

用系统辨识方法估计油田可采储量

韩志刚 王洪桥

(黑龙江大学应用数学研究所·哈尔滨, 150080)

摘要: 本文提出一种与储量有关的产量预报模型. 依据这种预报模型, 应用系统辨识的理论给出了一种估计油田在一定条件下的可采诸量的方法. 实际计算表明, 这种方法有较高的应用价值.

关键词: 预报模型; 系统辨识; 可采储量

1 引言

油田的可采储量, 显然依赖于油田的地质储量. 但储油层的物理性质, 诸如孔隙结构、渗透率、岩石表面润湿性、油层温度等, 也都是决定可采储量的重要因素.

实践证明, 随着油田开发过程对油田有关参数的估计逐渐精确, 原始地质储量也得到进一步核实.

油田投入注水开发以后, 在注水物理的、化学的作用下, 储油层的物理性质也将发生变化.

以上种种因素都将影响油田的可采储量的估计和最终采收率的确定.

鉴于可采储量的准确估计对于油田的进一步开发将占有举足轻重的地位, 所以给出一种计算简单、并且有一定的可靠程度的关于可采储量的估计算法是很有必要的.

在讨论关于开发动态预测问题时^[1], 我们发现, 当开发方式已确定时, 油田的产量与剩余可采储量有着明确的依赖关系. 依赖于这种关系, 可以把剩余可采储量的计算问题, 转换成某个产油量预报模型的参数辨识问题.

实际应用表明, 关于剩余可采储量估计的参数辨识途径是有效的, 而且算法要求的先验知识较少.

2 剩余可采储量与一种油田产量预报模型

前已指出, 油田 A 在 t 时刻的剩余可采储量 $Q(t)$ 决定于 t 时刻以前所采用的开发方式 C . 我们可以把 $Q(t)$ 表示成

$$Q(t) = F(C, M, \theta, t). \quad (1)$$

其中 $F(\cdot, \cdot, \cdot, \cdot)$ 是某个适当的函数, M 是原始地质储量, θ 是某些地质参数形成的参数向量, t 是时间, C 是条件变量, 它表示开采方式.

显然, $Q(t)$ 是变量 t 的一个减函数. 故 dQ/dt 取负值, 于是 $-dQ/dt$ 表示采出程度. 由于当开采条件固定时, 在井数、工况不变, 不加任何其它措施而且不间断生产的条件下, 采出程度 $-dQ/dt$ 与剩余可采储量 $Q(t)$ 有着明显的依赖关系. 所以, 可以建立关于 $-dQ/dt$ 与

$Q(t)$ 之间的联系方程

$$-dQ/dt = f(Q(t), \eta, t). \quad (2)$$

其中 $f(\cdot)$ 是适当的函数, η 是模型参数. 一种简单的情形是, 采出程度与剩余可采储量之间存在着一定的比例关系, 此时可以把 (2) 式写成

$$-dQ/dt = \eta(t)Q(t). \quad (3)$$

其中 $\eta(t)$ 表示比例系数, 一般地说它仍与 $Q(t)$ 有关.

如果 t_0 时刻的剩余可采储量 $Q(t_0)$ 是已知的, 那么到达 t 时刻时, 其剩余可采储量可以表示为

$$Q(t_0) - \int_{t_0}^t \left(\frac{dQ}{du} \right) du,$$

从而 (3) 式又可以表示成

$$-\frac{dQ}{dt} = \eta(t)(Q(t_0) + \int_{t_0}^t \frac{dQ}{du} du). \quad (4)$$

其中 $-\int_{t_0}^t \frac{dQ}{du} du$ 表示从时刻 t_0 到时刻 t 时的采出量.

我们可以把上述的微分方程改写成如下的差分方程形式

$$-(Q(t + \Delta t) - Q(t)) = \eta(t)(Q(t_0) + \int_{t_0}^t \frac{dQ}{du} du) \Delta t + \varepsilon(t). \quad (5)$$

不妨假定 $t = k\Delta t$, $t_0 = 0$, 并简记

$$Q(t) = Q(k\Delta t) = Q_k$$

那么

$$\begin{aligned} -(Q(t + \Delta t) - Q(t)) &= -Q((k+1)\Delta t) + Q(k\Delta t) \\ &= -Q_{k+1} + Q_k = x(k+1), \end{aligned}$$

