

# 游梁式抽油机冲次软测量方法研究\*

赵怀军, 常文婷, 张 燕, 朱凌建

(西安理工大学机械与精密仪器工程学院 西安 710048)

**摘要:**游梁式抽油机冲次是影响抽油机系统运行工况的重要参数,实时精确地测量抽油机冲次是调控及优化抽油机系统效率的基础。针对现有公式法和传感器法测量冲次,存在准确性易受实际运行条件和野外环境影响、需额外增设测量器件、故障率较高等缺陷,提出一种基于自相关理论的抽油机冲次软测量方法。即建立冲次与悬点载荷函数、驱动电机输入电功率函数的周期关联关系模型,通过采集驱动电动机输入电流、电压计算实时输入电功率,利用周期信号自相关函数与原函数同周期、噪声信号自相关函数在原点集中的特性,对输入电功率函数进行自相关运算,经去除干扰后获得电功率函数周期,依据输入电功率函数周期与抽油机冲程周期、抽油机冲次的关联关系计算得到抽油机冲次,从而在不增加外设条件下实现对抽油机冲次的软测量。仿真以及某大型油田采油六大队现场试验表明,该方法实用有效、抗扰性高、测量误差不超过1%。

**关键词:**游梁式抽油机;冲次;软测量技术;自相关理论

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 beam pumping unit strokes per minute

Zhao Huaijun, Chang Wenting, Zhang Yan, Zhu Lingjian

(School of Mechanical and Precision Instrument Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China)

**Abstract:** Strokes per minute (SPM) is one of the important parameters in beam pumping unit operation condition. Realtime accurate measurement of SPM is the basic principle to enhance the pump efficiency substantially. In view of the traditional methods by the formula calculating and sensor measuring, many problems of the additional measurement components, the high malfunction ratio, the difficulties of repairing and the accuracy influenced in the field operating conditions need to be considered. A soft-sensing approach for beam pumping unit SPM based on autocorrelation algorithm is proposed. The periodic correlated model is formulated among the SPM, load function and the driving motor input power function. The realtime input power is derived according to the driving motor input current and voltage. There are two kinds of features on the autocorrelation function. One is the periodic signal autocorrelation function period which is the same as input power function. The other is the noise signal autocorrelation function concentrated on the origin. On account of these two features, the input power function period can be identified accurately after interfering removed by the autocorrelation processing. Furthermore, the SPM is calculated according to the relationship between the SPM and the period of the electric power function. The beam pumping unit SPM soft-sensing is realized accurately without additional peripherals. Simulation and an oilfield test results show that the proposed approach is practical and effective, high anti-interference, and the measurement error is less than 1%.

**Keywords:** beam pumping unit; stroke per minute; soft-sensing technology; periodic signal autocorrelation theory

## 0 引 言

游梁式抽油机是国内外油田应用最广泛的采油设备,其冲次 $N_c$ 被定义为抽油杆每分钟上下往复的次数,

主要用以表征抽油机系统在工作中的实际抽汲频率和效率<sup>[1-2]</sup>。在线对抽油机冲次进行实时准确测量,是有效调控抽油机抽汲过程与不断变化的油井供液能力保持同步匹配的基础及前提<sup>[3]</sup>,从而达到提升油井泵效与抽油机系统效率、延长抽油杆泵与油管使用寿命、减少电能浪费

与油液产量损失。目前抽油机冲次的测量方法主要有公式法和传感器法。公式法的原理是依照冲次公式  $N_c = \frac{n_m}{i} \times \frac{d}{D}$  进行理论计算<sup>[4]</sup>, 其中  $n_m$  为抽油机驱动电动机的转速、 $d$  为电动机皮带轮的直径、 $D$  为减速器皮带轮的直径、 $i$  为减速器的减速/传动比。但在实际应用过程中, 受电动机转速时变性、电动机可能运行在发电状态、皮带传动存在打滑现象等因素的制约, 采用公式法难以准确在线实时获知抽油机实际运行冲次。传感器法是采用在抽油机系统外部装设相应传感器的方法进行抽油机冲次测量<sup>[5]</sup>。Lv H. Q. 等人<sup>[6]</sup> 研究通过利用变频器附带的定时器/计数器配合光电编码器的输出脉冲信号来测量电动机转速, 进而转换得到实际抽油机冲次; 于云华等人<sup>[7]</sup> 利用速度传感器采集速度信号, 通过求解两个速度最大值之间的时间间隔先获得冲程周期, 再依据冲程周期与冲次之间的倒数关系变换获得抽油机冲次; 梅云等人<sup>[8]</sup> 在抽油机游梁上装设角位移传感器, 通过采用特殊形状的转子和线圈模拟线性位移, 转子轴的旋转运动产生线性输出信号得到抽油机冲次; 吴金宏等人<sup>[9]</sup> 在抽油机系统上装设光电开关传感器, 即在抽油机基架的一侧装设一点光源, 另一侧(或同侧)装设接收光源的光电开关, 抽油机工作时其游梁或驴头上下移位遮挡(或反射)光源光束导致光电开关开、闭状态发生改变, 通过监测此开、闭状态发生改变的频次实现对抽油机冲次的测量。显然, 传感器法存在需额外增设测量元器件、准确性和精度受野外环境影响大、外置传感器及其传输线防护等级要求高且在抽油机运动振动及日常检修中极易损坏等缺陷<sup>[10-12]</sup>。

