

# 抽油机自适应柔性控制技术的研究与应用

段志刚, 叶 红, 司志梅, 王 志

(中国石化江苏油田分公司工程技术研究院, 江苏, 扬州 225009)

**摘要:**为解决抽油机井存在调参范围小、悬点载荷峰值大、泵效低、电能浪费的问题,开展了抽油机自适应柔性控制技术的研究应用。研发了流量趋势监测仪,形成了抽油机智能调冲技术;从抽油杆的速度特征、中和点位置、杆柱应力和使用寿命等方面,对比优选了 M 曲线的控制方法,形成了柔性控制技术;现场应用 32 井次,平均单井冲数下降了 49%,节能 40.5%,还能延长油井检泵周期。

**关键词:**抽油机;智能调冲;柔性控制;变频

**中图分类号:**TE938

**文献标志码:**A

## Study on adaptive flexible control technology for pumping units and its application

DUAN Zhigang, YE Hong, SI Zhimei, WANG Zhi

(Petroleum Engineering Technology Research Institute of Jiangsu Oilfield, SINOPEC, Yangzhou 225009, China)

**Abstract:** There are some problems in rod pumping wells, such as a small range of adjusting parameters, a large peak value of polished rod load, low pump efficiency, and a large amount of electric energy waste, and so on. In order to solve these problems, it was carried out studies on adaptive flexible control technology for pumping units. The flow trend monitor was developed to form the intelligent stroke adjustment technology of the pumping unit. According to speed characteristics, neutral point position, rod string stress, the service life of sucker rod, etc., it was compared and optimized the control method of M-curve. So, it was formed the flexible control technology. This technology has been applied in 32 wells, in which there is the average stroke number of single well decreased by 49%, a single well energy saving of 40.5%, and the prolonged pump inspection cycle of oil wells.

**Key words:** pumping units; intelligent stroke adjustment; flexible control; frequency change

游梁式抽油机以其结构简单、制造容易、可靠性高、耐久性好、维修方便<sup>[1]</sup>等优点,在采油机械中占有举足轻重的地位,但现场生产中存在以下几方面的问题:

(1)常规的调参范围有限,实施强度大,调整周期间隔长,难以及时适应井下工况的变化,从而导致生产参数偏大,泵筒充满度低,吨液能耗高;

(2)电机的匀速旋转,导致抽油杆的变速运行,使得抽油杆承受较大的惯性载荷和振动载荷,影响了泵效和检泵周期;

(3)抽油机启动的扭矩大,正常运行的扭矩小,在配备电机时,一般都会以满足启动扭矩为基本条件,因此,生产中存在“大马拉小车”<sup>[2]</sup>,导致电能浪费,影响系统效率。

针对以上存在的生产问题,从抽油机自动跟踪

地层产能并智能调整冲数、开发变速拖动控制曲线和优化控制柜结构等三个方面进行了技术研究,形成了抽油机自适应柔性控制技术,并在江苏油田、西北局等推广应用,取得了不错的效果。

## 1 抽油机智能调整冲数技术

通过现场调研分析,研制了流量趋势监测仪(见图1)。该仪器包括监测模块和信号处理器。监测模块由精密电源、发热元件、温度传感器和温度变送器组成,精密电源为发热元件提供稳定的电压,发热元件单位时间内发出的热量恒定,并将热量从

收稿日期:2019-06-14;改回日期:2019-08-29。

第一作者简介:段志刚(1978—),高级工程师,现从事地面工程技术研究。E-mail:duanzg.jsyt@sinopec.com。

流程管线外壁传递给管道壁及其内部的流体。温度传感器用于实时测量发热元件的温度,温度变送器用于将温度传感器的温度信号转换成电流信号。信号处理器根据电流信号的变化,判定流程管线的流量变化趋势。

