

Study of Operating Costs of Buried Heat Oil Pipeline Optimization

Ridong Bao, Lingling Guan

Shenyang University of Chemical Technology, Shenyang, China
guanlingling_0312@126.com

Abstract: Aim for the proper solution in buried heat oil pipeline of the contradiction between the energy consumption and the energy supplies, it will be great signification to determine the best pipeline in the state of the lower optimal cost of oil through determining the best oil operating temperature. In this paper, the mathematical model of the costs of fuel and electricity to the minimum as the objective function of buried hot oil pipeline had been established. The minimum economic heating temperature of the pipeline operation had been analyzed using the software of MATLAB to solve mathematical model. The relationship of specific heat capacity of the transformation oil with its temperature diversification, viscosity of the oil with the temperature diversification, the total energy costs with electricity costs and the fuel costs diversification. The methods demonstrated in this article will be great engineering value for the optimally economical operation of heat oil pipeline.

Keywords: heat oil pipeline, energy costs, economic operation, heating temperature

埋地热油管道运行费用优化研究

包日东, 关玲玲

沈阳化工大学, 沈阳, 中国, 110142
guanlingling_0312@126.com

摘要: 为妥善解决在役埋地热油管道沿线的能量消耗和能量供应之间的矛盾, 通过确定最佳的输油温度使管道处在最优运行状态对降低输油成本具有重要意义。本文建立了以燃料费用和电力费用之和最小为目标函数的埋地热油管道经济运行数学模型, 通过与 MATLAB 软件相结合求解数学模型, 分析了特定参数条件下, 使管道运行费用为最小的经济加热温度, 得出了管道运行时油品的比热容与温度的变化关系, 粘度与温度的变化关系, 总能耗费用与燃料费用和电力费用的变化关系, 并进行了仿真计算, 所采用的方法对管道的优化经济运行具有工程参考价值。

关键词: 热油管道; 能耗费用; 经济运行; 加热温度

1 引言

埋地热油管道的输量大, 运输距离长, 全年连续运行, 耗电耗油量很大。运行方案是否合理, 对输油成本影响很大。为了降低管道运行能耗, 除了对管道系统的设备, 流程, 输送工艺等进行改造外, 另一条途径就是在现有系统上实现优化运行, 即通过优选运行参数, 使系统能耗最低^[1]。热油管道的运行能耗包括加热原油所需的燃料消耗和电力消耗。本文建立了以燃料费用和电力费用之和最小为目标函数的埋地热油管道经济运行数学模型, 并通过与 MATLAB 软件相结合求解数学模型, 确定了在一定的输量下的管道

最佳输油温度, 使管道运行费用最小。

2 模型的建立

2.1 燃料费用的计算

$$S_R = \frac{c_y(T_R - T_Z)}{l_R} \frac{e_y}{\eta_R B_H} \quad \text{元}/(\text{t}\cdot\text{km})$$

2.2 电力费用的计算

$$S_P = \frac{2.723e_d H}{\eta_{Pe} l_R} \times 10^{-3} \quad \text{元}/(\text{t}\cdot\text{km})$$

2.3 总能耗费用的计算

$$S = S_R + S_P \quad \text{元/(t·km)}$$

式中,

c_y ——所输油品的比热容, $\text{kJ}/(\text{kg}\cdot^\circ\text{C})$;

e_y ——燃料油价格, 元 / t;

l_R ——加热站间距, km;

η_R ——加热炉效率;

B_H ——燃料油热值, $\text{kJ}/(\text{kg}\cdot^\circ\text{C})$;

e_d ——电力价格, 元 / ($\text{kW}\cdot\text{h}$);

H ——加热站间管道所需压头, m 液柱;

η_{Pe} ——泵机组效率;

对某一具体管道, 当流量, 地温, 总传热系数及运行的加热站数和泵站数一定时, 随着加热站出站油温的提高, 热损失增大, 燃料费用增加。同时, 站间平均油温的升高, 使得摩阻减小, 动力费用将下降^[2]。因此两者总能耗费用之和就有可能存在最低的值, 其相应的出站油温即为该输量下的经济加热温度。管道的水力坡降表示单位长度管道的摩阻损失, 即

$$i = \frac{h_l}{L} = \beta \frac{Q^{2-m} v^m}{d^{5-m}}, \quad \text{而水力坡降与管道的长度无关, 只随流量、粘度、管径和流态指数有关。全线所需压头可表示为}$$

$$H = iL + \Delta Z$$

式中,

i ——油流水力坡降;

h_l ——沿程摩阻损失, m 液柱;

L ——管道加热输送的长度, m;