本文通过分析游梁式抽油机系统运动规律和能量流通机理, 建立抽油机冲次与其悬点载荷函数周期、驱动电动机输入电功率函数周期之间的关联关系模型, 提出一种利用测量驱动电动机输入电功率函数周期间接测量抽油机冲次的软测量方法。考虑实际测量驱动电动机输入电功率的信号中含有电网波动、油杆振动、卡泵、油井故障等因素产生的噪声<sup>[13]</sup>, 利用周期信号自相关函数与原函数同周期、噪声信号自相关函数在原点集中的特性<sup>[14-16]</sup>, 对输入电功率函数做自相关运算去除干扰后获得其周期, 进一步利用输入电功率函数周期与抽油机冲程周期、抽油机冲次的关联关系, 经过计算变换最终得到抽油机冲次。此方法无须再额外增加传感器和其他元部件, 易于工程实现且抗干扰性好、测量精度高。

## 1 抽油机冲次软测量方法理论

游梁式抽油机系统能量流通机理如下所述, 输入电能经过驱动电动机模块、减速器模块将能量传递给四连杆机构, 将电动机圆周运动转化为抽油杆上、下周期性往

复直线运动, 悬点载荷也在抽油杆往复运动中以冲程周期  $T$  为周期变化。忽略各个模块能量传递损失时, 电动机的输入电能就转换成对悬点载荷的周期性做功。本节建立抽油机冲次与其悬点载荷函数周期、驱动电机输入功率函数周期之间的关联关系模型。

### 1.1 抽油机悬点载荷函数周期与冲次的关联关系

抽油机悬点载荷  $W$  俗称驴头悬点载荷, 包括抽油杆在油液中的重量、油管内油柱重量、振动载荷、惯性载荷以及抽油机运行引起的井下摩擦力<sup>[17-18]</sup>。忽略抽油杆振动、井下摩擦力的影响, 悬点载荷理想计算模型分为静、动载荷, 如式(1)所示。

$$\begin{cases} P_{s-up} = P_{bar}^* + P_{oil}^* \\ P_{s-down} = P_{bar}^* \\ P_{d-up} = (m_{bar} + m_{oil}) a_c \\ P_{d-down} = m_{bar} a_c \end{cases} \leftarrow \begin{cases} P_{bar}^* = S_{bar} L_c (\rho_{bar} - \rho_{oil}) g \\ P_{oil}^* = (S_{oil} - S_{bar}) h_{oil} \rho_{oil} g \\ m_{bar} = S_{bar} L_c \rho_{bar} \\ m_{oil} = (S_{oil} - S_{bar}) L_c \rho_{oil} \end{cases} \quad (1)$$

式中:  $P_{s-up}$  为悬点在上冲程中所受静载荷,  $P_{bar}^*$  为抽油杆在油液中自重,  $P_{oil}^*$  为油管内油柱自重,  $P_{s-down}$  为悬点在下冲程中所受静载荷,  $P_{d-up}$  为悬点在上冲程中所受动载荷,  $m_{bar}$  为抽油杆质量,  $m_{oil}$  为油液质量,  $a_c$  为驴头悬点加速度,  $P_{d-down}$  为悬点在下冲程中所受动载荷,  $S_{bar}$  为抽油杆截面积,  $L_c$  为井下参数泵深,  $\rho_{bar}$  为抽油杆密度,  $\rho_{oil}$  为油液密度,  $g$  为重力加速度常数,  $S_{oil}$  油管截面积,  $h_{oil}$  为动液面深度。

由式(1)分析可知, 驴头悬点在上冲程所受静载荷  $P_{s-up}$  由抽油杆在油液中自重  $P_{bar}^*$  及油管内油柱自重  $P_{oil}^*$  构成, 且这两者均为常量, 下冲程中所受静载荷  $P_{s-down}$  只与抽油杆在油液中自重  $P_{bar}^*$  有关且为常量, 因此在抽油机往复运动中驴头悬点所受静载荷在两个常量  $P_{s-up}$  和  $P_{s-down}$  之间循环变化, 具有周期性。

驴头悬点所受动载荷与游梁式抽油机四连杆机构的运行参数相关, 结构示意图如图 1 所示。其中  $R$  为曲柄、 $P$  为连接杆、 $C$  为游梁后臂、 $A$  为游梁前臂、 $K$  为极距、 $J$  为曲柄销轴承中心到游梁支撑中心的距离、 $I$  为基杆投影、 $H$  为游梁支撑点距齿轮箱中心高、曲柄角  $\theta$  从 12 点钟位置算起顺时针方向为正, 驴头悬点运动方向垂直向上取为正。则曲柄  $R$  的转角  $\theta$  与悬点位移  $S_c$  关系可表示为:

$$\begin{aligned} S_c = & A \left\{ \arccos \left[ \frac{C^2 + K^2 - (R + P)^2}{2CK} \right] - \arccos \left( \frac{C^2 + J^2 - P^2}{2CJ} \right) + \right. \\ & \left. \arcsin \left[ \frac{R}{J} \sin \left( \theta - \arctan \frac{I}{H} \right) \right] \right\} \quad (2) \end{aligned}$$

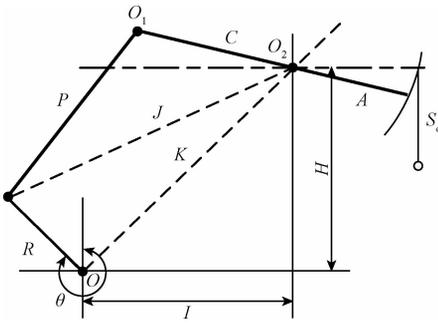


图1 四连杆结构示意图

Fig.1 Four-link structure diagram

在分析抽油机悬点的运动规律时,可用一种简化方式,即将抽油机  $O_1$  点绕游梁支点的弧线运动近似的看作直线运动,抽油机  $O_1$  的运动可视为曲柄滑块机构,故式(2)可简化成为:

$$S_c = \frac{A}{C}R \left[ (1 - \cos\theta) + \left( \frac{R}{2(P+C)} \right) \sin^2\theta \right] \quad (3)$$

