

创新点/亮点: 从计产准确率、投资回报率等方面比较了云计算与边缘计算两种功图计产模式的优劣势, 可以看出云计算功图计产模式计产结果与人工单量结果相对误差在 10% 以内, 且投资回报率较边缘计算功图计产模式提高 3.5 倍, 具有较好的推广应用前景。

引用格式: 陆梅, 吴春生, 刘天宇, 艾信, 田发国, 吴利利, 辛宏. 抽油机井云计算功图计产模式较边缘计算功图计产模式提高投资回报率 [J]. 石油钻采工艺, 2024, 46(6): 766-782. // LU Mei, WU Chunsheng, LIU Tianyu, AI Xin, TIAN Faguo, WU Lili, XIN Hong. The ROI of cloud computing mode is higher than that of edge computing mode in pumping well production calculate by dynamometer cards [J]. Oil Drilling & Production Technology, 2024, 46(6): 766-782.

抽油机井云计算功图计产模式较边缘计算功图计产模式提高投资回报率

陆梅^{1,2}, 吴春生^{1,2}, 刘天宇^{1,2}, 艾信^{1,2*}, 田发国^{1,2}, 吴利利^{1,2}, 辛宏^{1,2}

1. 中国石油天然气股份有限公司长庆油田分公司油气工艺研究院, 陕西西安

2. 低渗透油气田勘探开发国家工程实验室, 陕西西安

*通信作者: 艾信, 电子邮箱: axin1_cq@petrochina.com.cn

基金项目: 国家科技重大专项“鄂尔多斯盆地大型低渗透岩性地层油气藏开发示范工程”(编号: 2016ZX05050)。

摘要: (目的意义) 当前, 随着油田数智转型工作的不断推进, 相继出现基于边缘计算、云计算两种功图计产模式的油田数字化建设架构, 如何选择最佳的技术路线, 是摆在各大油田面前的难题。(方法过程) 文章利用上述两种模式分别对长庆油田 4 类抽油机井开展了现场试验, 并将两种模式的所对应的采样频次、处理效率、计产精度、投资回报率等方面进行了比较。(结果现象) 分析结果显示, 边缘计算功图计产模式具有更高的采样频次, 更快分析处理速度, 但投资回报率比较低。通过与人工单量结果对比显示, 在云端功图采集张数达标的情况下, 两种模式的计产结果与人工单量结果相对误差分别是 2.37%、2.65%, 基本保持一致; 在云端功图采集张数不达标的情况下, 对于出液平稳的抽油机井, 两种模式的计产结果与人工单量结果相对误差分别是 6.95%、3.94%, 仍保持一致; 在云端功图采集张数不达标的情况下, 对于出液波动的抽油机井, 边缘计算功图计产结果与人工单量结果相对误差 4.37%, 基本一致。但云计算功图计产结果与人工单量结果存在较大误差, 相对误差 18.42%。(结论建议) 目前 5G、光纤等传输技术已在各大油田规模应用, 油田物联网建设基础较好, 建议优选云计算功图计产模式, 该模式计产结果准确且投资回报率相对较高。

关键词/主题词: 油井; 采油; 抽油机井; 产液量; 功图计产; 云计算; 边缘计算; 物联网

中图分类号: TE355 文献标识码: A DOI: 10.13639/j.odpt.202501009

收稿日期: 2024-03-20; 修回日期: 2024-06-18; 录用日期: 2024-10-15; 编辑: 杨春莉

The ROI of cloud computing mode is higher than that of edge computing mode in pumping well production calculate by dynamometer cards

LU Mei^{1,2}, WU Chunsheng^{1,2}, LIU Tianyu^{1,2}, AI Xin^{1,2*}, TIAN Faguo^{1,2}, WU Lili^{1,2}, XIN Hong^{1,2}

1. Oil & Gas Technology Research Institute of PetroChina Changqing Oilfield Branch, Xi'an, Shaanxi, 710018, China

2. National Engineering Laboratory for Exploration and Development of Low-Permeability Oil & Gas Fields, Xi'an, Shaanxi, 710018, China

*Corresponding author. AI Xin, E-mail addresses: axin1_cq@petrochina.com.cn

Abstract: In order to solve the problem of how to choose the cloud computing dynamometer card production model and edge computing dynamometer card production model for pumping wells in the current oilfield, the paper uses the above two models to carry out field tests on four types of pumping wells in Changqing Oilfield, and compares the corresponding sampling frequency, processing efficiency, production accuracy, return on investment and other aspects of the two models. The analysis results show that

the edge computing power map production planning mode has higher sampling frequency and faster analysis and processing speed, but the return on investment is relatively low. By comparing with the manual single quantity results, it is shown that the relative errors between the production calculation results of the two modes and the manual single quantity results are 2.37% and 2.65%, respectively, when the number of collected power maps in the cloud meets the standard, which is basically consistent; In the case where the number of collected power maps in the cloud does not meet the standard, the relative errors between the production calculation results of the two modes and the manual single quantity results are 6.95% and 3.94%, respectively, for a pumping well with stable liquid output, which still remain consistent; Under the condition that the number of collected cloud power maps is not up to the standard, for the pumping wells with fluid fluctuation, the relative error between the edge computing power map production results and the manual single quantity results is basically the same 4.37%. However, there is a significant error between the cloud computing power chart production results and the manual single quantity results, with a relative error of 18.42%. At present, transmission technologies such as 5G and fiber optics have been widely applied in major oil fields, and the foundation of IoT construction in oil fields is good. It is recommended to choose the cloud computing power diagram production calculation mode, which has accurate production results and relatively high investment return rate.

Key words: oil well; oil extraction; pumping unit well; fluid production rate; production calculation based on dynamometer cards; cloud computing; edge computing; internet of things

<https://doi.org/10.13639/j.odpt.202501009>

Received 20 March 2024; Revised in revised form 18 June 2024; Accepted 15 October 2024

0 引言

油井产液量是指在单位时间内从油井井口产出的液体总量,这一指标对于评估油田的生产能力和经济效益至关重要^[1]。产液量的大小受到多种因素的影响,包括油藏可采储量、油藏孔隙度、油藏压力、油层渗透率以及油层粘度等。此外,泵的工作状态和阻尼系数也会影响产液量。

油井产液量直接反映了油田的生产能力^[2]。通过监测和分析油井的产液量,可以了解油田的储层条件、油藏压力、渗透率等关键参数,进而评估油田的潜在生产能力和长期稳产能力。这对于油田的规划和开发具有重要的决策支持作用。油井产液量对于制定生产策略具有指导意义^[3]。在油田生产过程中,需要根据油井的产量来调整抽油机井生产参数,如注水量、采油速度、生产压差等,以确保油田的高效、稳定生产。例如,当油井产液量下降时,需要通过增加注水量或调整采油速度来提高油井的生产能力;而当油井产液量过高时,则需要考虑采取相应的措施来控制产液量,防止油井过早衰竭。油井产液量还是优化油田管理的重要依据^[4]。通过对油井产液量的持续监测和分析,可以及时发现油田生产中存在的问题和隐患,如油井堵塞、设备故障等,从而及时采取措施进行解决。同时,通过对不同油井产液量的对比分析,还可以优化油田的井网布局和生产流程,全面提升油田的生产效率和经济效益。

油井产液量对油田生产具有重要的指导意义。它不仅反映了油田的生产能力,还为制定生产策略和优化油田管理提供了重要的依据。因此,在油田生产过程中,应加强对油井产液量的监测和分析,以确保油田的高效、稳定生产。在实际生产中,抽油机井产液量监测方法主要有4种方式:

一是通过翻斗量油装置监测抽油机井日产液量^[5]。该装置由油气分离缓冲装置、计量翻斗、液面控制及计数器等四部分组成。油气混合物自上部进入分离缓冲装置,其内部的分离伞用于分出油液中的气体,原油则经分配器均匀、平稳地流入计量翻斗。翻斗由两个联结在一起互相垂直的三角形斗构成,利用杠杆平衡原理翻动,当其中一斗装油到预定质量后便会自动翻转排油,另一斗则开始装油,来回交替,以达到连续计量的目的。计数器与翻斗的转轴相连,以记录翻斗的翻转次数,由此计算油井的累积产液量。但该方法采用间歇量油的方式实现产量计算,其系统误差相对较高,同时进入冬季,翻斗量油装置极易造成冻堵,引发系列安全生产事故;

二是通过玻璃管量油装置监测抽油机井日产液量^[6]。玻璃管量油装置设置有气液两相分离器,在气液两相分离器的侧壁安装专门用于量油的玻璃管,玻璃管上端与分离器顶部联通,玻璃管下端与分离器底部相

通,形成连通器。分离器内部液柱压力可直接传递到玻璃管内部液柱,使得两液柱压力平衡,因此,当分离器内部液位上升一定高度时,玻璃管内液柱也会上升同样的高度。记录玻璃管内液柱上升高度所需时间,则可计算出分离器内液柱重量,即可求出该井日产量。但玻璃管部分容易因外力撞击或温度变化而破裂,这不仅会导致设备损坏,还可能引发潜在的介质泄漏,从而存在安全隐患。在某些情况下,如容器内部光线不足或介质颜色深浅不一,可能影响读数的准确性。同时,玻璃管量油装置通常需要现场观察读数,不支持远程监测和操控。

