

THEORETICAL RESEARCH ON  
**RESERVOIR**  
**CLOSED-LOOP**  
PRODUCTION OPTIMIZATION



# 油藏开发

## 闭环生产优化控制

### 理论与方法

赵 辉 曹 琳 康志江 史永波 著



科学出版社

# 油藏开发闭环生产 优化控制理论与方法

赵 辉 曹 琳 康志江 史永波 著

国家自然科学基金(No.51344003, No.51674039, No.51604035)

国家科技重大专项(2016ZX05014—003)

2016 年长江大学青年人才基金

资助

科学出版社

北 京

## 版权所有,侵权必究

举报电话:010-64030229;010-64034315;13501151303

### 内 容 简 介

本书是作者在闭环生产优化控制理论与方法领域多年积累的研究成果的基础上总结提炼而成的,集中体现了该领域理论与方法研究的发展历程、现状和前沿,具有鲜明的时代特色。本书主要从油藏开发生产控制优化方法与油藏数值模拟自动历史拟合方法两个方面着重介绍了智能油田开发理论研究的核心技术——油藏开发闭环生产优化控制理论与方法。

本书的理论性与实用性均较强,内容涉及方法原理、理论推导、软件编制、算例测试及应用等。不仅可以供油藏工程、油田开发等专业大学生和工程技术人员参考,也可以作为油田一线工作人员,特别是油藏工程师的培训教材。

### 图书在版编目(CIP)数据

油藏开发闭环生产优化控制理论与方法/赵辉等著. —北京:科学出版社, 2016.11

ISBN 978-7-03-050500-2

I. ①油… II. ①赵… III. ①油田开发—闭环控制系统—研究 IV. ①TE34

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 267821 号

责任编辑: 闫 陶 何 念/责任校对: 董艳辉 周玉莲

责任印制: 彭 超/封面设计: 苏 波

科 学 出 版 社 出 版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

武汉市首壹印务有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

\*

开本: 787×1092 1/16

2016 年 11 月第 一 版 印张: 9 3/4 插图: 12

2016 年 11 月第一次印刷 字数: 267 000

定价: 68.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

## 作者简介

赵辉,男,1984年生,副教授,硕士生导师,2006年7月毕业于石油大学(华东)石油工程系石油工程专业,获工学学士学位,同年9月进入石油大学(华东)研究生院,攻读油气田开发工程专业硕士学位,2008年9月攻读油气田开发工程专业博士学位。期间获国家建设高水平大学公派研究生资格,于2009年9月至2010年9月在美国 Tulsa 大学进行博士联合培养的学习。2011年起在长江大学任教至今,入选长江大学“领军人才”计划。国际 SPE 会员,“SPEJ”《石油勘探与开发》等石油权威期刊编辑。以第一作者或通讯作者发表学术论文 30 余篇,其中,三大检索 21 篇;出版专著 1 部;承担国家自然科学基金、国家科技重大专项等在内的课题 11 项;获省部级科研奖励 3 项。主要研究方向:油藏数值模拟技术、油藏开发生产优化控制理论与井间动态连通性理论与方法等。

# 序

赵辉老师所著的《油藏开发闭环生产优化控制理论与方法》将要由科学出版社出版了。该书是作者在闭环生产优化控制理论与方法领域多年积累的研究成果的基础上总结提炼而成,集中体现了该领域理论与方法研究的现状、前沿和发展趋势。同时该书又非常注重理论的基础性、系统性和完整性,为读者真正理解在油田数字化背景下的油藏生产优化控制理论与方法提供了重要的基础。

全书内容共分为五章,第一章从智能油田技术的角度出发,分两部分着重讲述了目前智能油田核心技术闭环生产优化控制理论与方法的发展历程及未来展望。第二章以最优优化理论为基础,结合油藏生产实际,详细阐述了油藏开发生产优化控制数学模型建立过程,并引入多种无梯度优化算法进行自动求解。考虑到油藏实际生产等情况的约束,以及油藏地质模型的不确定性等问题,从系统自动化领域引入鲁棒控制思想,探讨了在线性、非线性混合约束下的鲁棒生产优化控制问题的求解,进一步提高了该理论方法实际应用的适应性。第三章以贝叶斯统计理论为基础将油藏历史拟合典型的反问题转化为概率求解问题,分别针对确定性及不确定性油藏模型研究,结合两大类无梯度优化方法进行了自动求解,实现了油藏模型的自动反演过程,能极大地减轻油藏工程师人工拟合的重担,使他们更多地关注优化方案的制定工作。第四章和第五章介绍了以上理论与方法及相应的软件在各油田的应用,并进行了实例分析。

