

# 输气管道优化设计新模型

王艳峰\* 沈祖培

(清华大学工程物理系)

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。

**摘要** 传统的输气管道优化设计模型设计变量多、约束条件多而且复杂,优化速度慢,优化结果不理想。提出了一种新的模型,该模型具有设计变量少、约束条件少而且简单的特点,提高了优化速度。对优化算法进行了改进,使得优化结果为全局最优解。给出了算例,证明输气管道优化设计新模型十分有效。

**关键词** 天然气管道 优化设计 计算模型

## 一、前言

输气管道具有距离长、投资大的特点,为了获得最佳经济效益,必须对输气管道的管径、壁厚、压气站数和压比等工艺参数进行优化设计。文献[1~4]专门讨论了输气管道优化设计的方法,混合离散变量优化方法被广泛采用,一些新的算法,如遗传算法<sup>[2]</sup>,也被引入到输气管道的优化设计中,对有分支(分气点)的输气管道的优化设计也进行了比较深入的研究<sup>[2,3]</sup>。这些计算所采用的优化模型基本上都是以传统输气管道优化模型为基础的,缺点是设计变量多、约束条件多、复杂,不利于优化。为此提出了一种新的模型,旨在克服传统模型的缺点,提高优化的效率。

## 二、传统输气管道优化模型

优化模型由设计变量、目标函数和约束条件三要素组成。

### 1、设计变量

传统输气管道优化模型一般将管道内径  $d$ 、壁厚  $\delta$ 、设计压力  $P$ 、压气站数  $N$ 、压比  $\epsilon$  以及站间距  $L_i$  ( $i$  站到  $i+1$  站的距离) 作为设计变量,即  $[d, \delta, P, N, \epsilon, L_i]^T$ 。

### 2、目标函数

目标函数是指输气管道建设和运营所需要的总

费用,其具体值由费用现值度量。目标函数  $V$  为三个方面费用的总和,即管道线路工程投资  $A$ 、压气站工程投资  $B$  和运行操作费用  $C$  (折合为现值),  $V=A+B+C$ 。

管道线路工程投资  $A$  只与设计变量中的管径  $d$ 、壁厚  $\delta$  以及管道的总长度  $L = \sum L_i$  有关。管道总长  $L$  也是输运线路总长度,在线路选定后为定值,因此  $A=f_a(d, \delta)$ 。

压气站工程投资  $B$  只与设计变量中设计压力  $P$ 、压气站数  $N$  和压比  $\epsilon$  有关,即  $B=f_b(P, N, \epsilon)$ 。

运行操作费用  $C=C_a \times Ra$ , 其中  $Ra$  为年金现值系数,  $C_a$  为年操作费用。年操作费用  $C_a=c_0S+c_1A+c_2B$ , 其中  $c_0, c_1, c_2$  均为常数,  $S$  为压气站年耗气量。

压气站年耗气量  $S$  与设计变量中的设计压力  $P$ 、压气站数  $N$  和压比  $\epsilon$  有关,即  $S=f_s(P, N, \epsilon)$ 。因此,运行操作费用表示为:  $C=f_c(d, \delta, P, N, \epsilon)$ 。

综上所述,目标函数  $V=A+B+C=f(d, \delta, P, N, \epsilon)$ , 即目标函数与除站间距外的所有设计变量有关。

### 3、约束条件

#### (1)管道强度约束

强度约束也称应力约束,是指管道在内外载荷作用下的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,在设计变量中只与设计压力  $P$ 、管径  $d$  和壁厚  $\delta$  有关,由于管材参数是给定值,因此该约束表示为  $g_1(P, d, \delta) \leq 0$ 。

(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  $\Delta x$  的限制,一般  $\Delta x \leq 0.03 D$ ,  $D$  为管道外径,  $D = d + 2\delta$ ,  $\delta$  为壁厚。对于稳定性约束,很多文献使用了更简单的经验公式,即  $\frac{D}{\delta} \leq C$ ,其中  $C$  为常数,一般在 110~120 之间。