三是通过单井计量装置监测抽油机井日产量^[7]。该装置由气液分离器、电动三通阀、液体质量流量计、气体孔板流量计、液位计、止回阀等组成。油气混合物进入气液分离器后,经旋流分离后,气体聚集于气液分离器上部,液体聚集于气液分离器底部。当液位计监测液位达到排液高度时,三通阀导通气液分离器底部与装置出口,进行排液,此时质量流量计计量累积液量。当液位计监测液位未达到排液高度时,三通阀导通气液分离器顶部与装置出口,进行排气,此时孔板流量计计量累积产气量。但该方法投入成本较高,单台装置高达 10 万元,后期设备维护较频繁,无法批量推广应用,同时对质量流量计要求较高,否则会导致较大的计产误差。

四是通过多相流量计监测抽油机井日产量^[8]。该多相流量计并不对井液作分离,而是直接实现油气水三相计量,也是当下多相流量计技术发展的主要方向。其涉及的核心技术主要包括油气水三相组分含量的测定和各相流速的测定。目前,常见的相流速测量技术主要有压差法、超声波法、激光多普勒效应法和电磁感应技术等,组分的体积分数计量的主要技术有核磁共振技术、电容层析成像技术等。但从现场应用来看,该仪器造价高昂,无法规模推广应用,同时受结蜡、结垢、腐蚀等复杂的测试环境影响,监测相对误差较高。

上述方法均难以实现抽油机井日产液量的低成本、高可靠性、精准性测试。调研发现,自 2000 年以来,智能传感器与物联网技术的迅猛发展及广泛应用,为抽油机井产液量监测提供了新的技术手段。主要形成两种计产方法,一种是功图法计产,另外一种的电参法计产。

其中功图法计产较为成熟,国内各大油田应用 20 万口井以上。主要基于实测示功图数据,通过建立复杂的抽油杆-油管-井液三维动力学模型,计算获得相应泵功图,确定泵的有效冲程,从而求得抽油机井日产量^[9]。吕孝孝等建立抽油机井正常工况、气体影响、供液不足、漏失影响等工况下的抽油泵运行特性模型,并进一步同杆管液动力学模型耦合,实现相对精准的地面功图转换井下泵功图,产液量平均相对误差低于 6%^[10]。唐丽雯等提取地面示功图特征向量,创新自适应工况识别算法,对抽油机井运行工况进行分类,并建立了产液量与不同运行工况之间的映射关系,得到基于工况识别的计量产量的模型,产液量平均相对误差 3.26%^[11]。周斌等创新提出基于八链码形状匹配分析的抽油泵游动阀、固定阀开闭点识别方法,柱塞有效行程计算精度较传统的游动阀、固定阀开闭点识别方法提高了近 1%,进一步提升了功图计产精度^[12]。以上关于地面功图转换井下泵功图、工况诊断、有效冲程识别等方法,为抽油机井功图法精准计产奠定了较好的基础。

而电参法计产形成相对较晚,国内各大油田应用 5 万口井以上。主要基于实测电功率数据,通过建立电参数反演示功图模型,计算获得地面示功图,然后采取与功图计产模式相同的步骤,获得抽油机井日产量^[13]。赵怀军等创新建立了电动机输入电参数计算抽油机扭矩的数学模型,并探索了扭矩数据经抽油机四连杆机构传递后的力学变化规律,进而获得相对精准的悬点载荷数据,与载荷传感器实测值对比,平均相对误差 3.87%,工程实用性强^[14]。张战敏等以生产大数据样本做支撑,利用深度学习技术建立了基于电参数据的产液量计量模型,通过对冲程、冲次、泵径、有功功率等数据进行深度挖掘,建立与产液量的回归方程,平均预测符合率达到 94.08%^[15]。魏显峰等通过同步采集电机功率和电机转角,分别计算悬点载荷和光杆位移,实现电参向力参示功图的转换,并于玻璃管量油计产方法进行对比分析,发现计产相对误差在

20% 以内的油井占比 85.2%^[16]。以上关于电参数计产的方法, 为抽油机井电参法精准计产指明了探索方向。

电参法计产方法需要经过两次转换才能获得井下泵功图, 进而通过泵功图有效冲程识别获得抽油机井日产量。其中, 第一次转换是电参数通过抽油机井四连杆力矩转换模型获得地面示功图, 第二次转换是地面示功图通过抽油杆-油管-井液三维动力学模型获得井下泵功图。而功图法计产方法通过安装载荷、位移传感器直接获得地面示功图, 仅需要一次转换, 因此计产精度在一定程度上优于电参法计产方法, 成为目前行业的主流抽油机井计产方法。

近年来, 随着云计算、边缘计算技术的发展, 在功图法计产模式基础上, 相继形成云计算功图计产模式和边缘计算功图计产模式, 但各大油田对于两种计产模式如何选择存在不同意见。为此, 通过应用上述两种技术模式分别开展现场试验, 并将两种技术模式的采样频次、处理效率、计产精度、投资回报率等进行全方位对比分析, 为油田关于两种计产模式的选择提供参考性意见及建议。

1 方法过程

1.1 成果研究过程

功图法计产基本原理是将抽油机井系统视作一个机械运动系统, 抽油杆柱、油管、液体在井筒的三维空间内运动, 并且三者的位移和受力相互耦合。因此以抽油机井机械运动系统的受力为切入点, 充分考虑抽油杆柱、油管、液柱在三维空间的运动特性及三者之间的接触力、摩擦力对系统机械运动的影响, 把井口采集的地面示功图作为输入, 而把井下泵示功图作为输出, 通过建立和求解模型, 便可获得抽油机井产液量^[17]。功图量油原理, 如图 1 所示。

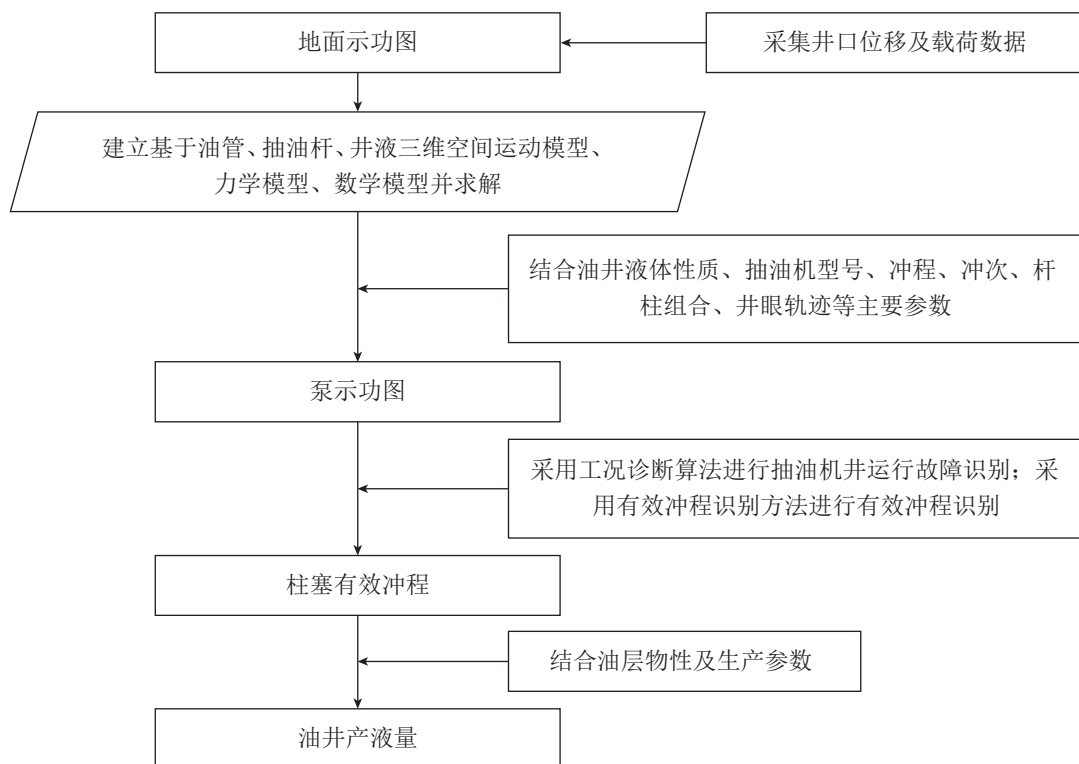


图 1 功图法量油原理图

Fig. 1 Principle Diagram of Oil Production Using the Dynamometer Card Method

从图 1 中可以看出, 功图法计产主要分为数据采集、地面示功图转换井下泵功图、井下泵示功图有效冲

程识别、日产液量计算 4 个步骤。

第 1 步, 数据采集。通过在抽油机井口设置载荷传感器、位移传感器、RTU(远程终端单元), 实现井口位移、载荷数据的全天候采集, 并形成地面示功图。

第 2 步, 地面示功图转换井下泵功图。全面考虑杆管柱轴向力、侧向力、偏磨力、惯性力、库仑摩擦力及法向力等的综合作用, 建立更加完善的有杆泵抽油系统抽油杆-油管-井液三维动力学模型, 并全面分析计算井身压力、温度、气液比、含水率剖面变化, 得到较为准确的全井段阻尼系数, 实现地面示功图精准转换井下泵示功图。

