

一种新的计算天然气偏差因子的方法

刘曰武¹ 吴学松¹ 陈维良¹ 高磊岩²

(1. 中国科学院力学研究所工程科学部 北京 100080; 2. 辽河油田浅海石油开发公司 辽宁盘锦 124010)

摘要 对目前国内外使用的天然气偏差因子计算方法进行了分类和评价分析,指出各类方法的优缺点。在此基础上,建立了一种新的偏差因子计算方法,给出了新方法的基本思想、计算方法和计算结果。利用三种方式对计算结果进行了分析对比。对比结果表明:计算结果与 Standing-Katz 图版的误差趋于 0;与目前公认最好的状态方程方法——DAK 方法的结果相比,其最大相对误差小于 1%。从而验证了该偏差因子计算方法的正确性。新的偏差因子计算方法具有计算速度快、精度高、范围大、计算机操作方便等优点。

关键词 天然气 偏差因子 计算方法 评价分析

引言

天然气的 PVT 物性参数主要是指气体临界压力、临界温度、偏差因子、体积系数、压缩系数、粘度等。除临界参数外,其它参数的变化都与气体偏差因子存在紧密关系。因此,研究天然气的 PVT 物性参数时,气体偏差因子是关键影响因素。天然气偏差因子或称 z 因子,是指在某一温度和压力条件下,同一质量气体的真实体积与理想体积的比值。通过偏差因子,可以进一步求解天然气的体积系数、膨胀系数和粘度等。

对天然气 PVT 物性的研究始于 1941 年^[1],在 20 世纪 70 年代达到研究高峰^[2~11],后续研究工作逐渐减少^[12,13]。近年来,随着我国天然气工业的发展,该问题又成为研究热点之一^[14,15]。在 Standing 和 Katz 于 1942 年发表了确定气体偏差因子图版^[1]以后,Standing-Katz 图版作为获取天然气压缩因子的实用数据源而使用至今。随着计算机的发展,很多学者提出了用解析式计算求解偏差因子的方法,以利于大量的工程科学计算。

到目前为止,计算偏差因子的方法主要分为三大类:第一类是直接 Standing-Katz 图版上特定点的偏差因子值存储到计算机,其余点的偏差因子值

通过插值求解;第二类是将 Standing-Katz 图版通过曲线拟合得到计算关系式;第三类是利用状态方程计算偏差因子。

早期由于受到计算机发展水平的限制,对偏差因子计算方法的综合评价,一般需要考虑各方法对内存的需求,对运行时间的需求,同时要适当地考虑精度的要求。插值方法从提出之后并没有得到广泛的应用。其原因在于当时的计算机技术不能满足该方法的要求。一方面计算偏差因子所需的数据存储量较大;另一方面插值编程对微型计算机较困难。在插值方法中,代表人物是 Gray 和 Sim^[2],他们提出的插值方法只用了 Standing-Katz 图版中的 400 个数据组成一个 20×20 的矩阵,来对整个 Standing-Katz 图版进行插值;对第二类方法则较适合于微型计算机编程计算。但每种拟合方法都只能适合于限定范围之内,无法进行外推,而且拟合的误差是不可避免的;第三类方法是从状态方程入手进行计算的,在不同的方程中建立的模型因素是不同的,因而也存在一定误差。Takacs^[12]对包括曲线拟合和状态方程推导两类方法在内的 10 种偏差因子计算模型进行了综合对比,主要对不同内存要求,不同运算时间要求下的偏差因子计算方法的选择提供了理论依据。分析认为 DAK 法的应用效果最好,相对误差最小,低误差区域更大。

[作者简介] 刘曰武,男,1965 年出生,副研究员,主要从事油藏工程、试井分析、水文地质工程研究。

随着计算机技术的飞速发展,偏差因子计算模型对计算机内存、运算时间的要求都可以忽略不计。最近几年对偏差因子的综合评价主要体现在计算精度上。Standing-Katz 图版经过多年的广泛应用已证明其正确性,就是本文提出偏差因子新的计算方法的基本。本文对偏差因子计算方法进行了分类,并给出了各类方法的基本评价,在此基础上通过三种方式验证了方法的正确性。

