

非标工业搬运夹具失气保护、安全释放 与工程验证方法研究

作者：■■■■■ 单位：江苏安睿克智能科技有限公司（安睿克智能科技研究组）

整理周期：2023.05—2026.04 文件性质：内部内部工程验证记录整理版 DOI：待定

说明：本稿按内部工程验证记录改写；未随附原始测试记录、仪器校准证书、现场照片和签字原件时，相关数据与结论应以归档原件为准，不作为第三方认证、客户验收或质量证明文件。

修订说明：本整理优化版根据技术评审建议，对标题、适用边界、标准引用、安全控制等级、FMEA 评分说明、测试设备与项目化检查表等内容进行了补充。主体技术路线仍保持原稿“失气不误放、受控再释放”的设计逻辑。

适用边界与使用声明

- 本文为内部工程验证方法与技术白皮书整理稿，可用于方案讨论、内部培训、项目风险评审和客户技术沟通前的材料准备。
- 本文不等同于第三方认证报告、型式试验报告、CE/ISO 符合性声明、客户验收文件或质量证明文件。
- 文中压力、时间、夹持力、滑移量、响应时间等参数，应区分为计算值、内部测试整理值和工程推荐值；实际项目必须结合工件质量、重心、温度、夹持方式、气源条件、动作曲线和现场风险评估重新校核。
- 对外发布或项目归档时，应补充原始测试记录、传感器校准证书、现场照片、测试曲线、签字页和项目级风险评估记录。

摘要：工业搬运夹具广泛应用于助力机械臂、气动搬运系统、机器人末端执行器、真空吸吊系统和专机上下料等场景，其安全释放与失气保护设计直接关系到工件坠落、设备碰撞、人员灼伤和产线停机风险。针对气源压力突降、气管破裂、阀组异常及控制信号失效条件下可能产生的夹持力衰减和非预期释放风险，本文提出一种面向工业搬运夹具的失气保护与安全释放设计方法。该方法强调“失气不误放、受控再释放”的设计逻辑，即失气时应优先保持夹持、停止搬运、禁止悬空释放，并在工件受托、夹具处于安全位置、机械臂或机器人处于允许释放位姿、人员处于安全区域且控制系统满足释放联锁条件后，再执行低速、可诊断、可复位的释放动作。本文围绕气动夹抱式、夹取式、真空吸附式、内撑式、吊钩式、翻转式及高温工件搬运夹具，系统讨论夹持力计算、机械自锁、几何承托、气路保压、泄漏检测、压力衰减监测、释放联锁、维护复位及工程验证验证方案。文中相关压力、时间、夹持力、滑移量和响应时间等均作为工程参考值或内部测试整理值提出，需结合具体工件、夹具结构、气源条件、搬运动作曲线和现场安全要求进行项目化校核。

关键词：工业搬运夹具；安全释放；失气保护；气动夹具；机械自锁；夹持力计算；气路保压；泄漏检测；高温工件搬运；非标助力机械臂；工程验证

Research on Air-loss Protection, Safe Release and Engineering Verification Methods for Non-standard Industrial Handling Fixtures

Abstract: Industrial handling fixtures are widely used in assisted manipulators, pneumatic handling systems, robot end-effectors, vacuum lifting systems and dedicated loading/unloading equipment. Their safe release and air-loss protection design is closely related to the risk of workpiece falling, equipment collision, operator injury and production interruption. This paper proposes a design method for air-loss protection and controlled safe release of industrial handling fixtures under rapid pressure drop, pipe rupture, valve malfunction and control signal failure. The method follows the principle of “no unintended release under air loss, and controlled release after confirmation”. It integrates clamping-force calculation, mechanical self-locking, geometrical support, pressure holding, leakage detection, pressure-decay monitoring, release interlocking, maintenance reset and simulated verification. All numerical values in this paper are engineering reference values or simulated verification settings and shall be recalculated for specific projects.

Key words: industrial handling fixture; safe release; air-loss protection; pneumatic clamp; mechanical self-locking; clamping force calculation; pressure holding; leakage detection; high-temperature workpiece handling; engineering verification

1 引言

工业自动化搬运系统中，夹具通常位于助力机械臂、气动平衡吊、桁架机械手、工业机器人、悬臂吊或专机上下料机构的末端，是实现工件夹持、承载、姿态转换、转移和释放的关键执行单元。与普通定位工装不同，工业搬运夹具不仅需要满足额定工况下的夹持要求，还需要在气源失效、控制异常、夹爪磨损、工件偏载、高温辐射和维护误操作等可预见异常条件下，避免风险进一步扩大。

在气动搬运夹具中，气源压力通常承担夹持力建立、夹爪驱动和释放执行等功能。如果夹具设计仅依赖气压保持，一旦出现主气源突然中断、气管破裂、快速接头脱开、阀芯卡滞、释放阀误动作或夹腔泄漏，夹持力可能快速下降，进而引发工件滑移、坠落或冲击。对于高温铸件、锻件和热处理件，由于工件温度高、表面氧化皮多、摩擦系数波动大、人员无法近距离干预，失气保护与安全释放设计尤为重要。

本文认为，工业搬运夹具的安全释放不是“断气后立即松开”，而是在异常状态下保持承载，并在工件受托、人员撤离、位置确认和控制系统满足释放条件后，执行受控、低速、可诊断、可复位的释放动作。正确的设计逻辑可概括为：失气不误放、受控再释放。

2 研究对象与边界条件

2.1 研究对象

本文研究对象为工业搬运场景中的非标搬运夹具及其安全释放、失气保护和工程验证方法，主要包括气动夹抱式搬运夹具、夹取式搬运夹具、真空吸附式搬运夹具、内撑式搬运夹具、吊钩式搬运夹具、翻转式搬运夹具、高温工件搬运夹具以及其他非标工业搬运夹具。适用设备包括助力机械臂、气动平衡吊、桁架机械手、工业机器人末端执行器、专机上下料搬运机构、悬臂吊配套搬运夹具和真空吸吊系统。

