

文章编号: 0253-2697(2018)08-0955-08 DOI:10.7623/syxb201808011

永磁复合电机直驱游梁式抽油机的应用

龚宇¹ 周和平² 胡松华³ 邹正辉² 江建中¹ 林祥生¹ 章华敏¹ 承长清¹

(1. 宁波天安磁性传动科技有限公司 浙江宁波 315700; 2. 中国石油化工股份有限公司中原油田分公司 河南濮阳 457000;
3. 大庆油田有限责任公司 黑龙江大庆 163453)

摘要:为了实现低速大转矩运行,传统游梁式抽油机一般由原动机(通常为感应电机)经过皮带和齿轮箱减速驱动。各驱动环节的额定效率较高,但是抽油机在运行过程中的负载变化幅度较大,平均负载率较低,造成驱动系统的平均效率较低。同时,皮带和齿轮箱润滑油属于消耗品,需要定期更换,还存在一定的安全和环境污染隐患。随着设备运行时间的延长,高速旋转的感应电机、磨损老化的皮带和齿轮箱均会发出较大的噪音。基于上述原因,研制了基于同心式磁性齿轮原理的永磁复合电机,该永磁复合电机具有高效高转矩密度的特点,取代抽油机原有的传动系统,直接驱动游梁式抽油机曲柄旋转。现场实际应用表明,该型抽油机在大庆油田、中原油田和辽河油田取得了较满意的效果。

关键词:游梁式抽油机;直接驱动;低速大转矩;磁性齿轮;永磁复合电机

中图分类号:TE933

文献标识码:A

Application of beam pumping unit directly driven by permanent magnet integrated motor

Gong Yu¹ Zhou Heping² Hu Songhua³ Zou Zhenghui² Jiang Jianzhong¹
Lin Xiangsheng¹ Zhang Huamin¹ Cheng Changqing¹

(1. Ningbo Tian'an Magnetic Drive Science and Technology Limited Company, Zhejiang Ningbo 315700, China;
2. Sinopec Zhongyuan Oilfield Company, Henan Puyang 457000, China; 3. Daqing Oilfield Limited Company,
Heilongjiang Daqing 163453, China)

Abstract: To achieve low-speed high-torque operation, the conventional beam pumping unit is generally driven by prime motor (induction motor) decelerating through belt and gear box. Although the rated efficiency of each driven link is relatively high, the load of beam pumping unit varies greatly with low average load rate, leading to low average efficiency of the driving system. Meanwhile, the belt and lubricating oil of gear box are consumable and require regular replacement; there are also some safety risk and environmental pollution hazards. With the passing of operation time, the induction motor under high-speed rotation as well as the wearing and aging belt and gear box will produce loud noises. For the above reasons, a permanent magnet integrated motor is developed based on the principle of concentric magnetic gear, characterized by high efficiency and high torque density; after replacing the original drive system of pumping unit, it can directly drive the crank rotation of beam pumping unit. Satisfactory achievements have been made in Daqing, Zhongyuan and Liaohe oilfields.

Key words: beam pumping unit; direct driving; low-speed high torque; magnetic gear; permanent magnet integrated motor (PMIM)

引用:龚宇,周和平,胡松华,邹正辉,江建中,林祥生,章华敏,承长清. 永磁复合电机直驱游梁式抽油机的应用[J]. 石油学报,2018,39(8):955-962.

Cite: GONG Yu, ZHOU Heping, HU Songhua, ZOU Zhenghui, JIANG Jianzhong, LIN Xiangsheng, ZHANG Huamin, CHENG Changqing. Application of beam pumping unit directly driven by permanent magnet integrated motor[J]. Acta Petrolei Sinica, 2018, 39(8):955-962.

游梁式抽油机是通过曲柄连杆或其他杆件机构将机械减速齿轮箱的旋转运动转变为抽油杆和抽油泵的往复运动。相较于其他各种新型节能抽油机型式,游梁式抽油机成本低廉,可靠坚实,故障率低,且有利于井下作业,是 150 多年来油田应用较广泛的抽油机型

式^[1-2],但游梁式抽油机效率较低。

为了输出低速大转矩,游梁式抽油机的驱动环节通常由原动机、皮带和减速齿轮箱组成。其中原动机通常为感应电机,虽然额定效率能达到 90% 以上,但由于抽油机特殊的工况,每一个冲数内负载均呈大范

第一作者及通信作者:龚宇,男,1980 年 1 月生,2002 年获上海大学工学学士学位,2010 年获上海大学工学博士学位,现为宁波天安磁性传动科技有限公司工程师,主要从事特种电机的研究。Email:excd@tianan.com

