

离心式压缩机多变指数的确定

李 宁* 孙立刚 胡柏松

(中国石油天然气管道工程有限公司)

李 宁 孙立刚等:离心式压缩机多变指数的确定,油气储运,2009,28(8) 16~19。

摘 要 以离心式压缩机多变指数为研究对象,提出了求解方法。通过具体算例,计算了某种组分的天然气在一定的压力、温度、多变效率下的多变指数;分析了多变指数随温度、压力、多变效率的变化趋势,为压缩机功率计算提供了参考依据。

主题词 离心式压缩机 多变指数 BWRS 方程 计算 方法

一、前 言

压缩机是管道输气的核心设备。压气站的投资占输气管道总投资的 20%~25%,压气站经营费用占总经营费用的 40%~50%,而压缩机组的投资占压气站投资的 1/2 以上,压缩机的燃料消耗占压气站经营费用的 80%以上。可见,压缩机的工作性能直接影响整个工程的投资和运行费用^[1]。

对于离心式压缩机,多变指数是影响实际功率的重要参数。影响多变指数的因素包括温度、压力、多变效率等。由于凭借经验选择的参数有可能与实际情况不匹配,因此有必要寻找一套切实可行的方法来确定多变指数。为此,研究了一种计算离心式压缩机多变指数的方法,并分析了不同压力、温度、多变效率下天然气多变指数的变化趋势,可以为工艺布站过程中离心式压缩机的选择提供技术支持和参考依据。

二、计算原理和公式

1、BWRS 方程

计算所采用的 BWRS 方程是一个多参数状态方程,是对 BWR(Betnedict-Webb-Rubin)方程的改进式,也是目前认为用于天然气计算最精确的方程式之一,其形式为^[2]:

$$p = \rho RT + \left(B_0 RT - A_0 - \frac{C_0}{T^2} + \frac{D_0}{T^3} - \frac{E_0}{T^4} \right) \rho^2 + \left(bRT - a - \frac{d}{T} \right) \rho^3 + a \left(a + \frac{d}{T} \right) \rho^6$$

$$+ \frac{c\rho^3}{T^2} (1 + \gamma\rho^2) \exp(-\gamma\rho^2) \quad (1)$$

式中 p ——系统的压力, kPa;

T ——系统的温度, K;

ρ ——气体的密度, kmol/m³;

R ——气体常数, 8.314 3 kJ/(kmol · K)。

2、天然气密度 ρ 的求解

式(1)可写为:

$$F(\rho) = \rho RT + \left(B_0 RT - A_0 - \frac{C_0}{T^2} + \frac{D_0}{T^3} - \frac{E_0}{T^4} \right) \rho^2 + \left(bRT - a - \frac{d}{T} \right) \rho^3 + a \left(a + \frac{d}{T} \right) \rho^6 + \frac{c\rho^3}{T^2} (1 + \gamma\rho^2) \exp(-\gamma\rho^2) - p \quad (2)$$

采用正割法, 对式(2)进行求解, 迭代公式为:

$$\rho_{k+1} = \frac{\rho_{k-1} F(\rho_k) - \rho_k F(\rho_{k-1})}{F(\rho_k) - F(\rho_{k-1})} \quad (3)$$

迭代精度为 0.000 1, 初值 $\rho_1 = 0.0$, $\rho_2 = \frac{p}{RT}$ 。

3、天然气压缩因子 Z 的求解

$$Z = 1 + \left(B_0 - \frac{A_0}{RT} - \frac{C_0}{RT^3} + \frac{D_0}{RT^4} - \frac{E_0}{RT^5} \right) \rho + \left(b - \frac{a}{RT} - \frac{d}{RT^2} \right) \rho^2 + \frac{a}{RT} \left(a + \frac{d}{T} \right) \rho^5 + \frac{c\rho^2}{RT^3} (1 + \gamma\rho^2) \exp(-\gamma\rho^2) \quad (4)$$

4、天然气定容比热容 c_v 的求解

$$c_v = c_v^0 + \int_0^p - \frac{T}{\rho^2} \left(\frac{\partial^2 p}{\partial T^2} \right)_\rho d\rho \quad (5)$$

