

天然气多气源管输合同路径规划模型的研究

朱志宏

江苏华电华汇能源有限公司 江苏 南通 226000

摘 要：随着我国天然气消费量持续增长及气源进口通道日趋多元，管道运输企业在多气源并网运行环境下面临着日益复杂的合同履行与资源配置挑战。本文立足于长输管道企业计划物资管理岗位的工作实际，系统梳理了多气源管输场景下合同路径规划的核心管理问题，提出了一套融合气源属性识别、管容分配机制、合同履行约束与物资供应保障的四维路径规划分析框架。在此基础上，构建了以成本最小化、气源适配性最大化及合同履行均衡性为多目标函数的管输合同路径规划模型，并探讨了模型中关键参数的管理含义与求解策略。研究认为，有效的路径规划不仅依赖数学优化算法，更需要与企业的计划编制流程、物资调运周期和合同管理机制形成制度性耦合。本文旨在为天然气管道企业提升多气源合同管理水平、优化资源配置效率提供理论参考与管理启示。

关键词：天然气管道；多气源；管输合同；路径规划；计划管理；物资配置

引言

随着我国天然气产业快速发展，西气东输、中俄东线等主干管道构成全国输送网络，国产气、进口管道气与 LNG 等多气源混输已成为常态。这一模式虽提升供气安全，却显著增加了管输企业在合同管理与资源计划方面的复杂性：不同气源在气质、热值、价格机制、调峰能力及入网节点等方面差异显著，传统“单气源—单路径”合同执行方式已难适用。管输企业亟需一种能统筹气源多样性、管容约束、合同条款与供气保障的路径规划方法。本文基于长输管道企业计划物资管理实践，聚焦多气源管输合同下的三大核心问题：资源路径规划、合同履行保障与物资配置优化，旨在提升管网调度效率与合同执行精准度，支撑多气源协同高效运行。

1 多气源管输合同路径规划的管理情境与问题界定

1.1 多气源管输体系的运行特征与管理挑战

我国天然气长输管道网络已基本形成“全国一张网”的格局，多气源并网输送带来了供气灵活性的显著提升，但同时也对管道企业的计划管理和合同执行能力提出了更高要求。具体而言，多气源环境下的管理挑战主要体现在以下四个方面：第一，气源物理属性的差异性。不同气源的天然气在热值、组分、杂质含量等方面存在差异，混合输送过程中需要满足管输气质标准，这对路径选择中的气源匹配提出了约束条件。第二，气源经济属性的异质性。国产气、进口管道气和 LNG 在计价方式、运输成本结构和供应稳定性上各不相同，路径规划必须考虑不同气源的成本差异及其对管输费结算的影

响^[1]。第三，管容资源的时空冲突。主干管道在高峰时段往往接近满负荷运行，不同合同客户的输气需求在时间和空间上可能产生冲突，需要通过合理的路径规划和时序安排予以化解。第四，合同条款的多样性。管输合同在输气量、供气波动幅度、取气点和交气点、合同期限等方面的约定各不相同，路径规划需要在不违反合同约束的前提下实现资源的最优配置。

1.2 计划物资管理岗位视角下的核心问题

从计划物资管理岗位的职能定位出发，多气源管输合同路径规划涉及三个相互关联的管理层面。在计划管理层面，年度、季度和月度输气计划的编制需要综合考虑各气源的供应能力、各合同客户的用气需求预测以及管道网络的输送能力约束。路径规划本质上是在时间和空间两个维度上对有限的管容资源进行分配，其结果直接决定计划的可执行性。在合同管理层面，管输合同明确了托运商的气量权利义务，但并未指定具体的物理气源和输送路径。在多气源条件下，管输企业拥有一定的路径选择自主权，但这种自主权的行使必须以确保合同履约为前提。路径规划模型需要将合同条款转化为可量化的约束条件。在物资管理层面，管输业务的正常运行依赖于压缩机备件、阀门、仪器仪表、润滑油品等各类物资的及时供应。路径规划中涉及的气源切换、流量调整和输气方案变更，会影响到沿线场站的物资消耗速率和备品备件的需求预测，进而影响物资采购计划的编制与库存策略的制定。