这恰恰是在一个时间步长 Δt 时, 油田的产油量. 利用记号 $x(k)$, 我们可以把

$$\int_{t_0}^t \frac{dQ}{du} du = \int_0^{k\Delta t} \frac{dQ}{du} du$$

表示成

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

从而等式 (5) 可以写成

$$x(k+1) = a(k)(Q(0) - \sum_{i=1}^k x(i)) + e(k). \quad (6)$$

其中

$$a(k) = \eta(k\Delta t)\Delta t, \quad e(k) = \varepsilon(k\Delta t).$$

只要令

$$\alpha(k) = a(k) + (Q(0) - \sum_{i=1}^k x(i))^{-1}e(k),$$

就可以把 (6) 改写成

$$x(k+1) = \alpha(k)(Q(0) - \sum_{i=1}^k x(i)). \quad (7)$$

自然地, 可以把 (7) 式写成较一般的形式

$$x(k+1) = \alpha(k)(Q(k_0) - \sum_{i=k_0+1}^k x(i)). \quad (8)$$

其中 k_0 是某一给定的时间, $\alpha(k)$ 是随机时变参数. $\alpha(k)$ 将随着时间的推移、开采条件、开采方式等的变化而改变. 公式(8)就是我们所得出的关于油田产量的预报方程.

3 可采储量 $Q(k)$ 的估计方法

$$x(k+1) = \alpha(k)(Q(k_0) - \sum_{i=k_0+1}^k x(i)) \quad (9)$$

中, 含有两个未知参数 $\alpha(k)$ 和 $Q(k_0)$, $Q(k_0)$ 表示 k_0 时刻的剩余可采储量, $\alpha(k)$ 是一个时变参数. 它由油田的一系列有关的地质参数决定. 由此可见, 关于可采储量 $Q(k)$ 的估计问题, 可以转化成为关于模型(9)的参数辨识问题.

下面提出的两种途径对解决上述问题, 都是有效的. 这两种途径都要求数据满足条件

$$x(k_0), x(k_0+1), \dots, x(k_0+i), \dots, x(k), \dots, \quad (10)$$

表示假定 k_0 时刻以后各时刻再不增加任何新的开采措施的条件, 下, 所得到的产油量.

3.1 预报误差最小化途径(I)

应用熟知的多层递阶方法^[2], 依据观测数据(10), 利用模型(9), 在 $Q(k_0)$ 给定的条件下, 从时刻 k 出发, 可以得到预报值:

$$\hat{x}(k+1|k, Q(k_0)), \hat{x}(k+2|k, Q(k_0)), \dots, \hat{x}(k+h|k, Q(k_0))$$

h 表示预报步长.

假定观测数据 $x(k+1), \dots, x(k+h)$ 都是已知的, 置

$$J(Q(k_0)) = \sum_{j=1}^h (\hat{x}(k+j|k, Q(k_0)) - x(k+j))^2. \quad (11)$$

$J(Q(k_0))$ 可以作为估计 $Q(k_0)$ 的一种准则, 称为预报误差准则, 如果 $\hat{Q}(k_0)$ 使

$$J(\hat{Q}(k_0)) = \min_Q J(Q), \quad (12)$$

则说 $\hat{Q}(k_0)$ 是 $Q(k_0)$ 在预报误差最小意义下的最佳估值.

于是我们得出估计 $Q(k_0)$ 的预报误差最小化途径如下:

- 1) 对于每个事先给定的 $Q(k_0)$, 应用多层递阶预报方法, 计算 $J(Q(k_0))$;
- 2) 应用最优化技术, 求 $J(Q(k_0))$ 的最小值点 $\hat{Q}(k_0)$, 或它的近似最小值点 $\tilde{Q}(k_0)$.

3.2 直接辨识途径(II)

我们可以把模型(9)改写成

$$x(k+1) = \beta(k) - \alpha(k) \sum_{i=k_0+1}^k x(i) = \beta(k) + \alpha(k)q(k). \quad (13)$$

其中

$$\beta(k) = \alpha(k)Q(k_0), \quad -q(k) = \sum_{i=k_0+1}^k x(i).$$

令

$$\varphi(k) = (1, q(k))^T, \quad \theta(k) = (\beta(k), \alpha(k))^T,$$

则有

$$x(k+1) = \varphi(k)^T \theta(k).$$

不难应用熟知的公式^[3]

$$\hat{\theta}(k) = \hat{\theta}(k-1) + \frac{1}{\|\varphi(k)\|^2} \varphi(k) \{x(k) - \varphi(k)^T \hat{\theta}(k-1)\}$$

得出 $\theta(k)$ 的估计 $\hat{\theta}(k)$. 但这样的估值并不是唯一的(参看[4]). 我们选取关于参数的估值序列

$$\hat{\theta}(k_0), \hat{\theta}(k_0 + 1), \dots, \hat{\theta}(k),$$

使得满足下列条件:

存在某个 $N < k$, 且

$$\frac{\hat{\beta}(N+j)}{\hat{\alpha}(N+j)} - \frac{\hat{\beta}(N+j+1)}{\hat{\alpha}(N+j+1)} = e(j), \quad j = 0, 1, \dots, k - N - 1,$$

形成一个零均值的白噪声序列. 此时只要取

$$\hat{\theta}(k_0) = \frac{1}{k - N} \sum_{j=0}^{k-N} \frac{\hat{\beta}(N+j)}{\hat{\alpha}(N+j)}$$

就行了.