2.2 边界条件

本文重点研究气动夹具及复合式搬运夹具在失气、泄漏、误释放和维护复位状态下的设计方法，不替代具体项目中的风险评估、机械强度计算、控制系统安全验证、现场调试和客户验收。不同工件的质量、尺寸、表面状态、温度、重心位置、夹持方式、搬运动作曲线、现场节拍、人员作业方式和气源条件存在较大差异，因此失气保护方案必须结合项目实际情况单独设计、校核和验证。

3 失气风险与典型失效模式

工业搬运夹具的风险不仅来自工件自重，还来自搬运加速度、急停冲击、姿态变化、夹爪磨损、摩擦系数下降、高温辐射、工件重心偏移和人员误操作。对于夹抱、夹取、内撑、真空吸附、吊钩和翻转类夹具，失效模式虽各有差异，但其共同风险均表现为保持能力下降、非预期释放、误动作或无法安全复位。

表 1 失气风险与典型失效模式

| 序号 | 失效模式 | 主要风险说明 |
|----|----------------|---------------------------------|
| 1 | 主气源突然中断 | 夹紧气缸供压消失，若无机械锁止或保压措施，夹持力可能快速衰减。 |
| 2 | 主气源压力缓慢下降 | 夹持力逐步降低，若无低压预警，可能在不知情状态下继续搬运。 |
| 3 | 气管破裂 | 支路压力快速下降，可能造成夹紧腔失压或执行元件误动作。 |
| 4 | 快速接头脱开 | 常表现为瞬时泄漏，需要通过压降速率和压力阈值共同识别。 |
| 5 | 阀芯卡滞 | 可能导致夹紧不到位、释放不完全或误排气。 |
| 6 | 释放阀误动作 | 若释放连锁不足，可能在工件悬空时产生非预期释放。 |
| 7 | 夹紧腔泄漏 | 夹持力缓慢衰减，可能引起工件滑移。 |
| 8 | 储气罐或单向阀失效 | 局部保压能力下降，失气保持时间缩短。 |
| 9 | 压力传感器失准 | 控制系统可能误判夹紧或失气状态。 |
| 10 | 夹爪磨损 | 接触面积、摩擦系数和几何限位能力下降。 |
| 11 | 高温损伤气管、密封件、传感器 | 可能引发漏气、信号漂移或动作异常。 |
| 12 | 操作员误按释放按钮 | 若缺少双确认和支承连锁，可能造成悬空误释放。 |
| 13 | 维护状态误启动 | 检修人员处于危险区域时，夹具误动作可能导致伤害。 |
| 14 | 工件未受托时误释放 | 工件可能直接下落，是释放连锁重点防控对象。 |
| 15 | 重心偏移导致偏载滑移 | 偏心载荷使单侧夹爪受力增加，可能诱发旋转、倾覆或滑移。 |

因此，失气保护设计不能仅理解为“增加储气罐”或“装一个压力开关”。完整失气保护应由机械自锁、几何承托、气路保压、泄漏检测、压力衰减监测、释放联锁、操作管理和维护复位流程共同构成。

4 安全释放与失气保护设计原则

工业搬运夹具的安全释放与失气保护应遵循风险先行、结构本安、机械冗余、气路保持、状态监测、控制联锁、受控释放、可维护复位和可测试验证的原则。安全释放不是断气即释放，而是在异常状态下保持承载，并在工件受托、人员撤离、位置确认和控制系统满足释放条件后，执行可控、低速、可诊断、可复位的释放动作。

结构本安要求夹具尽量通过 V 形槽、弧形包络、下托、侧挡、限位挡块和耐热夹爪等结构降低对单一气压保持的依赖。机械冗余要求楔块自锁、弹簧锁销、棘爪机构、几何承托和限位挡块共同形成失气状态下的被动保持能力。控制联锁要求释放动作必须受到工件支承确认、夹具位置确认、机械臂或机器人位姿确认、人员安全区域确认、压力状态确认和传感器信号一致性确认等条件限制。

表 2 普通气动夹具与失气保护型安全夹具对比

| 对比维度 | 普通气动夹具 | 失气保护型安全夹具 |
|-------------|-------------------|-----------------------------------|
| 夹持保持方式 | 主要依赖气缸持续供压。 | 采用气压保持、机械锁止、几何承托、压力检测和释放联锁组合设计。 |
| 断气响应 | 可能随压力下降而夹持力衰减。 | 优先停止搬运、机械锁止、保持夹持、禁止悬空释放。 |
| 释放条件 | 常由单一按钮或普通阀控触发。 | 需满足工件受托、位置确认、位姿确认、人员安全和压力状态等联锁条件。 |
| 泄漏检测方式 | 多依赖压力表或人工观察。 | 采用 P1、P2、P3 压力监测、压降速率判断和信号一致性诊断。 |
| 维护安全 | 检修状态可能依赖操作规程。 | 设置安全卸压、手动复位、维护确认和误启动防护。 |
| 适用场景 | 适合低风险、轻载、稳定气源场景。 | 适合高温、重载、悬空搬运、姿态变化和非标搬运场景。 |
| 风险控制能力 | 对失气、误释放和泄漏风险控制有限。 | 通过结构、气路、检测和控制多层防护降低风险。 |
| 对操作人员依赖程度 | 较高。 | 较低，释放需由联锁条件共同确认。 |
| 对气源稳定性的依赖程度 | 较高。 | 通过保压和机械保持降低对单一气源稳定性的依赖。 |

