



ENGINEERING RESEARCH REPORT · 工程研究报告

气动助力机械臂压缩空气能耗、泄漏率与 全生命周期成本评估方法研究

面向气动助力搬运系统的耗气、泄漏、能源成本与投资回收量化研究

文件编号 AUREK-RC-AR-041

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、系统边界与术语

02 计量架构与数据质量门槛

03 压缩空气基线与能效指标

04 助力机械臂有效用气量

05 泄漏率测量、换算与分级

06 压力损失、流通能力与最低压力判据

07 电耗归属与年度成本

08 全生命周期成本与投资门槛

09 单台设备支路完整计算与判定

10 改造优先级与复测流程

11 FMEA、风险控制与总放行规则

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

气动助力机械臂把压缩空气转化为负载平衡、升降、夹紧、翻转、制动释放和真空发生等功能。现场只记录空压机铭牌功率或设备入口压力，无法回答单台设备每千次循环耗气多少、停线期间泄漏多少、压力损失发生在哪一段、节能改造能否回收投资。ISO 11011:2013 将压缩空气系统划分为供给、输送和需求三个子系统，并要求以采集数据、分析结果和书面报告构成完整评估[1]。本文把这一系统边界落实到单台助力机械臂，建立“电表—总流量—支路流量—动态压力—生产计数”同一时间基准下的核算方法。

本文统一采用 ISO 8778:2003 的标准参考大气表达自由空气体积，即 20 °C、100 kPa 绝压、65% 相对湿度，并写作 $\text{m}^3(\text{ANR})$ [8]。现场仪表使用其他基准时，数据先换算到同一参考状态再相加。供给侧以同期实测的系统平均比功率 SP_{sys} 形成分摊电耗指标；实际节电量与经济收益只用同负荷分箱的边际功率—流量模型或全站归一化前后实测值。设备侧以流量积分计算有效生产用气和泄漏用气；输送侧对峰值流量动作和最低入口压力动作的全部同步压力波形逐样本判定。ISO 1217:2009 用于识别压缩机流量与功率验收数据的边界[4]，ISO 6358 系列用于其适用范围内元件和组件的稳态流量特性与系统流通能力计算[5][6][7]，二者均不替代现场同期计量。

核心结论

- 能耗核算必须使用同一参考状态的自由空气体积；表压、绝压、工况体积与 $\text{m}^3(\text{ANR})$ 混用时，报告直接判为数据不合格。
- 本文以年度支路泄漏体积占比的保守上界 $R_{\text{leak,U}}$ 分级：不超过 5% 为 A 级，超过 5% 且不超过 10% 为 B 级，二者通过；超过 10% 为不通过。美国能源部资料中的泄漏比例以压缩机容量或系统供气量为核算边界[9]，与本文单设备年度支路体积分母不同，两个百分比不得直接换算；本报告将 10% 固定为项目放行上限。
- 从压缩机组排气测点到关键执行元件入口的总压力损失率保守上界不超过 10%，且设备动态最低入口压力保守下界不低于设计下限，压力项才通过；任一条件失败即判不通过[9]。
- 单台设备使用“ $\text{m}^3(\text{ANR})/1000$ 次循环”和“分摊 kWh/1000 次循环”作为能效指标，同时公布生产用气、泄漏用气和空闲保压用气。分摊电耗不作为实际节电证据。
- 总放行采用数据、泄漏、压力、能效、经济、功能安全六项一票否决。泄漏、压力、能效和经济项全部用不利方向的扩展不确定度边界判定；六项全部成立才判项目通过。

01 研究对象、系统边界与术语

研究对象为气动助力机械臂本体、末端夹具、真空发生器、局部储气、过滤减压组件、软管和设备支路。供给系统包含空压机、冷却、干燥、过滤及其辅助用电；输送系统包含总管、环网、支管和末端连接；需求系统从设备支路隔离阀开始，止于执行器排气、真空发生器排气和工艺吹气出口。ISO 4414:2010 与 GB/T 7932-2017 覆盖机械气动系统及其元件的一般规则和安全要求[2][3]。能效改造不得削弱失压保护、残余能量释放、隔离、压力限制、夹持保持或防误释放功能。

