

采油采气工程智能化愿景

刘合¹, 许建国², 苏健¹, 杨清海^{1,2*}

1 中国石油勘探开发研究院, 北京 100083

2 吉林油田油气工程研究院, 吉林松原 138000

* 通信作者, qinghai.yang@petrochina.com.cn

收稿日期: 2023-03-15

国家自然科学基金基础科学中心项目“数字经济时代的资源环境管理理论与应用”(72088101)、中国石油天然气集团有限公司科学研究与技术开发项目“智能分层注采工程技术研究”(2021ZG12)和吉林油田公司关键工程技术攻关科技工程“智能高效注采关键技术研究与应用”(2022JLYTZX02-10)联合资助

摘要 智能油气田的核心是油气水井的数字化和智能化, 基于油田采油采气现状, 提出了由数据感知、数据传输、关键装备与工艺、数据融合等4项基本要素构成的智能化采油采气技术框架。数据感知通过分布于井筒和地面设备中的传感与信息单元全面感知油气水井状态; 数据传输通过井筒、井场和远传网络实现油气水井井下和地面节点互联, 实现可靠数据采集与指令下达; 关键装备与工艺将传感、通讯、控制等功能集成, 形成适应油气开发环境和生产工艺的硬件基础; 数据融合是以数据为基础、以人工智能模型与算法为核心的生产运行优化分析与智能决策控制系统, 实现油气最优化生产。基于智能化采油采气技术框架, 详细分析了采油工程和采气工程4项基本要素的技术现状和具体内容, 分别阐述了全链条智能采油和全生命周期智能采气的愿景和目标。采油采气井筒智能化研究和建设总体处于单井应用、分散建设阶段, 区块建设和应用刚刚起步, 智能化硬件呈现点状应用、规模不足的特点; 软件技术发展总体滞后, 数据融合模型较为分散, 协同化应用严重不足。提出了以采油采气井筒为对象制定顶层设计规划、开展智能化示范区建设、设计智慧油田生产管理平台框架等智能化发展建议, 并将数字化转型智能化发展划分为示范区建设、扩大规模、全面应用等3个阶段。

关键词 智能化; 采油采气工程; 数据感知; 数据传输; 关键装备与工艺; 数据融合

Prospects for intelligent oil and gas production

LIU He¹, XU Jianguo², SU Jian¹, YANG Qinghai^{1,2}

1 PetroChina Research Institute of Petroleum Exploration & Development, Beijing 100083, China

2 PetroChina Jilin Oilfield, Songyuan 138000, Jilin, China

Abstract The essence of intelligent oil and gas fields is the digitalization and intelligence of oil/water/gas wells. Based on the current situation of oil and gas production in oil fields, a technical framework of intelligent oil and gas production is proposed, which consists of four basic elements: data sensing, data transmission, key equipment and technology, and data fusion. Data sensing comprehensively senses the status of oil/water/gas wells through sensing and information units distributed throughout the wellbore and surface equipment. Data transmission is achieved through the wellbore, well site, and remote transmission networks to interconnect downhole and surface nodes of oil, gas, and water wells, achieving reliable data collection and command delivery. Key equipment and technologies integrate sensing, communication, control and other functions to form a hardware foundation

引用格式: 刘合, 许建国, 苏健, 杨清海. 采油采气工程智能化愿景. 石油科学通报, 2023, 04: 398-414

LIU He, XU Jianguo, SU Jian, YANG Qinghai. Prospects for intelligent oil and gas production. Petroleum Science Bulletin, 2023, 04: 398-414. doi: 10.3969/j.issn.2096-1693.2023.04.031

suitable for the oil and gas development environment and production process. Data fusion is a system of production operation optimization analysis and intelligent decision control, which is based on data and with an artificial intelligence model and algorithm as the core, so as to achieve optimal oil and gas production. Based on the framework of intelligent oil and gas production technology, the technical status and specific content of the above four basic elements are analyzed in detail. The vision and goals of full intelligent oil production and whole-life cycle intelligent gas production are described respectively. The research and construction of intelligent wells in oil and gas production is generally at the stage of single well application and scattered construction. The block construction and application have just started, and the intelligent hardware applications are characterized by being patchy and small scale. The development of software technology lags behind, the data fusion model is scattered, and the collaborative application is seriously insufficient. The following intelligent development suggestions are proposed in this paper: the top-level design planning of oil fields, the construction of intelligent demonstration zones, and the framework of an intelligent oil field production management platform. The process of digital transformation and intelligent development is divided into three stages: construction of demonstration zones, expansion of the scale, and comprehensive application.

Keywords intellectualization; oil & gas production; data sensing; data transmission; key equipment and technology; data fusion

doi: 10.3969/j.issn.2096-1693.2023.04.031

0 引言

我国老油田稳产形势严峻、新增油气储量劣质化趋势明显、油气市场不确定性提高、现场工作量大幅上涨与自然减员矛盾加剧等因素,迫使油气行业必须进行数字化转型、智能化发展,以有效应对效率提升和可持续发展挑战,降低开发成本和风险,强化应对油气行业发展和未来市场波动的韧性。

国内外油气开发企业在不同技术领域和开发环节针对信息化、数字化、智能化开展了诸多研发和建设,在云计算、大数据、人工智能方面取得了长足进展^[1-4]。国内油气行业信息化和数字化建设经历了单机应用、分散建设、集中建设、集成应用等阶段,基本实现了数字化油气田建设目标,三大石油公司建成了涵盖勘探、开发、生产、储运、炼化、销售全业务链的信息化支撑体系,目前正在通过数据共享、业务协同和智能化应用建设,由信息化向智能化方向转变^[5]。

油气井是油气田的根本,智能油气田的核心是油气水井生产的数字化和智能化。经过多年发展,井筒自动化、智能化技术取得了诸多创新成果,单项技术日益成熟。以第四代分层注水为代表的智能分注技术初步实现规模化推广应用;智能分层采油经过多轮技术演化升级,明确了适用于机采井管柱结构和生产管理需求的解决方案并已取得技术突破;智能举升在自动控制、电参计产、工况诊断等单项技术方面逐步扩大推广规模,进入多技术集成协同研究和应用阶段。总体来说,涵盖油、水、气井整体的采油采气工程智能化,其研发推广基本处于单项技术、单井应用以及分散建设阶段,区块示范应用处于研发探索阶段,亟

需开展系列化采油采气技术协同与智慧赋能研究与应用^[6-8]。

针对油气水井智能化,技术创新和研究较多等问题,目前并没有较为明确和清晰的采油采气井筒智能化场景描绘。本文基于油田采油采气现状,着眼数字化转型智能化发展以及油田中长期可持续发展,以采油采气工程视角,阐述了涵盖注水、注气、采油、采气等油气开发专业,考虑油气藏、井筒、地面等各个采油气环节的智能化采油采气愿景。

1 采油采气井筒智能化技术框架

智能油气田以油气水井为核心对象,通过完整的油田物联网(Petroleum Internet of Things, PIOT)实现^[9-11],与常规物联网具有相似的结构和特征。PIOT以数据为中心,通过数据流动构建智能闭环控制,完成从基础数据到决策指令的数据加工和处理,基本结构和技术体系如图1所示。

(1)全面感知:利用传感器、智能终端等进行油气水井节点状态数据采集。

(2)可靠传送:将油气生产节点接入数据网络,随时随地进行可靠信息交互和共享。

(3)智能处理:对海量感知和基础信息进行分析和处理,实现智能化决策和控制。

基于PIOT基本结构,考虑油气开发生产实际,提出了智能化采油采气技术框架,包含数据感知、数据传输、关键装备与工艺、数据融合等4项基本要素,其中前3项构成PIOT硬件基础,第4项为顶层软件,软硬件体系间进行实时数据和智能决策交互,如图2所示。

