

新能源汽车涂装生产线 VOC 治理与生产协同优化研究

郭明 刘明松

长城汽车股份有限公司天津哈弗分公司 天津 300000

DOI: 10.32629/ems.v8i8.21622

[摘要] 新能源汽车涂装线在喷涂、流平、烘干和调漆清洗环节形成差异化 VOC 负荷，固定风量运行会放大能耗、浓度峰值和节拍损失。本文分析涂装废气产生结构与多工序释放机理，梳理分区收集、负荷平衡、转轮浓缩、RTO 氧化、在线监测和排产联动组成的模型与方法体系，提出风量、入口浓度、出口控制浓度和节拍响应嵌入协同控制技术链及系统集成路径的优化思路。治理设施获得工序负荷和未来节拍后，可在达标排放边界内同步稳定热负荷、削弱短时冲击并减少产线扰动。

[关键词] 新能源汽车；涂装生产线；VOC 治理；生产协同；在线监测

引言

新能源汽车制造的涂装车间同时承担外观质量、节拍柔性 and 污染控制任务。喷房大风量、流平区滞后挥发、烘干炉高温排气和换色清洗间歇峰值交织后，VOC 治理设施若只按排口报警和固定频率运行，容易把浓度冲击、炉压波动和燃气消耗推迟到末端。涂装线排放控制应与车型、颜色、烘干曲线、风量和设备状态同步建模，使环保边界、工艺质量和生产效率在同一运行逻辑中被约束。

1 新能源汽车涂装生产线 VOC 治理结构特征与运行机理

1.1 涂装废气产生结构特征与功能分工

新能源汽车涂装生产线的 VOC 负荷并不只来自喷枪雾化瞬间，调漆间、输漆管路、喷涂室、流平区、烘干炉和清洗工位共同构成连续排放链。喷涂室承担车身外板和内腔覆盖，过喷漆雾携带溶剂进入循环风系统；流平区保持漆膜表面张力和挥发速度的均衡，废气浓度比喷房更容易出现短时抬升；烘干炉在较高温度下释放残余溶剂，排气温度和热负荷又直接影响 RTO 燃烧稳定性^[1]。新能源汽车车身轻量化材料、塑料件和多色小批量订单增加后，换色、清洗和补喷频次上升，低浓度大风量排气与高浓度间歇排气在同一班次交替出现。前处理和电泳段以水汽、酸碱雾和少量助剂为主，通常不宜直接并入高浓度 VOCs 主治理线；喷涂室和流平区侧重漆雾过滤、温湿度控制和浓度缓冲，烘干炉废气则更适合进入热氧化和余热回收单元。

1.2 多工序耦合下 VOC 释放运行机理

喷涂生产节拍决定 VOC 释放的时间结构。车身进入喷涂室时，机器人喷涂轨迹、喷枪开闭、静电吸附效率和循环风比例共同影响瞬时挥发量；车身转入流平区后，漆膜表层溶剂继续扩散，浓度峰值往往滞后于喷涂动作；进入烘干炉后，温升曲线加快残余溶剂释放，RTO 入口浓度受炉温、排风量和车身间距共同约束。多工序耦合还体现在质量控制和环保控制的目标差异，喷房抽风过强会改变漆雾捕集和漆膜流平条件，流平停留时间被压缩会提高单位时间废气释放强度，烘干炉排风波动会引起补风和燃气消耗变化。VOC 治理的运行关系表现为浓度、风量、温度、停留时间和排产节拍之间的多变量耦合，末端设备去除率只能解释其中一个环节。

2 新能源汽车涂装 VOC 协同优化模型与方法体系

2.1 VOC 治理生产协同的总体架构

涂装 VOC 协同调节架构把生产计划、工艺参数、废气收集、末端处理和在线监测放在同一数据链内。生产侧提供车型、颜色、节拍、换色和烘干曲线，治理侧采集 TVOC 浓度、风量、温度、压差和 RTO 运行状态，控制层按工序分区计算当前负荷并给出风阀开度、转轮脱附量、RTO 补燃和余热回收指令^[2]。架构的核心不是增加监控屏幕，而是让治理设施提前获得下一组车身的排产节奏和溶剂释放强度，在排放边界、漆膜质量和设备热负荷之间形成可回退的控制关系。治理链条与生产节拍的耦合关系如图 1 所示。

