

CO₂ 管道运输系统鲁棒优化设计

田群宏¹, 赵东亚^{*1}, 李兆敏², 朱全民^{1,3}

(1. 中国石油大学(华东)化学工程学院, 山东 青岛 266580;

2. 中国石油大学(华东)石油工程学院, 山东 青岛 266580;

3. 西英格兰大学, 英国布里斯托 BS16 1QY)

摘要: CO₂ 管道运输系统是碳捕集、利用与封存(CCUS)技术的重要环节. 将线性鲁棒优化方法应用于 CO₂ 管道运输费用设计, 建立其鲁棒优化模型, 解决了管道运输系统不确定性优化问题, 使优化结果更为合理. 提出的方法合理配置了管道入口压力、管道内径、壁厚、中间泵站数量, 降低了 CO₂ 运输费用. 仿真结果表明, 与现有优化设计方法相比, 运输系统鲁棒优化方法具有较强的适应能力, 为管道安全运输提供了保障.

关键词: CCUS 技术; 管道运输; 不确定性; 鲁棒优化

中图分类号: O232; U171 **文献标识码:** A **doi:** 10.7511/dllgxb201601015

0 引言

碳捕集、利用与封存(CCUS)技术能够有效地大规模减少 CO₂ 排放量^[1]. 该技术是指将 CO₂ 从工业中或其他排放源中分离出来, 并运输到特定地点加以利用或封存, 以实现被捕集 CO₂ 与大气的长期隔离^[2]. 作为 CCUS 技术的中间环节, CO₂ 运输系统具有重要的地位^[3]. 与罐车、船舶运输相比, 管道运输是大规模运输 CO₂ 最为经济有效的方式^[4].

对管道运输系统进行优化设计, 不仅能为管道安全运输提供保障, 而且可以有效降低系统费用. 文献[5]提出不配置中间泵站条件下, 管道运输最大距离的计算公式, 但并未给出具体的设计方案. 文献[6-7]为简化设计, 在固定中间泵站距离的前提下, 对运输提出了优化设计方案. 文献[8]在建立流体动力学模型的基础上, 对管道内径和中间泵站进行优化设计, 但由于未考虑管道公称尺寸, 该设计方案不能直接在工程上运用. 文献[9]假设管道内 CO₂ 密度为固定值, 研究了 CO₂ 管道设计潜在的经济效益. 但管道内 CO₂ 密度受管道压降的影响, 所以优化结果准确性难以保证.

文献[10]在考虑管道公称尺寸的基础上, 对管道系统管材等级、管道入口压力、管道内径和壁厚、泵站数量进行了优化设计. 以上运输系统设计研究, 都是假设管道内 CO₂ 温度为固定值进行的. 但是现有研究表明^[8], 管道内 CO₂ 温度的变化对运输系统的影响不可忽略, 且管道内 CO₂ 的温度会随土壤温度的变化而变化. 如何处理变化温度对系统优化设计的影响, 降低设计方案对温度不确定性的敏感度, 保证求解质量以降低运输风险至关重要.

本文将鲁棒优化应用于管道运输系统设计, 利用鲁棒优化方法的特性消除温度变化对运输系统设计的影响.

1 鲁棒优化研究步骤

鲁棒优化是不确定优化的一个研究方向, 同时也是解决不确定优化问题的有效工具. 管道运输系统是复杂的非线性系统, 如何运用现有的线性鲁棒优化设计方法解决管道运输系统的不确定性问题, 是亟待解决的关键问题. 本文给出了管道运输系统鲁棒优化研究步骤(如图 1 所示).

(1) 确定管道运输系统的三大基本要素: 决策

变量、目标函数、约束条件,建立系统的优化模型.

(2)为进一步运用线性鲁棒优化解决运输系统的不确定优化问题,将建立的复杂非线性系统线性化;考虑管道内变化温度引起的参数不确定性,建立不确定优化模型.

(3)根据理论推导,将不确定优化模型转化为确定性的半定规划问题,实现鲁棒对等问题转化.

(4)运用凸优化技术中的内点法,或 Matlab 提供的 LMI 工具箱对鲁棒对等问题进行求解^[11-12].

