



ENGINEERING RESEARCH REPORT · 工程研究报告

# 大型汽车钣金件搬运中的夹持力、变形与 外观保护研究

面向汽车行业助力搬运与非标夹具的公开资料研究、工程推导与验证方法

文件编号 AUREK-RC-AR-037

版本 V1.0

发布日期 2026-07-13

发布单位 江苏安睿克智能科技有限公司

研究与验证方法文件 · 非产品认证 / 非客户验收证明

## 报告结构

### 00 执行摘要

01 研究范围、对象与证据边界

02 失效机理与控制变量

03 夹持力与布局的联合设计方法

04 外观保护与污染控制

05 仿真、台架与真实样件验证

06 FMEA 与故障控制

07 工程实施与验收资料包

08 结论与适用限制

参考文献

**研究边界** 正文中的标准、论文与供应商资料用于支持方法框架；示例计算均带有假设。项目应用必须补充真实工件、夹具、动作曲线、风险评估与原始测试证据。

**研究边界** 文档属性：公开资料研究与工程设计方法。本文不包含特定客户项目的合格试验结果；示例参数仅用于说明计算路径，不能替代真实样件试验、风险评估与项目验收。

## 00 执行摘要

大型车身外覆盖件兼具大尺寸、薄壁、低局部刚度和高外观要求。搬运系统即使具备足够的总提升力，仍可能因为吸盘局部深拉、支点跨度过大、油膜降低切向摩擦、加减速引发边缘振动，或接触材料污染漆前表面而失效。公开研究表明，柔性钣金搬运必须把工件视作受运动边界条件驱动的柔性体，而非刚体；吸盘的非线性刚度、密封唇预压与真空载荷也会改变局部变形[1][2]。

本研究提出“承载安全、形状稳定、外观可接受”三目标设计框架。承载安全用法向吸附裕量和切向抗滑裕量校核；形状稳定用板壳刚度、吸点跨度、局部负压与动态加速度共同评价；外观保护则通过允许接触区、吸盘材料、清洁度、接触时间和复检条件闭环。工程上不应先选吸盘数量再寻找位置，而应先建立零件族参数矩阵和禁限区，再用吸点布局优化、动态轨迹降载与真实样件验证共同收敛。

### 核心结论

- 总吸附力合格不等于搬运可靠；竖直或倾斜姿态往往由切向摩擦和抗剥离能力控制。
- 薄板局部刚度随厚度立方增长，厚度、加强筋和吸点跨度的影响远大于单纯增加真空度。
- 带内支撑或防深拉结构的吸盘可减少局部鼓包；对油板还需专门的高摩擦纹理与滑移验证[3][4]。
- 外观保护必须以“规定光照、规定清洁状态、规定等待时间”的样件检查判定，不能只凭吸盘材质名称推断。
- 最终放行对象应是“零件版本—吸盘版本—真空阈值—动作配方—检验规则”的完整组合，而不是孤立夹具。

## 01 研究范围、对象与证据边界

研究对象包括外门板、发动机罩外板、顶盖、侧围、翼子板、尾门外板等大型冲压件，以及焊装前后带局部加强结构的薄壁件。搬运方式以真空吸附为主，同时讨论软质机械限位、托边和混合

夹持。研究覆盖取件、离模/离架、平移、旋转、短时保持和落位，不覆盖冲压模具本体强度、产品服役碰撞性能或涂装配方认证。

证据分为四层：第一层为 ISO 12100、ISO 4414 等机械与气动系统安全原则[5][6]；第二层为柔性钣金和真空夹持的动力学、有限元和控制研究[1][2]；第三层为汽车钣金吸盘供应商公开技术资料，用于识别工业常见结构和使用边界[3][4]；第四层为本文的工程推导与示例计算。第四层只用于建立项目方法，不能反向证明某具体产品或夹具已经通过验证。

| 研究变量  | 建议最小数据集                | 典型失真后果       |
|-------|------------------------|--------------|
| 零件几何  | CAD 版本、厚度、曲率、翻边、加强筋、孔洞 | 吸盘跨筋、局部悬空、剥离 |
| 材料与状态 | 材料牌号、屈服强度、表面油量、温度、保护膜  | 永久变形、滑移、污染   |
| 质量属性  | 质量、重心、惯量、来料偏差          | 偏载、摆动、制动过载   |
| 允许接触区 | 可吸区、禁吸区、外观 A 面、密封胶/焊点区 | 印痕、压伤、后工序缺陷  |
| 动作边界  | 姿态、速度、加速度、急停、路径包络      | 边缘振动、干涉、脱落   |

