

# 灰色非线性规划在输气干线优化设计中的应用<sup>\*</sup>

李薇<sup>1</sup> 汪玉春<sup>1</sup> 陈娟<sup>2</sup> 曹军<sup>2</sup> 马珂<sup>2</sup>

(1.西南石油大学 2.新疆时代石油工程有限公司)

李薇等.灰色非线性规划在输气干线优化设计中的应用.天然气工业,2007,28(1):125-128.

**摘要** 由于输气干线建设和运营的复杂性,其优化设计模型中的经济参数是处于动态变化的,并且对有关数字进行估计又很难完全、准确。为了提高优化结果的可靠性和适应性,将灰色非线性规划应用于输气干线的优化设计,考虑到了模型参数的变化和发展,把信息不完全、关系不确定的参数作为灰数处理,应用等维新息灰色预测模型预测目标值,再应用灰色非线性规划和互补几何规划对输气干线进行灰色优化设计建模和求解。实例证明,对输气干线进行灰色优化设计更符合工程实际,灰色非线性规划比确定性规划方法有更多的灵活性,提高了对输气干线设计方案科学决策的适应能力。

**关键词** 输气管道 优化设计 模糊数学 预测

灰色系统理论是我国学者邓聚龙教授首创的一门学科,是一种研究少数据、贫信息不确定性问题的有效方法<sup>[1-3]</sup>。由于输气干线建设和运营的复杂性,导致了输气干线优化设计是具有“部分信息已知,部分信息未知”的“小样本”、“贫信息”不确定性问题<sup>[4]</sup>。这种不确定性主要表现在输气干线优化设计模型中的经济参数,是处于动态的、是随着经济发展而变化的,并且对有关数字进行估计又很难完全准确,因此目标函数中的经济参数以及约束条件中的部分参数是区间数,即灰数<sup>[5]</sup>。过去,对输气干线优化设计中的种种不确定性通常采取回避态度,简化为一确定性的系统规划,这样分析的结果有时不能很好地适应工程实际。基于灰色规划理论的输气干线优化设计可以考虑模型参数的变化和发展,把信息不完全、关系不确定的参数视为灰数,应用等维新息灰色预测模型预测目标值,再应用灰色非线性规划和互补几何规划对输气干线进行灰色优化设计建模和求解。

## 一、灰色非线性规划

灰色规划理论就是用灰色模型来预测约束条件和目标函数中系数的变化,进而构造预测型规划,最后确定满足协调关系的有效规划解。灰色规划引入了灰色系统理论的灰数概念与灰数处理方法,从而使规划具有更好的适应性和可靠性,使规划解具有

可塑性<sup>[5]</sup>。

设  $X = (x_1, x_2, \dots, x_n)$  为决策向量,  $\otimes$  为灰参数,称  $\max(\min) S = f(X, \otimes)$  为一般灰色非线性规划问题。

白化  $f(X, \otimes)$  中的灰元,称所得规划问题为  $\max(\min) S = f(X, \otimes)$  的白化规划,记为  $\max(\min) S = f(X)$ 。

对于灰色非线性规划问题<sup>[5,6]</sup>,可先行白化,然后求解。

## 二、输气干线灰色优化设计数学模型

针对输气干线优化设计的特点,根据天然气管道输送理论、灰色非线性规划理论和技术经济学原理,以管道年值费用(包括管道建设费用和经营管理费)最省为目标函数,把信息不完全、关系不确定,且随时间而变化的参数作为灰数处理,记为  $\otimes$  (参数),建立输气干线灰色优化设计的数学模型。

### 1. 目标函数

输气管道的年值费用  $\otimes(F)$  主要由管道投资的年值费用  $\otimes(F_1)$ 、压缩机站总投资的年值费用  $\otimes(F_2)$ 、管道和压缩机站的年经营费用  $\otimes(F_3)$  组成。

$$\otimes(F) = \otimes(F_1) + \otimes(F_2) + \otimes(F_3) \quad (1)$$

式中:  $\otimes(F)$ 、 $\otimes(F_1)$ 、 $\otimes(F_2)$ 、 $\otimes(F_3)$  的单位均为  $10^4$  元/a。

\* 本文为四川省高校重点学科建设资助项目(编号:SZD0416)的研究成果。

**作者简介:**李薇,女,1981年生,硕士研究生,现从事油气储运工程优化研究。地址:(610500)四川省成都市新都区西南石油大学建筑工程学院。电话:13551235620。E-mail:liwei81mm@126.com

(1)输气管道投资的年值费用

$$\otimes(F_1) = [\otimes(a) + \otimes(a)D + \otimes(a)G] \times L \times \frac{i(1+i)^n}{(1+i)^n - 1} \quad (2)$$