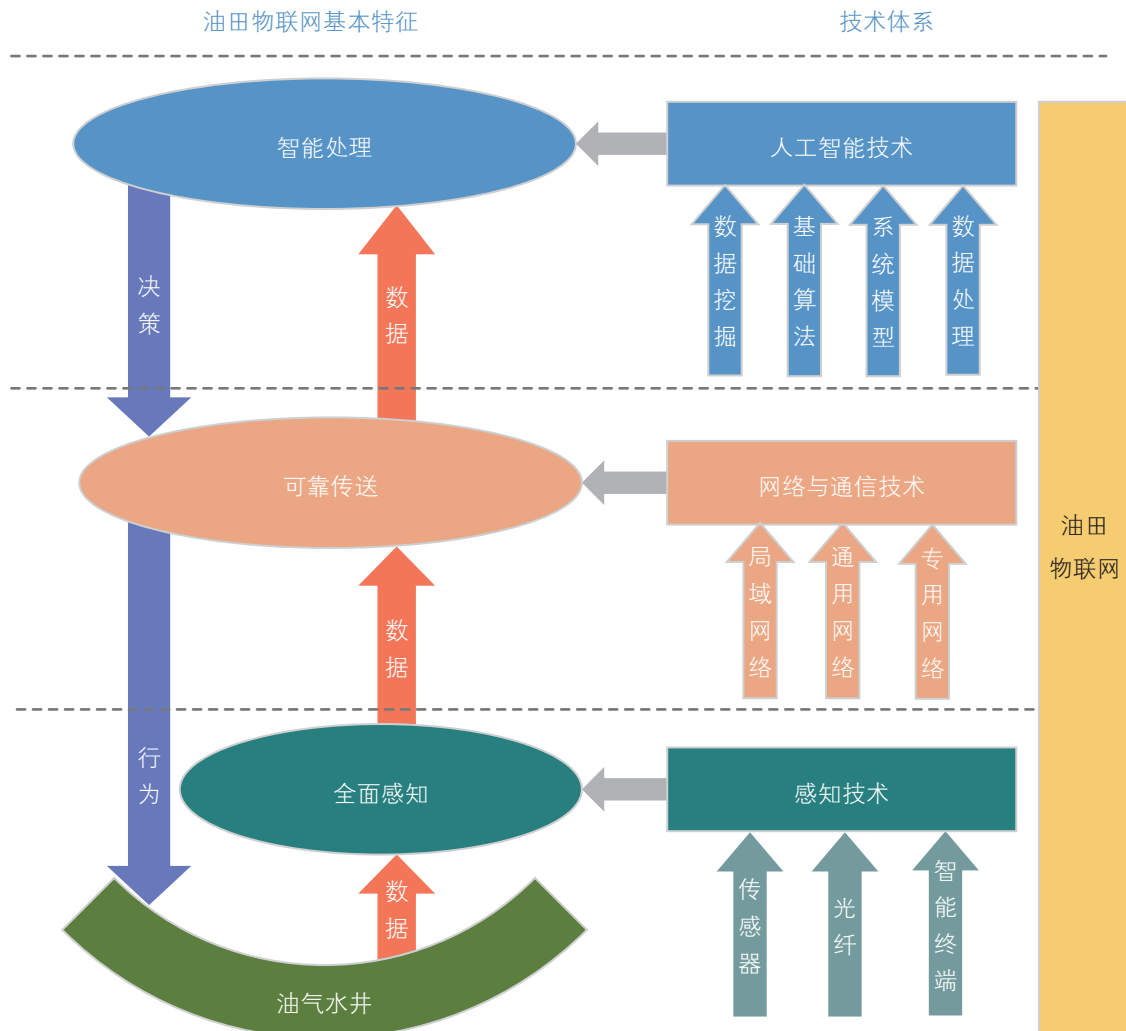


图1 油田物联网特征及其技术体系

Fig. 1 Characteristics and technical system of oilfield internet of things

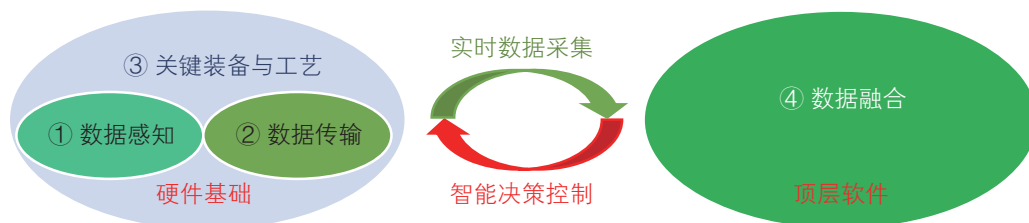


图2 智能化采油采气技术框架图

Fig. 2 Framework diagram of intelligent oil and gas production technology

1.1 数据感知

通过分布于井筒和地面设备中的数据感知与采集单元，全面感知油气水井状态，为最佳效益产量、最优生产参数的分析决策提供数据基础。实时感知的油气水井数据是具有4V特征的大数据^[12]。

(1) 体量大 (Volume): 油气水井数量庞大，自动、

实时、连续采集海量数据，全面掌握油气水井生产动态，为数据融合的全样本分析提供数据基础。

(2) 异构和多样性 (Variety): 井筒和地面状态参数类型多样、模式不一，包括文本、静态图像、动态视频、终端传感数据、模型分析结果等。

(3) 价值密度低 (Value): 不过多追求单一数据精度，适当忽略微观层面精确度，侧重规律分析，提取

决策参考信息；油气水井环境恶劣，对终端传感器单元的长期可靠性具有较高要求，数据的低价值密度特征一定程度上降低了对数据采集精度的要求，有利用传感器的大面积配置和长期服役。

(4)速度快(Velocity)：实时分析，即时决策并反馈执行，对数据融合模型的实时性具有较高要求。

1.2 数据传输

数据传输主要构建从井下到地面、从井场到数据中心的双向传输通道，将油气水井井下和地面节点接入传输网络，随时实现可靠数据采集与指令下达。数据传输网络主要包括3个层次。

(1)井筒网络：油气水井井筒环境恶劣、介质复杂、管柱各异，基于其结构和特点，构建井筒内、井筒到地面的近场/远距离数据传输以及近场电能传送网络，实现井筒内节点可靠互联。

(2)井场网络：构建井场范围内局域通讯网络，以标准协议便捷接入不同终端，实现井场范围内多终端信息交互。

(3)远传网络：利用现有通用成熟通讯技术和网络资源，构建井场到数据中心之间的高带宽、标准化通讯网络。

1.3 关键装备与工艺

采油采气工程面对的工作环境极其复杂，具有含油气层系多套、储层高温高压、岩性与流体多变、井眼空间有限、井型结构多样等特点，对装备和工艺的精密性、适应性、可靠性等要求极为苛刻。关键装备和工艺主要指集成传感、通讯、控制等功能，适应油气生产环境和作业工艺的硬件基础，可划分为由后台数据中心、边缘计算与通讯单元、井场智能工具构成的三级硬件架构。

在三级硬件架构中，后台数据中心属基础设施，为综合分析、管理、指挥中心；边缘计算与通讯单元设置在井场，通过局域网络与油气水井进行实时数据交互，利用自身计算能力，进行小规模专业化数据融合边缘计算，产生控制与决策指令并直接下达到单井执行。边缘计算与通讯单位在井场智能工具与数据中心间起到缓冲作用，一方面提高近端油气水井动态变化的响应速度，另一方面降低数据中心网络访问与运算负荷。

井场智能工具指的是集感知、传输、控制为一体，能够适应油气水井复杂工作环境的井下和地面关键工具、装备及其配套装置和作业工艺。井场智能工具具

有类型多样、涉及面广、用量大的特点，其技术水平和性能指标直接决定了数据采集的准确性和决策执行水平的可靠性。

1.4 数据融合

数据融合是以数据为基础、以人工智能模型与算法为核心的生产运行优化分析与智能决策控制系统，深度挖掘数据融合价值，实现油气最优化生产。数据融合体现了智能化的技术水平和现场决策控制的效果，其框架结构和功能如图3所示。

(1)四级结构：由数据输入流、专业化模型、系统级模型、数据输出流构成的四级数据融合结构，其中数据输入流包括基础数据、历史生产数据和实时采集数据，数据决策输出流包括实时控制指令、措施建议、分析评价、导出数据等。

(2)智能分析：由专业化模型和系统级模型两部分实现。专业化模型主要实现单一采油采气工艺的优化分析与控制，通过专业分析软件模块调用或数学模型计算实现；系统级模型实现多工艺、多领域、多环节融合的高阶协同分析与决策，应用于区块综合分析决策，通过软件协同和联合数学模型实现。

(3)数据挖掘：利用先进的人工智能算法，深度挖掘海量数据价值，一方面提高现有数据融合的准确性、及时性，另一方面可尝试挖掘目前未被涉及的未知价值。

2 智能化采油愿景描绘

2.1 数据感知

目前采油井、注水井和注气井生产数据录入和查询主要基于人工测量和记录，现场录取方式和频次如表1所示。油井录取数据包括示功图、冲程、冲次、油压、套压、回压、日产液、含水、动液面等；水井录取数据包括注水干线压力、水间油压、日注水量、井口油压、注入压力、分层注水量等；注气井录取干线压力、注入间油压、日注入量、注入压力、环空压力等。

由表1可知，目前采油井、注水井、注气井的数据感知存在采集点少、采集频次低、数据不连续、时效性差、人为干扰多等问题，无法支撑人工智能数据融合的大数据需求。在未来智能化采油愿景中，利用大量应用的实时、连续、低成本计量技术，获取采油井、注水井、注气井核心参数，明确油气水井注入、采出、举升状况及生产动态变化规律，为生产管理、