插值方法原理

1. 基本思想

在生产实践和科学研究所遇到的大量变化规律中,只有部分是可以透过变量间的解析函数关系进行明确描述的,而相当一部分的变化规律是通过实验测试得到离散的数据关系。要得到简单的函数关系必须采用插值和外推方法对实验数据进行分析处理。插值和外推方法主要解决以下两类问题:第一类问题是虽然变化规律的函数关系 $y = f(x)$ 在某个区间 $[a, b]$ 上是客观存在的,但是却不能得到具体的解析表达式,只能通过观察、测量或实验得到函数在区间 $[a, b]$ 上一些离散点上的函数值、导数值等;第二类问题是虽然变化规律有明确的解析表达式,但却过于复杂而不便于进行理论分析和数值计算。透过插值和外推方法可以构造一个既能反映函数的特性又便于计算的简单函数,近似代替原来的函数。插值法就是寻求近似函数的方法之一。

2. 基本方法

设函数在区间 $[a, b]$ 上 $n + 1$ 个互异节点 x_0, x_1, \dots, x_n 上的函数值分别为 y_0, y_1, \dots, y_n , 求 n 次插值多项式 $P_n(x)$, 使满足条件 $P_n(x_i) = y_i, i = 1, 2, \dots, n$ 。

令

$$L_n(x) = y_0 l_0(x) + y_1 l_1(x) + \dots + y_n l_n(x) = \sum_{i=0}^n y_i l_i(x) \quad (1)$$

其中: $l_0(x), l_1(x), \dots, l_n(x)$ 为以 x_0, x_1, \dots, x_n 为节点的 n 次插值基函数, 则 $L_n(x)$ 是一次数不超过 n 的多项式, 且满足 $L_n(x_i) = y_i (i = 1, 2, \dots, n)$, 根据插值多项式的唯一性, 得

$$P_n(x) = L_n(x) \quad (2)$$

上述(1)式表示的插值多项式称为拉格朗日(Lagrange)插值多项式。

3. 偏差因子的插值计算

利用 Standing-Katz 图版上 5940 个已知点的偏差因子值, 透过拉格朗日插值计算得到图版范围内任意拟对比温度和拟对比压力下的偏差因子值。拉格朗日插值的经典公式为

$$P(x) = \sum_{k=1}^n f(x_k) l_k(x) \quad (3)$$

其中
$$l_k(x) = \prod_{j=1, j \neq k}^n \frac{x - x_j}{x_k - x_j}$$

该问题中, 已知 5940 个插值节点 $(T_{ri}, P_{ij}) (i = 1, \dots, m; j = 1, \dots, n)$ 及对应的函数值 $Z_{ij} = f(T_{ri}, P_{ij})$, 要求给定点 (T_r, P_r) 处对应的函数值 Z , 可采用二元拉格朗日插值。即先对每个 $i (i = 1, \dots, m)$, 以 $P_{ij} (j = 1, \dots, n)$ 为插值节点, $Z_{ij} (j = 1, \dots, n)$ 为对应函数值, P_r 为插值变量, 作一元函数插值得到 $u_i (i = 1, \dots, m)$; 再以 $T_{ri} (i = 1, \dots, m)$ 为插值节点, u_i 为对应函数值, T_r 为插值变量, 作一元函数插值得到所求值 Z 。

拉格朗日方法的本质就是用 n 次多项式去拟合函数 $f(x)$, 增多插值结点。即提高插值多项式 $P_n(x)$ 的次数, 能使 $P_n(x)$ 在更多的点上与插值函数 $f(x)$ 相等。若 n 过大, 则在两个插值结点之间 $P_n(x)$ 与 $f(x)$ 的差异反而变大, 且越靠近端点其逼近的效果就越差, 此即“龙格”(Runge)现象。为了避免出现这种现象, 采用分段低次插值, 将 (T_r, P_r) 分为不同的区域进行插值计算, 即对每一个 (T_r, P_r) 只选取其二维平面内临近的 5×5 个点进行插值。利用本文计算方法所得到偏差因子图如图 1 所示。

