

油田开发规划与 优化决策方法

■ The Method of Oilfield Development
program and Optimization

刘德华 编著



石油工业出版社

油田开发规划与优化决策方法

刘德华 编著

石油工业出版社

内 容 提 要

本书系统阐述油田开发最优方法、油田开发规划方式以及油田开发规划编制过程中应用的油藏工程方法,涉及数学、运筹学、灰色系统理论等方面。书中所阐述的最优方法、规划方式可指导生产实际,帮助油田编制科学的合理的开发规划。

本书可供从事油田开发研究、油田开发规划编制的管理人员、油田现场工程技术人员以及石油院校有关师生参考。

图书在版编目(CIP)数据

油田开发规划与优化决策方法/刘德华编著.
北京:石油工业出版社,2007.12
ISBN 978-7-5021-6330-3

I. 油…
II. 刘…
III. 油田开发
IV. TE34

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2007)第 172928 号

出版发行:石油工业出版社
(北京安定门外安华里 2 区 1 号 100011)
网 址:www.petropub.com.cn
发行部:(010)64523620
编辑部:(010)64523612

经 销:全国新华书店
印 刷:石油工业出版社印刷厂

2007 年 12 月第 1 版 2007 年 12 月第 1 次印刷
787×1092 毫米 开本:1/16 印张:11.5
字数:290 千字 印数:1—1600 册

定价:40.00 元
(如出现印装质量问题,我社发行部负责调换)
版权所有,翻印必究

前 言

油田开发规划的编制是油田公司发展战略的组成部分，是油田发展的中长期目标。如何很好地制定发展规划，使其既符合油田发展规律，又符合公司发展战略和市场规律，是制定规划必须考虑的问题，也是优选制定规划方法的前提。为了适应国际资本市场和产品市场的变化，正确把握企业发展的方向和目标，科学制定中长期发展计划将成为影响企业生存和发展的重要环节。

编制好油田开发规划是实现油田高产稳产、最优合理开发的关键，也是油田开发管理现代化、科学化的前提。油田开发规划的编制是一个对历史回顾、现实评价、将来预测及优化选择和综合评价的过程，涉及石油地质、油藏工程、采油工程、地面工程、技术经济、系统工程、运筹学理论、最优化决策理论、现代控制理论、模糊数学理论、灰色系统理论、概率统计理论、计算机技术等多方面和多学科，是一个庞大的系统工程。要编制油田开发规划方案就需要大量的各方面的专家通力协作。目前，我国各油田每五年都要编制油田开发规划方案。随着计算机的广泛应用、油田规划方面的技术不断成熟、规划编制经验的长期积累，人们编制规划的水平也在不断提高。本书通过作者多年对油田开发规划方法的系统研究，形成了适合我国油田编制开发规划的系统方法和优化决策方法，并形成配套软件“油气田开发规划决策支持系统”。

本书主要介绍油田开发编制过程中涉及的油藏工程方法、经济评价方法、优化决策方法及开发规划决策支持系统软件。具体内容包括：未开发油藏储量的评价与开发的可行性分析计算方法确定；已开发油藏储量评价与预测方法研究；油田开发效果评价指标体系研究及相应计算方法确定；油田开发规划指标的计算方法优选；油田开发最优化规划方案的确定方法；油田开发规划方案经济评价方法及综合评价与优选。最后在研究开发规划方法的基础上，在 Windows 环境下，编制成“油气田开发规划决策支持系统”软件。该软件具有理论先进、编程技术先进、商品化程度高、内容丰富、应用面广、用户界面友好、图表匹配、操作灵活方便等特点，能为油藏工程师提供更先进、更丰富的研究手段和研究工具。该软件在油田的推广应用，必将大大提高油田开发规划的水平，提高油田开发分析水平，提高工作效率，提高油田开发规划、油藏动态分析、开发指标计算的准确性和科学性，真正做到油田开发规划、开发分析的计算机化、程序化、自动化和科学化，同时也为决策人员提供了可靠的科学的依据。

书中大部分内容是作者多年研究成果的总结，许多内容是首次公开发表。难免存在不足，望读者批评指正。

刘德华

2007 年 6 月于长江大学

目 录

第一章 油田开发规划与决策方法概况	(1)
第一节 油田开发规划与优化决策研究概况.....	(2)
第二节 油田开发优化决策过程.....	(8)
参考文献	(10)
第二章 油藏储量评价与新区规划方法	(12)
第一节 储量评价	(12)
第二节 可开发地质储量预测	(19)
第三节 采收率预测	(20)
第四节 新区规划技术界限的确定	(39)
第五节 未开发油藏评价	(42)
第六节 新区开发指标概算	(44)
参考文献	(47)
第三章 油藏开发效果评价	(48)
第一节 开发阶段的划分	(48)
第二节 井网评价	(51)
第三节 注水开发效果评价	(55)
第四节 含水上升规律评价	(58)
第五节 水驱开发效果综合评价	(60)
第六节 其他开发指标评价	(70)
参考文献	(72)
第四章 开发规划指标预测方法	(73)
第一节 产量预测方法	(73)
第二节 含水上升规律研究	(88)
第三节 地层压力评价与预测	(91)
第四节 其他开发指标预测方法	(93)
参考文献	(94)
第五章 油田开发最优化规划方法	(95)
第一节 概论	(95)
第二节 产量构成分析	(96)
第三节 开发规划指标确定的一般方法	(97)
第四节 油田开发规划确定的最优化方法.....	(100)
第五节 油田投资结构最优化方法.....	(105)



