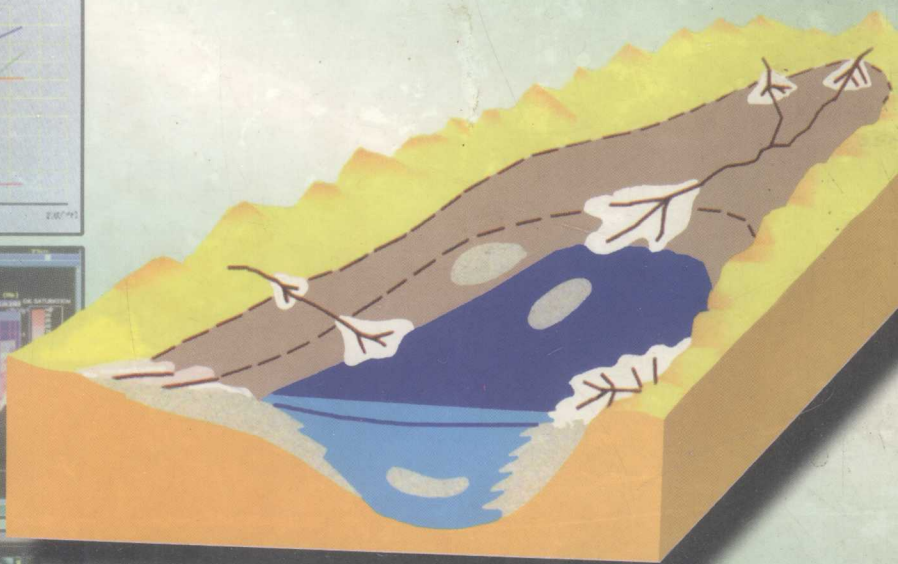
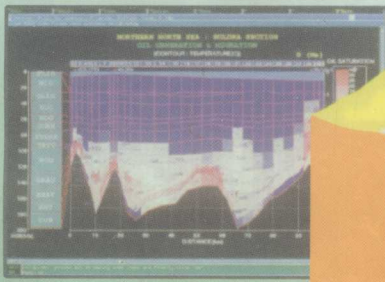
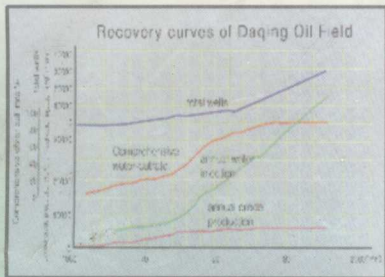
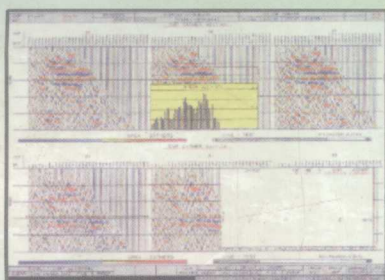


赵永胜 李凤林 黄伏生 等编著

油藏动态系统 辨识及预测 论文集



京)
3

石油工业出版社

登录号	147184
分类号	TE33-53
种次号	001

油藏动态系统辨识及预测论文集

赵永胜 李凤林 黄伏生 等编著



石油大学 0150334

石油工业出版社

内 容 提 要

本书主要收集了编著者近 20 年来应用系统科学方法研究油藏动态系统特征及其状态预测模型问题的部分论文,既有基础理论研究,也有预测模型研究,更多的是应用研究。

本书可供从事油气田开发工作的工程师、科研人员以及石油大专院校有关专业的教师、研究生及高年级学生阅读,也可供其它领域从事系统辨识、预测及最优化研究的人员参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

油藏动态系统辨识及预测论文集/赵永胜等编著
北京:石油工业出版社,1999.11
ISBN7-5021-2840-9

I. 油…

II. 赵…

III. 油气藏-动态系统-系统辨识-研究-文集

IV. TE33-53

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (1999) 第 53992 号

石油工业出版社出版
(100011 北京安定门外安华里二区一号楼)
河北霸州市长虹图文制作有限公司排版
黑龙江省大庆市勘探开发研究院科技彩印厂印刷
新华书店北京发行所发行

*

787×1092 毫米 16 开本 17.75 印张 454 千字 印 1—1 000
1999 年 11 月北京第 1 版 1999 年 11 月黑龙江第 1 次印刷

ISBN 7-5021-2840-9/TE·2220

定价: 30.00 元

系统科学方法与油藏动态系统预测

(代前言)

“经典科学”或“牛顿体系”所描绘的是这样的世界：其中每个事件都是由初始条件决定的，并且这些初始条件至少在原则上是可以精确给出的。在这样的世界中偶然性不起任何作用，所有的细部聚到一起，就像在机器中的一些齿轮那样。正是这种机械论的世界观把拉普拉斯引向了他那著名的主张：只要给出充分的事实，我们不仅能够预言未来，甚至可以追溯过去。

经典科学认为“所有一切都服从于外部观察者能够发现的普适定律”，强调稳定、有序、均匀和平衡，关心的是封闭系统和线性关系。事实上，封闭系统至多只能组成物质宇宙的很小部分，绝大多数现象是开放的系统。它们与周围环境不断地交换着能量和物质，使现实世界表现出无序、不稳定、多样性、不平衡、非线性以及暂时性对时间流的高度敏感性。对于这样的系统，试图用伴随机械论成长起来的、以拆零技术为核心的传统分析方法去认识它们是很难达到预期效果的。