对悬点位移  $S_c$  求二阶导数,得到悬点加速度为:

$$a_c = \frac{A}{C}R\omega^2 \left[ \cos\theta + \left( \frac{R}{P+C} \right) \cos 2\theta \right] \quad (4)$$

在式(3)中,因  $A, C, R, P$  均为常量,曲柄  $R$  转角  $\theta$  是周期性的变化量,所以悬点位移  $S_c$  就随着曲柄  $R$  转角  $\theta$  成周期性变化,同理悬点加速度  $a_c$  也随着曲柄  $R$  转角  $\theta$  成周期性变化。同时将悬点位移和悬点加速度绘制成曲线如图2所示,从图2中可看出,抽油机运行时悬点位移和加速度都随曲柄角  $\theta$  呈周期性变化。

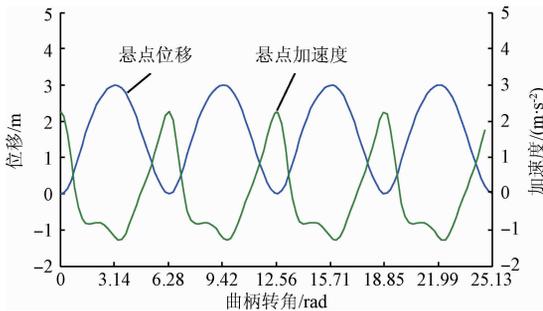


图2 悬点位移和悬点加速度曲线

Fig.2 Polished rod displacement and acceleration curve

将  $a_c$  代入式(1)分析可知,悬点所受动载荷  $P_{d-up}$  和  $P_{d-down}$  也因  $a_c$  具有的周期性而存在同步周期性,因此在抽油机往复运动中驴头悬点所受动载荷分别在两对常量  $m_{bar} a_{cmax} \sim m_{bar} a_{cmax}$  和  $(m_{bar} + m_{oil}) a_{cmin} \sim (m_{bar} + m_{oil}) a_{cmax}$  之间循环变化,也具有周期性,其中  $a_{cmin}$  和  $a_{cmax}$  为悬点加速度的最小、最大值。

综合上述对驴头悬点静、动载荷的分析结果说明,在抽油机周期性往复直线式运动中,其悬点载荷  $W$  以相同

的周期同步循环变化,即抽油机悬点载荷函数  $W$  周期直接与抽油机往复直线式运动的周期—冲程周期相同。

## 1.2 悬点载荷函数周期与驱动电动机输入电功率函数周期的关联关系

游梁式抽油机驱动电动机一般采用三相异步电动机,在其稳定运行时<sup>[19-20]</sup>,设电动机输入平均有功电功率真值为  $P_s$ ,则输出平均有功功率为  $P_2$ 、输出轴转矩  $M_d$  分别为:

$$P_2 = \eta P_s \quad (5)$$

$$M_d = \frac{P_2}{\omega} = \frac{30P_2}{n_m \pi} = \frac{30\eta P_s}{n_m \pi} \quad (6)$$

式中:  $\eta$  为电动机效率。

将电动机的输出轴转矩  $M_d$  等效到曲柄上,等效驱动力矩  $M_{ed}$  为:

$$M_{ed} = i M_d \eta_m^n = \frac{30i\eta\eta_m^n P_s}{n_m \pi} \quad (7)$$

式中:  $\eta_m$  为电动机到曲柄轴的传动效率、 $n$  为指数 ( $M_d > 0, n = 1$ ;  $M_d < 0$  时  $n = -1$ )。

由驴头悬点载荷  $W$ 、结构不平衡配重  $B$  在曲柄轴上造成的扭矩  $T_n$  为:

$$T_n = \eta_b^k (W - B) \overline{TF} - M \sin(\theta + \tau) \quad (8)$$

式中:  $\eta_b$  为铰链四连杆机构效率,  $M$  为最大平衡扭矩,  $\tau$  为平衡相位角(取  $0^\circ$ ),  $\overline{TF}$  为扭矩因数(由四连杆机构参数计算,随着曲柄  $R$  转角  $\theta$  成周期性变化),  $k$  为指数 ( $\overline{TF} > 0, k = -1; \overline{TF} < 0, k = 1$ )。

游梁式抽油机正常工作时,悬点载荷  $W$ 、结构不平衡配重  $B$  在曲柄轴上的扭矩  $T_n$  与电动机输出给曲柄等效驱动力矩  $M_{ed}$  应平衡,即有:

$$T_n = M_{ed} \quad (9)$$

将式(7)、(8)代入式(9)中得到:

$$\frac{30i\eta\eta_m^n P_s}{n_m \pi} = \eta_b^k (W - B) \overline{TF} - M \sin(\theta + \tau) \quad (10)$$

整理式(10)后得到:

$$P_s = \left[ \eta_b^k (W - B) \overline{TF} - M \sin(\theta + \tau) \right] \frac{n_m \pi}{30i\eta\eta_m^n} \quad (11)$$

式中:悬点载荷  $W$ 、扭矩因素  $\alpha, M \sin(\theta + \tau)$  都是以曲柄  $R$  转角  $\theta$  为变化量的周期函数,有  $W = W(\theta) = W(\theta + 2\pi S)$ 、 $\overline{TF} = \overline{TF}(\theta) = \overline{TF}(\theta + 2\pi S)$ 、 $M \sin(\theta + \tau) = M \sin(\theta + \tau + 2\pi S)$ ,  $S$  为正整数;电动机效率  $\eta$ 、电动机到曲柄轴的传动效率  $\eta_m$ 、铰链四连杆机构效率  $\eta_b$ 、 $i, n_m$  在理想状态下为常数。因此上式(11)可写为:

$$P_s = P_s(\theta) = \left\{ \eta_b^k [W(\theta) - B] \overline{TF}(\theta) - M \sin(\theta + \tau) \right\} \frac{n_m \pi}{30i\eta\eta_m^n} = P_s(\theta + 2\pi S) \quad (12)$$

