文章编号:1006-544X(2004)03-0286-03

GM(1,N)灰色模型在气井产能预测中的应用

杨 宇[1], 曾宪兵[2], 郭春华[3]

(1. 成都理工大学 能源学院, 四川 成都 610059; 2. 中石化西南分公司勘探开发研究院, 四川 成都 610081;
3. 四川理工学院, 四川 自贡 621709)

摘 要: 气井产能与其影响因素之间具有非线性关系, 利用灰色系统理论进行灰色建模, 采用灰关联分析和GM(1,N)灰色模型建立了产能预测模型; 对长庆气田15口井进行定量分析, 与各井的实测结果相比较, 其绝对误差平均为0.385 67, 相对误差平均为6.074%. 与常规方法相比, 用该方法进行产能预测比较实用、有效, 精度较高.

关键词: 灰色模型; 灰关联分析; 气井; 产能预测

中图分类号: TE319; O159 **文献标识码:** A①

目前, 气井产能预测的方法[1,2]很多, 但每种方法都有其局限性. 特别是在地质条件复杂多样, 而影响因素众多的情况下, 用常规方法是很难进行产能预测的. 影响气井产能的因素是多方面的, 这些参数又与产能之间具有非线性关系, 很难采用定量方式进行分析. 鉴于此, 本文进行了用灰色模型GM(1,N)来求解这种非线性的尝试, 取得了较好的效果.

1 GM(1,N)灰色模型的基本原理

1.1 灰关联分析

灰关联分析是基于行为因子序列的几何接近, 按发展趋势作分析, 且是一种以分析和确定因子间影响程度或因子对行为的贡献程度的分析方法[3]. 若几经数据转换后的母序列为$X_0(k)$, 子序列为$X_i(k)$, 则$X_0(k)$与$X_i(k)$的关联系数为$\xi_{0i}(k)$, 用下式计算

$$\xi_{0i}(k) = \frac{\min\limits_i \min\limits_k \Delta_i(k) + \rho \max\limits_i \max\limits_k \Delta_i(k)}{\Delta_i(k) + \rho \max\limits_i \max\limits_k \Delta_i(k)}.$$

式中:$\Delta_i(k) = |X_0(k) - X_i(k)|$;$\rho$为分辨系数, 其作用在于提高关联系数之间的差异显著性, 一般$\rho \in [0,1]$, 更一般地取$\rho = 0.5$;$\Delta_i(k)$称为第k个时刻(或指标, 空间)X_0与X_i的绝对差;$\min\limits_k \Delta_i(k)$为第1级最小差, 表示在$y_i$曲线上, 各相应点与$X_0$中各相应点的距离的最小值; $\min\limits_i \min\limits_k \Delta_i(k)$表示在各曲线找出最小的差$\min\limits_k \Delta_i(k)$的基础上, 再按$i = 1,2,\cdots,m$找出所有曲线中的最小差; $\max\limits_i \max\limits_k \Delta_i(k)$为两级最大差, 意义同两级最小差相似.

关联度的求法采用下式计算

$$\gamma_{0i} = \frac{1}{N}\sum_{k=1}^{N} \xi_{0i}(k).$$

式中:γ_{0i}为子序列i与母序列0的关联度;N为序列的长度, 即数据个数. 根据关联度的大小排序, 就可以进行优势分析, 判断子因素与母因素的作用, 分析哪些是主要的影响因素, 哪些是次要的影响因素.

1.2 GM(1,N)灰色建模

GM(1,N)是一阶N个变量的灰色模型, 其微分方程为

$$\frac{dx_1^{(1)}}{dt} + ax_1^{(1)} = b_1x_2^{(1)} + b_2x_3^{(1)} + \cdots + b_{N-1}x_N^{(1)}.$$

其中,

① **收稿日期:** 2003-06-24
基金项目: 国家自然科学基金资助项目(49774240)
作者简介: 杨 宇(1973-), 男, 博士研究生, 研究方向: 油气田开发与工程.

$$\hat{\boldsymbol{a}} = (a, b_1, b_2, \cdots, b_{N-1})^{\mathrm{T}} = (\boldsymbol{B}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{B})^{-1}\boldsymbol{B}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{Y}_M. \quad (1)$$