“20世纪人类的文明是发明了发明的方法”——这就是系统科学方法，其核心是系统方法以及实用系统方法，如功能模拟、最优化、灰色系统和系统动力学方法等。系统论创始人贝塔朗菲指出，一般系统论是整体和完整性的科学探索，因此，整体性原则是揭示系统本质的最高原则。这就要求随时随地都不能忘记把研究对象作为一个由诸多要素或子系统组成的系统来观察，把握其整体构成和整体运动规律，要求把对象放到它所属的系统中去观察。系统的整体规律只存在于组成它的诸要素的相互联系和相互作用中，系统各要素间的联系不是线性的因果链，而是互为因果的网络。整体联系存在于非线性作用之中，因此，从一定意义上说，系统方法就是有机整体性方法。

系统方法所遵循的第二个原则是系统有序原则，系统有序是系统的本质属性之一。所谓序，是指一定系统保持自己整体特性和功能的内部结构方式和运动秩序，它体现了整体与部分的对立统一。由于系统的结构与功能并非是一一对应的关系，他们有可能是同构同功的，也有可能是异构同功的。因此，系统的历时性主张系统是不断演化的，系统存在于过程之中，要认识一个系统，不仅要看它的现在，也要看它的过去。在此基础上的系统辨识或模型化是实现系统的最优化、系统的目的性的手段和必经途径。

系统科学方法的诞生彻底地改变了世界的科学前景和当代科学家的思维方式，从自然科学到社会科学处处可以体验到系统科学方法的影响力。100多年的油田开发实践使人们深刻认识到了油藏系统的复杂性，认识到油藏动态系统是一个与外界环境有物质和能量交换的开放系统，是一个具有随机性、时变性、有序性、非线性、非平衡的随机过程集合体。基于预测是优化的基础，要实现油藏的最佳控制，试图通过分解拆零技术所建立的预测模型是很难尽如人意的。显然，油田动态预测研究要获得更大的发展，就必须应用系统科学的方法，舍此别无它途。值得重视的是，油藏系统工程研究的前驱者翁文波、齐与峰、葛家理等几位学

者在油藏工程研究领域应用系统科学已做了开拓与卓有成效的创造性工作，为油藏系统工程的研究与发展奠定了坚实的基础。

《油藏动态系统辨识及预测论文集》一书仅仅限于油藏动态系统特征及其预测方法的研究，主要收集的是大庆油田一些研究人员在这方面所发表的论文。这些文章既有基础理论研究，也有预测方法研究，更多的是应用研究，共同点是应用系统科学方法来分析研究油藏动态系统特征及其状态变化问题。希望通过本书的出版能使油藏工程人员在短时间内了解以往研究的状况，也希望能使油藏工程研究人员对油藏动态体系特征及其匹配的预测方法问题有比较明确的认识，从而提高油藏系统辨识及预测的研究水平。

经典油田开发理论的基本点是构造和选择各种提高开发指标精度的计算方法，但由于始终局限于传统的分析方法，因此多年来进展速度比较缓慢。人类的文明史揭示了这样一个道理：当人类对自然界谋求更大的控制权的时候，就会产生科学。尽管油田开发系统科学研究的任务极其艰巨，但有识之士已看出这种追求的目标是无可指责的。

限于水平，偏颇之处恐怕不少，诚恳地等待行家们的指正与批评。

李凤林

1999年8月

序

《油藏动态系统辨识及预测论文集》是大庆油田科研人员在油藏工程领域几十年辛勤耕耘结果的集合，综观全书，你会感到作者是从另一个角度来研究油藏工程问题，对油藏工程研究对象的特征及其辨识、预测方法提出了比较清晰完整的叙述，仔细阅读每篇文章，你会被一种新思维所吸引，有一种走出了油藏工程这座百余年来令人头痛的迷宫之感。可以说，该书是应用系统科学方法研究油藏工程思维框架的一个较好介绍，将使我们对油藏工程问题有更深入的理解，对油藏动态系统所给出的与以往不同的观点和认识是值得认真考虑的，这些观点可归纳为如下几点：

1. 油藏工程研究的目的是实现对油藏动态系统的最优控制，而预测是实现最优控制的基础。

2. 油藏动态系统中存在着两类不同性质的参数预测问题：一类是描述储集层空间特征的分布参数预测；另一类是描述油藏动态变化的集中参数预测。

3. 油藏工程研究的对象——油藏动态系统是一个复杂的系统，复杂的根本原因在于系统的信息不完全及不可逆性。而从系统、信息与控制的角度来观察、分析、研究油藏系统，认为预测动态系统是一个具有整体性、随机性、有序性、时变性、非平稳的随机过程集合体，对于这样的系统，应用经典牛顿方程建立的确定性预测模型是很难奏效的，必须采用以概率为基础的随机过程理论建立其预测数学模型。

