

文章编号: 1000-8241(2018)10-1147-06

# 天然气管网运行最优化探讨

李博<sup>1</sup> 张忠东<sup>2</sup> 康阳<sup>1</sup> 阎涛<sup>1</sup> 柳建军<sup>1</sup> 支树洁<sup>1</sup> 段林杰<sup>1</sup> 陈振海<sup>3</sup>1. 中国石油管道科技研究中心/中国石油天然气集团公司油气储运重点实验室; 2. 中国石油管道公司;  
3. 中国石油管道局工程有限公司第四分公司

**摘要:** 随着天然气管网规模不断增大以及运行条件日益复杂,对管网集中调控提出了更高的要求,仅凭调度员经验难以全面应对管网运行问题,亟需高效的优化工具辅助制订运行方案,调整日常工况。将最优化技术应用于天然气管网运行中,分别以管道水力热力计算校核、压气站负荷分配、单条输气管道运行方案、复杂输气管网运行方案为优化对象,建立了相应的最优化模型,并提出了求解方法。最优化技术是解决天然气管网生产实际问题的有效方法,但仍需突破精准优化模型建立、优化模型高效求解以及优化结果分析利用等技术瓶颈。最后,展望了最优化技术在非稳态优化、控制系统优化以及全生命周期优化方面的应用前景。(参 20)

**关键词:** 天然气管网; 运行方案; 压气站; 最优化技术

中图分类号: TE822

文献标识码: A

doi: 10.6047/j.issn.1000-8241.2018.10.010

## Optimization discussion on the operation of natural gas pipeline network

LI Bo<sup>1</sup>, ZHANG Zhongdong<sup>2</sup>, KANG Yang<sup>1</sup>, YAN Tao<sup>1</sup>, LIU Jianjun<sup>1</sup>, ZHI Shujie<sup>1</sup>, DUAN Linjie<sup>1</sup>,  
CHEN Zhenhai<sup>3</sup>

1. PetroChina Pipeline R &amp; D Center/CNPC Key Laboratory of Oil &amp; Gas Storage and Transportation;

2. PetroChina Pipeline Company; 3. No.4 Branch Company, China Petroleum Pipeline Engineering Co. Ltd.

**Abstract:** As the scale of natural gas pipeline network is increased continuously and its operation conditions get more and more complicated, its central regulation and control shall meet more requirements. In this case, the problems involved in pipeline operation can be hardly solved comprehensively if dispatchers do the judging only based on their experience. Therefore, efficient optimization tools are in urgent need to assist the formulation of operation schemes and the regulation of daily conditions. In this paper, the application of optimization technology in the operation of natural gas pipeline network was described. Then, the corresponding optimization model was established and the solution method was developed with four cases as optimization objects, i.e., the hydraulic and thermal calculation checking of pipeline, the load distribution of compressor station, the reasonable optimization of single gas pipeline operation scheme, and the complex pipeline network operation scheme. It is pointed out that the optimization technology is an effective way to solve some practical production problems of natural gas pipeline network, but it is still necessary to strengthen the researches to break through the technical and application bottlenecks, e.g. the establishment of precise optimization model, the efficient solution of optimization model and the analysis and utilization of optimization result. Finally, the application prospect of optimization technology in transient optimization, control system optimization and even whole life cycle optimization was predicted. (20 References)

**Key words:** natural gas pipeline network, operation scheme, compressor station, optimization technology

截至 2017 年底,中国陆上油气管网总里程已超过  $13.14 \times 10^4$  km,其中天然气管道里程超过  $7.26 \times 10^4$  km。天然气管网系统内气源用户众多、联络线分布广泛,已形成横贯东西、纵穿南北、覆盖全国、联通海外的大型

天然气管网<sup>[1]</sup>。随着天然气管网规模增大及运行条件复杂程度提高,对管网集中调控提出了更高的要求,仅凭调度员经验难以全面应对管道运行问题,亟需高效的优化工具辅助制订运行方案,调整日常工况。

