



ENGINEERING RESEARCH REPORT · 工程研究报告

纸箱与透气工件真空吸附能力、泄漏补偿 与子系统工程放行研究

面向纸箱与透气表面的吸附承载、连续泄漏、动态安全与故障放行研究

文件编号 AUREK-RC-AR-043

版本 V1.0

发布日期 2026-08-15

发布单位 江苏安睿克智能科技有限公司

计算模型 · 试验矩阵 · 工程放行判据

报告结构

00 执行摘要

01 研究对象、系统范围与符号

02 透气、边缘密封与泄漏机理

03 吸附承载、摩擦与动态载荷模型

04 泄漏流量平衡与真空建立时间

05 分区、止回、限流与泄漏补偿架构

06 基准工况计算与唯一判定

07 单区故障、总失气与受控落位逻辑

08 测试矩阵、测量链与记录要求

09 FMEA 驱动的故障注入矩阵

10 FAT、SAT 与真空抓取子系统工程放行标准

11 工程控制与维护要求

12 研究结论

参考文献

判定规则 本报告采用明示输入与统一计算链，正式判定只有通过或不通过；任一硬门槛失败即不得放行。

00 执行摘要

纸箱、瓦楞板、袋装物和多孔复合材料不是理想气密工件。真空源抽走的气体同时来自管路容积、杯口密封间隙和材料孔隙；当进气量接近真空源在工作真空度下的有效抽吸流量时，系统会建立缓慢、压力波动，甚至永远达不到吸附许可阈值。因此，按光滑钢板的“压差乘面积”静态计算选型，会遗漏泄漏流量、建立时间、摩擦、偏心、动态加速度和局部失效。

GB/T 41098—2021《起重机 安全 起重吊具》目前为现行标准，并等同采用 ISO 17096:2015[1][2]。两者只用于起重机、葫芦及手控载荷操纵设备的非固定起重吊具；ISO 17096 明确排除气动部件危险，因此不能把它直接扩展为机器人末端执行器或气动回路的完整安全依据。GB/T 32293—2015 目前现行，只用于硬件真空设备泄漏 Q_H 的检漏方法选择，不用于给纸箱孔隙流 Q_P 或杯口过程进气 Q_E 出具标准符合性结论[3]。ISO 4414:2010 用于机械气动系统的设计、隔离、残余能量和维护，但其范围排除工厂供气系统、气瓶和储气罐[4]。

本报告形成“真空抓取子系统工程放行”。整机风险评估、承担安全功能的控制系统确认、机器人集成合规以及储气罐本体合规均为前置门；任一前置门没有正式记录，真空子系统即使通过本报告全部试验，也不得形成整机安全放行。本报告中的 2.5 载荷安全系数、1.5 流量储备系数、2.0 s 建立时限和四分区容错，为全文统一采用的工程基线。

统一研究基线

项目	本报告锁定值	通过条件
故障保持最低压差	$\Delta p_{min, LB} = 45 \text{ kPa}$	采用测量下界；故障至支撑转移期间每个健康分区均不低于该值
正常提升许可压差	$\Delta p_{pick, LB} = 50 \text{ kPa}$	每区连续 20 个 100 Hz 采样点均 $\geq 50 \text{ kPa}$ ，且窗口峰峰值 $\leq 2 \text{ kPa}$
载荷安全系数	$S_L = 2.5$	所有路径姿态、加速度和偏心下，容量/设计需求 ≥ 1.00
泄漏流量储备系数	$K_Q = 1.5$	用于 $Q_{S, LB}/Q_{L, UB}$ 的固定项目系数
流量保守判据	$Q_{S, LB}/Q_{L, UB} \geq 1.50$	源流量取下界，泄漏量取上界，且标准状态完全一致

项目	本报告锁定值	通过条件
真空建立时限	$t_{pick} \leq 2.0 \text{ s}$	从吸盘接触到全部分区达到 50 kPa 下界并稳定 200 ms
分区原则	4 个相互隔离分区	任意一个分区完全失效后仍满足载荷与力矩判据
备用建立	$t_1 - t_0 \leq 0.10 \text{ s}$	t_0 为主供能丧失, t_1 为四区发生器入口供气压力下界均 $\geq 0.40 \text{ MPa}$
故障确认	$t_2 - t_0 \leq 0.50 \text{ s}$	t_2 为控制系统确认并发出落位命令
受控落位	$t_3 - t_2 \leq 4.00 \text{ s}$	t_3 为载荷完成支撑转移; $t_{res} \geq 0.50 + 2 \times 4.00 = 8.50 \text{ s}$
样本验收规则	每个边界单元、FAT 与 SAT 独立零失效	任一失败即整项不通过, 整改后该整项从第一次重新执行

核心结论

- 真空吸附能力必须由“压差—有效面积—载荷方向—摩擦—力矩”联合计算；额定吸力或吸盘数量单独不能构成放行证据。
- 透气工件必须在实际接触状态测得泄漏流量上界，并用真空源在 45 kPa 压差、0.40 MPa 最低供气表压处的流量下界校核。 $Q_{S,LB}/Q_{L,UB} < 1.50$ ，判为不通过。
- 吸附许可必须来自每个分区的压力开关或传感器；只有当各区压力下界连续 200 ms 不低于 50 kPa 且峰峰值不大于 2 kPa，才允许提升。只用固定延时判定吸住，判为不通过。SMC 的官方选型资料也明确要求用压力信号确认吸附完成，而非只依赖定时器[5]。
- 单区故障不得由中央大腔体“平均压力”掩盖。各区必须具有独立取压、限流或止回隔离和可识别报警。
- 高泄漏纸箱不能把未经放气模型和最低供气压力性能验证的储气罐当作失气保护。备用真空源或压缩空气储备必须按绝热放气、最低供气压力流量下界和耗气量上界复算，并经切断主供能的实物故障注入证明。

- 未形成泄漏记录、动态包络、单区失效记录和受控落位记录的配置，结论只能是“不放行”，不得用经验签字替代。

01 研究对象、系统范围与符号

本文研究对象是从上表面或指定吸附面抓取的瓦楞纸箱、未覆膜纸板、透气袋材及类似工件，载体可以是助力机械臂、机器人或专用搬运机。系统范围从吸盘与工件接触开始，覆盖真空发生、分配、监测、运动、故障隔离和安全落位。GB/T 41098—2021/ISO 17096:2015 只在设备属于其定义的非固定起重吊具时采用；机器人末端执行器必须另行完成机器人系统集成和控制安全确认。

R1 前置门包括纸箱结构设计、储气罐本体合规、整机风险评估、控制系统安全完整性确认和爆炸性环境选型。五项记录编号全部写入 R1 后进入子系统工程放行；任一记录缺失，R1 直接不通过。