稳定性约束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  $\delta$  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  $g_2(P, d, \delta) \leq 0$ ,径向稳定性约束表示为  $g_3(P, d, \delta) \leq 0$ 。

(3)能量平衡约束<sup>[5]</sup>

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

$$\frac{L_i Q_i^2}{d^5} - C' P^2 \left(1 - \frac{1}{\epsilon^2}\right) = 0$$
$$C' = \frac{C^2}{\lambda \Delta Z T}$$

- 式中  $L_i$  ——站间距;
- $d$  ——管道内径;
- $Q_i$  ——流量;
- $P$  ——设计压力;
- $\epsilon$  ——压比;
- $C$  ——常数;
- $\lambda$  ——水力摩阻系数;
- $\Delta$  ——天然气相对空气的密度;
- $Z$  ——气体压缩系数;
- $T$  ——气体温度。

对于末站到输气终点:

$$\frac{L_z Q_z^2}{d^5} - C'(P^2 - P_z^2) = 0$$

- 式中  $L_z$  ——末站到终点的管道长度;
- $Q_z$  ——相应流量;
- $P_z$  ——终点压力。

对于不设首站:

$$\frac{L_s Q_s^2}{d^5} - C'(P_s^2 - P^2/\epsilon^2) = 0$$

- 式中  $L_s$  ——起点到第一站的管道长度;
- $Q_s$  ——相应流量;
- $P_s$  ——首站入口压力。

由此可见,若压气站数为  $N$ ,能量平衡方程至少有  $N$  个。能量平衡与除壁厚  $\delta$  外的所有设计变量相关,表示为:

$$g_{j+4}(d, P, N, \epsilon, L_i) = 0, j = 1, 2 \dots N \text{ (设首站)}$$

或  $j = 1, 2 \dots N + 1$  (不设首站)

(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  $X$  表示任一设计变量,则边界约束可以表示为  $X^L \leq X \leq X^U$ ,  $X^L$  和  $X^U$  分别表示该设计变量的下限和上限。对设计压力、管径和壁厚还有取值的限制,设计压力应按照国家标准取离散值,管径和壁厚也要按照一定的规格取离散值。

4、 优化模型

根据上述输气管道优化设计的设计变量、目标函数和约束条件,得到如下的传统优化模型。

设计变量:

$$[d, \delta, P, N, \epsilon, L_i]^T$$

目标函数:

$$V = f(d, \delta, P, N, \epsilon) \rightarrow Min$$

约束条件:

$$g_1(P, d, \delta) \leq 0$$

$$g_2(P, d, \delta) \leq 0$$

$$g_3(P, d, \delta) \leq 0$$

$$g_{j+4}(d, P, N, \epsilon, L_i) = 0, j = 1, 2 \dots N \text{ (设首站)}$$

或  $j = 1, 2 \dots N + 1$  (不设首站)

$$X^L \leq X \leq X^U \text{ (X 为设计变量)}$$

三、输气管道新优化模型

1、 设计变量和目标函数

输气管道新模型减少了设计变量(管道设计压力  $P$ 、壁厚  $\delta$  和站间距  $L_i$ )和约束条件的数量。管道设计压力  $P$  是一系列离散值,这些离散值的间隔比较大,当确定输气规模后,设计压力比较容易确定,设计压力有时也需要根据实际情况来确定,因此,将管道设计压力作为用户指定值,而非设计变量。

当管道设计压力  $P$  确定以后,约束条件  $g_1 \sim g_3$  只与设计变量中的管径  $d$  和壁厚  $\delta$  有关,而且壁厚  $\delta$  只影响约束条件  $g_1 \sim g_3$ ,其他约束条件与  $\delta$  无关;目标函数是壁厚的增函数,增大壁厚就是增大投资,因此,壁厚越小越好。这样,在一定管径下,若求得满足  $g_1 \sim g_3$  的最小壁厚值  $\delta_{min}$ ,则  $\delta_{min}$  不仅满足了