Q ——油品流量, m^3/s ;

v ——运动粘度, m^2/s ;

d ——管径, m;

ΔZ ——管道终点与起点高程差, m。

2.4 约束条件

泵站进出站压力约束: $P_{\min} < P < P_{\max}$

热站进站温度约束: $T_L \geq T_{\min}$

热站出站温度约束: $T_R \leq T_{\max}$

其中, P 为管线压力, Pa; P_{\min} 为泵站的最低允许压力, Pa; P_{\max} 为管道允许的最高压力, Pa; T_{\min} 为由油品性质决定的最低进站温度, $^\circ\text{C}$, 主要取决于原油的凝固点, 根据规范取高于原油凝固点的 3—5 $^\circ\text{C}$; T_{\max} 是由加热炉热负荷、油品初馏点等决定的最高出站温度, $^\circ\text{C}$ 。

3 模型的求解

(1)根据所给油品的性质和原油比热容随温度变化的趋势, 按析蜡点温度和最大比热容将 $c-T$ 曲线分成三个区。随加热温度的提高, 热损失增大, 燃料费用增加。

(2)根据所给油品测定的粘温数据, 绘成粘温曲线, 可知在其他参数一定的情况下, 随站间平均油温的升高, 油品粘度下降, 摩阻减小, 动力费用将下降。

(3)利用 MATLAB 软件对管道进行能耗费用计算, 绘制燃料费用和动力费用随加热站出站油温变化的曲线, 作为二者之和的总能耗有最低点存在, 与其相对应的加热温度即为该输量下的经济加热温度。

3 计算实例

某管道全长 435km, 管道材质为 16Mn 螺旋焊缝钢管, 管径 $\phi 355 \times 6\text{mm}$, 流量 $482\text{m}^3/\text{h}$, 全线设 4 个热泵站, 燃料油价格 1.45 元/kg, 电力价格 0.86 元/($\text{kW}\cdot\text{h}$), 加热站间距 100km, 凝固点 32°C , 平均流速 $V=1.445\text{m/s}$, 各站进站温度为 36°C , 出站温度不高于 77°C , 泵机组效率 0.97, 加热炉效率 0.8, 高程差 150m, 燃料油热值 $B_H=2436\text{kJ/kg}$, 油品在 15°C 时的相对密度为 0.8596, 20°C 时的相对密度是 0.8561。

温度含蜡原油在凝点附近粘温曲线很陡, 而当温度高于凝点 30~40 $^\circ\text{C}$ 以上时, 粘度随温度变化较小。提高油温对摩阻影响较小, 而热损失却显著增大, 故加热温度不宜过高。

原油比热容—温度的关系按下列各式计算:

(1) $T \geq T_{SL}$

$$c_y = \frac{1}{\sqrt{d_4^{15}}} (1.687 + 3.39 \times 10^{-3} T)$$

(2) $T_{SL} > T \geq T_{cmax}$

$$c_{Ly} = 4.186 - Ae^{nT}$$

(3) $T_{cmax} > T \geq 0^\circ\text{C}$

$$c_{Ly} = 4.186 - Be^{-kT}$$

式中,

d_4^{15} ——油品在 15°C 时的相对密度;

T ——油品温度, $^\circ\text{C}$;

c_{Ly} ——原油在析蜡温度以下的比热容, $\text{kJ}/(\text{kg}\cdot^\circ\text{C})$;

A ——常数, 随原油而不同, $\text{kJ}/(\text{kg}\cdot^\circ\text{C})$;

n ——常数, 随原油而不同, $1/^\circ\text{C}$;

B ——常数, 随原油而不同, $\text{kJ}/(\text{kg}\cdot^\circ\text{C})$;

k ——常数, 随原油而不同, $1/^\circ\text{C}$ 。

油品的相关参数取为: $A=0.4840 \text{ kJ/kg}\cdot^\circ\text{C}$, $B=1.9255 \text{ kJ/kg}\cdot^\circ\text{C}$, $k=0.01164$, $n=0.03465$, $T_{SL}=42^\circ\text{C}$, $T_{cmax}=30^\circ\text{C}$, 凝点为 32°C 。

当其它参数不变时, 管道的燃料费用随加热站出

站温度的提高而增加，计算式为

$$S_R = \frac{c_y(T_R - T_Z)}{l_R} \frac{e_y}{\eta_R B_H}$$

可根据出站油温的变化分为以下几个部分来求：

(1) 当 $T \geq T_{SL}$ 时

$$S_R = \frac{(1.687 + 3.39 \times 10^{-3} T)(T - 36) \times 1450}{0.8596 \times 100 \times 0.8 \times 2436}$$

