

# 大规模风光发电制甲醇工艺的 灵活运行策略与成本优化

张婷婷<sup>1</sup>, 戚萌<sup>2\*</sup>, 孙龙珠<sup>3</sup>, 路帅<sup>2</sup>, 刘义<sup>2</sup>

(1. 青岛欧赛斯环境与安全技术有限责任公司, 山东 青岛 266580;  
2. 中国石油大学(华东)化学与化工学院, 山东 青岛 266580;  
3. 中国石油工程建设有限公司北京设计分公司, 北京 100085)

**摘要:** 基于绿色甲醇离网生产、电网连接生产、双向联产 3 种模式, 提出并系统性地研究了该工艺的灵活运行及电力供应策略, 构建了相应的电力调度数学模型并应用基于人工神经网络的代理模型优化方法进行甲醇生产成本的优化。利用内蒙古通辽的风光数据, 以 3 种生产模式对应的灵活运行策略为基础, 评估了绿色甲醇生产的经济技术潜力。研究表明, 离网方案受风光波动影响较大, 甲醇成本高且能量利用率低; 与电网双向连接的甲醇与电力联产方案能够降低 24.6% 的甲醇生产成本, 提升整体能量利用效率至 50% 并同时保持高可再生能源渗透率。利用调度模型分析了中间氢气存储与甲醇产率对甲醇生产成本、可再生能源渗透率以及能量利用率的关系, 以期提供不同要求及目标下甲醇生产的优化运行策略。

**关键词:** 风光发电; 绿色甲醇; 灵活操作; 代理模型; 成本; 优化

中图分类号: TQ021.8

文献标志码: A

文章编号: 0253-4320(2023)09-0200-08

DOI: 10.16606/j.cnki.issn0253-4320.2023.09.041

## Flexible operation strategy and cost optimization of methanol production process driven by large-scale solar and wind power

ZHANG Ting-ting<sup>1</sup>, QI Meng<sup>2\*</sup>, SUN Long-zhu<sup>3</sup>, LU Shuai<sup>2</sup>, LIU Yi<sup>2</sup>

(1. Qingdao Oasis Environmental & Safety Technology Co., Ltd., Qingdao 266580, China;

2. College of Chemistry and Chemical Engineering, China University of Petroleum, Qingdao 266580, China;

3. Beijing Design Company of China Petroleum Engineering and Construction Corp., Beijing 100085, China)

**Abstract:** Based on three green methanol production modes, namely off-grid, grid-connected, and bi-directional cogeneration, this study proposes and systematically investigates the flexible operation and power supply strategies of this process. A corresponding mathematical model for power dispatch is established, and an optimization method based on artificial neural networks is applied to optimize the methanol production cost. Using the wind/solar power data from Tongliao, Inner Mongolia, China, the economic and technical potential of methanol production is evaluated based on the flexible operation strategies corresponding to the three production modes. The study shows that the off-grid mode is significantly affected by the fluctuations of the wind/solar power, resulting in higher methanol cost and lower energy utilization efficiency. The methanol and electricity cogeneration mode bi-directionally connected to the grid can reduce the methanol production cost by 24.6%, improve the overall energy utilization efficiency to 50%, and maintain a high penetration rate of renewable energy. The relationship between hydrogen storage, methanol yield respectively and methanol production cost, renewable energy penetration rate, energy utilization efficiency respectively is analyzed by using the dispatch model to provide optimal operating strategies under different requirements and objectives.

**Key words:** wind and solar power; green methanol; flexible operation; surrogate model; cost; optimization

向低碳及碳中和社会的深度转型需要大规模开发及利用可再生能源, 以替代传统高碳排放的化石能源。中国的陆地风能和光能资源储量丰富, 居世界前列<sup>[1]</sup>, 但以风光为代表的可再生能源存在间歇性强、时空分布不均等问题, 难以直接被消纳利用。将可再生电力转化为气体(氢气、甲烷)或液体燃料(甲醇)的 Power-to-Gas 和 Power-to-Liquid 技术<sup>[2]</sup>

是目前实现百兆瓦级别规模储能的唯一可行技术。将电解水生成的氢气与 CO<sub>2</sub> 进一步在热催化反应器中生成甲醇能实现可再生能源的高密度存储和低成本运输, 同时 CO<sub>2</sub> 作为原料也能够促进碳循环和终端再利用。李灿等<sup>[3]</sup>成功开发首套千吨级太阳能绿色甲醇项目, 虽然技术可行性已被证明, 但由于风光电力成本过高, 导致绿色甲醇的经济性较差且

收稿日期: 2022-11-18; 修回日期: 2023-07-10

基金项目: 国家重点研发计划专题(2021YFB400905)

作者简介: 张婷婷(1983-), 女, 硕士, 高级工程师, 研究方向为化工系统节能优化, 18661883616@163.com; 戚萌(1994-), 男, 博士, 讲师, 研究方向为化工系统工程和能源系统工程, 通讯联系人, qimeng@upc.edu.cn。

无法与传统化石路线竞争<sup>[4]</sup>。

为降低风光发电制绿色甲醇的成本,重点是削减电力供应成本和工艺设计优化,Kenkel等<sup>[5]</sup>基于工艺超结构对甲醇生产进行了经济与环境的双目标优化,将成本降至892欧元/t。Chen等<sup>[6]</sup>通过提高工艺灵活性来解决风光供应的间歇性,优化的电力供应和装置规模可将甲醇生产成本降低20%~35%。Huang等<sup>[7]</sup>设计了太阳能驱动模块化甲醇合成系统以最大化甲醇的生产灵活性,该模块化生产系统成本比规模化生产低15.5%。孔昕山等<sup>[8]</sup>基于模块化生产系统进一步优化了分时储热系统以实现能量最大化利用。Zheng等<sup>[9]</sup>基于数据驱动提出了并网情况下的甲醇系统生产调度方案,将运营成本降低4.5%。以上研究表明,提高甲醇工艺的操作灵活性和优化电力调度供应是降低成本的有效方案,然而目前尚缺乏此工艺操作灵活性策略的系统性分析及对工艺经济性的影响研究。本文中提出了基于中间氢气存储与电网连接的3种工艺操作灵活性策略,并为每种策略开发了能量供应调度方案。研究了每种策略下储氢规模以及甲醇生产规模对成本、可再生能源渗透率以及效率的影响。选取我国北方风光富集区域,应用实际数据进行基于替代模型的成本优化和工艺经济性评估,以期提供有效降低绿色甲醇成本的方案并推动工业化生产。