如果已知标准状态下的定压比热容 c_p^0 , 即可求得标准状态下的定容比热容 c_v^0 :

* 065000, 河北省廊坊市金光道 22 号; 电话: (010) 69217732。

$$c_v^0 = \frac{c_p^0}{\rho_0} \mu - R \quad (6)$$

式中 μ ——天然气的分子量;

ρ_0 ——标准状态下天然气的密度。

$\left(\frac{\partial^2 p}{\partial T^2}\right)_\rho$ 可由式(1)求得:

$$\begin{aligned} \left(\frac{\partial^2 p}{\partial T^2}\right)_\rho = & \left(-\frac{6 C_0}{T^4} + \frac{12 D_0}{T^5} - \frac{20 E_0}{T^6}\right) \rho^2 - \frac{2 d}{T^3} \rho^3 \\ & + \frac{2 a d}{T} \rho^6 + \frac{6 c \rho^3}{T^4} (1 + \gamma \rho^2) \exp(-\gamma \rho^2) \quad (7) \end{aligned}$$

则:

$$\begin{aligned} c_v = & c_v^0 + \left(\frac{6 C_0}{T^3} - \frac{12 D_0}{T^4} + \frac{20 E_0}{T^5}\right) \rho + \frac{d}{T^2} \rho^2 \\ & - \frac{2 a d}{5 T^2} \rho^5 + \frac{3 c}{\gamma T^3} \cdot [(\gamma \rho^2 + 2) \exp(-\gamma \rho^2) - 2] \quad (8) \end{aligned}$$

5、天然气定压比热容 c_p 的求解

定压比热容 c_p 可由下式求得:

$$c_p = c_v + \frac{T}{\rho^2} \cdot \frac{\left(\frac{\partial p}{\partial T}\right)_\rho}{\left(\frac{\partial p}{\partial \rho}\right)_T} \quad (9)$$

$\left(\frac{\partial p}{\partial T}\right)_\rho$ 和 $\left(\frac{\partial p}{\partial \rho}\right)_T$ 可由式(1)求得:

$$\begin{aligned} \left(\frac{\partial p}{\partial T}\right)_\rho = & \rho R + \left(B_0 R + \frac{2 C_0}{T^3} - \frac{3 D_0}{T^4} + \frac{4 E_0}{T^5}\right) \rho^2 \\ & + \left(b R + \frac{d}{T^2}\right) \rho^3 - \frac{a d}{T^2} \rho^6 - \frac{2 c \rho^3}{T^3} (1 + \gamma \rho^2) \\ & \times \exp(-\gamma \rho^2) \quad (10) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \left(\frac{\partial p}{\partial \rho}\right)_T = & R T + 2 \left(B_0 R T - A_0 - \frac{C_0}{T^2} + \frac{D_0}{T^3} - \frac{E_0}{T^4}\right) \rho \\ & + 3 \left(b R T - a - \frac{d}{T}\right) \rho^2 + 6 a \left(a + \frac{d}{T}\right) \rho^5 \\ & + \frac{3 c \rho^2}{T^2} \left(1 + \gamma \rho^2 - \frac{2}{3} \gamma^2 \rho^4\right) \exp(-\gamma \rho^2) \quad (11) \end{aligned}$$

6、天然气温度绝热指数 k_T 的求解

在高压下, $k = c_p / c_v$ 不能称为绝热指数, 需要求绝热温度绝热指数 k_T 。

$$\frac{1}{k_T} = 1 - \frac{p}{\rho^2 c_p} \frac{\left(\frac{\partial p}{\partial T}\right)_\rho}{\left(\frac{\partial p}{\partial \rho}\right)_T} \quad (12)$$

