

蚁群算法在天然气输送管道优化设计中的应用*

李智¹ 谢兆鸿¹ 秦建华²

(1. 武汉工业学院 2. 武汉化工学院)

李智等. 蚁群算法在天然气输送管道优化设计中的应用. 天然气工业, 2005; 25(9): 104~106

摘要 针对天然气输送管道优化模型中设计变量多, 约束条件复杂的特点, 以管道建设投资、压气站投资和运行费用最小为原则, 运用蚁群算法和 MATLAB 语言编制了天然气输送管道数学模型的优化仿真程序, 并对管道的选型、设计压力、压气站个数、压缩比及站间距离进行了优化设计。优化仿真结果表明, 在满足管道强度约束、稳定性约束、能量平衡约束及边界约束的前提下, 达到了费用最小, 且优化效果好于遗传算法。从而证明了蚁群算法应用于天然气输送管道的优化设计是可行的。

主题词 天然气 管道输送 蚁群算法 优化设计 应用

天然气输送管道都具有距离长、投资大等特点, 为节省投资, 一般都要采用优化方法进行设计, 以节省管道材料、站点建设费用以及人工费用。过去, 大多采用经典的数学方法进行优化设计, 这种方法对于优化变量少, 数学模型简单的问题, 很容易获得优化解。但如果数学模型复杂且涉及到导数等信息的时候, 就很难得到满意的优化解。而建立在仿生学基础之上的、基于现代优化理论的蚁群算法, 却能不依赖数学模型的结构及复杂性, 有效地解决此类问题。

一、蚁群算法原理

蚁群算法是由意大利学者 M. Dorigo 在仿生学成果的基础上提出的^[1], 并且采用该算法对 TSP 问题、分配问题^[2]、Job-shop 问题^[3]等进行了仿真求解, 解的质量优于或至少等效于演化算法、模拟退火算法及其他一些启发式算法。

蚁群算法是一种随机搜索算法, 与遗传算法、模拟退火算法等模拟进化算法一样, 通过候选解组成的群体在进化过程中寻求最优解^[4]。

1. 蚁群算法模型及其实现

Dorigo 等人提出的蚂蚁群体优化的元启发式规则较好地描述了蚁群算法的实现过程, 其过程中可以表示如下。

当没有达到结束条件时, 执行以下活动: ①蚂蚁

的行为, 即是蚂蚁在一定的限制条件下寻找一条路径; ②轨迹(即信息激素)浓度的挥发; ③后台程序, 主要是完成单个蚂蚁无法完成的任务, 比如说根据全局信息对信息激素浓度进行更新。

如达到条件, 结束。

由于最初的蚁群算法思想起源于离散的网络路径问题, 下面以一维搜索为例, 引申到 n 维空间的函数求解。

假定优化函数为: $\min Z = f(x) \quad x \in [a, b]$

转移概率准则: 设 m 个人工蚂蚁, 刚开始时位于区间 $[a, b]$ 的 m 等分处, 蚂蚁的转移概率定义为:

$$p_{ij} = \frac{\tau_j^\alpha \eta_j^\beta}{\sum_{j=1}^m \tau_j^\alpha \eta_j^\beta} \quad (1)$$

式中: p_{ij} 表示蚂蚁从位置 i 转移到位置 j 的概率; τ_j 表示蚂蚁 j 的邻域吸引强度; η_j 则定义为 $f_i(x) - f_j(x)$, 即目标函数差异值; 参数 $\alpha, \beta \in [1, 5]$ 。

强度更新方程:

$$\tau_j^{t+1} = \rho \tau_j^t + \sum_k \Delta \tau_{kj} \quad (2)$$

$$\Delta \tau_{kj} = Q/L_j \quad (3)$$

式中: $\Delta \tau_{kj}$ 表示第 j 只蚂蚁在本次循环中吸引强度的增加; Q 为正常数, 其范围 $0 < Q < 10000$; L_j 表示本次循环中 $f(x)$ 的增量, 定义为 $f(x+r) - f(x)$; $0 \leq \rho \leq 1$, 体现强度的持久性。于是, 函数 $f(x)$ 的寻优就

* 本文系湖北省教育厅重点科研项目(2004D011)。

作者简介: 李智, 1964 年生, 副教授, 博士; 2001 年毕业于武汉理工大学能源与动力工程学院, 从事现代优化理论及其应用的研究与教学工作。地址: (430023) 湖北省武汉市汉口武汉工业学院电气信息工程系。电话: (027) 62318826。E-mail: lizhibb@yahoo.com.cn