## 1 灵活性操作策略

可再生电力制绿色甲醇工艺包含电解水制氢单元,中间氢气存储单元,以及甲醇合成单元。研究指出,风光互补耦合能够有效缓解风光电力波动并降低成本,因此假设可再生电力为风光电力的混合<sup>[10]</sup>。该工艺的电力供应可由风电光电全部提供(称为离网生产),或大部分由风电光电提供,少量电力由电网辅助提供(称为电网连接生产)。此外,与电网连接下,多余的可再生电力还可在高峰时刻送至电网,形成基于双向电网连接的甲醇和电力联产(称为双向联产)。基于以上不同的电网连接方式形成如图1所示3种灵活性操作策略。

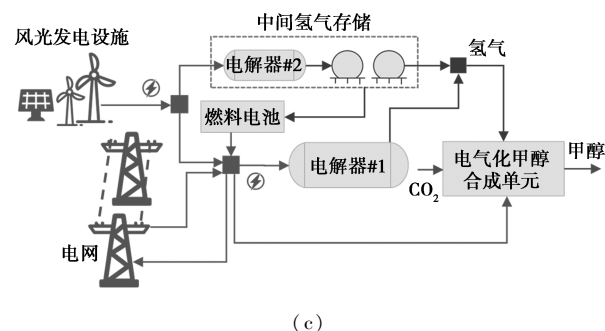
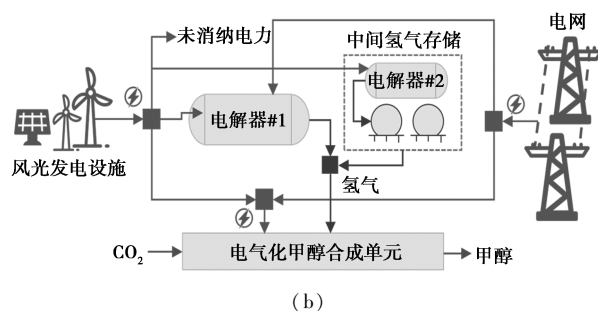
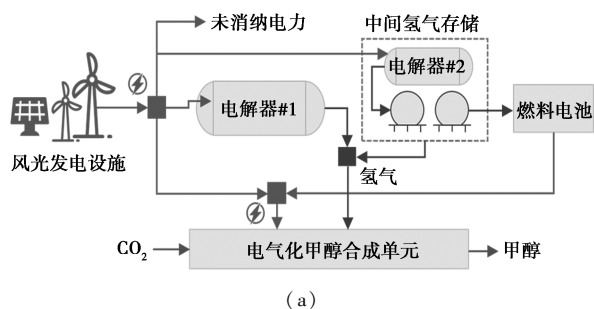


图1 3种生产模式示意图

### 1.1 离网生产

离网生产流程如图1(a)所示。电解器1与风光发电设施连接生产甲醇合成所需的氢气并直接通入甲醇合成单元。若可再生电力大于电解器1额定电力需求,多余电力将送往中间氢气存储单元,电解器2将多余电力转化为氢气并以压缩形式存储。若可再生电力小于电解器1额定电力需求,此时电解器1生产氢气不足以满足甲醇合成需求,氢气将由中间氢气存储单元提供,中间氢气存储规模必须足够大以保证任何时候都能满足氢气供应。此外,甲醇合成单元为纯电气化单元,即只需要电能驱动,而不需要任何额外热能。甲醇合成单元对电能需求与电解相比较低,通常由可再生电力直接提供,其优先度高于电解器1、2。若可再生电力非常低以至于无法提供甲醇合成单元所需电力,剩余所需电力将通过燃料电池利用氢气发电提供。

### 1.2 电网连接生产

电网连接生产流程如图1(b)所示,电解器1和2的运作原理与离网生产相同。不同的是,电网取代燃料电池以提供备用电力供应甲醇合成单元和电解器1。在电网连接生产中,若中间氢气存储不足以提供所需的氢气时,电网将补充用于生产剩余所需氢气的能量至电解器1。因此,电网连接生产的中间氢气存储容量存在一定的设计空间,容量越大所需电网电力就越小,反之亦然。

### 1.3 双向联产

双向联产流程如图1(c)所示,电解器1和甲醇

合成单元的运作原理与电网连接生产相同。不同的是,双向联产中的中间氢气存储需要设计足够大以消纳所有的可再生电力(100%利用率)。而在离网生产和电网连接生产中,因为需要减少中间氢气存储的规模 and 成本,可再生电力在最优成本下可能无法被全部消纳。中间氢气存储单元除了向甲醇合成单元输送氢气外,多余氢气将通过燃料电池在电网用电高峰时刻发电并送入电网,缓解高峰负荷的同时获取售电利润。此生产流程消纳全部风光电力并联产甲醇和高峰电力。

## 2 调度与优化模型

### 2.1 基于工艺灵活操作的调度方案

基于前述的工艺灵活操作策略,制定了数学调度模型来优化电力供应和储能规模。本文中假设针对工艺调度操作的时间为 8 760 h 即 1 a,定义可再生电力(风光混合发电)基于每小时的发电量为:

$$P_{re}(t) = P_w(t)f_w + P_s(t)f_s \quad (1)$$

$P_{re}(t)$ 、 $P_w(t)$ 、 $P_s(t)$  分别为风光混合、风电和光电

$$F_{PIM}^1(t) = \begin{cases} \gamma_{H_2} F_{MeOH} - (P_{re}(t) - P_{MeOH})/SP_{CH_2}, & P_{mis}(t) < 0, P_{re}(t) \geq P_{MeOH} \\ \gamma_{H_2} F_{MeOH}, & P_{re}(t) < P_{MeOH} \\ 0, & \text{Otherwise} \end{cases} \quad (6)$$

$$F_{FC}^1(t) = \begin{cases} (P_{MeOH} - P_{re}(t))/SG_{H_2}, & P_{re}(t) < P_{MeOH} \\ 0, & \text{Otherwise} \end{cases} \quad (7)$$

