



油气储运

Oil & Gas Storage and Transportation

ISSN 1000-8241, CN 13-1093/TE

《油气储运》网络首发论文

题目：天然气长输管网优化建模及求解研究进展
作者：周鹏，魏琪
收稿日期：2023-07-18
网络首发日期：2023-08-18
引用格式：周鹏，魏琪. 天然气长输管网优化建模及求解研究进展[J/OL]. 油气储运. <https://link.cnki.net/urlid/13.1093.TE.20230817.1148.002>



网络首发：在编辑部工作流程中，稿件从录用到出版要经历录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿等阶段。录用定稿指内容已经确定，且通过同行评议、主编终审同意刊用的稿件。排版定稿指录用定稿按照期刊特定版式（包括网络呈现版式）排版后的稿件，可暂不确定出版年、卷、期和页码。整期汇编定稿指出版年、卷、期、页码均已确定的印刷或数字出版的整期汇编稿件。录用定稿网络首发稿件内容必须符合《出版管理条例》和《期刊出版管理规定》的有关规定；学术研究成果具有创新性、科学性和先进性，符合编辑部对刊文的录用要求，不存在学术不端行为及其他侵权行为；稿件内容应基本符合国家有关书刊编辑、出版的技术标准，正确使用和统一规范语言文字、符号、数字、外文字母、法定计量单位及地图标注等。为确保录用定稿网络首发的严肃性，录用定稿一经发布，不得修改论文题目、作者、机构名称和学术内容，只可基于编辑规范进行少量文字的修改。

出版确认：纸质期刊编辑部通过与《中国学术期刊（光盘版）》电子杂志社有限公司签约，在《中国学术期刊（网络版）》出版传播平台上创办与纸质期刊内容一致的网络版，以单篇或整期出版形式，在印刷出版之前刊发论文的录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿。因为《中国学术期刊（网络版）》是国家新闻出版广电总局批准的网络连续型出版物（ISSN 2096-4188，CN 11-6037/Z），所以签约期刊的网络版上网络首发论文视为正式出版。

天然气管网优化建模及求解研究进展

周鹏^{1,2} 魏琪^{1,2}

1. 中国石油大学（华东）经济管理学院；2. 中国石油大学（华东）能源经济与政策研究院

摘要：天然气管网优化对于降低管网运营成本、提升天然气供应可靠性具有重要意义。将天然气管网优化模型分为基于物理属性与基于经济属性两类，系统总结回顾了天然气长输管网优化建模及求解的研究进展。现有研究多集中于解决特定阶段下单一属性的管网优化问题，但要提高管网的经济性、可靠性及可持续性，需要综合考虑经济属性与物理属性，并系统统筹设计优化与运行优化。当前，中国在天然气管网优化建模方面的研究主要集中在基于物理属性的建模方法上，未来还需关注天然气市场均衡模型在管网优化中的应用。在模型求解方面，总结了多种启发式算法。从管道安全优化、非稳态优化及市场均衡建模 3 个方面，对未来天然气管网优化建模的发展趋势进行了展望。

关键词：天然气管网；优化建模；天然气市场；均衡模型；算法

中图分类号：TE832

文献标识码：A

doi:

天然气在能源转型中扮演着重要角色，其相对较低的价格和为可再生能源提供备用供应的需求，推动了天然气消费的增长^[1]。据国际能源署（International Energy Agency, IEA）估计，到 2040 年，天然气将占据全球能源需求的四分之一，成为仅次于原油的第二大能源^[2]。管道是内陆与近岸天然气运输最经济且广泛的方式。根据 Statista 数据库统计^[3]，截至 2022 年 1 月，全球运营的天然气管道总数为 1 608 条，中国已成为世界上拥有运营天然气管道数量最多的国家。根据《中长期油气管网规划》，到 2025 年，中国天然气管网规划将达到 16.3×10^4 km。《“十四五”现代能源体系规划》进一步强调，要加快天然气长输管网设施建设，推进全国管网互联互通。然而，根据 Statista 数据库统计^[4]，中国天然气管道的平均每日配置容量（约 4.78×10^8 m³）与美国（约 22.40×10^8 m³）相比仍较低，表明尽管中国在天然气管道建设方面取得了一定成就，但管道利用效率仍较大有提升空间。

天然气长输管网优化旨在提高管网运营效率、降低建设运营成本、增强天然气供应可靠性。通过优化管网布局、参数配置、运营策略，可以实现天然气的高效输送及合理分配，进而推动天然气市场发展及价格市场化改革。此外，管网优化还可以增强天然气供应链的弹性和抗风险能力，以应对市场和环境的变化。管网优化在天然气管网的设计、运行方面发挥着重要作用。在设计方面，管网优化主要集中在管网结构布局、管道材料与尺寸选择、压气站配置等方面，其目标是以最小的投资成本优化管网输气容量^[5]、管网运行灵活性^[6]及管网容量扩展^[7]等。在运行方面，管网优化则考虑不同的目标，如运行成本最小化^[8]、交付能力最大化^[9]、线包最大化^[10]、温室气体减排最大化^[11]等，优化已有管道与压气站的运行策略。

针对天然气管网优化问题，国内外学者进行了大量的学术研究，大多聚焦于管网物理参数对优化问题的影响，忽略了一部分市场因素，即其他天然气市场主体的决策对天然气管网优化的影响。在此，增加考虑市场因素，将天然气管网优化模型分为基于物理属性、基于经济属性两类，并将天然气管网优化建模划分为前期投资建设、中期运行、后期扩展运行 3 个阶段。在此基础上，论述了中国天然气管网优化建模及求解的研究进展。最后，从管道安全、非稳态优化及市场均衡建模 3 个方面展望了未来管网优化建模的发展趋势。

1 天然气管网优化模型分类

根据不同的分类标准，天然气管网优化模型可以分为 4 类：①基于优化时间尺度，即是否考虑时间相关因素约束，分为静态优化模型、动态优化模型；②基于决策变量类型，分为连续变量（管道直径、压力等）模型、整数变量（管道布局、站点选择等）模型；③基于优化目标类型，分为单目标模型、多目标模型；④基于建模方法，分为线性规划模型、非线性规划模型。天然气管网优化研究往往以问题为导向，即

