

引用格式:岑学齐,吴晓东,宋丽阳,等. 基于功率曲线法的游梁式抽油机曲柄平衡调整模型[J]. 科学技术与工程, 2018, 18(6): 128—132  
Cen Xueqi, Wu Xiaodong, Song Liyang, et al. Calculation model of balance adjustment using power curve for beam pumping unit[J]. Science Technology and Engineering, 2018, 18(6): 128—132

# 基于功率曲线法的游梁式抽油机曲柄平衡调整模型

岑学齐<sup>1,2</sup> 吴晓东<sup>2</sup> 宋丽阳<sup>1</sup> 陈瞰瞰<sup>1</sup> 刘佳宜<sup>1</sup>

(中国石油化工股份有限公司石油勘探开发研究院<sup>1</sup>,北京 100083;中国石油大学(北京)石油工程教育部重点实验室<sup>2</sup>,北京 102249)

**摘要** 近些年,游梁式抽油机电机功率测试越来越普及,如何利用功率曲线数据信息指导抽油机节能运行变得更加重要。以抽油机平衡准则为基础,开展了利用功率曲线数据进行曲柄平衡抽油机调平衡方法的研究。研究中,结合生产现场实际情况,利用电动机功率与传到曲柄轴上的扭矩的关系,建立了曲柄平衡块位置改变量与电机输出功率改变量的关系,依据不同的抽油机平衡准则,分别建立了峰值功率法曲柄平衡块调整量计算模型和均方根功率法曲柄平衡块调整量计算模型。计算表明,与平均功率法和峰值功率法相比,均方根功率法能耗最小,有利于进一步挖掘抽油机节能潜力。

**关键词** 曲柄平衡 平衡块 平衡准则 峰值功率 均方根功率

**中图分类号** TE933.1; **文献标志码** A

游梁式抽油机在中国石油开采中占有重要的地位,是陆地油田长期应用的传统抽油设备,其数量众多、耗电量大。抽油机节能安全运行是采油工作者一直追求的目标。为保障抽油机安全节能运转,抽油机调平衡是一项重要措施。随着功率曲线测试的普及,运用曲线法调平衡方法越来越实用可行<sup>[1-3]</sup>。

判断抽油机是否实现理想平衡的依据主要有三种:①抽油机电机上、下冲程对外做功相等;②悬点上、下冲程中减速箱曲柄轴峰值扭矩相等;③整个冲程中减速箱曲柄轴扭矩均方根值最小<sup>[4-10]</sup>。当曲柄角速度恒定时,功率法平衡判据可等价于:①抽油机电机上、下冲程输出功率平均值相等;②悬点上、下冲程中电机输出功率峰值相等;③整个冲程中电机输出功率均方根值最小。

吴晓东等<sup>[1]</sup>依据功率法平衡判据①,建立了平均功率法曲柄平衡抽油机调平衡模型。借鉴其建模思路,依据功率法平衡判据②、③,分别建立了峰值功率法和均方根功率法曲柄平衡抽油机调平衡模型,并从节能的角度对比三种方法的特点,以期更大程度地挖掘抽油机节能降耗的潜力。

## 1 数学模型

### 1.1 峰值功率法曲柄平衡块调整量计算

抽油机曲柄平衡块的运转会对曲柄轴做功(如图1所示),当曲柄轴运转的角速度为恒定时,曲柄平衡块对曲柄轴做功的功率为<sup>[1]</sup>

$$P_p = \omega n G_q R \sin(\omega t) \tag{1}$$

式(1)中,  $P_p$  为平衡块的平衡功率, kW;  $n$  为安装的曲柄平衡块的数目;  $G_q$  为单块曲柄平衡块的质量, kN;  $R$  为曲柄平衡块的重心半径, m;  $t$  为时间, s;  $\omega$  为曲柄角速度, rad/s。