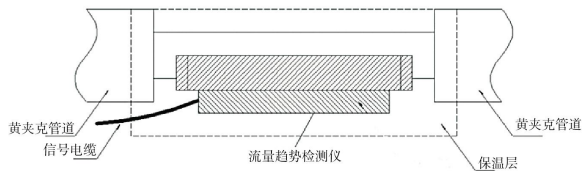


图1 流量趋势监测仪

根据流量趋势监测仪判断产量的变化趋势,并编制了智能调整冲数的程序(见图2),通过PLC和变频器控制电机的运转,从而实现智能调整冲数的目的。

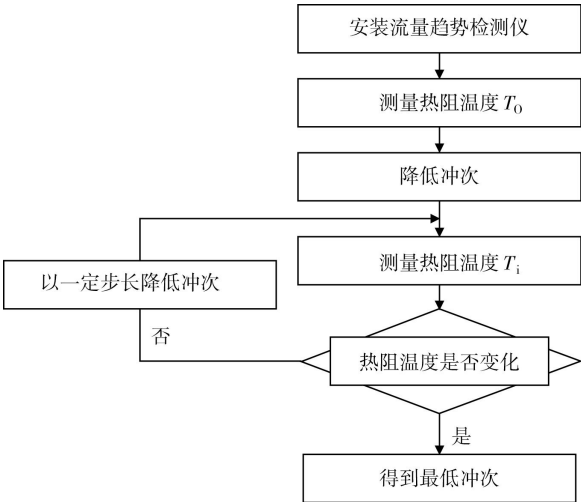


图2 智能调整冲数的程序框图

为验证该调冲技术的准确性,特优选了S10井、X29、M45井、Y28等4口井为试验井,该4口井都是单井产液直接进井场的计量单罐,通过刻度直接读数计量。调冲前后分别统计了10天的平均油井产量,结果表明,智能优化冲数后,油井的产量基本无变化(微小差异是由于计量时的读数误差引起的),数据见表1。

表1 智能调冲前后产量对比

井号	调前冲数 / (次·min <sup>-1</sup> )	调后冲数 / (次·min <sup>-1</sup> )	调前产量 / (t·d <sup>-1</sup> )	调后产量 / (t·d <sup>-1</sup> )
S10井	3	1.2	1.354	1.353
X29	3	1.1	2.132	2.133
M45	3	1.1	1.658	1.656
Y28	3	1.5	1.038	1.039
平均	3	1.225	1.546	1.545

2 抽油机柔性运行控制技术

抽油机柔性控制技术<sup>[3]</sup>主要是通过对变频器加载不同的拖动方式,实现对电机转速的实时控制。通过电机的变速运转,改变抽油机曲柄角速度及角加速度、悬点速度、光杆载荷等系统动态参数,进而改变抽油杆的振动载荷、惯性载荷以及柱塞在泵筒中的运动速度分布等参数,对抽油杆的应力变化实现“削峰填谷”,降低抽油杆的应力变化,从而延长抽油杆的使用寿命,延长油井的检泵周期<sup>[4]</sup>。

