

光 - 电微网下的抽油机井间抽控制方法研究

谢 魏¹, 亢清波², 杨梦石¹, 魏天良¹, 谢宇辰³, 高怡然⁴,
王丽雅⁵, 张胜利¹, 边韶森¹, 蔡毅轩⁶

¹中国石油天然气股份有限公司华北油田分公司油气工艺研究院, 河北 任丘

²中国石油天然气股份有限公司华北油田分公司新能源事业部, 河北 任丘

³北京邮电大学世纪学院自动化系, 北京

⁴国家管网集团北方管道有限责任公司天津维抢修中心, 天津

⁵中国石油天然气股份有限公司华北油田分公司第一采油厂, 河北 任丘

⁶中国石油天然气股份有限公司管道局工程有限公司机械公司(防腐公司), 河北 廊坊

收稿日期: 2025年10月27日; 录用日期: 2025年12月8日; 发布日期: 2025年12月18日

摘要

油田生产中电力系统与油田生产系统相互独立, 但随着光伏新能源利用日益广泛, 其具有时效性强、波动性强的特点, 油田生产必须考虑新能源供能特点, 调整原稳态生产方式。本文考虑荷端约束条件, 根据光伏发电特点, 以提高光伏利用率, 总体节能降耗为目标, 制定了光伏大发期三段运行方法, 光伏发电结束期智能间抽运行方法, 经试验对比, 在光伏大发期可以多消纳绿电9度以上, 总体节电率达到9%以上, 且有一定的产量提升效果。

关键词

抽油机井, 间抽, 沉没度, 示功图, 电参数, 微电网

Research on Inter-Well Pumping Control Method of Oil Pumping Unit Based on Optical-Electrical Microgrid

Wei Xie¹, Qingbo Kang², Mengshi Yang¹, Tianliang Wei¹, Yuchen Xie³, Yiran Gao⁴, Liya Wang⁵, Shengli Zhang¹, Shaosen Bian¹, Yixuan Cai⁶

¹Oil & Gas Technology Research Institute of PetroChina Huabei Oilfield Company, Renqiu Hebei

²New Energy Business Department of PetroChina Huabei Oilfield Company, Renqiu Hebei

³Department of Automation, Century College, Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing

⁴Tianjin Maintenance and Repair Center of National Pipeline Network Group Northern Pipeline Co., Ltd., Tianjin

⁵First Oil Production Plant of PetroChina Huabei Oilfield Company, Renqiu Hebei

文章引用: 谢魏, 亢清波, 杨梦石, 魏天良, 谢宇辰, 高怡然, 王丽雅, 张胜利, 边韶森, 蔡毅轩. 光-电微网下的抽油机井间抽控制方法研究[J]. 石油天然气学报, 2025, 47(4): 745-752. DOI: 10.12677/jogt.2025.474083

⁶Mechanical Company (Anti-Corrosion Company) of PetroChina Pipeline Bureau Engineering Co., Ltd., Langfang Hebei

Received: October 27, 2025; accepted: December 8, 2025; published: December 18, 2025

Abstract

In oilfield production, the power system and the oilfield production system are independent of each other. However, with the increasingly widespread use of photovoltaic new energy, which has the characteristics of strong timeliness and strong volatility, oilfield production must take into account the characteristics of new energy supply and adjust the original steady-state production mode. This paper considers the load-side constraints and, based on the characteristics of photovoltaic power generation, aims to improve the utilization rate of photovoltaics and save energy and reduce consumption overall. A three-stage operation method for the photovoltaic peak period and an intelligent inter-pumping operation method for the end of photovoltaic power generation have been formulated. After experimental comparison, it can absorb more than 9 degrees of green electricity during the photovoltaic peak period, and the overall power saving rate reaches more than 9%, with a certain effect of increasing production.

