

文章编号: 1673 - 9620 (2007) 03 - 0044 - 06

原油管道热经济性动态评价^{*}

孟振虎, 周 勇

(江苏工业学院 江苏省油气储运重点实验室, 江苏 常州 213016)

摘要: 基于热传导理论和优化分析方法, 提出了原油管输过程热经济性定义、评价参数、评价方法, 并实例介绍了建立动态评价曲线的过程, 讨论了评价曲线的特点。评价曲线基于优化分析结果。应用评价曲线可以确定热经济性良好的输量范围, 预测经济加热耗油指标, 动态评价当前输量下管道总体热经济性程度, 动态评价输送方案的合理性, 并及时动态提出优化调整方案。根据全线实际加热耗油量, 还可动态评估热站的综合运行效率。误差分析则表明, 在评价曲线输量范围, 即使土壤含水率和导热系数较大, 输量变化对 K 值从而对评价曲线的影响是有限的, 应用基于反算 K 值建立的动态评价曲线是可行的。

关键词: 原油管道; 运行优化; 热经济性; 动态评价曲线; 误差分析

中图分类号: TE 973.1

文献标识码: A

Dynamic Heating Economics Assessment for Buried Thermal Oil Pipeline

MENG Zhen - hu, ZHOU Yong

(Jingsu Key Laboratory of Oil & Gas Storage and Transportation Technology, Jiangsu Polytechnic University, Changzhou 213016, China)

Abstract : Based on the relative theory and operation optimization method, the definition, assessment parameters and dynamic assessment method of heating economics about buried thermal oil pipeline were outlined in the paper. The method of constructing assessment plots was presented by a practical example. The behavior of the assessment plot was discussed and an evaluation process was performed. By means of the plots the range of economic discharge capacity and the index of heating oil consumption for transportation can be determined. The state of heating economics for practice operation scheme can be dynamically estimated by comparing the information obtained by thermal analysis according to these running parameters with that from the assessment plots. The efficiency of heating stations can be predicted if the oil amount consumed in furnaces were known. The tolerance influence on assessment plots caused by the change of discharge rate was discussed for five different soil conditions. The results show that the tolerance was small in the definition domain of the plots, even if the soil has high water content and large coefficient of heat conductivity relatively. The method can be used to dynamically perform the heating economics assessment for crude oil pipelines.

Key words : thermal oil pipeline; operation optimization; heating economics; dynamic assessment plots; tolerance analysis

收稿日期: 2006 - 11 - 05

作者简介: 孟振虎 (1950 -), 男, 江苏常熟人, 副教授, 硕士, 主要从事输油管道研究和教学工作。

我国原油管道多采用热输, 加热耗油量很大。降低加热油耗提高热经济性仍是储运行业面临的迫切问题^[1~5]。提出原油管输过程动态热经济性评价参数和方法, 建立相应评价体系, 全面评价管道总体或某一运行状态的热经济性状况, 定量给出运行方案偏离热经济性的程度及其可接受性, 据此找出偏离的原因并加以控制, 对避免管道在低热经济性下运行具有重要意义。应指出, 原油管道热经济性主要指标是吨油输送加热耗油, 不同管道之经济加热耗油量并不相同, 但同一管道这种可比性是存在的。同一管道不同输量或不同加热方案所对应的运行参数及其反映出来的温降、沿线损失热、摩擦热、释放热及加热耗油量等参数是不同的, 但任何原油管道, 必存在热经济性最好的输量范围, 对给定输量必存在耗油量最经济的加热方案。将管道多年积累的运行数据加以总结分析, 并以此为基础进行优化分析, 可获得与最佳加热方案对应的评价参数值, 建立这些评价参数与输量的关系可得到相应的评价曲线, 应用这些评价曲线可实现加热经济性和相关运行方案合理性的定期或实时动态评价。本法最大特点是可方便实时进行输送过程动态评价。应用本法计算软件, 输入近期或当前运行参数, 可快速给出对运行方案热经济性的评价意见, 并给出运行优化方案以提供参考, 整个过程只需几分钟或者十几分钟, 在数字化管道的情况下完全可以实现自动和即时分析、即时了解、即时调整, 实现管道的动态管理。为使评价结果更符合实际, 讨论了输量变化对基于反算点输量得到的管道总传热系数 K 值及基于该 K 值的评价曲线对评价过程的误差影响。

