

离心式压缩机中多变指数的确定方法

作者/工艺 李 宁 孙立刚

摘要: 以离心式压缩机中的多变指数为研究对象, 提出了求解方法, 并通过具体的算例, 计算出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, 并给出了多变指数随温度、压力、多变效率的变化趋势, 为压缩机功率计算提供了有力的参考依据。

关键词: 离心式压缩机; 多变指数; BWRS方程

1 引言

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%, 而其中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。因此, 如何提高压缩机的工作性能, 能够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一个重要的参数。以往都是根据经验选择该参数, 很有可能与实际情况不匹配。影响多变指数的因素有很多, 譬如温度、压力、多变效率等等, 因此, 如何寻找一套切实可行的方法来确定多变指数, 成为当前亟待解决的问题。本文就是在这样的背景下应运而生的。

2 基本原理

计算所采用的方程为BWRS方程, 它是一个多参数状态方程, 是1970年由Starling-Han提出的对BWR (Betnedict-Webb-Rubin) 方程的改进式, 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]:

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

式中: p ——系统的压力, kPa ;

T ——系统的温度, K ;

ρ ——气体的密度, $kmol/m^3$;

R ——气体常数, $R = 8.3143 kJ/(kmol \cdot K)$ 。

(1) 分别求天然气各组分的11个参数。

公式中 A_0 、 B_0 、 C_0 、 D_0 、 E_0 、 a 、 b 、 c 、 d 、 α 、 γ 为状态方程式的11个参数。对于纯组分 i 的各参数均可由它的临界参数 T_{ci} 、 p_{ci} 及偏心因子 ω_i 从下列公式求得:

$$\rho_{ci} \cdot B_{0i} = A_1 + B_1 \cdot \omega_i$$

$$\frac{\rho_{ci} \cdot A_{0i}}{RT_{ci}} = A_2 + B_2 \cdot \omega_i$$

$$\frac{\rho_{ci} \cdot C_{0i}}{RT_{ci}^3} = A_3 + B_3 \cdot \omega_i$$

$$\rho_{ci}^2 \cdot \gamma_i = A_4 + B_4 \cdot \omega_i$$

$$\rho_{ci}^2 \cdot b_i = A_5 + B_5 \cdot \omega_i$$

$$\frac{\rho_{ci}^2 \cdot a_i}{RT_{ci}} = A_6 + B_6 \cdot \omega_i$$

(2)

$$\rho_{ci}^3 \cdot \alpha_i = A_7 + B_7 \cdot \omega_i$$

$$\frac{\rho_{ci}^2 \cdot c_i}{RT_{ci}^3} = A_8 + B_8 \cdot \omega_i$$

$$\frac{\rho_{ci} \cdot D_{0i}}{RT_{ci}^4} = A_9 + B_9 \cdot \omega_i$$

$$\frac{\rho_{ci}^2 \cdot d_i}{RT_{ci}^2} = A_{10} + B_{10} \cdot \omega_i$$

$$\frac{\rho_{ci} \cdot E_{0i}}{RT_{ci}^5} = A_{11} + B_{11} \cdot \omega_i \cdot \exp(-3.8\omega_i)$$

式(2)中的 A_i 、 B_i 值列于表1中, 是Starling通过正构烷烃采用多种热力学性质分析(P - V - T , 焓和蒸汽压)关联得到的。部分天然气纯物质组分的临界参数 T_{ci} 、 p_{ci} 及偏心因子 ω_i 的值列于表2中。

表1 通用常数

i	A_i	B_i
1	0.44369	0.115449
2	1.28438	-0.920731
3	0.356306	1.70871
4	0.544979	-0.270896
5	0.528629	0.349261
6	0.484011	0.75413
7	0.0705233	-0.044448
8	0.504087	1.32245
9	0.0307452	0.179433
10	0.0732828	0.463492
11	0.00645	-0.022143

表2 纯物质的物理参数

物质名称	临界温度 T_{ci}/K	临界密度 $\rho_{ci}/(kmol \cdot m^{-3})$	偏心因子 ω_i
甲烷	190.69	10.05	0.013
乙烷	305.38	6.7566	0.1018
丙烷	369.89	4.9994	0.157
异丁烷	408.13	3.8012	0.183
正丁烷	425.18	3.9213	0.197
正戊烷	469.49	3.2149	0.252
氮	126.15	11.099	0.035
二氧化碳	304.09	10.638	0.21
硫化氢	373.39	10.526	0.105