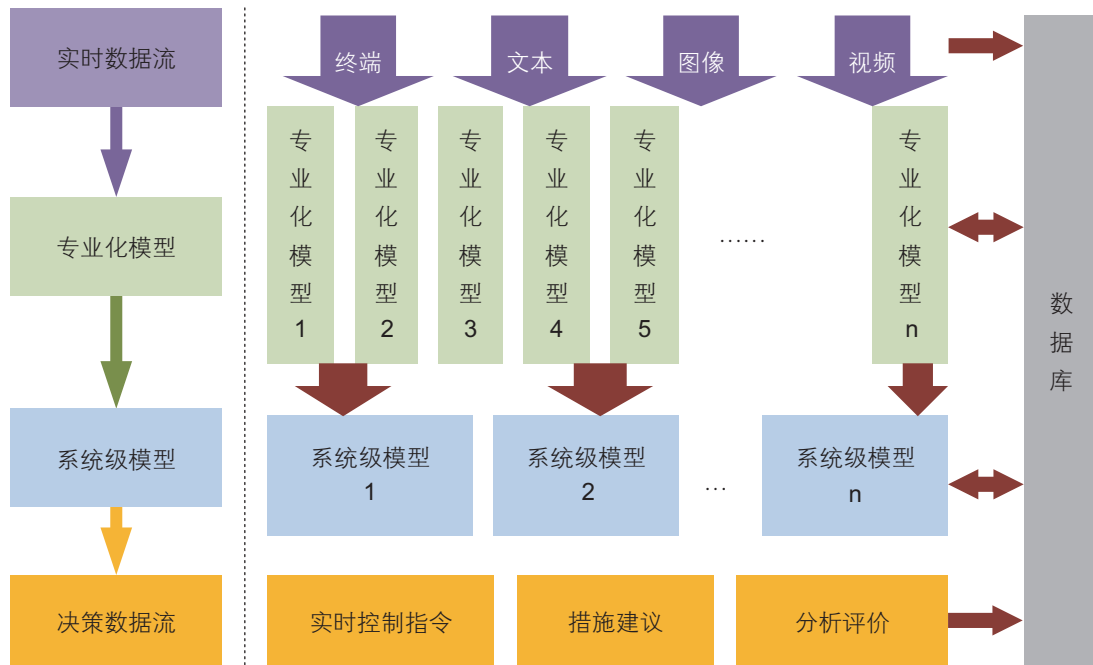


图3 数据融合四级结构和功能

Fig. 3 4-level structure and function of data fusion

表1 目前油气水井数据采集类型及方式

Table 1 Current data types and collection methods for oil and water&gas injection wells

井型	参数	录取方式	频次
油井	示功图/冲程/冲次	示功仪计量/人工读取记录	1次/月
	油压	人工挂仪表测量/人工读取记录	1次/月
	套压	人工挂仪表测量/人工读取记录	1次/月
	回压	人工挂仪表测量/人工读取记录	1次/月
	日产液	计量间翻斗计量/人工读取记录	1次/旬
	日产气	石英玻璃液位计及流量计/人工读取记录	按需
	含水	人工取样化验/人工读取记录	1次/半月
	动液面	声波动液面计量仪/人工读取记录	1次/月
水井	干线压力	压力表实时测量, 人工录入	1次/日
	水间油压	压力表实时测量, 人工录入	1次/日
	日注水量	流量计实时测量, 人工录入	1次/日
	井口油压	人工测试	按需
	注入压力	电缆投捞或边测边调	1次/季度
	分层注水量	电缆投捞或边测边调	1次/季度
注汽井	干线压力	压力表实时测量, 人工录入	1次/日
	注入间油压	压力表实时测量, 人工录入	1次/日
	日注入量	流量计实时测量, 人工录入	1次/日
	注入压力	压力表实时测量, 人工录入	1次/旬
	环空压力	压力表实时测量, 人工录入	1次/月

生产制度调整提供基础依据。智能化采油井、注水井、注气井核心参数获取方法、技术现状及作用分别如表2、表3和表4所示。

由表2、表3和表4可知, 相较于注水井和注气井, 由于油井人工举升管柱的存在以及多相流的复杂性, 智能化油井所需采集的数据类型更为丰富、技术

表 2 智能化油井数据感知核心参数分析

Table 2 Analysis of core parameters for data sensing of intelligent oil wells

核心参数	获取方法	技术现状	作用
载荷	载荷传感器	成熟	获取载荷状态和示功图, 掌握抽油机运行状态、举升能耗, 开展工况诊断、预警分析、计产等
电参	电参测控分析仪	成熟, 分析模型精度有提升空间	
地面	动液面	声波法装置成本高, 非连续测量, 井况要求高、不确定性大/地面功图和电参折算需要高精度模型和计算支持, 误差大 ^[13-15]	监测采油井产液状态, 实现开发方案和生产制度智能调整
	产液量	容积法/电参	精度和长期可靠性待验证
	含水率	阻抗/微波法测试	长期可靠性和流体适应性待验证
	套压	压力传感	成熟
	流压		监测油井产液与含水状态, 精准测量动液面, 为智能生产、开发方案调整提供依据
井下	分层温度	智能分采/光纤测试	智能分采技术趋于成熟、成本高/光纤监测技术成熟, 但工艺复杂、成本高 ^[16] ; 低成本光纤监测工艺已开展现场试验
	分层压力		掌握各层段产液状况和小层贡献率, 为措施建议和智能油藏管理提供依据
	分层产量		

表 3 智能化注水井数据感知核心参数分析

Table 3 Analysis of core parameters for data sensing of intelligent water-injection wells

核心参数	获取方法	技术现状	作用
地面	注入压力	地面压力计	成熟
井下	分层压力	智能分层注水	技术方案多样且成熟, 成本偏高, 需研发低成本智能分注技术, 进一步扩大应用范围 ^[17-19]
	分层流量		实时监测注水井分层注入状况, 提高注水合格率, 为注采协同调控提供实时数据和调控手段
	分层温度		

表 4 智能化注气井数据感知核心参数分析

Table 4 Analysis of core parameters for data sensing of intelligent gas-injection wells

核心参数	获取方法	技术现状	作用
地面	注入压力	地面压力计	成熟
地面	分层压力	智能分层注气	CO ₂ 驱分层注气技术尚不成熟
	分层流量		通过多源数据联合分析, 监测套管变形和破损, 及时准确监测井筒 CO ₂ 泄漏点及生产状态, 反演注采剖面, 优化生产制度, 监测井筒完整性安全风险
井下	井筒温度梯度	套管光纤监测	技术可行, 工艺复杂, 成本高 ^[20-21]

难度更高。由于机采井各数据之间存在关联关系, 未来应进一步明确各参数间的耦合关系, 建立准确关联模型, 在此前提下, 简化现场采集数据的类型和数量, 降低终端设备成本。

2.2 数据传输

数据传输是智能化采油的核心支撑条件, 未来应实现井筒内、井筒与地面、井场的无线数据传输, 以及近场无线电能传送, 构建井筒、井场、数据中心间

的标准化、高效率数据传输通道。

根据应用场景和技术成熟度, 数据传输可分为地面和井筒两大类, 如表 5 所示, 前者通常采用常规成熟技术, 根据需求和现场条件制定通讯协议, 建立可按特定协议随时接入的标准网络; 后者目前主要通过电缆和波码无线通讯方式实现。电缆通讯适用于油气水井, 传输速率高, 且可实现井下供电, 但存在施工繁琐、成本高、不适应带压作业等缺点; 波码无线通讯主要应用于注水井点对点数据传输, 技术成熟度高,

应用范围广,但也存在通讯效率低、适应性差等问题。由于采油井与注水井在压力环境、管柱结构、井液条件、生产制度等方面存在较大差异,波码无线通讯技术无法通用,需要根据采油井结构特点攻关载荷脉冲、振动波等无线通讯技术。

总的来说,未来井筒传输应以无线通讯为主,总体向低功耗、高可靠性、高适应性方向发展。

2.3 关键装备与工艺

以先进感知和可靠传输技术为基础,形成高效率、低成本、系列化、施工简便、具有广泛推广价值的智能采油装备与工艺,建立感知、互联、控制一体化的硬件系统。代表性关键装备与工艺如表6所示。

2.4 数据融合

采油数据融合涵盖智能分注、智能气驱、智能举升等多应用领域,以及多能供给、CO₂埋存等多场景,共包含3个系统级数据融合模型。

2.4.1 智能举升分析控制模型

利用动静态数据,对油井产出情况、运行状态、能耗水平、供能方式等进行综合分析评价,实现油井举升全过程的管理和优化。具体功能包括两部分。

(1)油井生产参数智能设计与调整。根据储层和产液状况,基于合理生产流压,完成机采系统方案的科学设计,从源头提升机采效率;根据现场油井运行参数,为实现最低能耗、最大泵效、最佳效益等不同目标,系统匹配不同模型并自动进行生产参数调整,实

