

气动助力机械臂

操作手感影响因素与评价方法研究

企业技术白皮书

出品单位：江苏安睿克智能科技有限公司

编制：安睿克研发组

文档类型：工程研究、评价方法与样机实测数据

版本：V1.0 日期：2026年6月

本白皮书系统阐述气动助力机械臂操作手感的工程定义、影响因素、量化评价方法与力学分析，文中数据来自江苏安睿克智能科技有限公司工程样机的实测结果与现场调试记录，具体项目的参数取值，应结合客户实际工况与安全要求进一步核定。

— 安睿克智能科技有限公司 —

摘要

气动助力机械臂在搬运、装配、上下料等工序中需要操作者直接推动、牵引、定位与释放工件，其“操作手感”长期以来多被现场人员以“轻不轻”“顺不顺”“有没有顿挫”“停得稳不稳”等主观语言描述。本文认为，操作手感并非单纯的主观感受，而是由操纵力、启动力、匀速运动力、停止漂移、回弹量、响应延迟、关节阻尼、末端惯量、夹具自重、气源压力稳定性、空载/负载压力切换逻辑以及人机工程因素共同决定的综合性能，可以从主观描述转化为可测量、可对比的工程指标。本文基于江苏安睿克智能科技有限公司气动助力机械臂工程样机（编号 ARK-S01）与现场调试经验，构建一套面向设计、调试与验收的操作手感评价方法，采用数字推拉力计、压力传感器、位移传感器、角度传感器、响应时间采集与操作者主观评分相结合的手段，对不同负载、不同作业半径、不同夹具状态下的操作手感进行量化分析，并通过力学模型、典型算例、测试记录表与 FMEA 风险分析说明评价流程与诊断思路。需要说明的是，文中所列参数、算例与测试数据来自 ARK-S01 工程样机的实测与分析，相关结论已通过样机测试验证；面向具体项目时，相关数值应结合客户工况和安全要求进一步核定，并以系统化、周期性的测试数据评估设备的长期性能。

关键词：气动助力机械臂；操作手感；操纵力；平衡调节；末端惯量；响应延迟；人机工程；评价方法

目录

一、引言	3
二、研究对象与操作手感的工程定义	3
三、操作手感影响因素分析	4
四、操作手感量化评价指标体系	5
五、力学模型与计算方法	7
六、实验方案与测试流程	8
七、典型算例分析	9
八、测试数据记录表与评价方法	10
九、FMEA 风险分析	12
十、优化建议与工程应用	13
十一、结论	14
十二、参考测试记录附录	14



AUUREK

— 安睿克智能科技 —

一、引言

气动助力机械臂广泛应用于汽车零部件、机械加工、箱体与板材搬运、高温工件转运、装配上下料等场景。与单纯的起吊设备不同，助力机械臂要求操作者在作业过程中直接推动、牵引、定位并释放工件，设备只承担“去除重力、保留操控”的助力作用。正因如此，设备的操作手感会直接影响作业效率、定位准确性、操作者疲劳程度以及现场安全风险。在实际工况中，操作手感的好坏往往比额定负载等单一指标更能决定一台设备是否“好用”。

现场对操作手感的评价多以主观语言出现，例如“推起来有点沉”“刚启动有顿挫”“放手以后会往上飘或往下沉”“停住以后会回弹”“空载和负载切换不够自然”等。这些描述看似主观、模糊，但本文认为，它们背后均可对应到具体的、可测量的物理量：“沉”对应操纵力偏大，“顿挫”对应启动动力过高或运行阻力波动，“上飘 / 下沉”对应气动平衡压力偏差，“回弹”对应气体可压缩性与末端惯量，“切换不自然”对应压力过渡与响应延迟。因此，将主观手感转化为工程指标，是实现设计优化与质量一致性的前提。

基于上述背景，本文围绕以下问题展开研究：

1. 操作手感能否从主观描述转化为可量化、可复现的工程指标？
2. 哪些机械、气动、控制与人机工程因素会影响操作手感，影响机理如何？
3. 如何用统一的测试方法，评价不同样机、不同夹具与不同负载条件下的手感差异？
4. 如何将评价结果反馈到气缸选型、气路调节、夹具减重、关节阻尼匹配与操作扶手设计中？

为聚焦研究重点，本文将研究对象限定为以气动平衡原理驱动硬臂式助力机械臂，涵盖立柱式、倒挂式、移栽式等安装形式，末端夹具包括吊钩、夹抱、真空吸盘、气胀轴及各类定制夹具。本文重点研究人工操纵过程中的力学表现与控制响应，不讨论全自动机器人的轨迹规划与闭环控制。

江苏安睿克智能科技有限公司长期从事气动助力机械臂的设计、制造与现场应用。本文由安睿克研发组编制，依托 ARK-S01 工程样机与多类现场工况，建立了一套可重复、可记录、可对比的操作手感评价体系，使“手感”这一传统上依赖经验判断的指标，能够被测量、被分析并被持续改进。文中结论均经样机测试验证，并可结合具体工况进一步修正。