根据解决问题的实际需要构建优化模型，目的主要是通过优化管网布局（确定管道最优路径、压气站位置）与优化管道容量配置（确定管道直径、压气站总运行成本），以经济成本最小化、运输效率最大化等为目标，实现天然气管网的高效运输。基于此，将天然气管网优化模型按照物理属性、经济属性进行分类（图 1）。

1.1 基于物理属性的优化模型

天然气输气系统通常由气源、用户、管道、压气站组成（图 1）。天然气在管输过程中会与管道内壁发生摩擦，造成压力不断降低，因此，有必要设置压气站对天然气进行加压，以确保天然气顺利输送到下游用户。管道、压气站是天然气管网优化过程中的关键因素，故对管道、压气站的优化问题及优化模型进行梳理总结。

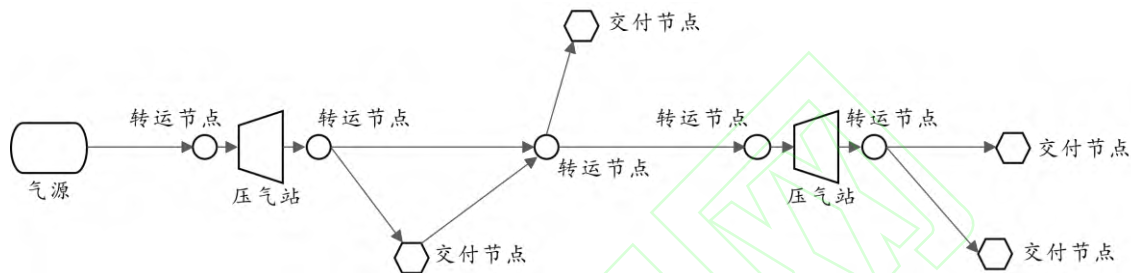


图 1 天然气管网结构简图

1.1.1 管道

从经济、环境、可靠性 3 方面考虑管道作为运输手段的优势，设计高效的天然气管网结构以期稳定天然气的生产与供应是天然气管网优化的主要目的。管道的建设往往伴随着非常高的投资成本，因此，管网优化问题通常以最小化投资成本与运营成本为目标，主要可以归纳为 4 类：管道布局结构优化、管道流量配置优化、管容配置优化及管道扩容优化等。

管道布局结构优化主要是考虑地形、障碍物等约束，建立线性或非线性规划模型，确定管道铺设位置及节点连接，优化管道的路线及长度以连接多个天然气生产设施与需求点。Robert 等^[12]最早提出采用混合整数非线性规划（Mixed Integer Nonlinear Programming, MINLP）模型解决天然气管道优化设计问题。在天然气管网优化过程中，常见的优化目标是经济成本最小化，不少学者还会考虑其他优化目标，如温室气体排放成本最小化^[13]、环境效益最大化^[14]、管输成本最小化^[15]等。

管道流量配置的主要目的是确定管道输气量与输气方向，常见的管道运行方案优化一般是在给定的输量、方向下进行的。为了使管网系统的能量消耗最小化^[16-17]，通过调整管道运行参数（压力、流量、温度、设备参数等）来确保用户需求^[18]，并在实现上述目标的前提下，尽量提高管网的输送能力。如 Zarei 等^[19]设计了某集成天然气管网优化模型，以经济成本最小化为优化目标对管道流量进行了优化。

为了应对天然气预测需求的增长，天然气运输公司需要有计划的不提高管道的运输能力。一定时间内，在保证用户需求量的情况下，确定要增加的最合理管道容量是管道优化的重要问题之一。在没有压气站的情况下，增加管容的唯一方法是铺设一条平行管道，如 Üster 等^[20]通过构建 MINLP 模型对已有管道的扩容问题进行优化研究。在有压气站的情况下，则可以在一定范围内增加管道压力，如 Kabirian 等^[21]提出一个非线性优化模型，通过对管道与压气站位置、压气站中压缩机组运行参数进行优化，实现以最低的运营成本完成最优天然气管网扩张决策的目标。很多学者认为，在最初管道设计阶段就应将管道扩容问题考虑在内，如 Mikolajková 等^[7]开发了一个多周期的 MINLP 模型，考虑到了将管网扩展到新的天然气接收

站的可能性。

1.1.2 压气站

涉及到压气站的天然气管网优化问题主要包括压气站的位置、数量、燃料成本、控制策略等方面的优化。合理地配置压气站位置与数量，可以在一定程度上利用其他条件优化压气站负荷分配，降低压气站内压缩机功率消耗^[9]，如 Hoppmann-Baum 等^[22]提出了一个 MINLP 模型，通过优化压气站位置与负荷分配来达到天然气管网投资成本的最小化。其次，为了控制压气站总运行成本，需要对压气站运行策略进行优化设计，如 Uraikul 等^[23]构建了一个压气站策略选择优化的混合整数线性规划（Mixed Integer Linear Programming, MILP）模型，将压气站容量、启停能耗作为决策变量，可为确定压气站最优控制方案提供决策支持。

天然气与管道内壁之间存在摩擦，因此需要压气站来稳定管道内压力以保证气体流动，而压气站的运行需要消耗管输天然气总量的 3%~5%，通过对管道运行的全局优化，可以使压气站总燃料消耗降低至少 20%^[24]。因此，压气站总燃料成本最小化（Fuel Cost Minimization Problem, FCMP）是天然气管网优化的一个重要目标，即在天然气供需量、物理设备参数的约束下，通过优化管网中每个压气站的压力、管道内气体流量来实现压气站总燃料成本最小化。然而，压气站总燃料成本最小化通常与其他优化目标构成多目标优化模型，如 Arya 等^[16-17]将压气站总燃料成本最小化与管道输气量最大化作为双优化目标；Zhou 等^[25]建立了包括压气站总能耗成本最小化、管道运输费用最小化以及两者费用之和最小化共 3 个目标函数的管网优化模型。

1.2 基于经济属性的优化模型

天然气管网是天然气市场不可或缺的一部分，管道与其他市场主体之间的相互依赖增加了管网优化决策的复杂性。最早由 Mathiesen 等^[26]提出的均衡模型考虑了天然气市场结构，是从经济角度解决天然气管网问题最常用的方法。该模型在解决天然气管网优化问题上的独特性在于其能够结合天然气市场多个主体的决策、管网运输多阶段扩张、需求的季节性差异以及根据 Nash-Cournot 理论的市场化特征描述等多方面因素。基于经济属性的优化模型可分为 3 类：自由化贸易分析的天然气市场系统（Gas market System for Trade Analysis in a Liberalizing Europe, GASTALE）模型、世界天然气模型（World Gas Model, WGM）及其他天然气市场模型。