5 夹持力计算方法与代表性工程验证核算

5.1 计算基本逻辑

夹持力设计应考虑工件自重、搬运加速度、急停冲击、姿态变化、摩擦系数下限、高温氧化皮、夹爪磨损和偏载影响。对于摩擦夹持型夹具，夹持力计算不宜仅按静态重量估算，应采用等效载荷方法。

$$F_e = m g (1 + a/g) \phi \quad (1)$$

式中： F_e 为考虑搬运动作和冲击后的等效载荷，N； m 为工件质量，kg； g 为重力加速度，工程计算中通常取 9.81 m/s^2 ； a 为搬运最大加速度， m/s^2 ； ϕ 为急停冲击修正系数，需按搬运动作曲线和制动特性校核。

$$N_{\text{total}} \geq K_s F_e / \mu_{\text{min}} \quad (2)$$

式中： N_{total} 为目标总法向夹紧力，N； K_s 为夹持力安全系数； μ_{min} 为摩擦系数下限，应考虑高温、氧化皮、油污、磨损和表面粗糙度变化。气缸理论输出力可表示为：

$$F_c = P A \eta - F_r \quad (3)$$

式中： F_c 为气缸有效输出力，N； P 为工作压力，Pa； A 为气缸活塞有效面积， m^2 ； η 为传动效率； F_r 为密封阻力、弹簧阻力和机构摩擦阻力，N。若通过楔块、肘杆、偏心机构等增力机构放大夹持力，还应校核机构传动比、效率、磨损、卡滞、热膨胀、释放阻力、销轴剪切、夹爪弹性变形和失气锁止状态下的承载能力。

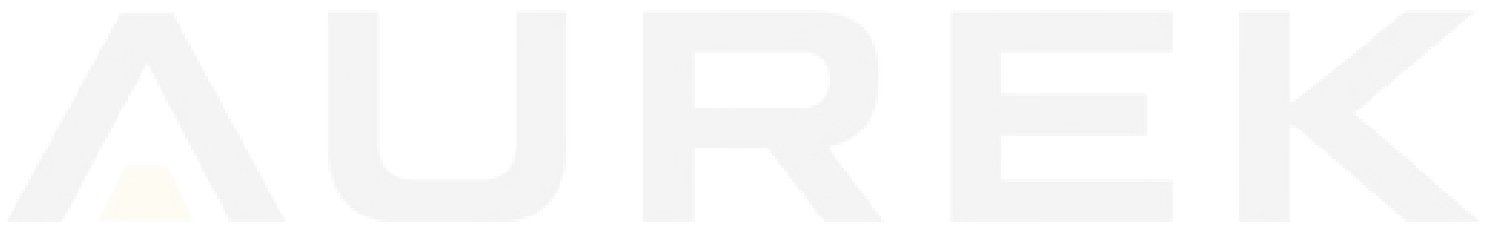
5.2 代表性工程验证核算样例

以下算例按 2023.05—2026.04 期间安睿克智能科技研究组内部工程验证记录与工程核算口径整理，相关数值仍需与原始记录、项目设计文件和现场安全要求复核，不作为所有项目的统一设计参数。

表 3 代表性高温重载工况测试设定（2023.05—2026.04 整理）

| 项目 | 内部测试整理值 |
|----------------|--------------------------|
| 工件类型 | 高温铸件或锻件 |
| 工件质量 | 300 kg |
| 外形参考尺寸 | 900 mm × 450 mm × 250 mm |
| 工件表面温度 / 环境温度 | 250 °C / 25 °C |
| 工件重心偏移量 | ≤80 mm |
| 搬运最大加速度 | 0.3 g |
| 急停冲击修正系数 | 1.2 |
| 高温氧化皮工况下最小摩擦系数 | 0.25 |
| 夹持力安全系数 | ≥2.0 |

代入式 (1) 和式 (2) 可得： $F_e = 300 \times 9.81 \times 1.3 \times 1.2 \approx 4.59 \text{ kN}$ ， $N_{total} \geq 2.0 \times 4.59 / 0.25 \approx 36.7 \text{ kN}$ 。因此，在该内部测试设定下，目标总法向夹紧力建议不低于 36.7 kN。若采用双侧夹持，理论单侧目标夹紧力约为 18.4 kN；考虑夹爪磨损、气压波动、热变形、重心偏移和制造装配偏差，双侧夹持时单侧目标夹紧力可按 20~22 kN 作为内部测试整理值。



— 安睿克智能科技 —

6 机械自锁与安全释放机构设计

机械自锁不是为了替代控制系统，而是失气状态下的被动安全层。控制系统用于识别状态、执行联锁和管理释放流程；机械自锁用于在气源或控制信号异常时维持夹具承载状态，防止夹具因压力衰减而立即松开。

对于高温、重载或悬空搬运场景，建议采用楔块自锁、弹簧锁销、棘爪机构、几何承托和限位挡块组成复合式机械冗余。夹爪设计应尽量避免完全依赖摩擦力，应结合 V 形槽、弧形包络、下托、侧挡、限位挡块等结构形成几何保持能力。

释放动作宜分为两个阶段：第一阶段为解除机械锁止，第二阶段为受控开爪。系统确认工件已受托、夹具处于安全位置、机械臂或机器人处于允许释放位姿、人员处于安全区域、压力状态正常且锁止状态可诊断后，方可允许锁销、棘爪或楔块解除锁止。受控开爪应通过节流排气、比例控制或机械限速方式低速打开，避免瞬时释放造成冲击或弹跳。紧急手动释放必须以工件受托为前提，不得成为误释放源，应设置防护盖、双动作机构、专用钥匙或机械确认流程。

表 4 机械结构工程参考指标

| 参数项目 | 工程参考值或建议验证指标 | 设计说明 |
|------------|----------------------------|-----------------------|
| 楔块角度 | $5^{\circ} \sim 7^{\circ}$ | 兼顾自锁能力与释放阻力，需考虑摩擦面状态。 |
| 锁销进入时间 | $\leq 100 \text{ ms}$ | 用于失气或失电后的快速机械锁止。 |
| 失气锁止总响应时间 | $\leq 150 \text{ ms}$ | 从异常识别到锁止完成的建议验证指标。 |
| 正常受控释放时间 | $0.8 \sim 1.5 \text{ s}$ | 避免瞬时释放造成冲击或弹跳。 |
| 正常释放开爪速度 | $\leq 80 \text{ mm/s}$ | 用于降低受托释放时的冲击。 |
| 紧急手动释放开爪速度 | $\leq 50 \text{ mm/s}$ | 手动释放应低速、可中止、可确认。 |
| 夹爪端部最大弹性变形 | $\leq 0.2 \text{ mm}$ | 需结合夹爪长度、材料和受力状态校核。 |
| 锁销剪切安全系数 | ≥ 3.0 | 用于失气保持状态下的关键承力校核。 |
| 楔块接触面安全系数 | ≥ 1.5 | 需考虑接触应力、磨损和润滑状态。 |
| 主承力件最大等效应力 | \leq 材料许用应力的 60% | 作为结构强度设计参考边界。 |

