

# 电潜往复泵举升工艺优化及应用研究

郭太勤

(中海油能源发展有限公司工程技术分公司 天津 300452)

**摘要:** 随着大量油田的开发建设,促使潜油往复泵的应用越来越广,但井下作业条件复杂,以往有杆泵举升存在的诸多问题,如管杆偏磨、效率低及能耗高等,严重制约了井下抽油生产的效率和经济效益。为此,基于潜油直线电机往复泵举升工艺的优化研究成为本文研究的重点,结合某油田生产现场需求,提出了一种优化的潜油往复泵举升工艺技术,并基于直线电机选型、油井流入动态、多相管流计算展开了分析,提出优化设计结构及流程和功能的介绍,最后经试验及现场作业进行了工艺的优化后的对比,有效降低了潜油往复泵举升工艺的生产成本,提升了油田井下生产作业的工作效率和经济效益。

**关键词:** 潜油往复泵; 直线电机; 提升抽油效率

## 0 引言

随着我国大量油田的开发进入中后期,潜油往复泵随之在油田油井生产中的应用也越来越广泛;潜油往复泵的举升系统的设计及优化也成为近年来科研领域持续研究探索的重点内容之一,潜油往复泵举升系统的优劣,将直接关系到油田生产的能效成本及经济效益。潜油往复泵举升系统的优化设计,其实质内容就是依据油井综合生产情况,应用计算机及数据等方法进行相关电机选型、下泵深度等指标进行软件等试验计算分析,从而科学量化优选出潜油往复泵举升系统的综合工作参数的过程。

### 1 目前国内外油井举升工艺技术发展趋势

(1) 逐渐由常规往复电机向基于油田实际生产的高性能的适应性方向发展。进一步优化了电机定子和电机转子的结构,提高了往复电机的举升力,扩大了技术适用性和应用领域行业发展趋势;根据生产工艺的改进,减小径向规格偏差,抑制震源引起的振动;根据线性度的改进,防止因超行程装置运行而引起的振动;选用科技含量更高的油路支管和专用电机减震弹簧设计,进一步降低了发电机组的振动。

(2) 从传统的石油管道外扎电缆加工工艺向连续油管内设电缆方向发展。由于传统输油管道外系电缆,施工工艺复杂,工作时间长,极易造成电缆损坏等问题。现阶段在现场考虑采用连续油管替代传统输油管道。根据特殊技术,将电缆嵌入连续的油管中,在提高工作效果的同时,也降低了电线电缆损坏的概率。

(3) 从传统的粗放式管理机制向检测确诊配套设施精细化管理的发展趋势。现阶段,油井生产常见故障诊断层面还存在粗放管理体系之中。日常故障诊断只能确保油井正常生产制造。对于故障情况只能根据工作经验来区分;根据电源等信号线路,采用直读或者反演解释技术等方法完成对油井井下工况的监测和诊断,有利于提高关键技术的实际效果。

(4) 以往井下一线工作人员工作经验设置主要举升参数到系统优化设计方案领域的发展趋势。对于油井生产的直线电机举升,现阶段主要依据井下产量及经验来对抽吸参数进行设置,但随着电机举升优化等技术的发展,根据油井生产的供排协调、油井流入动态和含水率测试等,依据合理的计算,

可以完成系统举升的整体优化和改进,以此提升油井生产技术的应用效率和经济效益。

(5) 从分散的非系统生产向标准化配套设施的信息集成化方向发展。由于传统井口抽油机和井口装置布设,往往进行检修和养护都需要多部门进行协调操作,很多配套装置也是临时进行应用,为此通过技术攻关,对相关配套技术及装置进行优化改进,实现系统装置的集成化技术管理,可以促进系统优化和规模化进行推广创设一定的条件。

### 2 直线电机作为井下动力系统的条件及电机选型

#### 2.1 直线电机作为井下动力系统的条件

井下潜油往复泵发电机组应用直线电机的选型标准应符合以下基本条件:

(1) 优良的密封性能和耐压性能。由于直线电机在油田井下的工作,电机始终处于超高压高温环境之中,所以现有的直线电机必须改进耐压和密封性设计,使其具有更优良的密封性能和耐压特性。

