



ENGINEERING RESEARCH REPORT · 工程研究报告

曲面汽车玻璃真空吸附可靠性与动态翻转研究

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-038

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 研究对象与适用边界

02 曲面密封与吸附承载模型

03 吸盘布局与真空架构

04 动态翻转与操作者控制

05 玻璃表面、边缘与附件保护

06 验证矩阵与故障注入

07 FMEA 与控制状态机

08 实施资料与结论

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验证方法。本文不宣称任何具体夹具、玻璃型号或生产线已通过试验；示例参数与判据需由真实样件和项目风险评估重新确认。

00 执行摘要

挡风玻璃、后窗、侧窗和全景天幕具有气密表面，通常适合真空搬运，但其曲率、层合结构、丝印/镀膜、边缘脆弱性和动态翻转使可靠性问题显著不同于平板玻璃。吸盘能否形成稳定密封，不仅取决于压差和面积，还取决于吸盘与局部曲面的接触几何、预压、弯曲和密封唇载荷分布。

IEEE 的吸盘建模研究把轴向压缩与弯曲力分开，并通过曲面试验验证了承载预测思路[1]；工业资料则强调柔性密封唇、波纹补偿、限定支撑面和低印痕材料在汽车玻璃中的作用[2][3]。

动态翻转会让负载在法向、切向和力矩之间持续转换。一个在初始竖直姿态真空稳定的夹具，可能在 45° 中间姿态因组合重心偏心产生最大翻转力矩，也可能在水平姿态因玻璃挠曲和吸点载荷重分配而失效。因此，工程设计必须把“密封形成—保持—全角度翻转—定位—受托释放—异常落位”视作一个连续状态机。

核心结论

- 吸盘数量与总面积只是起点；局部曲率匹配、密封唇预压和吸盘中心轴对准局部法向是可靠吸附的先决条件。
- 动态翻转应按姿态角计算重力分量、偏心力矩、惯性力矩和制动需求，验证中要连续采集真空、角度、加速度与相对滑移。
- 真空系统应采用合理分区、止回/储能、低真空动作抑制和受托释放；保压时间必须来自泄漏曲线而非经验常数。
- 玻璃保护需同时控制边缘撞击、金属接近、吸盘印痕、化学指纹和清洁颗粒。
- 可靠性放行应覆盖曲率极限、表面状态、温度、保护膜、附件、来料偏差和吸盘磨损等组合。

01 研究对象与适用边界

研究对象为汽车安全玻璃及其装配前总成，包括夹层挡风玻璃、钢化侧窗/后窗、带丝印、镀膜、加热丝、包边、定位销、线束或摄像头支架的玻璃。GB 9656-2021 给出了机动车玻璃的安全技术规范[4]，ISO 3537:2015 则规定安全玻璃材料的机械试验方法[5]。这些产品标准并不直接给出搬运

夹具参数，但提醒设计者：玻璃是经安全性能定义的产品，夹具不应引入未经评估的划伤、崩边、局部损伤或涂层影响。

本文覆盖人工助力机械臂、机器人末端和专用翻转机构上的真空夹具，不覆盖玻璃制造炉内成形、整车碰撞性能或胶粘剂固化工艺。凡涉及客户外观、光学或涂层规范，应以客户最新技术条件为准。

数据类别	必要输入	对夹具设计的影响
玻璃几何	三维曲面、厚度、尺寸、局部曲率、边缘轮廓	吸盘类型、局部法向、布局与包络
质量属性	玻璃质量、附件质量、组合重心、惯量	提升能力、翻转轴与制动力矩
表面系统	丝印、镀膜、保护膜、油墨、清洁剂	允许吸附区、材料相容性与印痕
装配附件	包边、销、线束、支架、胶路	禁限区、夹具避让和释放路径
来料状态	料架角度、片间距、粘片、摆放偏差	接近顺序、吸附确认与分片动作

02 曲面密封与吸附承载模型

02.1 密封形成条件

曲面吸附的首个问题不是“能承受多少重量”，而是密封唇能否在有限预压下连续接触。吸盘中心轴与局部法向偏差过大，会使一侧密封唇过压、另一侧翘起；波纹和柔性连接可以补偿角度与高度差，但也会增加姿态柔顺和切向位移。吸盘模型研究表明，接触几何、轴向压缩与弯曲变形共同决定密封与承载[1]。

工程上可用以下约束筛选吸点：

- 吸盘有效密封直径范围内，玻璃曲率与吸盘允许曲率相容。
- 吸盘预压位移位于供应商建议窗口内，不以机械臂强压来补偿错误姿态。
- 密封唇完整避开丝印台阶、保护膜褶皱、孔洞和附件边界。
- 柔性支座行程能够吸收来料偏差，但到位后不会失去足够的抗摆稳定性。

02.2 法向、切向与组合载荷

$$F_{N,usable} = (\Delta p_{min} \cdot \Sigma A_{eff} \cdot \eta_{curve} \cdot \eta_{surface}) / S_N$$