围变化,而感应电机轻载时的效率及功率因数较低,因此平均效率和功率因数不高。减速齿轮箱通常由2~3级齿轮组成,减速比一般在30~40,额定效率在90%~95%。但是需要定期更润滑油,在高温、严寒及昼夜温差大等自然环境下,接触密封处容易老化,产生渗油、漏油以及渗入地表的环境污染问题。皮带作为连接原动机及减速箱的环节,既起到减速的作用,又起到缓冲的作用,有时也通过调节皮带轮的大小来间接调节冲数,是游梁式抽油机中重要的部件。但是皮带轮的效率在变载时会降低,特别是皮带容易磨损,随着磨损程度的增加,效率会进一步降低。

上述3个旋转驱动环节使得游梁式抽油机的驱动效率较低,为了提高系统效率,有学者^[3-5]提出了多种节能方法,例如双功率感应电机、高转差率感应电机、变频调速感应电机、自启动永磁同步电机、变频调速永磁同步电机等。这些节能改造措施均可以在一定程度上提升系统效率,但诸如环节较多、维护频繁、噪声较大等问题依然没有得到解决或改善。特别是对于处于城镇区的抽油机,日渐老化磨损的皮带和齿轮发出的噪音对附近居民的日常生活带来了较大的困扰。

针对上述问题,宁波天安磁性传动科技有限公司在之前对磁性齿轮复合电机的工业化研究基础上,研制了一种用于直接驱动游梁式抽油机的永磁复合电机(PMIM),这种电机同时具有高转矩密度和高效^[6]。可以直接在原来齿轮箱的基座上进行安装,电机主轴直接与曲柄连接,驱动游梁式抽油机运转。

由于取消了原动机、皮带和齿轮箱,因此就消除了这些环节带来的一些缺点。由于永磁复合电机本质上属于永磁同步电机,因此在整个负载范围内可以保持较高的运行效率和功率因数。

1 磁性齿轮永磁复合电机

1.1 发展历程

磁性齿轮是随着磁性材料的发展而参照机械齿轮发展起来的一种齿轮。早期的磁性齿轮一般采用内、外啮合式结构,由大小2个不同磁极对数的圆环构成。当磁钢相互靠近时发生作用而传递转矩,由于磁性能不强,同一时刻靠近的磁钢较少,因此力能指标较低,只是在一些需要隔离传动的场合才有应用^[7-11]。

在20世纪末—21世纪初,美国工程师 Ackermann^[12]和英国谢菲尔德大学的学者 Atallah^[13]先后提出了同心式磁性齿轮,其最大的特点是所有磁钢同时参与作用,大大提高了力能指标。这种磁性齿轮的基本原理可以追溯至20世纪中叶的磁减速器^[14](图1),磁减速

器也由3个部件组成,内转子是一对极的永久磁铁,外转子是一圈通槽,定子则是一圈开口槽,与文献[11-12]所提的磁性齿轮的最大区别就是外层采用了磁阻式结构。

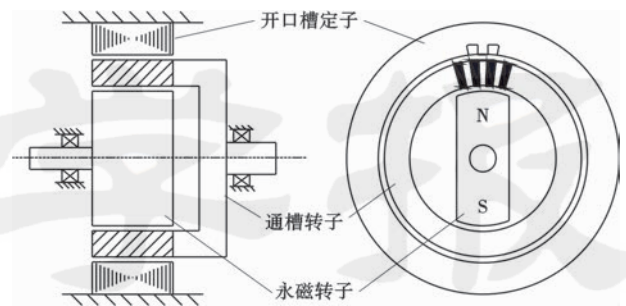


图1 磁减速器

Fig. 1 Magnetic decelerator

上海大学的学者^[14-15]率先进行了新型同心式磁性齿轮的研究,并提出在同心式磁性齿轮内置一个电枢定子,与磁性齿轮的外侧构成一个磁性齿轮复合电机^[16-18]。

内定子上的电枢绕组与磁性齿轮的内转子构成一个速度较高的永磁同步电机,内转子经过中间调磁铁心,调制成一个低速旋转的多极对数磁场,这个磁场的极对数与最外侧的外转子的磁极对数相同,从而输出稳定的低速大转矩。理论上,电枢绕组可以放置在内侧,也可以放置在外侧^[19],甚至可以放置在中间的调磁铁心间。其共同特点是电枢绕组控制的转子与磁性齿轮的转子共用,从而使结构紧凑,转矩密度高。

1.2 基本原理

同心式磁性齿轮的作用原理是利用调磁铁心把磁极对数较少、速度较高的旋转磁场调制成磁极对数较多、速度较低的旋转磁场,即利用磁场来实现减速。

为了进一步说明其工作原理,以一个具有 P_i 为2对磁极的内层转子、 P_m 为20对齿槽的调磁环和 P_o 为18对磁极的外层组成的磁性齿轮为例,分析在3种情况下外层气隙的磁场分布。