1.2.1 GASTALE 模型

基于连续寡头垄断视角下的 GASTALE 模型最早是由 Boots 等^[27]提出，后来被广泛应用到欧盟委员会的多项供应安全问题与基础设施研究当中。Oostvoorn 等^[28]运用该模型评估了欧盟至 2030 年的天然气基础设施需求，并讨论了影响最优投资方案实施的经济因素与市场监管因素。Egging 等^[29]在 GASTALE 模型上加入了天然气需求的季节性特征、天然气存储部门以及管网的运输能力等新要素，用此模型分析天然气管道容量对天然气市场的重要性。在上述研究的基础上，Lise 等^[30]采用 GASTALE 模型，通过设计不同的政策情景对天然气供应安全情况进行仿真分析，结果表明，为了提高天然气供应安全能力，并应对天然气季节性需求的变化，欧洲需要对天然气运输管廊进行大量的投资。除此之外，该学者的研究团队还对 GASTALE 模型做了进一步优化^[31]，用来分析影响天然气管道投资的市场因素。

1.2.2 WGM

Egging 等^[32]为欧洲天然气市场提出了一个比 GASTALE 模型更详细的 WGM。以此为基础，Holz 等^[33]构建了一个多周期 WGM，通过设计多种低碳减排情景，对欧洲天然气基础设施水平进行分析。结果表明，

无论在何种减排情境下，欧洲天然气基础设施的发展水平均可满足天然气在欧洲发展的需求。与 WGM 相似的是全球天然气模型（Global Gas Model, GGM），但 GGM 更符合分析随机情景问题的特点与作用，如 Egging^[34]通过 GGM 研究了对冲投资对基础设施投资时机、最优扩建容量的影响。

1.2.3 其他天然气市场模型

天然气市场模型具有地域异质性，许多学者在 GASTALE 模型和 WGM 的基础上结合其当地天然气市场特点构建不同形式的天然气市场模型。如 Gabriel 等^[35]在 GASTALE 模型的基础上，根据北美天然气市场的特点，加入了管道运营商，并分析了管道拥挤成本在天然气管网容量配置中的作用。Egging^[36]将 LNG 接收站、再气化站等相关运营主体加入到 WGM 中，在更细化的天然气市场模型中定量研究天然气管网最优扩容方案。Feijoo 等^[37]提出了北美天然气模型（North American Natural Gas Model, NANGAM），用来研究墨西哥能源改革路径，并在该模型中考虑了管道、压气站等基础设施扩张的内生性。Avraam 等^[38]运用 NANGAM 分析了在资源可用性、技术进步、全球原油价格的 3 种不同假设下，北美天然气综合市场与基础设施的发展。

天然气管网优化问题可以划分为前期投资建设、中期运行、后期扩展运行 3 个阶段。在前期投资建设阶段，首先运用基于经济属性的优化模型综合考虑市场对天然气管网运输容量的需求提出天然气管网规划方案。基于该规划方案再结合基于物理属性的优化模型，对管道布局、管道半径及压气站等相关参数进行优化设计，这样可以确保管网在建设初期就具备高效运行与满足市场需求的能力。在中期运行阶段，基于物理属性的优化模型变得十分关键。通过优化压气站的运行策略、管网流量配置及其他相关参数，可以使管网运行成本最小化，应对管网运行中的需求波动，使管网能够灵活地应对市场变化进而提高运行效率，确保天然气的稳定供应。在后期扩展运行阶段，再次应用基于经济属性的优化模型对管道扩容进行定量分析，并结合基于物理属性的优化模型，对管网的扩容需求进行评估，优化管网压力、输送能力等关键参数，以助力管网的可持续发展。

2 中国天然气长输管网优化建模的研究进展

相对欧洲、北美等国家和地区，中国天然气管网的发展起步较晚，随着天然气管网建设运行规模的增加，油气与管道领域学者开始关注天然气管网优化问题的研究。中国天然气管网优化主要是以管网流量配置优化、压气站运行策略优化为主，其主要目的是在保证输气量的前提下优化天然气管网输气方案，降低管网运行成本。为此，对中国天然气管网优化模型的研究文献进行梳理。

管道运输首先要保证天然气供应的稳定性^[39]，在进行管道流量配置优化时要以保证需求稳定为前提^[40]，Su 等^[41]通过构建天然气供应短缺风险最小化、电力需求最小化的双目标优化模型，对天然气管网运营策略进行优化。在保证供应稳定的基础上，天然气市场的发展对天然气管网提出了更高要求，即在满足基本运输需求的情况下还需实现储气功能，如：常海军等^[42]运用动态规划法求解管道能耗最小目标下的最优管道存量，以满足管网实际运行中稳定供气与节能降耗的要求；Chen 等^[43]通过构建多目标非线性优化模型来解决以最小的运营成本实现最大化管道储气量的问题。此外，由于受到管道材质、结构等因素的约束，所有的天然气管网优化问题都必须考虑管道的流量约束^[44-46]，如基础的管道流量阈值约束，基于管道长度、管道直径、摩擦系数等的管道压降约束，基于管道物理环境的管道温降约束等。

压气站运行策略优化的主要目的是降低天然气管网的运维成本，而压气站内压缩机的燃料成本是运维成本的主要组成部分。有学者通过优化压气站内压缩机质量流量、压气站压力配置等来实现压气站总燃料成本最小化^[47-48]，如张俊等^[48]通过构建 MINLP 模型，以全线管道总能耗最小化为目标函数，对压气站内

压缩机组合运行方式、压缩机的通过流量及压气站压力配置进行优化。

除了优化压气站的流量、压力配置，其运行决策优化也是降低天然气管网运维成本的有效方法，压气站运行决策主要包括压气站内压缩机数量配置、压缩机开关状态设置等^[49]。尽管天然气相对煤炭、石油燃烧时的 CO₂ 排放量低，但是从全供应链的角度其低碳性还存在较大争议，因此，降低压气站总能耗有助于实现天然气的绿色发展。优化压气站的压力配置、提高压气站内的压缩机功率是降低压气站总能耗的常用方法^[50-51]，如刘恩斌等^[50]建立了以压气站总能耗最低为目标函数的管道运行优化模型，对压气站内压缩机运行数量、压缩机压力配置进行优化，并将该模型应用于解决西气东输一线管道优化问题中，大幅降低了西气东输一线管道的总能耗。

