

· 油气钻采工程 ·

智能井技术现状与展望

刘均荣, 姚 军, 张 凯

(中国石油大学(华东)石油工程学院, 山东 东营 257061)

摘要: 阐明了智能井技术的机理和系统组成, 分析了其技术特点及关键技术, 介绍了国外的相关智能井系统, 对比分析了中国存在的差距, 指出了智能井技术在数据处理与解释、实时生产优化等方面存在的不足, 并结合 Baker Oil Tools公司 InForce系统的现场应用情况分析智能井技术的作用机理。研究认为中国有必要在智能井技术硬件和软件方面开展相关研究。

关键词: 智能井; 系统组成; 现场应用; 发展趋势

中图分类号: TE1

文献标识码: A

文章编号: 1009 - 9603(2007)06 - 0107 - 04

20世纪 90年代国外提出了无须实施修井作业的新技术——智能井技术^[1-2]。该技术将油藏动态实时监测与实时控制结合在一起, 为提高油藏经营管理水平提供了一条崭新的途径。

1 智能井技术介绍

1.1 机理及组成

智能井是一个实时注采管理网络, 是一种利用放置在井下的永久性传感器实时采集井下压力、温度、流量等参数, 通过通信线缆将采集的信号传输到地面, 利用软件平台对采集的数据进行挖掘、分析和学习, 同时结合油藏数值模拟技术和优化技术, 形成油藏管理决策信息, 并通过控制系统实时反馈到井下对油层进行生产遥控、提高油井产状的生产系统。

智能井包括的 4 个部分^[3]是: 井下信息收集传感系统, 主要由永久性安装在井下的、间隔分布于整个井筒中的温度、压力、流量等传感器组构成。井下生产控制系统, 包括可遥控的井下封隔器、可遥控的层间控制阀与井下流量控制阀、控制分支井筒密封的开关装置等。通过液压、电动或电动-液压方式操纵井下流量控制阀或滑套实现油藏各层段流量的控制。井下数据传输系统, 是连接井下工具与地面计算机的纽带, 能将井下数据和控制信号通过永久性安装的专用双绞线实现井下与地面之间的数据传输。地面数据收集、分析和反馈系统, 包括计算机和分析数据用的软件包。

1.2 技术特点

智能井技术与常规生产技术相比, 其特点和优势突出^[3-7], 主要表现为: 地面遥控功能。智能井能够在地面上识别井下流量控制阀的工作状态, 并能在地面上有选择地开关某一生产层段, 从而实现在不关井的情况下进行井身结构重配。适用于偏远地区、作业费用高昂的海上油田或沙漠油田以及成熟油田开发。可用于水平井、大位移井、分枝井、多层合采井及注水井等。实时监测功能。智能井能够获得生产层的实时井下信息, 并将监测到的资料传输到地面的计算机中储存起来, 测试的资料具有较强的连续性。由于监测资料是长期持续记录的, 从而克服了不稳定试井分析所带来的模糊性和不确定性。同时, 由于能够实时获得关键信息, 因此最大限度地减少了测井工作量。便于油藏管理。利用智能井所获得的长期监测资料比传统的短期测试资料更广泛, 提供的油藏信息量更多, 非常有利于油藏工程师建模。智能井监测的数据不但包括单井数据还包括井间数据, 获得的信息类型不断扩大, 从而使先进的油藏管理向着精确的流体前缘图解和油藏描述方向发展。增加动用油气资产的可采储量, 提高油田最终采收率。智能井中的流量控制阀可以对不同层位有选择性地开关, 从而实现从特定层段生产的目的; 井下传感器能够监测各层段流量, 并能调整油水井工作制度。当生产中出现水或气的锥进时, 可通过调整层段流量(如关闭产水层或产气层, 控制注水或注气等)来延缓水或气的锥进; 同时

收稿日期 2007 - 09 - 03; 改回日期 2007 - 10 - 10。

作者简介: 刘均荣, 男, 讲师, 1997年毕业于石油大学(华东)采油工程专业, 现为中国石油大学(华东)油气田开发工程专业在读博士研究生, 从事油气田开发方面的教学与研究工作。联系电话: (0546) 8393777, E-mail: junliu@hdpu.edu.cn。