生产优化控制理论与方法是在油藏生产整个过程当中进行开发方案制定的有效手段,并能针对高含水后期油藏实现剩余油挖潜方案的制定。

该书的特色可以归纳为以下几个方面。

(1) 内容新颖。该书是作者在博士论文的工作基础之上结合近年来的科研成果总结凝练而成,为最优化理论与油藏数值模拟技术的交叉学科前沿。有关成果曾获湖北省科技进步奖和中国石油和化学工业联合会科技进步奖。

(2) 系统性和完整性强。该书的第二章和第三章系统地介绍闭环生产优化控制理论与方法两大关键技术的实现过程,使该书的理论系统比较完整,同时也为读者深刻理解该书的内容奠定了基础。

(3) 理论与方法的实用性。理论结合实际是对应用基础研究工作的基本要求。理论研究成果必须放到实际中检验,并结合实际应用当中存在的问题进一步改进方法,从而使得形成的理论和方法有较强的实用性。该书很好地体现了这一过程,并形成了能够解决现场生产难题的方法和技术。

(4) 内容的丰富性。从最优化方法的基础理论与方法,到结合油藏生产实际的自动历史拟合及生产优化控制方法,再到闭环生产优化控制软件的研制和现场的应用。该书

为读者提供了丰富的信息和知识。

《油藏开发闭环生产优化控制理论与方法》将会在今后我国石油工业数字化智能化的发展大潮中,发挥越来越重要的作用。

中国工程院院士

A stylized handwritten signature in black ink, consisting of the characters '李' (Li) and '瑞' (Rui) written in a cursive, flowing style.

2016 年 10 月

# 前 言

在全球信息化浪潮之下,油田生产管理逐步进入信息化、智能化时代;但如何立足已探明的石油资源,提高原油产量,保障石油供给需求仍是石油行业迫切需要解决的重大问题。为了实现油气资源开发最优化和经济价值最大化,油藏闭环优化控制理论是在智能油田的时代背景下提出的解决方案之一。油藏闭环优化控制理论的研究与应用是随着油藏数值模拟技术发展而成长的一门新学科,该方法通过自动历史拟合和生产模型的最优化求解,能动态获取油水井注采及措施调控参数,尽可能地优化产出效益和提高模型认识程度,能够有效解放油藏工程师精力,更多地投入到制定开发优化方案当中。油藏闭环优化控制技术作为智能油田概念关键的一环,一直是研究热点,故此笔者以博士期间研究积累结合近五年的工作成果著作此书,以期将该领域的研究的部分理论与读者探讨、分享。

全书一共分五章:第一章介绍了智能油田概念,油藏闭环生产优化控制理论方法中自动历史拟合以及生产优化技术优势和存在的问题,研究及应用现状,未来展望等,为后续闭环优化控制理论的展开提供了背景信息;第二章详细介绍了最优化理论在油藏开发中的应用,建立了油藏开发生产控制最优模型并对其进行求解,并针对复杂混合约束条件下的模型求解及引入鲁棒思想的方案制定方法展开了论述;第三章在贝叶斯统计理论的框架之下建立了油藏自动历史拟合数学模型,结合随机极大似然思想,分别采用参数降维策略结合无梯度类方法以及多模型数据同化方法进行求解,并对其相应的适用性进行了探讨;第四章通过将自动历史拟合方法与油藏开发生产控制方法相结合形成闭环优化控制方法,并分别应用于概念与实际油藏进行测试;第五章介绍了基于上述理论编制的油藏开发闭环优化控制软件及其在油田的实际应用。

在本书撰写过程中,由史永波、唐乙玮、孙海涛、李颖协助算法改进及测试工作,由康志江、曹琳协助实际油藏应用结合与测试工作,赵辉负责全书的统稿工作。

在本书出版之际,感谢国家自然科学基金、国家科技重大专项、长江大学青年人才基金的经费支持,本书部分成果为以上项目研究成果。感谢中石化石油勘探开发研究院等单位领导及专家的大力扶持,成书过程中他们都给予了很好的指导和建议,使书中研究成果得以提升,并且为书中理论和方法的应用提供了大力支持。最后向美国 Tulsa 大学 TUPREP 工作组所提供的技术支持表示感谢。

