

T/XZBX

西安市质量与标准化协会团体标准

T/XZBX 0192—2026

涂装机器人工艺参数调试优化与效果验证 实施指南

Guideline for implementation of process parameter tuning
optimization and effect verification of coating robots

2026 - 03 - 16 发布

2026 - 04 - 01 实施

目 次

前言	III
引言	V
1 范围	1
2 规范性引用文件	1
3 术语和定义	1
4 总体要求	5
5 调试准备与基线建立	8
6 参数优化方法与试验设计	12
7 缺陷诊断与纠正措施	15
8 过程监控稳定性评价与持续改进	23

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。

本文件由西安市质量与标准化协会提出并归口。

本文件起草单位：天津铭捷智能装备有限公司、扬州坤铠智能制造有限公司、广州博越自动化科技有限公司。

本文件主要起草人：沙峰、彭建平、陆树川。

引 言

涂装作为制造业表面工程的关键工序，直接影响产品外观质量、耐蚀耐候性能、装配适配性与全生命周期维护成本。在汽车及零部件、工程机械、轨道交通、家电与3C、钢结构防腐、航空航天等行业中，喷涂对象形状复杂、批量节拍紧凑、涂层体系多样，对涂层厚度均匀性、外观缺陷控制、材料利用率、挥发性有机物排放以及稳定一致性提出了更高要求。涂装机器人因其轨迹重复精度高、作业节拍稳定、可实现封闭喷房内连续作业并降低人员暴露风险，已成为现代涂装生产线的重要装备。然而，机器人“能喷”并不等于“喷得好”，其工艺参数设置、路径与姿态规划、喷涂窗口控制、喷房气流组织与固化条件协同等因素共同决定最终涂层效果。工程现场常见问题包括膜厚波动、流挂、橘皮、干喷、针孔、缩孔、露底、边角薄涂、阴影区覆盖不足、色差与光泽不稳、过喷与回弹导致材料损耗增加等；若参数调试缺乏系统方法，往往呈现“经验驱动、反复试喷、难以复现、难以移交”的状态，既影响投产周期，也增加质量风险与综合成本。

涂装机器人工艺参数具有多变量、强耦合和显著工况敏感性特征。典型影响因子包括但不限于：旋杯或喷枪喷幅与雾化状态相关参数，与几何覆盖相关参数，与环境与材料相关参数。在不同涂层体系、不同基材与不同结构件形状条件下，上述参数的最优组合与工艺窗口存在明显差异，且在换色、换料、喷嘴磨损、过滤堵塞、供漆压力波动、工件表面能变化等扰动下会发生漂移。因此，需要将调试工作从“单点试错”提升为“可量化、可验证、可追溯”的系统化方法，建立从基线设定、试验设计、参数优化、在线监控到效果验证与持续改进的完整技术路径。

本文件围绕涂装机器人喷涂工艺参数调试与优化全过程提出通用的实施要求，重点解决以下问题：一是明确调试前提条件与边界，包括设备状态确认、喷房与供漆系统条件、量测与检验资源、试喷样件与评价指标；二是建立参数分层与变量管理方法，区分影响雾化成膜的关键参数、影响覆盖均匀性的轨迹参数、影响外观缺陷的环境与材料参数，并提出调试顺序与耦合关系控制原则；三是提出可操作的优化策略与验证方法，包括基于单因素逐步逼近、正交试验或响应面等试验设计方法的参数寻优，以及基于统计过程控制与趋势分析的稳定性评估；四是规定效果验证的指标体系与判定原则，覆盖外观缺陷、膜厚与均匀性、附着力与耐蚀性、材料利用率、节拍与一次合格率等，同时给出结果记录与证据链要求；五是强调安全与环保底线，针对高压静电、易燃溶剂、喷雾粉尘、爆炸危险区域、机器人协作与维护作业等风险提出控制要求，确保在优化效率与质量的同时不引入新的系统性风险。

涂装机器人工艺参数调试优化与效果验证 实施指南

1 范围

本文件规定了涂装机器人工艺参数调试优化与效果验证的实施要求，包括总体要求、调试准备与基线建立、参数优化方法与试验设计、缺陷诊断与纠正措施、过程监控稳定性评价与持续改进等内容。

本文件适用于采用机器人执行空气喷涂、空气辅助无气喷涂、无气喷涂、静电喷涂及粉末涂装等工艺的涂装生产线，适用对象包括喷涂机器人本体、旋杯或喷枪与雾化系统、供漆供粉系统、换色系统、喷房气流与过滤系统、固化烘干系统以及与喷涂工艺相关的测量检测与控制系统。

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 11291.2—2013 机器人与机器人装备 工业机器人的安全要求 第2部分：机器人系统与集成

GB 3836.16-2024 爆炸性环境 第16部分：电气装置检查与维护规范

GB/T 3836.1-2021 爆炸性环境 第1部分：设备 通用要求

GB/T 3836.5-2021 爆炸性环境 第5部分：由正压外壳“p”保护的设备

GB/T 8264—2008 涂装技术术语

GB/T 14441—2024 涂装作业安全术语

GB/T 18178—2000 水性涂料涂装体系选择通则

3 术语和定义

下列术语和定义适用于本文件。

3.1

涂装机器人 painting robot

在涂装生产线上用于执行喷涂作业并可通过程序控制运动轨迹姿态及工艺动作的经过防爆认证工业机器人及其末端执行系统的统称，包含机器人本体、防爆控制单元、旋杯或喷枪及其供漆供粉装置、控制系统与相关安全防护装置。

3.2

涂装机器人防爆模块 explosion proof module of paint robot

为运行在易燃易爆区域，涂装机器人一般配备了经过防爆认证的防爆模块。一般通过正压、本安等多种方式满足涂装机器人的安全需求。

3.3

TCP 速度 tool center point speed

指机器人末端执行器，即工具中心点的运动速度，通常包括线性速度和角速度两个部分。TCP速度是机器人性能的关键指标，直接影响任务执行效率。

3.4

工艺参数 process parameter

为实现规定涂层质量目标而设定并可调整的变量集合，包括喷涂参数、机器人运动参数、材料参数及环境参数等。

3.5

工艺参数调试 process parameter tuning

在满足前置条件的基础上，通过试喷与测量对工艺参数进行设定校准与迭代调整，使涂层质量与过程能力达到目标要求的活动。

3.6

工艺优化 process optimization

采用系统方法对工艺参数组合进行寻优与固化，以获得更优的质量稳定性、材料利用率、节拍与环境绩效的过程。

3.7

效果验证 performance verification

依据预先规定的指标体系与判定规则，对调试优化后的喷涂效果进行测量检验与统计评价，确认其满足应用要求的活动。

3.8

喷涂窗口 spray window

在给定涂料体系、工件几何、喷涂设备与环境条件下，可稳定获得合格涂层的参数取值范围及其组合关系。

3.9

雾化 atomization

涂料或粉末在旋杯或喷枪作用下被分散成细小颗粒并形成喷雾的过程，其状态受雾化能量、黏度、喷嘴结构、气压与静电条件等影响。

3.10

喷幅 spray pattern

旋杯或喷枪在规定参数下形成的喷雾形状与有效覆盖宽度，通常与扇形空气、雾化空气、喷嘴结构及静电场强相关。

3.11

枪距 gun to part distance

旋杯或喷枪喷嘴出口至被涂表面的距离，枪距变化会影响雾化颗粒到达表面的速度、覆盖宽度、回弹与成膜质量。

3.12

入射角 incidence angle

旋杯或喷枪喷雾中心线与被涂表面法线的夹角，入射角偏离会影响膜厚分布、边角覆盖与外观缺陷风险。

3.13

轨迹间距 path spacing

相邻喷涂轨迹之间在工件表面投影的间距，是决定覆盖均匀性与重叠率的重要参数。

3.14

重叠率 overlap ratio

相邻喷幅在工件表面有效喷涂区域的重合比例，用于表征覆盖叠加程度并影响膜厚均匀性与外观稳定性。

3.15

线速度 line speed

旋杯或喷枪相对工件表面的运动速度，线速度与流量、喷幅、重叠率共同决定单位面积上涂料沉积量。

3.16

触发时序 trigger timing

旋杯或喷枪开启与关闭相对轨迹关键点的时间或位置控制逻辑，影响起止端膜厚、边缘露底、堆漆与过喷。

3.17

触发延迟 trigger latency

旋杯或喷枪开启时，其实际开启时间和理论开启时间由于电气扫描周期和气动元件相应速度不一致所导致的相应延迟（由于涂装防爆要求喷房内多采用气动控制），其影响涂层的一致性、设备可靠性与涂装机器人轨迹编写的方式。