(2) 最大长度应小于12m。油田作业生产的工具越长,现场生产的工作就越复杂。如果管道机具太长,会导致无法工具完全吊起。

(3) 最大的外径应小于118mm。如果外径过大,电机不能顺利放入井内,尤其是斜轴段的井口。这将大大限制潜水往复泵工艺技术的应用。

(4) 平行线电机可耐高温120℃。由于直线电机在油井中运行,油井井下的工作场温度较高,加之电机本身的散热情况,因此,应确保直线电机的耐高温性能优良。

#### 2.2 直线电机选型

根据上述基本理论,可以进行直线电机的选型,主要有以下几种方式:

(1) 根据油井的主要参数,计算并调度所需的基本理论举升力,选择直线电机;

(2) 根据电机总重量与推力的比值,测量所选电机的推力,然后加上相关管柱的净重,得到举升力;

(3) 对比验证上述流程和规定进行反复试验,如果不能满足相关标准测试,则选择其它型号和规格的电机,重复上述整个过程,直到确定最优的电机。

### 3 井下潜油直线电机往复泵举升优化设计方法

#### 3.1 建立数据库

收集现阶段常用的潜水往复泵系统的各种主要参数，整理入数据库进行查询。现阶段由于潜水往复泵的工艺技术处于发展初期，型号规格和种类并不多见，为此，基于长远的考虑，数据库查询的创建应符合相关标准，并提前预留一定的相应的字段，以增加未来型号和种类增多后的数据信息的扩充预留相应的空间及接口。

#### 3.2 优化设计思路

假设这样一种情况：只给出油井的设计产液方案，指定油井的生产量，选择当前应用的几种泵型，明确泵的有效工作参数；应用该方案的计算简述如下步骤：

这种方法的测量过程总结如下：

(1) 根据给定的相关数据信息，绘制出油井综合 IPR 曲线图，计算出产量井的井底流压力。依据井内存在的油气水流动特性，建立 IPR 曲线。再依据计算的相关结果对不同类型的电机的工作推力和输入功率进行曲线绘制。如图 1 所示，依据室内试验展开对电机模型推力  $F$ 、 $F/P$ 、 $F/m$  与输入功率的相关特性模拟计算曲线图。

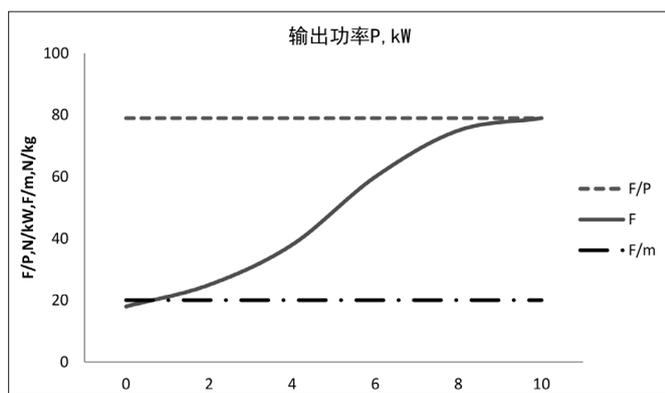


图 1 直线电机启动推力与输入功率的关系曲线图

从图 1 可以看出，当输入功率  $P=1-10\text{kW}$  时， $F/P$  保持在  $77 \sim 79\text{N/kW}$ ， $F/m$  基本保持在  $21\text{N/kg}$ ，即电机结构中的电机启动推力与电机质量基本呈正相关，这种认识非常关键，可以应用于电机模型的选择。

