◀XXXX▶

基于共直流母线与超级电容的抽油机能量互馈系统研究*

詹先波[1] 王 波[1] 张文英[2] 姚伟龙[1] 杜 爽[1] 王贻斌[1] 王 津[3]
（1. 中石油煤层气有限责任公司韩城分公司 2. 宝石电气设备有限责任公司 3. 西南石油大学机电工程学院）

詹先波，王波，张文英，等. 基于共直流母线与超级电容的抽油机能量互馈系统研究［J］. 石油机械，XXXX，XX（XX）：1-7.

Zhan Xianbo，Wang Bo，Zhang Wenying，et al. Research on an energy inter-feeding system based on common dc bus and supercapacitor for pumping units［J］. China Petroleum Machinery，XXXX，XX（XX）：1-7.

摘要：游梁式抽油机在煤层气排水采气中应用广泛，受四连杆机构运动特性及井下载荷非恒定性影响，驱动电机每冲次内呈现电动—发电—电动循环，下行程产生的再生制动能量造成能量浪费，并降低电网供电质量与电机功率因数，恶化电网供电质量。针对该问题，本文提出一种基于共直流母线与超级电容的能量互馈系统，实现高效的能量回收与再利用。首先构建了以共直流母线为核心的电能分配拓扑，将多口油井的驱动系统并联，实现井间能量的直接互馈与平衡；并设计了以超级电容为储能单元、双向DC-DC变换器为接口的能量管理子系统，以直流母线电压为控制目标，在电压越限时快速切换充放电模式，平抑母线电压波动。其次，基于扭矩-功率关系及现场工况建立电机功率特性模型，通过仿真实验确定了8型抽油机单次倒发电功率约6 kW，据此完成了超级电容组容量1.5 F、耐压720 V的选型设计。以韩城煤层气区块某井场开展工业性试验，结果表明：接入双向DC-DC模块后，直流母线电压波动由600~680 V缩至600~630 V，稳压效果显著；超级电容单次下行程最大储能量达73 631 J，存储能量在后续上行程释放辅助驱动。节能方面，8型、6型和5型抽油机日耗电量分别降低13%、8.7%和5%，机型越大节能效果越显著。因此，基于共直流母线与超级电容的能量互馈系统有效抑制了再生制动能量对电网的冲击，为煤层气井场抽油机节能降耗提供了可行方案。

关键词：抽油机；储能；共直流母线；超级电容
中图分类号： **文献标识码：** DOI：10.12473/CPM.202605078

Research on an Energy Inter-Feeding System Based on Common DC Bus and Supercapacitor for Pumping Units

Zhan Xianbo[1] Wang Bo[1] Zhang Wenying[2] YAO WEILONG[1] DU SHUANG[1] WANG YIBIN[1] WANG JIN[3]
（1. *Hancheng Branch of Petro China Coalbed Methane Company*, *Hancheng* 714000; 2. *Baoshi Electrical Equipment LLC*, *Beijing* 100192; 3. *School of Mechatronic Engineering*, *Southwest Petroleum University*, *Chengdu*, 610500）

Abstract: Beam pumping units are widely used in coalbed methane drainage and gas recovery. Due to the kinematic characteristics of the four-bar linkage mechanism and the non-constant downhole load, the driving motor undergoes a motoring-generating-motoring cycle within each stroke. The regenerative braking energy generated during the downstroke causes energy waste, reduces the power factor of the motor, and degrades the power

* 基金项目：四川省自然科学基金面上项目“超长水平井钻柱系统粘滑振动机理及分布式磁阻尼减振特性研究”（2025ZNSFSC0369）；中国石油科技创新基金“基于螺杆-钻头-岩石数字化模型的万米特深井钻柱动态特性研究”（2024DQ02-0146）。

