

用改进混沌综合法实现热油管道的优化设计

严宏东*

汪玉春

(重庆科技学院石油工程系) (西南石油学院)

严宏东 汪玉春:用改进混沌综合法实现热油管道的优化设计,油气储运,2005,24(2) 15~19.

摘要 由于热油管道的建设投资和运营费用巨大,因而采用新技术进行优化设计,对于降低费用和缩短设计时间具有重要的意义。建立了热油管道优化设计的数学模型,采用改进混沌综合法对该模型进行优化求解。通过算例与其它优化算法(方案比较法、复合形法、改进混沌法)的对比表明,采用该算法可节省工程投资,降低设计成本,缩短设计时间。

主题词 输油管道 混沌系统 加热输送 优化设计

一、前言

优化设计技术对于提高设计水平、节省工程投资、降低设计成本、缩短设计时间具有十分重要的作用,因而在油气管道设计和诸多工程领域内得到了广泛的应用^[1,2]。但由于热油管道的优化设计涉及的设计变量多,有离散实型、离散整型、连续型等类型,且一般目标函数为非线性,约束条件均较为复杂。对于这类混合离散变量的约束非线性优化问题,无论是将连续变量离散化(如方案比较法),还是将离散变量连续化均不易求得全局最优解。某些算法即使不对设计变量作形式上的改变,也很可能求得不是全局最优解。近年来,一类新型的优化算法——智能优化算法的迅速发展,为优化设计提供了一种新的思路。本文就此建立了热油管道的优化设计数学模型,研究了用改进混沌综合法求解该数学模型,并且通过算例以及与其它算法的对比表明,所采用的方法是有效的。

二、数学模型

1、目标函数

长距离输油管道运距长,输量大,建成投产后即

全年连续运行,所消耗的一次性建设投资费用和每年的运营费用(主要是燃料和动力费用)都很大。因此可以用管道系统的总费用作为评价输油管道经济性的指标,即选取输油管道系统的年折合费用作为目标函数。其目标函数为:

$$S = E(S_1 + S_2) + S_3 + S_4 + S_5 \quad (1)$$

式中 S ——输油管道的折合费用, 10^4 元/a;

E ——额定投资效益系数,取 0.15;

S_1 ——输油管道总基建投资, 10^4 元;

S_2 ——热泵站、泵站的投资, 10^4 元;

S_3 ——输油管道动力费用, 10^4 元/a;

S_4 ——输油管道燃料费用, 10^4 元/a;

S_5 ——全部职工工资支出, 10^4 元/a。

(1) 输油管道总基建投资(S_1) 输油管道(含保温层)总基建投资包括管道本身的基建投资费和保温层的基建投资费,其中保温层基建投资按保温层体积计算。显然, S_1 为管径和壁厚的函数,且可用式(2)进行计算。

$$S_1 = LS_{PL} + \pi LY_B (D\delta_b - \delta_b^2) \times 10^{-1} \quad (2)$$

式中 L ——管道总长度, km;

D ——管道外径, m;

δ_b ——保温层厚度, m;

S_{PL} ——每公里管道的基建投资, 10^4 元;

Y_B ——保温层单价, 元/ m^3 。

(2) 热泵站和泵站的总投资费用(S_2) 热泵站和泵站的总投资费用包括首站的基建投资费用, 中间泵站的基建投资费用和加热站的基建投资费用可用式(3)表述。

$$S_2 = S_{\sigma} + (n_c - 1)S_{\Sigma} + n_R S_{Rc} \quad (3)$$

式中 S_{σ} ——首站基建投资费用, 10^4 元;
 S_{Σ} ——单座中间泵站基建投资费用, 10^4 元;
 S_{Rc} ——单座加热站基建投资费用, 10^4 元;
 n_c ——泵站数量;
 n_R ——热泵站数量。

热泵站和泵站的基建投资可根据投资估算指标回归成管径 D 的一元函数。经过一元回归优化分析可知, 首站基建投资为:

$$S_{\sigma} = E_1(c_1 + c_2 D + c_2' D^2) \quad (4)$$

中间泵站基建投资为:

$$S_{\Sigma} = E_2(c_3 + c_4 D + c_4' D^2) \quad (5)$$

单座加热站基建投资为:

$$S_{Rc} = E_3(c_5 + c_6 D + c_7 D^2) \quad (6)$$

式中 $E_1 \sim E_3$ ——时间波动系数;