表5 智能化油水井数据传输技术及作用

Table 5 Data transmission technology and function for intelligent oil and water injection wells

井型	场景	获取方法	技术现状	作用
采油井	井下到地面	基于载荷脉冲和抽油杆运动的无线通讯/振动波无线通信	技术取得突破,但应用范围小、成本高	实现井下数据无线上传和控制指令下传
	地面到井下			
油气水井通用	井场内多点数据采集	ZigBee等局域网通讯技术	成熟	实现井场多设备互联
	井场与数据中心	通用网络	成熟	实现井场与数据中心互联
	井筒内近场电能与信号传输	电磁耦合无线传能与通信技术	基本成熟	实现油水井内近距离非接触无线传能与数据传输
	井下与地面双向通讯	振动波无线通讯	基本成熟,上传功耗高	实现井下数据无线上传和控制指令下传
		电缆	成熟,施工繁琐,工艺有创新空间	支撑重点井、大数据量、实时双向传输与井下供电
注水井	井下与地面	波码无线通讯	原理成熟,现场工艺有创新空间	在油管稳定环境中实现井下低功耗、高效率、可靠无线传输

表6 智能化采油关键装备与工艺

Table 6 Key equipment and processes for intelligent oil production

井型	装备与工艺	应用范围	技术现状	作用
采油井	智能分层采油装备与工艺	重点井	技术基本成熟,工艺有创新空间	实现重点井全面监测与控制,提高区块整体认识水平
	智能举升装备与工艺	油井全覆盖	产状监测和井筒无线传输技术取得突破;地面举升控制技术成熟,但协同作用发挥不足	建立智能举升系统,实现油井无人化智能生产
注水井	无线集成智能分注	水井全覆盖	缆控与波码工艺的重大升级,技术基本成熟,应用规模待扩大	集成配水器实现智能分注工具成本降低,无线/投捞电缆实现作业工艺简化,低成本智能分注全覆盖,实现分注实时监测与控制
	有线集成智能分注		成熟,适应层数少、水质要求高	改善层间吸入矛盾,实现精细注入
注气井	地面智能控制分注工艺	重点井	无定型、成熟、低成本解决方案	

现油井智能化生产。

油井智能生产可进一步划分为3个阶段。第一阶段为基于产状的智能举升,即基于动液面动态变化和井口产状,自动调整举升工作制度;第二阶段为基于效益的智能间抽生产,在产状基础上,耦合峰谷电价、油价等因素,以最佳效益为目标智能调整举升工作制度;第三阶段为与新能源融合应用的智能生产,基于风光电多能供给结构和新能源供电特性,实时优化供能模式及举升工作制度。

(2)油井运行状态分析及故障预警^[10-11]。利用人工智能,基于多参数对油井异常工况进行诊断识别,并智能预测工况变化趋势,为抽油机井运行提供超前预警及措施建议。

为实现上述功能,智能举升分析控制模型包含单井间抽控制模型、常规抽油机控制模型、其它举升方式控制模型等3个专业化数据融合模型。

(1)单井生产控制模型。基于油井产量、生产参数、运行成本,以保持合理生产压差和效益最大化为目标,确定并评价可智能调整的合理间抽制度,形成“优化—实施—评价—再优化”控制闭环^[22-24],如表7所示。

(2)集群生产控制模型。开展生产动态负载预测和新能源发电预测,建立新能源供能条件下的一体化综合调控与评价模型,依据实时生产动态,制定最优产

量、最佳效益等不同目标以及不同供能模式条件下的最优生产策略,实现生产负载与供能波动的最佳匹配,如表8所示。

(3)常规抽油机控制模型。基于实时运行数据流,分析抽油机平衡度、能耗水平、运行工况,结合产量计量,实时调整生产制度并针对异常工况提出处理建议^[25-27],如表9所示。

(4)其它举升方式控制模型。基于实时运行数据流,分析能耗水平、运行工况,结合产量计量,实时调整生产制度并针对异常工况提出处理建议,如表10所示。

2.4.2 注采协同分析评价模型

依托油藏静态资料和实时动态监测数据,智能分析分层产能、注采关系、注采矛盾,实现油水井、油气井协同调控,提高油田采收率^[28-30]。

注采协同分析评价模型具有分层产能评价、注采关系评价、注采矛盾分析等3类功能。分层产能评价基于油藏发育状况、动用效果及实时分层监测资料,分析分层剩余储量,给出分层调控及增油措施建议;注采关系评价基于生产动态数据、监测资料及油水/油气间配置关系,实时评价水驱/气驱方向及见效时间,给出油水/油气井协同调控方案调整建议;注采矛盾分析通过平面、层间、层内三大开发矛盾潜力分析,确

表7 单井生产控制模型

Table 7 Control models of single production well

模型	作用和实现方式	所需核心参数	技术现状
精细化间抽控制	基于流压或动液面实时数据及峰谷电价,以供采协调、保持合理沉没压力和效益最大化为目标,精细化制定单井智能间抽制度和开井生产制度。	流压、动液面、峰谷电价	已建立基础模型,待大规模现场检验和优化完善
间抽综合效益分析	分析间歇生产的产量综合波动状况、长期节能降耗情况,以及产量、电费及修井成本的变动,综合评价特定间抽制度下的效益。	产量、电价、修井成本	已建立基础模型,待大规模现场检验和优化完善

表8 集群生产控制模型

Table 8 Control models of cluster production

模型	作用与实现方式	所需核心参数	技术现状
生产动态负载预测模型	预测不同生产方式下的负载变化以及产量变化规律	流压、动液面、举升系统基本参数	抽油机节能降耗控制方法和能耗评价方法已成熟
新能源发电预测模型	基于新能源建设和气候、气象、地域等因素,建立新能源发电量预测分析模型,评价多能供给关系。	新能源形式、规模、气候、气象等	模型适用性和可靠性待完善和验证
多能供给一体化综合调控与评价模型	在线评价生产负载和新能源发电量关系,制定区块范围、不同目标下的生产优化策略,实现区块生产系统群控	生产负载模型结果、新能源发电预测结果	模型待开发

定具体注采协同调控原则、方式及配套措施建议。

注采协同分析评价模型包含智能分注数据应用模型、智能分采数据应用模型、智能分层注气应用模型等3个专业化数据融合模型。

(1)智能分注数据应用模型。依托精准、实时的井下分层注入数据,自动分析油层吸水指数、油藏类型、物性参数及边界变化情况,实时优化、执行注水方案,

提出水井措施建议,如表11所示。

(2)智能分采数据应用模型。依托精准、实时井下分层产出数据,自动分析重点井油层生产能力、合理流压及地层参数,实时控制流压并提出措施增油建议,如表12所示。

(3)智能分层注气应用模型。依托重点井智能分层注气,实时监测地面注入参数,分析优势通道类型,

表9 常规抽油机控制模型

Table 9 Control models of conventional pumping unit

模型	作用和实现方式	所需核心参数	技术现状
平衡度分析	智能识别上下冲程,并比较上下冲程电流和功率,诊断抽油机平衡情况,提出调整建议。	电参	成熟
泵效、能耗分析	根据井口产液量和理排确定泵效,综合耗电数据,分析抽油机工作制度合理性,并实时调整。	产液、电参	成熟
工况分析 诊断	根据示功图/电参数据,判断抽油机运行工况,提出处理建议。	示功图、电参	电参/示功图分析技术成熟,分析模型精度有待提高
产量计量 模型	通过电参、示功图折算油井产量,监测油井产液与含水状态,为智能生产、智能间抽制度调整提供依据。	电参、示功图、计量仪	电参、示功图折算精度有待提高,产液计量技术成熟。

表10 其它举升方式控制模型

Table 10 Control models of other lifting methods

模型	所需核心参数	技术现状	作用与实现方式
泵效、能耗分析	产液、电参	成熟	监控电流、频率、电机转速、压力、产量等参数,通过实际产液与理排之比获取泵效,分析油井生产及设备运行状态,给出设备参数调整建议。
生产动态分析	设备运行参数	成熟	

表11 智能分注数据应用模型

Table 11 Data application models of intelligent zonal water injection

模型	作用与实现方式	所需核心参数	技术现状
吸水指数	基于分层压力及注水量分析注水井套变、套外窜、封隔器密封性等井筒状态,确定油层吸水指数,为井况诊断和注水方案调整提供依据。	分层压力、注水量	已建立基础模型,待大规模现场检验和优化完善
吸水剖面	基于同位素测试结果,绘制吸水剖面,用于调剖堵水,提高注入水在各层的波及系数。	同位素	成熟
压降试井	通过停注后实时监测嘴后压力获取分层压降,形成压降不稳定试井解释成果,确定油藏类型、物性参数和边界变化,为措施方案制定、实施效果评价提供数据支持。	分层压力	已建立基础模型,待大规模现场检验和优化完善