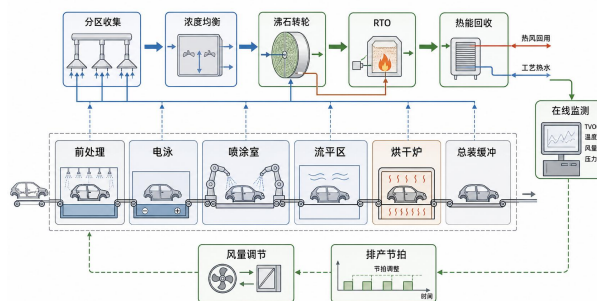


图 1 新能源汽车涂装 VOC 治理与生产协同结构

图 1 中，喷涂室、流平区和烘干炉分别对应不同废气负荷，蓝色收集线把工序负荷导入浓度均衡和沸石转轮，绿色反馈线把 TVOC、温度、风量和压力信号传回风量调节与排产节拍；这种结构使治理设施不再只按最大风量被动运行，而是在工序负荷、热能回收和节拍调整之间形成可调的协同关系。

2.2 废气负荷动态平衡模型的构建

废气负荷动态平衡模型以工序单元为行轴，把设计风量、入口 TVOC、出口控制浓度、节拍响应时间和控制重点作为主要变量。参数场景中，喷涂室风量按 82000m³/h 配置，入口 TVOC 取 120mg/m³，出口控制浓度取 12mg/m³，节拍响应控制在 3min；流平区风量按 36000m³/h 配置，入口 TVOC 取 180mg/m³，出口控制浓度取 14mg/m³，节拍响应控制在 5min；烘干炉风量按 28000m³/h 配置，入口 TVOC 取 260mg/m³，出口

控制浓度取 $13\text{mg}/\text{m}^3$ ，节拍响应控制在 $8\text{min}^{[3]}$ 。模型先把喷涂室、流平区、烘干炉、调漆清洗和低负荷缓冲区分开，再按当前排产节拍估算各分区进入总管的负荷贡献；当某一分区浓度抬升时，系统优先调整该分区风阀和缓冲风量，而不是同步提高全线总风量。烘干炉废气进入 RTO 后具有可利用热值，喷涂室大风量低浓度废气会稀释氧化温度并增加补燃需求，浓度均衡罐或沸石转轮承担缓冲环节后，转轮脱附风与 RTO 处理能力才能保持匹配。关键工序参数关系见图 2。

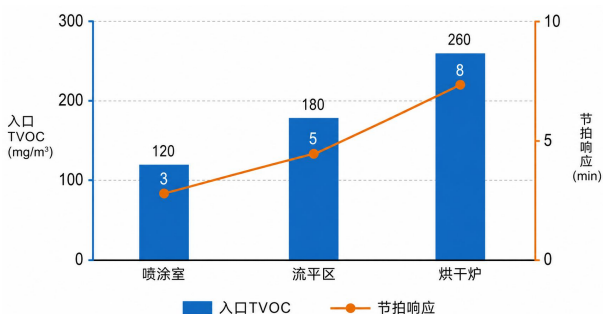


图2 涂装 VOC 负荷与节拍响应参数关系

图2显示，喷涂室、流平区和烘干炉的入口 TVOC 依次抬升，节拍响应也从短窗口转向较长窗口，说明负荷平衡模型不能只按单一风量分配治理能力。入口 TVOC 较高且节拍响应较长的烘干炉更依赖 RTO 热负荷稳定，喷涂室则更依赖大风量收集和快速风阀调节。

2.3 协同优化算法：策略、参数与场景

协同调节算法采用分层规则和滚动修正结合的方式。基础层按照法规边界锁定收集系统、排气筒监测和异常报警条件，生产层按照车型和颜色建立负荷预测表，控制层以 TVOC、风量、温度和压差为状态量滚动修正风阀、转轮和 RTO 指令。参数选择不追求单一最优值，喷涂室重点控制大风量下的漆雾预处理和负压稳定，流平区重点控制浓度缓冲和停留时间，烘干炉重点控制温度波动和余热利用^[4]。连续高节拍生产时，算法优先保证 RTO 入口负荷稳定，避免风量突增导致氧化温度下降；多颜色小批量生产时，算法关注换色清洗和调漆间的间歇峰值，采用短时密闭排风和缓冲脱附；检修或低负荷运行时，算法降低循环风和脱附频率，同时保持厂区无组织监测。算法输出还要受涂装质量边界约束，换色清洗、闪干等待和烘干升温不能被简单压缩为排放侧的低负荷窗口；当生产节拍与治理负荷发生冲突时，优先保持喷房负压、烘干温度和 RTO 稳定燃烧，再通过局部缓冲消化短时波动。

2.4 动态排产与实时风量重规划机制

排产计划提供 VOC 治理的提前量。涂装车间可把车型、颜色、喷涂面积、烘干曲线和换色次数转换为短周期废气负荷队列，治理系统据此安排风量、转轮再生和 RTO 温度准备。连续高溶剂负荷订单集中时，排产端可通过插入低负荷颜色或调整车身间距削弱峰值；治理设施处于维护或 RTO 温度恢复阶段时，排产端限制高负荷批次进入喷涂室。实时风量重规划依赖分区阀门和在线监测的闭环反馈，TVOC 浓度快速上