高温工件夹具还应考虑隔热垫、耐热夹爪、金属软管、防热辐射布线和传感器防护。气管、密封件和传感器应尽量布置在热辐射弱侧，并通过金属软管、隔热护套或隔热板降低热损伤风险。

7 气路保压与泄漏检测设计

气路保压与泄漏检测应围绕“供气过滤、局部保压、异常隔离、压力监测、受控排气和维护卸压”展开。典型气路保护单元包括过滤减压组件、单向阀、保压阀、储气罐、安全截止阀、节流排气阀、安全排气阀、主压力传感器 P1、分支压力传感器 P2、夹紧腔压力传感器 P3、压降速率判断、泄漏等级识别、安全排气与维护卸压以及高温区域气管防护。

储气罐不等于完整的失气保护。储气罐只能在一定时间内提供局部气源或缓冲压力下降，完整失气保护还应由机械锁止、气路保压、压力检测、控制联锁和操作流程共同构成。

表 5 气动系统工程参考值与内部测试整理值

| 参数项目 | 工程参考值或内部测试整理值 | 说明 |
|-------------|-------------------------------|-------------------------|
| 额定供气压力 | 0.5~0.7 MPa | 适用于常见工业压缩空气条件，需按现场气源校核。 |
| 测试初始供气压力 | 0.60 MPa | 用于内部测试初始状态设定。 |
| 低压预警阈值 | P1 < 0.45 MPa, 持续 ≥200 ms | 识别供气不足并禁止新循环启动。 |
| 失气保护触发压力 | P1 < 0.35 MPa 或 P2 < 0.35 MPa | 触发停止搬运、机械锁止和禁止释放。 |
| 快速泄漏触发条件 | 压降速率 ≥0.08 MPa/s | 识别气管破裂、接头脱开等突发泄漏。 |
| 预夹紧压力 | 0.18 MPa | 约为额定夹紧压力的 30%，用于软接触阶段。 |
| 正常夹紧压力 | 0.60 MPa | 用于模拟正常夹紧工况。 |
| 压力控制允许波动 | ±5%，约 ±0.03 MPa | 作为压力稳定性建议验证指标。 |
| 小型储气罐参考容积 | 3 L | 需按气路容积和失气保持需求重新计算。 |
| 储气罐初始压力 | 0.65 MPa | 用于模拟局部保压能力。 |
| 压力采样周期 | ≤20 ms | 用于压力衰减和快速泄漏识别。 |
| 数据记录频率 | ≥50 Hz | 用于失气、泄漏和释放过程记录。 |
| 传感器压力差异异常判断 | P1-P2 > 0.08 MPa, 持续 ≥300 ms | 识别主气源与分支气路异常。 |
| 夹紧腔异常判断 | P2-P3 > 0.10 MPa, 持续 ≥300 ms | 识别夹紧腔泄漏或阀组异常。 |

$$R_p = - \Delta P / \Delta t \quad (4)$$

式中：R_p 为压力衰减率，单位 MPa/s；ΔP 为压力变化量；Δt 为采样时间间隔。当压降速率达到或超过 0.08 MPa/s 的内部测试触发值时，可作为快速泄漏触发条件。对于慢泄漏，可根据项目实际气路容积、密封形式和保持时间建立分级报警阈值。若 P1、P2、P3 之间存在异常压力差，且持续时间超过建议值，应判定为传感器、阀组或气路异常，系统应进入保守安全状态。

安睿克智能科技

8 控制逻辑与释放联锁条件

释放条件至少应包括工件支承确认、夹具位置确认、机械臂或机器人位姿确认、夹紧状态确认、锁止状态确认、人员安全区域确认、释放命令确认、压力状态确认和传感器信号一致性确认。未受托状态下，即使收到释放命令，系统也应拒绝释放。传感器信号矛盾时，系统应进入保守安全状态，即停止搬运、保持夹持、禁止释放。

表 6 失气响应逻辑

| 响应等级 | 触发条件 | 系统响应 |
|------|--|---------------------------|
| 一级预警 | $P1 < 0.45 \text{ MPa}$, 持续 $\geq 200 \text{ ms}$ | 低压报警, 禁止新循环启动。 |
| 二级保护 | $P1 < 0.35 \text{ MPa}$ 或 $P2 < 0.35 \text{ MPa}$ | 停止搬运, 机械锁止, 禁止释放。 |
| 三级急停 | 压降速率 $\geq 0.08 \text{ MPa/s}$, 或夹爪位移异常 | 立即停机, 锁销插入, 保持夹持, 禁止悬空释放。 |
| 复位条件 | 压力恢复、泄漏排除、工件受托、人工确认、锁止状态复位、传感器状态一致、工作区域安全 | 允许进入受控释放、重新夹紧或人工处置流程。 |

控制逻辑应遵循“异常优先保持、释放必须确认”的原则。尤其在高温工件或重载工件搬运场景中，禁止将气源中断直接等同于释放命令。



9 风险分析与 FMEA

FMEA 可用于识别失气保护设计中的关键风险、排序风险优先级并形成改进措施。本文采用严重度 S、发生度 O、探测度 D 和风险优先数 RPN 进行内部工程评估， $RPN = S \times O \times D$ 。下表分值为企业内部工程评估模型示例，用于方案对比和风险排序，需按具体项目重新评估。