其中 η_{curve} 表示曲率与姿态折减， $\eta_{surface}$ 表示表面、污染、温度和磨损折减。竖直玻璃的重力主要形成切向需求；在翻转过程中，法向和切向分量随角度变化。若 θ 定义为玻璃法向与竖直方向夹角，可按具体坐标系分解重力与惯性，并对每个离散姿态计算吸盘负载分配，而不是只在 0° 和 90° 端点校核。

$$F_{T,demand}(\theta) = m \cdot |g_T(\theta) + a_T(\theta)| + F_{route}(\theta)$$
$$M_{demand}(\theta) = mge \cdot \sin(\theta) + I\alpha + c\omega + M_{disturbance}$$

式中 e 为玻璃—夹具组合重心到翻转轴的偏心距， I 为转动惯量， α 和 ω 为角加速度与角速度， $c\omega$ 表示等效阻尼项。最大力矩未必出现在端点，必须用完整动作曲线检查。

03 吸盘布局与真空架构

吸盘应围绕组合重心形成稳定支承多边形，同时避开边缘、黑边丝印台阶、加热丝连接区、摄像头/传感器支架、包边与胶路。大尺寸玻璃还需控制吸盘间距，使玻璃局部挠曲和中部下垂处于产品允许范围。布局应兼顾装车视线：夹具结构不能遮挡关键定位点，也不能在接近车身时进入 A 柱、顶棚或仪表板碰撞区。

03.1 真空分区

合理分区的目标是限制单点泄漏传播并提高可诊断性，而不是简单把每个吸盘都独立。每个分区应拥有足够的剩余能力、适当的止回元件和可测的压力点；传感器位置要能代表吸盘侧状态，而非只测真空源出口。分区过多会增加阀件、管路和泄漏点，必须通过可靠性与维护性权衡。

层级	设计要点	失效时目标状态
真空产生	能覆盖建立时间与已知泄漏，具备运行监测	源能力不足时禁止新提升
分区与止回	单区故障不立即拖垮全部吸盘	保持、停止危险动作、报警
储能/容积	为受控落位提供时间，不替代机械安全措施	压力衰减可预测、可诊断

层级	设计要点	失效时目标状态
阈值监测	建立阈值、运行阈值和警戒阈值分开	越阈值时限制翻转/释放
释放回路	仅在玻璃受托和姿态允许时通气	任一条件不满足时拒绝释放

03.2 保压与泄漏曲线

理想气体公式不足以描述密封唇随载荷变化的真实泄漏。建议用真实玻璃测得 $\Delta p(t)$ 曲线，并在最不利表面、温度、吸盘磨损和姿态下确定从运行阈值下降到最低保持阈值的时间窗。若局部区间近似指数衰减，可用下式拟合时间常数 τ ，但判定仍应基于实测曲线包络。

$$\Delta p(t) \approx \Delta p_0 \cdot \exp(-t/\tau)$$

04 动态翻转与操作者控制

翻转轴应尽量接近组合重心，以降低操作者力和制动负担。完全重心平衡并非总是最优：需要保留可控的方向感，同时避免玻璃自行翻转。旋转机构应有可验证的制动/锁止能力和受控释放，软管和线缆必须在全角度范围内无拉扯、折弯和勾挂。

04.1 示例力矩（仅说明方法）

假设玻璃与夹具组合质量 40 kg，组合重心到翻转轴偏心距 0.08 m，则重力偏心力矩峰值约 31.4 N·m。若最大惯性力矩估算为 8 N·m，另计摩擦离散和外部扰动，则制动、锁止和操作者允许力应在风险评估基础上采用附加裕量设计。这里的 40 kg、0.08 m 和 8 N·m 均为示例假设，不代表任何产品额定值。

动态试验应设置慢速探索轨迹和生产轨迹两层。先以低能量确认密封、包络和管线，再逐步增加速度与加速度；每次变更只改变一个主变量，并保留数据版本。直接以生产速度试错会放大玻璃损伤和坠落风险。

05 玻璃表面、边缘与附件保护

Schmalz 的汽车玻璃资料指出，吸盘印痕与结构、材料以及密封唇在玻璃表面的相对运动有关，污染颗粒会放大痕迹风险[2]。因此，“低印痕材料”不是免检条件。每种玻璃、表面、清洁剂、接触时间与温度组合都应完成样件确认。

风险	机制	控制措施	检查方式
吸盘印痕	材料迁移、滑移、局部面压	指定材料、限制滑移与接触时间	规定照明/角度下检查
划伤	砂粒、金属接近、脏手套	清洁分级、软质隔离、封闭存放	表面放大检查与缺陷图谱
崩边/微裂纹	边缘撞击、料架挂边、夹具干涉	边缘安全间隙、导向和低速离架	目视、专用检测或客户规则
附件受力	线束/支架被夹具挂住	三维禁限区、路径检查	全姿态包络验证
涂层/丝印影响	化学不相容或台阶密封不稳	允许吸附区、材料相容性试验	工艺批准与外观/功能复测