3.18

IPS 集成式喷涂控制系统 integrated process system

IPS（集成式喷涂控制系统）是指涂装机器人根据喷涂工艺需求，集成的不同的齿轮泵、调压器、喷枪、旋杯以及其他喷涂控制系统设备的总成，以下简称IPS。

3.19

IPS 动态响应延迟 dynamic response latency of IPS

IPS系统在喷涂过程中，实际动态控制相应的延迟时间，其影响涂层的一致性与涂装机器人的轨迹编写方式。

3.20

静电喷涂 electrostatic spraying

利用高压静电场使涂料颗粒带电并在电场力作用下向接地工件沉积的喷涂方式，通常用于提高传递效率与覆盖能力。

3.21

反馈电流 feedback current

静电喷涂往往采用恒定电压模式进行控制，此时就会产生动态的反馈电流。反馈电流值受到涂料电阻率、环境湿度、涂装设备的影响，电流值过大或者比例斜率过高容易产生爆炸的风险。同时在相同工况下电流值不稳定也容易导致膜厚不均匀。其影响静电喷涂的安全性、涂装膜厚的一致性，是涂装系统的核心工艺反馈参数之一。

3.22

传递效率 transfer efficiency

喷出涂料中实际沉积在工件表面的质量或体积分数与喷出总量之比，用于评价材料利用水平。

3.23

膜厚 film thickness

涂层在规定测量方法下的厚度，通常包含干膜厚度与湿膜厚度两类表征口径。

3.24

膜厚均匀性 film thickness uniformity

膜厚在规定区域内的离散程度，可采用极差、标准差、变异系数等统计指标表征。

3.25

流挂 sagging

涂膜在固化前因重力作用发生下垂或局部堆积形成条纹或挂痕的缺陷，常与涂料黏度、单位面积沉积量、枪距与环境条件相关。

3.26

橘皮 orange peel

涂膜表面呈现类似橘皮的起伏纹理缺陷，常与雾化质量、挥发速率、喷涂环境与固化条件相关。

3.27

干喷 dry spray

涂料颗粒在到达工件前已过度挥发或半干化，导致表面粗糙、附着力下降或光泽不稳的现象。

3.28

针孔 pinhole

涂层表面出现细小孔洞的缺陷，常与底材污染、溶剂挥发、气体析出、喷涂环境与烘干条件相关。

3.29

缩孔 fisheye

涂膜因表面张力差异形成局部凹陷露底或环状缺陷，常与硅油、油污、脱模剂或污染物有关。

3.30

基线参数 baseline setting

在设备状态确认与材料环境条件满足要求时，基于推荐值或历史成熟配方设定的初始参数组合，用作调试优化的起点与对照基准。

4 总体要求

4.1 基本原则

4.1.1 目标导向原则

调试优化应以明确的质量目标与过程能力目标为牵引，至少包括膜厚及其均匀性、外观缺陷控制、附着力与必要的防护性能、一次合格率、节拍与材料利用率等。目标应可量化、可检验，并与产品外观等级、使用环境与客户要求一致。

4.1.2 系统协同原则

涂装机器人工艺参数调试不得孤立进行，应将喷房气流与压差、过滤状态、供漆供粉系统稳定性、涂料黏度、电阻值与温度控制、静电接地状态、烘干固化曲线等作为系统约束条件一并纳入。对关键约束条件变化，应先恢复基准状态再开展参数优化，避免在非稳定条件下“调参代偿”。

4.1.3 先基线后优化原则

调试应先建立可复现的基线参数组合，在基线稳定的前提下再开展参数寻优。基线建立应通过试喷与测量确认，并形成配方模板与程序版本，作为后续对比与回滚依据。

4.1.4 风险控制原则

调试过程应优先控制安全与环保风险，严格执行防火、防爆、防静电、溶剂与粉尘控制、通风与职业健康防护、机器人安全互锁与区域隔离、在启动设备等可能影响安全的按钮处设置安全锁防止误触等要求。任何以缩短调试周期为目的而削弱安全措施的做法均不可接受。

同时应综合评判参数调试相关风险，提前做好机器人程序、喷涂参数等备份，并且制定好系统性的调试失败后恢复原生产状态的回滚预案。

4.1.5 数据驱动与可追溯原则

调试优化应基于数据而非仅凭经验。应建立从参数设定、试喷条件、测量数据到判定结论的证据链，确保“参数可复现、结论可复核、变更可追溯”。

4.1.6 分层调整原则

参数调整应遵循分层顺序，优先解决系统稳定性与设备状态，再调整雾化与材料沉积参数，最后精修轨迹与姿态参数。对多变量强耦合场景，应采用试验设计方法减少盲目试错。

4.2 前置条件与调试边界

4.2.1 设备状态前置条件

调试前应确认机器人本体、机器人防爆单元、旋杯或喷枪、供漆供粉系统、换色系统、静电系统、喷房通风与过滤系统以及烘干固化设备处于可控状态。至少应完成以下确认：

- a) 涂装机器人防爆单元模块通过自检无异常，接地电阻符合要求。
- b) 涂装机器人重复定位精度满足工艺要求，轴零点与工具坐标已校准；
- c) 旋杯或喷枪喷嘴型号与磨损状态满足要求，喷幅与雾化状态稳定；
- d) 供漆压力、回油回路与流量控制稳定，无明显脉动与堵塞；
- e) 静电系统接地电阻与高压输出稳定，互锁功能有效；
- f) 喷房风速压差在控制范围内，过滤与回风系统运行正常；
- g) 烘干室温度曲线与输送节拍稳定，测温点与控制点一致性满足要求。
- h) 所有设备无异常报警，喷房各互锁安全信号均为正常状态。

严禁为了调试设备工艺参数，屏蔽喷房外部安全信号的错误做法。

4.2.2 材料与环境前置条件

应确认涂料批次、混合比例、固化剂与稀释剂配比、黏度、电阻值与温度处于规定范围，且基材前处理（除油磷化喷砂或其他工艺）满足清洁度与表面能要求。喷房温湿度应处于规定范围，避免在极端环境下建立参数基线。

4.2.3 量测与检验资源

应配置满足测量精度与重复性要求的膜厚测量仪器、外观检验光源与标准样板、必要的附着力与性能验证工具或试验资源。量测方法与取样位置应固定，避免因测量口径变化造成假象。

4.2.4 调试边界

当出现以下情形之一时，应暂停参数优化并优先处理前置条件问题：

- a) 喷房压差与风速波动超出控制范围；
- b) 供漆压力或流量存在明显脉动，影响喷幅稳定；
- c) 静电接地异常或高压输出不稳定；
- d) 喷嘴磨损或堵塞导致喷幅明显变化；
- e) 涂料黏度、电阻值与温度波动超限或混合比例不稳定；
- f) 机器人轨迹重复性不足或工具坐标漂移。
- g) 机器人触发延迟和IPS动态响应延迟在可接受的性能范围内。
- h) 设备出现其他异常报警或者不满足安全需求

4.3 指标体系与判定框架

4.3.1 指标体系应覆盖质量效果、过程能力与资源效率三类维度。质量效果指标宜包括：膜厚目标达成率、膜厚均匀性、外观缺陷率、附着力合格率、必要的耐蚀耐候或耐介质性能；过程能力指标宜包括：一次合格率、过程波动水平、参数漂移频次、返工返修率；资源效率指标宜包括：涂料消耗、传递效率、过喷回收率、节拍与能源消耗等。