式(1) 中

$$\boldsymbol{Y}_M = [X_1^{(0)}(2), X_1^{(0)}(3), \cdots, X_1^{(0)}(M)]^{\mathrm{T}};$$

$$\boldsymbol{B} = \begin{bmatrix} -\frac{1}{2}(X_1^{(1)}(2) + X_1^{(1)}(1)) & X_2^{(1)}(2) & \cdots & X_N^{(1)}(2) \\ -\frac{1}{2}(X_1^{(1)}(3) + X_1^{(1)}(2)) & X_2^{(1)}(3) & \cdots & X_N^{(1)}(3) \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ -\frac{1}{2}(X_1^{(1)}(M) + X_1^{(1)}(M-1)) & X_2^{(1)}(M) & \cdots & X_N^{(1)}(M) \end{bmatrix}. \quad (2)$$

其响应函数为

$$\hat{X}_1^{(1)}(j+1) = [X_1^{(0)}(1) - \frac{1}{a}\sum_{i=2}^{N} b_{i-1}X_i^{(1)}(j+1)]\mathrm{e}^{-aj} + \frac{1}{a}\sum_{i=2}^{N} b_{i-1}X_i^{(1)}(j+1), (j = 0,1,2,\cdots,M-1).$$

按最小二乘法就可以求出系数的向量 $\hat{\boldsymbol{a}}$，当向量 $\hat{\boldsymbol{a}}$ 确定后代入式 (2) 即可确定一组序列的灰色模型.

灰色模型建立的具体步骤为[3,4]:

① 通过机理性的定性分析,明确主行为序列 $X_1^{(0)}$ 和因子序列 $X^{X}{}_2^{(0)}, X_3^{(0)}, \cdots, X_N^{(0)}$.

② 通过 $X_i^{(0)}(i = 2,3,\cdots,N)$ 对 $X_i^{(0)}$ 的关联度分析,选取关联度足够大的因子序列构成 GM(1, N) 的因子集.

③ 对 $X_i^{(0)}$ 作一次累加数据生成

$$X_i^{(1)}(k) = \sum_{j=1}^{N} X_i(j), i = 1,2,\cdots,N.$$

④ 利用最小二乘法确定向量系数 $\hat{\boldsymbol{a}}$.

⑤ 按累减生成对一次累加数据生成数据进行还原得到模型计算的值

$$\hat{X}_1^{(0)}(i) = \hat{X}_1^{(1)}(i) - \hat{X}_1^{(1)}(i-1).$$

⑥进行精度检验，若精度不够，可进行残差模型校正.

GM (1,N) 是一个状态模型,它反应的是 $N-1$ 个变量对因变量的一阶导数变化的影响，要将其用于气井产能预测必须要有足够的已知井来建模，使得建立的模型具有良好的代表性.

2　用 GM (1,N) 模型预测气井产能

多年的研究结果和实践表明：气井产能通常用无阻流量的大小来描述，因此，只要预测出气井的无阻流量，就相当于知道了气井的产能[1].

由气井二项式产能方程可知，影响气井产能的因素有地层渗透率、气层有效厚度、流体粘度、排驱半径、气井半径、表皮因子、气层孔隙度、原始地层压力、含气饱和度等因素. 这么多的因素不可能都拿来进行产能预测，因此首先要对因素进行筛选，进行筛选的方法很多，这里采用灰关联分析法，其结果表明，影响产能的主要有 5 个因素，即地层渗透率、气层有效厚度、气层孔隙度、原始地层压力、含气饱和度.

因此，建模过程中的因变量选用气井的无阻流量，建模所要解决的问题就是这 5 个影响因素与气井无阻流量之间的关系.

由于长庆气田现有的气井基本上都进行过产能试井，为此挑选了资料比较齐全、储层性质明确、有代表性的 15 口井作为模型的样本进行建模，各井的参数见表 1.

表 1　气井参数

Table 1　Parameters of gas wells

气井序号	储层渗透率/$10^{-3}\mu$m	测井孔隙度/%	含水饱和度/%	气层有效厚度/m	气层原始压力/MPa	气井无阻流量/(10^4m$^3\cdot$d^{-1})
1	0.155	5.24	24.30	5.2	30.996	11.148
2	0.186	5.64	22.49	5.8	31.287	12.230
3	0.172	4.31	29.37	4.6	30.48	8.373
4	0.204	5.13	17.96	3.6	34.609	9.259
5	0.109	4.81	24.25	9.0	31.34	10.63
6	0.21	5.41	18.10	5.0	33.15	11.21
7	0.396	5.01	21.96	6.0	30.59	8.456
8	0.083	4.41	21.23	6.4	32.05	13.278
9	0.057	4.31	32.99	6.4	31.3606	9.077
10	0.031	3.51	33.85	6.8	31.315	10.06
11	0.063	4.62	23.88	4.6	33.278	18.16
12	0.443	5.62	20.20	6.8	30.16	15.13
13	0.407	6.01	19.98	4.0	31.68	15.38
14	0.173	5.02	23.55	8.2	31.844	28.19
15	0.284	6.31	20.93	8.0	30.91	31.58

