三元复合驱最优控制

李树荣　葛玉磊　著

科学出版社

三元复合驱最优控制

李树荣　葛玉磊　著

科学出版社

北京

内 容 简 介

本书利用分布参数最优控制原理，将三元复合驱的注入方案优化设计问题，转换成如下的一类具有不等式约束的分布参数系统的最优控制问题：以累积利润的净现值作为目标泛函，以三元复合驱动态过程的渗流机理方程作为控制方程，以注入量(注入速度、注入浓度)为优化决策变量. 通过研究该类问题的数值求解，从而设计出三元复合驱的动态最佳注入方案.

本书可供从事三元复合驱领域的科研人员、高校教师和研究生使用，也可供相关工程技术人员研究参考.

图书在版编目(CIP)数据

三元复合驱最优控制/李树荣，葛玉磊著. —北京：科学出版社，2019.11

ISBN 978-7-03-063245-6

Ⅰ. ①三… Ⅱ. ①李… ②葛… Ⅲ. ①复合驱-最佳控制 Ⅳ. ①TE357.46

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2019) 第 249553 号

责任编辑：胡庆家 李 萍 / 责任校对：邹慧卿

责任印制：吴兆东 / 封面设计：陈 敬

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

北京虎彩文化传播有限公司 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2019 年 11 月第 一 版 开本：720 × 1000 B5

2019 年 11 月第一次印刷 印张：13 1/4 插页：4

字数：280 000

定价：118.00 元

(如有印装质量问题，我社负责调换)

前　言

石油开发中, 依靠油藏的天然能量将原油举升到地面, 称为一次采油, 在一次采油后, 通过向地下油藏注活性水, 提高油层压力将原油驱至地面, 称为二次采油. 但是注水开采后, 仍有 65%~70%以上的原油没有被采出. 此时通过向油藏中注入化学物质、蒸汽等改变原油化学物理性质并提高油藏压力, 进一步提高原油采收率, 这一阶段被称为三次采油 (Tertiary Recovery) 或者是增强采油 (Enhanced Oil Recovery, EOR).

在三次采油中, 化学驱技术是一种非常重要的提高原油采收率的方法, 也是当前的研究热点. 化学驱主要包括聚合物驱、表面活性剂驱和碱驱等. 化学驱是指在水中加入化学驱替剂, 用来改变水相黏度, 实现较好的流度控制, 产生较低界面张力, 从而扩大波及体积, 实现从油层中驱替出更多原油, 提高油藏采收率.

单一的化学驱在油藏开发中存在某些弊端限制了它的广泛应用. 例如, 碱驱对原油酸碱度及活性要求较高, 开采中容易出现结垢、碱耗等; 表面活性剂驱开发成本高, 容易大量滞留在地层中, 且容易和地层中的离子发生化学反应失效, 造成表面活性剂的大量消耗; 聚合物驱稳定性较差同时易受地层水矿化度影响, 导致聚合物用量增加, 驱油效果减弱.

具有不同特点的单一化学驱技术决定了它们只适用于特定地质条件的油藏. 因此有人考虑通过结合上述三种驱替剂, 最大程度发挥各自的优势, 使之对油藏具有更好的适应性, 从而提升驱油效率提高原油采收率, 因此开发出三元 (碱/表面活性剂/聚合物) 复合驱技术. 三元复合驱 (Alkali-Surfactant-Polymer, ASP) 通过聚合物扩大波及系数, 提高原油驱替效率; 碱与原油中的酸性物质反应后生成的具有表面活性的物质能够产生超低表面张力; 表面活性剂具有很强的岩石吸附特性, 能够改变岩石的亲油特性到亲水特性; 此外, 碱能够降低原油酸碱度, 从而减小表面活性剂的损失, 降低成本等. ASP 驱油技术自 20 世纪 80 年代产生以来, 已经进行了大量的实验分析与验证, 积累了可靠的开发技术经验. 例如, 我国大庆、胜利和美国 West Kihel 等油田都进行了相关试验, 均显著提高了原油采收率, 验证了三元复合驱巨大的应用价值.

三元复合驱项目涉及油藏地质条件复杂、经济投入大、时间长、风险大. 为了实现项目的最大化收益, 需要对三元复合驱的注采方案进行理论研究, 设计出最佳的油藏开发方案. 虽然三元复合驱技术进行了大量的矿场试验, 但是其开发方案单一简单, 缺乏理论研究. 当前油田最常用的开发方法为指标对比法, 即根据事先规

划设计出多个开发方案, 然后依次对每个方案使用模拟软件进行仿真验证, 最后根据不同需求 (例如, 最大化产油量、最大化净现值收益、最小投入成本等) 分析各个因素对最终结果的影响, 再根据经验调整相关参数, 制订出最终的开发方案. 该方法缺少科学依据, 通常依靠油藏工程师的经验进行调整, 需要投入大量时间精力, 同时存在较多人为因素造成的不确定性, 所以最终所得方案也未必是最优的.