4. 首先论述了油藏动态系统是一种耗散结构体系，继而从理论上解释了百余年来人们不曾给予回答的递减曲线应用的有效性，即时间作为状态变化自变量的原因。

5. 对油藏数值模拟的分析与评价是深刻的，也是客观的，试图通过油藏数值模拟得到油藏动态比较准确的预测是不现实的。

6. 提倡“整体论”代替“还原论”，用“目的论”代替“因果论”，依据输入输出信息，采用以随机过程理论为基础的功能模拟模型预测动态的变化，储层空间分布的能观性极差。百余年来人们对储层研究的共识“极其复杂”，值得注意的是，“复杂性有时意味着不可能性”。而目前流行的，储层随机建模技术只能指出真实地地质情况可能是什么，而不敢说真实的情况一定是什么，说到底随机建模技术仅仅是一种数据网格化技术。由于生成的网格化模型对观测数据点以外储层性质的推断是不确定的，因此，用随机模型解决诸如井间砂体预测这类问题，即给出储层真实的空间分布描述是很困难的。储层参数分布的不确定性属于模糊型不确定性，而对于这种模糊型不确定性系统采用概率型不确定性方法建立其预测模型也是不匹配的，因此，应该采用模糊数学方法、逻辑推理与经验判断方法。

储层中油水运动的规律不但受控于宏观的地质因素，而且也受微观孔隙结构等因素的影响。然而目前人们还不可能将复杂的孔隙结构等因素考虑进去，问题的复杂性在短时间内是不可能给予明确回答的。因此，油藏工程问题的研究不能局限于某一种固定的思维模式与方法，应从多学科、不同角度寻找解决问题的办法，使油藏工程研究向前迈前一步。

应用系统科学方法研究油藏工程问题，该书所作的研究是具有开拓性的，也是卓有成效的。我相信《油藏动态系统辨识及预测论文集》一定能引起油藏工程人员的注意与兴趣。

曾宪义

1999年9月

目 录

油田动态系统的能观性与能控性	赵永胜	李凤林	(1)
油田动态体系的特点及自适应预测实践	赵永胜		(4)
复杂油藏系统中的两类预测问题	赵永胜		(9)
耗散结构理论与油田动态自适应预测	赵永胜		(13)
水驱砂岩油田产量的自适应预报	赵永胜	李凤林	(19)
多变量多步自校正递推预报器及其应用	邓自立	郭一新	
	赵永胜等		(27)
大庆油田开发规划经济数学模型的研究	赵永胜	梁惠文	
	韩志刚等		(34)
油田动态数据的成熟度及其处理方法	赵永胜	王有民	(46)
递推算法在油田动态参数估计中的有效性	赵永胜	黄伏生	(50)
随机梯度算法参数辨识的强一致	李瑞胜	赵永胜	(55)
对油藏数值模拟模型预测功能的一点考虑	赵永胜		(62)
油藏数值模拟预测功能的一个注记	赵永胜	赵贵仁	(67)
油藏工程研究新途径的探讨	赵永胜		(70)
油田动态功能模拟的原理与途径	赵永胜	李淑君	(75)
油田动态功能模拟多解性的一个注记	李凤林	赵永胜	(79)
油层纵向扫及效率增长的一种可能解释	赵永胜		(82)
剩余油分布研究中的几个问题	赵永胜		(87)
储层流体流动单元的矿场试验研究	赵永胜	董富林	
	邵进忠等		(91)
储层三维地质模型难使数值模拟摆脱困境	赵永胜		(97)
对《水驱孔隙性砂岩油田产量递减预测方法》一文的讨论	赵永胜	夏桂江	(101)
油田动态预测方法评价	赵永胜	李凤林	
	赵贵涛		(104)
应用蒙特卡洛法确定油田产能	黄伏生	赵永胜	(110)
水驱砂岩油藏压力预测必要性讨论	赵永胜	黄伏生	(113)
油田动态预测的一种新模型	黄伏生	赵永胜	
	刘青年		(116)
油田动态功能模拟预测模型及其软件包	赵永胜	黄伏生	
	刘青年		(124)
一种含水预测模型的补充说明	黄伏生	赵永胜	(154)
递减曲线的多功能预测模型	赵永胜	黄秀祯	(159)
递减曲线研究应用中的一个问题	黄伏生	赵永胜	(164)

校正水驱曲线方法的改进及实例	赵永胜 张四平 黄伏生等	(169)
累积概率分布曲线的一个应用	赵永胜 高泽礼 陆惠民	(173)
用于累积量预测的加性噪声指数模型	张四平 赵永胜 黄伏生等	(176)
水驱砂岩油田可采储量的一种预测模型	赵永胜 张四平 刘文钰	(182)
Weng 旋回及其在油田开发决策中的应用	赵永胜 李秀兰	(186)
应用 Poisson 旋回模型预测油田最大注水量	李秀兰 赵秀霞	(193)
喇、萨、杏油田萨、葡厚油层产水率综合解释模型研究	赵永胜 黄伏生 陈泉等	(196)
控制因子优选方法在油田产量预报中的应用	杜长泰 郭一新 赵永胜	(203)
油田动态系统的延迟性与套管损坏的灾变性分析	赵永胜 董富林 刘淑敏	(210)
油田套管损坏的必然性及其自适应预测	赵永胜 刘青年 黄伏生	(214)
灾变预测方法的一个应用	刘青年 赵永胜 黄伏生	(220)
BLUE 方法在砂体预测研究中的应用	姜德全 赵永胜	(226)
剩余油分布研究的系统分析方法	赵永胜 赵学珍	(235)
油田开发指标预测研究	赵永胜 黄伏生 张四平	(241)

油田动态系统的能观性与能控性

赵永胜

李凤林

(大庆石油管理局勘探开发研究院) (大庆石油管理局第二采油厂)

摘 要

系统的能观性与能控性是系统辨识、预测和优化控制的基础。本文对油藏动态系统的能观性与能控性问题进行了较深入的探讨,进而认为从过程控制的角度研究油藏工程问题是值得考虑的有效途径之一。

