

输气管道运行优化方法研究*

王浩 梁伟 林扬 (中国石油大学(北京)机械与储运工程学院)

摘要：长距离输气管道是天然气输送的首选方式，但随着天然气管网的日益复杂化，其运行效率问题日益突出，尤其是天然气管道压缩机组的运行优化问题十分重要。首先论述了输气管道运行优化模型的建立过程，包括目标函数、约束条件和优化变量三部分。然后介绍了动态规划、遗传算法和蚁群算法等几种常见算法，并归纳和分析其在输气管道运行优化中的优势和不足之处。最后，做出了输气管道运行优化研究建议。

关键词：输气管道；运行优化；优化模型；优化算法

DOI:10.3969/j.issn.2095-1493.2016.11.006

目前，天然气作为一种清洁能源在我国得到了广泛使用，但是由于天然气需求和分布的不均衡使天然气能源的应用受到制约。长距离输气管道是解决该矛盾的最有效措施，例如川气东送工程、西气东输工程、榆济线等为天然气的输送做出了巨大贡献。输气管道的建设和日常运行耗费巨大，输气管道总经营费用的40%~50%用于压气站，压气站运营费用的70%以上用于压缩机动力费用，合理的压缩机组运行优化能够节约20%左右的能耗^[1]。为了节约能源，降低运行费用，尤其是对输气管道压缩机组的运行优化是非常必要的。

1 优化模型的建立

优化问题的标准数学模型式(1)，模型由目标函数和约束条件组成，优化变量包含在目标函数和约束条件中^[2]。

$$\begin{cases} \min f(X) \\ \text{s.t. } h_i(X) = 0 (i = 1, 2, \dots, m) \\ g_i(X) \leq 0 (i = 1, 2, \dots, l) \end{cases} \quad (1)$$

式中： X ——独立自变量； $f(X)$ ——目标函数一般形式； $h_i(X)$ ——等式约束条件； $g_i(X)$ ——不等式约束条件； m ——等式约束条件个数； l ——

等式约束条件个数。

输气管道优化模型建立在标准优化模型的基础上，需要确定目标函数、约束条件和优化变量三个部分。典型的输气管道包括管道、气源、用户和压气站四部分。通常将管道和压气站称为元素，气源和用户称为节点，各元素通过节点相互连接。以此为基础建立输气管道运行优化模型。

1) 目标函数。评价一个方案是否最优的依据就是要切合目标函数。输气管道运行优化的目标函数主要有：最大收益目标函数、最大流量目标函数、最小能耗目标函数、混合目标函数。其中混合目标函数的产生是因为输气管道运行时会同同时考虑天然气流量和收益2个目标。

2) 约束条件。对输气管道运行优化时，需要考虑气源、压力变化以及管道设计条件等约束。输气管道运行优化的约束条件通常为：进(分)气流量、压力约束、管道压力降方程、压缩机运行区间、阀门方程等。

3) 优化变量。由目标函数和约束条件可以看出，优化模型的目标函数和约束条件与许多变量相关，比如流量、压缩机功率、各节点压力、压缩机转速等，都可以作为优化变量。输气管道压缩机组合方式也可作为优化变量，但它是整数型离散变量。

2 优化模型求解

输气管道运行优化模型的不确定性和复杂性决定了其与传统优化问题模型的不同。输气管道运行优化模型属于带约束条件的非线性优化模型，其中

第一作者简介：王浩，2014年毕业于中国石油大学(华东)安全工程专业，现为中国石油大学(北京)机械与储运工程学院在读硕士，E-mail: wanghao_cup@163.com，地址：北京市昌平区府学路18号，102249。

*基金项目：中国石油大学(北京)科研基金资助，中石化“榆林首站压缩机优化运行技术研究”，项目编号：2462015TQ0406。

还包含离散变量的优化问题。在输气管道运行优化研究中, 动态规划、遗传算法和群体智能是比较常用且优化效果显著的优化算法, 因此对三种优化算法进行深入调研, 对其在输气管道运行优化中应用的优缺点做全面分析。