据统计,中国天然气管道天然气耗用量占输气量的15%以上,而欧洲的平均水平为3%左右,中国仍有较大的节能降耗潜力<sup>[2]</sup>。因此,在社会节能减排、企业降本增效的大背景下,对天然气管网进行运行管理优化意义重大。

## 1 最优化技术

最优化技术指运用数学方法研究各种系统的优化途径及方案,为管理者提供科学决策的依据<sup>[3-4]</sup>。最优化技术的主要研究对象是各种有组织系统的管理问题及相关生产经营活动,随着科学技术的日益进步,最优化技术已成为现代管理科学的重要理论基础和不可缺少的方法。目前,国民经济或部门经济的计划,企业的发展规划和年度生产计划,尤其是农业规划、种植计划、能源规划、环境与生态规划的制订,都开始应用最优化技术,以帮助管理人员进行各种优化决策。应用最优化技术,不仅能够得到满足需求目标的最优结果,还能够有效降低人工成本,提高工作效率。

采用最优化技术求解问题的步骤如下:①分析生产需求,提出最优化问题;②建立数学模型,确定决策变量,列出约束条件及目标函数;③分析模型,根据模型类型选择合适的最优化方法;④模型求解,由于优化问题一般计算量较大,因此采用计算机编程序求解;⑤最优解的检验和实施,即验证结果的最优性以及在实际问题中的合理性,并以此为依据对数学模型进行调整。

## 2 解决方法

安全和高效是管道运行中两大主题,在天然气管道运行管理中,管道水力热力计算校核、压气站负荷合理分配、单条输气管道运行方案优化、复杂输气管网运行方案优化等问题可以采用最优化技术解决。

### 2.1 管道水力热力计算校核

制订运行方案时,管道运行管理部门会根据当季/月计划采用仿真软件对管道运行参数进行计算,判断能否完成输送任务。目前,通常采用试算法对管道进行水力、热力校核,即人工根据一组运行数据反复调整管道全线的粗糙度和总传热系数,使得仿真结果更接近真实结果。但该方法存在3个弊端:①由于试算人

工成本较高,难以全面考虑所有运行方案;②不同运行方案反算得到的粗糙度波动较大,将整条管道粗糙度视为单一变量,在某些工况下会出现较大误差;③管道的水力、热力计算相互影响,难以保证校正后压力、温度的仿真值均接近真实值。

为克服上述弊端,可将站间管道进一步分割成若干小段,每一个小管段的粗糙度和总传热系数均视为变量,并通过最优化技术进行求解。

假设共有 $m$ 组工况,将管道划分为 $n$ 条小管段,已知每组工况的站间管道流量、起点压力、起点温度、终点压力、终点温度的实际值。需要计算出每条小管段的粗糙度和总传热系数,使得全部工况中终点压力、温度的实际值与计算值偏差的平方和最小,由此建立以下最优化模型:

$$\min \sum_{j=1}^m \left[ (p_{nj}^{\text{cal}} - p_{nj}^{\text{real}})^2 + (T_{nj}^{\text{cal}} - T_{nj}^{\text{real}})^2 \right]$$

$$s.t. \begin{cases} (p_{nj}^{\text{cal}}, T_{nj}^{\text{cal}}) \\ = f(M_j^{\text{real}}, p_{1j}^{\text{real}}, T_{1j}^{\text{real}}, e_1, e_2, \dots, e_n, K_1, K_2, \dots, K_n) \\ e_i \in (e_i^{\min}, e_i^{\max}) \\ K_i \in (K_i^{\min}, K_i^{\max}) \\ i=1, 2, \dots, n; j=1, 2, \dots, m \end{cases} \quad (1)$$