2 热经济性评价参数

由热分析, 原油输送中的损失热来自油温降低的释放热和水力摩阻转换的摩擦热^[1,2]。选择单位质量原油沿线损失热 w 、油流释放热 w_1 和摩擦热 w_2 为评价参数:

$$w = \frac{1}{Q} \sum_{j=1}^N \int_0^{L_j} K_{Lj} D (t - t_{0j}) dl \quad (1)$$

$$w_1 = - \sum_{j=1}^N \int_{t_{Rj}}^{t_{Lj}} C(t) dt \quad (2)$$

$$w_2 = \sum_{j=1}^N \int_0^{L_j} i_j g dl \quad (3)$$

式中, ρ 为原油密度, kg/m^3 ; Q 为输量, m^3/s ; L_j 为第 j 管段长度, km ; K_{Lj} 为第 j 段管道总传热

系数, $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$; T_{0j} , i_j 分别为第 j 管段平均地温, t_{0j} 和 t_{Lj} 分别为第 j 管段出站和下站进站油温, D 为管道外径, m ; N 为全线站间管段数目; g 为重力加速度, m/s^2 。为评估摩擦热对耗热的影响, 还应考虑 w_2/w_1 及 w_2/w :

$$= w_2/w_1 \quad (4)$$

$$= w_2/w = \frac{1}{1 + \dots} \quad (5)$$

若已知全线平均热站效率 η , 则根据 w_1 容易获得该管道吨油输送加热耗油量 G_f :

$$G_f = \frac{w_1}{q_1} \times 10^{-3} \quad (\text{kg}/\text{t}) \quad (6)$$

(6) 式也等同于以 η 表示的输送加热耗油指标, 式中 q_1 为加热燃油低发热值, kJ/kg , η 为热站平均效率。若已知管道小时质量输量 Q_h 后, 根据 G_f 和 w_1 也可评估:

$$= \frac{Q_h}{q_1 G_f} w_1 \quad (7)$$

若以两热站间参数代替上述各式之相应参数, 可动态评价站间管道的热经济性。

2 动态热经济性评价曲线的建立

评价曲线必须同时具有动态性和经济性, 其动态性在于: 曲线应基于与评价管道相同基础条件和近期或实时运行参数; 其经济性在于: 曲线应基于运行优化分析结果。本文以某总长 210 km、 $\phi 377 \times 8$ 、全线 7 站 6 段的实际管道为例^[3], 介绍建立管道动态评价曲线的方法。表 1 为管道基本情况及某时期内输量、运行参数和地温^[3]。反算过程热容条件采用了与其性质相近的大庆油^[4]:

$$\begin{cases} C(t) = C_0 (t - t_{SL}) \\ C(t) = 4.186 - A e^{-nt} \end{cases} \quad (8)$$

式中 C_0 取 $2.106 \text{ kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$; A 取 $0.9085 \text{ kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$; n 取 0.01732 s^{-1} ; 析蜡点油温 t_{SL} 取 45°C ^[4]。反算之 K_{Lj} 值也在表 1 中给出。为估算计算误差, 按表 1 输量、进站油温、地温条件, 用反算之传热系数对实际输送过程进行了数值模拟, 模拟结果与实际结果的相差范围在表 2 中给出。由表可见, 出站温度模拟计算值与实际值相差在 $0.54\% \sim 4.29\%$ 间, 水力摩阻值相差则在 $0.27\% \sim 6.17\%$ 之间, 误差范围在工程计算允许范围, 表明数值模拟方法和传热系数反算值是合理的。

表 1 算例条件及实际运行参数 (3 475 t/d)

Table 1 The operation parameters which the analysis is based on

| 管段号 | 长度 / km | 出站温 度 / °C | 进站温 度 / °C | 站间地 温 / °C | 水力摩 阻 / m | 反算 K_{Lj} 值 / (W/m ² ·K) |
|-----|---------|------------|------------|------------|-----------|---------------------------------------|
| 1-2 | 37.4 | 69.0 | 31.0 | 12.0 | 62.0 | 2.154 |
| 2-3 | 36.1 | 69.0 | 29.0 | 11.0 | 60.0 | 2.420 |
| 3-4 | 28.5 | 64.0 | 31.0 | 11.0 | 51.0 | 2.590 |
| 4-5 | 28.0 | 62.0 | 29.0 | 11.0 | 50.0 | 2.902 |
| 5-6 | 33.3 | 56.0 | 30.0 | 13.0 | 56.0 | 2.239 |
| 6-7 | 46.7 | 67.0 | 29.0 | 12.0 | 73.0 | 1.906 |