一、一个必须重新认识和明确的问题

大家知道,人们的实践活动从根本上来说都可以表示为主体与客体之间的反馈耦合,而所有的客体又都可以用一种可观测变量和可控制变量构成的系统来描述。显然,系统所具有的能观性与能控性特征从本质上决定了人们应该采用的研究途径与方法。

油藏工程研究的历史与现状表明,对于油藏动态系统的能观性与能控性认识不但仍需加深和完善,甚至需要观念上的更新。应该说本文是水驱油藏动态系统特征的一个补充研究,目的是通过水驱油藏动态系统能观性与能控性分析,进一步指出从过程控制角度研究油藏工程问题是值得重视、研究的有效途径之一。

二、系统的能观性与能控性概述

为了便于系统能观性与能控性问题的讨论,先列举几个实际的问题。比如,能否通过某种手段来控制商品价格和人口增长;能否通过某种措施来控制油田的含水上升速度或实现稳产等等,这就需要人们研究系统的能控性。还有一类问题,如能否通过一定的体检方法来监测癌症的发生和发展过程;能否通过一定密度的监测网和某种物理途径来监测灾害性气象过程和地质过程(如地震、滑坡等)的孕育和发展变化;能否通过一种或几种地球物理方法来监测油田地下剩余油的分布规律等等,这就需要研究系统的能观性问题。

从辨识与控制的角度看,能控性(Controllability)和能观性(Observability)不但是系统的重要特征,而且是系统辨识、预测和最优控制的基础,也就是说系统的能观与能控程度决定了人们对其认识和驾驭的能力。如果系统是完全能控与能观的,那么问题的求解自然也就简单容易得多。

实践表明,能控性的概念包含着输入能对系统施加多大影响的问题,能观性的概念意味着从输出能获得多少系统信息的问题。前者涉及输入对系统状态的作用,后者涉及到状态对

输出的作用。所谓系统的能控性是指：若输入信号能对系统的每一状态变量施加独立的影响，使之能从任意初始状态出发，经有限时间后到达预先期望的任意值，那么该系统是能控的。系统的能观性是指：输出信号受每个状态变量的独立影响，使之能从观测一段时间的输出值来惟一地确立状态变量在某一瞬时的值。通常，观测变量（输出）的维数一般都低于状态变量的维数，这是产生能观性问题的基础。

对于复杂的系统来说，能控性与能观性往往不是直观就能得出来的，因此系统的能控性与能观性研究有着十分重要的实际意义。

三、油藏动态系统的能控性与能观性

由于系统的可控变量与可观变量反映了人们实践活动的深度和广度，因此在某种意义上说，系统的能控性与能观性完全取决于人们可驾驭能控与能观变量的程度。人们掌握的可观变量越多，表示人们改造世界的的能力越大，显然，人类认识客观真理首先与掌握这两类变量的程度有关。许多事实证明，如果一个系统的可控与可观变量被限制在某一水平之内，那么无论怎样进行实践与认识的反复循环，都很难使认识进一步逼近真理^[1]。现代控制理论认为，如果一个系统的行为在时间上是连续的，利用专业范围内的一系列既定规律（如物质守恒、能量守恒、动量守恒等）能建立起具显示表达式的确定性数学模型，并能利用比较丰富的数学手段求得模型的解析解，这类系统称之为硬系统。与之相反，如果一个系统的行为在时间上是离散的或可作为离散系统处理，往往由于为它们发展所需要的专业理论和数学理论不够用，不能用严格的数学形式表达或不容易获得精确的解析解，这类系统称之为软系统。软系统的最大特点是涉及着过多的不确定性因素，据以建模的观测数据又往往受到严重的噪声污染，即使能够近似地得到某种显式模型，模型参数本身又带有不同程度的随机性，特别是软系统都具有时间滞后结构（即系统输入的效果往往不是一下子就能清楚——系统响应滞后），在解答中直接反映决策与后继事件之间的动态影响常常是很困难的事。除些之外，需要指出的是，几乎所有的软系统都很难提供为建模所需的一切必要数据。相对于硬系统来说，它的观测数据不但少得多并且是不能重复的，这是因为对软系统实行实地实验往往是不可能的或不允许的。事实上，油田动态系统就是时间上可作离散系统处理的软系统，因此深入研究该系统的能观性与能控性问题对于寻求系统的最佳估计与最优控制是极其重要的。

应该承认，以往的油藏工程研究忽视了对于系统的能控性与能观性问题的研究，至少可以说缺乏足够的认识，因而在建立油田动态指标的预测模型时，往往先入为主地假定了系统的能观与能控。

实践表明，对于油藏动态系统所具有的能控性问题是无须说明的。比如水驱油藏追求注采平衡并基本实现了注采平衡，说明了系统的能控性；采取一定的工艺措施、增产措施控制了含水上升速度，实现了高含水期的稳产目标，也说明了系统的能控性。因此，就油藏动态系统的能控性来说，古典与现代油藏开发理论在认识上是一致的，即无论是出于自觉还是不自觉，都是从系统的输入与输出关系中得出了相同的结论。但对于油藏动态系统的能观性认识却存在着相当大的、甚至是本质上的差别。由于以往的油藏工程研究方法不是从系统的整体性角度分析研究问题，而是采用了分析相加程序，把整个系统分成若干个子系统，分别研究每个子系统的特征，然后再合并为整体，这种拆零方法实质上是将系统的能观性问题复杂