参考文献	(116)
第六章 规划方案经济评价与技术经济界限	(118)
第一节 油田开发技术经济界限确定	(118)
第二节 规划方案经济评价方法与步骤	(124)
第三节 规划方案的风险分析	(135)
第四节 规划方案综合评价与优选	(137)
参考文献	(147)
第七章 油田开发规划决策支持系统总体设计	(148)
第一节 油田开发规划的主要内容与规划过程	(148)
第二节 油田开发规划决策支持系统总体设计	(150)
第三节 油田开发规划决策系统的主要内容及功能和特点	(151)
第四节 油田开发规划系统的主要关键技术及特点	(157)
第八章 油田开发规划决策支持系统的软件实现	(162)
第一节 软件设计与实现	(162)
第二节 软件应用说明	(168)
第三节 规划软件应用实例分析	(169)

第一章 油田开发规划与决策方法概况

随着石油资本和石油商品的国际化、市场化进程的不断加深,石油公司为了在激烈的竞争中立于不败之地,一刻也没有停止过对自身的发展进行系统化、规律化、理性化的思考和研究,从而获得长远生存和发展的能力。对于油气生产企业来说,最重要的莫过于对一定时期内的生产形势、效益状况、潜在资源、发展趋势的研究和了解,把握好未来的不确定性,进行生产结构的调整和成果的巩固,进而不断调整经济规模和市场地位。面对日益激烈的竞争,石油企业的中长期发展决策越来越趋于系统化、科学化。国际上大的石油公司在其涉及的领域均建立了科学的决策方法和程序,国内部分石油石化企业已经或正在建立主营业务范围内的规划决策系统,将最优化理论引入企业发展计划的制定中,力求资源配置和利用的合理性,以达到决策的科学性。

油田开发规划的研究对象是以油田公司的油气勘探开发等主营业务为主,主要目的在于建立油气开发规划与优化决策方法及相应的决策支持系统,为油田公司油气开发业务的发展决策提供科学的方法和依据。在规划的过程中,主要注重的研究内容应包括:建立和完善油气开发规划指标体系,对油田公司不同类型油气藏开发规划指标跟踪,客观地分析已开发油气藏的开发形势;建立适合不同类型油气藏特点的预测模型,科学地预测其开采趋势,并指出具有改善开发效果和提高经济效益潜力的研究对象,为老区产能建设提供决策依据;建立已探明未开发资源潜力评价模型,科学地筛选和研究潜力资源及与之相对应的开发技术政策界限和经营管理对策,并预测其开发效果,为未动用储量资源的有效利用提供决策依据;通过对油田公司分区带、油田和不同类型油气藏产能建设及到位率规律分析,并结合规划期内新增探明油气资源计划,为新增探明油气资源的有效转化提供决策依据。

通过应用优化决策方法,有助于将老区、未动用和新增资源潜力融为一体加以考虑,实现油气资源的优化配置,将资源优势转化为经济优势,为油田开发决策提供最优方案。

规划方案的编制是在对油田总体开发效果分析、潜力分析以及中长期发展战略的基础上进行的,指标预测具有战略指导性,更多地考虑资源的合理配置和油田发展中长期效益。因此,规划过程中的油藏综合分析、指标预测、经济分析和评价的具体方法有其特殊性,具有综合规划性质,不仅要求按常规评价方法评价规划方案的经济效益指标,而且要求对不同方案进行优化。编制好油田开发规划,是实现油田高产稳产、最优合理开发的关键,也是油田开发管理现代化、科学化的前提。油田开发规划的编制是一个对历史回顾、现实评价、将来预测及优化选择和综合评价的过程,涉及石油地质、油藏工程、采油工程、地面工程、技术经济、系统工程、运筹学理论、最优化决策理论、现代控制理论、模糊数学理论、灰色系统理论、概率统计理论、计算机技术等多方面和多学科,是一个庞大的系统工程,要编制油田开发规划方案就需要大量的各方面的专家通力协作。目前,我国各油田每五年都要编制油田开发规划方案。随着计算机的广泛应用、油田规划方面的技术不断成熟、规划编制经验的长



期积累,人们编制规划的水平也在不断提高,但存在许多不足,现在还没有一套功能齐全的编制油田开发方案的系统化方法和完善的软件。基本参数的计算、方案指标的确定等,各油田没有统一的方法。由于各油田的油藏特征不同,都需要寻求适合自己油田特点的系列规划方法。油田每五年编制油田开发规划方案,都要集中大量的人力、物力和财力,花费相当长的时间来编制规划方案。由于缺乏整体的协调、优化、评价,所编制规划的准确性、科学性、最优性等很难作出评价。为提高油田开发规划方案编制的水平,形成一套适合油田特点开发规划方案编制的系统方法和相应完善的软件系统,使得开发规划方案编制模型化、程序化、自动化和科学化,提高油田开发水平和现代化管理水平,提高决策的科学性、准确性。本书通过作者多年对油田开发规划方法的系统研究,形成了适合我国油田编制开发规划的系统方法和优化决策方法,并形成配套软件“油气田开发规划决策支持系统”。

第一节 油田开发规划与优化决策研究概况

世界各石油公司都在寻求新的方式来优化油藏开发过程并极大地提高油田采收率。他们的关注焦点在于最大限度地获得投资回报,与合作伙伴共担风险、共享机会,增加经济活动的范围。由于油田开发过程是一个庞大的系统工程,涉及的学科和工程方面的内容很多,基于油田的开发全过程而提出油藏整体优化开发技术就是要使石油公司能整体协调开发过程,充分应用新技术,合理经营油藏,以极大提高油田采收率,最大限度地获得投资回报。