4.3.2 应建立统一判定口径。对膜厚应明确干膜或湿膜口径、测点数量与分布、合格区间与统计指标；对外观缺陷应明确缺陷类别与判定等级；对附着力与性能验证应明确试验方法与合格判据；对材料利用率应明确计量边界与统计周期。

4.3.3 调试优化应分阶段设置验收点。至少应包含：基线建立验收、参数优化验收、稳定性验收与批量验证验收。各阶段验收应形成记录并满足可追溯要求。

4.4 参数分类与关键变量管理

4.4.1 工艺参数宜按作用机理分为四类：

- a) 雾化成膜类参数，如流量、雾化气压、成形气压、喷嘴口径、静电电压与电流限制；
- b) 覆盖几何类参数，如枪距、入射角、轨迹间距、重叠率、线速度、触发时序；
- c) 材料状态类参数，如黏度、电阻值、温度、固含、混合比例、可使用时间；
- d) 环境系统类参数，如喷房温湿度、风速压差、过滤状态、烘干曲线。

4.4.2 应建立关键变量清单与控制界限。关键变量应至少包含上述四类中的核心参数，并明确目标值、允许波动范围、监测频次与超限处置措施。关键变量清单应随配方与程序版本一并管理。

4.4.3 关键变量变更应实施变更管理。任何涉及关键变量目标值或控制界限的变更，应记录变更原因、

变更内容、验证结果与生效范围，并保留回滚方案。

4.5 证据链与记录要求

4.5.1 应建立调试优化证据链。证据链至少应包含：

- a) 工件信息与试喷条件，包括基材、前处理状态、涂层体系与批次；
- b) 设备状态确认记录，包括喷涂机器人、旋杯或喷枪杯头、喷嘴、供漆供粉、静电、喷房与烘干状态；
- c) 参数设定与版本信息，包括配方版本、程序版本与关键变量值；
- d) 试喷过程记录，包括喷涂顺序、节拍、异常情况与处置；
- e) 测量与检验数据，包括膜厚数据、外观缺陷记录、附着力与必要性能验证结果；
- f) 判定结论与纠正措施，包括缺陷分析、参数调整理由与复验结果。

4.5.2 证据链应可追溯到具体批次与具体版本。每次调试试验应具备唯一编号，确保可在需要时复现当时参数与现场条件。

5 调试准备与基线建立

5.1 调试准备流程

5.1.1 调试准备应以“条件可控、量测可用、风险可管、版本可追溯”为目标，按“确认—清洁—校准—试喷—验收”的步骤组织实施。调试前应完成安全技术交底，明确人员分工、试喷计划、停线窗口与应急处置措施。

5.1.2 调试准备宜至少包括以下工作内容：

- a) 安全确认，包含机器人防爆模块、接地电阻检测、其他喷房安全信号；
- b) 工件与涂层体系确认，包含基材材质、表面前处理工艺、涂层结构层次、涂料批次与混配比例；
- c) 旋杯或喷枪杯头与喷嘴确认，包含喷嘴型号、磨损状态、喷幅稳定性与雾化状态；
- d) 供漆供粉系统确认，包含供漆压力、回油回路、过滤器状态、换色阀组状态与冲洗流程；
- e) 静电系统确认，包含接地电阻、高压输出稳定性、互锁与报警功能；
- f) 喷房系统确认，包含风速压差、温湿度、过滤状态、照明与防爆设施状态；
- g) 设备安装精度和安全设置确认，包含机器人安装定位精度、附属设备安装定位精度、各轴限位设置、空间安全保护功能设置等状态。调试前，机器人安装精度在XYZ各方向误差应 $\leq 10\text{mm}$ ，角度误差应 $\leq 0.2^\circ$ ，并且应通过用户坐标系功能尽可能的纠正安装误差。
- h) 机器人本体与轨迹确认，包含设备管路和线缆连接、机器人故障复位、用户坐标与工具坐标设置、寄存器和背景逻辑程序设定、示教点与程序版本、TCP速度与加速度限制；
- i) IPS动态响应延迟与触发延迟确认：包含IPS动态启动延迟、关闭延迟与触发动态延迟确认；

j) 量测资源确认, 包含游标卡尺、涂料电阻率测定仪、温湿度测定仪、风速仪、膜厚仪校验状态、外观检验光源、标准样板与记录表单。

5.1.3 每次涂装机器人调试之前, 都应执行静态、动态功能测试和流量测试。测试旋杯与喷枪、供漆与供粉系统、机器人轨迹、IPS 动态响应延迟与触发延迟确认, 确保设备状态, 其确认方法如下:

a) 静态功能测试

涂装机器人应设定一个静态功能测试程序, 用于测试机器人静态轨迹精度、供漆系统与旋杯与喷枪的静态性能状态, 测试过程如下:

设定一个便于标记的位置, 提前在位置下铺设2-3层厚白纸。将机器人移动至便于标记的位置, 机器人执行触发信号5s, 然后机器人返回初始点。观察机器人运行轨迹状态、出漆是否连贯、白纸上静态的喷涂效果。

第一次执行该测试时, 应与设备商一同设定标准值, 之后每次调试时都参考该标准值进行校验比对。

b) 动态功能测试

涂装机器人应设定一个动态功能测试程序, 用于测试机器人动态轨迹精度和IPS动态响应延迟与触发延迟确认, 测试过程如下:

设定一组便于标记的起始位置和结束位置, 根据涂装机器人运动范围不同, 起始和结束位置应尽可能长一般在800mm-2000mm之间, 并且在程序中设定小扇形触发-大扇形-小扇形关闭三步操作, 标记切换工艺参数时所在的点的精确位置, 提前在位置下铺设2-3层厚白纸。执行动态功能测试程序, 机器人在起始和结束位置中走恒定TCP轨迹速度的直线程序, 并在程序中执行小扇形触发-大扇形-小扇形关闭三步操作, 然后机器人返回原点。观察机器人运行轨迹状态、出漆是否连贯、白纸上动态的喷涂效果、并根据机器人TCP轨迹速度和实际工艺参数变化位置与理论位置差换算得出IPS和触发延迟。

第一次执行该测试时, 应与设备商一同设定标准值, 之后每次调试时都参考该标准值进行校验比对。

c) 流量测试

涂装机器人应设定一个流量测试程序, 用于测试机器人流量精度, 测试过程如下:

设定一个便于标记的位置, 提前在位置下铺设量筒。将机器人移动至便于标记的位置, 机器人设定固定流量并执行固定时长触发信号。收集量筒检测量筒的体积或者质量变化值, 确定输出的真实流量, 将其与理论流量相比, 并重复2-3次。一般来说涂装机器人流量偏差值应 $\leq \pm 3\%$, 采用精度更高、性能更佳的设备可能实现更高的精度, 可以采取更高的标准。

d) 设备状态确认

将静态功能测试、动态功能测试和流量结果与初始标准值相比对, 从而评估综合的设备状态。

涂装机器人设备状态不合格的情况下, 应首先排除相关问题或故障, 不应在设备状态不适宜的情况下进行涂装机器人工艺参数调试工作。

5.1.4 调试准备阶段应建立“停用项清单”。当关键条件不满足时应立即暂停调试并整改, 整改完成且复核通过后方可继续。停用项至少包括: 机器人防爆模块异常、喷房压差失控、IPS 动态响应延迟与

触发延迟不合格、机器人轨迹异常、供漆压力脉动异常、接地异常、喷嘴明显磨损堵塞、涂料黏度和电阻值超限、机器人安全互锁失效等。

5.2 试喷对象与评价区域确定

5.2.1 试喷对象应具有代表性。宜优先选择典型结构复杂度、典型表面形态和典型边角特征的工件；当批量产品几何差异较大时，应至少选择一件“最难喷部位”工件作为基线建立对象。