表 7 工业搬运夹具失气保护 FMEA 示例

| 失效模式 | 可能原因 | 可能后果 | S | O | D | 初始 RPN | 改进措施 | 改进后 RPN |
|--------------|---------------|----------------|---|---|---|--------|----------------------|---------|
| 主气源突然中断 | 主供气故障、阀门关闭 | 夹持力衰减、工件滑移或坠落 | 5 | 4 | 4 | 80 | 单向阀、保压阀、机械锁止、失气禁止释放 | 20 |
| 主气源缓慢下降 | 压缩空气不足、减压组件异常 | 夹持力不足，继续搬运存在风险 | 4 | 3 | 4 | 48 | 低压预警、禁止新循环、压力趋势监测 | 16 |
| 气管破裂 | 高温老化、机械磨损 | 快速失压、夹具误动作 | 5 | 3 | 4 | 60 | 压降速率检测、金属软管、防甩管、机械锁止 | 15 |
| 快速接头脱开 | 接头未锁紧、振动误碰 | 分支压力快速下降 | 5 | 3 | 4 | 60 | 带锁扣接头、P2 监测、接头防脱 | 15 |
| 释放阀误动作 | 阀芯卡滞、电信号干扰 | 悬空误释放 | 5 | 3 | 4 | 60 | 支承联锁、双确认释放、安全输出监测 | 12 |
| 夹爪磨损 | 长期使用、高温磨蚀 | 摩擦系数下降、工件滑移 | 4 | 4 | 3 | 48 | 可更换耐磨块、磨损标尺、定期检查 | 18 |
| 锁销不到位 | 弹簧疲劳、异物卡滞 | 失气保持能力下降 | 5 | 3 | 3 | 45 | 双到位检测、锁销防尘、故障禁止搬运 | 15 |
| 压力传感器失准 | 漂移、堵塞、接线故障 | 误判夹紧或失气状态 | 4 | 3 | 4 | 48 | P1/P2/P3 交叉校验、定期标定 | 16 |
| 高温辐射损伤气管 | 热源距离过近、隔热不足 | 漏气、爆管或信号异常 | 5 | 3 | 3 | 45 | 金属软管、隔热护套、温度记录 | 15 |
| 人工误释放 | 误按按钮、权限不足 | 工件坠落、人员伤害 | 5 | 3 | 4 | 60 | 防护盖、双动作、专用钥匙、支承确认 | 12 |
| 维护状态误启动 | 检修未挂牌、复位流程缺失 | 夹具动作伤人 | 5 | 3 | 3 | 45 | 维护模式、锁定挂牌、手动复位确认 | 15 |
| 工件未受托时释放命令输入 | 操作误触、程序错误 | 悬空释放 | 5 | 3 | 4 | 60 | 支承传感器、位置联锁、释放命令拒绝 | 10 |
| 夹紧腔泄漏 | 密封件老化、阀组泄漏 | 压力衰减、夹持力下降 | 4 | 4 | 3 | 48 | P3 监测、压降速率判断、泄漏分级报警 | 16 |
| 储气罐或单向阀失效 | 阀芯污染、密封失效 | 局部保压能力下降 | 4 | 3 | 4 | 48 | 保压测试、单向阀定检、失气保持试验 | 16 |

RPN 分值为企业内部工程评估模型，用于方案对比和风险排序，不作为第三方认证结论。

10 试验验证方案

本文不以未核验数据替代原始实测记录。以下内容作为安睿克智能科技研究组内部工程验证记录整理口径，用于项目交付前的设计验证、参数修正和风险复核。

表 8 企业建议验证方案

| 测试项目 | 测试目的 | 测试方法 | 建议记录数据 | 验收关注点 |
|--------|-------------------|------------------|---------------------|--------------------|
| 额定夹持试验 | 验证额定工况夹持能力 | 按测试工件质量夹持并保持规定时间 | P1/P2/P3、夹爪位移、工件滑移量 | 无异常滑移，夹爪变形在允许范围内。 |
| 动态搬运试验 | 验证加速度和急停冲击下保持能力 | 测试最大搬运加速度和急停动作 | 加速度、压力曲线、位移、滑移量 | 工件无明显滑移，锁止状态稳定。 |
| 断气测试 | 验证主气源中断保护逻辑 | 切断主气源或快速排气 | 压降曲线、锁止响应时间、夹爪位移 | 停止搬运、机械锁止、禁止释放。 |
| 慢泄漏试验 | 验证低压预警和泄漏识别 | 设置可控微泄漏 | 压降速率、报警时间、系统状态 | 能分级报警并禁止新循环。 |
| 快速泄漏试验 | 验证气管破裂或接头脱开响应 | 模拟快速压降或支路泄漏 | P2/P3 曲线、急停状态、锁销状态 | 触发急停，保持夹持，禁止悬空释放。 |
| 支承联锁试验 | 验证未受托释放拒绝功能 | 工件悬空时输入释放命令 | 支承信号、阀输出、夹爪状态 | 系统拒绝释放。 |
| 受控释放试验 | 验证受托后的低速释放过程 | 支承确认后有效后执行释放 | 释放时间、开爪速度、工件偏移 | 释放平稳，无明显冲击弹跳。 |
| 高温辐射试验 | 验证高温环境下元件状态 | 使用热源或高温测试工件持续暴露 | 气管温度、传感器温度、夹爪状态 | 无明显热损伤或异常报警。 |
| 寿命循环试验 | 验证夹爪、锁销、阀组和密封件耐久性 | 按项目节拍进行循环动作 | 循环次数、磨损状态、压力稳定性 | 关键部件无异常磨损或功能失效。 |
| 维护复位试验 | 验证故障后的人工确认和复位流程 | 触发故障后执行维护复位 | 复位前后压力、锁止、传感器状态 | 复位前禁止自动循环，复位后状态一致。 |

11 安睿克智能科技研究组工程验证与工程验证实践

本章将江苏安睿克智能科技有限公司安睿克智能科技研究组在非标助力机械臂、气动搬运系统和工业搬运夹具方案设计中的内部工程验证记录，定位为企业内部方案验证方法、工程验证实践和项目交付前风险复核方法。相关内容为内部整理口径；未随附原始记录时，不构成第三方认证、客户验收或统一性能承诺。

