

# 小投入快速实现整车涂装产能提升的实践探索

潘永亮

广汽传祺汽车有限公司, 广东 广州 511434

DOI:10.61369/ERA.2025100025

**摘 要：** 针对传统整车涂装车间因工艺固化、设备瓶颈导致的产能提升依赖高投入改造的痛点，本文结合广汽传祺涂装车间的实践案例，提出“小投入、快产出”的产能提升策略。通过分析涂装车间标准日产能的核心制约因素（开动率、节拍），创新性提出四大改进措施：优化涂料匹配方式减少保洁损失、贴膜工艺替代喷涂释放瓶颈线体、工序间缓存调节降低空位损失、辅助设备效能提升压缩无效工时。实施后，单台保洁损失减少60%，喷涂工序开动率提升8%，整线开动率提升3%，总投资仅32万元，1个月内实现标准日产能提升8%。实践表明，通过精准识别工艺痛点与低成本技术组合，可突破传统涂装车间的产能天花板，为行业提供可复制的精益增产范式。

**关 键 词：** 整车涂装车间；小投入；快产出；产能提升

## Exploration of Capacity Improvement in Vehicle Painting Workshop with Low Investment in the short term

Pan Yongliang

GAC MOTOR CO., LTD., Guangzhou, Guangdong 511434

**Abstract：** Because of the equipment bottlenecks, most of the vehicle painting workshops rely on high-investment transformation to achieve capacity improvement. This paper, based on the case of GAC painting workshop, proposes a "low investment, quick output" strategy for capacity improvement. By analyzing the core constraints (for example, operating rate and takt time), it innovatively introduces four improvement measures. After the implementation, the cleaning loss decreases by 60%, the operating rate of the spraying process increases by 8%, the overall line operating rate increases by 3%. The total investment takes only 320,000 RMB, to achieve an 8% improvement in standard capacity within one month. It shows that, by precisely identifying pain points and integrating low-cost technologies, the capacity ceiling of traditional painting workshops can be broken through. It provides a replicable paradigm of lean production.

**Keywords：** vehicle painting workshop; low investment; quick output; capacity improvement

## 引言

### （一）研究背景

在汽车市场“多品种、小批量、快响应”的竞争环境下，涂装车间作为整车制造链承上启下的重要一环，其产能柔性程度直接影响企业对市场需求变化的适应能力。然而，传统涂装车间的产能体制具有强路径依赖性：

（1）工艺固化：涂装车间投产伊始，即已代表所选取的工艺定型，生产组织模式将一直沿袭该工艺所需条件进行推进，后续将很难变更。因此，工艺所独有的涂料特性、设备特性、环境特性、品质特性会对产能提升形成隐性瓶颈。

（2）空间约束：涂装车间厂房结构固定（如喷房长度、烘房跨度），难以通过扩建快速提升产能，某自主品牌涂装车间曾因扩建需求停工半年，直接损失产能3.5万辆。

（3）改造成本高：传统产能升级需进行大规模的主体设备改造（如喷涂机器人、喷房、烘房），单次投资超千万元，周期长达6-12个月。某德系车企涂装线改造项目中，仅机器人系统升级就耗资8700万元。

这种“高投入、长周期”的增产模式与精益生产的核心理念相悖，更难以支撑车企应对市场需求波动的灵活性，一旦错过市场窗口期，高投入的产能将被放空，反而不利于企业的可持续发展。因此，探索一条“小投入、快产出”的产能提升路径具有重要现实意义。

(二) 产能计算模型的核心要素

涂装车间标准日产能（台/日）的计算公式为：标准日产能（台）= 标准生产时间（min）× 开动率 / 单台节拍（min/台）。其中：标准生产时间由工厂班制决定（如2班 × 8h=16h），短期内不作调整。开动率受停机损失、保洁损失、空位损失等因素影响。单台节拍由工艺复杂度与设备效率决定。这里，本文聚焦的是标准日产能，是生产体制本身的提升，不涉及加班延长生产时间的安排。因此，提升开动率与压缩单台节拍是突破产能瓶颈的关键主攻方向。