表 2 按实际进站油温数值模拟结果及相差值

Table 2 The result tolerance between practice and numerical simulation

| 管段号 | 出站温度 / °C | | 相差 / % | 水力摩阻 / m | | 相差 / % |
|-----|-----------|------|--------|----------|------|--------|
| | 计算值 | 实际值 | | 计算值 | 实际值 | |
| 1-2 | 66.143 | 69.0 | -4.14 | 58.172 | 62.0 | -6.17 |
| 2-3 | 66.042 | 69.0 | -4.29 | 58.852 | 60.0 | -1.91 |
| 3-4 | 63.019 | 64.0 | -1.53 | 48.159 | 51.0 | -5.57 |
| 4-5 | 61.474 | 62.0 | -0.84 | 49.500 | 50.0 | -1.00 |
| 5-6 | 56.300 | 56.0 | -0.54 | 55.850 | 56.0 | -0.27 |
| 6-7 | 64.778 | 67.0 | -3.32 | 72.034 | 73.0 | -1.32 |

设管输原油之 ρ_0 为 870 kg/m^3 , 反常点 37, 析蜡点 45, 热处理后凝点为 24, 加热燃油低发热值 q_l 为 $47\,000 \text{ kJ/kg}$, 取经优化分析获得的经济进站油温为 28, 按表 1 之 K_{Lj} 值, 获得了该管道输送过程热经济性评价曲线。图 1 为单位质量原油输送过程之释放热和损失热, 两曲线之差为油流摩擦热。从评价曲线来看, 随输量增大, 单位质量原油之释放热和沿线损失热显著下降, 油流摩擦热随之增大, 表明高输量时管道运行热经济性明显高于低输量情况。图 2 中 $w_2/w \sim Q$ 曲线给出了摩擦热对输送加热的影响。由图可见, 一方面尽管摩擦热随输量增加而增大, 但总量有限且非很大, 另一方面摩擦热在释放热和损失热中所占比例不断上升, 当 Q 从 $150 \text{ m}^3/\text{h}$ 提高到 $800 \text{ m}^3/\text{h}$ 时, w_2/w 从 0.62% 提高到 70.69%, 其对输送过程的影响又极为明显。图 3 是 5 种平均热站效率下吨油输量加热耗油指标评价, 是相应输量下通过优化运行管道可能达到的最佳加热耗油指标, 可用于预测输量变化后的油耗情况。由图可见, 随输量增加吨油输量加热耗油呈下降趋势, 表明, 管道加热耗油量不一定因输量增加而增大, 若方案合适可使耗量随输量增加而下降, 一定条件下甚至可实现不加热输送, 不同输量管道采用同一加热耗油评价指标是不合适的。注意到图 1~图 3 评价曲线均出现某些波峰和转折, 这是因为, 不同输量下包括热站启用数目、位置和加热温度在内的加

热方案不完全相同, 曲线中每一个波峰或转折都表示因输量变化而导致加热方案相应调整所产生的影响。在运行热站数目出现减少调整所对应的输量点上, 某些管段加热距离延长, 必须相应提高出站油温以满足输送要求, 这使相当一段距离内油地温差增大而使沿线损失热较调整前增加, 加热耗油量随之增加, 曲线呈现上升形。若其后输量再进一步增加, 则摩擦热也会进一步增大, 出站油温又可降低, 这使油地温差又开始缩小, 热损失又相应减少, 曲线又呈现平滑下降形态, 直至新一轮加热方案调整。

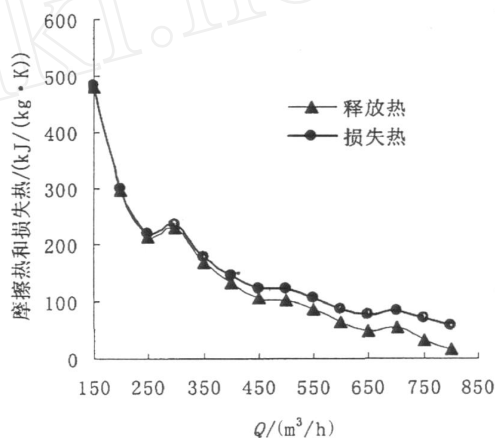


图 1 单位质量原油输送释放热和损失热评价

Fig. 1 The friction and loss heat value assessment for unit mass oil transportation

