

基于集对分析原理的煤层气井产气量拟合度计算

张彦昭

(国投晋城能源投资有限公司,山西 晋城 048026)

摘要: 为了能够定量计算煤层气井产气量历史拟合结果的拟合度,以集对分析原理为理论基础,建立了计算煤层气井历史拟合曲线与实际生产曲线拟合程度的数学模型,以沁水盆地的2口煤层气井为研究对象,对其产气量历史拟合曲线拟合度进行计算,判断拟合曲线的效果。计算结果表明,建立的数学模型可以方便的计算出拟合曲线的拟合度,较准确的选择出拟合效果最好的曲线:1号井的拟合效果较好,其拟合度为拟合度为84.3%,拟合的参数可以作为以后勘探开发参数使用;2号井的拟合效果稍差,其拟合度为71.2%,拟合参数是否可用,需要考虑实际评价标准。

关键词: 煤层气井;集对分析;联系度;历史拟合;拟合度

中图分类号:TD131 文献标志码:A 文章编号:0253-2336(2014)10-0109-04

Calculation on Fitting Degree of Coalbed Methane Well Gas Production Based on Set Pair Analysis Principle

ZHANG Yan-zhao

(SDIC Jincheng Energy Investment Company Limited, Jincheng, 048026, China)

Abstract: In order to quantitatively calculate a fitting degree of the historical fitting results of the coalbed methane well gas production, based on a set pair analysis principle as a theoretical base, a mathematic model to calculate a fitting degree between a historical fitting curve of the coalbed methane well and the actual production curve was established. Based on the historical fitting achievement of the gas production quantity from two coalbed methane wells in Qinshui Basin as a study object, a calculation was conducted on the fitting degree and the fitting curve effect was judged. The calculation results showed that the established mathematic model could easily calculate the fitting degree of the fitting curve and could accurately select a best fitting effect curve. The fitting effect of No. 1 well was good, the fitting degree was 84.3% and the fitting parameters could be the parameters of late exploration and development. The fitting effect of No. 2 well was poor, the fitting degree was 71.2% and the fitting parameters should be considered with the actual evaluation standards for the application.

Key words: coalbed methane well; set pair analysis; connection degree; historical fitting; fitting degree

0 引言

煤层气储层数值模拟技术是研究煤层气储集、运移和产出规律,确定煤储层特征、煤层气井工作制度与产气量之间关系的有效手段^[1-2]。在计算机上重现煤层气开发的动态过程,是把勘探和试验结果中的储层和工程参数输入到所建立的储层模型中,通过对历史资料的拟合,弥补地质勘探和常规开发研究的不足^[3-4]。通过不断调整储层模型中输入的

参数,使模型计算出的历史动态与实际生产动态相一致,就是运用已知的历史动态反求未知的煤层气层特性参数的“反问题”^[5-7]。目前国内外有大量关于用曲线拟合已有数据并计算拟合度的研究,很多学者借助于COMET和COALGAS等模拟软件在许多煤层气区块对煤层气井的历史拟合进行了模拟,也得到了比较好的拟合曲线,由此也得出了许多有价值的研究结论。但实际过程中,通过模拟得出的拟合曲线不止一条,所选出的拟合曲线大多是靠

收稿日期:2014-05-13;责任编辑:曾康生 DOI:10.13199/j.cnki.cst.2014.10.026

作者简介:张彦昭(1964—),男,山西河曲人,高级工程师。Tel:18835610988 E-mail:hnkylbc@163.com

引用格式:张彦昭.基于集对分析原理的煤层气井产气量拟合度计算[J].煤炭科学技术,2014,42(10):109-112.

ZHANG Yan-zhao. Calculation on Fitting Degree of Coalbed Methane Well Gas Production Based on Set Pair Analysis Principle[J]. Coal Science and Technology, 2014, 42(10): 109-112.