式中, $F_{PIM}^1(t)$ 和 $F_{FC}^1(t)$ 分别为 $t$ 时刻由存储单元补充甲醇合成单元的氢气量和燃料电池消耗氢气量; $SG_{H_2}$ 为单位氢气在燃料电池中的发电量。每小时中间氢气存储单元的氢气储存量可计算为:

$$L_{H_2}^1(t) = L_{H_2}^1(t-1) + F_{str}^1(t) - F_{PIM}^1(t) - F_{FC}^1(t) \quad (8)$$

假设初始时刻氢气存储量为 0 ( $L_{H_2}^1(0) = 0$ ),可计算每时刻的氢气存储量;氢气存储的容量 ( $L_{H_2}^{cap1}(0) = 0$ ),电解器 1 和 2 的总设计功率和燃料电池的设计功率可分别由下式决定:

$$L_{H_2}^2(t) = \begin{cases} L_{H_2}^2(t-1) + P_{mis}(t)/SP_{CH_2}, & P_{mis}(t) \geq 0, 0 \leq L_{H_2}^2(t-1) + P_{mis}(t)/SP_{CH_2} < L_{H_2}^{cap2} \\ L_{H_2}^{cap2}, & P_{mis}(t) \geq 0, L_{H_2}^2(t-1) + P_{mis}(t)/SP_{CH_2} \geq L_{H_2}^{cap2} \\ L_{H_2}^2(t-1) - \gamma_{H_2} F_{MeOH} + (P_{re}(t) - P_{MeOH})/SP_{CH_2}, & P_{mis}(t) < 0, P_{re}(t) \geq P_{MeOH}, \\ & L_{H_2}^2(t-1) - \gamma_{H_2} F_{MeOH} + (P_{re}(t) - P_{MeOH})/SP_{CH_2} \geq 0 \\ L_{H_2}^2(t-1) - \gamma_{H_2} F_{MeOH}, & P_{re}(t) \leq P_{MeOH}, L_{H_2}^2(t-1) - \gamma_{H_2} F_{MeOH} \geq 0 \\ 0, & \text{Otherwise} \end{cases} \quad (12)$$

每小时由电网供应的电量( $P_{grid}^2(t)$ )、未消纳电量( $P_{exc}^2(t)$ )和每小时电解器 2 的输入电量可计算为:

在 $t$ 时刻的发电量; $f_w$ 和 $f_s$ 分别为风光电占混合发电的比例。假设生产的甲醇量为 $F_{MeOH}$ ,则每小时可再生电力与甲醇生产所需电力之差为:

$$P_{mis}(t) = P_w(t)f_w + P_s(t)f_s - P_{H_2} - P_{MeOH} \quad (2)$$

$$P_{H_2} = SP_{H_2} \gamma_{H_2} F_{MeOH} \quad (3)$$

$$P_{MeOH} = SP_{MeOH} F_{MeOH} \quad (4)$$

$P_{mis}(t)$ 为 $t$ 时刻可再生电力与甲醇生产所需电力差值; $P_{H_2}$ 和 $P_{MeOH}$ 分别为电解器 1 和甲醇合成单元所需电力; $SP_{H_2}$ 和 $SP_{MeOH}$ 分别为单位氢气和甲醇生产所需电力; $\gamma_{H_2}$ 为所需氢气与甲醇生产量的比值。

#### 2.1.1 方案 1: 离网生产

对于离网生产,计算每小时流入中间存储单元的氢气量为:

$$F_{str}^1(t) = \begin{cases} P_{mis}(t)/SP_{CH_2}, & P_{mis}(t) \geq 0 \\ 0, & P_{mis}(t) < 0 \end{cases} \quad (5)$$

式中, $F_{str}^1(t)$ 为 $t$ 时刻流入中间存储单元的氢气量; $SP_{CH_2}$ 为单位氢气生产以及压缩所需电力。分别计算每小时由存储单元补充甲醇合成单元的氢气量及每小时燃料电池消耗的氢气量为:

$$L_{H_2}^{cap1} = -\min(L_{H_2}^1(t)) \quad (9)$$

$$L_{ele1}^{cap1} + L_{ele2}^{cap1} = \max(P_{re}(t)) \quad (10)$$

$$L_{FC}^{cap1} = \max(F_{FC}^1(t)) SG_{H_2} \quad (11)$$

式中, $L_{H_2}^{cap1}$ 、 $L_{ele1}^{cap1}$ 、 $L_{ele2}^{cap1}$ 和 $L_{FC}^{cap1}$ 分别为中间氢气存储、电解器 1、电解器 2 和燃料电池的设计规模。

#### 2.1.2 方案 2: 电网连接生产

对于电网连接生产,中间氢气存储设计容量为决策变量,因此首先定义设计容量为 $L_{H_2}^{cap2}$ ,则每小时中间氢气存储单元的氢气储存量( $L_{H_2}^2(t)$ )可计算为:

$$L_{H_2}^2(t) = \begin{cases} L_{H_2}^2(t-1) + P_{mis}(t)/SP_{CH_2}, & P_{mis}(t) \geq 0, 0 \leq L_{H_2}^2(t-1) + P_{mis}(t)/SP_{CH_2} < L_{H_2}^{cap2} \\ L_{H_2}^{cap2}, & P_{mis}(t) \geq 0, L_{H_2}^2(t-1) + P_{mis}(t)/SP_{CH_2} \geq L_{H_2}^{cap2} \\ L_{H_2}^2(t-1) - \gamma_{H_2} F_{MeOH} + (P_{re}(t) - P_{MeOH})/SP_{CH_2}, & P_{mis}(t) < 0, P_{re}(t) \geq P_{MeOH}, \\ & L_{H_2}^2(t-1) - \gamma_{H_2} F_{MeOH} + (P_{re}(t) - P_{MeOH})/SP_{CH_2} \geq 0 \\ L_{H_2}^2(t-1) - \gamma_{H_2} F_{MeOH}, & P_{re}(t) \leq P_{MeOH}, L_{H_2}^2(t-1) - \gamma_{H_2} F_{MeOH} \geq 0 \\ 0, & \text{Otherwise} \end{cases} \quad (12)$$

