

文章编号: 1000-8241(2017)06-0734-05

# 适用于输气管道运行方案优化的压缩机功率拟合函数

熊浩云<sup>1,2</sup> 吴长春<sup>1</sup> 玉德俊<sup>3</sup>

1. 中国石油大学(北京)城市油气输配技术北京市重点实验室; 2. 中国石油西南管道公司贵阳输油气分公司;  
3. 中国石油天然气股份有限公司规划总院

**摘要:** 完成一次大型天然气管网运行方案优化预计需要数十小时的计算机运算时间,其中绝大部分时间用于压缩机组功率计算,基于此,提出利用拟合函数简化压缩机的功率计算,但该方法未考虑压缩机进口温度对功率的影响。为提高拟合精度,引入压缩机进口温度对拟合函数加以改进,并以国内某输气管道系统配置的3种型号压缩机为例检验其效果。结果表明:改进前的最大偏差在10%以上,而改进后的最大偏差低于5%,平均偏差低于1%。将改进的拟合函数应用于某虚拟管道的工艺运行方案优化过程,其结果与常规方法计算结果的绝对偏差低于0.67 MW,相对偏差低于1.1%,且拟合函数法比常规方法节省了大量计算时间。(表5,参21)

**关键词:** 天然气管道; 运行优化; 压缩机功率; 拟合函数

中图分类号: TE974

文献标识码: A

doi: 10.6047/j.issn.1000-8241.2017.06.019

网络出版时间: 2017-4-18 9:55:10

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/13.1093.TE.20170418.0955.002.html>

## The fitting function of compress power suitable for optimization of gas pipeline operation scheme

XIONG Haoyun<sup>1,2</sup>, WU Changchun<sup>1</sup>, YU Dejun<sup>3</sup>

1. Beijing Key Laboratory of Urban Oil and Gas Distribution Technology, China University of Petroleum (Beijing);  
2. Guiyang Oil & Gas Transmission Sub-company, PetroChina Southwest Pipeline Company;  
3. PetroChina Planning and Engineering Institute

**Abstract:** It is expected to take dozens of hours' computer running time to complete the operation scheme optimization of large-scale natural gas network, and most of the time is spent on the computation of compressor power. It is proposed to simplify the computation of compressor power by using the fitting function, but this method doesn't take into consideration the effect of inlet temperature on compressor power. To increase the fitting precision, the fitting function was modified by introducing the inlet temperature of compressor. Then, three types of compressors installed in a domestic gas pipeline were used to test the performance of the fitting function. It is indicated that the maximum deviation of the fitting function is higher than 10% before the modification and lower than 5% after the modification and the average deviation is lower than 1%. When the modified fitting function is applied to the operation scheme optimization of a virtual gas pipeline, the absolute deviation of the calculation results between the conventional method and fitting function method is less than 0.67 MW and the relative deviation is less than 1.1%. The fitting function method saves much more time than the conventional method. (5 Tables, 21 References)

**Key words:** gas pipeline, operation optimization, compressor power, fitting function

输气管网运行方案优化通常以能耗量或能耗费用最低作为目标函数,输气压缩机组的能耗计算是优化

过程中需要反复调用的计算环节,该环节的计算量在整个优化过程中占很大比例。对于一个大型输气管

网,利用计算机进行一次运行方案优化预计花费数十小时<sup>[1-2]</sup>,其中绝大部分时间用于压缩机组能耗计算,因此设法减少该环节计算量可大大减少运行方案优化所需的计算时间。

输气管道压气站多数采用可调速离心压缩机组对天然气增压。在进行输气管网运行方案优化的过程中,通常需要根据压缩机的气体流量、进口压力、出口压力、进口温度计算压缩机组能耗。常规的计算方法需要利用压缩机特性曲线、压缩机效率曲线、相关热力学公式及气体状态方程<sup>[3]</sup>,且需迭代求解压缩机转速,其计算过程繁琐、计算量大,是制约输气管网运行方案优化的瓶颈。由于该方法不能给出计算压气站能耗的解析式,因而也限制了输气管网运行方案优化方法的选用范围。为此,Wu<sup>[4]</sup>提出了一种基于拟合函数的输气压缩机功率近似算法,其将压缩机功率与气体流量、进口压力和出口压力之间的关系拟合为一个显式函数,从而大大简化了压缩机功率计算。但该拟合函数是在特定温度条件下得到的,不适用于其他温度条件。为拓展该方法的适用性,引入压缩机进口温度作为自变量,对Wu的拟合函数加以改进。

