

# 动态节点分析方法确定海上油田生产井故障 及治理效益分析

舒杰<sup>1</sup> 王刘英<sup>2</sup> 倪俊<sup>1</sup> 邵国勇<sup>1</sup> 王志强<sup>1</sup>

(1. 中海石油(中国)有限公司湛江分公司, 广东 湛江 524057)

(2. 中海石油(中国)有限公司深圳分公司, 广东 深圳 518054)

**摘要:** 海上油田开发因其高投资、高成本、高速度的特点, 保障生产井生产时率、延缓产量递减成为油田开发的核心挑战。针对海上平台作业资源有限、成本高昂的约束, 油田管理者亟需快速、精准判别生产井故障。本文创新性构建涵盖地面设备、井筒举升系统和地下油藏三大动态节点的分析方法体系, 形成一套高效的生产井故障诊断技术。通过系统梳理各节点的关键监测参数、常见故障模式及治理对策, 结合实例验证, 显著提高故障诊断准确率与修井效率, 有效保障了油田生产时率, 为海上油田高效稳产提供关键技术支撑。

**关键词:** 海上油田开发; 生产时率; 故障诊断; 动态节点分析; 治理对策; 经济效益

**中图分类号:** TE5 **文献标识码:** A **文章编号:** 1674-5167(2026)001-0070-03

## Dynamic node analysis method for determining faults in production Wells of offshore oilfields and analyzing the benefits of treatment

Shu Jie<sup>1</sup>, Wang Liuying<sup>2</sup>, Ni Jun<sup>1</sup>, Shao Guoyong<sup>1</sup>, Wang Zhiqiang<sup>1</sup>

(1. CNOOC (China) Limited Zhanjiang Branch, Zhanjiang Guangdong 524057, China)

(2. CNOOC (China) Limited Shenzhen Branch, Shenzhen Guangdong 518054, China)

**Abstract:** Due to the characteristics of high investment, high cost and high speed in offshore oilfield development, ensuring the production time rate of production Wells and delaying the decline of production have become the core challenges in oilfield development. In view of the constraints of limited resources and high costs for offshore platform operations, oilfield managers urgently need to quickly and accurately identify faults in production Wells. This paper innovatively constructs an analysis method system covering three dynamic nodes: surface equipment, wellbore lifting systems, and underground oil reservoirs, forming a set of efficient fault diagnosis technologies for production Wells. By systematically sorting out the key monitoring parameters, common fault modes and governance countermeasures of each node, and combining with case verification, the accuracy of fault diagnosis and the efficiency of well servicing have been significantly improved, effectively ensuring the production time rate of the oilfield, providing key technical support for the efficient and stable production of offshore oilfields.

**Key words:** Offshore oilfield development; Production time rate; Fault diagnosis; Dynamic node analysis; Governance countermeasures; Economic benefits

全球海上油田勘探开发持续向深水、超深水领域拓展, 中国海域尤其是南海区域资源潜力巨大<sup>[1]</sup>。以中海油湛江分公司管辖的南海西部油田为例, 其开发面临极端环境、高作业成本(单次修井费用常超千万元)及严苛的安全环保要求。据统计, 生产井非计划关停导致的产量损失可占油田年递减率的15%-30%。因此, 快速精准诊断故障、缩短修井周期、提升生产时率, 直接关乎油田经济效益与采收率。

### 1 动态节点分析方法体系构建

#### 1.1 技术原理

电潜泵井采油本质是地层流体渗流—井筒举升—

地面处理的连续能量传递过程(见图1), 原油依靠生产压差从地层中流向井筒, 再通过电泵机械做功将流体举升到地面流程<sup>[2]</sup>。基于节点分析理论<sup>[3]</sup>, 将电潜泵生产系统划分为三个动态子系统: ①地面设备节点: 供电与控制系统(变压器、变频柜、控制柜、电缆接头); ②井筒举升节点: 流体举升通道(管柱、井下工具、电泵机组); ③地下油藏节点: 储层供液能力(压力系统、渗流特性、流体性质)。