$c_1 \sim c_7$ ——回归系数;

c_2', c_4' ——回归系数。

(3) 输油管道年动力费用(S_3) 输油管道年动力费用(S_3)可用式(7)表述。

$$S_3 = 8.2353 \times 10^{-3} n_c G H_c Y_D / e_{fc} \quad (7)$$

式中 G ——所输原油的质量流量, kg/s ;

H_c ——泵站提供的扬程, m ;

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

e_{fc} ——机泵的综合效率, 为电机效率 η_m 与泵效率 η_p 的乘积。

(4) 输油管道年燃料费用(S_4) 输油管道每年的燃料费用(S_4)可用式(8)表述。

$$S_4 = 3.024 \times 10^{-3} n_R Q_R Y_R / (\eta_R B_H) \quad (8)$$

式中 Q_R ——单座加热站的有效热负荷, J/s ;

Y_R ——燃料油价格, $\text{元}/\text{t}$;

B_H ——燃料油最低发热值, kJ/kg ;

η_R ——加热炉效率, 取 0.75。

对于含蜡原油, 比热 C 随温度 t 的变化在正常情况下可分为三个区域^[4]。当 $t_c \leq t_{cr}$ 时, C 与 t 的关系可用式(9)计算。

$$C(t) = 4186.8 - A_c e^{\alpha t} \quad (9)$$

式中 A_c, α ——常数, 可由试验确定。

单座加热站的有效热负荷 Q_R 为:

若 $t_c > t_{cr}$, 则

$$Q_R = \int_z^{t_R} G C_0 dt \quad (10)$$

若 $t_c \leq t_{cr}$, 则

$$Q_R = \int_{\sigma}^{t_R} G C_0 dt + \int_z^{t_R} G(4186.8 - A_c e^{\alpha t}) dt \quad (11)$$

式中 t_R ——加热站出站温度, $^{\circ}\text{C}$;

t_c ——加热站进站温度, $^{\circ}\text{C}$;

C_0 ——原油定值比热, $\text{J}/(\text{kg} \cdot ^{\circ}\text{C})$ 。

2、约束函数

(1) 强度约束条件 要求管道在最大压力下仍能满足强度要求, 而管道所受最大压力一般在泵站的出口处, 即每座泵站的出站压头不得大于管道允许的最大工作压力, 即:

$$H_d = H_c + H_s - \Delta h_c \leq [H_{d \max}] \quad (12)$$

$$[H_{d \max}] = 2.04 \times 10^5 \frac{\phi_g [\sigma_s] \delta_g}{\rho(D - 2\delta_g)} \quad (13)$$

式中 H_d ——泵站的出站压头, m ;

H_s ——泵站的进站压头, m ;

$[H_{d \max}]$ ——管道允许最大工作压力, m ;

ϕ_g ——焊缝系数, 取 0.85;

$[\sigma_s]$ ——管材许用应力, MPa ;

ρ ——原油密度, 取 $0.884 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$;

D ——管道内径, m ;

δ_g ——管壁厚度, m 。

(2) 泵特性约束条件 全线设置的泵站数 n_c , 每座泵站配备的输油泵类型, 泵机组数及串、并联组合方式形成泵组合。泵组合所提供的扬程必须与管路所需的压头相匹配, 而管路所需的压头与任务输量、管径等参数有关。由任务输量 G 可从有关设计手册中查得输油管的工作压力范围^[4], 然后根据可供选择的输油泵类型、数量及其泵特性方程, 对照任务输量和输油工作压力范围, 不难确定出各种可能的泵组合。泵特性约束条件可由式(14)表述。

$$H_c = \left\{ \begin{array}{l} H_{ci} = (Na_0 + Na_1 Q + Na_2 Q^{2-m})_i \\ \text{或} \\ H_{ci} = \left(a_0 + \frac{a_1}{N} Q + \frac{a_2}{N^{2-m}} Q^{2-m} \right)_i \end{array} \right. \quad (i=1, 2, \dots, M) \quad (14)$$

式中 H_{ci} ——一种泵组合所确定的泵站扬程, m 。

(3) 热力约束条件 由文献[4]可知, 对热油管道而言, 原油出站温度 t_R 应予以一定的制约, 即:

$$[t_{R \min}] \leq t_R \leq [t_{R \max}] \quad (15)$$

式中 $[t_{Rmin}]$ ——允许的最小出站温度, $^{\circ}\text{C}$;