式(12)表明游梁式抽油机驱动电动机输入电功率与悬点载荷一样,都是以曲柄  $R$  转角  $\theta$  为变化量的同周

期函数。在上面 1.1 节中已经分析知道抽油机悬点载荷函数  $W$  又与抽油机冲程同周期,故只要求出电动机输入电功率函数的周期就能得到抽油机冲程周期,依据冲程周期与冲次之间的倒数关系继以获得抽油机冲次。

## 2 基于自相关理论的驱动电动机输入电功率函数周期辨识

### 2.1 驱动电动机实时输入电功率的计算

油田配电系统中含有大量非线性负载,电网畸变不可避免,为准确获得电动机输入平均有功电功率,应用三相瞬时无功理论  $i_p-i_q$  算法计算<sup>[21-22]</sup>,如图 3 所示。

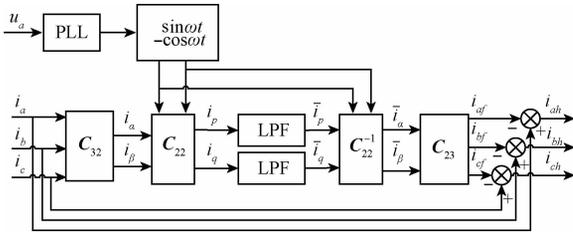


图 3 三相瞬时无功理论  $i_p-i_q$  算法原理

Fig. 3 The schematic of three-phase instantaneous reactive power theory  $i_p-i_q$  algorithm

$$\text{图 3 中, } C_{23} = C_{32}^T, C_{32} = \sqrt{2/3} \begin{bmatrix} 1 & -1/2 & -1/2 \\ 0 & \sqrt{3}/2 & -\sqrt{3}/2 \end{bmatrix},$$

$$C_{22} = \begin{bmatrix} \sin \omega t & -\cos \omega t \\ -\cos \omega t & -\sin \omega t \end{bmatrix} = C_{22}^{-1}, PLL, LPF \text{ 为由软件实现的锁相环和数字低通滤波器, } u_a \text{ 为电动机 } a \text{ 相瞬时电压值, } i_a, i_b, i_c \text{ 为各相瞬时电流, } i_\alpha, i_\beta, i_p, i_q, \bar{i}_p, \bar{i}_q, \bar{i}_\alpha, \bar{i}_\beta \text{ 均可视为中间变量, } i_{af}, i_{bf}, i_{cf} \text{ 为计算得出的各相瞬时电流基波分量, } i_{ah}, i_{bh}, i_{ch} \text{ 为求得的各相瞬时电流谐波分量。}$$

采集  $u_a$  和  $i_a, i_b, i_c$ , 通过  $i_p-i_q$  算法计算得到  $i_{af}, i_{bf}, i_{cf}$ , 与各相瞬时电压之积求得不含谐波的合相瞬时有功功率  $p_1$ , 再由平均有功功率定义计算获得电动机输入平均有功电功率测量值  $P_x$ 。

采集  $u_a$  和  $i_a, i_b, i_c$ , 通过  $i_p-i_q$  算法计算得到  $i_{af}, i_{bf}, i_{cf}$ , 与各相瞬时电压之积求得不含谐波的合相瞬时有功功率  $p_1$ , 再由平均有功功率定义计算获得电动机输入平均有功电功率测量值  $P_x$ 。

### 2.2 基于自相关理论的驱动电动机输入电功率函数周期辨识

在抽油机工作过程中,由于电网波动、油杆振动、卡泵、油井故障等干扰因素的影响,在实际获得的电动机输入平均有功电功率测量值  $P_x$  中含有丰富的噪声,致使其周期辨识困难。

设电动机输入平均有功电功率测量值  $P_x$  在一个完

整的冲程周期内采样值分别为  $P_x(m)$  ( $m$  为正整数,  $m = 1, 2, 3, \dots$ ), 则  $P_x(m)$  可以表示为:

$$P_x(m) = P_s(m) + P_u(m) \quad (13)$$

式中:  $P_s(m), P_u(m)$  ( $m$  为正整数,  $m = 1, 2, 3, \dots$ ) 分别为一个完整的冲程周期内电动机输入平均有功功率真值  $P_s$  和噪声  $P_u$  相应的采样值。

前面分析已知  $P_s$  是周期函数, 设其周期为  $L, P_x(m)$  的长度为  $N$ , 且  $N \gg L, l$  是采样窗口间隔长度, 那么  $P_x(m)$  的自相关函数  $r_x(l)$  为:

$$r_x(l) = \frac{1}{N} \sum_{m=0}^{N-1} [P_s(m) + P_u(m)] \cdot [P_s(m+l) + P_u(m+l)] = r_s(l) + r_{su}(l) + r_{us}(l) + r_u(l) \quad (14)$$