本书利用分布参数最优控制原理, 将三元复合驱的注入方案优化设计问题, 转换成如下的一类具有不等式约束的分布参数系统的最优控制问题: 以累积利润的净现值作为目标泛函, 以三元复合驱动态过程的渗流机理方程作为控制方程, 以注入量 (注入速度、注入浓度) 作为优化决策变量. 通过研究该类问题的数值求解, 设计出三元复合驱的动态最佳注入方案.

本书涉及控制科学与工程、应用数学、计算数学及石油工程等学科的交叉, 尽可能将最优控制与动态规划的相关知识介绍给大家, 使读者容易理解本书的内容.

第 1 章为绪论; 第 2 章为预备知识; 第 3 章为三元复合驱最优控制模型及必要条件; 第 4 章为基于正交函数近似的控制变量不连续最优控制求解; 第 5 章为基于动态规划的最优控制求解; 第 6 章为基于螺旋优化的模糊多目标最优控制求解; 第 7 章为三元复合驱时空建模及迭代动态规划求解; 第 8 章为基于色谱分离的三元复合驱机会约束规划求解; 第 9 章为本书的内容总结.

本书的研究工作得到了国家自然科学基金 (No.61573378) 与中国石油化工集团有限公司胜利油田分公司的大力支持. 在此, 特别感谢中国石油化工集团有限公司胜利油田分公司的郭兰磊高级工程师与单联涛高级工程师在提供相关资料方面的帮助. 本书的写作过程得到了中国石油大学 (华东) 的副教授张晓东、研究生卢松林、常鹏、韩露等, 北京邮电大学的研究生刘哲、涂思奇等的帮助, 在此深表感谢!

由于作者水平有限, 不妥之处在所难免, 敬请读者批评指正.