(2) 求天然气混和气体的11个参数。

当计算天然气混合气体的时候,其11个参数按照以下混合规则进行计算:

$$A_0 = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n x_i x_j A_{0i}^{1/2} A_{0j}^{1/2} (1 - k_{ij})$$

$$B_0 = \sum_{i=1}^n x_i B_{0i}$$

$$C_0 = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n x_i x_j C_{0i}^{1/2} C_{0j}^{1/2} (1 - k_{ij})^3$$

$$D_0 = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n x_i x_j D_{0i}^{1/2} D_{0j}^{1/2} (1 - k_{ij})^4$$

$$E_0 = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n x_i x_j E_{0i}^{1/2} E_{0j}^{1/2} (1 - k_{ij})^5$$

$$a = \left[\sum_{i=1}^n x_i a_i^{1/3} \right]^3$$

$$b = \left[\sum_{i=1}^n x_i b_i^{1/3} \right]^3$$

$$c = \left[\sum_{i=1}^n x_i c_i^{1/3} \right]^3$$

$$d = \left[\sum_{i=1}^n x_i d_i^{1/3} \right]^3$$

$$\gamma = \left[\sum_{i=1}^n x_i \gamma_i^{1/2} \right]^2$$

$$\alpha = \left[\sum_{i=1}^n x_i \alpha_i^{1/3} \right]^3$$

(3)

以上各式中, x_i 、 x_j 分别为气相混合物中*i*和*j*组分的摩尔分数; k_{ij} 为*i*、*j*组分间的交互作用系数,它表示和理想混合物所发生的偏差, k_{ij} 愈大说明偏离愈远。对于同一组分显然 $k_{ij} = 0$ 。表3中列出了Starling所给出的几种组分间 k_{ij} 的数据。

表3 BWRS模型中的二元交互作用系数 k_{ij} ($k_{ij} = k_{ji}$)

甲烷	乙烷	丙烷	异丁烷	正丁烷	正戊烷	氮	二氧化碳	硫化氢	$i \backslash j$
0.0	0.01	0.023	0.0275	0.031	0.041	0.025	0.05	0.05	甲烷
	0.0	0.0031	0.004	0.0045	0.006	0.07	0.048	0.045	乙烷
		0.0	0.003	0.0035	0.0045	0.10	0.045	0.04	丙烷
			0.0	0.0	0.001	0.11	0.05	0.036	异丁烷
				0.0	0.001	0.12	0.05	0.034	正丁烷
					0.0	0.148	0.05	0.02	正戊烷
						0.0	0.0	0.0	氮
							0.0	0.035	二氧化碳
								0.0	硫化氢

(3)求天然气密度。

将式(1)写为如下形式:

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

针对式(4),采用正割法求解密度,迭代公式如下:

$$\rho_{k+1} = \frac{\rho_{k-1} F(\rho_k) - \rho_k F(\rho_{k-1})}{F(\rho_k) - F(\rho_{k-1})} \quad (5)$$

迭代精度为0.0001,初值 $\rho_1 = 0.0$, $\rho_2 = \frac{p}{RT}$ 。

(注:压力单位为kPa)

(4)求压缩因子Z。

$$Z = 1 + \left(B_0 - \frac{A_0}{RT} - \frac{C_0}{RT^3} + \frac{D_0}{RT^4} - \frac{E_0}{RT^5} \right) \rho + \left(b - \frac{a}{RT} - \frac{d}{RT^2} \right) \rho^2 + \frac{\alpha}{RT} \left(a + \frac{d}{T} \right) \rho^5 + \frac{c \rho^2}{RT^3} (1 + \gamma \rho^2) \exp(-\gamma \rho^2) \quad (6)$$

(5)求定容比热容 c_v 。

$$c_v^0 = \frac{c_p^0}{\rho_0} \mu - R \quad (7)$$

其中: μ 表示分子量, ρ_0 为标准状态下的密度。

由式(1)可得

$$\left(\frac{\partial^2 p}{\partial T^2} \right)_\rho = \left(-\frac{6C_0}{T^4} + \frac{12D_0}{T^5} - \frac{20E_0}{T^6} \right) \rho^2 - \frac{2d}{T^3} \rho^3 + \frac{2\alpha d}{T} \rho^6 + \frac{6c \rho^3}{T^4} (1 + \gamma \rho^2) \exp(-\gamma \rho^2) \quad (8)$$

因此

$$c_v = c_v^0 + \int_0^p -\frac{T}{\rho^2} \left(\frac{\partial^2 p}{\partial T^2} \right)_\rho d\rho = c_v^0 + \left(\frac{6C_0}{T^3} - \frac{12D_0}{T^4} + \frac{20E_0}{T^5} \right) \rho + \frac{d}{T^2} \rho^2 - \frac{2ad}{5T^2} \rho^5 + \frac{3c}{\gamma T^3} \left[(\gamma \rho^2 + 2) \exp(-\gamma \rho^2) - 2 \right] \quad (9)$$