Keywords

Pumping Well, Intermittent Pumping, Submergence, Dynamometer Diagram, Electrical Parameters, Microgrid

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 概述

在我国油田采油作业中，抽油机采油是应用最广泛的方式。抽油机井的生产效率很大程度依赖于地层供液能力；当地层供液充足，抽油机可连续生产，保障原油高效开采；但当地层供液不足，油井动液面低于泵深时，抽油机空转，不仅浪费大量电能，还加剧井下杆、管磨损，缩短设备使用寿命，增加维护成本[1]。

为解决上述问题，间歇采油(间抽)的抽汲方式被广泛应用。间抽通过合理调控抽油机开井与关井时间，既能提高泵效、节约电能，又能降低设备磨损，实现降本增效。目前，确定间抽制度主要依据沉没度变化规律[2][3]，通过监测抽油机井电参数或示功图来间接计算油井沉没度或泵效[4]，以此判断空抽并确定开、关井时间。

然而，随着油田对光伏等新能源利用日益广泛，现有间抽制度确定方法的缺陷逐渐显现。新能源发电具有时域性强的特点，一段时间内发电量高，另一段时间发电量低。但现有方法仅考虑抽油机井节能需求，未考虑光伏发电的影响，导致无法充分利用能源，在光伏大发期可能出现电能浪费，而在光伏电量低时又无法保障抽油机高效运行。因此，迫切需要一种新的间抽制度确定方法，以适应光伏微电网接入油田配电网的新形势。

2. 国内研究情况

关于低渗透油田间抽运行，王文涛根据低渗透油田在开采过程中动液面变化特点，分析采油生产工

艺和设备特点,研究低渗透、超低渗透油井沉没度变化规律及沉没度与间抽周期关系,确定智能间抽控制系统的需求,提出单井智能间抽控制系统方案[5]。刘合等研究抽油机井在间抽过程中泵抽产量、沉没度以及液面恢复时沉没度随时间的变化特点,建立抽油机井间抽过程中流压变化的数学模型,确定抽油机井的合理间抽区间[6]。梁星原通过电功率曲线求解示功图,通过示功图的变化来确定动液面的下降规律,进而确定出开井时间,通过分析油井流入动态和沉没度变化之间的关系,确定出关井时间,最终获取间抽制度[7]。

上述文献未考虑间抽调度优化运行下的电源频率优化问题,且未充分考虑间抽井运行状态的变化对能源的影响以及单井运行状态频繁变化对抽油机使用寿命的影响。

3. 光-电微网下的抽油机井间抽系统分析

我国目前广泛使用游梁式抽油机进行石油开采,且低渗透油田数量较多,在开采过程中会出现供液不足的问题。随着开采程度不断加深,这个问题越来越严重,经常出现一段时间出液,一段时间不出液的情况,抽油机空转时间占比不断增大,浪费大量电能,加剧井下杆、管磨损,缩短设备使用寿命,增加维护成本。此时现场往往采用间抽的方式进行开采,但是不合理的间抽制度会出现管线冻堵或油井空抽的现象,导致设备的故障率和能耗增加,产液量降低。

因收到地域限制,油田新能源光伏发电主要分布式光伏发电形式,多个光伏发电场形成光-电微网,为现场生产提供能源。在实际应用当中,可采用直流母线技术降低系统能耗。下图1是某油田建设的光伏+微燃机交直流混合微电网,实现了“光伏直发直用,交直流互济互备”,绿电就地消纳,提升系统效率。



Figure 1. On site AC/DC hybrid microgrid structure
图 1. 现场交直流混合微电网结构图

但是在微电网实际运行过程中,光伏绿电及供配电与油气生产系统协同不足,互动较少,光伏出力高峰时段与油气生产有时空错位现象,供用两侧缺乏统一协调,见图2。

具体分析,即油田生产需要稳定的能源供给,但光伏微电网发电时域性强,发电功率不稳定,存在“尖峰时段消纳难”的问题,严重时将会发生弃光现象。另外,光伏供能时,荷端如果有较大功率波动,也会给微电网控制增加控制难度。