5.2.2 评价区域应固定并可重复定位。应在工件上划定膜厚测点区域、外观重点观察区域与缺陷易发区域，并建立位置标识方法（如坐标网格、基准孔位或夹具基准），避免不同试喷间比较失真。

5.2.3 对需要颜色一致性与光泽稳定性控制的场景，应同时确定色差与光泽评价区域，并保持光照条件、观察角度与样板对比口径一致。

5.3 基线参数建立原则与顺序

5.3.1 基线参数应以成熟经验或设备推荐窗口为起点，并以满足质量底线为优先目标。基线建立不追求极限效率或极限材料利用率，重点在于获得稳定可复现的合格涂层效果。

5.3.2 基线建立应遵循“先系统后参数、先雾化后轨迹、先面后边角”的顺序：

- a) 先稳定喷房与供漆供粉系统，确认环境与材料状态；
- b) 再确认机器人和喷控系统性能是否满足需求，确认设备状态；
- c) 再建立雾化成膜基线，优先保证雾化均匀与成膜连续；
- d) 再建立覆盖几何基线，调整枪距、入射角、TCP速度与轨迹间距；
- e) 最后对边角、孔洞、凹槽等复杂部位进行补喷策略与触发时序精修。

5.3.3 建立基线时宜采用单因素逐步逼近策略，避免同时调整多个关键参数导致因果关系不清。对耦合强的参数组合应采用成组调整并进行对照验证。

5.3.4 基线建立时要考虑涂装工艺的全面性和通用性。要根据现场工艺特性，对可能出现的不同类型的涂料覆盖顺序进行全面的交叉验证，以确保不会出现涂层质量缺陷，确保基线参数可以满足现场实际生产复杂情况的需求。避免出现基线参数工艺窗口过窄或者应用范围受限的情况。

5.4 关键参数清单与控制界限

为便于现场统一管理，本文件给出基线建立阶段关键参数清单示例及控制界限设置要点。工程应用时应结合涂层体系、旋杯或喷枪型号、工件几何与节拍要求进行细化，并将其固化为配方模板与控制计划。

表1 关键参数清单与控制界限示例表

参数类别	参数名称	基线设定要点	建议控制界限设置逻辑	记录与追溯要求
雾化成膜	涂料流量	与目标膜厚和TCP速度匹配，避免过量导致流挂	以膜厚均值达标为中心设置上下限	配方版本与流量单位统一
雾化成膜	雾化气压	保证雾化细腻，避免粗雾引发橘皮	以喷幅稳定与表面纹理合格为界	每次换喷嘴后复核
雾化成膜	成形气压	保证喷幅形状与边缘柔和	以喷幅宽度与边缘过渡为界	记录喷幅宽度测量值
雾化成膜	静电高压	提升涂料传递效率、提升涂装质量	以不产生新的涂装缺陷和满足反馈电流安全值为界	记录经典高压设定值
覆盖几何	枪距	保证覆盖与沉积效率平衡	以覆盖均匀性与回弹控制为界	以夹具基准固定枪距
覆盖几何	入射角	尽量接近法向，边角适当修正	以边角薄涂与阴影区覆盖为界	关键姿态点截图留存
覆盖几何	线速度	与流量重叠率匹配控制单位面积沉积	以膜厚均值与均匀性共同约束	记录TCP速度曲线与限制值
覆盖几何	轨迹间距重叠率	保证膜厚均匀与外观稳定	以膜厚变异系数与缺陷率为界	固化为程序参数
控制逻辑	触发时序	避免起止端堆漆或露底	以端部膜厚与过喷为界	记录触发点位与延时
控制逻辑	反馈电流	避免电流过大出现火灾等风险	以电流最大值和电流上升比例斜率为界	记录电流最大值和上升比例斜率
材料状态	黏度温度	保持在工艺窗口内稳定	以黏度目标为中心设置上下限	记录每次调漆与检测值
材料状态	涂料电阻值	保持在工艺窗口内稳定	以电阻值目标为中心设置上下限	记录每次调漆与检测值
环境系统	喷房风速压差	保证雾化运输与过喷抽排稳定	以风速压差目标为中心设置界限	记录班次数据与异常
环境系统	喷房湿度	保证雾化效果一致和静电安全	以喷房湿度目标为中心设置接线	记录班次数据与异常

5.5 基线试喷与验收判定

5.5.1 基线试喷应至少进行两轮：首轮用于建立可喷涂的合格状态，第二轮用于验证重复性与稳定性。每轮试喷应固定工件、固定评价区域、固定测量方法与采样点位。

5.5.2 膜厚验收应按规定测点数量实施测量，计算均值与离散指标。若膜厚均值达标但离散过大，应优先调整覆盖几何参数而非单纯提高流量。

5.5.3 外观验收应在规定光照条件下检查流挂、橘皮、干喷、针孔、缩孔、露底、颗粒等缺陷，并按缺陷分类记录缺陷位置与程度。出现系统性缺陷时，应按“材料与环境—雾化—覆盖—固化”顺序排查原因。

5.5.4 基线验收通过后，应将参数组合固化为基线配方，并冻结配方版本与程序版本。基线验收未通过时，应记录不合格项与原因分析，制定调整计划并重新试喷验证。

5.6 基线固化与版本化交付

5.6.1 基线固化应至少包含：

- a) 配方模板固化，包含关键参数目标值与控制界限；
- b) 机器人程序固化，包含轨迹路径、姿态点、速度与触发逻辑；
- c) 工艺参数固化，包含涂料流量、雾化空气、成型空气、静电高压、枪距；
- d) 环境变量固化，包括涂料电阻值、黏度、风量、风速、烘干条件与喷房温度、湿度范围；
- e) 检验口径固化，包含测点布置、外观判定光源与样板；

e) 文件化交付，形成基线建立报告并纳入档案。

5.6.2 由于喷房环境温度、湿度存在一定上下界限，基线版本内应提供与涂料流量与静电高压与喷房温湿度影响的关系，提出涂料流量与静电高压调整界限，并允许在温度和湿度发生变化时，在界限范围内进行响应调整。

5.6.3 基线版本发布后，应明确适用范围与禁止项。适用范围至少包括工件型号、涂层体系、旋杯或喷枪喷嘴型号、喷房与烘干条件；禁止项至少包括未经验证的涂料批次替换、喷嘴型号替换、喷房风速大幅调整等。

5.6.4 基线发布后宜进入短期稳定性观察期，对连续若干批次进行抽检统计，确认过程处于受控状态后方可进入系统性参数优化阶段。

5.6.5 基线版本发布后，应根据基线参数的不同存储区域，制定相关的参数保护或检查措施。例如对于存储在机器人控制器或 PC 段的参数应参与加密措施。对于设备控制并检测的参数，应对控制单元进行授权控制，避免未经授权的修改基线参数的行为。

6 参数优化方法与试验设计

6.1 优化总体思路

6.1.1 参数优化应在基线稳定的前提下开展。优化目标应从质量底线出发，在满足膜厚与外观合格的基础上，逐步提升膜厚均匀性、降低缺陷率、提高传递效率、压缩节拍并增强过程鲁棒性。任何以牺牲质量稳定性换取短期材料节约或节拍提升的做法均不应作为优化结果固化。

6.1.2 优化应坚持“安全第一”的原则。所有调试工作应全程观察机器人防爆模块的工作状态、静电喷涂需要严密监测反馈电流，应将保证安全优先于性能实现，需要预留足够的安全冗余。

6.1.3 优化应坚持“先筛选关键因素后精细寻优”的路径。对因素数量较多且耦合显著的工艺，应先开展关键因素识别与敏感性分析，缩小优化变量集合，再采用试验设计方法进行组合寻优，避免盲目全因子试验造成成本高、周期长且结论不稳定。