© Editorial Office of *China Petroleum Machinery*. OA under CC BY-NC-ND 4.0

supply quality of the grid. To address this issue, this paper proposes an energy inter-feeding system based on a common DC bus and supercapacitors to achieve efficient energy recovery and reuse. First, a power distribution topology centered on a common DC bus was constructed, connecting the drive systems of multiple wells in parallel to realize direct inter-well energy inter-feeding and balance. An energy management subsystem was also designed, utilizing supercapacitors as the energy storage unit and a bidirectional DC-DC converter as the interface. Taking the DC bus voltage as the control target, the system rapidly switches between charging and discharging modes when the voltage exceeds the limits, thereby suppressing bus voltage fluctuations. Second, a motor power characteristic model was established based on the torque-power relationship and field conditions. Simulation experiments determined that the peak regenerative power of a Type 8 pumping unit during a single downstroke is approximately 6 kW, based on which a supercapacitor bank with a capacity of 1.5 F and a rated voltage of 720 V was selected. Industrial field tests were conducted at a well site in the Hancheng Coalbed Methane Block. The results show that after integrating the bidirectional DC-DC module, the DC bus voltage fluctuation was reduced from 600 – 680 V to 600 – 630 V, demonstrating a significant voltage stabilization effect. The supercapacitors achieved a maximum energy storage of 73,631 J during a single downstroke, and the stored energy was released during the subsequent upstroke to assist in driving. In terms of energy savings, the daily power consumption of Type 8, Type 6, and Type 5 pumping units decreased by 13%, 8.7%, and 5%, respectively, indicating that larger unit types yield more significant energy-saving effects. Therefore, the proposed energy inter-feeding system based on a common DC bus and supercapacitors effectively mitigates the impact of regenerative braking energy on the power grid, providing a feasible solution for energy conservation and consumption reduction in coalbed methane well sites.

Keywords: Pumping unit; energy storage; common DC bus; Supercapacitors

1　引　言

游梁式抽油机作为油气田的关键设备得到广泛应用[1-3]，其结构包含电机、减速器、曲柄、平衡配重块、四连杆机构、游梁及驴头等核心部件[4]。相较于其他类型抽油机，它凭借两大显著优势确立了其主导地位：首先是高可靠性，其基于相对简单的四连杆机构设计，带来了加工制造便捷、持久耐用、适应性强以及运行稳定等突出优点，被油田企业公认为性能最为可靠的抽油设备[5-7]；其次是操作维护简便且运行成本低廉[8-10]。目前国内油田采用的新型抽油机，年维修成本通常是游梁式的4~5倍，且需专业技术人员维护，这些高昂的运行成本阻碍了其大规模推广。因此，在未来相当长时期内，游梁式抽油机仍将是国内油田的主力机型[11]。

尽管游梁式抽油机优势突出，但其自身也存在不可忽视的问题[12-14]。首要问题源于井下载荷的非恒定性：为确保生产，油田通常按最大载荷选配驱动电机，导致电机长期处于低负载运行状态，效率与功率因数显著偏低[15-16]。其次在于运行过程中的能量不平衡问题：理想状态下，配重块下降释放势能提升抽油杆时，其势能减少应与负载势能增加相平衡；反之亦然[17]。然而，受限于抽油机结构及负载特性，这种平衡难以实现。由于电机转速恒定，在每个运行周期内，不可避免地会出现负载或配重块拖动电机产生再生发电（倒发电）的现象。这不仅降低了电网的供电质量，也进一步拉低了电机的功率因数[18]。

在抽油机节能技术领域，国内外研究主要围绕以下几方面展开[19-21]：a）开发结构创新的抽油机型；b）研制适配抽油机特殊工况的节能电动机；c）应用高效节能配电箱技术；d）优化平衡系统设计；e）推广高效节能泵的使用。然而，现有研究对倒发电能量的回收与利用多局限于单机或单井，缺乏对多井场整体能量互馈和快速储能的系统解决方案。

基于上述问题，本文提出一种基于共直流母线与超级电容的能量互馈系统，实现下行程回馈能量的高效回收与利用。该系统通过共直流母线将井场多口井连为整体，实现井间能量互馈；同时，采用超级电容及双向DC-DC变换器，实现下行程能量的快速吸收与上行程释放，改善电网冲击并提升抽油机整体能效。与现有方案相比，本系统具有多井能量互馈、快速储能与释放、适配