基金项目: 中国石化资助项目“油藏动态实时监测与控制新技术研究”(P06072)

通过对各层段的流量控制可改善油层中的油水(气)前缘分布,扩大波及范围,达到提高油田最终采收率的目的。节约生产成本,最大限度地降低作业费用。智能井技术可以通过减少大量的井筒维修工作量、优选采油方式和工作制度,从而节约成本、降低作业费用,特别是在深水油井中。

1.3 关键技术

为了实现智能井的实时监测与实时控制功能,还需一些关键的技术与之匹配,这些技术包括^[8]:

能在井下高温高压环境下正常工作多年的、可测量各种井下参数(如压力、温度、流量等)的传感器。

信息传输系统。能在井下高温高压条件下长期使用,或者在工作一定时期后能够从井下提出来加以更换或维修。可自动控制的开关滑套或流量控制阀。例如,当传感器测得某一层段大量出水而需要将其关闭时,可以通过地面控制中心或者由井下安装的计算机下达指令关闭出水层段,从而实现智能控制;也可以自动或依指令调节开关滑套的入孔流量、生产压差,达到优化各层流量的目的。动力提供与储存技术。无论是传感器还是滑套、流量控制阀的开关都需要动力,这种动力可以通过电缆传输的方式提供,也可以由安置在井下的高能电池组提供。匹配的完井工艺技术。例如,在每个油层之间安装带封隔器、传感器和智能化控制阀的完井管串;水平井采用多级管外封隔器与滑套的分段完井技术等。井口贯入技术。智能井的关键技术之一是电源线、仪表电缆、液压控制线、光缆等穿越井口的技术。解决这个问题的方案是使某些通道具有多道传输功能,如将光缆通过液压控制线泵送到井下,或者将智能井的控制管缆布置在生产管线外壁等。电缆断开装置技术。安装在井下的智能井系统部件通常要求具有较长的工作寿命,而井下举升设备(如电泵)总体上寿命有限,在整个油井生产过程中需要不断取出更换。如果将电泵与控制管缆配置在同一油管上,则必须为智能井的液压控制管线和电源线提供井下湿式断开装置。

2 智能井技术的应用及分析

2.1 研究状况与动向

2.1.1 国外研究现状

国外一些公司已开发出了多种智能井系统^[9-12],Baker Oil Tools公司的 InCharge™和 InForce智能井系统结合了永久性数据采集和流量管理等功

能,不需进行昂贵的修井作业就能够可靠地遥控井下流量。WellDynamics公司推出的 SmartWell 系统包括地面控制系统、井下控制系统和井下设备 3 部分,最多可提供 100 个节流状态。Schlumberger 公司的油藏监测与控制系统将井下监测和分层流动控制与生产和/或油藏管理结合在一起,其分度系统可提供 6 个或 11 个节流状态。Weatherford 公司的 Simply Intelligent™系统将光纤传感技术与流动控制系统结合在一起,使得作业者能主动地调整油藏流入剖面以增加油藏采收率、优化生产动态、降低操作费用。

井下数据采集、处理和解释是智能井技术中的关键部分之一,目前采集的井下参数主要是压力、温度和流量。随着技术的发展,井下采集参数的范围将逐步扩大到识别出砂层、表皮因子、流体组分、腐蚀、侵蚀、多相流等。由于来自井下传感器的数据类型和数据量非常庞大,因此给数据处理和解释带来了巨大的挑战,目前还缺乏有效的数据软件来高效地管理和处理这些实时采集的数据。Athichanagom 等^[13]提出利用小波变换方法并结合现代试井理论来处理 and 解释永久性监测的井下压力数据以获得相关的油藏性质,但该方法只是集中在压力数据上,而将压力、温度、流量等监测数据综合起来进行处理和解释的报道还很少。

