

石油科学进展 21

三次采油最优控制 理论的应用

(美) W·F·拉米雷著

周显民 田保成译 陈淼鑫校



黑龙江科学技术出版社

41245

三次采油最优控制 理论的应用

〔美〕 W·F·拉米雷 著

周显民 田保成 译

陈淼鑫 校



黑龙江科学技术出版社

责任编辑: 王天青 孙旭凤

封面设计: 曹志红

三次采油最优控制理论的应用

周显民 田保民 译

黑龙江科学技术出版社出版

(哈尔滨市南岗区建设街35号)

黑龙江水利专科学校印刷厂印刷

850×1168毫米32开本 印张7.375 165千字

1990年2月第1版·1990年2月第1次印刷

印数: 1-2 500册

定价: 5.00元

ISBN 7-5388-1031-5/TE·6

译者序

本书是《石油科学进展》系列丛书的第21卷，该书详细地阐述了三次采油最优化控制理论以及在线性岩心实验中表面活性剂驱最优化的应用，在胶束聚合物驱提高采收率过程中的一维、二维最优化的应用和二氧化碳提高采收率过程中的二维最优化的应用。该书不仅可作为石油院校自动化控制专业、石油开发专业和采油专业师生的教材，而且对从事提高原油采收率数值模拟研究工作的同志来说，也是一本难得的参考资料。

本书第1~7章由周显民译，第8章由田宝成译。

在翻译过程中，得到了王如义、马启贵等同志的关心与帮助，成文后承蒙徐玉浦、袁庆峰校审，为此表示感谢。

由于水平有限，缺点和错误在所难免，敬请读者不吝指正。

1989年5月

目 录

第一章 三次采油	(1)
1.1 概述	(1)
1.2 能源的需求	(1)
1.3 目前原油生产方式	(3)
1.4 现有生产技术效率	(3)
1.5 未采出的原油	(4)
1.6 三次采油技术	(6)
1.6.1 蒸汽激励驱油法	(6)
1.6.2 蒸汽驱油法	(7)
1.6.3 火烧油层驱油法	(7)
2.6.4 表面活性剂——聚合物驱油法	(7)
1.6.5 聚合物驱油法	(8)
1.6.6 苛性水驱油法	(8)
1.6.7 烃类混相驱油法	(8)
1.6.8 二氧化碳驱油法	(8)
1.6.9 惰性气体驱油法	(8)
1.7 原油价格	(9)
1.8 三次采油方法的生产潜力	(14)
1.9 矿场经验	(16)
1.10 评价潜在经济效益	(17)
1.10.1 性能指标	(18)
1.10.2 货币的时值	(19)
1.10.3 净现值	(20)
1.10.4 胶束/聚合物实例	(20)
第二章 最优控制理论	(37)
2.1 概述	(37)
2.2 基本概念	(38)

2.2.1 泛函的定义	(38)
2.2.2 泛函的线性性	(39)
2.2.3 函数的范数	(40)
2.2.4 泛函的增量	(40)
2.2.5 泛函的一阶变分	(41)
2.2.6 泛函的极值	(43)
2.2.7 变分法的基本定理	(43)
2.3 单变量的积分泛函	(45)
2.4 约束极值	(51)
2.5 最优控制问题	(54)
2.6 庞特里亚金的极大值原理	(58)
2.7 分布参数系统的必要条件	(62)
第三章 线性岩心实验的表面活性剂驱油最优化	(72)
3.1 概述	(72)
3.2 数学模型	(73)
3.3 数值解方法	(78)
3.4 贝利 (Berea) 岩心结果	(82)
3.5 最优注入策略	(85)
3.6 计算步骤	(90)
3.7 伴随状态方程	(91)
3.8 最优化结果	(94)
第四章 离散最大值原理	(101)
4.1 概述	(101)
4.2 显式模型的必要条件	(101)
4.3 离散和连续的极大值原理的比较	(105)
4.4 隐式模型的必要条件	(108)
第五章 胶束/聚合物三次采油方法的一线最优化	(112)
5.1 概述	(112)
5.2 数学模型	(112)