式中:  $r_{su}(l), r_{us}(l)$  为  $P_s(m), P_u(m)$  的互相关函数。  $P_u(m)$  具有随机性可视为白噪声, 与功率信号  $P_s(m)$  无相关性, 因此  $r_{su}(l)$  和  $r_{us}(l)$  这两项幅值很小;  $r_u(l)$  是噪声  $P_u(m)$  的自相关函数, 由白噪声信号自相关函数在原点集中的特性可知,  $r_u(l)$  幅值集中并主要在  $l = 0$  取得, 当  $|L| > 0$  时衰减很快;  $P_s(m)$  是以  $L$  为周期的周期信号, 因周期信号自相关函数与原函数同周期, 所以  $r_s(l)$  也应是周期的, 且周期为  $L$ <sup>[23]</sup>。这样  $r_x(l)$  也将呈现周期性变化, 并在  $L = 0, L, 2L, \dots$  处呈现峰值, 求得  $r_x(l)$  的周期, 即可获得  $P_x(m)$  中  $P_s(m)$  的周期大小。

## 3 仿真研究

在理论分析计算的基础上, 利用 MATLAB 对第 1 节中建立的抽油机冲次与其悬点载荷函数、驱动电机输入功率函数周期的关联关系模型及第 2 节中基于自相关理论的驱动电动机输入电功率函数周期辨识方法进行仿真验证。游梁式抽油机仿真参数如下: 曲柄  $R = 1.15$  m、连接杆  $P = 3.35$  m、游梁后臂  $C = 2.4$  m、游梁前臂  $A = 3$  m、基杆投影  $I = 2.3$  m、游梁支撑点距齿轮箱中心高  $H = 3.27$  m、结构不平衡块  $B = 0$ ; 井下参数泵深  $L_c = 940$  m、动液面  $h_{oil} = 300$  m、抽油杆截面积  $2.83 \text{ mm}^2$ 、油管截面积  $24.63 \text{ mm}^2$ 。

1) 根据井下动液面深度  $h_{oil}$  及四连杆机构参数计算得到悬点加速度  $a_c$ , 结合式(1)得到上、下冲程过程中悬点载荷变化情况如图 4 所示, 运行过程中加入随机扰动时悬点载荷变化情况如图 5 所示。

2) 结合式(1)、(12) 计算得到悬点载荷对应的电动机输入平均电功率函数变化曲线, 如图 6 所示。

3) 将电动机输入电功率进行自相关运算去噪后功率函数变化曲线图, 如图 7 所示。

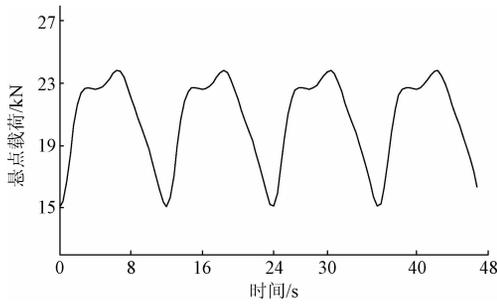


图4 悬点载荷函数变化曲线

Fig. 4 Polished rod load function curve

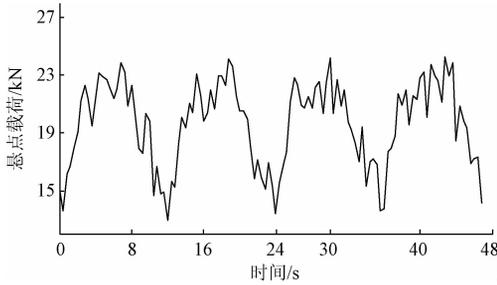


图5 加入随机扰动时悬点载荷函数变化曲线

Fig. 5 The curve of the polished rod load function with random disturbance

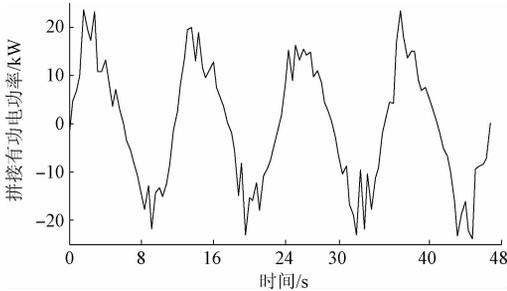


图6 电动机输入平均有功电功率变化曲线

Fig. 6 Motor input average active power change curve

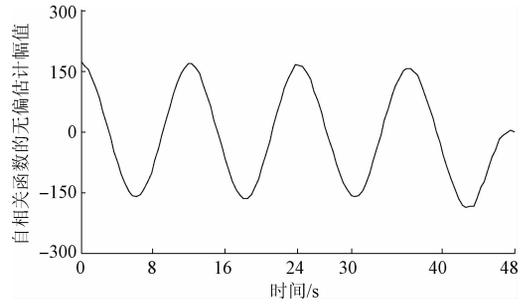


图7 电动机输入平均有功电功率自相关函数曲线

Fig. 7 The motor input power autocorrelation function curve

图4、5表明,在抽油机周期性往复直线式运动中,其悬点载荷  $W$  以相同的周期同步循环变化,即抽油机悬点载荷函数  $W$  周期直接与抽油机往复直线式运动的周期—冲程周期相同。

图6表明,在抽油机周期性往复直线式运动中,电动机输入平均电功率与悬点载荷  $W$  也以相同的周期同步循环变化。

图7表明,含有噪声的电动机输入平均有功电功率  $P_x$  经自相关运算处理后,其自相关函数与原函数同周期,且能有效去除干扰、减小周期的测量误差。由图7进一步看出,本仿真游梁式抽油机的冲程周期为 11.93 s,通过计算得出冲程周期为 12.02 s。