在智能井优化方面,Yeten 等^[14]利用共轭梯度算法并结合油藏模拟器优化井下流量控制阀的工作状态;Brouwer 等^[15]利用采油指数优化智能井生产,其目的是减少注入井与生产井之间的流动差别;Gai^[16]提出一种基于井底流入动态的控制阀工作状态关系式,并以此优化井中控制阀的工作状态;Arashi Ajayi 等^[17]提出了一种基于梯度法的优化方法,采用在一定时间间隔内设置各产层流量控制阀状态的方法优化目标函数。上述这些优化算法都是基于油藏模型不变的条件下优化井下控制阀的工作状态。Mochizuki 等^[18]阐述了一种油井生产实时优化技术,即利用井下传感器实时采集的数据,通过自动历史拟合来更新油藏地质模型,然后结合油藏数值模拟技术和优化算法来优化油井生产。在此过程中,如何实现油藏模型的实时更新以及如何寻求一种稳健、快速的优化算法是研究的重点之一。

2.1.2 中国研究现状

中国智能井技术研究目前还处于空白阶段,一些石油公司与国外著名公司也进行了合作,如中国海洋石油有限公司与 Schlumberger 油田服务公司在

印度尼西亚南爪哇海 NE IntenA - 24 井上成功地设计并安装了智能井系统^[8],该井是世界上第 1 次在第 6 级分枝井中采用智能井技术。辽河油田开展了稠油热采动态监测技术研究^[19],研制了新型金属绝热技术,同时在高温长效传感器和高能电池供电等研究方面取得了技术突破。西南油气田分公司等多家单位开展了气井永置式井下压力温度监测技术研究^[20]。在室内完成了高精度井下压力计、地面数据采集系统等的设计和研究,并分别于 2004 年 4 月、5 月在蜀南气矿 J17 井、Z7 井上进行了现场试验。在地面可直观、实时地监测井下压力、温度数据,为气井的生产提供了准确有效的数据。大连华光石油钻探设备制造有限公司发明了一种智能井下开关器^[21]。它集采油工艺技术和计算机自动化控制技术于一体,可连同封隔器、压力计随油管柱下入井内,对目的层进行开关井测试。胜利油田孤东采油厂也研制了一套类似的产品^[22],并在分层测试中得到了较好的应用。上述 2 种产品都能按照预先设定的时间实现井下分层控制,但不具备地面实时控制能力,也不具备井下测试数据实时传输能力。

总体来看,中国虽然具备了一些井下监测技术,但目前还没有真正意义上的智能井系统存在。

2.2 应用案例

大部分智能井安装在海上油田,但越来越多的陆上油田也安装了智能井系统。据统计,全球约 60% ~ 70% 的智能井安装在成本较高的极限井中(尤其是深水井),30% ~ 40% 安装在成熟油田。全世界安装智能井的数量超过 300 口,绝大部分安装在北海油田。智能井的典型应用包括控制水气生产/注入、多层合采等^[23]。

Ecuador 东部油田的生产井一般钻穿 2 ~ 4 个产层,由于各产层配产效率低、层间窜流以及在超过油藏饱和压力情况下进行开采可能引起压降过大等原因,制约了 Ecuador 油藏的多层合采,而智能井技术能充分解决这些问题。为了对各产层进行实时监测,作业者选择了一套 InForce 系统和 HCM - A 可调式节流器。HCM - A 将 Baker Oil Tools 公司的 HCM 地面控制滑套与节流技术结合在一起,通过液压方式可选择性地调节节流器而无需复杂的井下电子设备。节点分析和油藏研究帮助作业者和 Baker Oil Tools 公司确定节流器最优位置,以达到最大限度增加原油产量、降低地面含水率、防砂、避免窜流、减少后续产量损失、保持在泡点压力以上生产以避免泵入口出现气体等目的。油井上的监测数据包括

各层井下压力和温度以及下部层位的流量和含水率。将井下流动数据和地面三相流动测量结果综合在一起,作业者能够准确地为各产层分配产量。智能井技术还能通过调整各层流动参数来消除窜流影响。