化了，认识上也必然是模糊不清的。近百年的研究结果仍然是“注水开发后的油藏动态千变万化，极其复杂”这样一个结论。为了研究、分析、预测和控制产能的变化，基于达西经验公式与物质平衡关系式，建立了数十个因果关系方程。实践表明，当用这些关系式说明过去与现在的产能变化时，往往由于某些自变量与因变量或者在时间上、或者在空间上缺乏对应性而不得不以资料不全而停止；当用其说明未来时，某些关系式本身又难以给出自变量在未来时空中的准确值，甚至根本就无法给出，于是惟一的办法只有借助人的主观经验。可见，通过这类关系式试图“准确预测某一瞬时的值”显然是不可能的，也就是说，从上述分析问题角度出发得出的结论必然应该是油藏动态系统的能观性很差。此外，明知鉴于目前的技术水平很难搞清楚油层在三维空间中的确切分布形态与性质变化，但却一直想把剩余油分布问题的研究理想化，这都说明了在对油藏动态系统能观性问题的认识上存在着较大的模糊性。

对于油藏动态系统的研究，不能简单地采用分解的方法，用各组成部分去说明整体。因为注水后的油藏具有同一水动力场，作为一个整体，它的功能和属性是由各部分、各要素间的相互作用产生的。这一整体的功能和属性只有在它作为整体存在时才存在，而把它分解为各部分之后，整体的功能和属性也就不复存在了。因此，研究油藏动态这样复杂的系统，鉴于目前的认识手段，将着眼点落实到系统的行为（指系统输入的变化所引起系统输出的变化）和功能（指系统把输入变成输出的本领）上是十分重要的。

就油田开发最优化问题的性质而言，这是一个典型的动态最优问题，这类最优控制模型通常由状态方程、目标函数和约束条件三部分组成。对此，现代控制理论认为，构造油田开发动态规划控制模型要求油田动态系统必须具有能控性和能观性。依据系统的输入和输出来研究油藏动态系统的能观性，结论必然是系统具有较好的能观性。事实上，研究系统的能观与能控，关键在于研究描述系统状态变量的能观与能控。众所周知，油田动态系统是一个人工自然体系，用于描述这个系统状态变化的量很多，如产油量 Q_o ，产水量 Q_w ，产液量 Q_l ，含水率 F_w ，采油指数 I_o ，采液指数 I_w ，剩余可采储量 V_o ，含油饱和度 S_o ，含水饱和度 S_w ，采油速度 v_o ，采液速度 v_l ，油层压力 p_t ，流动压力 p_f ，产油递减率 D_o ，产水递增率 D_w ，注采比 R 等等，但这些变量并不是都可以用来构造最优控制模型的重要组成部分——状态方程，实质上就是人们关心并致力研究的状态预测模型，也就是说这些变量并不是都具有能控性与能观性。严格来讲，油藏动态系统的输出变量只有产液量 $Q_l(t)$ 和油层压力 $p(t)$ ，显然在目前的计量与测试技术条件下，人们很容易惟一地确定其状态变量在某一瞬时的值，也就是说产液量 $Q_l(t)$ 和油层压力 $p(t)$ 具有能控性与能观性。除此，采取其它状态变量（不包括产油量和产水量）所建立的状态方程不可能是最小维实现，都会给预测与控制带来困难。

✓
Model

至此，不难得出如下结论：由于从整体性原则出发可认为油藏动态系统具有能控性与能观性，所以油藏动态系统的输入和输出必然存在于柏格森时间之中，并且在任何瞬时都只能有一个可以分辨出来的确定标志，称之为输入可辨状态和输出可辨状态。这种输入和输出的可辨状态又处于不断的运动之中，于是这种随时间推移的状态变化组成了各自不可逆的时间序列。该序列在整体上，历史地反映了系统状态变化的规律性，因此从过程控制的角度来研究油藏动态系统的预测与控制问题，相信会收到预期的效果。

参 考 文 献

[1] 张仲俊. 张仲俊教授论文集. 上海: 上海交通大学出版社, 1987

油田动态体系的特点及自适应预测实践*

赵永胜

(大庆石油管理局勘探开发研究院)

摘 要

注水开发砂岩油田的动态体系是一个具有时变特点的非平稳随机过程系统,因此应用系统分析方法解决油田动态预测问题在一定范围内较之分析方法有更大的优越性。本文提供了一个针对这种特点所选择的预测方法,对大庆油田产量进行5年预报,并有经过实际资料检验的实例,可以说明系统分析方法解决油田动态预测问题的实用价值。

注水开发砂岩油田的动态预测核心是产油、产水量的变化规律,而产油、产水量赖以存在的油田动态体系是非常复杂的。尽管人们对它进行了百余年的研究,但影响产油、产水的诸种因素的关系仍不完全清楚,有些还难于进行定量的描述。体系是预测的基础,没有搞清楚信息体系的特征或者对体系的原始认识不同都会引起预测的失误^[1]。可见真正搞清预测体系的特征,对于选择合适的预测方法,取得预测的成功是非常重要的。

本文从系统观点出发分析研究了油田动态系统的特点,认为注水开发砂岩油田动态系统是一个具有系统性、时变性的非平稳随机过程体系。同时提供了一个针对这种特点所选择的预测方法对大庆油田产量进行五年预报并经过实际资料检验的实例。