本书的出版得到长江大学建设经费的资助,在此表示感谢。

笔者水平有限,书中难免有疏漏之处,恳请读者批评指正。

作 者  
2016 年 5 月

# 目 录

|                       |    |
|-----------------------|----|
| 第一章 概述                | 1  |
| 第一节 智能油田系统            | 1  |
| 第二节 油藏闭环生产优化控制定义      | 3  |
| 第三节 油藏闭环生产优化控制发展历史及现状 | 4  |
| 一、油藏开发实时生产优化发展概况      | 4  |
| 二、油藏自动历史拟合发展概况        | 8  |
| 三、油藏闭环生产优化控制存在的问题及展望  | 12 |
| 第四节 本章小结              | 13 |
| 第二章 油藏开发生产控制优化方法      | 14 |
| 第一节 最优控制理论与优化方法       | 14 |
| 一、最优控制理论              | 14 |
| 二、最优化方法               | 16 |
| 第二节 油藏生产中的最优控制模型      | 16 |
| 一、最优控制模型的一般形式         | 16 |
| 二、油藏动态实时优化最优控制模型      | 18 |
| 第三节 油藏生产最优控制模型的求解     | 19 |
| 一、油藏最优控制优化算法          | 19 |
| 二、随机扰动近似梯度算法          | 21 |
| 三、集合优化算法              | 25 |
| 四、粒子群优化算法             | 27 |
| 五、单纯型模矢算法优化算法         | 28 |
| 六、基于二次插值型的近似梯度算法      | 30 |
| 七、近似扰动梯度升级算法          | 34 |
| 八、计算实例                | 37 |
| 第四节 油藏开发复杂约束生产优化      | 51 |
| 一、增广拉格朗日函数            | 52 |
| 二、求解步骤                | 53 |
| 第五节 油藏开发鲁棒生产优化        | 56 |
| 一、基本原理                | 57 |
| 二、计算实例                | 58 |
| 第六节 本章小结              | 63 |
| 第三章 油藏数值模拟自动历史拟合方法    | 64 |
| 第一节 自动历史拟合数学模型        | 64 |

|                          |     |
|--------------------------|-----|
| 第二节 参数降维法 .....          | 65  |
| 一、基本原理 .....             | 66  |
| 二、计算实例 .....             | 67  |
| 第三节 随机极大似然 .....         | 75  |
| 一、基本原理 .....             | 75  |
| 二、计算实例 .....             | 78  |
| 第四节 集合卡尔曼滤波 .....        | 84  |
| 一、基本原理 .....             | 84  |
| 二、计算实例 .....             | 86  |
| 第五节 集合平滑多数据同化 .....      | 93  |
| 一、基本原理 .....             | 93  |
| 二、计算实例 .....             | 95  |
| 第六节 本章小结 .....           | 100 |
| 第四章 油藏开发闭环生产优化测试实例 ..... | 101 |
| 第一节 二维非均质油藏 .....        | 101 |
| 第二节 北海 Brugge 油藏 .....   | 111 |
| 第三节 本章小结 .....           | 116 |
| 第五章 油藏闭环生产优化软件及其应用 ..... | 117 |
| 第一节 油藏开发闭环优化软件简介 .....   | 117 |
| 一、历史拟合模块 .....           | 118 |
| 二、生产优化模块 .....           | 120 |
| 三、结果输出模块 .....           | 121 |
| 四、辅助工具模块 .....           | 123 |
| 第二节 计算实例 .....           | 125 |
| 一、塔河 S80 单元 .....        | 125 |
| 二、江汉 Z-16 单元 .....       | 130 |
| 第三节 本章小结 .....           | 139 |
| 参考文献 .....               | 140 |

# 第一章 概述

石油是“黑色的金子”，是现代工业的“血液”，不仅是一种不可再生的商品，更是国家生存和发展不可或缺的战略资源，对保障国家经济和社会发展以及国防安全有着不可估量的作用。

目前，国际市场油价低迷，随着大型油气田已经进入中高含水开发阶段，其开采成本逐年增加，部分油田不得不逐步关停高含水井，但油田整体采出程度仍然较低(郑军卫等，2007)。以我国为例，按照目前开发技术水平，各主力油田将有近 2/3 的剩余储量不能采出。根据目前的技术水平和对石油地质勘探的认识，发现新的大型油气田已相当困难，各大石油公司的勘探目标已转向较为复杂的地区、滩海和深海等难采、难动用储量。于是，如何在这种油价低迷、开采成本增加的双重压力下，保持石油开采经济效益增长，是目前世界石油行业一个迫于解决的问题。在这种形势的推动下，各大石油公司纷纷寻求解决的办法，于是“智能油田”的概念被提出并得到广泛关注。

## 第一节 智能油田系统

油藏管理(reservoir management, RM), 是 20 世纪 70 年代为提高油藏开发综合效益而兴起的一种油田开发理念和方法体系(杜志敏等, 2002; 张朝琛等, 1999; Gringarten, 1998; Woods et al., 1992)。近年, 传感技术和计算机的飞速发展和普及使得井组远程监控、远程控制技术和油藏数值模拟技术得到了广泛的应用。这些新技术与油藏管理的思想相结合, 推动着人们在油田的建设和生产上进行一场系统、全面革新, “智能油田”便是在这种背景下提出的新的油田生产管理理念。从提出伊始便得到人们的广泛关注, 成为研究的热点。世界各大石油公司借助新的方法和技术, 纷纷开始致力于发展智能油田的相关技术及理论研究, 智能油田已成为未来提高原油采收率, 实现油气资源开发最优化和经济价值最大化的重要发展方向。