5.2.1	连续方程	(114)
✓5.2.2	有效含盐量	(115)
5.2.3	相特性	(116)
5.2.4	界面张力	(118)
✓5.2.5	相粘度	(119)
5.2.6	残余饱和度	(120)
5.2.7	相对渗透率	(121)
5.2.8	吸附	(121)
5.2.9	阳离子交换	(122)
5.2.10	死孔隙	(122)
5.3	数值解	(123)
5.4	斯洛斯 (Sloss) 实验模拟	(124)
5.5	最优注入策略	(133)
5.6	计算步骤	(136)
5.7	伴随状态方程系数的计算	(138)
5.8	最优化结果	(139)
第六章	胶束/聚合物驱油过程的二维最优化	(152)
6.1	概述	(152)
6.2	流管模拟	(153)
6.3	最优注入策略	(163)
6.4	计算步骤	(166)
6.5	斯洛斯 (Sloss) 现场试验	(166)
6.6	最优化结果	(171)
第七章	二氧化碳三次采油过程的二维最优化	(176)
7.1	概述	(176)
7.2	数学模型	(177)
7.2.1	可混性混合规则	(180)
7.2.2	相对渗透率	(181)
7.2.3	原油性质	(181)

7.2.4 二氧化碳性质	(182)
7.2.5 水的性质	(182)
7.3 初始条件和边界条件	(183)
7.4 数值解	(184)
7.5 模拟结果	(188)
7.6 最优注入策略	(193)
7.7 计算步骤	(199)
7.8 最优化结果	(200)
7.8.1 实例1 单一二氧化碳段塞	(201)
7.8.2 实例2 二氧化碳和水同时注入	(206)
7.8.3 实例3 水气交替注入	(209)
7.8.4 最优控制策略的比较	(213)
第八章 摘 要	(218)
8.1 三次采油最优化	(218)
8.2 历史拟合	(218)
8.3 今后问题	(220)
索引	(222)

第一章 三次采油

1.1 概述

近年来，三次采油技术已在石油工业得到极大的关注。在70年代期间，由于能源供给的易变性，已知储量的递减以及现时的采油技术的低效率，使得油价持续地快速上升，这就促进了三次采油技术的发展。三次采油方法可分为三种主要类型：热力采油过程，包括蒸汽驱，蒸汽激励以及火烧油层；化学采油过程，包括表面活性剂——聚合物驱，聚合物驱以及苛性水驱；混相驱采油过程，包括碳氢化合物混相驱，二氧化碳驱以及惰性气体驱。所有这些方法，都包含着向油层中注入大量的相当昂贵的流体。任何三次采油过程商业性应用均取决于可观的投资回收的经济方案。由于化学剂价格昂贵，十分必要优化三次采油过程，以便以最低的化学注入费用，获得最高的采收率。本书的目的是用最优化控制理论确定最优操作策略，使三次采油过程具有最大的经济吸引力。最优控制过程或者操作策略的确定是三次采油新技术成功应用的一个关键因素。

1.2 能源的需求

现代工业社会消耗大量的能源。世界原油的消耗量大约是每年200亿桶。图1.1表明世界几个产油区域从1945年到1980年间的产量。在图1.2中给出了世界累积产量。这张图表明，目前我们已产出4 700亿桶原油。过去的十年里，美国已消耗了年产原油的34%。石油和天然气构成了世界能源需求的70%以上的能源。

