

引文: 付广涛, 涂仁福, 蔡丽韞, 等. 考虑成品油储运设施的甲醇区域多式联运系统规划优化[J]. 油气储运, 2025, 44(9): 1066–1079.

FU Guangtao, TU Renfu, CAI Liyun, et al. Optimization of regional methanol multimodal transport system planning considering refined oil storage and transportation facilities[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2025, 44(9): 1066–1079.

## 考虑成品油储运设施的甲醇区域多式联运系统规划优化

付广涛<sup>1</sup> 涂仁福<sup>1</sup> 蔡丽韞<sup>2</sup> 高胜寒<sup>2</sup> 俞欣然<sup>3</sup> 董博卓<sup>1</sup> 廖绮<sup>1</sup> 梁永图<sup>1,4</sup>

1. 中国石油大学(北京)机械与储运工程学院·城市油气输配技术北京市重点实验室·油气管道输送安全国家工程研究中心;  
2. 国家管网集团工程技术创新有限公司; 3. 中国石油大学(华东)储运与建筑工程学院·山东省油气储运安全重点实验室;  
4. 北京化工大学机电工程学院·绿色智慧管道运输交叉中心

**摘要:**【目的】在“双碳”目标与相关政策的推动下,甲醇作为氢能载体和绿色燃料,展现出广阔的发展前景。然而,中国甲醇产销地在地理空间上分布不匹配,现有甲醇储运设施整体能力较弱,难以支撑其大规模、长距离、低碳高效输送的需求。与此同时,随着成品油消费量持续下滑,现有成品油储运设施出现较大程度剩余能力。因此,在构建甲醇储存配送网络时,需统筹考虑现有成品油储运设施的整合利用,以实现资源共享与经济效益最大化。【方法】构建了一个甲醇区域多式联运系统规划框架,涵盖供应、运输、需求 3 个环节,综合考虑公路罐车、铁路罐车、甲醇管道及成品油管道等多种运输方式,建立实际甲醇供需能力(场景 1)、2030 年甲醇供需能力(场景 2)、2030 年甲醇供需能力及成品油剩余能力扩大(场景 3)共 3 种甲醇多式联运场景。在此基础上,以甲醇整体运输、甲醇管道建设、成品油管道改造、甲醇储罐建设及成品油储罐改造的总费用最小化为目标函数,添加甲醇物料平衡、甲醇管道建设、成品油管道改造等约束条件,建立适用于多路径、多方式协同优化的甲醇区域多式联运优化模型,以开展甲醇储运设施布局优化分析。【结果】将所建优化模型应用于中国某区域多式联运系统,通过融合成品油管道在内的多种运输方式,可显著降低甲醇储运成本。在场景 1 中,主干成品油管道 I、管道 II、管道 III 均被改造用于甲醇运输,整体负荷率相比仅用于成品油输送时提高了 27%~47%。【结论】所提出的规划框架与优化模型可为中国的甲醇区域储运设施规划提供有效的技术路径与决策支持,将成品油管道剩余能力纳入甲醇多式联运系统对促进区域能源协同发展具有重要现实意义。(图 7,表 8,参 28)

**关键词:** 甲醇; 多式联运; 甲醇管道; 成品油管道; 剩余能力; 设施规划优化

中图分类号: TE832

文献标识码: A

文章编号: 1000-8241(2025)09-1066-14

DOI: 10.6047/j.issn.1000-8241.2025.09.011

### Optimization of regional methanol multimodal transport system planning considering refined oil storage and transportation facilities

FU Guangtao<sup>1</sup>, TU Renfu<sup>1</sup>, CAI Liyun<sup>2</sup>, GAO Shenghan<sup>2</sup>, YU Xinran<sup>3</sup>, DONG Bozhuo<sup>1</sup>, LIAO Qi<sup>1</sup>, LIANG Yongtu<sup>1,4</sup>

1. College of Mechanical and Transportation Engineering, China University of Petroleum (Beijing)//Beijing Key Laboratory of Urban Oil and Gas Distribution Technology//National Engineering Research Center for Pipeline Safety; 2. PipeChina Engineering Technology Innovation Co., Ltd.; 3. College of Pipeline and Civil Engineering, China University of Petroleum (East China)//Shandong Key Laboratory of Oil & Gas Storage and Transportation Safety; 4. College of Mechanical and Electrical Engineering, Beijing University of Chemical Technology//Interdisciplinary Centre for Green and Intelligent Pipeline Transportation

**Abstract:** [Objective] The geographical disparity between methanol production and consumption, compounded by the limited capacity of current storage and transportation facilities, hinders large-scale, long-distance, low-carbon, and efficient methanol transport. Concurrently, the ongoing decrease in refined oil consumption has led to significant overcapacity in existing refined oil storage and transportation facilities. Therefore, when establishing an optimized methanol storage and transportation network, it is essential to comprehensively consider the integration and reutilization of existing refined oil storage and transportation facilities to maximize resource sharing and economic efficiency. [Methods] To address this, a framework for planning a regional methanol multimodal transport system was developed, encompassing supply, transportation, and demand. Multiple transport modes, namely road tankers, rail tankers, methanol pipelines, and refined oil

pipelines, were considered comprehensively. Three methanol multimodal-transport scenarios were defined: current methanol supply-demand capacity (Scenario 1), 2030 methanol supply-demand capacity (Scenario 2), and 2030 methanol supply-demand capacity with increased refined-oil surplus capacity (Scenario 3). On this basis, an optimization model for the regional multimodal transport of methanol, suitable for the collaborative optimization of multiple routes and modes, was established. The objective function was to minimize the total cost of methanol transportation, construction of methanol pipelines, transformation of refined oil pipelines, construction of methanol storage tanks, and transformation of refined oil storage tanks. Constraints such as methanol material balance, construction of methanol pipelines, and transformation of refined oil pipelines were incorporated to conduct an optimization analysis of the layout of methanol storage and transportation facilities. **[Results]** The proposed model was applied to a regional multimodal transport system in China, significantly reducing the storage and transportation costs of methanol by integrating multiple modes of transportation including refined oil pipelines. In Scenario 1, the main refined oil pipelines I, II, and III were all repurposed for methanol transport, resulting in an overall load rate increase of 27%–47% compared to their exclusive use for refined oil transport. **[Conclusion]** The proposed planning framework and optimization model can provide effective technical paths and decision-making support for the planning of regional methanol storage and transportation facilities in China. Incorporating the surplus capacity of refined oil pipelines into the methanol multimodal transport system is of great practical significance for promoting the coordinated development of regional energy. (7 Figures, 8 Tables, 28 References)

**Key words:** methanol, multimodal transport, methanol pipeline, refined oil pipeline, surplus capacity, facility planning optimization

为加快推进各行业节能减碳进程, 国务院印发了《2024—2025 年节能降碳行动方案》(国发〔2024〕12 号), 明确提出到 2025 年底交通运输领域单位碳排放较 2020 年下降 5%。氢气作为一种无碳能源载体, 在多个行业中具有广泛的应用前景, 但其低体积能量密度的特点使得氢气的大规模储运面临经济性挑战<sup>[1]</sup>。近年来, 世界各国围绕“甲醇经济”概念开展了大量研究, 为氢气的安全、高效储运提供了新思路<sup>[2]</sup>。中国甲醇生产与消费呈现出显著的空间错配, 截至 2023 年底<sup>[3]</sup>, 甲醇产量在西北、华东、华北、西南、华中、东北、华南地区的占比分别为 52.95%、18.90%、10.59%、6.74%、6.73%、2.56%、1.53%, 其中西北地区产量占比过半, 而主要消费则集中于华东地区, 由此潜在形成了“由西向东”“由北至南”的长距离、大规模运输需求<sup>[4]</sup>。

随着甲醇资源供需规模持续扩张、运输网络日益复杂, 合理规划甲醇多式联运储运设施对提升运输效率、降低运行成本具有重要意义<sup>[5]</sup>。近几年, 长距离管输甲醇的经济性与可行性研究已逐步开展<sup>[6]</sup>。刘伟等<sup>[7]</sup>对甲醇的管道运输与罐车运输进行了经济性对比, 指出管道运输在长期运行中具有更高的经济性与稳定性。Li 等<sup>[8]</sup>采用生命周期分析、多标准决策分析与 SWOT(Strengths, Weaknesses, Opportunities, Threats) 分析相结合的方法, 定性提出了甲醇的最优生产策略, 但未涉及具体区域内储运设施的建设方案。Cui 等<sup>[9]</sup>提出了一套以甲醇与氨为氢载体的运输策略, 并估算

了理想情况下甲醇的平均运输成本, 为设施建设提供了参考依据, 但未考虑现有设施对运输路径优化的影响。刘翠伟等<sup>[10]</sup>借助数值仿真方法验证了在大管径成品油管道中采用密度较柴油小的甲醇作为前驱液具有可行性, 同时指出应避免沿线路径存在大落差地形。在多式联运优化方面, 许少新等<sup>[11]</sup>认为将多种运输方式引入成品油物流系统中能够显著提升运输效率和销售企业的整体效益。张昊等<sup>[12]</sup>以中国某成品油管道为例, 验证了在极端天气条件下多式联运可有效缓解因单一运输方式受限所导致的供应中断问题。Fu 等<sup>[13]</sup>从多式联运的视角出发, 采用 3E(Energy, Economic and Environmental) 分析法对区域冗余炼厂进行了优化, 显著提升了区域整体的经济运行效益。上述研究表明, 多式联运模式能够有效提升区域资源的运输效率与综合经济效益<sup>[14–15]</sup>。目前已有通过改造现有储运设施进行甲醇输送的工程实践案例, 如加拿大现有 2 条甲醇长输管道, 分别由原油管道、液化石油气管道改造而成<sup>[16]</sup>。面对未来多能融合的能源消费结构, 油气管道有望继续成为能源运输过程中的关键纽带<sup>[17–18]</sup>。黄鑫等<sup>[19]</sup>研究表明甲醇的长距离输送需同步改造储罐流程, 并增设相应的储存及处理设施, 以保障工艺系统的稳定运行。Tu 等<sup>[20]</sup>构建了一个多式联运氨供应系统框架, 并通过优化分析得到新建液氨管道与改造成品油管道是最优的运输方式组合, 为甲醇多式联运系统规划研究提供了借鉴。