$[t_{Rmax}]$ ——允许的最大出站温度, $^{\circ}\text{C}$ 。

式中其值由油温、油品物理性质等方面的因素综合决定,文中分别取 40°C 、 90°C 。同样,原油进站温度也应予以一定制约,即:

$$[t_{zmin}] \leq t_z \quad (16)$$

式中 $[t_{zmin}]$ ——允许最小进站温度, $^{\circ}\text{C}$ 。

根据文献[4],进站温度 t_z 可由式(17)计算。

$$\int_0^{t_R} dt = - \int_{t_R}^{t_z} \frac{GC(t)}{K\pi D_B \left(t - t_0 - \frac{9.8G\beta Q^{2-m} \nu(t)^m}{K\pi D_B d^{5-m}} \right)} dt \quad (17)$$

式中 β, m ——与流态有关的系数;

Q ——原油体积流量, m^3/s ;

l_R ——加热站间距, km ;

D_B ——保温层外径, m ;

t_0 ——年平均地温, $^{\circ}\text{C}$;

K ——管道总传热系数, $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot ^{\circ}\text{C})$;

d ——管道实际可流通直径, m ;

$\nu(t)$ ——原油运动粘度, m^2/s 。

式(17)为进站温度 t_z 的方程,由于油流流态的变化比较复杂,对于进站温度 t_z 的计算应分段进行求解。

(4)水力约束条件 为了保证输油管道系统完成给定的任务输量,全线泵站所提供的总扬程应不小于该输量下管路所需的压头,即:

$$n_i H_c \geq \alpha_i n_R h_R + n_R \Delta h_R + n_i \Delta h_c + \Delta Z \quad (18)$$

式中 α_i ——考虑管路沿线弯头、阀门等所产生的局部摩擦而乘的附加系数;

Δh_R ——每座加热站站内压头损失, m ;

Δh_c ——每座泵站站内压头损失, m ;

ΔZ ——管路终点和起点高差, m ;

h_R ——加热站站间管路的沿程摩擦阻, m 。

根据文献[4],加热站站间管路的沿程摩擦阻 h_R 可由式(19)计算。

$$h_R = \frac{\beta G Q^{2-m}}{K\pi D_B d^{5-m}} \int_z^{t_R} \frac{C(t)\nu(t)^m}{t - t_0 - \frac{gG_i(t)}{K\pi D_B}} dt \quad (19)$$

其中

$$i(t) = \beta \frac{Q^{2-m} \nu(t)^m}{d^{5-m}} \quad (20)$$

由于油流流态的变化比较复杂,对于加热站站间管路的沿程摩擦阻 h_R 的计算也应分段求解。

通过以上分析,综合得出热油管道优化设计的数学模型一般形式如下。

$$\begin{aligned} \min S(X) \\ \text{s. t. } \begin{cases} x \in S^n \in R^n \\ g_u(x) \leq 0, u=1, 2, \dots, m \\ h(x) = 0 \end{cases} \quad (21) \end{aligned}$$

式中 S^n —— R^n 上有界子集(即变量定义域);

$S(x)$ ——输油管道年折合费用, 10^4 元;

$g_u(x)$ ——不等式约束函数,其个数为 m ;

$h(x)$ ——等式约束函数。

式(21)中, $x = [x_1, x_2, \dots, x_p]^T$ (设计变量 $x_i \geq 0$, 其个数为 p), 由于设计变量均为正值有界变量, 目标函数明显也为正值有界函数, 因此, 必定存在一个最小点。而最优化的目标就是要找到这一最小点的近似解。

三、数学模型的求解

上述模型中共有 7 个设计变量,除了出站温度 t_R 外,其余 6 个均为离散变量。显然,这是一个约束非线性混合离散变量优化设计问题,且离散变量较多、约束函数复杂。对于离散变量的处理,若采用权宜办法,即先将离散变量连续化,用连续变量的优化方法求得其“最优解”后,再将其圆整到附近某个邻域的离散点上。这种处理方法虽然简单易行,但经过圆整的解并不一定是离散空间的最好点,甚至可能出现违反约束条件的情况。为了避免这种情况,可考虑采用新的优化方法。

在新的优化方法中,为处理离散变量中的连续变量(离散变量较多,只含少数连续变量),一般宜采用直接方法,如混沌法、复合形法等,对于这类情况,直接法有较高的求解精度,且易求得全局最优解,尤其对约束函数复杂的情况更为适用。

