

天然气管道优化运行技术研究进展

韩星*,王坤

(中国石油大学机械与储运工程学院,北京 102249)

摘要:叙述了优化建模的目标函数和约束条件,介绍了国内外天然气管道优化研究进展,指出了目前使用较多的优化算法存在的不足,并针对天然气管道优化给出了具体的建议。

关键词:天然气管道;优化;数学模型

中图分类号:TE83

文献标志码:A

文章编号:0253-4320(2016)01-0029-04

DOI:10.16606/j.cnki.issn.0253-4320.2016.01.007

Research progress of operation optimization technology in natural gas pipeline

HAN Xing*, WANG Kun

(Institute of Machinery and Storage & Transportation Engineering, China University of Petroleum, Beijing 102249, China)

Abstract: The object function and restricting terms of the optimization models are described. The research progress of the natural gas pipeline optimization at home and abroad is introduced. The existing problems in many optimization algorithm methods are also pointed out. In view of the natural gas pipeline optimization, some concrete suggestions are given as well.

Key words: natural gas pipeline; optimization; mathematic model

天然气输送管道系统中一个重要的组成是压缩机,一个从气田到终端用户的输气管道系统拥有多个压气站,压气站内的压缩机为天然气的输送提供能量以克服摩阻损失,保证输送压力和流量满足用户需求。压缩机不仅会产生高额的动力费用,还会造成管道能量损失,压缩机大多是直接从管道中消耗天然气以提供自身能量的,管道系统的压缩机元件能消耗掉3%以上的气体输量^[1]。

天然气输送优化应用最早始于美国一家天然气输送公司和IBM联合研究天然气管道的优化问题,最初是把压缩机能耗设置为目标函数,经过运筹学的优化计算得出优化方案^[2]。后来随着研究的深入,目标函数逐渐多样化,优化算法也丰富起来,但是天然气管道系统优化运行都是建立在稳态研究,非稳态优化运行虽取得了较大的进展^[3-4],但也只是对已有的运行方案进行模拟比较^[5]。

国内在输气管道运行优化方面的研究开始较晚,进入21世纪以来的研究也取得了较大的突破。吴长春教授等^[6]为西气东输工艺方案建立了稳态模型,开发了专用软件WEGPOPT,可迅速计算出管道稳态最优运行方案;杨义等^[7]建立了固定输量天然气干线管道稳态优化模型,开发了主干管线稳态运行优化软件Simuopt 2007,初步总结出了天然气主干管线的运行特性。遗憾的是,国内目前对输气管道系统非稳态运行优化的研究较少,没有相应的

应用研究案例,也仅仅停留在某些非稳态工况的模拟和比较。

1 一般数学描述

输气管道设计优化过程包括压气站的位置和数量优化、压缩机的运行方式和配置优化以及管径和最大允许操作压力(MAOP)的优化。输气管道的优化目标主要有2点:①满足天然气输送管道沿线的流量和压力要求;②符合排放标准的前提下使管道能耗和运行维护费用最低^[8]。对于已有管道系统,压气站以及站内压缩机运行优化尤其重要。

输气管道的一般优化模型可描述如下。

(1) 目标函数

一般的优化目标是使管道系统总的能耗最小,但也可以设置维持压缩机运行费用和压气站开/关费用等为目标函数。

由于压缩机的能耗成本在整个管道系统的运营成本中占比很大,国内外多见将压缩机能耗费用设置为目标函数:

$$\text{Minimize } F_{\text{total}} = \sum_{i=1}^n C_i$$

式中, F_{total} 为管道系统压气站总的能耗费用; C_i 为单个压气站的能耗费用。

当压气站流量压力参数发生变化时,某些压缩机可能并不需要开启即可满足要求,这样一种常用

的目标函数(这种函数常出现在整数规划法的应用中)可表示为:

$$\text{Minimize } F_{\text{total}} = \sum_{i=1}^n J_i F_i$$

式中, F_{total} 为管道系统压缩机总能耗; J_i 当压缩机处于开启状态取值 1, 否则为 0; F_i 为第 i 个压缩机的能耗。

(2) 约束条件

天然气输送管道优化模型的约束条件包括管道运行(压力、流量)操作约束、管道压力流量之间的关系约束(管网流动方程约束)、流动条件水力特性约束、热力学特性约束、压缩机运行特性的约束等。这些约束条件给模型的求解带来了很大的难度,一方面是由于管网压力流量方程的非线性,另外压缩机运行的特性曲线使得模型的求解更加困难,这是由于压缩机压力流量参数自身的非凸性(nonconvex)^[9]。对于非稳态优化模型,其约束条件将更加苛刻,求解也尤为复杂,因为非稳态模型中的边界条件约束(boundary conditions),如沿线流量参数会随时间而发生变化,且压缩机站的启/关约束(0~1 规划)以及优化运行结束时管存量的约束等都加大了处理非稳态模型的难度^[10]。

2 输气管道优化方法研究

2.1 动态规划

动态规划(dynamic programming, DP)是美国学

者 Bellman 等于 1951 年提出的一种优化方法^[11],用于求解多阶段决策问题,该方法通过将某个整体问题分解成若干个相互联系的子阶段问题,逐一解决这些子问题,以达到整个决策问题求解的目的,进而使整个问题得以最佳的运行效果。事实上,输气管道的优化问题也可看作一个多阶段决策问题,因此,将该方法用于输气管道的运行优化上是可行的。

1968 年, Wong 等^[12]首次尝试将动态规划的方法应用到单个输气管道的费用优化中,按时间来划分不同的子阶段,以降低压缩机的能耗为目标,建立模型,最终的结果显示,末端气压越低(但仍高于系统允许最低压力)压缩机的能耗越小,相比优化前节约费用明显。

1971 年, Larson 等^[13]首次使用分层系统控制理论用于大型复杂的输气管道系统优化,提出将系统分解成若干个含有独立压气站的子系统,从后到前依次优化。1994 年,同样的方法应用在了英国某枝状管网上,给出了 24 h 内管网压力流量的时间特性,在满足既定的等式和不等式约束的前提下优化了压气站的费用消耗,其准确性在大型管网应用上得到了检验。

1986 年, Robert 等^[14]为 IBM AT 设计了一套基于动态规划的优化程序,可优化陆海天然气管道,并在阿拉斯加管道上得到了应用,但是这套优化程序存在如没有考虑气温的变化等诸多问题。

(上接第 28 页)

[11] 郑瑛, 王保文, 宋侃, 等. 化学链燃烧技术中新型氧载体 CaSO_4 的特性研究[J]. 工程热物理学报, 2006, 27(3): 531-533.

[12] Zheng M, Shen L, Xiao J. Reduction of CaSO_4 oxygen carrier with CO in chemical-looping combustion[J]. Chem Ind Eng, 2008, 59(11): 2812-2818.

[13] Shen L, Gao Z, Wu J, et al. Sulfur behavior in chemical looping combustion with $\text{NiO}/\text{Al}_2\text{O}_3$ oxygen carrier[J]. Combust Flame, 2010, 157(5): 853-863.

[14] Song Qilei, Xiao Rui, Deng Zhongyi, et al. Chemical-looping combustion of methane with CaSO_4 oxygen carrier in a fixed bed reactor[J]. Energy Conversion and Management 2008, 49(11): 3178-3187.

[15] Song Q, Xiao R, Deng Z, et al. Reactivity of a CaSO_4 -oxygen carrier in chemical-looping combustion of methane in a fixed bed reactor[J]. Korean J Chem Eng, 2009, 26: 592-602.

[16] Qin C, Shen L, Zheng M, et al. Experiments on reducing reaction for chemical looping combustion of coal with CaSO_4 oxygen carrier[J]. Chin Soc Elec Eng(China), 2009, 29(17): 43-50.