作　者

2019 年 10 月

彩　　图

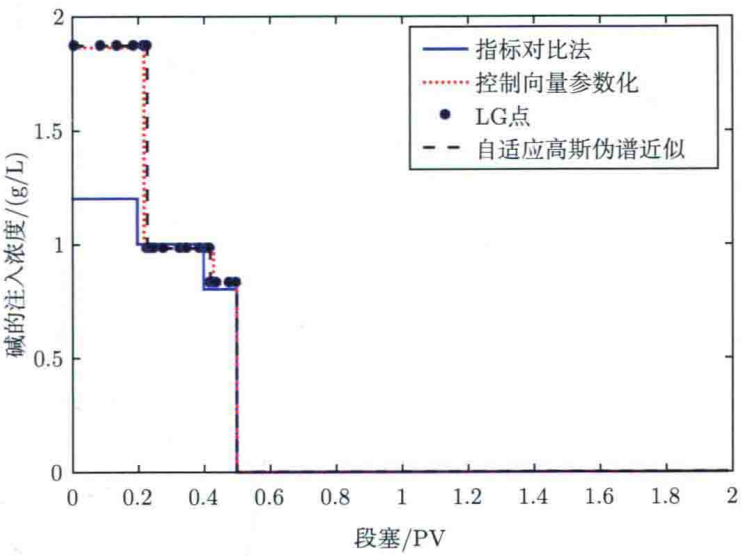


图 4-6　碱的注入浓度对比

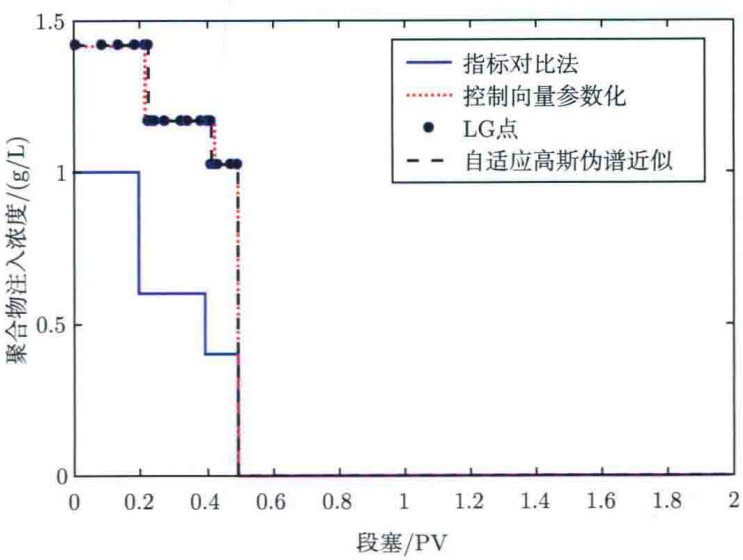


图 4-7　聚合物注入浓度对比

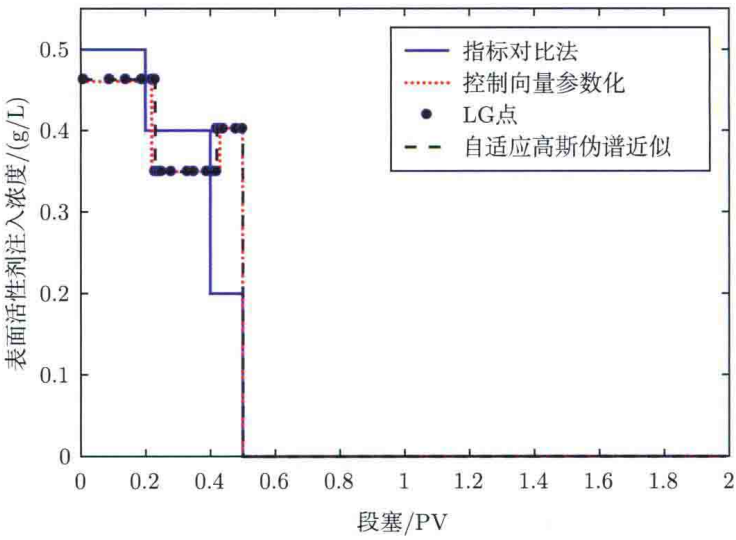