性强等优势。

2　抽油机储能系统及结构

2.1　储能系统总体方案设计

将井场各气井视作一个整体，通过共直流母线进行电能转换和分配；针对倒发电能量，通过共直流母线直接对其它井场抽油机进行供电；在这个过程中，回收的能量经超级电容进行快速转换收集后，经直流母线根据实际需要分配电能，整个系统对倒发电能量进行回收利用分配，如图1所示。

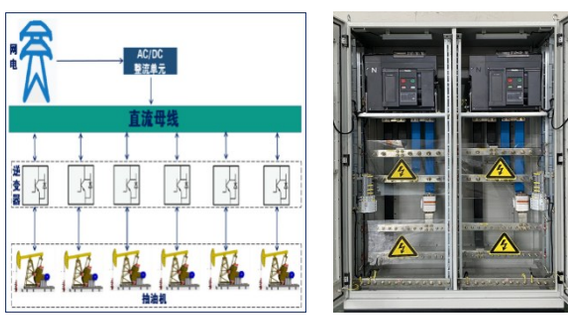


图1　共直流母线拓扑图及控制柜

Fig. 1　Common DC Bus topology diagram and control cabinet

为实现既定目标，系统需对直流母线电压进行高速、高精度采样，并将结果实时送入主控单元，由主控单元完成运算后立即发出充/放电指令；同时须配置一套储能模块，当充电通道导通时，该模块可迅速“吞入”回馈能量，抑制母线电压飙升；当放电通道导通时，又能把先前储存的能量“反哺”回母线，瞬间抬升电压，从而将母线电压稳在设定区间，整体架构见图2。

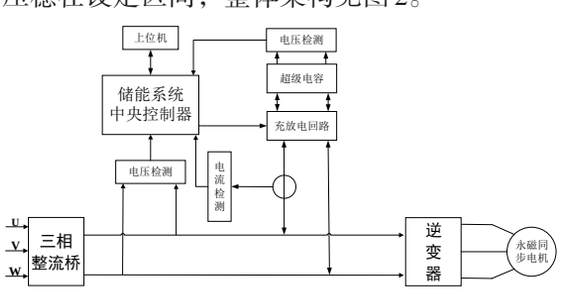


图2　能量互馈系统整体结构图

Fig. 2　Overall structure of the energy feed system

2.2　中央控制系统设计

本系统的控制方案主要是实现对各功能子模块的统一管理与一体化控制。具体控制逻辑如下：系统核心任务是实时监测直流母线电压。鉴于中浅层煤层气游梁式抽油机普遍采用380V工频供电，经整流后直流母线理论电压为540V。在考虑环境误差后，系统设定520 V至560 V为正常工作区间。考虑实际井场电网电压存在波动，系统采用滞环比较控制策略，当检测到母线电压超过上限阈值（630 V）时，立即开通超级电容充电回路；当电压低于下限阈值（600 V）时，则开通放电回路。滞环宽度设置为30 V，以防止系统在阈值点附近频繁切换。

此外，控制系统还必须具备快速响应能力，能对检测信号进行实时且精确的处理与判断，并迅速发出控制指令。在安全方面，系统集成了多重保护机制：当检测到充放电电流过载时，自动触发过流保护；当储能单元电压超过其额定值时，则启动过压保护。

最后，系统还配备了抗干扰能力强的人机交互界面，不仅用于实时显示运行状态，还允许用户根据实际需求调整系统参数，使设备运行状态直观可视，操作便捷。中央控制系统的控制策略图如图3所示。

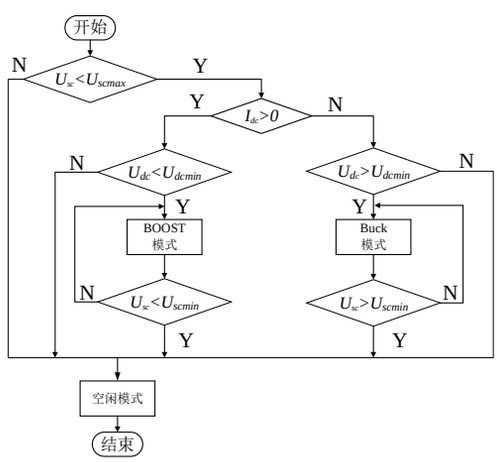


图3　中央控制系统控制策略框图

Fig. 3　Control strategy of the central control system

3　抽油机驱动电机功率特性仿真分析

3.1　抽油机电机功率特性研究

抽油机在工作过程中，驱动电机输出的高转速先经一级皮带轮传动，被降速并提升扭矩后传导至减速器输入轴。该动力再经减速箱进一步处理，实现最终的减速与增扭，从而驱动曲柄轴带动曲柄完成连续的圆周运动。根据扭矩与功率的计算关系，可得：