式中: $M_j^{\text{real}}$ 为第 $j$ 工况中的管道流量,  $\text{m}^3/\text{s}$ ;  $p_{1j}^{\text{real}}, p_{nj}^{\text{real}}$ 分别为第 $j$ 工况中管道的实际起点、终点压力,  $\text{MPa}$ ;  $T_{1j}^{\text{real}}, T_{nj}^{\text{real}}$ 分别为第 $j$ 工况中管道的实际起点、终点温度,  $\text{K}$ ;  $p_{nj}^{\text{cal}}$ 为第 $j$ 工况中通过仿真计算得到的管道终点压力,  $\text{MPa}$ ;  $T_{nj}^{\text{cal}}$ 为第 $j$ 工况中通过仿真计算得到的管道终点温度,  $\text{K}$ ;  $e_i$ 为第 $i$ 管段的绝对当量粗糙度,  $\text{m}$ ;  $K_i$ 为第 $i$ 管段的总传热系数,  $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ ;  $e_i^{\min}, e_i^{\max}$ 分别为第 $i$ 管段绝对当量粗糙度的下、上限,  $\text{m}$ ;  $K_i^{\min}, K_i^{\max}$ 分别为第 $i$ 管段总传热系数的下、上限,  $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ 。

上述模型为非线性规划(Nonlinear Programming, NLP)模型,序列二次规划(Sequential Quadratic Programming, SQP)是求解NLP模型的有效算法之一<sup>[5]</sup>。SQP的基本原理是在当前迭代点上构建二次规划问题,通过对其求解能够得到一个改进的迭代点。不断重复该过程,利用一系列二次规划问题逐次逼近原NLP问题,即可得到原NLP问题的一个最优解。

### 2.2 压气站负荷合理分配

在管道运行阶段,若压气站内配备的压缩机组型号相同,调度人员在编制运行方案及日常操作时凭借

经验确定压气站的开机台数,各机组间流量一般采用均分处理。但部分压气站存在压缩机组型号不同的情况,难以合理确定站内压缩机组开机台数及各机组间的流量分配,不利于管道高效运行<sup>[6]</sup>。

压气站负荷分配问题可以描述为:已知压气站的进站流量、压力、温度及出站压力,以单位时间内整个压气站运行费用最低为目标,确定压气站的开机组合与流量分配。由此,建立以下最优化模型<sup>[7]</sup>:

$$\begin{aligned} \min G &= \sum_{i'=1}^{mc} k_{i'} g_{i'} \\ s.t. & \begin{cases} \sum_{i'}^{mc} k_{i'} Q_{i'} = Q_t \\ g_{i'} = f_{i'}(Q_{i'}, p_s, T_s, p_d) \\ (Q_{i'}, P_s, T_s, p_d) \in D_{i'} \text{ or } Q_{i'} = 0 \\ k_{i'} = 0/1 \\ i' = 1, 2, \dots, m' \end{cases} \end{aligned} \quad (2)$$

式中:  $G$  为压气站的总能耗费用,  $10^4$  元/d;  $m'$  为站内压缩机台数;  $k_{i'}=0$  表示第  $i'$  台压缩机关机,  $k_{i'}=1$  表示开机;  $g_{i'}$  为第  $i'$  台压缩机每天运行费用,  $10^4$  元/d;  $f_{i'}(Q_{i'}, p_s, T_s, p_d)$  是由压缩机特性方程、BWRS 状态方程等构成的非线性方程组;  $Q_{i'}$  为第  $i'$  台压缩机的流量,  $m^3/s$ ;  $p_s, p_d$  分别为进、出口压力, MPa;  $T_s$  为进口温度,  $^{\circ}C$ ;  $Q_t$  为压气站的进站流量,  $m^3/s$ ;  $D_{i'}$  为第  $i'$  台压缩机的可行工作域。