图 4-8　表面活性剂注入浓度对比

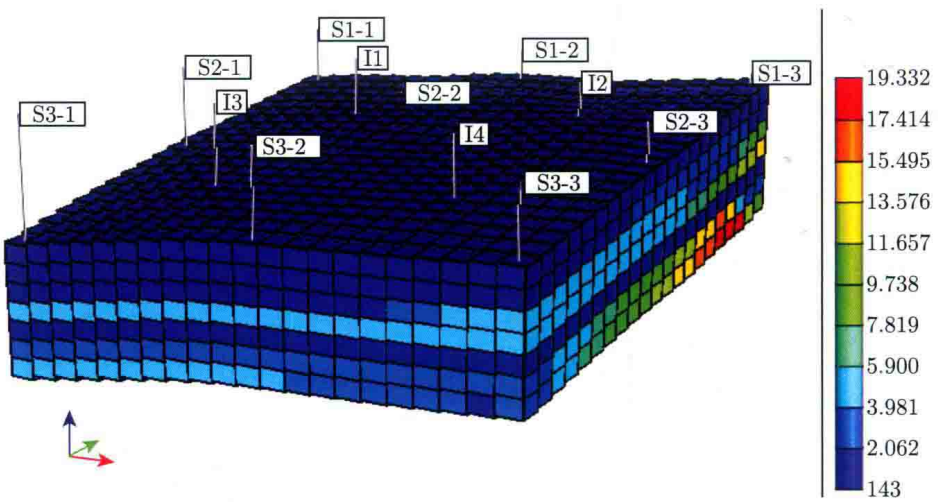


图 4-11　初始渗透率分布

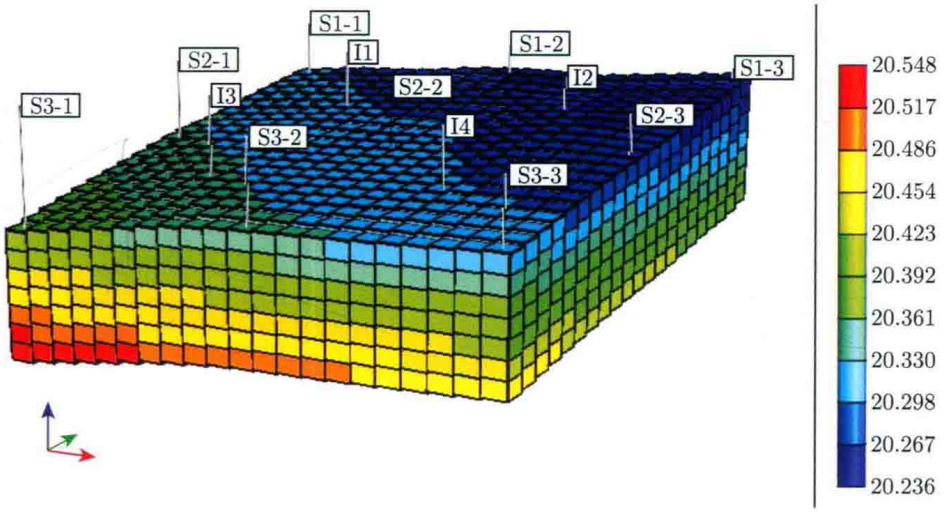


图 4-12　初始压力分布

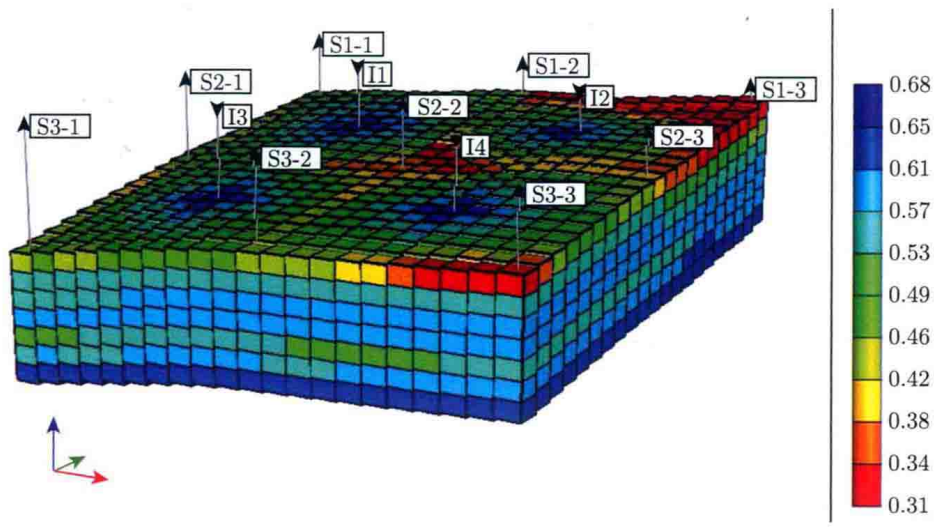