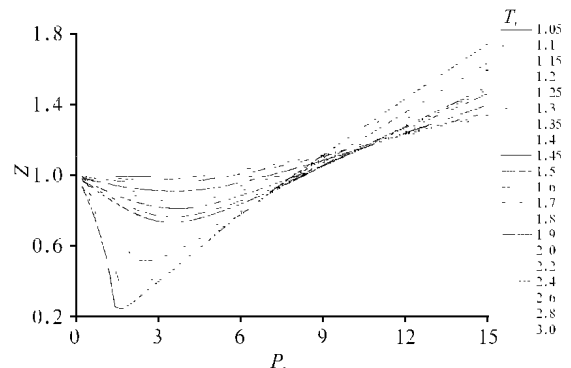


图1 本文计算方法得到的偏差因子图版

方法验证

偏差因子计算方法在工程计算中的大量使用,迫切需要以易于编程实现的数学解析式代替 Standing-Katz 图版。如何在实际应用中,在众多的偏差因子计算方法里选取合适的方法和寻找新的计算方法,已经成为国内外天然气工程研究人员的一个研究重点之一。每一位研究者提出其自己的偏差因子计算模型时,也声明了其使用范围。总体来说,由于 Standing-Katz 图版本身的限制,利用曲线拟合得到的偏差因子计算模型,其使用范围基本上限定在与 Standing-Katz 图版同样的参数范围内,即 $P_r \leq 15.0$, $1.0 \leq T_r \leq 3.0$ 。有些方法的使用范围甚至要远小于该区域。而通过状态方程得到的偏差因子计算方法,则多数可以外推到 $P_r \leq 30.0$ 。为了验证本文提出方法的正确性和计算精度,从以下三个方面进行对比研究。

1. 有实验数据的偏差因子曲线与 Standing-Katz 图版的对比验证

为了与 Standing-Katz 图版进行对比,在 Standing-Katz 图版上分别选定已有 5 个 T_r 值:1.05, 1.5, 2.0, 2.8, 3.0, 利用插值法对不同的 P_r 计算了相应的 Z 值。将计算得到的结果与图版上对应的已知进行比较得到的结果如图 2 所示。点为图版上已知数据点,曲线为计算得到的偏差因子曲线图。

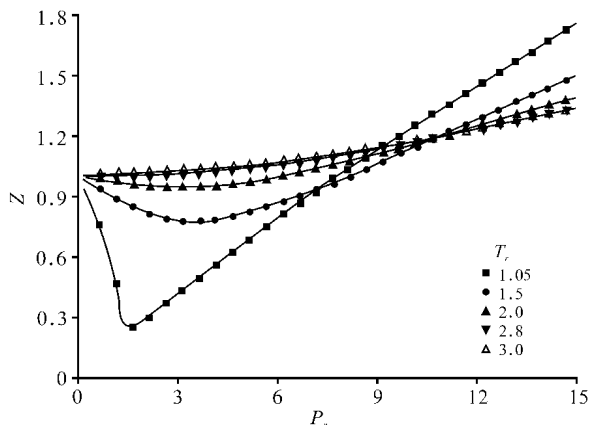


图2 有实验数据的偏差因子曲线与 Standing-Katz图版的对比验证示意曲线

从图 2 可以看出,对于不同的 T_r , 计算所得到的偏差因子与已知数据不论趋势还是数值都符合的很好,误差趋于 0。

2. 无实验数据的偏差因子曲线与 Standing-Katz 图版的对比验证

分别给定 $T_r = 2.5, 2.7, 2.9$ 三个图版上未有的 T_r 值,对不同的 P_r 计算了相应的 Z 值,并与已知图版进行比较(见图 3)。实线为图版上已有曲线,虚线为图版上未有曲线。