符号	定义	单位与规则
V_ANR	ISO 8778 标准参考大气下的自由空气体积	m ³ (ANR)
q_ANR	标准参考大气下的瞬时体积流量	m ³ /min(ANR)
E_sys	同期供给系统输入电能，含纳入边界的辅助设备	kWh
SP_sys	系统平均比功率， E_{sys} / V_{supply} ，仅用于分摊指标	kWh/m ³ (ANR)
SP_marg,b	全站负荷分箱 b 的边际比功率	kWh/m ³ (ANR)
V_prod	完成合格生产循环消耗的自由空气体积	m ³ (ANR)
V_leak	非功能性泄漏消耗的自由空气体积	m ³ (ANR)
V_total	设备支路全部带压状态总量，与 V_device 同义	m ³ (ANR)
I_prod	生产用气强度， $1000 V_{prod} / N_{cycle}$	m ³ (ANR)/1000 次
I_leak	泄漏用气强度， $1000 V_{leak} / N_{cycle}$	m ³ (ANR)/1000 次
I_air	总用气强度， $1000 V_{total} / N_{cycle}$	m ³ (ANR)/1000 次
I_e,alloc	分摊电耗强度， $1000 E_{device,alloc} / N_{cycle}$	kWh/1000 次

符号	定义	单位与规则
R_leak	泄漏空气占设备支路总供气量的比例	%
R_leak,U	泄漏空气占比的不利方向扩展不确定度上界	%
R_Δp,total,U	P0 至 P3 总压降率的不利方向扩展不确定度上界	%

“循环”固定定义为从工件抓取许可开始，到工件释放完成并回到下一次抓取起始状态。返工、空循环、调试循环分别计数，不并入合格生产循环。设备支路在生产、换型、休息和停班期间保持带压时，全部时间都进入保压时数。

每个采样点只能归入一种运行状态，状态代码固定为：P 合格生产、R 返工、S 调试或空循环、C 换型、I 空闲带压、F 故障带压、D 卸压。控制器没有状态代码时，以循环许可信号、设备报警、支路隔离阀反馈和班次记录重建状态；四类信号中缺少任意一类，状态分项报告判数据不通过。P 状态形成生产用气，R/S/C/I/F 分别单列，D 状态的非零流量作为仪表零点或隔离阀内漏异常处理。这样可以把完成生产所需的空气、可消除的空耗以及安全保压用气分开，避免把停班泄漏计入单次动作效率。

02 计量架构与数据质量门槛

计量点按能量流向布置：总电表记录供给系统输入电能；供给总流量计记录交付到输送系统的 m³(ANR)；设备支路流量计记录助力机械臂总用气；四个同步压力通道固定为 P0 压缩机组排气止回阀下游且首个后处理元件上游、P1 全部空气处理设备下游的主干管入口、P2 主干管末端且设备支路隔离阀上游、P3 关键执行元件入口；控制器记录循环、产品型号、运行状态和报警。存在多个压力关键执行元件时，分别移动 P3 完成独立测试，每个位置都须通过。多台空压机并联时，总电能与总自由空气流量使用同一时间窗求和。

数据项	最低采集规则	数据通过条件
供给电能与总流量	连续 7 个生产日，覆盖全部班次和正式产品型号，采样周期不大于 1 s	有效数据覆盖率不低于 95%

数据项	最低采集规则	数据通过条件
支路流量	覆盖生产、换型、休息、停班带压时段	仪表参考状态和流向记录完整
动态压力	峰值流量动作和最低入口压力动作各连续 30 次，四通道采样频率不低于 1 kHz	同一 DAQ、同一采样时钟、通道偏差不超过 1 个样本；传感器、调理器与 DAQ 的组合 -3 dB 带宽不低于 200 Hz；30 次波形完整；两者为同一动作时只测一组
泄漏流量	每个运行状态、压力档与稳态阀位组合在无生产、无动作、无有意用气条件下连续 30 min，采样周期不大于 1 s	每个组合有效覆盖率不低于 95%，压力保持在该档中心值 ± 0.01 MPa
泄漏压降复核	满足第 05.2 节全部前提后记录压力与气体绝对温度	两次结果偏差不超过 10%；任一前提失败时不得采用该方法
循环与产品数	来自控制器或独立计数，时间戳与流量同步	计数差异不超过 1%
仪表状态	编号、量程、精度、校准有效期写入报告	任何仪表超期即数据不通过