式(1)适用条件是抽油机上安装的  $n$  个平衡块的质量都为  $G_q$ 。而现场生产中,存在同一抽油机中曲柄平衡块质量不相等、平衡块的重心半径不相等的情况。

考虑各个曲柄平衡块质量不都相等、各个平衡块的重心半径不都相等的情况,  $n$  个平衡块对曲柄轴做功的功率为<sup>[11-17]</sup>

$$P_p = \omega (G_{q1} R_1 + G_{q2} R_2 + \cdots + G_{qn} R_n) \sin(\omega t) \tag{2}$$

式(2)中,  $G_{q1}$ 、 $G_{q2}$ 、 $G_{qn}$  分别为第1、2、 $n$  块曲柄平衡块的质量, kN;  $R_1$ 、 $R_2$ 、 $R_n$  分别为第1、2、 $n$  块曲柄平衡块的重心半径, m。

曲柄平衡块重心位置调整后,曲柄平衡块的平衡功率也会随之改变<sup>[18]</sup>,其关系为

$$\Delta P_p = \omega (G_{q1} \Delta R_1 + G_{q2} \Delta R_2 + \cdots + G_{qn} \Delta R_n) \sin(\omega t) \tag{3}$$

式(3)中,  $\Delta P_p$  为平衡块位置调整后曲柄平衡块平

2017年7月10日收到 国家自然科学基金(50674096)和国家重大专项课题(2016ZX05053005-002)资助  
第一作者简介:岑学齐(1985—),湖北黄冈人,博士。研究方向:采油工程与理论技术。E-mail:cenxueqi2005@163.com。

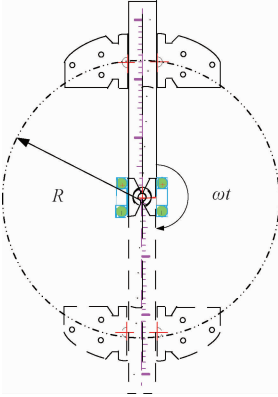


图1 抽油机曲柄运动示意图

Fig.1 Crank movement schematic for pumping units

衡功率的改变量,kW;  $\Delta R_1$ 、 $\Delta R_2$ 、 $\Delta R_n$  分别为第1、2、 $n$  块曲柄平衡块的重心半径调整量,m。

曲柄平衡块的平衡功率发生变化后,抽油机电机输出功率也会随之改变<sup>[1,18-21]</sup>,其关系为

$$\Delta P_p = -\Delta P \eta_2 \eta_3 \quad (4)$$

式(4)中,  $\Delta P$  为电机输出功率的变化值,kW;  $\eta_2$  为皮带效率,%;  $\eta_3$  为减速箱效率,%。

从功率曲线数据图(如图2所示)上可知,上、下冲程中抽油机电机输出功率都存在峰值点  $P_u$ 、 $P_d$ , 其对应的时刻分别为  $T_u$ 、 $T_d$  (抽油机驴头在左边为视角,曲柄轴顺时针转动,以曲柄轴位于“12 点钟位置”为0 时刻开始计时)。调平衡后,  $T_u$ 、 $T_d$  对应时刻电机输出功率分别为  $P'_u$  和  $P'_d$ 。结合式(3)和式(4),调平衡前后,电机输出功率变化关系为

$$P'_u = P_u + \Delta P_u = P_u - \frac{1}{\eta_2 \eta_3} \omega (G_{q1} \Delta R_1 + G_{q2} \Delta R_2 + \cdots + G_{qn} \Delta R_n) \sin(\omega T_u) \quad (5)$$

$$P'_d = P_d + \Delta P_d = P_d - \frac{1}{\eta_2 \eta_3} \omega (G_{q1} \Delta R_1 + G_{q2} \Delta R_2 + \cdots + G_{qn} \Delta R_n) \sin(\omega T_d) \quad (6)$$

