

文章编号:1673-8217(2007)03-0049-03

用灰色-马尔柯夫模型预测油田产量

文华¹,王岭²,计焕³,孙娜¹(1. 大庆石油学院石油工程学院,黑龙江大庆 163318;2. 中国石化
上海海洋油气分公司研究院;3. 中国石油青海油田天然气开发公司)

摘要:油田产量变化受多种因素的影响,表现出既有宏观趋势的确定性又有微观波动的随机性,而精确预测油田产量一直是油田开发的重要研究任务,因此,根据灰色预测和马尔柯夫链的基本原理,考虑其各自的特点,构造出预测油田产量的灰色马尔柯夫预测模型。该方法可以优势互补,使得预测结果更加合理可靠。实例表明,该方法预测精度高,能有效预测具有某种变化趋势而随机波动较大的油田产量。

关键词:灰色系统;马尔柯夫链;灰色马尔柯夫预测模型;应用

中图分类号:TE313

文献标识码:A

油田产量的预测是编制油田开发规划,调整方案设计,以及动态分析的重要内容。开发实践证明,影响油田或油井产量的因素很多,如地质因素、流体性质、开采方式、井网格式、增产措施和管理因素等,因而导致产量变化既有宏观趋势的确定性又有微观波动的随机性。因此,将油田生产视为一个带有随机动态特征的灰色系统,应用灰色系统预测理论与马尔柯夫链的基本原理,建立起预测油田产量的灰色-马尔柯夫预测模型。该模型能充分利用油田历史数据信息,用灰色预测来反映油田开发的宏观发展的总趋势^[1],用马尔柯夫链来确定油田产量状态规律,刻划产量的微观波动规律。

1 灰色系统和马尔柯夫链原理

1.1 灰色系统 GM(1,1)模型

灰色预测方法是一种将油田产量看作是在一定区间内变化的灰色量,将油田产量变化的过程看作一种随机过程,它反映的是系统的宏观变化发展规律。这种预测方法无需大量历史资料,强调目前变化对未来的影响,使预测的数据序列接近实际数据序列等优点,广泛应用在时间短、数据资料少、数据波动不大的预测问题。

灰色预测模型可记作 GM(1,1),建立过程如下^[2,3]:

设有随机变量序列:

$$\{x^0(i) \mid i = 1, 2, 3, \dots, n\} \quad (1)$$

对 $x^0(i)$ 做一次累加生成,产生序列:

$$\{x^1(k) \mid k = 1, 2, 3, \dots, n\} \quad (2)$$

其中

$$x^1(k) = \sum_{i=1}^k x^0(i)$$

($i, k = 1, 2, 3, \dots, i, k$ 均为时间序列样点)

由 $\{x^1(k) \mid k = 1, 2, 3, \dots, n\}$ 可建立一个单变量微分方程模型:

$$\frac{dx^{(1)}}{dt} + ax^{(1)} = u \quad (3)$$

记参数列为 $\hat{a} = \begin{bmatrix} a \\ u \end{bmatrix}$, 按最小二乘法求 \hat{a} , \hat{a}

由下式确定:

$$\hat{a} = (B^T B)^{-1} B^T y_N \quad (4)$$

其中:

$$B = \begin{bmatrix} -\frac{1}{2}(x^{(1)}(1)) + x^{(1)}(2) & 1 \\ -\frac{1}{2}(x^{(1)}(2)) + x^{(1)}(3) & 1 \\ \dots & \dots \\ -\frac{1}{2}(x^{(1)}(n-1)) + x^{(1)}(n) & 1 \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$y_N = [x^{(0)}(2), x^{(0)}(3), \dots, x^{(0)}(n)]^T \quad (6)$$

离散时间响应为

收稿日期:2007-03-05

作者简介:文华,1980年生,2004年毕业于大庆石油学院石油工程专业,现为油气田开发工程专业硕士研究生,研究方向:油气田开发理论及系统工程。

$$\hat{x}^{(1)}(k+1) = (x^{(0)}(1) - \frac{u}{a}e^{-ak} + \frac{u}{a}) \quad (7)$$