(6)求定压比热容 c_p 。

由式(1)可得

$$\left(\frac{\partial p}{\partial T} \right)_\rho = \rho R + \left(B_0 R + \frac{2C_0}{T^3} - \frac{3D_0}{T^4} + \frac{4E_0}{T^5} \right) \rho^2 + \left(bR + \frac{d}{T^2} \right) \rho^3 - \frac{\alpha d}{T^2} \rho^6 - \frac{2c\rho^3}{T^3} (1 + \gamma \rho^2) \exp(-\gamma \rho^2) \quad (10)$$

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

因此

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

(7)求多变指数。

在高压下, $k = \frac{c_p}{c_v}$ 只能称为定压、定容比热比, 而不能称为绝热指数, 需要求解温度绝热指数 k_T 。

$$k_T = \frac{1}{1 - \frac{p}{\rho^2 c_p} \left(\frac{\partial p}{\partial T} \right)_\rho \left(\frac{\partial p}{\partial \rho} \right)_T} \quad (13)$$

因为

$$\eta = \frac{\frac{m_T}{m_T - 1}}{\frac{k_T}{k_T - 1}} \quad (14)$$

所以

$$m_T = \frac{k_T \eta}{k_T \eta - (k_T - 1)} \quad (15)$$

已知效率 η , 可以求出温度多变指数 m_T , 在实际的计算中, 所采用的多变指数就是温度多变指数。

具体计算流程如图1所示。

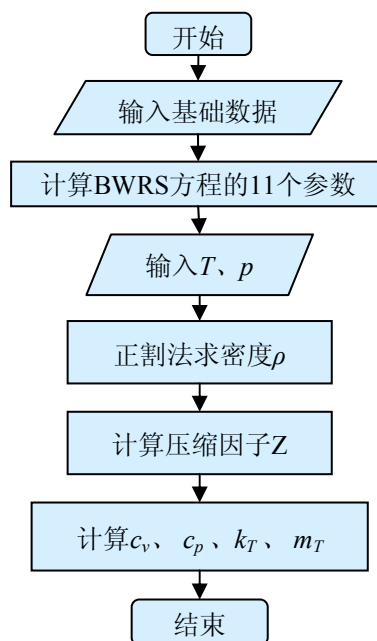


图1 计算程序流程图

3 实例应用

计算 $T = 55^\circ\text{C}$, $p = 12\text{MPa}$, 天然气的分子量 $\mu = 17.53$ 、天然气标准状态时的密度 $\rho_0 = 0.79\text{ kg/m}^3$ 、 $c_p^0 = 1.58454\text{ kJ/(m}^3\cdot\text{K)}$ 。各组分的体积百分比如表4所示。

表4 天然气各组分体积百分比

组分	甲烷	乙烷	丙烷	异丁烷	正丁烷	正戊烷	氮	二氧化碳	硫化氢
体积百分比(%)	92.5469	3.9582	0.3353	0.0863	0.1158	0.221	0.8455	1.8909	0.0001

应用本文介绍的计算方法, 采用MATLAB7.0计算软件编写了应用程序, 具体计算结果如下:

各组分的 A_0 、 B_0 、 C_0 、 D_0 、 E_0 、 a 、 b 、 c 、 d 、 α 、 γ 11个参数如表5所示(见下页)。天然气混合物相应的11个参数如表6所示。

表6 天然气混和物的11个参数

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	d $\times 10^{-1}$	α $\times 10^5$	γ $\times 10^3$
数值	2.12	4.57	27.97	52.46	17.46	8.67	5.6	3.82	29.48	7.44	5.6

