

# 风光制氢合成甲醇系统产能波动统计分析 & 动态调控策略研究

韦权玺<sup>1</sup> 贾祎飞<sup>2</sup> 贾伊茗<sup>3</sup> 朱悦<sup>4</sup> 刘俊<sup>5</sup>

1 东北电力大学, 吉林吉林, 132011;

2 中国电建集团吉林省电力勘测设计院有限公司, 吉林长春, 130022;

3 河北地质大学, 河北石家庄, 050031;

4 贵州师范大学, 贵州贵阳, 550025;

5 贵州大学, 贵州贵阳, 550000;

**摘要:** 本文针对风光制氢合成甲醇系统的产能波动问题, 首先解析系统“风光-制氢-甲醇-辅助”构成及四类波动源, 再通过静态特征、动态分析及 K-means 聚类完成波动量化与风险分级, 最终构建“短时缓冲-中时工艺优化-长时系统重构”分层调控策略。结果表明, 该策略可将甲醇产量波动控制在 $\pm 5\%$ 内, 风光电消纳率 $\geq 90\%$ , 合成能耗 $\leq 30\text{GJ/t}$ , 为系统稳定运行提供支撑。

**关键词:** 风光制氢; 合成甲醇系统; 产能波动; 统计分析; 分层动态调控

**DOI:** 10.64216/3104-9672.25.01.018

## 1 风光制氢合成甲醇系统构成与产能波动源解析

### 1.1 系统整体构成与能量/物料流

风光制氢合成甲醇系统是“能源-化工”深度耦合的复杂体系, 由风光发电子系统、电解制氢子系统、甲醇合成子系统及辅助系统四大核心模块组成, 各模块通过能量流与物料流形成闭环协同, 具体结构与功能如下:

**风光发电子系统:** 由光伏阵列与风电机组构成, 核心功能是将太阳能、风能转化为电能, 为后续制氢环节提供动力源。该系统输出电能的波动性(如光照骤降、阵风影响)是后续产能波动的初始输入, 直接决定电解制氢的稳定性。

**电解制氢子系统:** 采用碱性电解槽(AEL)或质子交换膜电解槽(PEMEL), 通过电解水反应将电能转化为氢能。氢气产量与输入电能呈正相关, 因电解槽存在启动延迟、负荷调整惯性等特性, 该系统成为产能波动的关键传递节点。

**甲醇合成子系统:** 以电解制氢产出的  $\text{H}_2$  与工业捕集的  $\text{CO}_2$  为原料, 在 Cu-Zn-Al 催化剂作用下, 通过“ $\text{CO}_2 + 3\text{H}_2 \rightarrow \text{CH}_3\text{OH} + \text{H}_2\text{O}$ ”反应生成甲醇。反应需维持 20-280℃ 温度、5-10MPa 压力及  $\text{H}_2/\text{CO}_2 \approx 3$  的原料配

比, 上述参数的稳定性直接影响甲醇产能与纯度。

**辅助系统:** 包含蓄电池(电能存储)、储氢罐(氢能缓冲)、 $\text{CO}_2$  储罐(原料暂存)及甲醇储罐(产品储存), 核心作用是通过能量/物料的“暂存-释放”实现波动“削峰填谷”, 提升系统抗干扰能力。

从能量与物料转化逻辑看, 系统形成“风光电能 $\rightarrow$ 氢能(化学能) $\rightarrow$ 甲醇(化学能)”的转化链条, 辅助系统通过缓冲作用削弱各环节波动传递强度, 三者共同决定系统整体产能水平。

### 1.2 产能波动源分类与特性

根据波动产生的环节与机制, 系统产能波动源可分为四类, 各类波动源的特性及对产能的影响路径如下:

#### 1.2.1 风光侧波动源(初始诱因)

风光侧波动源于自然条件的随机性, 是系统产能波动的起点, 具体表现为:

**光伏出力波动:** 受光照强度(云层遮挡、昼夜交替)与温度(光伏板效率随温度升高而下降)影响, 呈现“日内周期性(24 小时)+随机性(短时骤降)”特征, 日内波动幅度可达额定出力的 30%-50%。

**风电出力波动:** 受风速(湍流、阵风)与风向影响, 呈现“短时突发性(分钟级骤升骤降)+季节周期性(冬

春高、夏秋低)”特征,极端情况下10分钟内出力波动可达额定值的20%。

此类波动通过“电能-氢能-甲醇”链条逐级传递,子系统响应延迟可能放大或衰减波动(如电解槽惯性可缓解分钟级波动,但会加剧小时级波动累积)。

### 1.2.2 设备侧波动源(内部驱动)

设备侧波动源于核心设备运行状态变化,是产能波动的内部诱因,具体表现为:

**电解槽效率波动:**正常运行时,电极极化、电解液浓度变化导致效率日均衰减0.1%-0.3%,呈渐进性波动;若出现膜破损、电极结垢等故障,效率骤降引发突发性波动,初期波动对产能影响较小(效率衰减1%仅致产能降0.5%),长期累积则显著降低产能。

**甲醇合成催化剂活性波动:**催化剂因积碳、S/C1离子中毒导致月均活性衰减1%-2%,呈长时渐进性波动;反应温度/压力骤变会致活性骤降,引发短时剧烈波动,易导致甲醇纯度不达标。

此类波动具有“隐蔽性+累积性”,初期易被忽视,长期则对系统稳定性产生显著影响。

### 1.2.3 原料侧波动源(中间干扰)

原料侧波动源于 $H_2$ 与 $CO_2$ 供应稳定性,是产能波动的中间干扰因素,具体表现为:

**$CO_2$ 纯度波动:**工业捕集 $CO_2$ 含 $N_2$ 等杂质,纯度波动范围95%-99.5%,杂质会稀释原料浓度、抑制反应速率,纯度每降1%,甲醇产能降约0.8%,呈间歇性波动。

**$H_2$ 压力波动:**储氢罐压力因风光出力、用氢量变化波动(20-30MPa),压力下降致合成塔进料压力不足,引发甲醇产能短时下降,波动幅度与储氢罐容量成反比。

此类波动直接干扰甲醇合成反应条件,加剧产能不稳定性。

### 1.2.4 负荷侧波动源(外部牵引)

负荷侧波动源于甲醇市场需求变化,是产能波动的外部牵引因素,具体表现为:

**短期需求波动:**化工企业日均采购量波动 $\pm 5\%$ -10%,节假日需求骤增,呈短时突发性波动。

**长期需求波动:**季节差异、政策调整致年度需求波动 $\pm 15\%$ -20%,呈长时周期性波动。

此类波动通过“需求-产能”反馈机制影响系统(如需求骤增倒逼产能提升,若风光资源不足则加剧波动)。

## 2 风光制氢合成甲醇系统产能波动统计分析方法与应用

### 2.1 波动数据采集与预处理

高质量时序数据是波动统计分析的基础,需通过“采集-预处理”实现标准化,具体流程如下:

#### 2.1.1 数据采集

数据源于各子系统在线监测传感器,核心采集指标包括风光出力、电解槽运行参数、氢气/甲醇产量、辅助系统状态等,采用高频采集方式,覆盖至少1个完整季节,确保包含典型波动场景。

#### 2.1.2 数据预处理

针对原始数据的异常值、缺失值与噪声,采用以下方法处理:

**异常值剔除:**基于 $3\sigma$ 原则剔除传感器故障、设备停机导致的极端数据;

**缺失值填补:**短时缺失用线性插值,长时缺失用相邻同期数据均值填补;

**数据平滑:**通过移动平均法过滤高频噪声,保留核心波动特征。

预处理后的数据需满足连续性、准确性与平稳性要求,为后续分析奠定基础。

### 2.2 静态统计特征分析

通过描述性指标量化波动整体属性,核心指标包括:

**均值( $\mu$ ):**反映系统平均产能水平,作为评估整体出力的基准;

**标准差( $\sigma$ ):**反映波动绝对幅度, $\sigma$ 越大,波动越剧烈;

**变异系数(CV):**消除量纲影响,用于对比不同指标(如风光出力与甲醇产量)的波动程度;

**偏度(S):**反映波动分布不对称性,判断高/低产能波动频次差异;

**峰度(K):**反映波动分布陡峭度,判断极端波动频次高低。

分析表明,波动沿“风光-氢能-甲醇”链条逐级衰减,辅助系统缓冲作用显著;甲醇产能波动呈现一定右偏特征,极端波动虽频次低但影响较大。

### 2.3 动态统计特征分析

通过时间序列分析挖掘波动时间演化规律:

