

光照扰动条件下太阳能甲醇分解反应器的运行 调控策略

张沛晔^{1,2,3}, 扶禹^{1,2}, 王珠^{1,2}, 刘明^{1,2}, 严俊杰^{1,2}

(1. 西安交通大学绿色氢电全国重点实验室, 710049, 西安; 2. 西安交通大学陕西省能源动力系统优化与控制重点实验室, 710049, 西安; 3. 西安热工研究院有限公司, 710054, 西安)

摘要: 太阳直接辐照度(DNI)的间歇性与波动性易导致太阳能甲醇分解反应器转化率偏离目标、效率降低甚至催化剂超温烧结, 为此, 本文提出了一种融合扩展卡尔曼滤波(EKF)状态估计与积分补偿的模型预测控制(IMPC)策略。首先, 建立太阳能甲醇分解反应器的一维动态模型及其状态空间模型; 其次, 设计基于扩展卡尔曼滤波(EKF)的状态估计器, 利用温度测量信息实时校正反应器状态, 实现组分质量分数的在线估计; 在此基础上, 以甲醇转化率跟踪为控制目标, 构建引入积分补偿的模型预测控制器(IMPC), 通过滚动优化求解光照扰动条件下的最优甲醇流量。结果表明, 在光学效率存在2%偏差时, 甲醇质量分数的平均估计偏差仅为0.06%; 在太阳云遮时应用提出的IMPC策略, 甲醇的最大转化率偏差仅0.41%, 优于标准MPC的1.85%和PI控制的6.87%, 平均转化率达94.97%, 稳定时间由400 s缩短至300 s, 太阳-化学效率由16.59%提升至18.11%, 且全程未出现催化剂超温现象, 实现了光照扰动条件下太阳能甲醇分解反应器的高效、安全与稳定运行。

关键词: 太阳能; 甲醇分解; 动态特性; 模型预测控制; 运行策略

中图分类号: TK91 **文献标志码:**

DOI: 10.7652/xjtubXXXXXX001 **文章编号:** 0253-987X(XXXX)XX-0001-10

Operational Regulation of a Solar Methanol Decomposition Reactor under Solar Irradiance Disturbances

ZHANG Peiye^{1,2,3}, FU Yu^{1,2}, WANG Zhu^{1,2}, LIU Ming^{1,2}, YAN Junjie^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Multiphase Flow in Power Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China; 2. Energy and Power System Optimization and Control Key Laboratory of Shaanxi Province, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China; 3. Xi'an Thermal Research Institute Co., Ltd. Xi'an 710054, China)

Abstract: The intermittency and fluctuations in direct normal irradiance (DNI) can cause methanol conversion in a solar methanol decomposition reactor to deviate from its target, reduce system efficiency, and even lead to catalyst overheating and sintering. To address these issues, an integral model predictive control (IMPC) strategy incorporating extended Kalman filter (EKF)-based state estimation is proposed. First, a one-dimensional dynamic model and its state-space representation are established for the reactor. Next, an EKF-based state estimator uses temperature measurements to correct the reactor states in real time, enabling online estimation of the species mass fractions. On this basis, an IMPC controller with integral compensation is developed to track methanol conversion, and

receding-horizon optimization is used to determine the optimal methanol feed flow rate under irradiance disturbances. Results show that, when a 2% deviation in optical efficiency is introduced, the mean estimation error of the methanol mass fraction is only 0.06%. Under cloud-cover conditions, the proposed IMPC limits the maximum deviation in methanol conversion to 0.41%, compared with 1.85% for standard MPC and 6.87% for PI control. The average methanol conversion reaches 94.97%, the settling time decreases from 400 to 300 s, and the solar-to-chemical exergy efficiency increases from 16.59% to 18.11%. No catalyst overheating occurs throughout the process. These results demonstrate that the proposed strategy enables efficient, safe, and stable operation of the solar methanol decomposition reactor under solar irradiance disturbances.

Keywords: solar energy; methanol decomposition; dynamic characteristics; model predictive control; operational strategy

氢能因具有清洁低碳、质量能量密度高等优势^[1],对实现“双碳”目标具有极高战略价值。但是氢气具有密度低、易泄漏等问题,在能源领域全面部署氢气仍然面临挑战。为此,需要一种氢气载体与在用户端可实现的高效产氢技术。甲醇被视为一种极具潜力的氢载体,因其可由阳光、水、CO₂生成而被称为“液态阳光”^[2,3]。在用氢端,氢气可通过甲醇分解/重整制取,反应温度与抛物线槽式太阳能集热器的运行温度匹配,有望实现可再生能源的消纳与高效产氢^[4]。

然而,太阳直接辐照度(DNI)受云遮和天气变化影响,具有显著的间歇性和波动性^[5,6]。DNI扰动会改变反应器的热输入,并通过传热、流动和吸热反应的耦合作用,引起沿程温度、反应速率和甲醇转化率变化。特别是在DNI快速降低或恢复过程中,太阳能输入与反应物吸热需求之间会出现瞬态不匹配,导致转化率偏离目标值、太阳能利用效率降低,甚至造成催化剂温度超过烧结阈值,给反应器的稳定、高效与安全运行带来挑战。

现有太阳能热化学反应器的调控方法主要包括能量调节和流量调节两类。能量调节通过改变定日镜聚焦数量^[7]、接收器孔径^[8]或辅助热源功率^[9]直接调节反应器热输入;流量调节则通过改变反应物进料量,实现物质流与输入能流的动态匹配。已有研究采用线性反馈控制^[10]、PI控制^[11]及模型预测控制^[12]等方法,对反应器温度、转化率和产物组成进行调节,验证了流量调控在削弱太阳辐照扰动影响方面的有效性。然而,现有研究多面向反应段较短的高温腔式反应器,其内部温升及轴向状态变化相对有限,运行调控通常以维持单一温度设定值为目标,且缺乏热力学分析对控制目标的支撑。相比之下,太阳能甲醇分解反应器多采用数米长的管式

