽油机冲程、悬点载荷、间抽控制、工作模式显示界面。在进行试验的一年时间内,采用油田公司既有的声波测量装置(SYYJ型号)测量值与本文提出方法的测量结果进行比对。如表1所示列出了其中典型8口油井比对测量结果。



(c) 间抽控制显示 (d) 工作模式显示
(c) Intermittent control display (d) Working mode display

图9 液晶显示屏

Fig. 9 Liquid crystal display diagram

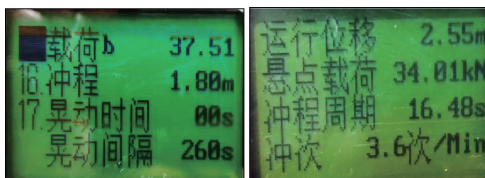
表1 声波测量装置与软测量方法测量的动液面相对误差
Table 1 Relative error of the hydrodynamic level measured by acoustic measuring device and soft sensing method

井号	测量次数 /次	动液面软测量值/m	动液面实测值/m	相对误差 /%
王 9-182	1	1 001.62	1 029	-2.66
	2	1 028.10	1 039	-1.05
	3	1 125.26	1 071	5.07
王 263-81	1	848.25	886	-4.26
	2	957.43	939	1.96
	3	918.81	890	3.24
王 C27-12	1	1 087.38	1 041	4.46
	2	1 062.05	1 022	3.92
	3	1 034.60	1 014	2.03
王 14-024	1	976.03	967	0.93
	2	940.14	977	-3.77
	3	974.09	931	4.63
王 16-241	1	924.67	914	1.17
	2	943.30	974	-3.15
	3	930.38	989	-5.93
王侧 14-27	1	1 007.67	981	2.72
	2	980.86	1 050	-6.58
	3	973.34	999	-2.57
王 29-32	1	1 056.19	1 088	-2.92
	2	1 057.06	1 023	3.33
	3	1 074.67	1 009	6.51
新 30-024	1	585.34	580	0.92
	2	567.03	600	-5.50
	3	551.92	592	-6.77
平均相对误差/%				3.585
最大相对误差/%				-6.77
最大误差 $\leq \pm 8\%$ 比例/%				100



图8 油田现场实验

Fig. 8 Oilfield field experiment diagram



(a) 冲程显示 (b) 悬点载荷显示
(a) Stroke display (b) Suspension point load display

如图 10 所示为王 C27-12 井动液面实测值与软测量值的对比曲线图。

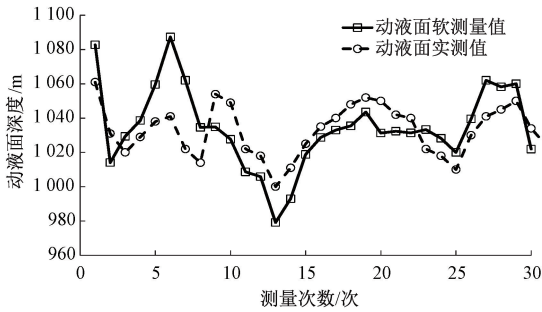


图 10 王 C27-12 井动液面实测值与软测量值对比曲线
Fig. 10 The comparison curve graph of the measured values of the dynamic liquid level and the soft measured values in Well Wang C27-12

如图 11 所示列出了 80 个测量点的相对误差分布。其余测量数据不再在文中赘述,但它们的测量误差均小于所选 8 口油井,不影响所提方法的工程应用结论。

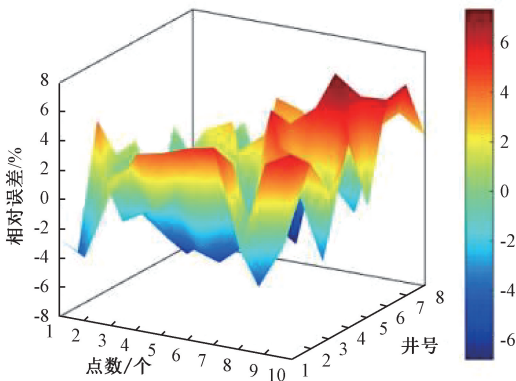


图 11 8 口油井 80 点动液面数据的相对误差分布
Fig. 11 Relative error distribution of 80-point moving liquid level data from 8 oil wells