整体优化就是关注油田开发全过程,应用新的技术,制定良好的开发规划。一个油田或一个油田公司,编制良好的开发规划,是公司取得良好发展的前提,是公司的重要发展战略。这样,规划编制内容的确定,编制方法的先进性等显得尤为重要。随着世界范围内对油田开发规划的重视,包括我国油田公司也是倍加重视,集团公司或各油田分公司都开展了油田开发规划方面的专题研究项目,有专门从事油田开发规划的编制人员。我国编制油田开发规划一般按国家五年计划为一个单位,编制油田五年规划,同时编制年度规划和中长期规划,一般5~15年。油田五年规划一般包括油田开发规划、采油工程规划、地面建设规划以及总的发展规划,本书主要是介绍油田开发规划。这方面也是油田开发的主体,是油田规划的主要组成部分,是其他规划的基础。如前所述,油田开发规划的编制既涉及面广、内容复杂,又是油田科学合理开发的关键,故在开发规划的编制过程中人们不断地探索新的规划方法,引进最优化决策理论、模糊数学理论、灰色系统理论、概率统计理论、计算机技术等多学科技术。

一、最优化技术在油田开发规划编制中的应用

科学、合理地开发油田,是油田开发中的中心问题之一^[1]。早在20世纪30年代,苏联M. B. 阿勃拉莫维奇在他的“合理开发油田的原则”的报告中,主张建立一种有根据的合理开发油藏的理论,并研究确定油田的合理井数。随后苏联、美国的其他石油工程师们也先后提出相同的观点,他们所考虑的思想是油田地质、渗流力学、油层物理化学等方面的单因素。20世纪50年代前后,有人提出了油田开发总体设计的思想。此时,苏联的克磊洛夫人



等人对油田开发全过程进行了深刻的分析,他们认为油田开发是由三大块组成:油田地质、渗流力学和工业经济。油田开发的功能指标为“三个最”,即最少的花费、最大的采收率和最大限度地满足国家要求,这便是最早的油田开发的系统观点和最优化的观点。

所谓系统工程^[2],就是从整体观念出发,通盘筹划,合理安排整体中的每一个局部,以求得整体的最优规划、最优管理和最优控制,使每个局部都服从一个整体目标,做到人尽其才,物尽其用,以便发挥整体优势,力求避免资源的损失和浪费。

我们知道油田开发的核心以及所追求的目标是如何以较少的工作量、较低的投资,获得较高的产量以及较长的稳产期和最好的经济效益,这都是一系列最优化问题。再者油田本身是一个庞大而复杂的系统,从不同的角度、不同的研究范围及不同的研究对象又可构成不同的子系统。如整个油田可作为一个系统,一个油藏、一个油层也可作为一个系统,还有注采系统、管网系统等。为了研究油田的许许多多的优化问题,石油工程师们引入了一系列优化方法(大系统理论、系统工程、最优控制理论、现代决策分析、模糊数学、灰色系统理论等),并应用整体的、全面的,即系统的观点来研究油田,以更好地合理开发油田,这样便构成了油田开发的系统工程方法。此方法在解决油田优化问题时,特别是解决整体优化问题时,既考虑油田地质、渗流特性、开发技术等实际的因素,又结合人们对油田的各种指标的要求,还考虑油田近期和远期目标等,真正做到全面优化。最优化方法在解决问题时是其他传统的方法和常规的方法所不能比拟的。它首先根据系统所要解决的问题,进行详细的系统分析,订出最优目标,确定目标函数,找出系统的各构成部分和各层次之间的相互关系,建立起定量化的模型或模拟过程;然后利用电子计算机,自动地调整整体和部分间的关系;最后得出满意的结果,使部分功能服从整体最优目标,从而对系统提出设计、建造、管理、运行、评价的最优化方案,以达到缩短周期、减少费用、提高效率、改进性能的目的。

石油工业是技术密集、投资大、风险大的行业,开采的对象也是一次性资源,所以对其很好地统筹规划,合理地利用人力、物力、财力资源,提高资金的投入效率具有相当重要的意义。

目前在油田开发中主要应用到的方法有:线性规划、非线性规划、动态规划、整数规划、网络优化等。要应用这类方法,就是针对油田的实际问题,根据自己所要求了解的对象,按下列步骤进行:

第一步,先确定目标函数 Z 。现在目标函数有成本最低、产量最大、效益最大、投资最省、采收率最大等几个方面。

第二步,就要根据油田的管理水平、地质条件、生产状况等实际情况,确定决策变量。决策变量可以是规划年限内产油量、产水量、各种措施(下电泵、下抽油机、压裂、酸化、新井等)时井的增产油量、钻新井数目、生产井转注数目、各种措施实施的井数等,这样可构成一个决策向量

$$\mathbf{X} = [X_1(t), X_2(t), \dots, X_n(t)]$$

第三步,确定约束条件。任何油田的开采都要受到一些客观因素的制约,不是无条件的最优开采。这样一般情况下考虑的约束条件有:原油生产能力约束;各项增产措施的基建、施工能力、设备供应等约束;含水约束(产水约束);全油田的能耗约束;规划的原则界限;技术界限等。

有了上述三步后,就可建立油田最优化问题的模型。

目标函数: $\text{Min (Max)} Z=f(x)$

约束条件: $g(x) \geq 0$

当 $f(x)$ 为单目标线性函数, $g(x)$ 为线性函数时便构成线性规划模型。在线性规划中,当决策变量 x 中规定取整数或部分取整数时,称为整数规划或混合整数规划模型。当 $f(x)$ 或 $g(x)$ 为非线性函数时则构成非线性规划模型。当 $f(x)$ 为多目标, $f(x)$ 、 $g(x)$ 均为线性函数时,即为多目标线性规划模型。

另外,动态规划是研究多阶段决策问题。油田开发本身是分阶段进行的,不同阶段所采用的开发方式、工艺措施、开采层位等都不尽相同,这就需要作出决策,每个阶段应采取什么样的开采方式、工艺措施、开采层位等,当到达一定时间后,哪些方面作相应的改变而进入另一个开发阶段。这样便可建立动态规划模型。若以年为时间段,每年的年产油量、产水量、注水井数、生产井数、各种工艺措施井数等作决策变量,这样也可建立动态规划模型。