Snorre 油田位于北海卑尔根西北部大约 210 km。Norsk Hydro 公司利用一套可控制 2 层生产的 InForce 系统加速 Snorre P - 30 井的生产并降低采油修井作业费用。P - 30 井总的测量深度为 6 600 m,远程控制层段位于 4 775 ~ 5 200 m,垂直深度约为 2 700 m,倾斜角为 80°。InForce 系统控制 2 个独立层段的流体流入,在 5 min 内能远程打开或关闭各层。总共采用 6 条控制管线来操纵 2 个 HCM 滑套、1 个油管/环空压力/温度计、1 个油管可取式安全阀。在北海,一次连续油管作业最少要 10 d,总体费用超过 30×10^4 美元。假如在 15 a 生产期限内 1 口井需要采取 5 次甚至更多次油井作业,那么减少或消除这类修井作业和延缓生产的能力将极大地影响到操作成本。P - 30 井初期产量为 3 500 t/d,每次作业需要停产 6 ~ 7 d,这样因每次作业导致的产量损失是非常巨大的。采用智能井技术后,该井取得了明显的经济效益,并且消除了与修井作业相关的风险。

在许多距离遥远的环境中,安装一套反转电泵将产出污水回注到地层比安装一台高性能地面泵更经济有效。1999 年,PDO 公司根据这个理论将 Syl - 18 井从生产井转成注水井。该井因缺少安装地面注入泵所需的地面基础设施,PDO 公司在井中安装了一套反转电泵和一套带套筒式 HCM 液压滑阀的 InForce 系统以及井下压力/温度计。利用这套 InForce 系统,作业者根据回压数据能够选择预期的注入量,也能够关闭滑阀让流体反向通过油嘴以保护电泵不因转速过高而造成损坏。1999 年 8 月安装 InForce 系统时,Syl - 18 井的注水量约为 $950 \text{ m}^3/\text{d}$ 。当打开滑阀且电泵变速驱动频率逐渐增加后,注水量几乎翻倍,达到 $1 700 \text{ m}^3/\text{d}$ 。此外,由于没有安装地面泵站,操作者预计节约了 30% 的投资费用。

3 结束语

智能井技术是为了适应现代油藏经营管理和信息技术应用于油气藏开采而发展起来的新技术,通过生产动态的实时监测和实时控制,达到提高油藏采收率和提高油藏经营管理水平的目的。国外已经

出现了一些相对成熟的智能井系统,中国在这方面还处于探索阶段,但出现了一些初具智能功能的“井下开关”。为了提高智能井的实时控制性能,还须在数据处理与解释、油藏模型实时更新、生产实时优化等方面展开深入的研究。随着油气勘探开发目标逐步转向复杂地区、滩海及深海等恶劣环境,中国也应开展智能井技术硬件和软件方面的相关研究。

参考文献:

- [1] Paulo Tubel, Mark Hopmann. Intelligent completion for oil and gas production control in subsea multilateral well applications[J]. SPE 36582, 1996.
- [2] Clark E Robison. Overcoming the challenges associated with the life - cycle management of multilateral wells: Assessing moves towards the “ Intelligent Completion ”[J]. SPE 38497, 1997.
- [3] Jack Angel. Intelligent well systems—Where we’ve been and where we’re going[J]. World Oil, 2003, 224(3): 23 - 26.
- [4] Karl Demong. Unique multilateral completion systems enhance production while reducing cost and risk in middle east offshore wells[J]. SPE 63193, 2000.
- [5] Nigel Snaith, Richard Chia. Experience with operation of smart wells to maximize oil recovery from complex reservoirs[J]. SPE 84855, 2003.
- [6] 罗美娥. 智能完井技术简介[J]. 油气田地面工程, 2003, 22(9): 65.
- [7] 肖述琴, 陈军斌, 屈展. 智能完井综合系统[J]. 西安石油大学学报: 自然科学版, 2004, 19(2): 37 - 40, 44.
- [8] 杨道平. 智能完井——一项极具发展前景的完井新技术[J]. 新疆石油科技, 2004, 14(2): 1 - 3, 12.
- [9] 窦宏恩. 当今世界最新石油技术[J]. 石油矿场机械, 2003, 32(2): 1 - 4.
- [10] 窦宏恩. 国外石油工程技术的最新进展(二)[J]. 石油机械, 2003, 31(7): 69 - 72.
- [11] Gao Changhong, Rajeswaran, Edson Nakagawa. A literature review on smart - well technology[J]. SPE 106011, 2007.
- [12] 石崇东, 李琪, 张绍槐. 智能油田和智能钻采技术的应用与发展[J]. 石油钻采工艺, 2005, 27(3): 1 - 4.
- [13] Athichanagom S, Home R N, Kikani J. Processing and interpretation of long term data acquired from permanent pressure gauges[J]. SPE 80287, 2002.
- [14] Yeten B, Durllofsky L J, Aziz K. Optimization of smart well control[J]. SPE 79031, 2002.
- [15] Brouwer D R, Jansen J D. Dynamic optimization of water flooding with smart wells using optimal control theory[J]. SPE 78278, 2002.
- [16] Gai H. Downhole flow control optimization in the worlds 1st extended reach multilateral well at Wytch farm[J]. SPE 67728, 2001.
- [17] Arashi Ajayi, Michael Konopczynski. A dynamic optimization technique for simulation of multi - zone intelligent well systems in reservoir development[J]. SPE 83963, 2003.
- [18] Mochizuki S, Saputelli L A, Kabir C S, et al. Real time optimization: Classification and assessment[J]. SPE 90213, 2004.
- [19] 赵业卫. 稠油、超稠油高温长效监测技术[J]. 石油钻采工艺, 2002, 24(4): 63 - 66.
- [20] 张华礼, 谢南星, 李少兵, 等. 气井永置式井下压力温度监测技术及其应用展望[J]. 钻采工艺, 2005, 28(1): 53 - 55.
- [21] 杜香芝, 李俊玲, 刘玉艳. 智能井下开关器在试油中的应用[J]. 石油机械, 2001, 29(8): 50 - 51.
- [22] 杨百新, 郝建中, 董维新, 等. 智能分层测试技术的研究与应用实例分析[J]. 油气井测试, 2006, 15(2): 53 - 55.
- [23] Jack Angel. Intelligent well technologies enabled real - time production management[EB/OL]. [2007 - 07 - 02]. <http://www.bakerhughesdirect.com/cgi/hello.cgi/BH1/public/bakerhughes/resources/indepth/7.2001/iws.pdf>

编辑 侯 青

欢迎订阅 2008年《石油钻探技术》

《石油钻探技术》创刊于 1973 年,她是中文核心期刊和历年中国科技论文统计源刊,被美国《石油文摘》、《中国石油文摘》和《中国地质文摘》等大量摘录。本刊主要报道国内石油钻探工程(包括钻井、泥浆、固井、完井、开采等专业)以及钻探机械设备与自动化方面的科技进展和现场经验,适当介绍国外石油钻探技术发展的水平和动向。栏目包括:教授专家专栏、钻井与完井、固井与泥浆、工具与设备、试井与开采、管理与发展、动态与信息。适合于石油、海洋、地矿行业广大钻井工程技术人员、高等院校师生和经营管理者阅读。

本刊自 1993 年开办彩色广告以来,成效显著,已成为石油、海洋、地矿、机电、化工、轻工、冶金、煤炭、军工、建材、信息等行业科技人员联系的纽带、科研人员交流信息的园地和高校师生了解现场的益友。本刊广告刊出及时,收费合理,欢迎随时联系广告业务。

本刊逢单月末出版。2008 年每期定价 12 元(含挂号邮寄费),全年 6 期共 72 元。本刊自办发行,欢迎有关单位和个人及时订阅。联系地址:山东省德州市东风东路 35 号石油钻井研究所编辑部,邮编:253005,电话:0534 - 2670163, 2670121, E - mail: syzt@vip.163.com, 传真:0534 - 2622468, <http://syzt.chinajournal.net.cn>

performance analysis, time – lapse logging from pilot holes & RST logging, and also reservoir simulation. The main genesis for remaining oil gathering at Lufeng 13 – 1 Oilfield of Pearl Mouth Basin includes as follows: discontinuously developed shaly barrier or calcareous sandstone, interlayer interference of commingled completion intervals, reservoir heterogeneity and well – pattern partially poorly controlling. The remaining oil mainly locates in unswept area by bottom water, at the low permeability streak or low permeable area, below “eaves” of local continuously developed shale zone and at bread part of “Sandwich” of weakly watered out sandstone.