2.1 动态规划法

20世纪50年代, Bellman等人针对多阶段决策问题的特性, 提出动态规划的最优化算法。动态规划的过程是由“状态、决策、状态转移规律、报酬函数和目标函数”组成。

动态规划能够解决输气管道运行优化模型具有复杂约束条件的难点, 可以用于管道输气分配、压缩机运行组合以及简单输气管网的优化; 但计算量会随着变量的规模而呈指数增加, 因此动态规划法不适用于大规模、复杂的输气管网运行优化。

2.2 遗传算法

1975年, 美国的J.Holland教授根据达尔文遗传选择和自然淘汰的生物进化过程, 首次提出遗传算法的概念。遗传算法通过不断对群体实施迭代优化过程, 淘汰适应度低的个体, 将适应度高的个体保留并遗传下来, 适应度最高的个体为最优解。

David E. Goldberg运用遗传算法优化了以全线能耗最小为目标函数的输气管道稳态运行模型, 带动了智能优化算法在长输管道运行优化领域的研究和应用。遗传算法具有随机性, 搜索时依据个体适配性, 不需其它信息。其优点为算法进行全空间并行搜索, 适应度高的部分搜索集中, 提高了优化效率且不易陷入局部极小, 具有固有的并行性。遗传算法适用于输气管道运行优化模型的非线性特征^[1], 且可以用于输气管网的瞬态运行优化; 但是遗传算法在利用优化过程中的反馈信息方面存在不足, 在求解到一定精确度后会做大量的冗余迭代计算, 降低求解效率。

2.3 群体智能

群体智能是指具有简单智能的个体通过相互协作和组织表现出的群体智能行为特征, 具有天然的分布式和自组织的优点。群体智能包括粒子群优化算法和蚁群算法等。

1995年, Kennedy和Eberhart受鱼群和鸟群捕食行为的启发, 提出基于群体智能的粒子群算法。该算法具有鲁棒性好、并行处理等特点, 能够以比较大的概率找到全局最优解, 且计算效率较传统方法高, 最大的优点为实现容易、收敛速度快和有深厚的智能背景。在天然气输气管网、

各节点压力和流量、输气管道混合目标函数的优化中起到重要作用。它的记忆特性能够动态跟踪当前的搜索情况并及时调整搜索策略, 其不足之处是在某些初始化条件下易陷入局部最优, 且搜索精度比遗传算法低。

1992年, 意大利学者Dorigo对蚂蚁寻找食物的行为模型进行模拟, 提出蚁群算法的概念。蚂蚁在觅食时总能找到最短路线是因为其在路径上释放信息素, 某条路径上走过的蚂蚁越多, 释放的信息素也就越多, 从而可以吸引更多的蚂蚁。蚂蚁通过信息素的浓度不断调整自己的路线, 最终聚集在最优路径上。蚁群算法在输气管道设计、压缩机的输量和每个压缩机站出口压力等方面的优化中发挥重要作用。蚁群算法具有正反馈特性, 通过不断更新路径上的信息素从而收敛到最优解, 适用于求解输气管道变量多、约束条件复杂的优化问题; 同时具有自组织性、并行性和鲁棒性的优点, 其不足之处是在求解初期信息素匮乏, 求解速度较慢。

3 建议

1) 输气管道的规划、设计与运行关系密切, 但是它们的优化问题通常会分开考虑, 可以建立涵盖管道规划、设计和运行等多阶段的优化模型, 对输气管道进行全程优化。

2) 季节不同, 天然气市场的需求量也会不同, 解决市场波动性的有效方式是建设储气库。储气库可以提高输气管道运行方案的灵活性, 优化模型会更加复杂, 包含储气库的长输管道运行优化问题亟待解决。

3) 新兴智能算法有独特的优点, 同时又有其不同的缺点, 将算法结合(如遗传算法和蚁群算法的融合)后用于输气管道运行优化是一个重要研究方向。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] 孙文瑜, 徐成贤. 最优化方法[M]. 高等教育出版社, 2004: 1-10.
- [3] 许萍, 武联中, 李著信, 等. 基于混合遗传算法的输气管网气站优化运行研究[J]. 微计算机信息, 2006, 22(8X): 121-123.

收稿日期 2016-05-15

(编辑 沙力妮)