

单条通用性天然气管线能耗计算软件的开发与应用

赵蔚蓝, 顾为, 李天俊

国家管网集团西南管道有限责任公司重庆输油气分公司, 重庆

收稿日期: 2024年4月11日; 录用日期: 2024年6月6日; 发布日期: 2024年6月17日

摘要

近年来, 有许多长输天然气管道建成并投运, 这使得单条天然气管道的研究具有一定的价值, 而最低能耗一直是管道企业追求的目标。本文研究了单条天然气管道的最优能耗问题, 主要是在稳态的基础上进行优化, 优化目标就是使得压气站的总能耗最低。优化方案通过两级优化完成, 即管道级优化和站场级优化。本文采用改进的动态规划方法和枚举算法结合完成优化工作, 并用Visual Basic.net开发了软件。本文以陕京二线管道为例, 利用软件对各种工况进行了优化。研究发现: 该软件能够较准确地计算出最优结果; 输出量越接近设计输入, 与实际相比节省的空间越小; 需要考虑运输成本和能源消耗, 选择合适的价值, 才能实现最大效益。

关键词

天然气管道, 能耗, 开发, 应用

Development and Application of Energy Consumption Calculation Software for a Single Universal Natural Gas Pipeline

Weilan Zhao, Wei Gu, Tianjun Li

Chongqing Oil and Gas Transportation Branch of State Grid Southwest Pipeline Co., Ltd., Chongqing

Received: Apr. 11th, 2024; accepted: Jun. 6th, 2024; published: Jun. 17th, 2024

Abstract

In recent years, many long-distance natural gas pipelines have been built and put into operation,

文章引用: 赵蔚蓝, 顾为, 李天俊. 单条通用性天然气管线能耗计算软件的开发与应用[J]. 石油天然气学报, 2024, 46(2): 141-149. DOI: [10.12677/jogt.2024.462018](https://doi.org/10.12677/jogt.2024.462018)

making the research on single natural gas pipelines valuable. Minimizing energy consumption has always been the goal pursued by pipeline companies. This article studies the optimal energy consumption of a single natural gas pipeline, focusing on optimization based on steady-state conditions, with the objective of minimizing the total energy consumption of compressor stations. The optimization plan is completed through two levels of optimization, namely pipeline-level optimization and station-level optimization. This article utilizes an improved dynamic programming method combined with enumeration algorithms to accomplish the optimization work, and develops the software using Visual Basic.net. Taking the Second Shaanxi-Beijing Pipeline as an example, the software is used to optimize various operating conditions. The study found that the software can accurately calculate the optimal results; the closer the output is to the designed input, the smaller the space saved compared to the actual situation. It is necessary to consider transportation costs and energy consumption, and choose the appropriate value in order to achieve maximum benefits.

Keywords

Natural Gas Pipeline, Energy Consumption, Development, Application

Copyright © 2024 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

近年来，天然气作为一种清洁能源走进了千家万户，其在我国能源结构中所占比例不断攀升，但仍远落后于发达国家。未来几年，我国的天然气工业将会有飞跃式的发展。目前，从霍尔果斯入境的中亚天然气经过西气东输二线送达华东和华南；从云南入境的缅甸天然气经中缅天然气管道送达云贵；而华北地区的用气紧张，也将会随着陕京四线的建成而解决。

早在上世纪 60 年代，美国就开始对输气管道优化运行进行研究，当时仅限于处理稳态问题。随着仿真技术的成熟，国外学者在输气管道(网)稳态运行优化的研究上已经有较为成熟的模型，并将很多模型应用到实际管道运行中。纵观近几年的国外文献，可以发现从事天然气管道运行优化的学者们大多将研究重点放在天然气长输管道非稳态运行优化上。截至到 2011 年为止，以全线能耗最小为目标函数的天然气长输管道非稳态运行优化模型仍然没有成熟的方案，而且对非稳态优化的求解方法也有待进一步探索[1] [2] [3] [4] [5]。