如表 2 所示进一步列出了所提软测量方法与常规 4 种动液面测量方法——声波反射法、示功图计算法、动液面预测法、浮筒法,在误差和适用范围方面的对比分析。

结合表 1、2 和图 10、11 分析可以看出,相较于常规动液面测量方法,本文提出的动液面软测量方法优势显著:在测量精度方面,其软测量曲线与动液面实测曲线呈现良好的吻合性,最大相对误差为 8%,满足工程实用误差 $\leq 10\%$ 要求;在适用范围上,不受井型、套管环空空间、历史测量数据、流体介质及工况条件等因素限制,适用范围较宽,工程实际应用性强。

表 2 动液面测量误差分析

Table 2 Analysis of measurement errors of dynamic liquid level

模型	最大相对误差/%	适用范围
声波反射法	6.00	适用于直井,不适用斜井
示功图计算法	15.00	可获取地面示功图的油井
动液面预测法	15.00	具备大量历史动液面数据的油井
浮筒法	10.00	适用套管环空空间规则的直井,不适用斜井
本文所提方法	8.00	适用于所有电驱井,适用范围宽

4 结 论

1) 从电能双源特性,即“电能既是动力源又是信息源”的视角出发,提出一种从地上电参数跨域关联油井地下动液面深度的软测量方法。

2) 通过解析油梁式抽油机系统的运动规律与能量流通机理,构建了地上电动机输入电参数、四连杆机构参数与驴头悬点载荷的关联模型,并以多冲程最优观测区内的载荷均值替代悬点上静载荷,同时以多冲程的下冲程载荷均值替代悬点下静载荷,依据动液面深度与载荷的相关关系,实现动液面的跨域在线软测量。

3) 经油田现场的实验验证,结果表明本文提出的动液面软测量方法能够实现对动液面的在线准确软测量,具有良好的稳定性与工程实用性,满足油田生产现场的实际应用需求。

参考文献

[1] 李梦华, 杨浩, 张宁, 等. 基于物联网的移动式油井动液面监测系统[J]. 物联网技术, 2024, 14(10): 10-12, 17.
LI M H, YANG H, ZHANG N, et al. Mobile monitoring system of oil well dynamic liquid level based on Internet of things [J]. Internet of Things Technology, 2024, 14(10): 10-12, 17.

[2] 杨浩然, 袁春华. 基于 Laplacian 正则和协同训练的抽油井故障诊断方法[J]. 机电工程技术, 2024, 53(6): 216-220.
YANG H R, YUAN CH H. Fault diagnosis method of pumping well based on Laplacian regular and cooperative training[J]. Mechatronics Engineering Technology, 2024, 53(6): 216-220.

[3] 于清澄. 功图计量技术在辽河油田的应用与研究[J]. 中国仪器仪表, 2022(9): 52-55.