$$p_m = \frac{\pi \cdot T_n \cdot n_m}{30 \times i_1 \cdot i_2 \cdot \eta_m^k} \tag{1}$$

式中：p_m为电机输出功率，W；T_n为曲柄轴扭矩，

N·m；n_m为电机输出转速，rpm；i_1为皮带轮传动比；i_2为减速箱传动比；η_m为电机轴到曲柄轴之间的传动效率；k为指数：当T_n>0时，k=1；T_n<0时，k=−1。

从上式可以看出，电机输出功率同电机转速和曲柄轴扭矩成正比，并与传动系统的总传动比成反比。

3.2　超级电容选型研究

在中浅层煤层气井排水采气过程中，使用的游梁式抽油机对应的变频器额定功率多为11 kW、15 kW，拟选配22 kW（或30 kW）变频器+超级电容进行现场试验，根据现场抽油机冲程冲次及用电参数匹配相关电容内部参数，实现超级电容对现场抽油机运行最优匹配。图4为超级电容单模组电容电压电流变化图，单模组容量为6 F，耐压值DC180V。

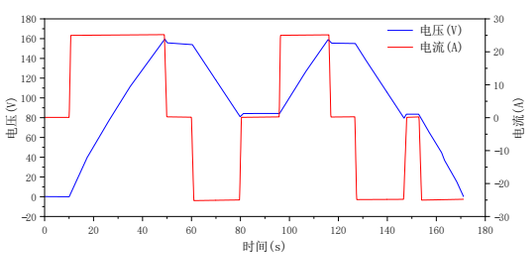


图4　超级电容充放电过程电压电流变化曲线

Fig. 4　Voltage and current curves during supercapacitor charge-discharge cycle

确定电容容量是系统设计的关键环节，其取值通常需要在理论计算值之上预留充分的裕度。从系统安全性考虑，足够的余量能够有效吸收和抑制运行过程中可能出现的意外电压过冲或电流尖峰，防止电容器因瞬时过载而损坏，从而提升整个系统的鲁棒性与可靠性。从长期运行稳定性考虑，电容器在实际使用中，其容量会随着环境温度波动以及自身老化而不可避免地发生衰减。预先设置的容量裕度可以补偿这种由时间和环境因素造成的性能下降，确保系统在全生命周期内都能满足性能要求，进而增强其环境适应力与使用寿命。

