

天然气压缩因子的计算

天然气的压缩系数计算方法可采用 GB/T 17747-1999《天然气压缩因子的计算》，或 AGA NX-19 方程。当为非贸易计量场合和贸易计量中符合 GB/T 18603-2001《天然气计量系统技术要求》表 A1 准确度为 C 级要求的计量装置可考虑使用 AGA NX-19 方程，其它应采用 SGERG-88 或 AGA 8-92DC 方程。

本文描述 AGA NX-19 和 SGERG-88 两种计算方法。

1. 用物性值进行计算天然气压缩因子的公式

本计算公式参照国家标准 GB/T 17747 中 SGERG-88 公式，该计算公式使用高位发热量、相对密度和 CO₂ 含量作为输入变量。

在 GB/T 17747 中，用物性值计算天然气压缩因子公式如下：

$$Z = 1 + B\rho_m + C\rho_m^2 \quad (1)$$

$$\rho_m = p/(ZRT) \quad (2)$$

式中有关符号表示见本文后述的符号说明。天然气压缩因子 Z 的值由方程 (1)、(2) 联解求得

(1) 式中：天然气第二维利系数 B 由方程 (B1) 求得

$$B = x_1^2 B_{11} + 2x_1 x_2 B_{12} + 2x_1 x_3 B_{13} + 2x_1 x_4 B_{14} + 2x_1 x_5 B_{15} + x_2^2 B_{22} + 2x_2 x_3 B_{23} + 2x_2 x_4 B_{24} + x_3^2 B_{33} + x_4^2 B_{44} + x_5^2 B_{55} \quad (B1)$$

$$(B1) \text{ 式中: } x_1 = x_{CH} \quad (B2)$$

$$x_2 = x_{N_2} \quad (B3)$$

$$x_3 = x_{CO_2} \quad (B4)$$

$$x_4 = x_{H_2} \quad (B5)$$

$$x_5 = x_{CO} \quad (B6)$$

$$B_{11} = b_{H0}(0) + b_{H0}(1)T + b_{H0}(2)T^2 + [b_{H1}(0) + b_{H1}(1)T + b_{H1}(2)T^2]H_{CH} + [b_{H2}(0) + b_{H2}(1)T + b_{H2}(2)T^2]H_{CH}^2 \quad (B7)$$

B_{14} , B_{15} , B_{22} , B_{23} , B_{24} , B_{33} , B_{44} 和 B_{55} 是温度函数的二次多项式，即：

$$B_{ij} = b_{ij}(0) + b_{ij}(1)T + b_{ij}(2)T^2 \quad (B8)$$

$$B_{12} = [0.72 + 1.875 \times 10^{-5} (320 - T)^2] (B_{11} + B_{22}) / 2 \quad (B9)$$

$$B_{13} = -0.865 (B_{11} B_{33})^{1/2} \quad (B10)$$

(B7) 和(B8)式中维利系数温度展开式系数 $b(0)$, $b(1)$ 和 $b(2)$ 的数值

	ij	b(0)	b(1)	b(2)
CH	H0	-4.25468×10^{-1}	2.86500×10^{-3}	-4.62073×10^{-1}
CH	H1	8.77118×10^{-4}	-5.56281×10^{-6}	8.81510×10^{-9}
CH	H2	-8.24747×10^{-7}	4.31436×10^{-9}	-6.08319×10^{-12}
N ₂	22	-1.44600×10^{-1}	7.40910×10^{-4}	-9.11950×10^{-7}
CO ₂	33	-8.68340×10^{-1}	4.03760×10^{-3}	-5.16570×10^{-6}
H ₂	44	-1.10596×10^{-3}	8.13385×10^{-5}	-9.87220×10^{-8}
CO	55	-1.30820×10^{-1}	6.02540×10^{-4}	-6.44300×10^{-7}
CH+ N ₂	12	$y=0.72+1.875 \times 10^{-5}(320-T)^2$		
CH+ CO ₂	13	$y=-0.865$		
CH+ H ₂	14	-5.21280×10^{-2}	2.71570×10^{-4}	-2.50000×10^{-7}
CH+ CO	15	-6.87290×10^{-2}	-2.39381×10^{-6}	5.18195×10^{-7}
N ₂ + CO ₂	23	-3.39693×10^{-1}	1.61176×10^{-3}	-2.04429×10^{-6}
N ₂ + H ₂	24	1.20000×10^{-2}	0.00000	0.00000