依据功率法平衡判据②,即上、下冲程中电机输出峰值功率相等,需要满足:

$$P'_u = P'_d \quad (7)$$

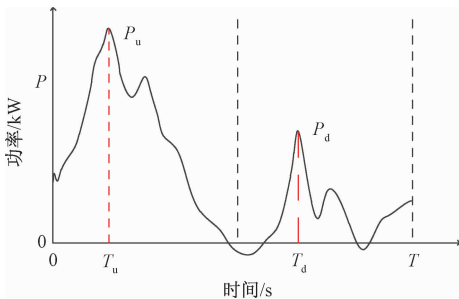


图2 抽油机电机功率曲线

Fig.2 Motor output curve for pumping units

结合式(5)~式(7),可得:

$$(G_{q1} \Delta R_1 + G_{q2} \Delta R_2 + \cdots + G_{qn} \Delta R_n) = \frac{(P_u - P_d) \eta_2 \eta_3}{\omega [\sin(\omega T_u) - \sin(\omega T_d)]} \quad (8)$$

$$\omega = \frac{2\pi}{T} = \frac{\pi}{30} N_s \quad (9)$$

式(9)中,  $T$  为抽油机运行一个冲程的时间,s;  $N_s$  为光杆冲次,  $\text{min}^{-1}$ 。

将式(9)代入式(8)中,有:

$$(G_{q1} \Delta R_1 + G_{q2} \Delta R_2 + \cdots + G_{qn} \Delta R_n) = \frac{30(P_u - P_d) \eta_2 \eta_3}{\pi N_s \left[ \sin\left(\frac{\pi}{30} N_s T_u\right) - \sin\left(\frac{\pi}{30} N_s T_d\right) \right]} \quad (10)$$

## 1.2 均方根功率法曲柄平衡块调整量计算

电机的均方根功率按照式(11)计算<sup>[2]</sup>:

$$P_t = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T [P(t)]^2 dt} \quad (11)$$

式(11)中,  $P_t$  为电机的均方根输出功率,kW;  $P(t)$  为电机瞬时输出功率,kW。

调整曲柄平衡块位置以后,电机瞬时输出功率发生改变,电机的均方根输出功率也发生改变:

$$P'_t = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T [P(t) + \Delta P]^2 dt} \quad (12)$$

式(12)中:  $P'_t$  为调平衡后电机的均方根输出功率,kW。

结合式(3)、式(4),式(12)变为

$$P'_t = \left\{ \frac{1}{T} \int_0^T \left[ P(t) - \frac{1}{\eta_2 \eta_3} \omega (G_{q1} \Delta R_1 + G_{q2} \Delta R_2 + \cdots + G_{qn} \Delta R_n) \sin(\omega t) \right]^2 dt \right\}^{\frac{1}{2}} \quad (13)$$

依据功率法平衡判据③,即整个冲程中电机输出功率均方根值最小,故要求  $P'_t$  最小。令:

$$\delta = \int_0^T \left[ P(t) - \frac{1}{\eta_2 \eta_3} \omega (G_{q1} \Delta R_1 + G_{q2} \Delta R_2 + \cdots + G_{qn} \Delta R_n) \sin(\omega t) \right]^2 dt \quad (14)$$

要使得  $P'_t$  最小,故要求  $\delta$  极小<sup>[22]</sup>。展开式(14),可得:

$$\delta = \int_0^T [P(t)]^2 dt + \int_0^T \left[ \frac{1}{\eta_2 \eta_3} \omega (G_{q1} \Delta R_1 + G_{q2} \Delta R_2 + \cdots + G_{qn} \Delta R_n) \sin(\omega t) \right]^2 dt - \int_0^T 2P(t) \frac{1}{\eta_2 \eta_3} \omega (G_{q1} \Delta R_1 + G_{q2} \Delta R_2 + \cdots + G_{qn} \Delta R_n) \sin(\omega t) dt \quad (15)$$