第 3 步, 井下泵示功图有效冲程识别。应用工况诊断算法, 首先识别抽油机井运行工况, 对于抽油杆断、卡泵、油管漏失、固定阀失灵、游动阀失灵、双阀失灵、气锁、脱出泵筒等工况, 直接得出当前抽油机井产液量为零。除上述工况以外的工况, 应用有效冲程识别方法, 确定泵筒内柱塞有效行程, 具体识别过程如下: 通过在泵示功图精确找到游动阀开启点 $P_{TO}(U_{TO}, F_{TO})$ 、关闭点 $P_{TC}(U_{TC}, F_{TC})$ 及固定阀开启点 $P_{SO}(U_{SO}, F_{SO})$ 、关闭点 $P_{SC}(U_{SC}, F_{SC})$, 抽油机井上行时对应的有效冲程 S_{PS} 为固定阀关闭点位移 U_{SO} 与固定阀开启点位移 U_{SC} 之差。抽油机井下行时对应的有效冲程 S_{PT} 为游动阀开启点位移 U_{TO} 与游动阀关闭点位移 U_{TC} 之差。若抽油机井上行时对应的有效冲程 S_{PS} 大于或等于抽油机井下行时对应的有效冲程 S_{PT} , 则抽油机井有效冲程 S_p 等于 S_{PT} ; 若抽油机井上行时对应的有效冲程 S_{PS} 小于抽油机井下行时对应的有效冲程 S_{PT} , 则抽油机井有效冲程 S_p 等于 S_{PS} 。

第 4 步, 日产液量计算。结合抽油机井生产参数, 根据柱塞的有效行程计算泵的井下排量, 最后依据油层物性参数计算得到井口产液量。在实际计算过程中, 分为 2 个环节。一是抽油机井第 i 张功图折合 1 min 产量计算。它与泵筒截面积、冲程、冲次成正比, 与原油体积系数成反比, 其详细计算过程, 见式(1)。

$$Q_i = \frac{\pi \times N \times S_{pi} \times D^2}{4 \times 10^6 \times B_v} \quad (1)$$

式中: N 为抽油机井冲次, 单位 min^{-1} ; S_{pi} 为抽油机井第 i 张功图的有效冲程, 单位 m; D 为抽油机井泵径, 单位 mm; B_v 为抽油机井体积系数, 无量纲。

二是抽油机井日产液量计算。假设全天采集 m 张功图, T_1 时刻采集第 1 张功图, T_i 时刻采集第 i 张功图, T_m 时刻采集第 m 张功图, 第 i 张功图代表的是 $T_{i+1}-T_i$ 时间段的产量。对应的全天日产液量计算, 见式(2)。

$$Q = Q_1(T_2 - T_1) + Q_2(T_3 - T_2) + \cdots + Q_i(T_{i+1} - T_i) + \cdots + Q_m(T_{m+1} - T_m) \quad (2)$$

式中: Q_i 为抽油机井第 i 张功图每分钟对应的产液量, 单位 m^3/min ; T_i 为第 i 张功图对应的采集时刻, 单位 min。

1.1.1 边缘计算功图计产模式

边缘计算是一种分布式计算模型, 其核心思想是将数据处理和计算资源放置在接近数据产生源头的边缘设备、传感器或用户设备上, 以提供更快速、实时的计算和数据分析能力。具体来说, 边缘计算是指在靠近物或数据源头的一侧, 采用网络、计算、存储、应用核心能力为一体的开放平台, 就近提供最近端服务, 满足行业在实时业务、应用智能、安全与隐私保护等方面的基本需求^[18]。

边缘计算涉及的核心技术主要包括应用域技术、数据域技术、网络域技术等方面。其中应用域技术主要包括应用程序可编程技术和负载分配技术, 满足应用程序在边缘端的部署去求, 同时合理分配计算资源, 确保边缘计算高效运行; 数据域技术主要包括数据聚合与互操作技术和数据分析与呈现技术, 实现语义统一, 构建统一信息模型架构, 以兼容多种现存模型, 实现数据跨厂商的互操作, 同时适配数据分析模型, 进行数据清洗、分析, 并根据结果触发业务响应策略, 为应用域提供数据支持; 网络域技术主要包括海量联接与自动化运维技术, 满足大规模联接和自动化运维的需求, 同时在网络层面解决边缘计算中的服务动态性、设备

动态注册与撤销以及数据调度问题。此外, 还有与边缘计算密切相关的硬件技术, 如 ASIC 芯片、FPGA 芯片、GPU 芯片和 DSP 芯片等, 这些芯片在边缘计算中发挥着重要作用, 用于处理特定的算法或应用程序, 提供高性能和灵活性^[19]。

边缘计算技术并没有明确的分类标准, 但可以根据不同的应用场景和技术特点进行划分。例如, 根据部署位置的不同, 可以将边缘计算分为移动设备边缘计算、物联网设备边缘计算、网关边缘计算等。此外, 还可以根据处理任务的不同, 将边缘计算分为数据预处理、实时分析、智能决策等类型^[20]。

边缘计算技术具有 4 个显著特点: ①低延迟。边缘计算将计算资源靠近数据源, 减少了数据传输的时间, 实现更低的延迟, 特别适用于自动驾驶、虚拟现实等对实时性要求较高的场景。②高带宽利用率。减少了不必要的数据传输, 只在需要时传输结果, 节省带宽资源。③增强隐私和安全性。敏感数据在边缘设备上处理, 减少数据泄露风险, 适合医疗健康等领域。④离线可用性。在断网情况下仍能工作, 保证应用的连续性和稳定性。⑤可扩展性和稳定性。支持大规模数据处理需求, 提升系统稳定性和可靠性^[21]。

抽油机井边缘计算功图计产模式是一种结合边缘计算技术和功图计产原理的油井产量计量方法。核心在于利用边缘计算技术对抽油机井的示功图数据进行分析 and 处理。系统整体架构如图 2 所示。

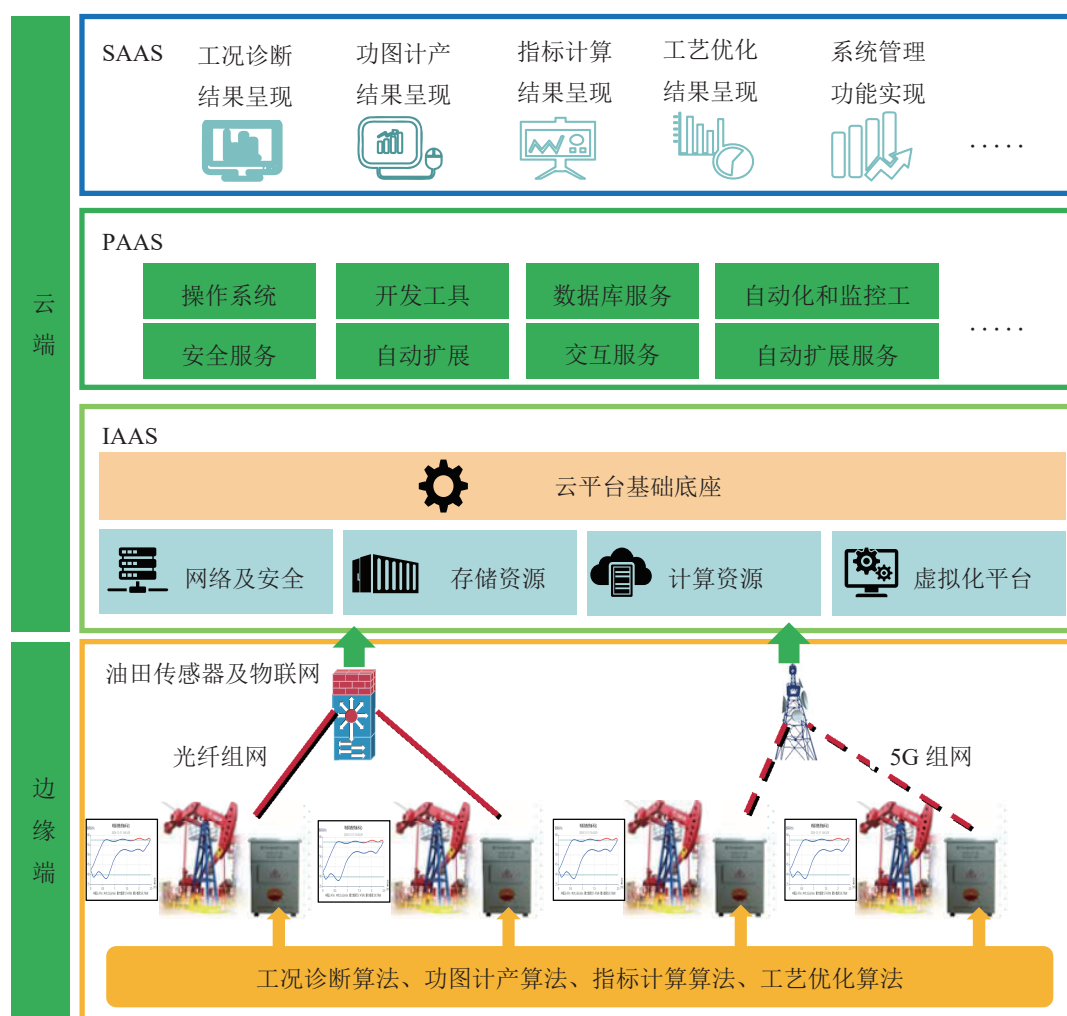


图 2 抽油机井边缘计算功图计产模式

Fig. 2 Edge Computing Dynamometer Card Method for Measuring Production Mode of Pumping Unit Wells