由式(4), 迭代了4次, 收敛精度达到要求, 得到天然气密度为: $\rho = 4.9971\text{ kg/m}^3$ 。

由式(5), 可得压缩因子 $Z = 0.8806$ 。

由式(6), 可得 $c_v^0 = 26.8464\text{ kJ/(kmol}\cdot\text{K)}$ 。

由式(8), 可得 $c_v = 28.2565\text{ kJ/(kmol}\cdot\text{K)}$ 。

由式(11), 可得 $c_p = 47.7353\text{ kJ/(kmol}\cdot\text{K)}$ 。

表5 各组分的11个参数

参数	甲烷	乙烷	丙烷	异丁烷	正丁烷	正戊烷	氮	二氧化碳	硫化氢
$A_0 \times 10^{-2}$	2.007	4.474	7.012	9.961	9.944	12.778	1.183	2.593	3.503
$B_0 \times 10^2$	4.43	6.74	9.24	12.23	11.89	14.71	4.03	4.40	4.33
$C_0 \times 10^{-5}$	21.7	185.8	525.7	994.8	1129.3	2106.0	6.3	157.2	220.3
$D_0 \times 10^{-6}$	36.2	524.5	1834.1	3858.6	4579.8	9544.7	7.0	457.3	761.3
$E_0 \times 10^{-8}$	12.9	160.8	522.3	1096.9	1292.4	2541.5	1.4	88.5	280.3
a	7.752	31.189	74.123	146.078	145.429	254.572	4.346	14.352	15.781
$b \times 10^3$	5.3	12.4	23.3	41.0	38.9	59.7	4.4	5.3	5.1
$c \times 10^{-4}$	29.8	331.3	1198.2	2918.6	3177.8	6970.7	7.5	161.5	251.2
$d \times 10^{-1}$	23.7	204.6	664.7	1515.4	1608.9	3370.4	9.6	115.9	127.6
$\alpha \times 10^4$	1.0	2.0	5.0	11.0	10.0	18.0	1.0	1.0	1.0
$\gamma \times 10^3$	5.4	11.3	20.1	34.3	32.0	46.1	4.3	4.3	4.7

由式(13)，可得 $k_T=1.3453$ 。

因此，当 $\eta=0.83$ 时，多变指数 $m_T=1.4477$ ；当 $\eta=0.86$ 时，多变指数 $m_T=1.4254$ 。

下面我们再详细的分析多变指数随温度、压力及多变效率的变化趋势。

图2 为 $p=12MPa$ 情况下，多变指数随温度的变化曲线，从图中可以看出，在压力一定的情况下，随温度的升高，多变指数在30℃到53~57℃的区间内呈上升趋势，在53~57℃达到峰值1.4477，随后呈下降趋势。

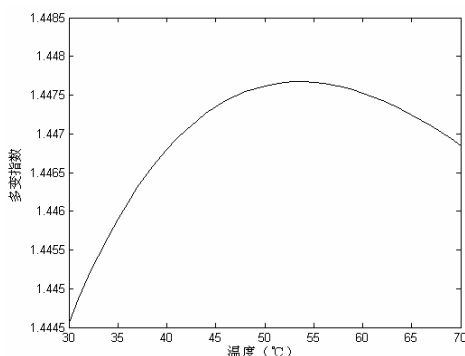


图2 多变指数随温度的变化曲线

图3 为 $T=55^\circ C$ 情况下，多变指数随压力的变化曲线，从图中可以看出，在温度一定的情况下，随压力的升高，多变指数在8MPa 到9.4~9.5MPa 的区间内呈上升趋势，在9.4~9.5MPa 达到峰值1.4523，随后呈下降趋势。

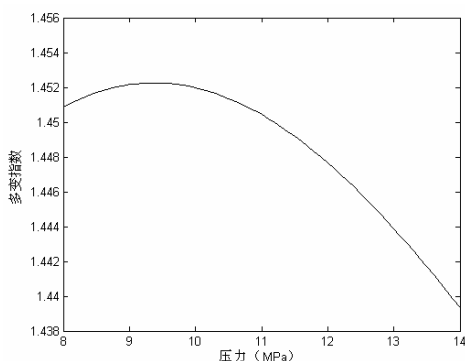


图3 多变指数随压力的变化曲线

图4 为 $T=55^\circ C$ 、 $p=12MPa$ 情况下，多变指数随多变效率的变化曲线，从图中可以看出，在温度、压力一定的情况下，随多变效率的上升，多变指数一直呈现下降的趋势。

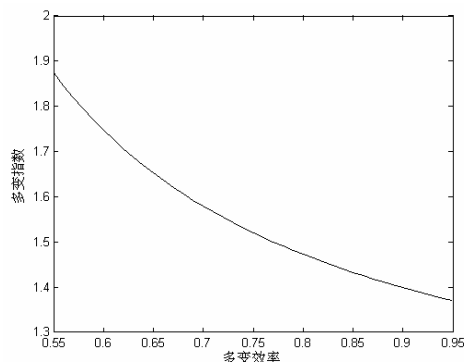


图4 多变指数随多变效率的变化曲线

4 结语

通过本文的研究，得到了一种计算离心式压缩机中天然气多变指数的方法，并计算了不同压力、温度、多变效率下的变化趋势，这为工艺布站过程中离心式压缩机的选择提供了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. 北京: 化学工业出版社[M]. 2006, 199~205
- 2.姚光镇. 输气管道设计与管理. 东营: 中国石油大学出版社[M]. 2006, 10~39