通过调节曲柄平衡块的位置,可使得  $\delta$  值极小。令:

$$\frac{d\delta}{d(G_{q1} \Delta R_1 + G_{q2} \Delta R_2 + \cdots + G_{qn} \Delta R_n)} = 0 \quad (16)$$

因为  $P(t)$ 、 $\sin(\omega t)$ 、 $\frac{1}{\eta_2\eta_3}\omega$  均非  $G_{q1}\Delta R_1 + G_{q2}\Delta R_2 + \cdots + G_{qn}\Delta R_n$  的函数,所以将式(15)代入式(16)中,并展开得:

$$(G_{q1}\Delta R_1 + G_{q2}\Delta R_2 + \cdots + G_{qn}\Delta R_n) \times \frac{\omega}{\eta_2\eta_3} \int_0^T [\sin(\omega t)]^2 dt - \int_0^T P(t) \sin(\omega t) dt = 0$$
$$\int_0^T [\sin(\omega t)]^2 dt = \frac{1}{2\omega} \int_0^T \frac{1 - \cos(2\omega t)}{2} d(2\omega t) = \frac{\pi}{\omega}$$

将式(18)代入式(17)中,可得:

$$(G_{q1}\Delta R_1 + G_{q2}\Delta R_2 + \cdots + G_{qn}\Delta R_n) = \frac{\eta_2\eta_3}{\pi} \int_0^T P(t) \sin(\omega t) dt$$

1.3 模型说明

上述峰值功率法调平衡模型和均方根功率法调平衡模型均不适合于变频调速电机驱动的抽油机。

调平衡公式式(10)和式(19)分别是峰值功率法和均方根功率法计算公式,公式适用性广,贴近现场情况,适用于:①抽油机曲柄平衡块质量不都相等的情况;②只调节其中几块曲柄平衡块的情况;③抽油机曲柄平衡块重心半径调整量不都相等的情况。但是,只适用于调整平衡块的位置的情况,不适用增减平衡块重量的情况。

如果每个曲柄平衡块重心半径调整量都相等  $\Delta R = \Delta R_1 = \Delta R_2 = \cdots = \Delta R_n$ , 每个曲柄平衡块重量都为  $G_q = G_{q1} = G_{q2} = \cdots = G_{qn}$ , 那么式(10)可化简为

$$\Delta R = \frac{30(P_u - P_d)\eta_2\eta_3}{n\pi G_q N_s \left[ \sin\left(\frac{\pi}{30} N_s T_u\right) - \sin\left(\frac{\pi}{30} N_s T_d\right) \right]}$$

同样,此种情况下,式(19)可简化为

$$\Delta R = \frac{\eta_2\eta_3}{n\pi G_q} \int_0^T P(t) \sin(\omega t) dt$$

式(20)、式(21)形式较为简单,但相对于式(10)、式(19)范围较窄,仅适用于抽油机曲柄平衡块重量相等,并且每个平衡块调整重心半径相等的情况。可根据现场实际情况选择计算公式。

2 实例计算与讨论

某井基础数据如表 1 所示。抽油机电机的输出功率曲线如图 3 所示。

分别应用提出的峰值功率法、均方根功率法和文献[1]中提出的平均功率法分别对上述抽油机井进行调平衡计算。应用平均功率法调整量为 4 个平衡块均往外调整 0.119 1 m,应用峰值功率法调整量

| 表 1 某抽油机井基础数据                             |         |                 |     |             |    |
|-------------------------------------------|---------|-----------------|-----|-------------|----|
| Table 1 Basic data of pumping unit well X |         |                 |     |             |    |
| 参数                                        | 取值      | 参数              | 取值  | 参数          | 取值 |
| $\omega/(\text{rad} \cdot \text{s}^{-1})$ | 0.628 3 | $n/\text{个}$    | 4   | $\eta_2/\%$ | 90 |
| $N_s/\text{min}^{-1}$                     | 6       | $G_q/\text{kN}$ | 8.5 | $\eta_3/\%$ | 90 |