结构,管内温升显著,DNI变化会引起沿程温度分布、反应进程及能量转换性能的协同变化^[13],现有调控方法难以直接适用于此类系统。

前期研究表明,太阳能甲醇分解反应器在DNI升高与降低扰动下呈现不同的动态响应特性,其响应时间及对应的最佳匀速流量调节速率均存在差异。因此,固定速率流量调节难以兼顾不同扰动过程,仍可能引起甲醇转化率、反应温度和能量转换效率波动。针对上述问题,本文构建太阳能甲醇分解反应器的模型预测控制策略,通过预测反应器状态演化并在线优化甲醇入口流量,实现DNI扰动条件下目标转化率的稳定跟踪及反应器的高效、稳定运行。

1 太阳能甲醇分解反应器模型

太阳能甲醇分解反应器由抛物槽式太阳能反射器和真空管式接收/反应器组成。太阳辐射经抛物槽反射器聚集至金属接收管,为催化剂床层内的甲醇分解吸热反应提供能量,其结构示意图如图1。

反应器内部同时涉及太阳能吸收、管壁传热、气体流动及化学反应等过程。为准确描述反应器的动态运行特性并开展控制策略研究,首先建立反

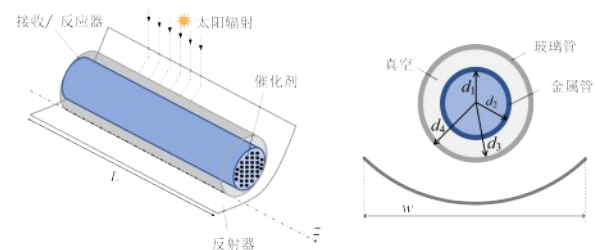


图1 太阳能甲醇分解反应器结构示意图

Fig. 1 Structure diagram of the solar MDR reactor

应器动态模型,进而将其转化为适用于状态估计与运行控制的状态空间模型。

1.1 反应器动态模型

鉴于槽式接收反应器具有较大的长径比,且反应器内流动、传热及化学反应过程主要沿轴向方向发展,本文采用一维轴向模型对反应器动态特性进行描述^[14, 15],其动态模型包括质量守恒、组分守恒、动量守恒和能量守恒。

反应气体及各组分的守恒方程见式(1)-(2)。

$$\frac{\partial \rho_i}{\partial \tau} + \frac{\partial (\rho_i v)}{\partial z} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial \omega_i}{\partial \tau} = -v \frac{\partial \omega_i}{\partial z} + \frac{M_i r_i S_A \rho_{cat}}{\varphi \rho_i} \quad (2)$$

式中: v 为反应气体流速; ρ_i 为反应气体密度; ω_i 为反应气体组分 i 的质量分数; M_i 为反应气体组分 i 的摩尔质量; r_i 为反应气体组分 i 的反应速率,由反应动力学速率及化学计量数确定; S_A 为催化剂比表面积; ρ_{cat} 为催化剂堆积密度; φ 为反应床层孔隙率。

对于较大的雷诺数的流动过程,动量守恒可通过Hick方程^[16]计算压损进行简化,如式(3)。

$$\frac{dp}{dz} = -6.8 \frac{(1-\varphi)^{1.2}}{\varphi^3} Re_p^{-0.2} \frac{(\varphi v)^2 \rho_i}{d_p} \quad (3)$$

式中: p 为反应气体压力; d_p 为催化剂直径; Re_p 为基于催化剂颗粒直径定义的雷诺数。

在各计算单元中,玻璃管、金属管以及反应气体混合物与催化剂床层组成的伪均相的能量守恒方程如式(4)-(6)。

$$\rho_g c_g V_g \frac{dT_g}{dt} = \dot{Q}_{re-g} - \dot{Q}_{g-e} \quad (4)$$

$$\rho_{re} c_{re} V_{re} \frac{dT_{re}}{dt} = \eta_{opt} \dot{Q}_{sun} - \dot{Q}_{re-f} - \dot{Q}_{re-g} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} & (\rho_f c_f \varphi + \rho_{cat} c_{cat}) V_{unit} \frac{\partial T_f}{\partial t} \\ & + \rho_f c_f v \varphi V_{unit} \frac{\partial T_f}{\partial z} = \dot{Q}_{re-f} - \dot{Q}_{reaction} \end{aligned} \quad (6)$$

式中: ρ_g 、 ρ_{re} 分别为玻璃管、金属管密度; ρ_{cat} 为催化剂堆密度; c_g 、 c_{re} 、 c_f 分别为玻璃管、金属管、反应气体比热容; V_g 、 V_{re} 、 V_{unit} 分别为每个计算单元中玻璃管、金属管、金属管管内空间的体积; η_{opt} 为聚光光学效率; T_g 、 T_{re} 、 T_f 分别为玻璃管、金属管、反应气体温度。

本文所采用的甲醇分解反应机理源自Peppley等人的研究^[17],反应速率表达式见(7)-(8)。

$$\begin{aligned} r_{MDR} &= k_D K_{CH_3O(2)}^* \left(\frac{p_M}{p_{H_2}^{1/2}} \right) \times \\ & \frac{\left(1 - \frac{p_{H_2}^2 p_{CO}}{K_D p_M} \right) C_{S_2}^T C_{S_{2a}}^T}{\left(1 + K_{CH_3O(2)}^* \frac{p_M}{p_{H_2}^{1/2}} \right) \left(1 + K_{H(2a)}^{1/2} p_{H_2}^{1/2} \right)} \quad (7) \\ K_D &= 10^{-5139/T + 12.621} \quad (8) \end{aligned}$$