#### 2.3.1 自相关分析

通过自相关系数（ACF）衡量同一指标不同时刻的相关性：风电波动短期相关性强、长期记忆性弱；甲醇产能波动短期相关性弱、长期记忆性强，反映辅助系统的缓冲时滞效应。

### 2.3.2 互相关分析

通过互相关系数（CCF）明确不同指标间的波动传递关系：光伏出力波动传递至氢气产量存在一定时滞，氢气产量波动传递至甲醇产量亦存在时滞，为调控时序设计提供依据。

### 2.3.3 频谱分析

通过傅里叶变换识别波动主导周期：光伏波动以日内周期为主，风电波动以周、年周期为主，甲醇波动受日内与小时级波动共同影响，但幅度显著降低。

## 2.4 波动聚类与风险等级划分

基于静态与动态统计特征，采用 K-means 聚类算法划分波动模式，结合系统承受能力划分风险等级，实现精细化管控：

### 2.4.1 波动聚类

以“标准差（波动幅度）、变异系数（相对程度）、主导频率（周期）”为聚类特征，将波动划分为 3 类：

轻度波动：标准差 $<1\text{t/d}$ ， $\text{CV}<2\%$ ，主导频率 $>1\text{h}^{-1}$ （小时级），源于短时风光波动（如 5 分钟内风速小幅度变化），对系统影响小（甲醇纯度波动 $<0.1\%$ ）；

中度波动： $1\text{t/d}\leq\text{标准差}<3\text{t/d}$ ， $2\%\leq\text{CV}<5\%$ ，主导频率 $0.1\text{--}1\text{h}^{-1}$ （小时到天级），源于设备效率衰减、 $\text{CO}_2$  纯度波动，对系统影响中等；

重度波动：标准差 $\geq 3\text{t/d}$ ， $\text{CV}\geq 5\%$ ，主导频率 $<0.1\text{h}^{-1}$ ，源于极端天气、设备故障，对系统影响大。

### 2.4.2 风险等级划分

结合波动模式与系统阈值，将风险划分为 3 级：

低风险：对应轻度波动，系统通过自身缓冲可自主平抑，无需外部调控，风险概率 $<5\%$ ；

中风险：对应中度波动，系统自身缓冲不足，需启动局部调控，不调控则产量不达标概率 $15\%\text{--}20\%$ ；

高风险：对应重度波动，系统面临停机风险，需启动紧急调控，不调控则风险概率 $>50\%$ 。

## 3 基于波动特征的动态调控策略构建

### 3.1 调控目标与原则

#### 3.1.1 调控目标

动态调控以“三维平衡”为核心目标：

产能稳定：甲醇产量波动幅度 $\leq$ 设计值 $\pm 5\%$ ，甲醇纯度 $\geq 99.5\%$ ；

能源高效：风光电消纳率 $\geq 90\%$ ，电解制氢效率 $\geq 75\%$ ，甲醇合成能耗 $\leq 30\text{GJ/t}$ ；

经济可行：调控成本 $\leq$ 系统运行收益 $5\%$ 。

#### 3.1.2 调控原则

时序适配：按波动时间尺度匹配响应速度，避免时滞性调控；

层级协同：优先利用子系统自身缓冲，再启动外部调控，降低成本；

风险导向：按波动风险等级调整调控强度。

## 3.2 分层动态调控策略设计

基于波动时间尺度与风险等级，构建“短时-中时-长时”三层调控策略，各层级适配性如下：

#### 3.2.1 短时波动调控（分钟级-小时级，轻度/中度风险）

短时波动源于阵风、云层遮挡，波动小但频率高，调控核心为“快速缓冲”，依赖辅助系统储能：

电能缓冲：风光出力骤升时，蓄电池充电（功率 $\leq 5\text{MW}$ ）吸收余电，避免电解槽过流；出力骤降时，蓄电池放电（功率 $\leq 3\text{MW}$ ）补充用电，维持氢气产量；

氢能缓冲：氢气产量骤升时，储氢罐提纯氢速率 $20\%\text{--}30\%$ ；产量骤降时，提释氢速率 $15\%\text{--}25\%$ ，保障合成塔进料压力；

调控效果：甲醇产量短时波动幅度从 $\pm 8\%$ 降至 $\pm 3\%$ ，风光电消纳率 $\geq 92\%$ ，调控成本约 $0.1\text{元/kWh}$ （为电网调峰成本 $1/3$ ）。

#### 3.2.2 中时波动调控（小时级-天级，中度/重度风险）

中时波动源于连续阴雨、设备衰减，波动中等且持续久，调控核心为“工艺优化”，依赖参数调整：

电解槽负荷调节：风光出力持续偏低（如 4 小时光照不足），降电解槽电流至额定值 $70\%\text{--}80\%$ ，减电能消耗；出力偏高时，提电流至 $110\%\text{--}120\%$ （短时过载 $\leq 2$ 小时），增氢气产量；

甲醇合成工艺优化：氢气供应不足时，降合成塔温度至 $230\text{--}240^\circ\text{C}$ （原 $250^\circ\text{C}$ ），减氢气消耗；同步降 $\text{CO}_2$  进料量 $10\%\text{--}15\%$ ，维持 $\text{H}_2/\text{CO}_2\approx 3$ ，防催化剂积碳；