## 02 失效机理与控制变量

### 02.1 法向失效：密封破坏与剥离

理想吸附力来自压差与有效面积之积，但真实吸盘会受密封唇变形、表面曲率、油膜、灰尘、沟槽和偏载影响。尤其当夹具姿态改变时，合力作用线偏离吸盘几何中心，会在一侧密封唇产生剥离趋势。剥离不是简单的“总力不足”，而是局部接触边缘先失稳，因此需要控制吸盘局部法向、安装角度和结构柔顺性。

$$F_{N,usable} = (\Delta p \cdot \Sigma A_{eff} \cdot \eta_{seal}) / S_N$$

式中， $\Delta p$  为经验证的最低工作压差， $A_{eff}$  为各吸盘有效面积， $\eta_{seal}$  为曲率、污染、制造离散和管路损失的综合折减， $S_N$  为项目安全系数。所有量均应采用最不利而非名义值。

## 02.2 切向失效：油膜、加速度与滑移

在钣金接近竖直时，负载主要通过吸盘与板件之间的切向摩擦传递。油膜会显著改变摩擦条件，普通吸盘的台架摩擦系数不能直接套用。供应商公开资料普遍采用纹理或摩擦结构来提升油板切向能力，并强调动态搬运需要专用结构[3][4]。工程验证应同时记录真空、切向位移和运动加速度，识别“真空正常但工件已滑移”的故障。

$$F_{T,demand} = m \cdot |g_t + a_t| + F_{disturbance}$$

$$F_{T,capacity} = \Sigma(\mu_{i,min} \cdot N_i) / S_T$$

若  $F_{T,capacity}$  小于  $F_{T,demand}$ ，应优先降低轨迹加速度、改变姿态、增设防滑支承或更换吸盘结构，而不是仅提高真空度。提高真空度会同步增加局部面压，可能恶化薄板印痕与深拉。

## 02.3 形状失效：局部深拉、整体挠曲与边缘振动

薄板抗弯刚度可用板壳弯曲刚度近似表示：

$$D = E \cdot t^3 / [12 \cdot (1 - \nu^2)]$$

在材料和边界相近时，厚度减半会使弯曲刚度降为约八分之一。局部吸盘负压、吸点间距和自由边长度因此可能主导变形。对相似板件，可用  $w \propto qL^4/D$  作为趋势判断：跨度  $L$  的四次方效应说明“吸点布局”和“支承跨度”通常比继续增加吸力更有效。该比例不能替代复杂曲面、翻边和加强筋条件下的有限元分析。

# 03 夹持力与布局的联合设计方法

设计应从最不利工况集合开始：最大质量不一定最危险，重心偏移最大、油膜最厚、局部曲率最小、可吸区最少或急停方向最不利的组合可能更关键。建议把全部工况编码为场景集  $G=\{\text{零件版本、姿态、温度、表面、动作段、异常状态}\}$ ，对每个场景分别校核。

## 03.1 示例计算（仅用于说明方法）

假设某外覆盖件质量 24 kg，采用 6 个直径 80 mm 吸盘，最低验证压差 60 kPa，密封与离散折减  $\eta_{seal}=0.75$ ，法向安全系数  $S_N=2.5$ 。理论总压差力约为 1.81 kN，折减并除以安全系数后的可用法向承载约为 0.54 kN，高于静态重力 0.235 kN。

但若工件竖直、油膜条件下验证得到最低摩擦系数仅 0.20，并采用切向安全系数 2.0，则保守切向能力约为 0.136 kN，低于静态重力，方案不成立。这个例子说明，同一组吸盘可能在水平提升中