[17] Liu Yongzhuo, Guo Qingjie, Cheng Yu, et al. Reaction mechanism of coal chemical looping process for syngas production with CaSO_4 oxygen carrier in the CO_2 atmosphere[J]. Industrial & Engineering

Chemistry Research, 2012, 13: 10364-10372.

[18] 丁宁, 郑瑛, 罗聪, 等. 化学链燃烧中 CaSO_4 复合载氧体的实验研究[J]. 燃料化学报, 2011, 39(3): 161-168.

[19] 丁宁, 郑瑛, 罗聪, 等. 助剂对 CaSO_4 载氧体化学链燃烧的影响[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(5): 40-47.

[20] 丁宁, 郑瑛, 罗聪, 等. 钙基复合载氧体反应性能的研究[J]. 动力工程学报, 2011, 30(9): 689-698.

[21] 贾伟华, 刘永卓, 胡修德, 等. 煤化学链燃烧中 CaSO_4 /膨润土复合载氧体的反应特性[J]. 化学反应工程与工艺, 2014, 30(1): 35-40.

[22] 郗艳荣, 刘永卓, 田红景, 等. 规模化制备钙基复合载氧体的性能研究[J]. 高校化学工程学报, 2014, 28(1): 51-58.

[23] García-Labiano F, de Diego L F, Gayán P, et al. Effect of fuel gas composition in chemical-looping combustion with Ni-based oxygen carriers. 1. Fate of sulfur[J]. Ind Eng Chem Res, 2009, 48(5): 2499-2508.

[24] 高正平, 沈来宏, 肖军, 等. 基于 Fe_2O_3 载氧体的煤化学链燃烧试验[J]. 工程热物理学报, 2009, 30(7): 1249-1252.

[25] Song Q, Xiao R, Deng Z, et al. Multicycle study on chemical-looping combustion of simulated coal gas with a CaSO_4 oxygen carrier in a fluidized bed reactor[J]. Energy Fuels, 2008, 22(6): 3661-3672. ■

2013年,Tibor等^[15]结合动态规划算法和进化算法开发出一套优化软件 Amadeus MARTI Studio 用于斯洛伐克天然气管网的运行管理,准确描述了压缩机及其驱动特性的多项式,保证了给定压缩机进气条件和压缩比的前提下自动迅速地选择出最优的单个压气站压缩机的种类、数量、转速。

2.2 整数规划

1985年,Mantri等^[16]最早采用非线性混合整数优化模型(integer programming, IP)求解输气管道非稳态优化运行问题,采用的计算模型包括2个主要的工具,管网模拟器和优化器。模拟器用于计算所有用于评估目标函数的数据,优化器计算目标函数的现值并在必要时输出新的循环。作者采用递减梯度算法和动态规划相结合的非线性混合整数规划优化方法,递减梯度算法用于系统非稳态问题的解决,动态规划用于每个压气站的优化选择。这种优化算法在2种算例上进行了试验,一个是假设的有着3个压气站的300英里的管道,另外一个实际的有着7座压气站的约600英里管道,优化结果显示,节约能耗分别达到了30%和20%,效果显著。

1996年,Carter^[17]将线性混合整数规划法(MILP)应用到了有6个压缩机的站,与实际数据结果比较得知,MILP的优化结果虽然和实际结果相似,但是并不具有良好的一致性,在其他实际案例中的表现“糟糕”。

1998年,Wright等^[18]在PSIG会议上较为详细地介绍了一种整数规划法—非线性混合整数规划法(MINLP),MINLP可用于处理不连续非线性变量问题的求解,作者分别使用MINLP和SA(遗传退火法)对假设的5~25个压气站进行了实际的计算,结果发现,MINLP在压气站较少时能表现其较优的优化性能,但是随着压气站数目增加到25个时,MINLP能成功找出解决方案的概率只有45%,远远低于SA。非线性整数规划算法在求解时要求提供一个初始解,且目标函数为凸函数,这在实际问题中几乎是不可能的,因此这也局限了MINLP的应用。