非线性规划模型是中国天然气管网优化的主流模型，其更贴合实际问题的特点。然而中国在天然气市场均衡优化方面的研究更多集中在天然气定价、补贴及市场化改革等方面，对于管网、加气站等基础设施的优化研究相对较少。随着天然气市场化改革政策的推进以及第三方主体准入政策的实施，可充分借鉴欧洲、北美等地天然气市场均衡模型的研究经验，以期在理解市场供需关系、优化资源配置及提高市场效率等方面为中国天然气市场化改革提供指导。如：Xu 等^[52]研究了市场化改革对中国天然气管网结构的影响，结果表明，中国天然气管网的集中管输会导致天然气输气结构发生变化，需要重新合理评估、优化长输天然气管网容量；Gong 等^[53]运用天然气市场均衡模型分析了中国天然气管网基础设施完善程度对天然气市场的影响，结果表明，天然气管网互联互通水平是促进天然气市场化改革的重要因素。

3 求解方法

动态规划法、广义约简梯度法、线性规划法是求解天然气管网优化模型的 3 种典型确定性方法，但随着问题的复杂化，优化模型主要以非线性为主。上述 3 种方法在求解非线性模型时都出现了不同的问题^[54]，如：动态规划法的求解时间非常长，无法求解大型、复杂的管网优化问题；梯度搜索容易陷入局部最优的困境；线性规划方法适用的范围较小且对初始值设置的要求较高。而启发式算法在求解复杂的非线性问题上具有计算速度快、求解精度高、适用范围广等优势，可以弥补确定性方法在求解过程中的不足，因此，被广泛应用于解决大型管网优化问题中。主流的启发式算法主要包括遗传（Genetic Algorithm, GA）算法、粒子群优化（Particle Swarm Optimization, PSO）算法、模拟退火（Simulated annealing, SA）算法、蚁群优化（Ant Colony Optimization, ACO）算法、差分进化（Differential Evolution, DE）算法。

3.1 GA 算法

GA 算法是基于达尔文自然选择、遗传学进化思想的元启发式搜索算法^[55]，其应用范围最广，多用于解决关于压气站总功率、管网结构、压气站总燃料成本等方面的天然气管网优化问题。Goldberg^[56]最早将 GA 算法应用于解决天然气管道优化问题，后又扩展到单线管道的瞬态优化^[57]。基于 Goldberg 的成果，Srinivas 等^[58]提出的自适应遗传算法（Adaptive Genetic Algorithm, AGA），其收敛性能得到了显著提高。Hu 等^[59]提出了一种新的非支配排序遗传（Non-dominated Sorting Genetic Algorithm, NSGA-II）算法对多目标 MINLP 模型进行求解，研究表明，该方法在解决不确定性多目标优化问题方面具有优势，是求解天然气管道多目标优化模型最高效的算法。

3.2 PSO 算法

PSO 算法是一种进化优化算法，其灵感来自于生物在鸟群或鱼群中的运动^[60]，其全局搜索能力可以在解决天然气管网优化问题中实现较高的计算速度与更精确的计算结果。李立刚等^[47]采用 PSO 算法求解以松弛气体流动方程为约束的天然气管网压气站燃料成本最小化问题，在相同的初始条件与精度要求下，找

到了更高质量的解。Zheng 等^[61]提出了一种改进的 PSO 算法来解决天然气管网压气站内压缩机燃料成本问题, 结果表明, 该算法在保持相似优化结果的前提下具有较高的计算效率。Wu 等^[62]利用惯性自适应粒子群优化 (Inertial adaptive particle swarm optimization, IAPSO) 算法求解了一个考虑最大运行效益与最大供气量的双目标优化模型, 结果表明, 该算法不仅收敛速度更快, 其解的质量也更高。

3.3 SA 算法

在冶金技术中, 退火是一种对材料进行加热与控制冷却的过程, 目的是改变晶体的性质, 减少材料的缺陷^[63]。SA 算法在天然气管网运行优化中被用于解决组合优化与设计问题, 随机搜索与全局优化的优势较为明显。该算法是 Khachaturyan 等^[64]于 1979 年提出的, 是以概率搜索的方式逼近指定函数的全局最优。Kirkpatrick 等^[65]运用 SA 算法为大型复杂系统的组合优化提供了一个有用的框架, 后来 Coli 等^[66]将该算法用于实时管道系统设计, 直至 2007 年 SA 算法才被应用于天然气管道的运行优化, 如 Mahlke 等^[67]运用 SA 算法求解以压气站总能耗最小化为目标的天然气管网优化问题, 发现 SA 算法可以充分发挥灵活性高的优势, 很好地解决同时包括连续变量与离散变量的优化模型。

3.4 ACO 算法

ACO 算法是 Dorigo 于 1992 年提出的一种受自然启发的优化方法^[68], 其在天然气管道优化问题中的应用较早, 虽然计算结果与动态规划算法的相对误差较小, 但计算速度更快。Cheboubi 等^[69]最早利用蚁群算法解决天然气管道运行优化问题。Arya 等^[70]应用原始 ACO 算法求解了一个压气站总燃料成本最小化问题, 与广义梯度法相比, 该算法在天然气流量固定的情况下可以得到更高质量的解。ACO 算法的计算结果与动态规划算法的相对误差一般小于 1%, 但 ACO 算法的计算速度比动态规划算法快 14 倍以上。虽然 ACO 算法在计算速度上优势明显, 但该算法仅适用于较简单的天然气管道优化问题, 在复杂天然气管网系统中的应用较少。

3.5 DE 算法

DE 算法与 GA 算法类似, 是一种由突变、交叉及选择 3 种操作组合而成的进化算法。DE 算法在天然气管网优化问题中多用于求解压气站总燃料成本最小化问题, 在处理包括大量离散变量、连续变量的复杂优化模型方面具有一定的优势。DE 算法一般与其他算法结合使用, 如: Malamura 等^[71]将 DE 算法与 GA 算法相结合, 求解天然气管网压气站总燃料成本最小化问题, 降低了优化问题的复杂性; Zhou 等^[72]将 DE 算法与 PSO 算法相结合, 求解以总能耗最小为目标的管道优化模型, 减小了结果的相对误差, 提高了了解的精确度。