从图 2 中可以看出,抽油机井边缘计算功图计产模式主要分为两大系统:一是边缘计算系统。抽油机井通过井口高性能 RTU 实时采集载荷、位移、电参等传感器数据,自动生成地面示功图及功率图等数据。并将工况诊断、功图计产、指标计算、工艺优化等算法嵌入井口高性能 RTU,进而实现抽油机井边缘计算,就地便可获得抽油机井运行工况、产液量、工艺指标等信息;而后,依托油田 5G、光纤网络,将边缘计算结果实时回传云平台。二是云平台系统,主要负责将边缘端回传的工况诊断、功图计产、指标计算、工艺优化相关结果进行呈现及数据的存储。

1.1.2 云计算功图计产模式

云计算技术是一种通过互联网提供计算资源和服务的技术。通过整合大量计算资源(如服务器、存储设备等),形成一个巨大的资源池,用户可以根据需求,通过互联网访问这些资源,并按照使用量付费。云计算技术旨在通过网络将多个成本相对较低的计算实体整合成一个具有强大计算能力的系统,并通过 SaaS、PaaS、IaaS 等先进的商业模式将这些计算能力分布到终端用户手中^[22]。

云计算主要核心技术包括虚拟化技术、分布式计算技术、资源弹性可伸缩技术。其中,虚拟化是云计算技术实现的核心基础之一,通过将物理硬件抽象成多个逻辑资源(如虚拟机、容器等),实现资源的独立运行、彼此隔离和动态分配^[23];分布式计算技术可支持处理海量数据和高并发任务,确保系统在大规模用户请求下的高效运行,通过将计算任务分解并分布到多个节点上并行处理,提高计算效率^[24];弹性可伸缩技术将云计算资源按照用户需求进行动态调整,实现资源的弹性扩展和收缩,满足用户在不同时间段内的资源需求变化,用户只需为自己实际使用的计算资源和存储空间付费,降低了成本,提高了资源利用率^[25]。

云计算服务主要包括 3 种类型。IaaS(基础设施即服务),提供计算、存储、网络等基础设施服务^[26]。用户可以通过互联网或专有网络按需访问这些资源,但无需实际拥有或维护物理设备。IaaS 的主要特点包括:提供高度可扩展的虚拟基础设施;用户可以根据需求动态调整资源规模;IaaS 服务提供商负责基础设施的维护和管理,用户无需关心底层硬件细节。PaaS(平台即服务),构建在 IaaS 之上,提供运行、开发和部署应用程序的平台^[27]。PaaS 抽象掉了基础设施的复杂性,让用户只需关注应用程序的开发。SaaS(软件即服务),直接向用户提供完整的软件服务^[28]。用户可以通过浏览器或客户端直接访问这些服务,无需关心底层硬件或软件的维护。SaaS 的主要特点包括:用户可以通过互联网直接使用应用程序,无需安装和维护本地软件;SaaS 服务提供商负责应用程序的更新和维护,确保用户始终获得最新版本的功能和安全性;SaaS 服务通常采用按需付费的商业模式,用户可以根据实际需求选择不同的服务套餐。这三种云计算服务并不是孤立的,它们相互联动,形成一个完整的云计算生态系统。在这个生态系统中,IaaS 提供基础设施支持,PaaS 提供应用开发平台,而 SaaS 则提供最终的应用程序服务。用户可以根据自己的需求和预算选择合适的云计算服务模式,或者组合使用多种模式来满足复杂的应用场景。

云计算技术广泛应用于数据存储、计算和管理等领域。例如,在企业领域,云计算可以用于搭建企业网站、运行企业应用程序、存储和管理企业数据等;在教育领域,云计算可以用于提供在线教育平台、教学资源共享和管理等;在政府领域,云计算可以用于构建电子政务平台、提供公共服务等。此外,云计算还在金融、医疗、娱乐等领域发挥着重要作用。无论是个人用户、企业还是政府机构,都越来越依赖云计算技术来提高效率和降低成本。云计算技术的优势包括:提高资源利用率、降低 IT 成本、增强业务灵活性、提高数据安全性。

抽油机井云计算功图计产模式是一种结合云计算技术和功图计产原理的油井产量计量方法。核心在于利用云计算技术对抽油机井的示功图数据进行分析 and 处理。系统整体架构如图 3 所示。

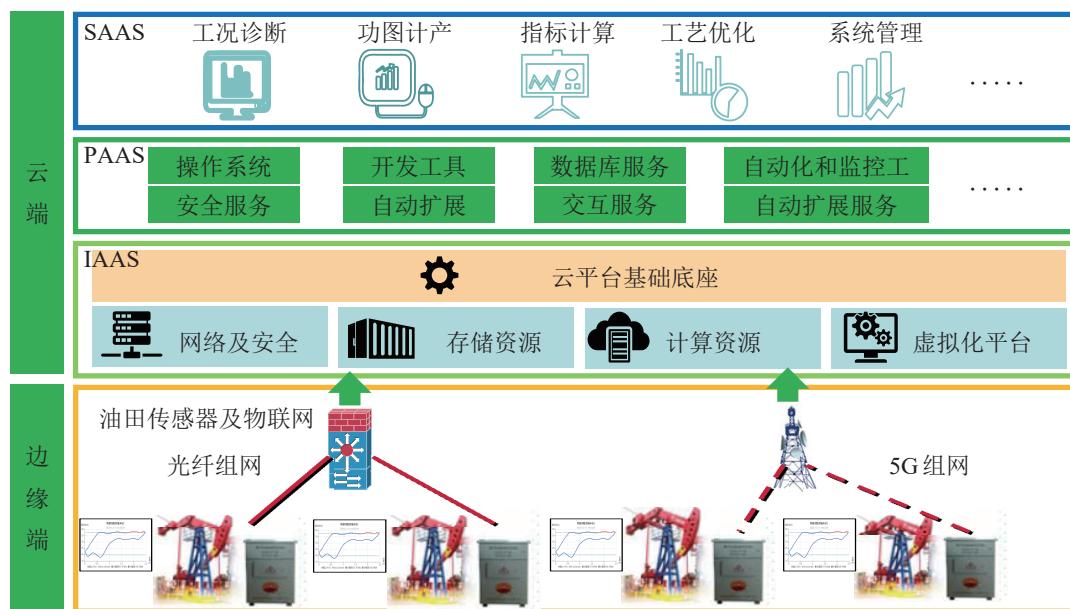


图3 抽油机井云计算功图计产模式

Fig. 3 Cloud Computing Dynamometer Card Method for Measuring Production Mode of Pumping Unit Wells

从图3中可以看出,抽油机井云计算功图计产模式也分为两大系统:一是油田传感器及物联网系统。对于抽油机井而言,通过井口RTU对载荷、位移、电参等传感器数据进行实时采集,自动生成地面示功图及功率图等数据。而后直接将生成的地面示功图及功率图等数据通过光纤、5G等通信方式实时上传云平台。二是云计算平台。主要包含IAAS、PAAS、SAAS三层服务,其中IAAS层为功图计产系统提供虚拟服务器资源、数据存储资源及网络资源等服务,PAAS层为功图计产系统提供操作系统、数据库及开发工具等服务,SAAS层为功图计产系统提供软件部署及应用功能发布等服务。

1.2 应用案例过程

经过研究,可以看出边缘计算功图计产模式和云计算功图计产模式均能实现抽油机井在线计产功能,而且具有工况诊断、指标计算及工艺优化等功能,极大的方便了油田现场生产管理。为了进为了更加科学、客观的评价两种计产模式优劣势,特开展现场应用试验评价。

1.2.1 试验井的选择

选取长庆油田抽油机井开展试验,主要对比采样频次、处理效率、计产准确度等。其中计产准确度尤为重要,考虑到云计算功图计产模式采样间隔10 min,用一张功图的计产结果代表10 min的产量,在有效冲程变化较大、出液波动的油井上有可能导致较大的计产误差。而边缘计算功图计产模式可以实现每一个冲次采集的示功图计产,理论上计产误差较小。因此,本次试验选择两类油井:一类是出液平稳的油井,即采集示功图的有效冲程变化较小,波动幅度在0~0.2 m;另外一类是出液波动较大的油井,即采集示功图的有效冲程变化较大。

除了上述出液情况是试验井选择的重要因素外,还有云端功图采集张数也是一个重要影响因素,直接关系到云计算模式的功图计产结果。实际生产中,功图采集张数达到理论功图采集张数的80%,认为功图采集达标;功图采集张数低于理论功图采集张数的80%,认为功图采集不达标。

