

T/CWDPA

团 体 标 准

T/CWDPA XXXX—2026

绿色甲醇生产系统柔性控制技术规范

Technical specification for flexible control of green methanol production system

征求意见稿

XXXX-XX-XX 发布

XXXX-XX-XX 实施

中国西部开发促进会 发 布

目 次

前 言 III

1 范围 1

2 规范性引用文件 1

3 术语和定义 1

4 缩略语 1

5 总体原则 2

 5.1 安全底线原则 2

 5.2 能效最优原则 2

 5.3 全流程协同原则 2

 5.4 可追溯可验证原则 2

6 系统架构与工艺路线 2

 6.1 系统组成 2

 6.2 工艺路线分类 2

 6.3 控制系统分层架构 2

7 柔性控制总体要求 3

 7.1 多工况自适应控制 3

 7.2 负荷调节能力 3

8 控制功能要求 3

 8.1 电解水制氢单元控制 3

 8.2 二氧化碳捕集与供给单元控制 3

 8.3 甲醇合成单元控制 4

 8.4 精馏分离单元控制 4

 8.5 缓冲系统协调控制 4

 8.6 公用工程与辅助单元控制 4

9 安全仪表与联锁保护 5

 9.1 一般要求 5

 9.2 单元级联锁 5

 9.3 系统级联锁 5

10 运行与维护 5

 10.1 运行管理 5

 10.2 维护与校准 5

 10.3 人员与培训 5

 10.4 网络与数据安全 5

11 性能评价指标 6

11.1 柔性性能指标	6
11.2 能效与消纳指标	6
11.3 产品质量指标	6
11.4 安全指标	6

前 言

本文件按照GB/T 1.1—2020《标准化工作导则 第1部分：标准化文件的结构和起草规则》的规定起草。

请注意本文件的某些内容可能涉及专利。本文件的发布机构不承担识别专利的责任。

本文件由中国西部开发促进会提出。

本文件由中国西部开发促进会归口。

本文件起草单位：。

本文件主要起草人：。

绿色甲醇生产系统柔性控制技术规范

1 范围

本文件规定了绿色甲醇生产系统柔性控制的缩略语、总体原则、系统架构、控制功能要求、安全仪表与联锁保护、运行维护及性能评价等内容。
本文件适用于绿色甲醇生产系统柔性控制。

2 规范性引用文件

下列文件中的内容通过文中的规范性引用而构成本文件必不可少的条款。其中，注日期的引用文件，仅该日期对应的版本适用于本文件；不注日期的引用文件，其最新版本（包括所有的修改单）适用于本文件。

- GB/T 338—2025 工业用甲醇
- GB/T 44693.2 危险化学品企业工艺平稳性 第2部分：控制回路性能评估与优化技术规范
- GB/T 50770 石油化工安全仪表系统设计规范（附条文说明）
- GB/T 50779 石油化工建筑物抗爆设计标准
- AQ/T 3034—2022 化工过程安全管理导则
- NB/T 11968—2025 绿色甲醇

3 术语和定义

下列术语和定义适用于本文件。

3.1

绿色甲醇 green methanol

以可再生能源、生物质或捕集的二氧化碳为原料生产，全生命周期碳排放显著低于传统化石基甲醇的甲醇产品。
[来源：NB/T 11968—2025，3.1，有修改]

3.2

柔性控制 flexible control

绿色甲醇生产系统在多能源波动、多工况切换、多产品规格条件下，通过先进控制技术实现自适应调节、安全平稳运行的控制方式

3.3

控制回路 control loop

自动控制系统中，由传感器、执行器、控制器和信号处理器等组成的基础控制单元。

4 缩略语

下列缩略语适用于本文件。

- APC：先进过程控制（Advanced Process Control）
- DAC：直接空气捕集（Direct Air Capture）
- DCS：分散控制系统（Distributed Control System）

ESD: 紧急停车系统 (Emergency Shutdown Device)
MPC: 模型预测控制 (Model Predictive Control)
SIS: 安全仪表系统 (Safety Instrumented System)
EMS: 能量管理系统 (Energy Management System)
PEM: 质子交换膜 (Proton Exchange Membrane)