6.1.4 优化应坚持“工艺窗口”理念。优化结果应输出参数组合的推荐值与允许范围，并明确约束条件与适用边界；对关键参数应同时给出控制界限与超限处置建议，避免只输出单点最优导致现场稍有扰动即失效。

6.2 因素选择与变量分层

6.2.1 因素选择应以失效机理与现场问题清单为输入。宜从以下来源建立候选因素池：

- a) 基线试喷的薄弱环节与缺陷分布，如边角薄涂、流挂倾向、橘皮、干喷或缩孔等；
- b) 工艺波动来源分析结果，如供漆压力波动、黏度漂移、喷房风速变化、静电接地不稳定等；
- c) 质量数据统计结果，如膜厚离散指标高、缺陷复发、一次合格率低等；
- d) 设备能力边界，如机器人速度上限、旋杯或喷枪喷幅上限、静电电流限制与安全互锁限制等。

6.2.2 变量分层应与调试顺序一致。优化变量宜按以下层次管理并明确优先级：

- a) 材料与环境层变量，主要用于建立稳定边界条件，如黏度温度、喷房风速压差、温湿度；
- b) 雾化成膜层变量，主要影响雾化质量与颗粒谱，如流量、雾化气压、成形气压、喷嘴口径、静电电压；
- c) 覆盖几何层变量，主要影响沉积分布与覆盖均匀性，如枪距、入射角、线速度、轨迹间距、重叠率、触发时序；
- d) 固化与节拍协同变量，主要影响外观与性能，如闪干时间、烘干曲线、输送节拍。

6.2.3 优化变量数量宜控制在可实施范围内。对单轮试验设计，因素数量宜优先控制在3~6个；若因素更多，应先进行筛选试验或分阶段优化，避免一次性引入过多因素导致分析不清晰。

6.3 响应指标定义与测量口径

6.3.1 响应指标应与目标一致并可量化，宜至少包含膜厚均值、膜厚均匀性指标、外观缺陷指标与材料利用率指标。对需兼顾耐蚀等性能要求的产品，应增加附着力、冲击、盐雾、老化、耐候性测试或必要性能指标作为约束指标。

6.3.2 膜厚指标应明确测量口径与统计口径。应固定测点数量与位置，给出均值、标准差或变异系数等离散指标，并明确合格区间与判定规则。

6.3.3 外观缺陷指标应采用分类统计方式。应明确缺陷类别、缺陷等级与判定口径，宜采用缺陷计数、缺陷面积占比或缺陷评分等方式表征，并应保证同一批试验的光照条件与检验人员口径一致。

6.3.4 材料利用率指标宜至少包含单位工件涂料消耗量、传递效率或过喷回收量。计量边界应明确，包括换色冲洗损耗是否计入、回收料是否折算、喷房捕集效率是否参与核算等。

6.4 单因素逐步优化方法

6.4.1 单因素方法适用于基线已稳定且主要矛盾明确的场景，例如仅存在膜厚偏低、边角薄涂或轻微橘皮等单一问题。单因素调整时应保持其他关键变量在控制界限内并固定不变。

6.4.2 调整顺序宜遵循“先雾化后覆盖”的原则：

- a) 若外观粗糙或橘皮明显，应优先检查雾化气压与成形气压、枪距与黏度；
- b) 若膜厚不足或露底，应优先核对流量与速度匹配、重叠率与触发时序；
- c) 若边角薄涂，应优先优化入射角、枪距与局部补喷路径，而非简单提高总流量。

6.4.3 单因素试验应设置对照组并至少进行重复确认。每次调整宜采用小步长策略，并记录调整前后差异，避免跨步过大导致出现新缺陷。

6.5 正交试验实施方法

6.5.1 正交试验适用于多因素多水平的参数筛选与初步寻优。应根据可控因素数量与水平数选择合适的正交表，并明确试验次数与资源投入。

6.5.2 因素水平设置应满足工程可实施性与安全边界。各水平应覆盖预期工艺窗口范围，同时不得触及旋杯或喷枪、静电与喷房的安全限制或设备能力上限。对风险较高的水平组合，应先进行安全评估或小样验证。

6.5.3 试验执行应遵循随机化原则或分块原则。为降低外部干扰，应尽量在同一时间窗口完成同一轮试验；如必须跨班次或跨日期，应将环境与材料状态作为分块因素记录，并在分析中予以考虑。

6.5.4 结果分析应至少包含极差分析与方差分析的思路。应识别主导因素与次要因素，给出推荐组合，并通过确认试验验证推荐组合的有效性与可重复性。

6.6 响应面方法实施要点

6.6.1 响应面方法适用于在已确定关键因素后进行精细寻优与工艺窗口构建。宜选择 2~4 个关键连续变量，构建二次回归模型并分析交互作用。

6.6.2 试验点设计应覆盖中心点与边界点。应设置重复中心点用于估计纯误差与判断模型拟合质量。若发现模型拟合不足，应检查数据质量、变量范围设定与潜在的不可控因素干扰。

6.6.3 多目标优化应明确主目标与约束条件。通常以外观缺陷率与膜厚均匀性为主目标，以膜厚均值达标与不流挂为约束，以材料利用率与节拍为次目标。优化结果应输出推荐点与可行域范围，并标明对扰动的敏感性。

6.6.4 优化结果必须通过确认试验验证。确认试验应在接近生产条件下进行，且应纳入稳定性观察，避免仅在短时试喷条件下得出“偶然最优”。

6.7 过程稳定性验证与批量确认

6.7.1 优化结果应进行稳定性验证。稳定性验证应覆盖至少连续若干批次或若干节拍周期的抽检统计，确认膜厚与外观处于受控状态，并检查关键变量是否存在漂移趋势。

6.7.2 对易漂移因素应设置在线监控或强化点检。例如黏度温度、供漆压力、喷房压差、静电接地状态与喷嘴磨损等，应设定监测频次与超限处置措施，防止优化结果在实际生产中快速失效。

6.7.3 批量确认通过后，方可将优化参数固化为正式配方版本与程序版本，并更新控制计划与检验抽样方案。

6.8 效果验证指标与验收口径

为确保优化结果可落地、可复核，本文件给出效果验证指标与验收口径示例。工程应用时应结合产品外观等级、涂层体系与客户要求细化具体阈值，并固化到企业控制计划或项目验收文件中。

表2 效果验证指标与验收口径示例表

指标类别	指标名称	推荐统计口径	典型验收要点	不符合处置建议
膜厚	膜厚均值	固定测点均值	均值处于目标区间	优先调整流量速度匹配
膜厚	膜厚均匀性	标准差或变异系数	离散指标满足要求且无明显薄点	优先调整轨迹间距重叠率姿态
外观	流挂缺陷率	计数或面积占比	不允许或低于限值	降低单位面积沉积量或优化闪干
外观	橘皮等级	标准样板对比	等级满足外观要求	优化雾化状态黏度与枪距
外观	缩孔针孔	缺陷计数	不允许或低于限值	排查污染源改善清洁与过滤
结合力	附着力	划格等级或合格率	达到规定等级	优先排查前处理与固化曲线
效率	单件耗漆量	质量或体积统计	与基线相比下降或受控	检查过喷回弹与喷房抽排
效率	传递效率	质量平衡法	满足目标或提升	优化静电与枪距姿态

表2 效果验证指标与验收口径示例表（续）

指标类别	指标名称	推荐统计口径	典型验收要点	不符合处置建议
过程能力	一次合格率	批次统计	达到目标并稳定	分析缺陷贡献与波动来源
稳定性	关键变量超限率	班次或日统计	超限率低且可控	强化点检或设在线监控

7 缺陷诊断与纠正措施

7.1 总则

7.1.1 缺陷诊断应遵循“先条件后参数、先共因后特因、先系统后局部”的原则。出现缺陷时，应优先核查喷房环境、材料状态、供漆供粉稳定性、静电接地与设备状态等共因条件，确认处于控制界限内后再开展工艺参数调整，避免在不稳定基础条件上反复调参。