智能油田系统是指一套联系地面与井下的闭环信息采集、双向传输和处理应用系统(图 1-1)。首先通过地下的传感、传输系统和地面收集系统将油井生产参数实时汇总到大型数据库中, 生产技术人员通过油藏数值模拟软件快速地将数据库中的生产数据进行模拟、分析、处理, 获取实时的地下动态, 利用最优化理论, 制定最优的生产工作制度, 进而通过远程控制系统对生产制度进行实时调控, 实现油气资源开发最优化和经济价值最大化。概括地说, 就是“采集→模拟→决策→控制”。其中, “采集”和“控制”主要依靠智能井系统, 而“模拟”和“决策”主要依靠油藏开发闭环生产优化控制技术。

目前许多世界知名石油公司都已经将智能油田的生产管理模式在实际油藏进行初步应用, 如斯伦贝谢的 Haradh 智能油田、巴西石油的 Brownfield 智能油田和壳牌的 NaKika、

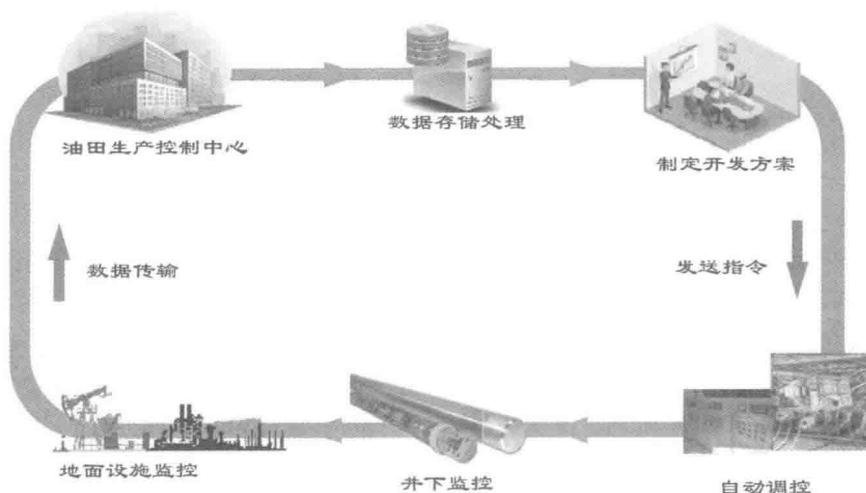


图 1-1 智能油田系统示意图

Champoin West 智能油田, 它们都取得了理想的效果。壳牌公司被认为是世界上智能油田开发投资最大的公司, 研究走在前列。它认为智能油田生产管理模式(图 1-2)可使得: ①油田开发方案设计 & 决策时间降低 75%; ②油田平均采收率提高 8%, 成本降低 20%。壳牌公司 21 世纪初投产 70 口智能井, 仅一年就创造了约 200 万美元的额外净产值 (ExxonMobil Corporation, 2004)。北海 Ekofisk 油田依靠智能油田技术减缓了产量递减速度, 实现了油田可持续发展, 其预测采收率最大可提高近 14% (王金旗等, 2004)。剑桥能源研究协会 (CERA) 估计: 如果使用智能油田技术, 世界范围内现有油田 6~10 年内可