式中: r_{MDR} 为甲醇分解反应率; p_M 、 p_{CO} 、 p_{H_2} 分别为甲醇、一氧化碳和氢气的分压; K_D 为甲醇分解反应平衡常数。

太阳能甲醇分解反应器的热力学分析方法采用前期研究建立的方法,相关模型见文献^[18-20]。

1.2 状态空间模型

为设计太阳能甲醇分解反应器控制器,本文将反应器控制方程整理为如(9)-(12)所示的状态空间形式,以统一描述各物理量的动态演化规律。

$$\frac{\partial \omega_i}{\partial \tau} = f_{\omega, z}(u_{in}, \omega_i, T_f) \frac{\partial \omega_i}{\partial z} + f_{\omega}(\omega_i, T_f) \quad (9)$$

$$\frac{\partial T_f}{\partial \tau} = f_{T, z}(u_{in}, \omega, T_f) \frac{\partial T_f}{\partial z} + f_{T_f}(T_{re}, T_f, \omega, u_{in}) \quad (10)$$

$$\frac{\partial T_g}{\partial \tau} = f_{T_g}(T_g, T_{re}) \quad (11)$$

$$\frac{\partial T_{re}}{\partial \tau} = f_{T_{re}}(DNI, u_{in}, \omega, T_g, T_{re}, T_f) \quad (12)$$

式中: f 为反应器的动力学函数,其具体形式由质量守恒方程和能量守恒方程推导得到; f_{ω} 、 $f_{\omega, z}$ 分别为描述组分质量分数轴向对流项和反应项的函数; $f_{T, z}$ 、 f_{T_f} 分别为描述流体能量轴向对流项,以及由反应热和壁面换热引起的源项函数; f_{T_g} 、 $f_{T_{re}}$ 分别为描述玻璃管和金属管温度演化的函数。

1.3 模型验证

基于所建立的太阳能甲醇分解反应器动态模型,对模型在稳态运行工况的模拟结果进行了进一步验证^[21, 22]。图2给出了太阳能甲醇分解反应器中甲醇转化率的模拟结果与文献实验结果^[23]的对比。甲醇入口温度和太阳入射角分别设定为120℃和61°。结果显示,模拟计算得到的甲醇转化率与实验数据偏差最大为2.5%,从而验证了太阳能甲醇分解反应器模型的可靠性。

2 模型预测控制策略

2.1 基于温度测量的状态估计方法

实际装置与仿真模型之间不可避免地存在模型失配,反应器内各组分的质量分数难以实时测

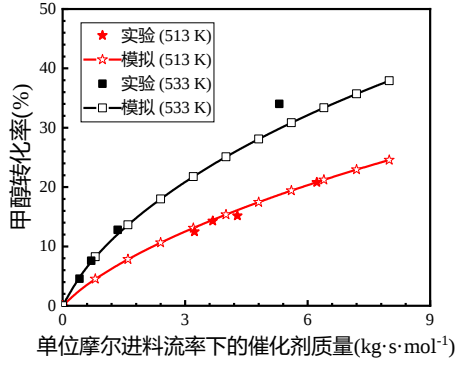


图2 太阳能甲醇分解反应器实验结果与模拟结果对比

Fig. 2 Comparison between experimental and simulated results of solar-driven methanol decomposition reactor

量,温度测量也会受到噪声干扰。因此,本文采用扩展卡尔曼滤波(Extended Kalman Filter, EKF)递推估计太阳能甲醇分解反应器的状态,并将估计结果反馈至优化控制模型,实现基于状态估计的闭环控制。

EKF包括状态预测和测量校正两个阶段。在预测阶段,对离散状态方程在当前估计点进行一阶线性化,得到状态转移矩阵,进而计算下一时刻的状态预测值和误差协方差,以表征过程噪声引起的不确定性,相应方程见(19)-(21)。

$$A_k = \frac{\partial f_d}{\partial x} \bigg|_{\hat{x}_{k|k}, u_k, d_k} \quad (19)$$

$$\hat{x}_{k+1|k} = f_d(\hat{x}_{k|k}, u_k, d_k) \quad (20)$$

$$\hat{P}_{k+1|k} = A_k \hat{P}_{k|k} A_k^T + Q_k \quad (21)$$

式中:下标 $k+1|k$ 为基于时刻 k 的信息预测 $k+1$ 时刻信息; A_k 为状态转移矩阵; $\hat{x}_{k+1|k}$ 为 $k+1$ 时刻的状态预测值; $\hat{P}_{k+1|k}$ 为预测误差协方差矩阵; Q_k 为过程噪声协方差矩阵。

在测量校正阶段,根据预测状态计算测量预测值,并将其与实际测量值之差作为测量残差。同时,对测量模型在预测状态点进行线性化,得到测量灵敏度矩阵,进而计算综合考虑预测误差和测量噪声的残差协方差矩阵。相关方程见(22)-(24)。

$$v_{k+1} = y_{k+1} - h(\hat{x}_{k+1|k}) \quad (22)$$

$$H = \frac{\partial h}{\partial x} \bigg|_{\hat{x}_{k+1|k}} \quad (23)$$

$$S_{k+1} = H_{k+1} \hat{P}_{k+1|k} H_{k+1}^T + R_{k+1} \quad (24)$$

式中: v_{k+1} 为测量残差; H_{k+1} 为测量灵敏度矩阵; S_{k+1} 为残差协方差矩阵; R_{k+1} 为测量噪声协方差矩阵。

最后,根据预测误差协方差和残差协方差计算卡尔曼增益,以权衡模型预测与测量信息。随后,

利用该增益修正预测状态并更新误差协方差,得到当前状态估计,完成一次状态递推,相关方程见(25)-(27)。

$$L_{k+1} = \hat{P}_{k+1|k} H_{k+1}^T S_{k+1}^{-1} \quad (25)$$

$$\hat{x}_{k+1|k+1} = \hat{x}_{k+1|k} + L_{k+1} v_{k+1} \quad (26)$$

$$\hat{P}_{k+1|k+1} = \hat{P}_{k+1|k} - L_{k+1} S_{k+1} L_{k+1}^T \quad (27)$$

式中: L_{k+1} 为卡尔曼增益矩阵; $\hat{x}_{k+1|k+1}$ 为时刻 $k+1$ 的状态估计值; $\hat{P}_{k+1|k+1}$ 为状态估计误差协方差矩阵。