在此区间燃料费用随出站油温的变化如图 1 所示。

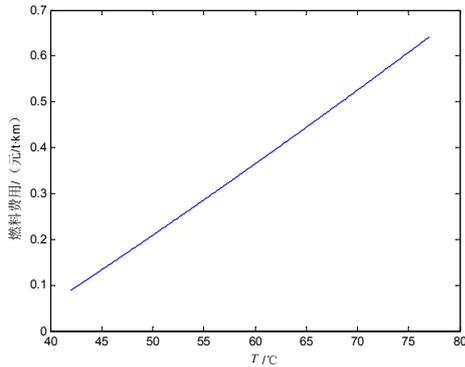


Figure 1 Variation of fuel costs with outlet temperature among 42 ~ 77 °C

图 1 42~77℃时燃料费用随出站温度的变化规律

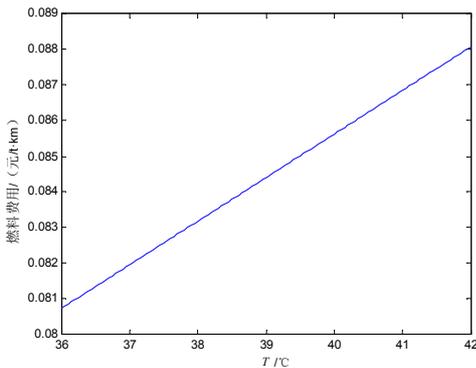


Figure 2 Variation of fuel costs with outlet temperature among 36~42 °C

图 2 36~42℃时燃料费用随出站温度的变化规律

(2) 当 $T_{SL} > T \geq T_{cmax}$ 时

$$S_R = 7.44 \times 10^{-3} (T - 36) \times (4.186 - 0.4840e^{0.03465T})$$

在此区间燃料费用随出站油温的变化规律如图 2 所示。

(3) 当 $T_{cmax} > T \geq 0^\circ\text{C}$ 时

$$S_R = 7.44 \times 10^{-3} (T - 36) \times (4.186 - 1.9255e^{-0.01164T})$$

与此同时，在其它参数不变的情况下，由于加热油温的升高，油品的粘度下降，水力坡降

$$i = \frac{h_l}{L} = \beta \frac{Q^{2-m} v^m}{d^{5-m}}$$

下降，加热站间管道所需压头 $H = iL + \Delta Z$ 也下降，因此动力费用将下降。根据已知条件和原油的相对密度公式 $\rho = \rho_{20} - \varepsilon(T - 20)$ ，其中温度系数 $\varepsilon = 1.825 - 1.315 \times 10^{-3} \rho_{20}$ 以及运动粘度公式 $\nu = \mu / \rho$ 和雷诺数公式 $Re = \rho V d / \mu = V d / \nu$ ，计算结果如下表所示。

Table 1. Coefficient of oil properties
表 1. 油品性质系数

T(°C)	30	40	48	57	76
μ (10^{-2} Pa·s)	4.5702	2.7921	1.9002	1.3038	0.8385
ρ (kg/m ³)	849.1	842.1	836.5	830.6	817.5
ν (10^{-6} m ² /s)	53.82	33.16	22.72	15.70	10.26
Re	9208	14946	21813	31567	48304

由上表可知，当油品在 20℃ 以上时雷诺数大于 4000，根据我国《输油管道工程设计规范》GB 50253-2003 中所推荐的管壁绝对当量粗超度 e 设计取值为：螺旋缝钢管，DN250~DN350 时， $e=0.125\text{mm}$ 。

由特性雷诺数的计算式 $Re_1 = 59.7 / (2e/d)^{8/7}$ 可得 $Re_1 = 2.3 \times 10^5$ 。

由此可得，实例中油品在该输量下的流态处于水力光滑区，管道流态系数 $m=0.25$ ，管道压降系数 $\beta=0.0246$ ，将上表粘度温度关系数据代入多项式回归方程并求得其系数，从而求得粘度与温度变化关系方程为

$$\mu = -3.0233 \times 10^{-7} T^3 + 7.1229 \times 10^{-5} T^2 - 0.0057T + 0.1605$$