一、油田动态体系的特点

油田是一个不可试验的系统,同时也是一个可观测、可控制的系统。在油田未投入开发之前,它是一个油、气、水(束缚水、底水或层间水)和岩石的集合体,并处于“静平衡”状态。当油田投入开发后,它是一个油、气、水(主要是注入水等)运动过程集合体,并在注水保持注采平衡的前提下处于“动平衡”的状态。值得注意的是,正是这种“动平衡”在油田开发的过程中从总体上控制着油田动态的变化。

一般来说,油田具有同一的水动力系统,这表明了油田动态系统的整体特征。因此对油田动态这个可控制的系统来说,各种可控制和不可控制的因素综合起来影响或支配着油田的开采动态。可控因素主要是指按计划生产、各种稳产调整措施(如打新井、压裂、抽油、堵水、电泵等)的数量、注水量的多少、测试次数、生产井的修理作业、抽油机井的调参次

*选自《石油学报》1986年第7卷第3期。

数、特高含水井关井井数、注水井的洗井周期、自喷生产井的油嘴大小、油井管理中的清蜡、热洗以及操作人员的变化等；不可控制的因素主要指油田构造特征、油层的非均质性、油层内流体性质以及驱油机理等。上述可控与不可控因素中任何单一因素或某些因素的结合发生变化，都能使油田开采动态发生变化。

众所周知，油田的开发只能是一个逐渐扩大开发领域的过程。在整个油田开发过程中，每年钻井的井数、投产的区块、投产井的产量及每年采取的调整措施都是随机的。由于调整区块产油层间的差异，其产量也自然是随机的。在开采过程中油井修理、注入到油层中的水量、测试井次以及操作人员的变化等，都具有明显的随机特征。从另一方面来看，油田注水后，油层中液体质点的运动实际上是在极其复杂的多孔介质中，在驱动力、重力、毛细管力、粘滞力以及油水和岩石间的物理化学作用力等同时作用下进行的，这些力相互间的变化与作用和地面上的各种随机影响又相互联系，使油田动态系统带有明显的随机特征。需要指明的是，这种随机性是在油田处于“动平衡”前提下产生的。

在强调油田动态系统具有明显随机性的同时，还必须注意这样的事实，即在油田开发过程中，特别是在油田稳产阶段，各种调整挖潜措施的采取在同一时间和空间里，由于受到资金设备、施工队伍和自然条件的限制也不可能是无限的。

上述分析表明，注水开发后的油田是一个随机过程的集合体。表征油田系统状态变化的输出主要是产油和产水量。在开发过程中，产油和产水即油田系统的状态随时间要发生各种变化，这种变化通常称之为系统的时变性。系统的瞬时状态表明了系统瞬时输入的影响，而系统的输入与输出关系在时间上是一种循序关系，具有确定的过去—未来的次序，因此只有考察研究油田动态系统的过程才能揭示出系统的规律性。具体来说，由于产油、产水量的随机性和时变性实质是表明了各种因素综合影响的结果，它们本身载有关于油田动态系统的功能特性以及油田内部结构等方面的大量信息，其统计规律反映了油田动态系统的内在规律性，因而成为认识油田动态特征的依据。

尽管上述分析与描述是极为概括的，但这种骨架式的描述也足以使人们清楚地看到油田动态体系具有整体性、统计规律性，并带有时变特征的非平稳随机过程系统。

二、油田动态预测的实践

把经验与渗流力学方程相结合，从而推导出具有完全确定性的油田动态预测模型，这种传统的动态预测方法是大家熟知的。采用分析方法进行油田动态预测，在实际应用中往往会遇到模型中某项或某几项参数无法确定的困难，因此预测人员常常凭借经验即采用主观概率来确定或修改模型中某一项或几项参数^[2]，以便使预测结果能达到人们的认识程度所能接受的地步。本文给出了两个采用系统分析方法对大庆油田产油、产水量进行预测并经过5年实践检验的实例^[3]，借以说明应用系统观点解决油田动态预测问题的现实性。

参考文献 [3] 采用了现代控制理论的方法，在分析研究大庆油田 1972—1979 年产油量序列 $[Q_0(t)]$ 变化规律的基础上，建立了油田产量多层递阶预报模型。

按非时变系统处理模型为：

$$Q_0(k+l) = 7.9495 - 0.59206(k+l)^{0.54146} \quad (1)$$

按时变系统处理模型为：

$$Q_o(k+l) = 7.96935917 - [0.7144624881 + (-0.0009)l^{0.9}](k+l)^{(0.4883419736 + 0.0008l)} \quad (2)$$

式中 $Q_o(k+l)$ ——第 $(k+l)$ 时刻的预测产量；

k ——建模所用数据个数， $k=29$ ；

l ——预测时间步长， $l=1, 2, 3, \dots, n$ 。

产油量预测与实际资料检验结果见表1。检验结果表明，将油田动态系统按非时变系统处理，5年（20步）预测平均相对误差为10.29%（见表2），而按时变系统考虑平均相对误差为7.74%，这说明考虑动态系统的特点对于搞好预测是很重要的。