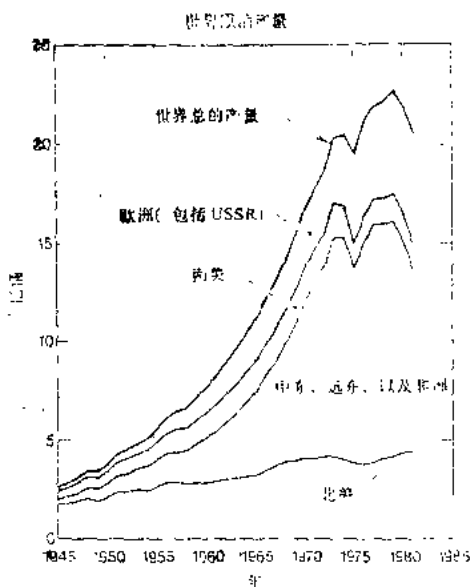


图1.1 世界原油生产速度
取自德戈莱耶和麦克内顿20世纪石油统计资料,1982

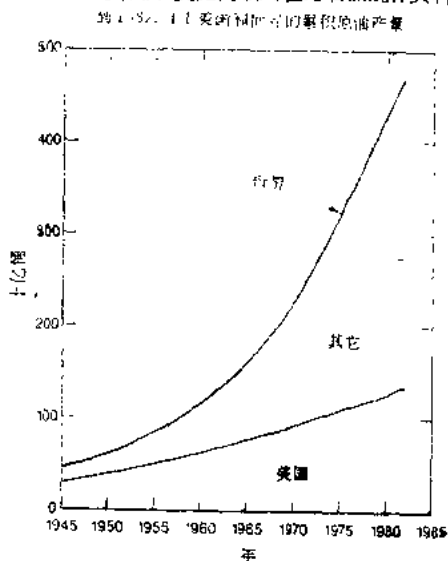


图1.2 世界累积产油量
取自德戈莱耶和麦克内顿20世纪石油统计资料,1982

显然，为了保持今天的高标准生活，我们消耗了大量的能源，并且这些能源的来源取决于石油生产技术。社会持续所关心的事情之一是得到充足的、相当廉价的能源。

1.3 目前原油生产方式

石油工业目前使用的采油技术是一次采油和二次水驱采油。

象术语字面所包含的意思，一次采油是指从一个油藏中最初生产原油的方法。当油藏发现时，油藏中的水油气混合物包含在小孔隙空间中，或者存在于岩石颗粒骨架之间孔隙空间中。最初，这些流体是处于相当高的压力条件下，这种压力是地下水的静水压力产生的。在这种高压条件下，大部分气体是溶解在油相之中，原生水和溶解气能量的结合为把油从油层中移向井底提供了动力，然后由井底的剩余压力把油推向地面，或者通过泵把油提升到地面。

油藏压力下降以两种方式影响着原油的产出。首先，压力下降减小了把油驱向井底的力。其次，也是更重要的，由于油藏压力下降，以溶解状态存在的某些气体被释放，并且以分离的气泡形式存在于多孔介质的孔隙中。当气体流动增加时，这种分离出来的气相阻碍着油流向井底。

增加原油采收率的传统方法是向油层中注入气或水，其目的是在生产中推迟压力递减。这种技术称为压力保持，并且在此条件下产出的原油仍做为一次采油的一部分。

当油层压力递减使产油速度变得不经济以后，则可向油层中连续地注入一种流体。一般来说，这样的流体是水。这种技术称为二次水驱原油。

1.4 现有生产技术效率

利用今天包括压力保持在内的一次采油和二次水驱采油技

术，有一半以上原始储量的原油产不出来。按自然条件生产，一个油田可能产出原始储量的20%至30%。当通过生产者来探求自喷井时，在1977年底，美国500 000口以上的油井中，仅仅约为70%的油井是自喷井。一次采油量大约占1976年美国原油产量的一半。国家石油理事会预计，到2000年现有油田的一次采油量将低于总产量的10%。

到1973年，水驱采油已成为美国采油主要方法之一。在此期间，国内产出的原油一半是从局部水驱或者完全水驱的油藏中产出。在世界各地，加拿大、委内瑞拉、伊拉克和沙特阿拉伯的油田水驱采油较为普遍。在过去的实际工作中，格芬 (Geffen) (1973) 估计水驱采油的平均成本为30~50美分/桶之间。但是，最近的某些报告表明，新的水驱方案成本略高一些。

对于一个高于比重为0.8762的典型气体衰竭油田，增加的水驱采收率在15%至20%范围内，一次和二次采收率大约为30%至45%。下面(表1.1)是EPA68-01-2445给出的美国几个油田一次和二次采油效率的数据。

表1.1 一次和二次采油效率

油 田	一次采收率	增加水驱采收率
埃尔多雷多 (Eldorado)	21%	22%
杰伊 (Jay)	17	21
佩贝恩 卡迪姆 (Penbina Cardium)	15	15
索恩 希尔斯 (Sawn Hills)	17	25
韦德恩 (Waybuden)	14	17
西伯克 伯内特 (West Burck Burnett)	15	17

1.5 未采出的原油

已发现的原油总量可分为两类，一类是由一次和二次采油技

术能够产出的量（探明储量），其次是利用目前技术而采不出的量，这些采不出的量正是三次采油诸方法的目标。表1.2表明目前的累计产量已超过4 760亿桶。达拉斯、德克萨斯的德戈莱耶（DeGolyer）和麦克内顿（Mac Naughton）（20世纪石油统计资料，1982）估计到1982年1月，世界原油储量是6 600.1亿桶。图1.3表示了这些探明储量之分布。石油输出国组织（OPEC）占储量的63%，而美国的储量是总数的4.5%。