符号	含义	单位
Δp_{LB}	大气压与吸盘腔绝对压力之差的测量下界	Pa 或 kPa
$A_{eff,LB,i}$	第 i 个吸盘在锁定压缩量下、扣除不确定度后的有效面积下界	m^2
C_i	第 i 个吸盘的法向容量， $C_i = \Delta p_{min,LB} A_{eff,LB,i}$	N
$Q_{S,LB}$	真空源在指定压差、最低供气压力下的抽吸流量下界	NL/min
$Q_{L,UB}$	样本、姿态、压缩量和污染边界内的泄漏流量上界	NL/min
μ_{LB}	接触副在污染和寿命边界下、扣除不确定度后的摩擦系数下界	—
N_i, T_i	第 i 个吸盘承担的法向拉力及吸附面内二维切向力向量	N
m_{UB}, g	工件质量上界、重力加速度；本文 $g = 9.81 \text{ m/s}^2$	kg、 m/s^2

符号	含义	单位
$a_{n,UB}$ 、 $a_{t,UB}$	含正常、故障制动和落位过程的法向与切向加速度上界	m/s^2
S_L 、 K_Q	载荷安全系数、流量储备系数	—
$V_{Z,UB}$	单分区需要抽空的等效容积上界	L
p_N 、 T_N	标准状态；本文固定为 101.325 kPa、293.15 K	kPa、K
U_x	量 x 的扩展测量不确定度， $k=2$	与 x 相同

有效面积必须来自吸盘几何、5 mm ~ 9 mm 锁定压缩量和测量不确定度，不能把外轮廓面积直接当作有效面积。本文规定 $U_A/A \leq 2\%$ ，计算使用 $A_{eff,LB} = A_{eff,meas} - U_A$ 。Schmalz 的官方技术说明以 $F = \Delta p A$ 表达理论保持力，同时指出多孔、粗糙工件会降低可达到的真空度[6][7]。供应商目录保持力用于初选；子系统工程放行统一使用压差下界、有效面积下界和本报告安全系数。

02 透气、边缘密封与泄漏机理

系统进气由三部分组成：材料孔隙流 Q_P 、杯唇与表面微通道造成的密封泄漏 Q_E ，以及接头、阀和管路泄漏 Q_H 。

$$Q_L = Q_P + Q_E + Q_H$$

瓦楞纸面纤维、压痕、印刷涂层、胶缝、封箱胶带和局部翘曲会改变流阻；吸盘压缩量、杯唇硬度和落点则改变边缘密封。Piab 关于瓦楞纸板的官方技术资料指出，纸板孔隙率和杯口密封会造成循环间泄漏变化，并以 $F = AP$ 说明低真空、大面积方案的承载逻辑[8]。该资料用于支撑泄漏机理与选型方法。

Tiwari 与 Persson 的原始研究通过不同粗糙度基材和吸盘试验说明，界面粗糙度引起的泄漏、吸盘容积与刚度会共同影响脱离时间[9]。Gabriel 等人的原始研究把表面粗糙度、吸盘直径与数量纳入泄漏和能耗模型[10]。两项研究共同支持一个工程结论：泄漏必须在真实接触副和真实压缩状态下表征，不能只用材料名称赋一个固定系数。

检漏时必须分清“硬件自身泄漏”和“工件过程泄漏”。先用不透气标准板封住全部吸盘，在 45 kPa 压差处测 Q_H ；再换实际工件测 Q_L 。硬件门固定为 $Q_H, UB/Q_S, LB \leq 0.05$ ，超限即停机修复，禁止用加大真空源掩盖接头或阀件故障。实际工件测量使用第 08 章十个边界单元，不以“最差”“相似”或“典型”替代数值单元。

02.1 泄漏边界的固定测试方法

每次测试执行相同顺序：吸盘以 0.10 m/s 法向速度接触，压缩量按边界单元锁定为 5 mm、7 mm 或 9 mm，开启单区真空源，记录 0 ~ 12 s 的压力与标准流量。稳定窗口固定为第 10.0 ~ 12.0 s；窗口内每个压力下界均须 ≥ 50 kPa，压力示值峰峰值须 ≤ 2 kPa。泄漏示值取该窗口内最大的 100 ms 滑动平均值，再加 U_Q 得到 Q_L, UB 。吸盘接触后 2.0 s 内未达到 50 kPa 下界并稳定 200 ms，该循环直接判 R4 失败，原始数据仍保留。

本报告的污染边界固定为 23 ± 2 °C、相对湿度 $50 \pm 10\%$ 条件下，将同批纸箱材料制成并筛分为 75 ~ 150 μm 纸粉，在吸附面均匀施加 0.50 g/m²；超过该面密度、存在液态水、油或胶黏物的纸箱不在本放行边界内。寿命边界固定为吸盘完成 100000 次额定压缩循环，或密封唇相对新件磨损达到 0.50 mm，两者先到者。摩擦、有效面积、泄漏和动态试验均须覆盖新件与该寿命边界。

纸面撕裂、杯唇跨越箱盖开缝、箱盖被抽起，或密封唇与高度差/深度 ≥ 0.50 mm 的折线、压痕、胶带台阶之间的最小距离 < 10 mm，该循环直接失败且该落点列入禁区图。禁区图采用工装坐标，边界坐标精确到 1 mm。

工件族只能在材料牌号、楞型、层数、涂层、印刷覆盖、胶带方案、允许落点和质量上限完全相同时共用泄漏数据。任何一项不同都建立独立数据集。该规则把“纸箱看起来相似”转化为可审计边界，防止低泄漏样本掩盖高泄漏批次。

03 吸附承载、摩擦与动态载荷模型

第 i 个吸盘的法向容量下界和系统总容量为：

$$C_i = \Delta p_{\min, LB} A_{\text{eff}, LB, i}$$

$$F_{N, \text{cap}, LB} = \sum C_i$$

设吸附面从水平面转过 θ ，法向和切向设计需求按下式计算。质量、加速度和偏心取测量上界；加速度包络同时包含正常生产、单区故障制动、转安全位和落位的逐轴峰值，不使用平均速度替代。

$$F_{N,d} = S_L m_{UB} \max_t |g \cos\theta + a_{n,UB}(t)|$$

$$F_{T,d} = S_L m_{UB} \max_t \sqrt{[(g \sin\theta + a_{x,UB}(t))^2 + a_{y,UB}(t)^2]}$$

快速筛查条件:

$$F_{N,cap,LB} \geq F_{N,d}$$

$$\mu_{LB} F_{N,cap,LB} \geq F_{T,d}$$

摩擦系数试验使用三个纸箱批次、每批 10 个独立试片，在 45 kPa 和 50 kPa 压差两档分别测得首次连续滑移 2 mm 时的切向力。每一压差、每种新件/寿命件及清洁/0.50 g/m²纸粉状态均完成 30 次， $\mu_{meas} = F_{slip}/(\Delta p A_{eff,meas})$ ，取全部结果最小值并减去 U_μ 得到 μ_{LB} ； U_μ 必须 ≤ 0.02 。基准工况取 $\mu_{LB} = 0.35$ 。Schmalz 的设计资料要求对多孔工件开展吸附试验，并列出水水平工件至少 2、翻转工件至少 2.5 的安全系数[6]；本报告统一把 2.5 用于全部载荷方向。