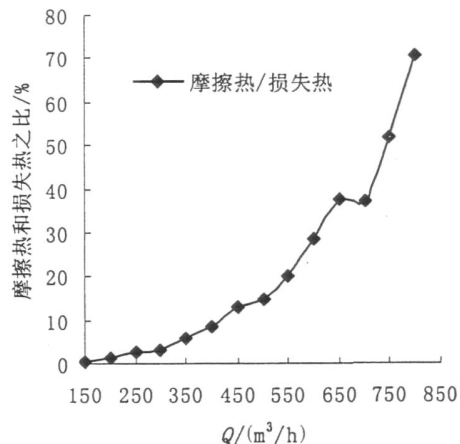


图 2 输送释放热和损失热之比评价曲线

Fig. 2 The ratio of friction heat to loss heat value during oil transportation

3 动态评价曲线的应用

3.1 预测输送过程经济耗油指标

应用图 3 可估计管道相应输量和热站效率下量

化经济耗油指标。例如，已知热站平均效率为 0.85，则由图知，在埋设段土壤含水率未发生较大变化情况下，150 m³/h 输量时经济耗油指标大致为 12‰，而 800 m³/h 输量时降至约 0.43‰。

3.2 评价热站综合热效率

若当前输量为 350 m³/h，且已知日加热耗油量约为 33.5 t，吨油耗油指标为 4.62‰，由图 3 可估计该状态下全线热站平均综合效率可能已降至 0.75~0.8 之间。但若实测热站平均效率高于该值，则可能是运行方案不合理的问题了。

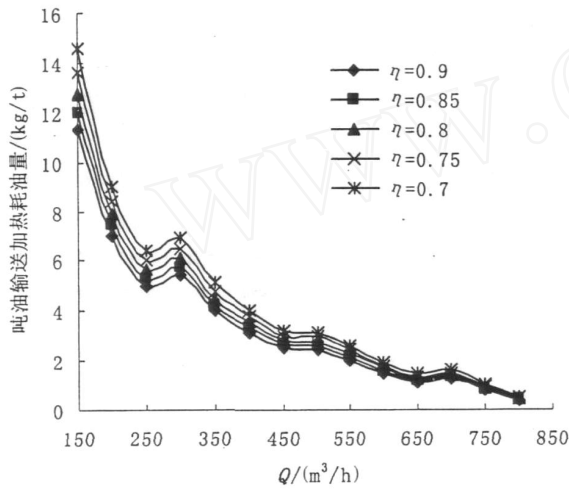


图 3 吨油输送加热耗油量经济性评价

Fig. 3 The fuel consumption index plots for unit mass oil transportation

3.3 评估热经济性较好的输量范围

应用评价曲线可评估当前或土壤导热系数未发生较大变化的某一时期内管道热经济性较好的输量

范围。由图知算例条件下 350~600 m³/h 是较好的范围，此时 w 在 178.88~105.94 kJ/kg 左右， w_2/w 大致在 5.63%~22.87% 之间，平均水力坡降则在 4.89~11.69 m/km 左右，若 η 为 0.85 时，经济耗油指标应在 4.226‰~2.044‰ 之间。

3.4 当前实际运行方案的动态评价

评价曲线可用于对当前输送方案进行评估。表 3 给出了表 1 运行方案热经济性评价结果。表中分析项目 a 为实际运行状态热分析结果，项目 b 是以实际进站油温进行数值模拟热分析结果，比较 a 、 b 两项可以估计数值模拟分析误差，这种分析误差在第 4 行给出。项目 c 取自评价曲线相应点数据即按优化方案运行时的热指标， b 、 c 两项中耗油指标均按热站效率为 0.85 计算。第 5 行是 b 、 c 两项的比较结果，反映了若采用经济进站油温方案时管道热经济性的可改善程度。因为采用计算机软件模拟，尽管存在模拟误差，但 b 、 c 两项对应参数相减获得之差值可认为已排除误差影响。例如， c 方案耗油指标较 b 方案低 1.331‰，表明若 a 方案调整为 28℃ 进站的话，耗油指标也会较调整前低 1.331% 左右。进一步分析可见，若进站油温与实际情况同，按模拟结果， b 项的总温降、单位质量释放热、损失热都将比采用 28℃ 进站的 c 项高 12.28%~14.28%，摩擦热对加热量的影响降低 21%，耗油指标则增大 11.84%，其净增值为 1.331‰，若按全年 350 d 计，全年将多耗燃油 1 618 t，表明若控制在 28℃ 进站，即使管道总体上仍处于低热经济性状态，加热油耗指标较目前还可降低，目前方案存在进一步调整优化的可能。