5 总体原则

5.1 安全底线原则

柔性调节全过程不应突破工艺安全边界, 关键参数联锁保护优先级高于优化控制, 应符合AQ/T 3034—2022的过程安全管理要求。

5.2 能效最优原则

以单位甲醇产品综合能耗最低、可再生能源消纳率最高为核心优化目标, 协同调节制氢、合成、精馏全流程负荷。

5.3 全流程协同原则

柔性控制覆盖原料制备、合成反应、分离提纯、产品储运全链条, 避免单一单元调节引发上下游参数震荡。

5.4 可追溯可验证原则

所有控制指令、调节过程、运行数据应完整存储, 支持性能审计与故障追溯, 数据存储周期不小于1年。

6 系统架构与工艺路线

6.1 系统组成

6.1.1 绿色甲醇生产系统一般由可再生能源发电单元、电解水制氢单元、二氧化碳捕集与供给单元、甲醇合成单元、精馏分离单元、公用工程与辅助单元组成, 各单元通过柔性控制系统实现协同运行。

6.1.2 可再生能源发电单元宜包括风力发电和光伏发电, 为电解水制氢提供绿电。电解水制氢单元可选用碱性电解水制氢或质子交换膜 (PEM) 电解水制氢, 其产氢量应根据可再生能源发电功率波动进行动态调节。

6.1.3 二氧化碳捕集与供给单元的二氧化碳来源宜优先采用生物质能或直接空气捕集 (DAC) 等途径获得, 其供给量应与甲醇合成单元的负荷相匹配。

6.2 工艺路线分类

绿色甲醇生产系统按工艺路线宜分为以下类型:

- a) 绿电制氢+二氧化碳加氢合成路线: 利用可再生能源发电制取绿氢, 与捕集的二氧化碳经压缩、预热后进入甲醇合成反应器, 在催化剂作用下反应生成粗甲醇, 再经精馏获得精甲醇;
- b) 生物质气化合成路线: 生物质原料经预处理和气化生成合成气, 经变换、脱硫脱碳净化后进入甲醇合成单元;
- c) 多能互补耦合路线: 综合采用上述两种或多种路线的组合方式, 通过柔性控制系统实现多能源、多原料、多产品的协同优化。

6.3 控制系统分层架构

6.3.1 绿色甲醇生产系统柔性控制应采用分层架构, 一般包括以下层级:

- a) 过程控制层: 以分散控制系统 (DCS) 为核心, 实现对生产过程中温度、压力、流量、液位、组分等参数的实时监测与闭环控制;

- b) 先进控制层：以先进过程控制（APC）和模型预测控制（MPC）为核心，实现多变量协调优化、大滞后对象控制和自适应调节；
 - c) 安全保护层：以安全仪表系统（SIS）和紧急停车系统（ESD）为核心，实现安全联锁保护和紧急状态下可靠停车；
 - d) 调度管理层：以能量管理系统（EMS）和生产执行系统为核心，实现可再生能源发电预测、生产计划优化调度和全流程能效管理。
- 6.3.2 各层级之间应通过工业以太网或现场总线实现数据通信，通信协议宜符合开放性和互操作性要求。

7 柔性控制总体要求

7.1 多工况自适应控制

- 7.1.1 柔性控制系统应具备多工况自适应控制能力，包括但不限于以下工况的自动识别与切换：
- a) 正常生产工况：各单元按设定负荷稳定运行，控制系统维持物料平衡和能量平衡；
 - b) 负荷升降工况：响应可再生能源发电功率波动或生产计划调整，系统自动协调制氢单元产氢量、二氧化碳供给量和甲醇合成单元进料量，实现平稳升降负荷；
 - c) 热待机工况：可再生能源发电功率低于电解水制氢最低运行负荷时，制氢单元进入热待机状态，甲醇合成单元转入保温保压循环；
 - d) 冷启动工况：系统从完全停机状态启动，按预定程序依次投运各单元，自动完成升温 and 建压过程；
 - e) 应急停车工况：触发安全联锁条件时，系统按设定程序执行紧急停车。
- 7.1.2 工况切换过程中应保证关键参数的平稳过渡，避免温度、压力等参数的剧烈波动。

7.2 负荷调节能力

柔性控制系统应满足以下负荷调节能力要求：

- a) 电解水制氢单元的负荷调节范围宜为额定负荷的 20%~110%（碱性电解槽可能达不到），负荷变化速率宜不低于额定负荷的 10%/min；
- b) 甲醇合成单元的负荷调节范围宜为额定负荷的 50%~110%（数值确认，还是关于柔性的问题），负荷变化速率宜不低于额定负荷的 3%/min；
- c) 精馏分离单元的负荷调节范围宜为额定负荷的 40%~110%；
- d) 工况恢复时间：从热待机恢复至满负荷运行不超过 2h，从冷启动至满负荷运行不超过 8h（再确认，按照 3%递增）；
- e) 系统在可再生能源发电功率波动条件下的平均可利用率宜不低于 92%。