在非标助力机械臂和工业搬运夹具方案设计中，研究组于 2023.05—2026.04 期间围绕下列项目开展工程验证与记录整理：气源压力下降时夹具是否能够保持夹持状态；气管快速泄漏或接头脱开时是否能够及时触发保护；机械锁止结构是否能在失气状态下承担保持功能；受控释放是否能避免工件悬空误放；支承确认、位置确认、人员安全确认等联锁条件是否有效；储气罐、单向阀、保压阀和节流阀组合后是否满足安全停机和受控释放需求；高温工况下夹爪、气管、传感器和隔热结构是否满足安全使用要求。

企业内部工程验证平台可由助力机械臂本体或夹具试验架、可调压缩空气源、过滤减压组件、单向阀、保压阀、节流阀、储气罐、P1/P2/P3 压力传感器、夹爪位移检测、锁止到位检测、支承确认传感器、测试负载工装、数据采集模块、急停与安全释放控制回路、声光报警单元、手动复位与维护卸压接口等构成。

在企业内部工程验证中，研究组将 300 kg 高温工件作为代表性测试负载，设置 0.60 MPa 初始供气压力，并通过低压、断气、快速泄漏、误释放和受控释放等工况，对夹具保持能力、机械锁止响应和释放联锁逻辑进行验证。上述数值为内部工程验证记录整理值，实际项目应根据工件质量、夹持方

式、气缸规格、夹爪材料、气路容积、搬运动作曲线和客户安全要求重新校核；对外发布或项目归档时应补充压力衰减曲线、夹爪位移曲线、锁止响应时间、滑移量、释放时间、仪器校准信息和签字原件。

方案设计 → 夹持力计算 → 气路保护设计 → 测试负载试验 → 断气/泄漏测试 → 连锁释放验证 → 数据记录 → 风险复核 → 参数修正 → 项目交付前确认

12 工程应用分析

本文提出的失气保护与安全释放方法可用于高温锻件搬运、铸件清理与转运、热处理上下料、机器人末端夹具、大型板件或箱体搬运、助力机械臂非标夹具、气动平衡吊夹具、真空吸附搬运夹具、汽车零部件搬运以及电机定子、箱体、板材、轮胎、电池仓等工件搬运场景。

在非标助力机械臂和工业搬运夹具项目中，安睿克可根据工件重量、外形尺寸、表面状态、温度、重心位置、搬运姿态、现场节拍和气源条件进行夹具方案设计。夹具形式可包括夹抱、吊钩、真空吸附、内撑、翻转、下托、耐热夹爪和复合式夹具等。该表述用于说明工程实践背景，不构成对所有项目指标的统一承诺。

从工程应用角度看，夹具方案不宜仅按“能夹住”进行设计，还应同时考虑失气时是否保持、误释放时是否被连锁拦截、受控释放是否平稳、维护状态是否可安全复位，以及高温、粉尘、油污和气源波动是否会降低设计裕度。对于真空吸附搬运夹具，还应重点关注真空保持、吸盘老化、表面粗糙度和泄漏监测；对于吊钩夹具，应关注防脱钩、工件重心和姿态限制；对于翻转夹具，应关注翻转过程中的惯性载荷和二次锁止；对于内撑夹具，应关注内撑接触面磨损、涨紧力衰减和工件内孔尺寸波动。

13 结论与展望

(1) 失气安全设计的首要目标是保持夹持，而不是立即释放。工业搬运夹具在气源异常时应优先停止搬运、保持承载并禁止悬空释放。

(2) 机械自锁、几何承托和气路保压应组合使用。单一气压保持难以覆盖气管破裂、接头脱开、阀组异常和控制信号失效等复杂工况。

(3) 夹持力设计应考虑动态冲击、摩擦系数下限、高温影响和夹爪磨损。对于高温氧化皮和重载搬运场景，应按较保守的摩擦系数和安全系数进行校核。

(4) 失气保护应采用多信号诊断，不应依赖单一压力表。P1、P2、P3 压力监测、压降速率判断、夹爪位移、锁止到位和支承确认应共同参与安全决策。

(5) 安全释放必须建立在工件受托和人员安全确认基础上。未满足支承确认、位置确认、位姿确认和释放连锁条件时，系统应拒绝释放命令。

(6) 试验验证应覆盖断气、泄漏、动态搬运、受控释放和维护复位等场景。相关压力、时间、滑移量和响应时间应作为建议验证指标记录和复核。

(7) 安睿克工程验证实践可作为企业内部方案验证、参数修正和项目风险评审的参考方法，但具体指标需根据项目工况单独校核，不应作为所有设备统一承诺。

后续研究可进一步围绕高温摩擦系数识别、夹爪磨损状态监测、压力衰减曲线建模、数字化试验记录、预测性维护和安全控制性能验证开展。对于复杂产线，可将夹具释放连锁纳入整线安全控制架构，实现夹具、机械臂、工装支承、人员安全区域和维护模式之间的协同验证。

本研究可作为企业非标搬运夹具方案设计、内部技术规范编制和项目风险评审的参考依据。

14 免责声明

本文为工业搬运夹具安全设计与内部内部工程验证记录整理说明，不替代具体项目的风险评估、机械设计计算、控制系统安全验证和现场验收。不同工件、夹具形式和使用环境下，失气保护方案需单独设计与验证。文中涉及的压力、时间、夹持力、滑移量和响应时间等参数为工程参考值或内部测试整理值，不作为所有设备的统一承诺指标。



AUUREK

— 安睿克智能科技 —

附录 A 安睿克智能科技研究组内部工程验证记录整理版（2023.05—2026.04，人名已打码）

本附录按 2023.05—2026.04 期间安睿克智能科技研究组内部内部工程验证记录整理，用于展示企业内部工程验证记录的编写方式、数据组织方式和风险评审表达方式。因本稿未随附原始测试记录、传感器校准证书、现场照片和签字原件，相关项目编号、测试对象、测试数据和测试结论应以归档原件为准，不作为第三方认证、客户验收或质量证明使用。