表12 智能分采数据应用模型

Table 12 Data application models of intelligent zonal oil production

模型	作用与实现方式	所需核心参数	技术现状
产液剖面	基于分层产量、含水,压力,分析油层生产能力,为调整配产配注方案提供依据	分层产量、含水	已建立基础模型,待大规模现场检验和优化完善
合理流压	基于分层流压与产量的关系,确定合理流压,为举升及措施方案制定提供依据,最大限度地发挥油井潜能	分层压力、产量	低渗透油田合理流压模型,待攻关
压恢试井	基于压力恢复速度,形成压恢试井解释成果,获取地层参数,评价油气井或油藏的生产动态,为措施方案提供依据	分层压力	成熟

制定调控方案,实现精细化配注和调堵;结合井下光纤监测反演吸入剖面变化,评价调控效果,指导调控方案优化,如表 13 所示。

2.4.3 CCS 完整性评价模型

综合注气过程工艺管柱、套外水泥环、地质体完整性监测,建立地质封存 CO₂ 完整性评价模型,指导 CO₂ 驱 CCS 阶段区块和注入井优选及调整,实现 CO₂ 长期安全封存。

CCS 完整性评价模型具有井筒完整性评价、套外完整性评价、地质体完整性评价等 3 类功能。井筒完整性评价通过实时监测注气井环空压力,智能分析降压数据,实施分级管理;套外完整性评价基于注采井附近地面、大气 CO₂ 通量监测,分析 CO₂ 浓度变化规律及变化原因,进一步评价管柱套外完整性;地质体完整性评价通过三维地震数据,评价盖层、断层封闭性,给出区块埋存建议。CCS 地质体完整性评价模型如表 14 所示。

2.5 智能化采油愿景

基于新能源与常规能源多能供给结构,实时监测注水井、注气井和采油井储层、井筒、地面全面生产信息,将实时数据流和历史开发状况、储层条件等数据融合,利用人工智能制定区块开发方案,决策分发分层注入、分层采出、智能举升等生产控制指令,根据区块动态变化,实时优化、调整开发方案,提出以

效益最大化为目标的区块措施建议。

最终,建立以实时、丰富数据流为基础,以数据分析与价值挖掘为核心,以智能控制执行终端为支撑,覆盖采油全链条的智能采油模式。

3 智能化采气愿景描绘

3.1 数据感知

目前天然气信息系统已实现生产信息录入、查询功能,录取参数包括井口油压、套压、产气量及产液量等,数据获取方式和频次如表 15 所示。

由上表可知,目前气井数据采集类型较为单一,主要为井口和地面信息,具有覆盖范围较小、数据量小、不连续等特点。智能化采气愿景中,应实现低成本、实时、连续计量,明确气井井筒携液状况及井下生产动态变化规律,为排采措施优选及优化、生产制度调整提供基础依据。智能化采气核心参数、获取方法、技术现状和作用等如表 16 所示。

3.2 数据传输

气井管柱结构和特点与油井具有较大差异,措施实施需要带压或压井作业,工艺复杂,成本较高。目前较为适合气井的数据传输方式为预置电缆,一般用于强排措施,满足筒与地面的高效双向数据交互需求;除此之外,目前缺乏适用于气井特点的双向通讯

表 13 智能分层注气数据应用模型

Table 13 Data application models of intelligent zonal gas injection

模型	作用与实现方式	所需核心参数	技术现状
吸入剖面	基于分层温度测试结果,绘制吸气、吸水剖面,用于气驱调控扩大波及体积。	DTS 数据	成熟
压降试井	基于压降不稳定试井解释成果,明确优势通道类型、表皮系数等,为气驱扩大波及体积调控方案设计提供理论基础	分层压降	成熟

表 14 完整性评价模型

Table 14 Integrity evaluation models for CCS

模型	用途	所需核心参数	技术现状
环空带压评价	基于环空压力监测数据、压降及压恢测试曲线判断环空带压等级	成熟	环空压力、压降及压恢曲线
CO ₂ 埋存状况评价	通过连续监测注采井附近土壤环境、大气中 CO ₂ 通量变化,实时监测区域范围内 CO ₂ 浓度变化,评价 CO ₂ 泄漏情况	无评价方法,待攻关	CO ₂ 通量
井下微地震事件分析	通过实时地质体微地震事件监测,配合时移 VSP 测试,分析盖层、断层是否发生 CO ₂ 泄漏,认识储层及流体随时间的变化规律,监测二氧化碳在地下封存状态,定量描述 CO ₂ 注入后吸层位、波及范围	分析评价方法不成熟,待完善 ^[20,31]	DAS 数据

技术,气井井下数据上传主要通过柱塞或其它间接方式实现。

智能化采气数据传输的重点是井下流压、动液面等参数的获取与上传,应更加关注适用于不同排采阶段个性化数据传输技术。此外,地面数据传输网络与油井类似,应构建单井、井场、数据中心之间的标准化、高效率数据传输通道。

3.3 关键装备及工艺

以先进感知和可靠传输技术为基础,形成高效率、低成本、系列化、施工简便、具有广泛推广价值的智能采气装备与工艺,建立感知、互联、控制一体化的硬件系统,代表性关键装备及工艺如表 17 所示。

3.4 数据融合

基于气井不同生产阶段动静态数据,构建气井全

生命周期采气工艺优选评价及参数优化模型,开展生产递减规律、井筒携液能力、井筒流态和产积液等综合评价分析^[32-34],智能优选气井全生命周期排采工艺和优化工艺参数,评价工艺效果,达到气井有效发挥产能和长期稳定生产目的。

气井全生命周期采气工艺优选评价及参数优化模型具有生产规律及井筒产积液评价分析、井筒井况分析评价、全生命周期采气工艺优选、采气工艺参数调整优化、采气工艺措施适应性及经济性评价等功能。

3.4.1 生产规律及井筒产积液评价分析

基于气量、液量、井口压力和井筒液面等实时动态数据,分析气井生产递减规律,动态评价井筒携液、流态和产积液状况。生产规律及井筒产积液评价子模型及其技术现状等如表 18 所示。

3.4.2 井筒井况分析评价

基于完井井身结构,评价气井生产及排液能力,

表 15 目前气井数据采集类型及方法

Table 15 Current data types and collection methods for gas wells

参数	现场录取方式	录取频次
油压、套压	井口压力计远传,数量极少	实时
	人工读取	1次/3天
气量	井口单独计量,占比约20%,多数不具备数据远传功能	实时
	站内计量分离器多井轮换计量	1次/3天
液量	站内计量分离器多井轮换计量	1次/3天

表 16 智能化采气核心参数及现状

Table 16 Core parameters and status of intelligent gas production

核心参数	获取方法	技术现状	作用	
地面	气、液量	多相流量计	基于射线的多相流量计量技术成熟,成本高,单井实时计量未规模推广	计算井筒温度压力剖面,评价井筒携液能力,分析生产递减规律和气井流动阶段,为控压生产和排采措施优化提供依据
	油套压及BC环空压力	压力传感器	成熟,测试数据远传尚未规模推广	间接评价气井生产递减规律;间接评价井筒积液情况;评价井筒完整性
井下	流压	自喷	计算 井下压力梯度测试	计算模型成熟
		泡排	钢丝投捞作业/毛细管测压	成熟
	气举	计算	成熟	
	柱塞	柱塞测压	成熟,智能化程度待提高	
动液面	液面仪	成熟,井况要求高,现场多为人工周期测试,泡排、封隔器完井等井型使用受限	准确测量动液面,评价井筒携液能力和排采工艺效果	

为措施调整提供依据；基于B、C环空压力及腐蚀速率实时监测数据，保障井筒各级屏障长期稳定。子模型及技术现状等如表 19 所示。

3.4.3 全生命周期采气工艺优选

基于气井产状、工况综合评价、不同生产阶段特征，科学评估优选经济高效采气工艺措施及生产工艺切换时机。子模型及作用、技术现状等如表 20 所示。

3.4.4 采气工艺参数调整优化

基于不同排采工艺措施的动态数据，智能调整不同工况条件下气井排采工艺参数。子模型及其作用、技术现状等如表 21 所示。

3.4.5 采气工艺措施效果及适应性评价

基于气井排采措施前后实时生产动态数据，定量评价不同排采措施增产效果、减缓递减效果、井筒积液排出效果，同时结合工艺经济性评价，指导气井措施调整。子模型及作用、技术现状等如表 22 所示。