所有的约束条件,而且满足了优化的要求。在一定管径下求得满足  $g_1 \sim g_3$  的最小壁厚值是很容易实现的,因此壁厚  $\delta$  不再作为设计变量。站间距  $L_i$  可以通过计算管道得到,因此也不作为设计变量。这样,设计变量只剩下了管径  $d$ 、压气站数  $N$  和压比  $\epsilon$ ,表示为  $\vec{X} = [d, N, \epsilon]^T$ 。目标函数相应地变为  $V = f(\vec{X}) = f(d, N, \epsilon)$ 。

## 2、约束条件

因为设计压力和壁厚不再作为设计变量,并且在计算一定管径下的最小壁厚值时,也已经满足了约束条件  $g_1 \sim g_3$ ,所以在新模型中减少约束条件  $g_1 \sim g_3$ 。

能量平衡约束在传统优化模型中是最复杂也是最难处理的,不仅数量众多,而且都是等式约束,给优化求解造成了很大的困难。在新模型中采用了一种新的方法,将能量平衡约束转化为两个不等式约束,可以用这两个不等式约束来代替传统优化模型中的所有等式约束。

一般而言,管道输送的终点是配气站,再由配气站向城市用户输送天然气或者向储气库转输气体。配气站对输送的天然气的压力  $P_z$  有一个范围限制,即  $P^L \leq P_z \leq P^U$ ,  $P_z$  代表管道输送到配气站的天然气实际终点压力,  $P^L$  代表配气站允许来气压力的下限,  $P^U$  代表配气站允许来气压力的上限。据此,能量平衡约束就可以转化为两个不等式约束,方法如下。

针对一组设计变量,首先按照流量和高差的差异将主干线分成若干段,然后按照给定的参数,从天然气输送起点向输送终点逐段计算。在这些段中,又按照距离分成若干小段,应用能量平衡方程,逐小段进行计算,并考虑到管道内流体温度等参数的变化,以达到所需要的精度。完成了管道全线的计算,也就得到了输送终点的压力  $P_z$ ,用  $P_z$  分别与  $P^L$  和  $P^U$  相比较,就得到了两个约束条件,即  $G_1(\vec{X}) = 1 - P_z/P^L \leq 0$  和  $G_2(\vec{X}) = P_z/P^U - 1 \leq 0$ 。只要满足了这两个不等式约束条件,相应地也就满足了能量平衡约束,因此,可以用这两个不等式约束来代替能量平衡的诸多等式约束。

## 3、优化模型

根据新的设计变量、目标函数和约束条件建立新的优化模型。

设计变量:

$$\vec{X} = [D, N, \epsilon]^T$$

目标函数:

$$V = f(\vec{X}) \rightarrow Min$$

约束条件:

$$G_1(\vec{X}) \leq 0, \quad G_2(\vec{X}) \leq 0$$

$$X^L \leq X \leq X^U \quad (X \text{ 为设计变量})$$

## 4、优化方法

该优化问题属于混合离散优化的范畴,所以要采用混合离散优化方法求解。在 MDCP 算法<sup>[6]</sup>基础上,采用了一种改进的针对输气管道优化设计的混合离散优化算法。该算法具备 MDCP 算法的所有功能,采用向最好点和平均点进行搜索两种策略,根据设计变量间隔的不同,在一维线性搜索时采用多个步长,并在一维线性搜索方向的垂平面上进行试探搜索,在重构复合型前增加了局部最优搜索的功能。应用结果表明,该算法不仅速度快,而且能够得到全局最优解。

## 四、管道优化设计软件与算例

根据新的输气管道优化设计模型,采用标准 C++ 以及 MFC 编制了天然气管道优化设计软件,该软件不仅可以优化水平单气源单用户的管道,而且可以优化有高差、有分气点的管道。按照管径壁厚是否规格,优化功能又分为规格化优化和不规格化优化。另外,还附有模拟校验的功能,可以迅速判断一组优化变量是否为可行解。