2.3 遗传算法

Goldberg^[19]率先使用遗传算法(genetic algorithms, GA)优化天然气管道的运行,作者选取了2个样本,稳态连续管道系统和单个瞬态管道,运用三重遗传算法抽样了不到1%的搜索空间就找到了近优解。在Goldberg D的另一篇研究中指出,一个

简单的遗传算法包括有繁殖、交叉和变异,它经过对一个有40个泵的液体管道系统问题很小一部分的检验,可以迅速地找到运行泵组合的近优解。但Cart^[17]的一项研究结果表明,使用遗传算法得到最优解的速度比不连续动态规划算法慢3000多倍,且遗传算法往往耗费大量的计算时间而只是找到了一个近似解,因此当遇到需求解某些组合问题时,遗传算法或许并不是最佳的计算方法。另外遗传算法过快的搜索速度也带来了一些问题,当诸如变异率和交叉率等的某些参数取值不合适,有可能根本就得不到问题的解。

我国的曾力波等^[20]以压气站的功耗为目标函数,设置了压缩机的转速、出口温度和管道强度约束条件,建立了一个基于遗传算法的优化模型,并将此优化模型应用到陕京输气管道二线上,求解结果显示,优化后的能耗可比优化前减少约5%。这种模型适用于复杂非线性问题的求解,但是作者建立的这个优化模型并未考虑输气管道的非稳态参数的变化,实际应用价值有限。

高松竹^[21]在其硕士论文中提出一种遗传退火算法,将遗传算法(GA)和模拟退火算法(SA)结合起来,基于此种算法设计出一个输气站压气站优化软件,在某全长999.9 km的输气管道上对比遗传退火算法和动态规划法、遗传算法的优化效果,结果显示,这种遗传退火算法的优化效果最好,可节约动力费用4.3%。这种算法有较高的搜索最优解速度,适应性强,计算效率高,且局部收敛性能优于遗传算法,但文章为减小算法的求解难度,忽略了实例应用中输气管道管径不均匀和沿线分输气的压气站的影响。

2.4 模拟退火

模拟退火算法(simulated annealing, SA)在天然气管道优化中常常用来解决复杂组合型问题(combinatorial optimization problem),模拟退火的思想取自金属退火锻造的过程,金属被加热变成液体后,分子随机运动,液体被逐渐冷却,最终形成晶体结构。

Wright等^[18]将SA算法与GA算法以及非线性混合整数规划方法等进行了比较,SA算法从不同样本函数中获取统计特性的功能较差,比启发式的稳定性能好,一般优于启发式算法2%~3%。SA算法在压气站数量增加时能体现出其优于MINLP算法的优化精度和稳定性,这一点说明SA算法的稳定性受压气站数量变化的影响非常小,优化效果好

于非线性混合整数规划算法。

段善宁等^[22]结合使用模拟退火和神经网络对天然气管道组合优化问题进行求解,综合二者的优势,编写了一套可用于输气管道优化的程序,此程序具有更好的收敛性能,并有效避免了传统遗传算法对初始问题迭代值的过分依赖,在某全长1 320 km的输气管道上实际应用结果显示,采用模拟退火-神经网络优化后可节省超过10%的动力费,远远优于只采用神经网络优化的结果,但该方法弱化了输气管道的非稳态参数变化,其实用性仍有进一步提升的空间。

3 总结

国内外在天然气管道优化的研究已经取得了长足的进展,研究的领域也不再局限于压缩机运行方案的优化,深海管道运行优化以及事故状态下天然气管道的优化研究也取得了一定的成果,在节约成本、安全运行的应用上,天然气管道优化做出了巨大的贡献。但是目前针对天然气输气管道系统的优化研究仍存在诸多不足和需改进的地方。

问题:①优化模型算法局限性大,没有一个可适用于各类管道优化的通用性较好的算法;②目前存在的天然气管道非稳态优化研究为降低求解难度而没有考虑某些重要的参数,导致其对实际的管道指导性很差,且缺少准确可靠高效的非稳态模型优化算法。

建议:①继续开发适用于天然气管道优化的算法,可考虑与传统的优化算法相结合,而不再仅仅采用单一算法进行优化;②可运用非稳态模拟软件对非稳态优化方案进行模拟分析,指导天然气管道输送的优化工作;③综合利用添加减阻剂(DRA)和内涂层技术^[23],结合数学模型构建运行优化,以达到天然气管道优化的目的。

参考文献

[1] Carter R G. Pipeline optimization: Dynamic programming after 30 years [C]. PSIG 30th Annual Meeting, Denver, Colorado, USA, 1998.