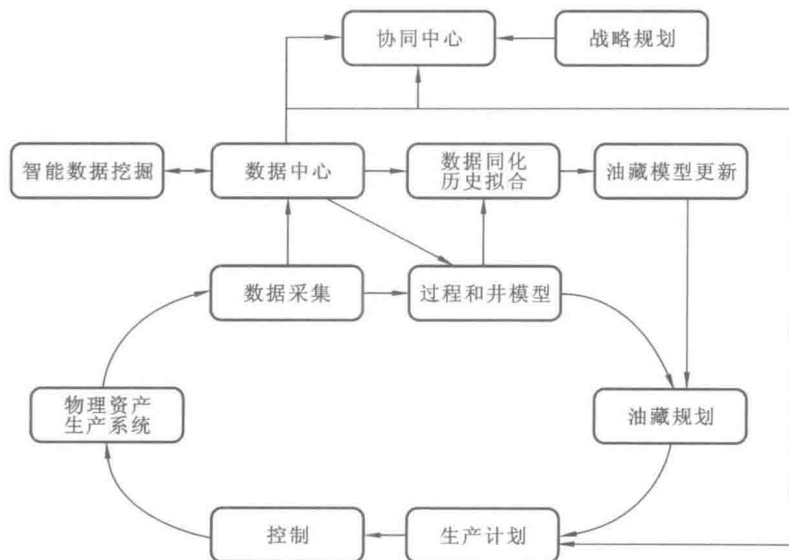


图 1-2 油藏闭环管理示意图

以增产原油 1250 亿桶,相当于伊拉克的可采储量的总和。可见智能油田拥有巨大的经济效益和广阔的应用前景,具有十分重要的研究意义。虽然智能油田的应用取得了许多不错的成果,但是智能油田开发技术目前仍停留在起步阶段,相关的理论方法仍需进一步研究和完善。在我国,新疆油田公司是我国首个提出建设智能油田的公司,依靠已经初步具备的“数字油田”的基础,新疆油田公司计划未来 5 年内在克拉玛依建设第一个智能油田(Satter et al.,1994)(图 1-3)。



图 1-3 新疆油田公司已从数字化迈向智能化

智能井作为智能油田系统硬件基础,主要解决了智能油田“采集→模拟→决策→控制”闭环环节中的“采集”(通过智能井下传感器进行实时采集数据)与“控制”(通过智能井下控制阀进行生产实时调控)两个部分。概括来讲,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,中国也应大力开展智能井技术的相关研究。

油藏开发闭环生产优化管理技术是本书主要涉及的内容,后文将进行具体阐述。其作为智能油田系统的软件基础,主要解决了智能油田“采集→模拟→决策→控制”闭环环节中的“模拟”(通过油藏数值模拟技术掌控油水动态)与“决策”(通过最优化理论制定生产制度)两个部分。以下将对油藏开发闭环生产优化技术发展历史及研究与应用现状进行详细介绍。

## 第二节 油藏闭环生产优化控制定义

“油藏生产闭环优化控制”(reservoir production closed-loop optimization control, RPCOC)就是针对智能油田实时调控环节提出的一项新兴课题,也是智能油田理论研究的核心部分;同时,油藏生产闭环优化控制不仅仅是用于智能油田,它依赖于自动历史拟合和生产优化的结合,体现了它的“闭环”的特性。因此,也可以说油藏生产闭环优化控制

技术就是充分结合新的技术和方法,对传统的油田开发技术的一种改进。相比被动控制方法,它以实现整个油藏生产效益的最大化为目标,利用油藏数值模拟及最优化理论,实时优化油水井的生产调控参数(如油井压力、流量等),高效率地管理油藏的开发状况。这种管理方法不仅能很好地保障决策的“最优”,还可以大大降低决策时间。油藏闭环生产优化控制涉及多学科的复杂问题,开展油藏闭环生产优化控制的研究对于实现油气田工程的信息化和智能化,提高油藏管理水平,具有十分重要的意义。

油藏闭环生产优化管理系统主要为两大部分,即油藏自动历史拟合(reservoir automatic history matching)和油藏开发生产优化(optimization of production development of reservoir)(Wang et al.,2007)。

自动历史拟合,就是以油藏生产系统作为研究对象,利用油藏数值模拟技术通过对传感器输出的生产观测数据进行自动历史拟合来更新修正油藏模型,降低油藏模型的不确定性。

生产优化,就是以拟合后的油藏模型为基础,在确定当前油藏的油水的分布后,基于油藏数值模拟技术和优化控制算法进行油田开发生产优化,确定油藏未来生产的最优工作制度。

简单来说,所谓油藏闭环生产优化管理(图 1-4),就是经过生产优化之后,油田工作制度发生改变,再利用新的生产观测数据去实时地更新、修正所建立的油藏模型,再进行新的油藏生产优化过程,随着开发的一步步进行,“拟合→优化→再拟合→再优化”这个如闭环一样的优化过程不断进行,最终实现油藏开发生产效益的最大化。