上世纪 90 年代我国才开始对输气管道运行优化进行研究，虽然在理论上与国外有一定差距，但是许多国内学者仍然针对我国实际管线建立了数学模型，在模型求解的方法上做了很多的研究和探索，并开发了不少实用性软件。2004 年，北京华油天然气公司和中国石油大学(北京)合作开发了陕京线稳态优化运行软件 SJGPOPT，计算结果表明陕京线有较大的节能降耗潜力。2008 年杨义在其硕士毕业论文中研究了中国主干输气管网的稳态优化运行问题，其将管网拆成单根管道，应用枚举法和顺序动态规划法依次求解每条管道的优化运行方案，最后得到管网的优化运行方案。基于上述理论，其开发了输气管网稳态优化运行软件 SimuOpt2007，并用陕京一线和西气东输一线作为算例，对算法和软件进行了验证[6] [7] [8] [9]。

本文针对单条天然气管线开发能耗计算软件，用户可以随意增加站场，并在站场之间加入阀室，输入压气站压缩机基本参数，就可以计算出能耗。同时，该软件还可以优化能耗，继而计算出该管线的能耗最优值。

2. 软件介绍

2.1. 数学模型

2.1.1. 问题分析

在起点进气量给定后，输气成本主要取决于该系统压缩机的总能耗费用，因此选择总能耗费用最小作为该系统稳态运行优化的最优准则。稳态运行优化问题可以分为两个层次，即管线级优化和站内优化[10]，管线级优化可确定各个压气站最优进/出站压力，站级优化是在已知压气站进/出站压力和进站流量的前提下确定站内最优开机方案。在优化问题求解过程中，两个优化层次相互影响，管线级优化需要站内优化得到在确定压气站进/出站压力和进站流量下的最优压气站能耗费用；而站级优化只有在管线级优化给定进/出站压力和进站流量的情况下方可进行。

2.1.2. 管线级优化[10]

在稳态运行工况下，当气源供气流量、供气压力、供气温度；各分输点分输量；沿线地温和总传热系数等参数确定后，对任意压气站的一个出站状态(包括压力和温度)，都能唯一确定下一站的进站状态。该出站状态还可结合该压气站的进站状态和进站流量确定该站的多种运行方案。下面建立管线级优化顺序形式的动态规划模型[11]。

如图1所示，建立动态规划模型时设压气站数目为n。

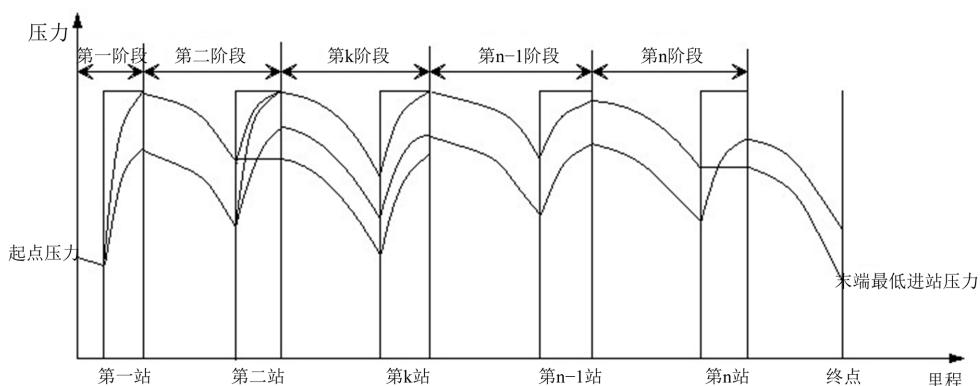


Figure 1. Schematic diagram of dynamic programming model
图 1. 动态规划模型示意图

将第 $k-1$ 个压气站出口到第 k 个压气站出口的输气过程视为对应问题的第 k 阶段，第 k 阶段的状态变量 x_k (即该阶段的起点状态)为第 $k-1$ 站的出站压力($k \geq 2$)，决策变量 d_k 为第 k 站的压比，阶段效应为第 k 站的能耗费用，则可建立针对该管线各压气站压比的动态规划模型：

状态变量：

$$x_k = P_{dk-1} \quad k = 2 \sim n + 1$$

决策变量：

$$d_k = \varepsilon_k \quad k = 1 \sim n$$

状态演变方程：

$$x_k = T_k^r(x_{k+1}, d_k) \quad k = 1 \sim n$$

阶段效应：

$$V_k = C_k(d_k, x_{k+1}) \quad k = 1 \sim n$$

指标函数：

$$V_{1,k} [x_{k+1}, P_{1,k}(x_{k+1})] = \sum_{i=1}^k C_i(d_i, x_{i+1}) \quad k = 1 \sim n$$

