

天然气管网中一类新的压缩机功率拟合函数

马 越 寇彩霞

北京邮电大学理学院, 北京 100876

摘 要:对于大型天然气管网系统,完成一次运行优化问题的求解需要数十小时,其中压缩机功率的计算时间占绝大部分。针对应用广泛但功率计算极其复杂的离心式压缩机,为提高计算效率、加快天然气管网运行优化问题的求解速度,提出了3个新的压缩机功率拟合函数。以中国某天然气管网系统中配置的3种型号压缩机为实验对象,测试3个新的压缩机功率拟合函数的数值效果。实验结果表明,对于3种型号压缩机,3个新的压缩机功率拟合函数在精度上均有大幅度提高。此外,将3个新的压缩机功率拟合函数应用于虚拟的天然气管网系统进行运行优化问题求解测试,并与压缩机功率的传统计算方法进行对比。结果表明,使用3个新的压缩机功率拟合函数计算压缩机功率在保证求解精度的同时大大减少了求解时间。

关键词:天然气管网;拟合函数;压缩机功率;运行优化

DOI:10.3969/j.issn.1006-5539.2022.01.002

A new class of fitting function for compressor power in gas pipeline networks

MA Yue, KOU Caixia

School of Science, Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing, 100876, China

Abstract: For large natural gas pipeline networks, it takes dozens of hours to complete one operation optimisation, in which the calculation time of the compressor power accounts for the vast majority of the run time. For centrifugal compressors that are widely used but extremely difficult to calculate power consumption, in order to improve the calculation efficiency and accelerate the speed of solving operation optimisation problems, three new fitting functions of centrifugal compressor power are proposed. The numerical performances of these three new fitting functions are tested with three types of compressors as experimental objects. The experimental results show that for the three types of compressors, the accuracy of the power calculation has improved a lot after using the three new fitting functions. In addition, these three new fitting functions are applied to operation optimisation of a virtual gas pipeline network and the results are compared with the traditional method for calculating the compressor power. The numerical results show that using three new fitting functions to calculate the compressor power can greatly reduce the solution time

收稿日期:2021-07-18

基金项目:国家自然科学基金“支持深度学习的优化方法及其在医学中的应用”(11971073);国家自然科学基金“非凸二次约束优化问题的二阶锥重塑技术等全局性方法研究”(11871115)

作者简介:马 越(1996-),女,山东日照人,硕士研究生,主要研究方向为最优化方法及其应用。E-mail:mayue0515@bupt.edu.cn

通信作者:寇彩霞(1983-),女,内蒙古乌兰察布人,副教授,博士,主要从事最优化方法及其应用方向的研究工作。E-mail:koucx@bupt.edu.cn

while ensuring the accuracy of the solution.

Keywords: Gas pipeline network; Fitting function; Compressor power; Operation optimization

0 前言

近年来,中国天然气需求量不断增长、管道业务迅速发展,高效求解天然气管网系统运行优化问题越发重要。天然气管网系统运行优化问题通常以运行成本最低作为目标函数^[1-2],压缩机功率作为运行成本的重要组成部分在整个优化过程中需要反复计算。对于大型天然气管网系统,完成一次运行优化问题的求解一般需要数十小时^[3-4],而压缩机功率的计算量占绝大部分。因此,设法简化压缩机功率计算、减少该环节的计算量,对整个天然气管网系统运行优化尤为重要。

天然气管网系统中常用的压缩机有往复式压缩机和离心式压缩机。往复式压缩机功率计算较为简单,计算量小。离心式压缩机特性方程复杂,功率计算繁琐,但因其运行平稳、排量大、调节方便等优点而被广泛应用于天然气管网系统^[5-6],本文主要对离心式压缩机的功率计算进行研究。在天然气管网系统运行优化问题的求解过程中,需要根据压缩机的入口气体流量、入口气体压力、出口气体压力及入口气体温度等变量计算压缩机功率。压缩机功率的传统计算方法需要利用压缩机特性方程、相关的气体热力学公式以及气体状态方程等,迭代求解压缩因子、压缩机转速等多个参数,计算过程极其复杂,计算量大^[7]。