最优化技术的主要应用如下几个方面:生产规划与管理;最优配产、配注;确定井位;多油层或多油气田组合最优开采;投资优化分配;最佳采油速度的确定。上述这些方面的应用,在国内外已取得了很多成果。在国内,最早从事这方面研究的是葛家理等人,他们用系统工程的方法研究了油田开发中的优化问题,成果是《成组气田开发最优化规划决策》^[3]、《复杂成组凝析油气田开发规划决策的递阶优化方法》^[4]等。与此同时,大庆石油管理局和中国优选与管理科学中心合作,用线性规划方法编制了“七五”规划。其主要思想是从宏观的角度、产量的要求、工作量的安排上进行优化,其成果报告为《大庆油田“七五”开发(调整)规划方案优选研究报告》^[5]、《大庆油田开发与地面工程规划(1986—1990)的统筹安排和方案优选的研究》^[6]。此后又有很多人开展这方面的工作,辽河油田与西南石油学院合作,用线性规划方法进行了“油田开发规划决策研究”,辽河油田与哈尔滨工业大学应用动态规划方法编制了“八五”规划。西南石油学院也有许多人继续开展研究。其中有李光耀、刘德华等人用线性规划和非线性规划研究了油田开发优化分配及投资结构优化等问题^[7]。长江大学刘德华等人自1988年开始研究油田开发最优化问题,应用线性规划和非线性规划和灰色系统理论、模糊数学理论等建立了“油田开发规划决策支持系统”^[8],先后建立了油田开发产量优化分配模型、油田投资结构优化模型、油田开发方案综合评价的灰色多目标局势决策模型等^[9~12]。

国外,有关运筹学的应用成果更加丰富早在20世纪50年代就开始这方面的研究。Aronofsky 和 Lee [1958] 对有限多个均质油藏的生产规划提出了一组线性规划模型公式以使生产效益最大^[13],他们使用的是 Van Everdingen Hurst [1949] 方法,描述油藏的压力动态。利用类似的模型, Aironofsky 和 Williams [1962]^[14] 研究了以下两个基本问题:在无辅助钻井和固定钻井的情况下,多层油藏系统生产的最优化规划;在固定生产计划下分批钻井。Charnes 和 Cooper [1961] 提出了单油藏注水模型^[15],他的目标是在固定生产计划下使生产井、注水井、集输管线等设备的成本最小。Attrra 等人 [1961] 研究了最大采油速度生产下的最优生产条件^[16],如对油井生产能力、气举和维持压力的要求、销售合同要求和对气体压缩机要求等。

Bohannon [1970] 使用 0-1 混合整数规划模拟研究了多油藏管线系统,即多个油藏进

入一个或多个集输系统^[17]。O' Dell 等人 [1973] 系统地提出了一个最优化模型来确定多个气田的优化开发和生产规划^[18]。模型的构成是以几个优化标准来确定最佳完井时间和生产计划。Devine 和 Lesson [1972]^[19]、Friar^[20]和 Devine [1974]^[21]、Babayer [1975]^[22]将数学规划技术应用到与近海石油开发有关问题中，他们的分析初步涉及了整个油田的生产与开发。Devine 和 Lesson 与 Fria 和 Devine 考虑了与生产平台个数、尺寸、位置以及井在平台上的分布有关的决策。Babayer 的模型集中在多层油气田每层需钻的井数和层之间井的变换上。这些研究假定生产速度剖面已知或表示为井的数量函数。他们还对诸如最终采收率、油藏压力这些变量的可选择作为战略的影响进行了归类。这些研究的结果通常是用指数曲线或下降的双曲线来描述生产速度与时间的关系曲线，Devine [1973] 和 Lilien [1973] 还研究了这些模型的推广问题。

Huppler [1974] 进一步研究了单状态变量动态线性规划模型^[23]。考察一均质气藏在给定理想气体销售方案和规定峰值销售能力后，研究了最优井数和压缩机马力匹配的投资策略。模型用的是 Van Everdingen Hurst 非稳态注水罐型油藏模型。Huppler 也将非线性规划应用到多油藏气田生产速度规划之中。

Kuller 和 Cummings [1974] 系统地提出了油藏生产和投资的经济模型^[24]，利用 Kuhn-Tucker 必要条件得出了离散最优控制问题的决策规划，模型对最大生产限制的油藏动态进行了归类，注意到了石油的可采储量取决于投资随生产时间变化的过程。

Wattenbarger 用一个有限差分油藏模拟器模拟生产井影响系数^[25]（井的影响系数反应了在初始时间内第 i 井的单井产量引起第 j 井在 t 时刻的压力降）。在这些数据形成了一系数矩阵，得到气藏计划生产线性规划生产速度的一组约束。目标是使计划生产和所期望的生产之间差距最小。利用影响函数，Rosnewald 和 Green 提出用混合整数规划模型研究最佳气藏的井场位置问题^[26]。Murray 和 Fdgar 也利用影响函数方法进一步研究了混合整数规划的算法来优选气藏中的井位及多井气藏的最优流动规律^[27]。

1983 年 Ali 等人总结概括了四种模型。这些模型是由科威特石油公司用来解决每天的操作和长期计划等问题的。该公司使用油藏开发模型，以 Rowan 和 Warren 的工作为基础，研究了投资政策和生产注入速度，也使用非线性规划技术寻找满足递减期间成本、能力、油藏和井动态已知条件下的最优生产目标解。

M. A. Saif 等人在《多层油藏长期开发计划的混合整数线性规划模型》^[28]文中的模型已用于指导科威特油田的生产。E. H. Douherty 等人在《用数学分解法选择最佳采气配气投资计划》^[29]文中建立了一个气田开发整体系统的优化模型，包括开发、管网、天然气净化、经济分析等，可用作产量、投资等方面的长期规划。James、W. Mcfarland 等人研究以运用罐模型和非线性规划来研究油藏开发规划与管理^[30]。Gary. W. Rosenwald 等人用混合整数规划研究了确定优化井位的问题^[31]。Richard. P 在《一个天然气配产数学规划模型》^[32]文中提出了天然气的配产方法（直接与用户联系），其规划考虑了几个目标函数、一组线性约束和一组非线性约束。