4 实际应用

我们对某采油厂的可采储量进行了估计, 该厂按地质结构及地理位置划分为六个区块, 它们分别为北二西、北二东、北三西、北三东、北部过渡带、东部过渡带. 我们用前面介绍的可采储量估计方法 I. 即预报误差最小的方法, 分别对六个区块及全厂的可采储量做了估计.

我们有如下观测数据(未措施产油量数据):

表 1 未措施产油量数据表

区块名/年份	1982	1983	1984	1985	1986	1987	1988	1989
北 二 西	215.75	168.57	147.99	127.53	127.61	141.56	129.0	115.2
北 二 东	120.33	107.58	91.3	78.42	82.21	77.72	82.72	76.54
北 三 西	121.22	135.22	149.71	156.07	152.39	131.89	124.37	104.75
北 三 东	195.1	193.33	190.07	166.69	170.57	151.63	131.26	129.7
北部过渡带	178.73	137.69	119.34	170.39	119.05	115.88	108.51	103.81
东部过渡带	69.34	58.98	51.83	51.33	44.6	38.6	35.93	38.63
全 厂	749.61	775.6	789.73	738.6	744.17	701.79	675.3	629.43

利用模型(9), 在预报误差最小的情形下, 得出以下 k_0 时刻的可采储量的最佳估值:

表 2 可采储量估计值表

$k_0=1982$	可采储量估计值	$k_0=1982$	可采储量估计值
北 二 西	1900	北部过渡带	1500
北 二 东	980	东部过渡带	700
北 三 西	1800	全 厂	9400
北 三 东	2600		

各区块估值之和与全厂估值的相对误差为 0.85%. 这表明上述估计可采储量的方法是有效的.

参 考 文 献

- [1] 韩志刚, 王洪桥. 多模型多方法综合多层递阶预报模式在油田产量预报中的应用. 控制与决策, 1991, 6(6), 434-439
- [2] 韩志刚. 多层递阶方法及其应用. 北京: 科学出版社, 1989
- [3] 韩志刚. 石油产量的自适应预报. 控制理论与应用, 1989, 6(1), 99-113
- [4] 韩志刚. 多层递阶预报方法参数估值的初值选择. 控制与决策, 1986, 1(1), 25-29

The Estimation of Rest Workable Reserve of Oil-Field by Identification Method

HAN Zhigang and WANG Hongqiao

(Institute of Applied Mathematics, Heilongjiang University • Harbin, 150080, PRC)

Abstract: In this paper, the prediction model of oil output has been presented. The method of estimating rest workable reserve of oil-field, under certain condition, has been given by identification method dependent on above prediction model. In practice, it can be shown that, this method is efficient.

Key words: prediction model; identification; workable reserve

本文作者简介

韩志刚 1934年生. 1958年毕业于吉林大学, 现任黑龙江大学教授. 主要从事系统辨识, 自适应预报与控制的研究, 曾提出多层递阶方法, 目前研究领域是结构与参数皆时变的系统的辨识及自适应控制.

王洪桥 女. 1956年生. 1982年毕业于黑龙江商学院电子工程系, 获学士学位. 现为黑龙江大学应用数学研究所工程师. 主要研究兴趣为自适应控制, 多层递阶方法及计算机实现.

国 外 出 版 动 态

国际自控联 (IFAC) 于 1993 年 2 月创刊新的杂志 Control Engineering Practice, 向工业界及应用研究者介绍最新的理论研究成果, 以填补长期存在的理论与实践之间的鸿沟. 它要求刊登的文章短小精悍, 真正有实用价值, 并且全篇完整可读无需引用其它参考资料. 当然, 仍要求保证质量.

技术万能的观点已为全球所接受. 为此, 专业工程师们有社会责任去响应. 不要只研究新理论或开发新技术, 而要设法付诸实用; 不要只为个别社团或个别国家谋利, 而要俾益于全人类. 自动化的目的不仅仅是节约人力, 更重要的是延伸人类的活动能力, 使人与机器能够联成一体. 自动化技术乃是这种联合的乳胶漆剂.

(摘自 Newsletter 1993, No. 1, Feb.)