二、研究对象与操作手感的工程定义

如前所述，本文的研究对象为气动平衡式硬臂助力机械臂及其末端夹具系统。这类设备通过气缸输出力矩与负载力矩的近似平衡，使工件在空间中处于“随遇平衡”状态，操作者只需施加较小的力即可完成升降、水平移动、定位与释放。研究对象的边界包括本体臂架，主、中、前关节，气动平衡回路，控制阀组，操作扶手与末端夹具，但不包含全自动控制系统。

2.1 操作手感的工程定义

本文将“操作手感”定义为：在规定的负载、作业半径、行程、气源压力与夹具状态下，操作者通过操作扶手或夹具手柄使气动助力机械臂完成启动、升降、水平移动、停止、定位、夹取与释放等动作时，所需操纵力、响应稳定性、运动连续性、停止保持能力以及人体舒适性的综合表现。这一定义强调四点：其一，手感是在确定工况下的表现，脱离负载、半径与压力谈手感没有意义；其二，手感是动作全过程的表现，而非某一瞬间；其三，手感既包含力学量，也包含人机工程因素；其四，手感最终应可被测量与评价。

2.2 操作手感是综合指标而非单一指标

本文认为，操作手感不宜仅用“轻”或“不轻”来描述，而应拆解为力学、稳定性、响应、动态与人机工程等多类指标，并辅以操作者主观评价进行交叉验证。各指标的工程意义如表 1 所示。

表 1 操作手感指标分类与工程意义

指标类别	具体指标	工程意义
力学指标	启动力、匀速运动力、峰值操纵力	判断设备是否省力、是否存在卡滞
稳定性指标	停止漂移、回弹量、压力波动	判断定位与保持的稳定性
响应指标	按钮响应延迟、压力建立时间、动作滞后	判断气路与控制的灵敏度
动态指标	末端惯量、关节阻尼、运动过冲	判断推拉是否发飘或笨重
人机工程指标	扶手高度、握持角度、按钮位置、双手姿态	判断长期操作的疲劳程度
主观评价	轻重、顺滑、稳定、疲劳评分	与客观数据进行关联验证

三、操作手感影响因素分析

操作手感由多种因素叠加形成，单独看任何一个因素都不足以解释现场反馈。本文将主要影响因素归纳为气动平衡、机械结构、夹具自重与末端惯量、气路控制与空载 / 负载切换、人机工程五个方面，并分别说明其影响机理。

3.1 气动平衡因素

气动助力机械臂依靠气缸输出力矩与负载力矩的近似平衡实现助力。若平衡压力偏低，操作者需要额外向上用力，表现为“发沉”；若压力偏高，设备会出现上浮趋势，表现为“往上飘”。在实际工况中，影响气动平衡的关键因素包括：空载压力与负载压力的调节是否合理、气源压力是否稳定、减压阀的调节灵敏度、气缸的摩擦与密封阻力，以及储气罐和单向阀对压力波动的缓冲作用。其中，空载 / 负载切换时若压力过渡不平滑，极易产生突然上升或下降的趋势，是手感评价中需要重点关注的环节。

3.2 机械结构因素

机械结构主要影响启动阻力、运行顺滑性与停止稳定性。主关节、中间关节与前端关节的转动阻力，轴承、销轴、衬套与滚轮的摩擦状态，以及关节刹车是否存在拖滞，都会直接体现在启动力与匀速操纵力上。此外，主臂与副臂的刚度、连接部位的间隙、臂长变化以及不同半径位置下的力矩变化，也会影响操作者在不同位置感受到的力的大小与一致性。在实际工况中，关节润滑不足、轴承污染或刹车间隙不当，往往是“启动费力、运行有顿挫”的常见原因，已在样机测试中得到验证，并可通过维护加以改善。

3.3 夹具自重与末端惯量因素

夹具往往是影响手感的重要来源。即便机械臂本体平衡良好，夹具过重、重心偏移或惯量过大，也会导致末端发沉、摆动、回弹或定位困难。本文认为，非标夹具的设计不应只关注“能否夹住工件”，还应关注夹具自重、重心位置、与工件组合后的总质量与转动惯量，以及真空吸盘、夹爪、气胀轴等不同形式对手感的不同影响。对于翻转类夹具，还需核算 0°、45°、90° 等不同角度下的重心变化；气管、真空管与电缆的拖拽，也会在水平移动与回位过程中改变末端的受力，使手感变“重”或回位“不自然”。

3.4 气路控制与空载 / 负载压力切换因素

气路控制决定动作响应是否自然。按钮触发到气缸响应之间的延迟、阀组通径与负载的匹配、节流阀调节的松紧、气管长度与弯折，以及气源中水分、油分与杂质对阀件灵敏度的影响，都会改变操作者对“跟手”程度的感受。空载 / 负载压力切换是其中最敏感的环节：若加载与卸载时压力差过大或控制逻辑不合理，会产生瞬间冲击，表现为放件或取件瞬间的突然上升或下沉。本文建议为切换过程设置压力过渡与验证逻辑，并将切换冲击纳入响应与稳定性测试。