各节点通过压力、流量、温度、电参数等关键变量耦合联动。任一节点故障将打破系统平衡, 表现为产量波动、压力异常或设备报警。诊断逻辑遵循“先

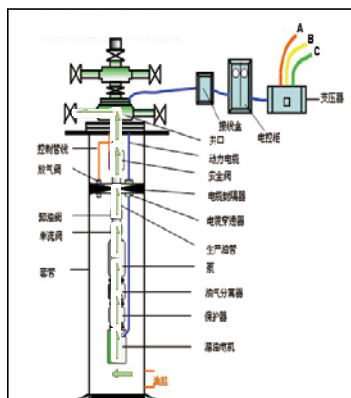


图1 电潜泵井生产系统示意图

地面后井筒、先本井后邻井、先易后难”原则，通过多源数据交叉验证锁定故障源。

## 1.2 节点故障模式库与诊断指标体系

### 1.2.1 地面设备节点

地面设备作为能量传输与运行控制的核心载体，直接决定油井生产的连续性与安全性，其核心构成包括变

频器、变压器及电缆三类关键设备。然而，受通球作业引发的系统负荷波动、海洋高湿盐雾环境侵蚀及长期连续运行损耗等因素影响，这些设备易频发各类故障：①电缆烧毁是高发问题，多因接头在温度交替与机械振动中逐渐老化松动，或绝缘层在安装运维中受损，生产参数调整可能导致的瞬时过载，造成电流异常激增，最终引发电缆烧毁；②控制柜误动作隐患突出，其一源于程序长期运行后的逻辑紊乱或初始设计缺陷，其二受环境干扰导致传感器信号漂移，使控制柜接收错误指令，进而引发执行机构误操作；③变频器失效多由散热通道堵塞导致设备过热，或内部电容长期承受电压冲击出现老化衰减，直接破坏功率输出稳定性。针对上述故障风险，需要重点关注表1关键监测参数。

表1 地面设备节点关键监测参数

参数	正常范围	故障征兆
电机电流	±10%	骤降（断相）、波动（接地）
电缆绝缘电阻	>100MΩ	<2MΩ（绝缘失效）
变频器温度	<85℃	>95℃（散热故障）

### 1.2.2 井筒举升节点

井筒举升关键设备包含井管柱、电潜泵、井下工具，常见故障如下：①管柱泄漏：油管腐蚀穿孔、螺纹密封失效（占修井原因的35%）；②电泵失效：叶导轮结垢卡泵、轴断裂、气锁；③井下工具故障：安全阀误关、防砂筛管破损导致出砂<sup>[4]</sup>。针对井筒举升关键设备常见故障，需要重点关注以下关键监测参数：监测管柱泄漏需紧盯井口油压与套压，若油压骤降、套压异常上升且二者差值偏离历史正常区间，结合实际产液产气与泵理论排量差值持续扩大、环空流体组分与油管介质高度吻合等情况，可精准预警油管腐蚀穿孔或螺纹密封失效问题；监测电潜泵状态要跟踪泵入口压力与运行电流，叶导轮结垢卡泵会引发电流骤

升<sup>[5]</sup>、入口压力剧烈波动，轴断裂会造成电流骤降、排量直接归零，气锁则表现为入口压力偏低且电流持续不稳<sup>[6]</sup>，同时产出液含砂量与温度异常也能间接反映泵体过载风险；监测井下工具需关注安全阀控制压力与环空密封性，安全阀误关会出现控制压力偏离设定值且井口排量骤减，环空异常泄压则大概率是防砂筛管破损等工具失效所致。

表2 井筒举升节点关键监测参数及诊断

参数	诊断意义
油套压差值	ΔP 突然减小→管柱漏失
泵吸入口压力	持续升高→泵堵或气锁
振动频谱	特定频率峰值→轴承磨损 / 叶轮损伤
生产含水率	突变→管外窜槽或筛管破裂