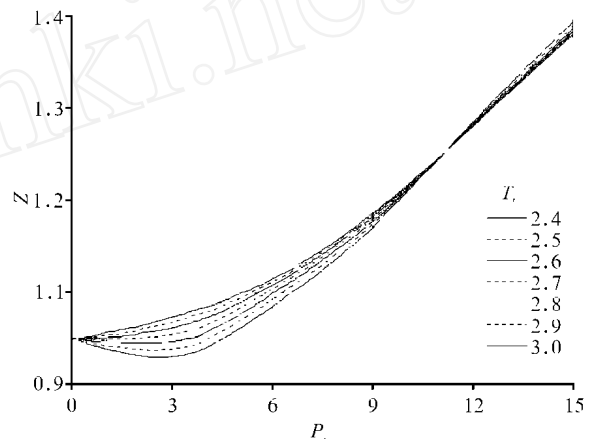


图3 无实验数据的偏差因子曲线与 Standing-Katz图版的对比验证示意曲线

从图 3 可以看出,计算得到的偏差因子曲线夹在对应曲线之间,其趋势及数值变化合乎图版规律。

3. 外推偏差因子曲线与 DAK 方法计算结果的对比验证

将本文方法外推到 Standing-Katz 图版以外的对比压力范围,并利用在图版范围内误差较小的 DAK 方法与本文提出方法的外推计算结果进行了比较。当对比压力在 15.0~30.0 的范围内时,计算结果的对比如图 4 所示。

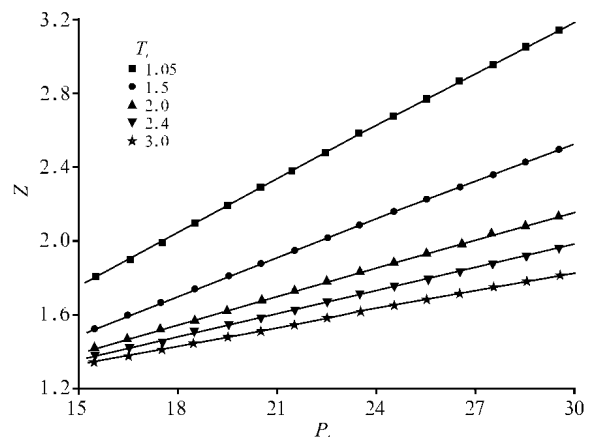


图4 外推偏差因子曲线与 DAK 方法计算结果的对比图

从图 4 可以看出,偏差因子的外推计算结果与 DAK 方法结果具有较好的一致性,从而说明本文提

出的方法具有较强的适用范围。从另一方面说,这两个结果的一致性也证明了插值法的计算结果与图版之间的误差是微乎其微的。本文所提出的方法在对比压力为 15.0 ~ 30.0 的范围内的计算结果与 DAK 方法计算结果最大相对误差小于 1%,远低于工程误差 5% 的要求,因此具有较好的工程实用性。

结 论

1. 对国内外提出的天然气偏差因子的主要计算方法进行了分类,指出了各类方法的优缺点。

2. 建立了一种新的偏差因子计算方法,给出了天然气偏差因子计算新方法的基本思想、计算方法和计算结果,得到新的偏差因子图版。

3. 利用三种方式对计算结果进行了分析对比,验证了本文提出新方法的正确性。

4. 本文所提出方法外推计算结果与 DAK 方法计算结果最大相对误差小于 1%,具有较好的工程实用性。

5. 本文提出的方法具有计算速度快、精度高、计算范围大、计算机操作方便等多方面的特点。

参 考 文 献

- 1 Standing M B, Katz D L. Density of Natural Gases. Trans. AIME, 1942, 146: 140 ~ 149
- 2 Gray E H, Sims H L. Z-Factor Determination In a Digital Computer. OGI, July 20, 1959: 80 ~ 81