目测辨别的,所得结果通常因人而异。拟合曲线与实际曲线这 2 条曲线之间的拟合程度究竟怎样,是否可以正确地反应两者间的相似关系却不知,对于拟合结果的精确度相关研究少。未来的数值模拟技术需要进一步提高结果的稳定性和精确度^[8],笔者通过运用集对分析原理建立的数学模型,尝试用数学计算的方法来定量确定历史拟合的拟合效果。

1 集对分析原理

集对分析是一种处理不确定性问题的系统分析方法,其核心就是把被研究的客观事物之间确定性联系与不确定性联系作为一个确定不确定系统来分析处理^[9-10]。由于该方法独特的优势,至今在科学技术和社会经济的许多领域得到了大量应用^[11-12]。所谓集对是指有一定联系的 2 个集合组成对子,集对原理就是在一定的背景下,对组成集对的 2 个集合 A 、 B 的特性做同一性、差异性、对立性分析^[4]。而集对的不确定关系用联系度表达式来描述,即

$$\mu_{(A-B)} = S/N + iF/N + jP/N \quad (1)$$

式中: $\mu_{(A-B)}$ 为集合 B 对集合 A 的联系度; N 为集合特性的总项数; S 为同一性的个数; P 为对立性的个数; F 为差异性的个数; i 为差异性不确定系数, $-1 < i < 1$; j 为对立系数,取 -1 。

为分析计算简便,一般令 $a = S/N$ 称为同一度; $b = F/N$ 称为差异度; $c = P/N$ 称为对立度。 a 、 b 、 c 分别表征集合 A 和 B 所呈现出的相同、相异、相反的关系,其中 a 、 b 、 c 满足归一化条件,即有关系式 $a + b + c = 1$,式(1)中一般可取 $i = (a - c) / (a + c)$ 。

2 关联系度计算方法过程

1) 根据研究对象,分别构造时间序列集合 A (x_1, x_2, \dots, x_k) 和时间序列集合 B (y_1, y_2, \dots, y_k), $k = 1, 2, \dots, n$, n 为元素个数,其中 x_k, y_k 分别为集合

A 与集合 B 按时间排列的数据。集合 A 和集合 B 就构成集对 (A, B) 。如集合 A 与集合 B 的元素间的数量级不同,则先按一定标准,进行数据规格化处理。

2) 计算构成集对的集合 A 与集合 B 对应元素之间的相对误差。若相对误差在区间 $(0, 10\%]$ 内,则认为集合 A 和集合 B 的元素具有相同的级别水平,即具有同一性,标记为 I。若相对误差在区间 $(10\%, 20\%]$ 内,则认为集合 A 、 B 的元素具有差异性,标记为 II。若相对误差大于 20% ,则认为集合 A 、 B 的元素具有对立性,标记为 III。

3) 统计集对 (A, B) 中具有同一性、差异性、对立性的元素对应的个数分别为 S 、 F 、 P ,即 I、II、III 中的项数。

4) 通过联系度表达式计算出联系度 μ ,结合同一度 a 、差异度 b 、对立度 c 综合分析得出的结果。

3 煤层气产量历史拟合度计算实例

以沁水盆地南部地区有代表性的 2 口煤层气井为研究对象,进行产气量历史拟合,用以上方法对结果进行定量分析。

1) 煤层气井生产情况。本次工作研究的 2 口煤层气井分别为 1 号和 2 号井。1 号井位于沁水县柿庄乡枣园村,排采历时 13 个月。排采过程分为 3 个阶段。第 1 阶段抽水降压,历时 55 d;第 2 阶段产气,历时 264 d,累计产气 $75.17 \times 10^4 \text{ m}^3$,最高产气量达 $6\,986 \text{ m}^3/\text{d}$;第 3 阶段历时 55 d,产气量降低。2 号井位于阳城县町店镇刘家腰村,连续生产 228 d。排采过程分为 3 个阶段,第 1 阶段排水产气,历时 76 d,产气量在 $0 \sim 468.4 \text{ m}^3/\text{d}$;第 2 阶段气产量上升,共 70 d,产气量从 $218.1 \text{ m}^3/\text{d}$ 到 $1\,346.7 \text{ m}^3/\text{d}$,之后又跌至 $645.8 \text{ m}^3/\text{d}$;第 3 阶段产气量缓慢下降,历时 82 d,产气量缓慢降低,最后维持在 $320 \text{ m}^3/\text{d}$ 。2 口井的参数调整,历史拟合结果见表 1^[5]。