面对甲醇资源禀赋现状,现有甲醇储运设施布局分散,难以形成高效衔接的长距离运输网络,引发运输成本高、效率低等问题,而现有成品油管道的剩余能力未被充分利用,造成了运力资源较大程度的浪费<sup>[21]</sup>。因此,有必要在设计多式联运的甲醇储运系统时,整合评估现有成品油储运设施的剩余能力<sup>[22]</sup>,从而在降低甲醇配送成本的同时,避免储运设施的重复建设与资源浪费。

## 1 甲醇区域多式联运系统

甲醇区域多式联运系统(图1)主要包括甲醇的供应环节、运输环节及需求环节。在供应环节中,根据反应物来源的不同,甲醇可被分为绿色甲醇与蓝色甲醇,反应物主要包括氢气、一氧化碳、二氧化碳、氮气等<sup>[23]</sup>。氢气通常由指定供应商直接提供,二氧化碳可从空气

中分离或从附近的发电厂获取,氮气则可从空气中分离或从煤制气厂购买。生成的甲醇通过公路罐车、铁路罐车、管道、船舶等方式运输至需求地,并根据供应点与需求点之间的距离,匹配相应的运输方式。公路罐车在短距离运输中具有重要作用,灵活性优越,但其运输成本、单位碳排放及能耗较高。在中远距离运输中,铁路罐车与管道发挥着重要作用。船舶运输通常用于甲醇进出口业务,并且随着技术的发展,甲醇可作为船舶燃料使用,甲醇/柴油双燃料船舶的运行可显著降低颗粒物、氮氧化物及二氧化碳等污染物的排放<sup>[24]</sup>。而甲醇多式联运则是指在甲醇运输过程中,联合使用多种运输方式,并通过中转节点实现各种运输方式的高效衔接。甲醇运输至需求地后,部分甲醇会直接配送至用户,部分甲醇经裂化厂处理后生成氢气、低碳烯烃等产品再输送给用户<sup>[25]</sup>,以满足不同用户的需求。

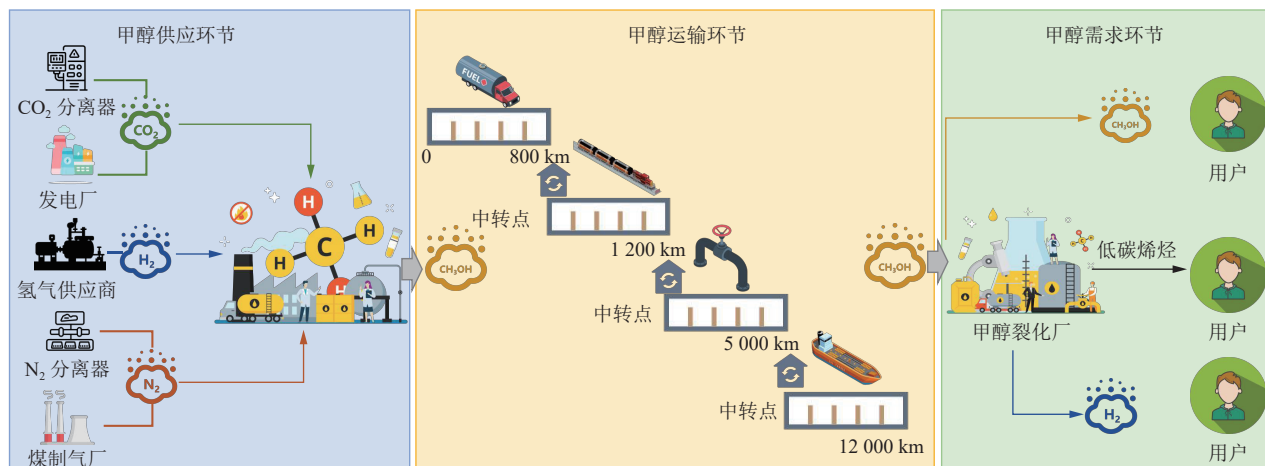


图1 甲醇区域多式联运系统示意图

Fig. 1 Schematic diagram of regional methanol multimodal transport system

## 2 甲醇区域多式联运系统规划框架

甲醇区域多式联运系统规划的本质在于充分发挥多种运输方式的组合优势,从而在不同运输距离、地理条件及设施布局下实现最优资源配置。多式联运系统的优化不仅体现在运输路径和运输方式的选择上,更关键在于储运设施的协调利用。通过引入成品油管道的剩余能力并对其进行改造评估,可在降低基础设施建设投资的前提下,实现对甲醇资源的高效配置。为此,构建了甲醇区域多式联运系统规划框架(图2),整体共分为4个步骤。步骤1:收集甲

醇区域多式联运系统的相关数据,包括节点供需属性、中转点位置、运输路径信息、甲醇管道建设费及甲醇储罐建设费等静态数据,甲醇供应计划、甲醇需求计划、甲醇库存容量及成品油管道剩余能力等动态数据。步骤2:建立实际甲醇供需能力(场景1)、2030年甲醇供需能力(场景2)、2030年甲醇供需能力及成品油剩余能力扩大(场景3)共3种甲醇多式联运场景(表1)。步骤3:建立适用于多路径、多方式协同优化的甲醇区域多式联运优化模型,以甲醇整体运输、甲醇管道建设、成品油管道改造、甲醇储罐建设以及成品油储罐改造的总费用最小化为目标函数,同时考虑甲醇物料

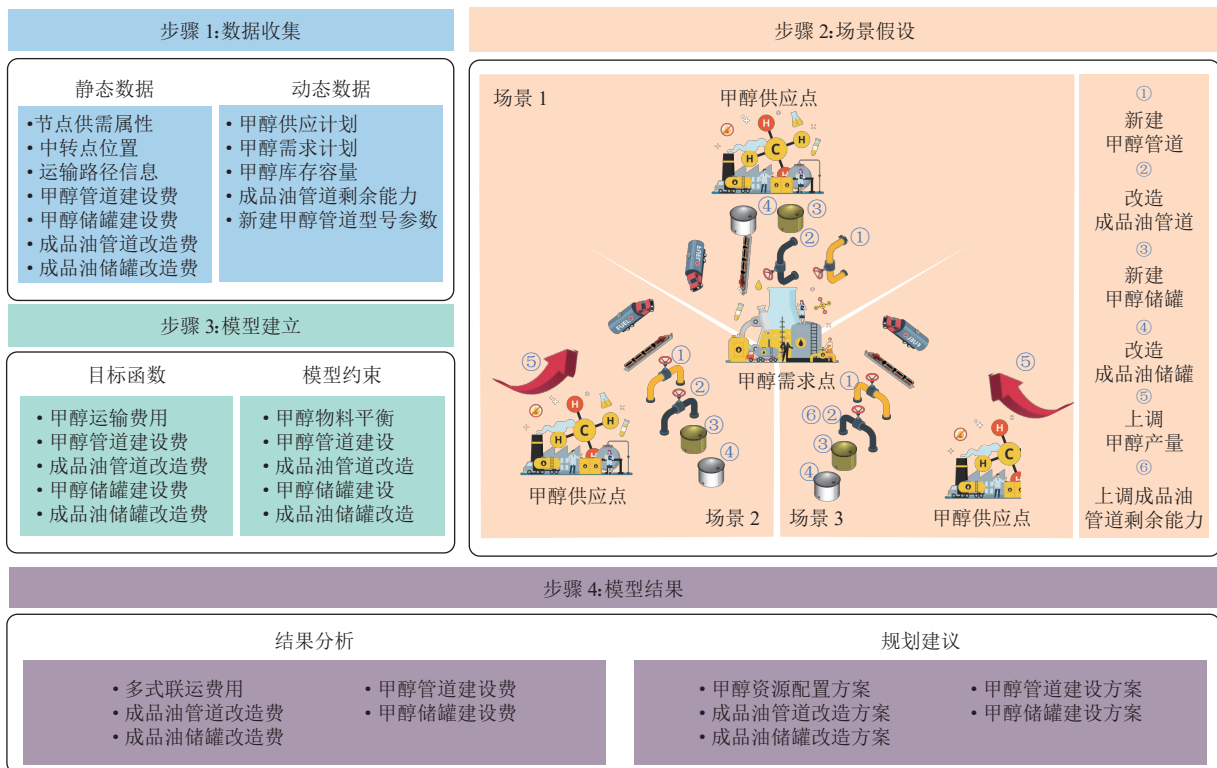


图 2 甲醇区域多式联运系统规划框架图  
Fig. 2 Planning framework for regional methanol multimodal transport system

表 1 3 种甲醇多式联运场景设计表  
Table 1 Design of three methanol multimodal transport scenarios