除了上述的一些应用研究成果外，还有 S. N. Zakirov 等人的《气田最优化开发和开采的数学模型》^[33]，D. N. Dietz 等人的《高产气井的开采动态与气藏组合的最佳采气政策》^[34]以及《应用油藏模拟来制定最优化开发规划：线性规划和动态的比较》^[35]、《油气田开发发

展的最优化方法》^[36]、《油气开采过程中的几个最优化问题》^[37]、《关于注水油田开发系统的最优化》^[38]、《用于编制采油计划的线性规划模型》等研究论文。这方面的工作相当多，篇幅所限，不能一一列举。

值得一提的是，前苏联在这方面的研究已相当成熟，他们很注重油田的最优化开采。很早便将一些最优化方法引入油田，用来指导油田开发，很多油田已建立了整体的优化模型。论文有《利用线性规划解决气田开发最优化问题》、《选择最优输气问题》、《在各联合公司分配基建投资的最优化模型》、《预测油田产量和井组产量》、《罗马什金油田开发系统最优化的经验》、《气田开发指标最优化》、《油田最优化开发方案的选择》、《编制长远规划的最佳开采水平的计算》、《气体开采企业最优化的多级经济数学模型》等。

在油田战略规划方面，涉及经营与投资方向，其成功与否关系到石油公司的生死存亡。国外对此开展了一些研究，主要有以下两个方面：

(1) ARCO 油气勘探开发公司 M. L. Kate 等人^[39]依据 J. W. Forrester 的系统动力学思想，针对影响因素众多、关系错综复杂、难以用传统的数学规划方法进行研究的长期战略规划问题和业务活动建立了一个计算机模型。首先假设各种决策，如勘探、钻井、开采设备投资的时机和社会经济环境，如油气价格等，然后运用模型对不同环境下的各种决策方案进行模拟预测。根据预测结果，决策者依据一组决策规划，如在一定费用下，当年净现值收获最大，或最大限度提高就业机会等选择最满意决策。这种优化过程不属于自动化过程，主要是由决策者以人机对话方式对所假定的决策方案进行优选。我国在地区综合经济发展战略等方案使用过系统动力学方法，在油田开发方面还没有见到成熟的工作。

(2) G. C. Bumess 等人 [1993] 运用一个线性规划模型进行多种勘探与开发项目的投资的分配^[40]。R. L. Nesvold 等人 [1996] 也用线性规划模型研究海上油田平台安装，钻进计划等开采策略问题^[41]。

目前一些常用的优化方法，如线性规划、动态规划、最优控制、模拟退火与遗传算法都已在油田开发决策中得到了不同程度的应用，可以说油田开发是在优化方法应用中的一个广阔领域。但应注意的是，与其他系统相比，油田开发系统更是一个复杂的系统。它具有以下四个特点：第一，它不仅是一项技术活动，也是一项经济活动，受到政治、军事等因素的影响，是一个典型的多目标决策问题。第二，油层深埋地下，人们对它的认识是间接的，再加上油层复杂的非均质性，因此人们对它的认识又是不完全的，具有较强的随机性和模糊性。第三，石油属于枯竭性资源，开采过程中投资较大，风险高，且具有动态特性，不能重复实验。第四，油田开发涉及开发地质、油藏工程、采油工程与地面工程等众多专业，这些专业相互影响、相互制约。以上四个特点，决定了油田开发决策为什么不是一个简单的过程。它必须根据油田开发所固有的特点开展研究从定性到定量、从专家经验到计算机模拟的综合集成方法。

二、最优控制论方法的应用

最优控制理论同运筹学一样是一门新兴学科。由于任何系统都存在控制问题，所以其应用也相当广泛。石油工业是一个庞大、复杂的大系统，其勘探、钻井、开发运输等各个环节也是相当大的子系统，为了使油田开发的各个环节很好地协调，且最优地方式发展，这就需要控制。最优控制理论首先就是将所研究的对象作为一个系统确定出相应的输入输出变量

(控制变量)、外生变量,再建立起整个系统数学模型,然后进行模拟、仿真。必要时应用自组织理论,使所建模型具有自组织,自适应的功能,从而使整系统按最优方式运行。

从控制论的观点来看,油田开发过程是在人的支配之下的发展过程。仅现在支配的手段已很多。设其控制变量为

$$U(t) = [U_1(t), U_2(t), \dots, U_n(t)]^T$$

其中, $U_i(t)$, $i=1, 2, \dots, n$, 是各种具体的控制措施和可控的因素,再定出状态方程:

$$Q(t) = A(t)Q(t-1) + B(t)U(t)$$

$$\text{目标函数: } J(U) = \int_a^b f[Q(t), U(t)] dt$$

用系统辨识方法定义相应的参数,即可对系统实施最优控制。如我们描述油田开发的动态过程,则可为: $U_1(t)$ 油井压裂和酸化井次(指在 t 时刻之前油田上总的压裂及酸化次数);油井堵水 $U_2(t)$;油井补孔 $U_3(t)$;加密油井 $U_4(t)$;换油嘴 $U_5(t)$;改抽或换大泵或电泵 $U_6(t)$;水井措施调整吸水剖面 $U_8(t)$ (包括水井压裂、酸化、补孔、堵水等),日注水量 $U_9(t)$;加密水井 $U_{10}(t)$ 等。通过这些控制变量的作用,可以增加油田产量,降低综合含水,提高油田水驱效率等。若再将油田动态指标联系在——输出变量状态变量, $Q(t) = [Q_o(t), Q_w(t), p(t)]^T$, 其中, $Q_o(t)$ 为产油量, $Q_w(t)$ 为产水量(d或a), $p(t)$ 为平均地层压力,于是可有油田动态的状态方程:

$$Q(t) = f(Q_i, U_i)$$

$$Q_i = [Q(t)^T; Q(t-1)^T; Q(t-2)^T]$$

$$U_i = [U(t)^T; U(t-1)^T; U(t-2)^T; U(t-3)^T]$$

此式为四步递阶的结构,有时用二步递阶即可。最后定出目标函数;

$$J(U) = \int_a^b f[Q(t), U(t)] dt$$

确定出相应的参数,即可对油田动态实施控制。

同样对于其他系统,也可用相应的方法,来建立数学模型。

最优控制理论在油田开发中主要有编制油田开发规划;方案设计;油田动态预测;一次采油转二次采油的最佳时期;最佳采油速度的确定;多油层油田和气田的最优开发及最佳钻井时机的选择;三次采油(提高原油采收率的最佳注入方案的确定);油藏识别等8个方面的应用。

这8个方面的应用,在国内外已取得很多成果,有许多已应用于指导、控制生产。约在1983年,大庆石油局与黑龙江省应用数学研究所合作开始从事这方面研究;赵永胜、韩志刚等人用控制论方法建立了油田产量预报和油田最优规划模型^[42];邓白立等人也研究了油田产油产水的动态预报^[43];齐与峰等人在这方面进行了较深入的研究,建立了一个油田开发的整体最优控制模型^[44],它综合考虑了地质因素、渗流力学、地面工程和管网建设等多种因素,通过最优控制,使油田达到最优开采效益,已应用于山东孤东油田、大庆油田。另

外,在井间流动系统的研究^[45],多断块油田地下连通状况识别与新井最佳设计^[46],油层研究^[47],双重介质油层研究^[48]等方面取得了不少的成果。郎兆新、李允等用最优控制论研究了双重孔隙介质油层识别问题^[49]。

国外的应用也已比较普遍。前苏联是应用最成功的国家之一,他们用控制论方法建立了从勘探到最后集输净化全过程的最优控制模型,用于编制规划和指导生产,并在运用时具有自组织、自适应的功能。这方面已形成了一系列方法,已出版专著,如《油田开发过程的自动化设计及调整系统》、《关于气田的最佳开采指标》、《多层油田和气田最佳钻井时机选择的数学模型》^[50]等。另外,Raphael Amit等人研究了在油藏开采中,从一次采油转向二次采油的最佳时机选择及最佳钻井时机的选择问题^[51]。W. Fred Ramirez等人用控制论方法研究了最佳注入方案问题^[52],包括注聚合物、碱水 CO₂、胶束等。Mehos. G. J 也用同样的方法研究了优化 CO₂ 混相驱提高采收率问题^[53]。在这方面西方已出版了《最优控制在提高采收率中的应用》^[54]一本书。G. Chavent 等人,在单相渗流场内,根据已知数据,通过压力的历史拟合把最优控制理论应用于确定油层流动系数的分布等^[55]。

三、发展趋势

目前,国内外油田开发系统工程正在向整体化、系统化的方向发展,将全油田建立一个大的整体的优化控制模型,包括勘探、开发、集输、经济分析及相应的辅助设施在内,可对整个系统进行模拟、控制和调整,使模型不但完善,具有自组织、自适应的功能。且包含的方法也系统化了,具有普遍性,适用不同的油气田,应用逐步深入,几乎涉及开发过程的各类问题,不断引入新的方法,如灰色系统理论、专家系统、决策支持系统、模式识别等。

第二节 油田开发优化决策过程

油田油气开发规划的编制涉及内容丰富,既涵盖油田开发的许多方面,又包括油田专业以外的计算机、数学等方面的技术。在编制过程中需要大量的人力物力的投入,同时编制合理优化的规划方案还需要结合油田具体情况,应用数学等方法开展资源的优化配置、方案的

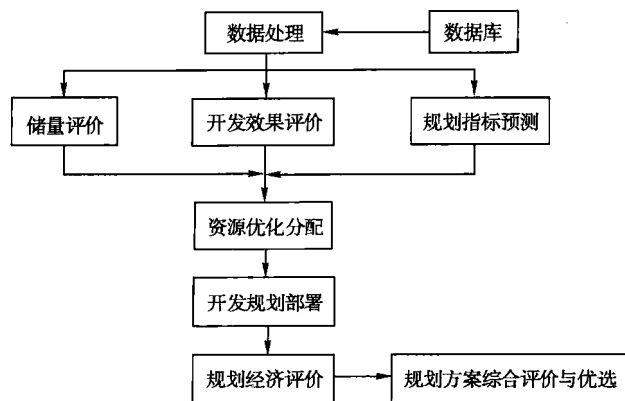


图 1-1 油气规划优化决策过程

综合评价与优选等工作。根据油田开发规划的特点,首先要对已探明未动用的储量进行评价,同时也需对老油田的开发开展详细历史及现状评价、未来的预测,措施效果的分析,最后确定产量等指标的规划。油田规划优化决策过程如图 1-1 所示。