表 1 各煤层气井初始储层参数

井号	渗透率/ $\times 10^{-3} \mu\text{m}^2$	储层压力/MPa	割理孔 隙度/%	吸附时 间/d	含气饱 和度/%	煤厚/ m	朗氏体积/ ($\text{m}^3 \cdot \text{t}^{-1}$)	朗氏压 力/MPa	含气量/ ($\text{m}^3 \cdot \text{t}^{-1}$)
1	0.95	3.36	2.00	10.44	95.20	6.33	53.57	3.17	23.09
2	0.73	2.83	2.00	2.76	95.80	2.90	41.32	3.22	24.17

运用美国先进能源公司(ARI)的煤储层数值模拟软件 COMET3 对 2 口煤层气井进行产气量的历史拟合,经过对参数的调整,分别得到了 3 组拟合效果较好的参数组,见表 2。

2) 应用计算过程。研究对象为实际数据曲线和历史拟合曲线,实际数据曲线上的数据点构成集合 A ,历史拟合曲线上对应的数据点构成集合 B ,则 A 和 B 构成集对 (A, B) ,其中对应点的相对误差计

算式为 $e_k = |(x_k - y_k) / x_k|$ 其中 e_k 为集合 A 中的第 k 个数据点与集合 B 中第 k 个数据点的相对误差。

表2 各井的3组参数拟合值

井号	储层压力/MPa	储层渗透率/ $10^{-3} \mu\text{m}^2$	含气量/ $(\text{m}^3 \cdot \text{t}^{-1})$	割理孔隙度/%	煤厚/m
1	3.00	1.50	23.10	2.00	6.33
	2.90	1.80	23.85	2.00	6.33
	3.15	1.20	22.60	2.00	6.33
2	2.90	0.50	19.62	3.50	6.60
	2.80	0.60	19.50	3.45	6.60
	2.95	0.45	19.73	3.57	6.60

将计算结果按 $(0, 10\%]$ $(10\%, 20\%]$ $(20\%, \infty)$ 分为 I、II、III 类。统计 I、II、III 中的项数,即为集合 A 和集合 B 对应的相同、相异、相反的数据对个数。数据的计算由 MATLAB 软件来完成,通过 MATLAB 计算相对误差,结果见表 3。据表 3 中数据按式 (1) 分别建立 2 口井的各参数组的联系度表达式,1 号井的产气量联系度表达式为 $\mu_{11} = 0.703 + 0.237i + 0.06j$; $\mu_{12} = 0.663 + 0.24i + 0.097j$;

$\mu_{13} = 0.723 + 0.193i + 0.084j$ 。其中 i 的取值为 $i = (a - c) / (a + c)$ $j = -1$ 。2 号井的气量联系度表达式为 $\mu_{21} = 0.671 + 0.197i + 0.132j$; $\mu_{22} = 0.706 + 0.175i + 0.119j$; $\mu_{23} = 0.719 + 0.145i + 0.136j$,其中 μ_{11} 、 μ_{12} 、 μ_{13} 为 1 号井的 3 组拟合曲线相对于实际曲线的联系度,以此 μ_{21} 、 μ_{22} 、 μ_{23} 类同。经计算,1 号井和 2 号井的产气量曲线联系度分别为: $\mu_{11} = 0.843$ 、 $\mu_{12} = 0.748$ 、 $\mu_{13} = 0.792$ 、 $\mu_{21} = 0.671$ 、 $\mu_{22} = 0.712$ 、 $\mu_{23} = 0.682$ 。

表3 2口井对应3组参数分类项数统计

井号	I 类	II 类	III 类	井号	I 类	II 类	III 类
1	211	71	18	2	153	45	30
	198	72	30		161	40	27
	217	58	25		164	33	31

从计算结果可知,1 号和 2 号井的最大拟合度分别为 $\mu_{11} = 0.843$ $\mu_{22} = 0.712$ 。其对应的参数组即为最佳参数,与初始参数组的数值变化对比见表 4。