## 1 常规方法

### 1.1 压缩机特性曲线

压缩机特性曲线是功率计算的依据<sup>[5-7]</sup>。常用压缩机特性曲线有压头-流量-转速曲线、效率-流量-转速曲线,其相应的特性方程具有如下形式:

$$H_{\text{pol}}/g = a_1 Q^2 + a_2 Q \frac{n}{n_0} + a_3 \left( \frac{n}{n_0} \right)^2 \quad (1)$$

$$\eta_{\text{pol}} = b_1 Q^2 \left( \frac{n_0}{n} \right)^2 + b_2 Q \frac{n_0}{n} + b_3 \quad (2)$$

式中: $H_{\text{pol}}$ 为压缩机多变能头, kJ/kg;  $\eta_{\text{pol}}$ 为压缩机多变效率;  $Q$ 为压缩机进口状态下的气体体积流量,  $\text{m}^3/\text{s}$ ;  $n$ 为压缩机实际转速, rpm;  $n_0$ 为压缩机额定转速, rpm;  $g$ 为重力加速度,取值  $9.8 \text{ m/s}^2$ ;  $a_1$ 、 $a_2$ 、 $a_3$ 、 $b_1$ 、 $b_2$ 、 $b_3$ 为拟合系数。

### 1.2 压缩机功率计算

天然气在离心压缩机中的增压过程为多变过程<sup>[8-12]</sup>,其相关计算公式为:

$$N_s = \frac{GH_{\text{pol}}}{\eta_{\text{pol}}\eta_m} \quad (3)$$

$$T_2 = T_1 \left( \frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{m_T-1}{m_T}} \quad (4)$$

$$H_{\text{pol}} = \frac{m_V}{m_V-1} Z_1 R_g T_1 \left[ \left( \frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{m_V-1}{m_V}} - 1 \right] \quad (5)$$

$$\frac{m_T}{m_T-1} = \eta_{\text{pol}} \frac{k_T}{k_T-1} \quad (6)$$

$$m_V = \frac{\lg(p_2/p_1)}{\lg(\rho_2/\rho_1)} \quad (7)$$

$$\frac{k_T-1}{k_T} = \frac{p}{\rho^2 c_p} \left( \frac{\partial p}{\partial T} \right)_p \quad (8)$$

式中: $N_s$ 为压缩机输入功率, kW;  $G$ 为天然气的质量流量, kg/s;  $\eta_m$ 为机械效率;  $T_1$ 、 $T_2$ 分别为压缩机进口处和出口处的气体温度, K;  $p_1$ 、 $p_2$ 分别为压缩机进口压力和出口压力, Pa;  $m_T$ 为温度多变指数;  $Z_1$ 为天然气压缩因子;  $R_g$ 为天然气的气体常数, kJ/(kg·K);  $\rho_1$ 、 $\rho_2$ 分别为进出口条件下的天然气密度,  $\text{kg/m}^3$ ;  $k_T$ 为温度绝热指数;  $c_p$ 为天然气的定压比热, J/(kg·K)。

温度绝热指数 $k_T$ 随气体的温度和压力变化,而式(6)中的 $k_T$ 取对应于进口状态和出口状态的温度绝热指数的平均值。

在已知离心压缩机的气体质量流量、进口压力、出口压力和进口温度的条件下,联立式(1)~式(8),并应用气体状态方程即可以求解压缩机输入功率。由于 $k_T$ 、 $c_p$ 、 $\rho$ 、 $Z$ 的计算涉及气体状态方程,通常采用迭代法求解 $N_s$ 。可见,利用常规方法计算压缩机功率相当繁琐。