由  $f_{i'}(Q_{i'}, P_s, T_s, P_d)$  可知,在给定进、出口压力及进口温度的条件下,压缩机每天的运行费用仅与进口流量有关,可通过分段线性插值将目标函数线性化。压缩机可行域约束  $D_{i'}$  是非线性的,但是在进口压力、温度及出口压力给定的情况下,可以将其转化为一个线性约束:  $Q_{i'} \in [Q_{i'}^{\min}, Q_{i'}^{\max}]$ 。其中,  $[Q_{i'}^{\min}, Q_{i'}^{\max}]$  是根据压缩机压比确定的可行流量区间 ( $Q_{i'}^{\min}, Q_{i'}^{\max}$  分别为给定压比下压缩机可行的最小、最大流量,  $m^3/s$ )。

将上述混合非线性整数规划模型转化为混合线性整数规划模型 (Mixed Integer Linear Programming, MILP), 确定每台压缩机的可行流量区间并离散化, 然后计算每个离散流量点对应的压缩机组能耗费用, 在此基础上对目标函数作分段线性插值。转化得到的混合线性整数规划模型如下:

$$\min g = \sum_{i'=1}^{mc} k_{i'} G_{i'}$$

$$\begin{aligned} s.t. & \begin{cases} \sum_{j'=1}^{J_{i'}} \lambda_{i'j'} q_{i'j'} = Q_{i'} \\ \sum_{i'=1}^{mc} Q_{i'} = Q_t \\ \sum_{j'=1}^{J_{i'}} \lambda_{i'j'} g_{i'j'} = G_{i'} \\ \lambda_{i'j'} \geq 0 \\ \sum_{j'=1}^{J_{i'}} \lambda_{i'j'} = 1 \\ Q_{i'}^{\min} \leq q_{i'j'} \leq Q_{i'}^{\max} \\ k_{i'} Q_{i'}^{\min} \leq Q_{i'} \leq k_{i'} Q_{i'}^{\max} \\ k_{i'} = 0/1 \end{cases} \end{aligned} \quad (3)$$

式中:  $j'$  为线性化后离散点的序号;  $J_{i'}$  为第  $i'$  台压缩机离散点集的维数;  $\lambda_{i'j'}$  为线性插值系数;  $q_{i'j'}$  为第  $i'$  台压缩机第  $j'$  个离散流量,  $m^3/s$ ;  $g_{i'j'}$  为第  $i'$  台压缩机第  $j'$  个离散流量对应的运行费用,  $10^4$  元/d。

求解混合整数线性规划问题的算法和求解器较多<sup>[8]</sup>, 如 CPLEX、SCIP、GUROBI、MATLAB 等。

### 2.3 单条输气管道运行方案优化

当得到气源和用户的季/月度计划以及管道的维检修作业计划之后, 需要编制季/月度运行方案确定能否完成输送任务, 此过程一般由计划编制人员通过管道仿真软件进行优化比选并结合生产经验完成。

输气管道运行方案优化问题<sup>[9]</sup>可以概括为: 已知管道气源输量、压力、温度及用户合同输量或压力的条件下, 求解全线各个压气站的出站压力及站内负荷分配, 使全线压气站的总能耗/费用最低。其数学模型为:

$$\begin{aligned} \min G^{\text{pipe}} &= \sum_{i^*=1}^{m^*} \sum_{j^*=1}^{n^*} k_{i^*j^*} g_{i^*j^*}^{\text{pipe}} \\ s.t. & \begin{cases} k_{i^*j^*}^{\text{pipe}} = 0/1 \\ k_{i^*j^*}^{\text{pipe}} \sum q_{i^*j^*}^{\text{pipe}} = Q_{i^*}^{\text{pipe}} \\ (q_{i^*j^*}^{\text{pipe}}, p_{s^*}^{\text{pipe}}, p_{d^*}^{\text{pipe}}) \in D_{i^*j^*} \\ p_{d^*}^{\text{pipe}} \leq p_{d^*}^{\max} \\ p_{s^*}^{\text{pipe}} \geq p_{s^*}^{\min} \\ (p_{s^*}^{\text{pipe}}, T_{s^*}^{\text{pipe}}) = f_p[Q_{i^*}^{\text{pipe}}, p_{d^*}^{\text{pipe}}, T_{d(i^*-1)}^{\text{pipe}}] \\ (g_{i^*j^*}^{\text{pipe}}, q_{i^*j^*}^{\text{pipe}}, T_{d^*}^{\text{pipe}}) = f_{CS}(Q_{i^*}^{\text{pipe}}, p_{s^*}^{\text{pipe}}, T_{s^*}^{\text{pipe}}, p_{d^*}^{\text{pipe}}) \\ i^* = 1, 2, \dots, m^*; j^* = 1, 2, \dots, n^* \end{cases} \end{aligned} \quad (4)$$