天然气第二维利系数 C 由方程 (C1) 求得

$$C = x_1^3 C_{111} + 3x_1^2 x_2 C_{112} + 3x_1^2 x_3 C_{113} + 3x_1^2 x_4 C_{114} + 3x_1^2 x_5 C_{115} + 3x_1 x_2^2 C_{122} + 6x_1 x_2 x_3 C_{123} \\ + 3x_1 x_3^2 C_{133} + x_2^3 C_{222} + 3x_2^2 x_3 C_{223} + 3x_2 x_3^2 C_{233} + x_3^3 C_{333} + x_4^3 C_{444} \quad (C1)$$

(C1)式中:

$$C_{111} = c_{H0}(0) + c_{H0}(1)T + c_{H0}(2)T^2 + [c_{H1}(0) + c_{H1}(1)T + c_{H1}(2)T^2]H_{CH} \\ + [c_{H2}(0) + c_{H2}(1)T + c_{H2}(2)T^2]H_{CH}^2 \quad (C2)$$

C_{222} , C_{333} , C_{444} , C_{113} , C_{223} 是温度函数的二次多项式, 即:

$$C_{ijk} = c_{ijk}(0) + c_{ijk}(1)T + c_{ijk}(2)T^2 \quad (C3)$$

维利系数温度展开式中系数 $c(0)$, $c(1)$ 和 $c(2)$ 的数值

	ijk	c(0)	c(1)	c(2)
CH	H0	-3.02488×10^{-1}	1.95861×10^{-3}	-3.16302×10^{-6}
CH	H1	6.46422×10^{-4}	-4.22876×10^{-6}	6.88157×10^{-9}
CH	H2	-3.32805×10^{-7}	2.23160×10^{-9}	-3.67713×10^{-12}
N ₂	222	7.84980×10^{-3}	-3.98950×10^{-5}	6.11870×10^{-8}
CO ₂	333	2.05130×10^{-3}	3.48880×10^{-5}	-8.37030×10^{-8}
H ₂	444	1.04711×10^{-3}	-3.64887×10^{-8}	4.67095×10^{-9}
CH+ CH+ N ₂	112	$y=0.92+0.0013(T-270)$		
CH+ CH+ CO ₂	113	$y=0.92$		
CH+ CH+ H ₂	114	$y=1.20$		
CH+ CH+CO	115	7.36748×10^{-3}	-2.76578×10^{-5}	3.43051×10^{-8}
CH+ N ₂ + N ₂	122	$y=0.92+0.0013(T-270)$		
CH+ N ₂ + CO ₂	123	$y=1.10$		
CH+ CO ₂ + CO ₂	133	$y=0.92$		
N ₂ + N ₂ + CO ₂	223	5.52066×10^{-3}	-1.68609×10^{-5}	1.57169×10^{-8}
N ₂ + CO ₂ + CO ₂	233	3.58783×10^{-3}	8.06674×10^{-6}	-3.25798×10^{-8}

其他非同类交互作用维利系数由方程(C4)求得:

$$C_{ijk} = y_{ijk} (C_{iii} C_{jjj} C_{kkk})^{1/3} \quad (C4)$$

(C4)式中 y_{ijk} 由(C5)~(C8)给出:

$$y_{112} = y_{122} = 0.92 + 0.0013(T - 270) \quad (C5)$$

$$y_{113} = y_{133} = 0.92 \quad (C6)$$

$$y_{114} = 1.20 \quad (C7)$$

$$y_{123} = 1.10 \quad (C8)$$

式中符号:

H——摩尔发热量, 单位: $\text{MJ} \cdot \text{kmol}^{-1}$

x ——组分的摩尔分数

CH——等价烃类

CO——一氧化碳

CO_2 ——二氧化碳

H_2 ——氢气

N_2 ——氮气

ρ_m ——摩尔密度, 单位: $\text{kmol}^{-1} \cdot \text{m}^3$

p ——绝对压力, 单位: MPa

R ——摩尔气体常数, 其值为 $0.008314510 \text{ m}^3 \cdot \text{kmol}^{-1} \text{K}^{-1}$

T ——热力学温度, 单位: K

2. 用 AGA NX-19 公式计算天然气压缩因子的方法

天然气超压缩系数 F_z 是因天然气特性偏离理想气体定律而导出的修正系数, 其定义为

$$F_z = \sqrt{\frac{Z_n}{Z_1}} \dots\dots\dots (3)$$

式中: Z_n —— 天然气在标准参比条件下的压缩因子;

Z_1 —— 天然气在操作条件下的压缩因子。

F_z 值按如下公式计算:

天然气以甲烷为主, 在其真实相对密度 Gr 小于或等于 0.75, 氮气和二碳气摩尔含量不超过 0.15 时, 其超压缩因子 F_z 按下式计算:

$$F_z = \left(\frac{\sqrt{\frac{B}{D} - D + \frac{n}{3H}}}{1 + \frac{0.00132}{\tau^{3.25}}} \right) \dots\dots\dots (4)$$

$$\text{其中: } B = \frac{3-mn^2}{9mH^2}$$

$$m=0.0330378 \tau^{-2}-0.0221323 \tau^{-3}+0.0161353 \tau^{-5}$$

$$n = \frac{-0.133185 \tau^{-1} + 0.265827 \tau^{-2} + 0.0457697 \tau^{-4}}{m}$$

$$H = \frac{P_i + 14.7}{1000}$$

$$\tau = \frac{t_i + 460}{500}$$

$$P_j = 145.04 P_i F_p$$

$$t_j = (1.8t_i + 492)F_t - 460$$

$$D = (b + \sqrt{b^2 + B^3})^{1/3}$$

$$b = \frac{9n - 2mn^3}{54mH^3} - \frac{E}{2mH^2}$$

当 $1.4 > \tau \geq 1.09$ 且 $P_i(\text{绝}) \leq 13.79 \text{ MPa}$ 时

$$E = 1 - 0.00075H^{2.3}e^{-20(\tau-1.09)} - 0.0011(\tau-1.09)^{0.5}H^2 [2.17 + 1.4(\tau-1.09)^{0.5} - H]^2$$

当 $0.88 \leq \tau < 1.09$ 且 $13.79 \text{ MPa} \geq P_i(\text{绝}) > 8.963 \text{ MPa}$ 时,

$$E = 1 - 0.00075H^{2.3}(2 - e^{-20(1.09-\tau)}) + 0.455 [200(1.09 - \tau)^6 - 0.03249(1.09 - \tau) + 2.0167(1.09 - \tau)^2 - 18.028(1.09 - \tau)^3 + 42.844(1.09 - \tau)^4] (H - 1.3)(4.01952 - H^2)$$

当 $0.84 \leq \tau < 1.09$ 且 $P_i(\text{绝}) \leq 8.963 \text{ MPa}$ 时,

$$E = 1 - 0.00075H^{2.3}(2 - e^{-20(1.09-\tau)}) - 1.317(1.09 - \tau)^4 H(1.69 - H^2)$$

$$\text{而 } F_p = \frac{156.47}{160.8 - 7.22Gr + K_p}$$

$$F_t = \frac{226.29}{99.15 + 211.9Gr - K_t}$$

$$K_p = (X_c - 0.392X_n) \times 100$$

$$K_t = (X_c + 1.681X_n) \times 100$$

式中: P_i — 流量计实测表压力值, MPa ;

t_i — 天然气流经节流装置时实测的气流温度, 单位为: $^{\circ}\text{C}$

Gr — 天然气真实相对密度 (应小于 0.75);

X_c — 天然气中二氧化碳含量的摩尔分数 (应小于 0.15), 由气分析给出;

X_n — 天然气中氮气含量的摩尔分数 (应小于 0.15), 由气分析给出。

当天然气真实相对密度 Gr 和组分超出此规定, 或组分变化较大, 或进行精确计算时应按 GB/T17747.1~3-1999 进行计算。

附表 1: 用 SGERG-88 计算的压缩因子表格, 表内数据按天然气相对密度为 0.581, 二氧化碳摩尔分数为 0.006, 氢气摩尔分数为 0, 高位发热量为 $40.66\text{MJ} \cdot \text{m}^{-3}$ 计算。