快速筛查通过后仍须校核组合载荷和三维偏心。坐标原点固定在工件重心， r_i 为重心至第 i 杯作用点的向量， n 为吸附面单位法向， T_i 为面内二维向量， $f_i = N_i n + T_i$ ； $M_{external}$ 只包含不随重心合力表达的独立外加力偶。对每个 10 ms 路径采样时刻，必须求得一组满足下列条件的吸盘力：

$$N_i \geq 0$$

$$N_i/C_i + ||T_i||/(\mu_{LB} C_i) \leq 1$$

$$\sum f_i + f_{external} = 0$$

$$\sum (r_i \times f_i) + M_{external} = 0$$

线性组合包络禁止在同一吸盘上同时重复使用全部法向容量和全部摩擦容量。存在满足全部平衡式与组合包络的力分配，判为通过；不存在即不通过。吸盘三维坐标、重心三维坐标、工件厚度力臂和故障制动峰值必须进入外力矩。纸板局部压溃、面层剥离和箱盖开裂另设材料承压判据；真空容量通过并不自动代表纸箱结构通过。

03.1 纸箱局部承压与变形门槛

吸盘区域的平均压紧应力以 $\Delta p_{min,LB}$ 计，但杯唇窄环处存在应力集中。项目必须用目标纸箱做静态保持和动态循环，验收后拆检吸附面。硬性通过条件为：箱盖不得被吸开，面纸不得从瓦楞芯剥离，不得出现贯穿破损；卸载 60 s 后，吸附区相对未加载基准面的永久凹陷测量上界必须 ≤ 2.00 mm。任一结构损伤出现，即使真空压力、载荷和节拍全部达标，R9 仍判为不通过。

材料承压试验在 45 kPa 下界和 50 kPa 下界两档分别持续 10 min；动态试验按第 08 章六个动态路径单元各运行 120 循环。吸盘数量增加会扩大总承载面积，但不会自动降低单杯局部应力，因此每个吸盘的落点和压缩量都必须满足上述门槛。

04 泄漏流量平衡与真空建立时间

真空源选型使用实际管路、阀、过滤器和发生器组合在最低供气表压 0.40 MPa、45 kPa 压差处的流量下界，不使用“最大吸入流量”或“最终真空度”两个孤立目录值。源和泄漏必须统一换算到 $p_N = 101.325 \text{ kPa}$ 、 $T_N = 293.15 \text{ K}$ 。单分区硬性判据为：

$$\begin{aligned} Q_{S,LB} &= Q_{S,meas} - U_{QS} \\ Q_{L,UB} &= Q_{L,meas} + U_{QL} \end{aligned}$$

$$Q_{S,LB}(45 \text{ kPa}, 0.40 \text{ MPa 供气}) / Q_{L,UB} \geq 1.50$$

$Q_{L,meas}$ 取完整测试矩阵中的最大示值，不取平均值，也不剔除吸附成功但泄漏偏高的样本。流量计、供应商曲线和管路换算的合成扩展不确定度均进入 U_Q ；本报告门规定 $U_Q/Q \leq 2\%$ 。SMC 官方资料给出了利用实际发生器、吸盘、工件和真空表反推泄漏量的方法，并说明粗糙或透气工件的泄漏会阻止系统达到所需真空[5]。GB/T 32293—2015 只用于硬件 Q_H 检漏方法选择； Q_P 、 Q_E 和总过程流量 Q_L 使用本报告的工件过程测试。记录必须注明压力、温度、量程、采样率和标准状态。

在 0 至 50 kPa 压差区间内，真空源扣除泄漏后的标准流量下界为 $Q_{net,LB}$ 。单区从大气压 p_0 抽至目标绝对压力 p_1 的保守时间为：

$$\begin{aligned} Q_{net,LB} &= \min[Q_{S,LB}(p) - Q_{L,UB}(p)] \\ t_{ev} &= V_{Z,UB} (p_0 - p_1) / (p_N Q_{net,LB}) \\ t_{pick} &= t_{ev} + t_{stable} + t_{aux} \end{aligned}$$

Q 需换算为 L/s，目标 $p_1 = p_0 - 50 \text{ kPa}$ 。若 $Q_{net,LB} \leq 0$ ，直接判为不通过。 $t_{stable} = 0.20 \text{ s}$ ；阀响应、传感器响应、PLC 扫描和许可输出的合计上界固定为 $t_{aux} = 0.10 \text{ s}$ 。接触到全部分区压力下界达到 50 kPa、连续 20 个采样点合格且窗口峰峰值 $\leq 2 \text{ kPa}$ 的总时间必须 $\leq 2.0 \text{ s}$ 。任一分区超时、任一采样点低于阈值、30 ms 内没有新模拟量，或开关量与模拟量矛盾持续超过 50 ms，均禁止提升和水平加速。

05 分区、止回、限流与泄漏补偿架构

四个分区分别配置真空发生支路、压力检测、隔离元件和诊断编号。每区吸盘在几何上跨越工件重心两侧；失去任一区后的实际三维坐标必须通过第 03 章组合载荷平衡，不另用“吸盘数量足够”或二维外观判断替代。第 06 章锁定 x-z 平面并把全部 y 向输入设为零。中央总管压力只能用于诊断，不能代替分区许可。

架构元件	强制功能	不合格状态
独立分区取压	识别局部漏气、空吸和脱杯	只测总管压力
止回或真空节流	阻断故障区拖垮健康区	任一区开路导致任一健康区压力下界 < 45 kPa
真空源流量储备	在泄漏上界下维持阈值	$Q_{S, LB}/Q_{L, UB} < 1.50$
压力许可逻辑	各区压力下界 ≥ 50 kPa、连续 200 ms 且峰值 ≤ 2 kPa	只用定时器或单总信号
备用供能	$t_1 - t_0 \leq 0.10$ s 并维持至 t_3	绝热保持时间 < 8.50 s 或 0.40 MPa 下 $Q_{S, LB}/Q_{L, UB} < 1.50$
受控排气	双支撑确认 500 ms、速度 ≤ 0.01 m/s、位置误差 ≤ 5 mm 后释放	任一条件不满足仍可排气

SMC 的真空节能阀资料说明，未覆盖吸盘的漏气可被限制，从而维持其余回路真空[5]；Piab 的泡棉夹具资料也把止回阀技术用于不同孔隙率材料[11]。这些元件不是自动安全保证：阀卡滞、污染、反向泄漏和响应时间必须进入故障注入。

泄漏补偿按优先级执行：扩大有效吸附面积、改善落点与密封、缩短和增大主管、分散真空源、再增加源流量。禁止以无限增大抽气量替代分区隔离，因为局部大开口仍会消耗全部流量并掩盖正在脱离的吸盘。