场景编号	甲醇生产能力	甲醇消费能力	成品油管道剩余能力
场景 1	各节点实际生产情况	各节点实际消费情况	各管道实际运行情况
场景 2	2030 年各节点预测生产情况	2030 年各节点预测消费情况	各管道实际运行情况
场景 3	2030 年各节点预测生产情况	2030 年各节点预测消费情况	2030 年各管道预测运行情况

平衡、甲醇管道建设、成品油管道改造等约束条件。步骤 4: 对于每种场景, 利用已建立的甲醇区域多式联运优化模型进行计算, 求解各场景下的多式联运费用、甲醇管道建设费、成品油管道改造费、甲醇储罐建设费及成品油储罐改造费, 并在此基础上分析甲醇资源配置、甲醇管道新建、成品油管道改造等方案, 同时提出相应的规划建议。

### 3 甲醇区域多式联运优化模型建立

#### 3.1 模型假设

模型建立过程中, 对模型做如下简化假设: ①不考虑甲醇运输过程中的损耗; ②聚焦甲醇顺序输送战略层(长期优化问题, 通常以年为时间跨度, 涉及运输、供需网络的设计与建设, 如对整体结构进行新建或改造)的资源最优配置情况, 故不考虑甲醇顺序输送

作业层(短期优化问题, 通常以周或日为时间跨度, 涉及设施的运行状态, 如对单条管道进行调度)的具体输送过程, 即利用成品油管道剩余能力代表甲醇顺序输送的最大运输量; ③不考虑各种运输方式的运力、价格变化; ④不考虑甲醇由于温度、压力等引起的体积变化; ⑤不考虑甲醇在中转点可能存在的装卸不确定性。

#### 3.2 目标函数

在优化模型中, 以  $S = \{1, 2, \dots, s_{\max}\}$  表示所有甲醇供应节点的集合, 供应节点编号用  $s$  表示, 其中管道运输相关节点集合为  $S_p$ , 且  $S_p \subset S$ ; 以  $G = \{1, 2, \dots, g_{\max}\}$  表示所有普通节点(此类节点无甲醇供应与生产的功能, 但具备甲醇中转与新建管道的功能)的集合, 普通节点编号用  $g$  表示, 其中管道运输相关节点集合为  $G_p$ , 且  $G_p \subset G$ ; 以  $D = \{1, 2, \dots, d_{\max}\}$  表示所有甲醇需求节点的集合, 需求节点编号用  $d$  表示, 其中管道



运输相关节点集合为  $D_p$ , 且  $D_p \subset D$ ; 以  $N = \{1, 2, \dots, n_{\max}\}$  表示区域多式联运系统中所有节点的集合, 节点编号用  $n$  表示, 包括所有甲醇供应节点、普通节点及甲醇需求节点, 即  $S \cup G \cup D = N$ ; 以  $Z = \{1, 2, \dots, z_{\max}\}$  表示所有运输方式的集合, 运输方式编号用  $z$  表示, 其中管道运输方式集合为  $Z_p$ , 且  $Z_p \subset Z$ ; 以  $X = \{1, 2, \dots, x_{\max}\}$  表示新建甲醇管道管径阶梯的集合, 阶梯编号

$$\min F = F_1 + F_2 + F_3 + F_4 + F_5 = \sum_{n \in N} \sum_{n' \in N} \sum_{z \in Z} V_{n,n',z} l_{n,n'} c_{hz} + \sum_{n \in N} \sum_{n' \in N} (\alpha_{n,n'} \delta_{n,n'} \rho V_{IPn,n'} l_{n,n'} c_\gamma + \alpha_{n,n'} V_{IPn,n'} l_{n,n'} c_\eta) + \sum_{n \in N} \sum_{n' \in N} V_{JPn,n'} l_{n,n'} c_\varepsilon + \sum_{n \in N} (K_{IRn} c_\lambda + K_{IRn} c_\tau) + \sum_{n \in N} K_{JRn} c_\psi \quad (1)$$

式中:  $V_{n,n',z}$  为从节点  $n$  利用运输方式  $z$  运输至节点  $n'$  的甲醇量, t;  $l_{n,n'}$  为节点  $n$  与节点  $n'$  之间的距离, km;  $c_{hz}$  为运输方式  $z$  的单位运输成本, 元/(t·km);  $\alpha_{n,n'}$  为节点  $n$  与节点  $n'$  之间新建甲醇管道的直径系数, m/t;  $\delta_{n,n'}$  为节点  $n$  与节点  $n'$  之间新建甲醇管道的壁厚系数, m;  $\rho$  为管道钢材密度, t/m<sup>3</sup>;  $V_{IPn,n'}$  为从节点  $n$  利用新建的甲醇管道运输至节点  $n'$  的甲醇量, t;  $V_{JPn,n'}$  为从节点  $n$  利用改造的成品油管道运输至节点  $n'$  的甲醇量, t;  $K_{IRn}$  为在节点  $n$  处新建甲醇储罐的库容量, t;  $K_{JRn}$  为在节点  $n$  处改造成品油储罐的库容量, t;  $c_\eta$  为新建甲醇管道单位其他费用, 元/(m·km);  $c_\varepsilon$  为改造成品油管道单位建设费用, 元/(t·km);  $c_\gamma$ 、 $c_\lambda$ 、 $c_\tau$ 、 $c_\psi$  分别为新建甲醇管道单位材料费用、新建甲醇储罐单位材料费用、新建甲醇储罐单位其他费用、改造成品油储罐单位建设费用, 元/t。

为简化模型复杂度, 发货节点  $n$  与收货节点  $n'$  之间的距离  $l_{n,n'}$  采用欧式距离<sup>[20]</sup>, 若已知两点间真实运输路径距离, 则可直接赋值替代。

### 3.3 约束条件

#### 3.3.1 甲醇物料平衡约束

对于甲醇供应节点, 其甲醇生产量与自身生产能力有关。同样, 对于甲醇需求节点, 其需求量应与所在地甲醇消耗能力保持匹配。各个节点应满足甲醇物料平衡约束, 即节点自身甲醇生产量与接收量之和应等于该节点的外发量与自身需求消耗量之和, 其约束表达式为:

$$W_n + \sum_{n' \in N} \sum_{z \in Z} V_{n',n,z} = \sum_{n' \in N} \sum_{z \in Z} V_{n,n',z} + Q_n \quad n \in N \quad (2)$$

式中:  $W_n$ 、 $Q_n$  分别为节点  $n$  生产、消耗的甲醇量, t。

#### 3.3.2 甲醇管道建设约束

任意节点之间允许新建甲醇管道, 但两节点间新

建甲醇管道只允许存在一种规格管道, 新建管道的直径需要与管内流速匹配<sup>[26]</sup>, 其约束表达式为:

$$B_{IPn,n'} = \sum_{x \in X} B_{IPn,n',x} \quad n \in N, n' \in N \quad (3)$$

$$\alpha_{n,n'} = \sum_{x \in X} \alpha_{n,n',x} \quad n \in N, n' \in N \quad (4)$$

$$\delta_{n,n'} = \sum_{x \in X} \delta_{n,n',x} \quad n \in N, n' \in N \quad (5)$$

$$B_{IPn,n',x} \delta_{n,n',x} \leq \alpha_{n,n',x} V_{IPn,n'} < B_{IPn,n',x+1} \delta_{n,n',x+1} \quad n \in N, n' \in N, x \in X \quad (6)$$

$$B_{IPn,n',x} u_{n,n',x} \leq V_{IPn,n'} < B_{IPn,n',x+1} u_{n,n',x+1} \quad n \in N, n' \in N, x \in X \quad (7)$$

式中:  $B_{IPn,n'}$  为二元变量, 若节点  $n$  与节点  $n'$  之间新建甲醇管道则  $B_{IPn,n'} = 1$ , 否则  $B_{IPn,n'} = 0$ ;  $B_{IPn,n',x}$  为二元变量, 当节点  $n$  与节点  $n'$  之间新建管道处于第  $x$  阶梯内则  $B_{IPn,n',x} = 1$ , 否则  $B_{IPn,n',x} = 0$ ;  $\alpha_{n,n',x}$  为节点  $n$  与节点  $n'$  之间管道处于第  $x$  阶梯的直径系数, m/t;  $\delta_{n,n',x}$  为节点  $n$  与节点  $n'$  之间新建管道处于第  $x$  阶梯的管道壁厚, m;  $u_{n,n',x}$  为节点  $n$  与节点  $n'$  之间新建管道处于第  $x$  阶梯的输量, t。

考虑实际工程要求, 任意 3 个节点之间不允许形成闭环管道; 任意 2 个节点间存在成品油管道时, 不允许建设新的甲醇管道, 其对应的约束表达式分别为:

$$B_{IPn,n'} + B_{IPn',n''} + B_{IPn'',n} \leq 2 \quad n \in N, n' \in N, n'' \in N \quad (8)$$

$$B_{IPn,n'} = 0 \quad n \in S_p, n' \in G_p \cup D_p \quad (9)$$

#### 3.3.3 成品油管道改造约束

若节点之间已有成品油管道, 且在该管道成品油负荷率较低、甲醇输送量较大时, 即可对该成品油管道实施改造。改造内容包括非金属密封件、阀门系统、

管道内涂层及界面监测系统等设施, 以使其适用于甲醇与成品油的顺序输送。通过改造成品油管道运输甲醇的运量应保持在成品油管道剩余能力范围内, 其对应的约束表达式为:

$$V_{JPn,n'} \leq B_{JPn,n'} y_{\max n,n'} + (1 - B_{JPn,n'}) e_{\max n,n'} \quad n \in N, n' \in N \quad (10)$$

$$\theta B_{JPn,n'} \leq \frac{e_{\max n,n'}}{y_{\max n,n'}} \quad n \in N, n' \in N \quad (11)$$

$$\frac{V_{JPn,n'}}{e_{\max n,n'}} \geq \beta B_{JPn,n'} \quad n \in N, n' \in N \quad (12)$$

$$V_{JPn,n'} \leq e_{\max n,n'} \quad n \in N, n' \in N \quad (13)$$

式中:  $B_{JPn,n'}$  为二元变量, 若节点  $n$  与节点  $n'$  之间改造成品油管道则  $B_{JPn,n'}=1$ , 否则  $B_{JPn,n'}=0$ ;  $e_{\max n,n'}$  为节点  $n$  与节点  $n'$  之间的成品油管道剩余能力,  $t$ ;  $y_{\max n,n'}$  为节点  $n$  与节点  $n'$  之间的成品油管道设计输量,  $t$ ;  $\theta$  为剩余能力改造额度比;  $\beta$  为甲醇输量占管道剩余能力的比值。