升时，系统先识别峰值来自喷涂室、流平区还是烘干炉，再对对应支路增风或切入缓冲；总管浓度偏低且各支路压差稳定时，低负荷支路风量逐步下调。风量调整不能破坏喷房洁净度和炉压平衡，每次调整都设置最小持续时间和回退条件，排产与风量的联动使治理系统从事后超标响应转为事前负荷整形。排产节拍与风量重规划的反馈关系如图3所示。

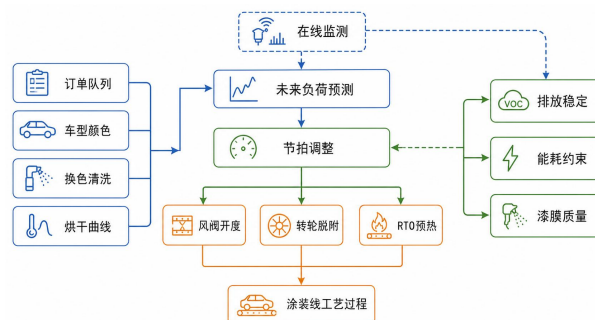


图3 排产节拍与风量重规划反馈

图3中，订单队列、车型颜色、换色清洗和烘干曲线进入未来负荷预测，预测结果推动节拍调整，并同步作用于风阀开度、转轮脱附和 RTO 预热；右侧排放稳定、能耗约束和漆膜质量再反馈到节拍调整，说明生产计划和治理设备之间存在双向约束。

3 新能源汽车涂装VOC协同控制技术链与系统实现

3.1 涂装生产线协同控制系统架构设计

协同控制系统分为感知层、模型层、执行层和管理层。感知层布置 TVOC、温度、风量、压差、炉压和 RTO 燃烧状态采集点，模型层计算工序负荷和未来节拍负荷，执行层控制分区风阀、循环风比例、转轮脱附、RTO 补燃和余热回收，管理层记录原辅料、设施运行、报警处置和维护台账^[5]。四层结构的接口采用统一时间戳、工序编码和车身批次编号，浓度峰值才能与具体颜色、清洗动作和烘干曲线对应。系统权限也要分级，生产调度可调整批次顺序和节拍窗口，环保控制可锁定排放边界和异常回退，设备维护可处理过滤阻力、转轮压差和燃烧状态异常。

3.2 跨工序 VOC 治理控制策略与参数

跨工序控制以分区收集、均衡浓度、稳定氧化、回收热量为主线。喷涂室按 $82000\text{m}^3/\text{h}$ 设计风量维持负压和漆雾预过滤，流平区按 $36000\text{m}^3/\text{h}$ 配置缓冲风量削弱浓度峰值，烘干炉按 $28000\text{m}^3/\text{h}$ 组织高温废气进入 RTO 并回收热量，调漆清洗按 $12000\text{m}^3/\text{h}$ 设置密闭间歇排风，总装缓冲按 $6000\text{m}^3/\text{h}$ 维持低负荷异味监测^[6]。出口控制浓度分别压到 $12\text{mg}/\text{m}^3$ 、 $14\text{mg}/\text{m}^3$ 、 $13\text{mg}/\text{m}^3$ 、 $22\text{mg}/\text{m}^3$ 和 $18\text{mg}/\text{m}^3$ 时，治理侧可把喷房大风量、烘干高浓度和清洗间歇峰值分开处理。喷房风量过高会增加净化能耗，风量过低会影响漆雾捕集和作业环境；RTO 温度偏低影响氧化充分性，温度过高又增加燃气消耗；转轮脱附频率过高会造成热负荷波动，过低会降低浓缩效率。关键工序的协同控制参数可按表1组织。

表1 涂装生产线 VOC 治理协同控制参数

工序单元	设计风量 m ³ /h	入口 TVOCmg/m ³	出口控制 TVOCmg/m ³	节拍响应 min	协同控制重点
喷涂室	82000	120	12	3	分区收集和漆雾预过滤
流平区	36000	180	14	5	浓度均衡和缓冲风量
烘干炉	28000	260	13	8	RTO 热负荷和余热回收
调漆清洗	12000	220	22	10	密闭转移和间歇排风
总装缓冲	6000	40	18	15	异味监测和低负荷切换
闪干区	22000	150	15	6	温湿度联动和短时缓冲

表 1 显示，喷涂室承担最大设计风量，流平区和烘干炉具有更高入口 TVOC 差异，出口控制 TVOC 则被压在相近区间内，说明跨工序控制不能用单一风量指令覆盖全线。节拍响应越短的单元越适合实时风阀调节，响应窗口较长的烘干和调漆清洗环节则更依赖负荷预测、缓冲容积和 RTO 热负荷稳定。