06 基准工况计算与唯一判定

本章固定计算工况如下：搬运对象始终保持吸附面水平， $\theta = 0$ ；计算平面为 x - z ，锁定 $a_{y, UB} = 0$ 、 $e_{y, UB} = 0$ 、 $M_x = 0$ 、 $M_z = 0$ 。以吸盘阵列几何中心为临时计算原点，吸盘投影为 $x = \pm 0.25$ m、 $y = 0$ ，重心坐标为(0.060,0,-0.160) m；进入第 03 章向量方程时， r_i 按“吸盘坐标减重心坐标”换算。 y 向加速度、偏心或力矩不为零时，输入全部三维坐标并执行向量平衡。

输入量	已含不确定度的锁定数值
纸箱质量上界 m_{UB}	18.0 kg

输入量	已含不确定度的锁定数值
吸盘数量与分区	8 个, 4 区, 每区 2 个
单杯有效面积下界 $A_{eff, LB}$	0.0060 m ²
吸盘二维投影坐标	相对阵列中心 $x = \pm 0.25$ m, $y = 0$; 每区正负侧各一杯
故障保持压差下界 $\Delta p_{min, LB}$	45 kPa
正常提升许可压差下界 $\Delta p_{pick, LB}$	50 kPa
摩擦系数下界 μ_{LB}	0.35
正常及故障向上加速度上界 $a_{z, UB}$	1.50 m/s ²
正常及故障水平加速度上界 $a_{x, UB}$	2.00 m/s ²
y 向加速度与偏心	$a_{y, UB} = 0$; $e_{y, UB} = 0$
重心水平偏移上界 $e_{x, UB}$	0.060 m
重心距吸附面高度上界 h_{UB}	0.160 m
外部滚转、偏航力矩	$M_x = 0$; $M_z = 0$
指定支撑位	$S1 = (1.00, 0, -0.20)$ m; 故障路径长度上界 1.20 m
单区等效抽气容积上界 $V_{z, UB}$	1.80 L
单区泄漏最大示值及 U_{QL}	55.0、1.1 NL/min; $Q_{L, UB} = 56.1$ NL/min
单区源流量最小示值及 U_{QS}	90.0、1.8 NL/min; $Q_{S, LB} = 88.2$ NL/min
源流量适用条件	0 ~ 50 kPa 全区间, 供气表压 0.40 MPa, 过滤器寿命边界
稳定、辅助时间	$t_{stable} = 0.20$ s; $t_{aux} = 0.10$ s
储气罐、供气压力与初温上界	有效容积下界 25.0 L; 起始表压下界 0.70 MPa、最低可用表压上界 0.40 MPa; $T_{1, UB} = 298.15$ K

输入量	已含不确定度的锁定数值
四区耗气最大示值及 U_{Qair}	300、6 NL/min; $Q_{air,UB} = 306$ NL/min

06.1 正常状态承载

总面积下界为 $8 \times 0.0060 = 0.0480 \text{ m}^2$ ，单杯容量 $C_i = 45000 \times 0.0060 = 270 \text{ N}$ ：

$$\begin{aligned}
 F_{N,cap,LB} &= 45000 \times 0.0480 = 2160 \text{ N} \\
 F_{N,d} &= 2.5 \times 18 \times (9.81 + 1.50) = 508.95 \text{ N} \\
 \text{法向容量比} &= 2160 / 508.95 = 4.24 > 1.00, \text{ 通过}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 F_{T,cap} &= 0.35 \times 2160 = 756 \text{ N} \\
 F_{T,d} &= 2.5 \times 18 \times 2.00 = 90 \text{ N} \\
 \text{切向容量比} &= 756 / 90 = 8.40 > 1.00, \text{ 通过}
 \end{aligned}$$

以吸盘阵列中心为矩心，水平加速度和重心偏移形成的俯仰力矩为：

$$\begin{aligned}
 M_d &= F_{N,d} e_x + F_{T,d} h \\
 &= 508.95 \times 0.060 + 90 \times 0.160 \\
 &= 44.94 \text{ N} \cdot \text{m}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \text{两侧法向力差 } \Delta F &= M_d / 0.25 = 179.76 \text{ N} \\
 \text{高载侧需求} &= (508.95 + 179.76) / 2 = 344.36 \text{ N} \\
 \text{低载侧需求} &= (508.95 - 179.76) / 2 = 164.60 \text{ N} \\
 \text{每侧容量} &= 4 \times 45000 \times 0.0060 = 1080 \text{ N} \\
 &\text{两侧均通过}
 \end{aligned}$$

按四杯/侧平均分配，高载侧每杯 $N_H = 344.36/4 = 86.09 \text{ N}$ ，低载侧每杯 $N_L = 164.60/4 = 41.15 \text{ N}$ ，八杯切向力均为 $T = 90/8 = 11.25 \text{ N}$ 。线性组合包络为：

$$\begin{aligned}
 \eta_H &= 86.09/270 + 11.25/(0.35 \times 270) = 0.44 \\
 \eta_L &= 41.15/270 + 11.25/(0.35 \times 270) = 0.27 \\
 \max(\eta_H, \eta_L) &= 0.44 \leq 1.00, \text{ 组合载荷通过}
 \end{aligned}$$

06.2 流量与建立时间

泄漏上界为 56.1 NL/min，源流量下界为 88.2 NL/min：

$$\begin{aligned}
 \text{源/泄漏比} &= Q_{S,LB} / Q_{L,UB} \\
 &= 88.2 / 56.1 \\
 &= 1.572 \geq 1.50, \text{ 通过}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\text{需求容量比} &= Q_{S, LB} / (1.5 Q_{L, UB}) \\ &= 88.2 / 84.15 \\ &= 1.048 \geq 1.00, \text{通过}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}Q_{\text{net}, LB} &= 88.2 - 56.1 = 32.1 \text{ NL/min} = 0.535 \text{ L/s} \\ p_1 &= 101.325 - 50 = 51.325 \text{ kPa}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}t_{\text{ev}} &= 1.80 \times (101.325 - 51.325) / (101.325 \times 0.535) \\ &= 1.66 \text{ s} \\ t_{\text{pick}} &= 1.66 + 0.20 + 0.10 \\ &= 1.96 \text{ s} \leq 2.00 \text{ s}, \text{通过}\end{aligned}$$

“源/泄漏比”与“需求容量比”是两个不同指标，前者门槛为 1.50，后者门槛为 1.00。四区必须分别达到 50 kPa 下界并稳定 200 ms；任一区超过 2.00 s，R4 即不通过。