(2) 根据现场经验和具体情况确定沉没程度；

(3) 明确浸没程度后，根据静液柱的工作压力估算浸没程度的过程，即可明确泵的进口的工作压力；

(4) 依据已知的井底的流量压力和泵进口的工作压力，从井底到顶部，根据多种管道流量计算方法，确认泵吸入口上方的相对高度然后计算泵挂深度；

(5) 以井筒为起点，进行下泵深度的多组分管流量估算，求出泵进出口的工作压力。以上两步的主要计算方法和步骤请参考 Orkiszewski 方法模拟试验；

(6) 泵的进出口压差可由泵道和进出口的工作压力求得。针对该压差等主要参数，计算油井基本理论举升力，参照图 1 所示方法确定所需电机型号及规格。

(7) 根据电机型号规格及油井基本主要参数，参照基本

游梁式抽油机的泵选型方法，明确泵径及电机主要参数。

#### 4 优化后潜油直线电机往复泵举升现场应用实例

##### 4.1 现场工艺要求

###### 4.1.1 地面条件

一是选择在市区城镇等人口稠密地区使用，防止油泵损坏和噪音污染的风险。

二是规避在河流、泄洪区等自然环境敏感区域内应用，降低环保风险。

三是在供电系统中选择相对稳定的区域内应用，减少因电压不稳或线路短路造成对装置的损坏。

###### 4.1.2 井况条件

一是优选低效、高能耗的油井进行应用，以提升优化系统的高效率，降低成本和能耗。

二是优选定向和水平井及泵杆偏磨严重的油井进行应用，以降低优化后的作业生产成本。

三是应确保油井结构能符合以下标准：泵深  $\leq 2000\text{m}$ ，防水套管规格  $\geq 139.7\text{mm}$ ，井眼运动轨迹达到机械设备平稳插入，发电机组位置设置应确保在稳斜段。

###### 4.1.3 生产条件

含砂量  $\leq 0.2\%$ ，气液比  $\leq 80\text{m}^3/\text{m}^3$ ，产液量  $\leq 20\text{m}^3/\text{d}$ ，泵挂部分井温设置需  $\leq 100^\circ\text{C}$ ，地面的原油粘度应低于  $\leq 100\text{MPa}\cdot\text{s}$ ，应确保环境腐蚀轻微且不易结蜡和积聚油垢。

###### 4.1.4 机组及井下附属条件

首先，电机型号选择应考虑井筒背压、结蜡等因素；其次，要综合考虑电机的热洗和散热等因素。电缆耐高温  $\geq 120^\circ\text{C}$ ，使用耐  $50\text{m}$  以上发电机组的接引电缆（电缆终端头性能参数不低于普通电缆）；选择气液含量较高的井，为达到密封性和耐压性，应选择气密专用井筒。

###### 4.1.5 配套清防蜡要求

针对结蜡井应有除蜡和防蜡措施，防止损坏电缆和发电机组。

##### 4.2 优化设计系统说明

###### 4.2.1 系统基本功能需求

根据给定的相关油井生产数据信息输出以下内容：

首先是在整个曲线后输出该油井的 IPR 曲线。

然后对结果进行计算和分析。计算指标包括：采油指数、IPR 曲线、油井进口工作压力 (MPa)、出口工作压力 (MPa)、井底压力 (MPa)、泵排量 ( $\text{m}^3/\text{d}$ )。

###### 4.2.2 设计思路

现阶段，潜油往复泵的相关工艺技术刚刚发展起来，型号规格较少。数据信息类型和相关分析并不复杂。从系统的开发维护、应用转移等角度考虑，可以使用比较简单的小型数据库管理，如 MS-ACCESS，程序流程属于 Microsoft Office 软件中的一个组件，可用于构建简单的小型数据库查询，避免大中型技术专业数据库的安装、调整和维护的不便。

从长远考虑，数据库查询的创建要符合相关标准，数据分析表的字段名设置要有效，逻辑顺序要简单，这样会扩大数据库系统的嵌入式空间和字段设置，依此预留未来数据信

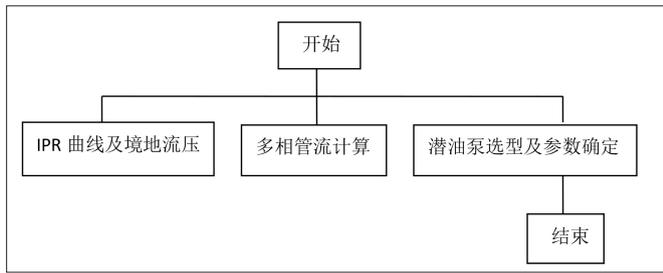


图 2 优化设计软件结构流程图

息的种类增加。

本优化设计可采用 C++ 语言表达编写，并按照 VC++6.0 标准进行调试。程序流程将在 Windows 环境下运行，全部使用汉字进行提示，数据信息采用国际单位制；模块化设计用于构建程序。