### 3.3.4 甲醇储罐建设约束

若两节点之间无成品油管道, 则允许在两节点间新建甲醇管道, 但需建设配套甲醇储罐, 其对应的约束表达式为:

$$K_{IRn} = \mu \sum_{n' \in N} V_{IPn',n} \quad n \in N \quad (14)$$

式中:  $\mu$  为甲醇储罐库容建设系数。

### 3.3.5 成品油储罐改造约束

成品油管道在改造用于输送甲醇后, 需同时对沿线的成品油储罐进行相应改造。储罐的改造内容包括内壁涂层处理、密封系统、呼吸阀与排气系统, 以及防火与泄漏应急系统的配置等, 以满足甲醇储存的安全与功能要求, 其对应的约束表达式为:

$$K_{JRn} = \kappa \sum_{n' \in N} V_{JPn',n} \quad n \in N \quad (15)$$

式中:  $\kappa$  为成品油储罐库容改造系数。

### 3.4 模型求解

上述甲醇区域多式联运优化模型为混合整数线性规划(Mixed Integer Linear Programming, MILP)模型, 利用商业求解器 Gurobi 学术版进行求解, 以得到最优的甲醇区域多式联运储运设施规划方案。

## 4 算例分析

### 4.1 基础参数

以中国某区域多式联运系统(图 3, 图中默认两任意节点之间均存在公路罐车运输通道)为例, 该系统包括 23 个供应节点(编号为 S1~S23)、25 个需求节点(编号为 D1~D25, 其中 D25 用于表示区域外

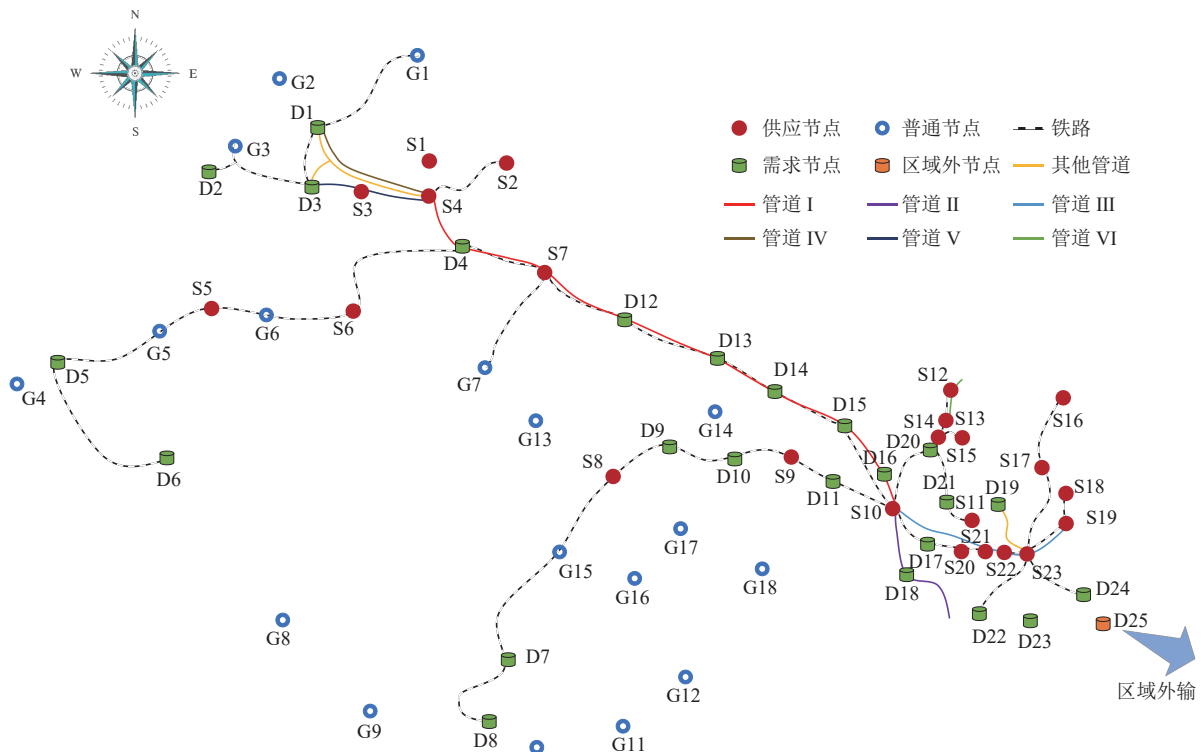


图 3 中国某区域多式联运系统分布示意图  
Fig. 3 Distribution of multimodal transport systems in a certain region of China

甲醇需求)、18 个普通节点(编号为 G1~G18),主干成品油管道包括管道 I (S4—D4—S7—D12—D13—D14—D15—D16—S10)、管道 II (S10—D18)、管道 III (S10—D17—S20—S21—S22—S23—S19),支线成品油管道包括管道 IV (S4—D1)、管道 V (S4—S3—D3)、管道 VI (S13—D12)。该区域涉及管道、铁路、公路 3 种运输方式,其单位运输费分别为 0.26 元/(t·km)、0.52 元/(t·km)、0.80 元/(t·km)<sup>[3]</sup>。新建甲醇管道型号参数(表 2)、该区域储运设施建设及改造费用参数<sup>[20]</sup>

(表 3)及该区域成品油管道设计输量与剩余能力情况(表 4)均作为优化模型的输入参数。Li 等<sup>[27]</sup>以中国为研究对象,得出了 2020—2060 年内各省份甲醇与液氨的产量,再结合中国不同区域绿色能源发展政策,可得到该区域内各个供应节点的实际供应量与 2030 年预测供应量(图 4a)、各需求节点的实际需求量与 2030 年预测需求量(图 4b)。其中, S13、S16、S19 节点出现负涨幅率的主要原因是这些节点以生产灰醇为主,因此 2030 年其生产能力受到相应政策限制。

表 2 中国某区域新建甲醇管道型号参数表

Table 2 Parameters of new methanol pipelines for different models in a certain region of China

管道型号	管道流量/(10 <sup>4</sup> t·a <sup>-1</sup> )	直径系数/(m·t <sup>-1</sup> )	壁厚系数/mm	钢材密度/(t·m <sup>-3</sup> )
小口径	0~250	0~0.085	2	7.85
中口径	250~500	0.850~1.700	3	7.85
大口径	500~750	1.700~2.550	4	7.85

表 3 中国某区域储运设施建设及改造费用参数表

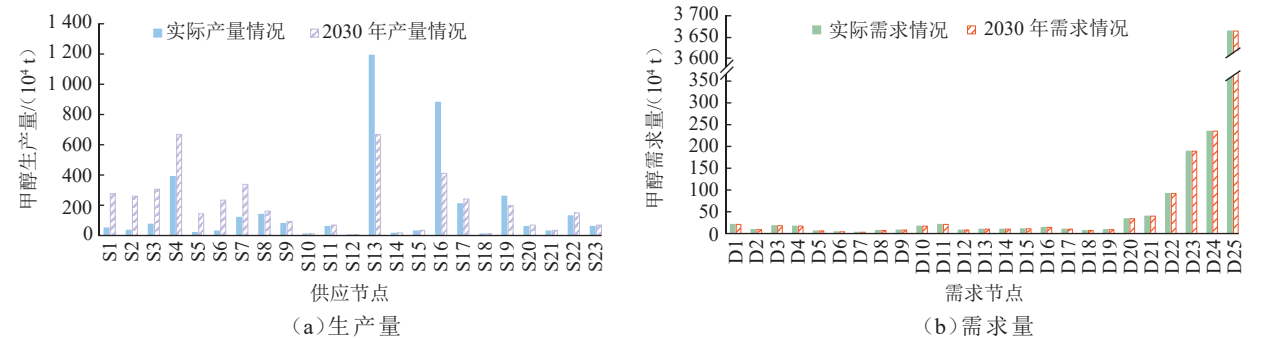
Table 3 Parameters of construction and transformation costs for storage and transportation facilities in a certain region of China

新建甲醇管道 单位材料费用/ (元·t <sup>-1</sup> )	新建甲醇管道 单位其他费用/ (元·km <sup>-1</sup> ·mm <sup>-1</sup> )	改造成品油管道 单位建设费用/ (元·t <sup>-1</sup> ·km <sup>-1</sup> )	新建甲醇储罐 单位材料费用/ (元·t <sup>-1</sup> )	新建甲醇储罐 单位其他费用/ (元·t <sup>-1</sup> )	改造成品油储罐 单位建设费用/ (元·t <sup>-1</sup> )
3 400	300	6 000	0.105	0.08	0.11