为 4 个平衡块均往外调整 0.166 5 m,应用均方根功率法调整量为 4 个平衡块均往外调整 0.141 7 m。分别按照上述调整量调整后,运用文中计算模型,计算得到不同方法调整后的电机输出功率曲线(如图 3 所示)。按照三种调平衡方法调整后,抽油机电机输出功率情况是(如图 4 所示)。

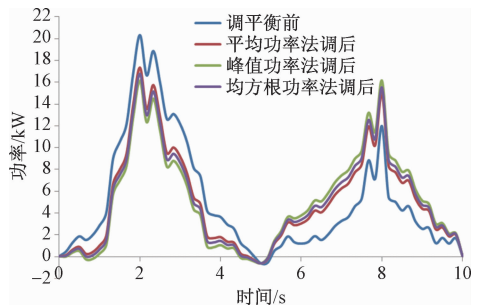


图 3 抽油机井功率曲线  
Fig. 3 Motor curve for pumping unit well

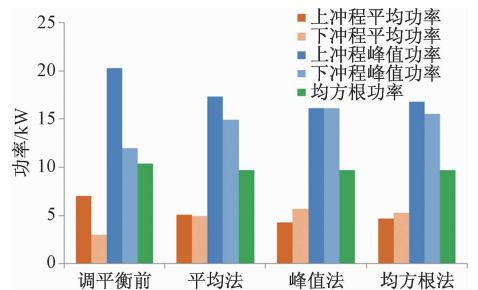


图 4 不同方法抽油机调平衡效果对比  
Fig. 4 The effect comparison of different approaches to adjust balance for beam-pumping unit

①上、下冲程中的平均功率差值的绝对值:平均功率法为 0.132 5 kW,峰值功率法为 1.407 2 kW,均方根功率法为 0.594 9 kW。

②上、下冲程中的峰值功率差值的绝对值:平均功率法为 2.379 2 kW,峰值功率法为 0,均方根功率法为 1.255 3 kW。

③上、下冲程中的均方根功率:平均功率法为 9.697 6 kW,峰值功率法为 9.702 0 kW,均方根功率法为 9.679 6 kW。

从三种调平衡方法结果可以看出:均方根方法调后曲线是介于平均功率法调后曲线和峰值功率法调后曲线之间(如图 3 所示)。均方根功率方法调平衡后,上下冲程的平均功率和峰值功率均有良好的效果,并且均方根功率最小,节能效果最好。

### 3 结论

(1) 利用电动机输出功率与传到减速箱曲柄轴上的扭矩的关系,结合曲柄平衡块位置改变量与电机输出功率改变量的关系,依据抽油机平衡准则,分别建立了峰值功率法和均方根功率法调平衡模型。