图2为两者的内层磁钢在外层气隙产生的空间磁场分布。图3为对应的气隙磁密谐波分析。可以看到,在引入调磁铁心后,除了2对极的基波磁场外,还有1个幅值较大的18对极谐波磁场。这个18对极正好与外层的磁极对数相同,因此,当这个18对极谐波磁场旋转时,就会带动外层转子旋转,输出稳定的转矩。因此,三者的极对数有如下关系:

$$P_i + P_o = P_m \quad (1)$$

理论上,只要固定磁齿轮3层中任何一层,另外两层都可以以固定的速度比变速传动,但实际一般固定调磁环或者外转子,以达到较大的速度比,但是不同的

固定方式有不同的转向。内外层磁钢的极中心线和调磁铁心的中心线重合,处于稳定位置[图 4(a)]。设从内到外 3 层的转速依次为 ω_i 、 ω_m 和 ω_o ,假如固定外层($\omega_o = 0$),内转子逆时针旋转到外层磁钢的下一对极中心[图 4(b)]。可以看到,与该中心线最近的调磁铁心

的极中心线将滞后,因此调磁环将与内转子同方向逆时针旋转以达到平衡。同理,假如固定调磁环($\omega_m = 0$),内转子逆时针转到如图 4(c)所示调磁铁心的下一对极中心时,与该中心线最近的外层磁钢极中心线将超前,因此外层转子将以反方向顺时针旋转。

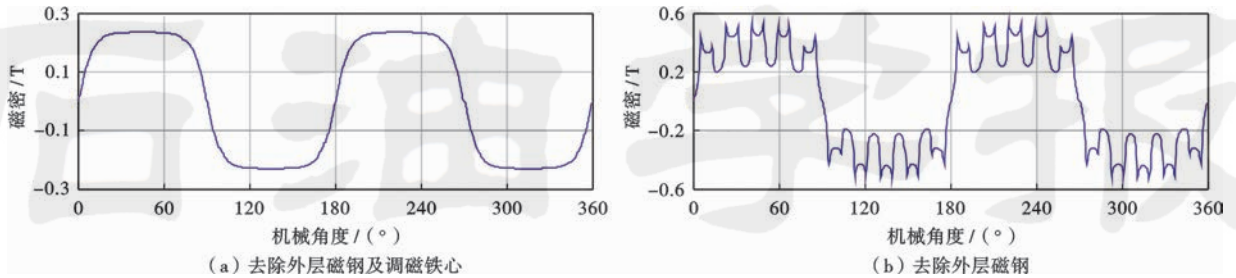


图 2 外层气隙磁场分布

Fig. 2 Magnetic field distribution in the outer air-gap

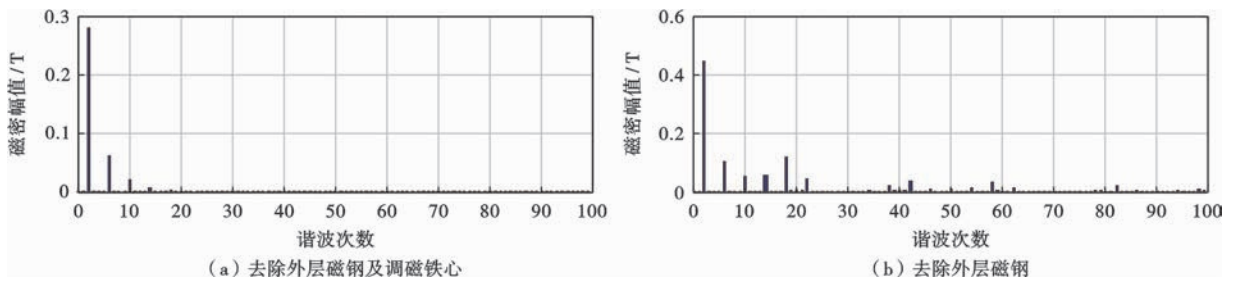


图 3 气隙磁密谐波分析

Fig. 3 Harmonic analysis of the air-gap flux densities

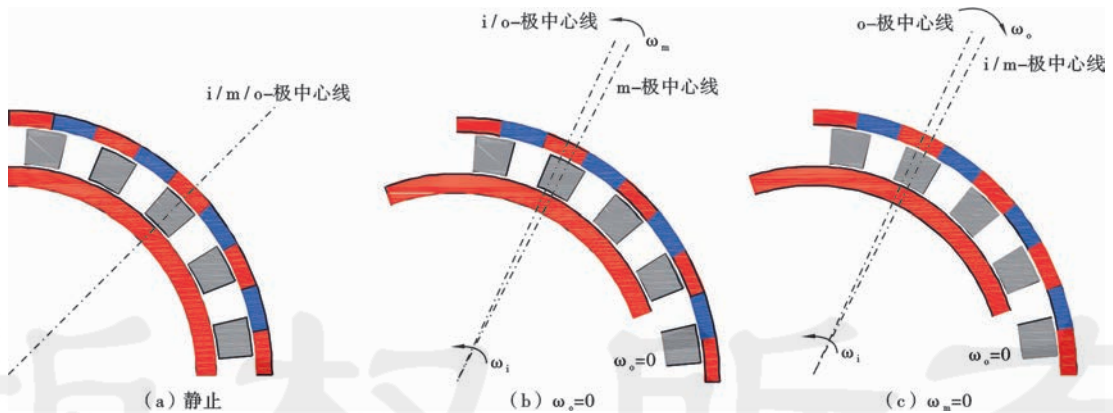


图 4 磁性齿轮转向示意

Fig. 4 Diagram of rotation direction of the magnetic gear

对应上述两种情况,即固定外层磁钢和固定调磁环的磁性齿轮的速比公式依次为:

$$G_r = \omega_i / \omega_m = P_m / P_i \quad (2)$$

$$G_r = \omega_i / \omega_o = -P_o / P_i \quad (3)$$

如果给上述磁性齿轮配置一套电枢绕组,无论是放置在最里面还是最外面,甚至中间调磁环的铁心之间^[20],均可以通过电流来控制内转子旋转。因此,永

磁复合电机本质就是用高速电机来实现低速大转矩输出的磁场减速电机,结构非常紧凑,达到 $100 \text{ kN} \cdot \text{m} / \text{m}^3$ 以上。

1.3 特性计算

为了充分利用永磁复合电机高转矩密度高效率的特点,参照包括中心高在内的抽油机标准齿轮箱规格^[21],设计研发了 26 型、37 型、53 型和 73 型永磁复

合电机产品,具体参数见表1。表1中的额定效率均为包括变频器在内的电驱动系统效率。以37型为例,计算电机的性能。

图5为空载线反电势波形及其谐波分析,取50次谐波,正弦畸变率仅为0.7%。图6为整个运行范围内的效率分布。可以看出,大部分运行区间的效率在85%以上。因此,对于平均负载率不高的抽油机工况,复合电机具有较高的节电潜力。

表1 直驱游梁式抽油机永磁复合电机规格

Table 1 Specifications of PMIM applied for direct-driving beam pumping unit

	额定转矩/ kN·m	额定转速/ (r·min ⁻¹)	额定效率/ %	额定功率 因数	过载 倍数	中心高/ mm
26型	26	8	90	0.98	1.25	480
37型	37	6	90	0.98	1.25	560
53型	53	6	91	0.99	1.25	600
73型	73	6	92	0.99	1.25	620

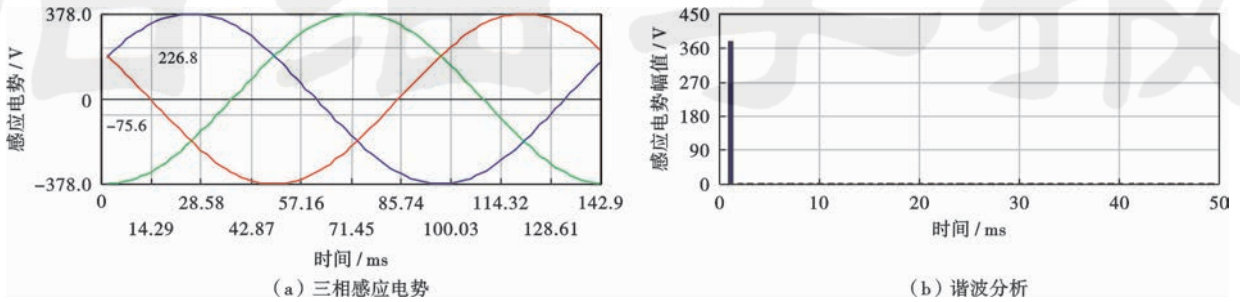


图5 37型永磁复合电机空载感应线电动势

Fig. 5 No load line EMF of 37-PMIM

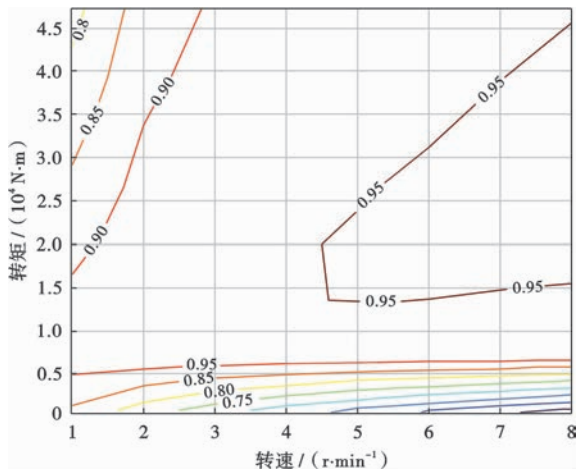


图6 37型永磁复合电机等效率曲线

Fig. 6 Efficiency contour of 37-PMIM

1.4 型式试验

对于永磁复合电机的型式试验,由于其低速大转矩的特性,在测试空载反电势时需要通过齿轮箱组将

原动机的速度降低;在做负载效率特性测试时,需要通过齿轮箱组对复合电机进行增速,满足涡流测功机的速度范围;在做长时间温升测试时,从节能考虑采用对拖的方式。

图7为委托上海市电器科学研究所做的第三方CNAS型式试验现场。其中齿轮箱组的速度比为88.2。空载时由感应电机通过变频器控制速度反拖复合电机,负载时调节涡流测功机的励磁电流来调节负载大小,复合电机的输出轴连接100 kN·m的转矩转速传感仪,用于测试输出的机械功率。