表 4 中国某区域成品油管道设计输量与剩余能力情况表

Table 4 Designed throughput and surplus capacity of refined oil pipeline in a certain region of China

管段	设计输量/(10 <sup>4</sup> t·a <sup>-1</sup> )	剩余能力/(10 <sup>4</sup> t·a <sup>-1</sup> )		管段	设计输量/(10 <sup>4</sup> t·a <sup>-1</sup> )	剩余能力/(10 <sup>4</sup> t·a <sup>-1</sup> )	
		实际	2030 年			实际	2030 年
S4—S3	520	295	325	D14—D15	1 000	530	580
S3—D3	520	295	325	D15—D16	1 000	530	580
S4—D1	160	100	110	D16—S10	1 000	530	580
D1—S4	400	350	385	S10—D18	800	98	105
D1—D3	100	50	55	S10—S20	500	475	475
S4—D4	1 000	530	580	S20—S22	500	475	475
D4—S7	1 000	530	580	S22—S23	500	475	475
S7—D12	1 000	530	580	S23—S19	500	475	475
D12—D13	1 000	530	580	S23—D19	60	60	60
D13—D14	1 000	530	580	S13—S12	60	60	60



## 4.2 场景结果

### 4.2.1 区域甲醇多式联运物流方案

由于研究区域内节点较多,且相互之间的运输关系较为复杂,因此,选取主干成品油管道 I 沿线节点

及相关节点,绘制 3 种场景下甲醇多式联运系统的桑基图(图 5)。桑基图中矩形表示各个节点,矩形长边的长度与对应的甲醇供应量或需求量成正比;矩形之间的连线均表示资源从左节点往右节点单向流动,连

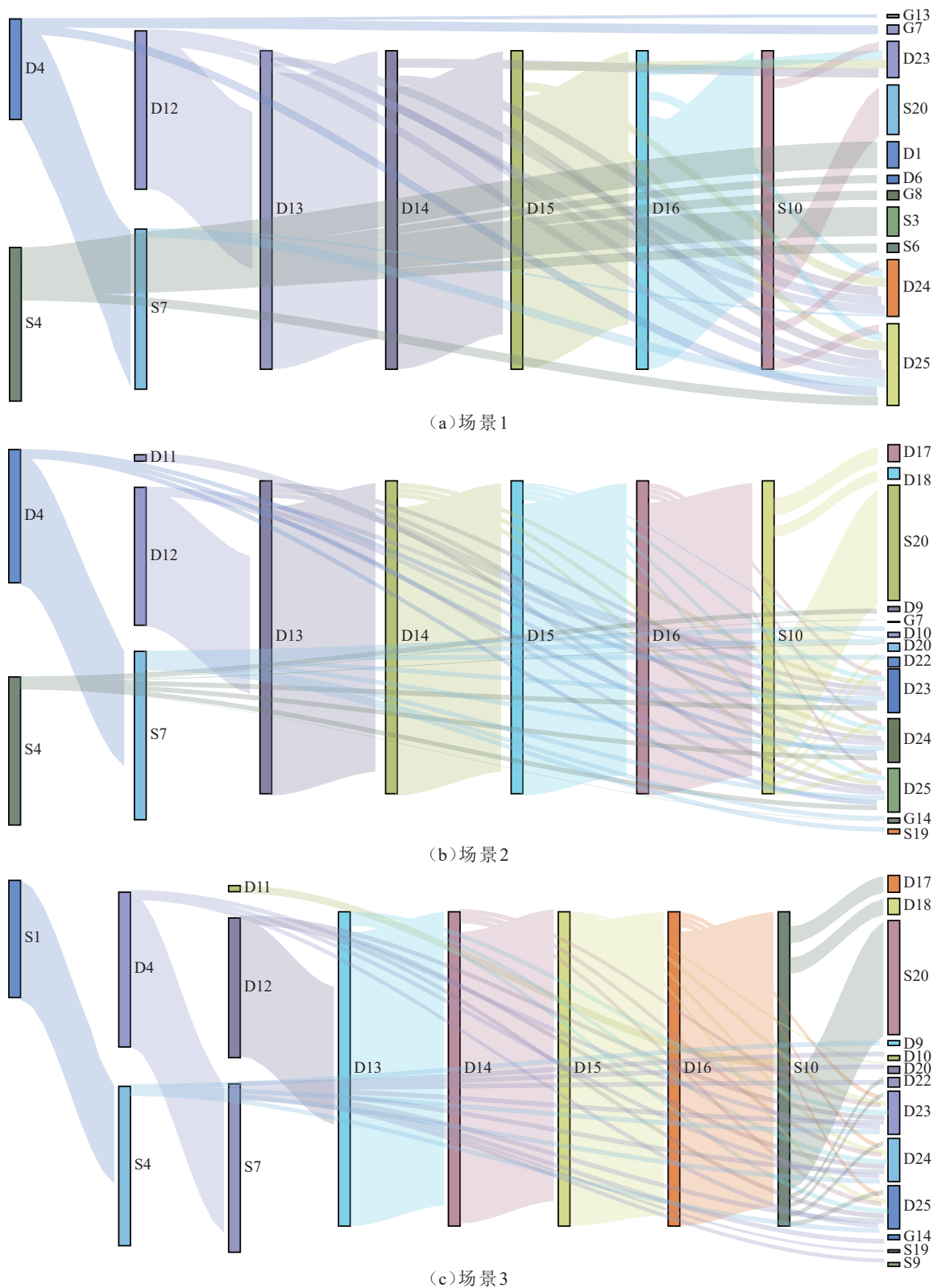


图 5 3 种场景下甲醇多式联运系统的桑基图

Fig. 5 Sankey diagrams for the methanol multimodal transport system under three scenarios



线宽度与实际运输量成正比,从而可直观反映甲醇运输分布情况<sup>[13, 28]</sup>。根据图中甲醇资源流向差异来看,场景 2(图 5b)中的细短连线较场景 1(图 5a)更多,表明 2030 年甲醇供需结构发生变化后,多式联运系统充分利用了已有的成品油管道进行长距离调配西北地区的甲醇资源,因此东南地区的部分甲醇供应节点可通过更多的罐车进行短途、小范围且灵活的配送。场景 3(图 5c)较场景 2(图 5b)的细长连线变得更宽,表明更多低负荷率的成品油管道被改造,用于输送甲醇资源。此外,由于管道 I 剩余能力的增加,西北地区的供应节点生产的甲醇也被远距离调配至东南地区,以满足对应需求。

采用上述甲醇区域多式联运优化模型进行计算可得到 3 种场景下管道、铁路运输甲醇资源的流向与运量(表 5~表 7,其中表 6 中标蓝的运输路径运量代表相较于表 5 发生了变化,表 7 中标黄的运输路径运量表示相较于表 6 发生了变化)。宏观上甲醇整体呈“由西向东”“由北至南”的运输趋势,其中管道 I 在资源

调配中发挥了关键作用。2030 年, S1~S6 供应节点的绿醇供应能力有所提升、S12~S23 灰醇供应能力有所下降,该区域甲醇供应重心进一步向西北地区倾斜,场景 1 与场景 2 在供需结构上出现差异化变化。在场景 2 中, D5、D6 节点的甲醇需求均由 S5 节点独自供应,而 S6 节点所提供的甲醇资源则被远距离调运至东南部地区。同样, S4 节点供应的甲醇不再通过管道 IV 向西输送至 D1 节点,而是经由管道 I 调配至东南地区。D1 节点的甲醇需求则由 S3 节点通过管道 V 与铁路的联合运输予以保障。考虑到 2030 年成品油管道剩余能力存在进一步扩大的可能性,场景 3 相较场景 2 仅上调了成品油管道剩余能力。对比场景 3 与场景 2 的运量,管道 I、管道 II、S23—S19 段分别增加甲醇管道运量  $50\times 10^4$  t、 $20\times 10^4$  t、 $9\times 10^4$  t, D20—D21 段、S20—S21 段分别降低甲醇铁路运量  $10\times 10^4$  t、 $11\times 10^4$  t,使得甲醇多式联运系统的运输成本下降了  $4.06\times 10^8$  元,体现出管道 I、管道 II 等成品油管道经改造后用于顺序输送甲醇具有现实可行性。

表 5 场景 1 下管道、铁路运输甲醇资源的流向与运量表  
Table 5 Flow direction and transport volume of methanol transported by pipeline and railway under Scenario 1

运输路径	运输方式	运量/(10 <sup>4</sup> t)	运输路径	运输方式	运量/(10 <sup>4</sup> t)	运输路径	运输方式	运量/(10 <sup>4</sup> t)
S3→D3	管道	119	D14→D15	管道	158	S17→S23	铁路	60
S4→S3	管道	64	D15→D16	管道	128	S18→S19	铁路	60
S4→D1	管道	58	D16→S10	管道	39	S21→S22	铁路	30
S4→D4	管道	190	D23→D25	管道	355	S22→S23	铁路	60
S7→D12	管道	223	D24→D25	管道	500	S23→D24	铁路	60
S10→S20	管道	109	S5→G5	铁路	60	D3→D2	铁路	48
S13→S12	管道	60	S6→G6	铁路	50	D3→G3	铁路	20
S13→S15	管道	352	S8→D9	铁路	60	D7→D8	铁路	46
S19→D25	管道	500	S8→G15	铁路	60	D9→D10	铁路	33
S20→S22	管道	169	S9→D10	铁路	2	D16→S10	铁路	60
S22→S23	管道	269	S9→D11	铁路	38	D20→D21	铁路	35
S23→S19	管道	40	S13→S12	铁路	60	D24→D25	铁路	60
S23→D25	管道	480	S13→S14	铁路	60	G5→D5	铁路	45
D4→S7	管道	128	S14→D20	铁路	60	G6→S5	铁路	25
D12→D13	管道	196	S15→S14	铁路	60	G15→D7	铁路	60
D13→D14	管道	187	S16→S17	铁路	60			