3.5 人机工程因素

即使力学指标良好，扶手位置与操作姿态不合理，操作者仍会认为设备“不好用”。在实际工况中，扶手高度是否接近操作者肘部舒适高度、按钮能否在自然握持姿态下触发、升降与夹紧 / 释放按钮是否具备防误触设计、双手操作是否符合安全逻辑、操作视线是否被夹具或工件遮挡，以及长时间重复操作对腕部与肩部造成的疲劳，都会显著影响主观评价。因此，本文认为人机工程因素应与力学指标并列纳入评价，并在测试中记录操作者的身高、臂展与操作经验，以解释不同人员之间的评分差异。

四、操作手感量化评价指标体系

为将操作手感转化为可测量的工程指标，本文建立一套量化评价指标体系，主要包括操纵力、启动力与匀速运动力、停止漂移与回弹量、响应延迟与压力波动等客观指标，以及与之关联的主

观评分。各指标的符号、单位与推荐测量工具汇总如表 2 所示。

表 2 操作手感量化指标汇总

指标	符号	单位	推荐测量工具	说明
启动力	F_{start}	N	推拉力计	启动瞬间最大操作力
匀速运动力	F_{cv}	N	推拉力计	稳定运动区间平均操作力
峰值操纵力	F_{peak}	N	推拉力计	动作周期内最大力
停止漂移	D_{stop}	mm	位移传感器 / 激光测距	松手后规定时间内位移
回弹量	R	mm	位移传感器 / 视频分析	停止后反向最大位移
响应延迟	t_d	ms	数据采集系统	按钮到动作响应的的时间
压力波动	ΔP	MPa	压力传感器	运动或切换过程压力变化
等效惯量	J_{eq}	$\text{kg}\cdot\text{m}^2$	计算 / 试验辨识	反映末端动态负担
关节阻尼	B_j	$\text{N}\cdot\text{m}\cdot\text{s}/\text{rad}$	角度传感器 + 力测试	反映水平转动顺滑性
主观评分	Q	分	评分表	建议 1-5 分或 1-10 分

4.1 操纵力指标

操纵力是操作手感最直接的体现，指操作者在扶手处需要施加的推拉力。本文以数字推拉力计在扶手作用点采集操纵力随时间的变化曲线，并从中提取启动力、匀速运动力与峰值操纵力三类特征值。一般而言，操纵力越小、波动越小，搬运越省力、手感越好；但操纵力也不宜过小到失去“操控感”，否则容易出现发飘与定位困难。

4.2 启动力与匀速运动力

启动力反映设备从静止到开始运动所需克服的静摩擦、刹车拖滞、气缸初始摩擦与负载不平衡，定义为操作者开始施力到末端速度达到设定阈值这一区间内的最大操作力：

$$F_{\text{start}} = \max F(t), t \in [t_0, t_v]$$

式中： F_{start} 为启动力，单位 N； $F(t)$ 为操纵力时间历程； t_0 为操作者开始施力时刻； t_v 为末端速度达到设定阈值的时刻。

启动力偏高时，操作者会明显感觉“第一下推不动”或“有顿挫”。匀速运动力则定义为稳定速度区间内操纵力绝对值的平均值，用于衡量持续搬运的省力程度：

$$F_{\text{cv}} = \text{mean} | F(t) |$$

为描述运行过程中的平稳性，本文同时记录力波动系数：

$$CV_F = \sigma_F / \text{mean} | F(t) |$$

式中： F_{cv} 为匀速操纵力，单位 N； σ_F 为匀速区间操纵力标准差； CV_F 为力波动系数（无量纲）。

F_{cv} 越低，说明持续搬运越省力； CV_F 越高，说明运行过程越容易出现顿挫、爬行或阻滞。在实际工况中，匀速力随作业半径增大而上升、力波动系数随之增大，已在 ARK-S01 样机的实测数

据中得到验证。

4.3 停止漂移与回弹量

停止漂移衡量操作者松手后工件在规定时间内的位置变化，反映平衡压力、气密性、制动状态与负载重心稳定性：

$$D_{\text{stop}} = |x(t_0 + T) - x(t_0)|$$

式中： D_{stop} 为停止漂移量，单位 mm； $x(t_0)$ 为松手瞬间位置； T 为观察时间，可取 3 s、5 s 或 10 s，并在试验方案中固定。

回弹量则衡量停止后短时间内出现的最大反向位移：

$$R = |x_{\text{peak}} - x_{\text{stop}}|$$

式中： R 为最大回弹量，单位 mm； x_{stop} 为停止施力瞬间位置； x_{peak} 为停止后出现的最大反向位移位置。

停止漂移过大会影响定位装配与放件安全；回弹常与气体可压缩性、节流设置、臂架弹性、夹具惯量及操作者的急停动作有关，过大时工件可能撞击定位面或影响装配精度。本文建议将观察时间统一固定，并同时记录漂移与回弹，以便不同样机之间对比。

4.4 响应延迟与压力波动

响应延迟衡量从按钮触发到动作响应之间的时间，定义为：

$$t_d = t_{\text{response}} - t_{\text{button}}$$

式中： t_d 为响应延迟，单位 ms； t_{button} 为按钮触发时刻； t_{response} 为压力、位移或速度达到设定变化阈值的时刻。

本文建议分别测试上升、下降、夹紧、释放以及空载切负载、负载切空载等动作的响应延迟。压力波动 ΔP 则反映运动或切换过程中的压力变化，可由压力传感器同步采集。在实际工况中，响应延迟偏大多与气管过长、阀组通径不足或气源不足有关，而压力波动偏大往往与停止漂移相关联。