根据超级电容在充放电过程中的计算公式，系统的超级电容组的容量可表示为：

$$\Delta E = \frac{1}{2}C\left(U_2^{\,2} - U_1^{\,2}\right) \qquad (2)$$

式中：ΔE为超级电容组储存的能量，J；C为超级电容组容量的理论值，F；U_1、U_2为超级电容最小、最大电压，V。

本文拟采用4个超级电容串联模式，因此其耐压值达到DC720V，而容量降为1.5 F。8型抽油机单次倒发电功率在P=6 kW，8型机单日倒发电28 kWh；

制动单元输出电压在DC300V，则制动电流I=6000/300=20 A；由上图只超级电容模组电流值25 A>20 A满足现场需求；

按照满充半放的要求，超级电容理论容量为230 400 J，超级电容模组可吸收全部倒发电能并实现实时充放，满足现场需求。

4　现场实施效果分析

4.1　共直流母线技术在井场应用

通过现场试验开展了共直流母线技术验证，分析了韩城煤层气区块两个井场在使用共直流母线技术前后的能耗，如图5所示：

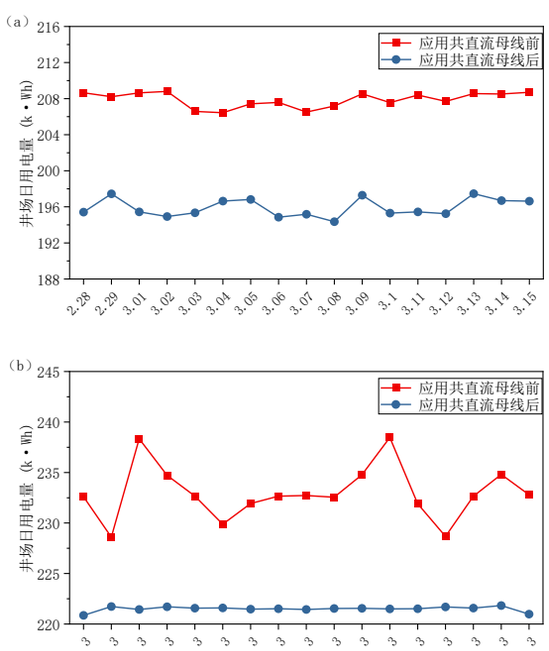


图5　井场1和井场2日耗电量

Fig. 5　Daily power consumption of Well site 1 and Well site 2

从图中可以看出，两个井场在使用共直流母线技术后，能耗都有显著降低，分别降低5.7%和4.9%。

4.2　超级电容储能实验结果

对韩城某口煤层气井进行了超级电容储能和共直流母线技术的现场应用，分别采用超级电容直连和超级电容与双向DC-DC技术应用，现场测试如图6所示。通过对抽油机下行过程中，变频器制动电阻的做功测量，在一个下放行程做功约为73 000 J，超级电容单个模组最大电压为180 V，采

用4个模组串联，其最大耐压为720 V。而为了充分利用超级电容进行充放电，选择最小耐压为最大耐压一半，即360 V。通过公式（2）可得，需选用的定容容量为1.11 F。为避免过充等情况，因此选择超级电容容量为1.5 F。