以上研究步骤中的不确定优化问题形成、鲁棒对等问题转换、模型求解将在下面详细阐述.

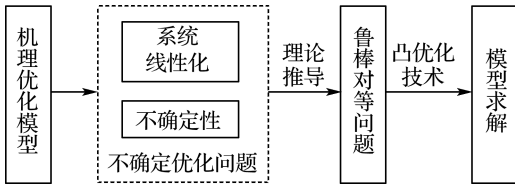


图1 鲁棒优化研究步骤

Fig.1 Research procedures of robust optimization

2 鲁棒优化设计

2.1 不确定优化问题描述

运输系统优化设计目标函数为^[10]

$$C(p) = \frac{H \times (C_{pc} + C_{cc} + C_{bc}) + C_{tom} + C_{te}}{Q_m \times 8\,760 \times 3.6} \quad (1)$$

式中: C 为 CO₂ 运输的平准化费用(元/t); p 为管道入口压力(MPa), 为决策变量; H 为管道、压缩机、泵站资本回收系数; C_{pc} 、 C_{cc} 、 C_{bc} 分别为管道、压缩机、泵站的总投资费用(元); C_{tom} 为管道、压缩机、泵站总的运行与维护费用(元); C_{te} 为压缩机和泵站总的年能量消耗费用(元/a); Q_m 为 CO₂ 质量流量(kg/s).

将目标函数划分为有限数量的直线段, 则式(1)可线性化为

$$L_g(l) = k_g p + d_g; \quad l = 1, 2, \dots, n \quad (2)$$

其中 k_g 为斜率, n 为直线段的个数.

$$k_g = \frac{f(b_g) - f(a_g)}{b_g - a_g}; \quad g = 1, 2, \dots, G \quad (3)$$

其中 $(a_g, f(a_g))$ 、 $(b_g, f(b_g))$ 为坐标点.

考虑管道内变化温度引起的不确定性, CO₂ 管道运输系统优化问题的数学模型可转化为

$$\begin{aligned} \min L_g(l) &= k_g p + d_g + d_\delta \\ \text{s. t. } v &< v_{\max} \end{aligned} \quad (4)$$

其中 d_δ 为不确定参数, v 为 CO₂ 速率.

2.2 鲁棒对等问题的建立

令 $k_g p + d_g + d_\delta = A_g X_g$, 则 $X_g = (k_g p + d_g + d_\delta) / A_g$, 式(4)可转化为

$$\begin{aligned} \min A_g X_g \\ \text{s. t. } (\tilde{A}_i X_g)^2 - \tilde{B}_i X_g - \tilde{C}_i < 0, \quad \{\tilde{A}_i, \tilde{B}_i, \tilde{C}_i\} \in U \end{aligned} \quad (5)$$

其中 $\tilde{A}_i = \frac{c_1 A_g^2}{k_g^2}$; $\tilde{B}_i = \frac{2c_1 A_g (d_g + d_\delta)}{k_g^2} - \frac{c_2 A_g}{k_g}$; $\tilde{C}_i = -\frac{c_1 (d_g + d_\delta)^2}{k_g^2} + \frac{c_2 (d_g + d_\delta)}{k_g} - c_3 + \frac{v_{\max}}{Q_m}$; $\tilde{A}_i$ 、 $\tilde{B}_i$ 、 $\tilde{C}_i$ 为优化模型的不确定参数. 不确定集合 U 如下:

$$\begin{aligned} U = \left\{ (\tilde{A}_i, \tilde{B}_i, \tilde{C}_i) = (A_i^0, B_i^0, C_i^0) + \right. \\ \left. \sum_{l=1}^L \xi_l (A_i^l, B_i^l, C_i^l) \right\}_{i=1}^n \mid \xi^T Q_j \xi \leq 1, \\ j = 1, 2, \dots, K; \end{aligned}$$

$$Q_j \geq 0, \quad \sum_{j=1}^K Q_j > 0$$

定理 1^[13] 对于不确定集合 U , 不确定问题(5)可以通过下述半定规划问题求解:

$$\begin{aligned} \min A_g X_g \\ \text{s. t. } \begin{pmatrix} S_i(X) - \sum_{j=1}^K \tau_{ij} (N_i(X) + p_i)^T R_i(X) \\ N_i(X) + p_i & \sum_{j=1}^K \tau_{ij} Q_{1j} & M_i^T(X) \\ R_i(X) & M_i(X) & I \end{pmatrix} \geq 0 \\ i = 1, 2, \dots, n, \quad j = 1, 2, \dots, K, \quad \tau_{ij} \geq 0 \end{aligned} \quad (6)$$