最优指标函数：

$$f_k(x_{k+1}) = \min_{P_{1,k}(x_{k+1})} V_{1,k} [x_{k+1}, P_{1,k}(x_{k+1})] \quad k = 1 \sim n$$

函数递推方程：

$$f_k(x_{k+1}) = \min_{d_k \in D_k^*(x_{k+1})} \{f_{k-1}(x_k) + C_k(x_{k+1}, d_k)\} \quad k = 1 \sim n$$

初始条件：

$$x_1 = Pd0 \text{ (气源的供气压力)}$$

$$f_0(x_1) = 0$$

其中， P_{dk} 为第 k 站的出站压力；

$Dkr(x_{k+1})$ 为第 k 阶段相应于其终点状态 x_{k+1} 的允许决策集合；

$P_{1,k}(x_{k+1})$ ：从多阶段过程起点 x_1 到达第 k 阶段终点状态 x_{k+1} 的前部子过程的策略，它是由前 k 个阶段的决策值构成的序列；

$C_k(d_k, x_{k+1})$ 为第 k 个压气站的能耗费用函数。

2.1.3. 站级优化[10]

该系统所有压气站的压缩机均是并联方式，对于并联压缩机的流量分配问题，有流量均分和流量高低分配组合两种方式，据文献[10]介绍，对于同型号机组并联的情况，如果不考虑每套压缩机流量上/下限约束，理论上可以证明流量均分是最优的。

2.2. 压缩机特性工艺计算[11]

陕京二线进行优化计算时需要确定以下数据，单套压缩机的最高与最低压比；最高与最低转速；单套压缩机在入口状态下的可行流量范围；压气站功率；压气站能耗费用。由此可见，该系统优化的核心就是压气站优化，而压气站优化的关键是计算压气站在指定工况下的能耗费用。

(1) 压缩机组能耗费用计算公式

压缩机组的能耗费用计算分两步，先求出压缩机组的输入功率，然后结合驱动机的效率及能耗单价得到能耗费用值。该系统包括燃驱离心压缩机组和电驱离心压缩机组，故只考虑这两种压缩机组能耗费用的计算。

如果驱动机为电动机，则压缩机组的能耗费用为：

$$Cost = N_s / \eta_d \times P_d \times 24 \quad (1)$$

其中， $Cost$ 为单套压缩机组的能耗费用，元/天；

N_s 为压缩机组输入功率，kW；

η_d 为电机效率；

P_d 为电价，元/(kW·h)。

(2) 压缩机特性曲线

在回归和应用压缩机特性方程时，需要注意两个问题：

① 在压缩机的各种特性方程中，压缩机的流量通常是指在其入口状态(包括温度和压力)下的体积流量。如果特性曲线图上的流量是标准状态(101,325 Pa, 20°C)下的体积流量，则在回归特性方程时应首先应将标准体积流量换算为实际入口状态下的体积流量。

② 特性方程是在压缩机特性曲线的测试条件下回归得到的，当利用这些特性方程计算压缩机实际工艺参数时，需要根据相似原理将测定条件下的特性方程换算成实际条件下的特性方程。

研究压缩机特性，先根据需要将标准状况下的流量换算成压缩机进口状态(进站压力与进站温度)下的体积流量，换算公式为：

$$Q_1 = \frac{Q_0 \times 0.101325 \times Z_1 \times T_1}{P_1 \times 293.15} \quad (2)$$

其中， Q_1 、 T_1 、 P_1 和 Z_1 分别为压缩机进口状态下的流量、温度、压力及压缩因子，单位分别为 m³/d、K、MPa；

Q_0 为标况下的流量，单位为 Nm³/d。

然后将 Q_1 化为在转速 n_0 下的对应流量：

$$Q = Q_1 \times \frac{n_0}{n} \quad (3)$$

对单套压缩机组，需要先求得其输入功率，如公式(4)所示。

$$W = \frac{H}{\eta} \times G \quad (4)$$

其中， H 为多变能头，kJ/kg；

G 为质量流量，kg/s；

H 为压缩机的效率。

从上式可知，需要回归压缩机的压头 - 流量曲线和效率 - 流量曲线。

① 压头 - 流量特性方程

如果所给特性曲线图上的流量是标准状况下的值，需要先利用公式(2)将标准流量换算成压缩机进口状态下的流量。然后选择对应转速 n_0 的压头 - 流量曲线进行取点回归，得到压头 - 流量特性方程为：