式中:  $G^{\text{pipe}}$  为全线压气站总能耗费用,  $10^4$  元/d;  $g_{i^*j^*}^{\text{pipe}}$  为第  $i^*$  站第  $j^*$  台压缩机的运行费用,  $10^4$  元/d;  $q_{i^*j^*}^{\text{pipe}}$  为第  $i^*$  站第  $j^*$  台压缩机的通过流量,  $m^3/s$ ;  $f_{CS}$  为压气站负荷

分配优化子问题;  $f_p$  为管道仿真函数, 用来计算进站(即管道末端)压力和温度等参数;  $Q_i^{\text{pipe}}$  为第  $i^*$  站的进站流量,  $\text{m}^3/\text{s}$ ;  $p_{s,i^*}^{\text{pipe}}$ 、 $p_{d,i^*}^{\text{pipe}}$  分别为第  $i^*$  站的进站压力和出站压力, MPa;  $T_{s,i^*}^{\text{pipe}}$ 、 $T_{d,i^*}^{\text{pipe}}$  分别为第  $i^*$  站的进站温度和出站温度, K;  $p_{s,i^*}^{\text{pipe}}$ 、 $p_{d,i^*}^{\text{pipe}}$  分别为第  $i^*$  站的最高出站压力和最低进站压力, MPa;  $i^*$  为压气站的序号;  $j^*$  为压缩机的序号。

该优化模型属于混合整数线性规划问题, 同时包含了压气站负荷合理分配优化问题, 但由于输气管道运行方案优化问题可以进一步转化为多阶段决策问题, 因此可以采用动态规划法进行求解。动态规划法对优化问题中的非线性和非凸性条件不敏感, 计算效率较高, 结果最优性较好, 现已成为输气管道运行方案优化问题中应用最成熟、最成功的算法之一<sup>[10]</sup>。

#### 2.4 复杂输气管网运行方案优化

从能耗角度来看, 管网系统层级的优化空间要远远大于单条管道的优化空间, 运行方案编制也应着眼于管网系统层面。由于管网系统中存在环状结构, 一方面产生了新的环内流量分配问题, 增加了决策变量的维度及约束条件的个数; 另一方面难以构造出按压气站顺序进行的多阶段决策问题, 动态规划法将不能直接应用。因此, 输气管网最优运行方案的求解相比于单条管道来说难度更大<sup>[11]</sup>。

近年来, 研究人员尝试采用多种方法求解输气管网运行方案优化问题, 如 Carter 等<sup>[12-14]</sup>提出了基于 DP 算法的非序列动态规划法(Non-sequential Dynamic Programming, NDP), 通过对管网拓扑结构进行预处理, 提前给定管网中各条管道的输量, NDP 算法可以对管网中的节点压力进行优化; Rios-Mercado 等<sup>[15-17]</sup>提出了广义简约梯度法(Generalized Reduced Gradient, GRG), 优化管网中的节点压力和环内流量分配; Martin 等<sup>[18]</sup>对优化问题中的非线性约束进行了区域线性化处理, 将原问题近似为混合整数线性规划问题; Cobos-Zaleta 等<sup>[19]</sup>采用外逼近法、等式约束松弛法及增广罚函数法(Outer Approximation with Equality Relaxation and Augmented Penalty, OA/ER/AP)直接求解原混合整数非线性规划问题。