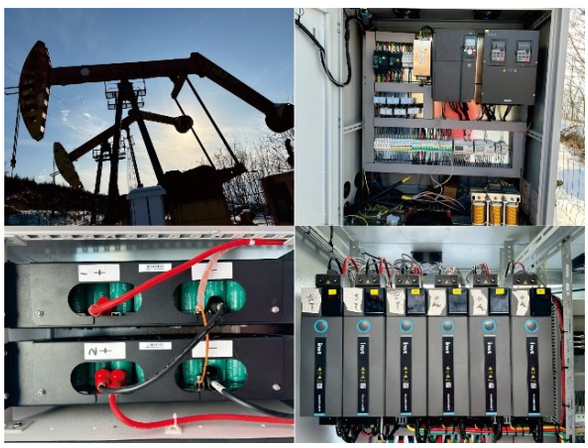


图6　现场测试照片

Fig. 6　Field test pictures

在实验过程中，通过外接DC-DC和未接DC-DC时，超级电容为电机供电，其直流母线端电压波动如下图所示：

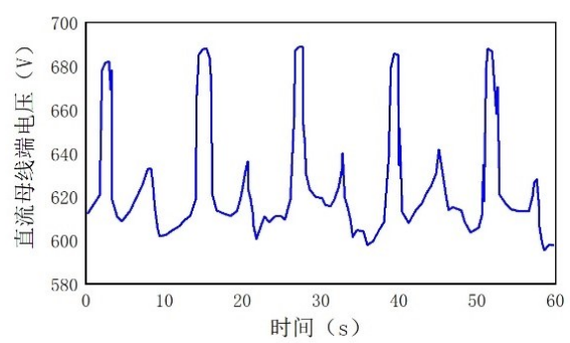


图7　无DC-DC直流母线端电压

Fig. 7　DC Bus Voltage Without DC-DC module

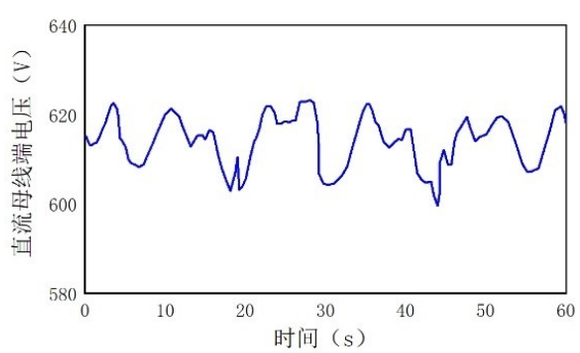


图8　有DC-DC直流母线端电压

Fig. 8　DC Bus Voltage With DC-DC module

从图7和图8可以看出，当系统无DC-DC模块时，共直流母线端电压波动较大，在600V到680V之间波动，而接入DC-DC模块后，电压波动范围在600V-630V之间。主要是因为实际井场电网电压存在波动，导致实测的直流母线电压基线在600V左右，高于基于380V交流电的理想整流值。

同时测量了七个冲次直流母线和超级电容端的电压变化，如下表所示：

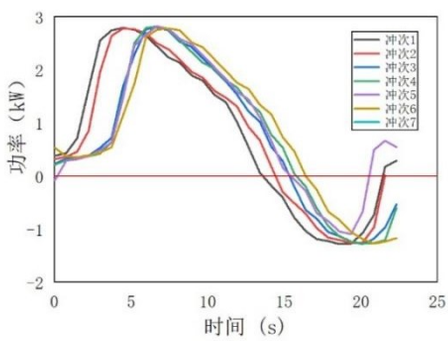


图9　基于电参数电功图

Fig. 9　Power diagram Based on the electrical parameter

表1　直流母线和超级电容侧电压变化

Table 1　Voltage changes on the DC bus and supercapacitor

组别	冲时冲次	直流母线侧		超级电容侧		
		峰值电压/V	最低电压/V	峰值电压/V	最低电压/V	超级电容储能/J
1	1.02	624	608	690	618	70632
2	1.06	624	610	691	623	67014
3	0.99	623	604	690	622	66912
4	1.00	622	599	692	617	73631
5	1.03	619	607	692	618	72705

从图9可以看出，当功率为负时，表示此时电机处于发电状态，为超级电容充电。从表7可以看出，最大储能为73631J，最小储能为66912J，超级电容储存的电能将在下一个上行程为电机供电。

对比分析了8型、6型和5型三种功率抽油机在使用超级电容储能前后的能耗情况，如图10所示。从图10可以看出，在应用超级电容储能技术后，抽油机的日耗电量明显降低，分别降低13%、8.7%和5%。分析原因，大机型通常用于更深、载荷更大的油井，其上下行程的势能差更大，导致平衡系统更难做到完美平衡，由此产生的再生制动能量的绝对值和占比也更高。并且实验期间，密切监控了各试验井的产液量、动液面等关键生产参数，数据显示工况基本稳定，排除了因产量大幅下降导致能耗降低的可能性。因此，可以得到机型越大，日耗电量降低比例越大。

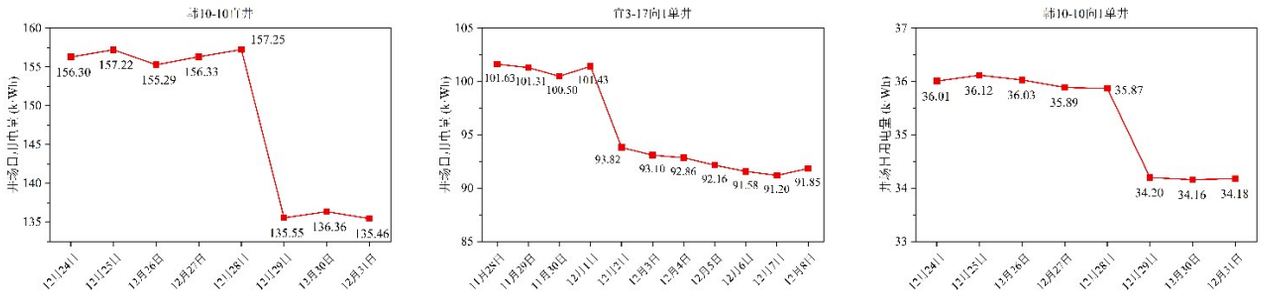


图 10　单机日耗电量(a、b、c 分别为 8 型机、6 型机和 5 型机)