表 3 管道运行方案热分析和热经济性评估结果 (3 475 t/d)

Table 3 The heating economic evaluation for a practical operating scheme

| 分析项目 | 总温降/ | 摩擦温升/ | $w_1/$ (kJ/kg) | $w_2/$ (kJ/kg) | $w/$ (kJ/kg) | $(w_2/w_1)/\%$ | $(w_2/w)/\%$ | 耗油指标/‰ |
|--------------|--------|---------|----------------|----------------|--------------|----------------|--------------|----------|
| a . 实际过程 | 208.0 | 1.565 | 468.88 | 3.452 | 472.33 | 0.736 2 | 0.730 8 | - |
| b . 数值模拟 | 198.8 | 1.473 7 | 452.19 | 3.361 | 455.55 | 0.743 2 | 0.737 7 | 11.244 9 |
| c . 经济油温 | 170.42 | 1.503 2 | 396.06 | 3.563 | 399.62 | 0.899 7 | 0.891 7 | 9.914 |
| $(b-a)/a/\%$ | -4.42 | -5.8 | -3.56 | -2.6 | -3.55 | 0.95 | 0.94 | - |
| $(b-c)/b/\%$ | +14.28 | -2.0 | +12.41 | -6.0 | +12.28 | -21.06 | -20.88 | +11.84 |

3.5 当前输量下管道总体热经济性评价

目前管输量为 167.3 m³/h，流速约 0.454 m/s，由表 3 中 c 项数据可见，即使严格控制 28℃ 进站油温，各项指标仍处于评价曲线左端，耗油指标仍达到 9.914‰，表明管道目前的总体热经济性处

于很差的低输量状态，扣除分析误差后实际经济性程度更差。

4 输量变化对基于反算 K 值的评价

反算得到的管道总传热系数 K 值基于某特定输量，而评价曲线反映的是各评价参数随输量的变

化关系, 估计输量变化对基于反算 K 值的评价过程产生的误差影响是有必要的。已知原油管道总热阻 R 表达式为^[4]:

$$R = \frac{1}{K} = R_1 + R_2 + R_3 = \frac{D_w}{1d} + \frac{D_w \ln(D_i/d_i)}{2i} + \frac{1}{2} \quad (9)$$

式中, R_1 , R_2 , R_3 分别为油流本身放热、管壁和沥青绝缘层导热及管外壁至土壤的放热热阻, $m^2 \cdot K/W$; 1 , 2 分别为油流至管壁、绝缘层外壁至周围土壤的放热系数, $W/(m^2 \cdot K)$; D_w 为沥青绝缘层外径, d 为管道内径, D_i 和 d_i 分别为各导热层外径和内径, 量纲均为 m ; i 为相应导热层导热系数, $W/(m \cdot K)$ 。对给定埋地原油管道, 各导热层热阻与输量变化无关, 在稳定传热情况下, 外壁至土壤的放热也基本不受输量影响, 与输量有关且对 K 值产生影响的只有 1 。为估计输量变化的误差影响, 研究了评价曲线输量范围内油流放热热阻 R_1 及其在总热阻中所占比例随 Q 的变化关系。

由原油管道热分析知^[4], 当 $2000 < Re < 10^4$ 时, 1 可由下式计算:

$$1 = K_0 \frac{1}{d} Pr_y^{0.43} \left(\frac{Pr_y}{Pr_{bi}} \right)^{0.25} \quad (10)$$

当 $Re > 10^4$, 且 $Pr < 2500$ 时, 有

$$1 = 0.021 \frac{1}{d} Re_y^{0.8} Pr_y^{0.44} \left(\frac{Pr_y}{Pr_{bi}} \right)^{0.25} \quad (11)$$