其中 I 为适当维数的单位矩阵, $R_i(X) = A_i^0 X_g$, $S_i(X) = 2X_g B_i^0 + C_i^0$, $M_i(X) = (A_i^1 X_g \quad A_i^2 X_g$

$$\cdots \quad A_i^K X_g), N_i(X) = \begin{pmatrix} X_g B_i^1 \\ \vdots \\ X_g B_i^K \end{pmatrix}, p_i = \frac{1}{2} \begin{pmatrix} C_i^1 \\ \vdots \\ C_i^K \end{pmatrix} \cdot Q_{1j}$$

为第 i 行第 j 列元素为 1、其他元素为 0 的适当维数矩阵.

2.3 鲁棒优化设计程序

图 2 为运输系统优化算法整体程序流程. 首先, 根据计算的理想管道内径, 结合管道公称尺寸(NPS)表进行管道内径与壁厚参数选择. 然后, 将建立的非线性运输系统模型, 转化为线性不确定优化问题; 并根据定理 1 对其进行鲁棒对等问题转换. 最后, 采用 Matlab 提供的 LMI 工具箱对鲁棒对等问题进行求解.

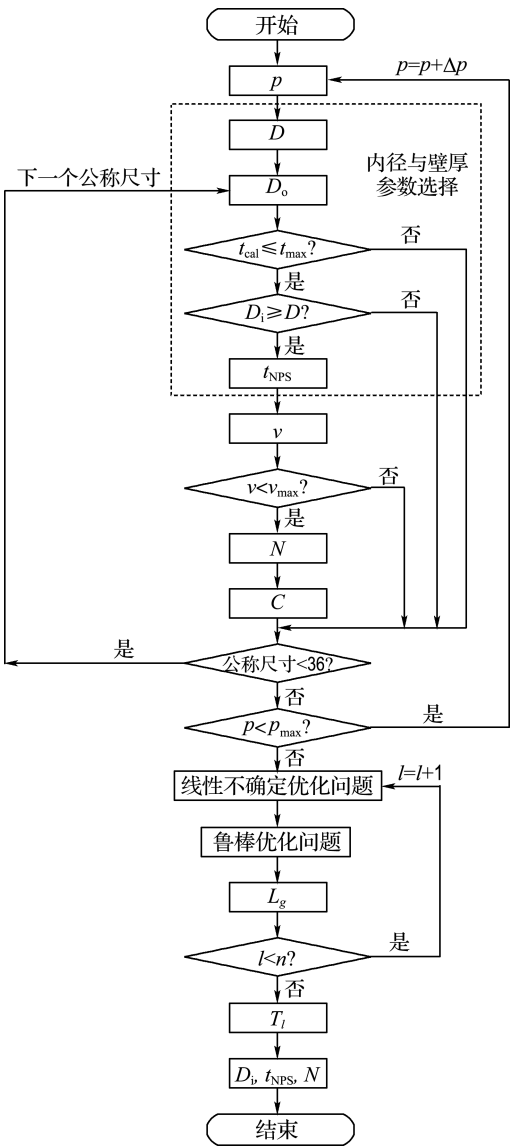


图 2 CO₂ 管道运输系统优化设计程序流程图
Fig. 2 Flow diagram of optimization design for CO₂ pipeline transportation systems

为便于优化设计,对现有管径模型进行改进. 管道内径计算公式如下^[14]:

$$D=0.363Q_m^{0.45}\rho^{-0.32}\mu^{0.025}\tag{7}$$

其中 D 为管道内径; ρ 、 μ 分别为 CO₂ 的密度和黏度.

