

潜油永磁同步电机国内外研究进展*

崔俊国, 肖文生, 喻高远, 王宏敏, 司国琛

[中国石油大学(华东)石油石化新型装备与技术教育部工程研究中心, 山东 青岛 266580]

摘要: 从结构类型、设计开发、试验应用等方面分析了潜油永磁同步电机国内外研究进展。与潜油异步电机相比, 潜油永磁同步电机具有效率高、值得油田推广应用。分析了国内潜油永磁同步电机开发应用中存在的问题, 并提出了解决问题的建议, 为潜油永磁同步电机深入研究提供参考。

关键词: 潜油永磁同步电机; 结构类型; 国内外研究进展; 试验与应用

中图分类号: TM 351 文献标志码: A 文章编号: 1673-6540(2015)03-0007-06

Research Advances of Submersible Permanent Magnet Synchronous Motor

CUI Junguo, XIAO Wensheng, YU Gaoyuan, WANG Hongmin, SI Guochen

[Research Center for New Petroleum and Petrochemical Equipment and Technology Ministry of Education(China University of Petroleum(East China)), Qingdao 266580, China]

Abstract: Research advances about structure type, design and development, test and application of SPMSM at home and abroad was analyzed. Compared with induction motor SPMSM has higher efficiency. As a new type driving device with significant advantages SPMSM was worth popularization and application in oilfield. Some problems of SPMSM during the development and application were analyzed and some relevant suggestions were proposed, which provided a reference for the further research of SPMSM.

Key words: submersible permanent magnet synchronous motor (SPMSM); structure type; research advances at home and abroad; test and application

0 引言

目前机械采油方式中,有杆泵采油系统占主导地位,其次是电潜离心泵采油系统和潜油螺杆泵采油系统。随着油田不断开发,深井、定向井、水平井数量增加,难动用储量区块及高黏稠油井、高含沙含蜡含气原油井的数量逐渐增多,给有杆泵采油系统带来了较多问题。例如:在深井、定向井、水平井中杆管偏磨更加严重,在高黏稠油井中造成抽油杆下行困难、断脱。潜油泵采油系统由于没有抽油杆而不存在杆管偏磨现象,其中螺杆泵是一种容积式泵,原油开采过程中不会出现砂卡、结垢、气锁等现象,因此,潜油泵采油系统将逐渐成为油田开采的主要设备。潜油电机是潜油泵采油系统的动力机,是保障机组正常运转的关键,也是主要的能耗设备之一。其性能直接影响

潜油泵机组乃至电泵井的质量和寿命,同时也影响到原油产量及各项采油成本。目前油田主要应用的是潜油异步电机,采用潜油异步电机直接驱动电潜离心泵,或加行星齿轮减速器驱动螺杆泵。但潜油异步电机的效率和功率因数较低,加减速器驱动螺杆泵使机组传动链变长、故障点增加、系统效率进一步降低。为改善潜油电机的性能指标,提高潜油泵采油系统效率,近几年国内外学者开展了潜油永磁同步电机的研究,主要包括驱动离心泵用的高速潜油永磁同步电机和驱动螺杆泵用的低速潜油永磁同步电机,起动方式包括变频起动和异步起动两种。

本文通过分析潜油永磁同步电机国内外研究进展及应用情况,指出当前存在的问题,提出解决问题的途径,为潜油永磁同步电机的进一步开发应用提供理论参考。

* 基金项目: 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(24720146051)

1 潜油永磁同步电机驱动潜油泵系统

离心泵、螺杆泵的结构形式和工作原理决定了其工作转速,离心泵需要在高转速下工作(约 3 000 r/min),而螺杆泵在低转速下工作(一般 0~500 r/min);潜油永磁同步电机直接驱动离心泵或螺杆泵,因此对应开发的潜油永磁同步电机有高速(磁极数少)和低速(磁极数多)两种。潜油永磁同步电机驱动潜油泵采油系统如图 1 所示。