因此,分别按照“云端功图采集张数达标、出液相对平稳油井”“云端功图采集张数达标、出液波动变化油井”“云端功图采集张数不达标、出液相对平稳油井”“云端功图采集张数不达标、出液波动变化油井”进行试验井的选择,试验井选择结果如下。

类别1(云端功图采集张数达标、出液相对平稳油井):Y46-5、H108-53。

类别 2(云端功图采集张数达标、出液波动变化油井): X3-45、X74-77。

类别 3(云端功图采集张数不达标、出液相对平稳油井): H116-51、H108-51。

类别 4(云端功图采集张数不达标、出液波动变化油井): X71-79、H111-53。

1.2.2 试验流程设计

(1)边缘端、云端采样频次对比分析评价。

第 1 步, 根据试验井全天边缘端采集功图张数, 计算边缘端采样间隔。

第 2 步, 根据试验井全天云端采集功图张数, 确定云端采样频次。

通过上述评价, 可以得出两种功图计产模式在采样频次方面的性能优劣。

(2)边缘端、云端处理效率对比分析评价。

第 1 步, 通过在边缘端嵌入程序添加时间戳进行运行监控, 确定边缘端高性能 RTU 完成一次产量计算所耗时间。

第 2 步, 通过在云端程序添加时间戳进行运行监控, 确定云计算平台完成一次产量计算所耗时间。

通过上述评价, 可以得出两种功图计产模式在处理效率方面的性能优劣。

(3)边缘端、云端功图计产结果与人工单量结果对比分析评价。

第 1 步, 将对应单量 24 小时的边端、云端采集的示功图进行折合日产液计算。

第 2 步, 将云计算计产结果、边缘计算计产结果、人工单量结果进行对比分析。

通过上述评价, 一方面可以得出两种功图计产结果与人工单量结果的相对误差, 另一方面也可以看出云计算功图计产结果与边缘计算功图计产结果的差异。

1.2.3 试验具体过程

(1)现场准备工作。为了能同步开展边缘计算功图计产试验, 需要对上述 4 类试验井额外安装处理性能强劲的井口 RTU。开展数据调试上线工作, 确保载荷传感器、位移传感器、电参传感器数据精准采集, 并在井口 RTU 内实现每一个冲次抽油机井示功图和功率图的自动生成与存储。同时, 在 4 类试验井上安装人工单量设备, 便于开展边缘计算功图计产结果、云计算功图计产结果与人工单量计产结果的分析比对工作。

(2)边缘计算功图计产。高性能井口 RTU 将抽油机井每一个冲次绘制的地面示功图应用地面功图转泵功图算法、工况诊断算法、有效冲程识别算法、功图计产算法, 获得每一张功图对应的有效冲程数据、产量数据, 进而求得最终的功图计产结果数据。其中, 最终的功图计产结果数据为每一张功图对应产量数据之和。

(3)云计算功图计产。将回传云计算平台将回传云端的全部地面示功图应用与边缘计算功图计产模式相同的算法, 获得每一张功图对应的有效冲程数据、每 1 min 产量数据, 进而求得最终的功图计产结果数据。具体计算方法按照式(1)、式(2)进行。

2 结果现象讨论

2.1 计产准确度对比分析

(1)采样频次对比分析。对于边缘计算功图计产模式, 实现了每一个冲次的功图采集, 其采样频次与抽油机井自身冲次保持一致, 一般为 2-6 次/min。

对于云计算功图计产模式, 受限于功图、功率图等大体量数据传输, 考虑云平台网络吞吐量, 其采样频次基本为 10 min。

如 H108-53 油井, 当采用云计算功图计产模式时, 间隔 10 min 采集一张示功图, 全天采集 144 张功图。采用边缘计算功图计产模式时, 每一个冲次采集一张功图, 该井冲次为 3.2 次/min, 全天采集 4608 张功图, 采样频次、功图采集张数较云计算功图计产模式提升 32 倍。因此, 边缘计算功图计产模式较云计算功图计产模式采样频次提升 20-60 倍。

(2)处理效率对比分析。对于边缘计算功图计产模式, 高性能 RTU 完成工况诊断、功图计产及工艺指标计算等全过程仅需 1 s。

对于云计算功图计产模式, 功图数据从井口 RTU 采集至数据库耗时 10 min。云计算功图计产软件从数据库中提取功图数据时间间隔设置为 30 min。云计算功图计产软件完成全部油井的最新一张采集功图的分析处理耗时约 20 min。由此可得, 云计算功图计产模式的处理耗时约 60 min。

因此, 边缘计算功图计产模式处理效率较云计算功图计产模式提升近 3 600 倍。

(3)边缘端、云端功图计产结果与人工单量结果对比分析。

将 4 类试验井同一天的边缘端、云端采集示功图进行日产液计算, 并与人工单量结果进行对比。如图 4 所示。

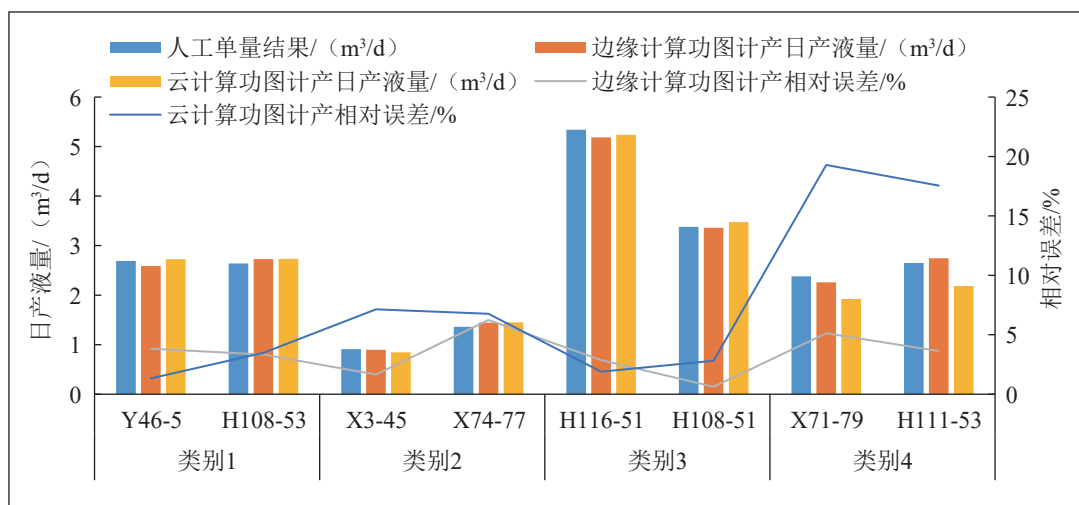


图 4 云计算/边缘计算的日产液量与人工测试的日产液量对比分析

Fig. 4 Comparative analysis of daily liquid production of cloud computing/edge computing and manual testing

从图 4 中可以看出, 类别 1、类别 3 的 4 口油井均属于出液平稳油井, 云计算功图计产结果、边缘计算功图计产结果与人工单量结果相对误差较小, 分别是 2.37%, 2.65%; 类别 2、类别 4 的 4 口油井均属于出液波动变化油井, 但对于类别 2 的两口油井, 云端功图采集张数达标, 此时云计算功图计产结果、边缘计算功图计产结果与人工单量结果相对误差较小, 分别是 6.95%, 3.94%。但对于类别 4 的两口油井, 云端功图采集张数不达标, 此时云计算功图计产结果与人工单量结果相对误差较大, 为 18.42%, 而边缘计算功图计产结果仍与人工单量结果保持一致, 为 4.37%。

为了进一步分析出现上述现象的具体原因, 考虑到每日云计算功图计产模式的示功图采集张数较少, 边缘计算功图计产模式的示功图采集张数相对较多, 且示功图有效冲程直接关乎抽油机井日产液量, 因此瞄准每日两种模式采集全部示功图的有效冲程, 展开深入分析。在分析过程中, 将有效冲程区间划分为 4 个区间, 分别是小于 0.5 m、大于等于 0.5 m 且小于 0.7 m、大于等于 0.7 m 且小于 0.9 m、大于等于 0.9 m, 并将“云端功图采集张数达标、出液相对平稳油井”, “云端功图采集张数达标、出液波动变化油井”, “云端功图采集张数不达标、出液相对平稳油井”, “云端功图采集张数不达标、出液波动变化油井” 4 类试验井不同有效冲程区间的示功图采集张数占比进行统计分析, 以此解释 4 类试验井功图计产差异原因。经统计, 云计算功图计产模式、边缘计算功图计产模式的不同有效冲程区间示功图采集张数占比, 如表 1 所示。

表 1 不同有效冲程区间的示功图采集张数占比分析

Table 1 Analysis of the proportion of collected dynamometer cards for different effective stroke ranges