一、产能提升的核心措施

(一) 措施一：优化涂料匹配方式，削减保洁损失

问题背景：在传统涂装工艺开发中，涂料选型往往陷入“性能孤岛”困境：研发端过度聚焦涂料的终端性能（如防腐性、附着力），却忽视其与涂装设备的兼容性。以本案为例，线体工艺采用的是B1B2工艺，开发初期选用深灰BC1涂料作为底色漆，仅验证了其遮盖力和施工窗口，却未系统评估其对喷涂设备的潜在危害。

根据微观机理分析，深灰BC1主体成分为粒径20-30nm的碳粉颗粒。由于碳粉表面极性极强、粒径小，在雾化过程中易通过静电吸附，在雾化器表面形成“桥接效应”，导致污染速率呈指数级增长，使设备频繁脏污，反而成为品质不良的源头，不得不依赖人工定时保洁。据统计，某车型生产初期每25台即需空位7台进行人工保洁，保洁损失占总停线时间的35%。

技术方案：

(1) 颜料体系重构：将主体颜料由碳粉替换为钛白粉，其多孔片状结构可形成“机械锁合”效应，降低颗粒迁移速率<sup>[1]</sup>。同时通过粒度级配技术，将钛白颗粒粒径控制在100-300nm区间，使涂料雾化后的颗粒分布更接近正态分布<sup>[2]</sup>。体系重构后的涂料色相与深灰BC1略有差异，我们称之为浅灰BC1，如表1所示。

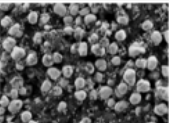



BC1	深灰BC1	浅灰BC1
碳粉含量	3.5%	<1.2%
钛白含量	0	>33.5%
主体颜料	碳粉	钛白
结构	微粒	多孔片状结构
电子显微图		
粒径	20-30nm	100-300nm
污染能力	强	弱
生产相同台数污染图示		

表1：深灰BC1与浅灰BC1对比表

(2) 涂层匹配调整：对匹配的BC2涂料进行色相的适配性微调，以吸收浅灰BC1应用所产生的色相变化。同时对关键喷涂参

数进行优化，确保浅灰BC1的遮盖性与深灰BC1一致。

实施效果：

(1) 保洁损失削减：机器人雾化器保洁周期从1次/25台延长至1次/60台，保洁损失减少60%，开动率提升5%。

(2) 质量提升：大幅削减完成车的颗粒不良件数，据统计，完成车的颗粒不良数由深灰BC1的20件/台削减至浅灰BC1的12件/台，减少后工序打磨抛光工时，使后工序开动率提升2%。

(二) 措施二：贴膜工艺替代喷涂，释放瓶颈线体产能

问题背景：随着车身喷涂面积的不断增加，喷涂线体逐渐成为涂装车间的产能瓶颈。尤其是四门窗框部位，因结构复杂（棱角多、曲面深），导致喷涂路径长（单个窗框喷涂路径长达1.8m）、涂装效率低（需反复喷涂3次），形成效率悖论<sup>[3]</sup>，制约着线体的开动率提升。以某车型为例，四门窗框喷涂占喷涂总作业工时的18%以上，喷涂机器人的设备负荷率已经高达99%，但仍无法满足工时需求，需要间歇停线对应，每日停线累计18min。

技术方案：突破“涂装=喷涂”的固有思维，采用贴膜工艺替代窗框喷涂。

(1) 材料体系创新：贴膜材料选用黑色的PVC薄膜（厚度0.1mm），具备较佳物理特性（拉伸强度>15MPa，延伸率>30%），且表面微孔直径精确控制在5-8μm，能与车漆形成分子级咬合<sup>[4]</sup>。同时该材料具备与汽车原漆相当的耐老化性、耐腐蚀性、耐磨性等关键机能。

(2) 工艺路径重构：将该工序外移至非喷涂岗位，释放喷涂线体这一瓶颈工序工时。同时设计柔性定位工装，并结合窗框曲面数据设计专用型面贴膜，生成最佳贴膜路径，确保贴膜后的成品窗框具备较好商品性。

实施效果：

(1) 产能跃升：四门窗框喷涂工序时间占比从18%降至3%（保留少量交接位置的喷涂），完全消除喷涂线体的间歇停线时间，削减每日停线损失18min，开动率提升3%，使喷涂线体一直保持高效运转状态。