4 未来展望

通过对天然气管网优化建模及求解算法相关研究的梳理, 将优化模型从物理属性、经济属性两方面进行了分类。尽管国内外已经有众多学者对天然气管网优化建模做了大量研究, 但随着天然气在能源转型中的作用越来越重要, 未来对天然气管网优化建模也提出了更高的要求, 优化模型需进一步发展以满足解决实际问题的需求。

目前, 天然气管网优化模型主要集中在解决控制成本、优化压气站能耗及储气能力最大化等问题上, 却很少关注管道安全问题。将管道安全作为目标函数纳入优化模型中, 可以实现管道安全性与经济性的双重优化。通过在优化过程中权衡管道安全与其他指标 (成本、能耗等) 之间的关系, 寻找最优的管道运行策略, 既保证了管道运行的安全可靠, 又提高了管道运输的经济效益与可持续性。

当前的天然气管网优化模型主要关注天然气管网的稳态优化问题, 而实际运行中面临着各种挑战, 如

天气变化、季节需求波动、管道损耗、供需不平衡等因素均会导致管道系统的输气任务发生变化，需要对管网进行动态调整与优化。相比稳态优化，非稳态优化考虑了时间因素与供需的动态特征，能够更好地应对实际运行中的不确定性。此外，非稳态优化还可以考虑紧急情况（供应中断、管道故障等）下的应急策略，求解其快速应对方案，以确保管道系统的安全性与可靠性。

从市场均衡模型角度出发，天然气管网优化建模可以结合需求响应、天然气交易模型及灵活调度策略等方面。首先，随着天然气市场的变化与供需波动，天然气管网的优化问题可以结合需求响应策略，通过考虑不同需求模式与天然气需求弹性，调整管网运输能力、输送方案，以满足市场需求的变化。其次，将天然气价格、供给、需求等因素纳入管网优化模型中，优化管网资源配置，进而提高天然气市场效率。再次，市场均衡模型可以结合灵活的调度策略，以应对天然气市场的季节性与日变化特征。通过优化天然气的储存、调度方案，管网可以更好地应对市场需求的变化，提高天然气供应的稳定性。

5 结束语

天然气管网优化建模需要综合考虑其经济属性与物理属性，通过设计优化与运行优化，提高管网的经济性、可靠性及可持续性。这种综合的优化方法可以为天然气管网的规划、建设及运营提供科学依据，并为天然气产业的发展与市场需求的满足提供支持。未来的研究可以进一步探索更加精细、全面的优化建模方法，以应对管网的复杂性和多样性，推动天然气管网优化模型的发展。

参考文献

- [1]Energy Information Administration.International Energy Outlook 2021[R]. Washington: EIA 2021: 16-20.
- [2]International Energy Agency.World Energy Outlook 2022[R]. Paris: IEA, 2022: 446-447.
- [3]STATISTA.Number of natural gas pipelines worldwide as of January 2022, by project status[R]. Hamburg: Statista, 2022: 1.
- [4]STATISTA.Daily capacity of operational and planned gas pipelines worldwide as of December 2020, by country[R]. Hamburg: Statista, 2022:1.
- [5] DA SILVA ALVES F, DE SOUZA J N M, COSTA A L H. Multi-objective design optimization of natural gas transmission networks[J]. Computers & Chemical Engineering, 2016, 93: 212-220. DOI: 10.1016/j.compchemeng.2016.06.006.
- [6] FODSTAD M, MIDTHUN K T, TOMASGARD A. Adding flexibility in a natural gas transportation network using interruptible transportation services[J]. European Journal of Operational Research, 2015, 243(2): 647-657. DOI: 10.1016/j.ejor.2014.12.010.
- [7] MIKOLAJKOVÁ M, HAIKARAINEN C, SAXÉN H, PETTERSSON F. Optimization of a natural gas distribution network with potential future extensions[J]. Energy, 2017, 125: 848-859. DOI: 10.1016/j.energy.2016.11.090.
- [8] MISRA S, FISHER M W, BACKHAUS S, BENT R, CHERTKOV M, PAN F. Optimal compression in natural gas networks: a geometric programming approach[J]. IEEE Transactions on Control of Network Systems, 2015, 2(1): 47-56. DOI: 10.1109/TCNS.2014.2367360.
- [9] FASIHZADEH M, SEFTI M V, TORBATI H M. Improving gas transmission networks operation using simulation algorithms: case study of the National Iranian Gas Network[J]. Journal of Natural Gas Science and Engineering, 2014, 20: 319-327. DOI: 10.1016/j.jngse.2014.07.018.
- [10] R ÓS-MERCADO R Z, BORRAZ-SÁNCHEZ C. Optimization problems in natural gas transportation systems: a state-of-the-art review[J]. Applied Energy, 2015, 147: 536-555. DOI: 10.1016/j.apenergy.2015.03.017.
- [11] YANG X Q, LI H L, WALLIN F, YU Z X, WANG Z. Impacts of emission reduction and external cost on natural gas distribution[J]. Applied Energy, 2017, 207: 553-561. DOI: 10.1016/j.apenergy.2017.06.005.
- [12] TSAL R J, GORDON E, SIMPSON K O, OLSON R R. Optimal gas pipeline design via dynamic programming with variable stages[C]. New Orleans: PSIG Annual Meeting, 1986: PSIG-8601.
- [13] ZAMANIAN M R, SADEH E, AMINI SABEGH Z, EHTESHAM RASI R. A fuzzy goal-programming model for optimization of sustainable supply chain by focusing on the environmental and economic costs and revenue: a case study[J]. Advances in Mathematical Finance and Applications, 2019, 4(1): 103-123. DOI: 10.22034/amfa.2019.578990.1134.