- YU Q CH. Application and research of work measurement technology in Liaohe Oilfield[J]. *China Instruments and Meters*, 2022(9): 52-55.
- [4] WU J. Analysis on the failure causes of the collapsed tubing in an oil well[J]. *World Journal of Engineering and Technology*, 2023, 11(4): 745-755.
- [5] 刘欢. 示功图智能校核动液面方法在油田数字化项目中的应用[J]. *自动化应用*, 2024, 65(10): 154-156.
- LIU H. Application of intelligent verification of dynamic liquid level using indicator diagram in digital oilfield projects[J]. *Automation Application*, 2024, 65(10): 154-156.
- [6] 李建平, 董永杨, 宋明会. 基于改进 ResNet 的示功图分类算法研究[J]. *计算机技术与发展*, 2024, 34(8): 197-201.
- LI J P, DONG Y Y, SONG M H. Research on dynamometer classification algorithm based on improved ResNet[J]. *Computer Technology and Development*, 2024, 34(8): 197-201.
- [7] 罗久飞, 郑明轩, 冉超, 等. 噪声激振下的油井动液面测量方法研究[J]. *仪器仪表学报*, 2022, 43(12): 258-266.
- LUO J F, ZHENG M X, RAN CH, et al. Research on detection of dynamic liquid level of oil wells based on noise excitation[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2022, 43(12): 258-266.
- [8] LENG CH Y, JIA M X, NIU D P. Dynamic liquid level prediction for multiple oil wells based on transfer learning and multidimensional feature fusion network[J]. *Measurement Science and Technology*, 2025, 36(1): 015020.
- [9] JIA M X, LENG CH Y. Multi-well dynamic liquid-level prediction method of pumping well based on dynamic and static information feature fusion neural network[J]. *Transactions of the Institute of Measurement and Control*, 2023, 45(6): 1099-1110.
- [10] 艾信, 刘天宇, 张浩伟, 等. 变权重组合算法预测抽油机井动液面提高测试效益[J]. *石油钻采工艺*, 2024, 46(5): 586-599.
- AI X, LIU T Y, ZHANG H W, et al. Variable weight combination algorithm for predicting the testing efficiency of improving the dynamic liquid level of pumping unit wells[J]. *Petroleum Drilling and Production Technology*, 2024, 46(5): 586-599.
- [11] 杨勇楠. 基于大数据的螺杆泵井动液面预测与应用[J]. *化学工程与装备*, 2024(9): 106-109, 156.
- YANG Y N. Prediction and application of dynamic liquid level in rod pumped wells based on big data[J]. *Chemical Engineering and Equipment*, 2024(9): 106-109, 156.
- [12] 王通, 陈延彬. 基于改进生成对抗网络的动液面建模数据扩充[J]. *电子测量与仪器学报*, 2023, 37(2): 99-109.
- WANG T, CHEN Y B. Data augmentation for dynamic liquid surface modeling based on improved generative adversarial networks[J]. *Journal of Electronic Measurement and Instrumentation*, 2023, 37(2): 99-109.
- [13] 薛小东, 王涛. 延长油田油井动液面综合检测技术研究[J]. *能源与环保*, 2021, 43(11): 103-107.
- XUE X D, WANG T. Research on comprehensive testing technology of oil wells moving liquid level in Yanchang Oilfield[J]. *China Energy and Environmental Protection*, 2021, 43(11): 103-107.
- [14] 苟柱银, 刘毅石, 田新建, 等. 塔里木油田超深井压恢曲线异常分析及解决对策[J]. *油气井测试*, 2024, 33(5): 67-72.
- GOU ZH Y, LIU Y SH, TIAN X J, et al. Analysis and solution on abnormal pressure build-up curves of ultra-deep wells in Tarim oilfield[J]. *Oil and Gas Well Testing*, 2024, 33(5): 67-72.
- [15] 彭凯, 王昊, 齐京国. 基于连续液面曲线的间歇采油工作制度优化研究[J]. *油气藏评价与开发*, 2023, 13(2): 254-259.
- PENG K, WANG H, QI J G. Optimization of interval production working system based on continuous liquid level curve[J]. *Oil and Gas Reservoir Evaluation and Development*, 2023, 13(2): 254-259.
- [16] 赵怀军, 常文婷, 张燕, 等. 游梁式抽油机冲次软测量方法研究[J]. *仪器仪表学报*, 2017, 38(12): 2972-2979.
- ZHAO H J, CHANG W T, ZHANG Y, et al. Soft-sensing method of beam pumping unit strokes per minute[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2017, 38(12): 2972-2979.
- [17] 赵怀军, 贺可可, 胡定兴, 等. 游梁式抽油机悬点载荷软测量方法的研究[J]. *仪器仪表学报*, 2021, 42(9): 160-171.
- ZHAO H J, HE K K, HU D X, et al. Research on the soft-sensing method of polished rod load of beam pumping unit[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2021, 42(9): 160-171.
- [18] 刘天巍. 偏心连杆平衡抽油机曲柄轴转矩多目标动力学 ADAMS 仿真[J]. *制造业自动化*, 2024, 46(12): 143-149.