$$H_0 = b_0 + b_1 Q_1 + b_2 \times Q_1^2 \quad (5)$$

其中， b_0 、 b_1 和 b_2 为系数；

H_0 为压缩机进口状态下的体积流量 Q_1 对应的压头，m。

设压缩机的实际转速为 n ，标准状况下的体积流量为 Q_0 。为了利用公式(5)计算压缩机的压头，首先需要用公式(2)将 Q_0 换算成压缩机进口状态下的体积流量 Q_1 ，然后利用(3)将 Q_1 换算成转速 n_0 下的相应流量 Q ，并将得到的 Q 代入公式(5)得到 H_0 。最后将 H_0 代入式(6)得到压缩机的实际压头：

$$H = H_0 \times \left(\frac{n}{n_0} \right)^2 \quad (6)$$

② 效率 - 流量特性方程

如果效率 - 流量特性曲线图上的流量是标准状况下的值，同样需要利用公式(2)将标准流量换算成压缩机进口状态下的流量。然后选择某一转速下的效率 - 流量曲线进行取点回归，得到对应转速 n_0 的效率 - 流量特性方程为：

$$\eta_0 = a_0 + a_1 Q_1 + a_2 \times Q_1^2 \quad (7)$$

其中, a_0 、 a_1 和 a_2 为系数;

η_0 为压缩机进口状态下体积流量 Q_1 对应的效率。

设压缩机的实际转速为 n , 标准状况下的体积流量为 Q_0 。为了利用公式(7)计算压缩机的效率, 首先需要用公式(2)将 Q_0 换算成压缩机进口条件下的体积流量, 然后利用(3)将 Q_1 换算成在转速 n_0 下的相应流量 Q , 将得到的 Q 代入效率 - 流量特性方程(7), 得到效率 η 。

3. 举例

本文以陕京二线为例, 如表 1 所示, 各压气站内压缩机在其额定转速下回归得到的曲线方程。

Table 1. Characteristic equation of Shaanjing second line compressor

表 1. 陕京二线压缩机特性方程

	榆林	临县
压头 - 流量	$H = 64.9 + 9.1613Q - 0.2132Q^2$	$H = 60.058 + 1.8436Q - 0.0467Q^2$
效率 - 流量	$\eta = -0.0836 + 0.0645Q - 0.0011Q^2$	$\eta = -0.2539 + 0.0329Q - 0.0045Q^2$
滞止 - 转速	$Q_{\max} = 1.053 + 0.029n + 10^{-7}n^2$	$Q_{\max} = 1.492 + 0.0044n + 10^{-7}n^2$
喘振 - 转速	$Q_{\min} = 9.4383 - 0.008n + 2 \times 10^{-7}n^2$	$Q_{\min} = 8.717 - 0.0006n + 2 \times 10^{-7}n^2$
转速 - 滞止	$n = 901.58 + 263.72Q - 1.0262Q^2$	$n = 60.888 + 204.6Q - 0.4812Q^2$
转速 - 喘振	$n = -2376.6 + 887.48Q - 14.062Q^2$	$n = -1151.5 + 630.73Q - 8.158Q^2$
	阳曲	石家庄
压头 - 流量	$H = 57.274 + 2Q - 0.0488Q^2$	$H = 59.072 + 1.9086Q - 0.0476Q^2$
效率 - 流量	$\eta = -0.2037 + 0.03923Q - 0.0005Q^2$	$\eta = -0.2593 + 0.0328Q - 0.00045Q^2$
滞止 - 转速	$Q_{\max} = 3.653 + 0.004n + 2 \times 10^{-7}n^2$	$Q_{\max} = 0.4066 + 0.0051n + 10^{-7}n^2$
喘振 - 转速	$Q_{\min} = 9.3548 - 0.0009n + 3 \times 10^{-7}n^2$	$Q_{\min} = 8.6737 - 0.0007n + 3 \times 10^{-7}n^2$
转速 - 滞止	$n = -259.55 + 204.57Q - 0.6457Q^2$	$n = 86.806 + 183.95Q - 0.3721Q^2$
转速 - 喘振	$n = -1040.1 + 582.09Q - 7.5623Q^2$	$n = -1095.5 + 590.37Q - 7.6374Q^2$