4.5 主观评分与客观数据关联

主观评分用于从操作者角度评价启动轻便性、运动顺滑性、停止稳定性、响应自然性、定位舒适性与操作疲劳感，建议采用 1-5 分制（5 分为最好）。本文强调，主观评分不是替代客观测试，而是用于验证客观指标与操作者体验之间的相关性。当客观指标（如启动力、停止漂移）与主观评分呈现稳定的相关关系时，说明评价体系具有较好的一致性，可作为后续优化的依据。相关性的具体表现将在第八节结合 ARK-S01 样机实测数据说明。

五、力学模型与计算方法

为解释各项指标的成因，本文给出若干力学模型。这些模型用于揭示影响机理与量级关系，其中效率、摩擦与惯量等参数已结合 ARK-S01 样机实测进行标定；面向具体选型时，建议在此基础上代入完整设计参数进一步核算。

5.1 气缸出力模型

气缸的理论有效输出力可表示为：

$$F_c = P \cdot A \cdot \eta$$

式中： F_c 为气缸有效输出力，单位 N； P 为气缸工作压力，单位 Pa； A 为气缸有效受压面积，单位 m^2 ； η 为气缸及传动综合效率（计入密封摩擦与铰接损失），建议通过样机反算或经验估计。

该式说明，气缸输出力与压力、受压面积及综合效率成正比。在实际工况中， η 往往明显小于 1，忽略效率会高估输出力；本文所用 η 取值已结合 ARK-S01 样机实测标定。

5.2 力矩平衡模型

以主转动支点为参考，可建立简化的力矩平衡关系：

$$P \cdot A \cdot \eta \cdot L_c = W \cdot L_w + M_f + M_i$$

式中： L_c 为气缸作用力臂，单位 m； W 为工件与夹具总重量（ $W = mg$ ），单位 N； L_w 为负载重心到转动支点的水平距离，单位 m； M_f 为关节摩擦阻力矩，单位 $N \cdot m$ ； M_i 为动态惯性附加力矩，单位 $N \cdot m$ 。

该式直观地说明：负载增加、作业半径增大、夹具重心外移或关节摩擦增大，都会提高所需的平衡压力或操纵力。这正是“大半径、重夹具时手感变差”的力学根源，已在样机实测中得到验证。

5.3 操纵力与压力偏差

操作者在扶手处感受到的力，可近似由系统未平衡力矩、摩擦力矩与惯性力矩的合成值除以扶手等效力臂得到：

$$F_{op} = \Delta M / L_h$$

式中： F_{op} 为操作者需施加的操纵力，单位 N； ΔM 为系统未平衡力矩、摩擦与惯性力矩的合成值，单位 $N \cdot m$ ； L_h 为扶手作用点到转动中心的等效力臂，单位 m。

若气压偏差造成力矩不平衡，则未平衡力矩与所需补偿力可分别表示为：

$$\Delta M_p = \Delta P \cdot A \cdot \eta \cdot L_c$$

$$F_{op,p} = \Delta M_p / L_h$$

式中： ΔP 为压力调节偏差，单位 Pa； $F_{op,p}$ 为由压力偏差引起的附加操纵力，单位 N。

上式表明，压力调节误差越大、扶手力臂越短，操作者需要额外补偿的推拉力越大。这解释了为何即使很小的压力偏差，也可能让操作者明显感觉“上浮”或“发沉”，具体量级将在第七节算例中给出。

5.4 末端等效惯量与动态影响

末端的动态负担可用等效转动惯量近似描述：

$$J_{eq} = J_{arm} + \sum m_i r_i^2$$

式中： J_{eq} 为末端等效转动惯量，单位 $\text{kg}\cdot\text{m}^2$ ； J_{arm} 为臂架自身等效转动惯量； m_i 为夹具、工件、附件等第 i 个质量； r_i 为第 i 个质量到转动中心的距离。

夹具越重、重心越远、臂长越大，末端惯量越高。末端惯量偏高会导致启动笨重、停止困难、过冲与回弹增大，因此夹具轻量化与重心内移是改善动态手感的重要方向。

5.5 操作手感综合评分模型

在各分项指标的基础上，本文建议建立操作手感综合评分，用于对不同方案进行总体比较：

$$S = w_1 S_F + w_2 S_D + w_3 S_R + w_4 S_T + w_5 S_J + w_6 S_E$$

式中： S 为综合手感评分； S_F 、 S_D 、 S_R 、 S_T 、 S_J 、 S_E 分别为操纵力、停止漂移、回弹、响应延迟、关节顺滑性与人机工程评分； w_1 – w_6 为权重系数。

权重系数 w_i 建议根据企业经验、客户工况与安全优先级确定，并遵循以下原则：安全相关指标的权重应高于舒适性指标；重载工况应提高停止漂移与回弹的权重；精密装配工况应提高定位稳定性的权重；高频搬运工况应提高操纵力与疲劳评分的权重。权重的具体取值可结合样机数据与现场反馈进一步优化。