#### 4.2.3 总体模块化设计

首先，制作 IPR 曲线图并计算井底流压力，使用多分量管道流量计算方法计算泵输出和通道工作压力，以及使用所得结论计算泵性能及其它的主要参数。

其中，最重要、最复杂的是第二部分——多相管流计算的控制模块。该控制模块实际设计的最终流程图如图 3 所示。

#### 4.3 现场应用情况

截至 2019 年 9 月，在某油田累计应用的潜油直线电机往复泵的 13 口井。通过对其中渤海油井生产现场的试验等情况的对比分析：泵效由 23.9% 提升至 75.9%，有效提升 3.18 倍；能耗方面：由日耗电：103.2kWh，显著下降至：70.3kWh，总体节电 31.26%；系统效率由 9.22% 提高到 17.08%，提高 1.85 倍；优化后日常生产运行中井口无渗漏、井下无出现偏磨问

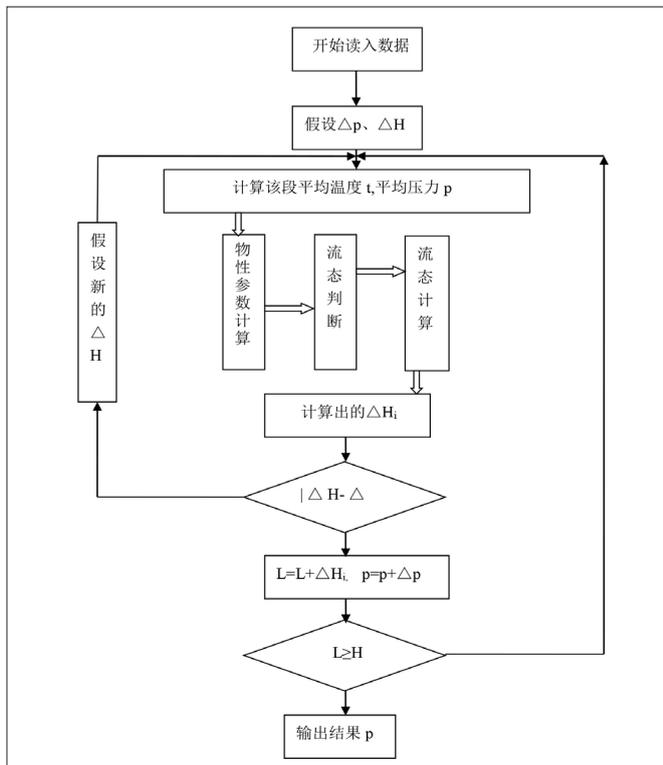


图 3 基于 Orkiszewski 方法的多相管流程序流程图示意图

题，原来的检泵周期也由 310 天提高至 510 天，提高 145 天；生产运行各参数可以实现远程控制。详见图 3、图 4、图 5 及下表。

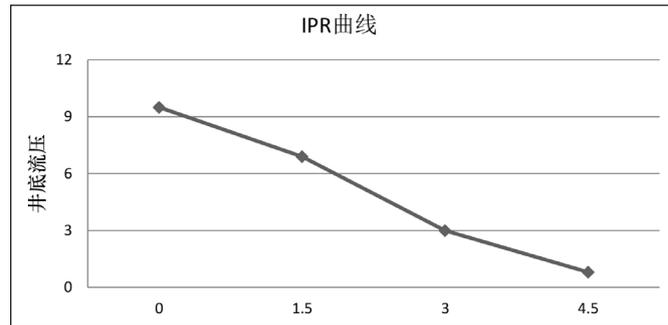


图 4 2# 井的 IPR 曲线

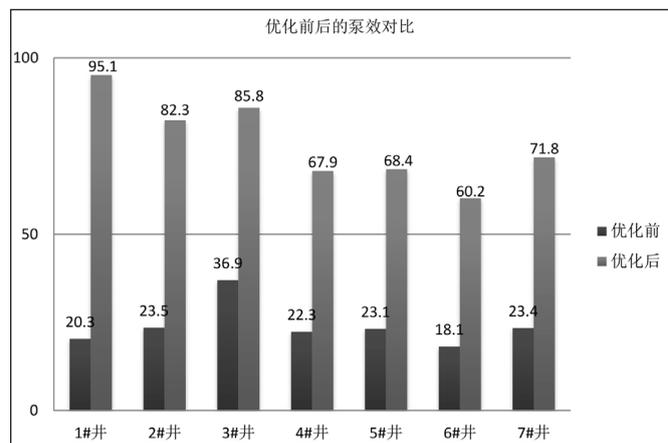


图 5 潜油往复泵 1# ~ 7# 井优化试验前后的泵效对比

表 潜油往复泵试验能耗对比

井号	日耗电 / (kW·h)			系统效率 / %		
	抽油机	潜油泵	节电率 (%)	抽油机	潜油泵	差值
1# 井	85.8	67.3	21.56	10.85	15.12	4.27
2# 井	70.1	52.3	25.39	8.61	19.83	11.22