## 2 拟合函数法

为减少压缩机功率计算的工作量,Wu提出了压缩机功率计算的拟合函数法,其中两个拟合函数为:

$$f_1 = G \left[ A_1 \left( \frac{G}{p_1} \right)^2 + A_2 \left( \frac{p_2}{p_1} \right)^2 + A_3 \frac{G p_2}{p_1 p_1} + A_4 \frac{G}{p_1} + A_5 \frac{p_2}{p_1} + A_6 \right] \quad (9)$$

$$f_2 = p_1 \left[ B_1 \left( \frac{G}{p_1} \right)^2 + B_2 \left( \frac{p_2}{p_1} \right)^2 + B_3 \frac{G p_2}{p_1 p_1} + B_4 \frac{G}{p_1} + B_5 \frac{p_2}{p_1} + B_6 \right] \quad (10)$$

式中： $G$ 为天然气质量流量，kg/s； $f_1$ 、 $f_2$ 为压缩机功率，MW； $A_1$ 、 $A_2$ 、 $A_3$ 、 $A_4$ 、 $A_5$ 、 $A_6$ 、 $B_1$ 、 $B_2$ 、 $B_3$ 、 $B_4$ 、 $B_5$ 、 $B_6$ 为拟合系数。

由式(5)可知，压缩机进口处的气体温度  $T_1$  将直接影响压缩机功率。上述两个拟合函数均未涉及  $T_1$ ，原则上只适用于  $T_1$  为定值的情况，若应用于  $T_1$  为非定值的情况将使压缩机功率计算值产生不同程度的系统误差。为此，对式(9)、式(10)加上如下修正项：

$$f^* = GT_1 \left( C_7 \frac{p_2}{p_1} + C_8 \right) \quad (11)$$

式中： $C_7$ 、 $C_8$ 为拟合系数。

修正后的拟合函数分别为：

$$f_1^* = f_1 + f^* \quad (12)$$

$$f_2^* = f_2 + f^* \quad (13)$$

为了便于应用，拟合函数中的质量流量  $G$  被替换

为我国天然气行业标况(101 325 Pa, 20 °C)下的体积流量  $Q$ 。

### 3 实例分析

#### 3.1 拟合精度

为了检验改进的压缩机功率拟合函数的精度，以国内某输气管道上配置的3种型号压缩机作为检验对象<sup>[13]</sup>。压缩机的允许转速范围为3 120~4 800 rpm，机械效率为0.98，其各自的特性曲线参数列于表1，拟合函数自变量取值范围列于表2。天然气状态方程选用BWRS方程<sup>[14]</sup>。

在各自变量取值范围内等间距取10个点，每种压缩机得到10 000个工况点，剔除其中不在压缩机工况可行域中的点，采用大约5 000个可行数据点作为压缩机功率拟合函数的样本点。用常规方法计算样本点对应的压缩机功率，然后用最小二乘法确定拟合函数的系数，拟合偏差列于表3，其中MRD和ARD分别为常规方法与拟合函数法计算结果的最大相对偏差和平均相对偏差。可以看出，改进后的拟合函数精度明显优于改进前。此外， $f_2^*$ 的拟合精度略高于 $f_1^*$ ，其拟合系数列于表4。

表1 3种压缩机的特性曲线参数

型号	$a_1$	$a_2$	$a_3$	$b_1 \times 10^2$	$b_2 \times 10$	$b_3 \times 10$
1	-91.780	1 058.267	3 213.152	-1.809	2.880	-2.557
2	-177.301	1 121.734	3 716.255	-3.931	3.748	-0.045
3	-333.777	1 350.802	5 867.311	-3.831	2.715	3.805

表2 3种压缩机功率拟合函数的自变量取值范围

型号	流量/(m <sup>3</sup> ·s <sup>-1</sup> )		进口压力/MPa		出口压力/MPa		进口温度/°C	
	最小值	最大值	最小值	最大值	最小值	最大值	最小值	最大值
1	380	591	6.5	8.5	8.5	10	5	25
2	230	500	6.5	8.5	8.5	10	5	25
3	160	460	6.5	8.5	8.5	10	5	25