根据文献[15]提供的数据,采用最小二乘法进行参数辨识,得到 CO₂ 的密度和黏度计算公式:

$$f_{\rho}=A_{\rho}p^2+B_{\rho}p+C_{\rho}$$

$$f_{\mu}=A_{\mu}p^2+B_{\mu}p+C_{\mu}$$

其中 A_{ρ} 、 B_{ρ} 、 A_{μ} 、 B_{μ} 为系数, C_{ρ} 、 C_{μ} 为常数. 则式 (7)可转化为

$$D=0.363Q_m^{0.45}f_{\rho}^{-0.32}f_{\mu}^{0.025}\tag{8}$$

系统鲁棒优化设计具体步骤如下:

- Step 1 设定管道入口压力(p)的最小运行
值;设置 $l=1$.
- Step 2 将 p 代入式(8)计算 D .
- Step 3 根据公称尺寸,选择管道外径(D_o),
将其代入公式 $t=p_{\max}D_o/2SFE$ 计算 t_{cal} . 如果
 $t_{\text{cal}}\leq t_{\max}$ 成立,执行下一步;否则,转 Step 7.
- Step 4 将满足 $t_{\text{NPS}}\geq t_{\text{cal}}$ 的 t_{NPS} 代入公式
 $D_o=D_i+2t$,得到 D_i . 如果 $D_i\geq D$ 成立,确定 t_{NPS}
的值;否则,转 Step 7.
- Step 5 将 D_i 和 p 代入公式计算 v . 如果
 $v<v_{\max}$ 成立,执行下一步;否则,转 Step 7.
- Step 6 将 D_i 代入公式计算泵站数量(N).
将已知和计算数值数据代入式(1)计算 C .
- Step 7 如果公称尺寸<36 成立,转 Step 3;
否则,执行下一步.
- Step 8 如果 $p<p_{\max}$, 令 $p=p+\Delta p$, 转
Step 2;否则,执行下一步.
- Step 9 将 l 值代入式(4),形成线性不确定
优化问题.
- Step 10 采用 Matlab 提供的 LMI 工具箱
对鲁棒对等问题(式(6))进行求解,得到 L_g .
- Step 11 如果 $l<n$ 成立,令 $l=l+1$, 转
Step 9;否则,执行下一步.
- Step 12 在计算的 L_g 中,选择最小值将其
作为 T_l ;根据 T_l 得到相应的 D_i 、 t_{NPS} 、 N ;程序结
束.

3 仿 真

表 1 给出了管道运输系统的基本参数设置, 其他参数如表 2、3 所示.

令 $\xi_1=0.2$, $n=100$. 按照图 2 给出的程序流
程进行系统优化,得到不同质量流量条件下的鲁
棒优化结果(如表 4 所示). 与本文提出的鲁棒优

表 1 管道运输系统基本参数^[5,8-9]

Tab. 1 Basic parameters of the pipeline transportation systems^[5,8-9]

参数	符号	数值
管道周围土壤温度(℃)	t_{soil}	17
CO ₂ 管道入口压力(MPa)	p	8.6~15.3
管道起始/终止点高度差(m)	h_1-h_2	0
管道长度(km)	L	400
CO ₂ 质量流量(kg/s)	Q_m	150
CO ₂ 最大允许速率(m/s)	$v_{\max}$	6
驱油注入压强(MPa)	p_{inject}	10
资本回收系数	H	0.15

表 2 管道参数^[16-17]

Tab. 2 Parameters of pipeline^[16-17]

参数	符号	数值
管材最小屈服强度 X70 (MPa)	S	483
焊缝系数	E	1.0
强度设计系数	F	0.72
管材价格(€/kg)	C_{ps}	0.934 2
材料成本因子	f_m	22.4%
管道运行维护费用占投资费用百分比	$f_{po\&m}$	0.04

表 3 压缩机和泵站参数^[10,14,18]

Tab. 3 Parameters of compressor and boosting pump stations^[10,14,18]