为提高计算效率、加快求解速度,Wu Suming 等人^[8]提出了1种基于拟合函数的压缩机功率近似计算方法。其思想是将压缩机功率与压缩机入口气体流量、入口气体压力和出口气体压力之间的关系拟合为1个显式函数,以代替压缩机功率的传统计算方法。但该压缩机功率拟合函数未考虑压缩机入口气体温度变化,适应性较差。为增强压缩机功率拟合函数的适应性,熊浩云等人^[7]将压缩机入口气体温度作为自变量,对Wu Suming 等人的压缩机功率拟合函数加以改进,精度明显提高,但对于实际应用仍需进一步提高精度。为满足实际应用需求,进一步提高压缩机功率拟合函数的精度,本文提出了3个新的压缩机功率拟合函数。

1 传统计算方法

离心式压缩机功率传统计算方法的主要思想是根据压缩机入口气体流量、入口气体压力、出口气体压力和入口气体温度等变量,结合压缩机特性方程、相关的气体热力学公式及气体状态方程,利用迭代法计算压缩机功率。

1.1 压缩机特性方程

压缩机特性方程是计算压缩机功率的依据^[9-10],对

于离心式压缩机,常用的变转速特性方程有压头—流量—转速方程、效率—流量—转速方程、喘振流量—转速方程和滞止流量—转速方程,见式(1)~(4)^[11]:

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

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

$$Q_{surge} = c_1 n^2 + c_2 n + c_3 \quad (3)$$

$$Q_{stonewall} = d_1 n^2 + d_2 n + d_3 \quad (4)$$

式中: H_{pol} 为压缩机多变压头,kJ/kg; g 为重力加速度,取 9.8 m/s^2 ; η_{pol} 为压缩机多变效率; Q_{surge} 为喘振流量, m^3/s ; $Q_{stonewall}$ 为滞止流量, m^3/s ; Q 为压缩机入口状态下的天然气体积流量, m^3/s ; n_0 为压缩机额定转速,r/min; n 为压缩机实际转速,r/min; $a_1 \sim a_3$ 、 $b_1 \sim b_3$ 、 $c_1 \sim c_3$ 、 $d_1 \sim d_3$ 分别为相应系数。

1.2 气体状态方程

常用气体状态方程有Van den Waals^[12]、RK^[13]、SRK^[14]、PR^[15]和BWRS^[16]等。本文采用精度较高的BWRS方程,见式(5):

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

式中: p 为压力,kPa; R 为通用气体常数,取 $8.314 \text{ kJ}/(\text{kmol} \cdot \text{K})$; T 为温度,K; ρ 为天然气密度, kmol/m^3 ; $A_0 \sim E_0$ 、 $b \sim d$ 、 o 、 α 、 γ 分别为相应系数。

1.3 压缩机功率的传统计算方法

下面介绍天然气在离心式压缩机中增压多变过程的主要计算公式。表1^[17]给出了随状态变化各点上的可压缩性函数 X 、 Y ,最大与最小等熵指数比 $k_{\max}/k_{\min}$ 所规定的精确度。当气体状态满足表1所列的范围时,可以近似使用理想气体的相关计算公式^[17-18],见式(6)~(9):

$$u = \frac{1}{1 - \frac{k-1}{\eta_{pol} k}} \quad (6)$$

$$T_2 = T_1 \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{u-1}{u}} \quad (7)$$

$$H_{pol} = \frac{u}{u-1} Z_1 R_s T_1 \left[\left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{u-1}{u}} - 1 \right] \quad (8)$$

$$N = \frac{q H_{pol}}{\eta_{pol} \eta_m} \quad (9)$$

式中: u 为多变指数; k 为等熵指数; T_1 、 T_2 分别为压缩机入

口、出口气体温度, K; p_1 、 p_2 分别为压缩机入口、出口气体压力, Pa; Z_1 为压缩机入口气体压缩因子; 比气常数 $R_s = R/M$, 其中 M 为克分子质量 (kg/kmol); q 为天然气质量流量, kg/s; η_m 为压缩机机械效率; N 为压缩机功率, MW。