7、压缩机多变指数的求解

在实际计算中, 所采用的多变指数是指温度多变指数。已知效率 η 和温度绝热指数 k_T , 可以求出温度多变指数 m_T :

$$m_T = \frac{k_T \eta}{k_T \eta - (k_T - 1)} \quad (13)$$

三、状态方程参数的求解

1、纯组分

对于纯组分 i , BWRS 状态方程式中的参数 A_0 、 B_0 、 C_0 、 D_0 、 E_0 、 a 、 b 、 c 、 d 、 α 、 γ 可由下列公式求得:

$$\left. \begin{aligned} \rho_{ci} \cdot B_{0i} &= A_1 + B_1 \cdot \omega_i \\ \frac{\rho_{ci} \cdot A_{0i}}{R T_{ci}} &= A_2 + B_2 \cdot \omega_i \\ \frac{\rho_{ci} \cdot C_{0i}}{R T_{ci}^3} &= A_3 + B_3 \cdot \omega_i \\ \rho_{ci}^2 \cdot \gamma_i &= A_4 + B_4 \cdot \omega_i \\ \rho_{ci}^2 \cdot b_i &= A_5 + B_5 \cdot \omega_i \\ \frac{\rho_{ci} \cdot a_i}{R T_{ci}} &= A_6 + B_6 \cdot \omega_i \\ \rho_{ci}^3 \cdot \alpha_i &= A_7 + B_7 \cdot \omega_i \\ \frac{\rho_{ci}^2 \cdot c_i}{R T_{ci}^3} &= A_8 + B_8 \cdot \omega_i \\ \frac{\rho_{ci} \cdot D_{0i}}{R T_{ci}^4} &= A_9 + B_9 \cdot \omega_i \\ \frac{\rho_{ci}^2 \cdot d_i}{R T_{ci}^2} &= A_{10} + B_{10} \cdot \omega_i \\ \frac{\rho_{ci} \cdot E_{0i}}{R T_{ci}^5} &= A_{11} + B_{11} \cdot \omega_i \cdot \exp(-3.8 \omega_i) \end{aligned} \right\} \quad (14)$$

式中 T_{ci} ——纯物质 i 的临界温度参数, K;

ρ_{ci} ——纯物质 i 的临界密度参数, kmol/m³;

ω_i ——偏心因子。

式(14)中的 A_i 值和 B_i 值是 Starling 对正构烷烃进行多种热力学性质分析 ($P-V-T$, 焓和蒸汽压) 得到的, T_{ci} 值、 ρ_{ci} 值及 ω_i 值为部分物质的临界参数和偏心因子^[1]。

2、天然气混和气体

对于天然气混合气体, BWRS 状态方程参数按照以下混合规则计算^[1]:

$$\begin{aligned}
 A_0 &= \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n x_i x_j A_{0i}^{1/2} A_{0j}^{1/2} (1 - k_{ij}) \\
 B_0 &= \sum_{i=1}^n x_i B_{0i} \\
 C_0 &= \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n x_i x_j C_{0i}^{1/2} C_{0j}^{1/2} (1 - k_{ij})^3 \\
 D_0 &= \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n x_i x_j D_{0i}^{1/2} D_{0j}^{1/2} (1 - k_{ij})^4 \\
 E_0 &= \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n x_i x_j E_{0i}^{1/2} E_{0j}^{1/2} (1 - k_{ij})^5 \\
 a &= \left[\sum_{i=1}^n x_i a_i^{1/3} \right]^3 \\
 b &= \left[\sum_{i=1}^n x_i b_i^{1/3} \right]^3 \\
 c &= \left[\sum_{i=1}^n x_i c_i^{1/3} \right]^3 \\
 d &= \left[\sum_{i=1}^n x_i d_i^{1/3} \right]^3 \\
 \gamma &= \left[\sum_{i=1}^n x_i \gamma_i^{1/2} \right]^3 \\
 \alpha &= \left[\sum_{i=1}^n x_i \alpha_i^{1/3} \right]^3
 \end{aligned} \quad (15)$$

式中 x_i, x_j ——天然气混合气体中 i 和 j 组分的摩尔分数；

k_{ij} —— i, j 组分间的交互作用系数，指天然气混合气体与理想混合物的偏差。 k_{ij} 越大说明偏离越远，对于同一组分， $k_{ii}=0$ 。