8 控制功能要求

8.1 电解水制氢单元控制

电解水制氢单元的控制应满足以下要求：

- a) 具备接收能量管理系统（EMS）调度指令的接口，根据可再生能源发电功率预测结果自动调节电解槽运行功率；
- b) 对碱性电解槽，应监测并控制电解液温度、循环流量、气液分离器液位、氢气与氧气出口压力等参数，并设置氢氧浓度差在线监测与报警；
- c) 对 PEM 电解槽，应监测并控制纯水电导率、膜电极温度、氢气和氧气出口压差等参数，并设置质子交换膜状态在线诊断功能；
- d) 多台电解槽并联运行时，应具备负荷分配优化控制功能，根据各电解槽的运行效率曲线和健康状态自动分配负荷；
- e) 应设置氢气纯度在线监测，当氢气纯度低于设定阈值时触发报警或联锁动作。

8.2 二氧化碳捕集与供给单元控制

二氧化碳捕集与供给单元的控制应满足以下要求：

- a) 应具备二氧化碳流量、压力、温度和纯度的在线监测与闭环调节功能；
- b) 二氧化碳压缩机出口压力应与甲醇合成单元入口压力协调控制，实现压力匹配和平稳供气；
- c) 当采用多源二氧化碳供给时，应具备来源切换控制和混合比例调节功能；
- d) 应设置二氧化碳缓冲罐的压力、液位（若适用）监控及高低限报警；
- e) 应监测二氧化碳中的硫化物、卤素等对催化剂有毒害作用的杂质含量，超标时触发报警并联动切断供气。

8.3 甲醇合成单元控制

甲醇合成单元的控制应满足以下要求：

- a) 甲醇合成反应器的温度控制应实现床层温度的均匀分布和热点管理，热点温度与平均温度偏差宜控制在 $\pm 15\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以内；（分工况，稳态工况 $\pm 15\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和变负荷工况）
- b) 合成回路压力应与新鲜气补充量协调控制，压力波动宜控制在设定值的 $\pm 0.2\text{ MPa}$ 范围内；
- c) 氢碳比（ H_2 与 CO_2 的摩尔比）应与进料组分配比协调控制，宜维持在 $2.8\sim 3.2$ 范围内，并具备在线自动调节功能；
- d) 循环气流量和弛放气排放量的控制应与合成回路压力、惰性气体浓度协同优化，平衡反应效率与系统能耗；
- e) 应设置甲醇合成催化剂床层温度多区段监测与超温联锁保护，当任一测点温度超过催化剂允许最高使用温度时自动触发降温或停车动作。

8.4 精馏分离单元控制

精馏分离单元的控制应满足以下要求：

- a) 预精馏塔、加压精馏塔和常压精馏塔的塔釜温度、塔顶温度、回流比等关键参数应实现自动调节，确保精甲醇产品质量满足 GB/T 338 的相关要求；
- b) 各塔的进料流量和组成发生变化时，应通过 APC 或 MPC 实现前馈补偿和自适应调节，缩短过渡过程时间；
- c) 精馏系统的蒸汽消耗和冷却水消耗应与进料负荷协调优化，实现节能运行；
- d) 应设置精甲醇产品在线分析或定时取样分析功能，对水含量、酸度、羰基化合物等指标进行监控；
- e) 应设置塔釜液位和塔顶回流罐液位的高低限报警及联锁。

8.5 缓冲系统协调控制

缓冲系统的协调控制应符合以下要求：

- a) 设置氢气缓冲罐，有效容量满足合成单元 15min 以上基础负荷需求，平抑制氢单元快速波动，压力控制精度 $\pm 0.05\text{ MPa}$ ；
- b) 设置二氧化碳缓冲罐，有效容量满足合成单元 15min 以上原料需求，保障供气稳定性；（宜）
- c) 设置粗甲醇缓冲罐，有效容量满足精馏单元 30min 以上进料需求，隔离合成单元波动对精馏系统的冲击；
- d) 缓冲系统与上下游单元联动控制，依据负荷预测提前调整罐内压力与储量，发挥削峰填谷作用。

8.6 公用工程与辅助单元控制

公用工程与辅助单元的控制应满足以下要求：

- a) 循环冷却水系统的供水温度和压力应根据环境温度和工艺负荷自动调节，并设置水泵的自动切换和故障报警；
- b) 蒸汽系统的压力应实现分等级稳定控制，蒸汽减温减压站的参数调节应与甲醇合成和精馏单元的用汽需求联动；
- c) 氮气系统的供气压力和纯度应满足安全置换和密封保护的要求，设置氮气储罐压力低限报警和备用气源自动切换；