图 4-13　初始含水饱和度分布

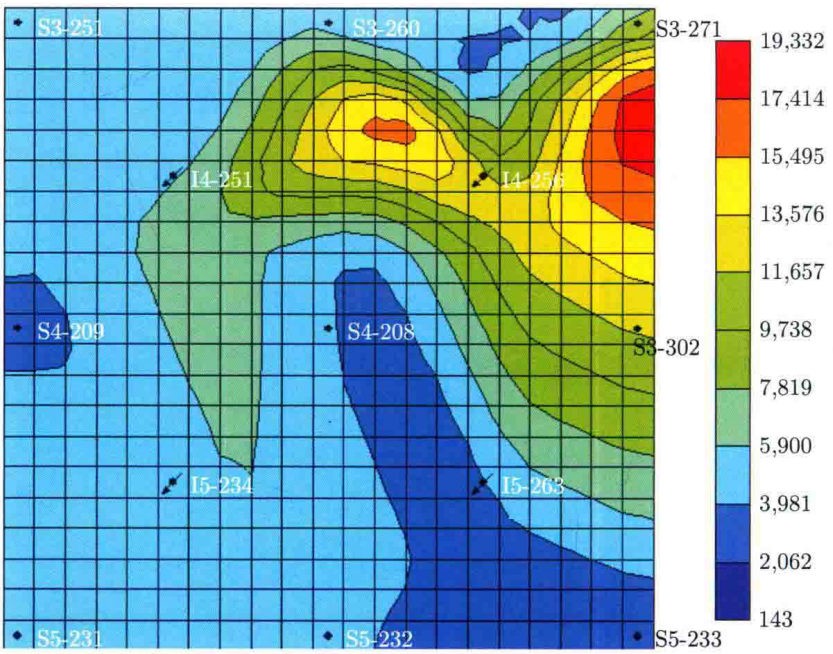


图 5-4　渗透率分布

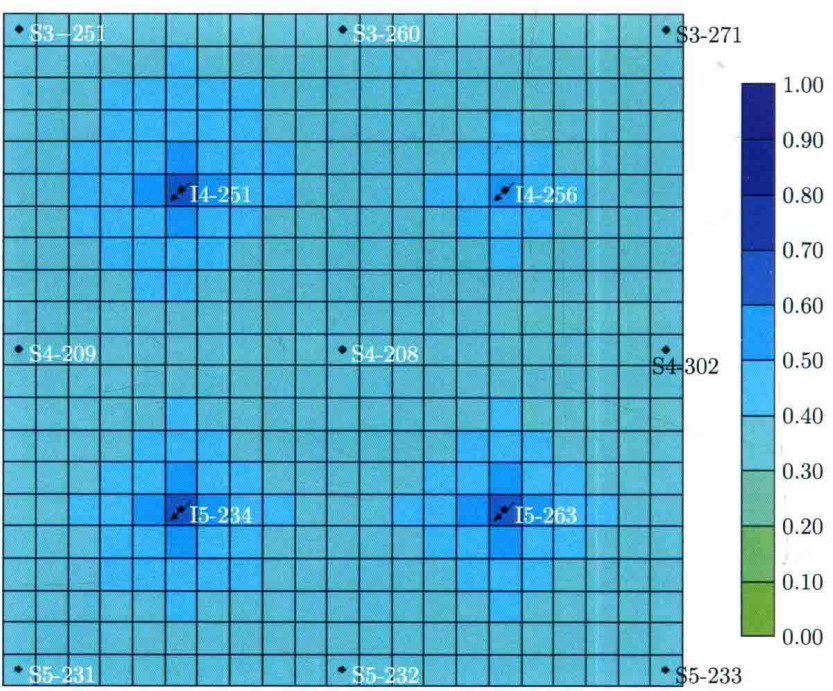


图 5-5　初始含水饱和度分布

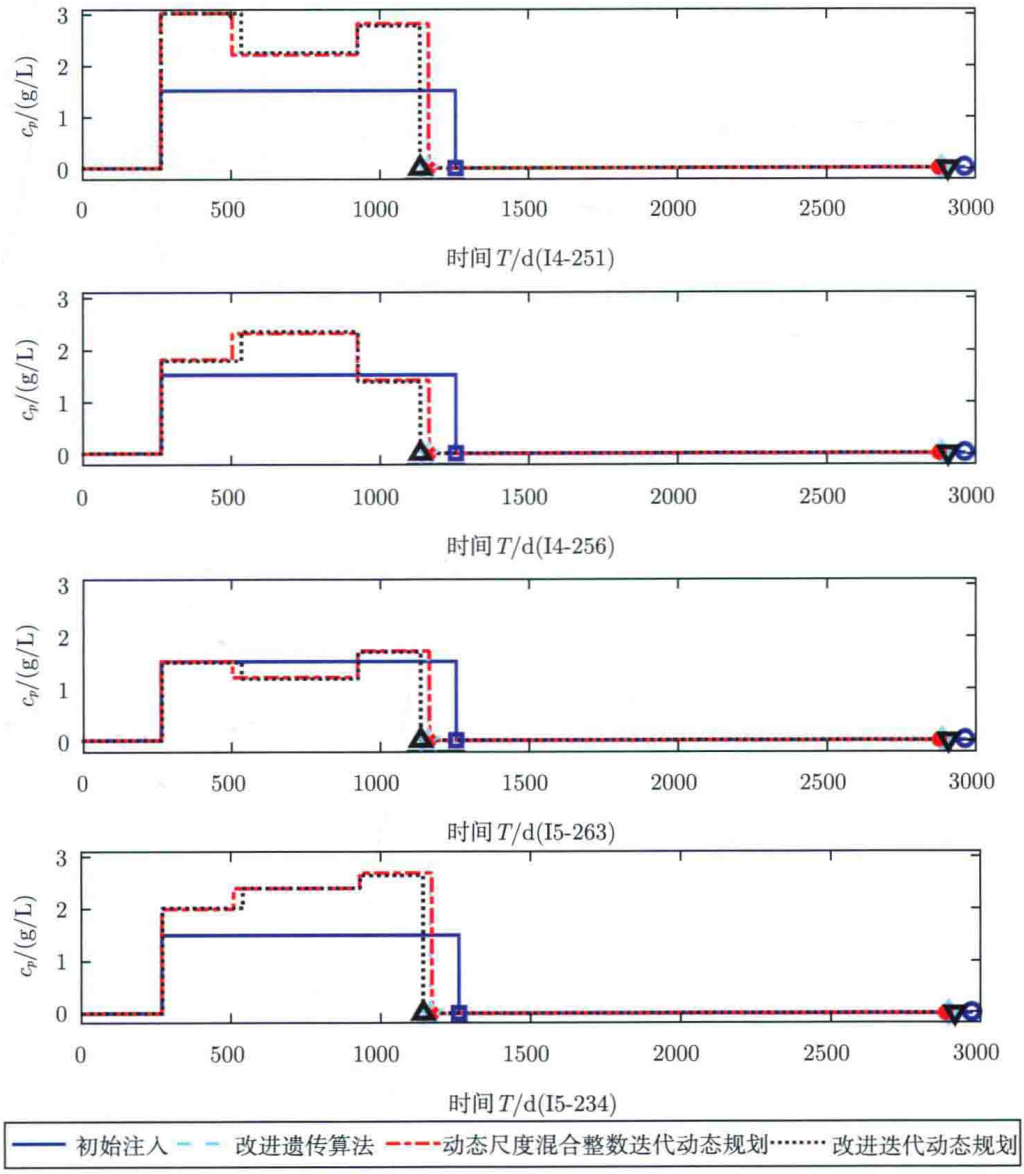