(2) 质量跨越：四门窗框的漆膜外观合格率由92%提升至99%，同时该贴膜与原漆搭配形成较好的商品性，大幅提升产品高级感。

(三) 措施三：调节工序间缓存，降低空位损失

问题背景：涂装车间由手工线（如电泳打磨线）、自动线（如前处理电泳线）组成，在产能提升过程中，通过价值流图（VSM）分析发现，涂装车间存在典型的“自动线-手工线”速率失配现象<sup>[5]</sup>：前处理电泳自动线节拍：80 s/台（受工艺参数刚性

约束，涉及防锈机能的前处理电泳线，其节拍时间直接决定电泳涂层的机能性，不能变动。而电泳打磨手工线节拍：71 s/台（通过岗位重组可由80秒/台提速至71秒/台），与自动线存在节拍差，每日因此产生的空位时间：21min。

技术方案：基于工业工程“生产线平衡”理论，结合自动线开动率（99.5%）与手工线开动率（98%）的差异，运用工业工程“时空分离”原理，构建动态缓存调节机制<sup>[3]</sup>：

（1）时间维度优化：实施“错峰生产”策略：在手工线午饭（0.75 h）和晚饭（0.75 h）时段，维持自动线满负荷运行，将富余产能转化为缓存储备<sup>[6]</sup>。开发“节拍平滑算法”：通过MES系统动态调整手工线停线时点，减少对自动线的冲击<sup>[7]</sup>。

（2）空间维度重构：在电泳存储区的垂直面创造空间，增加少量流动数（约10台缓存位置），实现缓存区本质扩容。

（3）智能管控系统：活用RFID车辆跟踪系统，实时监控缓存区状态（占用率、停留时间）。

实施效果：前处理电泳—电泳打磨工序间空位损失完全消除，节拍时间缩减9%，由80 s/台缩短至71 s/台，同时实现整线开动率提升3%，大幅减少设备空运转能耗。

**（四）措施四：提升辅助设备效能，压缩无效工时**

**1. 子措施1：导入静电吸附工装，减少机器人无效作业**

问题背景：机器人喷涂白车身边缘部位（如前翼子板边缘、油箱盖边缘）时，因曲率突变导致局部电场畸变，带电油漆粒子在库仑力作用下发生“边缘效应”：（1）物理现象：因静电吸附作用，油漆粒子速度矢量发生偏转，易在部件边缘堆积，形成“粒子堆积层”（厚度达0.5mm），成为品质不良。（2）效率损失：为了避免上述不良，机器人需降低喷涂速度，削减吐出量，并额外增加3次姿态调整（单次耗时1.4秒），导致无效工时占比达6%，有效工时不足，不得不以间歇停线对应。

技术方案：借鉴避雷针“尖端放电”原理设计复合式静电吸附工装<sup>[8]</sup>。结构设计上采用Φ8mm金属绕制环形工装，如图1所示。通过卡扣方式与白车身前翼子板/油箱盖快速对接（装配时间<10s）。同时进行工艺参数优化，建立静电场仿真模型，确定最佳电极间距和电压梯度，当雾化器进行静电喷涂时，多余的带电油漆粒子会被吸附在工装表面，而使白车身边缘部位本身的漆膜均匀附着。

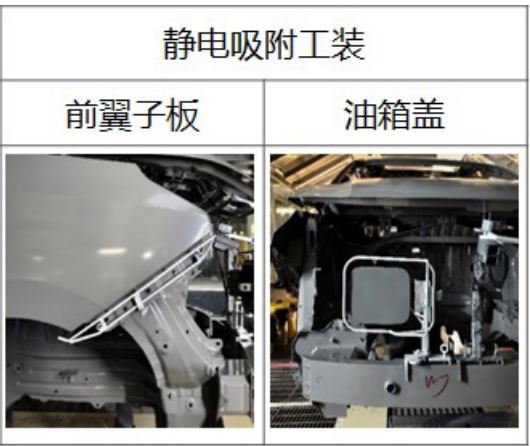


图1 静电吸附工装安装示意图

实施效果：机器人无效工时减少75%（单台减少3s），间歇停线消除。

**2. 子措施2：提升溶剂清洗能力，缩减换色时间**

问题背景：机器人作业时需定期使用溶剂清洗旋杯、管路（同色清洗8s/次，换色清洗12s/次），占总作业时间的18%<sup>[9]</sup>。该清洗时间很大程度上与溶剂清洗能力密切相关。在业界，传统提升清洗能力的方法有多种途径，比如增加溶剂配比浓度、更换大流量泵等，但这些措施成本高，周期长，难以快速落地。