式中, y 和 bi 分别为油温和壁温条件下油流的导热系数, Re 和 Pr 分别为雷诺准数和普朗特准数, 下标 y 和 bi 分别代表油温和壁温条件, K_0 为计算系数, 由 Re 数确定。

当管道中心埋深 $h_0 > 2D_w$ 时, 2 可由下式求得^[4]:

$$2 = \frac{2s}{D_w \ln \frac{4h_0}{D_w}} \quad (12)$$

式中 s 为土壤导热系数。取全线平均油温 $42.69^\circ C$ 为计算油温。按工程经验^[3,4] 壁温取 $39.69^\circ C$, 相应温度之 y 和 bi 分别为 0.1301 和 $0.1304 W/(m \cdot K)$, 比热容分别为 2283 和 $2379.4 J/(kg \cdot K)$ ^[4], 取沥青绝缘层厚为 $8 mm$, 其导热系数为 $0.15 W/(m \cdot K)$, 中心埋深为 $1.2 m$, 忽略管壁蜡层热阻, 研究了表 4 几种埋设土壤及含水率下 K 值随 Q 的变化关系。

表 4 给出了 $163.5 m^3/h$ 输量时上述 5 种埋设土壤条件下各项热阻在总热阻中所占比例。由表可

见, 管内油流放热热阻 R_1 所占比例很小, 虽随 s 增大致 2 变小使所占比例有所上升, 但总体影响仍然有限。而土壤热阻 R_3 虽随 s 增大而明显下降, 但所占比例很大, 即使在 25% 含水率亚粘土条件下, 所占比例仍超过 80% , 是埋地原油管道主要热阻。沥青绝缘层热阻影响也不容忽视, 尤其在含水率提高、土壤热阻降低的情况下, 所占比例显著提高。

由图 4 可见, 在评价曲线输量范围, 油流放热热阻在总热阻中所占比例很小, 且随 Q 值增大明显变小, 即使在 25% 含水率和 $150 m^3/h$ 的下限输量情况下, 所占比例也只有 4.14% 。如果再考虑管壁蜡层热阻的话, 实际所占比例更低, 影响更小。因此, 应用基于给定输量之反算 K 值所建立的评价曲线预测输量变化后管道的热经济性是可行的, 应用反算 K 值进行运行优化分析以获得的与输量调整有关的经济加热方案也是可行的。

表 4 不同土壤条件下各热阻与总热阻之比 ($Q = 163.5 m^3/h$)

Table 4 The ratio of single heat resistor value to the total under various soil conditions

| 土壤性质 | 砂质土 | | 亚粘土 | | |
|-------------------------|---------|-------|-------|-------|-------|
| 含水率/% | 6 | 10 | 15 | 20 | 25 |
| $\lambda/W/(m \cdot K)$ | 0.543 8 | 1.012 | 1.454 | 1.617 | 1.651 |
| $(R_1/R)/\%$ | 1.4 | 2.47 | 3.37 | 3.68 | 3.74 |
| $(R_2/R)/\%$ | 5.6 | 9.83 | 13.4 | 14.63 | 14.88 |
| $(R_3/R)/\%$ | 93.0 | 87.7 | 83.27 | 81.69 | 81.38 |

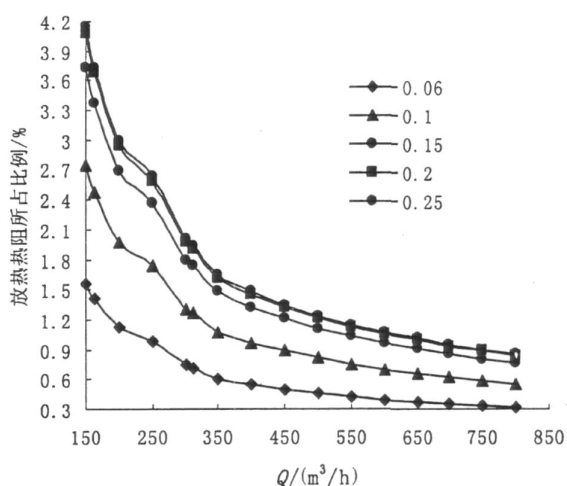


图 4 油流至管壁放热热阻在总热阻中的比例

Fig. 4 The ratio of heat resistor value during oil heat releasing to total resistor

图 5 给出了上述 5 种土壤条件下, 各输量点 K 值相对于反算输量点 $Q = 163.5 m^3/h$ $K_{163.5}$ 值的偏差, 用于评估评价误差。由图可见, 无论何个输量点, 无论何种土壤条件, 因输量变化而在 K 值上