注:“→”表示资源流向。

采用上述甲醇区域多式联运优化模型进行计算可得到 3 种场景下管道、铁路、罐车的运输量占比(图 6),可见,罐车运输量从场景 1 的 47.65%下降至场景 2 的 34.88%,而后又进一步下降至场景 3 的 33.89%。

因此,改造成品油管道并新建甲醇管道能够在较大程度上替代罐车运输,提升整个系统的经济性。随着甲醇供需能力的增加,多式联运系统更倾向于选择单位运输费用较低的管道运输方式。鉴于既有成品油管道

表 6 场景 2 下管道、铁路运输甲醇资源的流向与运量表  
Table 6 Flow direction and transport volume of methanol transported by pipeline and railway under Scenario 2

运输路径	运输方式	运量/(10 <sup>4</sup> t)	运输路径	运输方式	运量/(10 <sup>4</sup> t)	运输路径	运输方式	运量/(10 <sup>4</sup> t)
S3→D3	管道	147	D23→D25	管道	500	S22→S23	铁路	60
S4→D4	管道	530	D24→D25	管道	500	S23→D24	铁路	60
S7→D12	管道	530	S5→G5	铁路	60	D3→D1	铁路	60
S10→S20	管道	475	S5→G6	铁路	53	D3→D2	铁路	29
S10→D18	管道	47	S6→D4	铁路	17	D3→G3	铁路	20
S13→S12	管道	60	S7→D12	铁路	60	D7→D8	铁路	7
S19→D25	管道	500	S8→D9	铁路	60	D9→D10	铁路	60
S20→S22	管道	475	S8→G15	铁路	1	D10→S9	铁路	22
S22→S23	管道	333	S9→D11	铁路	60	D11→S10	铁路	60
S22→D25	管道	305	S10→D17	铁路	60	D12→D13	铁路	60
S23→S19	管道	42	S13→S12	铁路	60	D13→D14	铁路	60
S23→D25	管道	500	S13→S14	铁路	60	D14→D15	铁路	60
D4→S7	管道	530	S14→D20	铁路	40	D15→D16	铁路	60
D12→D13	管道	530	S16→S17	铁路	60	D16→S10	铁路	60
D13→D14	管道	530	S17→S23	铁路	60	D20→D21	铁路	59
D14→D15	管道	530	S18→S19	铁路	60	D24→D25	铁路	60
D15→D16	管道	530	S20→S21	铁路	60	G5→D5	铁路	46
D16→S10	管道	521	S21→S22	铁路	60	G15→D7	铁路	10

注：“→”表示资源流向。

表 7 场景 3 下管道、铁路运输甲醇资源的流向与运量表  
Table 7 Flow direction and transport volume of methanol transported by pipeline and railway under Scenario 3

运输路径	运输方式	运量/(10 <sup>4</sup> t)	运输路径	运输方式	运量/(10 <sup>4</sup> t)	运输路径	运输方式	运量/(10 <sup>4</sup> t)
S3→D3	管道	147	D23→D25	管道	500	S22→S23	铁路	60
S4→D4	管道	580	D24→D25	管道	500	S23→D24	铁路	60
S7→D12	管道	580	S5→G5	铁路	60	D3→D1	铁路	60
S10→S20	管道	475	S5→G6	铁路	53	D3→D2	铁路	29
S10→D18	管道	67	S6→D4	铁路	17	D3→G3	铁路	20
S13→S12	管道	60	S7→D12	铁路	60	D7→D8	铁路	7
S19→D25	管道	500	S8→D9	铁路	60	D9→D10	铁路	60
S20→S22	管道	475	S8→G15	铁路	10	D10→S9	铁路	23
S22→S23	管道	322	S9→D11	铁路	60	D11→S10	铁路	60
S22→D25	管道	305	S10→D17	铁路	60	D12→D13	铁路	60
S23→S19	管道	51	S13→S12	铁路	60	D13→D14	铁路	60
S23→D25	管道	500	S13→S14	铁路	60	D14→D15	铁路	60
D4→S7	管道	580	S14→D20	铁路	43	D15→D16	铁路	60
D12→D13	管道	580	S16→S17	铁路	60	D16→S10	铁路	60
D13→D14	管道	580	S17→S23	铁路	60	D20→D21	铁路	49
D14→D15	管道	580	S18→S19	铁路	60	D24→D25	铁路	60
D15→D16	管道	580	S20→S21	铁路	49	G5→D5	铁路	46
D16→S10	管道	541	S21→S22	铁路	60	G15→D7	铁路	10

注：“→”表示资源流向。

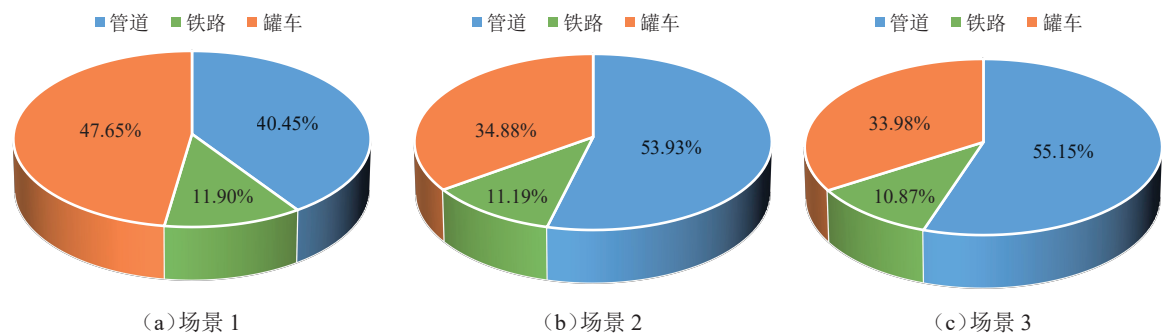


图 6 3 种场景下管道、铁路、罐车运输量占比图  
Fig. 6 Proportion of transport volumes by pipeline, railway and tanker under three scenarios

的布局与甲醇供需格局较为匹配,故优化模型更倾向于优先改造成品油管道,新建甲醇管道则可作为现有运输能力的有效补充。在该区域内,铁路布局与既有成品油管道存在一定程度的重叠,并在部分区域起到了拓展与补充的功能。因此,在 3 种场景中,铁路运输量均稳定在约 11%,且铁路负荷率普遍处于中高水平,通常不会在铁路覆盖范围内新建成品油管道,铁路运

输在该区域也不会被大规模取代。  
4.2.2 成品油储运设施改造情况  
采用上述甲醇区域多式联运优化模型计算可得到该区域 3 种场景下的成品油管道改造情况(表 8)。可见,尽管场景 1 改造的管段数量略多,但其改造管段的长度相对较短,总体属于小口径、短距离的管道类型。

表 8 3 种场景下成品油管道改造情况汇总表  
Table 8 Summary of the transformation of refined oil pipeline under three scenarios

场景序号	改造管段数量/条	改造管段长度/km	成品油管道改造费用/(10 <sup>4</sup> 元)	运输甲醇量/(10 <sup>4</sup> t)
场景 1	16	2 948.67	1 769.20	2 137
场景 2	15	3 038.15	1 822.89	5 810
场景 3	15	3 038.15	1 822.89	6 198

基于甲醇区域多式联运优化模型的计算结果,可获得 3 种不同情景下已建管段的负荷率变化情况(图 7)。此外,为更加直观地展示优化带来的改善效果,图 7 中还引入了两个对比场景:①实际成品油管道

运行场景,即当前成品油管道仅用于输送成品油资源;②成品油剩余能力增长场景,即 2030 年不进行任何干预的情况下,成品油管道仍单一输送成品油,导致剩余能力进一步扩大。可见,成品油管道被改造用于输

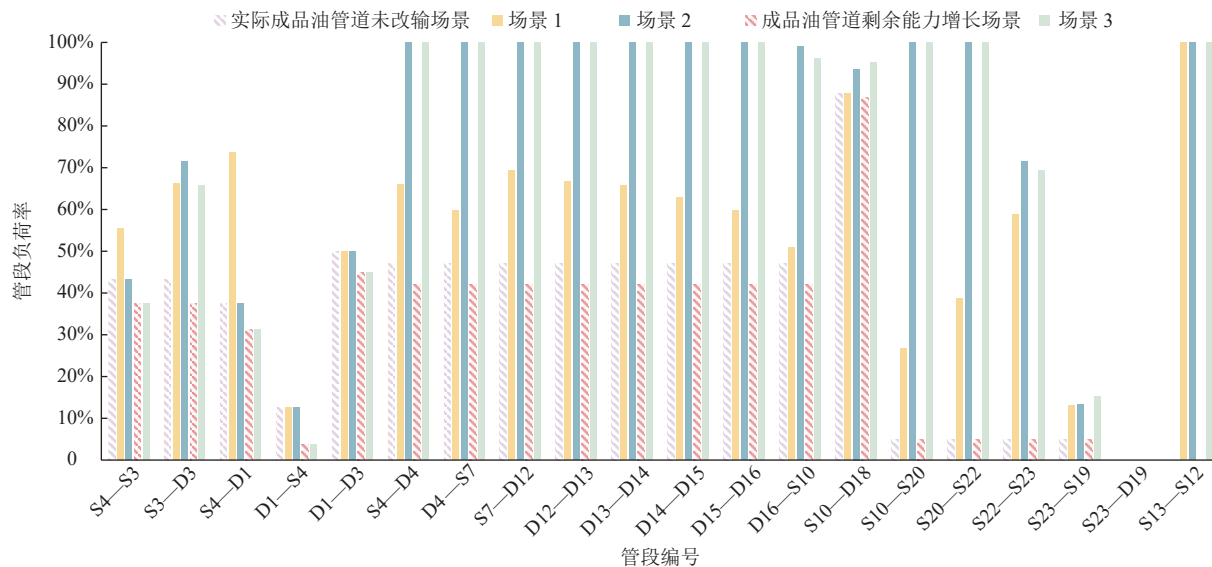


图 7 5 种场景下已建管段负荷率变化情况图  
Fig. 7 Load rate changes of existing pipeline segments under five scenarios