技术方案：通过热力学—流体力学协同优化实现清洗能力跃升。

（1）溶剂加热温度优化：在现有“管中管水浴加热”系统基础上，将溶剂的预热温度提升20℃（安全阈值内）<sup>[10]</sup>。同时优化PID控制模式，温度控制精度±0.5℃，响应时间<10s。

（2）流场重构设计：将清洗系统的直管段改造为螺旋扰流管（螺旋角θ=15°），使雷诺数提升至湍流状态。同时对清洗系统增加文丘里喷嘴（喉管直径φ12mm），产生负压抽吸效应，使清洗压力波动率<3%。

实施效果：使溶剂对油漆的溶解度提升30%，清洗时间缩短至同色6s/次、换色9s/次，机器人无效作业时间削减25%，避免无效工时导致的停线。

**二、实施效果**

**（一）综合产能提升验证**

以广汽传祺某涂装车间为例，四大措施实施后：保洁损失减少60%，喷涂工序开动率提升5%，检查工序开动率提升2%；削减喷涂工序每日停线损失18min，开动率提升3%；工序间空位损失完全消除，前处理电泳—电泳打磨工序节拍时间缩减9%，同时实现整线开动率提升3%；机器人各类无效工时减少25%—75%，杜绝无效工时导致的停线。

上述一系列措施的投入成本相对较小（约32万元），却成功实现在1个月内将标准日产能提升8%，从而能够迅速应对市场需求，实现小投入，大产出。如果叠加延长生产时间的措施，其效益将成倍放大。这种模式不仅使产线快速具备柔性化生产空间；同时为产线创造进一步节能降耗的条件。

**（二）可复制性总结**

本方案聚焦“工艺微创新+管理优化+低成本技改”，无需更换主设备（如机器人、喷房、烘房），适用于当前主流涂装车间，来支撑市场快速响应需求。该方案具备如下特点：技术普适性——适用于所有采用B1B2工艺的涂装车间，已成功推广至3家同行车企；经济可行性——总投资仅32万元，约为传统改造的1/120，投资回收期≤0.2年；管理兼容性——与现有TPM、精益生产体系无缝衔接。

**三、结论与展望**

针对涂装车间“高投入改造”的传统增产模式，本文提出

“小投入、快产出”的产能提升策略，通过四大措施，在广汽传祺取得显著成效。主要贡献体现在三个方面：理论层面构建了“工艺-设备-管理”三位一体的产能提升模型；实践层面实现1个月内快速提产8%的业界少有的可观效益；方法论层面形成可复制的“诊断-设计-实施-控制”方法论体系。

本次实践表明，涂装车间产能提升的关键在于“精准识别工

艺痛点+低成本技术组合”，而非依赖大规模设备升级。未来将推动产能提升向“智能化、精准化”方向发展，可进一步研究方向包括：开发基于数字孪生的涂装车间仿真系统，探索 AI 算法在涂料匹配中的应用，探索涂装各工序流动数的智能数字化管理系统等。

### 参考文献

[1] 杜邦公司. 金红石型钛白粉技术白皮书 [R]. 威尔明顿：杜邦化学，2020.

[2] 张志强，等. 涂料粒度分布对雾化效果的影响 [J]. 材料工程，2022，50(3)：112-117.

[3] 王恒. 汽车涂装线平衡优化研究 [D]. 武汉：华中科技大学，2020.

[4] 3M 公司. 改性 PVC 薄膜技术参数表 [Z]. 圣保罗：3M 中国，2022.

[5] 丰田生产方式研究会. 价值流图（VSM）应用指南 [M]. 北京：机械工业出版社，2019.

[6] 丰田自动织机. 错峰生产调度策略手册 [R]. 爱知：丰田自动织机，2020.

[7] SAP. MES 系统动态排产功能说明 [Z]. 沃尔夫斯堡：SAP，2021.

[8] 刘源张. 静电屏蔽技术及其应用 [M]. 北京：科学出版社，2017.

[9] 中国汽车工程学会. 汽车涂装工艺能耗统计指南 [S]. 北京：机械工业出版社，2023.

[10] 国家标准化管理委员会. 水浴加热系统安全规范：GB/T 12345-2020[S]. 北京：中国标准出版社，2020.