混沌是存在于非线性动力学系统中的一种较为普遍的现象,混沌系统具有一些非常特殊的动力学性质,如内在随机性、遍历性等^[3]。

由于具有这些独特性质,因此,利用混沌进行约束非线性混合离散变量问题的优化有以下优越性。

(1)目标函数无需是可微的或连续的。

(2)混沌优化方法可以在一定范围内遍历求解,有利于找到全局最优解,从而可以克服传统优化方法中常常只能找到局部最优点的缺点。

而一般的混沌搜索方法在迭代时没有用到前面已得出的结果,导致搜索速度不快。因此,改进混沌方法,是把前面两个结果之差与前一个结果和最新结果之差做比较就可加快搜索速度。

约束非线性混合离散变量优化问题一般采用 Logistic 模型产生混沌变量序列^[6],即。

$$x[k+1]=\lambda x[k](1-x[k]), x[k] \in [0,1] \quad (22)$$

式中 $x[k]$ ——混沌序列的第 k 个变量;

$x[k+1]$ ——混沌序列的第 $k+1$ 个变量。

其中, λ 为控制参数,取值范围为 $0 \sim 4$ 之间, Logistic 映射是 $[0,1]$ 间的不可逆映射,当 $\lambda = 4.0$ 时, Logistic 映射处于混沌状态。因此可由 Logistic 映射产生 $[0,1]$ 间的混沌变量序列,再经过尺度变换和坐标平移将其转化成在所求优化问题解空间中作混沌遍历的变量,进行混沌搜索得到问题全局最优解近似的解。其算法步骤如下^[6]。

(1)取 $0.01 \sim 0.49$ 间 n 个随机数,作为 n 个变量的初值 $x[k]$,计数器初始化。

(2)将 $x[k]$ 代入式(22)得到 n 个混沌变量,构成一个混沌变量序列。

(3)经过尺度变换和坐标平移,将求出的混沌变量序列变化到优化问题的允许解空间。

(4)判断是否符合约束条件,如果是,就转到步骤(5),否则就将 $x[k+1]$ 值传给 $x[k]$,转到步骤(2)。

(5)计数器加 1,判断当前点函数值 $f(x[k+1]) < \text{最小值 } f_{\min}$,如果是,就将当前函数值传给 f_{\min} ,计数器清零,否则就转步骤(6)。

(6)判断计算精度是否达到要求和计数器是否超过限制,计算精度达到要求或计数器超过限制,输

出结果,否则就转步骤(2)继续迭代。

从上述可以看出,混沌搜索确实能找到全局最优解的近似解。但是,其寻找的方式在局部搜索时效果不理想,对其进行改进也收不到太好的效果。

复合型法具有局部搜索时收敛快的优点,但其又常常收敛于局部最优点附近,不易搜索到全局最优点。单独用这两种算法都不理想,因此考虑利用混沌搜索易找到全局最优解的近似解和复合型法局部收敛快的特点,将混沌优化方法与复合型法结合就可以形成高效的综合算法。综合考虑后,决定采用混合离散变量的改进混沌综合算法,其中,复合型法原理如下^[6]。

在可行域内任取 n 个点(复合型的顶点),构成初始复合型。然后计算各顶点的函数值,比较后得到最大的函数值点并求得其余顶点的中心,用这两点做反射线段,得到另一新点,判断是否满足约束条件以及函数值是否小于最大函数值,如果不满足就构成新的复合型继续求解,如果满足就输出最小的函数值。否则,就缩短反射线段,再得到另一新点重复上面的步骤,直至构成新的复合型继续求解。其算法步骤见文献[6]。

四、算例和分析对比

1、改进混沌综合法求解结果并与其它优化方法对比分析

试用改进混沌综合算法对某输油管道工艺参数进行优化设计,其基本数据见表 1。改进混沌综合法求解结果见表 2。

表 1 某输油管道工艺参数

设计 输量 (10^4 t/a)	管道 全长 (km)	析蜡 温度 ($^{\circ}\text{C}$)	反常 温度 ($^{\circ}\text{C}$)	凝点 ($^{\circ}\text{C}$)	导热系数 $\text{W}/(\text{m} \cdot ^{\circ}\text{C})$			流段平均结蜡厚度 (m)		管道 埋深 (m)
					土壤	蜡沉积物	保温层	牛顿	非牛顿	
1 500	1 400	45	37	29	1.86	2.5	0.069 7	0.005	0.01	1.6

对比表 2 中数据可知,4 种方案结果中的设计变量(管径、泵站数、泵站扬程、管壁厚度)均相同,只有加热站数量、保温层厚度、出站温度不同(其中加热站相差 1 座),从而导致了最优结果的不同。尤其是改进混沌综合法与方案比较法只在出站温度、保温层厚度上有一些差别。