为评估扩展卡尔曼滤波在状态估计与测量更新过程中的统计一致性,采用归一化估计误差平方(Normalized Estimation Error Squared, NEES)和归一化新息平方(Normalized Innovation Squared, NIS)作为性能评价指标,计算如式(28)和式(29)所示。

$$e_{NEES_k} = (x_k - \hat{x}_{k|k})^T P_{k|k}^{-1} (x_k - \hat{x}_{k|k}) \quad (28)$$

$$e_{NIS_k} = v_k^T S_k^{-1} v_k \quad (29)$$

2.2 最优控制问题

图3给出了在设计DNI为 $800 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ 时,甲醇进料流量对转化率、反应气体出口温度和太阳-化学效率的影响。随着甲醇流量降低,转化率和太阳-化学效率逐渐提高,并在甲醇完全转化时达到最高效率,此时的进料流量定义为临界甲醇流量。当流量进一步降低时,反应吸热量减少,剩余太阳能将加热产物气体和催化剂,可能使催化剂温度超过烧结阈值,影响反应器安全运行。

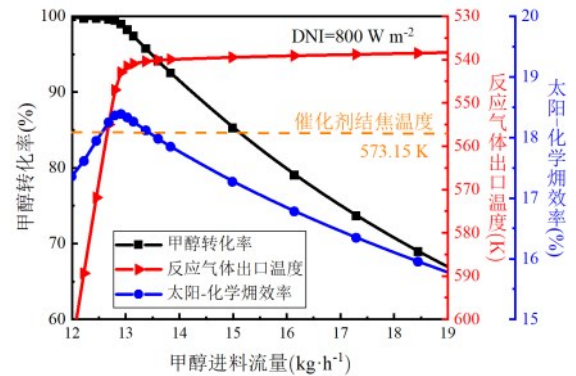


图3 甲醇进料流量对反应器性能影响

Fig. 3 The effect of methanol feed flow rate on reactor performance

为兼顾光照扰动下的反应效率与催化剂安全,提出将甲醇流量维持在略低于临界流量值,并以95%甲醇转化率作为控制目标的模型预测控制策略。该控制过程可表述为一个最优控制问题(Optimal Control Problem, OCP),即通过求解各时

刻的甲醇进料流量,使转化率尽可能接近目标值。相应的数学表述见式(30)-(33)。

$$\min_{x(\cdot), u(\cdot)} \int_0^{\tau_f} (X_{\text{out}} - X_{\text{target}})^2 d\tau \quad (30)$$

$$\text{s. t. } x(0) - x_0 = 0, \quad (31)$$

$$\dot{x}(\tau) - f(x(\tau), u(\tau), d(\tau)) = 0, \tau \in [0, \tau_f] \quad (32)$$

$$g(x(\tau), u(\tau)) \leq 0, \tau \in [0, \tau_f] \quad (33)$$

式中: X_{target} 为甲醇转化率目标值,即 95%; x_0 为反应器状态的初始值; t_f 为控制时域终止时间; u 为反应器被控量; d 为反应器扰动量。

2.3 模型预测控制策略设计

太阳能热化学反应器系统受太阳辐照波动、反应动力学和传热过程共同影响,状态变量间耦合显著。模型预测控制(Model Predictive Control, MPC)在处理多变量耦合及显式约束方面具有明显优势^[25]。MPC 基于当前状态预测有限时域内的系统演化,在线求解最优控制序列,仅执行首个控制量,并根据下一时刻的状态反馈滚动优化。若 MPC 仅依赖模型预测而不利用实际状态或状态估计,则属于开环 MPC,难以修正模型误差和外部扰动。为提升控制效果,本文将 MPC 与 EKF 结合,以 EKF 的状态估计作为 MPC 的初始条件进行在线预测与优化,其原理如图 4 所示。

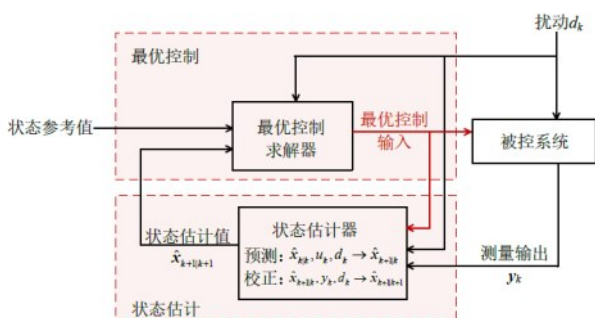


图 4 结合状态估计的模型预测控制逻辑示意图

Fig. 4 Schematic diagram of model predictive control combined with state estimation

在结合状态估计的 MPC 基础上,本文引入积分补偿以消除稳态偏差,构建了 IMPC 策略,如图 5 所示。每个控制步长末,测量反应器温度并更新状态估计,再以更新后的状态为初始条件求解最优控制问题,得到甲醇流量基准值。控制步内,该基准值经线性插值后施加于反应器,并叠加根据甲醇转化率估计值与目标值偏差计算的积分补偿量,从而进一步修正稳态偏差。

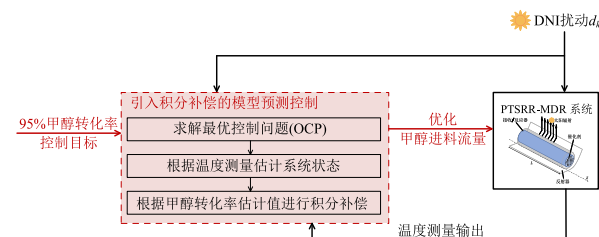


图 5 太阳能甲醇分解反应器的 IMPC 控制策略示意图

Fig. 5 Schematic diagram of IMPC control strategy for solar-driven methanol decomposition reactor