研究分析大量的运转控制曲线,优化了一种M控制曲线,与圆拖动方式进行对比,分析两种拖动方式下抽油杆的运行速度和所受应力。

2.1 速度特征对比分析

从两种方式的速度曲线看,M曲线拖动下的抽油杆的最大速度是圆拖动下的最大速度的77.9%,抽油杆的运行相对更加平稳(见图3)。

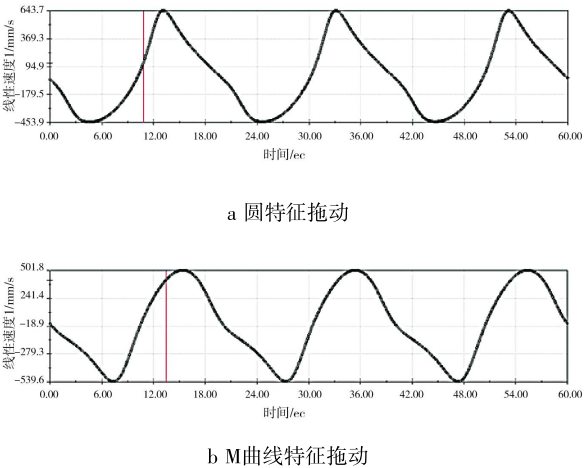


图3 两种特征下的Y方向速度曲线

2.2 中和点对比分析

抽油杆向下运动时,在杆柱系统所受的各种力的综合作用下,抽油杆上部受到的是拉力,下部受到的是压力,在这个压力的作用下,抽油杆在井内产生弯曲变形。随着上下冲程往复,使抽油杆与油管相互摩擦,造成管杆偏磨<sup>[5]</sup>。以现场的一口油井为例,选取上时刻点位置、下时刻点位置、最大加速度时刻位置以及最大速度时刻位置的数据,计算两种不同拖动方式下的抽油杆柱中和点(见表2),可以看出,在下冲程中,M曲线拖动方式的中和点位置有一定程度的下移,这对油井的防偏磨将起到积极的作用。

表2 下冲程中各时刻对应的抽油杆中和点位置

时刻	中和点位置 /m	
	圆拖动方式	M曲线拖动方式
上死点时刻	1 254	1 265
下死点时刻	1 263	1 286
最大加速度时刻	1 208	1 223
最大速度时刻	1 242	1 265

2.3 杆柱应力对比分析

根据边界条件,利用ANSYS仿真软件,分析光杆在上死点、下死点、下行程加速度最大、上行程加速度最大、下行程速度最大和上行程速度最大等6个主要位置的受力(见图4),并对比分析了光杆在两种不同的拖动情况下受力特征(见表3),总体来说,M曲线拖动的最大应力,比圆拖动的最大应力小,光杆的受力更加均衡。

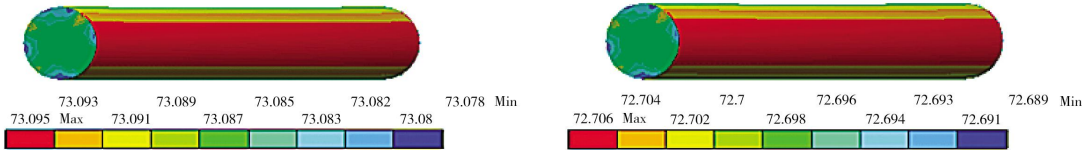


图4 光杆受力仿真

表3 不同拖动方式下的光杆最大应力对比

关键点	圆拖动最大应力 $\sigma_1$ /MPa	M曲线拖动最大应力 $\sigma_2$ /MPa	$\sigma_2-\sigma_1$
上死点	71.227	70.816	-0.411
下死点	72.851	72.526	-0.325
下行程加速度最大	73.095	72.706	-0.389
上行程加速度最大	97.985	97.96	-0.025
下行程速度最大	72.194	71.572	-0.622
上行程速度最大	96.068	95.415	-0.653

表4 抽油杆疲劳寿命对比

关键点	圆拖动循环次数 $C_1$	M曲线拖动循环次数 $C_2$	$C_2-C_1$
上死点	48 613 200	48 487 200	-126 000
下死点	43 388 400	43 663 200	274 800
下行程加速度最大	42 859 200	43 706 400	847 200
上行程加速度最大	15 115 200	15 960 800	845 600
下行程速度最大	46 725 600	46 736 000	10 400
上行程速度最大	16 173 600	16 203 600	30 000

