

东临复线稳态优化运行方案

李超

(中国石化管道储运公司鲁宁处)

李超. 东临复线稳态优化运行方案. 油气储运, 2010, 29(10): 744-748.

摘要: 基于东临复线管道概况和基础参数, 回归了各泵站不同泵组合方式的特性方程, 建立了运行方案优化数学模型, 包括管内油流温度、总传热系数、原油密度、比热容、粘温关系的计算方法, 以及原油价格和电价格的取值依据。利用热油管道稳态通用 HOPOPT 软件, 计算了管道在大、中、小 3 种输量条件下, 其末站在不同进站温度时的各站开泵方案、进出站压力、进出站温度及电耗、油耗情况。通过分析优化, 计算得到了最佳经济运行方案, 揭示了东临复线的节能潜力与进站温度的关系。

主题词: 东临复线; 热油管道; 稳态运行; 运行方案; 优化; 能耗计算

东临(东营—临邑)复线管道全长 157 km, 沿途地势平坦, 共设有 1 座首站(东营)、1 座中间热泵站(滨州)、2 座泵站(乔庄、淄角)和 1 座末站(临邑)。管道设计压力为 6.20 MPa, 各站输油泵进口允许最低压力为 0.21 MPa, 允许最低进站温度为 32 ℃、最高出站温度为 60 ℃。全线采用密闭输送工艺, 各站输油泵采用串联方式。

1 基础数据

计算软件将优化运行基础参数(表 1~表 3)分为管道参数、设备参数、原油物性参数、条件性参数 4 类。前 3 类参数基本固定, 只有条件性参数是变化的。在计算不同情况下的优化运行方案时, 通常需要修改条件性参数, 主要包括管道起点进站温度与进站压力、管道沿线各站间管段自然地温、总传热系数、各站加热炉燃料低发热值、各站电价、燃料价格和管道沿线的输油流量分布等。优化计算结果是否符合实际, 站间管段水力与热力计算的精度至关重要。

表 1 管道基本数据

站间管段	站间高程差 /m	站间距 /km	管径×壁厚 /mm
东营—乔庄	0.5	30.0	630.0×7
乔庄—滨州	2.2	24.6	630.0×7
滨州—淄角	2.5	47.0	711.2×8
淄角—临邑	4.3	55.4	711.2×8

表 2 输油主泵的配置情况

站名	分类	数量	扬程 /m	排量 /(m ³ ·h ⁻¹)	效率 %	功率 /kW
东营	大泵	3	246	2 850	85	2 290
	小泵	1	101	2 850	85	925
乔庄	大泵	3	230	2 500	70	2 300
	小泵	1	120	2 500	70	1 250
滨州	大泵	3	246	2 850	85	2 290
	小泵	1	101	2 850	85	925
淄角	大泵	3	230	2 500	70	2 300
	小泵	1	120	2 500	70	1 250

表 3 加热炉(热媒炉)的配置情况

站名	分类	数量	型号	功率 /kW	备注
东营	大炉	3	20MMBTU/H	5 815	热媒炉
	小炉	2	12MMBTU/H	3 487	热媒炉
乔庄	无	0			
滨州	无	2	GW5000—Y/6.4—Y2	5 000	加热炉
淄角	无	0			

2 计算方法

2.1 泵站特性描述

泵匹配在给定输量下一般有多种组合方式, 根据泵厂提供的特性曲线回归了各个泵站不同泵组合的特性方程(表 4、表 5)。

2.2 管段内油流温度

苏霍夫公式既没考虑摩擦生热对管道轴向降

作者简介: 李超, 工程师, 1962 年生, 2004 年毕业于石油大学(华东)石油工程专业, 现主要从事输油技术管理工作。电话: 05375273441。

E-mail: lichao3441@sina.com

温的影响,也没有计入含蜡原油降温时的析蜡潜热效应,故仅适于流速小、温降大、摩擦生热可忽略不计的场合。实际上油流在沿管道向前流动的过程中,由于摩阻存在而使压力不断降低,这部分压能将转化为摩擦热而使油流温度升高。对于大型输油管道,特别是满负荷运行管道,精确进行热力计算应计入摩擦热的影响,计算温度时应将物性参数看成变量,选用迭代法,直至满足精度要求为止,采用列宾宗温降公式:

$$t_z = (t_0 + b) + [t_r - (t_0 + b)]e^{-al} \quad (1)$$

$$a = \frac{\pi k D}{\rho Q c_p}, b = \frac{\rho Q g i}{\pi k D}$$

式中: k 为管道的总传热系数, $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})$; i 为水力坡降, m/m ; ρ 为油品密度, kg/m^3 ; c_p 为油品的比定压热容, $\text{kJ}/(\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})$; l 为计算长度, m ; t_0 为管道周围的介质温度, $^\circ\text{C}$; Q 为管道输量, m^3/s ; D 为计算直径(对无保温层管道,取钢管外径), m ; t_r 为 l 长度管道周围介质的起点温度, $^\circ\text{C}$; t_z 为 l 长度管道周围介质的终点温度, $^\circ\text{C}$; a 、 b 为修正系数。

$$t_a = \frac{1}{3}t_r + \frac{2}{3}t_z \quad (2)$$

式中: t_a 为油品的平均温度, $^\circ\text{C}$ 。

表4 东营首站¹⁾与滨州站泵站特性方程

泵组合方式	泵站特性方程
1台小泵	$H = 130.0 - 0.011 Q + 2.45 \times 10^{-6} Q^2 + 7.33 \times 10^{-10} Q^3$
1台大泵	$H = 317.3 - 0.028 Q + 5.98 \times 10^{-6} Q^2 + 1.79 \times 10^{-9} Q^3$
1台大泵 1台小泵	$H = 447.3 - 0.039 Q + 8.43 \times 10^{-6} Q^2 + 2.52 \times 10^{-9} Q^3$
2台大泵	$H = 634.6 - 0.056 Q + 11.96 \times 10^{-6} Q^2 + 3.58 \times 10^{-9} Q^3$
2台大泵 1台小泵	$H = 764.6 - 0.067 Q + 14.41 \times 10^{-6} Q^2 + 4.31 \times 10^{-9} Q^3$

注:1)东营首站无给油泵,计算过程中该首站提供的总扬程为主泵扬程加给油泵额定扬程81 m。

2.3 总传热系数

对于热油管道很难保持绝对稳态工况,其运行参数记录值难免存在随机误差,通常采用一个较长时间段,即1个月来确定总传热系数 k 值。具体做法是在指定时间段内挑选出相对稳定工况管段的运行参数,利用苏霍夫温降公式(式(3))反算各个站间的总传热系数 $k_{(i)}$ 。

$$\frac{\pi k D}{G c} L = \ln \frac{T_r - T_0 - \frac{g i G}{\pi k D}}{T_z - T_0 - \frac{g i G}{\pi k D}} \quad (3)$$

式中: G 为管输介质的质量流量, kg/s 。

表5 乔庄站和淄角站泵站特性方程

泵组合方式	泵站特性方程
1台小泵	$H = 206.6 - 0.094 Q + 3.990 \times 10^{-5} Q^2 - 6.62 \times 10^{-9} Q^3$
1台大泵	$H = 396.8 - 0.181 Q + 7.661 \times 10^{-5} Q^2 - 1.271 \times 10^{-8} Q^3$
1台大泵 1台小泵	$H = 603.4 - 0.275 Q + 1.165 \times 10^{-4} Q^2 - 1.933 \times 10^{-8} Q^3$
2台大泵	$H = 634.6 - 0.056 Q + 1.196 \times 10^{-5} Q^2 + 3.58 \times 10^{-9} Q^3$
2台大泵 1台小泵	$H = 793.6 - 0.362 Q + 1.532 \times 10^{-4} Q^2 - 2.542 \times 10^{-8} Q^3$

程序计算步骤:利用管道正常运行时的站间压差确定管段的水力坡降;利用正常运行时进出站温度计算站间平均油温,确定相应温度下的原油比定压热容;给定各个站间总传热系数 $k_{(i)}$ 的初始值,循环迭代,使式(3)左右两端的差值达到允许的误差范围,最终得到各个站间的总传热系数 $k_{(i)}$ 。