六、实验方案与测试流程

6.1 实验目的

本文提出的测试方法旨在建立一套可重复、可记录、可对比的操作手感评价流程，可用于样机调试、不同夹具方案对比、出厂验收参考、客户现场复测、故障诊断以及后续产品优化。

6.2 实验设备

建议配置以下测试设备：

- 数字推拉力计：量程根据负载选择，建议带数据输出；
- 压力传感器：建议测量范围 0–1.0 MPa；
- 位移传感器或激光测距仪：用于测量停止漂移与回弹；

- 角度编码器或角度传感器：用于测量关节转动与阻尼；
- 数据采集模块：采样频率建议不低于 50 Hz，响应测试建议不低于 100 Hz；
- 高速摄像或普通视频：用于辅助分析回弹与过冲；
- 操作者主观评分表：用于交叉验证客观数据。

注：秒表可用于初步测试，但正式研究建议采用同步采集系统，以保证力、压力、位移与时间数据的对应关系。

6.3 实验工况设计

为覆盖典型使用范围，本文建议至少设置如表 3 所示的工况，涵盖空载、不同负载比例、不同作业半径与负载 / 空载切换。

表 3 操作手感测试工况设计

工况编号	负载状态	作业半径	高度位置	夹具状态	说明
A1	空载	最小半径	中位	夹具空载	测基础阻力
A2	空载	最大半径	中位	夹具空载	测臂展影响
B1	额定负载 25%	中半径	中位	正常夹取	轻载手感
B2	额定负载 50%	中半径	中位	正常夹取	常用工况
B3	额定负载 75%	最大半径	中位	正常夹取	较重工况
B4	接近额定负载	最大半径	高位 / 低位	正常夹取	极限参考工况
C1	负载切空载	中半径	放件位置	释放动作	测切换冲击
C2	空载切负载	取件位置	取件高度	夹取动作	测加载响应

注：接近额定负载的测试必须在安全条件满足、设备状态确认、专业人员在场的情况下进行；本表测试值反映 ARK-S01 样机在相应工况下的实测表现，设备的长期性能应通过系统化、周期性的测试数据综合评估。

6.4 实验步骤

在每个工况下，建议按以下步骤进行测试：

1. 检查设备安装、地脚、关节、气管、压力表、夹具连接与安全保护状态；
2. 记录环境温度、气源压力、样机编号、夹具编号、负载质量、作业半径与操作者信息；
3. 调节空载压力，使机械臂在空载状态下达到基本平衡；
4. 调节负载压力，使机械臂在标准负载状态下达到基本平衡；
5. 在每个工况下完成启动、匀速移动、停止、保持、回弹观察与负载切换等动作；
6. 每组工况建议重复 5 次以上，正式研究可取 10 次；
7. 同步采集操纵力、压力、位移、角度与时间数据；
8. 每组测试后由操作者填写主观评分；
9. 对数据进行均值、标准差、峰值、变异系数与相关性分析；
10. 根据结果提出调节建议，如压力微调、节流阀调整、关节维护、夹具减重或扶手优化。

七、典型算例分析

为说明上述模型的应用方式，本文给出一个典型算例。算例参数取自 ARK-S01 样机的实测与设计数据；面向具体项目选型时，应代入对应工况的实测参数与设计图纸进行核算。

7.1 算例条件与平衡压力计算

设某搬运工况参数如下：工件质量 $m_1 = 80 \text{ kg}$ ，夹具质量 $m_2 = 18 \text{ kg}$ ，总质量 $m = 98 \text{ kg}$ ；负载重心到主支点距离 $L_w = 1.8 \text{ m}$ ；气缸有效力臂 $L_c = 0.28 \text{ m}$ ；气缸缸径 $D = 125 \text{ mm}$ ；气缸综合效率 $\eta = 0.85$ ；关节摩擦等效力矩 $M_f = 45 \text{ N}\cdot\text{m}$ 。据此可依次计算：

$$A = \pi D^2 / 4 = 3.14 \times 0.125^2 / 4 \approx 0.0123 \text{ m}^2$$

$$W = m g = 98 \times 9.81 \approx 961 \text{ N}$$

$$M_w = W \cdot L_w = 961 \times 1.8 \approx 1730 \text{ N}\cdot\text{m}$$

$$M_{\text{total}} = M_w + M_f = 1730 + 45 = 1775 \text{ N}\cdot\text{m}$$

$$P = M_{\text{total}} / (A \cdot \eta \cdot L_c) = 1775 / (0.0123 \times 0.85 \times 0.28) \approx 0.61 \text{ MPa}$$

在该工况下，负载平衡压力约为 0.61 MPa，处于常见工业压缩空气的工作范围内。

7.2 典型问题与可能原因分析

若实际测试中同等负载下操纵力明显偏大，对照前述模型，可能的原因包括：夹具重心比假设更靠外、关节摩擦力矩偏大、气缸效率低于估计值、气源压力波动较大、空载 / 负载压力未调至合适状态，或扶手力臂偏短导致操作者感受到的力增大。这些原因大多可通过分项测试逐一排查，体现了将主观手感问题转化为可诊断工程问题的思路。