3.1. 相关工艺参数

- (1) 标准状态为: 压力 1.01325×10^5 Pa (绝对压力), 温度 20°C 。
- (2) 年工作天数为 350 天。
- (3) 管道的管内壁绝对当量粗糙度取 $10 \mu\text{m}$ 。
- (4) 各压气站内压降取 0.2 MPa , 其中压气站入口压降取 0.15 MPa (主要考虑分离设备、计量设备及管路的摩阻损失), 出口压降取 0.05 MPa (主要考虑管路空冷器的摩阻损失)。各分输站站内压降取 0.05 MPa 。
- (5) 在本案例分析中, 沿线温度取各地的年平均地温; 沿线总传热系数均取 $1.75 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ 。
- (6) 在本论文案例分析中, 各站最高出站压力为 10 MPa (绝对压力); 榆林压气站出站温度上限取 60°C , 其余各压气站出站温度上限取 55°C 。
- (7) 长庆来气压力为 5 MPa , 进站温度 10°C ; 通州最低允许进站压力 4.2 MPa 。
- (8) 各管段的输气效率统一取 0.94 。
- (9) 电价每度 1.00 元, 电机效率 95% 。
- (10) 气量在安平站分输一半给联络线。

3.2. 优化案例分析

3.2.1. 固定进气量(3700 万方/天)

Table 2. Operation optimization plan (37 million cubic meters/day)**表 2.** 运行优化方案(3700 万方/天)

单位	进站流量 万方/天	进站压力 MPa	出站压力 MPa	压比	开机 套	转速 rmp	进站温度 ℃	出站温度 ℃	能耗 万元/天
榆林	3700	5	9.9	1.96	3	8110	10	60	85.16
兴县	3700	8.28	9.8	1.187	2	5544	27.4	41.8	20.46
阳曲	3700	7.67	8.5	1.109	2	4669	19.8	29.3	13.02
石家庄	3700	6.26	6.26	1.000	0	0	17.4	17.4	0.00
通州站	1850	4.32							
总计					7				118.63

由上表 2 可以得出：该软件在设定进气量的情况下，可以较快计算出全线的优化运行工况。

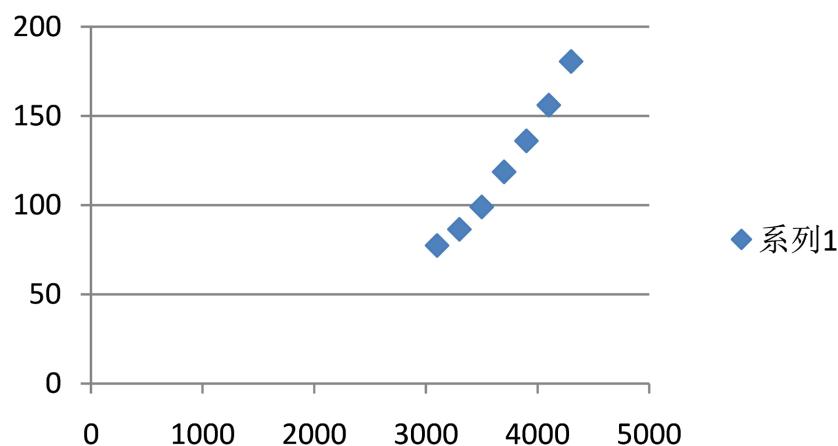
3.2.2. 改变进气量

设进气量由 3100 万方/天增加到 4300 万方/天，步长定为 200 万方/天。

Table 3. Changes in intake volume (increased from 31 million cubic meters per day to 43 million cubic meters per day)**表 3.** 改变进气量(由 3100 万方/天增加到 4300 万方/天)

进气量	3100	3300	3500	3700	3900	4100	4300
能耗	77.36	86.43	98.98	118.63	136.04	156.04	180.54