### 1.2.3 地下油藏节点

地下油藏常见问题如下：①能量不足：地层压力下降，供液指数（PI）降低，直接导致油井自喷能力减弱甚至丧失，需依靠人工举升设备维持生产，若长期能量亏空，还会造成油藏采收率大幅下降，影响开发效益；②渗流障碍：出砂埋泵、结垢堵塞近井地带<sup>[7]</sup>，出砂会磨损井下管柱和泵体部件，埋泵后直接中断生产，而近井地带结垢会堵塞地层孔隙通道，大幅降低原油渗流能力，加剧供液不足的问题；③流体性质变化：原油乳化、沥青质析出，乳化原油黏度升高，增加举升能耗与管道输送阻力，沥青质析出则会沉积在井筒和地层孔隙中，进一步堵塞渗流通道，形成恶性循环，严重制约油井正常生产。这些问题相互关联、互为影响，直接决定了油藏开发的难易程度与最终效益。

针对地下油藏开发问题，可通过三类方法系统诊断：①IPR曲线分析，对比不同开发阶段流入动态曲线，捕捉地层压力、供液指数变化规律，结合产能衰减速率，区分自然递减与非自然产能下降主因；②压力恢复试井，关井监测井底压力恢复数据，计算表皮系数、渗透率等参数，量化近井地带地层伤害程度与范围；③邻井干扰分析，监测注采井产量、压力响应，验证窜流通道并判断窜流引发的原油乳化等连锁问题。三类方法相互补充，为油藏治理方案提供科学支撑。

### 1.2.4 诊断决策树

针对异常生产井，以地面、井筒、地下油藏为节点载体，遵循先地面井筒后地下油藏、先本井后邻井的分析原则，逐步剖析问题原因，提出合理治理举措。通过分析总结，形成海上电潜泵井生产异常动态节点分析决策机制。

## 2 实例应用与经济效益

### 2.1 地面故障分析确保生产稳定

WZ-B24井于2022年8月31日完成提频调整后，

进入稳定生产阶段,连续3天各项生产指标均保持正常。期间地层能量充足,供液状态稳定,未出现供液不足或波动情况;井下电泵运行参数表现良好,泵电流、电机温度及井底流压始终处于合理区间,无异常波动或偏离现象,充分说明井下举升设备及油藏供液条件未出现问题。然而,稳定生产3天后,井口突然出现无产出的异常情况。结合该井地层能量充足、供液稳定的前提,以及故障前井下电泵关键运行参数均保持稳定的特征,初步排除油藏能量不足、井下管柱泄漏、电潜泵本体失效等井下相关故障因素,判断异常大概率源于地面设备问题。随后通过检泵作业对地面设备进行全面排查,最终确认故障为地面穿越电缆烧毁。进一步核实得知,该井电泵入井时间较短,电机各项参数符合设计标准,故障前电机运行状态稳定,无过载、发热等异常迹象,彻底排除井下电机及相关部件故障的可能性,最终明确此次井口无产出的故障原因为地面穿越电缆烧毁导致的地面设备故障。

### 2.2 井筒举升故障分析降低修井成本

WZ-A7井是油田重要的主力生产井,其纵向上含油层位发育完整,且与对应注水井建立了良好的注采对应关系,生产基础条件优越。2022年3月,该井突发井口无产出的异常状况,同步监测数据显示,井底流压呈现持续上涨特征,与正常生产时的流压变化规律明显背离。技术人员首先对地面设备展开全面排查,逐一排除井口装置、地面管线、供电系统等外部干扰因素后,结合流压上涨的核心特征,分析判断故障根源在于井下——生产过程中地层产出的杂质(如泥沙、结垢物等)随流体进入井筒,逐渐沉积并堵塞电泵吸入口,最终导致电潜泵卡泵停机,引发无产出问题。为快速恢复生产,技术团队针对性开展循环洗井治理,通过高压流体循环冲刷井筒及电泵吸入口,有效清除堵塞杂质,成功解除卡泵故障。此次治理不仅让该井迅速恢复正常生产,更延长有效生产时率达365天,避免常规检泵修井带来的停产损失,直接节省修井作业成本300万元,为油田降本增效提供现场实例。