$$P_{\text{grid}}^2(t) = \begin{cases} (\gamma_{\text{H}_2} F_{\text{MeOH}} - L_{\text{H}_2}^2(t)) SP_{\text{H}_2}, & P_{\text{mis}}(t) < 0, P_{\text{re}}(t) \geq P_{\text{MeOH}}, L_{\text{H}_2}^2(t+1) = 0 \\ (\gamma_{\text{H}_2} F_{\text{MeOH}} - L_{\text{H}_2}^2(t)) SP_{\text{H}_2} + (P_{\text{MeOH}} - P_{\text{re}}(t)), & P_{\text{re}}(t) < P_{\text{MeOH}}, L_{\text{H}_2}^2(t+1) = 0 \\ 0, & \text{Otherwise} \end{cases} \quad (13)$$

$$P_{\text{exc}}^2(t) = \begin{cases} (L_{\text{H}_2}^2(t) + P_{\text{mis}}(t)/SP_{\text{CH}_2} - L_{\text{H}_2}^{\text{cap}2}) SP_{\text{CH}_2}, & P_{\text{mis}}(t) \geq 0, L_{\text{H}_2}^2(t+1) = L_{\text{H}_2}^{\text{cap}2} \\ 0, & \text{Otherwise} \end{cases} \quad (14)$$

$$P_{\text{exc}2}^2(t) = \begin{cases} (L_{\text{H}_2}^2(t+1) - L_{\text{H}_2}^2(t)) SP_{\text{CH}_2}, & P_{\text{mis}}(t) \geq 0 \\ 0, & P_{\text{mis}}(t) < 0 \end{cases} \quad (15)$$

$P_{\text{ele}2}^2(t)$ 为 $t$ 时刻电解器2的输入功率。电解器1和2的设计功率和燃料电池的设计功率则由下式决定:

$$L_{\text{ele}1}^{\text{cap}2} + L_{\text{ele}2}^{\text{cap}2} = SP_{\text{CH}_2} \gamma_{\text{H}_2} F_{\text{MeOH}} + \max(P_{\text{ele}2}^2(t)) \quad (16)$$

### 2.1.3 方案3:双向联产

双向联产需要定义中间氢气存储的设计容量 $L_{\text{H}_2}^{\text{cap}3}$ ,此氢气存储假设只供应甲醇合成,则每小时中间氢气存储单元的储存量( $L_{\text{H}_2}^3(t)$ )由式(12)计算。

$$L_{\text{H}_2}^{3-s}(t) = \begin{cases} L_{\text{H}_2}^{3-s}(t-1) + [P_{\text{exc}}^3(t)(1 - \text{Peak}(t))]/SP_{\text{CH}_2} - \\ [\max(P_{\text{exc}}^3(t))\text{Peak}(t)]/SG_{\text{H}_2}, & L_{\text{H}_2}^{3-s}(t-1) + [P_{\text{exc}}^3(t)(1 - \text{Peak}(t))]/SP_{\text{CH}_2} - \\ & [\max(P_{\text{exc}}^3(t))\text{Peak}(t)]/SG_{\text{H}_2} > 0 \\ 0, & L_{\text{H}_2}^{3-s}(t-1) + [P_{\text{exc}}^3(t)(1 - \text{Peak}(t))]/SP_{\text{CH}_2} - \\ & [\max(P_{\text{exc}}^3(t))\text{Peak}(t)]/SG_{\text{H}_2} \leq 0 \end{cases} \quad (17)$$

式中, $\text{Peak}(t)=1$ 代表高峰时段窗口; $\text{Peak}(t)=0$ 代表非高峰时段。每小时向电网的供电量为:

$$P_{\text{to grid}}^3(t) = \begin{cases} (L_{\text{H}_2}^{3-s}(t) - L_{\text{H}_2}^{3-s}(t+1)) SG_{\text{H}_2} + P_{\text{exc}}^3(t), & \text{Peak}(t) = 1 \\ 0, & \text{Peak}(t) = 0 \end{cases} \quad (18)$$

电解器1和2的设计功率和第二中间氢气存储的设计容量则分别由下式决定:

$$L_{\text{ele}1}^{\text{cap}3} + L_{\text{ele}2}^{\text{cap}3} = SP_{\text{H}_2} \gamma_{\text{H}_2} F_{\text{MeOH}} + [\max(P_{\text{mis}}(t)) SG_{\text{H}_2}]/SP_{\text{CH}_2} \quad (19)$$

$$L_{\text{H}_2}^{\text{cap}3}(t) = L_{\text{H}_2}^3(t) + \max(L_{\text{H}_2}^{3-s}(t)) \quad (20)$$

## 2.2 甲醇成本计算模型

工艺经济性使用甲醇生产的平准化成本(levelized cost of methanol production, LCOMeOH)衡量<sup>[11]</sup>:

$$\text{LCOMeOH} = \frac{\{(\text{CAPEX}_{\text{PIM}} + \text{CAPEX}_{\text{H}_2} + \text{CAPEX}_{\text{gen}})[(i \times (i+1)^z)/((i+1)^z - 1)] + (\text{OPEX}_{\text{PIM}} + \text{OPEX}_{\text{H}_2} + \text{OPEX}_{\text{gen}} + \text{OPEX}_e) - \text{BYP}_e\}}{NF_{\text{MeOH}}} \quad (21)$$