3 结果与讨论

3.1 状态估计结果与分析

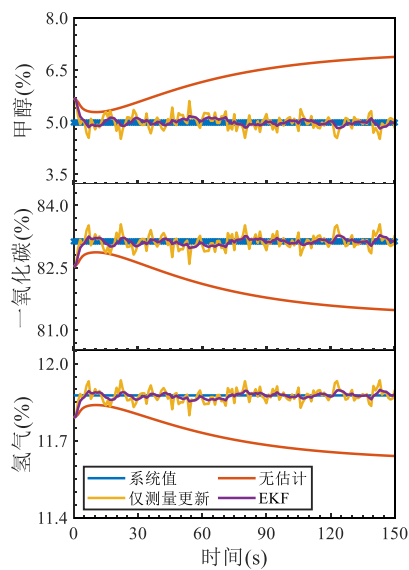
实际运行中,反应器光学效率易受光学衰减、镜面污染和环境变化等因素影响,导致其偏离标定值。为评估模型失配对状态估计的影响,在 DNI 为 $800 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ 、甲醇转化率为 95% 的稳态工况下,将参考光学效率设为 0.733,并在模型中引入 2% 的偏差。估计结果如图 6 所示,用于验证 EKF 在模型失配条件下的适用性。

图 7 给出了该工况下 EKF 的 NEES 和 NIS 变化。随着状态递推,二者逐渐稳定在 95% 置信区间内且未持续越界,表明 EKF 在模型失配条件下仍具有良好的统计一致性。

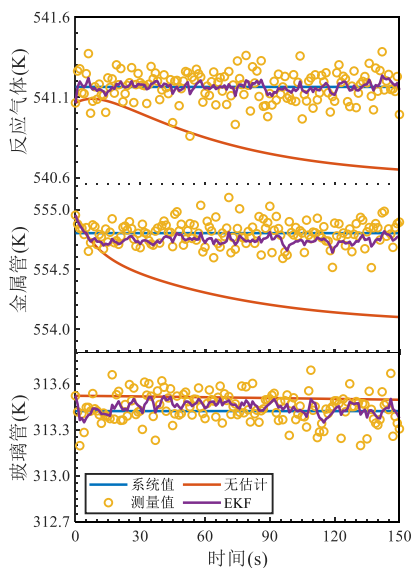
3.2 云遮过程控制结果与分析

研究表明,当云层漂浮在反应器上方时,系统接收的太阳辐射低于晴空条件^[24],云遮条件下 DNI 可下降约 40-60%^[25]。由于变化时间较短,这类过程可简化为 DNI 的阶跃变化^[26]。对于变化较慢的连续光照波动,系统可近似视为准稳态,控制器可根据实时状态逐步调整。因此,本研究选取两个典型工况: DNI 从 $800 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ 阶跃下降至 $400 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$,以及从 $400 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ 阶跃上升至 $800 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$,分别用于模拟云遮与其恢复过程,以验证控制策略在快速辐照扰动下的抗扰性能。

图 8 对比给出了太阳能甲醇分解反应器在 MPC、IMPC 以及 PI 控制下云遮工况的动态响应结果,分别展示了云遮过程中甲醇流量的调节过程,以及甲醇转化率、反应气体出口温度和太阳-化学效率的动态变化。DNI 在 200 s 时从 $800 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ 阶跃降低至 $400 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$,甲醇入口温度为 500 K,初始时刻的甲醇流量为 $13.5 \text{ kg} \cdot \text{h}^{-1}$ 。其中, MPC 及其积分补偿形式基于动力学模型进行反馈调节,使甲醇流量与输入能流相匹配,从而稳定反应器出口温



(a) 质量分数变化



(b) 温度变化

图6 模型参数失配影响下太阳能甲醇分解反应器估计结果

Fig. 6 Estimation results of solar methanol decomposition reactor under the influence of model parameter mismatch

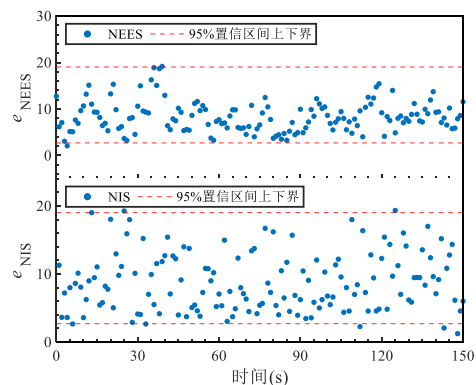
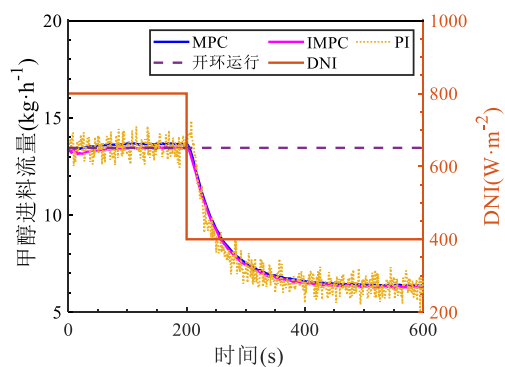
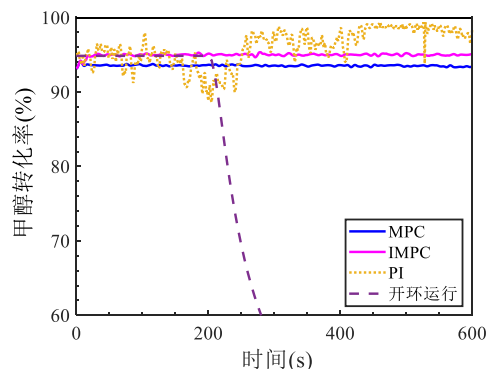