将其还原,得数据序列预测值,即:

$$\hat{x}^{(0)}(k+1) = \hat{x}^{(1)}(k+1) - \hat{x}^{(1)}(k) \quad (8)$$

为了判别模型的优劣,用后验差检验法进行检验,详细检验过程参阅文献[2][3]。

1.2 马尔柯夫链

马尔柯夫预测的研究对象是一个随机变化的动态系统,刻划的是微观变化趋势,其理论基础是通过马尔柯夫过程来反映复杂系统的状态转移,即一个 n 阶马尔柯夫链由 n 个状态 S_i 及其状态转移概率矩阵 $P_{ij} (i, j = 1, 2, 3 \dots n)$ 所确定。马尔柯夫分析的基本方法是利用转移概率矩阵进行预测和决策,因此转移概率矩阵显得尤为重要^[3]。

在一个系统中,如果产生的状态数为 n 个,即 S_1, S_2, \dots, S_n , 假设系统由状态 S_i 经过一次转移到状态 S_j 的条件概率为 P_{ij} , 那么系统全部一次转移概率的集合组成一矩阵,这就称为转移概率矩阵。其表示如下:

$$P = \begin{bmatrix} P_{11} & P_{12} & \dots & P_{1n} \\ P_{21} & P_{22} & \dots & P_{2n} \\ M & M & \dots & M \\ P_{n1} & P_{n2} & \dots & P_{nm} \end{bmatrix} \quad (9)$$

转移概率矩阵 P_{ij} 具有下列的性质:

$$P_{ij} \geq 0, \sum_j P_{ij} = 1$$

$$P^k = P^{k-1} \cdot P, P(k) = P^k \quad (10)$$

2 灰色—马尔柯夫模型的建立

灰色系统预测主要用于时间短、数据少、波动不大的预测问题,其预测的几何图形是一条单调递减或单调递增的平滑曲线,对随机波动性较大的数据序列拟合较差,预测精度较低。而马尔柯夫链适合于随机波动较大的数据预测问题,在这一点上恰好可以弥补灰色预测的局限性。因此将灰色预测与马尔柯夫链有机结合在一起,可以收到优势互补的效果^[4~6]。应用灰色—马尔柯夫链方法进行预测的基本思路是

(1)先建立灰色 GM(1,1)模型,求出其预测曲线 $\gamma(k) = \hat{x}^{(0)}(k+1)$ 。

(2)状态划分。对于一个符合马尔柯夫链特点的油田产量非平稳随机状态过程,则采用“变量划分法”来确定状态^[7],即以 $\gamma(k)$ 曲线为基准,由

与 $\gamma(k)$ 曲线“平行”(即形状相同,位置不同)的若干曲线构成若干条形区域,每一条形区域构成一个状态(在灰色理论中也称“灰区间”) S_i 。根据具体情况划分为 n 个状态,任一个状态 S_i 表达为

$$S_i \in [S_{i1}, S_{i2}] (i = 1, 2, \dots, n) \quad (11)$$

$$S_{i1} = \hat{x}^{(0)}(k+1) + b_i \bar{Y} \quad (12)$$

$$S_{i2} = \hat{x}^{(0)}(k+1) + c_i \bar{Y} \quad (13)$$

其中 \bar{Y} 是历年油田产量平均值; b_i, c_i 可根据具体预测对象及原始数据结合经验赋值。

(3)计算状态转移概率,构建状态转移概率矩阵。 $N_{ij}^{(m)}$ 表示由状态 S_i 经过 m 步转向状态 S_j 样本数, N_i 是在状态 S_i 下的样本数,则油田产量由状态 S_i 经过 m 步转向状态 S_j 的概率:

$$P_{ij}^{(m)} = \frac{N_{ij}^{(m)}}{N_i} \quad (14)$$

由此可建立一个经过 m 步转移的状态转移概率矩阵:

$$P = \begin{bmatrix} P_{11}^m & P_{12}^m & \dots & P_{1n}^m \\ P_{21}^m & P_{22}^m & \dots & P_{2n}^m \\ M & M & \dots & M \\ P_{n1}^m & P_{n2}^m & \dots & P_{nm}^m \end{bmatrix} \quad (15)$$

转移矩阵 P 反映了油田产量各个状态之间的转移规律。一般选取离预测年最近的 j 个年份,按离预测年的远近,转移步数分别定为 1, 2, ..., j。在转移步数所对应的转移方阵中,取最近各年份的状态所对应的行向量,从而组成新的概率矩阵。对新的概率矩阵将其列向量求和,其中的最大值所对应的状态即为预测的油田年产量状态。