依据油田开发规划编制思路 and 过程,详细地归纳了油田开发规划编制的流程,如图 1-2。依据图中流程可以系统地完成开发规划所需要完成的工作。

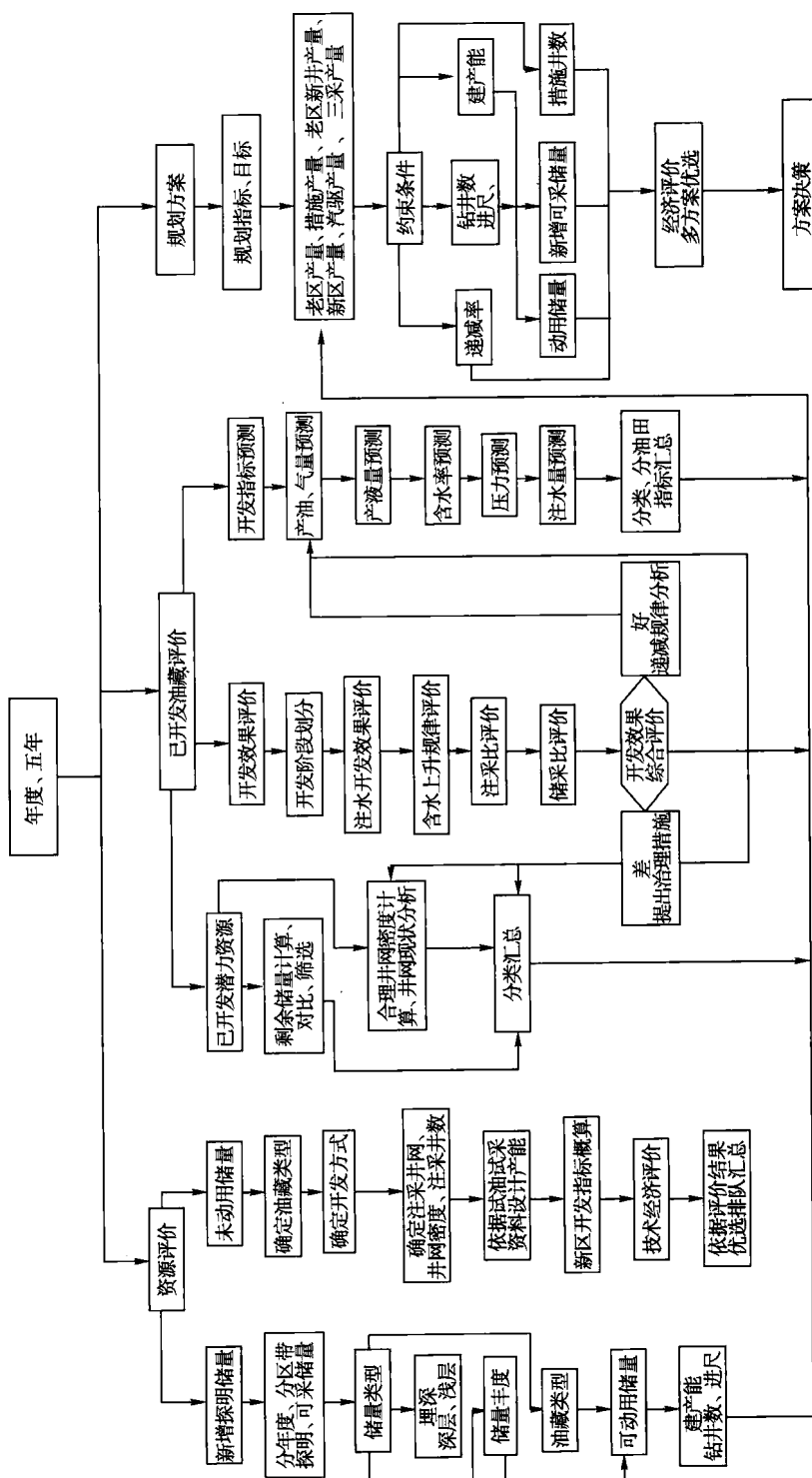


图 1-2 油田开发规划编制的流程

参 考 文 献

- [1] 陈钦雷等. 油田开发设计与分析基础. 北京: 石油工业出版社, 1982
- [2] 王众托等. 系统工程理论. 北京: 机械工业出版社, 1985
- [3] 葛家理, 赵立彦. 成组气田开发最优规划决策//第二届国际石油工程师会议论文. 1986, 3
- [4] 廖贻助, 葛家理. 复杂成组凝析油气田开发规划决策的递阶优方法. 西南石油学院学报, 1988, 11 (1)
- [5] 大庆油田等. 大庆油田“七五”开发(调整)规划方案优选研究报告. 1986, 10
- [6] 大庆油田等. 大庆油田开发与地面工程规程(1986-1990)的统筹安排和方案优选的研究. 1985, 10
- [7] 刘德华. 气田开发优化模型及其软件研究. 西南石油学院硕士学位论文, 1989, 7
- [8] 刘德华等. 油田开发规划决策支持系统的研制与应用, 石油学报, 1996 (1)
- [9] 刘德华. 油田投资结构优化模型的建立与分析. 石油学报(增刊), 1995
- [10] 刘德华等. 气田开发规划产量优化分配模型研究. 西南石油学院学报, 1990 (2)
- [11] 刘德华. 气田开发经济评价与方案优选模型研究. 天然气工业, 1990 (5)
- [12] 刘德华. 优选油气田开发方案的灰色评价模型. 江汉石油学院学报, 1989, 11 (4)
- [13] Aronofsky J S, A S Lee. A Linear Programming Model for Scheduling Crude Oil Production. J. Petroleum Technol. (July) 1958, 51~54
- [14] Aronofsky J S, Williams A C. A Linear Programming and Mathematical Mode in Underground Oil Production. Mgmt. Sci. 8, 1962, 394~407
- [15] Charnes A, Cooper W W Management Mode and Industrial Applications of linear programming Vol. II, 583~651, John Wiley & Sons, New York 1961
- [16] Attra H D, Wise H B, Black W M. Application of Optimal Techniques for Studying Field Producing Operation, J. Petroleum Technol. (January) 1961, 82~86
- [17] Bohannon J M. A Linear Programming Model for Optimum Development of Multi-Reservoir Pipeline System. J. Petroleum Technol. (November) 1970, 1429~1436
- [18] O' Dell P M, Stebing N W, Gray J W. Optimization of Gas Field Operation. J. Petroleum Technol. (April) 1973, 419~425
- [19] Devine, M. D. A Mode of Minimizing the Cost of Drilling Dual Completion Oil Well Mgmt. Sci. 20, 1973, 532~535
- [20] Friar L, Devine M D. Economic Optimization of offshore Petroleum Development Mgmt. Sci. 21 1974 1370~1379
- [21] Devine, M. D, Lesso W G. Models for Minimum Cost Development of Offshore Oil Field, Mgmt. 18 1972, 378~387
- [22] Babayer D A. Mathematical Model is for Optimal Timing of Drilling Multilayer Oil and Gas Field, Mymt. sci, 1975, 21: 1361~1369
- [23] Huppler J D. Scheduling Gas Field Petroleum for Maximum Profit, Soc Petroleum Engr. J. (June) 1974, 274~279
- [24] Kuller R, G, R. G. Cummings. An Economic Model of Investment and Production for Production Reservoirs, Am Econ. Rev. 64, 1974, 66~79
- [25] Waltenbarger, R. A. Maximizing Seasonal Withdrawals from Gas Storage Reservoirs, J. Petroleum Technol. (August) 1970, 994~998
- [26] Rosenwald, G. W. and D. W. Green. A Method for Determining the Optimal Location of Wells in a Reservoir Using Mixed Integer Programming Soc. Petroleum Edgr. J. (February) 1974, 44~54
- [27] Murray. J. E. and T. E. Fdgar. Optimal Scheduling of Production and Compression in Gas Fields, J. Petroleum Technol. (January) 1979, 109~116
- [28] M. A. Saif, R. kumar etc. Mixed Integer linear Programming Model for Multi-reservoir Strategic Planning