## 4 实验研究

### 4.1 游梁式抽油机冲次软测量智能测控平台实现研究

游梁式抽油机冲次软测量智能测控平台硬件结构如图8所示,包括驱动电动机电参量采集模块、驱动电动机电参量处理模块、输出执行模块3大模块。

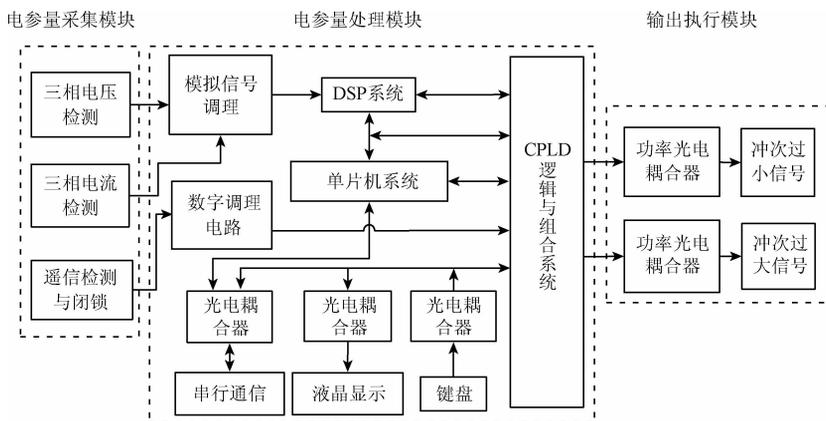


图8 游梁式抽油机冲次软测量智能测控平台结构

Fig. 8 The structure of intelligent measurement and control platform for soft measurement of SPM of beam pumping unit

工作时,驱动电动机电参量采集单元利用电压、电流互感器采集实时三相瞬时电压( $u_a$ 、 $u_b$ 、 $u_c$ )和三相电流值( $i_a$ 、 $i_b$ 、 $i_c$ ),经信号调理电路滤波、数字化后传输给驱动电动机电参量处理模块;驱动电动机电参量处理模块由单片机、DSP 和 CPLD 逻辑与组合单元组成,主要完成三相瞬时无功理论  $i_p$ - $i_q$  算法计算、平均电功率离散点的自相关处理、驱动电动机输入平均电功率函数的周期计算、抽油机冲次的计算等;输出执行单元根据最终计算得到的冲次大小发出相应的过大或者过小调控信号。抽油机冲次软测量自相关处理子程序工作流程如图 9 所示。

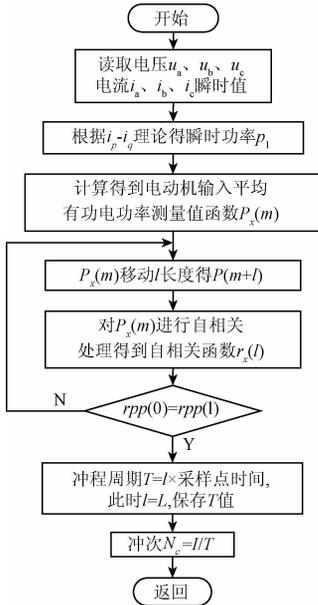


图 9 游梁式抽油机冲次软测量自相关处理子程序流程

Fig. 9 Flow chart of arutocorrelation processing for soft measurement of beam pumping unit SPM

#### 4.2 游梁式抽油机软测量工程现场试验与结果分析

在某大型油田采油六大队杏 6025-2、杏 6025-5 油井上,对上述游梁式抽油机冲次软测量方法和平台进行了试验,结果如图 10~13 所示。

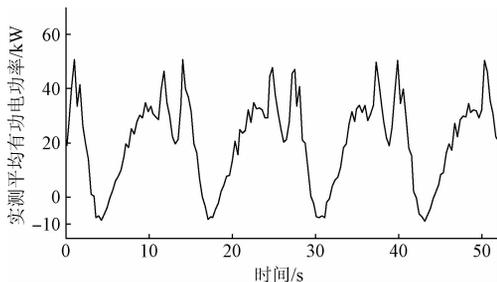


图 10 杏 6025-2 实测电动机平均有功电功率测量值曲线

Fig. 10 The actual measured average active power value of motor of X6025-2

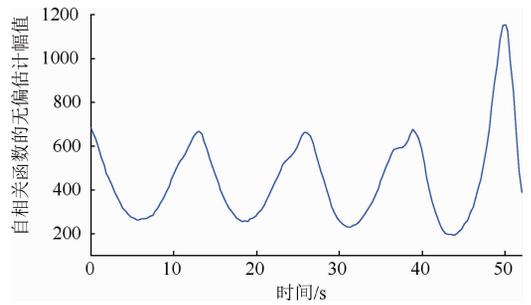


图 11 杏 6025-2 电动机平均有功电功率自相关函数曲线

Fig. 11 X6025-2 motor average active power autocorrelation function curve

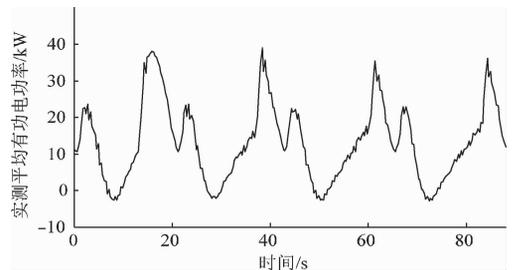


图 12 杏 6025-5 实测电动机平均有功电功率测量值曲线

Fig. 12 The actual measured average active power value of motor of X6025-5

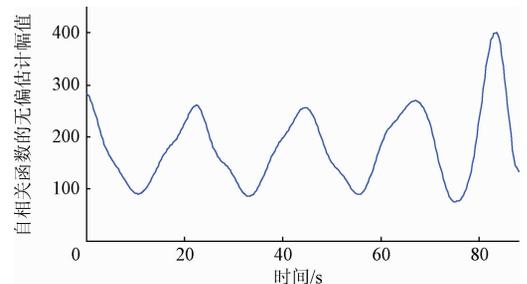


图 13 杏 6025-5 电动机平均有功电功率自相关函数曲线

Fig. 13 X6025-5 motor average active power autocorrelation function curve

图 10 所示为通过平台实际采集的杏 6025-2 油井的实测电动机平均有功电功率测量值曲线,图 11 所示为对应的电动机平均有功电功率自相关函数曲线;图 12 所示为通过平台实际采集的杏 6025-5 油井的实测电动机平均有功电功率测量值曲线,图 13 所示为对应的电动机平均有功电功率自相关函数曲线。