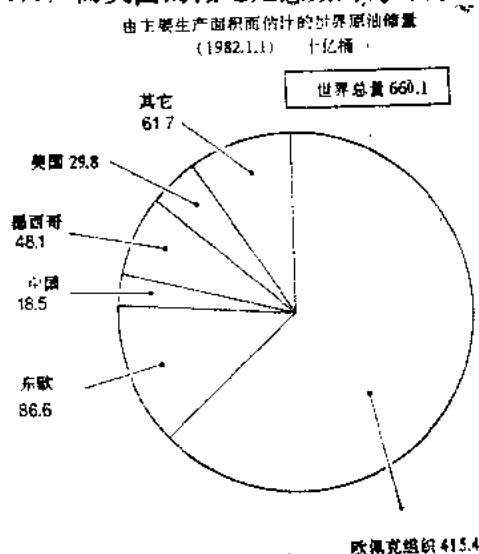


图1.3 原油储量分布

取自德戈莱耶和麦克内顿20世纪石油统计资料,1982

联邦能源局FEA/B—76/221给出的到1976年1月1日美国的原油产量、储量和地下剩余油量示于表1.2。

表1.2 美国原油产量、储量和剩余油量

	已产出的油量	探明的储量	EOR目标	总和
10亿桶	101	22	278	401
占地下原油 (%)	25.2	5.5	69.3	100

世界性的三次采油目标大约是 2×10^4 亿桶原油。正如1984年《金融时报》石油和天然气国际年鉴所报告的那样（英格兰，威斯特豪斯，朗曼集团有限公司），估计未来发现的可采原油以90%的概率在 3.4×10^4 亿桶和 1.5×10^5 亿桶之间，最可能的是 5.8×10^4 亿桶。

每年假定以 2.1×10^2 亿桶恒速消耗原油的话（由图1.1可知，这是过去5年典型的消耗量），那么目前6600.1亿桶的储量将持续31年。如果每年消耗量以5%的速度增长，则这些储量将在19年内耗尽。自1970年以来，美国每年生产速度大约为40亿桶。假定以这个速度生产的话，美国220亿到290亿桶的探明储量将在5.5~7.25年内耗尽。对于可得到的探明储量存在一个确切的界限。

利用目前的一次和二次采油方法有2/3的世界原油采不出。显然，为了提高已发现的原油采出百分数，将会开发许多新的三次采油技术。

1.6 三次采油技术

三次采油技术可分为三种主要类型：热力采油过程，化学采油过程以及混相驱采油过程。热力采油过程包括蒸汽驱、蒸汽激励以及火烧油层。化学采油过程包括表面活性剂——聚合物驱或者微乳液/聚合物驱、聚合物驱以及苛性水驱。混相驱采油过程包括烃类混相驱以及二氧化碳驱。在H·K·范波伦(Van poolen)

(1980)所著的《三次采油基础》一书中可找到对各种方法的详细讨论。

1.6.1 蒸汽激励驱油法

蒸汽激励法也就是众所周知的循环注蒸汽法，蒸汽浸泡法或蒸汽吞吐。在这种采油方法中，在一特定的周期内（通常是在2~3周内）向生产井中注入蒸汽。在注入蒸汽以后，关井数天，使热量充分扩散，然后开井生产。注入蒸汽的热量提高了油层温度，因而，明显地提高了重油的流动性，相应地提高了重油的产量。

1.6.2 蒸汽驱油法

将蒸汽注入到许多井中，而从相邻的井中产油。当蒸汽从注入井向周围移动时，随着蒸汽的范围不断扩大，蒸汽的压力亦随之下降，蒸汽的温度也不断下降。在距注入井某一距离内，蒸汽凝析为热水并形成热水带。在蒸汽带中，原油受到蒸汽蒸馏作用和气驱作用的驱动。在热水带中，物理特性变化，特别是原油粘度的变化，导致了增加原油采收率。