3.3 排放在线监测与过程控制协同

在线监测把排放状态转化为可执行的生产信号。TVOC、非甲烷总烃、温度、风量和压差数据应与喷涂机器人程序、换色记录、烘干炉温区和 RTO 运行状态同步存储，报警阈值不只设在排口末端，也布置在关键支路和治理设备入口。入口浓度抬升而排口仍稳定时，系统提前调整转轮和风量；入口、出口同时抬升时，系统检查 RTO 温度、旁路状态和过滤阻力^[7]。过程控制协同还要求监测数据进入质量和设备维护，喷房压差异常可能同时影响漆膜颗粒缺陷和废气收集效率，烘干炉排风波动可能同时改变固化质量和热氧化负荷，转轮压差升高可能提示吸附材料堵塞。环保报警与维修工单、耗材更换和班组操作记录关联后，会成为涂装生产稳定性的前置指标。

3.4 系统集成与工程应用实现路径

工程应用从高负荷工序和关键数据接口开始，而不是一次性替换全部治理设施。第一阶段完成调漆、喷涂、流平、烘干和排口监测点位校核，建立工序编码、车身批次和排放数据的对应关系；第二阶段改造分区风阀、压差监测、转轮脱附和 RTO 热回收接口，使控制指令可以按工序执行；第三阶段把排产系统与治理控制系统联通，形成未来负荷预测和异常回退规则。系统集成完成后，评价指标同时覆盖排放稳定性、单位车身治理能耗、异常恢复时间、换色清洗峰值削减和产线节拍损失。若只考核排口达标，设施可能长期高风量高能耗运行；若只追求节拍，峰值排放和设备热冲击会被推迟到末端。运行维护阶段还应把阀门开度、转轮脱附温度、RTO 炉膛温度和监测仪表漂移纳入同一巡检表，异常处理先限定影响工序，再调整旁路、补风和排产顺序，避免把局部波动扩展为全线停机。工程集成可按图 4 形成阶段化实施路径。

图 4 中，点位校核先确认 TVOC、风量和压差数据，接口改造把风阀、RTO 和转轮纳入执行层，联动调试把排产、报警和回退规则接入控制逻辑，评价迭代再以排放、能耗和节拍作为回看指标；末端反馈箭头返回联动调试，说明系统集

成需要持续校正。

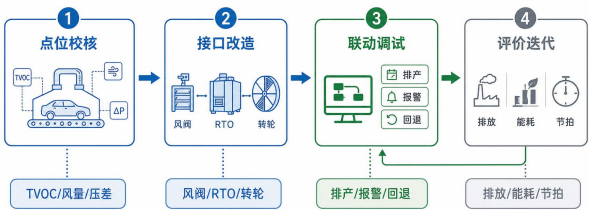


图 4 VOC 治理协同控制工程实施路径

结语

新能源汽车涂装生产线 VOC 治理的有效性，取决于喷涂、流平、烘干、调漆清洗和总装缓冲等工序负荷能否进入同一协同控制链。分区收集把低浓度大风量和高浓度间歇排气区分开，浓度均衡和沸石转轮削弱进入 RTO 的负荷波动，在线监测和排产联动把排口结果前移为工序调节信号。工程实施中，达标排放应作为硬边界，单位车身治理能耗、异常恢复时间、峰值削减和节拍损失可作为联合评价指标，监测点位、分区阀门、RTO 热回收和排产接口则按工序逐步改造。治理设施理解生产节拍，生产计划响应治理负荷后，VOC 减排、涂装效率、漆膜质量和能源利用才能保持稳定协同。

[参考文献]

[1] 谭淑益. 新能源汽车充电桩 110 kV 供电系统优化设计[J]. 通讯世界, 2026, 33(7):115-117.

[2] 邓媛月, 张恺琦. 中国新能源汽车产业链利润分配的结构性失衡及其治理路径研究[J]. 汽车与新动力, 2026, 9(3): 87-90. DOI:10.16776/j.cnki.1000-3797.2026.03.008.

[3] 罗紫馨. 中国-印尼新能源汽车现代工匠学院多元协同治理机制创新研究[J]. 汽车与配件, 2026, 46(11):62-64.

[4] 张林娟. 汽车 4S 店数字化转型中的管理难点及应对策略[J]. 投资与创业, 2026, 37(14):167-169.

[5] 王思山, 司华超, 王文涛, 等. 数智化转型时代下汽车信息安全人才培养: 内涵、模式与实施路径[J]. 时代汽车, 2026, (15):88-91.

[6] 周鑫. 基于数据中台的财务数据治理与价值挖掘研究——以汽车科技企业为例[J]. 知识经济, 2026, (21):84-87. DOI:10.15880/j.cnki.zs.jj.2026.21.044.

[7] 查銑. SAP 系统环境下, 探究汽车零部件企业 BOM 准确性提升策略[J]. 当代企业世界, 2026, (7):110-112.