将上式绘制成油品粘温曲线，如图 3 所示。

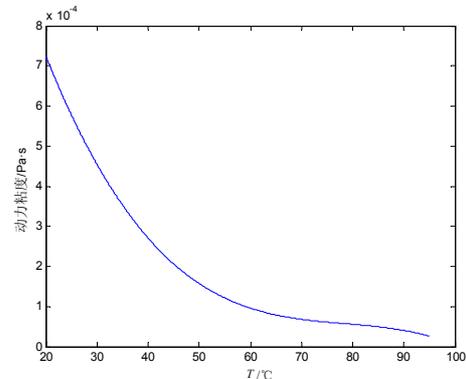


Figure 3 Variation of oil viscosity with temperature

图3 油品粘度随温度变化的规律

由此油品的运动粘度可表示为

$$\nu = \mu / \rho = \mu / (d_4^{20} - \varepsilon(T - 20)) \times 10^3$$

油品的电力费用可表示为

$$S_P = \frac{2.732e_d (\beta L Q^{2-m} \nu^m / d^{5-m} + \Delta Z)}{1000 \eta_{Pe} I_R}$$

$$= 2.414 \times 10^{-5} (5.120 \times 10^{-3} \nu^{0.25} + 150)$$

因此可求出电力费用随出站油温的变化规律如图4所示。

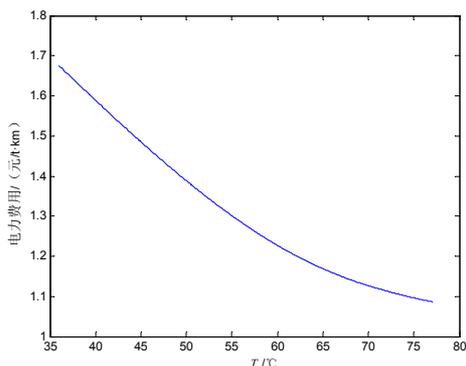


Figure 4 Variation of electricity costs with outlet temperature
图4. 电力费用随出站温度的变化规律

根据热油管道加热站出站油温的变化和已知条件可将热油管道总能耗费用分为以下两个区间考虑:当加热站出站油温大于 36°C 小于 42°C 和大于 42°C 小于等于 77°C 的两个区间时, 油品的总能耗费用分别为这两个区间的燃料费用和电力费用的和, 与出站温度的变化关系如图5所示。

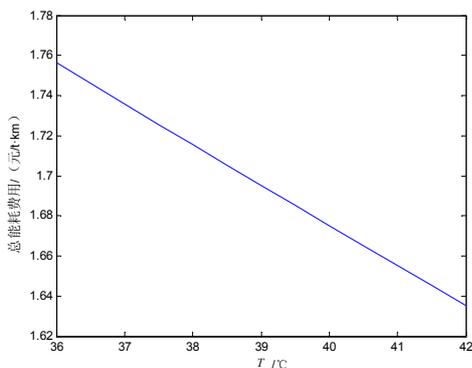


Figure 5 Variation of total energy costs with outlet temperature among 36 ~ 42 °C

图5 36~42°C时总能耗费用随出站温度的变化规律

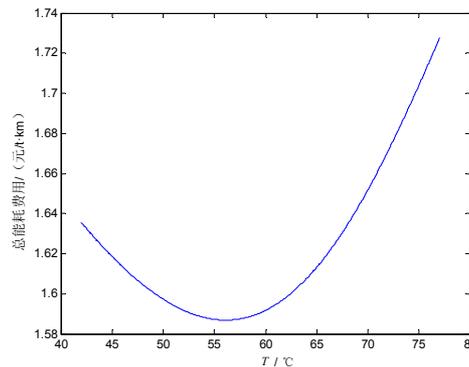


Figure 6 Variation of total energy costs with outlet temperature among 42~77°C

图6 42~77°C时总能耗费用随出站温度的变化规律

由图中可看出, 作为二者之和的总能耗 S 存在最低点, 与最低点对应的加热温度约为 56°C 即为管道的经济加热温度。

4 结论

本文建立了以燃料费用和电力费用之和最小为目标函数的埋地热油管道经济运行数学模型, 编写了 MATLAB 求解软件, 分析了特定参数条件下, 使管道运行费用为最小的经济加热温度, 得出了管道运行时油品的比热容与温度的变化关系, 粘度与温度的变化关系, 总能耗费用与燃料费用和电力费用的变化关系, 进行了仿真分析, 得到了总费用最低的加热站出站油温, 所采用的方法对热油管道的优化经济运行具有工程参考价值。

References (参考文献)

- [1] MENG Zhenghu, Yi Xiaomin. Assessment Method of Heating Economics for Crude Oil Pipeline[J], Oil&Gas Storage and Transportation, 2007,26(3)49~53..(Ch)
孟振虎, 仪晓珉. 原油管输过程热经济性评价方法及其应用[J]. 油气储运, 2007,26(3)49~53.
- [2] Verschuur E, Den Hartog A P, Verheul C M. The effect of thermal shrinkage and compressibility on the yielding of gelled waxy crude oils in pipeline. J. of Institute of Petroleum, 1971, 57(555): 131~138