Fig. 10　Daily power consumption per Unit (a, b, c for Type 8, 6, 5)

5　结　论

(1) 分析了抽油机能量回馈原理，设计了共直流母线和超级电容储能对抽油机下行程能量回收的能量互馈系统，通过现场实验分析，验证了方案的可行性，稳压效果显著；超级电容单次下行程最大储能量达 73631 J。

(2) 基于抽油机与电网络情况完成了超级电容选型，超级电容储能适用于倒发电较严重的抽油机，节能效果与电机负载率呈正相关关系，且越大的机型节能效果越好，单机日耗电量最高可降低 13%。

(3) 基于共直流母线和超级电容的抽油机能量互馈技术的节能效果均与抽油机倒发电有着直接关系，因此这两种技术均可在深层煤岩气项目中使用，抽油机倒发电随着抽油机机型增大而增大，这两项技术的节能效果会更好。

参　考　文　献

[1] 商宇璠，黄立华，万书亭，等. 基于电流-位移曲线下面积的游梁式抽油机平衡度计算方法 [J]. 科学技术与工程，2026，26 (09)：3763-3770.
SHANG Y F，HUANG L H，WAN S T，et al. Calculation Method of Pumping Unit Balance Values Based on Area under Current-Displacement Curve [J]. Science Technology and Engineering，2026，26 (09)：3763-3770.

[2] 闫莹. 深井梁式抽油机节能采油控制系统研究 [D]. 西安石油大学，2025.
YAN Y. Research on energy-saving oil recovery control system of deep-well beam pumping unit [D]. Xi'an Shiyou University，2025.

[3] 徐国泰，李建威，孙烽尧，等. 游梁式抽油机胶带自动张紧控制系统设计 [J]. 石油机械，2019，47 (8)：100-106. DOI：10.16082/j.cnki.issn.1001-4578.2019.08.016.
Xu Guotai，Li Jianwei，Sun Fengyao，et al. Design of Automatic Tension Control System for Beam Pumping Unit Belt [J]. China Machinery Petroleum，2019，47 (8)：100-106. DOI：10.16082/j.cnki.issn.1001-4578.2019.08.016.

[4] 张传新，姚金杭，孔有为，等. 变频驱动游梁有杆泵系统仿真与频率优化研究 [J]. 石油机械，2025，53 (01)：98-105.
ZHANG C X，YAO J H，KONG Y W，et al. Simulation and Frequency Optimization Research of Variable Frequency Driven Beam Pump System [J]. China Petroleum Machinery，2025，53 (01)：98-105.

[5] 杨胡坤，戴永钦，韩佰超，等. 滚珠丝杠直驱抽油机结构改进及性能分析 [J]. 机械设计与研究，2024，40 (05)：182-186+192.
YANG H K，DAI Y Q，HAN B C，et al. Structure Improvement and Performance Analysis of Ball Screw Direct Drive Pumping Unit [J]. Machine Design & Research，2024，40 (05)：182-186+192.

[6] Chen Z，Zhang J，Zhang Y，et al. Research on Key Technology of Intelligent Beam Pumping Unit Based on Clean Oil Production Concept [J]. Journal of Physics：Conference Series，2025，3048 (000)：012007.

[7] WANG J，GUO Q Y，FU C L，et al. A novel optimization scheme for structure and balance of compound balanced beam pumping units using the PSO，GA，and GWO algorithms [J]. Petroleum Science，2025，22 (3)：1340-1359.

[8] 叶哲伟，刘章，刘兵，等. 基于卷积变分自编码器的游梁式抽油机示功图样本扩展方法 [J]. 石油机械，2026，54 (01)：10-19.
YE Z W，LIU Z，LIU B，et al. A Sample Expansion Method for Beam Pumping Unit Dynamometer Cards Based on Convolutional Variational Autoencoder [J]. China Petroleum Machinery，2026，54 (01)：10-19.

[9] 王青华，邹洪岚，晏军，等. 抽油机井恒功率变频控制系统研究 [J]. 石油机械，2024，52 (02)：

99-106.
WANG Q H, ZOU H L, YAN J, et al. Research on Constant-Power Frequency Conversion System for Beam Pumping Units [J]. China Petroleum Machinery, 2024, 52 (02): 99-106.