- 3 Dranchuk P M, Quon D. A General Solution of the Equations Describing Steady State Turbulent Compressible Flow in Circular Conduits. JCPT, Summer 1965: 60 ~ 65
- 4 Papay J. A Termelotechnologiai Parameterek Valtozaisa a Gazeleplemuvelese Soran. OGIL Musz, Tud, Kuzl, Budapest, 1968: 267 ~ 273
- 5 Yarborough L, Hall K R. A New Equation-of-State For Z-Factor Calculations. OGI, June 18, 1973: 82 ~ 92
- 6 Yarborough L, Hall K R. How to Solve Equation of State for Z-Factor. OGI, Feb. 18, 1974: 86 ~ 88
- 7 Burnett R R. Calculator Gives Compressibility Factors. OGI, June 11, 1979: 70 ~ 74
- 8 Dranchuk P M, Purvis R A and Robinson D B. Computer Calculations of Natural Gas Compressibility Factors Using the Standing and Katz Correlations. Institute of Petroleum Technical Series, No. IP74 - 008, 1974
- 9 Dranchuk P M, Abou Kasseem J H. Calculations of Z-Factor For Natural Gases Using Equations of State. JCPT, July-Sept. 1975: 34 ~ 36
- 10 Takacs G. Comparison Made for Z-Factor Calculation. OGI, Dec. 20, 1976: 64 ~ 67
- 11 Gopal V N. Gas Z-Factor Equations Developed For Computer. OGI, Aug. 8, 1977: 58 ~ 61
- 12 Takacs G. Comparing Methods For Calculation Z-Factor. OGI, May 1989, 15: 43 ~ 46
- 13 Khaled A. Analysis Shows Magnitude of Z-Factor Error. OGI, Nov 27, 1995: 65 ~ 69
- 14 袁自学. 计算偏差因子经验公式的优化选择. 新疆石油地质, 1996, 17(2): 163 ~ 167
- 15 张明禄, 胡建国, 屈雪峰. 应用状态方程计算天然气偏差因子的方法评价. 天然气工业, 2003, 23(2): 69 ~ 71

本文收稿日期: 2007 - 01 - 09 编辑: 穆立婷

2007 年《油气井测试》征订启事

《油气井测试》是由中国石油天然气集团公司主管、华北石油管理局主办的国内试油、测试行业惟一公开发行的专业技术刊物,是河北省优秀科技期刊、国家中文核心期刊、中国科技论文统计源期刊、“万方数据—数字化期刊群”全文收录期刊、中国期刊光盘版期刊。辟有理论与方法研究,解释评价与应用,工艺技术,仪器装备,综述,争鸣,企业广告,消息等栏目,主要报导国内常规试油技术、地层测试技术、完井技术(包括射孔、排液、诱喷、防砂、投产管柱设计等)及测试资料处理解释、油气井增产措施等方面生产、科研技术新发展和应用效果等内容。国内、外公开发行。欢迎各单位和个人订阅,欢迎各单位刊登相关产品及企业形象广告。

《油气井测试》为双月刊,大 16 开本(80 页),全年 6 期,每期定价 10 元,全年定价 60 元;精装合订本每册定价 80 元。

中国标准连续出版物号:ISSN 1004 - 4388 CN13 - 1147/TE 广告经营许可证号:1310004000046

《油气井测试》杂志由《油气井测试》编辑部办理订阅发行。

1. 银行汇款单位:华北石油管理局资金结算中心万庄结算处(请务必注明“测试订刊费”)

开户银行:中国工商银行廊坊万庄支行 帐号:0410000409221002062

2. 邮局汇款地址:(065007)河北省廊坊市万庄 43 号信箱《油气井测试》编辑部

联系人:方志慧 联系电话:(0317)2552634 传真:(0317)2551432 电子信箱:yqjcs@petro-hb.com.cn

WELL TESTING (YOUQIJING CESHU)

Vol. 16 No. 2 (Serial No. 100) 2007

Abstracts

·Research of Theory & Method ·

Study on Determination of the Radius-of- Investigation. 2007,16(2):1~3

Qi Liwei, Wang Xiaodong (Power Source Department, China Geoscience University (Beijing))

A general formula of drawdown radius-of- Investigation including typical linear flow, radial flow and spherical flow is presented firstly based on the solution to the problem of general radial flows with a transient point sink. Secondly, an improved formula of drawdown radius-of- Investigation for a non-Newtonian power-law fluid is obtained in terms of the new solution to the model of the fluid pseudo-steady state flow. At last, Peaceman's buildup radius-of- Investigation formula is introduced.