06.3 单区完全失效

任一区隔离后剩余 6 个吸盘，面积 0.0360 m²；因每区在 x 正负两侧各布一杯，任一区失效后两侧仍各有 3 杯。

$$\begin{aligned}F_{N, 1\text{fail}} &= 45000 \times 0.0360 = 1620 \text{ N} \\ \text{法向容量比} &= 1620 / 508.95 = 3.18, \text{通过}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}F_{T, 1\text{fail}} &= 0.35 \times 1620 = 567 \text{ N} \\ \text{切向容量比} &= 567 / 90 = 6.30, \text{通过}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\text{单侧剩余容量} &= 3 \times 45000 \times 0.0060 = 810 \text{ N} \\ 810 &> 344.36 \text{ N} \text{ 且 } 810 > 164.60 \text{ N}, \text{力矩分配通过}\end{aligned}$$

任一区失效后，高载侧和低载侧各剩三杯。取每杯 $T = 90/6 = 15 \text{ N}$ ：

$$\begin{aligned}N_{H, 1\text{fail}} &= 344.36/3 = 114.79 \text{ N} \\ N_{L, 1\text{fail}} &= 164.60/3 = 54.87 \text{ N}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\eta_{H, 1\text{fail}} &= 114.79/270 + 15/(0.35 \times 270) = 0.584 \\ \eta_{L, 1\text{fail}} &= 54.87/270 + 15/(0.35 \times 270) = 0.362\end{aligned}$$

$$\max(\eta_{H, 1\text{fail}}, \eta_{L, 1\text{fail}}) = 0.584 \leq 1.00, \text{通过}$$

因此，该基准工况在 18 kg 质量上界、水平吸附面、已锁定正常/故障加速度和二维偏心包络内，正常状态及任一单区完全失效的快速筛查与组合载荷均通过。

06.4 主供能丧失与受控落位

基准工况采用有效容积下界 25.0 L 的压缩空气储备，起始表压下界 0.70 MPa、最低可用表压上界 0.40 MPa； $p_N = 0.101325$ MPa，绝对压力 $P_1 = 0.801325$ MPa、 $P_2 = 0.501325$ MPa。采用空气 $\gamma = 1.4$ 的绝热刚性罐放气模型，标准温度 $T_N = 293.15$ K，罐内初温上界 $T_{1,UB} = 298.15$ K；四区耗气量使用上界 306 NL/min = 5.10 NL/s。最低供气表压 0.40 MPa 时，每区 $Q_{S,LB} = 88.2$ NL/min，已通过 1.50 流量门。

$$\begin{aligned}
 m_2/m_1 &= (P_2/P_1)^{(1/\gamma)} \\
 &= (0.501325/0.801325)^{(1/1.4)} \\
 &= 0.7153 \\
 V_{N,use} &= 25 \times (0.801325/0.101325) \times (293.15/298.15) \\
 &\quad \times (1 - 0.7153) \\
 &= 55.34 \text{ NL} \\
 t_{res} &= 55.34 / 5.10 = 10.85 \text{ s} \\
 t_{required} &= (t_2 - t_0)_{max} + 2(t_3 - t_2)_{max} \\
 &= 0.50 + 2 \times 4.00 \\
 &= 8.50 \text{ s} \\
 10.85 &> 8.50 \text{ s, 通过}
 \end{aligned}$$

唯一计算结论：该配置通过 R2、R3、建立时间计算、单区失效计算和备用时长计算，可按第 08、09 章执行 FAT/SAT。FAT 与 SAT 的全部边界单元和故障注入均零失效，且整机前置门记录齐全时，形成“真空抓取子系统工程放行”。

07 单区故障、总失气与受控落位逻辑

运行许可逻辑不得把报警与安全动作混在一个延时链中。状态机采用下列硬逻辑：

$$\begin{aligned}
 &\text{Lift_Enable} = \\
 &\quad \text{Workpiece_Present} \\
 &\quad \wedge \text{Zone_A_OK} \wedge \text{Zone_B_OK} \wedge \text{Zone_C_OK} \wedge \text{Zone_D_OK} \\
 &\quad \wedge \text{每区 } \Delta p_{LB} \geq 50 \text{ kPa 连续 } 200 \text{ ms} \\
 &\quad \wedge 200 \text{ ms 窗口峰峰值} \leq 2 \text{ kPa} \\
 &\quad \wedge \text{Motion_Envelope_OK} \\
 &\quad \text{Single_Zone_Fault} \rightarrow \\
 &\quad \quad \text{禁止继续生产路径} \\
 &\quad \quad \wedge |a_{z,UB}| \leq 1.50 \text{ m/s}^2 \\
 &\quad \quad \wedge \sqrt{(a_{x,UB})^2 + (a_{y,UB})^2} \leq 2.00 \text{ m/s}^2 \\
 &\quad \quad \wedge \text{禁止翻转} \\
 &\quad \wedge \text{执行已登记支撑位 S1 落位}
 \end{aligned}$$

Main_Supply_Loss →
 备用建立 $t_1 - t_0 \leq 0.10 \text{ s}$
 $\wedge$ 故障确认 $t_2 - t_0 \leq 0.50 \text{ s}$
 $\wedge$ 保持全部健康分区
 $\wedge$ 支撑转移 $t_3 - t_2 \leq 4.00 \text{ s}$

四个时间戳采用同一 1 ms 时基： t_0 是主供气入口压力下界首次低于 0.55 MPa 表压或主阀开信号丢失的较早时刻； t_1 是四区发生器入口供气压力下界均达到 0.40 MPa 表压的首时刻； t_2 是控制器置位供能故障并发出落位命令的时刻； t_3 是两只独立支撑传感器均置位、支撑力下界达到 $0.95m_UBg$ 且连续保持 500 ms 的首时刻。4.00 s 从 t_2 起算，主供能丧失至支撑转移的总上限为 4.50 s。

本工况登记支撑位 $S1 = (1.00, 0, -0.20) \text{ m}$ ，位置公差 $\pm 5 \text{ mm}$ ，从运动包络任一点至 $S1$ 的路径长度上界为 1.20 m；支撑力下界为 $0.95 \times 18 \times 9.81 = 167.75 \text{ N}$ 。R1 输入表必须登记支撑位坐标、路径上界和支撑力门；未登记位置不构成安全支撑位。

任何故障发生后均不得主动排气。释放许可必须同时满足：末端位置进入 $S1 \pm 5 \text{ mm}$ ；运动速度 $\leq 0.01 \text{ m/s}$ 并连续 500 ms；两只独立支撑传感器连续 500 ms 置位；支撑力下界 $\geq 0.95m_UBg$ ；人工释放指令保持 500 ms。五项全部成立后才允许排气。压力恢复不得自动续跑，必须完成 t_3 、检查工件并人工复位后建立新循环。

备用供能必须在起始表压 0.70 MPa、泄漏上界、耗气量上界、过滤器寿命边界和 1.20 m 故障路径组合下切断主供能实测。从 t_0 至 t_3 ，任一健康区压力下界 $< 45 \text{ kPa}$ 、任一故障加速度上界超限、 $t_1/t_2/t_3$ 任一时间门超限或人工托住工件，均判为受控落位失败。