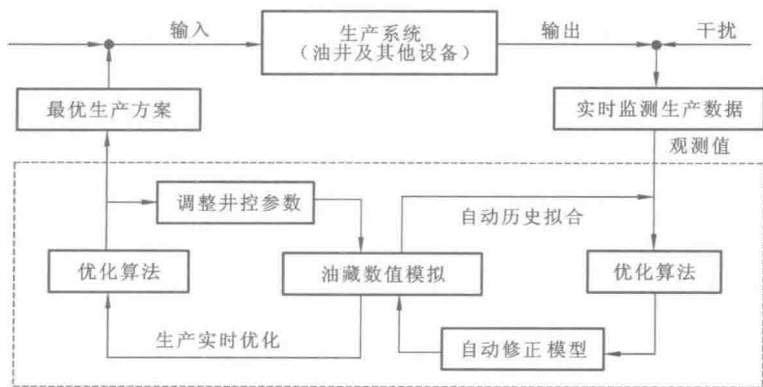


图 1-4 油藏闭环生产优化管理过程

### 第三节 油藏闭环生产优化控制发展历史及现状

#### 一、油藏开发实时生产优化发展概况

油藏生产优化作为闭环优化的关键环节,其目的是基于当前地质认识情况确定最优生产制度。如图 1-5 所示,在一个区块内,改变油水井的注采量,将影响油藏内部压力、饱

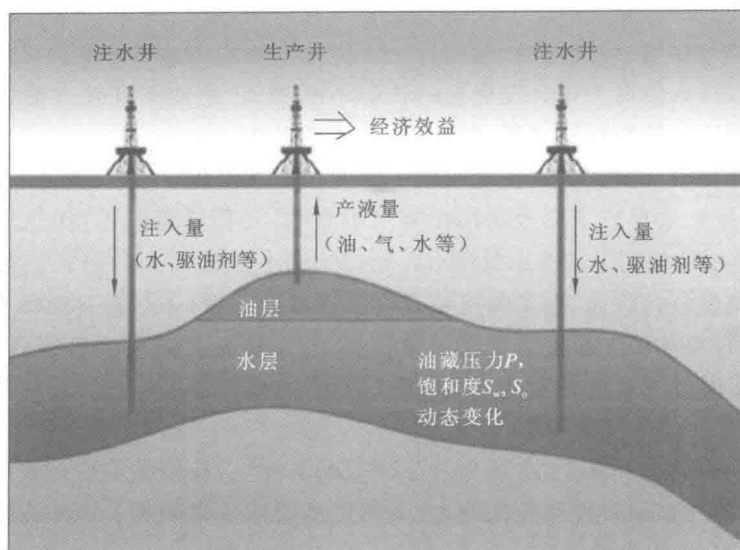


图 1-5 油藏生产示意图

和度等的状态参数,生产井中油水的产量也会随之改变。如何确定每口井的工作制度来获得较高的采收率与经济效益,是油藏开发方案设计的关键。

常规的注采参数设计是以油藏整体或井组为单元,人工设定多组时间和注采量组合的方案,在这些方案中选取效果相对最好的方案应用于实际油田。但是因为方案中参数的取值大小受人为主观因素影响较大,具有随意性和盲目性,而且枚举方案个数有限,所以通过有限列举法制定的多种方案有可能都不是最优的,难以达到油田最好的开发效果,再者,此方法对连通性复杂、井网规则性差的油藏适用性差。不合理的方案应用于油田可能会使地下情况发生改变,如水的指进等,还可能造成人力、物力、财力的浪费,这是我们所不愿看到的。

油藏开发生产优化控制技术很好地解决了这些问题,能够使油田开发方案设计时间及决策时间降低 75%。它是一种以经过拟合后的油藏地质模型为基础,以单井为对象注采方案设计方法,并以实现油藏经济效益最大化为目标,把对油藏生产体系的控制描述成一个最优化问题,通过优化油水井注采参数求解,自动地为油水井定制各阶段的生产调控方案,调控油水井的生产,以此改善开发效果。

因此,油藏生产优化研究越来越多地受到国际学术界的重视,Comp. Geos. 杂志在 2006 年出版了油藏生产优化专刊,美国 SPE 每年都举办智能能源会议,尽可能将能源开采与智能优化结合起来,改善油田开发的效果。

油藏生产优化的发展最早可以追溯到 20 世纪 50 年代, Lee 等(1958)利用线性规划解决石油开采产量优化问题,在当时,由于受制于相态相数、模型尺寸及数值模拟技术等因素,模拟具有较大的局限性。到了 20 世纪 80~90 年代,由于计算机技术、优化方法的迅猛发展以及油田开发的迫切需要,各国一些研究机构开始积极地应用优化技术研究油

田开发中遇到的各种问题,依据所研究问题模型的不同,线性规划、非线性规划、随机规划、模糊规划、动态规划、最优控制、遗传算法等优化方法均在油田开发决策问题中得到应用。进入 21 世纪,人们对油藏开发优化的认识不断深入,把油藏开发方案选择描述成为一个最优化问题这一思想逐渐成形;荷兰 Delft 大学的 Brouwer 等(2002)首次提出了“油藏开发生产优化控制”的概念,真正地实现了最优控制理论和三维三相隐式油藏数值模拟的结合,并基于伴随法形成了高效的梯度类求解算法,实例计算显示:优化后水驱突破时间由原来的 253 d 延长到了 658 d;Naevdal 等(2006)考虑到前人的研究均是基于油藏模型为已知确定模型进行优化,而实际模型具有较强不确定性,于是将自动历史拟合融合进来,通过交替进行自动历史拟合来更新油藏模型,并以更新后的模型进行后期生产优化,使油藏尽可能实时处于最优控制状态,实现快速增油,至此油藏开发闭环优化控制理论正式被提出。