$\text{CAPEX}_{\text{PIM}}$ 、 $\text{CAPEX}_{\text{H}_2}$ 以及 $\text{CAPEX}_{\text{gen}}$ 分别代表甲醇合成单元、电解器与中间氢气存储单元以及可再生能源发电的固定投资成本; $\text{OPEX}_{\text{PIM}}$ 、 $\text{OPEX}_{\text{H}_2}$ 以及 $\text{OPEX}_{\text{gen}}$ 分别代表各单元的年操作成本; $\text{OPEX}_e$ 和 $\text{BYP}_e$ 分别代表电网购电成本与售电利润; $i$ 和 $z$ 分

每小时由电网供应的电量( $P_{\text{grid}}^3(t)$ )和未消纳电量( $P_{\text{exc}}^3(t)$ )由式(13)和式(14)计算。假设设置第二中间氢气存储来消纳所有风光电力,在高峰时段,多余电力将直接供应电网,而在低峰时段,风光电力以氢气形式存储在第二中间氢气存储单元再通过燃料电池在高峰时段向电网输电。高峰时段假设为12—20时,则第二中间氢气存储单元的储存量 $L_{\text{H}_2}^{3-s}(t)$ 为:

别代表利率(8%)和装置寿命(25 a)。

电解器使用质子交换膜电解装置以适应可再生能源输入的波动性,成本为600美元/kW。甲醇合成单元使用固定床反应器,成本计算模型来自文献[12],氢气高压存储及可再生能源发电成本参数来自文献[6]。电网购电与售电价格取为0.1美元/kWh(基于内蒙古通辽电价)。CO<sub>2</sub>成本假设为50美元/t。

## 2.3 基于代理模型的优化

针对提出的灵活甲醇生产工艺,在固定可再生能源和风电的装机规模下,设定以下3个关键变量以最小化甲醇生产成本(LCOMeOH):风电比例( $f_w, f_w + f_s = 1$ )、中间氢气存储容量( $L_{\text{H}_2}^{\text{cap}}$ )及甲醇生产量( $F_{\text{MeOH}}$ )需要注意,中间氢气存储容量在离网生产中由储氢容量曲线确定,因此离网生产中只存在风电比例和甲醇生产量2个决策变量,而在电网连接生产和双向联产方案中,3个关键变量需要同时优化。

由于所提出的调度模型含有条件公式且需要处理每小时为基准的可再生电力数据,以全年时间为基础的过程优化模型求解需要较大的计算量与时间成本,因此使用基于人工神经网络(ANN)的代理模型进行优化。代理模型优化是一种基于黑箱模型的优化方法,通过将模型输入与输出映射到ANN来拟

合黑箱模型,从而降低模型复杂度和减少计算时间。基于代理模型的优化步骤如下:首先使用拉丁超立方采样来进行模型试验,即收集 3 个变量可行域内的足够采样点(设定为 1 000),将采样点作为输入,根据所提出的调度模型以及成本计算模型计算相应甲醇成本,同样得到 1 000 个成本数据。将变量采样点与成本数据用于训练 ANN。该 ANN 结构采用基于 sigmoid 隐藏神经元和线性输出神经元的两层前馈神经网络,通过试错法来优化隐藏神经元的数量。训练、验证与测试集数据比例为 7:1.5:1.5,通过调整隐藏神经元数量保证模型准确度  $R^2$  不低于 0.999。基于拟合的 ANN 模型,最终通过粒子群优

化方法(PSO)最小化 LCOMeOH。

### 3 案例数据

选取内蒙古通辽考察甲醇生产的技术经济潜力。风光数据来源于 NASA MERRA2 数据库,获取 2021 年该地的风速与太阳光辐射强度,并转化为 100 MW 风光发电数据<sup>[13]</sup>。甲醇合成单元工艺如图 2 所示,其中甲醇精馏采用热泵精馏以实现电气化甲醇合成。甲醇合成与热泵精馏的能质平衡数据来自文献[12]和[6]。氢气生产耗电量基于质子交换膜电解装置,氢气压缩耗电量基于 2 MPa 压力,数据来源于文献[6]。

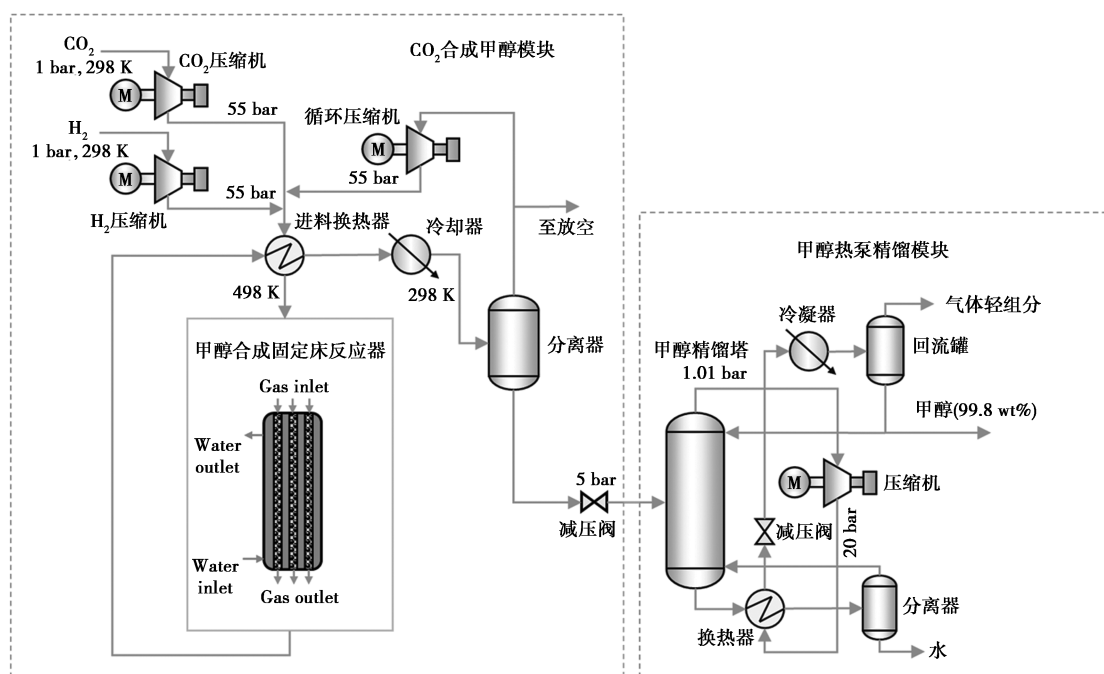


图 2 甲醇合成单元流程

## 4 结果与讨论

### 4.1 代理模型构建与优化结果

基于 3 种绿色甲醇生产方式的优化模型构建了相应的 ANN 代理模型,当隐藏神经元数量为 15 时,代理模型的精度满足优化需求, $R^2$  值均大于 0.999。将构建的代理模型进行优化得到的结果如表 1 所示。