永磁复合电机的电枢绕组感应的是内部的高速转子,因此其感应电势能力远高于普通的低速永磁电机,每相串联匝数较少,铜损耗较低。实测的额定负载S1工况下5 h温升结果显示:绕组温升为25.3 K,机壳温度为42.8℃,轴承两端温度为36.6和35.2℃,冷却介质温度为25℃。永磁复合电机的效率测试如表2所示。可以看到,测试值与计算值比较接近。

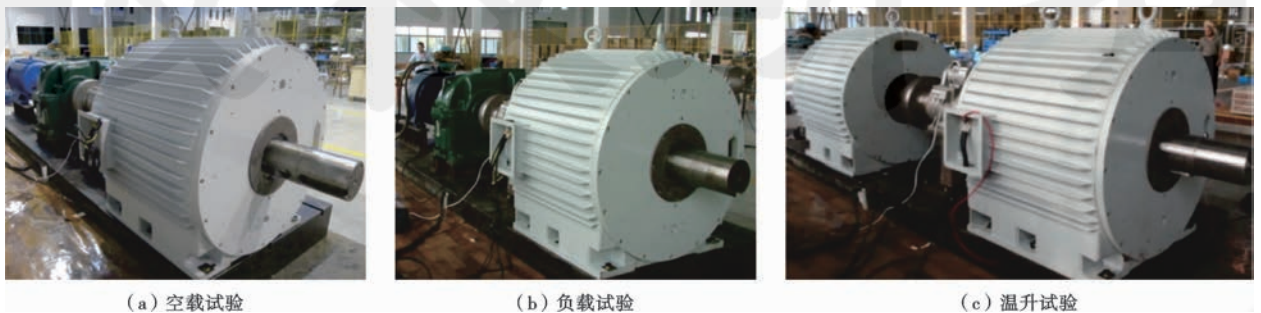


图7 37型永磁复合电机型式试验

Fig. 7 Test of 37-PMIM

表2 37型永磁复合电机效率测试结果

Table 2 Measured efficiency results of 37-PMIM

电机转速/ ($r \cdot \min^{-1}$)	电流/ A	输入功率/ W	输出功率/ W	效率/ %	功率 因数
6	45.95	24 707	23 000	93.09	0.983
4	45.72	16 890	15 340	90.82	0.979
2	48.84	8 770	7 670	87.46	0.952

2 直驱游梁式抽油机

2013年11月7日,永磁复合电机(37型)在大庆油田采油三厂二矿一队进行现场改造安装(北2-361-20井),至今依然在连续平稳的运行(图8)。这是由电机直接驱动的游梁式抽油机。采油三厂工程技术大队对其前后运行数据进行了采集对比(表3)。

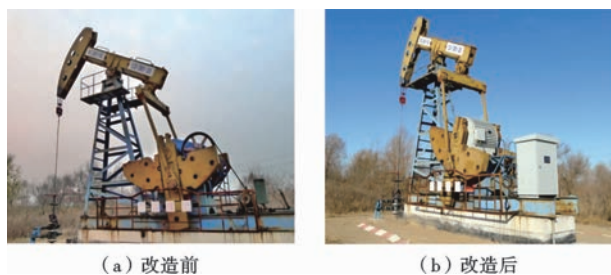


图8 改造前后的直驱游梁式抽油机

Fig. 8 Direct-driving beam pumping unit before and after transformation

表3 直驱抽油机对比测试结果

Table 3 Comparison test results of direct-driving beam pumping unit

测试日期	产液/ ($t \cdot d^{-1}$)	液面/ m	泵效/ %	日耗电/ ($kW \cdot h$)	系统效率/ %
20131031	16.8	397	54.44	164.4	10.72
20131113	17.2	434	55.74	148.8	13.35

结果表明,直驱改造后该井系统效率提高了2.6%,百米吨液有功节电率达到19%,无功节电率达到71.4%,按照无功经济当量0.03计算,综合节电率达到22.1%。

3 永磁复合电机水利模拟井试验

在油田现场进行对比测试,即使是同一口井,井下的情况也是一直在变化的。不同的液面、不同的平衡率、不同的气候,改造前后的客观条件无法保持一致,即使折算成百米吨液耗电,也存在一定的差异。为了对比测试,利用大庆水利模拟井(G192-242井)进行了试验(图9)。