- [14] BAZYAR A, ZARRINPOOR N, SAFAVIAN A. Optimal design of a sustainable natural gas supply chain network under uncertainty[J]. Chemical Engineering Research and Design, 2021, 176: 60-88. DOI: 10.1016/j.cherd.2021.09.006.
- [15] HAMEDI M, ZANJIRANI FARAHANI R, HUSSEINI M M, ESMAEILIAN G R. A distribution planning model for natural gas supply chain: a case study[J]. Energy Policy, 2009, 37(3): 799-812. DOI: 10.1016/j.enpol.2008.10.030.
- [16] ARYA A K, HONWAD S. Multiobjective optimization of a gas pipeline network: an ant colony approach[J]. Journal of Petroleum Exploration and Production Technology, 2018, 8(4): 1389-1400. DOI: 10.1007/s13202-017-0410-7.
- [17] ARYA A K. Optimal operation of a multi-distribution natural gas pipeline grid: an ant colony approach[J]. Journal of Petroleum Exploration and Production Technology, 2021, 11(10): 3859-3878. DOI: 10.1007/s13202-021-01266-3.
- [18] CHEN Q, ZUO L L, WU C C, LI Y, HUA K X, MEHRTASH M, et al. Optimization of compressor standby schemes for gas transmission pipeline systems based on gas delivery reliability[J]. Reliability Engineering & System Safety, 2022, 221: 108351. DOI: 10.1016/j.ress.2022.108351.
- [19] ZAREI J, AMIN-NASERI M R. An integrated optimization model for natural gas supply chain[J]. Energy, 2019, 185: 1114-1130. DOI: 10.1016/j.energy.2019.07.117.
- [20] ÜSTER H, DILAVEROĞLU Ş. Optimization for design and operation of natural gas transmission networks[J]. Applied Energy, 2014, 133: 56-69. DOI: 10.1016/j.apenergy.2014.06.042.
- [21] KABIRIAN A, HEMMATI M R. A strategic planning model for natural gas transmission networks[J]. Energy Policy, 2007, 35(11): 5656-5670. DOI: 10.1016/j.enpol.2007.05.022.
- [22] HOPPMANN-BAUM K, HENNINGS F, LENZ R, GOTZES U, HEINECKE N, SPRECKELSEN K, et al. Optimal operation of transient gas transport networks[J]. Optimization and Engineering, 2021, 22(2): 735-781. DOI: 10.1007/s11081-020-09584-x.
- [23] URAIKUL V, CHAN C W, TONTIWACHWUTHIKUL P. A mixed-integer optimization model for compressor selection in natural gas pipeline network system operations[J]. Journal of Environmental Informatics, 2004, 3(1): 33-41. DOI: 10.3808/jei.200400025.
- [24] KAZDA K, LI X. Approximating nonlinear relationships for optimal operation of natural gas transport networks[J]. Processes, 2018, 6(10): 198. DOI: 10.3390/pr6100198.
- [25] ZHOU J, PENG J H, LIANG G C, PENG C. Operation optimization of multiroute cyclic natural gas transmission network under different objectives[J]. Journal of Pipeline Systems Engineering and Practice, 2022, 13(1): 04021079. DOI: 10.1061/(ASCE)PS.1949-1204.0000628.
- [26] EGGING R G, GABRIEL S A. Examining market power in the European natural gas market[J]. Energy policy, 2006, 34(17): 2762-2778. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2005.04.018>.
- [27] BOOTS M G, RIJKERS F A M, HOBBS B F. Trading in the downstream European gas market: a successive oligopoly approach[J]. The Energy Journal, 2004, 25(3): 73-102.
- [28] Energieonderzoek Centrum Nederland, VAN OOSTVOORN F, DE JOODE J, LISE W. Optimal gas corridors and infrastructure between Eu and its neighbouring countries to secure supply in Europe[C]. Florence: 9th IAEE European Energy Conference, 2007: ECN-M--07-101.
- [29] EGGING R G, GABRIEL S A. Examining market power in the European natural gas market[J]. Energy Policy, 2006, 34(17): 2762-2778. DOI: 10.1016/j.enpol.2005.04.018.
- [30] LISE W, HOBBS B F, VAN OOSTVOORN F. Natural gas corridors between the EU and its main suppliers: Simulation results with the dynamic GASTALE model[J]. Energy Policy, 2008, 36(6): 1890-1906. DOI: 10.1016/j.enpol.2008.01.042.
- [31] LISE W, HOBBS B F. Future evolution of the liberalised European gas market: simulation results with a dynamic model[J]. Energy, 2008, 33(7): 989-1004. DOI: 10.1016/j.energy.2008.02.012.
- [32] EGGING R, GABRIEL S A, HOLZ F, ZHUANG J F. A complementarity model for the European natural gas market[J]. Energy Policy, 2008, 36(7): 2385-2414. DOI: 10.1016/j.enpol.2008.01.044.
- [33] HOLZ F, RICHTER P M, EGGING R. The role of natural gas in a low-carbon Europe: infrastructure and supply security[J]. The Energy Journal, 2016, 37(1): SI3. DOI: 10.5547/01956574.37.SI3.fhol.
- [34] EGGING R. Benders decomposition for multi-stage stochastic mixed complementarity problems – applied to a global natural gas market model[J]. European Journal of Operational Research, 2013, 226(2): 341-353. DOI: 10.1016/j.ejor.2012.11.024.