08 测试矩阵、测量链与记录要求

每一纸箱规格在 FAT 和 SAT 分别执行完整矩阵，FAT 数据不得抵扣 SAT。坐标原点为纸箱设计吸附中心，允许落点偏移固定为 x 、 y 各 $\pm 20 \text{ mm}$ ，压缩量固定为 $5 \text{ mm} \sim 9 \text{ mm}$ 。每个边界单元使用独立纸箱：三个来料批次、每批 10 箱、每箱 5 循环，共 150 循环；每循环保存四条分区曲线，因此每单元为 600 条分区曲线。

单元	落点/状态	压缩量	污染与寿命	每阶段样本
E1	(0,0) mm, 未印刷中心区	7 mm	清洁新件	150 循环/600 曲线
E2	(+20,0) mm	7 mm	清洁新件	150 循环/600 曲线
E3	(-20,0) mm	7 mm	清洁新件	150 循环/600 曲线
E4	(0,+20) mm	7 mm	清洁新件	150 循环/600 曲线
E5	(0,-20) mm	7 mm	清洁新件	150 循环/600 曲线
E6	印刷覆盖率 100% 区域, 密封唇距胶带边 10 mm	7 mm	清洁新件	150 循环/600 曲线
E7	(0,0) mm	5 mm	清洁新件	150 循环/600 曲线
E8	(0,0) mm	9 mm	清洁新件	150 循环/600 曲线
E9	(0,0) mm	7 mm	0.50 g/m ² 纸粉、新件	150 循环/600 曲线
E10	(0,0) mm	7 mm	0.50 g/m ² 纸粉、100000 循环或 0.50 mm 磨损件	150 循环/600 曲线

每一纸箱规格、每一阶段合计 1500 个泄漏/建立循环和 6000 条分区曲线；FAT 与 SAT 合计 3000 循环和 12000 条分区曲线。新增纸箱材料、楞型、层数、涂层、胶带或质量上限时，作为新规格重新执行全部数量。

动态搬运设六个路径单元：D1 为 18 kg、 $a_{z,UB} = +1.50 \text{ m/s}^2$ 且 $a_{x,UB} = 0$ ；D2 为 18 kg、 $a_{x,UB} = +2.00 \text{ m/s}^2$ 且 $a_{z,UB} = 0$ ；D3 为 18 kg、 $a_{x,UB} = -2.00 \text{ m/s}^2$ 且 $a_{z,UB} = 0$ ；D4 同时施加 $a_{z,UB} = +1.50 \text{ m/s}^2$ 、 $a_{x,UB} = +2.00 \text{ m/s}^2$ ；D5 同时施加 $a_{z,UB} = +1.50 \text{ m/s}^2$ 、 $a_{x,UB} = -2.00 \text{ m/s}^2$ ；D6 为单区故障后沿 1.20 m 上界路径落至 S1。六个单元均使用 E10 污染与寿命状态，每单元三个批次×10 箱×4 循环 = 120 循环。每一阶段动态试验为 720 循环，FAT 与 SAT 合计 1440 循环。

每一阶段还独立完成：有效面积 8 杯×3 个压缩量×2 个寿命状态×10 次 = 480 次；摩擦系数 2 个压差×2 个寿命状态×2 个污染状态×30 次 = 240 次；发生器在 0.40 MPa 供气表压、过滤器压差 5 kPa 条件下完成 4 区×10 条 0 ~ 50 kPa 曲线 = 40 条。上述数量不得与 E1 ~ E10 或 D1 ~ D6 互相抵扣。

测量项目	仪器与采样	必须记录	判定
分区压力	每区独立绝压或差压传感器, ≥ 100 Hz, $U_p/p \leq 2\%$	Δp_{meas} 、 U_p 、 Δp_{LB}	提升前 $\Delta p_{\text{LB}} \geq 50$ kPa; 故障期间健康区 $\Delta p_{\text{LB}} \geq 45$ kPa
泄漏与源流量	标准流量计 ≥ 100 Hz, $U_Q/Q \leq 2\%$	Q_{meas} 、 U_Q 、标准状态	$Q_{\text{S,LB}}/Q_{\text{L,UB}} \geq 1.50$
质量与坐标	校准秤 $U_m \leq 0.10$ kg; 三维测量 $U_r \leq 1.0$ mm	m_{meas} 、 U_m 、吸盘/重心/支撑位坐标	$m_{\text{UB}} = m_{\text{meas}} + U_m$; 偏心与力臂取绝对值加 U_r
动态载荷	独立三轴加速度计 ≥ 200 Hz, $U_a \leq 0.05$ m/s ²	各轴示值、 U_a 、故障制动峰值	$a_{\text{UB}} = \max$
位移/滑移	≥ 100 fps 视觉测量, $U_s \leq 0.20$ mm	起点、峰值、终点和标定尺	$s_{\text{UB}} = s_{\text{meas}} + U_s \leq 2.00$ mm
支撑力	校准测力元件, $U_F/F \leq 2\%$	$F_{\text{support,meas}}$ 、 U_F 和双支撑信号	$F_{\text{support,LB}} = F_{\text{meas}} - U_F \geq 0.95 m_{\text{UBg}}$ 并保持 500 ms
容积、储气压力与温度	容积 $U_V/V \leq 2\%$; 压力 $U_P \leq 0.005$ MPa; 温度 $U_T \leq 1$ K	分区/储罐容积、 P_1 、 P_2 、 T_1 及各 U 值	抽空容积取上界; 储罐容积/ P_1 取下界, P_2/T_1 取上界
有效面积	标定图像或尺寸测量, $U_A/A \leq 2\%$	压缩量、密封内边界和面积	计算只用 $A_{\text{eff,LB}} = A_{\text{meas}} - U_A$
摩擦系数	校准测力计, $U_\mu \leq 0.02$	滑移起点力、压差、面积、状态	计算只用 $\mu_{\text{LB}} = \min(\mu_{\text{meas}}) - U_\mu$
备用供能	压力、流量与 1 ms 事件时基	t_0 、 t_1 、 t_2 、 t_3 、最低分区压力	≤ 0.10 s、 ≤ 0.50 s、 ≤ 4.00 s 且健康区 $\Delta p_{\text{LB}} \geq 45$ kPa

压力许可始终使用下界。U_{p/p} = 2%时，50 kPa 下界对应示值至少 51.02 kPa，45 kPa 下界对应示值至少 45.92 kPa。采样时钟差必须≤10 ms。压力开关只有开关量时，必须增加可记录模拟压力；没有原始曲线只有成功/失败位，R10 不通过。

释放窗口固定为 0≤Δp_{UB}≤5 kPa 并连续 500 ms。阀动作后 300 ms 内模拟压力变化 < 0.50 kPa，或连续 30 ms 没有新样本，判为信号卡滞；开关量与模拟量矛盾超过 50 ms，判为诊断故障。