表1 产油量预测与实际资料检验结果表

时间(年,月) 项目	1980.3	6	9	12	1981.3	6	9	12	1982.3	6
实际值	4.2146	4.1288	4.0812	4.061	3.9336	3.8177	3.7263	3.6951	3.5536	3.3126
预测值(1)	4.2155	4.1486	4.0827	4.0178	3.9537	3.8905	3.8281	3.7665	3.7056	3.6455
误差(%)	-0.02	-0.479	0.037	0.011	-0.51	-1.9	2.73	-1.93	-4.2	-10.0
预测值(2)	4.20894	4.13564	4.06309	3.99123	3.92003	3.84946	3.77947	3.71004	3.64114	3.57274
误差(%)	0.13	-0.16	0.44	1.7	0.3	-0.8	1.4	-0.4	-2.4	-7.8

时间(年,月) 项目	1982.9	12	1983.3	6	9	12	1984.3	6	9	12
实际值	3.1408	3.3371	3.22	2.9866	2.81498	2.81321	2.68086	2.5486	2.4078	2.36695
预测值(1)	3.5861	3.5274	3.4693	3.4119	3.355	3.2988	3.2431	3.188	3.1334	2.0793
误差(%)	-14.1	-5.7	-7.74	-14.2	-19.1	-17.2	-20.9	-25.1	-30.1	-30.0
预测(2)	3.50482	3.43734	3.37029	3.30365	3.2374	3.17151	3.10598	3.04077	2.9768	2.9113
误差(%)	-11.5	-3.0	-4.66	-10.61	-15.0	-12.73	-15.85	-19.36	-23.63	-22.99

表2 平均相对误差 (%)

时间 项目	1年(4)	2年(8)	3年(12)	4年(16)	5年(20)
预测(1)	0.135	0.952	3.468	6.241	10.29
预测(2)	0.607	0.666	2.503	4.564	7.74

注：1年(4)——指4步预测，以此类推。

在分析油田1973年9月到1980年12月的月平均日产水量序列 $[Q_w(t)]$ 变化规律的基础上，建立了产水量的多层递阶预报模型，并按时变系统考虑：

$$Q_w(k+l) = 2.86069 + [0.303659 + 0.0015l](k+l)^{(1.2326 + 0.001l)} \quad (3)$$

式中 $Q_w(k+l)$ ——第 $(k+l)$ 时刻的预测值；

k ——建模数据个数， $k=30$ ；

l ——预测时间步长， $l=1, 2, 3, \dots, n$ 。

预测与实际资料检验结果见表3。可以看出，预测相对误差是比较小的，4年（16步）平均相对误差为2.0%。

表3 产水量预测与实际值检验表

时间(年,月) 项目	1981.3	6	9	12	1982.3	6	9	12	1983.3
实际值	24.451	25.8809	26.6377	27.7107	29.9342	29.8448	30.3875	32.2408	33.6528
预测值	23.9601	24.9872	26.0373	27.1106	28.2074	29.3278	30.4723	31.6412	32.8346
误差(%)	2.0	3.45	2.25	2.16	5.76	1.73	-0.28	1.86	2.35
时间(年,月) 项目	1983.6	9	12	1984.3	6	9	12	1985.3	6
实际值	34.0775	34.6434	36.7729	38.4262	39.2619	39.6203	40.4106	—	—
预测值	34.0529	35.2964	36.5655	37.8604	39.1815	40.5291	41.9036	43.3052	44.7343
误差(%)	0.072	-1.88	0.564	1.47	0.204	-2.29	-3.69	—	—

与此同时,采用随机序列分析领域中带外界影响因素的自回归滑动平均(ARMAX)模型描写了油田产油量时间序列的随机特征,其模型为:

$$Q(t) = aQ(t-1) + b \nabla u(t) + c \nabla f(t) + \epsilon(t) \quad (4)$$

式中 $Q(t)$ ——第 t 时刻产油量;

$Q(t-1)$ ——第 $(t-1)$ 时刻产油量;

$\nabla u(t)$ ——措施增产油量;

$\nabla f(t)$ ——产水量增量;

$\epsilon(t)$ ——残差;

a, b, c ——待定系数。

在无措施条件下,即 $\nabla u(t) = 0$ 时,产油量多步自校正预测模型为:

$$Q(t+k) = a(t)Q(t+k-1) + c(t)\nabla f(t+k) \quad (5)$$

式中 $k=1,2,3,\dots,n$ 。

在式(5)的预测模型中,需要知道将来某一时刻的产水量增量 $\nabla f(t+k)$,为此,采用预测值 $\hat{\nabla} f(t+k)$ 近似代替 $\nabla f(t+k)$ 。分析产水量的时间序列,并用 AR(1)模型来描述,则有:

$$f(t) = \beta f(t-1) + \epsilon(t) \quad (6)$$

式中 $f(t)$ —— t 时刻产水量;

$f(t-1)$ —— $(t-1)$ 时刻产水量;

β ——待定系数;

$\epsilon(t)$ ——残差。

于是有多步自校正产水量预测模型:

$$f(t+k) = [\beta(t)]^k f(t) \quad (7)$$

具体以月为时间单位步长,运用 1973—1979 年共 84 组数据,并用自适应参数加权最小二乘法递推估计器进行参数估计,给出了两年产量预测结果。与此同时,应用 1973—1980 年共 96 组数据又建立了下述模型:

$$Q(96+k) = 0.994666Q(96+k-1) + 0.059355 \nabla \hat{f}(96+k) \quad (8)$$

$$\hat{f}(96+k) = [1.01718]^k f(96) \quad k=1,2,3,\dots,n \quad (9)$$

$$\nabla \hat{f}(96+k) = \hat{f}(96+k) - \hat{f}(96+k-1) \quad (10)$$

应用模型(8)对大庆油田的产油量进行 5 年预测(共 60 步),应该说由于当时对油田

开采形势缺乏全面的认识，对这类预测方法又缺乏了解，因此导致对这类预测结果的评价是慎重的。用1981—1984年的实际资料验证预测结果（见表4），可以看到多步自校正预报结果也是比较符合实际的，最大预报误差为8.69%，4年预测平均相对误差为3.911%。