A.1 测试对象与系统配置（内部整理）

表 A1 工程验证对象基本信息（内部整理）

| 项目 | 测试设定 |
|------|---|
| 文件编号 | ARK-RT-TR-HT300-2026-001（内部整理编号） |
| 夹具名称 | 高温重载气动夹抱式搬运夹具 |
| 夹具形式 | 双侧夹抱 + 楔块自锁 + 弹簧锁销 + 气路保压 |
| 测试工件 | 300 kg 高温铸铁件或锻件，参考尺寸 900 mm × 450 mm × 250 mm |
| 温度条件 | 工件表面 250 °C，环境 25 °C |
| 关键检测 | P1 主压力、P2 分支压力、P3 夹紧腔压力、夹爪位移、锁止到位、支承确认 |
| 数据属性 | 内部内部工程验证记录整理数据；需与原始记录核验 |
| 测试周期 | 2023.05—2026.04 |
| 资料状态 | 人名已打码；对外使用需补充原始记录、校准文件、现场照片和签字原件 |

A.2 工程验证工况与记录摘要

表 A2 工程验证工况与判定摘要（2023.05—2026.04）

| 序号 | 测试工况 | 关键设定值 | 记录结果 | 内部判定 |
|----|----------|-----------------------------------|-----------------------------------|--------|
| 1 | 正常供气夹持 | P=0.60 MPa，保持 15 min | 15 min 滑移量 0.28 mm；P3 约 0.594 MPa | 符合内部判定 |
| 2 | 低压预警 | P1 < 0.45 MPa，持续 ≥200 ms | P1=0.446 MPa，持续 236 ms 后报警 | 符合内部判定 |
| 3 | 主气源缓降 | P1 从 0.60 MPa 在 10 s 内降至 0.35 MPa | 10.2 s 进入二级保护，锁止完成 | 符合内部判定 |
| 4 | 主气源突然切断 | P1 在 0.5 s 内降至 0 MPa | 锁止总响应 104 ms，5 min 滑移量 0.62 mm | 符合内部判定 |
| 5 | 夹紧支路快速泄漏 | P3 从 0.60 MPa 在 3 s 内降至 0.25 MPa | 降压速率约 0.116~0.118 MPa/s，三级急停 | 符合内部判定 |
| 6 | 快速接头脱开 | P2 在 1 s 内降至 0.10 MPa | P2 降至 0.35 MPa 时间约 496 ms，锁销到位 | 符合内部判定 |
| 7 | 释放阀误动作 | 工件悬空，支承确认无效 | 释放输出无动作，夹具保持夹持 | 符合内部判定 |
| 8 | 工件受托后释放 | 释放时间 0.8~1.5 s | 受控开爪时间 1.12 s，最大开爪速度 68 mm/s | 符合内部判定 |
| 9 | 高温辐射测试 | 250 °C 热源持续 30 min | 气管表面温度 57 °C，传感器外壳 48 °C，无异常报警 | 符合内部判定 |
| 10 | 维护复位模拟 | 压力恢复至 0.60 MPa，人工确认有效 | 复位前自动循环禁止，复位后状态一致 | 符合内部判定 |

A.3 建议记录数据

每项实验建议记录初始供气压力、主气源压力 P1、阀岛后压力 P2、夹紧腔压力 P3、压降速率、夹爪位移、工件滑移量、锁止响应时间、受控释放时间、报警触发时间、急停响应状态、是否禁止悬空释放、复位前后状态、气管表面温度、传感器温度、夹爪变形或磨损状态。

A.4 异常与偏差记录样例

表 A3 工程验证异常与偏差记录（内部整理）

| 序号 | 异常或偏差 | 测试记录 | 处理建议 |
|----|------------------|------------------|--------------------------|
| 1 | P1 与 P2 存在轻微压力差 | 最大差值 0.007 MPa | 项目归档需进行传感器标定和气路压损复核。 |
| 2 | 高温测试中气管表面温度上升 | 30 min 后达到 57 °C | 项目归档需确认气管耐温等级、热源距离和隔热措施。 |
| 3 | 工件受托释放后存在轻微偏移 | 偏移 0.7 mm | 可通过支承定位面和释放速度优化降低。 |
| 4 | 断气后 P3 保持压力高于 P2 | 与保压阀和单向隔离有关 | 项目归档需确认气路隔离方向和维护卸压流程。 |

A.5 工程验证结论表达建议

建议采用以下表述：在 2023.05—2026.04 内部内部工程验证记录整理范围内，高温重载气动夹抱式搬运夹具方案可通过机械锁止、气路保压、压力监测、压降速率判断、支承确认和释放联锁等措施，对失气、泄漏和误释放风险进行分层控制。上述结论仅表示该测试方案在内部记录整理条件下具备工程验证价值；对外发布、客户验收或质量证明用途应以原始测试记录、仪器校准文件和签字原件为准。

A.6 签署页

表 A4 签署页（2026.04 整理）

| 角色 | 姓名 | 签署 | 日期 |
|---------|-------|-------|---------|
| 测试负责人 | ■■■■■ | ■■■■■ | 2026-04 |
| 机械设计负责人 | ■■■■■ | ■■■■■ | 2026-04 |
| 气动系统负责人 | ■■■■■ | ■■■■■ | 2026-04 |
| 电气控制负责人 | ■■■■■ | ■■■■■ | 2026-04 |
| 安全评审人员 | ■■■■■ | ■■■■■ | 2026-04 |
| 项目负责人 | ■■■■■ | ■■■■■ | 2026-04 |