合格，却在竖直翻转中因切向滑移失败。改进方向包括提高经验证的摩擦能力、增加几何托承、减少竖直段加速度或改变吸点位置。

**研究边界** 示例参数不是安睿克产品额定值，也不是项目推荐值。吸盘有效面积、最低真空、摩擦系数和安全系数必须依据具体产品数据、风险评估和真实样件测试确定。

03.2 布局规则

- 吸点尽量围绕重心形成多边形，避免全部集中在一条窄带内。
- 优先靠近局部高刚度区，但不得跨越尖锐筋、孔洞、焊点或禁触区。
- 每个吸盘中心轴尽量对准局部法向；高度补偿元件只补偿制造和来料偏差，不用于强行压平工件。
- 对长自由边和大悬伸区增加支撑或缩短跨度，避免用更高真空“拉住”振动边缘。
- 将真空分区，使单点密封异常不立即拖垮全部回路，同时避免分区后单区能力不足。

04 外观保护与污染控制

外观保护不是单一的“无痕吸盘”选型。吸盘材料、硬度、表面纹理、接触滑移、吸附时间、温度、油品、清洁剂、粉尘和重复使用次数都会影响印痕与污染。对漆前外覆盖件，还要关注硅类或其他可能影响涂装的物质；任何材料相容性声明应由供应商文件和客户工艺批准共同支持。

| 风险   | 形成机制             | 设计控制                  | 验证证据              |
|------|------------------|-----------------------|-------------------|
| 环形印痕 | 局部面压、密封唇滑移、长时间保持 | 限制真空与接触时间、优化支撑、选择适配材料 | 规定光照下外观检查、轮廓或成像记录 |
| 划伤   | 吸盘或手套夹带硬颗粒       | 清洁分级、封闭存放、换班点检        | 清洁记录与放大检查         |
| 油膜迁移 | 接触件携油跨区域转移       | 工装分区、定向清洁、禁混用         | 表面洁净度或后工序确认       |
| 局部凹陷 | 吸盘腔深拉或支撑点集中      | 内支撑、增大支承面积、降低跨度       | 三维扫描/检具对比         |

| 风险   | 形成机制       | 设计控制         | 验证证据        |
|------|------------|--------------|-------------|
| 涂装污染 | 材料析出或清洁剂残留 | 材料批准、化学相容性验证 | 客户工艺认可或专项试验 |

外观检查应定义观察面、照度、角度、距离、等待时间和清洁方法。吸盘刚移除时出现的可恢复痕迹与永久变形应分开判定。没有统一条件的“目视无痕”结论缺乏可重复性。

## 05 仿真、台架与真实样件验证

建议采用三级验证。第一级为解析校核和容差分析，用于淘汰明显不满足的方案；第二级为有限元或数字样机，识别薄板挠曲、局部压痕、吸点载荷分配和轨迹包络；第三级为真实样件试验，确认密封、滑移、变形与外观。仿真无法可靠覆盖表面油量、粉尘、吸盘磨损和清洁状态，因此不能替代实物测试。

| 验证项目 | 输入条件        | 建议测量           | 合格逻辑            |
|------|-------------|----------------|-----------------|
| 吸附建立 | 曲率与来料偏差组合   | 各区真空建立时间、贴合状态  | 每区达到项目阈值后才允许提升  |
| 静态保持 | 最低真空、最长停留   | 压力衰减、位移、外观     | 规定时间内不越过警戒阈值    |
| 动态搬运 | 最大速度、加速度、急停 | 加速度、真空、滑移、边缘振幅 | 不脱落、不超位移、不越形变限值 |
| 单点故障 | 单吸盘泄漏或遮断    | 分区压力、控制响应      | 进入保守状态且有安全落位余量  |
| 外观复检 | 温度、油量、重复次数  | 光学检查、三维对比      | 满足客户外观与尺寸规则     |
| 耐久   | 代表性循环与清洁周期  | 吸盘磨损、真空趋势、换件点  | 趋势可监测且维护周期可执行   |

动态试验必须覆盖起动、制动、转向、翻转中间姿态和异常停止。仅做“吊起后静置”不能代表生产轨迹。若工件会从水平变为竖直，应分别验证法向承载、切向抗滑和剥离最不利姿态。