- [35] GABRIEL S A, KIET S, ZHUANG J F. A mixed complementarity-based equilibrium model of natural gas markets[J]. *Operations Research*, 2005, 53(5): 799-818. DOI: 10.1287/opre.1040.0199.
- [36] EGGING R G. Multi-period natural gas market modeling-applications, stochastic extensions and solution approaches[D]. College Park: University of Maryland, 2010.
- [37] FEIJOO F, HUPPMANN D, SAKIYAMA L, SIDDIQUI S. North American natural gas model: impact of cross-border trade with Mexico[J]. *Energy*, 2016, 112: 1084-1095. DOI: 10.1016/j.energy.2016.06.133.
- [38] AVRAAM C, CHU D, SIDDIQUI S. Natural gas infrastructure development in North America under integrated markets[J]. *Energy Policy*, 2020, 147: 111757. DOI: 10.1016/j.enpol.2020.111757.
- [39] 艾慕阳, 柳建军, 李博, 刁洪涛, 张俊, 康阳.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. DOI: 10.6047/j.issn.1000-8241.2015.06.001.
- AI M Y, LIU J J, LI B, DIAO H T, ZHANG J, KANG Y. Current status and prospect of steady operation optimization techniques for gas pipeline network[J]. *Oil & Gas Storage and Transportation*, 2015, 34(6): 571-575.
- [40] 虞维超, 李熠辰, 王珩宇, 赵洪洋, 王子轩, 林聿明, 等.考虑需求侧影响的天然气管网事故工况流量分配方法[J].*油气储运*, 2023, 42 (2) : 223-230. DOI: 10.6047/j.issn.1000-8241.2023.02.012.
- YU W C, LI Y C, WANG H Y, ZHAO H Y, WANG Z X, LIN Y M, et al. Gas flow allocation method for natural gas pipeline network under accident conditions considering demand side effect[J]. *Oil & Gas Storage and Transportation*, 2023, 42(2): 223-230.
- [41] SU H, ZIO E, ZHANG J J, LI X Y, CHI L X, FAN L, et al. A method for the multi-objective optimization of the operation of natural gas pipeline networks considering supply reliability and operation efficiency[J]. *Computers & Chemical Engineering*, 2019, 131: 106584. DOI: 10.1016/j.compchemeng.2019.106584.
- [42] 常海军, 戴征宇, 丁媛.输气管道的管存量优化控制[J].*天然气工业*, 2019, 39 (3) : 102-108. DOI: 10.3787/j.issn.1000-0976.2019.03.013.
- CHANG H J, DAI Z Y, DING Y. Optimized control of line pack of gas pipeline[J]. *Natural Gas Industry*, 2019, 39(3): 102-108.
- [43] CHEN Q, WU C C, ZUO L L, MEHRTASH M, WANG Y X, BU Y R, et al. Multi-objective transient peak shaving optimization of a gas pipeline system under demand uncertainty[J]. *Computers & Chemical Engineering*, 2021, 147: 107260. DOI: 10.1016/j.compchemeng.2021.107260.
- [44] 张晴, 陈亮, 艾文宝, 寇彩霞.天然气管网稳态运行优化模型的非线性界增强方法[J/OL].*运筹学学报*: 1-11[2023-07-12].<http://kns.cnki.net/kcms/detail/31.1732.O1.20230530.1026.002.html>.
- ZHANG Q, CHEN L, AI W B, KOU C X. A nonlinear bound strengthening method for the steady-state operation optimization model of gas pipeline networks[J/OL]. *Operations Research Transactions*: 1-11[2023-07-12].
<http://kns.cnki.net/kcms/detail/31.1732.O1.20230530.1026.002.html>.
- [45] 黄亚魁, 李博, 康阳, 戴戡虹, 柳建军.天然气稳态运行优化的混合整数模型及其算法[J].*运筹学学报*, 2017, 21 (2) : 13-23. DOI: 10.15960/j.cnki.issn.1007-6093.2017.02.002.
- HUANG Y K, LI B, KANG Y, DAI Y H, LIU J J. A mixed integer model and an algorithm for steady-state gas network optimization[J]. *Operations Research Transactions*, 2017, 21(2): 13-23.
- [46] 杨毅, 刁洪涛, 向敏, 孙晓波, 柳建军.基于动态规划和黄金分割法的环状天然气管网运行优化[J].*天然气工业*, 2020, 40 (2) : 129-134. DOI: 10.3787/j.issn.1000-0976.2020.02.015.
- YANG Y, DIAO H T, XIANG M, SUN X B, LIU J J. Operation optimization of a looped natural gas pipeline network based on dynamic programming and the golden section method[J]. *Natural Gas Industry*, 2020, 40(2): 129-134.
- [47] 李立刚, 张朝晖, 戴永寿, 孙伟峰, 董超群.基于改进模式搜索算法的天然气管网运行优化[J]. *中国石油大学学报(自然科学版)*, 2012, 36 (4) : 139-143. DOI: 10.3969/j.issn.1673-5005.2012.04.026.
- LI L G, ZHANG Z H, DAI Y S, SUN W F, DONG C Q. Operation optimization based on improved pattern search algorithm in gas transmission networks[J]. *Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science)*, 2012, 36(4): 139-143.
- [48] 张俊, 李博, 柳建军, 康阳.输气管道运行优化算法适性研究[J].*计算机仿真*, 2016, 33(1): 369-372. DOI: 10.3969/j.issn.1006-9348.2016.01.080.
- ZHANG J, LI B, LIU J J, KANG Y. Adaptability of algorithms in natural gas pipeline operation optimization problem[J]. *Computer Simulation*, 2016, 33(1): 369-372.