G192-242井是一口封闭自循环的纯水井,通过预先慢速注水严格控制液面,在同一液面下进行抽汲,对每一次抽汲上来的水量进行实时称重,同时往井中注

水保持液面恒定。最后根据产液量和耗电情况换算成百米吨液耗电。



图9 水利模拟井试验现场

Fig. 9 Test scene of hydraulic simulation well

表4为在不同液面下的3组对比数据,冲数为 $4 \min^{-1}$,冲程为4.2 m,有功与无功单耗均指百米吨液耗电。从表4可以看出,随动液面增大,节电率降低,说明复合电机在轻载时的节电效果更好。

表4 水利模拟井对比测试结果

Table 4 Comparison test results in hydraulic simulation well

参数	动液面 200 m		动液面 400 m		动液面 600 m	
	原态	节态	原态	节态	原态	节态
有功单耗/($kW \cdot h$)	1.088	0.965	1.498	1.404	1.961	1.870
无功单耗/($kW \cdot h$)	2.486	0.179	2.595	0.25	2.824	0.312
有功节电率/%		11.3		6.24		4.64
无功节电率/%		92.8		90.38		88.96
综合节电率/%		16.5		10.4		8.1

水利模拟井动液面不深,但是由于是封闭的水井,基本可以保证100%的充满度,不存在现场的供水问题,泵效基本在90%以上。另外纯水井的柱塞和泵筒之间无法形成油膜,达不到生产井油膜起到的减少摩擦,降低磨损的作用,因此同样液面深度对应的载荷比生产井重。通过示功图测试得到200 m动液面的最大载荷平均为52 kN,400 m动液面的最大载荷平均为61 kN,600 m动液面的最大载荷平均为72 kN。

水利模拟井与生产井的另一个区别是纯水井基本不含气,注满度较高,因此影响其泵效的主要因素是漏失,冲数越高,漏失越少,泵效越高。但这种情况与生产井有较大差异,生产井的泵效主要取决于供液,有时通过降低冲数以及增加注满度反而能提高泵效。

4 生产井批量试验

4.1 大庆油田批量试验

为了对永磁复合电机直驱抽油机的泵效、系统效

率、节电率等进行评价,大庆油田在第1口井试验成功的基础上对永磁复合电机进行批量试验。表5是随机测试的第1批9口试验井的数据。9口井根据机型不同由3台37型和6台53型永磁复合电机驱动。

结果表明,改造后抽油机系统效率最低提高了2.52%,最高提高了17.76%,平均提高11.18%,百米吨液有功节电率最低为8.99%,最高为30.06%,平均为20.84%。

4.2 中原油田现场试验

与大庆油田相比,中原油田的油井液面较深,油液较稠^[22-23]。为了测试永磁复合电机直驱抽油机在不同的油层特性下的运行情况,在中原油田进行了10台抽油机的现场改造试验,包括4台53型和6台73型。

表6是率先安装测试的3口井的数据。从表6中

可以看到,中原油田的液面较深,油液较稠,因此冲数普遍较低。冲数越低,原有传动系统的减速比越大,相应的效率也会降低。对于不带变频器工频供电的感应电机传动系统,只能通过减小感应电机轴端的皮带轮直径来实现,随着皮带轮包角的减小,皮带的寿命、效率均会受到影响。从表6中可以看到,第2口井的冲数较低,因此原驱动效率较低,节电率超过40%。第1口井和第3口井的液面、冲数相差不多,但是节电率相差较多。这主要是由于两者的泵效不同,后者泵效较高,说明载荷较重,原驱动效率较高,因此节电率只有6.3%,这与水利模拟井所反映的测试结果一致。但是3口井的平均效率也能达到20%以上,说明永磁复合电机直驱抽油机在中原油田同样也能取得较好的节电效果。

表5 大庆油田采油三厂现场试验结果

Table 5 Onsite test results of the third oil production factory in Daqing oilfield

编号	抽油机型	状态	液量/ (t·d ⁻¹)	液面/ m	泵效/ %	有功节电率/ %	系统效率/ %	系统效率 提高/%	百米吨液 节电率/%
1	CYJY-8-3-37HB	改造前	16.8	397	54.4		10.83		
		改造后	17.2	434	55.7	10.1	13.35	2.52	19.09
2	CYJY-8-3-37HB	改造前	23.9	698	43.4		25.31		
		改造后	26.2	731	47.5	6.8	31.24	5.93	18.85
3	CYJY-8-3-37HB	改造前	36.6	561	55.3		46.20		
		改造后	38.1	622	57.6	10.0	59.41	13.21	22.30
4	CYJ-10-4.2-53HB	改造前	53.0	504	65.0		50.17		
		改造后	54.0	550	66.3	17.0	67.93	17.76	24.50
5	CYJ-10-4.2-53HB	改造前	33.0	545	66.5		29.18		
		改造后	34.0	607	68.6	18.8	41.80	12.62	30.06
6	CYJ-10-4.2-53HB	改造前	97.0	533	76.2		51.70		
		改造后	97.0	508	76.4	26.1	67.70	16.00	22.77
7	CYJ-10-4.2-53HB	改造前	79.0	548	56.7		64.01		
		改造后	80.0	513	57.8	23.7	80.69	16.68	20.16
8	CYJ-10-4.2-53HB	改造前	74.0	546	64.3		51.97		
		改造后	77.0	573	66.5	13.3	64.98	13.01	20.06
9	CYJ-10-4.2-53HB	改造前	44.0	770	47.6		39.50		
		改造后	44.0	756	47.5	11.0	43.25	3.75	8.99