7.1.2 缺陷诊断应实行证据链管理。每次缺陷事件应形成唯一编号，记录缺陷类型、出现部位、批次信息、当时参数版本、环境与材料状态、设备状态、处置措施与复验结果，实现可追溯闭环。

7.1.3 纠正措施应以“消除根因”为目标，不应仅通过提高膜厚或扩大喷涂窗口掩盖缺陷风险。纠正措施实施后必须进行验证试喷或批量抽检确认，验证通过后方可固化为正式版本或控制计划调整。

7.2 缺陷分类与优先级管理

7.2.1 缺陷应按风险与影响分级管理。对影响安全防护性能或造成大面积返工的缺陷应列为高优先级，优先处置并必要时暂停生产；对仅影响外观但可通过局部修补的缺陷可列为中优先级；对轻微可接受或可在后续工序被覆盖的缺陷可列为低优先级。

7.2.2 缺陷分类宜至少包括：

- a) 膜厚类缺陷：薄涂露底、局部过厚、膜厚波动大；
- b) 外观类缺陷：流挂、橘皮、干喷、颗粒、针孔、缩孔、桔纹、色差与光泽不稳；
- c) 结合与性能类缺陷：附着力不良、耐蚀不足、耐介质不足、起泡、开裂；
- d) 清洁与污染类缺陷：油污、硅污染、灰尘纤维、喷房污染；
- e) 工艺动作类缺陷：触发不准、起止端堆漆、阴影区覆盖不足、边角薄涂。

7.2.3 诊断总流程与排查顺序

7.2.4 缺陷出现后应按以下顺序组织排查并形成记录：

- a) 现象确认：缺陷类型、位置、数量、严重度与可重复性；
- b) 条件核查：材料批次与混配、黏度、电阻值、温度、喷房温度湿度风速压差、过滤状态、烘干曲线；
- c) 设备核查：喷嘴磨损堵塞、供漆压力波动、静电接地状态、旋杯或喷枪雾化状态、机器人轨迹重复性；
- d) 参数核查：配方版本与程序版本是否正确调用，关键变量是否超限；
- e) 复现试验：在控制条件下复现缺陷或确认缺陷与某因素相关；
- f) 纠正措施：制定并实施措施，进行复验并判断有效性；
- g) 固化与预防：更新控制计划或版本并设定防再发措施。

7.2.5 对难以复现或偶发缺陷，应优先排查“漂移因素”与“间歇性故障”，包括黏度漂移、供漆脉动、喷嘴局部堵塞、静电接地波动、喷房压差波动、过滤饱和、换色残留等。

7.3 典型缺陷诊断与纠正措施

7.3.1 膜厚不足或露底

7.3.1.1 特征描述

膜厚测量结果低于目标区间下限，或在边角、凹槽、阴影区出现可视露底、发花、底材纹理透出等现象，且缺陷具有一定重复性。

7.3.1.2 排查要点

排查要点应包含以下方面：

- a) 材料与环境：核查涂料黏度、温度、固含与混配比例是否处于控制界限内；核查喷房风速压差是否偏大导致沉积效率下降；
- b) 设备状态：核查供漆压力与流量控制是否稳定，过滤器是否堵塞；核查喷嘴型号与磨损状态、喷幅宽度与雾化稳定性；核查静电接地与高压输出是否稳定；
- c) 覆盖几何：核查枪距是否偏大、入射角偏离过大、轨迹间距过大或重叠率不足；核查阴影区是否存在“不可达姿态”或路径覆盖盲区；
- d) 控制逻辑：核查触发时序是否存在开启滞后、提前关闭或路径端部未覆盖的情况；核查局部补喷路径是否缺失或未调用。

7.3.1.3 纠正措施

纠正措施如下：

- a) 以“单位面积沉积量”为主线优先调整流量与线速度匹配关系，在不引发流挂的前提下恢复膜厚均值至目标区间；

- b) 优先通过调整轨迹间距与重叠率改善薄点区域覆盖，必要时增加补喷路径或优化阴影区姿态点；
- c) 将枪距与入射角恢复至基线窗口，边角与凹槽部位采用局部姿态修正与分段速度控制；
- d) 校核静电接地与高压参数，恢复至稳定窗口；对接地不良的夹具或工件挂具应整改后再验证；
- e) 校正触发点位与延时逻辑，确保起止端与边缘覆盖连续。

7.3.1.4 复验要求

应在固定测点与固定外观观察条件下复验膜厚均值与均匀性，并对薄点区域进行加密测点验证；复验合格后方可固化版本。

7.3.2 局部过厚或流挂

7.3.2.1 特征描述

局部膜厚超过上限，垂直面或下边缘出现下垂条纹、挂痕或堆漆，常集中于路径重叠区、起止端或边角补喷区。

7.3.2.2 排查要点

排查要点应包含以下方面：

- a) 材料与环境：核查黏度是否偏低、温度是否偏高；核查喷房温湿度及通风条件是否导致闪干不足；
- b) 覆盖几何：核查线速度是否偏低、轨迹间距是否过小或重叠率过高；核查枪距是否过近、喷幅是否过窄导致局部沉积过量；
- c) 控制逻辑：核查起止端触发时序是否造成端部停留喷涂；核查边角补喷路径是否与主路径重复覆盖；
- d) 固化与节拍：核查闪干时间、喷涂间隔与烘干升温曲线是否合理，是否存在湿碰湿叠加过度。
- e) 设备与环境参数不匹配：核查喷房湿度与静电高压的参数，是否存在喷房湿度较高、放大了静电传递的效率。

7.3.2.3 纠正措施

纠正措施如下：

- a) 优先降低单位面积沉积量：降低流量或提高线速度，并同步核查膜厚均值是否仍达标；
- b) 调整轨迹间距与重叠率，避免在局部区域重复覆盖；对重叠区可采用速度补偿或分区参数；
- c) 适当增大枪距或优化成形气压以改善喷幅边缘过渡，降低边缘堆漆风险；
- d) 调整黏度与温度至工艺窗口，必要时优化稀释体系；同时核查混配比例与可使用时间；
- e) 优化喷涂顺序与闪干控制，必要时延长闪干或调整烘干初段升温速率。

e) 降低涂装设备静电高压设定值，以确保满足反馈电流的安全需求范围下，将静电高压传递效率调整至最佳状态。

7.3.2.4 复验要求

应在流挂敏感区域进行重点外观复核，并对路径重叠区开展膜厚剖面或加密测点验证；确认缺陷消除且膜厚目标仍满足要求后方可固化。

7.3.3 橘皮与表面粗糙

7.3.3.1 特征描述

涂膜表面呈橘皮状起伏或粗糙颗粒感，光泽不稳，通常与雾化质量、流平条件与固化条件相关。

7.3.3.2 排查要点

排查要点应包含以下方面：

- a) 雾化与喷幅：核查雾化气压、成形气压与喷嘴磨损状态；观察喷幅边缘是否发散、条纹是否清晰；
- b) 材料状态：核查黏度偏高或溶剂体系挥发过快导致流平不足；核查涂料温度与固含波动；
- c) 覆盖几何与环境：核查枪距偏大、喷房风速偏大导致颗粒到达前半干化；核查温湿度是否偏离窗口；
- d) 固化：核查闪干不足或烘干升温过快造成表面结皮。

7.3.3.3 纠正措施

纠正措施如下：

- a) 恢复稳定雾化状态：在安全边界内优化雾化气压与成形气压，必要时更换喷嘴并重新建立喷幅基准；
- b) 调整黏度与温度至窗口，优化稀释与流平条件；对批次差异应实施批次管理与小样确认；
- c) 优化枪距与喷房风速压差，降低干喷倾向并改善沉积稳定性；
- d) 校核闪干与烘干曲线，必要时降低初段升温速率或延长闪干时间。