表 1 用于状态变化简化计算的允许偏离表

Tab. 1 Allowable deviation for simplifying calculations of state changes

压力比	$k_{\max}/k_{\min}$	最大压缩性函数		最小压缩性函数	
		X	Y	X	Y
1.4	1.12	0.279	1.071	-0.344	0.925
2.0	1.10	0.167	1.034	-0.175	0.964
4.0	1.09	0.071	1.017	-0.073	0.982
8.0	1.08	0.050	1.011	-0.041	0.988
16.0	1.07	0.033	1.008	-0.031	0.991
32.0	1.06	0.028	1.006	-0.025	0.993

如果给定的真实气体特性超出表 1 所列极限值, 确定多变指数时应考虑压缩过程中可压缩性系数的变化, 故对于真实气体的相关计算公式见式 (10) ~ (14) [17]:

$$u = \frac{1+X}{\frac{1}{k_v} \left(\frac{1}{\eta_{\text{pol}}} + X \right) - Y \left(\frac{1}{\eta_{\text{pol}}} - 1 \right)} \quad (10)$$

$$T_2 = T_1 \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^m \quad (11)$$

$$m = \frac{\frac{k_v Y - 1}{k_v} \left(\frac{1}{\eta_{\text{pol}}} + X \right)}{(1+X)^2} \quad (12)$$

$$H_{\text{pol}} = \frac{u}{u-1} Z_1 R_s T_1 \left[\left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{u-1}{u}} - 1 \right] \quad (13)$$

$$N = \frac{q H_{\text{pol}}}{\eta_{\text{pol}} \eta_m} \quad (14)$$

式中: X 、 Y 为可压缩性函数, $X = \frac{T}{Z} \left(\frac{\partial Z}{\partial T} \right)_p$, $Y = 1 - \frac{p}{Z} \left(\frac{\partial Z}{\partial p} \right)_T$ 要用到 p_1 到 p_2 压缩过程的平均值, 即 $X = (X_1 + X_2)/2$, $Y = (Y_1 + Y_2)/2$; 苏尔兹修正系数 $f = \frac{h_{2s} - h_1}{\frac{k_v}{k_v - 1} (p_2 v_{2s} - p_1 v_1)}$, 容积等熵指数 $k_v = \ln \frac{p_2}{p_1} / \ln \frac{v_1}{v_{2s}}$, 其中 h_i 为气体在状态 i 下的比焓, v_i 为气体在状态 i 下的比容。

根据压缩机特性方程式 (1) ~ (4)、气体状态方程式 (5)、上述方程式 (6) ~ (14) 及其推导出的其他气体物性参数, 可以通过迭代计算得到压缩机出口气体温度 T_2 和压缩机功率 N 。

2 拟合函数法

在天然气管网系统运行优化问题中, 采用传统方法计算压缩机功率非常复杂、耗时。因此, 本文考虑采用基于拟合函数的压缩机功率近似计算方法, 将压缩机功率与压缩机入口气体流量、入口气体压力、出口气体压力和入口气体温度之间的关系拟合为一个显式函数。使用该拟合函数计算压缩机功率以降低计算成本、加快求解速度。目前已有的压缩机功率拟合函数均存在精度较低、适应性较差的缺点, 不能满足实际应用需求。故本文在已有的研究基础上, 提出了 3 个精度更高的压缩机功率拟合函数 g_{new}^1 、 g_{new}^2 、 g_{new}^3 , 见式 (15) ~ (17):

$$g_{\text{new}}^1 = q \left[A_1 \left(\frac{q}{p_1} \right)^2 + A_2 \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^2 + A_3 \frac{q}{p_1} \frac{p_2}{p_1} + A_4 \frac{q}{p_1} + A_5 \frac{p_2}{p_1} + A_6 \right] + q T_1 \left(A_7 \frac{p_2}{p_1} + A_8 \frac{1}{p_1} + A_9 \right) \quad (15)$$