3# 井	121.3	56.8	53.17	12.68	26.85	14.17
4# 井	138.7	105.3	24.08	9.39	12.41	3.02
5# 井	149.7	107.6	28.12	7.08	14.93	7.85
6# 井	87.3	50.1	42.61	8.58	15.27	6.69
7# 井	69.5	52.9	23.88	7.37	15.13	7.76
平均合计	103.2	70.3	31.26	9.22	17.08	7.85

### 5 结语

通过本次针对某油田油井生产中的潜油往复泵举升系统优化后的现场应用，获得以下的相关认识：

(1) 安全性显著提升：由于优化后的举升系统取消了地面电机及抽油机，简化了以往抽油机地面维护保养及换皮带带轮等操作流程，有效规避了“工伤”等隐患，另外，由于简化了地面等传动部件，降低了养护成本和对环境的破坏程度，尤其对于低洼区域内的油井在汛期的生产，起到了最大程度的安全生产保障。

(2) 生产过程的低噪音和零污染效果明显：由于优化后

(下转第 70 页)

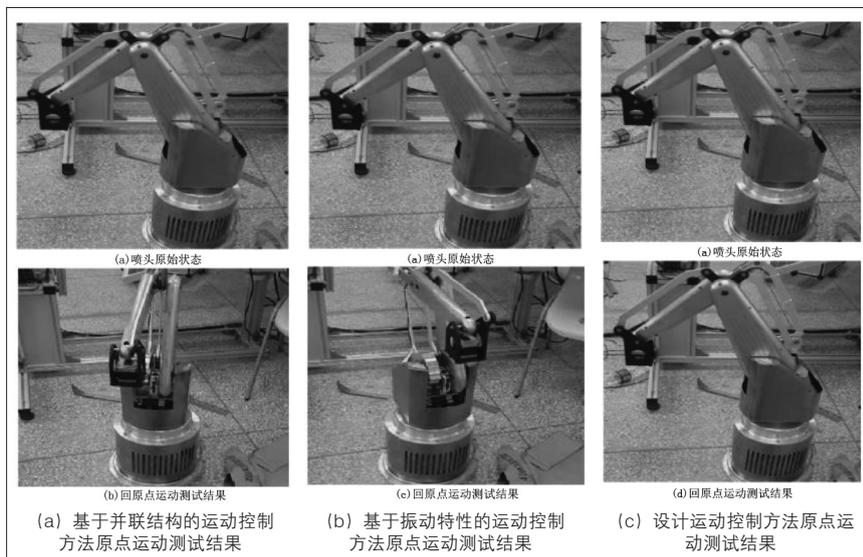


图5 三种运动控制方法原点运动测试结果

法控制喷头运动回原点的运动测试,测试结果如图5所示。

在支持3D打印机喷头运动的程序内,运行三种喷头运动控制方法的控制程序,控制打印机喷头从原始运动起点复位至原始起点。根据上图整理得到的复位测试结果,基于并联结构的运动控制方法并未回归到打印机喷头的原始位置,该种运动控制方法的控制效果较差。基于振动特性的运动控制方法控制的喷头回归至原始位置,但最终喷头偏离了设定喷头运行位置,该种喷头运动控制方法的控制能力较强,但测点标定的能力较弱。所设计的喷头运动控制方法能够控制喷头运动至设定的原始状态,与两种参与测试的喷头运动控制方法相比,所设计的运动控制方法控制效果最佳。