表4 各井参数的初始值与最佳拟合值对比

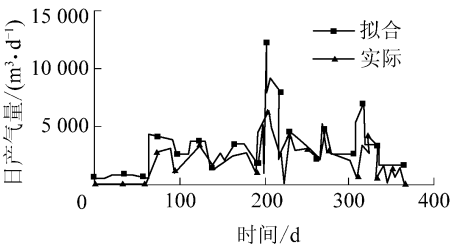
井号	储层压力/MPa		储层渗透率/md		含气量/ $(\text{m}^3 \cdot \text{t}^{-1})$		割理孔隙度/%		煤厚/m	
	初始	拟合	初始	拟合	初始	拟合	初始	拟合	初始	拟合
1	3.36	3.00	0.946	1.50	23.09	23.10	2.00	2.00	6.33	6.33
2	2.83	2.90	0.730	0.50	19.62	19.62	2.00	3.50	6.60	6.60

由最终确定的参数组进行拟合的产气量曲线如图 1 所示。

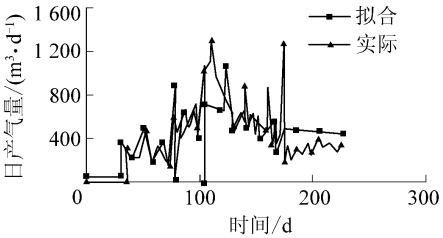
经过历史拟合,调整后的参数与初始值相比较,2 口井的含气量、煤厚几乎都没有变化。1 号井的储层压力由 3.36 MPa 降低为 3.00 MPa,减少了约 10.7%,储层渗透率由初始的 $0.946 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 升高到 $1.50 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,增加了 58.6%,变化较大,割理孔隙度没有变化;2 号井的储层压力由初始的 2.83 MPa 升高到 2.90 MPa,增加了约 2.5%,储层渗透率由原来的 $0.73 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 降低到 $0.50 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,降低了 31.5%,割理孔隙度由 2.00% 提高到 3.50%,增加了约 75%。其中 2 口井的储层压力和储层渗透率变化都比较大,这是因为这 2 项参数都属于不确定的参数,调整的空间范围都比较大。

4 结果分析

从计算结果来看,1 号井和 2 号井的拟合产气



(a) 1号井



(b) 2号井

图1 1号和2号煤层气井历史拟合曲线量曲线与实际产气量曲线的拟合度分别为 0.843 和 0.668,1 号井的拟合效果很好,2 号井的拟合效果较

差。这仅仅是从总体结果评价拟合效果,集对分析联系度表达式还可以通过 a 、 b 、 c 进行层次结构的细致分析。

对于1号井, $\mu = 0.703$, $\beta = 0.237$, $\rho = 0.06$,整体拟合度为84.3%,其中拟合度好的占70.3%,拟合度较好的占23.7%,较差的占6.0%。

对于2号井, $\mu = 0.706$, $\beta = 0.175$, $\rho = 0.119$,整体拟合度为71.2%,拟合结果不算好,其中拟合度好的占70.6%,较好的占18.5%,较差的占11.9%。

对比2口井的拟合效果,1号井的拟合效果比2号井的拟合效果要好的原因如下。

1) 实际产气量曲线型态。1号井的实际产气量曲线整体阶段性比较好,产气阶段比较平稳,相比较而言2号井的实际产气量曲线则变化幅度比较大,整体平稳性较差,由于模拟软件COMET3的内在模拟算法程序固定,所以软件对稳定性强的曲线拟合效果要好一些。

2) 联系度表达式中系数 j 的取值。按集对分析原理,式中都是取值为-1,由于2号井的Ⅲ类拟合点所占比例为11.9%,而1号井的Ⅲ类拟合点比例为6.0%,所以在 $j = -1$ 的情况下,计算的1号井的拟合结果要比2号井的拟合效果好。如果不考虑Ⅲ类拟合点,即 $j = 0$ 时,1号井的拟合度为94%,2号的拟合度为89.1%,拟合效果都很好,两者相差不大。