表4 多步自校正预测结果验证表

时间(年,月) 项目	1981.3	6	9	12	1982.3	6	9	12	1983.3
实际值	13.056	12.6714	12.368	12.2646	13.4335	12.5225	11.8731	12.6152	13.2485
预测值	13.337	13.2010	13.071	12.947	12.8302	12.7192	12.614	12.5173	12.4266
误差(%)	-2.15	-4.179	-5.68	-5.56	4.49	-1.57	-6.24	-0.766	6.203
时间(年,月) 项目	1983.6	9	12	1984.3	6	9	12	1985.3	6
实际值	12.2881	11.5819	11.5746	13.1911	12.5314	11.8478	11.6465	—	—
预测值	12.2801	12.189	12.1128	12.044	11.983	11.929	11.883	11.846	11.816
误差(%)	0.065	-5.24	-4.64	8.69	4.376	0.685	-2.03	—	—

注：以月为单位每年预测12步，这里仅选季度值。

三、讨 论

(1) 油田动态体系具有一定的模糊性，是一个具有时变特点的非平稳随机过程体系。对这样的动态体系进行预测，应用传统的分析方法遇到的困难较大，正如参考文献^[1]所指出的：如果原始体系 Z_1 或观察到的形象 X_1 原本是模糊的，那么用清晰模型概括自然现象可能一筹莫展或导出不完全真实或不完整的结果。因此，应用随机过程理论解决油田动态预测，在一定范围内较之分析方法有一定的优越性。

(2) 鉴于目前的认识能力和技术条件的限制，人们还不能搞清楚被研究对象——油田动态系统变化过程中的全部原因。退一步来看，即使掌握了全部影响因素，但又无法考虑这个复杂系统中各部分之间、各过程之间相互协调、作用的定量关系，在对油田动态系统的现状和过去发展的依从关系的认识基础上，采用现代控制论的方法建立时变系统的产量预测模型，实际资料检验表明是比较符合实际的，是有实用价值的。把上述的两种预测方法结合起来应用，可能会收到较好的预测结果。

(3) 评价一种预测方法的好坏，不但要看其理论的成熟程度、预测精度的高低，而且在预测精度满足工程要求的前提下，方法应用的方便程度则是油藏工程技术人员决定取舍的前提。此外，完整的预测方法应具备可复制性和可检验性，否则其检验结果必然带有较强的人为随意性。实例中采用的两种预测方法不但应用是简单的，而且具备上述的复制性和可检验性。

参 考 文 献

- [1] 翁文波著．预测论基础．北京：石油工业出版社，1984
- [2] 赵永胜，夏桂江．对“水驱孔隙性砂岩油田产量递减预测方法”一文的讨论．石油勘探与开发，1983（6）
- [3] 赵永胜等．大庆油田开发规划经济数学模型的研究．石油学报，1983（3）

复杂油藏系统中的两类预测问题*

赵永胜

(大庆石油管理局勘探开发研究院)

摘 要

本文从系统的能观与能控性分析入手,研究认为,在复杂油藏系统的两类预测问题研究中,首先应该深入研究复杂油藏系统的特征,进而寻求与之匹配的研究方法。否则,不顾系统的固有特征,先入为主,将概率的和随机过程问题采用确定性模型来描述,将模糊系统问题采用概率模型来解决,并且不适当地要求量化程度与准确性,都是不合乎客观实际的,当然也不会收到令人满意的结果。

油藏工程研究的核心问题是如何实现油藏的最优控制,目的是尽最大可能提高油藏的最终采收率。而预测是控制的基础,因此,对于油藏工程来说,预测问题的研究是极其重要的。

事实上,复杂油藏系统的预测问题可归纳为两类:一是表征油层物性及流体特征参数的预测,如油层厚度、渗透率、孔隙度、油水饱和度等,这类参数不但与时间有关,而且是位置的函数,属于分布参数预测问题;二是描述注水开发后油藏动态系统状况的参数预测,如产液量、产油量、含水和压力等,这些参数是时间的函数而与位置无关,属于集中参数预测问题。在复杂油藏系统的研究中,人们始终在为寻找两类参数的预测方法、提高两类参数的预测精度而努力着。

一、复杂油藏系统的特征及其能观与能控性

1. 复杂油藏系统的特征

从系统的观点来看,复杂油藏系统的两类参数预测研究涉及两类不同性质的系统问题,分布参数预测属油藏静态系统问题,而集中参数预测属油藏动态系统问题。显然,研究两类参数的预测,首先必须搞清两类参数所依赖的系统特征。

(1) 油藏静态系统特征

石油是一种埋藏在地下几百米或几千米深处的液体矿床。基于油田开发的特殊性,即使整个油田的每口井都取岩心,人们能够看到的样品的体积也不到整个油藏体积的百万分之一。从数学角度看,人们已知的是油藏中的若干个“点”,希望的是通过已知“点”推导出油藏储层“体”的空间分布。由于这些已知“点”的连续性,特别是这些已知“点”所载储

* 选自《systems science and its applications》. Tiangin People's Publishing House. 1998.7