2 路径规划模型的构建

2.1 模型设计的指导原则与目标体系

路径规划模型的设计需要遵循以下指导原则。其一是合同优先原则,即任何路径规划方案必须以完全履行已签订管输合同的各项条款为基本前提,不得因气源调配或路径选择而损害合同的法律效力。其二是经济合理原则,即在满足合同要求的前提下,优先选择综合成本较低的输气路径和气源组合。其三是可操作性原则,模型输出的规划方案应当能够转化为具体的月度、周度输气计划,并与现有的计划管理流程相衔接。其四是物资协同原则,路径规划方案应当充分考虑沿线物资消耗的均衡性,避免因输气路径的剧烈变动造成局部物资供应紧张或库存积压。基于上述原则,本文设定路径规划的三级目标体系:第一层级为约束满足目标,确保所有合同条款、管网物理约束和气质标准得到满足;第二层级为效率优化目标,在可行方案集合中追求综合输气成本最小化和管容利用率均衡化;第三层级为协同管理目标,追求路径规划方案与物资供应计划、设备维修计划之间的协调匹配。

2.2 关键约束条件的识别与形式化

路径规划模型的约束条件可分为四个类别。物理约束主要包括管段输气能力上限约束、节点流量平衡约束和气源供应能力约束。管段能力约束要求任意管段上的实际输气流量不得超过其设计输送能力;节点平衡约束确保进入任一节点的总流量等于流出该节点的总流量与节点损耗之和;气源能力约束则要求各气源的实际提取量不超过其可供气量。合同约束涵盖了单份合同的最低与最高输气量约束、合同约定的取气与交气节点约束、合同期限内的累计输气量约束,以及部分合同中可能包含的优先供气条款和照付不议条款。这些约束共同界定了管输企业在路径规划中必须遵守的法律义务边界^[2]。气质约束涉及不同气源热值差异的混输兼容性约束、各交气节点处的热值波动范围约束,以及气质检测指标达标要求。气质约束的存在使得路径规划不能仅考虑流量分配,还需关注不同气源的混合比例。物资管理关联约束是本文区别于纯工程优化模型的重要特征,具体包括各关键场站的物资消耗速率与输气负荷的关联关系约束、备品备件最小库存安全线约束、物资补货周期与输气计划变更之间的响应时间约束等。这些约束将路径规划从单纯的流量分配问题拓展为涉及物资供应链协同的综合管理问题。

2.3 目标函数的设定与多目标处理策略

本文采用多目标加权求和的方法构建综合目标函

数,具体包含以下三个子目标。成本最小化子目标涵盖气源采购成本、管输能耗成本和路径切换产生的操作成本。对于进口管道气和 LNG,气源成本可能存在与管输费分离的计价方式,需要在目标函数中单独计量。气源适配性子目标衡量的是各交气节点处混合气源的热值、组分与合同约定值的偏差程度。该子目标的引入是为了在成本优化与气质保障之间寻求平衡,避免过度追求低成本气源而造成交气质量偏离合同要求。合同履约均衡性子目标衡量的是各合同在路径规划方案中获得的“履约满意度”的均衡程度。该子目标的设置旨在防止优化算法过度偏向某些“便利”合同而忽视其他合同的合理权益,从而降低企业的合同违约风险和商业纠纷风险。三个子目标通过层次分析法确定权重系数后合并为单一的综合目标函数,权重系数的取值可根据企业在不同发展阶段的管理重心进行调整。

3 模型求解方法与管理应用

3.1 模型求解的策略框架

由于本文构建的路径规划模型包含离散变量、非线性约束(如气质混输约束)和多目标函数,属于混合整数非线性规划问题,严格求解面临 NP-hard 复杂性。在实际管理应用中,建议采用分阶段求解策略:第一阶段利用线性规划松弛方法求解不考虑整数变量的连续优化问题,获得流量分配的初步方案;第二阶段基于初步方案,运用启发式搜索算法或商业优化求解器进行整数变量的修正和方案的精炼;第三阶段通过人工专家评审对优化结果进行管理可行性校验,必要时进行局部调整。

3.2 输入数据的准备与管理要求

模型的有效运行依赖于高质量的数据输入。计划管理部门需要建立和维护以下数据集:管道网络拓扑数据库,包括管段长度、管径、设计压力、输送能力等技术参数;气源信息数据库,包括各气源节点的供应能力曲线、气质参数、计价方式等;合同信息数据库,包括各在履行合同的输气量条款、时间条款、节点条款及其他特殊约定;物资供应数据库,包括各场站的物资库存水平、消耗规律、采购周期和供应商信息。上述数据的准确性、及时性和完整性直接决定了模型输出的可靠性。