解决优化问题离不开算法,在优化算法研究的方向上,梯度类算法是解决优化问题的一类重要方法,但在油田开发优化问题上,其梯度的获取异常困难。国外许多学者对此进行了大量研究,通常是采用伴随方法(adjoint method)(Wang et al., 2007; Sarma et al., 2006; de Montleau et al., 2006; Sarma et al., 2005)进行求解,该方法是基于变分原理(邢继祥等, 2003; Lions, 1971)发展起来的一种最优控制方法,它能够较为准确地获得目标函数的梯度。但是伴随方法也有缺陷,它需要通过编写伴随矩阵嵌入油藏数值模拟计算中来获取梯度,使得求解过程异常复杂,大大增加了程序实现的难度。且每次梯度的求解必须是在油藏模拟全隐式条件下进行正向和反向两次计算,降低了模拟器的计算效率。对于三次采油以及含有水平井等油藏开发问题,尚无有效的方法计算真正的梯度。因此,尽管梯度类算法在一些实例测试中表现出了较快的计算效率,但其目前仍无法较好地应用于实际油藏生产优化问题的求解,难以在石油行业得到广泛的推广。

相对于梯度类算法,无梯度类方法因为其计算更加简便、适用范围广的特点而越来越多地受到油藏管理工作者的关注。

Wang 等(2007)首次将随机扰动近似(simultaneous perturbation stochastic approximation, SPSA)算法引入到油藏生产优化中,Bangerth 等(2006)还将其应用到井位优化等领域。作为一种有效的梯度近似算法,SPSA 算法可对控制变量进行同步扰动来获得搜索方向,其计算简便,每个迭代步仅需对目标函数进行计算,不需要梯度的求解,易于和各种商业化模拟器相结合,因此,该方法可被认为是一种无(免)梯度(derivative free)求解方法,且其搜索方向恒为上山方向,保证了算法的收敛性(Spall, 1992)。在 Wang 等(2007)测试实例中,SPSA 算法优化得到了和梯度类方法相同的经济开发效益,但计算效率要低于梯度类方法。

集合优化算法(ensemble-based optimization, EnOpt)是由 Chen 等(2009a)提出的另一种用于解决油藏生产优化问题的无梯度优化方法。但该方法的一些基本思想最早出现在 Nwaozo(2006)、Lorentzen 等(2006)以及 Wang 等(2009, 2007)的研究中,后又经过 Chen 等(2009b)的系统改进和发展,使该方法成为目前被普遍采用的一种有效的无梯度油藏生产优化方法。在 EnOpt 算法中,要求生成多个控制变量的实现并利用油藏模拟技

术计算这些实现对应的目标函数值,通过求取各实现与目标函数之间的敏感矩阵来确定搜索方向。因此,EnOpt 算法的计算代价要明显大于梯度类求解方法。但在实际生产优化中,如果同时考虑油藏模型的不确定性,进行基于多油藏模型的鲁棒优化(robust optimization)(Chen et al.,2011;van Essen, et al.,2009),一些研究实例结果表明该方法计算效率相比梯度法而言,表现出了极大的竞争性,且其获得的优化方案易于现场实际操作应用。可是,该方法所获得的搜索方向对于所优化的目标函数而言不能保证恒为上山方向,因此,其稳定性有待进一步研究。

单纯形梯度算法(simplex gradient method)(Bortz et al.,1998)最早是在 1998 年由 Bortz 和 Kelley 提出的一种多维参数优化算法,是将单纯形梯度信息作为优化算法的搜索方向(Custódio et al.,2010;Custódio et al.,2007;Kelley,1999)。为获得单纯形梯度,需生成一系列不同的控制变量向量来预测一组目标函数值,即构造一个“单纯形”,求解过程需要对矩阵进行奇异值分解计算。基于单纯形梯度算法的运算效率取决于用于单纯形梯度计算的控制变量向量的个数。Custódio 等(2007)将单纯形梯度与模矢搜索算法结合形成单纯型模矢算法(pattern search method guided by simplex derivatives, SID-PSM),随后,赵辉(2011)将其应用在生产优化中,对算法进行了测试。研究结果表明,尽管 SID-PSM 收敛速度较快,但目标函数最终净现值仅略高于全局搜索粒子群算法,远差于 SPSA 与 EnOpt 等算法。