$$g_{\text{new}}^2 = p_1 \left[B_1 \left(\frac{q}{p_1} \right)^2 + B_2 \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^2 + B_3 \frac{q}{p_1} \frac{p_2}{p_1} + B_4 \frac{q}{p_1} + B_5 \frac{p_2}{p_1} + B_6 \right] + q T_1 \left(B_7 \frac{p_2}{p_1} + B_8 \frac{1}{p_1} + B_9 \right) \quad (16)$$

$$g_{\text{new}}^3 = p_2 \left[C_1 \left(\frac{q}{p_1} \right)^2 + C_2 \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^2 + C_3 \frac{q}{p_1} \frac{p_2}{p_1} + C_4 \frac{q}{p_1} + C_5 \frac{p_2}{p_1} + C_6 \right] + q T_1 \left(C_7 \frac{p_2}{p_1} + C_8 \frac{1}{p_1} + C_9 \right) \quad (17)$$

式中: $A_1 \sim A_9$ 、 $B_1 \sim B_9$ 、 $C_1 \sim C_9$ 为相应拟合系数。

g_{new}^1 、 g_{new}^2 是在 Wu Suming 等人的研究基础上, 结合压缩机多变压头式 (8)、功率式 (9), 考虑压缩机入口气体温度 T_1 对压缩机功率的影响, 在压缩机功率拟合函数中加入关于变量 T_1 的修正项 $q T_1 \left(\alpha \frac{p_2}{p_1} + \beta \frac{1}{p_1} + \gamma \right)$, 以提高拟合精度。

当 g_{new}^1 、 g_{new}^2 忽略修正项, 即对应系数 $A_7 \sim A_9$ 、 $B_7 \sim B_9$ 均为 0 时, g_{new}^1 、 g_{new}^2 即为 Wu Suming 等人提出的 2 个压缩机功率拟合函数 g_{wu}^1 、 g_{wu}^2 。 g_{wu}^1 、 g_{wu}^2 未考虑变量 T_1 对压缩机功率的影响, 默认压缩机入口气体温度 T_1 恒定, 使得 g_{wu}^1 、 g_{wu}^2 误差较大, 不适合实际应用。当 g_{new}^1 、 g_{new}^2 修正项中的系数 A_8 、 B_8 均为 0 时, g_{new}^1 、 g_{new}^2 即为熊浩云等人提出的 2 个压缩机功率拟合函数 g_{xiong}^1 、 g_{xiong}^2 。 g_{xiong}^1 、 g_{xiong}^2 采用的关于温度 T_1 的修正项过于简单, 使整个压缩机功率拟合函数精度不高。

g_{new}^3 是在 g_{new}^1 、 g_{new}^2 的基础上, 通过分析 g_{new}^1 、 g_{new}^2 的函数结构, 结合各变量之间的关系, 进一步提出的另一种压缩机功率拟合函数。为了便于应用, 本文使用中国天然气行业标况 (101 325 Pa, 20 °C) 下的体积流量 Q 代替拟合函数中的质量流量 q [7]。

3 拟合函数精度对比

以中国某天然气管网系统中配置的 3 种型号压缩机为实验对象,检验 3 个新的压缩机功率拟合函数 g_{new}^1 、 g_{new}^2 、 g_{new}^3 的数值表现效果。

实验中各自变量取值范围如下: $380\text{ m}^3/\text{s} \leq \text{入口气体体积流量 } Q \leq 591\text{ m}^3/\text{s}$, $6.5 \times 10^6\text{ Pa} \leq \text{入口气体压力 } p_1 \leq 8.5 \times 10^6\text{ Pa}$, $8.5 \times 10^6\text{ Pa} \leq \text{出口气体压力 } p_2 \leq 1.0 \times 10^7\text{ Pa}$, $278.15\text{ K} \leq \text{入口气体温度 } T_1 \leq 298.15\text{ K}$ 。相关参数取值如下:压缩机机械效率 η_m 为 0.98,转速范围为 $3\ 120 \sim 4\ 800\text{ r/min}$,压缩机特性方程系数见表 2。天然气各成分摩尔含量为:甲烷 96.30%、乙烷 1.95%、丙烷 0.16%、正丁烷 0.03%、异丁烷 0.03%、正戊烷 0.01%、异戊烷 0.01%、正己烷 0.03%、二氧化碳 0.66%、氮气 0.82%。