## 06 FMEA 与故障控制

| 失效模式 | 主要后果 | 现有/建议控制 | 验证方法 |
|------|------|---------|------|
|------|------|---------|------|

| 失效模式    | 主要后果       | 现有/建议控制         | 验证方法         |
|---------|------------|-----------------|--------------|
| 单吸盘密封失效 | 载荷重分配、剥离扩展 | 真空分区、止回、单区监测    | 故障注入与保持时间测试  |
| 油膜导致滑移  | 定位偏差或坠落    | 高摩擦结构、托承、轨迹限加速度 | 最不利油量动态试验    |
| 吸盘跨筋/孔  | 真空建立慢或假吸   | CAD 禁限区、视觉/到位确认 | 多版本样件检查      |
| 薄板深拉    | 外观凹陷、尺寸超差  | 内支撑、降低局部压差、缩短跨度 | 三维扫描与检具检查    |
| 吸盘磨损    | 泄漏上升、印痕变化  | 寿命计数、趋势监测、点检标准  | 耐久后复测        |
| 型号配方错误  | 吸点落入禁区     | 零件识别、夹具/配方一致性联锁 | 错配故障注入       |
| 误释放     | 工件坠落或磕碰    | 受托确认、双条件释放、控制验证 | 在非落位状态发出释放命令 |

FMEA 排序不应只依赖主观 RPN。对可能造成坠落、人身伤害或重大产品损失的失效，即使发生概率估计较低，也应优先采用本质安全、几何承托、能量保持和防误释放措施。控制系统安全功能的性能等级应由项目风险评估确定，而不是由本文直接指定[5][7]。

## 07 工程实施与验收资料包

推荐将项目分为数据冻结、概念评审、样件试验、设计冻结、FAT、现场 SAT 和量产监控七个节点。每个节点都要保持零件版本、夹具版本和动作配方可追溯。任何板厚、材料、冲压工艺、油品、加强筋或外观标准变化，都应触发影响评估。

### 最低交付证据

- 零件族参数矩阵、允许接触区与禁限区图。
- 载荷工况表、吸附与抗滑计算书、假设与折减来源。
- 吸点布局图、真空分区图、管路与传感器清单。

- 轨迹速度/加速度边界、急停和失压状态定义。
- 真实样件试验原始数据、照片、三维或检具报告。
- FMEA、风险评估、控制逻辑、维护和复位说明。
- 首件、换型、清洁、吸盘更换与异常放行记录模板。

## 08 结论与适用限制

大型汽车钣金件搬运的本质，是在柔性工件、动态载荷和高外观要求之间寻找可验证的平衡。可靠方案应同时满足法向吸附、切向抗滑、局部剥离、整体挠曲、外观与污染控制，并通过最不利样件和真实轨迹验证。若只证明“总吸力大于重量”，仍不足以支持工程放行。

本文方法适合方案设计、技术协议、验证计划和设计评审，不构成产品认证、第三方型式试验或客户验收证明。具体项目必须由具备相应能力的机械、电气、安全和质量人员结合现行法规、标准、供应商数据和客户规范完成最终确认。

## 参考文献

1. Liao, Y. G. Non-linear and explicit finite element analysis in dynamic responses of handling sheet-metal parts. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B, 2007. <https://doi.org/10.1243/09544054JEM768>
2. Modelling for Control of Vacuum Grippers in Automatically Reconfigurable Fixturing Systems for Thin-walled Workpieces. Procedia CIRP 115, 2022, 226-231. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2022.10.078>
3. J. Schmalz GmbH. Flat Suction Cups SAF / suction cups for handling sheet metal. <https://www.schmalz.com/en/vacuum-technology-for-automation/vacuum-components/vacuum-suction-cups/suction-cups-for-handling-sheet-metal/flat-suction-cups-saf-303827>
4. Piab. Automotive suction cups for press shop and body assembly. [https://www.piab.com/globalassets/documents/document-centre/brochures/us-auto/0232753\\_rev00\\_en-us\\_brochure\\_pacups.pdf](https://www.piab.com/globalassets/documents/document-centre/brochures/us-auto/0232753_rev00_en-us_brochure_pacups.pdf)
5. ISO 12100:2010. Safety of machinery - General principles for design - Risk assessment and risk reduction. <https://www.iso.org/standard/51528.html>
6. ISO 4414:2010. Pneumatic fluid power - General rules and safety requirements for systems and their components. <https://www.iso.org/standard/44790.html>
7. ISO 13849-1:2023. Safety of machinery - Safety-related parts of control systems - Part 1: General principles for design. <https://www.iso.org/standard/73481.html>
8. ISO/TR 20218-1:2018. Robotics - Safety design for industrial robot systems - Part 1: End-effectors. <https://www.iso.org/standard/69488.html>