2.4 原油密度、比热容及粘温关系

已知某原油密度为:

$$\rho = 888.5 - 0.802 T \quad (4)$$

式中: ρ 为油品密度, kg/m^3 ; T 为油品温度, $^\circ\text{C}$ 。

当 $T > 45 ^\circ\text{C}$ 时,

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

$$\lg \mu = 2.9702 - 0.01973 T$$

当 $T < 45 ^\circ\text{C}$ 时,

$$c_p = 4.186 - 0.484 \exp(0.03465 T)$$

$$\lg \mu = 3.4596 - 0.02588 T$$

式中: d_4^{15} 为油品在 $15 ^\circ\text{C}$ 时的相对密度, kg/m^3 ; μ 为油品的动力粘度, $\text{Pa} \cdot \text{s}$ 。

2.5 原油价格与电价

原油价格取自2004年8月~2005年9月胜利油平均价格2888元/t。东营站实际电价为0.58元/(kw·h),其他各站电价为0.59元/(kw·h)。

3 计算结果

根据管道实际情况设定大、中、小3种输量为计

节能环保 746

算输量,基本可以反映目前管道运行过程中流量的波动范围。基于上述数据和数学模型,利用HOPOPT软件计算了1个月内3种输量下东临复线临邑末站在不同进站温度下的稳态运行方案。计算中月平均地温取4℃,东营站进站温度取40℃,将临邑站进站温度作为变量进行计算。

3.1 方案1

根据东营—滨州管段流量为2100 m³/h、滨州—临邑管段流量为2200 m³/h时的计算结果与运行方案(表6),在大输量条件下,随着进站油温的降低,管道全线的总能耗费用总体呈现下降趋势,最佳运行方案下全线不加热,末站进站油温为32.3℃,滨州站进站油温为36.7℃,总能耗费用为12.018×10³元/h。2005年2月在该输量下临邑站和滨州站的实际进站温度分别为38℃和36℃,总

能耗费用为15.4345×10³元/h,采用最佳方案可节约能耗费用3.426×10³元/h。

3.2 方案2

根据东营—滨州管段输量为1770 m³/h,滨州—临邑管段输量为1900 m³/h时的计算结果与运行方案(表7),在中等输量下,随着进站油温的降低,全线总能耗费用虽总体呈现下降趋势,但进站温度为36℃时总能耗费用略低于进站温度为35℃时的总能耗费用,原因在于温度下降致使摩阻变大,改变了泵组合方式,由于泵扬程呈阶梯状变化增大了动力消耗,使得由温度下降而引起的燃料费用下降不足以抵消增加的这部分动力消耗。进站温度为35℃运行时压头浪费很大,节流损失达105.9 m;而进站温度为36℃时节流损失仅15.2 m。

表6 不同进站温度下各站间管段能耗的计算结果(方案1)

站间管段	进站温度/℃	流量/(m ³ ·s ⁻¹)	扬程/m	总节流/m	燃料费/(10 ³ 元·h ⁻¹)	动力费/(10 ³ 元·h ⁻¹)	总费用/(10 ³ 元·h ⁻¹)	泵组合方式
东营—乔庄	38	0.589	462.01	6.6	0.960	3.350	4.310	2台大泵
乔庄—滨州		0.589	393.86		0	2.894	2.894	2台大泵
滨州—淄角		0.617	413.98		2.758	2.022	4.780	1台大泵
淄角—临邑	36	0.617	514.79	99.3	0	2.894	2.894	1台小泵
东营—乔庄		0.589	477.59		0	2.894	2.894	2台大泵
乔庄—滨州		0.589	404.83		0	2.894	2.894	1台小泵
滨州—淄角		0.617	431.88		2.456 4	2.881	5.337	1台大泵
淄角—临邑	35	0.617	531.74	83.0	0	2.894	2.894	2台大泵
东营—乔庄		0.589	477.22		0	3.924	3.924	1台小泵
乔庄—滨州		0.589	404.14		0	2.233	2.233	1台大泵
滨州—淄角	34	0.617	440.73	69.2	1.846 7	2.881	4.728	1台小泵
淄角—临邑		0.617	540.30		0	2.894	2.894	2台大泵
东营—乔庄	33	0.589	476.87	52.5	0	3.350	3.350	2台大泵
乔庄—滨州		0.589	403.50		0	2.890	2.890	2台大泵
滨州—淄角		0.617	449.55		3.095 8	2.880	4.080	2台大泵
淄角—临邑		0.617	548.95		0	2.890	2.890	2台大泵
东营—乔庄	32.3	0.589	476.55	40.7	0	3.350	3.350	2台大泵
乔庄—滨州		0.589	402.90		0	2.894	2.894	2台大泵
滨州—淄角		0.617	458.37		0.527	2.881	3.408	2台大泵
淄角—临邑		0.617	557.68		0	2.894	2.894	2台大泵
东营—乔庄	32.3	0.589	481.26	40.7	0	3.350	3.350	2台大泵
乔庄—滨州		0.589	411.71		0	2.894	2.894	2台大泵
滨州—淄角		0.617	455.64		0	2.881	2.881	2台大泵
淄角—临邑		0.617	562.97		0	2.894	2.894	2台大泵