为解决这一问题,本文主要针对荷端提出一种抽油机井间抽控制方法,在保持稳定生产前提下,提高光伏利用率,且实现总体节能降耗。

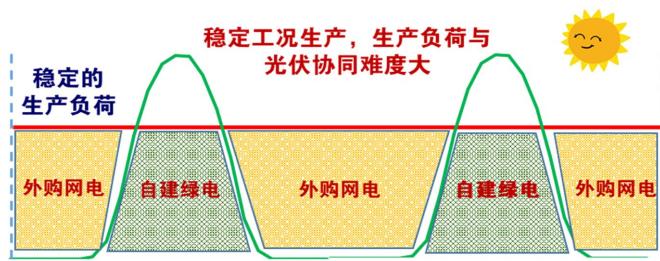


Figure 2. Electricity generation situation of photoelectric microgrid
图 2. 光 - 电微网用电发电情况

4. 光 - 电微网下的抽油机井间抽运行模型

此模型重点在荷端考虑低渗油田生产特性，运用抽油机井示功图及电参数诊断方法，优化抽油机井间抽制度，并做到实时调节；在源端将光伏数据引入间抽系统中协同优化运行。

4.1. 基本条件

荷端抽油机井需具备变频器及中央处理设备，能够控制抽油机启停荷冲次调节。并能够实时采集抽油机电参数，进行泵况分析，根据泵况进行实时调节功能。

源端具备数据共享能力，能够预测一段时间光伏发电能力，且做到发电数据的实时共享。

4.2. 模型约束条件

1) 单井日产量约束。为全面地考虑油井产能，模型引入单井日产量约束，明确规定油井在给定时间内的产量下界。在光 - 电微网复杂生产环境下，该约束在实际调度中对于确保实际生产过程的产液量目标十分重要。单井日产量约束表示为[8]：

$$\sum_{t=1}^T Q_t U_w^t \Delta t \geq Q_z \quad (1)$$

其中， Q_z 为油井在 T 时间内的产量下界； Q_t 为油井在 t 单位时间内的具体产能； U_w^t 是油井在 t 时刻的开关状态，开井时为 1。

2) 单井连续开井和关井时长约束。间抽井如果频繁启停，会加剧设备损耗。因此引入单井连续开井或关井时长约束，明确开关时长范围，保障间抽井的稳定运行，提高设备的使用寿命。间抽井单次开井的时长需满足如下约束

$$T_{\max} \geq \sum_{t=1}^T U_w^t \Delta t \geq T_{\min} \quad (2)$$

其中， T_{\min} 为间抽井累计采油时长下界； T_{\max} 为间抽井累计采油时长上界。

3) 为防止抽油机频繁启停，并且使油井的产能充分恢复的同时避免抽油机因为关井时间过长而导致油井冻堵，抽油机单次关井的时长需满足要求为

$$T_2 \geq T_{si} \geq T_1 \quad (3)$$

其中， T_{si} 为第 i 次关井持续时间； T_2 为油井管道停输最长时间； T_1 为油井最低压力恢复时间。

4.3. 抽油机井沉没度计算方法

在抽油机间抽井实际运行中，需要实时监测抽油机井动液面情况，当动液面接近泵吸入口时需要立即停机避免抽油机抽空。一般抽油机井沉没度计算采用功图法计算，但因为目前现场功图采集局限性，最快只能达到一小时一张功图，对于间抽井的监测来说时间间隔太久。而电参数的采集可以达到秒级，

且电参数变化同样能够反映悬点载荷的变化情况，因此本模型计算沉没度采用电参数反推示功图，再通过反推的示功图计算的方法。

4.3.1. 电功率曲线反演泵示功图

首先根据功率和扭矩、载荷和扭矩之间的关系，建立载荷和功率之间的12个数学模型，由于篇幅关系，不一一展开。然后根据这12个模型进行联立求解，解得功率和载荷直接的关系： $P=f(I)$ 。通过曲柄转角求得位移曲线，因此，可以通过电功率曲线获得地面示功图曲线。

得到地面示功图后，通过基伯斯波动方程求解得到泵示功图[9]-[11]。

4.3.2. 示功图计算沉没度方法

通过泵功图上死点和下死点受力，可得到沉没度计算公式：

$$H = \frac{\frac{\pi}{4} \rho_l g L \pi D_y^2 - (F_{up} - F_{down} - F_{oil})}{\rho_o g A_z} \quad (4)$$