3.5 智能化采气愿景

构建以生产信息全面感知、远程生产管控为主体的气田数字化开发模式，利用人工智能分析诊断不同阶段气井生产动态规律，系统评价气井井筒流态及产积液状况，提供全生命周期生产技术决策，并实时调

表 17 智能化采气关键装备与工艺

Table 17 Key equipment and processes for intelligent gas production

装备与工艺	应用范围	技术现状	用途
智能可调气嘴	全覆盖	成熟，待推广	针对精细控压气井，通过自动可调油嘴实时调整油嘴开度，达到气井全周期精细控压生产目的。
智能化泡排加注装置	弱喷气井	硬件基本成熟，但泡排加注制度靠人工摸索	针对泡排措施气井，智能化调控泡排药剂加注量及加注制度，发挥泡排工艺措施作用。
智能泡排加注和测压一体化装置	弱喷气井	单项技术成熟，工艺待集成	将泡排剂直接加注到产层位置，提升泡排效果；自动切换泡排和测压流程，实现压力在线监测
智能化柱塞排采一体化装置	重点气井	智能柱塞待攻关	针对柱塞举升气井，动态监测井下压力，实现气井井筒产积液动态评价，智能化调控柱塞工作制度。

表 18 气井生产规律及井筒产积液评价分析

Table 18 Analysis of production law and evaluation of fluid accumulation in gas wells

子模型	作用与实现方式	所需核心参数	技术现状
全井筒临界携液评价模型	综合评价井筒携液状况，确定井筒不满足携液的位置和时机		临界携液模型基本成熟，需攻关全井筒携液动态分析模型
井筒流态动态评价模型	基于井筒流态模型，进行井筒流态分析，动态评价气井井筒流态	产气量、产液量、井口压力、井筒液面	稳态法分析井筒流态技术成熟，需结合实时动态数据，进一步攻关动态分析模型
生产试井递减规律分析模型	基于现代递减分析，实现产量、流压、地层压力预测		试井解释方法成熟，需结合动态监测数据校正模型

表 19 井筒井况分析评价

Table 19 Analysis and evaluation of wellbore condition

子模型	作用与实现方式	所需核心参数	技术现状
排采流动通道评价	基于不同完井方式及井下生产管柱状况，分析计算气井生产及排液能力	允许通过气量、极限排液量	特殊工况流动通道分析方法需完善
环空带压评价	根据各级套管抗内压强度设定环空压力预警值，基于B、C环空实时监测压力，判断环空带压情况，实现超压预警	B、C环空压力	成熟
腐蚀评价	通过井口腐蚀挂片开展腐蚀监测，定期评价腐蚀速率，为调整加药制度提供依据，满足井筒防腐性能需求	腐蚀速率	成熟

表 20 全生命周期采气工艺优选

Table 20 Technology selection for full life cycle gas production

子模型	作用与实现方式	所需核心参数	配套采气工艺现状
管柱排采阶段精细控压生产制度调整优化	基于气井产状和工况综合评价, 优选经济高效采气工艺措施	临界气量、液量、压力范围	技术可行, 需根据气井不同生产阶段优化控压规则
低压自身能量生产阶段排采工艺优选及参数优化			泡排和柱塞智能化排采应用国内有应用试验
外部能量助排生产阶段排采工艺优选及参数优化			气举智能化排采应用国内有应用试验
高产液生产阶段排采工艺优选及参数优化			进口电潜泵高液量排水采气技术成熟, 智能化合理供排调控技术需完善及推广

表 21 采气工艺参数调整优化

Table 21 The adjustment and optimization models of gas production parameters

模型	作用与实现方式	所需核心参数	技术现状
智能控压模型	基于生产动态分析和产能预测, 建立不同阶段控压指标和油嘴调控规则; 通过油嘴开度计算、生产试井流态诊断、解析法产能预测、管流模型流压校正, 实现全生命周期精细控压生产	井口压力、产气量、产液量、油嘴开度	试验阶段, 待完善
智能泡排模型	基于生产动态和临界携泡分析, 分析泡沫携液能力、加注参数与排液关系、加注量与经济关系, 实现加注制度智能化分析与优化	产气量、产液量、加注药剂、井口压力	常规泡排加注工艺成熟, 智能调控技术待完善
智能柱塞举升模型	基于瞬时携液和载荷系数评价分析, 分析诊断运行状态和压力恢复情况, 评价合理运行参数, 实现柱塞气举参数优化与运行状态诊断	产气量、产液量、井口压力、井筒流温流压、开关井时间、柱塞运行状态	常规柱塞工艺成熟, 智能调控技术有待完善
智能气举排采模型	基于气举过程携液动态评价, 分析合理流压和合理注气量, 评价合理气举制度并智能优化	产气量、注气量、产液量、井口压力, 注气周期	常规气举工艺成熟, 智能调控技术有待完善
智能电潜泵排采模型	基于电泵排采效果与储层供给关系, 分析储层气液供给、电泵工况以及运行参数与排液关系, 智能调节电泵运行参数	井口压力, 泵出入口压力、温度, 电机运行频率、输出电流	试验阶段, 待完善

表 22 采气工艺措施效果及适应性评价

Table 22 Evaluation of effectiveness and adaptability of gas production process measures

子模型	作用与实现方式	所需核心参数	技术现状
井筒排液效果评价分析模型	根据措施前后产气量、液量、油压实时评价全井筒携液和井筒流态	产气量、产液量、井口压力、井筒液面	临界携液模型已成熟, 需进一步攻关全井筒携液动态分析模型; 稳态法分析井筒流态技术成熟, 需进一步攻关动态分析模型
工艺增产及减缓递减效果评价分析模型	实时监测措施前后气井气量、液量、压力变化动态, 判断工艺措施增产及减缓递减效果, 及时调整措施、优化参数	产气量、产液量、井口压力	递减规律分析技术成熟
工艺经济性评价分析模型	综合评价气井措施增量及投入成本, 确定工艺效益应用边界条件, 指导气井措施调整及参数优化。	措施增量、气价、措施成本	不同工况条件排采工艺效益评价方法需完善

控采气工艺装备运行制度, 实现气井高效排采与智能化管理协同协作, 打造智能化气田生产模式。

最终, 以智能气田采气工程核心业务为主线, 以

全流程数字化管理为支撑, 搭建全生命周期的采气工程智能化管控模式, 从而实现数据采集自动化、工艺应用一体化、生产管控可视化、分析决策科学化。

4 数字化转型智能化发展建议

采油采气井筒智能化愿景如图4所示，即以数据感知、数据传输为基础，构建智能化采油采气关键装备与工艺，与专业化、系统级分析决策模型进行数据交互融合，实现以数据为基础的生产运行优化分析与智能实时决策控制，发挥注入与采出、井下与地面协同效应，提高采收率和油气生产整体运行效率，优化生产组织方式，促进管理水平提升和转变，保障油田可持续发展。

4.1 智能化发展形势与挑战

目前，采油采气井筒智能化研究和建设总体处于单井应用、分散建设阶段，区块建设和应用刚刚起步，规模较小。智能化采油采气硬件和软件技术发展形势主要呈现以下特点。

(1) 硬件点状应用，规模不足。第一，单项智能化

技术已日趋成熟稳定，部分硬件装备和工具已由功能实现向降成本方向发展；第二，目前的技术应用一般为单项技术应用在单一技术领域，缺乏整体设计和硬件协同；第三，推广应用规模较小且分散，数据支撑能力不够，智能化开发效果展现不足。

(2) 软件滞后，即数据融合模型及其协同化应用发展滞后。第一专业化数据融合能力基本基于大型商业软件，软件功能模块调用缺乏统一接口设计和规范；第二，专业化分析模型较为分散，人为主导性较强，知识不统一、不规范；第三，系统级分析模型基本空白，功能整合不足，大数据、人工智能的作用和优势无法充分发挥。