(2) 分析了峰值功率法调平衡模型和均方根功率法调平衡模型的适用性,推导了不同情况下公式形式,提高了模型的实用性。

(3) 计算结果表明,均方根调平衡方法对上下冲程平均功率和峰值功率的调整效果良好,并且对抽油机电机的节能效果最好。

### 参 考 文 献

- 1 吴晓东,岑学齐,安永生,等. 基于平均功率法的游梁式抽油机功率曲线法调平衡模型. 石油钻采工艺,2015;37(2):63—66  
Wu Xiaodong, Cen Xueqi, An Yongsheng, *et al.* Balance adjusting model by power curve of beam-pumping unit based on average power method. Oil Drilling & Production Technology, 2015;37(2):63—66
- 2 张 琪. 采油工程原理与设计. 北京:中国石油大学出版社,2006;100,117—130  
Zhang Qi. Theory and Design of Oil Production Engineering. Beijing: China University of Petroleum Beijing Press,2006;100,117—130
- 3 岑学齐,吴晓东,罗 文,等. 深井采油技术减载效果对比研究. 西南石油大学学报(自然科学版),2015;37(2):173—177  
Cen Xueqi, Wu Xiaodong, Luo Wen, *et al.* Comparative study of application effect of load reducing technique in deep well production. Journal of Southwest Petroleum University (Science & Technology Edition), 2015;37(2):173—177
- 4 王玉良. 调径变矩型抽油机的优化设计与平衡效果分析. 钻采工艺,2003;26(4):53—55  
Wang Yuliang. Optimization design and balance analysis of beam pumping units with adjustable radius and change moment. Drilling Production Technology, 2003;26(4):53—55
- 5 宋永刚. 随动复合平衡抽油机动力学分析及计算机仿真. 石油矿场机械,2011;40(10):54—56  
Song Yonggang. Dynamic analysis and computer simulation of servo balance beam pumping unit. Oil Field Equipment, 2011;40(10):54—56
- 6 王艳杰. 抽油机电机在变电压及变负载条件下节能控制方法研究. 北京:华北电力大学(北京),2009  
Wang Yanjie. Energy-saving control method's research of the pumping unit electric motor under the variable voltage and variable load condition. Beijing:North China Electric Power University (Beijing),2009
- 7 史鹏飞,崔丽岩,张彦彬,等. 功率法调整抽油机平衡方法初探. 油气井测试,2003;12(6):51—53  
Shi Pengfei, Cui Liyan, Zhang Yanbin, *et al.* An balance way for adjusting pumping unit by power method. Well Testing, 2003;12(6):51—53
- 8 中国石油天然气集团公司. 游梁式抽油机平衡及操作规范: Q/SY 1233—2009. 北京:石油工业出版社,2009  
China National Petroleum Corporation. The operation and balance for beam-pumping units: Q/SY 1233—2009. Beijing: Petroleum Industry Press, 2009
- 9 中国石油天然气总公司劳资局. 采油工程. 2 版. 北京:石油工业出版社,1996;99—103  
The Labor Bureau of China National Petroleum Corporation. Oil extraction engineering. 2nd ed. Beijing: Petroleum Industry Press, 1996;99—103
- 10 孙延安. 游梁式抽油机合理平衡判别方法研究. 石油机械,2014;42(3):72—75  
Sun Yan'an. Research on the reasonable balance discrimination method for beam pumping unit. China Petroleum Machinery, 2014;42(3):72—75
- 11 岑学齐,吴晓东,葛 磊,等. 峰值功率法游梁式抽油机游梁平衡重调整量计算模型. 石油矿场机械,2015;44(4):29—32  
Cen Xueqi, Wu Xiaodong, Ge Lei, *et al.* Crank counterbalance weight calculation model for crank-balance pumping unit. Oil Field Equipment, 2015;44(4):29—32
- 12 张明亮,雷长森,田小兰,等. 抽油机曲柄平衡的调整计算及效果预测. 石油机械,2001;29(5):36—39  
Zhang Mingliang, Lei Changsen, Tian Xiaolan, *et al.* Balance adjustment and calculation of pumping unit with crank, China Petroleum Machinery, 2001;29(5):36—39
- 13 顾永强,周 静,李 玲,等. 改进抽油机井“功率平衡”测试实现节能降耗. 油气田环境保护,2009;19(4):45—47  
Gu Yongqiang, Zhou Jing, Li Ling, *et al.* Energy saving test on “power balance” of improved pumping well. Environmental Protection of Oil & Gas Fields, 2009;19(4):45—47
- 14 周继德. 用功率曲线法判断和调整抽油机的平衡. 石油学报,1991;12(4):127—132  
Zhou Jide. Adjustment of counterbalance of pumping unit by using electric power characteristics. Acta Petrolei Sinica, 1991;12(4):127—132
- 15 侯立功,刘 超,陶 明. 双驴头抽油机平衡调整的简易方法. 油气田地面工程,2008;27(7):52—53  
Hou Ligong, Liu Chao, Tao Ming. A simple method of balance adjustment of dual horsehead pumping unit. Oil-Gas Field Surface Engineering, 2008;27(7):52—53
- 16 刘巨保,张宏岩. 基于抽油机动力学仿真的转矩法调平衡. 大庆石油学院学报,2006;30(6):53—56  
Liu Jubao, Zhang Hongyan. Torque method for adjusting balance based on dynamic simulation of pumping unit. Journal of Daqing Petroleum Institute, 2006;30(6):53—56
- 17 尹 强,罗炼刚,陈广晔,等. 抽油机井功率平衡技术探讨. 油气田地面工程,2009;28(5):52—53  
Yin Qiang, Luo Liangang, Chen Guangye, *et al.* Discussion on power balance technology for pumping well. Oil-gas Field Surface Engineering, 2009;28(5):52—53
- 18 张 琪,吴晓东. 抽油井计算机诊断技术及其应用. 华东石油学院学报,1984;8(2):144—159  
Zhang Qi, Wu Xiaodong. Pumping well diagnostic technique and its application. Journal of East China Petroleum Institute, 1984;8(2):144—159
- 19 张 琪,赵长禄. 抽油机扭矩曲线的应用. 石油矿场机械. 1984;13(1):22—28,63  
Zhang Qi, Zhao Changlu. Application of torque of the pumping