四、程序和计算流程

便用 MATLAB 7.0 计算软件编写应用程序，具体计算流程见图 1。

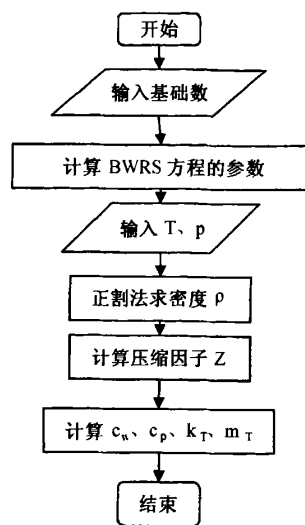


图 1 多变指数计算流程图

五、实例应用

1、多变指数的求解

天然气各组分的体积百分含量见表 1。

表 1 天然气各组分体积百分比

组分	体积含量 %	组分	体积含量 %
甲烷	92.546 9	正戊烷	0.221 0
乙烷	3.958 2	氮	0.845 5
丙烷	0.335 3	二氧化碳	1.890 9
异丁烷	0.086 3	硫化氢	0.001 0
正丁烷	0.115 8		

设 $T=55^\circ\text{C}$, $p=12\text{ MPa}$, 天然气的分子量 $\mu=17.53$, 天然气标准状态时的密度 $\rho_0=0.79\text{ kg/m}^3$, $c_p^0=1.584\text{ kJ}/(\text{m}^3 \cdot \text{K})$ 。天然气各组分及其混合物参数的计算结果见表 2。

表 2 天然气各组分及其混合物不同状态参数的计算结果

天然气 各组分	T=55°C, p=12 MPa 下的状态参数										
	$A_0(\times 10^{-2})$	$B_0(\times 10^2)$	$C_0(\times 10^{-5})$	$D_0(\times 10^{-6})$	$E_0(\times 10^{-8})$	a	$b(\times 10^3)$	$c(\times 10^{-4})$	$d(\times 10^{-1})$	$\alpha(\times 10^4)$	$\gamma(\times 10^3)$
甲烷	2.007	4.430	21.700	36.200	12.900	7.752	5.300	29.800	23.700	1.000	5.400
乙烷	4.474	6.740	185.800	524.500	160.800	31.189	12.400	331.300	204.600	2.000	11.300
丙烷	7.012	9.240	525.700	1 834.100	522.300	74.123	23.300	1 198.200	664.700	5.000	20.100
异丁烷	9.961	12.230	994.800	3 858.600	1 096.900	146.078	41.000	2 918.600	1 515.400	11.000	34.300
正丁烷	9.944	11.890	1 129.300	4 579.800	1 292.400	145.429	38.900	3 177.800	1 608.900	10.000	32.000
正戊烷	12.778	14.710	2 106.000	9 544.700	2 541.500	254.572	59.700	6 970.700	3 370.400	18.000	46.100
氮	1.183	4.030	6.300	7.000	1.400	4.346	4.400	7.500	9.600	1.000	4.300
二氧化碳	2.593	4.400	157.200	457.300	88.500	14.352	5.300	161.500	115.900	1.000	4.300
硫化氢	3.503	4.330	220.300	761.300	280.300	15.781	5.100	251.200	127.600	1.000	4.700
天然气 混合物	2.120	4.570	27.970	52.460	17.460	8.670	5.600	38.200	29.480	74.400	5.600

表 3 为多变指数的计算结果。由式(2)计算天然气密度时,迭代 4 次后收敛精度即达到要求。

表 3 多变指数的计算结果							
天然气 密度 ρ (kg/m^3)	压缩因子 Z	标准状态下的 定容比热 容 c_v^0 ($\text{kJ} \cdot \text{kmol} \cdot \text{K}$)	定容比热容 c_v ($\text{kJ} \cdot \text{kmol} \cdot \text{K}$)	定压比热容 c_p ($\text{kJ} \cdot \text{kmol} \cdot \text{K}$)	温度绝热 指数 k_T	$\eta=0.83$ 下的多变 指数 m_T	$\eta=0.86$ 下的多变 指数 m_T
4.997 1	0.880 6	26.846 4	28.256 5	47.735 3	1.345 3	1.447 7	1.425 4

2、 多变指数的影响因素分析

图 2 为 $p=12\text{ MPa}$ 的情况下,多变指数随温度的变化曲线,可知多变指数随系统温度的变化呈抛物线变化。压力一定时,在 $30\sim55\text{ }^\circ\text{C}$ 多变指数随温度的升高呈上升趋势,在 $55\text{ }^\circ\text{C}$ 达到峰值 1.447 7,随后呈下降趋势。