7.3.3.4 复验要求

应采用统一光源与样板口径进行外观复验，同时抽测膜厚均匀性，避免通过“过厚成膜”掩盖橘皮问题。

7.3.4 干喷与粉化

7.3.4.1 特征描述

涂膜表面发干、粗糙、附着力或光泽下降，擦拭有粉化感，常发生于枪距偏大、风速偏大或挥发过快条件下。

7.3.4.2 排查要点

排查要点应包含以下方面：

- a) 覆盖几何：核查枪距是否偏大、线速度是否过高、路径是否远离工件表面导致飞行时间过长；
- b) 环境条件：核查喷房风速偏大、温度偏高或湿度偏低；核查回风与抽排是否异常；
- c) 雾化参数：核查雾化能量是否过高导致颗粒过细、挥发加速；
- d) 材料状态：核查黏度是否偏低、溶剂体系是否过快。

7.3.4.3 纠正措施

纠正措施应如下：

- a) 在保证覆盖的前提下适当减小枪距或降低线速度，并复核膜厚与外观；
- b) 将喷房风速温湿度恢复至窗口，必要时调整通风组织与压差设定；
- c) 适当降低雾化气压或优化成形气压，使颗粒谱与沉积状态更适配；
- d) 调整黏度与溶剂体系，平衡雾化与挥发速率。

7.3.4.4 复验要求

应复验外观粗糙度与光泽稳定性，并关注附着力或后续性能是否受影响；复验通过后方可更新配方版本。

7.3.5 针孔与起泡

7.3.5.1 特征描述

涂膜出现细小孔洞或气泡，固化后可形成针孔、鼓包或局部凹坑，常与污染、水分、溶剂滞留或固化曲线不当相关。

7.3.5.2 排查要点

排查要点应包含以下方面：

- a) 前处理与清洁：核查基材清洁度、含水含油情况；核查压缩空气含水含油及过滤状态；
- b) 材料与施工：核查混配比例、黏度与可使用时间；核查是否存在湿碰湿叠加过度或单次沉积过厚；
- c) 环境与通风：核查喷房湿度偏高或通风不良导致溶剂排出受阻；
- d) 固化：核查闪干不足或升温过快导致表面结皮、内部溶剂析出。

7.3.5.3 纠正措施

纠正措施如下：

- a) 强化前处理与清洁控制，整改压缩空气品质与过滤系统，必要时更换滤芯并进行验证；
- b) 控制单位面积沉积量与喷涂顺序，避免溶剂滞留；必要时增加闪干或分层喷涂；
- c) 调整喷房温湿度与通风条件，降低水分与溶剂滞留风险；
- d) 优化烘干曲线，避免快速结皮；必要时降低初段升温速率并延长恒温段。

7.3.5.4 复验要求

应在固化后进行外观复验，并按产品要求增加附着力或必要性能验证，确认缺陷消除且性能满足要求。

7.3.6 缩孔

7.3.6.1 特征描述

涂膜出现环形凹陷或局部露底的缩孔缺陷，具有突发性与污染相关性，常与含硅、油污、脱模剂等低表面张力污染源有关。

7.3.6.2 排查要点

排查要点应包含以下方面：

- a) 污染源追溯：核查工件、夹具、挂具、手套、清洁剂、润滑剂是否存在含硅或油性污染；
- b) 喷房与过滤：核查喷房循环风路径、过滤状态与墙面地面清洁；核查是否存在污染物再悬浮；
- c) 换色与冲洗：核查换色冲洗程序是否充分，阀组死角是否残留；
- d) 供漆系统：核查过滤与管路清洁，确认无污染物混入。

7.3.6.3 纠正措施

纠正措施应如下：

- a) 立即隔离问题批次并开展污染源清除，对喷房、夹具与挂具执行专项清洁；
- b) 完善禁用物管理，建立喷房区域含硅物质禁入清单与进场管控；
- c) 优化换色与冲洗程序，必要时增加冲洗步骤并验证残留水平；
- d) 检修供漆过滤与管路清洁状态，必要时实施系统清洗与再确认。

7.3.6.4 复验要求

应采用同批材料与同工件条件进行对照复验，确认缩孔不再出现后方可恢复批量生产，并将污染防控措施纳入控制计划。

7.3.7 颗粒与杂质

7.3.7.1 特征描述

涂膜表面出现颗粒、毛刺、纤维或杂质点，影响外观等级并可能引发返工，通常与喷房洁净、过滤与供漆洁净度相关。

7.3.7.2 排查要点

排查要点应包含以下方面：

- a) 喷房洁净与过滤：核查过滤器饱和与破损情况，核查地面墙面与循环风路径积尘；
- b) 供漆过滤：核查滤芯更换周期与压差，核查涂料混入杂质风险；
- c) 工件清洁：核查前处理残渣、搬运过程二次污染与静电吸尘；
- d) 旋杯或喷枪维护：核查喷嘴结皮、枪口污染与清洁停机保护执行情况。

7.3.7.3 纠正措施

纠正措施应如下：

- a) 按制度维护喷房过滤并实施专项清洁，必要时调整清洁频次与换滤周期；
- b) 检修供漆过滤系统并更换滤芯，强化涂料入线过滤与密闭管理；
- c) 强化工件清洁与防尘措施，规范搬运与暂存，必要时增加除尘工序；
- d) 规范旋杯或喷枪清洁与停机保护，避免结皮脱落形成颗粒源。

7.3.7.4 复验要求

应在外观重点区域进行颗粒计数或等级评定，并复核喷房与供漆系统的清洁状态记录，确认颗粒水平受控后固化措施。

7.3.8 色差与光泽不稳

7.3.8.1 特征描述

同批或不同批工件颜色与光泽存在明显差异，或同一工件不同区域存在色泽不均，常与材料批次、膜厚一致性、雾化状态与固化条件波动相关。

7.3.8.2 排查要点

排查要点应包含以下方面：

- a) 材料批次与混配：核查批次差异、搅拌均匀性、混配比例与黏度温度漂移；
- b) 膜厚一致性：核查膜厚均值与均匀性，尤其关注薄厚差异对色相与光泽的影响；
- c) 雾化与静电：核查喷幅稳定、雾化状态与静电接地稳定性，排查间歇性波动；
- d) 固化条件：核查烘干曲线波动、温度测点一致性与输送节拍变化；
- e) 工艺顺序：核查喷涂顺序、闪干时间与换色稳定性。

7.3.8.3 纠正措施

纠正措施应如下：

- a) 固化批次管理与混配控制，确保黏度温度与搅拌条件稳定；对批次切换应执行小样确认；
- b) 优先改善膜厚均匀性，通过轨迹间距、重叠率与姿态优化降低区域差异；
- c) 恢复雾化与静电参数至稳定窗口并整改接地系统，降低传递效率波动；
- d) 校核烘干曲线与节拍，保证固化一致性；必要时校准测温点与控制点；
- e) 固化喷涂顺序与闪干节拍，减少工况差异引发的色泽波动。

7.3.8.4 复验要求

应按统一光源与观察角度进行色差与光泽复验，并与膜厚数据进行关联分析，确认波动来源已受控后方可固化版本。

7.3.9 膜厚均匀度差

7.3.9.1 特征描述

同批或不同批工件膜厚均匀度存在明显差异，或同一工件不同区域膜厚最大值和最小值相差过大，常与机器人轨迹、涂装设备、工件重复定位精度、涂料流平相关。

7.3.9.2 排查要点

排查要点应包含以下方面：

- a) 机器人程序：核查机器人程序是否被未经授权修改；
- b) 涂装设备和供漆系统：核查出漆是否稳定，是否存在闪枪或者流量不稳定现象
- c) 工装：检查工件重复定位精度；
- d) 材料批次与混配：核查批次差异、搅拌均匀性、混配比例与黏度温度漂移；

7.3.9.3 纠正措施

纠正措施应如下：

- a) 固化批次管理与混配控制，确保黏度温度与搅拌条件稳定；对批次切换应执行小样确认；
- b) 恢复未经授权修改的机器人程序；
- c) 更换故障的涂装设备或者供漆系统；
- d) 优化工装，改善工件的重复定位精度；