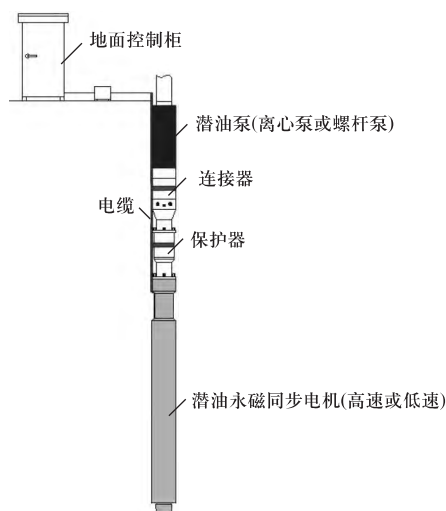


图1 潜油永磁同步电机驱动潜油泵采油系统

潜油永磁同步电机置于井下机组的底端,依次与保护器、连接器、潜油泵自下而上同轴连接,电缆将电流输送给潜油电机。工作时,由地面控制柜控制潜油永磁同步电机,对其进行无级调速,使其以需要的转速运行,直接驱动离心泵或螺杆泵进行采油。这种直驱采油模式(特别是直驱螺杆泵)无需抽油杆和机械减速装置,提高了系统效率,降低了能耗,节约了成本,具有结构简单、安装维护方便、工作安全可靠等优点。

2 潜油永磁同步电机国内外研究进展

潜油电机作为潜油泵采油系统的重要组成部分,一直是研究热点之一,而潜油永磁同步电机则是随着永磁电机技术的发展及潜油泵采油系统特别是螺杆泵采油系统的广泛应用而逐步发展起来的。国内外学者和研究机构从潜油永磁同步电机

结构类型、开发应用等方面已经开展了大量的研究工作,并取得了一定的研究成果^[1-7]。

2.1 结构类型

潜油永磁同步电机采用细长结构,定转子分段,每段之间安装有扶正轴承,相当于多台小永磁同步电机。根据潜油永磁同步电机实际应用情况,结合永磁同步电机分类特点,可分为以下两种。

(1) 调速潜油永磁同步电机。采用变频电源供电,转子上无起动绕组,通过电流频率逐步升高来起动。电机转速在稳定运行时与电源频率保持恒定关系,可直接用于开环变频调速系统。该电机效率高,可降低配套变频电源的容量要求。调速潜油永磁同步电机又包含矩形波电流驱动和正弦波电流驱动两种类型。前者的供电电流波形为矩形波,反电势波形近似为矩形波或梯形波;后者的供电电流波形和反电势波形都为正弦波。结构上二者基本相同,定子电枢一般采用三相对称绕组,转子上安装永磁体。常见转子结构主要有永磁体表面式和内置式两大类。表面式结构又分为插入式和凸出式,前者属于凸极转子结构,后者为隐极转子结构;内置式结构一般都是凸极转子,主要分为径向式、切向式和混合式。调速潜油永磁同步电机转子结构形式如图 2 所示。

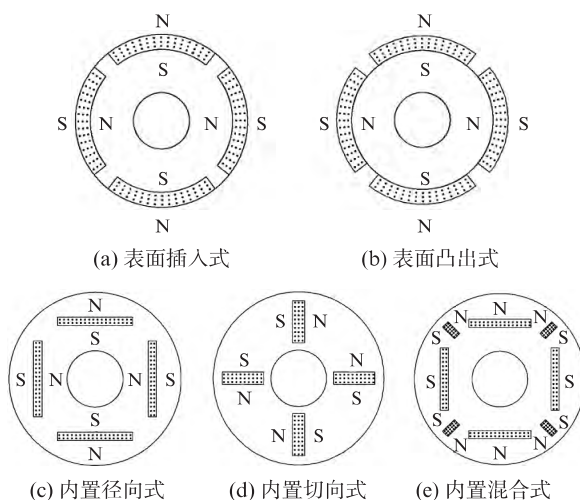


图2 调速潜油永磁同步电机转子结构形式

(2) 异步起动潜油永磁同步电机。依靠鼠笼型转子绕组产生的异步转矩实现自起动;起动完成后,转子绕组不再起作用,由转子永磁磁极和定

子绕组共同作用产生恒定的驱动转矩,电机以同步转速正常运行。异步起动潜油永磁同步电机转子上需要安放鼠笼导条,故常采用永磁体内置式转子结构。磁路结构形式与调速潜油永磁同步电机的内置式结构相似,也可分为径向式、切向式和混合式,如图3所示。

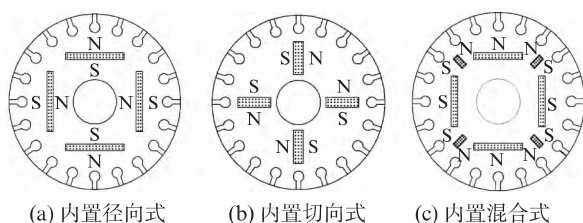


图3 异步起动潜油永磁同步电机转子结构形式

2.2 潜油永磁同步电机国外研究现状

国外潜油永磁同步电机的开发主要在俄罗斯,而有成熟产品并且在世界各地油田应用的主要是俄罗斯的 RITEK JSC、Borets、Novomet 三家公司^[8-11]。