式中： $\otimes(a)$ 为与管路直径和重量无关的投资(包括勘探、选线、设计、道路、通讯等的费用)， $10^4$ 元/km； $\otimes(a)$ 为每1 km 管路单位直径的投资(如防腐绝缘层、挖沟、回填等的费用)， $10^4$ 元/mm·km； $\otimes(a)$ 为每1 km 管路单位重量的投资(包括管材价格、管子运输、焊接安装、下沟、穿跨越工程等的费用)， $10^4$ 元/t； $D$ 为管路外径，mm； $G$ 为管路的重量，t/km； $G=0.0266 \times (D-\delta) \times \delta$ ， $\delta$ 为管壁厚，mm； $L$ 为管线长度，km； $i$ 为国家规定的某基准内部收益率， $1/a$ ； $n$ 为经济使用期，a。

(2)压缩机站总投资的年值费

$$\otimes(F_2) = \sum_{j=1}^m [\otimes(b) + \otimes(b_j)\psi N_j] \times \frac{i(1+i)^n}{(1+i)^n - 1} \quad (3)$$

式中： $\otimes(b)$ 为与功率无关的压缩机站的投资(如办公楼、仓库、消防设施、生活区等的投资)， $10^4$ 元； $\otimes(b_j)$ 为与功率成正比的压缩机站的投资， $10^4$ 元/kW； $\psi$ 为备用系数，一般取1.05； $m$ 为整个管路所需压缩机站的数目； $N_j$ 为每座压缩机站需要的功率，kW。

(3)管道和压缩机站的年经营费用

年经营费用以动力费为主，且比较稳定，考虑到管理、维修等费用后，将动力费乘以运行费附加系数 $\beta$ 后即得到年经营费用。

$$\otimes(F_3) = 8640 \times 10^{-4} \otimes(Y_e) \beta q \sum_{j=1}^m N_j \quad (j=1, 2, \dots, m) \quad (4)$$

式中： $\otimes(Y_e)$ 为气价，元/ $m^3$ ； $\beta$ 为运行费附加系数； $q$ 为压气站自耗气， $m^3/(kW \cdot h)$ 。

2. 约束条件

(1)管线水力约束

由文献[7]，水力计算采用潘汉德尔公式：

$$Q = 11522 \otimes(E) D^{2.53} \left( \frac{p_0^2 - p_2^2}{Z \Delta^{0.961} T L} \right)^{0.51} \quad (5)$$

式中： $D$ 为管道内径，cm； $p_0$ 为输气管道计算段起点压力，MPa； $p_2$ 为输气管道计算段终点压力，MPa； $Z$ 为天然气压缩因子； $T$ 为天然气的平均温度，K； $\Delta$ 为天然气的相对密度； $\otimes(E)$ 为输气管道的效率系数(当管道公称直径为300~800 mm时， $E$ 为0.8~0.9；当管道公称直径大于800 mm时， $E$ 为0.91~0.94)。

(2)管道强度约束

管壁厚度与管道的承压能力成正比，壁厚不但是影响长输管道经济参数的重要因素，也是强度约束条件的重要因素。由参考文献[7]，采用强度约束条件表达式如下：

$$\frac{pD}{2FETS} - \delta \leq 0 \quad (6)$$

式中： $p$ 为管道的设计压力，MPa； $D$ 为管子的外径，mm； $F$ 为结构类型设计因子； $E$ 为纵向焊缝系数； $T$ 为温度降级因子； $S$ 为管子的最低屈服极限，MPa。

(3)管道稳定性约束

对于埋地管道，为了防止其横截面严重失稳，稳定性约束条件为：

$$\frac{D}{\delta} \leq C' \quad (7)$$

式中： $C'$ 为管径与壁厚比值限制值，一般在110~120之间。

(4)管道规格约束条件

由于管径和壁厚按规格取离散值，因此有：

$$D_j \in [D_{g1}, D_{g2} L] \quad (8)$$

$$\alpha \in [\alpha_{g1}, \alpha_{g2} L] \quad (9)$$

式中： $D_{g1}$ 、 $D_{g2}$ 为管径规格，mm； $\alpha_{g1}$ 、 $\alpha_{g2}$ 为壁厚规格，mm。

### 三、灰色参数的预测

在输气管道工程的规划设计中，采用的管道、压缩机站的投资费以及管道和压缩机站年经营费用都是过去某一时期或现时的费用，而所规划设计的输气管道工程往往是未来管道建设的投资问题。这些投资费用和运行费用是处于动态变化的，应先对目标函数中的灰色参数进行预测，以所预测的建设期的管道年值费用作为优化设计的目标函数，从而达到提高输气干线优化设计准确性的目的。根据价格指数理论<sup>[8,9]</sup>，建设期输气干线的年值费用计算式为：

$$\otimes[F(t)] = \otimes[E_1(t)](F_{01} + F_{02}) \times \frac{i(1+i)^n}{(1+i)^n - 1} + \otimes[E_2(t)]F_{03} \quad (10)$$