由于量纲的不同，所以必须进行资料的标准化处理，参数标准化用下式来表达

$$X_{jD} = \frac{X_j - X_{j\min}}{X_{j\max} - X_{j\min}} (0 \leqslant X_{jD} \leqslant 1).$$

利用文中所介绍的方法对该气田的气井的无阻流量进行 GM(1,6)模型的建模，求得模型的矩阵为

$$[a \quad b_1 \quad b_2 \quad b_3 \quad b_4 \quad b_5]^{\mathrm{T}} =$$
$$[-0.2601 \quad -0.025 \quad -0.022 \quad 0.0851 \quad 0.0101 \quad 0.217]^{\mathrm{T}},$$

一次残差矩阵为

$$[ea \quad eb_1 \quad eb_2 \quad eb_3 \quad eb_4 \quad eb_5]^{\mathrm{T}} =$$
$$[-0.0043 \quad -0.005 \quad 0.022 \quad 0.005 \quad -0.009 \quad -0.116]^{\mathrm{T}}.$$

应用该模型进行计算，与各井的实际测试结果作比较，最大绝对误差为 0.914 52，最小绝对

误差为0.024 78，绝对误差平均为0.385 67，相对误差平均为6.074%．为了增加可比性和证明方法的适用性，又进行了常规多元回归的计算，与各井的实际测试结果作比较，其绝对误差平均为0.914 5，相对误差平均为12.06%．可以看出，用GM(1,N)灰色模型建立的产能预测模型，精度较高，基本上能满足产能预测的精度要求．在计算过程中，有两口井的相对误差大于10%，经过分析发现，产生误差比较大的是一些低产的井，因此，对于低产井，方法还有待于改进．

3 结 论

（1）与其它方法[2]相比，用GM(1,N)建模的优点是所需的信息较少，通常只要有4个以上数据即可建模．

（2）建模的精度较高，能满足工程要求的需要，完全可以用于产能的预测．

（3）在建模的过程中，样本的选取很重要，样本要有代表性．

（4）用GM(1,N)模型预测气井产能是一种有效适用的方法，只要知道了气田区块内气井的静态参数，便可用此法预测出气井的产能．

参考文献

[1] 杨彦军，杨 宇，梁 波．气井二项式产能方程求解方法的改进与应用[J]．桂林工学院学报，2003，23（3）：271－273.

[2] 杨 宇，杨彦军，曾 焱．改进模拟退火算法在开发模式中的应用[J]．桂林工学院学报，2003，23（3）：266－270.

[3] 邓聚龙．灰色系统（社会．经济）[M]．北京：国防工业出版社，1985.

[4] 张国东．GM(1,N)灰色模型在压裂井评井选层中的应用[J]．天然气工业，2002，22（3）：31－34.

Applicatlon of GM(1,N) grey model to the gas well prediction of the off-take potential

YANG Yu[1]，ZENG Xian-bing[2]，GUO Chun-hua[3]

（1. *College of Energy Resources*，*Chengdu University of Technology*，*Chengdu* 610059，*China*；
2. *Southwest Exploration & Exploitation Institute of SLNOPEC Corp*，*Chengdu* 610081，*China*；
3. *Sichuan Institute of Technology*，*Zigong* 621709，*China*）

Abstract：In the research of the gas reservoir engineering ，the prediction of the off-take potential of the gas well is important for the design and adjustment of development. The theory of the grey systems to build an grey model is introduced. Grey-correlation analysis and GM (1,N) grey model are used to analyse the gas wells in Changqing gas field. Compared with the result of the actual measurement，the average absolute error is 0.38567，and average relative error is 6.74%. Compared with commom methods，the method is effective with a higher degree of precision.

Key words：grey model；grey-correlation analysis；gas well；prediction of the off-take potential