图 5-7　聚合物注入浓度比较

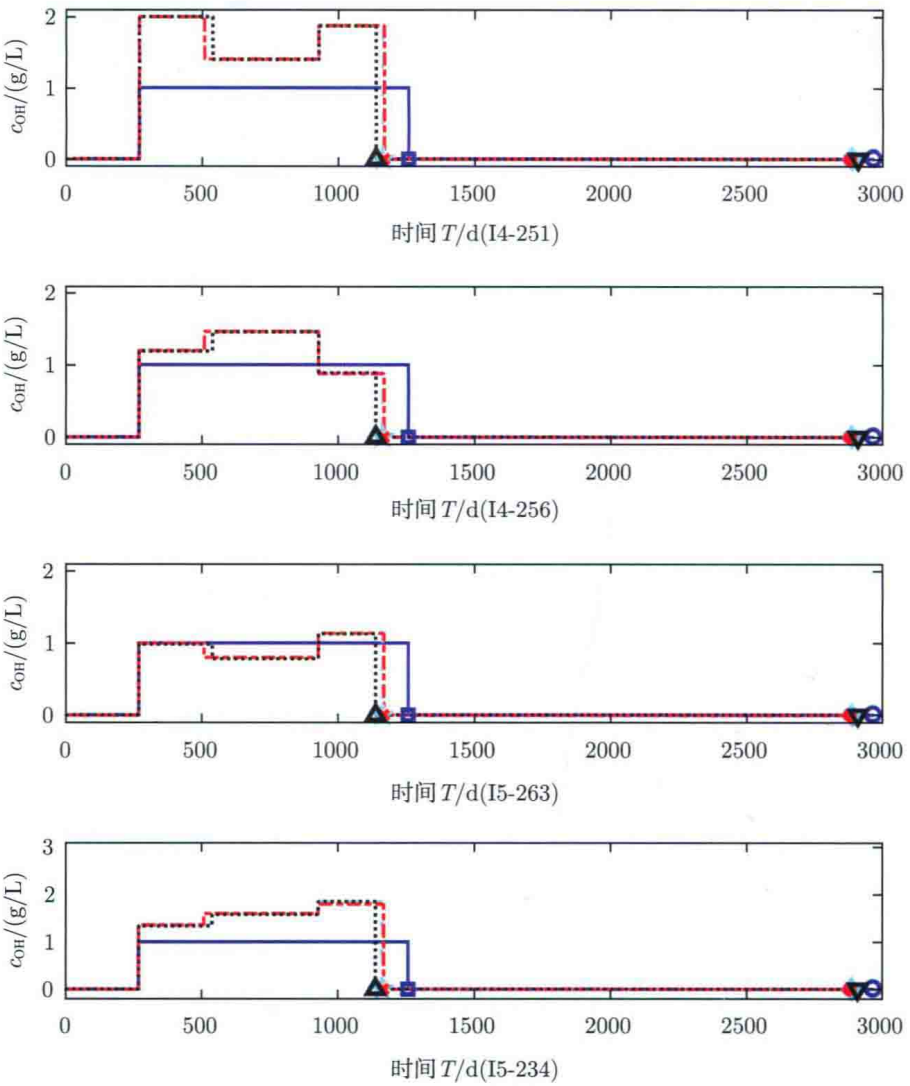

c_{OH}/(g/L)
时间 T/d(I4-251)
时间 T/d(I4-256)
时间 T/d(I5-263)
时间 T/d(I5-234)
初始注入
改进遗传算法
动态尺度混合整数迭代动态规划
改进迭代动态规划