其中， L 为泵深，m； A_z 为抽油杆柱塞面积，m²； D_y 为油管内径，m； ρ_o 为原油密度，kg/m³； ρ_l 为混合液密度，kg/m³； F_{up} 为上冲程静载荷，N； F_{down} 为下冲程静载荷，N； F_{oil} 为油压产生的压力，N。

4.4. 抽油机井光伏发电间抽控制三段法

目标是在光伏大发时期保持间抽井运行状态，以最大限度消纳光伏发电，且保持一定间抽井沉没度，不发生抽空现象。

首先假定已获取光伏大发起始时刻 t_0 ，光伏大发终止时刻 t_z ，持续时间为 T ；并且根据约束条件，假定抽油机井在 t_0 时刻，油井沉没度已恢复至正常生产水平 H_0 ；已知间抽井正常生产时的沉没度变化曲线，正常运行冲次为 N_0 ，正常生产至动液面抽空关井时间 T_z ，且 T 远大于 T_z 。

第一阶段，为沉没度快速下降阶段。此阶段主要通过沉没度快速下降，从而降低生产压差，增加恢复液量。此阶段冲次为 $N_1 = N_0$ ，开始运行时刻为 t_0 时刻。

结束时刻为 t_1 ，按下述方法判断。

监测时刻 t_i 抽油机运行电参数，得到 t_i 时刻油井沉没度 H_i ，当以下条件满足时，记为 t_1 时刻。

$$H_i \leq H_0 / 3 \quad (5)$$

第二阶段，为平稳生产阶段。此阶段生产特点为适当降低冲次尽量延长生产时间。此阶段的冲次 N_2 确定方法为：

$$N_2 = N_0 / n \quad (6)$$

其中， n 为冲次调整参数，可预设为2。

此阶段起始时刻为 t_1 ，结束时刻 t_2 按下述方法判断。

监测时刻 t_i 抽油机运行电参数，得到 t_i 时刻油井沉没度 H_i 。然后在 Δt 时间间隔后，再次监测此时时刻 t_{i+1} 抽油机运行电参数，同样计算出此时刻油井沉没度 H_{i+1} ，通过下述方法计算斜率值，若斜率值低于设定值 ε_1 ，则确定此时刻为第二阶段结束时刻 t_2 。

$$\left| \frac{H_i - H_{i+1}}{t_i - t_{i+1}} \right| \leq \varepsilon_1 \quad (7)$$

第三阶段为沉没度维持阶段。此阶段的冲次 N_3 以变频器可能达到的最小冲次运行，尽可能维持生产时间而泵不发生抽空。此阶段的起始时刻为 t_2 ，结束时刻 t_3 由以下方法确定。

参考第二阶段判断方法，计算 Δt 时间间隔的沉没度下降斜率值，若斜率值低于设定值 ε_2 ，则确定油井即将抽空，必须关井。

$$\left| \frac{H_i - H_{i+1}}{t_i - t_{i+1}} \right| \leq \varepsilon_2 \quad (8)$$