原始数据不得只存图片。每条曲线必须保存时间戳、分区号、样本号、批次号、落点编号、压力、流量、加速度、阀状态和许可状态，单位写入字段名或元数据。数据处理脚本和参数一并归档，计算输出能反向定位原始行。剔除数据只允许用于仪器明确失效，且剔除原因、故障证据和重测记录必须并存；以“异常值”为由删除高泄漏或慢建立循环，R10 直接不通过。

09 FMEA 驱动的故障注入矩阵

本章把 FMEA 识别出的失效模式转化为可重复故障注入，不用低发生率删除故障。每次注入均使用 18 kg 质量上界、E10 污染/寿命状态和 1.20 m 故障路径；FAT 与 SAT 分别执行全表数量。非供能故障以 t_F 表示物理注入时刻，故障确认门为 t₂-t_F≤0.50 s；主供能故障继续使用第 07 章 t₀~t₃。

失效模式	注入方法	每阶段次数	必须发生的控制动作	通过标准
单吸盘未覆盖	每杯设置 6.0 mm 校准开口	8 杯×10 = 80	对应区报警并执行 S1 落位	健康区 Δp _{LB} ≥45 kPa， t ₂ -t _F ≤0.50 s， t ₃ -t ₂ ≤4.00 s
单分区管路断开	每区快断接头完全断开	4 区×10 = 40	故障区隔离并执行 S1 落位	全部 40 次满足时间、 压力、加速度和滑梯门
止回阀卡开	每区旁通止回阀形成全开通路	4 区×10 = 40	健康区独立诊断并执行 S1 落位	任一健康区 Δp _{LB} < 45 kPa 即整项失败
压力传感器卡高	每通道注入满量程高电平；提升前 5 次、运动中 5 次	4 通道×10 = 40	提升前禁止许可；运动中执行 S1 落位	不产生错误 Lift_Enable，运动中满足 t ₂ 、t ₃ 门

失效模式	注入方法	每阶段次数	必须发生的控制动作	通过标准
压力传感器卡低	每通道注入 0 kPa 信号；提升前 5 次、运动中 5 次	4 通道×10 = 40	提升前锁止；运动中执行 S1 落位	不得旁路运行，健康区压力保持合格
主压缩空气切断	距 S1 路径 1.20 m 处关闭主阀	10	t ₁ 、t ₂ 后执行 S1 落位	t ₁ -t ₀ ≤0.10 s, t ₂ -t ₀ ≤0.50 s, t ₃ -t ₂ ≤4.00 s
备用储备低压	起始表压固定为 0.39 MPa	10	起动前锁止	10/10 不得产生 Lift_Enable
纸箱局部塌陷	吸附区预制直径 30 mm、深 5.0 mm 凹陷	10	压力故障后执行 S1 落位	无撕裂、无跌落，s _{UB} ≤2.00 mm
软件定时器提前	将延时固定为 0.50 s	10	压力联锁继续阻止运动	任一区 Δp _{LB} < 50 kPa 均无提升
排气阀误动作	路径中点注入排气输出请求	10	五项释放许可屏蔽请求	t ₃ 前排气阀不得得电

每一阶段共执行 290 次故障注入，FAT 与 SAT 合计 580 次。故障注入必须使用防坠承接装置并清空危险区。任一非预期运动、压力下界越线、时间超限、加速度上界超限、滑移上界超限、排气误动作或人工托住工件均计为失败；失败后不得补做单次，完成整改后该失效模式在该阶段从第一次重新执行。

10 FAT、SAT 与真空抓取子系统工程放行标准

子系统工程放行由前置门、设计资料、工厂验收 FAT、现场验收 SAT 四道门组成。四道门全部通过才形成真空抓取子系统工程放行；计算通过不能替代实物验收，FAT 数据不能抵扣 SAT，供应商样本不能替代目标纸箱。

编号	放行门	明确通过标准
R1	前置门与输入冻结	整机风险评估结论通过；Lift_Enable、故障检测、排气禁止和受控落位的已验证 PL/SIL $\geq$ 风险评估要求；机器人集成、储气罐本体和环境合规结论通过；质量/重心/三维坐标/加速度/安全位/A_eff, LB/ μ _LB/Q_L, UB/Q_S, LB 及全部 U 值有版本
R2	静态/动态承载	正常及任一区失效时快速容量比 ≥ 1.00 ，且所有 10 ms 时刻存在 $\eta_i \leq 1.00$ 的三维平衡解
R3	流量储备	每区 Q_S, LB(45 kPa、0.40 MPa 供气)/Q_L, UB ≥ 1.50
R4	建立时间	E1 ~ E10 每单元 150/150 循环、600/600 分区曲线均在 2.0 s 内达到 50 kPa 下界并稳定 200 ms
R5	动态搬运	D1 ~ D6 每单元 120/120 循环；零跌落，s_UB ≤ 2.00 mm，加速度上界不超计算包络
R6	单区故障	四区断开各 10 次、止回阀卡开各 10 次；健康区 $\Delta p_{LB} \geq 45$ kPa，全部按时落至 S1
R7	主供能丧失	10/10 次满足 $t_1 - t_0 \leq 0.10$ s、 $t_2 - t_0 \leq 0.50$ s、 $t_3 - t_2 \leq 4.00$ s， $t_0 \sim t_3$ 健康区 $\Delta p_{LB} \geq 45$ kPa
R8	故障注入	第 09 章每阶段 290/290 次零错误许可、零误排气、零时间/压力/加速度/滑移越线
R9	纸箱结构	无盖板掀开、面层剥离或穿孔；卸载 60 s 后永久凹陷上界 ≤ 2.00 mm
R10	记录完整性	原始压力/流量/加速度/位移曲线、 $t_0 \sim t_3$ 日志、仪器 U 值、配置与结论可追溯

FAT 与 SAT 使用同一阈值并分别完成全部数量。现场更换真空发生器、吸盘型号/硬度、管径、过滤器、阀件、控制程序，或纸箱材料、涂层、胶带、质量、重心、路径加速度后，原放行边界立