温度℃ Zn/Zg 绝对压力 (MPa)	-10	-5	0	5	10	15	20	25
0.10	1.0009	1.0007	1.0005	1.0004	1.0002	1.0001	0.9999	0.9998
0.20	1.0041	1.0038	1.0034	1.0031	1.0028	1.0025	1.0022	1.0019
0.30	1.0074	1.0069	1.0063	1.0058	1.0053	1.0049	1.0045	1.0041
0.40	1.0107	1.0100	1.0093	1.0086	1.0079	1.0073	1.0068	1.0062
0.50	1.0141	1.0131	1.0122	1.0113	1.0105	1.0098	1.0091	1.0084
1.00	1.0312	1.0292	1.0273	1.0255	1.0238	1.0222	1.0207	1.0194
1.50	1.0492	1.0459	1.0429	1.0401	1.0374	1.0350	1.0327	1.0305
2.00	1.0679	1.0633	1.0591	1.0551	1.0515	1.0480	1.0449	1.0419
2.50	1.0875	1.0814	1.0758	1.0707	1.0659	1.0614	1.0573	1.0535
3.00	1.1079	1.1002	1.0932	1.0867	1.0806	1.0751	1.0700	1.0652
3.50	1.1293	1.1198	1.1111	1.1031	1.0958	1.0891	1.0829	1.0771
4.00	1.1517	1.1401	1.1297	1.1201	1.1113	1.1033	1.0960	1.0892
4.50	1.1750	1.1612	1.1488	1.1375	1.1272	1.1178	1.1092	1.1014
5.00	1.1993	1.1831	1.1685	1.1553	1.1434	1.1326	1.1227	1.1137
5.50	1.2246	1.2056	1.1887	1.1735	1.1599	1.1475	1.1363	1.1261
6.00	1.2507	1.2288	1.2094	1.1921	1.1765	1.1626	1.1499	1.1385
6.50	1.2777	1.2526	1.2305	1.2109	1.1934	1.1777	1.1636	1.1509
7.00	1.3054	1.2769	1.2519	1.2299	1.2104	1.1930	1.1773	1.1633
7.50	1.3335	1.3014	1.2735	1.2490	1.2274	1.2081	1.1910	1.1755
8.00	1.3619	1.3260	1.2951	1.2680	1.2442	1.2232	1.2044	1.1877

温度℃ Zn/Zg 绝对压力 (MPa)	30	35	40	45	50	55	60
0.10	0.9997	0.9996	0.9994	0.9993	0.9992	0.9992	0.9991
0.20	1.0017	1.0015	1.0012	1.0010	1.0008	1.0007	1.0005
0.30	1.0037	1.0034	1.0030	1.0027	1.0024	1.0022	1.0019
0.40	1.0057	1.0053	1.0048	1.0044	1.0040	1.0037	1.0033
0.50	1.0078	1.0072	1.0066	1.0061	1.0056	1.0052	1.0048
1.00	1.0181	1.0168	1.0157	1.0147	1.0137	1.0127	1.0119
1.50	1.0285	1.0266	1.0249	1.0233	1.0218	1.0203	1.0190
2.00	1.0391	1.0366	1.0342	1.0320	1.0299	1.0280	1.0262
2.50	1.0499	1.0466	1.0435	1.0407	1.0381	1.0356	1.0333
3.00	1.0608	1.0567	1.0530	1.0495	1.0462	1.0433	1.0405
3.50	1.0718	1.0670	1.0624	1.0583	1.0544	1.0509	1.0476
4.00	1.0830	1.0772	1.0720	1.0671	1.0626	1.0585	1.0547
4.50	1.0942	1.0876	1.0815	1.0759	1.0708	1.0661	1.0617
5.00	1.1055	1.0979	1.0910	1.0847	1.0789	1.0736	1.0687
5.50	1.1168	1.1083	1.1006	1.0935	1.0870	1.0810	1.0756
6.00	1.1281	1.1186	1.1100	1.1022	1.0950	1.0884	1.0824
6.50	1.1394	1.1289	1.1194	1.1107	1.1028	1.0956	1.0890
7.00	1.1506	1.1391	1.1287	1.1192	1.1106	1.1027	1.0956
7.50	1.1617	1.1492	1.1378	1.1275	1.1182	1.1097	1.1020
8.00	1.1726	1.1590	1.1468	1.1357	1.1256	1.1165	1.1082