三段法的沉没度下降曲线见图 3。

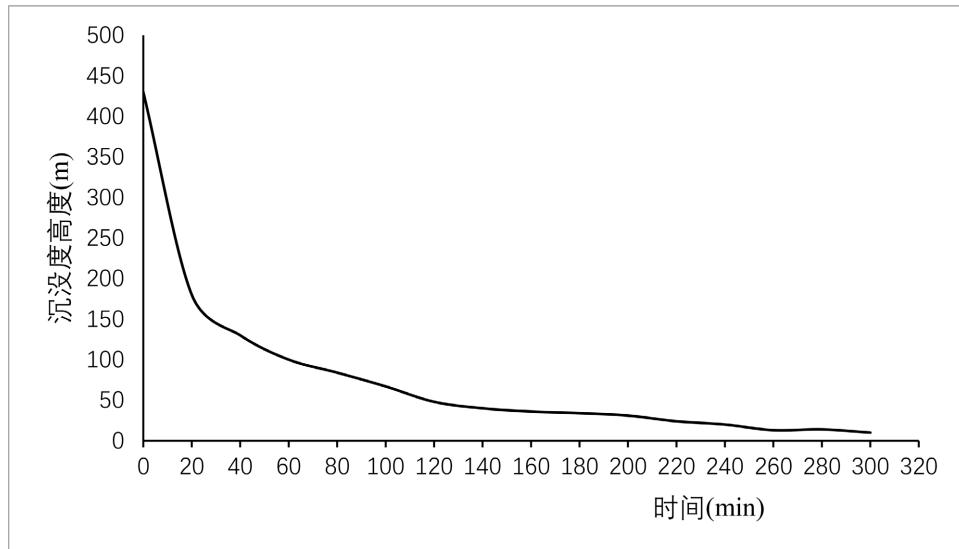


Figure 3. The sinking degree decline curve of three-stage method

图 3. 三段法沉没度下降曲线

在间抽井运行周期，需实时测试电参数数据，根据实际运行情况进行冲次调整。如果 $t_2 < t_z < t_3$ ，则认为三个阶段冲次运行参数 N_1 、 N_2 、 N_3 设置合理；如果 $t_z < t_2$ ，则认为第二阶段 N_2 运行参数太小，应适当减小 n 值；如果 $t_z > t_3$ ，则认为第二阶段 N_2 运行参数太大，应适当增大 n 值。具体算法流程见下图 4。

4.5. 抽油机井光伏发电结束间抽控制方法

目标是通过间抽控制，保证油井产量，且具有一定节能降耗潜力。根据开井时长约束条件，间抽井柔性负荷控制需满足：

$$\text{总开井时间 } T_x \geq T_{\min}$$

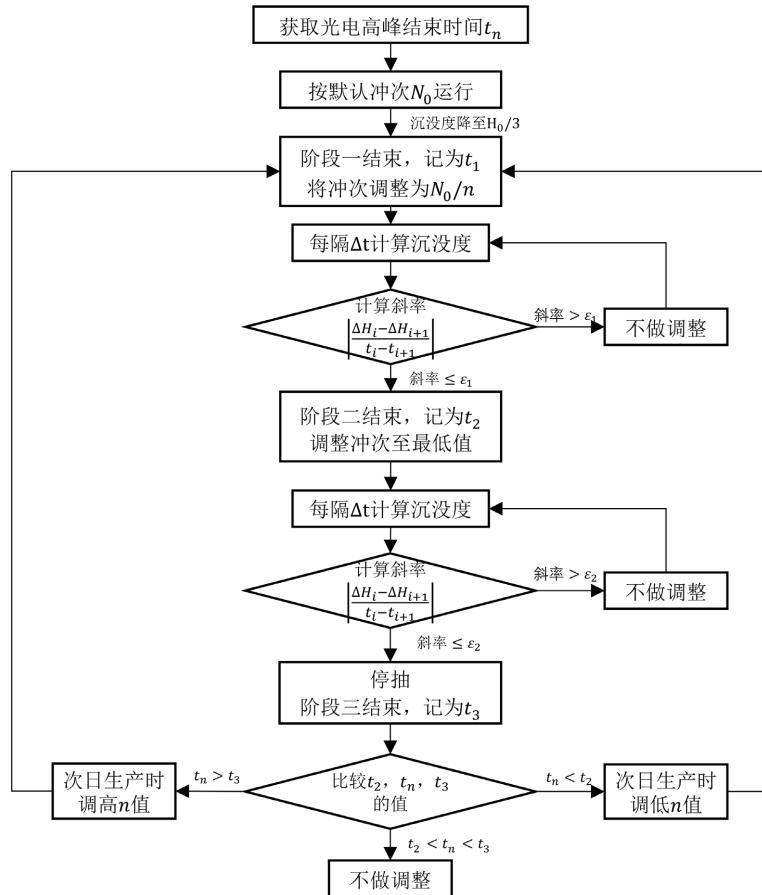
其中， T_{\min} 为智能间抽寻优制度总开井时间。可以采用保持原智能间抽制度运行，或适当延长关井时间的方法进行控制，保证总开井时间等于或大于 T_{\min} 。