1990年,俄罗斯专家开始利用交流电机驱动潜油泵进行采油作业;2000年,俄罗斯专家开始研究潜油永磁同步电机;2001年,俄罗斯 RITEK JSC 公司为研究潜油永磁同步电机而专门成立的子公司 RITEK-ITC 开发出世界第一台潜油永磁同步电机,其调速范围为 1 500 ~ 3 600 r/min,主要用于驱动潜油离心泵或加齿轮减速器驱动螺杆泵采油,同转速下功率密度为三相异步电机两倍,工作有效长度同比减少一半,便于井下安装作业;同年,RITEK-ITC 公司开发了转速为 100 ~ 500 r/min 直接驱动螺杆泵采油的低速大扭矩潜油永磁同步电机,并成功应用到油井上;2002年,RITEK-ITC 公司生产的潜油永磁同步电机开始装备到俄罗斯 LUKOIL 石油公司油井上进行采油作业,并逐年增加,截止到 2007 年 1 月 6 日,共装备油井 620 口(驱动离心泵系统油井 496 口,驱动螺杆泵系统油井 124 口)。

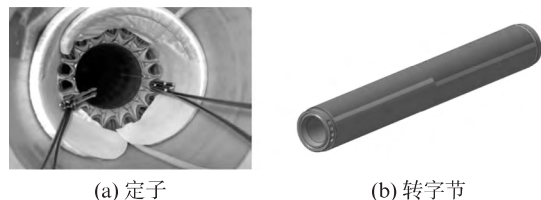
2006年,俄罗斯 Borets 公司开始研发潜油永磁同步电机,分别研发了驱动电潜离心泵用高速潜油永磁同步电机(4极)和驱动螺杆泵用低速潜油永磁同步电机(10极),如图4所示。转子、定子铁心均为硅钢片叠压而成,采用永磁体内置径向式,漏磁系数小、转轴上不需要采取隔磁措施、

极弧系数易于控制,结构简单,转子机械强度高,且安装永磁体后转子不易变形。2011年,Borets 公司生产的潜油永磁同步电机已被俄罗斯秋明英国石油控股公司、俄罗斯天然气工业石油公司、美国阿帕奇石油公司等油田公司采用;2012年,在巴西安装了4套潜油永磁同步电机驱动的采油系统;2013年,哥伦比亚开始进行安装使用。到目前为止,Borets 公司生产的潜油永磁同步电机已经应用 2 500 余台。



图4 Borets 公司开发的潜油永磁同步电机转子结构形式

Novomet 公司也开发出了高速和低速两种潜油永磁同步电机,分别采用 4 极结构和 14 极结构,转子磁路结构采用永磁体表面插入式,表面没有安装起动绕组,无异步起动能力,转子上没有软磁极。Novomet 公司开发的潜油永磁同步电机定子结构如图5所示。Novomet 公司对潜油永磁同步电机的转子结构和扶正轴承进行了改进设计,减小了电机运行过程中的振动。2012年6月中旬,埃及 Agiba 石油公司引进了 Novomet 公司生产的潜油永磁同步电机,生产效率达到预期效果;潜油永磁同步电机在俄罗斯西西伯利亚地区和 Usinskoye 地区等复杂、恶劣环境中应用具有明显优于传统采油方式的效率。



(a) 定子 (b) 转字节

图5 Novomet 公司开发的潜油永磁同步电机定转子结构

美国的 PM&D 工程公司与 Borets-Weatherford 公司联合开展了潜油永磁同步电机驱动离心泵采油的试验研究^[12],分别进行了实验室试验研究与现场试验研究。结果表明,潜油永磁同步电机比