LIU T W. ADAMS simulation of multi-objective dynamics of crank shaft torque of eccentric connecting rod balanced pumping unit [J]. *Manufacturing Automation*, 2024, 46(12): 143-149.

- [19] 徐永明, 金磊, 艾萌萌, 等. 低速大扭矩永磁同步电动机的转矩提升[J]. *电机与控制学报*, 2022, 26(12): 116-127.

XU Y M, JIN L, AI M M, et al. Torque enhancement of low-speed and high-torque permanent magnet synchronous motor [J]. *Journal of Electric Machines and Control*, 2022, 26(12): 116-127.

- [20] 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 CH H, GAO X W. Modeling of oil production process in rod pump pumping wells [J]. *Journal of Shenyang University of Technology*, 2021, 40(1): 12-18.

- [21] 谢文敏, 陈燕, 邹章明, 等. 一种井筒液面位置准确识别与分析方法[J]. *油气井测试*, 2024, 33(4): 73-78.

XIE W M, CHEN Y, ZOU ZH M, et al. A method for accurate identification and analysis of liquid level position of wellbore [J]. *Well Testing*, 2024, 33(4): 73-78.

- [22] 谷瑀. 游梁式抽油机尾部随动平衡装置的应用与评价[J]. *石油石化节能与计量*, 2023, 13(12): 24-26.

GU Y. Application and evaluation of tail follow-up balancing device of beam pumping unit [J]. *Energy Conservation and Metering of Petroleum and Petrochemical Industry*, 2023, 13(12): 24-26.

作者简介



赵怀军, 1991年于中国计量大学获得学士学位, 1996年于西安理工大学获得硕士学位, 2007年于西北工业大学获得博士学位, 现为西安理工大学教授, 主要研究方向为仪器科学与技术, 自动化检测和控制。

E-mail: zhj0858@sohu.com

Zhao Huaijun received his B. Sc. degree from China Jiliang University in 1991, received his M. Sc. degree from Xi'an University of Technology in 1996, and received his Ph. D. degree from Northwestern Polytechnical University in 2007. He is currently a professor at Xi'an University of Technology. His main research interests include instrument science and technology, automated testing and control.



姬永晟, 2020年于西安理工大学获得学士学位, 现为西安理工大学硕士研究生, 主要研究方向仪器仪表工程。

E-mail: 1341727388@qq.com

Ji Yongsheng received his B. Sc. degree from Xi'an University of Technology in 2020.

He is currently a master student at Xi'an University of Technology. His main research interest is instrumentation engineering.



胡定兴(通信作者), 2013年于西安理工大学获得学士学位, 2016年于西安理工大学获得硕士学位, 现为西安华瑞网电科技股份有限公司部门经理, 主要研究方向仪器仪表工程。

E-mail: 1071656180@qq.com

Hu Dingxing (Corresponding author) received his B. Sc. degree from Xi'an University of Technology in 2013, received his M. Sc. degree from Xi'an University of Technology in 2016. At present, he is the department manager of Xi'an Hi-Rate Network Technology Co., Ltd. His main research interest is instrumentation engineering.



赵东升, 2012年于中国石油大学(华东)获得学士学位, 2016年于常州大学获得硕士学位, 现为中石油长庆油田分公司发展计划部设计管理科副科长, 主要研究方向是鄂尔多斯盆地油气田地面工艺技术应用。

E-mail: 2260888017@qq.com

Zhao Dongsheng received his B. Sc. degree from China University of Petroleum (East China) in 2012, received his M. Sc. degree from Changzhou University in 2016. He is currently the deputy chief of the design management section of the Development Planning Department of Petro China Changqing Oilfield Branch. His main research interest is the application of surface process technology in oil and gas fields in the ordos basin.



聂小兵, 2023年于西安理工大学获得学士学位, 现为西安理工大学硕士研究生, 主要研究方向仪器仪表工程。

E-mail: 3302135162@qq.com

Nie Xiaobing received his B. Sc. degree from Xi'an University of Technology in 2023. He is currently a master student at Xi'an University of Technology. His main research interest is instrumentation engineering.