测试井类别	井号	采集数量	不同有效冲程区间的功图采集张数占比/%			
			$S_p < 0.5\text{ m}$	$0.5\text{ m} \leq S_p < 0.7\text{ m}$	$0.7\text{ m} \leq S_p < 0.9\text{ m}$	$S_p \geq 0.9\text{ m}$
类别1	Y46-5	边缘端(5091张)	0.00	100.00	0.00	0.00
		云端(141张)	0.00	100.00	0.00	0.00
	H108-53	边缘端(4608张)	0.00	100.00	0.00	0.00
		云端(144张)	0.00	100.00	0.00	0.00
类别2	X3-45	边缘端(4152张)	74.86	15.32	1.30	8.52
		云端(141张)	76.60	15.60	0.71	7.09
	X74-77	边缘端(5468张)	80.29	4.57	2.34	12.80
		云端(141张)	78.01	4.96	2.84	14.19
类别3	H116-51	边缘端(5148张)	0.00	0.00	0.00	100.00
		云端(80张)	0.00	0.00	0.00	100.00
	H108-51	边缘端(4632张)	0.00	0.00	100.00	0.00
		云端(90张)	0.00	0.00	100.00	0.00
类别4	X71-79	边缘端(3976张)	31.19	56.92	11.62	0.28
		云端(103张)	38.83	50.48	10.69	0.00
	H111-53	边缘端(2664张)	0.00	0.00	73.00	27.00
		云端(80张)	0.00	0.00	100.00	0.00

从表 1 中可以看出,类别 1、类别 3 的四口出液平稳油井,抽油机井有效冲程变化较小,因此在日产液量计算过程中,弱化了功图采集张数的影响,云端功图采集张数达标与否对计产结果影响并不大,因此,不论在云端计产还是在边缘端计产,均能得到相对准确的计产结果;类别 2、类别 4 的 4 口出液波动变化油井,不论是云端采集示功图还是边缘端采集示功图,可以发现有效冲程变化较大,该类井强化了功图采集张数对日产液量计算的影响。但从类别 2 的两口油井可以看出,云端功图采集张数达标,云端与边缘端不同有效冲程区间的功图采集张数占比相对接近,而有效冲程直接关乎计产结果,因此类别 2 两口油井的云端、边缘端的计产结果与人工单量结果相对误差较小。但从类别 4 的两口油井可以看出,云端功图采集张数不达标,云端与边缘端不同有效冲程区间的功图采集张数占比存在明显差异,正是这种差异,导致了类别 4 两口油井的云端计产结果与人工单量结果、边缘端计产结果相对误差较大。

通过上述试验可以得出,对于边缘计算功图计产模式,因不受网络传输影响,因此不论在什么情况下,均能保持较高的计产符合率、采样频次及处理效率。对于云计算功图计产模式,当抽油机井出液平稳,不论其采集张数是否达标,其计产结果始终与人工单量结果保持一致;当抽油机井出液波动变化,若功图采集张数达标,其计产结果与人工单量结果保持一致,若功图采集张数不达标,此时其计产结果与人工单量结果存在较大误差。为了评价在 5G、光纤网络传输条件下的云计算功图计产模式的适应性,对 5 万口油井的云端功图采集张数进行分析,发现功图采集张数达标率达到 99%,仅有 1% 的油井功图采集张数较少。因此,云计算功图计产模式的计产符合率也非常高,完全满足现场应用需求。

但在应用过程中发现边缘计算功图计产模式存在两大劣势:一是抽油机井加装高性能 RTU,硬件成本显著增加;二是系统运维管理难度增大,问题排查及算法维护极不方便。而云计算功图计产模式,在满足计量准确性的要求下,还可以实现数据的共享和集中管理,方便决策者对油井生产情况进行宏观控制和决策。

综上所述,抽油机井云计算功图计产模式是一种高效、准确、通用的油井产量计量方法,对于提高油田

生产效率和管理水平具有重要意义。

2.2 投资回报率对比分析

投资回报率(Return On Investment, 简称 ROI), 是指通过投资而应返回的价值, 是衡量投资收益与成本之间关系的关键指标, 也即利润与投入的比值^[29]。下面以 5 万口油井为分析对象, 约 12500 座井场, 按照运行 3 年进行投资回报率计算。

(1) 云计算功图计产模式投资回报率计算。抽油机井云计算功图计产模式的建设投入分析涉及多个方面, 包括基础设施建设、技术研发投入、运营成本等。以下是对该模式建设投入的具体分析, 如图 5 所示。

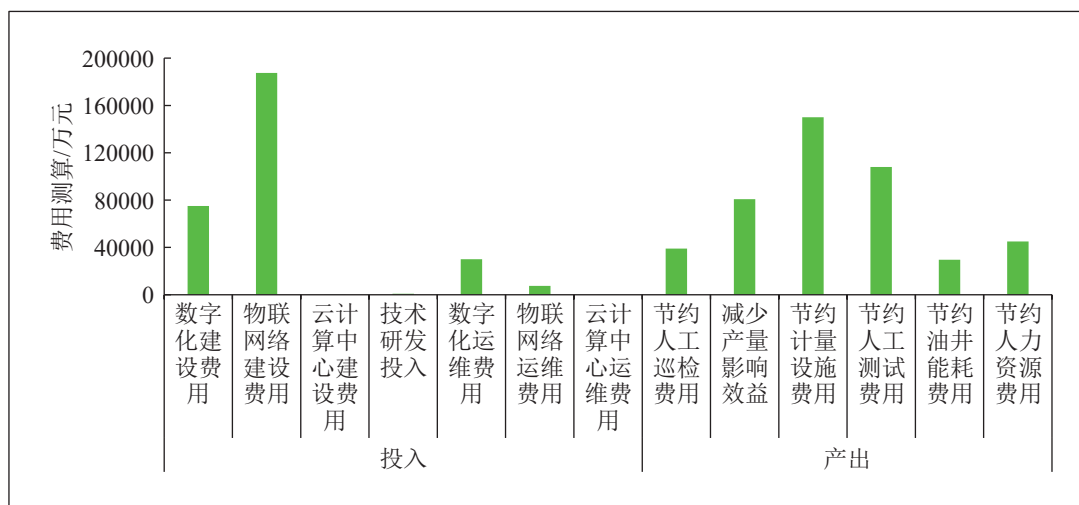


图 5 云计算功图计产模式投入/产出分析

Fig. 5 Input/output analysis of dynamometer card liquid production measurement model based on Cloud Computing

从图 5 中可以看出, 云计算功图计产模式投入部分主要包括基础设施建设投入、技术研发投入、运营投入。具体测算内容包括以下 3 个方面。

①在基础设施建设投入方面。主要包括抽油机井数字化、传输网络建设以及云计算数据中心建设。对于抽油机井数字化建设, 因采用云计算建设模式, 对 RTU 性能要求并不高, 单井数字化建设费用约 1.5 万元, 5 万口油井数字化建设费用约 75 000 万元; 对于传输网络建设, 假设所有井组均铺设光缆, 井组与站点的平均距离约 5 km, 光缆建设费用每公里约 3 万元, 12500 个井组光缆建设费用约 187 500 万元; 对于云计算中心建设, 按照抽油机井云计算规模, 预估费用 150 万元。以上共 262 650 万元。

②在技术研发投入方面。主要包括数据库搭建、核心算法设计以及应用功能开发, 按照抽油机井云计算功图计产系统的功能点进行初步测算, 预估技术研发投入在 800 万元。

③在运营投入方面。主要包括抽油机井数字化运维、光纤运维、云计算中心运维。对于抽油机井数字化运维, 由于前端硬件相对简单, 单井数字化运维费用每年约 0.20 万元, 3 年的数字化运维费用约 30 000 万元; 对于光纤运维, 传输稳定可靠, 每公里的年运维费用约 0.04 万元, 3 年的光缆运维费用约 7 500 万元; 对于云计算中心运维, 云计算硬件设施每年运维费用约 5 万元, 功图计产软件系统每年维护费用约 30 万元, 3 年共计约 105 万元。共计 37 605 万元。综上, 抽油机井云计算功图计产模式 3 年共计投入 301 055 万元。

云计算功图计产模式的收益主要包括代替人工巡井、降低产量影响、代替计量设施建设、代替工艺指标人工测试、抽油机井生产制度优化、盘活用工等方面产生的经济效益。具体测算内容包括以下 6 个方面。

①实现电子巡井, 代替人工巡检, 节约人工巡检费用。每个井组每年巡检 52 次, 每个井组每次巡检费用约 200 元, 3 年共计节约费用 39 000 万元。

②躺井工况提前 3 天发现，及时安排上修，减少产量影响。修井作业频次为每井次每年约 0.45 次，单井日产油量 1 t，原油价格每桶\$80 美元，3 年共计节约费用 80 747.28 万元。

③实现功图计产，节约计量设施建设费用。计量设施费用每台约 12 万元，每个井组需布置 1 台，共计节约建设费用 150 000 万元。

④系统效率、能耗等工艺指标自动分析计算，节约人工测试费用。测试频次每口井每年约 12 次，测试费用每口井每次约 600 元，3 年共计节约 108 000 万元。