式中： $\otimes[F(t)]$ 为建设期输气管线的年值费用， $10^4$ 元/a； $\otimes[E_1(t)]$ 为以某一固定时期为基期的管道和压缩机站投资费用价格指数； $\otimes[E_2(t)]$ 为以某一固定时期为基期的运行期压缩机站自耗气价格指数； $F_{01}$ 为基期的输气管道投资费用， $10^4$ 元； $F_{02}$ 为基期的压缩机站总投资费用， $10^4$ 元/a； $F_{03}$ 为基期的管道

和压缩机站年经营费用,  $10^4$  元/a。

可以应用灰色预测理论建立价格指数的灰色预测模型<sup>[8]</sup>。灰色预测是通过原始数据的处理和灰色模型的建立,来发现和掌握系统发展规律,对系统的未来状态做出科学的定量预测。在价格指数的预测中常用GM(1,1)模型,其实质是对原始序列作一次累加生成,使生成序列呈一定规律,并用典型曲线拟合,从而建立数学模型,为了提高预测精度,笔者建立了价格指数的灰色残差修正等维新息预测模型,其具体做法是:①原始数据预处理;②级比检验、建模可行性判断;③建立残差值的GM(1,1)模型,再用残差GM(1,1)的预测值加到原预测值上,以补偿原预测值;④建立价格指数的GM(1,1)等维新息灰色预测模型,即采取增加新信息与去掉旧信息同时进行的方式建模,其关键问题是确定预测的维数 $n$ ;⑤后残差检验,确定预测精度;⑥建立残差GM(1,1)模型;⑦将残差修正GM(1,1)模型得到的预测值作为价格指数的预测值。

#### 四、模型求解

互补几何规划算法又称为几何规划问题的Avriel-Williams迭代解法,它的主要思想是将一般几何规划问题化为困难度较低的一系列正定几何规划问题来求解<sup>[11]</sup>。输气管道的数学模型是带负系数的非线性广义几何规划问题,且困难度大于1,因此采用互补几何规划方法将其白化模型转换为困难度较小的正定几何规划问题求解较为简便。

本文所涉及的灰数基本上都属于区间灰数,为了建立输气干线优化设计的白化模型,对预测后的目标函数中的灰数进行均值白化处理,令 $\otimes(a)$ 、 $\otimes(a)$ 、 $\otimes(b)$ 、 $\otimes(b)$ 、 $\otimes(Y_e)$ 分别是 $\otimes(a)$ 、 $\otimes(a)$ 、 $\otimes(a)$ 、 $\otimes(b)$ 、 $\otimes(b)$ 、 $\otimes(Y_e)$ 的白化值,则白化后的输气干线优化模型的目标函数为:

$$\min \otimes(F) = \{ \otimes(a) + \otimes(a)D + \otimes(a)G \times L + \sum_{j=1}^m [ \otimes(b) + \otimes(b) \varphi N_j ] \times \frac{i(1+i)^n}{(1+i)^n - 1} + 8640 \times 10^{-4} \otimes(Y_e) B_y q \sum_{j=1}^m N_j \quad (11)$$

互补几何规划算法的计算步骤:①根据输气干线灰色优化设计模型的特点将其转化为广义几何规划的标准形式;②把广义几何规划问题化为等价的互补几何规划问题,并找出一个初始可行解,给定计算精度;③构造输气干线灰色优化设计模型的对偶

形式;④求解输气干线优化设计模型的对偶形式;⑤求出最优解。

#### 五、实例计算

拟建的一条输气管道全长960 km,年输气量为 $10 \times 10^8 \text{ m}^3$ ,管道允许终点压力为1.65 MPa。当前年份(2007年)该管线的经济参数已知,前10 a的价格指数为已知值,1998年为价格指数的计算基期,求2008、2009、2010年建设该管线的年值费用和最优参数。1998~2007年(参考1995~2007年中国统计年鉴)的管道、压气站投资价格指数和自耗气价格指数见表1。

表1 价格指数表

年份	管道投资价格指数	自耗气价格指数	年份	管道投资价格指数	自耗气价格指数
1998	1	1	2003	1.063	1.3899
1999	1.04	1.102	2004	1.067	1.3927
2000	1.058	1.2045	2005	1.069	1.3941
2001	1.056	1.1937	2006	1.093	1.4973
2002	1.051	1.2044	2007	1.154	1.6425