### 2.3 地下油藏故障分析改善油藏开发效果

涠洲6-X油田为以构造岩性边底水油藏,随着油田开发,油井表现出供液不足、地层压力下降的特征。

表3天然能量驱动能力分级标准

指标	较充足	有一定	不足
$\Delta P/R$	0.2~0.8MPa	0.5~2.5MPa	>2.5MPa
$N_{pr}$	>30	10~30	2~10

采用油藏工程方法评价该油田天然能量等级<sup>[5]</sup>,区块无因次采出油量与弹性驱动产量比( $N_{pr}$ )为6.39、每采出1%地质储量的压降( $\Delta P/R$ )为0.22,区块天

然能量不足,将限制油井产能及后续调整挖潜。

表4涠洲6-X油田地层能量评价结果表

油田	区块	$N$ $10^4 m^3$	$P_i$ MPa	$S_{we}$	$C_t$ $10^{-3} MP^{-1}$	$B_{oi}$	$B_o$	$N_p$ $10^4 m^3$	$N_{pr}$	$\Delta p/R$
WZ6-X	南块	290.28	23.52	0.7	4.447	1.222	1.218	82.75	6.39	0.22

表4中: $N$ —原油地质储量, $10^4 m^3$ ;  $P_i$ —原始地层静压,MPa;  $S_{we}$ —初始含油饱和度,1;  $C_t$ —综合压缩系数, $10^{-3} MP^{-1}$ ;  $B_{oi}/B_o$ —原始/目前条件下原油体积系数, $m^3/m^3$ ;  $N_p$ —地面原油产量, $10^4 m^3$ ;  $N_{pr}$ —无因次采出油量与弹性驱动产量比;  $\Delta p/R$ —每采出1%地质储量的压降,MPa/1%。

在此基础上,制定区块治理策略为:①关停高含水井,优化产液结构、提升天然能量利用率;②新增1口采油井挖潜高部位剩余油提高区块采油速度,低部位补充一口注水井提升层能量保持水平。采用数值模拟方法预测,2口井投产后区块初期日增油 $80 m^3/d$ ,累增油 $12.33 \times 10^4 m^3$ ,采收率提高3.7%,经济效益得到显著提升。

### 3 结论

本文提出的动态节点分析方法,整合地面-井筒-油藏全流程数据,构建系统化诊断框架,有效改变了传统故障诊断多依赖经验判断或单一参数分析效率及成功率偏低等问题,提升了海上油井故障判别及治理效率,为海上油田智能化生产管理提供新范式。

### 参考文献:

- [1] 王海燕. 海上电潜泵井故障诊断专家系统[J]. 石油钻采工艺, 2020, 42(5): 645-650.
- [2] 中国海油集团能源经济研究院联合中国经济信息社. 中国海洋能源发展报告 2023[R]. 北京: 北京第三届海洋能源发展论坛发布, 2023-12-10.
- [3] 李颖川. 采油工程[M]. 北京: 石油工业出版社, 2009.
- [4] 杨万有, 刘敏, 等. 海上油田举升工艺创新与实践[M]. 北京: 科学出版社, 2024-6-1.
- [5] 何骁勇, 陈绍凯, 等. 海上油气田智能无人平台关键技术研究进展[J]. 中国海上油气, 2025(05).
- [6] 李伟, 陈建华, 吴绍伟, 等. 基于SPC控制图与加权决策树识别海上油气井生产异常[J]. 海洋地质前沿, 2022, 38(12): 84-91.
- [7] 韦龙贵, 张鑫, 李建雄, 等. 基于稀疏滤波的潜油电泵故障诊断方法[J]. 石油钻采工艺, 2023, 45(1): 112-118.

### 作者简介:

舒杰, 女, 硕士, 工程师, 主要从事海上油气田开发研究工作。