unit. Oil Field Equipment, 1984;13(1):22—28,63

20 刘益江,张学臣,李 伟,等. 抽油井示功图综合解释. 油气田地面工程. 2007;26(8):3—5

Liu Yijiang, Zhang Xuecheng, Li Wei, *et al.* The comprehensive interpretation technology for the diagnostics of rod pumping systems. Oil-gasfield Surface Engineering, 2007; 26(8):3—5

21 梅启太,徐文倬. 用示功图扭矩分析法确定抽油机平衡块位置. 油田地面工程, 1991;10(3):8—10

Mei Qitai, Xu Wenzhuo. Adjustment of counter balance of pumping unit by using torque curves of the pumping unit. Oil-gasfield Surface Engineering, 1991;10(3):8—10

22 吴晓东,张 琪. 抽油机可调相位角平衡装置的设计. 石油大学学报(自然科学版), 1991;15(4):21—26

Wu Xiaodong, Zhang Qi. Design of a balance device with adjustable phase angle for beam unit. Journal of University of Petroleum, China (Edition of Natural Science), 1991;15(4):21—26

Calculation Model of Balance Adjustment Using  
Power Curve for Beam Pumping Unit

CEN Xue-qi<sup>1,2</sup>, WU Xiao-dong<sup>2</sup>, SONG Li-yang<sup>1</sup>, CHEN Kan-kan<sup>1</sup>, LIU Jia-yi<sup>1</sup>

(Exploration & Production Research Institute, SINOPEC<sup>1</sup>, Beijing 100083, China; Key Laboratory for Petroleum Engineering of the Ministry of Education, China University of Petroleum (Beijing)<sup>2</sup>, Beijing 102249, China)

[Abstract] In recent years, motor power test for beam-pumping unit gains increasing popularity, thus it turns more important to utilize power curve data to direct pumping unit to operate efficiently. Based on pumping unit equilibrium criterion, research on equilibrium adjustment method of crank-balanced pumping unit utilizing power curve data is carried out. With actual situation in production site considered and the relationship between motor power and crank axle torque utilized, the relationship between crank counterbalance position change and motor output power change is built. Crank counterbalance position adjustment calculation models using peak power method and root mean square power method are built respectively for different kinds of pumping unit equilibrium criterion. The calculation results show that compared to average power method and peak power method, root mean square power method gains the minimum energy consumption, which is conducive to tap the potential of pumping unit energy conservation for the next step.

[Key words] crank balance      crank counterbalance      equilibrium criterion      peak power      root mean square power