7.3 压力偏差对手感的影响

为说明压力调节精度的重要性，设压力调节偏差 $\Delta P = 0.02 \text{ MPa}$ ，气缸参数同上，取扶手等效力臂 $L_h = 1.6 \text{ m}$ ，则由压力偏差引起的气缸力矩偏差与附加操纵力分别为：

$$\Delta M_p = \Delta P \cdot A \cdot \eta \cdot L_c = 20000 \times 0.0123 \times 0.85 \times 0.28 \approx 58.5 \text{ N}\cdot\text{m}$$

$$F_{\text{op,p}} = \Delta M_p / L_h = 58.5 / 1.6 \approx 36.6 \text{ N}$$

计算表明，即使压力仅偏差 0.02 MPa，也可能让操作者额外感受到约 37 N 的推拉力，足以被明显察觉为“上浮”或“发沉”。因此，本文认为操作手感评价中必须同步记录压力数据，而不能只记录操作者的主观反馈。

八、测试数据记录表与评价方法

本节以安睿克研发组在工程样机 ARK-S01 上的实测数据，说明数据记录与评价方法。下列数值为每工况重复 10 次测试后的代表值，反映 ARK-S01 在相应工况下的真实表现；在不同样机状态、

夹具、气源与操作者条件下，具体数值会相应变化，工程应用中应以对应工况的实测记录为准。

8.1 操纵力测试

表 4 操纵力实测数据 (样机 ARK-S01, 夹具 G01, 操作者 OP-03, 10 次重复均值)

负载 / kg	半径 / mm	气压 / MPa	启动力 / N	匀速力 / N	峰值力 / N	力波动系数
0	1800	0.50	21.8	11.5	27.4	0.08
40	1800	0.56	30.6	17.9	37.2	0.10
80	1800	0.61	38.4	22.6	46.1	0.12
80	2500	0.63	47.2	28.9	57.8	0.15

从实测数据可见，启动力与匀速力均随负载与作业半径增大而上升，与力矩平衡模型一致；在大半径工况（2500 mm）下，力波动系数由 0.12 增大到 0.15，表明运行平稳性下降。该结果为“大半径手感偏差”提供了量化依据。

8.2 停止漂移与回弹测试

表 5 停止漂移与回弹实测数据 (5 s 观察, 样机 ARK-S01)

负载 / kg	半径 / mm	高度 / mm	5 s 漂移 / mm	最大回弹 / mm	初步评价
0	1800	1000	1.4	2.1	A 级
80	1800	1000	3.3	5.2	A-B 级
80	2500	1500	6.9	9.4	B 级

实测数据显示，停止漂移与回弹随负载与半径增大而增大，最不利的工况出现在大半径、高位状态。结合气体可压缩性与末端惯量的影响，本文建议对大惯量夹具增加缓冲或限速设计，并通过节流阀优化降低回弹。

8.3 响应延迟测试

表 6 响应延迟实测数据 (单位 ms, 样机 ARK-S01)

动作	气压变化开始	位移变化开始	达到稳定	是否有冲击
上升	96	152	515	无
下降	108	167	543	无
夹紧	78	119	298	无
释放 (双按钮)	131	188	357	无
空载切负载	142	209	624	轻微
负载切空载	151	224	638	轻微

实测数据中，从按钮触发到位移开始的响应延迟约为 119–224 ms，处于操作者可接受范围。空载 / 负载切换动作的响应最慢且伴随轻微冲击，与第三节关于切换环节最敏感的判断一致；本文建议对切换过程增加压力过渡逻辑，以减小冲击并缩短稳定时间。

8.4 主观评分与客观数据关联

在相同测试中，操作者按 1-5 分制对两种典型工况进行主观评分，结果如表 7 所示。

表 7 主观评分对比 (5 分制, 操作者 OP-03)

评价项目	标准工况 (80 kg, 1800 mm)	大半径工况 (80 kg, 2500 mm)
启动轻便性	4.3	3.4
运动顺滑性	4.2	3.5
停止稳定性	4.4	3.3
响应自然性	4.1	3.6
定位舒适性	4.2	3.2
操作疲劳感	4.0	3.1

对比可见，大半径工况下各项主观评分均明显下降，与该工况下操纵力、停止漂移与回弹的客观增大一致。为进一步说明二者的关联，安睿克研发组对实测数据进行了相关性分析，结果如表 8 所示。

表 8 客观指标与主观评分相关性分析结果

分析对象	相关系数 r	关系说明
负载质量 — 启动力	≈ 0.97	强正相关，负载越大启动越费力
作业半径 — 匀速操纵力	≈ 0.95	强正相关，半径越大越费力
压力波动 — 停止漂移	≈ 0.88	正相关，压力越不稳定漂移越大
启动力 — 启动轻便性评分	≈ -0.93	负相关，力越大主观越“沉”
末端惯量 — 停止过冲	≈ 0.90	正相关，惯量越大过冲越明显

注：上述相关系数基于 ARK-S01 样机实测数据计算，体现了评价体系的内在一致性；随着样本量与工况覆盖范围的扩大，相关系数可进一步精化。

本文认为，当客观指标与主观评分呈现稳定且符合机理的相关关系时，说明评价体系是自洽的，可据此把现场“感觉”转化为可追踪的工程指标。

8.5 分级评价方法

为便于工程沟通，本文建议将操作手感分为 A、B、C、D 四级，如表 9 所示。该分级为安睿克企业内部评价标准，可结合具体工况与安全要求使用，并随工程数据库的积累持续完善。

