

# 抽油机井系统效率提升技术研究与应用

张志永

大港油田公司第一采油厂第二采油作业区 天津 300280

**摘要:** 抽油机井作为陆上油田最主要的采油方式之一,其系统效率直接关系到油田开发的能耗水平、运行成本及碳排放强度。当前,我国大量抽油机井存在系统效率偏低的问题,普遍存在“大马拉小车”、参数不匹配、设备老化等现象,导致能源浪费严重。本文在深入分析抽油机井系统构成及效率影响因素的基础上,系统梳理了近年来在系统效率提升方面的关键技术,包括精细化工况诊断、智能优化设计、高效节能设备应用、变频调速控制以及数字化管理平台建设等。结合典型油田区块的现场应用案例,验证了上述技术组合应用的有效性。结果表明,通过多维度协同优化,可显著提升抽油机井系统效率(平均提升12.5个百分点),降低吨液百米耗电量(平均下降28.6%),具有良好的经济效益和推广前景。本文的研究成果可为老油田节能降耗、绿色低碳转型提供理论支撑与实践路径。

**关键词:** 抽油机井; 系统效率; 节能降耗; 智能优化; 变频调速; 现场应用

## 引言

随着全球能源结构转型与“双碳”目标的深入推进,石油工业面临着前所未有的节能减排压力。作为油田生产能耗的主要载体,抽油机井的能耗占油田总电耗的60%以上。据统计,我国陆上油田抽油机井的平均系统效率普遍低于30%,部分低产低效井甚至不足15%,远低于国际先进水平(40%-50%)。这种低效运行状态不仅造成了巨大的能源浪费,也显著增加了油田的运营成本和碳足迹。抽油机井系统是一个由地面驱动装置(抽油机)、井下举升设备(抽油泵、抽油杆)及油藏供液能力共同构成的复杂机电液耦合系统。其系统效率是衡量整个举升过程能量利用有效性的核心指标,定义为有效举升功与输入电能之比。效率低下往往源于系统内部各环节的能量损失叠加,如机械摩擦损失、水力损失、气体干扰、参数不匹配等。因此,开展抽油机井系统效率提升技术研究,不仅是实现油田精细化管理和降本增效的关键举措,更是响应国家绿色发展战略、推动石油工业高质量发展的必然要求。本文旨在系统总结当前主流的效率提升技术,并通过现场应用实例,探讨其综合效益与推广价值。

## 1 抽油机井系统效率影响因素分析

抽油机井系统效率( $\eta_{\text{sys}}$ )可分解为多个子效率的乘积:

$$\eta_{\text{sys}} = \eta_{\text{motor}} \times \eta_{\text{transmission}} \times \eta_{\text{surface}} \times \eta_{\text{rod}} \times \eta_{\text{pump}}$$

其中, $\eta_{\text{motor}}$ 为电动机效率, $\eta_{\text{transmission}}$ 为传动系统效率, $\eta_{\text{surface}}$ 为地面设备(抽油机)机械效率, $\eta_{\text{rod}}$ 为抽油杆柱水力与机械效率, $\eta_{\text{pump}}$ 为井下泵效。

### 1.1 地面设备因素

地面设备是抽油机井能量输入与初步转换的关键环

节,其运行状态对系统整体效率具有决定性影响。在实际生产中,“大马拉小车”现象尤为突出,即为低产井配置了功率冗余的电机和抽油机,导致电机长期处于轻载甚至空载状态,而异步电机在低负载率下效率急剧下降,造成大量电能浪费。此外,抽油机四连杆机构在长期交变载荷作用下,轴承、销轴、曲柄等关键部件易发生磨损、松动或润滑失效,不仅增大了机械摩擦阻力,还可能引发振动和噪声,进一步降低传动效率。平衡度不佳同样是常见问题,若曲柄平衡块配置不合理,上下冲程中电机负载差异悬殊,将导致电流波动剧烈,增加无用功消耗,甚至加速电机绝缘老化<sup>[1]</sup>。这些问题共同构成了地面环节效率损失的主要来源。

### 1.2 井下设备因素

井下举升系统是能量传递至流体的最后一环,其性能直接决定了有效功的输出。抽油泵作为核心部件,其效率受多种复杂因素制约。泵筒与柱塞之间的间隙因磨损扩大后,高压液体回漏严重,有效排量大幅减少;凡尔球与阀座的密封失效则会导致吸入或排出过程中的内循环,削弱泵的容积效率。更普遍的是气体干扰问题,当地层流体含气量高或沉浸度过低时,泵腔内易形成气锁,使泵无法正常充满,造成“干抽”或“半抽”,极大降低泵效。与此同时,抽油杆柱在往复运动中承受复杂的交变应力,若材质选择不当、杆径组合不合理或扶正措施缺失,极易发生偏磨、腐蚀乃至疲劳断裂。这些损伤不仅威胁安全生产,还会因额外的摩擦阻力和振动耗散能量。此外,动液面过高导致泵吸入口压力不足,也是诱发气蚀、降低有效扬程的重要原因,反映出井筒与油藏动态匹配的失衡。