首先,确定 g_{new}^1 、 g_{new}^2 、 g_{new}^3 的拟合系数。

1) 选取样本点^[7]。在各自变量定义域内等距取 10 个点,组合得到 10 000 个工况数据,去掉不在可行域中的工况数据,得到 4 904 个可行工况数据。用传统计算方法计算可行工况数据对应的压缩机功率,得到 4 904 个样本点。

表 3 g_{new}^1 、 g_{new}^2 、 g_{new}^3 的拟合系数表

Tab. 3 Coefficients of g_{new}^1 , g_{new}^2 , g_{new}^3

拟合函数	型号	拟合系数值								
		A_1	A_2	A_3	A_4	A_5	A_6	A_7	A_8	A_9
g_{new}^1	1	$4.830\ 9 \times 10^6$	0.025 2	-943.447 3	530.321 6	-0.004 5	-0.031 3	$3.246\ 0 \times 10^{-4}$	82.619 7	$-2.669\ 1 \times 10^{-4}$
	2	$7.320\ 0 \times 10^5$	-0.002 5	-168.922 5	93.807 6	0.008 6	-0.008 4	$1.667\ 8 \times 10^{-4}$	34.625 0	$-1.567\ 1 \times 10^{-4}$
	3	$1.436\ 9 \times 10^6$	-0.009 4	-199.774 3	81.779 8	0.001 7	-0.001 4	$4.231\ 6 \times 10^{-4}$	89.675 4	$-3.914\ 1 \times 10^{-4}$
拟合函数	型号	拟合系数值								
		B_1	B_2	B_3	B_4	B_5	B_6	B_7	B_8	B_9
g_{new}^2	1	312.183 0	$1.807\ 4 \times 10^{-6}$	-0.074 9	0.033 2	$1.763\ 6 \times 10^{-7}$	$-1.694\ 4 \times 10^{-6}$	$3.233\ 5 \times 10^{-4}$	91.291 4	$-2.665\ 5 \times 10^{-4}$
	2	29.949 9	$-2.016\ 2 \times 10^{-7}$	-0.022 9	0.017 3	$1.458\ 8 \times 10^{-6}$	$-1.296\ 7 \times 10^{-6}$	$1.657\ 4 \times 10^{-4}$	35.544 6	$-1.554\ 5 \times 10^{-4}$
	3	103.078 6	$-7.990\ 5 \times 10^{-7}$	-0.050 3	0.032 1	$3.021\ 6 \times 10^{-6}$	$-2.196\ 3 \times 10^{-6}$	$4.221\ 5 \times 10^{-4}$	94.940 9	$-3.905\ 6 \times 10^{-4}$
拟合函数	型号	拟合系数值								
		C_1	C_2	C_3	C_4	C_5	C_6	C_7	C_8	C_9
g_{new}^3	1	245.424 1	$9.833\ 2 \times 10^{-7}$	-0.043 5	0.006 6	$1.160\ 7 \times 10^{-6}$	$-1.927\ 5 \times 10^{-6}$	$3.313\ 3 \times 10^{-4}$	90.796 9	$-2.534\ 7 \times 10^{-4}$
	2	24.165 6	$9.597\ 0 \times 10^{-8}$	-0.012 7	0.006 7	$3.804\ 6 \times 10^{-7}$	$-4.549\ 2 \times 10^{-7}$	$1.668\ 0 \times 10^{-4}$	35.367 1	$-1.569\ 3 \times 10^{-4}$
	3	81.726 6	$3.651\ 4 \times 10^{-7}$	-0.027 2	0.009 5	$-1.858\ 0 \times 10^{-7}$	$-0.755\ 9 \times 10^{-7}$	$4.226\ 6 \times 10^{-4}$	94.663 5	$-3.914\ 0 \times 10^{-4}$

其次,对不同压缩机功率拟合函数的精度进行对比。

1) 选取测试工况数据。在各自变量定义域内随机取 10 个点,组合得到 10 000 个工况数据,去掉不在可行域中的工况数据,得到 3 203 个可行工况数据作为测试