送甲醇后, 大多数的管道负荷率显著增加, 低负荷运行的成品油储运设施得到了充分利用, 管道 I ~ 管道 VI 均多次被改造。在场景 1 中, 主干线 S4—D4、D4—S7、S7—D12、D12—D13、D13—D14、D15—D16、D16—S10 管段负荷率提高了 27%~47%, 而在场景 2 与场景 3 中, 这些管段实现满负荷运行, 负荷率分别提高了 113%、138%。在 3 种场景中, 支线 S13—S12 的负荷率则从 0 提高至 100%, 其他支线(S10—S20、S20—S22、S22—S23、S23—S19)也实现了重新利用。因此, 在后续管道改造实施中, 可优先考虑对上述关键管段进行改造。

甲醇与成品油在物理性质上仍存在差异, 因此将成品油管道改造用于甲醇运输时, 需同步对沿线储罐进行改造。场景 1 共改造成品油储罐 16 座, 改造储罐容量为  $179.51 \times 10^4$  t, 改造费用为  $19.75 \times 10^4$  元; 场景 2 改造成品油储罐 15 座, 改造储罐容量提升至  $488.04 \times 10^4$  t, 改造费用为  $53.68 \times 10^4$  元。场景 3 同样改造成品油储罐 15 座, 但改造容量进一步增加至  $520.63 \times 10^4$  t, 改造费用为  $57.27 \times 10^4$  元。

#### 4.2.3 甲醇储运设施建设情况

受区域边界条件限制, 边界地带运输能力存在不足, 因此采用上述甲醇区域多式联运优化模型规划的新建管道主要集中在 D25 省外的虚拟节点区域。该区域在未来将成为甲醇资源调配的重要区域, 建议适当规划甲醇储运设施建设项目, 以保障后续甲醇保供目标的实现。此外, 场景 1 中对 S13—S15 段新建了长度为 34.37 km、直径系数为 0.85~1.70 m/t、输量为  $352 \times 10^4$  t 的中口径甲醇管道, 总费用为  $13.92 \times 10^8$  元。在节点 S15 处需新建容量为  $29.57 \times 10^4$  t 的甲醇储罐, 总费用为  $5.47 \times 10^8$  元。

## 5 结论

尽管甲醇在清洁能源转型中具有广阔应用前景, 但现阶段其储运系统在空间布局与资源配置方面仍存在短板, 制约了其大规模推广与高效利用。以管道、铁路罐车、公路罐车多方式协同运输系统为研究对象, 在综合考虑甲醇物料平衡、甲醇管道建设、甲醇储罐建设、成品油管道改造及成品油储罐改造约束条件下, 构建了以甲醇整体运输、甲醇管道建设、成品油管道改造、甲醇储罐建设以及成品油储罐改造的总费用最

小化为目标的甲醇区域多式联运优化模型。以中国某区域多式联运系统为研究对象, 设置 3 种供需场景, 采用所构建模型对各场景进行优化求解, 得到各运输路径的最优运量分配、甲醇管道建设、甲醇储罐建设、成品油管道改造及成品油储罐改造规划方案。研究结果表明, 系统整体呈现出以管道运输逐步替代公路罐车运输的趋势。在 3 个场景中, 通过改造该区域成品油管道 I、管道 II 及管道 III 在甲醇输送中发挥了关键作用。同时, 建议在该区域优先规划建设中心口径甲醇管道, 以进一步完善区域运输结构。在场景 1 中, 主干线的整体负荷率相较于仅用于成品油输送时提高了 27%~47%。而在场景 2 和场景 3 中, 这些管段实现满负荷运行, 负荷率分别提高了 113%、138%。此外, 场景 3 的甲醇多式联运系统相较于场景 2 的年运输成本可减少约  $4.06 \times 10^8$  元。综上, 所建模型适用于面向区域化发展的甲醇多式联运系统, 具有良好的适应性与推广价值, 可为政府部门、相关企业制定甲醇区域多式联运发展策略与规划储运设施建设方案提供理论参考和决策支持。

#### 参考文献:

- [1] 冯成, 周雨轩, 刘洪涛. 氢气存储及运输技术现状及分析[J]. 科技资讯, 2021, 19(25): 44-46. DOI: 10.16661/j.cnki.1672-3791.2109-5042-8196.
- FENG C, ZHOU Y X, LIU H T. Current situation and analysis of hydrogen storage and transportation technology[J]. Science & Technology Information, 2021, 19(25): 44-46.
- [2] 高建刚, 姜亚鹏, 包宝青, 王书琦, 崔书明. 绿氢转化制绿色甲醇与绿氨分析[J]. 化工进展, 2025, 44(4): 1987-1997. DOI: 10.16085/j.issn.1000-6613.2024-1731.
- GAO J G, JIANG Y P, BAO B Q, WANG S Q, CUI S M. Green methanol and green ammonia synthesis by green hydrogen[J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2025, 44(4): 1987-1997.
- [3] 林宝辉, 张文伟, 王法, 孟凡鹏, 吴凤荣, 吴文, 等. 长距离甲醇输送管道技术研究进展[J]. 油气与新能源, 2025, 37(2): 17-25. DOI: 10.3969/j.issn.2097-0021.2025.02.003.
- LIN B H, ZHANG W W, WANG F, MENG F P, WU F R, WU W, et al. Research progress in long-distance methanol pipeline transport technology[J]. Petroleum and New Energy, 2025, 37(2): 17-25.
- [4] 梁永图, 邱睿, 涂仁福, 杜渐, 廖缙, 邵奇. 中国油气管网运行关