附表 2：用 NX-19 计算的压缩因子，表中数据真实相对密度 $Gr=0.6$ ，氮气和二氧化碳摩尔分数均为 0.00 计算。

Zn/Zg 温度 绝对 压力 (MPa) °C	-20	-15	-10	-5	0	5	10	15	20	25
0.10	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000
0.20	1.0034	1.0032	1.0030	1.0029	1.0027	1.0025	1.0024	1.0023	1.0021	1.0020
0.30	1.0069	1.0065	1.0061	1.0058	1.0055	1.0051	1.0048	1.0046	1.0043	1.0041
0.40	1.0104	1.0098	1.0093	1.0087	1.0082	1.0078	1.0073	1.0069	1.0065	1.0061
0.50	1.0140	1.0132	1.0124	1.0117	1.0110	1.0104	1.0098	1.0092	1.0087	1.0082
1.00	1.0325	1.0305	1.0286	1.0269	1.0253	1.0238	1.0223	1.0210	1.0198	1.0186
1.50	1.0518	1.0485	1.0455	1.0426	1.0400	1.0375	1.0352	1.0331	1.0311	1.0293
2.00	1.0722	1.0674	1.0630	1.0589	1.0551	1.0516	1.0484	1.0454	1.0426	1.0400
2.50	1.0936	1.0872	1.0812	1.0758	1.0708	1.0661	1.0619	1.0580	1.0543	1.0510
3.00	1.1162	1.1078	1.1002	1.0933	1.0869	1.0810	1.0757	1.0707	1.0662	1.0620
3.50	1.1400	1.1295	1.1200	1.1113	1.1035	1.0963	1.0897	1.0837	1.0782	1.0732
4.00	1.1651	1.1521	1.1405	1.1300	1.1205	1.1119	1.1041	1.0969	1.0904	1.0844
4.50	1.1915	1.1758	1.1618	1.1493	1.1380	1.1278	1.1186	1.1103	1.1027	1.0957
5.00	1.2194	1.2005	1.1839	1.1691	1.1559	1.1441	1.1334	1.1238	1.1150	1.1071
5.50	1.2486	1.2262	1.2067	1.1895	1.1742	1.1606	1.1484	1.1374	1.1274	1.1185
6.00	1.2793	1.2530	1.2302	1.2104	1.1928	1.1773	1.1634	1.1510	1.1399	1.1298
6.50	1.3113	1.2806	1.2544	1.2316	1.2117	1.1942	1.1786	1.1647	1.1522	1.1411
7.00	1.3444	1.3091	1.2790	1.2532	1.2308	1.2111	1.1937	1.1783	1.1645	1.1522
7.50	1.3785	1.3381	1.3040	1.2750	1.2499	1.2280	1.2088	1.1918	1.1767	1.1632
8.00	1.4131	1.3673	1.3291	1.2967	1.2689	1.2448	1.2237	1.2051	1.1886	1.1740
Zn/Zg 温度 绝对 压力 (MPa) °C	30	35	40	45	50	55	60	65	70	75
0.10	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000
0.20	1.0019	1.0018	1.0017	1.0016	1.0015	1.0014	1.0013	1.0012	1.0012	1.0011
0.30	1.0038	1.0036	1.0034	1.0032	1.0030	1.0029	1.0027	1.0025	1.0024	1.0023
0.40	1.0058	1.0054	1.0051	1.0048	1.0046	1.0043	1.0041	1.0038	1.0036	1.0034
0.50	1.0077	1.0073	1.0069	1.0065	1.0061	1.0058	1.0055	1.0052	1.0049	1.0046
1.00	1.0176	1.0166	1.0156	1.0147	1.0139	1.0131	1.0124	1.0117	1.0110	1.0104
1.50	1.0275	1.0259	1.0244	1.0230	1.0217	1.0204	1.0193	1.0182	1.0171	1.0162
2.00	1.0376	1.0354	1.0333	1.0313	1.0295	1.0277	1.0261	1.0246	1.0232	1.0218
2.50	1.0478	1.0449	1.0422	1.0396	1.0372	1.0350	1.0329	1.0310	1.0292	1.0274
3.00	1.0581	1.0545	1.0511	1.0480	1.0450	1.0423	1.0397	1.0373	1.0351	1.0330
3.50	1.0685	1.0641	1.0600	1.0563	1.0528	1.0495	1.0464	1.0436	1.0409	1.0384
4.00	1.0789	1.0737	1.0690	1.0646	1.0605	1.0567	1.0531	1.0498	1.0467	1.0438
4.50	1.0894	1.0834	1.0779	1.0728	1.0681	1.0638	1.0597	1.0559	1.0523	1.0490
5.00	1.0998	1.0930	1.0868	1.0811	1.0757	1.0708	1.0662	1.0619	1.0579	1.0542
5.50	1.1103	1.1026	1.0956	1.0892	1.0832	1.0777	1.0726	1.0678	1.0633	1.0592
6.00	1.1207	1.1122	1.1044	1.0972	1.0906	1.0845	1.0788	1.0736	1.0687	1.0641
6.50	1.1310	1.1216	1.1130	1.1051	1.0979	1.0912	1.0850	1.0792	1.0738	1.0689
7.00	1.1411	1.1309	1.1215	1.1129	1.1050	1.0977	1.0910	1.0847	1.0789	1.0735
7.50	1.1511	1.1400	1.1298	1.1205	1.1120	1.1041	1.0968	1.0900	1.0838	1.0780
8.00	1.1609	1.1489	1.1380	1.1279	1.1187	1.1103	1.1024	1.0952	1.0885	1.0823