计划建设一条长距离输气管道,输送距离 2 270 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。使用优化软件对该问题进行规格化优化,得出了规格化管子的规格为  $\phi 914 \times 14.2 \text{ mm}$ ,压气站数为 9 座,压比为 1.21,压气站布置见表 1。

表 1 压气站布置

站号	站间距 (km)	站号	站间距 (km)
1	0	6	1 045.8
2	197.1	7	1 261.7
3	405.5	8	1 478.7
4	617.5	9	1 696.8
5	831.1		

# 预测腐蚀管道剩余强度的新方法 \* \*

付道明 \* 孙 军 贺志刚 岑广远

(塔里木油田分公司开发事业部) (北京安东奥尔工程技术有限责任公司)

喻西崇

(中国科学院力学所)

付道明 孙 军等:预测腐蚀管道剩余强度的新方法,油气储运,2004,23(4) 12~18。

**摘 要** 将 BP 神经网络和遗传算法相结合,得到了一种可计算腐蚀管道剩余强度和最大允许注水压力的新神经网络。通过实例分析,将 7 种常用规范和改进的遗传神经网络方法进行了比较。结果表明,不同计算方法得到的剩余强度和最大允许注水压力相差较大,Wes 2805-97 规范、ASMEB31G 规范、CVDA-84 规范、Irwin 断裂力学方法等都比  $J$  积分方法的剩余强度和最大允许注水压力偏大;Burdiken 和 DM 断裂力学方法计算得到的剩余强度和最大允许注水压力比  $J$  积分偏小; $J$  积分方法和基于  $J$  积分方法的改进遗传神经网络方法计算结果比较接近,比较适中,可以认为是计算管道剩余强度和最大允许注水压力较好的方法。

**主题词** 腐蚀管道 剩余强度 BP 神经网络 遗传算法

## 一、前 言

管道发生腐蚀后,管道的剩余强度和承压能力将下降,管道腐蚀的检测和维修费用上升,管道的维修和更换周期缩短,投资和运行费用增加,整个输送

系统的正常运行将受到干扰<sup>[1]</sup>。评价腐蚀管道剩余强度的目的是为了研究缺陷能否在某一操作压力下允许存在,以确定当前腐蚀缺陷下的剩余强度和最大失效压力,以及在某一输送压力下允许存在的最大腐蚀缺陷尺寸等,为管道维修计划和安全生产管理提供科学的指导。含腐蚀缺陷的在役腐蚀管道剩

管道各部分的经济指标分别为,管道线路工程投资为  $42.3 \times 10^8$  元,压气站工程投资为  $8.6 \times 10^8$  元,运行操作费用为  $20.7 \times 10^8$  元,合计为  $71.6 \times 10^8$  元。

## 五、结 论

新的输气管道优化设计模型与传统的优化模型相比具有设计变量少、约束条件少、优化简单和效率高等优点。计算管道能量平衡约束时将管道分为小段进行处理,不仅精度高,而且适用于有高差、有分气点的管道。在 MDCP 算法的改进基础上,编写了用于输气管道优化的混合离散算法,实例应用表明,该算法不仅运行速度快,而且可得到全局最优解。

### 参 考 文 献

- 1, 李长俊 杨 宇等:长距离输气管道工程混和离散变量优化设计研究,管道技术与设备,2001(3)。
- 2, 刘明超 黄腾飞:大型水平输气管线优化设计新方法,天然气与石油,2002,20(1)。
- 3, 康正凌 袁宗明:树枝状天然气管网优化设计,天然气工业,2001,21(3)。
- 4, 张其敏:有分支天然气管线优化设计,天然气与石油,2000,18(1)。
- 5, 姚光镇:输气管道设计与管理,石油大学出版社(东营),1989。
- 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:2003-06-02)

编辑:刘春阳

\* 841000,新疆库尔勒市;电话:(0996)2174726。

\* \* 国家 863 项目;石油勘探开发分布式集成应用系统(863-306-ZT04-03-3)。