借助 m 个蚂蚁的不断移动来进行:当 $\eta_{ij} \geq 0$ 时,蚂蚁 i 按概率 p_{ij} 从其邻域 i 移至蚂蚁 j 的邻域;当 $\eta_{ij} \leq 0$ 时,蚂蚁 i 做邻域搜索(搜索半径或步长为 r),即每个蚂蚁要么转移至其他蚂蚁处,要么进行邻域搜索。

函数优化问题的蚁群算法步骤^[5]:① $\text{count} \leftarrow 0$ (count 是迭代步数或搜索次数);各 τ_j 和 $\Delta\tau_j$ 初始化;②将 m 个蚂蚁置于各自的初始邻域;每个蚂蚁按概率 p_{ij} 移动或做邻域搜索;③计算各个蚂蚁的目标函数 $Z_k (k=1, 2, \dots, m)$, 记录当前的最好解;④按强度更新方程修正轨迹强度;⑤ $\Delta\tau_j$ 修正, $\text{count} \leftarrow \text{count} + 1$;⑥若 count 小于预定的迭代次数,则转到②;⑦输出目前的最好解。

二、天然气输送管道优化数学模型^[6]

天然气管道输送的数学模型通常由设计变量、目标函数及约束条件三部分组成。

1. 设计变量

在天然气输送管道优化设计中,一般都是将输气管道的管道内径 d 、壁厚 δ 、压气站数 N , 站间距离 L_i (i 站到 $i+1$ 站的距离)以及压缩比 ϵ 等工艺参数作为设计变量。

2. 目标函数

目标函数的建立,一般都是从经济性角度来考虑的,主要考虑输气管道建设费用、压气站建设费用及运营所需的费用等,即:

$$F = A + B + C \quad (4)$$

式中: A 表示管道建设费用,万元; B 表示压气站建设费用,万元; C 表示运营费用,万元。

管道建设费用主要与管道的选型和长度有关,也就是与管道内径 d 、壁厚 δ 、管道的总长度 L 有关,可表示为:

$$A = f_A(d, \delta, L) \quad (5)$$

压气站建设费用主要与设计压力 p 、压气站数 N 、压缩比 ϵ 有关,可表示为:

$$B = f_B(p, N, \epsilon) \quad (6)$$

运行费用可表示为 $C = \alpha C_a$ 。其中: α 表示年现值系数; C_a 表示年操作费用,其值可表示为: $C_a = c_1 Q + c_2 A + c_3 B$; Q 表示压气站年耗气量, m^3 , 该值与设计压力 p 、压气站数 N 、压缩比 ϵ 有关,可表示为 $Q = f_Q(p, N, \epsilon)$ 。故运行费用可表示为:

$$C = f_C(d, \delta, p, N, \epsilon) \quad (7)$$

目标函数 F 表示为:

$$F = f(d, \delta, p, N, \epsilon) \quad (8)$$

优化的目的就是寻找一组优化变量 $X = [d, \delta,$

$p, N, \epsilon]^T$, 从而使得目标函数 F 最小。

3. 约束条件

约束条件中,主要包括管道强度约束、稳定性约束、能量平衡约束^[7]及边界约束。

(1) 管道强度约束

管道强度约束主要指管道在内外载荷作用下,相当应力必须小于管材的许用应力。该约束与管材参数密切相关,即与设计变量中的设计压力 p 、管径 d 和壁厚 δ 有关,表示为:

$$g_1(p, d, \delta) \leq 0 \quad (9)$$

(2) 稳定性约束

稳定性约束分为轴向稳定性约束和径向稳定性约束。轴向稳定性约束指管道轴向压力应小于管道失稳的临界轴向压力;径向稳定性约束是对管道径向变形量 Δy 的限制,一般 $\Delta y \leq 0.03 D$, D 表示管道外径,其值为 $D = d + 2\delta$ 。经验取值一般在 $D/\delta \leq E$, 其中 E 介于 110~120 之间。

另外,稳定性约束还与地下敷设参数密切相关,在设计变量中,只与设计压力 p 、管径 d 和壁厚 δ 有关。由于敷设参数由勘测结果给出,所以

轴向稳定性约束表示为: $g_2(p, d, \delta) \leq 0$ (10)

径向稳定性约束表示为: $g_3(p, d, \delta) \leq 0$ (11)

(3) 能量平衡约束

能量平衡指压气站提供的能量与气体输送所消耗的能量相平衡。站间能量平衡方程为:

$$\frac{L_i Q_i^2}{d^5} - C' p^2 \left(1 - \frac{1}{\epsilon^2}\right) = 0 \quad (12)$$

$$C' = \frac{E^2}{\lambda \Delta Z T} \quad (13)$$

上两式中: Q_i 表示流量, m^3/h ; E 表示 D/δ 的上限值,一般在 110~120 之间; λ 表示水力摩阻系数; Δ 表示天然气相对于空气的密度; Z 表示气体压缩系数; T 表示气体温度 ($^\circ\text{C}$)。