所以对于Ⅲ类拟合点的分析处理,如何对 j 取值,取决于实际生产中对于拟合效果和层次结构的要求。

5 结 论

通过用集对分析原理对沁南地区的2口煤层气井产气量历史拟合的拟合度计算,经过定量计算,对拟合出的三组参数进行对比分析,选择出了最佳拟合参数。其中1号井的拟合效果很好,2号井的拟合效果稍差,这是整体分析的结果。如果只看Ⅰ类、Ⅱ类的话,2号井的拟合效果也比较好的。如何合理的处理拟合效果差的数据点,需要以后进一步的研究。集对分析原理简单易懂,运用集对分析方法定量分析了煤层气井产气量历史拟合的效果,弥补了只是靠肉眼感性判定拟合效果的缺陷,能够清晰展现结果的层次结构,使得对结果的分析更加科学合理,提高了结果的可信度。

参考文献:

- [1] 赵 雯,朱炎铭,张晓莉,等.煤层气井历史拟合评述[J].中国煤层气,2010,7(3):20-22.
- [2] 张遂安.煤层气模拟原理及其应用[J].中国煤层气,1998,21(1):34-36.
- [3] 骆祖江,叶建平.沁水盆地FZ煤层气井网三维数值模拟[J].成都理工大学学报:自然科学版,2005,32(3):271-277.
- [4] 苏现波,林晓英.煤层气地质学[M].北京:煤炭工业出版社,2009:54-56.
- [5] 孟雅杰.一种实用的自动历史拟合方法[J].大庆石油学院学报,1995,13(1):16-20.
- [6] 王晓梅,张 群,张培河,等.煤层气井历史拟合方法探讨[J].煤田地质与勘探,2003,23(1):20-22.
- [7] 袁奕群,袁庆峰.黑油模型在油田开发中的应用[M].北京:石油工业出版社,1995:78-79.
- [8] 秦 勇,袁 亮,胡千庭,等.我国煤层气勘探与开发技术现状及发展方向[J].煤炭科学技术,2012,40(10):1-6.
- [9] 赵克勤,宣爱理.集对论一种新的不确定性理论方法与应用[J].系统工程,1996,14(1):18-23.
- [10] 赵克勤.集对分析与熵的研究[J].浙江大学学报:社会科学版,1992,6(2):65-72.
- [11] 朱 兵,王文圣,王红芳,等.集对分析中差异不确定系数 i 的探讨[J].四川大学学报,2008,40(1):5-9.
- [12] 邓红霞,李存军,赵太想,等.基于SPA的水文预测模型评估[J].四川大学学报,2006,38(6):34-37.
- [13] ZOU Ming-jun, WEI Chong-tao, PAN Hai-yang, et al. Productivity of Coalbed Methane Wells in Southern of Qinshui Basin [J]. Mining Science and Technology, 2010, 20(5):765-769.

(上接第108页)

- [5] 宋红娟.千米定向探放水钻机在神华宁煤集团水害治理中的应用前景展望[C]//全国煤矿机械与救援装备高层研讨暨新产品技术交流会论文集.沈阳:北方交通重工集团,2011.
- [6] 国家煤矿安全监察局.煤矿防治水规定[M].北京:煤炭工业出版社,2009:60-63.
- [7] 郭东琼.煤矿井下随钻测量定向钻进用PDC钻头的研制[J].金刚石与磨料磨具工程,2011,31(3):31-34.
- [8] 刁文庆,唐大勇.定向钻进用胎体式PDC钻头烧制工艺研究[J].煤炭科学技术,2013,41(3):22-24.
- [9] 石智军,田宏亮,田东庄,等.煤矿井下随钻测量定向钻进使用手册[K].北京:地质出版社,2012:6-7.
- [10] 孙荣军.煤矿井下随钻测量技术及钻孔轨迹数据处理方法研究[D].西安:煤炭科学研究总院西安研究院,2009:8-16.
- [11] 王二鹏,刘 波,郭文杰.随钻测量技术在我国煤矿井下水平定向钻进中的应用与展望[C]//沈阳国际安全科学与技术学术研讨会论文集.沈阳:东北大学出版社,2010.
- [12] 石智军.煤矿井下定向分支孔钻进技术的研究[R].西安:煤炭科学研究总院西安分院,1994.
- [13] 孙新胜,王 毅,郭 涌.定向钻进技术在煤矿井下探放水孔施工中的应用[J].煤田地质与勘探,2005,33(S1):22-24.