图7 模型参数失配下太阳能甲醇分解反应器状态估计的NEES与NIS

Fig. 7 NEES and NIS of state estimation for solar methanol decomposition reactor under model parameter mismatch



(a) 甲醇流量与DNI



(b) 甲醇转化率

度;相比之下,PI控制仅依据反应气体出口温度偏

差进行反馈调节。

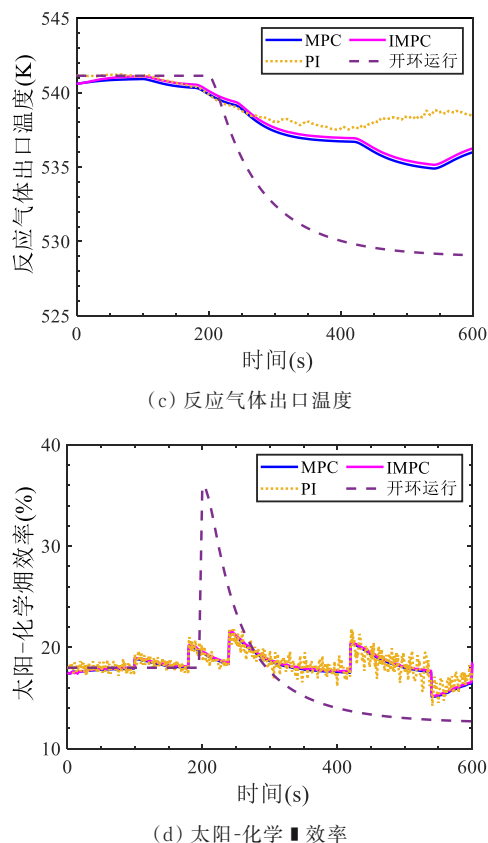


图 8 云遮条件下太阳能甲醇分解反应器不同控制策略的动态响应对比

Fig. 8 Comparison of dynamic responses of different control strategies for solar-driven methanol decomposition reactor under cloud shading conditions

DNI 阶跃降低后,甲醇流量同步调整,并在约 300 s 内达到新的稳态。受简化控制模型与反应器真实模型之间偏差的影响,MPC 控制下的甲醇转化率稳定在约 93.5%,未达到 95% 的设定值。引入积分补偿后,该稳态偏差得到有效削弱,甲醇转化率和反应气体出口温度更接近设定值,如图 8 (b) 所示。该结果表明,积分补偿能够累积系统输出偏差,并通过优化过程修正控制量,有效消除由于模型失配和扰动引起的稳态误差;同时,EKF 利用温度测量信息对模型状态进行在线校正,提高了甲醇质量分数等不可测状态变量的估计精度,使 MPC 能够基于更准确的系统状态进行滚动优化。二者协同作用提升了 IMPC 对云遮扰动下反应器动态变化的适应能力。相比之下,PI 控制下的甲醇流量在 200 s 后出现较大波动,导致转化率、出口温度和太阳-化学效率明显振荡,表明其扰动抑制能力有限。MPC、IMPC 和 PI 控制下的最大转化率偏差分别为 1.85%、0.41% 和 6.87%。

图 9 对比了云遮条件下不同控制策略的平均甲醇转化率和平均太阳-化学效率。结果表明,基于模型与测量的 MPC、IMPC 以及仅基于测量的 PI 控制均能有效抑制转化率和效率下降。其中,IMPC 的平均转化率为 94.97%,最接近 95% 的设计值;太阳-化学效率为 19.04%,略高于 MPC 的 18.93%,略低于 PI 的 19.09%,且均显著高于开环运行的 17.16%。尽管 PI 的平均效率略高,但 IMPC 的状态波动明显更小,运行稳定性更优。

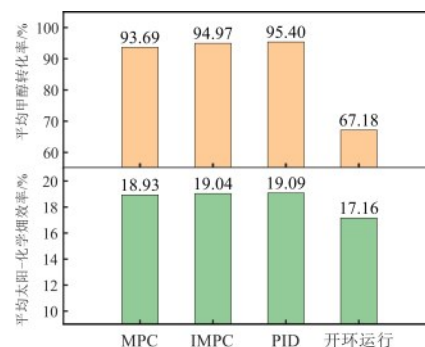


图 9 云遮条件下太阳能甲醇分解反应器不同控制策略的平均转化率与效率

Fig. 9 Comparison of average conversion rate and efficiency of different control strategies for solar-driven methanol decomposition reactor under cloud shading conditions

3.3 云遮恢复过程控制结果与分析

在云遮恢复扰动下,太阳直接辐照强度在 200 s 时从 $400 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ 阶跃升高至 $800 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$,甲醇入口温度为 500 K,初始时刻的甲醇流量为 $6.2 \text{ kg} \cdot \text{h}^{-1}$ 。

图 10 对比了 MPC、IMPC 和 PI 控制下反应器的动态响应。若不进行调节,甲醇将在管内完全反应,使出口温度短时升高,可能导致催化剂失活。因此,需调节甲醇流量以匹配回升的输入能流。如图 10 (a) 所示,扰动发生约 200 s 后,甲醇流量完成调整。MPC 控制下的转化率稳定在约 93.5%,而 IMPC 通过积分补偿将其维持在约 95%,且响应更加平稳,如图 10 (b) 所示。PI 控制下的转化率和出口温度则出现明显振荡。MPC、IMPC 和 PI 控制下的最大转化率偏差分别为 2.03%、0.79% 和 4.41%,表明 MPC 和 IMPC 对云遮恢复扰动的适应能力明显优于 PI 控制。

图 11 给出了云遮恢复条件下不同控制策略的平均性能对比。IMPC 的平均转化率和太阳-化学效率分别为 94.90% 和 16.63%,最接近设计工况。开环运行的平均转化率虽达到 98.13%,但反