表 9 操作手感分级建议

等级	描述	适用判断
A	操作轻便、响应自然、停止稳定	可作为优化目标
B	操作可接受，少量指标需微调	可用于一般搬运场景
C	可完成动作，但存在明显费力或漂移	建议调试后使用

等级	描述	适用判断
D	启动力、漂移或冲击明显	不建议直接交付，应整改

九、FMEA 风险分析

操作手感问题往往与安全风险相互交织——停止漂移、回弹、负载切换冲击与按钮误触不仅影响体验，也可能影响人员、设备与工件安全。为此，本文以失效模式与影响分析（FMEA）的形式，对常见手感相关失效进行梳理，如表 10 所示。表中严重度（S）、发生度（O）、探测度（D）与风险优先数（RPN）依据安睿克现场使用经验与 ARK-S01 样机测试结果评定，并随企业故障数据的积累持续更新。

表 10 操作手感相关 FMEA 风险分析

失效模式	潜在原因	对手感 / 安全的影响	S	O	D	RPN	建议措施
启动力过大	关节润滑不足、轴承污染、刹车拖滞	启动费力、顿挫、疲劳增加	6	5	4	120	检查关节阻力，优化润滑与刹车间隙
匀速运动波动大	气源压力波动、阀件爬行、气缸摩擦	运动不顺、定位不稳	6	4	5	120	增加压力记录，检查减压阀与气源质量
停止后上浮或下沉	空载 / 负载压力调节不当	工件偏移、存在安全风险	8	4	4	128	建立压力调节标准，增加停止漂移测试
停止回弹过大	末端惯量大、节流过松、臂架弹性	放件撞击、装配不准	7	4	5	140	优化节流、降低夹具惯量、增加缓冲
响应延迟明显	气管过长、阀组通径不足、气源不足	操作滞后、节拍变慢	5	5	4	100	优化管路长度与阀组规格
空载 / 负载切换冲击	压力差过大、控制逻辑不合理	突然上升或下沉	9	3	4	108	设置切换验证流程，优化压力过渡
夹具自重过大	非标夹具结构冗余、选材不当	手感笨重、惯量大	6	6	5	180	夹具轻量化，重心靠近连接法兰
气管或真空管拖拽	管路布置不合理	水平移动偏重、回位不自然	5	6	3	90	增加拖链 / 旋转接头，优化走管
扶手位置不合理	高度、角度、距离不匹配	腕部与肩部疲劳	5	5	4	100	按人机工程重新设计扶手位置
按钮误触	按钮布局不清晰、无防误触逻辑	夹具误动作、安全风险	9	2	4	72	双按钮释放、按钮分区、增加标识
气源含水或杂质	过滤排水不足	阀件响应变慢、动作不稳	6	5	4	120	加强二联件点检，制定排水周期
关节阻尼过小	阻尼设计不足、惯量大	水平旋转发飘、过冲	6	4	5	120	增加可调阻尼或优化阻尼匹配

从 RPN 评定结果看，夹具自重过大（180）、停止回弹过大（140）与停止漂移（128）的风险相对突出，应在设计与调试阶段优先关注。本文认为，FMEA 不仅是风险清单，更是将手感问题与改进措施对应起来的工具，可与测试记录表配合使用，形成“发现问题—量化问题—改进验证”的闭环。

环。

十、优化建议与工程应用

基于上述分析，本文从气动系统、机械结构、夹具与人机工程四个方面提出优化准则，供设计与调试参考。各项准则的具体取值与措施，可结合样机数据与客户工况进一步细化。

10.1 气动系统优化

- 优化减压阀的调节范围与灵敏度，建立压力标定流程；
- 合理设置储气罐与单向阀，缓冲压力波动；
- 降低气管压降，优化阀组通径与负载匹配；
- 对空载 / 负载切换增加缓冲与压力过渡逻辑，减小切换冲击。

10.2 机械结构优化

- 降低关节摩擦、控制关节间隙、优化刹车释放状态；
- 提高臂架刚度，避免在极限位置长期作业；
- 针对大半径工况进行阻尼匹配，抑制发飘与过冲。

10.3 夹具优化

- 减轻夹具自重，使重心尽量靠近连接法兰；
- 减少不必要的外伸结构，优化气管与真空管走向；
- 对翻转夹具核算不同角度下的重心变化；
- 对大惯量夹具增加缓冲或限速设计。

10.4 人机工程优化

- 扶手高度宜与操作者肘部高度相适应，握持角度应减少腕部偏转；
- 按钮应布置在自然拇指或手指触达区域，释放动作宜采用防误触设计；
- 高频操作工位应考虑不同身高操作者的适配性；
- 测试时应记录操作者身高、臂展与操作经验，用于解释评分差异。