### 1.3 工作制度与油藏因素

抽油机井的运行效果本质上是地面设备、井下工具与油藏供液能力三者动态耦合的结果。若工作制度（如冲程、冲次、泵径）未根据单井产能特征进行科学设计，系统极易偏离高效运行区间。例如，对低供液能力井采用高冲次，不仅无法增加产量，反而加剧泵的无效循环和气体影响；反之，对高产能井使用小泵径，则限制了油井潜力的发挥。随着油田开发进入中后期，地层能量持续衰竭，供液能力逐年下降，若生产参数未能及时调整，原有的合理制度将迅速变为低效甚至有害模式。此外，井筒流体物性也深刻影响系统效率。高粘原油流动阻力大，需更高举升压头；高含水虽降低粘度但增加处理液量；高矿化度易结垢，堵塞流道；高含气则直接干扰泵的正常工<sup>[2]</sup>。这些复杂流体特性使得单一、固定的生产制度难以适应动态变化的井况，成为制约效率提升的深层因素。

## 2 系统效率提升关键技术

针对上述影响因素，近年来国内外发展了一系列旨在提升抽油机井系统效率的关键技术。

### 2.1 基于大数据的精细化工况诊断技术

传统依赖人工录取示功图的方式已难以满足现代油田对实时性与精准度的要求。当前，依托物联网技术，在井口部署集载荷、位移、电流、电压、温度等多参数于一体的无线传感器，实现了对抽油机井运行状态的全天候、高频次、自动化数据采集。海量工况数据汇聚至云端后，借助人工智能算法，特别是深度神经网络和集成学习模型，能够对抽油过程进行高精度建模与智能识别。该技术不仅能准确还原井下泵的动态工作状态，还能自动判别诸如供液不足、气体影响、杆管断脱、泵阀漏失、结蜡卡泵等多种典型故障模式，并量化各类异常对系统效率的具体贡献度。这种基于数据驱动的精细化工况诊断，为后续实施靶向性优化措施提供了坚实的数据基础和科学决策依据，从根本上改变了“凭经验、靠感觉”的粗放管理模式。

### 2.2 智能优化设计与参数调整技术

在精准诊断明确问题根源后，如何确定最优的调整方案成为关键。现代系统工程方法引入了单井数字孪生理念，利用专业仿真软件（如PumpSim, nodal analysis等）构建包含地面-井筒-油藏全系统的动态模型。该模型能够精确模拟不同冲程、冲次、泵径及沉没度组合下，整个举升系统的力学响应、能耗特征与产液能力。在此基础上，嵌入遗传算法、粒子群优化等智能寻优策略，可自动搜索出使系统效率最大化或吨液耗电最小化的最佳参数组合<sup>[3]</sup>。管理人员无需依赖繁琐的手工计算或试错

调整，只需依据系统生成的优化建议，在现场或通过远程指令即可完成参数变更。这种“一井一策”的个性化、智能化调控模式，确保了每口井始终运行在接近其理论最优工况点，从而实现系统能效的整体跃升。

### 2.3 高效节能设备的应用

硬件升级是提升效率的物理基础。永磁同步电机（PMSM）因其转子无励磁损耗、功率因数高、效率曲线平坦（尤其在20%-100%负载范围内均保持高效）等优势，正逐步替代传统异步电机，特别适用于负载波动大、长期轻载的低产井。在传动环节，采用高精度硬齿面齿轮、优化润滑系统的减速箱，配合低弹性滑差、高抗拉强度的复合皮带或同步带，可显著降低机械传动过程中的摩擦与滑动损失。此外，新型结构的抽油机，如塔架式、液压式或长冲程低冲次机型，通过改变动力传递路径，有效减少了传统游梁式抽油机在换向瞬间的巨大冲击载荷和能量耗散，更适合匹配油藏缓慢、稳定的供液特性，从源头上提升了能量利用效率。