由于复杂输气管网运行优化问题的规模庞大、模型结构复杂, 通用的管网优化引擎必须兼顾计算效率、结果最优等各方面问题, 其关键是针对优化问题的特点选择合适的简化方法和优化算法<sup>[20]</sup>。线性化

等预处理技术的引用能够有效地对原问题进行简化, 成熟的商业求解器能够在保证计算速度的基础上得到全局/局部最优解。对于非通用的定制管网优化引擎, 在各管道流量已知的前提下, NDP 算法能够保证得到问题的最优解, 但是在流量优化层面需要进一步提高。

中国石油管道科技研究中心联合清华大学、中国科学院数学与系统科学研究院, 通过多年研究提出了针对大型天然气管网运行优化问题的求解方法。该方法将线性化技术与动态规划法相结合, 利用并行计算、压力与流量的二级递阶计算提高了计算速度, 并已经在中国石油区域管网系统中完成测试。

可见, 在天然气管网运行管理中采用最优化技术具有一定的可行性, 但仍需要加大研究力量突破部分技术瓶颈和应用瓶颈, 才能使最优化技术在生产实际中取得良好效果。其中技术瓶颈是指将物理模型转化为数学模型之后, 由于数学模型规模庞大、问题复杂, 需要研究新的高效算法或在生产数据和实际运行经验的基础上, 将数学模型进一步简化; 应用瓶颈则是指通过优化软件得到的最优解无法直接应用于实际生产中。解决上述问题应从以下几个方面入手:

(1) 提高数学模型的准确性。天然气物性仿真、管道仿真、压缩机仿真、燃气轮机仿真等基础仿真模块的准确性在一定程度上影响着最优化技术在天然气管网中的应用效果。如实际中的压缩机特性曲线和出厂数据已有较大偏离, 在此情况下难以准确计算出管网系统的能耗。

(2) 为优化软件的使用者提供更多的操作空间。实际情况比建模求解过程中考虑的情况更为复杂, 如计划人员在编制运行方案时还需考虑沿线压气站的维检修作业情况, 而一般的管网优化软件可能会忽视这一类生产需求。因此, 利用最优化技术解决实际问题需要与生产人员反复沟通改进, 并且给予生产人员可以调整模型的更多接口或功能。

(3) 合理利用优化软件作为辅助工具。引入最优化技术能够大幅度缩短工作时间, 生产人员仅需在最优化解附近根据经验进行微调即可得到满意的结果。通过对优化结果进行分析后, 发现部分生产规律可以在优化结果中得到直接体现, 因此在利用最优化技术解决生产问题时, 应加强对优化结果的分析, 总结规律指导生产。

### 3 展望

#### 3.1 管道非稳态优化

输气管道非稳态优化问题是指系统由于出现任务输量变化、边界持续扰动、突发事故等情况,导致管道系统处于较为剧烈的非稳态工况中运行,管道非稳态优化技术可解决以下问题:

(1)任务输量发生变化。采用输气管道(网)运行优化技术可以求解某一特定任务输量下全线的最优运行方案,但是当任务输量变化时,则需要非稳态优化技术指导管道系统从初始输量状态过渡到目标输量状态。

(2)用户用气量波动较大。居民用气一般呈现小时不均匀性及日不均匀性等特点,工业用户会出现间歇供气的情况。用户用气量的波动同样会导致管道进入非稳态工况中运行。非稳态优化技术能够指导计划人员进行管道管理,高效、平稳地完成指定输送任务。