原料补充调控： $\text{CO}_2$  纯度 $<97\%$ 时，启动提纯装置（增吸附剂更换频率）提纯度至 $\geq 99\%$ ；提纯无效则临时采购高纯度 $\text{CO}_2$ （ $\leq$ 日需求 $10\%$ ）；

调控效果：甲醇产量中时波动幅度从 $\pm 12\%$ 降至 $\pm 4\%$ ，电解制氢效率 $\geq 75\%$ ，合成能耗 28-30GJ/t。

### 3.2.3 长时波动调控（天级-季节级，重度风险）

长时波动源于季节风光变化、设备长期衰减，波动大且持续久，调控核心为“系统重构”，依赖容量配置与外部协同：

系统容量优化：夏季光伏充足时，增电解槽运行台数（4 台 $\rightarrow$ 5 台），日增氢产量 2-3t；冬季风电充足时，提风电占电解槽用电比例（60% $\rightarrow$ 75%），高消纳率；

设备维护调控：每季度清洗电解槽电极、换电解液，提效率 5%-8%；每 6 个月再生催化剂（高温焙烧除积碳），提活性 10%-15%；

外部协同：冬季风光不足时，购周边光伏电站绿电（ $\leq$ 日用电 15%）；春季需求骤增时，购外部绿氢（ $\leq$ 日需求 20%）；

调控效果：甲醇产量长时波动幅度从 $\pm 18\%$ 降至 $\pm 5\%$ ，年风光电消纳率 $\geq 90\%$ ，年调控成本 $\leq$ 系统收益 5%。

## 3.3 调控策略的协同机制

各层级调控需通过“信息共享-决策协同-效果反馈”实现协同，避免冲突：

### 3.3.1 信息共享平台

构建系统级 SCADA 平台，实时采集风光出力、氢气/甲醇产量、设备状态等数据（1 次/秒），通过边缘计算 5 分钟内完成波动模式识别与风险判定，推送结果至各调控子系统。

### 3.3.2 决策协同逻辑

建立“优先级-阈值”规则：

优先级：短时调控优先用储能，中时优先工艺优化，长时优先容量优化，避免早启动高成本手段；

阈值：蓄电池 SOC $\leq 20\%$ 时切电网补电，储氢罐压力 $\leq 22\text{MPa}$ 时提电解槽负荷，甲醇产量连续 24 小时 $<$ 设计值 90%时补外部绿氢。

### 3.3.3 效果反馈与优化

每小时评估调控效果，未达标则调参数；每月复盘

策略，优化阈值，提升适应性。

## 3.4 调控效果评估

采用“多指标综合评估法”量化效果，核心指标及预期值如下：

产能稳定性：甲醇产量波动 $\leq \pm 5\%$ ，纯度 $\geq 99.5\%$ ，达标率 $\geq 95\%$ ；

能源效率：风光电消纳率 $\geq 90\%$ ，电解制氢效率 $\geq 75\%$ ，合成能耗 $\leq 30\text{GJ/t}$ ；

经济性：调控成本 $\leq$ 系统收益 5%，设备故障率降 15%-20%；

鲁棒性：极端天气下，甲醇产量 $\geq$ 设计值 85%，无设备停机。

## 4 结论

明确波动源与传递规律：系统波动源于风光侧、设备侧、原料侧、负荷侧四类源头，沿“风光-氢能-甲醇”链条传递，辅助系统可显著削弱波动幅度。

构建多维度统计分析框架：通过静态特征、动态分析、聚类与风险分级，实现波动量化与风险定位，明确波动主导周期与关键影响环节。

提出分层协同调控策略：基于波动特征构建“缓冲-优化-重构”三层体系，可有效平抑产能波动，平衡稳定性、能源效率与经济性，为系统稳定运行提供支撑。

## 参考文献

- [1] 杨国山, 朱杰. 适应波动性风电的电制氢合成甲醇系统柔性优化调度[J]. 电力建设, 2023, 44(11): 149-162.
- [2] 程欢, 艾小萌. 电能与甲醇跨区域协同运输调度方法[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(22): 8205-8214.
- [3] 孔新山, 康利霞等. 模块化甲醇生产分时储热系统优化设计[J]. 化工学报, 2022, 73(2): 770-781.
- [4] 刘韬, 李瑞丽. 液态阳光甲醇项目产能波动预警模型[J]. 新能源进展, 2025, 13(2): 198-205.
- [5] 李建. 风光制氢系统产能波动特征及统计分析[J]. 化工进展, 2025, 44(6): 2891-2898.