2) 确定拟合系数。对于上述样本点,应用 matlab 中的非线性拟合函数 nlinfit 确定 g_{new}^1 、 g_{new}^2 、 g_{new}^3 的拟合系数,结果见表 3。

表 2 压缩机特性方程系数表

Tab. 2 Coefficients of compressor characteristic equations

系数	各型号系数值		
	1	2	3
a_1	-91.780 2	-177.300 6	-52.561 2
a_2	1 058.267 0	1 121.734 0	289.888 5
a_3	3 213.152 0	3 716.255 0	6 699.786 0
b_1	-0.018 1	-0.039 3	-0.006 1
b_2	0.288 0	0.574 8	0.084 8
b_3	-0.255 7	-0.004 5	0.586 9
c_1	$-2.950\ 0 \times 10^{-7}$	$-2.889\ 6 \times 10^{-7}$	$1.587\ 6 \times 10^{-4}$
c_2	4.800 9	2.854 2	2.634 7
c_3	-5.167 8	-5.049 9	3 029.578 0
d_1	$1.105\ 4 \times 10^{-6}$	$7.838\ 8 \times 10^{-8}$	$2.929\ 7 \times 10^{-4}$
d_2	8.627 4	5.132 5	5.926 3
d_3	20.762 6	1.304 7	178.221 0

工况数据。

2) 计算误差。分别采用传统计算方法和拟合函数法计算每个测试工况数据对应的压缩机功率并计算两者之间的最大相对误差与平均相对误差。

实验结果见表 4。由表 4 可知,本文提出的 3 个新压缩机功率拟合函数 g_{new}^1 、 g_{new}^2 、 g_{new}^3 的计算精度较其余 4 个压缩机功率拟合函数 g_{wu}^1 、 g_{wu}^2 、 g_{xiong}^1 、 g_{xiong}^2 的计算精度均有明显提高。与 g_{wu}^1 、 g_{wu}^2 、 g_{xiong}^1 、 g_{xiong}^2 中精度最高的 g_{xiong}^2 相比,本文提出的 3 个新压缩机功率拟合函数的最大误差减小量最高可达 59.56%,平均误差减小量最高可达 74.36%,具体结果见表 5。

表 4 各压缩机功率拟合函数的精度测试对比表

Tab.4 Comparasion of the accuracy of compressor power fitting functions

拟合函数	型号 1		型号 2		型号 3	
	最大误差	平均误差	最大误差	平均误差	最大误差	平均误差
g_{wu}^1	6.66%	2.49%	6.95%	2.43%	7.94%	2.67%
g_{wu}^2	7.39%	2.49%	7.22%	2.44%	8.41%	2.67%
g_{xiong}^1	3.55%	0.48%	1.28%	0.39%	1.75%	0.42%
g_{xiong}^2	2.58%	0.41%	1.36%	0.35%	1.69%	0.39%
g_{new}^1	2.15%	0.26%	0.77%	0.12%	0.99%	0.12%
g_{new}^2	1.45%	0.22%	0.76%	0.12%	0.73%	0.11%
g_{new}^3	1.51%	0.18%	0.55%	0.09%	0.70%	0.10%

表 5 g_{new}^1 、 g_{new}^2 、 g_{new}^3 的误差减小量对比表

Tab.5 Comparasion of error reduction of g_{new}^1 、 g_{new}^2 、 g_{new}^3

拟合函数	型号 1 减小量		型号 2 减小量		型号 3 减小量	
	最大误差	平均误差	最大误差	平均误差	最大误差	平均误差
g_{new}^1	16.67%	36.59%	43.38%	65.71%	41.42%	69.23%
g_{new}^2	43.80%	46.34%	44.12%	65.71%	56.80%	71.79%
g_{new}^3	41.47%	56.10%	59.56%	74.29%	56.80%	74.36%