图 5-8　碱注入浓度比较

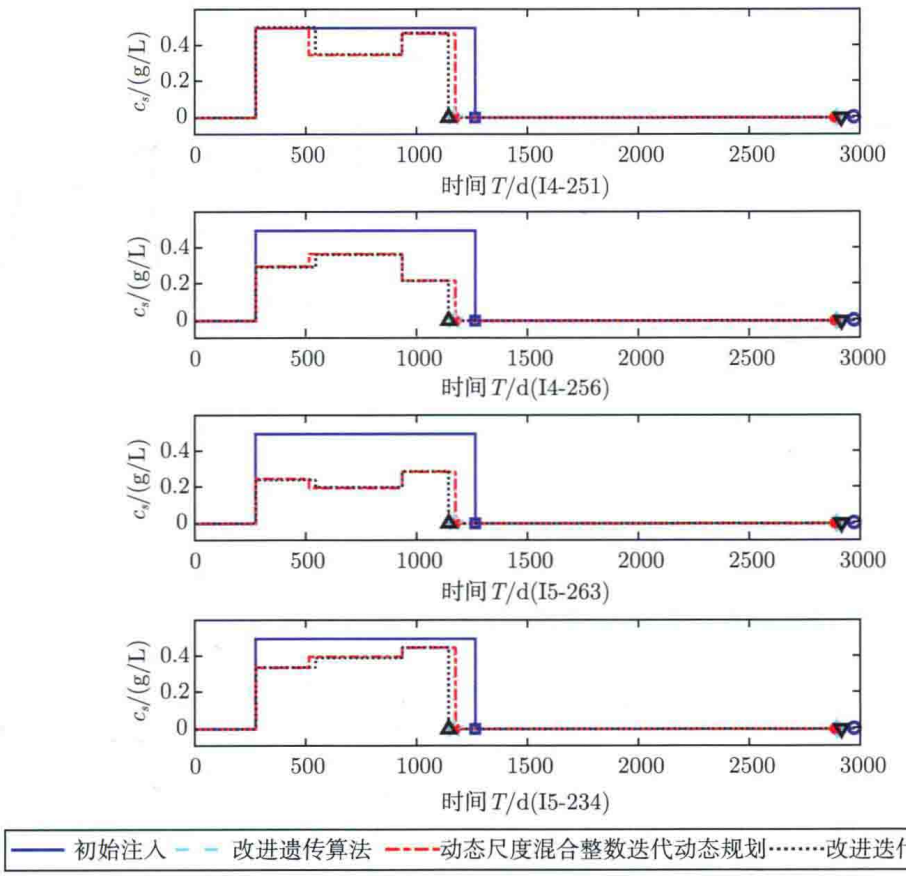


图 5-9　表面活性剂注入浓度比较

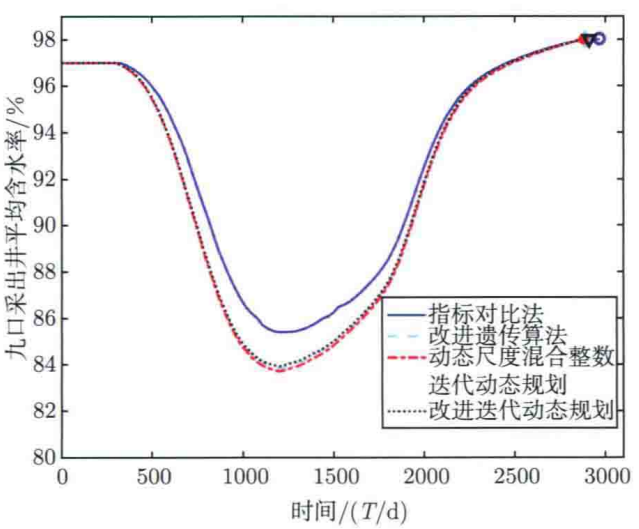


图 5-10　九口采出井平均含水率比较

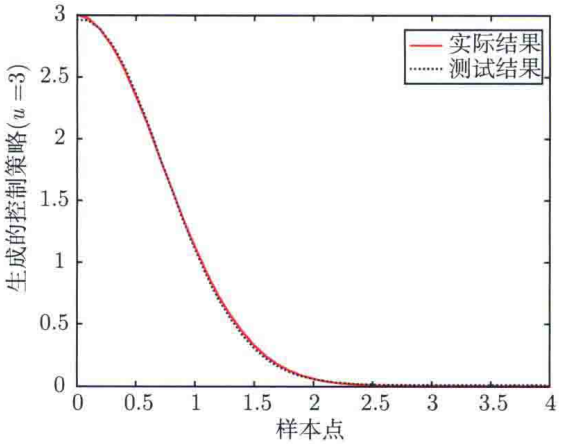


图 5-16　模型验证结果

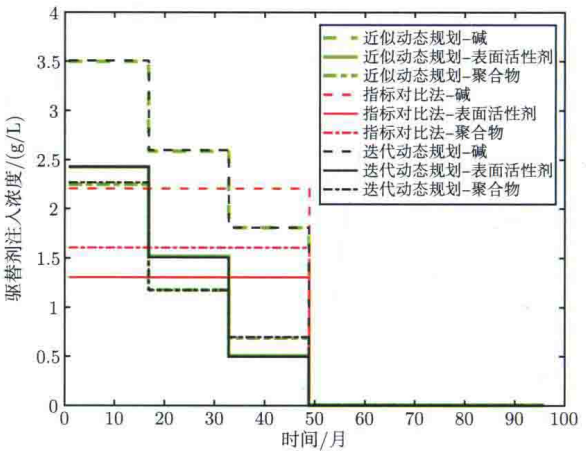


图 5-17　注入浓度比较

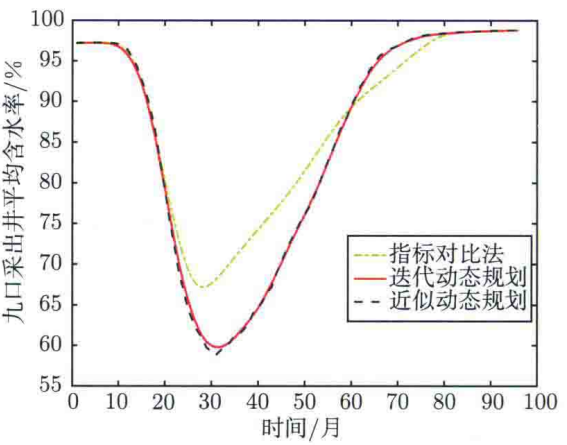


图 5-21　采出井平均含水率

目　　录

前言
第 1 章　绪论 ····· 1
1.1　研究背景及意义 ····· 1
1.2　国内外研究现状 ····· 2
1.3　本书主要内容 ····· 5
第 2 章　预备知识 ····· 8
2.1　最优控制理论 ····· 8
2.1.1　最优控制问题表述 ····· 8
2.1.2　最优性必要条件 ····· 9
2.1.3　数值最优控制方法 ····· 11
2.2　动态规划 ····· 22
2.2.1　动态规划理论 ····· 22
2.2.2　迭代动态规划理论 ····· 26
2.2.3　近似动态规划理论 ····· 29
第 3 章　三元复合驱最优控制模型及必要条件 ····· 31
3.1　三元复合驱数学模型 ····· 31
3.1.1　支配方程 ····· 31
3.1.2　物化代数方程 ····· 34
3.1.3　简化的三元复合驱二维模型 ····· 37
3.1.4　简化的三元复合驱一维岩心模型 ····· 38
3.2　三元复合驱数学模型的有限差分求解 ····· 38
3.2.1　全隐式有限差分离散化 ····· 38
3.2.2　数学模型方程组求解 ····· 43
3.3　三元复合驱最优控制模型 ····· 44
3.3.1　性能指标 ····· 45
3.3.2　支配方程 ····· 45
3.3.3　优化变量 ····· 45
3.3.4　约束条件 ····· 46

3.4 三元复合驱最优控制问题的必要条件 ····· 46
3.4.1 离散三元复合驱最优控制的一般形式 ····· 47
3.4.2 离散三元复合驱最优控制的必要条件 ····· 47
3.5 本章小结 ····· 50
第 4 章 基于正交函数近似的控制变量不连续最优控制求解 ····· 51
4.1 问题描述 ····· 51
4.2 基于自适应正交函数近似的最优控制求解方法 ····· 53
4.2.1 基于约束凝聚的约束处理 ····· 53
4.2.2 多阶段问题转化 ····· 55
4.2.3 正交函数近似 ····· 56
4.2.4 自适应策略 ····· 60
4.2.5 具有最优性验证的控制结构检测方法 ····· 61
4.3 基于序列二次规划的优化求解 ····· 63
4.3.1 算法步骤 ····· 63
4.3.2 算法测试 ····· 64
4.4 基于自适应正交函数近似的三元复合驱最优控制求解 ····· 66