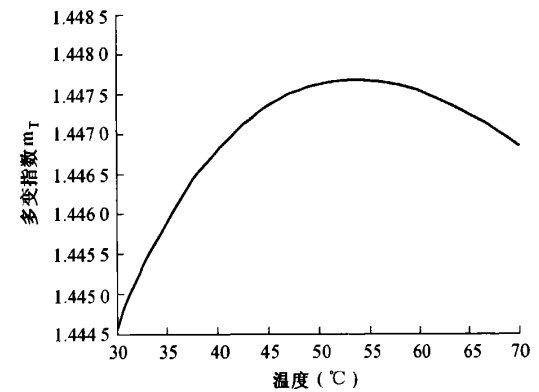


图 2 多变指数随温度的变化曲线

图 3 为 $T=55\text{ }^\circ\text{C}$ 的情况下,多变指数随压力的变化曲线温度一定时,在 $8\sim9.5\text{ MPa}$ 多变指数随压力的升高呈上升趋势,在 9.5 MPa 达到峰值 1.452 3,随后呈下降趋势。

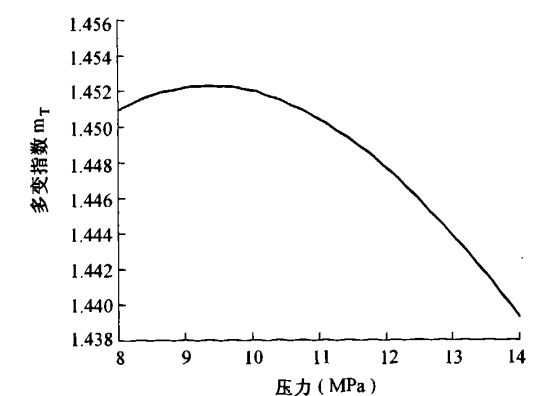


图 3 多变指数随压力的变化曲线

图 4 为 $T=55\text{ }^\circ\text{C}$ 、 $p=12\text{ MPa}$ 的情况下,多变指数随多变效率的变化曲线。在温度、压力一定的情况下,随多变效率的上升,多变指数一直呈下降的

趋势。

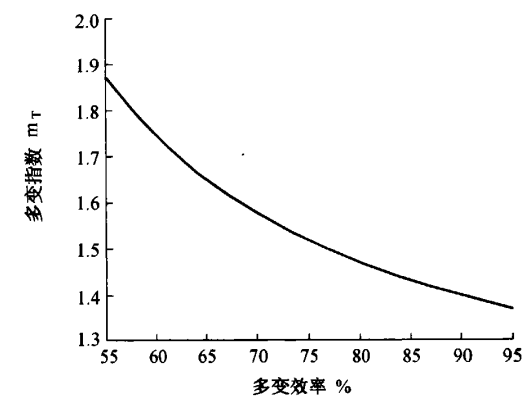


图 4 多变指数随多变效率的变化曲线

六、结束语

- 通过以上计算与分析,可以得到以下结论。
- (1)多变指数是压力与温度的非线性函数。
 - (2)在系统压力不变、多变效率不变的情况下,多变指数随系统温度的变化呈抛物线变化,在 $53\sim57\text{ }^\circ\text{C}$ 区间达到最大值,为 1.447 7,随后逐渐降低。
 - (3)在系统温度不变、多变效率不变的情况下,多变指数随系统压力的变化也呈抛物线变化,并在 $9.4\sim9.5\text{ MPa}$ 区间达到最大值,为 1.452 3,随后逐渐降低。
 - (4)在系统温度不变、压力不变的情况下,多变指数随多变效率的增加而非线性地减小。

综上所述,通过研究,建立了一种计算离心式压缩机天然气多变指数的方法,并获得了不同压力、温度、多变效率下的变化趋势结果,可为工艺布站过程中离心式压缩机的选择提供有力的理论支持和参考依据。

参 考 文 献

1、 王树立 赵会军：输气管道设计与管理,化学工业出版社(北京),2006。
2、 姚光镇：输气管道设计与管理,石油大学出版社(东营),2006。

(收稿日期:2008-09-22)