4.2 智能化发展建议

(1) 以采油采气井筒为对象，制定智能化油田顶层设计规划

首先，油田应结合自身特点因地制宜制定全面、完整的智能化油田顶层设计规划，涵盖注水、注气、

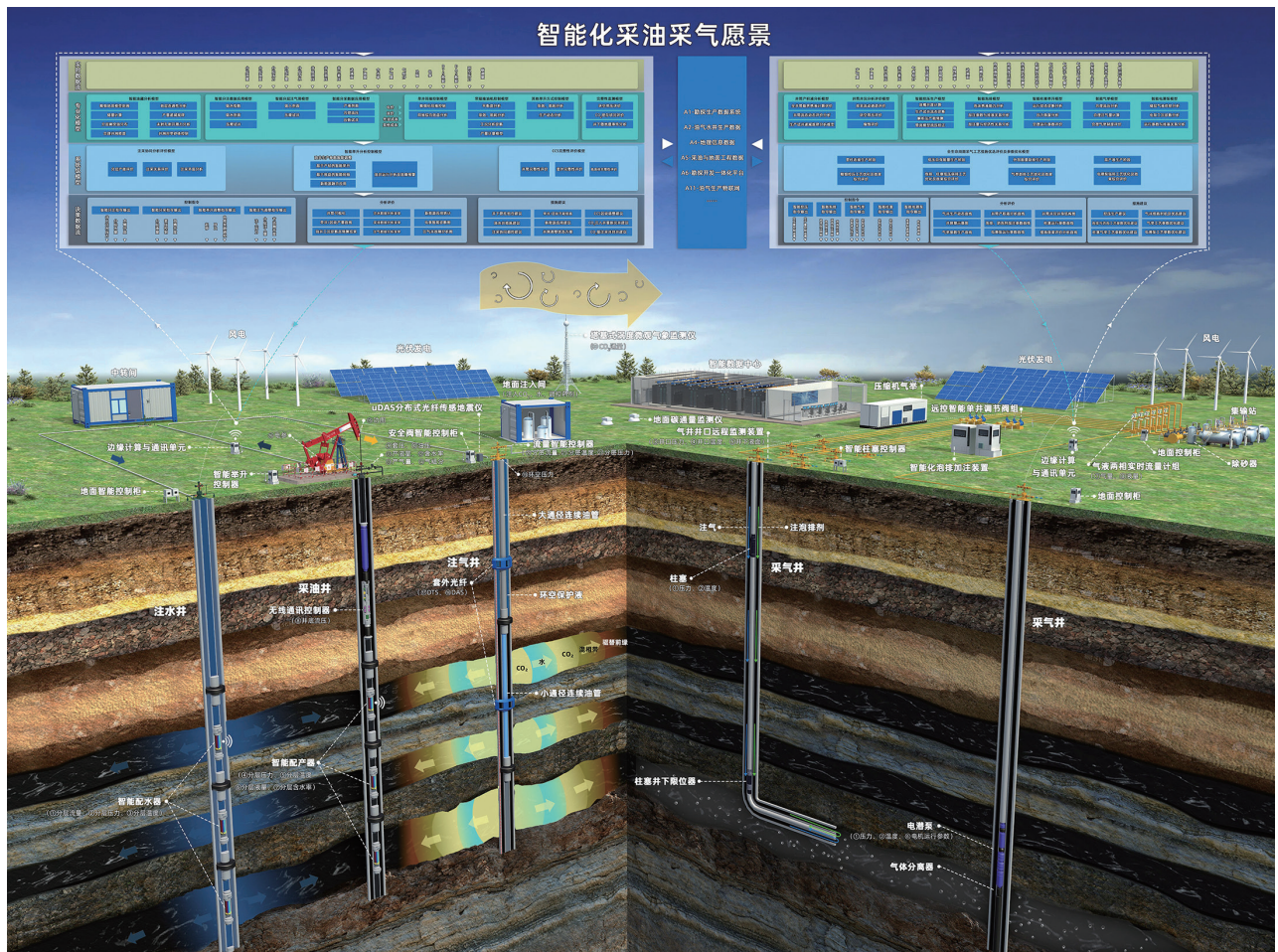


图4 智能化采油采气愿景

Fig. 4 Vision of intelligent oil and gas production

采油、采气等油气开发专业领域,考虑油气藏、井筒、地面等各个采油气环节,统一转型发展目标;其次,顶层设计规划应着眼长远发展,由上而下、按高技术规格设计,避免过渡和折中方案;第三,根据顶层设计规划以及技术成熟度、技术成本等条件,制定技术路线图和关键里程碑节点,由下而上分步骤推进智能化建设;第四,营造转型发展理念,统一转型认识,明确业务部门和单位分工和职责,按业务模块衔接标准,各自推进,紧密合作,形成合力。

(2) 加快技术研发应用进程,开展智能化示范区建设

智能化硬件技术的应用规模与技术水平和成本直接相关,其推广既是技术创新过程,也是规模效应降低成本的过程。智能化硬件技术研发和应用应遵循以下3个原则。

① 模块化研发。采用模块化理念研发基础通用功能模块,以功能组合方式研制关键装备与工具,提高研发效率和技术可靠性,降低单一工具的研发成本;

② 系列化制造。以系列化、批量化理念制造关键装备,提高基础通用模块可靠性,延长智能装备现场服役时间,降低制造和使用成本;

③ 便捷化工艺。通过技术创新和优化设计,简化智能装备入井工艺和日常维护工艺,降低入井操作技术门槛,提高施工效率、成功率以及维护便捷性。

目前,部分智能化技术已处于国内外领先水平,应加大此类技术的产品化进程,提高技术成熟度,降低成本。在此前提条件下,开展智能化先行示范区建设,发挥技术协同作用,加快呈现智能化技术在开发效果、生产管理以及综合效益提升方面的作用和优势。

(3) 制定智慧油田生产管理平台框架结构

第一,搭建智能化油田生产管理平台系统框架,明确模块构成、逻辑关系、数据标准、数据结构等基本标准,使基础模块搭建有据可依,兼具通用性;第二,由“硬件为主”向“软硬兼施”转变,各基层业务单位以专业化数据融合模型为起点,有步骤、分阶段构建各专业领域的系统级分析模型,进而构建智慧油田数据融合系统。

4.3 智能化发展展望

数字化转型智能化发展可划分为三个主要阶段。

(1) 示范区建设阶段。建设智能油气田示范区,确定智能化采油气硬件技术序列,构建智能化油气生产管理平台,实现部分专业化模型植入与基本协同,初步探索形成智能油气田运行架构和模式;

(2) 扩大规模阶段。扩大智能化软硬件推广应用范围,实现智能油气田示范区数据采集与传输全覆盖,提升智能化油气生产管理平台系统级分析决策能力,基本实现智能化油气生产管理;

(3) 全面应用阶段。定型智能油气田发展模式,并全面推广,实现油气田开发少人化、科学化和智能化,促进油田管理模式转变。

5 结论

在智能化、“双碳”战略目标的新时代背景下,数字化转型、智能化发展是能源行业极为核心、避不开的重要战略研究目标,是油气田可持续发展的广泛共识。本文从智能化油气的核心,即油气水井角度,提出了由数据感知、数据传输、关键装备与工艺、数据融合等基本要素构成的智能化采油采气技术框架,阐述了基本要素的技术内涵及其具体结构和内容,分别描绘了智能化采油、智能化采气发展愿景,总结了智能化采油采气的目标。

智能化采油采气不仅能够加速能源开发业务升级发展,更能促进传统油气业务和新能源融合发展,创新能源新模式、新业态,助力能源清洁低碳转型和双碳目标达成。然而,数字化转型、智能化发展也是一项复杂的系统工程,不仅仅涉及先进技术创新和推广应用,更涉及各油气田管理模式、文化理念、观念认识等非技术问题,是一项持久攻坚战,是一个技术不断创新、成本逐步降低、效果逐渐显现、效益持续提升的过程。为了加速智能化发展进程,应采用自上而下规划、自下而上实施的发展模式,统一目标、明确职责,硬件建设和软件设计同步推进,以示范区建设带动油田智能化全面发展。

致谢:本文在编写过程中得到吉林油田油气工程研究院张帆、杨兴国、孙超、孙伟、宋克丛、潘若生、沈翹楚、刘亚珍、潘钰、周宇驰以及中国石油勘探开发研究付涛、石白茹、廖成龙等人的帮助,在此一并表示感谢。