表 7 不同进站温度各站间管段能耗的计算结果(方案 2)

站间 管段	进站温度 /℃	流量 /($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)	扬程 /m	总节流 /m	燃料费 /(10^3 元 $\cdot \text{h}^{-1}$)	动力费 /(10^3 元 $\cdot \text{h}^{-1}$)	总费用 /(10^3 元 $\cdot \text{h}^{-1}$)	泵组合 方式
东营—乔庄	38	0.493 2	333.64	65.7	1.537	3.350	4.888	2 台大泵
乔庄—滨洲		0.493 2	290.67		0	1.447	1.447	1 台大泵
滨州—淄角		0.526 3	304.87		3.573	1.441	5.013	1 台大泵
淄角—临邑		0.526 3	389.35		0	2.233	2.233	1 台大泵 1 台小泵
东营—乔庄	36	0.493 2	346.92	15.2	0.732	3.350	4.083	2 台大泵
乔庄—滨洲		0.493 2	299.75		0	1.447	1.447	1 台大泵
滨州—淄角		0.526 3	319.76		2.937 6	1.441	4.378	1 台大泵
淄角—临邑		0.526 3	402.61		0	2.233	2.233	1 台大泵 1 台小泵
东营—乔庄	35	0.493 2	353.52	105.9	0.260	3.350	3.610	2 台大泵
乔庄—滨洲		0.493 2	304.35		0	1.447	1.447	1 台大泵
滨州—淄角		0.526 3	326.94		2.951	1.441	4.391	1 台大泵
淄角—临邑		0.526 3	409.26		0	2.894	2.894	2 台大泵
东营—乔庄	34	0.493 2	356.86	86.7	0	3.350	3.350	2 台大泵
乔庄—滨洲		0.493 2	306.52		0	1.447	1.447	1 台大泵
滨州—淄角		0.526 3	334.03		2.640 5	1.441	4.081	1 台大泵
淄角—临邑		0.526 3	415.93		0	2.894	2.894	2 台大泵
东营—乔庄	33	0.493 2	356.54	73.8	0	3.350	3.350	2 台大泵
乔庄—滨洲		0.493 2	305.93		0	1.447	1.447	1 台大泵
滨州—淄角		0.526 3	341.06		2.090 5	1.441	3.531	1 台大泵
淄角—临邑		0.526 3	422.66		0	2.894	2.894	2 台大泵
东营—乔庄	32	0.493 2	356.25	60.9	0	3.350	3.350	2 台大泵
乔庄—滨洲		0.493 2	305.39		0	1.447	1.447	1 台大泵
滨州—淄角		0.526 3	348.07		1.510	1.441	2.951	1 台大泵
淄角—临邑		0.526 3	429.44		0	2.894	2.894	2 台大泵

此中等输量下最佳运行方案为东营站不点炉,滨州进站油温 34.85°C ,滨州站点 2 台炉,临邑末站进站油温 32°C ,总能耗费用 10.641×10^3 元/h。2006 年临邑站进站温度 36°C ,滨州站进站温度 38°C ,总能耗费用 12.9455×10^3 元/h,采用最佳运行方案可节约能耗费用 2.313×10^3 元/h。

3.3 方案 3

根据东营—滨洲管段输量为 $1550 \text{ m}^3/\text{h}$,滨州—临邑管段输量为 $1650 \text{ m}^3/\text{h}$ 时的计算结果与运

行方案(表 8),在小输量下,随着进站油温降低,全线总能耗费用下降趋势与中等输量相同。该输量下最佳运行方案为东营站不点炉,滨州进站油温度为 33.43°C ,滨州站点 2 台炉,末站进站油温 32°C ,总能耗费用为 10.103×10^3 元/h。2005 年该输量下临邑站实际进站油温 36°C ,滨州站实际进站油温 38°C ,总能耗费用为 12.2958×10^3 元/h,采用最佳运行方案能耗费用可节约 2.192×10^3 元/h。