7.3.9.4 复验要求

应按统一工件对膜厚均匀性进行复验，确认波动来源已受控后方可固化版本。

8 过程监控稳定性评价与持续改进

8.1 总则

- 8.1.1 调试优化后的工艺应进入受控运行状态，通过关键变量监控、质量特性统计分析与变更管理，维持喷涂窗口内运行并防止参数漂移导致缺陷再发。
- 8.1.2 过程监控应遵循“关键少数”原则，优先对高敏感、易漂移、后果严重的变量实施在线监控或高频点检，对低敏感变量采用周期性抽检，形成成本与风险匹配的监控体系。
- 8.1.3 稳定性评价应覆盖质量稳定性、过程能力稳定性与设备系统稳定性三个方面，并以数据为依据形成周期性评价报告，作为持续改进与版本更新的输入。
- 8.1.4 所有过程监控稳定性评价第一优先评价的是安全相关参数，所有持续改进都以不降低或者提升安全性能作为底线。

8.2 关键变量监控与点检

- 8.2.1 关键变量应从表 1 所列参数中结合现场特点确定，并至少包含材料状态变量、喷涂参数变量、覆盖几何变量以及喷房系统变量。关键变量应明确监控方式、频次、责任岗位与超限处置。
- 8.2.2 监控方式宜按以下分层配置：
- a) 在线监控变量并实时报警：反馈电流值；
 - b) 在线监控变量：黏度温度、供漆压力、喷房压差风速、静电接地状态、高压输出状态等，可通过传感器与系统采集实现实时监视；
 - c) 高频点检变量：喷嘴磨损与喷幅宽度、雾化状态、过滤器压差、换色冲洗效果等，宜按班次或按规定节拍点检；
 - d) 周期抽检变量：机器人轨迹基准点复核、工具坐标复核、喷房洁净度评估、烘干曲线校验等，宜按周或按月实施。
- 8.2.3 点检应使用标准化表单并固化判定口径。点检记录应包含时间、责任人、测量值、判定结论、处置措施与复核结果，并与当班配方版本和程序版本关联。
- 8.2.4 对易漂移因素应设置预警阈值与停用阈值。预警阈值用于提示趋势异常并触发加密点检，停用阈值用于触发停线或暂停喷涂并启动纠正措施。

8.3 统计过程控制与稳定性判定

- 8.3.1 应选择关键质量特性实施统计过程控制。关键质量特性宜包括膜厚均值、膜厚均匀性指标、外观缺陷率、单位耗漆量或传递效率等。统计口径应固定，避免因抽样变化导致误判。
- 8.3.2 控制图工具可按数据类型选择。对连续型数据宜采用均值极差控制图或均值标准差控制图，对计数型缺陷宜采用计数控制图或不合格品率控制图。控制限的建立应基于稳定期数据并定期复核。
- 8.3.3 稳定性判定应至少包括：

- a) 过程是否处于统计受控状态，是否存在超控制限点、趋势点、周期性波动或突变；
- b) 波动来源是否与关键变量漂移相关，是否存在设备系统性故障或环境系统波动；
- c) 一次合格率与返工返修率是否稳定在目标区间；
- d) 材料利用率是否存在异常波动或持续恶化趋势。

8.3.4 当出现以下任一情况时，应判定过程稳定性下降并启动专项评估：

- a) 反馈电流值出现上升趋势或者比例斜率过高；
- b) 关键质量特性连续出现趋势性漂移或多点接近控制限；
- c) 同类缺陷在短周期内重复出现且无法通过常规点检解释；
- d) 关键变量超限频次显著上升或出现间歇性异常；
- e) 一次合格率明显下降或返工量异常增加；
- f) 批次间色差与光泽波动超出控制目标。

其中反馈电流值一旦出现上升趋势或者比例斜率过高由于影响设备安全性能，无需出现异常应当立刻启动专项评估。

8.3.5 有设备条件的现场应考虑利用 AI、MES 系统等新技术赋能，以便更高效准确的完成统计过程控制与稳定性判定等工作。

8.4 漂移识别与再校准触发

8.4.1 应建立漂移识别机制，识别对象至少包括喷嘴磨损导致的喷幅变化、黏度温度长期偏移、供漆压力缓慢漂移、喷房压差变化、静电接地状态劣化、机器人基准点漂移等。

8.4.2 漂移识别宜采用“指标联动”方法。例：当膜厚均值下降且单位耗漆量未下降时，应优先排查传递效率下降、接地异常或枪距漂移；当膜厚离散上升且喷房压差波动增大时，应优先排查气流组织变化与回弹再沉积。

8.4.3 再校准触发条件应文件化并与岗位职责绑定。典型触发条件包括：

- a) 涂装机器人静态或动态性能测试长期偏离正常值；
- b) 流量测试长期偏离正常值；
- c) 喷幅宽度偏离基线超过规定阈值或雾化状态异常；
- d) 关键基准点复核偏差超过规定阈值；
- e) 涂料黏度、电阻值、喷房温度、湿度、供漆压力或喷房压差连续超预警阈值；
- f) 静电接地电阻超限或高压输出不稳定；
- g) 对关键涂装设备进行了技术改造或者改动；
- h) 长期放假或其他原因导致的设备长期未使用；
- j) 模式切换或大修后首次投产前。

8.4.4 再校准应形成记录并与版本管理联动。再校准导致参数或轨迹变化的，应按变更管理执行并进

行必要的效果验证。

8.5 变更管理与版本运行控制

8.5.1 涂装工艺应实施配方版本与程序版本双版本管理。任何对关键参数、阈值、轨迹、触发逻辑、喷涂顺序、补喷策略的变更均应更新版本并记录变更原因、变更内容与验证结论。

8.5.2 变更应分级管理。对影响质量与安全的重大变更应开展试喷验证与批量确认；对一般变更可开展小范围验证后逐步放大。

8.5.3 版本发布应设置回滚机制。新版本上线应保留旧版本可用性，设定试运行周期并加密抽检；如出现不满足要求的情况，应立即回滚至上一个稳定版本并启动原因分析。

8.5.4 版本运行中应防止误调用。应通过系统权限、程序锁定、配方调用校验与作业指导书双人核对等措施，避免错误版本导致批量不合格。

8.6 持续改进机制

8.6.1 应建立例行评审机制。宜按周或按月开展过程评审，评审内容至少包括涂装系统安全性评估、关键质量特性趋势、缺陷结构变化、关键变量超限统计、设备故障与停机情况、材料利用率与节拍达成情况。

8.6.2 应建立缺陷知识库与经验沉淀机制。对7.4所列典型缺陷，应沉淀“现象—根因—措施—验证”模板，形成可复用的排查路径与参数建议，支持新产线移交与人员培训。

8.6.3 应建立工艺能力提升专项。对长期存在的薄弱项应组织专项改善，必要时通过夹具改造、旋杯或喷枪升级、视觉引导或闭环控制等方式提升系统能力。

8.6.4 持续改进应以数据闭环验证为前提。任何改进措施均应明确目标指标、验证方法与评估周期，验证通过后方可固化到控制计划与版本体系中。

8.7 记录与档案管理

8.7.1 过程监控记录应至少包含：关键变量点检记录、在线监控数据摘要、控制图与统计报表、缺陷统计与处置台账、版本发布与变更记录、再校准记录与复验记录。

8.7.2 记录保存期限应结合法规、客户要求与企业管理要求确定。对涉及重大质量事件或客户投诉的相关记录与数据，应按更高等级保存并确保可追溯。

8.7.3 归档资料应具备可复现性。对关键版本应保存配方参数清单、轨迹程序、工艺窗口说明、验收报告与稳定性验证数据，确保在需要时可复现当时工艺能力水平。

8.7.4 归档资料应优先采取电子化的存储方式，采取合适的存储方式和载体，将所有存续区域的参数统一备份，并且优先采取双备份的方式进行归档，以确保归档资料的安全性。