SPE 15759

- [29] E. H. Doherty et al. Use of Math. Decomposition to Optimize Investments in Gas Production and Distribution, J. P. T Jan. 1986
- [30] James W. Mcfar land etc 运用罐型和非线性规划研究油藏的开发规划与管理//油气田开发系统工程专集. 胡玉洁, 译. 北京: 石油工业出版社, 1990
- [31] Rosenwald G W, et al. 混合整数规划在确定油藏优化井位中的应用//油气田开发系统工程专集. 李力, 译. 北京: 石油工业出版社, 1990
- [32] Richard P, O' Nells et al. 一个天然气配产数学规划模型//油气田开发系统工程专集. 李力, 译. 北京: 石油工业出版社, 1990
- [33] Zakirov S N, Kolbikov S V, et al. 气田最优开发与开采的数学模型. 阎秦麟, 译. SPE 11181
- [34] Dietz D N, Scholten P, et al. Production Behavior of Prolific Gas Wells and Optimal Production Policy for a Gas-reservoir Complex J. P. T 1989
- [35] 应用油藏模拟软件制订最优开发计划: 线性规划和动态规划方法的比较. 郎兆新, 译. SPE 12159, 1989
- [36] Aronofsky J S. Optimization Methods in Oil and Gas Development 1983, Oct. SPE 12295
- [37] 凡哲元. 油田开发规划优化决策支持系统研究. 油气地质与采收率, 2003, 10 (6): 34~36
- [38] 徐小力等. 油田注水系统结构及优化分析. 油气田地面工程, 2001, 20 (6): 19~20
- [39] katz M L, et al. 石油勘探开发战略筹划计算机模拟法//油气田开发系统工程方法专辑. 齐与峰, 译. 北京: 石油工业出版社, 1990
- [40] Burness G C, et al. An Optimization Model for A location Exploration and Production Operation SPE25923, 1993
- [41] Nesvold R L, et al. Field Development Optimization using Linear Programming Couple with Reservoir Simulation—Ekofisk Field. SPE; 36874, 1996
- [42] 赵永胜等. 大庆油田开发规划经济数学规模的研究. 石油学报, 1983, 4 (3)
- [43] 邓白立, 郭一新. 油田产油量、产水量动态预报. 自动化学报, 1983, 9 (2)
- [44] 齐与峰, 李力. 油田开发总体设计最优控制法. 石油学院, 1987, 8 (1)
- [45] 齐与峰. 井间流动系数确定方法. 石油学报, 1983, 14 (2)
- [46] 齐与峰, 叶继根. 多断块油田地下连通状况识别和新井位最佳设计. 石油学报, 1990, 11 (1)
- [47] 齐与峰, 章欣. 油层研究的控制论方法. 石油学报, 1984, 5 (4)
- [48] 齐与峰, 章欣. 双重介质油层研究的控制论方法. 1986, SPE 14864
- [49] 郎兆新, 李允. 双重孔隙介质油层识别最优控制法. 石油大学学报, 1986
- [50] Djangir, Babaye A. 多层油田和气田最佳钻井时机选择的数学模型//油气田开发系统工程方法专辑. 朱国金, 译. 北京: 石油工业出版社, 1990
- [51] Raphael A. 油藏开采: 从一次采油转向二次采油//油气田开发系统工程方法专辑. 秦关, 译. 北京: 石油工业出版社, 1990
- [52] Ramirez W F, et al. 提高原油采收率的最佳注入方案//油气田开发系统工程方法专辑. 刘威, 译. 北京: 石油工业出版社, 1990
- [53] Mehos G J Use of Optimal Control Theory to Optimize Carbon Dioxide Mixcible-flooding Enhanced Oil Recovery. J. Petrol. Science & Engr. 1939, 2 (4), 247~260
- [54] Ramirez W F. 最优控制在提高采收率中的应用. 哈尔滨: 黑龙江科技出版社, 1990
- [55] Chavent C, et al. 最优控制理论在生产历史拟合中的应用//油气田开发系统工程方法专辑. 齐与峰, 等译. 北京: 石油工业出版社, 1990