表 8 不同进站温度各站间管段能耗的计算结果

站间 管段	进站温度 /℃	流量 /($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)	扬程 /m	总节流 /m	燃料费 /(10^3 元 $\cdot \text{h}^{-1}$)	动力费 /(10^3 元 $\cdot \text{h}^{-1}$)	总费用 /(10^3 元 $\cdot \text{h}^{-1}$)	泵组合 方式
东营—乔庄	38	0.4305	260.05	93.5	1.968	2.503	4.472	1 台大泵 1 台小泵
乔庄—滨洲		0.430 5	230.86		0	1.447	1.447	1 台大泵
滨州—淄角		0.458 0	231.90		4.354	1.441	5.795	1 台大泵
淄角—临邑		0.458 0	305.11		0	1.447	1.447	1 台大泵

续表 8

站间 管段	进站温度 /℃	流量 /($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)	扬程 /m	总节流 /m	燃料费 /($10^3 \text{元} \cdot \text{h}^{-1}$)	动力费 /($10^3 \text{元} \cdot \text{h}^{-1}$)	总费用 /($10^3 \text{元} \cdot \text{h}^{-1}$)	泵组合 方式
东营—乔庄	36	0.430 5	271.12	93.5	1.192	2.503	3.695	1台大泵 1台小泵
乔庄—滨洲		0.430 5	238.13		0	1.447	1.447	1台大泵
滨州—淄角		0.458 0	245.50		3.490	1.441	4.931	1台大泵
淄角—临邑		0.458 0	316.13		0	1.447	1.4468	1台大泵
东营—乔庄	35	0.430 5	276.56	29.9	0.782	2.503	3.285	1台大泵 1台小泵
乔庄—滨洲		0.430 5	241.81		0	1.446	1.446	1台大泵
滨州—淄角		0.458 0	251.67		3.174 3	1.441	4.615	1台大泵
淄角—临邑		0.458 0	321.52		0	1.446	1.446	1台大泵
东营—乔庄	34	0.430 5	281.96	50.5	0.349 8	2.503	2.853	1台大泵 1台小泵
乔庄—滨洲		0.430 5	245.52		0	1.446	1.446	1台大泵
滨州—淄角		0.458 0	257.66		3.149 7	1.441	4.590	1台大泵
淄角—临邑		0.458 0	326.90		0	1.446	1.446	1台大泵
东营—乔庄	33	0.430 5	286.09	121.6	0	2.503	2.503	1台大泵 1台小泵
乔庄—滨洲		0.430 5	248.30		0	1.446	1.446	1台大泵
滨州—淄角		0.458 0	263.54		2.963 3	1.441	4.404	1台大泵
淄角—临邑		0.458 0	332.29		0	2.233	2.233	1台大泵 1台小泵
东营—乔庄	32	0.430 5	285.80	111.2	0	2.503	2.503	1台大泵 1台小泵
乔庄—滨洲		0.430 5	247.78		0	1.447	1.447	1台大泵
滨州—淄角		0.458 0	269.34		2.479 0	1.441	3.920	1台大泵
淄角—临邑		0.458 0	337.71		0	2.233	2.233	1台大泵 1台小泵

综上所述,在给定输量下,随着进站油温下降,管道总能耗费用总体呈现下降趋势。也就是说,在允许范围之内,设定尽量低的进站油温有利于降低总能耗费用。计算流量范围内,设定相同进站温度,单位体积总能耗费用(单位体积总能耗费用=总能耗费用/体积流量)随着流量增大而减少。管道在运行过程中,电力成本与热力成本呈相反方向变化,降低管道能耗成本不仅仅局限于降低进站油温,而是牵扯到整个运行方案的综合性问题。优化运行方案在本质上就是使电费和燃料费达到最佳平衡过程。从中等输量和小输量计算结果可以看出:当管道、设备确定后,输量在一定范围内,在局部温度段随着进站油温降低,管道总费用呈现上升趋势。因此管道在运行中并非进站油温越低越经济,需根据实际情况计算确定进站油温。

(收稿日期:2010-04-13)