- 键技术及展望[J]. 石油科学通报, 2024, 9(2): 213–223. DOI: [10.3969/j.issn.2096-1693.2024.02.016](#).
- LIANG Y T, QIU R, TU R F, DU J, LIAO Q, SHAO Q. Key technologies and prospects for the operation of oil and gas pipeline networks in China[J]. *Petroleum Science Bulletin*, 2024, 9(2): 213–223.
- [5] 曹传胜, 唐畅, 赵璐, 程帅, 张云龙. “双碳”目标下氢能多元领域利用现状与展望[J]. 现代化工, 2025, 45(6): 15–20. DOI: [10.16606/j.cnki.issn0253-4320.2025.06.003](#).
- CAO C S, TANG C, ZHAO L, CHENG S, ZHANG Y L. Current status and prospects of hydrogen energy utilization in multiple fields under “carbon dioxide emission peaking and carbon neutrality” goals[J]. *Modern Chemical Industry*, 2025, 45(6): 15–20.
- [6] 张慧敏, 田磊, 孙云峰, 杨文, 彭世垚, 刘翠伟, 等. 有机液体储氢研究进展及管道运输的思考[J]. 油气储运, 2023, 42(4): 375–390. DOI: [10.6047/j.issn.1000-8241.2023.04.002](#).
- ZHANG H M, TIAN L, SUN Y F, YANG W, PENG S Y, LIU C W, et al. Progress of research on hydrogen storage in organic liquid and thinking about pipeline transportation[J]. *Oil & Gas Storage and Transportation*, 2023, 42(4): 375–390.
- [7] 刘伟, 陈佳鹏, 解强. 中煤龙化化工公司管输甲醇的费用测算及与汽运的经济性比较[J]. 化工管理, 2014(9): 10–11. DOI: [10.3969/j.issn.1008-4800.2014.09.008](#).
- LIU W, CHEN J P, XIE Q. Cost calculation of pipeline methanol transportation by China Coal Longhua Chemical Company and Economic comparison with road transportation[J]. *Chemical Engineering Management*, 2014(9): 10–11.
- [8] LI C J, HAO Q W, ZHANG W, WANG S Y, YANG J. Development strategies for green hydrogen, green ammonia, and green methanol in transportation[J]. *Renewable Energy*, 2025, 246: 122904. DOI: [10.1016/j.renene.2025.122904](#).
- [9] CUI J Y, AZIZ M. Techno-economic analysis of hydrogen transportation infrastructure using ammonia and methanol[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2023, 48(42): 15737–15747. DOI: [10.1016/j.ijhydene.2023.01.096](#).
- [10] 刘翠伟, 艾丽纳, 杜长慧, 聂超飞, 杨文, 裴业斌, 等. 甲醇/柴油顺序输送混油规律模拟[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2025, 49(2): 205–213. DOI: [10.3969/j.issn.1673-5005.2025.02.020](#).
- LIU C W, AI L N, DU C H, NIE C F, YANG W, PEI Y B, et al. Simulation of mixed oil law of methanol/diesel in sequential transportation[J]. *Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science)*, 2025, 49(2): 205–213.
- [11] 许少新, 涂仁福, 徐宁, 李舒丹, 黄丽燕, 梁永图. 成品油管铁联运物流优化[J]. 油气储运, 2022, 41(7): 859–868. DOI: [10.6047/j.issn.1000-8241.2022.07.015](#).
- XU S X, TU R F, XU N, LI S D, HUANG L Y, LIANG Y T. Optimization of refined oil logistics considering pipeline-rail combined transportation[J]. *Oil & Gas Storage and Transportation*, 2022, 41(7): 859–868.
- [12] 张昊, 涂仁福, 张旭, 杨心怡, 苏艺薇, 夏玉恒, 等. 运输市场竞争下成品油管道效能评价[J]. 油气储运, 2024, 43(10): 1180–1188. DOI: [10.6047/j.issn.1000-8241.2024.10.011](#).
- ZHANG H, TU R F, ZHANG X, YANG X Y, SU Y W, XIA Y H, et al. Efficiency evaluation of product oil pipeline under transportation market competition[J]. *Oil & Gas Storage and Transportation*, 2024, 43(10): 1180–1188.
- [13] FU G T, TU R F, QIU R, WAN X W, SU Y W, ZHANG F L, et al. Energy, economic and environmental impact analysis of adjusting oil refinery capacity: an interregional optimization approach for resource allocation[J]. *Energy*, 2025, 320: 135275. DOI: [10.1016/j.energy.2025.135275](#).
- [14] 涂仁福, 梁永图, 邵奇, 廖绮, 邱睿, 张昊, 等. 绿氨-成品油综合运输系统适应性分析与规划[J]. 油气储运, 2024, 43(4): 361–372. DOI: [10.6047/j.issn.1000-8241.2024.04.001](#).
- TU R F, LIANG Y T, SHAO Q, LIAO Q, QIU R, ZHANG H, et al. Adaptability analysis and planning of green ammonia and product oil integrated transmission system[J]. *Oil & Gas Storage and Transportation*, 2024, 43(4): 361–372.
- [15] QIU R, TU R F, WEI X M, ZHANG H, GAO M D, LIAO Q, et al. Evaluation and optimization of pipeline pricing strategies on oil product logistics in China[J]. *Journal of Pipeline Science and Engineering*, 2024, 4(1): 100144. DOI: [10.1016/j.jpse.2023.100144](#).
- [16] 聂超飞, 姜子涛, 刘罗茜, 左丽丽, 苗青, 李博生, 等. 甲醇管道输送技术发展现状及挑战[J]. 油气储运, 2024, 43(2): 153–162. DOI: [10.6047/j.issn.1000-8241.2024.02.004](#).
- NIE C F, JIANG Z T, LIU L Q, ZUO L L, MIAO Q, LI B S, et al. Current status and challenges in technology development for methanol pipeline transmission[J]. *Oil & Gas Storage and Transportation*, 2024, 43(2): 153–162.
- [17] 梁永图, 涂仁福, 张昊, 刘春颖, 付广涛, 邱睿, 等. 油气管道在多能融合新型能源体系建设中的作用[J]. 油气储运, 2025, 44(4): 361–378. DOI: [10.6047/j.issn.1000-8241.2025.04.001](#).

- LIANG Y T, TU R F, ZHANG H, LIU C Y, FU G T, QIU R, et al. Role of oil and gas pipelines in the construction of a new energy system with multi-energy integration[J]. *Oil & Gas Storage and Transportation*, 2025, 44(4): 361–378.
- [18] LI Z B, LIAO Q, XU B, TU R F, LI L C, WANG Y F, et al. A decision-making framework for scheduling of multiproduct pipeline under the fair opening[J]. *Journal of Pipeline Science and Engineering*, 2024, 4(4): 100185. DOI: [10.1016/j.jpse.2024.100185](https://doi.org/10.1016/j.jpse.2024.100185).
- [19] 黄鑫, 滕霖, 聂超飞, 刘罗茜, 闫锋, 邱姝娟, 等. 液氨/甲醇/成品油顺序输送技术研究进展[J]. *油气储运*, 2023, 42(12): 1337–1351. DOI: [10.6047/j.issn.1000-8241.2023.12.003](https://doi.org/10.6047/j.issn.1000-8241.2023.12.003).
- HUANG X, TENG L, NIE C F, LIU L Q, YAN F, QIU S J, et al. Research progress on batch transportation technology of liquid ammonia/methanol/product oil[J]. *Oil & Gas Storage and Transportation*, 2023, 42(12): 1337–1351.
- [20] TU R F, LIU C Y, SHAO Q, LIAO Q, QIU R, LIANG Y T. Pipeline sharing: Optimal design of downstream green ammonia supply systems integrating with multi-product pipelines[J]. *Renewable Energy*, 2024, 223: 120024. DOI: [10.1016/j.renene.2024.120024](https://doi.org/10.1016/j.renene.2024.120024).
- [21] QIU R, ZHANG B, ZHAO W, TU R F, HE M Q, LIAO Q, et al. An integrated MINLP model for multi-party coordination in downstream oil supply chain[J]. *Petroleum Science*, 2024, 21(3): 2066–2079. DOI: [10.1016/j.petsci.2023.12.008](https://doi.org/10.1016/j.petsci.2023.12.008).
- [22] 沈亮, 倪玮隆, 许玉磊, 梁永图, 郭晓磊. 市场化运营模式下成品油管道输送能力分配[J]. *西安石油大学学报(自然科学版)*, 2025, 40(1): 90–98. DOI: [10.3969/j.issn.1673-064X.2025.01.011](https://doi.org/10.3969/j.issn.1673-064X.2025.01.011).
- SHEN L, NI W L, XU Y L, LIANG Y T, GUO X L. Allocation of refined oil pipeline transmission capacity under market-oriented mode[J]. *Journal of Xi'an Shiyou University (Natural Science Edition)*, 2025, 40(1): 90–98.
- [23] KIM T, KIM D, KIM Y, PARK J. Design and analysis of negative CO<sub>2</sub> emission methanol synthesis process incorporating green hydrogen and blue hydrogen[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2024, 476: 143796. DOI: [10.1016/j.jclepro.2024.143796](https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2024.143796).
- [24] 赵柯洋, 张衡, 贺波, 庞轶星, 程星鑫, 苏玉香, 等. 基于改进第二代非支配遗传算法的甲醇/柴油双燃料船舶发动机参数多目标优化[J]. *内燃机工程*, 2025, 46(1): 17–26. DOI: [10.13949/j.cnki.njgc.2025.01.003](https://doi.org/10.13949/j.cnki.njgc.2025.01.003).
- ZHAO K Y, ZHANG H, HE B, PANG Y X, CHENG X X, SU Y X, et al. Multi-objective optimization of methanol/diesel dual-fuel marine engine parameters based on improved non-dominated sorting genetic algorithm-II[J]. *Chinese Internal Combustion Engine Engineering*, 2025, 46(1): 17–26.
- [25] 丁爱护. 中国甲醇产业发展探讨[J]. *天津化工*, 2025, 39(2): 19–22. DOI: [10.3969/j.issn.1008-1267.2025.02.006](https://doi.org/10.3969/j.issn.1008-1267.2025.02.006).
- DING A H. Discussion on the development of China's methanol industry[J]. *Tianjin Chemical Industry*, 2025, 39(2): 19–22.
- [26] LI Z C, GUO Y, XU N, WANG B H, ZHONG R Q, LI W L, et al. Integration of a novel distributed water and energy system in the oilfield[J]. *Chemical Engineering Research and Design*, 2022, 186: 350–361. DOI: [10.1016/j.cherd.2022.08.008](https://doi.org/10.1016/j.cherd.2022.08.008).
- [27] LI Y N, LAN S, RYBERG M, PÉREZ-RAMÍREZ J, WANG X N. A quantitative roadmap for China towards carbon neutrality in 2060 using methanol and ammonia as energy carriers[J]. *iScience*, 2021, 24(6): 102513. DOI: [10.1016/j.isci.2021.102513](https://doi.org/10.1016/j.isci.2021.102513).
- [28] 邱睿. 成品油一次物流优化及协调研究[D]. 北京: 中国石油大学(北京), 2023.
- QIU R. Optimization and coordination of primary logistics of refined products[D]. Beijing: China University of Petroleum (Beijing), 2023.
- (编辑: 张雪琴)
- 
- 基金项目:** 国家自然科学基金资助项目“面向大规模成品油管网调度的数据解析与优化融合方法”, 52202405; 中国博士后科学基金第76批面上资助项目“液态清洁燃料综合管网协同调度优化理论与方法研究”, 2024M763640.
- 作者简介:** 付广涛, 男, 2001年生, 在读硕士生, 2023年毕业于中国石油大学(北京)油气储运工程专业, 现主要从事油气物流与长输管道运行优化、新能源储运相关技术的研究工作。地址: 北京市昌平区府学路18号, 102249。电话: 19932374939。Email: [fgtao8783@163.com](mailto:fgtao8783@163.com)
- 通信作者:** 梁永图, 男, 1971年生, 教授, 2009年博士毕业于中国石油大学(北京)油气储运工程专业, 现主要从事油气供应链优化、油气管道运行优化、油气田地面工程系统优化相关技术的研究工作。地址: 北京市昌平区府学路18号, 102249。电话: 13910970411。Email: [liangyt21st@163.com](mailto:liangyt21st@163.com)
- Received: 2025-05-09
  - Revised: 2025-06-12
  - Online: 2025-06-16