3.3 在计划编制中的应用流程

将路径规划模型嵌入年度、月度输气计划的编制流程,可形成如下标准化工作程序:首先,由市场部门提供各合同客户的下月用气需求预测,由调度部门提供管网运行状态信息和设备检修计划;其次,计划管理部门汇总上述信息,录入模型并进行多场景试算,生成若干

备选路径规划方案；再次，组织相关部门对备选方案进行联合评审，从技术可行性、经济合理性和物资保障充分性等维度进行综合比较；最后，确定最优方案并分解为各场站的操作指令和物资配送计划^[3]。

3.4 在合同管理中的应用价值

路径规划模型还为合同管理提供了重要的决策支持工具。在合同签订阶段，该模型可用于评估新合同对现有管容资源的占用情况，预判合同条款的可行性与潜在冲突，为商务谈判提供量化依据。在合同履行阶段，模型可用于监测实际输气路径与规划路径的偏差，及时预警可能出现的合同违约风险。在合同纠纷处理阶段，模型提供的路径规划记录可作为管输企业履行“合理努力”义务的客观证据，具有一定的法律风险防范价值。

3.5 在物资管理中的应用延伸

路径规划方案对物资管理的影响通过“输气负荷-设备工况-物资消耗”的传导链条实现。具体而言，不同路径方案下各场站的输气流量和压力等级不同，导致压缩机等关键设备的运行工况存在差异，进而影响零部件的磨损速率和更换频率^[4]。计划物资管理部门可将模型输出的各场站输气负荷预测作为输入变量，结合设备维修定额和物资消耗标准，生成差异化的物资需求计划和补货建议，实现从“经验驱动”向“数据驱动”的物资管理模式转变。

4 模型实施的制度保障与管理建议

4.1 组织流程层面的配套要求

路径规划模型的有效实施需要相应的组织流程保障。建议企业设立由计划管理部门牵头的跨职能协调小组，成员包括调度运行、商务合同、物资供应等岗位的代表，负责模型的日常运行、方案评审和异常处置。该小组应建立定期会商制度，在月度计划编制周期内完成从数据收集到方案决策的全流程闭环管理。

4.2 信息系统层面的支撑需求

模型的高效运转有赖于信息系统的基础支撑。企业应推动计划管理系统、合同管理系统、物资管理系统与管道仿真系统的数据互联互通，消除信息孤岛。建议开发路径规划决策支持模块，实现数据自动提取、模型自动运行、结果可视化和方案对比分析功能，降低模型使

用的专业门槛，提高计划编制的工作效率。

4.3 人员能力与制度规范建设

人员能力建设是模型落地应用的关键环节。计划管理人员需要掌握基本的运筹学建模知识、优化求解器的操作技能以及数据分析方法。企业应组织开展专项培训，提升相关人员对模型原理、输入要求和结果解读的理解水平。同时，应制定路径规划模型使用的操作规程和管理制度，明确数据更新频率、方案评审程序、决策权限划分和异常情况处理流程，使模型应用有章可循、有据可查。

5 结语

多气源管输合同路径规划是天然气管道企业在管网日趋复杂、气源日益多元背景下必须面对的重要管理课题。本文从计划物资管理岗位的职能视角出发，构建了一个将合同约定、物理约束、气质约束与物资管理约束纳入统一框架的路径规划模型，并讨论了模型求解策略及其在计划编制、合同管理和物资配置三个方面的应用价值。研究认为，优秀的路径规划模型不应仅仅是一个数学优化工具，更应当成为连接企业计划管理、合同管理和物资管理的制度性纽带。未来随着天然气管网智能化水平的持续提升和全国统一大市场建设的深入推进，多气源管输合同路径规划将面临更多新的管理挑战与研究议题，例如考虑碳足迹约束的绿色路径规划、考虑管网容量交易机制的市场经济学模型、以及面向突发事件的鲁棒路径规划等。希望本文的研究能够为这些方向的探索提供有益的起点和参照。

参考文献

- [1] 刘毅, 张伟, 陈建国. 基于多目标优化的天然气管网运行经济性研究 [J]. 油气储运, 2022, 41(3): 245-252.
- [2] 赵忠德, 王保群, 孙春良. 中国天然气管道多气源供气格局下合同管理问题探析 [J]. 天然气工业, 2021, 41(8): 156-163.
- [3] 陈思远, 李明. 考虑供需不确定性的天然气管输计划优化模型 [J]. 系统工程理论与实践, 2023, 43(2): 412-423.
- [4] 王浩, 周晓洁, 郑洪龙. 天然气管网管容分配机制与合同路径管理研究综述 [J]. 油气储运, 2022, 41(11): 1241-1249.