玻璃从料架分片时还存在粘片和突然分离风险。夹具需要确认单片离架，必要时采用受控小行程、片间传感或辅助分片措施。不得依靠快速拉离来克服粘片。

06 验证矩阵与故障注入

验证场景	变量组合	记录信号	主要判据
曲率极限	最小/最大曲率、来料偏差	各区真空、预压位移	全部关键区稳定建立
表面边界	清洁、规定污染、保护膜、温度	建立时间、衰减、印痕	不越阈值且表面可接受

验证场景	变量组合	记录信号	主要判据
全角翻转	0°至目标角连续轨迹	角度、速度、加速度、真空、滑移	无剥离、滑移或失控转动
急停/制动	最不利角度与速度	停止时间、峰值加速度、力矩	不坠落、不碰撞、可恢复
单区泄漏	受控开漏或封堵单吸盘	分区压力、控制状态	停止危险动作并保留落位时间
误释放命令	玻璃悬空/未受托	释放阀与状态反馈	命令被拒绝并报警
耐久后复测	代表性循环和清洁周期	泄漏趋势、材料磨损、印痕	维护阈值可检测、性能可保持

故障注入应从低能量、替代载荷和模拟信号开始，最后才在风险受控条件下使用真实玻璃。每项测试要定义注入位置、注入时间、系统预期状态、允许响应窗口、恢复条件和证据文件。故障注入的目的不是“证明永不失败”，而是确认单一故障或可预见组合故障不会直接导致危险释放。

07 FMEA 与控制状态机

失效模式	后果	检测/控制	安全恢复
吸盘未完全贴合	慢泄漏或起吊后剥离	分区建立时间与压力趋势	禁止离架，重新吸附
单区管路破裂	真空快速下降	止回、分区传感、阈值联锁	停止翻转，受控落位
角度传感异常	错误制动/释放许可	合理性校验、机械限位	锁止并人工诊断
制动器未锁	自行翻转、碰撞	锁止反馈、力矩/位置异常	限制运动，安全支撑
玻璃型号错误	吸点进入禁区或路径干涉	车型—夹具—配方一致性	禁止吸附/提升
释放阀粘连	意外进气	阀状态诊断、双条件释放	几何托承/分区保持
吸盘污染磨损	印痕、泄漏、划伤	清洁点检、寿命与趋势监控	更换后首件确认

推荐状态机包含：空载安全、接近、预压、真空建立、吸附确认、离架、运输、翻转、定位、受托确认、释放允许、释放完成和异常保持。任何传感矛盾、通信中断或阈值越界均进入“保持载荷、停止危险动作、禁止释放”的保守状态。恢复必须先消除故障并确认玻璃处于受托位置。

08 实施资料与结论

工程交付至少包括玻璃族参数矩阵、允许吸附区、局部法向与吸盘安装图、真空分区与阈值、翻转轴和力矩计算、轨迹包络、故障状态表、真实样件原始数据、表面检查规则、维护周期和异常落位说明。对多车型共线工位，还应把玻璃型号、夹具模块和控制配方做一致性联锁。

曲面汽车玻璃真空搬运的可靠性来自四个闭环：几何上真正密封、载荷上具有全姿态裕量、控制上可监测且不误释放、质量上不损伤表面和边缘。任何单点措施都不能替代完整验证。本文可作为设计评审和试验计划基础，但不构成产品认证、客户验收或第三方测试报告。

参考文献

1. Hudoklin, J. et al. Vacuum Suction Cup Modeling for Evaluation of Sealing and Real-Time Simulation. IEEE Robotics and Automation Letters, 2022. <https://doi.org/10.1109/LRA.2022.3145509>
2. J. Schmalz GmbH. Vacuum-Handling Systems / Suction Cups for Automotive Glass Handling. https://www.schmalz.com/site/binaries/content/assets/media/04_applications/industries/automotive/en/Vakuum-Handhabungssysteme_AMI_HS_2020_englisch.pdf
3. J. Schmalz GmbH. Bellows suction cup SAB HT1 for dynamic handling of automotive glass. <https://www.schmalz.com/en-us/products/vacuum-technology-for-automation-301607/vacuum-components-301608/vacuum-suction-cups-301609/suction-cups-for-handling-glass-305667/bellows-suction-cups-sab-ht1-15-folds-305668>
4. GB 9656-2021 机动车玻璃安全技术规范. <https://openstd.samr.gov.cn/bzgk/std/newGblInfo?hcno=9D70607A5C909E556DC2D140CE56FE3A>
5. ISO 3537:2015. Road vehicles - Safety glazing materials - Mechanical tests. <https://www.iso.org/standard/56215.html>
6. Novotny, F.; Horak, M. Computer modelling of suction cups used for window cleaning robot and automatic handling of glass sheets. MM Science Journal, 2009. https://doi.org/10.17973/MMSJ.2009_06_20090304
7. ISO 12100:2010. Safety of machinery - General principles for design - Risk assessment and risk reduction. <https://www.iso.org/standard/51528.html>
8. ISO 4414:2010. Pneumatic fluid power - General rules and safety requirements for systems and their components. <https://www.iso.org/standard/44790.html>
9. ISO/TR 20218-1:2018. Robotics - Safety design for industrial robot systems - Part 1: End-effectors. <https://www.iso.org/standard/69488.html>