1.6.3 火烧油层驱油法

在正向火烧法中，在空气注入井的邻近点燃油层，并且燃烧前缘由注入井向外扩展。反向燃烧过程开始时，采用的方法与正向燃烧相同，但是，从点火井向外燃烧一段短距离后，即邻井转向注空气，驱动着原油向原来的点火井前进，而燃烧前缘沿着相反方向朝着邻井推进。火烧提供了降低重油粘度和增加原油流动性的能量。

1.6.4 表面活性剂——聚合物驱油法

这个过程可分两步：注入表面活性剂段塞，然后注入一种流动的缓冲剂。表面活性剂的最初目的是降低油和水相之间的界面张力。油层的残余油饱和度是强烈依赖于水—油界面张力的函数，界面张力低，残余油饱和度就低。聚合物的目的是提供表面活性剂段塞的流动控制。表面活性剂浓度高时，形成胶束溶液。这是表面活性剂、水以及油分子的稳定聚集物，它们可能是水溶性、油溶性或者形成一种分离的微乳液相。由于许多表面活性剂过程是在胶束形成的高浓度表面活性剂条件下进行的，所以，一般把这种过程叫做胶束/聚合物驱，而不叫表面活性剂——聚合物驱。

1.6.5 聚合物驱油法

聚合物驱油主要是向注入水中添加水溶性聚合物稠化剂。尽管加入聚合物对最终残余油饱和度没有实质的改变，但是，却减少为达到最终残余油饱和度所需要总的注入水量，同时，由于改善了流动控制，所以，聚合物驱增加了扫油效率。

1.6.6 苛性水驱油法

这种驱油过程是将氢氧化钠溶液加入驱替水中。碱性物质与原油中的有机酸作用，在油层中产生表面活性剂，降低了油水界面张力，减少了残余油饱和度。

1.6.7 烃类混相驱油法

混相驱油过程包括注入可以完全与油层流体溶解的流体。消除岩石骨架中引起滞留原油的力。烃类溶剂可以是醇类，精制烃类或者是凝析烃类气体。首先注入一个溶解段塞，随后注入一种流体或者气体，将溶质—油混合物推向生产井。

1.6.8 二氧化碳驱油法

在正确的压力、混度和原油组成的条件下，二氧化碳将与油藏的原油混合，形成一种单相流体。这种流体要比原来的原油轻得多。然后，注入二氧化碳气体或者水可以驱替这种膨胀后的油之混相前缘。

1.6.9 惰性气体驱油法

惰性气体如氮混相驱替油层流体的现象只能在有限的流体组成、压力和温度范围内发生。因此，能够使用惰性气体驱油法的油层数量是有限的。

1.7 原油价格

在70年代的10年中，原油价格发生了空前的变化。1973年以前，世界原油价格保持相当稳定，每桶在2美元至4美元之间。但是，由于1973年的阿拉伯—以色列战争的政治事件以及世界对原油的需求近似地等于原油生产能力这一事实，欧佩克（石油输出国组织）单方面地把阿拉伯的比重为0.8550的原油价格从每桶3.01美元提高到5.12美元。为了表示阿拉伯人对美国与荷兰在对待阿拉伯—以色列战争政策的不满，对这两个国家实施了禁运。实际上，原油变得缺乏。在1973年11月23日，欧佩克再次把油价提升到每桶11.65美元。于是，在不到一年的时间内，世界原油价格上涨了287%。但是，原油市场的变化将总有一天会到来。由于过度的开采，原油价格是过分的便宜。原油价格的急剧变化冲击了整个世界。

在1940~1970这个阶段，世界范围内的原油产量大体上每10年翻一番。1940年每天600万桶，到1950年每天4 800万桶，1960年每天2 200万桶，1970年每天4 800万桶。原油市场再不能象以前那样继续扩大了，到1973年，我们已达到每天产出5 600万桶的生产速度。这已经非常接近原油的生产能力，并且发现重大新油田的前景并非乐观。以传统的速度继续扩大生产，意味着世界石油储量将在90年代中期以前耗尽。

正如图1.4所示，欧佩克有能力影响1979年的原油价格的第二个戏剧性增加。这主要是由于伊朗的政治事件所决定。伊朗的石油产量从每天200万桶减少到只有60万桶。从一个主要供应国产生的这种急剧减产引起了几家主要石油公司在他们的销售合同中实行不可抗力条款*。这对看到原油来源处于危险之中的独立者

*不可抗力条款是指因不可抗力（如天灾、战争等）使正常条款无法履行时，所规定的履行的条款。 译注