表 1 绿色甲醇成本优化结果

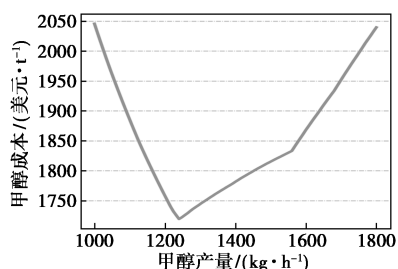
生产方案	$f_w$	$F_{MeOH}/$ ( $\text{kg}\cdot\text{h}^{-1}$ )	$L_{H_2}^{cap}/$ kg	LCOMeOH/ ( $\text{美元}\cdot\text{t}^{-1}$ )	可再生 能源渗 透率/%	能量 效率/ %
离网生产	0.403	1254.6	90.14	1725.3	35.08	100
电网连接生产	0.262	1700.0	15713.20	1400.4	38.84	92.56
电网双向联产	0.198	1500.0	16414.50	1301.2	53.11	95.32

示。对于每种方案通过灵敏度分析揭示决策变量对甲醇生产成本、可再生能源渗透率和能量利用效率的影响。

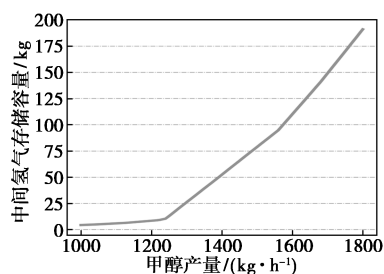
### 4.2 离网生产

在离网生产优化中,给定风光发电规模决策变量,甲醇产量( $F_{MeOH}$ )存在上限值。需要通过中间氢气存储量来确定最大上限值,即保证操作终点氢气存储量大于等于操作起点氢气存储量。优化得到的 LCOMeOH 为 1 725.3 美元/t,工艺的能量效率为 35.08%,离网生产若使用全部风光电力会导致巨大容量的中间氢气存储,因此减少中间氢气存储的容量是最小化甲醇生产成本的关键,较小的氢气存储造成大部分的风电光电未被储存和消纳,整体能量利用率偏低。较低的风光利用率也导致离网生产的

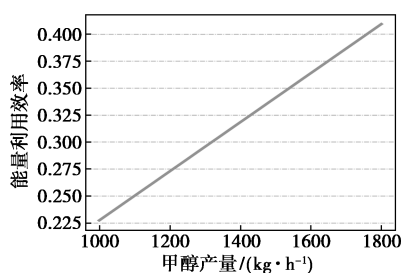
甲醇成本高,优化后的成本依然约为目前甲醇市场价格的4倍。在固定风电比例为0.403下,调整甲醇生产量观察其对甲醇成本、中间氢气存储容量以及能量利用效率的影响如图3所示。甲醇产量高于或低于最优值时,甲醇成本都显著增加,在甲醇低产量时其高成本由较低的能量利用效率导致(甲醇产能低),大量风光电力未被消纳而被弃用;而在甲醇高产量时其高价由较多的中间氢气存储容量所带来的高成本导致。当甲醇产量高于最优值时,中间氢气存储容量迅速增加,虽然能量利用效率得到了提高,但由于目前电解器成本和氢气存储成本较高,提高离网生产的能量利用效率不利于降低甲醇的生产成本。



(a) 甲醇成本



(b) 中间氢气存储容量



(c) 能量利用效率

图3 甲醇产量对甲醇成本、中间氢气存储容量以及能量利用效率的影响

### 4.3 电网连接生产

在电网连接生产中,中间氢气存储的容量为决策变量,且 $F_{MeOH}$ 没有上限值。优化后的LCOMeOH为1400.4美元/t,可再生能源渗透率为92.56%,工艺的能量效率为38.84%。其中,甲醇成本明显降

低,比离网生产降低了18.83%。原因是部分电力来源于电网,电网廉价的电力削减了甲醇成本,同时电网能够补偿部分风光间歇性,从而间接通过缩小中间氢气存储容量削减甲醇成本。即使并网生产,电网电力的使用不会大幅降低可再生能源在甲醇生产的渗透率,保证电力供应大部分来自于风光电力。因为甲醇产量提升,工艺的能量效率相应增加。图4显示了在最优成本条件下,中间氢气存储量和电网供电的变化曲线。在前2000h内,氢气存储量多次减少至0kg,此时电网开始供电,供给电解槽生产所需的氢气以及维持甲醇合成单元用电。6000h后,氢气存储量多次增加至满容量,此时风光电力无法被储存因而未被消纳。

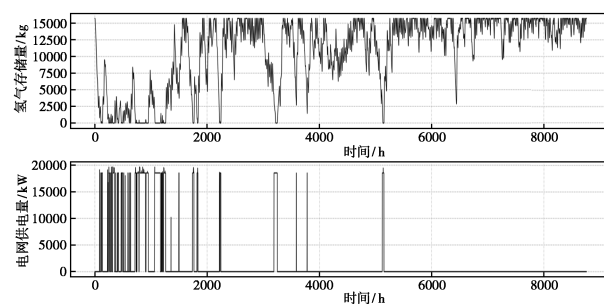
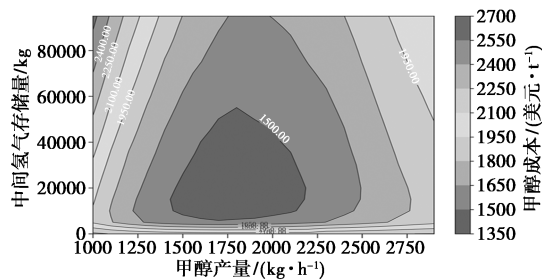