应用灰色等维新息预测模型求得的2008~2010年的管道投资价格指数和2010~2012年的年经营费用价格指数分别见表2、表3。

表2 管道、压气站投资价格指数四维新息残差修正预测表

年份	残差修正区间覆盖	均值白化	后验差比值	预测精度
2008	(1.1934, 1.1995)	1.1964	0.1035	1
2009	(1.2582, 1.2618)	1.2582	0.0441	1
2010	(1.3058, 1.3083)	1.3071	0.0220	1

表3 自耗气价格指数七维新息残差修正预测表

年份	残差修正区间覆盖	均值白化	后验差比值	预测精度
2010	(1.9045, 1.9306)	1.9176	0.0678	1
2011	(2.0325, 2.0694)	2.0510	0.0444	1
2012	(2.1656, 2.1818)	2.1737	0.0321	1

从表2和表3可以看出,管道、压气站投资价格指数和自耗气价格指数的预测精度均为1级,后验差比值均小于0.35,预测精度较高。因此,所预测的价格指数可以作为有效参数带入优化设计数学模型进行优化求解。

将表2、表3的预测结果带入式(10)就可得到建

设期和运行期的经济参数,对经济参数进行均值白化处理,代入式(11)得到输气干线灰色优化设计的

白化模型,再应用互补几何规划就可求得最优参数和最优解。2007~2010年的优化结果见表4。

表4 输气干线优化设计最优参数表

年份	管径 (mm)	壁厚 (mm)	输送 压力 (MPa)	首站 压比	中间各站 压比	站 数	末段管长 (km)	管道投资 费用 (万元/a)	建站投资 费用 (万元/a)	经营管理 费用 (万元/a)	年值费用 (万元)
2007	457	4.5	6.4	1.1636	1.2254	2	704.807	4797.766	474.944	159.459	5432.168
2008	457	4.5	6.4	1.1636	1.2114	3	473.112	4974.038	740.426	280.808	5995.271
2009	457	4.5	6.4	1.1636	1.2041	3	485.907	5230.979	770.090	293.338	6294.407
2010	457	4.5	6.4	1.1636	1.2140	3	458.698	5434.046	812.228	320.892	6567.166

## 六、结束语

(1)通过灰色预测,把握了输气干线优化设计目标函数的变化趋势,体现了灰色规划动态建模的特点。从计算结果可以看出,GM(1,1)等维新息灰色预测模型通过增加新信息、新数据,对系统的变化趋势有了一个更好的拟合,更具有实用价值,通过残差修正又进一步提高了预测的精度。

(2)互补几何规划具有较高的准确性和可靠性,与广义几何规划相比,具有困难度低、计算过程简便的优点。

(3)灰色优化设计的计算结果随时间的推移而变化,其变化趋势符合经济增长规律,体现了经济参数随时间而变化的动态特性,更符合客观实际,同时也说明了灰色非线性规划比确定性规划方法有更多的灵活性,提高了对输气干线设计方案科学决策的适应能力。

## 参 考 文 献

[1] 邓聚龙.灰色系统基本方法[M].武汉:华中理工大学出版社,1987.

[2] 苏欣,袁宗明,张琳,等.基于灰色理论的城市燃气负荷预测[J].西南石油学院学报,2006,28(6):100-102.

[3] 刘先涛,陈光胜,高军.多种方法排序集结的灰色关联分析方法[J].西南石油学院学报,2004,26(5):83-84.

[4] 王学萌,张继忠,王荣.灰色系统分析及实用计算程序[M].武汉:华中科技大学出版社,2001.

[5] 邓聚龙.多维灰色规划[M].武昌:华中理工大学出版社,1989.

[6] 刘思峰,党耀国,方志耕,等.灰色系统理论及其应用[M].北京:科学出版社,2005.

[7] 油气田及管道建设设计专业标准化委员会.输气管道工程设计规范(GB50251-2003)[M].北京:中国计划出版社,2003.

[8] 汪玉春,李长俊,刘玉峰.油气管道投资的灰色预测与计算[J].天然气工业,1998,18(6):68-71.

[9] 韩嘉骏.价格指数理论与实践[M].北京:中国发展出版社,1992.

[10] 邓聚龙.灰预测与灰决策[M].武汉:华中科技大学出版社,2002.

[11] 席少霖,赵凤治.最优化计算方法[M].上海:上海科技出版社,1983.

(修改回稿日期 2007-11-15 编辑 罗冬梅)