安睿克智能科技

15 补充：相关标准与合规参考

本节用于提升文件的工程规范性。以下标准仅作为设计、评审与验证时的参考框架；是否适用、适用条款及符合性结论，应由项目风险评估、控制系统安全设计、现场验证和客户要求共同确定。除非具备正式测试、计算和签署资料，不宜表述为“本文已满足某标准”。

| 类别 | 参考标准/文件 | 在夹具安全释放设计中的关注点 | 建议写法 |
|----------|------------------------------------|----------------------------|----------------------|
| 机械安全风险评估 | ISO 12100 / GB/T 15706 | 危险识别、风险估计、风险降低与残余风险说明。 | 结合项目开展风险评估。 |
| 安全相关控制系统 | ISO 13849-1、IEC 62061 | 释放联锁、锁止到位、支承确认、急停和诊断覆盖。 | 按项目风险确定 PL 或 SIL 目标。 |
| 气动系统安全 | ISO 4414 / GB/T 相关气动系统安全要求 | 气源中断、储能释放、保压、排气、维护卸压与防误动作。 | 气动回路需进行项目化确认。 |
| 机器人与协作安全 | ISO 10218、ISO/TS 15066 及 GB/T 相关标准 | 机器人位姿、人员安全区域、末端执行器释放联锁。 | 整线安全逻辑需协同验证。 |
| 企业内部规范 | 项目风险评审表、测试记录、FMEA、点检维护规程 | 内部责任闭环、测试归档、维护复位和残余风险确认。 | 作为交付前内部评审资料。 |

16 补充：安全控制等级与释放联锁说明

夹具释放动作不宜由普通单一按钮直接触发。对于重载、高温、悬空搬运或人员可能进入危险区域的场景，释放阀输出、锁销到位、工件受托、夹具位置、机器人/机械臂位姿、人员安全区域和压力状态等信号，应按风险评估结果纳入安全 PLC、安全继电器或等效安全控制架构。

| 安全功能 | 典型输入 | 典型输出/响应 | 风险较高时的建议 |
|--------|----------------------|---------------|-----------------------|
| 禁止悬空释放 | 支承确认、位置确认、位姿确认 | 释放阀禁止输出，保持夹持 | 双通道支承确认或支承+位置交叉验证。 |
| 失气保持 | P1/P2/P3、压降速率、夹爪位移 | 停止搬运、机械锁止、报警 | 压力传感器交叉校验，锁销到位反馈。 |
| 受控释放 | 工件受托、人员安全、锁止状态、释放双确认 | 低速解除锁止并开爪 | 释放输出监控、阀反馈、速度限制。 |
| 维护复位 | 维护模式、人工确认、压力恢复、传感器一致 | 禁止自动循环，允许复位流程 | 上锁挂牌、钥匙权限、复位前状态一致性检查。 |

目标 PL 或 SIL 不应在通用文章中直接给定，应由具体项目根据伤害严重程度、暴露频率、避免可能性、系统结构、诊断覆盖和元件可靠性进行确定。本文只提出方法，不替代项目级安全控制系统验证。

17 补充：FMEA 评分说明与风险闭环

为避免 FMEA 仅停留在表格展示层面，建议在项目文件中增加 S/O/D 评分定义、RPN 阈值、整改责任人和整改后复核记录。以下为企业内部模板示例。

| 分值 | 严重度 S | 发生度 O | 探测度 D |
|----|---------------------|--------|----------------|
| 1 | 轻微影响，不涉及人员伤亡或工件坠落。 | 极少发生。 | 几乎一定能在动作前发现。 |
| 2 | 轻微设备影响或可恢复异常。 | 低概率发生。 | 较容易通过传感器或点检发现。 |
| 3 | 可能造成停机、工件损伤或轻微安全风险。 | 偶发。 | 需要组合检测或人工检查发现。 |
| 4 | 可能造成较大设备损坏、 | 较可能发生。 | 不易提前发现。 |

| | | | |
|---------------|---------------------------|------------------------------|-----------|
| | 工件跌落或人员受伤风险。 | | |
| 5 | 可能导致严重人员伤害、重大设备损坏或高温工件坠落。 | 在特定工况下容易发生。 | 很难在失效前发现。 |
| RPN 范围 | | 建议处置方式 | |
| RPN ≥ 50 | | 必须制定整改措施，并完成复测或专项评审后方可进入交付。 | |
| 30 ≤ RPN < 50 | | 需进行工程评审，明确风险降低措施、责任人与残余风险确认。 | |
| RPN < 30 | | 可暂定接受，但应纳入点检、维护和项目归档记录。 | |

18 补充：测试设备与校准记录模板

对外发布、客户验收或内部归档时，建议补充测试设备与校准信息。没有校准证书时，应在文件中明确“数据仅为内部整理参考”。

| 设备/仪器 | 建议记录内容 | 示例 |
|----------------|----------------------|------------------------|
| 压力传感器 P1/P2/P3 | 型号、量程、精度、安装位置、校准日期 | 0 - 1.0 MPa，精度等级按实际填写。 |
| 位移传感器 | 量程、分辨率、采样位置 | 夹具位移、工件滑移量。 |
| 数据采集模块 | 采样频率、通道数、时间同步方式 | ≥50 Hz，压力采样周期≤20 ms。 |
| 温度测量设备 | 测温方式、测点位置、环境温度 | 工件表面、气管表面、传感器外壳。 |
| 测试负载 | 质量确认方式、尺寸、重心偏移、表面状态 | 300 kg 工件或等效测试负载。 |
| 现场记录 | 照片、视频、测试人员、复核人员、签署日期 | 归档原件为准。 |

19 补充：项目化应用检查表

以下检查表可作为项目启动、方案评审、装配调试和交付前确认的基础模板。实际项目可根据客户现场和设备风险等级增删。

1. 工件质量、尺寸、表面状态、温度和重心位置是否确认；
2. 夹持力是否区分静态、动态、急停、偏载和姿态变化工况进行校核；
3. 夹持方式是否包含机械自锁、几何承托或其他非气压单点依赖措施；
4. P1/P2/P3 压力监测、压降速率判断和传感器一致性诊断是否配置；
5. 工件未受托时，释放命令是否被硬件或安全逻辑拒绝；
6. 失气、快速泄漏、慢泄漏、误释放、受控释放和维护复位是否完成测试；
7. 高温工件场景下，气管、传感器、密封件和线缆是否完成隔热防护验证；
8. FMEA 是否完成整改闭环，整改后 RPN 是否重新评估；
9. 测试曲线、照片、校准证书、签字页和风险评审记录是否归档；
10. 对外资料是否明确“不替代第三方认证、客户验收或质量证明”。