⑤盘活劳动用工，节约人力资源费用。盘活用工每口井每年约 0.02 人，工资按照每人每年 15 万元，3 年共计节约费用 45 000 万元。

综上，抽油机井云计算功图计产模式 3 年共计产生效益 452 312 万元。由此可计算得到，抽油机井云计算功图计产模式的投资回报率为 0.5。

(2)边缘计算功图计产模式投资回报率计算。抽油机井边缘计算功图计产模式的建设投入分析也涉及多个方面，以下是对该模式建设投入的具体分析，如图 6 所示。

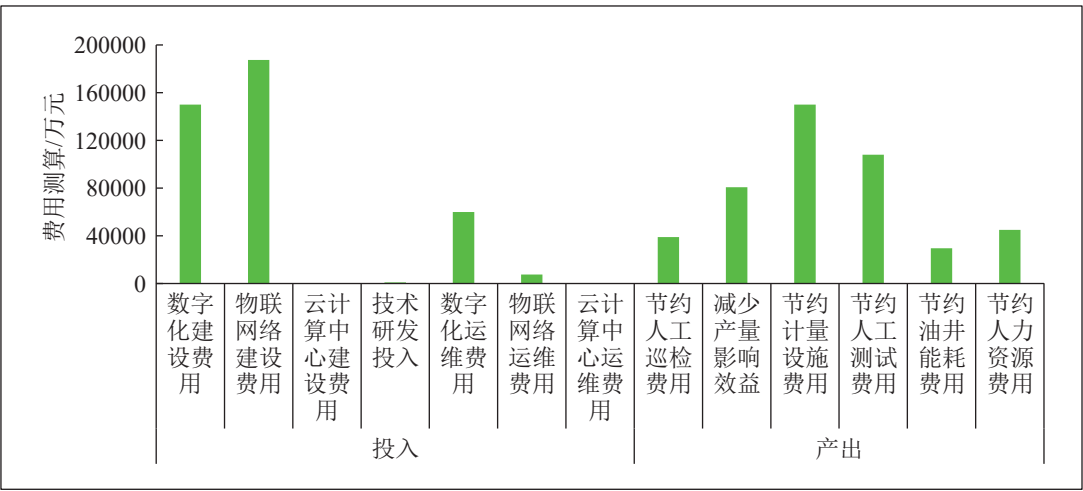


图 6 边缘计算功图计产模式投入/产出分析

Fig. 6 Input/output analysis of dynamometer card liquid production measurement model based on Edge Computing

从图 6 中可以看出，边缘计算功图计产模式投入部分同样包括基础设施建设投入、技术研发投入、运营投入。具体测算内容包括 3 个方面。

①基础设施建设投入。主要包括抽油机井数字化、传输网络建设以及云计算数据中心建设。对于抽油机井数字化建设，因采用边缘计算建设模式，对 RTU 性能要求较高，单井数字化建设费用约 3 万元，5 万口油井数字化建设费用约 150 000 万元；对于传输网络建设，假设所有井组均铺设光缆，井组与站点的平均距离约 5 km，光缆建设费用按每公里 3 万元，12500 个井组光缆建设费用约 187 500 万元；对于云计算中心建设，因将核心算法迁移至井口 RTU，云计算所需资源大幅下降，预估建设费用 75 万元。以上共 337 575 万元。

②技术研发投入。主要包括云端、边缘端数据库搭建、核心算法设计以及应用功能开发，按照抽油机井边缘计算功图计产系统的功能点进行初步测算，预估技术研发投入在 1 000 万元。

③运营投入。主要包括抽油机井数字化运维、光纤运维、云计算中心运维。对于抽油机井数字化运维，由于前端硬件功能强大，设备费用高且运维复杂度提升，单井数字化运维费用每年约 0.4 万元，3 年的数字化运维费用约 60 000 万元；对于光纤运维，传输稳定可靠，运维费用每公里每年约 0.04 万元，3 年的光缆运维费用约 7 500 万元；对于云计算中心运维，云计算硬件设施运维每年费用约 5 万元，功图计产软件系统维护每年费用约 30 万元，3 年共计约 105 万元。以上共 67 605 万元。综上，抽油机井边缘计算功图计产模式

3 年共计投入 406 180 万元。

抽油机井边缘计算功图计产模式的收益同云计算功图计产模式基本一致, 3 年共计产生效益 452 312.28 万元。由此可计算得到, 抽油机井边缘计算功图计产模式的投资回报率为 0.11。

(3) 云计算功图计产系统与边缘计算功图计产系统投资回报率分析。从上面来看, 云计算功图计产模式前端硬件简单, 建设成本及运行维护成本相对较低, 3 年投资回报率高达 0.5; 而对于边缘计算功图计产模式, 前端硬件复杂, 建设成本及运行维护成本相应大幅增加, 3 年投资回报率为 0.11。由此可见, 云计算功图计产模式投资回报率较边缘计算功图计产模式提高 3.5 倍。

3 结论建议

(1) 通过将云计算功图计产模式与边缘计算功图计产模式分别在不同类型抽油机井上开展试验, 可以看出: 云计算功图计产模式具有较高的计产符合率、投资回报率, 在代替人工巡井、降低产量影响、代替计量设施建设、代替工艺指标人工测试、抽油机井生产制度优化、盘活劳动用工等方面均有巨大作用, 对抽油机井日常生产管理意义重大, 助推了油井管理方式转变、现场安全管理水平和企业管理效率提升, 对从事采油工艺现场管理、技术研究和油田数字化、智能化建设工作的技术人员具有较强针对性和实践意义。该模式不仅有效解决了长庆油田“少人多井”状况下的抽油机井高效智能生产难题, 也为国内油田抽油机井智能生产、机械采油数智转型指明了方向。

(2) 在应用云计算功图计产模式时, 通过对云端功图采集张数不达标的油井进行分析, 发现功图丢失主要发生在井口 RTU 至井场 RTU 的无线通信链路上, 当 1 台井场 RTU 负责转发 8 台及以上井口 RTU 的采集功图数据时, 云端经常会出现功图采集张数不达标现象。同时, 井口 RTU 与井场 RTU 之间的直线距离超过 80 m, 或当井口 RTU、井场 RTU 的天线出现破损现象时, 也会导致云端功图采集张数不达标。鉴于上述情况, 建议在抽油机井数字化建设时, 一定注意井场 RTU 对应的井口 RTU 数量及安装位置, 并在后期运维过程中, 定期检查井口 RTU、井场 RTU 天线状况。

(3) 在两种计产模式对比分析过程中, 忽略了抽油机井生产制度优化的对比分析。可以看出: 云计算功图计产模式在用于抽油机井生产制度优化时, 采用“大闭环”控制方式, 即通过在云端分析得出抽油机井最佳生产制度, 然后通过物联网下发至井口 RTU 执行。而边缘计算功图计产模式在用于抽油机井生产制度优化时, 采用“小闭环”控制方式, 即通过在井口 RTU 内分析计算得出抽油机井最佳生产制度, 然后就地实现抽油机井变频调速和间抽控制。对比上述两种生产制度优化方式, 边缘计算功图计产模式的生产制度优化方式更加稳定可靠。为了提升云计算功图计产模式的生产制度优化稳定性, 下部需要建立可靠的“握手”机制, 确保生产制度能够顺利从云端直达井口 RTU。

致谢

长庆油田分公司油气工艺研究院对科技成果给予大力支持并且允准发表科技论文, 低渗透油气田勘探开发国家工程实验室为科技成果提供了较好的实验环境, 在此谨致谢忱。

稿件申明

作者排名已征得全部作者的同意, 学术观点方面全部作者的观点均一致, 涉及的专利已经征得所有发明人的同意且已签字确认, 文章涉及的内容不存在学术不端的问题。

署名贡献声明

陆梅, 项目负责人, 提出了研究课题以及论文的修改。

吴春生, 试验数据处理, 为论文撰写提供技术性支持。

刘天宇, 试验数据处理, 为论文撰写提供技术性支持。

艾信, 试验数据处理, 为论文撰写提供技术性支持。

田发国, 试验数据处理, 为论文撰写提供技术性支持。

吴利利, 现场测试数据收集, 为论文撰写提供技术性支持。

辛宏, 现场测试数据收集, 为论文撰写提供技术性支持。

利益冲突说明

发表的论文不涉及企业技术商业秘密, 专家审稿无要求避讳问题。

数据可用性声明

本研究中涉及的所有原始数据、分析脚本及研究过程中产生的其他相关数据资料, 均已妥善保存并可通过合理请求获得。为确保数据的隐私与安全, 以及遵守相关伦理与法律要求, 部分敏感或个人信息已进行脱敏处理。研究者鼓励并欢迎其他学者基于本研究数据进行进一步的探索与分析。如有数据访问需求, 请通过电子邮件联系通信作者, 并在邮件中说明数据使用目的、研究计划以及预期的研究成果。我们将在收到请求后的合理时间内, 根据数据共享政策与程序, 对请求进行评估并作出回应。