参数	符号	数值
CO ₂ 压缩因子	Z	0.994 2
通用气体常数 (J/(mol·K))	R	8.314 5
吸入温度 (K)	T_m	313.15
比热容比 (c_p/c_v)	γ	1.294
摩尔质量(g/mol)	M	44.01
压缩系统压缩级数	N_m	4
等熵效率	η_{iso}	80%
机械效率	η_{mech}	99%
压缩机站进出口压力比	p_1/p_2	0.101/8.6
压缩机参考费用(10 ⁶ €)	I_0	21.9
参考压缩机功率(MW)	$W_{comp,0}$	13
比例因子	y	0.67
增值系数	n_r	0.9
泵站运行维护费用占泵站投资费用百分比	$f_{bo\&m}$	0.04
泵站效率	$\eta_{booster}$	0.5
泵站数量	N	≤10
欧元-人民币汇率	r_E	8.563 3
美元-人民币汇率	r_D	6.191 3
年运行时间(h)	t_B, t_C	8 760
电价(元/(kW·h))	C_{pe}	0.5

表 4 鲁棒优化与传统优化方法比较

Tab. 4 Comparison results of robust optimized and traditional methods

方法	$Q_m/(kg \cdot s^{-1})$	p/MPa	D_i/mm	t_{NPS}/mm	N
文献 [10]	50	11.166	211.562	3.759	10
	100	11.542	260.350	6.350	10
	150	10.816	342.900	6.350	10
	200	10.700	393.700	6.350	10
鲁棒 优化	50	11.190	211.562	3.759	10
	100	11.566	260.350	6.350	10
	150	10.840	342.900	6.350	10
	200	10.723	393.700	6.350	10

化设计方法相比,采用文献[10]设计方法,虽然优化的管道内径、壁厚、泵站数量相同,但是管道入口压力较小.这说明传统设计方法在不考虑温度变化对系统优化设计的影响下,设计的管道入口

压力偏小,难以克服 CO₂ 在运输途中因压力损失而导致的输送困难,不能满足实际工程要求.事实证明,鲁棒优化算法的性能优于一般管道运输优化算法,能够使系统设计更加合理.

4 结 语

本文对存在参数不确定性的管道运输系统进行研究.通过对管道运输系统的深入分析,结合鲁棒优化的核心思想,提出运输系统鲁棒优化设计研究步骤,建立运输系统鲁棒优化模型.结合管道公称尺寸表进行管道内径与壁厚的优化选择,运用 Matlab 提供的 LMI 工具箱对鲁棒对等问题进行求解,实现了系统的优化设计.仿真过程中,通过与现有优化设计方法比较,证明了鲁棒优化方法的优良性能和较强的适应能力.

参考文献:

[1] Leung D Y C, Caramanna G, Maroto-Valer M M. An overview of current status of carbon dioxide capture and storage technologies [J]. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, 2014, **39**:426-443.

[2] 科技部社会发展科技司,中国 21 世纪议程管理中心. 中国碳捕集、利用与封存(CCUS)技术发展路线图研究[R]. 北京:科技部社会发展科技司,中国 21 世纪议程管理中心,2011.

Department of S&T for Social Development, Ministry of Science and Technology of the People's Republic of China, The Administrative Center for China's Agenda 21. Technology Roadmap Study on Carbon Capture, Utilization and Storage in China [R]. Beijing: Department of S&T for Social Development, Ministry of Science and Technology of the People's Republic of China, The Administrative Center for China's Agenda 21, 2011. (in Chinese)

[3] Knoope M M J, Ramírez A, Faaij A P C. A state-of-the-art review of techno-economic models predicting the costs of CO₂ pipeline transport [J]. **International Journal of Greenhouse Gas Control**, 2013, **16**:241-270.

[4] Svensson R, Odenberger M, Johnsson F, *et al.* Transportation systems for CO₂-application to carbon capture and storage [J]. **Energy Conversion and Management**, 2004, **45**(15):2343-2353.

[5] GAO Lan-yu, FANG Meng-xiang, LI Hai-long, *et al.* Cost analysis of CO₂ transportation; Case study in China [J]. **Energy Procedia**, 2011, **4**:5974-5981.