即失效并完整重做 R1—R10。不存在“带条件放行”：任何一项不满足，真空抓取子系统工程结论为不通过。

11 工程控制与维护要求

1. **吸盘与落点**：密封唇不得跨越箱盖开缝、破损或高度差/深度 ≥ 0.50 mm 的折线、压痕、胶带台阶，与上述边界的最小距离必须 ≥ 10 mm。机械导向把压缩量限制在 5 mm ~ 9 mm。
2. **过滤与排水**：每区配置压差监测过滤器。过滤器压差上界达到 5 kPa 或使用达到 500 h，两者先到即锁止并更换；更换后重新执行 Q_H 班前测试。
3. **分区检查**：每班开始前用不透气的标准板在 45 kPa 压差处执行硬件泄漏自检；任一区 $Q_{H,UB}/Q_{S,LB} > 0.05$ 即停用维修。
4. **传感器诊断**：吸附前 $0 \leq \Delta p_{UB} \leq 5$ kPa 并连续 500 ms；阀动作后 300 ms 内变化 < 0.50 kPa、连续 30 ms 无新样本或开关量/模拟量矛盾 > 50 ms，均置位故障。
5. **压力阈值保护**：正常运动期间每区 Δp_{LB} 必须 ≥ 50 kPa。任一健康区出现一个 100 Hz 采样点 $\Delta p_{LB} < 45$ kPa，控制器在下一扫描周期置位故障，且 t_2 时间门仍须 ≤ 0.50 s。
6. **变更管理**：吸盘、密封材料、阀、软管长度、真空源、程序参数和纸箱材料均纳入版本管理。未经重新计算和相应复验，不得替换。
7. **人员与能量隔离**：维护前切断、锁定并释放气动残余能量，支撑力下界达到 $0.95m_{UBg}$ 并连续 500 ms 后才允许进入。ISO 4414:2010 用于机械气动系统设计、安装、运行和维护，不覆盖压缩机、工厂供气分配、气瓶和储气罐[4]；储气罐合规记录属于 R1 前置门。

12 研究结论

纸箱与透气工件的真空搬运不是单一吸力问题，而是承载、泄漏、动态、分区和失气处置共同组成的系统问题。本报告把真空抓取子系统工程放行固定为六个不可替代的判据：

1. 以 $\Delta p_{min,LB}$ 、 $A_{eff,LB}$ 、 μ_{LB} 和 2.5 倍动态载荷校核正常及单区故障状态，快速容量比 ≥ 1.00 ，且每个 10 ms 时刻存在组合系数 $\eta_i \leq 1.00$ 的三维平衡解。
2. 每区在 45 kPa 压差、0.40 MPa 最低供气表压处满足 $Q_{S,LB}/Q_{L,UB} \geq 1.50$ 。

3. 每区在 2.0 s 内达到 50 kPa 下界, 连续 20 个采样点合格且窗口峰峰值 ≤ 2 kPa; 许可来自分区压力信号。
4. 任一区完全失效时, 健康区压力下界保持 ≥ 45 kPa, 故障加速度上界不超包络, 系统落至登记支撑位。
5. $t_1 - t_{0} \leq 0.10$ s、 $t_2 - t_{0} \leq 0.50$ s、 $t_3 - t_2 \leq 4.00$ s; 备用供能按 $\gamma = 1.4$ 和 298.15 K 初温上界的绝热模型满足 $t_{\text{res}} \geq 8.50$ s。
6. FAT 与 SAT 分别完成每规格十个边界单元、六个动态单元及 290 次故障注入, 全部零失效, 且 R1 前置门记录齐全。

第 06 章 18 kg 纸箱基准工况得到唯一“计算通过”结论: 正常法向、切向快速容量比分别为 4.24、8.40, 组合系数最大 0.44; 单区失效后快速容量比分别为 3.18、6.30, 组合系数最大 0.584; $Q_{S, LB} = 88.2$ NL/min、 $Q_{L, UB} = 56.1$ NL/min, 源/泄漏比 1.572、需求容量比 1.048; 建立许可时间 1.96 s; 绝热备用供能时间 10.85 s, 大于 8.50 s。该计算结果进入规定的 FAT/SAT 验证流程。

R1—R10 全部取得 FAT 与 SAT 独立零失效记录后, 真空抓取子系统结论为“通过”; 缺一项即“不通过”。整机放行同时纳入风险评估、控制安全确认、机器人集成和储气罐本体合规记录。

参考文献

- [1] 国家市场监督管理总局、国家标准化管理委员会. [GB/T 41098—2021 起重机 安全 起重吊具](<https://openstd.samr.gov.cn/bzgk/std/newGblInfo?hcno=4CA21010ABA8198422193BC441982662>). 发布于 2021-12-31, 实施于 2022-07-01, 标准状态: 现行。
- [2] International Organization for Standardization. [ISO 17096:2015 Cranes—Safety—Load lifting attachments](<https://www.iso.org/standard/58103.html>). ISO 官方页面标示于 2026 年复审确认, 当前版本继续有效。
- [3] 国家市场监督管理总局国家标准全文公开系统. [GB/T 32293—2015 真空技术 真空设备的检漏方法选择](<https://openstd.samr.gov.cn/bzgk/std/newGblInfo?hcno=24CEB44CD262915DDDC696905A1E7073>). 发布于 2015-12-10, 实施于 2016-07-01, 标准状态: 现行。
- [4] International Organization for Standardization. [ISO 4414:2010 Pneumatic fluid power—General rules and safety requirements for systems and their components](<https://www.iso.org/standard/44790.html>). ISO 官方页面标示该版本于 2021 年复审确认。
- [5] SMC Corporation. [Vacuum Equipment: Model Selection and Common Precautions](https://www.smcworld.com/catalog/BEST-technical-data-en/pdf/Vacuum-Common_en.pdf). 官方真空元件选型资料, 含泄漏估算、响应时间、压力确认与节流/止回应用。
- [6] J. Schmalz GmbH. [Design of the Suction Cup](<https://www.schmalz.com/en-at/support/know-how/vacuum-knowledge/the-vacuum-system-and-its-components/vacuum-suction-cups/design-of-the-suction-cup>). 官方真空技术知识库。
- [7] J. Schmalz GmbH. [Technical Data of Suction Cups](<https://www.schmalz.com/en-de/support/know-how/vacuum-knowledge/the-vacuum-system-and-its-components/vacuum-suction-cups/technical-data-of-suction-cups>). 官方真空技术知识库。
- [8] Piab AB. [Handling Corrugated Cardboard: Advantages through Optimized Pressure Regulating of Air-driven Vacuum Pump](https://www.piab.com/globalassets/productimages/handlingcorrugatedcardboardadvantagesthroughoptimizedpressureregulatingofairdrivenvacuumpump_gb.pdf?ref=82E74A6F5B). 官方瓦楞纸板真空搬运技术资料。
- [9] A. Tiwari, B. N. J. Persson. [Physics of suction cups](<https://doi.org/10.1039/C9SM01679A>). Soft Matter, 2019, 15: 9482–9499. 原始研究论文。
- [10] F. Gabriel, S. Baars, M. Römer, K. Dröder. [Grasp Point Optimization and Leakage-Compliant Dimensioning of Energy-Efficient Vacuum-Based Gripping Systems](<https://doi.org/10.3390/machines9080149>). Machines, 2021, 9(8):149. 原始研究论文。
- [11] Piab AB. [piCOBOT Foam Grippers](<https://www.piab.com/en-us/robot-and-cobot-gripping-solutions/cobots-and-robot-grippers/picobot-i-vacuum-gripper-unit/picobot-foam-grippers>). 官方产品技术页面, 含不同孔隙率材料的止回阀应用说明。