潜油异步电机平均可节能 20%。实验室测试出的效率曲线如图 6 所示。现场试验得出的产量能耗曲线如图 7 所示。

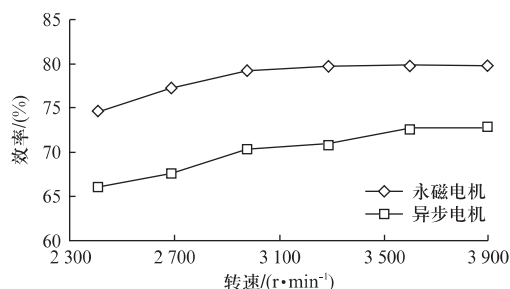


图6 效率对比

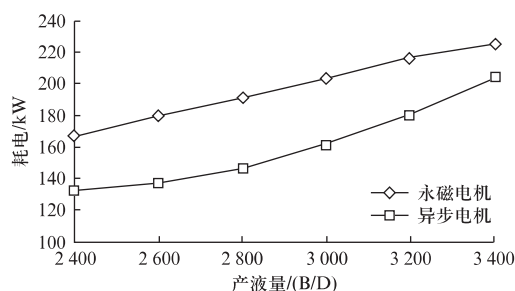


图7 产量能耗对比

2.3 潜油永磁同步电机国内研究现状

国内哈尔滨工业大学的郑砥中等在 1996 年设计了潜油永磁同步电机^[13-15]。哈尔滨工业大学设计的潜油永磁同步电机如图 8 所示,定子开 18 个槽;转子由带圆形闭口槽的硅钢片叠压而成,硅钢片的轭部对称开有镶嵌槽,镶嵌槽内填充钕铁硼永磁材料,属于内置式结构,极对数为 2;圆形闭口槽数为 16 个,内放置铜导条,端部用铜环条固定,铜导条作为起动绕组,使潜油永磁同步电机能够实现异步起动;利用局部区域有规则剖分下不规则点调整的有限元法完成了潜油永磁同步电机磁场数值分析,在此基础上,计算了考虑电机磁路非线性影响的电机参数;利用电机动态分析方法,得出了电机微分方程数学模型,对潜油永磁同步电机起动过程进行了仿真分析,为设计电机时合理地选择参数提供了依据;但并未见样机试验与应用的研究。

近几年,哈尔滨工业大学开始研究直驱螺杆泵用的低速潜油永磁同步电机^[16]。设计了额定转速 300 r/min 的 9 槽 8 极潜油永磁同步电机,转子采用永磁体表贴式结构。试制了一台潜油永磁

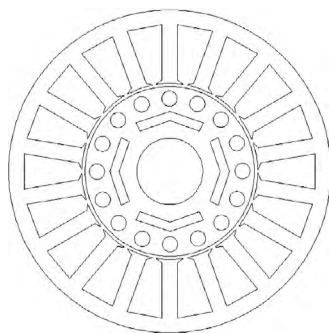


图8 哈尔滨工业大学设计的潜油永磁同步电机

同步电机样机,并搭建了地面温度测试试验平台,但由于电机绕组绝缘处理不当,导致电机漏电,进而使得电机在地面温度测试试验中意外烧毁,导致地面温度测试试验中断,没能测得电机的稳态温度值。

沈阳工业大学与胜利油田泵业有限公司联合开发了潜油螺杆泵专用稀土永磁同步电机^[17]。采用 10 极 36 槽分数槽绕组,转子结构为永磁体内置径向式,同时转子上装有起动绕组,实现电机的异步起动功能;沈阳工业大学与大庆油田有限责任公司合作开发了直驱螺杆泵用潜油永磁同步电机^[18],采用 8 极 24 槽整数槽绕组,转子结构为永磁体内置切向式,转子上未安装起动绕组,需变频起动。

大庆油田力神泵业有限公司开发了高速潜油永磁同步电机^[19]。转子结构与哈尔滨工业大学郑砥中等提出的转子结构相似,其配套的高速潜油永磁同步电机驱动电潜泵采油系统已经在大庆油田实现了小规模应用。

河南新乡市夏烽电器有限公司研制出分数槽直驱螺杆泵用潜油永磁同步电机,采用永磁体表贴式转子结构,无起动绕组,已在大庆、长庆、胜利等油田进行了应用^[20-21]。

中国石油大学(华东)与武汉直驱机电技术有限公司联合开展了整数槽直驱螺杆泵用潜油永磁同步电机的研究,试制了一台 12 极 36 槽整数槽绕组潜油永磁同步电机并进行了样机试验。试验结果表明,电机运行状况良好,下一步将进行油田现场试验应用。

2.4 潜油永磁同步电机性能特点

根据国内外现场应用情况,总结得出潜油永磁同步电机与潜油异步电机相比,具有如下特点:

(1) 调速范围宽。潜油永磁同步电机高速 500 ~ 6 000 r/min, 低速 0 ~ 500 r/min, 增加了电机的使用灵活性; 使用过程中, 可以通过人工或自动调速, 输出转速转矩稳定。

(2) 效率高、功率因数高。电机本身没有励磁损耗和碳刷损耗, 消除了多级减速损耗, 高速潜油永磁同步电机效率可达 90% ~ 94%; 转子采用永磁体替代励磁绕组, 功率因数接近于 1, 有利于改善电网状况, 减少线路损耗, 降低电网容量。

(3) 恒转矩下功率密度更高。在 25% ~ 120% 额定负载范围内均可保持较高的效率和功率因数。

(4) 节能效果显著。与潜油异步电机相比可节能 10% ~ 20%。

(5) 井口控制器采用无位置传感器磁通矢量控制, 自适应控制快速灵敏, 使机组始终保持在较高的生产水平。抽吸连续平稳, 不对油层产生压力激动作用, 泵的排量稳定, 泵效高, 油液流动无扰动, 便于计量。

(6) 运行电流低, 能耗低, 发热少, 工作电流约降低 15%, 因此地面变频控制器、电缆均可以采用较小的功率等级或型号, 同时电缆、变压器、变频器中的能耗也降低。在冷却液流速较低的情况下可正常运行, 冷却液流速最低可为 0.015 m/s。

(7) 体积重量小。潜油永磁同步电机的体积和重量比同容量、同极数的潜油异步电机降低约 20%, 因此相同输出功率下具有更小的尺寸和重量, 特别适用于海上石油开采。

(8) 运行成本降低。寿命增加, 检修周期变长, 驱动离心泵采油平均寿命周期为 1 000 d, 最长的为 1 530 d; 驱动螺杆泵采油检修周期在 250 ~ 800 d。

通过以上分析可知, 利用潜油永磁同步电机驱动离心泵或螺杆泵采油能够提高系统效率, 节约电能, 控制调节方便, 降低油田开采成本, 值得在国内外油田规模化推广应用。

3 存在的问题及解决途径

潜油永磁同步电机的研究不同于传统感应电机的研究, 且由于其特殊的工作环境, 故与其他类型的永磁同步电机研究也存在一定的区别。尽管

国内外学者在潜油永磁同步电机的开发应用方面取得了一定的研究成果, 开创了潜油永磁同步电机油田应用的新局面, 但针对潜油永磁同步电机设计方法及其井下运行状况仿真分析少有文献报道, 应从以下几个方面继续深入研究:

(1) 已有的潜油永磁同步电机的研究主要集中在结构设计、试验应用方面, 而潜油永磁同步电机设计过程涉及多参数、多性能指标, 应探寻一种适合于潜油永磁同步电机的全局优化方法, 进一步提高此类电机设计精确度。

(2) 潜油永磁同步电机井下运行温度场分布受到电磁场、流体场、应力场等多物理场相互耦合、相互制约, 分布不合理会造成温升过高、绝缘损坏、永磁体失磁等问题, 进而使电机性能下降。应开展电机井下运行发热和散热机理问题研究, 对井下运行系统进行仿真分析。

(3) 目前基本上借助试验应用判断潜油永磁同步电机设计的合理性, 很少采用具有针对性和行之有效的分析方法来判断电机设计的合理性, 没有从根本上揭示电机故障原因与电机参数确定之间的映射关系及故障的产生和动态演化机理。

针对上述潜油永磁同步电机需要继续研究的问题, 提出以下研究方法与思路:

(1) 深入研究潜油永磁同步电机电磁参数对电机性能影响机理, 开展基于多目标优化设计方法的潜油永磁同步电机电磁参数优化设计。

(2) 建立潜油永磁同步电机井下运行多物理场耦合仿真分析模型; 深入研究模型参数、环境参数、模型响应等因素之间的相互关系; 探究电机井下运行的发热情况和散热机制。

(3) 集成现代信号获取与处理技术, 开展样机试验, 探究电机故障与电机参数之间的参数关系, 并结合仿真分析揭示潜油永磁同步电机故障产生与动态演化机制。

4 结 语

本文介绍了潜油永磁同步电机直接驱动离心泵或螺杆泵采油系统, 以及潜油永磁同步电机的主要结构形式。从结构类型、设计开发、试验应用等方面分析了潜油永磁同步电机国内外研究进展; 根据国内外应用情况总结了潜油永磁同步电机的性能特点, 认为潜油永磁同步电机作为一种