[6] Wildenborg T, Holloway S, Hendriks C, *et al.*

- Cost Curves for CO₂ Storage. Part 2: European Sector [R]. Utrecht Nederland: IEA Greenhouse Gas R&D Programme, 2004.
- [7] van den Broek M, Brederode E, Ramírez A, *et al.* Designing a cost-effective CO₂ storage infrastructure using a GIS based linear optimization energy model [J]. **Environmental Modelling & Software**, 2010, **25**(12):1754-1768.
- [8] ZHANG Dong-jie, WANG Zhe, SUN Ji-ning, *et al.* Economic evaluation of CO₂ pipeline transport in China [J]. **Energy Conversion and Management**, 2012, **55**:127-135.
- [9] Chandel M K, Pratson L F, Williams E. Potential economies of scale in CO₂ transport through use of a trunk pipeline [J]. **Energy Conversion and Management**, 2010, **51**(12):2825-2834.
- [10] Knoope M M J, Guijt W, Ramírez A, *et al.* Improved cost models for optimizing CO₂ pipeline configuration for point-to-point pipelines and simple networks [J]. **International Journal of Greenhouse Gas Control**, 2014, **22**:25-46.
- [11] 俞 立. 鲁棒控制-线性矩阵不等式处理方法[M]. 北京:清华大学出版社, 2002.
YU Li. **Robust Control-Linear Matrix Inequality (LMI)** [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2002. (in Chinese)
- [12] 宗 群, 王维佳, 何彦昭. 基于鲁棒优化理论的电梯群控制调度策略[J]. **控制理论与应用**, 2008, **25**(4): 743-748.
ZONG Qun, WANG Wei-jia, HE Yan-zhao. Elevator group scheduling based on robust optimization [J]. **Control Theory & Applications**, 2008, **25**(4):743-748. (in Chinese)
- [13] Ben-Tal A, Nemirovski A. Robust optimization methodology and applications [J]. **Mathematical Programming**, 2002, **92** (3):453-480.
- [14] Zhang Z X, Wang G X, Massarotto P, *et al.* Optimization of pipeline transport for CO₂ sequestration [J]. **Energy Conversion and Management**, 2006, **47**(6):702-715.
- [15] OUYANG Liang-biao. New correlations for predicting the density and viscosity of supercritical carbon dioxide under conditions expected in carbon capture and sequestration operations [J]. **Open Petroleum Engineering Journal**, 2011, **4**(1):13-21.
- [16] McCoy S T, Rubin E S. An engineering-economic model of pipeline transport of CO₂ with application to carbon capture and storage [J]. **International Journal of Greenhouse Gas Control**, 2008, **2**(2):219-229.
- [17] Vandeginste V, Piessens K. Pipeline design for a least-cost router application for CO₂ transport in the CO₂ sequestration cycle [J]. **International Journal of Greenhouse Gas Control**, 2008, **2**(4):571-581.
- [18] Kuramochi T, Ramírez A, Turkenburg W, *et al.* Comparative assessment of CO₂ capture technologies for carbon-intensive industrial processes [J]. **Progress in Energy and Combustion Science**, 2012, **38**(1):87-112.

Robust optimization design for CO₂ pipeline transportation systems

TIAN Qun-hong¹, ZHAO Dong-ya^{*1}, LI Zhao-min², ZHU Quan-min^{1,3}

(1. College of Chemical Engineering, China University of Petroleum (Huadong), Qingdao 266580, China;

2. College of Petroleum Engineering, China University of Petroleum (Huadong), Qingdao 266580, China;

3. University of the West of England, Bristol BS16 1QY, UK)

Abstract: CO₂ pipeline transportation systems are the important link for the carbon capture, utilization and storage (CCUS) technology. A robust optimization method is applied to the cost design of the CO₂ pipeline transportation systems. The robust optimization model is established to solve the uncertainty optimization problem of the pipeline transportation systems, which makes the design more reasonable than the traditional one. The proposed approach properly allocates the inlet pressure, inner diameter, wall thickness and the number of inter-stage boosting pump stations, which decreases the CO₂ transportation cost. Compared with other optimization methods, it is verified that the robust optimization method has more suitability and provides security for the pipeline transportation systems.

Key words: CCUS technology; pipeline transportation; uncertainty; robust optimization