(3)出现事故工况。当管道系统出现泄漏、截断阀误关断、站场失电等事故工况时,非稳态优化技术可以指导调度人员进行合理操作,使管道尽快恢复平稳,减少损失。

(4)在线优化。利用非稳态优化技术,结合历史数据库、专家系统、机器学习等技术,实时指导调度人员完成各类操作任务。

#### 3.2 管网控制系统优化

输气管网中调节阀等控制系统一般采用比例-积分-微分(PID)控制,PID控制回路是否运行良好直接影响着管道的日常运行管理。实际生产中,管道系统中的部分PID调节阀出现调节缓慢或超调等情况。甚至在某些工况条件下,需要先将PID调节阀置于“手动”控制,调度人员通过观察压力、流量数据,凭借经验进行阀位调节。

PID调节的效果受控制逻辑及比例、积分、微分3个参数的设定影响。为保障PID调节能够满足生产需求,生产人员需要对参数进行整定。由于缺乏有效的工具,人工整定需要耗费一定的时间且无法保证整定结果的有效性。亟需通过最优化技术,解决PID参数自动整定的问题。

#### 3.3 管网全生命周期优化

管道系统在前期规划、设计及运销层面也存在诸多问题,可利用最优化技术解决。如在设计阶段,压缩

机组选型、站场位置确定、管径选择等问题,均可以利用最优化技术进行辅助决策或科学指导。

### 4 结束语

随着计算机科学的发展、基础数学水平的提高,最优化技术愈发成熟,人工智能技术的火热再一次掀起了最优化理论研究的热潮,最优化技术在越来越多的行业中展现了其实用价值。但由于管道系统的复杂性、边界条件的波动性及不确定性等因素,最优化技术在管道系统内全面应用尚有诸多工作需要开展,其在智能调控、优化运行等方面的应用潜力也值得进一步深入研究。

#### 参考文献:

- [1] 高鹏,王培鸿,杨耀辉,等. 2015年中国油气管道建设新进展[J]. 国际石油经济,2016,24(3):60-65.  
GAO P, WANG P H, YANG Y H, et al. China's oil and gas pipeline construction in 2015[J]. International Petroleum Economics, 2016, 24(3): 60-65.
- [2] 王永红,宫敬,李晓平,等. 天然气管道能源管理系统的规划[J]. 油气田地面工程,2010,29(10):43-45.  
WANG Y H, GONG J, LI X P, et al. Layout of energy management system for natural gas pipeline[J]. Oil-Gas Field Surface Engineering, 2010, 29(10): 43-45.
- [3] 张凤丽. 最优化理论在经济生活中的应用研究[D]. 济南: 山东大学,2009:1-3.  
ZHANG F L. Applied research on economic life in optimization theory[D]. Jinan: Shandong University, 2009: 1-3.
- [4] 张福坤,吴长春,左丽丽. 输气管道水力摩擦因数计算[J]. 油气储运,2010,29(3):181-186.  
ZHANG F K, WU C C, ZUO L L. Calculation on hydraulic friction coefficient of gas transmission pipelines[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2010, 29(3): 181-186.
- [5] 王波,濮定国. 新的无罚函数无滤子的序列二次规划方法[J]. 同济大学学报(自然科学版),2016,44(5):807-811.  
WANG B, PU D G. A new sequential quadratic programming method without a penalty function or a filter[J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2016, 44(5): 807-811.
- [6] 李博,康阳,何淼,等. 输气管道压气站内压缩机组开机方案的优化方法[J]. 油气储运,2017,36(4):416-420.