对于末站到输气终点,有:

$$\frac{L_z Q_z^2}{d^5} - C' (p^2 - p_z^2) = 0 \quad (14)$$

式中: L_z 表示末站到终点的管道长度, km ; Q_z 表示相应流量, m^3/h ; p_z 表示终点压力, MPa 。

对于不设首站,有:

$$\frac{L_s Q_s^2}{d^5} - C' \left(p_s^2 - \frac{p^2}{\epsilon^2}\right) = 0 \quad (15)$$

式中: L_s 表示起点到第一站的管道长度, km ; Q_s 表示相应的流量, m^3/h ; p_s 表示首站入口压力, MPa 。

由此可见,若压气站数为 N , 能量平衡方程至少有 N 个,表示如下。

设首站:

$$g_{j+1}(d, p, N, \epsilon, L_i) = 0 \quad j = 1, 2, \dots, N \quad (16)$$

不设首站:

$$g_{j+1}(d, p, N, \epsilon, L_i) = 0 \quad j = 1, 2, \dots, N+1 \quad (17)$$

(4) 边界约束

边界约束指设计变量取值或取值范围的限制。设 V 为任一变量, 则边界约束可以表示为 $V^L \leq V \leq V^U$, V^L 和 V^U 分别表示该设计变量的下限和上限。对设计压力、管径、壁厚等要按照国家标准及规格进行取值。

三、实例仿真

计划建设一条天然气长输管道, 输送距离

2270 km, 年输气量 $80 \times 10^8 \text{ m}^3$, 终点压力要求不小于 4 MPa, 不超过 4.8 MPa, 管道设计压力为 9.9 MPa。采用蚁群算法、遗传算法和 Matlab 语言, 编制优化仿真程序, 仿真程序在 CPU1133 MHz、RAM256 MB 的 PC 机上运行, 设计变量仿真结果如表 1 所示, 站间距离如表 2 所示, 目标函数如表 3 所示。对比看出, 蚁群算法的优化效果明显优于遗传算法。

表 1 设计变量优化结果表

设计变量	$d(\text{mm})$	$\delta(\text{mm})$	N	ϵ
遗传算法	916.7459	14.4923	9	1.2134
蚁群算法	913.9820	14.2001	9	1.2101

表 2 站间距离优化结果表

站间距离(km)	L_1	L_2	L_3	L_4	L_5	L_6	L_7	L_8	L_9
遗传算法	196.2833	209.2378	211.9138	212.3873	215.2937	217.0000	216.9912	220.1240	570.7689
蚁群算法	197.2000	208.4001	212.0000	213.6291	214.6933	216.0011	217.0000	219.0001	572.0763

表 3 目标函数优化结果表

目标函数(万元)	A	B	C	F
遗传算法	42.3892×10^6	8.5984×10^6	20.8271×10^6	71.8147×10^6
蚁群算法	42.2781×10^6	8.5871×10^6	20.6992×10^6	71.5644×10^6

四、结束语

(1) 采用蚁群算法对天然气管道输气工程进行了优化设计, 从计算结果来看, 优化效果十分显著, 可在保证各项约束的前提下, 达到投资最小化。

(2) 蚁群算法对优化问题的数学模型没有具体要求, 只要是能够显式表达, 就能够正确求解, 而且效果好于遗传算法。

参 考 文 献

- 1 Dorigo M, Bocabeau E, Theraola G. Ant algorithms and stigmergy. Future Generation Computer System, 2000; 16(5): 851—871
- 2 Maniezzo V, Colnari A. The ant system applied to the quadratic assignment problem. IEEE Trans on Knowl-
- edge and Data Engineering, 1999; 1(5): 769—778
- 3 Colnari A, Dorigo M, Maniezzo V, Trbian M. Ant system for job-shop scheduling. Belgian Journal Operations Research Statistic Computation Science, 1994; 34(1): 39—53
- 4 马良. 来自昆虫世界的寻优策略——蚂蚁算法. 自然杂志, 1999; 21(30): 161—163
- 5 魏平, 熊伟清. 用于一般函数优化的蚁群算法. 宁波大学学报, 2001; 14(4): 52—55
- 6 王艳峰, 沈祖培. 输气管道优化设计新模型. 油气储运, 2004; 23(4): 9—12
- 7 姚光镇. 输气管道设计与管理. 山东东营: 原石油大学出版社, 1989

(修改回稿日期 2005-07-08 编辑 屠维清)