4.4.1 基于高斯伪谱法的一维三元复合驱最优控制求解 ····· 66
4.4.2 基于有理 Haar 函数的三维三元复合驱最优控制求解 ····· 70
4.5 本章小结 ····· 82
第 5 章 基于动态规划的最优控制求解 ····· 83
5.1 基于迭代动态规划的混合整数最优控制求解 ····· 83
5.1.1 动态尺度混合整数迭代动态规划算法 ····· 83
5.1.2 三元复合驱最优控制问题求解 ····· 90
5.2 基于近似动态规划的最优控制求解 ····· 97
5.2.1 最优控制问题描述 ····· 97
5.2.2 基于执行–评价框架的近似动态规划算法 ····· 99
5.2.3 算法测试 ····· 106
5.2.4 三元复合驱最优控制问题求解 ····· 107
5.3 本章小结 ····· 112
第 6 章 基于螺旋优化的模糊多目标最优控制求解 ····· 113
6.1 改进的螺旋优化算法 ····· 113
6.1.1 经典螺旋优化算法 ····· 113
6.1.2 自适应柯西变异 ····· 116

6.1.3 拉丁超立方采样……118
6.1.4 混合螺旋优化算法……119
6.1.5 算法测试……121
6.2 基于混合螺旋优化的模糊多目标最优控制问题求解……123
6.2.1 模糊多目标最优控制描述……123
6.2.2 确定性模型转化……124
6.2.3 基于对称模型和水平截集的模糊多目标处理方法……126
6.2.4 混合螺旋优化求解……127
6.3 三元复合驱模糊多目标最优控制求解……128
6.4 本章小结……132
第 7 章 三元复合驱时空建模及迭代动态规划求解……134
7.1 基于动态记忆小波神经网络的建模方法……134
7.1.1 基本原理……134
7.1.2 K-L 分解……135
7.1.3 动态记忆小波神经网络……138
7.1.4 基于动态记忆小波网络的三元复合驱近似建模……144
7.2 双正交时空 Wiener 建模方法……148
7.2.1 基本原理……149
7.2.2 时空 Wiener 系统……149
7.2.3 基函数构造……150
7.2.4 双正交时空 Wiener 系统建模……155
7.2.5 仿真测试……160
7.3 基于双正交时空 Wiener 建模的迭代动态规划算法……164
7.4 基于双正交时空建模的三元复合驱最优控制求解……165
7.4.1 油藏描述……165
7.4.2 三元复合驱建模和模型验证……166
7.4.3 迭代动态规划求解……169
7.5 本章小结……172
第 8 章 基于色谱分离的三元复合驱机会约束规划求解……173
8.1 色谱分离参数计算及软件设计……173
8.1.1 色谱分离参数计算模式……173
8.1.2 色谱分离参数计算软件设计……175
8.2 三元复合驱机会约束规划……177

8.2.1　三元复合驱优化模型 ····· 177
8.2.2　优化模型实例求解 ····· 179
8.3　本章小结 ····· 182
第 9 章　结论 ····· 183
参考文献 ····· 185
附录　模糊优化基础 ····· 196
彩图