5. 试验情况

为验证研究模型的可行性，选取某油田第四采油厂两口间抽井进行现场试验分析。

1 号井日产液 3.2 吨，泵深 1800 米，泵径 32 毫米，原智能间抽制度为开井 1.5 小时，冲程 4.8 米，冲次 4 次，停井 1.5 小时，日耗电 88 度。

2 号井日产液 2.5 吨，泵深 1960 米，泵径 32 毫米，原智能间抽制度为开井 1 小时，停井 1.5 小时，冲程 4.8 米，冲次 4 次，日耗电 76 度。

**Figure 4.** Algorithm flowchart**图 4. 算法流程图**

仿真实验采用独立试验柜，包括电参数采集、功图采集、智能间抽制度控制策略，并安装单井计量装置，实时监测油井产液和含水状况，现场数据实时反馈给后台服务器，服务器根据现场数据进行计算分析，调整控制策略。试验模拟光伏大发期为 10 点到 13 点半，共计 3.5 小时。

两口井各采用智能间抽策略运行一星期，监测数据；然后根据仿真实验条件和光-电微网下的抽油机井间抽运行模型再次运行一周，监测数据。下表是具体试验数据。

从下表 1 中可以看到，采用微电网模型控制策略，与原智能间抽制度相比，在光伏大发期可以

Table 1. Comparison of experimental data**表 1. 试验数据对比**

井号	系统控制策略		光伏大发期 能耗(度)		其余时间能耗 (度)		总能耗(度)		日产量(方)		
	智能间抽	微网模型		智能 间抽	微网 模型	智能 间抽	微网 模型	智能 间抽	微网 模型	智能 间抽	微网 模型
		光伏大发期	其余时间								
1	开 1.5 小时， 停 1.5 小时	3.5 小时常开	开 1.5 小时， 停 2 小时	11	20	77	59.5	88	79.5	3.2	3.6
2	开 1 小时停 1.5 小时	3.5 小时常开	开 1 小时停 2 小时	11.8	21	64.2	48	76	68	2.5	2.7

多消纳绿电 9 度以上，在使用系统电时可节电 16 度以上，总体节电率达到 9%以上，而且采用微电网模型控制策略可保持油井日产量不变甚至稍有提升，总体达到在保持稳定生产前提下，提高光伏利用率，且实现总体节能降耗的目标。

参考文献

- [1] 于小明, 何贯中, 金英兰. 抽油机井间抽制度合理性研究[J]. 大庆石油地质与开发, 2006, 25(4): 78-79.
- [2] 关宁, 欧阳华章, 李华. 抽油机低效间抽井产液变化规律[J]. 油气田地面工程, 2006, 25(2): 17-18.
- [3] 周代余, 梁政. 低效油井合理间歇抽油制度设计方法研究[J]. 钻采工艺, 2003, 26(1): 52-55.
- [4] 谢朝阳, 周好斌. 基于动液面控制的抽油机变频控制系统[J]. 石油机械, 2009, 37(9): 122-124.
- [5] 王文涛. 基于动液面的油井智能间抽控制系统与应用研究[D]: [硕士学位论文]. 西安: 西安石油大学, 2021.
- [6] 刘合, 高甲善, 王雪艳. 关于抽油机井合理间抽制度的研究[J]. 石油钻采工艺, 2000, 22(1): 69-72.
- [7] 梁星原. 供液不足井智能间抽制度优化研究与应用[D]: [硕士学位论文]. 北京: 中国石油大学(北京), 2016.
- [8] 高小永, 李晨龙, 檀朝东, 等. 无储能光-电微网下的抽油机井群间抽混合整数非线性优化方法[J]. 石油钻采工艺, 2023, 45(6): 776-778.
- [9] Gibbs, S.G. (1963) Predicting the Behavior of Sucker-Rod Pumping Systems. *Journal of Petroleum Technology*, **15**, 769-778. <https://doi.org/10.2118/588-pa>
- [10] 张琪, 吴晓东. 抽油井计算机诊断技术及其应用[J]. 华东石油学院学报, 1984(2): 145-159.
- [11] 张丽华, 李琨, 孙川, 等. 基于 Gibbs 模型的有杆抽油系统泵功图研究[J]. 钻采工艺, 2016, 39(2): 83-86.