参考文献

- [1] 牛小希. 消除油井产量定义不同造成试井解释误差方法的研究 [J]. 钻采工艺, 2019, 42(4): 54-56+9. //NIU Xiaoxi. Research on methods for eliminating well testing interpretation errors caused by different oil well production definitions [J]. Drilling and Production Technology, 2019, 42(4): 54-56,9.
- [2] YADUA Asekame U, LAWAL Kazeem A. 油田一体化生产系统产能评价方法 [J]. 石油勘探与开发, 2023, 50(3): 585-593. //YADUA Asekame U, LAWAL Kazeem A. Productivity evaluation method for integrated oilfield production system [J]. Petroleum Exploration and Development, 2023, 50(3): 585-593.
- [3] 王振龙, 何岩峰, 王相, 等. 基于数据驱动的油井生产参数智能调控方法 [J]. 断块油气田, 2022, 29(6): 859-864. //WANG Zhenlong, HE Yanfeng, WANG Xiang, et al. Data driven intelligent control method for oil well production parameters [J]. Block Oil and Gas Field, 2022, 29(6): 859-864.
- [4] 郭迎春, 曲全工, 曹小鹏, 等. 注采优化提高平面非均质低渗油藏井网水驱波及效率 [J]. 石油钻采工艺, 2020, 42(2): 214-221. //GUO Yingchun, QU Quangong, CAO Xiaopeng, et al. Optimization of injection production improves the water drive sweep efficiency of well network in planar heterogeneous low-permeability reservoirs [J]. Petroleum Drilling and Production Technology, 2020, 42(2): 214-221.
- [5] 高帅, 唐浩然, 万雯绯, 等. 翻斗称重式采油井产量计量系统设计与关键技术研究 [J]. 传感器与微系统, 2021, 40(4): 45-47+51. //GAO Shuai, TANG Haoran, WAN Wenfei, et al. Design and key technology research of production measurement system for flip bucket weighing oil well [J]. Sensors and Microsystems, 2021, 40(4): 45-47,51.
- [6] 李杰训, 贾贺坤, 宋扬, 等. 油井产量计量技术现状与发展趋势 [J]. 石油学报, 2017, 38(12): 1434-1440. //LI Jiexun, JIA Hekun, SONG Yang, et al. The current situation and development trend of oil well production measurement technology [J]. Acta Petroleum Sinica, 2017, 38(12): 1434-1440.
- [7] 郝虎, 陈晓玉, 孔德明, 等. 一种永置式石油生产地面多井组单井轮巡三相流监测装置及应用研究 [J]. 仪器仪表学报, 2023, 44(5): 193-203. //HAO Hu, CHEN Xiaoyu, KONG Deming, et al. Research on a permanent surface multi well group single well rotation three-phase flow monitoring device for oil production and its application [J]. Journal of Instrumentation, 2023, 44(5): 193-203.
- [8] 高书香, 周星远, 单秀华, 等. 国内在线不分离式多相流量计技术现状 [J]. 油气储运, 2019, 38(6): 667-671. //GAO Shuxiang, ZHOU Xingyuan, SHAN Xiuhua, et al. The current status of online non separable multiphase flowmeter technology in China [J]. Oil and Gas Storage and Transportation, 2019, 38(6): 667-671.
- [9] 周晖. 基于示功图的抽油机井工况诊断与计产技术研究 [D]. 中国石油大学 (华东), 2015. //ZHOU Hui. Research on the diagnosis and production calculation technology of pumping unit wells based on indicator diagrams [D]. China University of Petroleum (East China), 2015.
- [10] 吕孝孝, 王早祥, 刘延鑫, 等. 故障工况下有杆泵采油系统运行特性及示功图研究 [J]. 中国石油大学学报 (自然科学版), 2020, 44(2): 117-126. //LV Xiaoxiao, WANG Hanxiang, LIU Yanxin, et al. Research on the operating characteristics and

- indicator diagram of rod pump oil production system under fault conditions [J]. Journal of China University of Petroleum (Natural Science Edition), 2020, 44(2): 117-126.
- [11] 唐丽雯, 樊军, 赵新语, 等. 基于功图故障特征分析的液量计量方法研究 [J]. 机械设计与制造, 2024(9): 164-168+174. //TANG Liwen, FAN Jun, ZHAO Xinyu, et al. Research on liquid measurement method based on fault characteristics analysis of power diagram [J]. Mechanical Design and Manufacturing, 2024(9): 164-168,174.
- [12] 周斌, 邢林林, 张敏. 基于八链码形状匹配的抽油机井地面示功图凡尔开闭点识别 [J]. 科学技术与工程, 2022, 22(12): 4788-4796. //ZHOU Bin, XING Linlin, ZHANG Min. Identification of valve opening and closing points on the surface indicator diagram of pumping unit wells based on eight Chain code shape matching [J]. Science, Technology and Engineering, 2022, 22(12): 4788-4796.
- [13] 吕志忠, 姜铖, 蒋林, 等. 基于电功率的抽油机示工图测试系统研究 [J]. 机械设计与制造, 2019(3): 225-228. //LV Zhizhong, JIANG Cheng, JIANG Lin, et al. Research on the testing system of pumping unit diagram based on electric power [J]. Mechanical Design and Manufacturing, 2019(3): 225-228.
- [14] 赵怀军, 贺可可, 胡定兴, 等. 游梁式抽油机悬点载荷软测量方法的研究 [J]. 仪器仪表学报, 2021, 42(9): 160-171. //ZHAO Huaijun, HE Keke, HU Dingxing, et al. Research on soft measurement method for suspension load of beam pumping unit [J]. Journal of Instrumentation, 2021, 42(9): 160-171.
- [15] 张战敏, 朱丹丹, 刘重伯, 等. 抽油机井原油产量计量新方法 [J]. 钻采工艺, 2023, 46(2): 71-76. //ZHANG Zhanmin, ZHU Dandan, LIU Chongbo, et al. A new method for measuring crude oil production in pumping wells [J]. Drilling and Production Technology, 2023, 46(2): 71-76.
- [16] 魏显峰, 易正昌. 电参示功图计产技术现场应用与分析 [J]. 中外能源, 2021, 26(7): 58-62. //WEI Xianfeng, YI Zhengchang. Field application and analysis of oil well production calculation based on indicator diagram calculated from electrical parameters [J]. Chinese and Foreign Energy, 2021, 26(7): 58-62.
- [17] 何强. 稠油机抽井功图监控诊断系统的应用 [J]. 北京石油化工学院学报, 2023, 31(1): 37-42. //HE Qiang. Application of monitoring and diagnostic system for heavy oil pumping well power diagram [J]. Journal of Beijing Institute of Petrochemical Technology, 2023, 31(1): 37-42.
- [18] 陈昊崑, 邓水光, 赵海亮, 等. 面向移动边缘的组合服务选择及优化 [J]. 计算机学报, 2022, 45(1): 82-97. //CHEN Hao-wei, Deng Shuiguang, ZHAO Hailiang, et al. Mobile edge oriented selection and optimization of composite services [J]. Acta Computerica Sinica, 2022, 45(1): 82-97.
- [19] 徐晓斌, 王琪, 范存群, 等. 面向空天地一体化信息网络的边缘计算资源融合管理方法 [J]. 计算机学报, 2023, 46(4): 690-710. //XU Xiaobin, WANG Qi, FAN Cunqun, et al. Edge computing resource fusion management method for space space space integrated information network [J]. Acta Computerica Sinica, 2023, 46(4): 690-710.
- [20] 牛岚甲, 吴迪, 刘全明, 等. 边缘计算环境中基于区块链的物联网解决方案 [J]. 南京理工大学学报, 2023, 47(5): 678-684. //NIU Lanjia, WU Di, LIU Quanming, et al. IOT solution based on blockchain in edge computing environment [J]. Journal of Nanjing University of technology, 2023, 47(5): 678-684.
- [21] 黄成龙, 柯宇曦, 华向东, 等. 边缘计算在智慧农业中的应用现状与展望 [J]. 农业工程学报, 2022, 38(16): 224-234. //HUANG Chenlong, KE Yuxi, HUA Xiangdong, et al. Application status and Prospect of edge computing in smart agriculture [J]. Journal of Agricultural Engineering, 2022, 38(16): 224-234.
- [22] 郝苑辰, 解宇恒, 唐建军. 量子计算云平台的技术演进与发展趋势 [J]. 电信科学, 2024, 40(11): 114-124. //HAO Yuanchen, JIE Yuheng, TANG Jianjun. The technological evolution and development trends of quantum computing cloud platforms [J]. Telecommunications Science, 2024, 40(11): 114-124.
- [23] 孙超. 基于云计算虚拟化技术的船舶航海信息服务平台 [J]. 舰船科学技术, 2022, 44(6): 141-144. //SUN Chao. Ship navigation information service platform based on cloud computing virtualization technology [J]. Ship Science and Technology, 2022, 44(6): 141-144.
- [24] 廖小飞, 郭得科, 叶保留. 新兴分布式计算技术与系统专题序言 [J]. 计算机科学, 2022, 49(3): 1-2. //LIAO Xiaofei, GUO Deke, YE Shou. Preface to emerging distributed computing technologies and systems [J]. Computer Science, 2022, 49(3): 1-2.
- [25] 吴晓军, 张成, 原盛, 等. 基于强化学习的云资源混合式弹性伸缩算法 [J]. 西安交通大学学报, 2022, 56(1): 142-150. //WU Xiaojun, ZHANG Cheng, YUAN Sheng, et al. Cloud resource hybrid elastic scaling algorithm based on reinforcement learning [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2022, 56(1): 142-150.