参考文献

- evaluation and prediction of oilfield mechanical production system based on data mining[D]. Daqing: Northeast Petroleum University, 2022.]
- [2] 王振龙. 基于深度学习的抽油机井生产参数自适应调控方法研究[D]. 常州: 常州大学, 2022. [WANG Z L. Research on adaptive control method for production parameters of pumping wells based on deep learning[D]. Changzhou: Changzhou University, 2022.]
- [3] ROWLAN O L, MCCOY J N, BECKER D J, et al. Efficient and accurate monitoring of rod pump well performance using real time data processing and visualization[C]. Oklahoma: SPE Production and Operations Symposium, 2013, 3: 23–26.
- [4] 沈煜佳. 基于边缘计算的抽油机井智能诊断系统研发[D], 南京: 东南大学, 2021. [SHEN Y J. Research and development of intelligent diagnosis system for sucker rod pumping units based on edge computing[D]. Nanjing: Southeast University. 2021.]
- [5] 匡立春, 刘合, 任义雨等. 人工智能在石油勘探开发领域的应用现状与发展趋势[J]. 石油勘探与开发, 2021, 48(1): 1–11. [KUANG L C, LIU H, REN Y L, et al. Application and development trend of artificial intelligence in petroleum exploration and development[J]. Petroleum Exploration and Development, 2021, 48(1): 1–11.]
- [6] 李付超. 数字化抽油机控制技术与系统应用研究[D]. 西安: 西安石油大学, 2015. [LI F C. Research on control technology and system for the digital pumping unit[D], Xi'an: Xi'an Shiyou University, 2015.]
- [7] WANG X, HE Y, LI F, et al. A working condition diagnosis model of sucker rod pumping wells based on deep learning [J]. SPE production & operations, 2021: 1–10.
- [8] NASCIMENTO J, MAITELLI A, MAITELLI C, et al. Diagnostic of operation conditions and sensor faults using machine learning in sucker-rod pumping wells[J]. Sensors, 2021, 21(13).
- [9] 班兴安, 李群, 张仲宏, 等. 油气生产物联网[M]. 北京: 石油工业出版社, 2021. [BAN X A, LI Q, ZHANG Z H, et al. IoT for oil and gas production[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2021.]
- [10] 李剑峰, 肖波, 肖莉, 等. 智能油田[M]. 北京: 中国石化出版社, 2020. [LI J F, XIAO B, XIAO L, et al. Intelligent oil field[M]. Beijing: China Petrochemical Press, 2021.]
- [11] 龚仁彬, 李欣, 李宁, 等. 油气人工智能[M]. 北京: 石油工业出版社, 2021. [GONG R B, LI X, LI N, et al. Artificial intelligence in oil and gas[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2021.]
- [12] 李雄飞, 董元方, 李军. 数据挖掘与知识发现(第三版)[M]. 北京: 高等教育出版社, 2020. [LI X F, DONG Y F, LI J. Data mining and knowledge discovery(3rd edition)[M]. Beijing: Higher Education Press, 2020.]
- [13] 姜东. 抽油机井电功图测试动液面技术研究与应[J]. 石油地质与工程, 2019, 33(3): 115–118. [JIANG D. Research and application of electric power diagram to estimate dynamic liquid level in rod-pumping wells[J]. Petroleum Geology And Engineering, 2019, 33(3): 115–118.]
- [14] 刘沛津, 孙艺阁, 孙昱. 基于电参数的油井动液面监测方法[J]. 科学技术与工程, 2020, 20(33): 13641–13646. [LIU P J, SUN Y G, SUN Y. Monitoring method of dynamic level of oil well based on electrical parameters[J]. Science Technology and Engineering, 2020, 20(33): 13641–13646.]
- [15] 李翔宇, 高宪文, 侯延彬. 基于示功图的抽油井动液面软测量机理建模[J]. 控制工程, 2018, 25(3): 464–471. [LI X Y, GAO X W, HOU Y B. Soft-sensor mechanism modeling for dynamic fluid level of beam pumping systems based on dynamometer card[J]. Control Engineering of China, 2018, 25(3): 464–471.]
- [16] 张洪涛, 付威, 王春骞, 等. 光纤温压法实现油井动液面的实时监测[J]. 哈尔滨理工大学学报, 2018, 23(6): 1–6. [ZHANG H T, FU W, WANG C Q, et al. Real-time monitoring of oil-well dynamic liquid-level with pressure and temperature based on optical fiber sensor[J]. Journal Of Harbin University Of Science And Technology, 2018, 23(6): 1–6]
- [17] 齐方瑾. 智能采油分层注水技术的研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨理工大学, 2019. [QI F J. Research on layered water injection technology of intelligent oil recovery[D]. Harbin: Harbin University of Science and Technology, 2019.]
- [18] 李井慧. 智能分注技术发展现状与应用[J]. 化学工程与装备, 2021, 6: 40–41. [LI J H. Development status and application of intelligent stratified water injection technology[J]. Chemical Engineering And Equipment, 2021, 6: 40–41.]
- [19] 薛鸿禧. 基于智能井技术的分层注水方法研究[D]. 西安: 西安石油大学, 2016. [XUE H X, Stratified water injection method based on intelligent well technology[D]. Xi'an: Xi'an Shiyou University, 2016.]
- [20] 李海涛, 罗红文, 向雨行, 等. DTS/DAS技术在水平井压裂监测中的应用现状与展望[J]. 新疆石油天然气, 2021, 17(4): 62–73. [LI H T, LUO H W, XIANG Y X, et al. The application status and prospect of DTS/DAS in fracturing monitoring of horizontal wells[J]. Xinjiang Oil & Gas, 2021, 17(4): 62–73.]
- [21] 王刚. 基于光纤传感的油水井套管形变监测技术研究[D]. 济南: 齐鲁工业大学, 2021. [WANG G. Research on monitoring technology of casing deformation in oil and water well based on optical fiber sensing[D]. Jinan: Qilu University of Technology, 2021.]
- [22] 曹庆年, 张杰, 孟开元. 基于示功图的抽油机智能间抽系统研究[J]. 辽宁化工, 2021, 50(3): 340–342, 345. [CAO Q N, ZHANG J, MENG K Y. Research on intelligent pumping system of pumping unit based on indicator diagram[J], Liaoning Chemical Industry. 2021, 50(3): 340–342, 345.]
- [23] 孙成. 基于泵功图的间抽技术研究[D]. 西安: 西安石油大学, 2018. [SUN C. Study on the intermittent pumping technology based on

- pump dynamometer card[D]. Xi'an; Xi'an Shiyou University, 2018.]
- [24] 谢英莉. 基于示功图的油井智能间抽系统研究[J]. 长江大学学报(自科版). 2017, 14(19): 97-98. [XIE Y. Study on an intelligent intermissive pumping system based on indicator diagram[J]. Journal of Yangtze University (Natural Science Edition), 2017, 14(19): 97-98.]
- [25] 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 X X, WANG H X, LIU Y X, et al. Study on operating performance and indicator diagram of rod pump production system under fault conditions[J]. Journal of China University of Petroleum, 2020, 44(2): 117-126.]
- [26] 张龙飞. 基于示功图的有杆泵抽油机井产液量计算方法的研究与实现[D]. 沈阳: 东北大学, 2014. [ZHANG L F. Research and implementation on output metering for rod pumped wells based on dynamometer card[D]. Shenyang: Northeastern University, 2014.]
- [27] 蒋薇. 基于示功图的油井产量预测技术研究. 大庆: 东北石油大学, 2021. [JIANG W. Research on oil well production forecast technology based on indicator diagram[D]. Daqing: Northeast Petroleum University, 2021.]
- [28] 贾德利, 刘合, 张吉群, 等. 大数据驱动下的老油田精细注水优化方法[J]. 石油勘探与开发, 2020, 47(3): 629-636. [JIA D L, LIU H, ZHANG J Q, et al. Data-driven optimization for fine water injection in a mature oil field[J]. Petroleum Exploration and Development, 2020, 47(3): 629-636.]
- [29] 贾虎, 邓力琿. 基于流线聚类人工智能方法的水驱油藏流场识别[J]. 石油勘探与开发, 2018, 45(2): 312-319. [JIA H, DENG L H. Oil reservoir water flooding flowing area identification based on the method of streamline clustering artificial intelligence[J]. Petroleum Exploration and Development, 2018, 45(2): 312-319.]
- [30] 王洪亮, 穆龙新, 时付更, 等. 基于循环神经网络的油田特高含水期产量预测方法[J]. 石油勘探与开发, 2020, 47(5): 1009-1015. [WANG H L, MU L X, SHI F G, et al. Production prediction at ultra-high water cut stage via recurrent neural network[J]. Petroleum Exploration and Development, 2020, 47(5): 1009-1015.]
- [31] 王振宇, 林伯韬, 艾白布·阿不力米提. DAS与DTS光纤测试技术在水平井中的应用[J]. 测井技术, 2022, 46(4): 478-486. [WANG Z Y, LIN B T, Abulmiti A B B. Application of DAS and DTS optical fiber testing technology in horizontal wells[J]. Well Logging Technology, 2022, 46(4): 478-486.]
- [32] 田巍, 杜利, 王明, 等. 井筒积液对储层伤害及产能的影响[J]. 特种油气藏, 2016, 32(2): 124-127. [TIAN W, DU L, WANG M, et al. Effect of liquid loading on reservoir and productivity[J]. Special Oil and Gas Reservoirs, 2016, 32(2): 124-127.]
- [33] 博古. 气井积液井筒排液采气技术应用[D]. 北京: 中国石油大学(北京), 2016. [BO G. Gas Recovery technology by application of liquid drainage on a well bore with liquid accumulation[D]. Beijing: China University of Petroleum(Beijing), 2016.]

(编辑 马桂霞)