产生的相对偏差很小,且该偏差随土壤 s_s 值降低而进一步减少,在算例最大 s_s 值情况下,下限输量点的相对偏差仅为 -0.414% ,上限输量点也只有 2.99% ,在含水率为 6% 砂质土情况下,此两点 K 值的相对偏差仅为 -0.156% 和 1.11% ,应说明,误差分析所用反算点输量稍小于建立评价曲线时所基的实际反算点输量($167.3\text{ m}^3/\text{h}$),故输量变化对 K 值产生的误差范围也还会稍小。因管道强度和泵机组配置原因,该管道在 $600\text{ m}^3/\text{h}$ 以上输量运行的可能性不大,故实际上限偏差还会更小。图5也可作为偏差校正曲线,根据输量变化不断对反算 K 值进行修正,由此生成的评价曲线更符合实际。更实用的方法是,充分利用管道多年积累的运行数据,按不同条件运行参数进行反算以获得相应 K 值,建立相关数据库,据此生成的评价曲线将使评价过程更加合理,且不会增加分析难度。

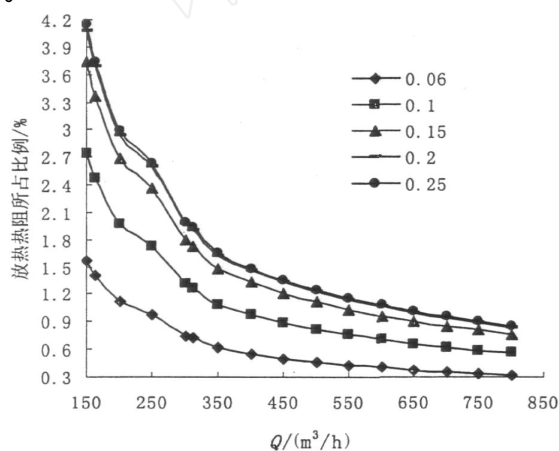


图5 任意 Q 之 K 值对于 $Q=163.5\text{ m}^3/\text{h}$ 时 K 值的偏差

Fig. 5 The tolerance analysis of K -value calculated by any Q to a given Q

应指出,本文未直接涉及泵扬程问题,目前国内不少管道长期处于低输量下运行,泵压头具有很大富余量,相当部份消耗于阀门节流上,故进一步的工作应包含加热和加压两方面的综合经济性评

价。另外输送过程结蜡吸热和析蜡放热量计算在工程上还未有大的突破,文中也未加考虑。

5 几点结论

提出了埋地热油管道热经济性动态评价参数和评价曲线的建立方法,方法正确,可快速实施管道热经济性自动和即时分析、即时评价、即时调整,对管道设计和运行管理具有实用意义;评价曲线基于优化分析结果,很好反映了通过优化运行方案管道可以达到的经济加热油耗指标,确定热经济性良好的输量范围,可以动态分析该项指标随输量的变化趋势,分析油流摩擦热在输送过程发挥的作用,可以提供对当前输送方案的优化调整建议;

应用本文方法,根据运行参数可以获得管输过程全面的热状况信息,将其与评价曲线比较,可以定量动态评估当前输量管道运行方案的热经济性程度,预测运行方案的合理性,也可根据实际耗油量动态评价热站运行效率;输量变化对评价曲线产生的误差是有限的,忽略其影响不会对评价结果产生太大的误差,而气候变化使土壤含水率增加所造成的影响是必须考虑的;建立反算 K 值的偏差校正曲线,或充分利用管道多年积累的运行数据,获得不同输量段之 K 值,可以使评价曲线和评价过程更加合理。

参考文献:

- [1] 孟振虎,陈毅忠.原油管道输送过程的热分析[J].江苏工业学院学报,2005,17(3):19-23.
- [2] 孟振虎.原油不加热等温输送的临界条件[J].油气储运,2005,24(6):22-27.
- [3] 段光才,丁于华.洪荆线冬季低输量的计算[J].石化管道,2003,26(3):22-23.
- [4] 严大凡.输油管道设计与管理[M].北京:石油工业出版社,1986.59-74.
- [5] 梁翥章,唐智圆.世界著名管道工程[M].北京:石油工业出版社,1974.37-71.