优势明显的新型驱动装置值得油田推广应用。分析了目前特别是国内潜油永磁同步电机开发应用中需要深入研究的问题,并提出了研究方法思路,为潜油永磁同步电机进一步设计研究与应用提供参考。

【参考文献】

- [1] IGOR A, ARTHUR S. Application of permanent-magnet motors in oil production [J]. Journal of Petroleum Technology, 2009 61(7): 56-57.
- [2] LI J J, ZOU J B, JIANG X T, et al. Electrical-thermal coupled calculation of a submersible motor used for deep-sea electromagnetic propeller [C] // Dig Bienn IEEE Conf Electromagn Field Comput, CEFC, 2010: 1.
- [3] AHMED S, TOLYAT H A. Coupled field analysis needs in the design of submersible electric motors [J]. IEEE Electr Ship Technol Symp, 2007: 231-237.
- [4] WEN J B, PAN Y B. Research of six-pole permanent magnet submersible motor design [C] // Proc Int Forum Strateg Technol, IFOST, 2011: 545-548.
- [5] ZHANG B Y, LIANG B X, FENG G H, et al. Research of multipolar permanent magnet synchronous submersible motor for screw pump [C] // Proc IEEE Int Conf Mechatronics Autom, ICMA, 2007: 1011-1016.
- [6] 郝明晖, 张健, 郝双晖, 等. 井下直驱螺杆泵潜油伺服系统设计 [J]. 机械设计与制造, 2011 7(3): 221-223.
- [7] 熊素铭, 钱庆镇. 实现永磁潜油电机自启动的一些措施 [J]. 中小型电机, 2001 28(1): 45-47.
- [8] PAVLENKO V. Permanent magnet synchronous motor (PMSM) - New type of drives for submersible oil pumps [C] // SPE Rus Oil and Gas Tech Conf Exhibition, Moscow, Russia, October 2008: 1-8.
- [9] KEN S, ANDREY S. Case history of running progressing cavity pumps with submersible permanent magnet motors [C] // Soc Pet Eng-Progress Cavity Pumps Conf, Calgary, Canada, 2013(8): 80-88.
- [10] LUIS S, ANDREY S. Field experience with the application and operation of permanent magnet motors in the ESP industry: success stories and lessons learned [C] // Soc Pet Eng-SPE Artif Lift Conf-Am: Artif Lift: Where Do We Go Here, 2013: 183-188.
- [11] AHMED R, HESHAM A M A, AHMED S, et al. Permanent magnet motor application for ESP artificial lift [C] // Soc Pet Eng-North Africa Tech Conf Exhib, NATC, 2013: 1-12.
- [12] THOMAS B, ROBERT M, TREVOR K. Induction vs. permanent magnet motors for electric submersible pumps field and laboratory comparisons [C] // Rec Conf Pap Annu Pet Chem Ind Conf, 2012: 1-9.
- [13] 郑砥中, 杨振强. 永磁同步潜油电机磁场数值分析 [J]. 电机技术, 1996(1): 18-21.
- [14] 杨振强, 郑砥中. 以磁场数值分析为基础计算永磁同步潜油电机参数 [J]. 电机技术, 1996, (4): 20-22.
- [15] 杨振强, 郑砥中. 永磁同步潜油电机启动过程仿真 [J]. 微特电机, 1996(3): 17-19.
- [16] 孔祥龙. 潜油螺杆泵驱动电机设计与热分析 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2011.
- [17] 梁丙雪. 潜油螺杆泵专用稀土永磁同步电动机研究 [D]. 沈阳: 沈阳工业大学, 2008.
- [18] 王欣欣. 潜油螺杆泵直驱永磁电动机的研究 [D]. 沈阳: 沈阳工业大学, 2012.
- [19] 乔正芳, 赵国辉, 曹锦丽. 永磁同步潜油电机的应用 [J]. 石油石化节能, 2008(3): 46-49.
- [20] 李德印. 潜油直驱永磁同步电机: 中国, 201020292314.0 [P]. 2010-08-16.
- [21] 张克岩. 潜油直驱螺杆泵 [J]. 油气田地面工程, 2011 30(7): 99.

收稿日期: 2014-09-06

中文核心期刊 中国科技核心期刊 中国学术期刊(光盘版)

全国优秀科技期刊 华东优秀科技期刊

中国科学引文数据库来源期刊 中国学术期刊综合评价数据库来源期刊