图4 中间氢气存储量和电网供电的变化曲线

在固定风电比例为0.262下,调整甲醇产量和中间氢气存储容量的影响如图5所示。甲醇成本在变量范围内存在最优点,增大或减小甲醇产量以及中间氢气存储容量都会相应增加成本,并且二者对成本的影响相当。减少产量或提升中间氢气存储容量有利于增加可再生能源渗透率,但会增加成本,而可再生能源渗透率与能量效率又同时存在互斥关系,提高渗透率降低能量效率,反之亦然。在低中间氢气存储容量时,调整氢气存储容量将大幅影响可再生能源渗透率和能量效率;在高容量时,甲醇产量将会变为关键因素,而氢气存储容量此时影响可忽略不计。即使提高甲醇成本,可再生能源渗透率或能量效率的提升非常有限。



(a)

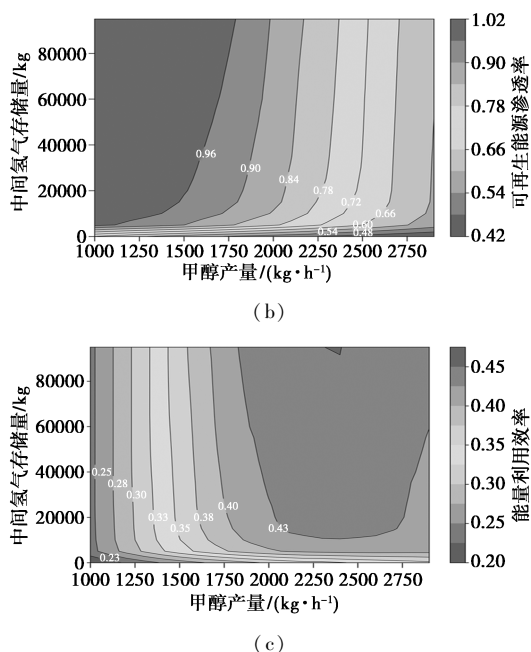


图 5 甲醇产量和中间氢气存储容量对甲醇成本、可再生能源渗透率以及能量利用效率的影响

#### 4.4 双向联产

在双向联产中,中间氢气存储的容量同样为决策变量,但需要对  $F_{\text{MeOH}}$  设定下限值。由于双向联产可实现风光电力的 100% 利用,  $F_{\text{MeOH}}$  值越小,输送至电网的电力就越多。为保证风光电力主要用于甲醇的生产,本文中设置最小值为 1 500 kg/h,相当于最多约 50% 的风电可用于联产电力。优化得到的 LCOMeOH 为 1 301.2 美元/t,可再生能源渗透率为 95.32%,工艺的能量效率为 53.11%。因为有额外的电力销售利润,双向联产的甲醇成本继续降低,第二中间氢气存储的成本和部分甲醇生产的成本由高峰时刻的售电利润抵消。与单向电网连接相比,甲醇生产的可再生能源渗透率略有上升;虽然甲醇产量较低,但由于实现了可再生能源 100% 利用和甲醇与电力联产,工艺的整体能量利用效率大幅提升。图 6 显示了在最优成本条件下,第一中间氢气存储量、电网供电量、向电网售电量以及第二中间氢气存储量的变化曲线。与单向电网连接不同,当第一中间氢气存储至满容量时,若此时为电网高峰时刻,多余可再生电力被直接送入电网;若此时为电网低谷时刻,可再生电力继续被转化为氢气并送入第二中间氢气存储。在高峰时段第二中间氢气存储的氢气被送入燃料电池发电。由此第二中间氢气存储量曲线可确定其设计容量应为 7 433.4 kg。

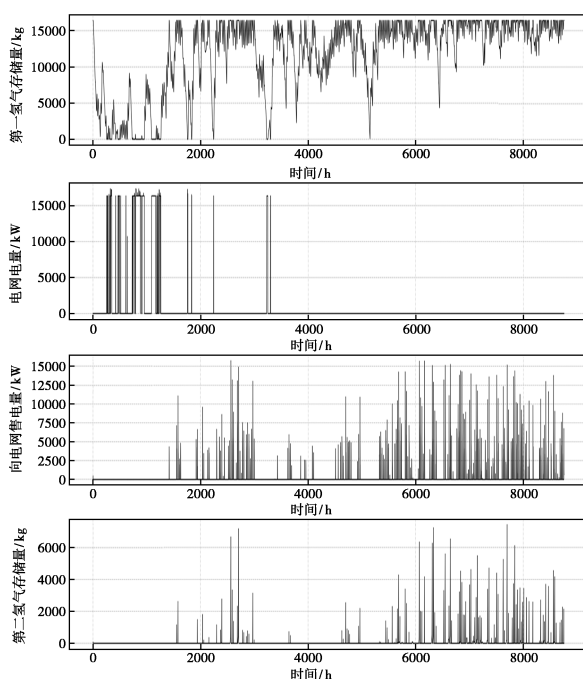
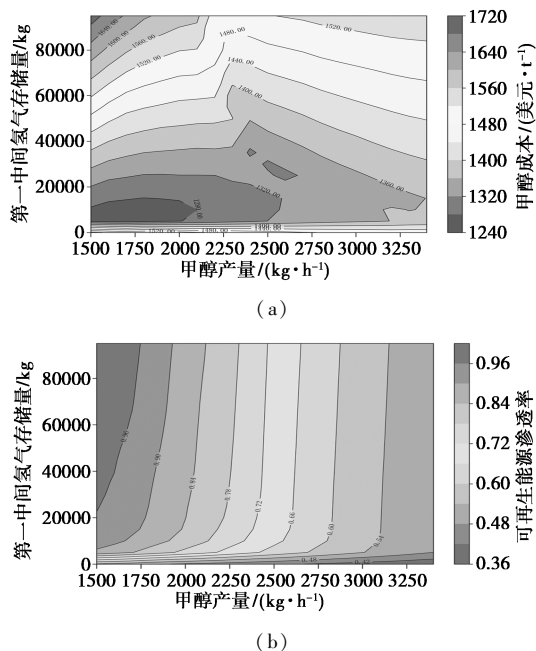
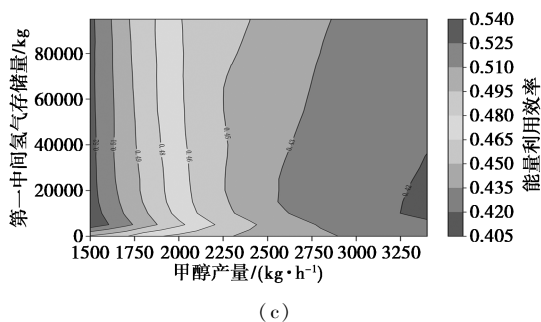