将表 3 中的进气量为横坐标，以能耗为纵坐标，得到下图 2

**Figure 2.** Energy consumption change chart (increased from 31 million cubic meters per day to 43 million cubic meters per day)**图 2.** 能耗变化图(由 3100 万方/天增加到 4300 万方/天)

将由上图可以得出：1) 随着输量的增加，全线运行能耗费用增加；2) 与实际运行费用相比，随着数量增加，节能效果越来越不明显；3) 增输相同的气量，所需运行费用随起点输量的增加而增加。

3.2.3. 管线效益分析

假设该管线的管输费用单价为 0.1 元/方、0.15 元/方和 0.2 元/方。将其结合 3.2.2 中的表可得如下三表(表 4~6)数据。

Table 4. Energy consumption and profit comparison table (0.1 unit price)

表 4. 能耗和利润对比表(0.1 单价)

进气量	3100	3300	3500	3700	3900	4100	4300
能耗	77.36	86.43	98.98	118.63	136.04	156.04	180.54
利润	232.64	243.57	251.02	251.37	253.96	253.96	249.46

Table 5. Energy consumption and profit comparison table (0.15 unit price)

表 5. 能耗和利润对比表(0.15 单价)

进气量	3100	3300	3500	3700	3900	4100	4300
能耗	77.36	86.43	98.98	118.63	136.04	156.04	180.54
利润	387.64	408.57	426.02	436.37	448.96	458.96	464.46

Table 6. Energy consumption and profit comparison table (0.2 unit price)

表 6. 能耗和利润对比表(0.2 单价)

进气量	3100	3300	3500	3700	3900	4100	4300
能耗	77.36	86.43	98.98	118.63	136.04	156.04	180.54
利润	542.64	573.57	601.02	621.37	643.96	663.96	679.46

由上述三表可以得出：只要该管线的管输费用单价不小于 0.1 元/方，则输量大利润大；且随着管输费用单价的增加，输量越大利润越大。

4. 结论

- (1) 该软件在设定进气量的情况下，可以较快计算出全线的优化运行工况；
- (2) 1) 随着输量的增加，全线运行能耗费用增加；2) 与实际运行费用相比，随着数量增加，节能效果越来越不明显；3) 增输相同的气量，所需运行费用随起点输量的增加而增加；
- (3) 只要该管线的管输费用单价不小于 0.1 元/方，则输量大利润大；且随着管输费用单价的增加，输量越大利润越大。

参考文献

- [1] Venkataraman, G., Basu, U. and Linden, P. (2000) Smoother and More Economic Operation of Gas Pipelines. *Transactions on Industry Applications*, **36**, 1430-1434. <https://doi.org/10.1109/28.871293>
- [2] Sekirnjak, E. (1996) Practical Experiences with Various Optimization Techniques for Gas Transmission and Distribution Systems. *PSIG 28th Annual Meeting*, Alberta, 26 September 1996, 1-22.
- [3] Grelli, G.J. and Gilmour, J. (1986) Western U.S. Gas Pipeline Optimization Program. *Oil & Gas Journal*, 15-19.
- [4] Krishnaswami, P., Chapman, K.S. and Abbaspour, M. (2004) Fuel-Efficient Operation of Compressor Station Using Simulation-Based Optimization. *IPC*, 27-38.
- [5] Ferber (1999) CNGT Intalls Fuel Minimization System to Reduce Operating Cost. *Pipe Line & Gas Industry*, 17-22
- [6] 王寿喜, 曾自强. 天然气管网静动态仿真[J]. 天然气工业, 1995(2): 59-63+111-112.
- [7] 李长俊, 曾自强. 气体管网系统的仿真[J]. 油气储运, 1997(2): 21-25+61-5.

-
- [8] 高松竹. 输气干线压缩机站运行优化研究[D]: [硕士学位论文]. 南充: 西南石油学院, 2002.
 - [9] 杨义. 中国石油主干输气管网稳态优化运行软件的开发[D]: [硕士学位论文]. 北京: 石油大学(北京), 2008.
 - [10] 俗北南. 多气源、多用户天然气管网优化运行软件开发[D]: [硕士学位论文]. 北京: 石油大学(北京), 1999.
 - [11] 杨延胜. 西气东输管道稳态优化运行软件的开发及应用[D]: [硕士学位论文]. 北京: 石油大学(北京), 2002.