(1)对比优化效果。改进混沌综合法年折合费用最少,效果最好,方案比较法次之,复合型法列第三位,而改进混沌法最差。这一结果符合热含蜡原油管道设计的趋势,即用较高的工作压强,较少的加热站来达到节能降耗的目的。

(2)对比计算时间。复合型法计算时间最短,只

需十几秒;改进混沌综合法与改进混沌法基本相同, 仅用 1~2 min;方案比较法最差,要用几个小时。

表 2 改进混沌综合法求解结果

方案	年折合费用 (10^4 元)	管径 (m)	泵站扬程 (m)	加热 站数	泵站数	管壁厚度 δ_g (m)	保温层厚度 δ_b (m)	出站温度 t_R ($^{\circ}\text{C}$)	进站温度 t_L ($^{\circ}\text{C}$)
改进混沌综合法	13 327.619	0.720	519.6	11	9	0.008	0.040	55.746	44.996
方案比较法	13 329.884	0.720	519.6	11	9	0.008	0.041	55.600	45.035
复合型法	13 369.267	0.720	519.0	10	9	0.008	0.040	57.143	45.093
改进混沌法	13 378.490	0.720	519.6	11	9	0.008	0.045	55.346	45.373

2、改进混沌法寻优过程分析

考虑到对于分析搜索趋势而言,图形分析更为直观,因而启用图形输出功能(见图 1)。

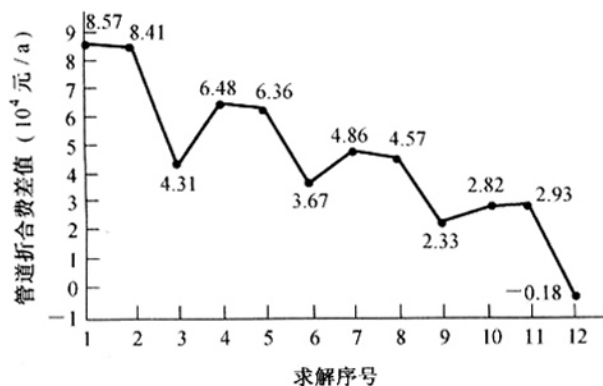


图 1 搜索趋势图

从图 1 可以看出,改进混沌优化方法能够在全局内搜索最优解,且 ΔCost 是振荡减小,趋向于零。但由于振荡造成搜索效率下降的缺点是所有类似混沌法的优化方法的通病,不易克服。

3、问题讨论

按理说,方案比较法(即穷举法)是将所有可能的方案都考虑进去了,应该得到最好的结果,但最后结果却不是如此,改进混沌综合法的结果最好。经分析发现,产生这种情况的原因出自设计变量中的连续变量(即出站温度)。方案比较法计算时将出站温度离散化,步长为 0.1°C (如 51.2°C 、 51.3°C),于是在步长 0.1°C 之间的温度情况就没有考虑,这样便产生了误差。为了提高精度,若将步长定为 0.01°C ,计算效率就必然成几何倍数下降,且在 0.01°C 之间的温度情况还是无法考虑,这就是将连续变量离散化的必然结果。改进混沌综合法不用将出站温度(连续变量)离散化,就可得到比方案比较法更好的结果。

五、结 论

(1)在热油管道优化设计的总体效果中,改进混沌综合优化算法与方案比较法、复合型法和改进混沌法相比,精度更高。

(2)从结果上看,出站温度对系统费用的影响非常大,其微小变化就会引起摩阻、热能损失等较大变化,进而影响其它参数的变化。因此,从降低能耗的角度来看,出站温度的选定是热油管道优化设计中最重要的环节。

(3)通过本文中对各种优化方法的对比表明,每种优化方法都各有其优缺点,及适用范围。因此在对工程问题的优化中,应多考虑采用综合的优化策略,合理利用不同优化方法的优点,扬长避短。

参 考 文 献

1. 蒲家宁:长输管道运行优化的分析与计算,油气储运,1992,11(1)。
2. 董正远 韩成才:原油热输管道的最优运行模型,西安石油学院学报,1996,11(5)。
3. 王凌:智能优化算法及其在应用,清华大学出版社(北京),2001。
4. 杨筱蘅 张国忠:输油管道设计与管理,石油大学出版社(山东),1996。
5. 张春概 徐立云等:改进混沌优化及其在非线形约束优化问题中的应用,上海交通大学学报,2000,34(5)。
6. 陈立周等:工程离散变量优化设计方法,机械工业出版社(北京),1989。

(收稿日期:2004-03-25)

编辑:孟凡强