- LI B, KANG Y, HE M, et al. Optimization method for the startup program of compressor sets in a compressor station of gas pipeline[J]. *Oil & Gas Storage and Transportation*, 2017, 36(4): 416-420.
- [7] ABBASPOUR M, CHAPMAN K S, KRISHNASWAMI P. Nonisothermal compressor station optimization[J]. *Journal of Energy Resources Technology*, 2005, 127(2): 224-238.
- [8] 孙辉, 徐箭, 孙元章, 等. 基于混合整数线性规划的风电场有功优化调度[J]. *电力系统自动化*, 2016, 40(22): 27-33.
- SUN H, XU J, SUN Y Z, et al. Active power optimization scheduling of wind farm based on mixed-integer linear programming[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2016, 40(22): 27-33.
- [9] WONG P, LARSON R. Optimization of natural-gas pipeline systems via dynamic programming[J]. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 1968, 13(5): 475-481.
- [10] 张俊, 李博, 柳建军, 等. 输气管道运行优化算法适用性研究[J]. *计算机仿真*, 2016, 33(1): 369-372.
- ZHANG J, LI B, LIU J J, et al. Adaptability of algorithms in natural gas pipeline operation optimization problem[J]. *Computer Simulation*, 2016, 33(1): 369-372.
- [11] 艾慕阳, 柳建军, 李博, 等. 天然气管网稳态运行优化技术现状与展望[J]. *油气储运*, 2015, 34(6): 571-575.
- AI M Y, LIU J J, LI B, et al. Current status and prospect of steady operation optimization techniques for gas pipeline network[J]. *Oil & Gas Storage and Transportation*, 2015, 34(6): 571-575.
- [12] CARTER R G, GABLONSKY J M, PATRICK A. Pipeline optimization: algorithms for noisy problems in gas transmission pipeline optimization[J]. *Optimization & Engineering*, 2001, 2(2): 139-157.
- [13] JIN L, WOJTANOWICZ A K. Optimization of large gas pipeline network—A case study in China[J]. *Journal of Canadian Petroleum Technology*, 2010, 49(4): 36-43.
- [14] WU S, RIOS-MERCADO R Z, BOYD E A, et al. Model relaxations for the fuel cost minimization of steady-state gas pipeline networks[J]. *Mathematical and Computer Modelling*, 2000, 31(2): 197-220.
- [15] RIOS-MERCADO R Z, KIM S, BOYD E A. Efficient operation of natural gas transmission systems: A network-based heuristic for cyclic structures[J]. *Computers & Operations Research*, 2006, 33(8): 2323-2351.
- [16] BORRAZ-SANCHEZ C, RIOS-MERCADO R Z. A hybrid meta-heuristic approach for natural gas pipeline network optimization[C]. Dallas: International Conference on Hybrid Metaheuristics, 2005: 54-65.
- [17] BORRAZ-SANCHEZ C, RIOS-MERCADO R Z. Improving the operation of pipeline systems on cyclic structures by tabu search[J]. *Computers & Chemical Engineering*, 2009, 33(1): 58-64.
- [18] MARTIN A, MOLLER M, MORITZ S. Mixed integer models for the stationary case of gas network optimization[J]. *Mathematical Programming*, 2006, 105(2-3): 563-582.
- [19] HAWRYUK A, BOTROS K K, GOLSHAN H, et al. Multi-objective optimization of natural gas compression power train with genetic algorithms[C]. Calgary: 8th International Pipeline Conference, 2010: 21-29.
- [20] 左丽丽, 刘欢, 张晓瑞, 等. 输气管道非稳态优化运行技术研究进展[J]. *科技导报*, 2014, 32(18): 73-78.
- ZUO L L, LIU H, ZHANG X R, et al. Review on transient operation optimization of gas pipelines[J]. *Science & Technology Review*, 2014, 32(18): 73-78.
- (收稿日期: 2017-11-03; 修回日期: 2018-08-03; 编辑: 曾力波)
- 
- 基金项目:** 中国石油天然气股份有限公司科技攻关项目“大型天然气管网优化技术及应用研究”, 2013B-3410.
- 作者简介:** 李博, 男, 1988年生, 工程师, 2014年硕士毕业于中国石油大学(北京)油气储运工程专业, 现主要从事输气管网仿真及优化工作。地址: 河北省廊坊市广阳区金光道51号, 065000。电话: 18131658270, Email: libocolby@yeah.net