显然,在图 10、12 中,由于电网波动、油杆振动、卡泵、油井故障等干扰因素的影响导致电动机输入平均有功电功率周期无法精确识别;对实测的输入平均有功电

功率曲线进行自相关处理之后得到的图 11、13 中,噪声得到了有效抑制,曲线周期易精准判别。对图 11、13 的曲线分析计算后可得其周期分别为 13.00、22.01 s,经计算得到杏 6025-2、杏 6025-5 抽油机实际运行冲次分别为 4.62、2.73  $\text{min}^{-1}$ 。

为了验证上述测量值的准确性,在杏 6025-2、杏 6025-5 抽油机上同时分别装设角位移传感器以获取对比数据,具体测量数据及误差分析如表 1 所示。

表 1 试验测量数据与误差分析

Table 1 Test measurement data and error analysis

测试井号	冲程	软测量	标准	误差/%
	周期/s	冲次/ $\text{min}^{-1}$	冲次/ $\text{min}^{-1}$	
杏 6025-2	13.00	4.62	4.64	0.4
杏 6025-5	22.01	2.73	2.75	0.7

由表 1 看出,利用测量驱动电动机输入电功率函数周期间接测量抽油机冲次的软测量方法测量精度高、误差不超过 1%,满足油田现场的生产要求,且无须再额外增加传感器和其他元部件、易于工程实现、抗干扰性好。

## 5 结 论

通过游梁式抽油机系统能量流通机理的分析得出游梁式抽油机冲程周期、悬点载荷周期、电动机输入功率周期三者具有同周期性,提出利用测量电动机输入电功率函数周期的方法可以实现对抽油机冲次的软测量。

对实测电动机输入电功率信号函数进行自相关处理后能有效减小噪声对输入电功率信号函数周期辨识准确性的影响。

仿真和某大型油田采油六大队现场试验结果表明了上述方法的正确性和可行性,且测量精度高、误差不超过 1%,满足油田现场的生产要求、易于工程实现。

## 参考文献

- [1] 王强,黄健勇,张春辉. 抽油机冲次自动调节技术研究与应用[J]. 化工管理, 2015(13): 176.  
WANG Q, HUANG J Y, ZHANG CH H. Research and application of automatic adjustment technique for Strokes per minute of pumping unit [J]. Chemical Enterprise Management, 2015(13): 176.
- [2] 董世民,李伟成,侯田博文,等. 变频游梁式抽油系统运行参数的优化设计与性能仿真[J]. 机械工程学报, 2016, 52(21): 63-70.  
DONG SH M, LI W CH, HOUTIAN B W, et al. Optimization design and performance simulation of operation parameters of variable frequency beam pumping system[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2016, 52(21): 63-70.
- [3] 王泰华,陈致富. 基于 PSO 自整定 PID 的塔架式抽油机调速系统研究[J]. 电子测量与仪器学报, 2014,

28(9): 998-1004.

WANG T H, CHENG ZH F. Research on speed control system for tower mounted pumping unit based on PSO self-adjusting PID control [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2014, 28(9): 998-1004.

- [4] 李俊朋,唐光辉,张杰,等. 游梁式抽油机冲次与电机转速、电机皮带轮直径关系式的推导[J]. 化工管理, 2015(2): 21.  
LI J P, TANG G H, ZHANG J, et al. Deduction of the relation among the stroke of the beam pumping unit, the motor speed and the diameter of the motor pulley [J]. Chemical Enterprise Management, 2015(2): 21.
- [5] 潘崢嵘,张岩,郭凯. 基于 MCGS 与 GPRS 的抽油机示功图的实现[J]. 电子测量技术, 2009, 32(5): 9-12.  
PAN ZH R, ZHANG Y, GUO K. Realization of oil pump indicator diagram based on the MCGS and GPRS[J]. Electronic Measurement Technology, 2009, 32(5): 9-12.
- [6] LV H, LIU J, HAN J, et al. An energy saving system for a beam pumping unit[J]. Sensors, 2016, 16(5): 685.
- [7] 于云华,张家珍,时海涛,等. 便携式油井示功图测试仪的研制[J]. 科学技术与工程, 2009, 9(15): 4451-4453.  
YU Y H, ZHANG J ZH, SHI H T, et al. Development of portable tester for indicator diagram of oil well [J]. Science Technology and Engineering, 2009, 9(15): 4451-4453.
- [8] 梅云,叶勇华. 常规抽油机信息化的改造[J]. 油气田地面工程, 2014(4): 3-4.  
MEI Y, YE Y H. Information transformation of conventional pumping unit [J]. Oil-Gasfield Surface Engineering, 2014(4): 3-4.
- [9] 吴金宏,张连中,刘丽娜. 光电开关及其应用[J]. 电子设计工程, 2001, 1(5): 14-18.  
WU J H, ZHANG L ZH, LIU L N. Photoelectric switches and its application [J]. International Electronic Elements, 2001, 1(5): 14-18.
- [10] 王通,高宪文,蔺雪,等. SWE-IPCA 方法在传感器故障诊断中的应用[J]. 仪器仪表学报, 2013, 34(8): 1841-1846.  
WANG T, GAO X W, LIN X, et al. Application of SWE-IPCA method in sensor fault diagnosis [J]. Chinese Journal of Scientific and Instrument, 2013, 34(8): 1841-1846.
- [11] 王通,段泽文,李琨. 基于改进 AdaBoost 的油井动液面自适应集成建模[J]. 电子测量与仪器学报, 2017, 31(8): 1342-1348.  
WANG T, DUAN Z W, LI K. Adaptive ensemble modeling for dynamic liquid level of oil well based on improved AdaBoost method [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2017, 31(8): 1342-1348.