表6 中原油田采油三厂现场试验结果

Table 6 Onsite test results of the third oil production factory of Zhongyuan oilfield

编号	井号	状态	冲数/ (r·min ⁻¹)	液量/ (t·d ⁻¹)	液面/ m	泵效/ %	日耗电量/ (kW·h)	系统效率/ %	百米吨液 节电率/%
1	MZW95-150	改造前	3.85	15.0	1367	28.7	318	18.3	16.8
		改造后	3.00	14.5	1383	36.7	260	20.6	
2	MZW305-57	改造前	1.74	1.7	2025	20.4	192	5.0	44.3
		改造后	1.75	1.9	2110	22.2	125	12.5	
3	MZW95-123	改造前	3.80	35.9	1496	53.6	343	39.6	6.3
		改造后	3.00	37.0	1476	72.3	330	43.8	

4.3 辽河油田示范井

由于生产需要,采油厂油区生产与生活区域常交错在一起。随着时间的推移,不少地方都是油田与城

镇居民区混合在一起,许多抽油机毗邻市政区、居民区、景观区,传统抽油机驱动系统中带风扇高速旋转的感应电机、磨损老化的皮带以及齿轮箱均会发出较大

的噪音,给附近的居民带来困扰。因此,在辽河油田居民区附近改造了一口示范井,以评估其噪音改善效果,现场如图10所示。该抽油机于2014年9月装机,噪音测试表明,改造后抽油机可以降低噪音20 dB以上。



图10 辽河油田兴隆台采油厂示范井(兴476井)

Fig. 10 Demonstration well in Xinglongtai Oil Plant, Liaohe oilfield(Well Xing 476)

5 结论

(1) 永磁复合电机的额定转矩密度高达 $80 \text{ kN}\cdot\text{m}/\text{m}^3$ 以上,最高转矩密度超过 $100 \text{ kN}\cdot\text{m}/\text{m}^3$,体积与同规格的油田齿轮箱相同。各规格的永磁复合电机均可以按照对应齿轮箱的中心高和安装螺孔设计,直接在现有的游梁式抽油机的炮台上安装。

(2) 永磁复合电机直驱抽油机不存在皮带和齿轮箱,大大降低维护的工作量。由于取消了皮带和齿轮箱,消除了主要噪声源——带风扇的感应电机,运行平稳较安静,适合于居民区附近的抽油机改造。

(3) 从节电效果来看,载荷越轻,平均负载离感应电机的额定电压越远,越能发挥永磁复合电机平均运行效率高的优势。从现场测试数据看,永磁复合电机直驱游梁式抽油机在大庆和中原油田的百米吨液有功节电率均达到平均约20%。

(4) 永磁复合电机内置磁性齿轮减速,可以以较低转速高效率运行,甚至低于 $1 \text{ r}/\text{min}$,因此,对于一些超低冲数井,甚至间抽井,可以考虑采用永磁复合电机进行连续极低冲数抽汲,从而提高泵效和节电率,减少维护工作量。

符号注释: P_i —内层磁极对数; P_m —调磁铁心齿数; P_o —外层磁极对数; ω_i —内层转子角速度, rad/s ; ω_m —调磁铁心角速度, rad/s ; ω_o —外层转子角速度, rad/s ; G_r —磁性齿轮速度比。