(上接第66页)

取消了光杆及盘根装置,有效杜绝了因盘根盒漏油和光杆断喷油等等隐患,极大的清洁了井口环境,由于取消了地面机械传动装置,正常生产过程中低噪音、无污染,极大提升了作业过程的环保效率。

(3)改进后的井下泵效率显著提升:根据地面工作控制的输出频率,可完成油泵的低冲程生产;选用无杆提升方式,无杆加长,加载的速率会更快,泵效率更高。

(4)综合生产过程的节能环保效果显著:消除了升降杆立柱和冲程损坏造成的故障能耗;启动电流仅为额定电压的110%~150%,解决了为实现运行必须引起的“大马拉小车”难题。低产液井(5吨以下)能耗较基础抽油泵能耗均值有效降低30%以上,中低产液井(5~10吨)能耗降低25%以上。

(5)彻底规避了偏磨断脱现象:由于选用了无杆举升方式,取消了传统的井下抽油杆,无杆举升更适合定向井、气井等独特的井眼运动轨迹的日常生产,从源头上彻底解决了油井偏磨、抽油杆疲劳开裂等问题。潜油柱塞泵系统举升工艺技术在试验的NB35-3-B01井、QK18-1-5D井均取得了较好的实用效果,基本具备了现场大规模使用的标准,可以大规模进

### 3 结语

综合3D打印机喷头的功能与性质,以色彩模糊理论作为算法支持,设计3D打印机喷头运动控制过程。通过设定原点复位测试,在相同的测试平台内,测试得到运动控制过程的性能。结合测试结果可知,设计的喷头运动控制过程能够有效控制喷头运动。在未来运动控制工作中,希望所设计的喷头运动控制方法能够为研究工作提供支持。

### 参考文献:

- [1] 马玉琼,王铁成,郑红伟,等.FDM多喷头3D打印机结构设计及运动研究[J].机床与液压,2019,47(08):29-32.
- [2] 裴未迟,张雪静,纪宏超,等.3D打印机喷头及工作台振动响应特性分析[J].科学技术与工程,2020,20(11):4330-4337.

[3] 张俊,池长城,汤腾飞,等.五自由度混联3D打印机设计与运动学分析[J].中南大学学报(自然科学版),2020,51(10):2822-2833.

[4] 高阳,方成刚,蒋贤辉.水泥3D打印喷头中浆体的流动分析[J].浙江大学学报(工学版),2019,53(03):420-426.

[5] 欧攀,刘泽阳,高汉麟,等.基于柔性材料的双喷头3D打印技术研究[J].工具技术,2019,53(05):24-28.

基金项目:本文系山东工程职业技术大学校内基金项目“基于三维软件熔融成型工艺参数影响快速原型产品质量表面研究”研究成果,(课题编号:kw2201904)。

作者简介:李海霞(1982.11-),女,汉族,山东济宁人,硕士研究生,副教授,研究方向:快速制造。

行推广应用。

### 参考文献:

- [1] 钱坤,胡文瑞,孙延安,等.电潜往复泵举升工艺优化研究与应用[J].油气藏评价与开发,2019,9(01):56-60.
- [2] 黄晓东,姚满仓,雷德荣,等.投捞式电动潜油往复泵研制及现场试验[J].钻采工艺,2018,041(002):82-84.
- [3] 那志强.井下电潜式往复泵举升系统的井筒温度场分布研究[J].内蒙古石油化工,2011(14):133-135.
- [4] 赵磊,杨学云,曲占庆,等.井下电潜式往复泵举升系统设计[J].石油矿场机械,2008,37(002):37-39.
- [5] 雷德荣,姚满仓.国内首次可投捞式电动潜油往复泵深抽技术成功应用[J].新疆石油科技,2016,03(v.26;No.100):6-6.
- [6] 于德亮,齐维贵,邓盛川,等.基于支持向量机沉没度预测的潜油泵冲次优化研究[J].中国电机工程学报,31(27):7.
- [7] 汪方式,杨松,葛静涛.电动潜油往复泵在中低产液量煤层气L型井的应用探讨[J].石化技术,27(12):3.

作者简介:郭太勤(1965.12-),男,汉族,四川人,大专,工程师,研究方向:电潜泵新型技术。