[10] 王波. 吊重平衡前置式游梁抽油机的研究与应用 [D]. 中国石油大学（华东），2022.
WANG B. Research and Application of Front-mounted Beam Pumping Unit Balanced with Lifting [D]. China University of Petroleum (East China), 2022.

[11] 王晓岗，齐静静，邵长彬，等. 游梁式抽油机免维护轴承密封性能及优化 [J]. 石油机械，2024，52 (12)：73-80.
WANG X G, QI J J, SHAO C B, et al. Sealing Performance and Optimization of Maintenance-Free Bearing of Beam Pumping Unit [J]. China Petroleum Machinery, 2024, 52 (12): 73-80.

[12] 王波，邓永洪，周昌辉，等. 煤层气开采中游梁式抽油机能源管控技术优化 [J]. 天然气工业，2025，45 (11)：143-151.
WANG B, DENG Y H, ZHOU C H, et al. Optimization of energy control technology for beam pumping units in coalbed methane extraction [J]. Natural Gas Industry, 2025, 45 (11): 143-151.

[13] 田德高，谭思思. 基于液压传动的游梁式抽油机节能技术应用研究 [J]. 中国工程机械学报，2025，23 (05)：918-922.
TIAN D G, TAN S S. Research on the application of energy-saving technology of beam pumping unit based on hydraulic transmission [J]. Chinese Journal of Construction Machinery, 2025, 23 (05): 918-922.

[14] XU J, WANG W, LI W, et al. Kinematic and Dynamic Analysis of Eccentric Balanced Positive Torque Pumping Unit [J]. Machines, 2024, 12 (4): 240.

[15] 王义龙，赵海森，詹阳，等. 用于游梁式抽油机电动机系统能耗分析的实用模型 [J]. 中国电机工程学报，2017，37 (13)：3909-3919.
WANG Y L, ZHAO H S, ZHAN Y, et al. Practical Model for Energy Consumption Analysis of Beam Pumping Units and Motor Systems [J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37 (13): 3909-3919.

[16] 张金东. 抽油机变速运行与节能机理研究 [D]. 东北石油大学，2014.
ZHANG J D. Research on variable speed operation and energy saving mechanism of pumping unit [D]. Northeast Petroleum University, 2014.

[17] 蔡志钦，蔡海洋，崔钰璞，等. 游梁式抽油机非圆齿轮传动设计与节能分析 [J]. 厦门大学学报（自然科学版），2024，63 (04)：609-618.
CAI Z Q, CAI H Y, CUI Y P, et al. Design and energy saving analysis of non-round gear transmission of beam pumping unit [J]. Journal of Xiamen University (Natural Science), 2024, 63 (04): 609-618.

[18] 王培旺. 游梁式抽油机超级电容储能系统设计研究 [D]. 中国石油大学（华东），2022
WANG P W. Design and Research of Super Capacitor Energy Storage System about Beam Pumping Unit [D]. China University of Petroleum (East China), 2022

[19] LV H Q, LIU J, HAN J Q, et al. An energy saving system for a beam pumping unit [J]. Sensors, 2016, 16 (5): 685.

[20] LUO Y L, CHEN X S, ZHANG H S, et al. A multifunction energy-saving device with a novel power-off control strategy for beam pumping motors [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2011, 47 (4): 1605-1611.

[21] 刘昕晖，李春爽，陈琳，等. 游梁式抽油机节能技术综述 [J]. 吉林大学学报（工学版），2021，51 (01)：1-26.
LIU X H, LI C S, CHEN L, et al. Review of energy saving technologies for beam pumping units [J]. Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition), 2021, 51 (01): 1-26.

第一作者简介：詹先波，中级工程师，1988年7月出生，2011年毕业于西安石油大学油气储运工程专业，现从事地面工程及工艺研究，陕西省韩城市金城区神谷酒店。

通信作者：王 津，副教授，email：jinwang@swpu.edu.cn

修改回稿日期：XXXX-XX-XX

（本文编辑　）