参 考 文 献

- [1] 李继志,万邦烈.石油钻采机械概论[M].2版.东营:中国石油大学出版社,2012:300-307.
LI Jizhi, WAN Banglie. Introduction of oil exploration and production[M]. 2nd ed. Dongying: Petroleum Industry Press, 2012: 300-307.
- [2] 李颖川.采油工程[M].北京:石油工业出版社,2011:68-74.
LI Yinchuan. Oil production engineering[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2011: 68-74.
- [3] 白连平,马文忠,杨艳,等.关于游梁式抽油机用电动机节能的讨论[J].石油机械,1999,27(3):41-44.
BAI Lianping, MA Wenzhong, YANG Yan, et al. Energy saving of electric motor on beam pumping units[J]. China Petroleum Machinery, 1999, 27(3): 41-44.
- [4] 刘合,郝忠献,王连刚,等.人工举升技术现状与发展趋势[J].石油学报,2015,36(11):1441-1448.
LIU He, HAO Zhongxian, WANG Liangang, et al. Current technical status and development trend of artificial lift[J]. Acta Petrolei Sinica, 2015, 36(11): 1441-1448.
- [5] 姜建胜,林立,由宏君,等.有杆抽油系统无级调冲次工艺研究[J].石油学报,2005,26(2):111-114.
JIANG Jiansheng, LIN Li, YOU Hongjun, et al. Stepless stroke regulation technology for rod pumping system[J]. Acta Petrolei Sinica, 2005, 26(2): 111-114.
- [6] 宁波天安磁性传动科技有限公司.永磁复合电机直驱游梁式抽油机:20150034273.2[P].2015-01-23.
Ningbo Tian'an Magnetic Drive Science and Technology Limited Comang. Beam pumping unit directly driven by permanent magnet integrated motor: 20150034273. 2[P]. 2015-01-23.
- [7] TSURUMOTO K, KIKUCHI S. A new magnetic gear using permanent magnet[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 1987, 23(5): 3622-3624.
- [8] KIKUCHI S, TSURUMOTO K. Trial construction of a new magnetic skew gear using permanent magnet[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 1994, 30(6): 4767-4769.
- [9] YAO Y D, HUANG D R, LIN S M, et al. Theoretical computations of the magnetic coupling between magnetic gears[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 1996, 32(3): 710-713.
- [10] 赵韩,王勇,田杰.磁力机械研究综述[J].机械工程学报,2003,39(12):31-36.
ZHAO Han, WANG Yong, TIAN Jie. Review of study on magnet machine and mechanism[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2003, 39(12): 31-36.
- [11] 励鹤鸣,励庆孚.电磁减速式电动机[M].北京:机械工业出版社,1982.
LI Heming, LI Qingfu. Electromagnetics reducer[M]. Beijing: Mechanical Industry Press, 1982.
- [12] ACKERMANN B, LEO H. Magnetic drive arrangement comprising a plurality of magnetically cooperating parts which are moveable relative to one another; US, 5633555[P]. 1997-05-27.

- [13] ATALLAH K, HOWE D. A novel high-performance magnetic gear [J]. *IEEE Transactions on Magnetics*, 2001, 37(4): 2844-2846.
- [14] 刘新华. 新型磁场调制式磁性齿轮的设计研究[D]. 上海: 上海大学, 2008.
LIU Xinhua. Design and research on a novel field modulated magnetic gear[D]. Shanghai: Shanghai University, 2008.
- [15] 杜世勤. 新型磁齿轮复合电机的设计研究[D]. 上海: 上海大学, 2010.
DU Shiqin. Research and design on a permanent magnet electrical machine combined with a magnetic gear[D]. Shanghai: Shanghai University, 2010.
- [16] CHAU K T, ZHANG Dong, JIANG J Z, et al. Design of a magnetic-gear outer-rotor permanent magnet brushless motor for electric vehicles[J]. *IEEE Transactions on Magnetics*, 2007, 43(6): 2504-2506.
- [17] 张东, 邹国棠, 江建中, 等. 新型外转子磁齿轮复合电机的设计与研究[J]. *中国电机工程学报*, 2008, 28(30): 67-72.
ZHANG Dong, CHAU K T, JIANG Jianzhong, et al. Design and research of a novel magnetic-gear outer-rotor compact machine [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2008, 28(30): 67-72.
- [18] JIAN Linni, CHAU K T, JIANG J Z. A magnetic geared outer-rotor permanent magnet brushless machine for wind power generation[J]. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 2009, 45(3): 954-962.
- [19] ATALLAH K, RENS J, MEZANI S, et al. A novel "pseudo" direct-drive brushless permanent magnet machine[J]. *IEEE Transactions on Magnetics*, 2008, 44(11): 4349-4352.
- [20] JIAN Linni, GONG Wansheng, XU Guoqing, et al. Integrated magnetic-gear machine with sandwiched armature stator for low-speed large-torque applications[J]. *IEEE Transactions on Magnetics*, 2012, 48(11): 4184-4187.
- [21] 中国国家标准化管理委员会. 石油天然气工业-游梁式抽油机: GB/T 29021-2012[S]. 北京: 中国标准出版社, 2013.
Standardization Administration of the People's Republic of China. Petroleum and natural gas industries-Beam pumping units: GB/T 29021-2012 [S]. Beijing, China Standard Publication House, 2013.
- [22] 顾乐民. 中国石油产量历史回顾与未来趋势[J]. *石油学报*, 2016, 37(8): 280-288.
GU Lemin. Historical review and future tendency of oil production in China[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2016, 37(2): 280-288.
- [23] 陈元千, 唐玮. 油气田剩余可采储量、剩余可采储采比和剩余可采程度的年度评价方法[J]. *石油学报*, 2016, 37(6): 796-801.
CHEN Yuanqian, TANG Wei. Annual evaluation methods for remaining recoverable reserves, remaining recoverable reserves-production ratio and remaining recoverable degree of oil and gas fields[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2016, 37(6): 796-801.

(收稿日期 2017-11-05 改回日期 2018-06-24 编辑 宋宁)

版权所有