### 2.4 变频调速（VFD）控制技术

变频调速技术以其灵活性和高效性，成为连接智能诊断与执行控制的核心纽带。通过调节电机供电频率，可实现对抽油机冲次的无级、平滑调节。这一能力使得系统能够动态响应油井供液能力的实时变化，例如在供液不足时段自动降低冲次，避免空抽造成的能量浪费；在供液充足时适度提高冲次，挖掘生产潜力。更进一步，先进的变频器支持编程设定非匀速运动曲线，如“慢上快下”模式，可有效改善上下冲程的载荷平衡，大幅降低峰值电流和电网冲击。同时，其内置的软启动功能消除了传统星三角启动带来的大电流冲击，延长了电机和机械部件的使用寿命<sup>[4]</sup>。当与智能诊断平台联动时，变频器还能执行自适应闭环控制，根据AI模型的实时优化指令自动调整运行频率，将节能潜力发挥到极致。

### 2.5 数字化与智能化管理平台

单点技术的突破固然重要，但要实现油田级的规模化、常态化能效提升，必须依靠统一的数字化管理平台进行集成与赋能。该平台作为整个技术体系的“大脑”，无缝整合了前端感知、数据分析、智能诊断、优化决策、远程控制及绩效评估等全链条功能。管理人员可在中心控制室通过可视化界面，对成百上千口抽油机井的运行状态、能效指标、故障预警进行集中监控。平台不仅能自动生成单井或区块的能效分析报告，还能推送个性化的优化方案和维保建议，极大地提升了管理的精细化水平和响应速度。这种“平台+终端+算法”的一体化管理模式，将分散的个体优化汇聚成全局的系统性增效，是推

动老油田向智慧、绿色、高效转型的核心支撑。

### 3 现场应用与效果分析

为验证上述技术的综合效果,选取某老油田A区块的50口低效抽油机井作为试验对象。该区块油井普遍产量低(90%)、系统效率平均仅为22.3%。

#### 3.1 实施方案

项目实施遵循“诊断先行、精准施策、软硬结合、平台赋能”的原则。①数据采集与诊断:为所有试验井加装无线工况监测仪,连续采集一个月数据。利用AI诊

断平台对每口井进行健康评估,识别主要问题。②参数优化:基于诊断结果和单井模型,为每口井计算出最优的冲程、冲次组合。③设备改造:对其中20口问题突出的井,更换为永磁同步电机并加装智能变频器。④平台接入:将所有试验井接入油田数字化管理平台,实现远程监控与动态调整。

#### 3.2 应用效果

经过三个月的稳定运行,对试验井进行了效果评估,主要指标对比如下表所示:

表1:应用效果

指标	改造前(平均值)	改造后(平均值)	变化率
系统效率(%)	22.3	34.8	+56.1%(+12.5pp)
吨液百米耗电量(kWh)	7.2	5.1	-29.2%
日产液量(t)	4.8	5.0	+4.2%
电机负载率(%)	35.6	68.2	+91.6%
故障停机时间(h/月/井)	8.5	3.2	-62.4%

分析:①系统效率显著提升:平均系统效率提升了12.5个百分点,增幅超过50%,达到了国内先进水平。②能耗大幅降低:吨液百米耗电量下降近30%,按年处理10万吨液量计算,年节电量可达21万kWh,经济效益显著。③设备运行更平稳:电机负载率回归合理区间(60%-80%),减少了设备的机械应力和电气冲击,故障率明显下降。④产量略有回升:通过消除气锁、优化沉没度等措施,部分井的泵效得到恢复,实现了小幅增产。该案例充分证明了以“精准诊断-智能优化-高效设备-变频控制-数字管理”为核心的系统性解决方案,在提升抽油机井系统效率方面具有强大的生命力和广阔的推广前景。

### 4 结语

本文系统研究了抽油机井系统效率的影响因素,并围绕“诊断、优化、设备、控制、管理”五个维度,构建了一套完整的效率提升技术体系。通过在典型油田区块的现场应用,验证了该技术体系的有效性,实现了系统效率和经济效益的双提升。未来,抽油机井系统效率的提升

将朝着更加智能化、集成化和绿色化的方向发展:①AI深度赋能:利用更先进的机器学习模型,实现从“故障后诊断”到“故障前预测”的转变,并实现全自动闭环优化。②新能源融合:探索“光伏+储能+抽油机”的微电网模式,利用清洁电力驱动抽油机,进一步降低碳排放。③全生命周期管理:将效率提升理念贯穿于油井的设计、建设、生产、维护直至废弃的全生命周期,实现资产价值最大化。

#### 参考文献

- [1]李显达.抽油机井机采系统效率影响因素探讨[J].中国石油和化工标准与质量,2025,45(22):33-35.
- [2]程树春.抽油机井系统效率影响因素分析及节能措施效果评价[J].石油石化节能与计量,2025,15(09):44-49.
- [3]王松梅.提高游梁式抽油机井系统效率措施探讨[J].石化技术,2025,32(05):211-212+108.
- [4]陈晓贺.提高抽油机井系统效率方法分析及应用[J].石油石化节能与计量,2024,14(09):54-58.