在国内,对油田优化领域研究开始于 20 世纪 80~90 年代,起步较晚,理论研究不够深入,多数方法只适合于静态优化,而无法对油藏进行动态最优控制。Lang 等(1983)首先将国外动态规划和全时步一次优化的方法用于求解生产过程的最优化问题的思想引入国内。此后,刘志斌(1993)、刘志斌等(1993)、张在旭(1998a,1998b)、胥泽银等(1999)分别应用最优化方法对油藏生产优化进行了细致的研究。到了 21 世纪,国内对油田开发生产优化的研究逐步深入,2002 年,刘昌贵(2002)建立了注气提高石油采收率的油藏生产最优控制模型,并对该数学模型进行了优化求解。张晓东(2008)利用离散极大值结合伴随方法对聚合物驱生产参数控制模型进行了求解,选取净现值作为目标函数,优化参数为聚合物的注入浓度及注入速度,得到的注入策略可以显著增加净现值及产油量。2009 年,张凯等(2010)基于梯度类算法对水驱油藏生产优化进行研究,将编写的油藏全隐式黑油模拟与极大值原理求解方法紧密结合,采用伴随梯度方法对最优控制数学模型进行求解,并对油水井位进行了优化。赵辉(2011)、赵辉等(2011)将统计学里的鲁棒优化方法引入油藏生产优化,考虑了模型的不确定性,提高了优化结果的可靠性,并且对 SPSA 算法也进行了改进,通过引入控制变量协方差矩阵使其产生梯度更加光滑连续,提高了算法效率的同时也便于优化结果的实际应用。闫霞(2013)创建了基于随机梯度与有限差分相结合的一种梯度逼真优化方法——随机梯度有限差分算法(stochastic gradient finite-difference,SGFD),给出了相应的数学理论推导及判别标准,解决了随机近似梯度准确率低的问题,同时给出了逼真梯度的评价方法,为目前现有各种随机近似梯度算法的改进研究提供了一个新思路。

目前在生产优化中常用的无梯度类算法有

随机扰动近似梯度算法(simultaneous perturbation stochastic approximation)

集合优化算法(ensemble-based optimization method)

粒子群优化算法(particle swarm optimization)

单纯型模矢算法(pattern search method guided by simplex derivatives)

信赖域算法(new unconstrained optimization algorithm/quadratic model-based trust-region algorithm)

基于二次插值型的近似梯度算法(quadratic interpolation model-based algorithm guided by approximated gradient)

根据油藏开发生产的实际条件,一般需要对油藏生产优化问题进行约束优化求解,主要有罚函数法、拉格朗日函数法和投影梯度法。另外,基于单一油藏模型进行生产优化所得的控制方案不一定是最优的,甚至有可能导致比常规开发方案更差的开发效果。为此,为了降低油藏生产优化结果的风险性,讨论了一种新的基于多油藏模型的生产优化策略——鲁棒优化(robust optimization)。

本书的第二章将较系统地介绍油藏开发生产优化的相关内容。

## 二、油藏自动历史拟合发展概况

油藏历史拟合作为油藏数值模拟过程中最为关键的一个环节,是一项极其重要的工作,是通过动态资料对油藏进行再认识的过程(陈兆芳等,2003)(图 1-6)。在油藏历史拟合过程中不断地调整模型参数,从而使计算获得的生产动态与油田实际动态趋于一致,拟合过程可以降低在油藏描述中的不确定性,从而保证油藏数值模拟再现油田开发全过程的正确性,提高对油层地下分布的认识,为后期开发方案预测提供基础。需要特别指出的是,油藏数值模拟历史拟合相比生产优化而言,需要进行调整的参数数目要远远大得多。同时,历史拟合是一个典型的不适定反问题,存在多解性。

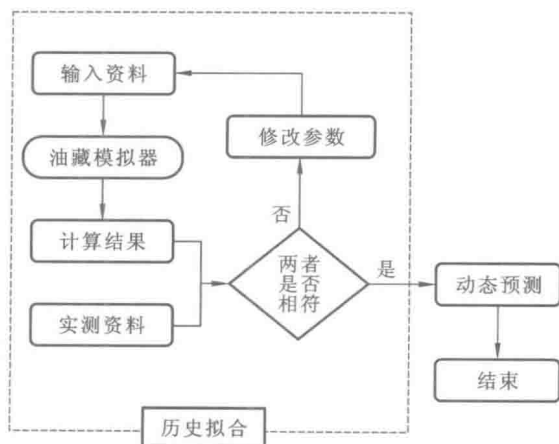


图 1-6 油藏历史拟合示意图