- [12] 魏勇, 余厚全, 戴家才, 等. 基于 CPW 的油水两相流持水率检测方法研究[J]. 仪器仪表学报, 2017, 38(6): 1506-1515.  
WEI Y, YU H Q, DAI J C, et al. Water holdup measurement of oil-water two-phase flow based on CPW[J]. Chinese Journal of Scientific and Instrument, 2017, 38(6): 1506-1515.
- [13] 廖明栋, 范缜煜, 董福庆. 基于 DSP 的直流伺服电机驱动电路研究与分析[J]. 国外电子测量技术, 2013, 32(8): 77-80.  
LIAO M D, FAN ZH Y, DONG F Q. Research and analyse of driving circuit for DC servo motor on DSP[J]. Foreign Electronic Measurement Technology, 2013, 32(8): 77-80.
- [14] SAID A, DAVIZON Y A, ESPINO-ROMAN P, et al. Automatic frequency identification under sample loss in sinusoidal pulse width modulation signals using an iterative autocorrelation algorithm [J]. Symmetry, 2016, 8(8): 78.
- [15] 张同伟, 杨坤德, 马远良, 等. 一种基于单水听器宽带信号自相关函数的水下目标定位稳健方法[J]. 物理学报, 2015, 64(2): 280-286.  
ZHANG T W, YANG K D, MA Y L, et al. A robust localization method for source localization based on the auto-correlation function of wide-band signal [J]. Acta Physica Sinica, 2015, 64(2): 280-286.
- [16] 王辉, 赵静, 赵吉文, 等. 基于多峰拟合的直线电机动子位置精密测量方法[J]. 仪器仪表学报, 2017, 38(4): 935-943.  
WANG H, ZHAO J, ZHAO J W, et al. Ultra-precision position detection for linear motor mover based on multi-peak fitting[J]. Chinese Journal of Scientific and Instrument, 2017, 38(4): 935-943.
- [17] 孙振华, 田学民. 游梁式抽油机悬点载荷的动态响应分析[J]. 石油机械, 2008, 36(8): 39-42.  
SUN ZH H, TIAN X M. Dynamic response analysis of suspension beam load of beam pumping unit [J]. China Petroleum Machinery, 2008, 36(8): 39-42.
- [18] LIANG Y, WANG T, WANG X, et al. Simulation research on hydraulic hybrid assistant beam pumping unit[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part C Journal of Mechanical Engineering Science, 2016, 230(11): 1795-1804.
- [19] 王博, 赵海森, 李和明, 等. 用于模拟游梁式抽油机电动机动态负荷的测试系统设计及应用[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(21): 3488-3495.  
WANG B, ZHAO H S, LI H M, et al. Design and applications of the testing system with dynamic load for beam pumping motor[J]. Proceedings of the Chinese Society for Electrical Engineering, 2014, 34(21): 3488-3495.
- [20] 于洪霞, 胡静涛. 基于 EKF 的异步电机转速和负载转矩估计[J]. 仪器仪表学报, 2011, 32(2): 329-335.  
YU H X, HU J T. Speed and load torque of induction motor using extended kalman filter [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2011, 32(2): 329-335.
- [21] POPESCU M, BITOLEANU A, SURU V. Phase coordinate system and p-q theory based methods in active filtering implementation [J]. Advances in Electrical & Computer Engineering, 2013, 13(1): 69-74.
- [22] 陈兆岭, 刘国海, 杨晨星, 等. 提高谐波电流检测性能的 LMS/LMF 自适应滤波器 [J]. 仪器仪表学报, 2013, 34(5): 1036-1042.  
CHEN ZH L, LIU G H, YANG CH X, et al. LMS/LMF adaptive filter for harmonic current detection performance improvement [J]. Chinese Journal of Scientific and Instrument, 2013, 34(5): 1036-1042.
- [23] 常亮, 徐敬德, 崔慧娟, 等. 电话线质量语音的基音周期提取算法 [J]. 清华大学学报: 自然科学版, 2013(11): 1548-1552.  
CHANG L, XU J D, CUI H J, et al. Pitch extraction algorithm for telephone speech [J]. Journal of Tsinghua University: Science and Technology, 2013(11): 1548-1552.

### 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 年于西安工业大学获得博士学位, 现为西安理工大学副教授, 主要研究方向为仪器科学与技术、自动化检测和控制。  
E-mail: hi\_rate@163.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. Now he is an associate professor at Xi'an University of Technology. His main research interests include instrument science and technology, automated testing and control.



朱凌建(通讯作者), 分别在 2001 年和 2004 年于西安理工大学获得学士和硕士学位, 2015 年于西安交通大学获得博士学位, 现为西安理工大学副教授, 主要研究方向为测量、控制及智能信息处理方法与技术。  
E-mail: zlj\_zhy@126.com

**Zhu Lingjian** (Corresponding author) received his B.Sc. and M.Sc. degrees both from Xi'an University of Technology in 2001 and 2004, respectively, and received his Ph.D. degree from Xi'an Jiaotong University in 2015. Now he is an associate professor at Xi'an University of Technology. His main research interests include measurement, control, intelligent information processing and technology.