4 案例分析

本节使用拟合函数法代替压缩机功率的传统计算

表 6 案例分析实验结果表

Tab.6 Experimental results of case analysis

流量 / ($10^6 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$)	功率 /MW				计算时间 /s				误差		
	传统计算方法	g_{new}^1	g_{new}^2	g_{new}^3	传统计算方法	g_{new}^1	g_{new}^2	g_{new}^3	g_{new}^1	g_{new}^2	g_{new}^3
35	27.16	27.42	27.24	27.2	64.33	1.87	1.91	1.84	0.96%	0.29%	0.15%
36	28.7	28.93	28.77	28.68	106.23	2.67	2.72	2.68	0.80%	0.24%	0.07%
37	30.33	30.5	30.36	30.47	147.39	3.1	3.09	3.08	0.56%	0.10%	0.46%
38	32.02	32.13	32.01	32.21	183.73	3.3	3.28	3.34	0.34%	0.03%	0.59%
39	33.77	33.82	33.71	34.2	194.53	3.03	3.11	3.1	0.15%	0.15%	1.27%
40	35.56	35.6	35.51	36.16	193.05	3.35	3.45	3.32	0.11%	0.14%	1.69%
41	37.44	37.42	37.33	37.94	223.44	4.9	4.97	4.99	0.05%	0.29%	1.34%

方法,应用于一小型虚拟天然气管网系统进行运行优化求解,并与传统计算方法进行对比,其中虚拟管网模型见图 1。3 台压缩机型号分别为 1、2、3,每条管道长 20 km。首个压缩机入口气体压力为 7 MPa、入口气体温度为 288.15 K,每个压缩机允许的最低入口气体压力和最高出口气体压力分别为 6.5 MPa 和 10 MPa。实验中采用动态规划算法对该天然气管网系统在多种流量下的运行优化问题进行求解^[19-20],压缩机出口压力离散步长取 0.01 MPa。

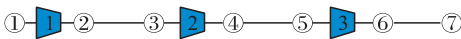


图 1 虚拟天然气管网系统图

Fig.1 Virtual gas pipeline network

所有实验均在 matlab 2015b 中编写,并在内核 2.10 GHz、内存 12 GB 的笔记本电脑上运行。为减弱 CPU 性能对实验结果的影响,对于每种流量方案均进行了 20 次实验,计算时间取其平均值,实验结果见表 6。由表 6 可得以下四点。

1) g_{new}^1 的误差随流量增大而减小,当流量大于 $37 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{d}$ 时,相对误差小于 0.56%,绝对误差小于 0.17 MW, g_{new}^1 更适用于较大流量的情形。

2) g_{new}^2 的误差随流量增大先减小后增大,相对误差小于 0.29%,绝对误差小于 0.11 MW, g_{new}^2 在不同流量情况下均适用。

3) g_{new}^3 的误差随流量增大先减小后增大,当流量小于 $38 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{d}$ 时,相对误差小于 0.59%,绝对误差小于 0.19 MW, g_{new}^3 更适用于较小流量的情形。

4) 与传统计算方法相比,使用 3 个新的拟合函数后的求解时间均减少了 97% 以上,求解效率大大提高。

综上,3 个新的拟合函数 g_{new}^1 、 g_{new}^2 、 g_{new}^3 在保证求解精度的同时能够大大减少求解时间,极大地提升了求解效率。拟合函数法的求解精度及所用求解时间均能够满足实际应用需求,可以应用于天然气管网系统运行优化中。

5 结论

本文提出了3个新的压缩机功率拟合函数 g_{new}^1 、 g_{new}^2 和 g_{new}^3 ,精度对比结果表明其计算精度较其他压缩机功率拟合函数的计算精度均有显著提升,可以满足天然气管网系统运行优化实际应用需求。此外,通过虚拟管网系统测试结果可知,与压缩机功率传统计算方法相比,拟合函数法在保证求解精度的基础上能够大幅度减少求解时间,可以应用于天然气管网系统运行优化中。

参考文献:

- [1] 郭 岚.天然气管道输送技术及优化模型设计[J]. 化学工程与装备, 2015(3): 60-62.
GUO Lan. Natural gas pipeline transportation technology and optimization model design [J]. Chemical Engineering & Equipment, 2015 (3): 60-62.
- [2] 李长俊,杨 毅,朱 勇,等.输气管道优化运行技术[J]. 天然气工业, 2005, 25(10): 106-109.
LI Changjun, YANG Yi, ZHU Yong, et al. Optimized operation of gas transmission pipelines [J]. Natural Gas Industry, 2005, 25 (10): 106-109.
- [3] BOTROS K K, SENNAUSER D, STOFFREGEN J, et al. Large pipeline network optimization: Summary and conclusion of trans-Canada research effort [C] //Proceedings of the 6th International Pipeline Conference, 25-29 September, 2006, Calgary, Alberta, Canada. New York: ASME, 2006: 657-670.
- [4] 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 Muyang, LIU Jianjun, LI Bo, 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.
- [5] 尹贻功.基于性能曲线拟合的离心式压缩机运行优化措施的制定[J]. 石油化工设备技术, 2020, 41(6): 26-33.
YIN Yigong. Establishment of optimization measures for centrifugal compressor operation based on performance curve fitting [J]. Petrochemical Equipment Technology, 2020, 41 (6): 26-33.
- [6] 王继坤,夏庆春.离心式压缩机常用变转速特性方程应用与改进[J]. 天然气与石油, 2017, 35(2): 13-16.
WANG Jikun, XIA Qingchun. Application and improvement of variable speed characteristic equations of centrifugal compressor [J]. Natural Gas and Oil, 2017, 35 (2): 13-16.
- [7] 熊浩云,吴长春,玉德俊.适用于输气管道运行方案优化的压缩机功率拟合函数[J]. 油气储运, 2017, 36(6): 734-738.
XIONG Haoyun, WU Changchun, YU Dejun. The fitting function of compress power suitable for optimization of gas pipeline operation scheme [J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2017, 36 (6): 734-738.
- [8] WU Suming, 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): 197-220.
- [9] 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 Changchun, YANG Tingsheng. Optimizing the pipeline process operation programs of West-East Gas Transmission [J]. Natural Gas Industry, 2004, 24 (11): 127-130.
- [10] ODOM F M, MUSTER G L. Tutorial on modeling of gas turbine driven centrifugal compressors [C] //Proceedings of the PSIG Annual Meeting, 12-15 May, 2009, Galveston, Texas, United States. Houston: PSIG, 2009: 1-36.
- [11] KOCH T, HILLER B, PFETSCH M, et al. Evaluating gas network capacities [M]. Philadelphia: Society for Industrial and Applied Mathematics, 2015.
- [12] WAALS J D, ROWLINSON J S. On the continuity of the gaseous and liquid states [M]. New York: Dover Publications, Inc., 2004.
- [13] MURDOCK J W. Fundamental fluid mechanics for the practicing engineer [M]. Boca Roton: CRC Press, 1993.
- [14] SOAVE G. Equilibrium constants from a modified Redlich-Kwong equation of state [J]. Chemical Engineering Science, 1972, 27 (6): 1197-1203.
- [15] PENG D Y, ROBINSON D B. A new two-constant equation of state [J]. Industrial and Engineering Chemistry Fundamentals, 1976, 15 (1): 59-64.
- [16] STARLING K E. Fluid thermodynamic properties for light petroleum systems [M]. Houston: Gulf Publishing, 1973.
- [17] 全国风机标准化技术委员会.透平压缩机—性能试验规程:GB/T 25630—2010 [S]. 北京:中国标准出版社, 2010:12.
SAC/T 187. Turbocompressors—Performance test code: GB/T 25630—2010 [S]. Beijing: Standards Press of China, 2010: 12.
- [18] 黄亚魁,李 博,康 阳,等.天然气稳态运行优化的混合整数模型及其算法[J]. 运筹学报, 2017, 21(2): 13-23.
HUANG Yakui, LI Bo, KANG Yang, et al. A mixed integer model and an algorithm for steady-state gas network optimization [J]. Operations Research Transactions, 2017, 21 (2): 13-23.
- [19] WONG P J, LARSON R E. Optimization of tree-structured natural-gas transmission networks [J]. Journal of Mathematical Analysis and Applications, 1968, 24 (3): 613-626.
- [20] 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.