表3 压缩机功率拟合函数的偏差

型号	$f_1$		$f_2$		$f_1^*$		$f_2^*$		%
	MRD	ARD	MRD	ARD	MRD	ARD	MRD	ARD	
1	10.84	3.04	10.39	3.03	2.34	0.51	2.25	0.49	
2	11.10	3.53	11.64	3.52	4.15	0.82	4.53	0.78	
3	9.23	3.38	9.78	3.34	3.76	0.82	3.11	0.66	

表4  $f_2^*$  的拟合系数

型号	$B_1 \times 10^4$	$B_2$	$B_3 \times 10^2$	$B_4 \times 10^2$	$B_5$	$B_6$	$C_7 \times 10^4$	$C_8 \times 10^4$
1	3.317	1.902	0.752	-3.285	0.162	-1.743	2.914	-2.277
2	3.535	0.496	3.606	-5.539	0.682	-0.982	3.064	-2.272
3	3.153	-0.297	5.769	-6.953	1.514	-1.173	3.513	-2.761

### 3.2 拟合函数

考虑一条长 1 500 km 的虚拟水平输气管道,钢管规格为  $\phi 1 016 \times 17.5$ , 全线设 10 个压气站,站间距均为 150 km。首站进气压力 7 MPa、进气温度 15 °C,管道终点(末站出口)压力 5 MPa。每个压气站允许最高出站压力和最低进站压力分别为 10 MPa 和 6.5 MPa。前 5 座压气站配置型号 1 压缩机 1 台,后 5 座压气站配置型号 2、3 压缩机各 1 台。

采用动态规划算法对该管道在多种流量下的工艺运行方案进行优化<sup>[15-17]</sup>,取压气站出口压力离散步长为 0.01 MPa。在优化过程中,分别采用常规方法和拟合函数法计算压缩机组功率。后 5 座压气站两台压缩机同时运行,分别采用黄金分割法(常规方法计算能耗)和牛顿法(拟合函数计算能耗)计算站内两台机组之间的最优负荷分配<sup>[18-21]</sup>。结果表明:拟合函数法与常规方法计算的总功率的绝对偏差小于 0.67 MW,相对偏差小于 1.1%,而拟合函数法比常规方法节省了大量计算时间(表 5)。

表5 采用常规方法和拟合函数法计算压缩机组功率的结果对比

体积流量 $/(10^6 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1})$	总功率/MW		计算时间/s	
	常规方法	拟合函数	常规方法	拟合函数
36	61.62	60.95	2 852.46	696.95
39	77.07	76.92	2 771.16	511.72
42	93.70	93.77	2 234.23	353.41
45	119.70	119.33	1 516.23	236.63
48	150.98	150.67	971.89	143.86
51	189.38	189.17	618.23	76.01

## 4 结论

压缩机功率拟合函数考虑了进口温度的影响,拟合精度比改进前明显提高,可以满足输气管网运行方案优化的要求。与常规方法相比,采用拟合函数计算压缩机功率可以减少大量计算时间。

### 参考文献:

- [1] BOTROS K K, SENNHAUSER D, STOFFREGEN J, et al. Large pipeline network optimization-summary and conclusion of TransCanada research effort[C]. Calgary: 6th International Pipeline Conference, 2006: 657-670.
- [2] 艾慕阳,柳建军,李博,等.天然气管网稳态运行优化技术现状与展望[J].油气储运,2015,34(6):571-575.  
AI M Y, LIU J J, LI B, et al. Current status and prospect of steady operation optimization techniques for gas pipeline network[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2015, 34(6): 571-575.
- [3] 张晓瑞.基于用气量变化的输气管道非稳态优化运行研究[D].北京:中国石油大学(北京),2016:9-23.  
ZHANG X R. Optimization of transient operation for a gas pipeline with varying gas consumption[D]. Beijing: China University of Petroleum (Beijing), 2016: 9-23.
- [4] WU S, RÍOS-MERCADO R Z, BOYD E A, et al. Model relaxations for the fuel cost minimization of steady-state gas pipeline networks[J]. Mathematical and Computer Modeling, 2000, 31(2-3): 197-220.
- [5] 吴长春,杨廷胜.“西气东输”管道工艺运行方案优化[J].天然气工业,2004,24(11):127-130.  
WU C C, YANG T S. Optimizing the pipeline process operation programs of West-East Gas Transmission[J]. Natural Gas Industry, 2004, 24(11): 127-130.
- [6] ODOM F M, MUSTER G L. Tutorial on modeling of gas turbine driven centrifugal compressors[C]. Galveston: PSIG Annual Meeting, 2009: 1-36.
- [7] 李晓平,李天成,吕勃蓬,等.天然气管道离心压缩机的运行特性研究[J].压缩机技术,2013(3):33-37.  
LI X P, LI T C, LYU B P, et al. Research on the operation characteristics of natural gas pipeline centrifugal compressor[J]. Compressor Technology, 2013(3): 33-37.
- [8] SCHULTZ J M. The polytropic analysis of centrifugal