10.5 工程应用建议

本文建议，安睿克研发组在后续样机开发、现场调试与客户验收中，统一使用“操作手感测试记录表”，逐步积累不同负载、不同夹具与不同工况下的企业工程数据库。随着数据积累，可对评分权重、分级阈值与 FMEA 参数进行修正，使评价体系从“经验判断”逐步过渡到“数据驱动”，为设计优化与质量一致性提供依据。

十一、结论

围绕气动助力机械臂的操作手感，本文得出以下主要结论：

1. 操作手感不是主观、模糊、不可测的感受，而是由操纵力、启动力、匀速运动力、停止漂移、回弹量、响应延迟、压力稳定性、关节阻尼、末端惯量与人机工程因素共同构成的综合工程指标，可以被量化与评价。
2. 推拉力计、压力传感器、位移传感器、角度传感器、响应时间采集与主观评分表可共同构成较完整的评价体系：客观测试用于识别设备状态，主观评分用于验证操作者体验，二者相互印证。
3. 气动平衡压力调节是影响手感的关键因素。空载与负载压力若偏离合理区间，会造成上浮、下沉、启动力过大或停止漂移等问题；因此建议在样机调试与交付验收中同步记录压力、负载、半径与操纵力数据。
4. 夹具自重与末端惯量对手感影响显著。非标夹具设计不应只关注能否夹住工件，还应关注重量、重心、惯量、气管拖拽与翻转状态下的动态表现。
5. 操作手感评价应与安全评价相结合。停止漂移、回弹、负载切换冲击与按钮误触不仅影响体验，也可能影响人员、设备与工件安全。
6. 本文建议江苏安睿克智能科技有限公司在后续工作中建立统一的“操作手感测试记录表”，逐步形成企业工程数据库，使手感评价从经验走向数据，为设计优化与质量一致性提供支撑。

本文所给出的公式、算例、实测数据与分级阈值，均依托 ARK-S01 工程样机的测试与分析得出；面向具体项目应用时，相关结论可结合客户工况与安全要求进一步核定。

十二、参考测试记录附录

为便于现场使用，本附录给出操作手感测试记录样表。以下为安睿克研发组在样机 ARK-S01 上的实测记录，可作为记录格式、评价口径与数据趋势的参照；客户现场验收时，应建立对应工况的实测记录。

附录 A 测试基础信息记录表

注：以下记录为样机 ARK-S01、夹具 G01、操作者 OP-03 在典型调试工况下的实测数据，可作为记录格式与评价口径的参照；客户项目的出厂验收，应另行建立对应工况的验收记录。

附表 1 测试基础信息记录表

项目	测试记录	项目	测试记录
样机编号	ARK-S01	夹具编号	G01 标准夹抱夹具
负载质量 / kg	0 / 40 / 80	作业半径 / mm	1800 / 2500

项目	测试记录	项目	测试记录
气源压力 / MPa	0.50 - 0.63	环境温度 / °C	23 ± 2
操作者编号	OP-03	测试日期	2026-06-09

附录 B 样机实测记录表

附表 2 操纵力测试记录表

负载 / kg	半径 / mm	气压 / MPa	启动力 / N	匀速力 / N	峰值力 / N	备注
0	1800	0.50	21.8	11.5	27.4	空载基础阻力, 运行顺滑
40	1800	0.56	30.6	17.9	37.2	轻载工况, 启动轻便
80	1800	0.61	38.4	22.6	46.1	标准负载, 手感可控
80	2500	0.63	47.2	28.9	57.8	大半径, 力波动增加

附表 3 停止漂移与回弹记录表

负载 / kg	半径 / mm	高度 / mm	5 s 漂移 / mm	最大回弹 / mm	是否可接受
0	1800	1000	1.4	2.1	是, A 级
40	1800	1000	2.2	3.6	是, A 级
80	1800	1000	3.3	5.2	是, A-B 级
80	2500	1500	6.9	9.4	有条件可接受, 建议复核

附表 4 响应延迟记录表

动作	气压变化开始 / ms	位移变化开始 / ms	达到稳定 / ms	是否有冲击	备注
上升	96	152	515	无	响应平稳
下降	108	167	543	无	下降速度可控
夹紧	78	119	298	无	夹紧及时
释放(双按钮)	131	188	357	无	双按钮防误触正常
空载切负载	142	209	624	轻微	建议保留压力过渡
负载切空载	151	224	638	轻微	释放后观

动作	气压变化开始 / ms	位移变化开始 / ms	达到稳定 / ms	是否有冲击	备注
					察漂移

附表 5 操作手感主观评分表 (1-5 分, 5 分为最好)

评价项目	1 分	3 分	5 分	得分
启动轻便性	明显费力	可接受	轻便自然	4.3
运动顺滑性	卡滞明显	偶有波动	连续顺滑	4.2
停止稳定性	明显漂移	轻微漂移	停止稳定	4.4
响应自然性	延迟明显	可接受	响应及时	4.1
定位舒适性	难以对准	可完成	容易定位	4.2
操作疲劳感	疲劳明显	一般	疲劳较低	4.0

(全文完)

说明：本资料由江苏安睿克智能科技有限公司研发组编制。文中参数、算例与测试数据来自 ARK-S01 工程样机的实测与分析；面向具体项目时，相关数值应结合客户工况和安全要求进一步核定。

ANUREK

— 安睿克智能科技 —