图 6 第一中间氢气存储量、电网供电量、向电网售电量以及第二中间氢气存储量的变化曲线

在固定风电比例为 0.198 下,调整甲醇产量和第一中间氢气存储容量的影响如图 7 所示。最佳成本点出现在了边界下限,这表明降低甲醇产量能够降低成本,在当前电价下将更多可再生电力存储并售至电网更为经济。售电对于降低甲醇成本至关重要,但若电价下降至一定程度,可能会出现甲醇产量的成本最优点。与单向电网连接生产相比,此方案的甲醇成本对甲醇产量和中间氢气存储容量的变化具有较低敏感性;同时,可再生能源渗透率与能量利



(b)



(c)

图7 甲醇产量和第一中间氢气存储容量对甲醇成本、可再生能源渗透率以及能量利用效率的影响

用效率之间不再具有互斥关系。在小幅增加成本的前提下,可通过增加第一中间氢气存储容量来提高可再生能源渗透率,同时保证相同的能量利用效率。

## 5 结论

提出了3种绿色甲醇生产的灵活运行策略,并通过制定电力调度模型和运用ANN替代模型进行了甲醇生产成本优化。运用内蒙古通辽的风光数据,对甲醇生产工艺进行了技术经济评估,得出以下结论。

(1) 与电网连接的灵活性运行方案对于甲醇生产成本的降低至关重要。利用所提出的电力调度方案,考虑单向与双向电网连接的甲醇生产工艺可将成本由1 725.3美元/t分别降为1 400.4、1301.2美元/t,同时保持较高的可再生能源渗透率(92%~95%),甲醇生产依然是低碳或近无碳。

(2) 若在偏远地区使用离网生产方案,中间氢气存储的容量是甲醇生产成本的关键因素。由于氢气存储成本较高,最优成本下大量的可再生能源无法被存储消纳,造成较低的利用效率。但若风光电力能够较好互补,同时中间存储成本能够大幅降低,离网生产方案将具备可行性。

(3) 单向和双向电网连接方案的甲醇成本降低受电网电价影响。较低价格的电网电力能够作为备用电力,降低成本;但高电网电价也并非负面影响,双向联产方案中峰值电网电力的销售也可带来更高额外利润,从而抵消更大部分的成本。即使采用灵活运行及优化方案,目前绿色甲醇的成本还是无法与传统化石路线竞争。进一步降低成本需要全面对

成本因子进行灵敏度分析,并进行全国范围内生产地理位置的优化。

## 参考文献

- [1] Zhang S, Zhao X, Andrews-speed P, *et al.* The development trajectories of wind power and solar PV power in China: A comparison and policy recommendations [J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2013, 26: 322-331.
- [2] Dieterich V, Buttler A, Hanel A, *et al.* Power-to-liquid via synthesis of methanol, DME or Fischer-Tropsch-fuels: A review [J]. *Energy & Environmental Science*, 2020, 13(10): 3207-3252.
- [3] 王芳. 用“液态阳光”将风电存起来、送出去 [J]. *风能*, 2021, (1): 24-25.
- [4] Bazaluk O, Havrysh V, Nutsenko V, *et al.* Assessment of green methanol production potential and related economic and environmental benefits: The case of China [J]. *Energies*, 2020, 13(12): 3113.
- [5] Kenkel P, Wassermann T, Rose C, *et al.* A generic superstructure modeling and optimization framework on the example of bi-criteria Power-to-Methanol process design [J]. *Computers & Chemical Engineering*, 2021, 150: 107327.
- [6] Chen C, Yang A. Power-to-methanol: The role of process flexibility in the integration of variable renewable energy into chemical production [J]. *Energy Conversion and Management*, 2021, 228: 113673.
- [7] Huang R, Kang L, Liu Y. Renewable synthetic methanol system design based on modular production lines [J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2022, 161: 112379.
- [8] 孔昕山, 黄仁星, 康丽霞, 等. 甲醇模块化生产中分时储热系统的优化设计 [J]. *化工学报*, 2022, 73(2): 770-781.
- [9] Zheng Y, You S, Li X, *et al.* Data-driven robust optimization for optimal scheduling of power to methanol [J]. *Energy Conversion and Management*, 2022, 256: 115338.
- [10] 钱宇, 陈耀熙, 史晓斐, 等. 太阳能波动特性大数据分析 with 风光互补耦合制氢系统集成 [J]. *化工学报*, 2022, 73(5): 2101-2110.
- [11] Adnan M A, Kibria M G. Comparative techno-economic and life-cycle assessment of power-to-methanol synthesis pathways [J]. *Applied Energy*, 2020, 278: 115614.
- [12] Vo N D, Oh M, Lee C H. Design guideline for CO<sub>2</sub> to methanol conversion process supported by generic model of various bed reactors [J]. *Energy Conversion and Management*, 2022, 269: 116079.
- [13] Arora A, Zantye M S, Hasan M M F. Sustainable hydrogen manufacturing via renewable-integrated intensified process for refueling stations [J]. *Applied Energy*, 2022, 311: 118667. ■