Key words: transitional facies, sandstones, extra – high water cut stage, remaining oil distribution, impermeable barrier, step type multiple – bottom water well

Zou Xinbo, Shenzhen Branch Company, China Limited Company, PetroChina, Shenzhen City, Guangdong Province, 518067, China

Geng Zhanli, Jiang Hanqiao, Chen Minfeng et al. A new method for quantitative characterization on remaining oil potential in high water cut oil reservoirs. *PGRE*, 2007, 14 (6):100 ~ 102

In contrast with moderate or low water cut oil reservoirs, the distribution features of remaining oil have changed a lot in high water cut oil reservoirs, which exhibits high dispersion and local enrichment. Traditional method for quantitative characterization on the remaining oil potential has not been applicable. As we all know, distributary ability of the remaining oil has a nonlinear relation with oil saturation. Thus a new method is presented for quantitative characterization on the remaining oil potential in high water cut oil reservoirs, which is called abundance of predominant remaining oil. The remarkable differences of the abundance of predominant remaining oil up to 10 times have been found among the different areas in 8 ~ 10 sand groups of Tuo7 block reservoir in Shengli Oilfield although their abundance of recoverable remaining oil reserves is approximately the same. This method can demonstrate the areas of the predominant remaining oil efficiently and make clear the target of the remaining oil tapping potential.

Key words: high water cut period, remaining oil, distributary ability, relative permeability, abundance of predominant potential

Geng Zhanli, MOE Key Laboratory of Petroleum Engineering, China University of Petroleum (Beijing), Beijing City, 102249,

China

Xu Dongyan, Tang Qingmei. Estimating remaining oil saturation using sidewall coring analysis data—a case of Xingshugang Oilfield. *PGRE*, 2007, 14 (6):103 ~ 106

The distribution of remaining oil is highly dispersed both laterally and vertically at later high water cut stage in Daqing Oilfield. Evaluation of watered out degree is more difficult. It's the key of evaluating watered out degree to accurately calculate remaining oil saturation. Using the principle of data statistics and regressive formula as well as the calculating method by rock pyrolysis, the cores by sealed coring and sidewall coring in two wells are compared in Xingshugang Oilfield. The method of two – step rectifying and calculating remaining oil saturation is introduced by matching the sealed coring analysis data with sidewall coring analysis data. The formula for calculating remaining oil saturations for pay layers and external layers are obtained. The calculating result of the new formula matches well with the production data, the accuracy ratio of the draft is over 80 percent in the effective layers, and is over 95 percent in the external layers.

Key words: sidewall coring, sealed coring, pyrolysis hydrocarbon content, remaining oil saturation, regressive formula

Xu Dongyan, No. 2 Oil Plant, Daqing Oilfield Limited Company, PetroChina, Daqing City, Heilongjiang Province, 163511, China

Liu Junrong, Yao Jun, Zhang Kai. Present situation and prospect of intelligent well. *PGRE*, 2007, 14 (6):107 ~ 110

The mechanism and components of the intelligent well technology were stated. Advantages and the key technologies were analyzed. Through the introduction of several types of foreign intelligent well, the gaps at home and abroad were compared. It is pointed out that there are disadvantages in data processing and interpretation and real time optimization of the technology. Based on the field application of Baker Oil Tools' InForce system, the mechanisms of the intelligent well technology were analyzed. It is believed that the theoretical research and technology innovation in this field are very necessary and should be enhanced in China.

Key words: intelligent well, system component, field application, development tendency

Liu Junrong, Faculty of Petroleum Engineering, China University of Petroleum (East China), Dongying City, Shandong Province, 257061, China