- compressors[J]. *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, 1962, 84(1):69-82.
- [9] 徐忠. 离心式压缩机原理[M]. 北京: 机械工业出版社, 1990: 231-260.
- XU Z. Principles of centrifugal compressors[M]. Beijing: China Machine Press, 1990:231-260.
- [10] 李宁, 孙立刚, 胡柏松. 离心式压缩机多变指数的确定[J]. 油气储运, 2009, 28(8):16-19.
- LI N, SUN L G, HU B S. Method to determine polytropic exponent of centrifugal compressor[J]. *Oil & Gas Storage and Transportation*, 2009, 28(8):16-19.
- [11] MODISETTE J L. Equation of state tutorial[C]. Savannah: PSIG Annual Meeting, 2000: 1-21.
- [12] DAUBERT T E, DANNER R P. API technical data book-petroleum refining[S]. Washington DC: American Petroleum Institute, 1997: 7.115-7.132.
- [13] 杨义. 中国石油主干输气管网稳态仿真与优化运行软件的开发[D]. 北京: 中国石油大学(北京), 2007:53-56.
- YANG Y. Development of simulation and optimization software for steady operation of Petrochina gas pipeline network[D]. Beijing: China University of Petroleum (Beijing), 2007:53-56.
- [14] 李玉星, 姚光镇. 输气管道设计与管理[M]. 东营: 中国石油大学出版社, 2009:26-30.
- LI Y X, YAO G Z. The design and management of gas transmission pipeline[M]. Dongying: China University of Petroleum Press, 2009: 26-30.
- [15] 吴长春, 严大凡. 热油管道稳态运行的两级递阶优化模型[J]. 石油学报, 1989, 10(3):109-117.
- WU C C, YAN D F. A two-level hierarchical model for optimizing steady operation of hot oil pipelines[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 1989, 10(3):109-117.
- [16] WONG P J, LARSON R E. Optimization of natural-gas pipeline systems via dynamic programming[J]. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 1968, 13(5):475-481.
- [17] LIU E, LI C, YANG Y. Optimal energy consumption analysis of natural gas pipeline[J]. *The Scientific World Journal*, 2014(4):1-8.
- [18] MAHMOUDIMEHR J, SANAYE S. Minimization of fuel consumption of natural gas compressor stations with similar and dissimilar turbo-compressor units[J]. *Journal of Energy Engineering*, 2013, 140(1):04013001.
- [19] 陈宝林. 最优化理论与算法[M]. 北京: 清华大学出版社, 2005:287-289.
- CHEN B L. Optimization theory and algorithm[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2005:287-289.
- [20] 杨廷胜. 西气东输管道稳态优化运行软件的开发及应用[D]. 北京: 中国石油大学(北京), 2003:17-25.
- YANG T S. Development & application of the software for optimizing the steady operation of West to East Gas Pipeline[D]. Beijing: China University of Petroleum (Beijing), 2003:17-25.
- [21] CARTER R G. Compressor station optimization: Computational accuracy and speed[C]. San Francisco: PSIG Annual Meeting, 1996:1-24.
- (收稿日期:2017-02-15; 修回日期:2017-04-29; 编辑:杜娟)

---

**作者简介:** 熊浩云, 男, 1988年生, 工程师, 2013年硕士毕业于中国石油大学(北京)油气储运工程专业, 现主要从事天然气管道生产运行工作。地址: 贵州省贵阳市观山湖区金城街101号, 550081。电话: 18788679623, Email: xionghaoyun@hotmail.com