[2] 初飞雪, 吴长春. 输气管道优化运行的研究现状[J]. 油气储运, 2004, 23(11): 3-6.

[3] Christian Kelling, Klaus Reith, Erwin Sekirnjak. A practical approach to transient optimization for gas networks [C]. PSIG Annual Meeting, Savannah, Georgia, 2000.

[4] Henry H Rachford Jr, Richard G Carter. Optimizing pipeline control

in transient gas flow [C]. PSIG Annual Meeting, Savannah, Georgia, 2000.

- [5] Ulli Pietsch, Henry H Rachford Jr, Richard G Carter. Investigating real-world applications of transient optimization [C]. PSIG Annual Meeting, Salt Lake City, Utah, 2001.
- [6] 吴长春, 杨廷胜. “西气东输”管道工艺运行方案优化[J]. 天然气工业, 2004, 24(11): 127-130.
- [7] 杨义, 郑宏伟. 中石油主干输气管网稳态优化运行研究[J]. 上海煤气, 2008, (2): 10-14.
- [8] Phil Ferber, Ujjal Basu, Ganesh Venkataramanan, et al. Gas pipeline optimization [C]. PSIG Annual Meeting, St. Louis, Missouri, 1999.
- [9] 贺三, 邹永莉, 王欣. 天然气管道的运行优化[J]. 油气储运, 2009, 28(6): 1-7.
- [10] 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.
- [11] 龙子泉, 陆菊春. 管理运筹学 [M]. 武汉: 武汉大学出版社, 2010.
- [12] Wong P, Larson R. Optimization of natural-gas pipeline systems via dynamic programming [J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 1968, 13(5): 475-481.
- [13] Larson R E, Wismer D A. Hierarchical control of transient flow in natural gas pipeline networks [C]. SPE3822, 1971.
- [14] Robert J, Edward Gordon. Optimal gas pipeline design via dynamic programming with variable stages [C]. PSIG Annual Meeting, New Orleans, Louisiana, 1986.
- [15] Tibor Žáčik, Peter Somora, Rudolf Hajossy. Modeling and optimizing in Slovak gas transmission network [C]. PSIG Annual Meeting, Prague, Czech Republic, 2013.
- [16] Mantri V B, Preston L B, Pringle C S. Transient optimization of a natural gas pipeline system [C]. PSIG Annual Meeting, Albuquerque, New Mexico, 1985.
- [17] Richard G Carter. Compressor station optimization: Computational accuracy and speed [C]. PSIG Annual Meeting, San Francisco, California, 1996.
- [18] Wright S, Ditzel C, Somani M. Compressor station optimization [C]. PSIG Annual Meeting, Denver Colorado, 1998.
- [19] Goldberg D E. Computer-aided gas pipeline operation using genetic algorithms and rule learning part I: Genetic algorithms in pipeline optimization [C]. SPE 14590, 1985.
- [20] 曾力波, 朱小丹. 基于遗传算法的天然气管道运行参数的优化模型 [C]. CIPC, 2013.
- [21] 高松竹. 输气干线压缩机站优化运行研究 [D]. 成都: 西南石油大学, 2003.
- [22] 段善宁, 周昊, 汪玉春. 基于模拟退火与 Hopfield 神经网络的输气管道优化运行 [J]. 内蒙古石油化工, 2013, 4(8): 69-72.
- [23] Hesham A M Abdou. Role of simulation system in maximizing transportation capacity of an aged pipeline [C]. PSIG Annual Meeting, Prague, Czech Republic, 2013. ■