2.4 杆柱寿命对比分析

抽油杆的使用寿命主要与应力疲劳有关,可以用应力寿命曲线来表示载荷与偏劳失效的关系,应力寿命曲线图表示出承受循环载荷后的循环次数,循环次数高的,则寿命越长。因为主要仿真单轴疲劳,所以利用Fatigue tool中的疲劳敏感性曲线来仿真抽油杆的疲劳寿命,根据实际部件存在一定缺陷,所以将损伤因子设为0.8,并利用Goodman理论对材料进行修正,载荷类型指定为ratio,得到抽油杆的疲劳寿命对比数据(见表4)。从对比数据来看,除了上死点外,M曲线拖动的循环次数均优于圆拖动,且在上行程加速度最大时(即应力最大点),M曲线拖动比圆拖动的循环次数多了845 600次,说明在抽油杆寿命最短的时刻点,M曲线拖动方式的寿命更长。因此,M曲线拖动方式下的抽油杆使用寿命将更长。

通过以上对比分析,显示出M曲线拖动的优势。可见,M曲线控制的柔性运行技术能延长抽油杆的使用寿命,延长油井的检泵周期。

3 抽油机智能控制柜的优化

智能控制柜主要应用了变频控制技术<sup>[6]</sup>,实时调整冲数和柔性控制抽油机的运行。

针对目前通用型变频器的控制电路和信号电路大多采用软件控制、抗电磁干扰能力弱、故障率高的问题,研发了全部硬件化的控制电路和信号电路,提高了抗电磁干扰能力,延长了变频器寿命。

抽油机在下冲程中存在反拖发电的情况,利用制动电阻消耗反拖发电,保护了变频器设备。同时,优化了控制线路,抑制了电源谐波,控制了变频器产生的谐波对电网的干扰,现场应用表明,谐波低于5%。

表5 抽油机自适应柔性控制技术应用效果统计表

井号	状态	冲数 /(次·min <sup>-1</sup> )	谐波 /%	液量 /(m <sup>3</sup> ·h <sup>-1</sup> )	功率因数	系统效率 /%	综合节电率 /%
H88-5	使用前	2.8	2.81	2.42	0.795 2	6.3	32.48
	使用后	1.5	3.08	2.43	0.932 7	9.2	
W5-33	使用前	4.5	2.07	1.01	0.347 6	5.02	71.22
	使用后	1.4	4.21	1.02	0.916 5	16.36	
X19-2	使用前	3	1.45	3.51	0.296 4	6.59	55.71
	使用后	1.3	2.09	3.52	0.996 3	13.63	
Z35-1	使用前	3	1.01	4.12	0.673 1	28.79	29.27
	使用后	1.5	2.09	4.11	0.929 3	39.58	

4 现场应用

抽油机自适应柔性控制技术,在江苏油田应用30井次,在西北局应用2井次,应用后,平均单井冲数下降了49%,节能40.5%,抽油机示功图变得饱满,提高了泵效。同时,该柔性控制技术,能延长抽油杆的使用寿命,延长油井的检泵周期。表5统计了部分油井的应用效果。

5 结论

(1)流量趋势监测仪能有效地分析井口产量的变化趋势,为抽油机自动优化调整冲数提供了技术支持。

(2)M曲线控制的拖动方式,相比常规的圆形拖动,在抽油杆的应力分布、疲劳寿命等方面,都具有优势。

(3)抽油机自适应柔性控制技术,对于低产油

井具有很好的适应性,能大幅提高低产油井的泵效,综合节能率高。

参考文献:

[1] 张明. 浅谈抽油机的发展趋势和驱油技术[J].中国化工贸易,2013,5(9):77.

[2] 吕毫龙,吕莉莉,梁晶,等.抽油机电机高效再制造技术的研究与应用[J].石油石化绿色低碳,2016,1(6):50-52.

[3] 杜红勇,李炜,陶丽楠,等. 抽油机柔性控制技术研究与应用[J].电气应用,2017,36(14):50-52.

[4] 吴忠智,吴加林.变频器应用手册[M].北京:机械工业出版社,2002.

[5] 王志刚,李辉. 抽油机井防偏磨综合配套技术研究与应用[J].石油地质与工程,2011,25(S1):107-109.

[6] 赵来军,程发兴. 抽油机变频控制技术[J].钻采机械,1999,22(6):62.

(编辑 韩 枫)