(4)确定油田产量预测值。根据油田产量的转移状态后,确定油田产量预测值的变动区间,该变动区间的中点即为油田产量在 k+1 时刻的最可能的预测值

$$\bar{x} = \hat{x}^{(0)}(k+1) + \frac{1}{2}(b_i + c_i)\bar{Y} \quad (16)$$

3 预测实例

本文以预测大庆油田北一区断东基础井网 2004 年产量为例,说明该模型的计算过程。

(1)对矿场年产量数据进行灰色建模。把油田 1991~2003 年 13 个年产量数据(表 2),用灰色系统预测方法建模,方程如下:

$$\hat{x}^{(0)}(k+1) = -734.082 1e^{-0.108k} + 821.412 1$$

用式(8)求得油田年产油趋势值,并求得历史产量平均值: $\bar{Y} = 47.9462 \times 10^4 \text{ t}$ 。

(2)状态划分和时间序列所对应的年产油量状态。根据油田年产油趋势值和历史值,按“变量划分法”划分为6个状态(表1),则年产油历史数据状态见表2。

表1 状态划分表

状态 S	b 值	c 值
A	-0.3	-0.2
B	-0.2	-0.1
C	-0.1	0
D	0	0.1
E	0.1	0.2
F	0.2	0.3

表2 历史年产油状态及预测结果表

年份	年产油量/ 10^4 t	状态	灰色预测值/ 10^4 t	灰色-马氏预测值/ 10^4 t
1991	87.33	D	87.33	87.33
1992	74.84	C	75.11	74.713
1993	72.86	E	67.43	74.617
1994	66.10	E	60.53	67.718
1995	57.36	D	54.33	56.731
1996	35.27	A	48.77	36.788
1997	36.03	B	43.78	36.592
1998	32.10	B	39.30	32.112
1999	37.02	D	35.28	37.679
2000	34.30	D	31.67	34.069
2001	32.54	D	28.43	30.829
2002	30.83	E	25.52	32.714
2003	26.72	D	22.91	25.308
2004	20.85		18.46	20.857
2005	18.57		16.57	18.967
2006	17.02		14.88	17.277
预测相对误差, %			12.19	2.13

(3)构造2004年的状态转移矩阵。根据年产油量状态值,用式(14)计算各个产量状态的状态转移概率及矩阵。

$$P^{(1)} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0.5 & 0 & 0.5 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0.2 & 0 & 0.2 & 0.4 & 0.2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0.333 & 0.333 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$P^{(2)} = \begin{bmatrix} 0 & 0.5 & 0 & 0.5 & 0 & 0.1 \\ 0 & 0 & 0 & 0.333 & 0.333 & 0 \\ 0.08 & 0.2 & 0.08 & 0.227 & 0.427 & 0 \\ 0.067 & 0 & 0.067 & 0.244 & 0.178 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$P^{(3)} =$$

$$\begin{bmatrix} 0.1 & 0.25 & 0.1 & 0.45 & 0.1 & 0.09 \\ 0.067 & 0 & 0.067 & 0.244 & 0.178 & 0 \\ 0.016 & 0.28 & 0.016 & 0.333 & 0.267 & 0 \\ 0.049 & 0.067 & 0.049 & 0.157 & 0.175 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

(4)利用状态转移概率矩阵,预测2004年年产油量状态,并计算年产油量预测值。选择离预测年最近的3个年份,转移步数分别定为1,2,3。在转移步数所对应的转移概率矩阵中,取各年份的状态所对应的行向量组成一个新转移概率矩阵。

$$P =$$

$$\begin{bmatrix} 0.2 & 0 & 0.2 & 0.4 & 0.2 & 0.067 \\ 0.016 & 0.28 & 0.016 & 0.333 & 0.267 & 0 \end{bmatrix}$$

从上述新概率矩阵看出状态D列累计值最大,为0.977,可以看出油田年产油量2004年状态为D。根据GM(1,1)预测2004年油田产量趋势值为 $18.46 \times 10^4 \text{ t}$,则2004年油田产油量为 $\bar{X}_{2004} = [18.46 + 0.5 \times (0 + 0.1) \times 47.9462] \times 10^4 = 20.857 \times 10^4 \text{ t}$,预测相对误差为0.0096%。

如果将2004年的预测值作为已知产量,那么可以进一步预测2005年油田产量为 $18.967 \times 10^4 \text{ t}$ (表2),其他年份依此类推。

从表2可以明显看出,灰色-马尔柯夫链预测模型能有效预测具有某种变化趋势而随机波动较大的油田产量数据列,预测精度较灰色预测模型高。

4 结论

灰色-马尔柯夫预测模型兼有灰色GM(1,1)模型和马尔柯夫转移概率预测模型的优点,能充分利用有限的历史数据给予的信息,对随机波动较大的数据进行预测。现场实践证明,利用灰色马尔柯夫模型进行油田产量的预测,方法简单,预测结果较准确。