- d) 火炬系统的点火控制和长明灯状态监测应实现远程操作和自动点火，确保紧急排放时的安全处理能力；
- e) 供电系统的运行状态，包括可再生能源发电功率、外购电功率、自用电负荷等，应纳入 EMS 统一监控和调度。

9 安全仪表与联锁保护

9.1 一般要求

绿色甲醇生产系统应设置独立于过程控制系统的SIS，其安全完整性等级（SIL）应根据HAZOP与LOPA分析结果确定，设计应符合GB/T 50770的相关规定。控制室建筑抗爆设计应符合GB/T 50779的相关规定。

9.2 单元级联锁

单元级联锁应符合以下要求：

- a) 电解水制氢单元：氢氧浓度异常、电解槽超温、系统超压时触发自动停车联锁；
- b) 甲醇合成单元：反应器超温、回路超压、循环压缩机故障、催化剂床层飞温时触发紧急停车联锁；
- c) 精馏分离单元：塔釜液位超限、塔压超限时触发联锁保护与进料切断。

9.3 系统级联锁

9.3.1 应采用分级联锁机制：

- a) 可燃/有毒气体低浓度泄漏：触发声光报警与局部通风联动；
- b) 高浓度单点泄漏：触发对应单元切断、隔离与氮气吹扫；
- c) 泄漏浓度达到爆炸下限多点扩散怎么定义：触发全厂紧急停车，联动消防与应急排放系统。

9.3.2 联锁动作响应时间应满足对应 SIL 等级要求，安全联锁不得被优化控制指令屏蔽或旁路。

10 运行与维护

10.1 运行管理

10.1.1 编制柔性控制专项操作规程，明确各负荷区间操作要点、参数限值与异常处置流程。

10.1.2 建立柔性运行台账，记录每日负荷调节次数、调节幅度、产品质量、能耗与异常事件。

10.1.3 每月开展一次运行效果分析，评估柔性控制对能效、消纳率与产品质量的影响。

10.2 维护与校准

10.2.1 检测仪表、执行机构每月至少巡检一次，调节阀每季度进行行程校验，保障调节精度与响应速度；

10.2.2 APC 或 MPC 模型每半年进行一次校正，催化剂更换、设备改造后应重新开展模型辨识与参数整定；

10.2.3 每年开展一次控制回路性能评估，核心回路性能指数不低于 0.8，评估方法应符合 GB/T 44693.2 的相关规定；

10.2.4 SIS 系统每季度进行一次联锁功能测试，每年开展一次全面功能验证。

10.3 人员与培训

10.3.1 操作人员应经柔性控制专项培训考核合格后方可上岗，掌握 DCS 操作、负荷调节与应急处置方法。

10.3.2 工艺工程师应具备 APC 参数整定与故障分析能力。

10.3.3 每年至少组织一次柔性控制专项应急演练，覆盖负荷骤变、设备故障、仪表失灵等场景。

10.4 网络与数据安全

10.4.1 控制网络与管理网络之间部署工业防火墙与网闸，禁止控制区直接连接互联网。

- 10.4.2 控制区实施白名单访问控制，关键控制参数修改执行审批留痕制度。
- 10.4.3 生产运行数据定期备份，关键控制逻辑与历史数据异地存储，数据存储周期不小于 1 年。

11 性能评价指标

11.1 柔性性能指标

柔性性能指标宜符合表1的规定。

表 1 柔性性能指标

指标名称	要求
系统整体负荷调节范围	$\geq 30\% \sim 110\%$ 额定负荷
负荷调节速率	$\geq 5\%$ 额定负荷/分钟
负荷阶跃响应时间	$\leq 120\text{ s}$ ($\pm 2\%$ 稳态偏差)
年负荷调节次数适应性	≥ 1000 次无设备异常衰减

11.2 能效与消纳指标

- 11.2.1 单位绿色甲醇产品综合能耗不高于同等规模稳态系统的 105%。
- 11.2.2 可再生能源消纳率不低于 97%，弃电率不高于 3%。
- 11.2.3 全系统能量回收利用率不低于 85%。

11.3 产品质量指标

产品甲醇质量应符合GB/T 338—2025中相关品级的要求，负荷波动期间产品不合格率不高于0.5%。

11.4 安全指标

- 11.4.1 柔性调节过程中联锁误动作率为 0。
 - 11.4.2 全年因柔性控制引发的非计划停车次数为 0。
 - 11.4.3 可燃有毒气体报警响应率 100%。
-