Key words: radius of investigation, well test analysis, non-newtonian power low fluid, draw down, build up

A New Method for Calculating Natural Gas Compressibility Factors. 2007,16(2):4~7

Liu Yuewu, Wu Xuesong, Chen Weiliang (Division of Engineering Science, Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences), Gao Leiyan (Offshore Oil Development Company, Liaohe Oilfield)

The gas compressibility factors calculating methods in common use are classified and evaluated, and their advantages and disadvantages are described in this paper. Based on the comparison and analysis, a new method for calculating natural gas compressibility factors has been developed with its fundamental idea, calculating method and results. By comparing with other results in three different manners, the results show that the errors between the new method developed in this study and Standing-Katz type curve approximated to zero, and the maximal relative errors between the new method——DAK method, which is the most accuracy method for calculating Z-factor by using EOS, is less than 1%. The advantages of the method are that the computation speed is quick, the precision is high, the range of application is large.

Key words: nature gas, gas deviation factors, calculating method, evaluation and analysis

Unsteady Well Testing for CBM (Coal Bed Methane). 2007,16(2):8~11

Liang Zhijun (SINO-Australia Combination Mining Technical Development, Co., Ltd.), Liao Xinwei (China Petroleum University), Li Xiang (Ningxia Province Baijigou Mining Factory, Shenhua Coal Co., Ltd), Shao Longyi (China Mining University)

Theory, method and application of injection/down pressure testing analysis for CBM is studied and some of formation parameters of permeability, reservoir pressure, skin factor and closure pressure have been gained. For analyzing these comprehensively obtained geologic data, it is judged that these values are corresponds to actual situation basically and these data are used for later period of production well's design and plan of well net which increases productivity and income and gains a good economical effect.

Key words: CBM, well testing, application

The Processing Methods to the Deep Gas Well Testing Data. 2007,16(2):12~13

Zou Cunyou (Key Laboratory of Exploration Technologies for Oil and Gas Resources (Yangze University), Ministry of Education), Li Zhiping, Wang Shuping, Huang Zhiwen, Xu Jinjin (China University of Geosciences), Li Yanping (Exploration and Exploitation Academy, Qinghai Oilfield)

To the problems of the slope of the early period on log-log plot is more than 1 and the data of the middle period and late period is too discrete which makes the early period of theoretical curve can not be matched and too discrete middle and later data makes too difficult for interpreters to make acute analysis. In the paper, the method that using tested pressure, temperature to calculate PVT parameters and using viscosity and compressibility to correct the real pressure point is studied and integral transformation to deal with derivative data is put out which can make the derivative plot more smoothly. The applications about the two methods prove that they can make good effects for the interpretation for deep well.

Key words: deep-gas well, slope of the early period, discrete, theoretical curve, pressure corrected, integral transformation

Well Testing Model Selection and Reservoir Annotation to Low Permeability Reservoirs. 2007,16(2):14~16

Yang Xiuxiang, Cheng Shiqing, Yuan Yujin, Yang Tianlong (Key Laboratory of Petroleum Engineering, Ministry of Education, China University Petroleum)

A lot of well testing data for low permeability reservoirs were analyzed and their curve characteristics were summarized in Changqing oilfield in this paper. The data should be interpreted according to composite model on basis of interface addition friction when derivative curves rise. A boundary reservoir with a good connectivity should be considered as low permeability zone or residual region when the matching with impermeable boundary is used. Through the analysis for well testing interpretation model in low permeability reservoirs the interpretation result including the reservoir and performance information can be announced.

Key words: low permeability reservoir, well test, composite model, boundary