参考文献

- 张连. 灰色理论在江苏油田原油产量预测中的应用[J]. 石油天然气学报, 2005, 27(2): 222~223
- 邓聚龙. 灰色系统(经济. 社会)[M]. 北京: 国防出版社, 1985. 60~64

(下转第54页)

度高,底水可以进入孔洞中,洞中的原油可以部分或者全部被水驱走,孔洞既是“源”,又是渗流通道。驱动效率与连通位置有关,连通点越靠近洞的顶部,驱动效率越高,由于重力分异,在孔洞连通点以上的原油无法被水驱走,形成残余油;驱动速度与连通程度有关,一般来说,多向连通型渗流能力大于双向连通型,驱动速度也大于双向连通型。

3.3 晚期开发阶段

在开发后期,底水沿裂缝进一步窜进,在部分溶洞体内形成一定规模的次生底水,这时油藏流体流动的能量主要为底水的驱动能,在高角度裂缝中,重力起着重要作用,毛管力作用可以忽略。

裂缝中底水流动速度 $v = -\frac{b^2}{12\mu}(\Delta p - \rho g)$,由公式可以看出,底水更容易沿宽裂缝上窜,形成水锥。被底水波及的地方,缝洞系统由于组合方式不同,孔洞内水驱油效率也不相同。

(1)单向连通型:对于上洞下喉型、横向喉道型和喉道宽度小于喉道临界宽度的下洞上喉型来说,孔洞中的原油无法被底水驱走,形成死油区;而喉道宽度大于喉道临界宽度的下洞上喉型,孔洞中原油已被驱走,失去了“源”的作用,只能成为渗流通道的一部分。

(2)双向连通型和多向连通型:由于孔洞连通程度较高,在开发后期,底水波及的地方,孔洞中可动原油已被驱走,只是由于重力分异作用,在孔洞顶部喉道连通位置以上分布一些残余油。这两种连通类型的孔洞都失去了“源”的作用,只能作为渗流通道的一部分,只是在裂缝级别一致时,多

向连通型比双向连通型的渗流能力高。

4 结论

(1)碳酸盐岩油藏孔洞和裂缝组合方式异常复杂,决定了孔洞作用的复杂性和多样性。

(2)在不同开发阶段,油藏流体流动能量不同,使得不同组合方式的孔洞的作用也不同。

(3)孔洞-裂缝组合方式不同,底水驱动速度和效率也有所不同,一般来说,与孔洞连通的裂缝越多,连通程度就越大,孔洞的渗透性就越好,底水驱动速度就越快,驱油效率也越高。

参考文献

- 1 赵春莉,王跃文.塔河油田奥陶系定容体油藏特征及能量补充方法探讨[J].试采技术,2005,26(4):12~15
- 2 康志江,李江龙,张冬丽等.塔河缝洞型碳酸盐岩油藏渗流机理[J].石油与天然气地质,2005,26(5):635~637
- 3 黄孝特.碳酸盐岩裂缝-溶洞型油气藏开发技术探讨[J].石油实验地质,2002,24(5):446~448
- 4 郭春华,杨宇,莫振敏等.缝洞型碳酸盐岩油藏流动单元概念和研究方法探讨[J].石油地质与工程,2006,20(6):34~37
- 5 李培廉,张希明,陈志海.塔河油田奥陶系缝洞型碳酸盐岩油藏开发[M].北京:石油工业出版社,2003.52~54
- 6 柏松章.碳酸盐岩潜山油田开发[M].北京:石油工业出版社,1996.258~259

编辑:彭刚



(上接第 51 页)

- 3 肖艳玲.系统工程理论与方法[M].北京:石油工业出版社,2002.170~179,250~278
- 4 何勇.灰色马尔科夫预测模型及其应用[J].系统工程理论与实践,1992,12(4):61~65
- 5 王清晓,陈家铨.灰色马尔柯夫链方法在设备故障预测中的应用初探[J].机械科学与技术,1997,16(3):119

~123

- 6 陈程,孙义梅.用高波茨-马尔柯夫链模型预测油田年产量[J].河南石油,1995,9(3):33~38
- 7 樊相如,唐海仕.灰色-马尔可夫模型在高科技企业销售预测中的应用[J].技术经济,2004,(6):49~50

编辑:彭刚