反应器温度超过设计值,效率降至11.60%,且波动较大。综合考虑转化率、效率及运行稳定性,IMPC在云遮恢复条件下均表现出最优的综合性能。

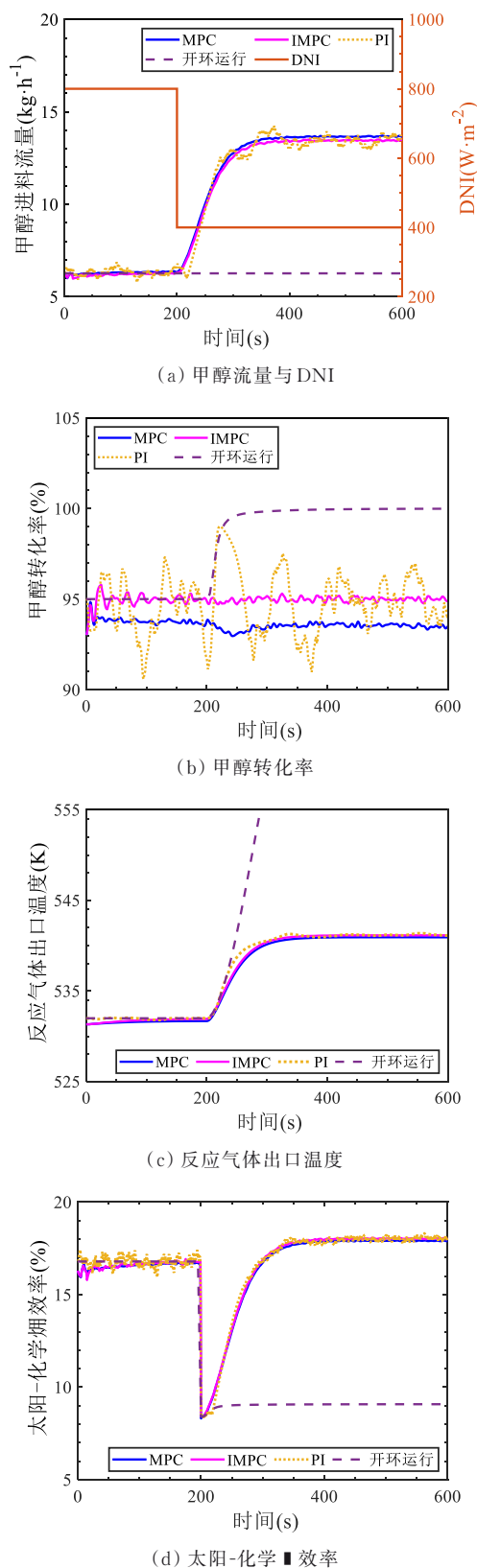


图10 云遮恢复条件下太阳能甲醇分解反应器不同控制策略

略的动态响应对比

Fig. 10 Comparison of dynamic responses of different control strategies for solar-driven methanol decomposition reactor under cloud recovery conditions

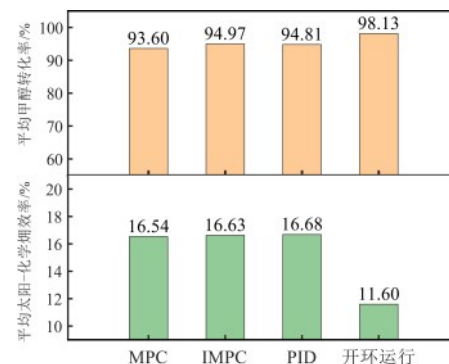


图11 云遮恢复条件下太阳能甲醇分解反应器不同控制策略的平均转化率与效率

Fig. 11 Comparison of average conversion and efficiency of different control strategies for solar-driven methanol decomposition reactor under cloud recovery conditions

4 结 论

本文围绕太阳能甲醇分解反应器的运行调控展开研究。首先,基于动态模型选取状态变量并建立状态空间模型,针对光照扰动下的运行调控问题构建最优控制框架;随后,针对反应器组分质量分数难以实时测量的问题,设计基于温度测量的状态估计器,实现系统状态的在线估计;最后,设计适用于太阳能甲醇分解反应器的模型预测控制器,以实现反应器的安全高效运行。主要结论如下:

(1) 在光学效率存在2%偏差时,EKF状态估计器仍能有效融合模型预测与测量信息,修正参数失配引起的稳态偏移并抑制测量噪声。反应器出口甲醇质量分数和温度的平均估计偏差分别仅为0.06%和0.02 K,NEES与NIS均稳定在95%置信区间内,验证了估计器在模型失配条件下的良好一致性。

(2) 提出的IMPC策略通过引入积分补偿,有效消除了标准MPC因模型失配导致的转化率稳态跟踪误差。在云遮过程与云遮恢复两种工况下,IMPC的最大转化率偏差分别仅为0.41%和0.79%,平均转化率分别达到94.97%和94.90%,控制精度与动态稳定性均显著优于传统PI控制及标准MPC。

(3) 从反应器综合性能来看,IMPC在云遮工

况下将稳定时间由开环的400 s缩短至300 s,太阳-化学■效率由16.59%提升至18.11%,且全程未出现超温现象,在转化率跟踪、能量转换效率与运行安全性之间实现了协同优化。

参考文献:

- [1] HASSAN N, JALIL A, RAJENDRAN S, et al. Recent review and evaluation of green hydrogen production via water electrolysis for a sustainable and clean energy society [J]. INTERNATIONAL JOURNAL OF HYDROGEN ENERGY, 2024, 52: 420-441.
- [2] 施晶莹, 李灿. 太阳燃料: 新一代绿色能源[J]. 科技导报, 2020, 38(23): 39-48.
SHI J, LI C. Solar fuels: New generation of green energy[J]. Science & Technology Review, 2020, 38(23): 39-48.
- [3] SHIH C F, ZHANG T, LI J, et al. Powering the Future with Liquid Sunshine[J]. Joule, 2018, 2(10): 1925-1949.
- [4] 马朝, 程泽东, 何雅玲. 相变储热型太阳能甲醇重整反应器稳态及动态制氢特性的实验研究[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2021, 61(12): 1371-1378.
MA C, CHENG Z, HE Y. Experimental study of the steady and dynamic efficiencies of a solar methanol steam reforming reactor filled with a phase change material for hydrogen production [J]. Journal of Tsinghua University(Science and Technology), 2021, 61(12): 1371-1378.
- [5] KAROUT Y, CURCIO A, EYNARD J, et al. Model-Based Predictive Control of a Solar Hybrid Thermochemical Reactor for High-Temperature Steam Gasification of Biomass [J]. Clean Technologies, 2023, 5(1): 329-351.
- [6] OBERKIRSCH L, GROBBEL J, MALDONADO QUINTO D, et al. Controlling a solar receiver with multiple thermochemical reactors for hydrogen production by an LSTM neural network based cascade controller[J]. Solar Energy, 2022, 243: 483-493.
- [7] ROCA L, de la CALLE A, YEBRA L J. Heliostat-field gain-scheduling control applied to a two-step solar hydrogen production plant[J]. Applied Energy, 2013, 103: 298-305.
- [8] ABUSEADA M, OZALP N. Experimental and numerical study on heat transfer driven dynamics and control of transient variations in a solar receiver [J]. Solar Energy, 2020, 211: 700-711.
- [9] ROWE S C, HISCHIER I, PALUMBO A W, et al. Nowcasting, predictive control, and feedback control for temperature regulation in a novel hybrid solar-electric reactor for continuous solar-thermal chemical processing[J]. Solar Energy, 2018, 174: 474-488.
- [10] PETRASCH J R, OSCH P, STEINFELD A. Dynamics and control of solar thermochemical reactors [J]. Chemical Engineering Journal, 2009, 145 (3) : 362-370.
- [11] MUROYAMA A, SHINN T, FALES R, et al. Modeling of a Dynamically-Controlled Hybrid Solar/Autothermal Steam Gasification Reactor[J]. Energy & Fuels, 2014, 28(10): 6520-6530.
- [12] SAADE E, CLOUGH D E, WEIMER A W. Model predictive control of a solar-thermal reactor[J]. Solar Energy, 2014, 102: 31-44.
- [13] ZHANG P, LIU M, MU R, et al. Exergy-based control strategy design and dynamic performance enhancement for parabolic trough solar receiver-reactor of methanol decomposition reaction [J]. Renewable Energy, 2024, 224: 120222.
- [14] ZHANG Y, GUO Z A O, ZHANG P, et al. Study on the comprehensive performance and control strategy of a methanol decomposition reactor for compressed air energy storage with combined heating from compression heat and solar energy [J]. Renewable Energy, 2025, 250: 123272.
- [15] LIU Q, JIN H, HONG H, et al. Performance analysis of a mid- and low-temperature solar receiver/reactor for hydrogen production with methanol steam reforming [J]. International Journal of Energy Research, 2011, 35(1): 52-60.
- [16] ALLEN K G, von BACKSTRÖM T W, KRÖGER D G. Packed bed pressure drop dependence on particle shape, size distribution, packing arrangement and roughness [J]. Powder Technology, 2013, 246: 590-600.
- [17] PEPPELEY B A, AMPHLETT J C, KEARNS L M, et al. Methanol-steam reforming on Cu/ZnO/Al₂O₃ catalysts. Part 2. A comprehensive kinetic model[J]. Applied catalysis. A, General, 1999, 179 (1-2) : 31-49.
- [18] HOU Z, ZHENG D, JIN H, et al. Performance analysis of non-isothermal solar reactors for methanol decomposition [J]. Solar Energy, 2007, 81 (3) : 415-423.
- [19] CHENG Z D, MEN J J, ZHAO X R, et al. A comprehensive study on parabolic trough solar receiver-reactors of methanol-steam reforming reaction for

- hydrogen production [J]. *Energy Conversion and Management*, 2019, 186: 278-292.
- [20] 张沛晔, 刘明, 穆瑞琪, 等. DNI扰动条件下太阳能甲醇分解反应器的流量调控策略分析[J]. *工程热物理学报*, 2023, 44(11): 2917-2923.
- ZHANG P, LIU M, MU R, et al. Analysis on Flow Rate Regulation of Solar-driven Methanol Decomposition Reactor Under DNI Disturbance [J]. *Journal of Engineering Thermophysics*, 2023, 44(11): 2917-2923.
- [21] LIU Q, WANG Y, LEI J, et al. Numerical investigation of the thermophysical characteristics of the mid-and-low temperature solar receiver/reactor for hydrogen production[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2016, 97: 379-390.
- [22] CHENG Z D, LENG Y K, MEN J J, et al. Numerical study on a novel parabolic trough solar receiver-reactor and a new control strategy for continuous and efficient hydrogen production [J]. *Applied Energy*, 2020, 261: 114444.
- [23] LIU T, BAI Z, ZHENG Z, et al. 100 kWe power generation pilot plant with a solar thermochemical process: design, modeling, construction, and testing [J]. *Applied Energy*, 2019, 251: 113217.
- [24] WANG A, LIU J, LIU M, et al. Dynamic modeling and behavior of parabolic trough concentrated solar power system under cloudy conditions [J]. *Energy*, 2019, 177: 106-120.
- [25] LI M, CHU Y, PEDRO H T C, et al. Quantitative evaluation of the impact of cloud transmittance and cloud velocity on the accuracy of short-term DNI forecasts [J]. *Renewable Energy*, 2016, 86: 1362-1371.
- [26] YAN H, LIU M, CHONG D, et al. Dynamic performance and control strategy comparison of a solar-aided coal-fired power plant based on energy and exergy analyses[J]. *Energy*, 2021, 236: 121515.