- [49] 马越, 寇彩霞, 陈亮, 艾文宝. 多气源天然气管网运行优化问题的混合整数规划模型及其算法[J]. 系统科学与数学, 2023, 43 (2) : 493-504. DOI: 10.12341/jssms21529.
- MA Y, KOU C X, CHEN L, AI W B. A mixed integer programming model and an algorithm for optimal operation of multi-source gas pipeline networks[J]. Journal of Systems Science and Mathematical Sciences, 2023, 43(2): 493-504.
- [50] 刘恩斌, 匡建超, 吕留新, 刘渊, 张璐. 大型天然气管道稳态运行优化研究[J]. 西南石油大学学报(自然科学版), 2019, 41 (5) : 150-160. DOI: 10.11885/j.issn.1674-5086.2018.12.12.01.
- LIU E B, KUANG J C, LYU L X, LIU Y, ZHANG L. Optimization of steady operation of large scale natural gas pipelines[J]. Journal of Southwest Petroleum University (Science & Technology Edition), 2019, 41(5): 150-160.
- [51] 杜培恩, 陈新果, 李欣泽, 李晓平. 基于动态规划法与改进遗传算法的管网稳态运行优化[J]. 油气储运, 2018, 37 (3) : 285-290. DOI: 10.6047/j.issn.1000-8241.2018.03.008.
- DU P E, CHEN X G, LI X Z, LI X P. Steady-state operation optimization of pipeline network based on dynamic programming method and advanced genetic algorithm[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2018, 37(3): 285-290.
- [52] XU J, HALLACK M, VAZQUEZ M. Applying a third party access model for China's gas pipeline network: an Independent pipeline operator and congestion rent transfer[J]. Journal of Regulatory Economics, 2017, 51(1): 72-97. DOI: 10.1007/s11149-017-9316-z.
- [53] GONG C Z, WU D S, GONG N J, QI R. Multi-agent mixed complementary simulation of natural gas upstream market liberalization in China[J]. Energy, 2020, 200: 117535. DOI: 10.1016/j.energy.2020.117535.
- [54] ARYA A K. A critical review on optimization parameters and techniques for gas pipeline operation profitability[J]. Journal of Petroleum Exploration and Production Technology, 2022, 12(11): 3033-3057. DOI: 10.1007/s13202-022-01490-5.
- [55] KONAK A, COIT D W, SMITH A E. Multi-objective optimization using genetic algorithms: a tutorial[J]. Reliability Engineering & System Safety, 2006, 91(9): 992-1007. DOI: 10.1016/j.res.2005.11.018.
- [56] GOLDBERG D E. Computer-aided pipeline operation using genetic algorithms and rule learning. PART I: Genetic algorithms in pipeline optimization[J]. Engineering with Computers, 1987, 3(1): 35-45. DOI: 10.1007/BF01198147.
- [57] GOLDBERG D E. Computer-aided pipeline operation using genetic algorithms and rule learning. PART I: Genetic algorithms in pipeline optimization[J]. Engineering with Computers, 1987, 3(1): 35-45. DOI: 10.1007/BF01198147.
- [58] SRINIVAS M, PATNAIK L M. Adaptive probabilities of crossover and mutation in genetic algorithms[J]. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, 1994, 24(4): 656-667. DOI: 10.1109/21.286385.
- [59] HU Y, BIE Z H, DING T, LIN Y L. An NSGA-II based multi-objective optimization for combined gas and electricity network expansion planning[J]. Applied Energy, 2016, 167: 280-293. DOI: 10.1016/j.apenergy.2015.10.148.
- [60] KENNEDY J, EBERHART R. Particle swarm optimization[C]. Perth: Proceedings of ICNN' 95-International Conference on Neural Networks, 1995: 1942-1948.
- [61] ZHENG Z W, WU C C. Power optimization of gas pipelines via an improved particle swarm optimization algorithm[J]. Petroleum Science, 2012, 9(1): 89-92. DOI: 10.1007/s12182-012-0187-8.
- [62] WU X, LI C J, JIA W L, HE Y F. Optimal operation of trunk natural gas pipelines via an inertia-adaptive particle swarm optimization algorithm[J]. Journal of Natural Gas Science and Engineering, 2014, 21: 10-18. DOI: 10.1016/j.jngse.2014.07.028.
- [63] LAARHOVEN P J M, AARTS E H L. Simulated annealing: theory and applications[M]. Dordrecht: Springer, 1987: 671.
- [64] KHACHATURYAN A G, SEMENOVSKAYA S V, VAĬNSHTEĬN B K. Statistical-thermodynamic approach to determination of structure amplitude phases[J]. Soviet Physics, Crystallography, 1979, 24(5): 519-524.
- [65] KIRKPATRICK S, GELATT C D, Jr, VECCHI M P. Optimization by simulated annealing[J]. Science, 1983, 220(4598): 671-680. DOI: 10.1126/science.220.4598.671.
- [66] COLI M, PALAZZARI P. Real time pipelined system design through simulated annealing[J]. Journal of Systems Architecture, 1996, 42(6/7): 465-475. DOI: 10.1016/S1383-7621(96)00034-3.
- [67] MAHLKE D, MARTIN A, MORITZ S. A simulated annealing algorithm for transient optimization in gas networks[J]. Mathematical Methods of Operations Research, 2007, 66(1): 99-115. DOI: 10.1007/s00186-006-0142-9.
- [68] WU X, LI C J, HE Y F, JIA W L. Operation optimization of natural gas transmission pipelines based on stochastic optimization algorithms: a review[J]. Mathematical Problems in Engineering, 2018, 2018: 1267045. DOI: 10.1155/2018/1267045.

- [69] CHEBOUBA A, YALAOUI F, AMODEO L, SMATI A, TAIRI A. New method to minimize fuel consumption of gas pipeline using ant colony optimization algorithms[C]. Troyes: 2006 International Conference on Service Systems and Service Management, 2006: 947-952.
- [70] ARYA A K, HONWAD S. Modeling, simulation, and optimization of a high-pressure cross-country natural gas pipeline: application of an ant colony optimization technique[J]. Journal of Pipeline Systems Engineering and Practice, 2016, 7(1): 04015008. DOI: 10.1061/(ASCE)PS.1949-1204.0000206.
- [71] MALAMURA E, MURATA T. Hybrid system modeling and operation schedule optimization for gas transportation network based on combined method of DE, GA and hybrid petri net[C]. Kumamoto: 2016 5th IIAI International Congress on Advanced Applied Informatics (IIAI-AAI), 2016: 1032-1035.
- [72] ZHOU M, ZHANG Y, JIN S J. Dynamic optimization of heated oil pipeline operation using PSO - DE algorithm[J]. Measurement, 2015, 59: 344-351. DOI: 10.1016/j.measurement.2014.09.071.

(收稿日期: 2023-07-18; 修回日期: 2023-07-26; 编辑: 张雪琴)

基金项目: 国家自然科学基金项目“城市能源系统低碳转型的驱动机制及政策研究”, 71934007。

作者简介: 周鹏, 男, 1978年生, 教授, 博士生导师, 2008年博士毕业于新加坡国立大学工业与系统工程专业, 现主要从事能源经济与管理, 碳减排政策建模、效率与生产率分析等方面的研究工作。地址: 山东省青岛市黄岛区长江西路66号, 266580。电话: 0532-86983298。Email: pzhou@upc.edu.cn

创新点名称: 基于物理属性和经济属性的天然气管网优化建模综述

创新点内容: 提出一个新的天然气管网优化建模分类, 即管网的物理属性和经济属性两类。基于物理属性的优化建模则适用于管网的设计、运行和扩建等阶段, 是对既有的天然气管道和压缩机进行优化, 以最小化运行成本实现最佳运行条件; 基于经济属性的优化建模主要适用于天然气管网投资建设阶段, 通过市场均衡模型确定优化方案以满足整个天然气市场的运行需求。针对管网优化问题, 需要综合考虑经济属性和物理属性, 并系统统筹设计优化方案和运行优化方案, 以提高管网的经济性、可靠性和可持续性。