本方法把支路流量相对扩展不确定度上限设为 5%，电能相对扩展不确定度上限设为 2%，压力相对扩展不确定度上限设为 2%。不确定度预算须包含校准、重复性、参考状态换算、时钟、状态分类和年度外推；只引用仪表铭牌精度时数据项不通过。任一项超过上限，能效对比不进入经济评价。基线期与改造后评价期使用相同产品权重、合格循环定义和年度带压时数；产品结构发生变化时，按冻结权重归一化，不直接比较两个未归一化总量。

评价开始前冻结产品权重 w_j ，权重取企业正式年度生产计划；没有年度计划时，取基线连续 7 日各型号合格循环占比。任一纳入权重的型号在基线期和改造后期均须完成不少于 30 个合格循环，否则数据项不通过。归一化用气强度按下式计算，前后期使用同一组 w_j ，且 $\sum w_j = 1$ ：

$$I_{\text{air,norm}} = \sum [j=1..m] w_j \cdot I_{\text{air},j}$$

支路流量与循环状态的时钟误差不得超过 100 ms，电能与供给总流量的时钟误差不得超过 1 s；四个压力通道执行同一 DAQ 的 1 个样本上限。缺失样本不插值；总缺失率超过 5%、缺失段覆盖峰值动作，或泄漏试验期间存在任一缺失点，数据项直接不通过。仪表扩展不确定度按覆盖因子

k=2 报告。两期年度用气量的标准不确定度为 $u_{\text{base}}=U_{\text{base}}/2$ 、 $u_{\text{after}}=U_{\text{after}}/2$ ，相关系数为 ρ 时：

$$U_{\Delta V} = 2 \cdot \sqrt{u_{\text{base}}^2 + u_{\text{after}}^2 - 2\rho \cdot u_{\text{base}} \cdot u_{\text{after}}}$$

$$\Delta V_L = (V_{\text{base}} - V_{\text{after}}) - U_{\Delta V}$$

U_{base} 、 U_{after} 为两期年度用气量的绝对扩展不确定度。只有校准链、仪表、采样与换算误差的独立性均有书面证据时才使用记录的 ρ ；缺少任一证据时固定采用保守上界

$U_{\Delta V}=U_{\text{base}}+U_{\text{after}}$ 。 $\Delta V_L > 0$ 才证明节气方向成立；等于零也判不通过。所有派生硬门采用以下不利方向边界：

$$\eta_{\text{air},L} = [1 - (I_{\text{air},\text{after}} + U_{I,\text{after}})/(I_{\text{air},\text{base}} - U_{I,\text{base}})] \cdot 100\%$$

$$V_{\text{leak},U} = \sum(s,b,k) (q_{\text{leak},s,b,k} + U_{q,s,b,k}) \cdot 60 \cdot (H_{s,b,k} + U_{H,s,b,k})$$

$$R_{\text{leak},U} = V_{\text{leak},U} / (V_{\text{device},\text{year}} - U_{V,\text{device}}) \cdot 100\%$$

分母不大于零时数据项不通过。能效项须同时满足 $\eta_{\text{air},L} \geq 5\%$ 与 $\Delta V_L > 0$ ；泄漏项须满足 $R_{\text{leak},U} \leq 10\%$ 。压力和经济守界公式分别见第 06、08 章。

03 压缩空气基线与能效指标

系统平均比功率使用同期实测值，只形成分摊指标：

$$SP_{\text{sys}} = E_{\text{sys}} / V_{\text{supply}}$$

$$E_{\text{device},\text{alloc}} = SP_{\text{sys}} \cdot V_{\text{total}}$$

$$I_{\text{air}} = 1000 \cdot V_{\text{total}} / N_{\text{cycle}}$$

$$I_{e,\text{alloc}} = 1000 \cdot E_{\text{device},\text{alloc}} / N_{\text{cycle}}$$

E_{sys} 包含评估边界内空压机主电机、冷却风机、干燥机、排水器和控制辅助设备的电能；

V_{supply} 为同一时段交付到管网的 $\text{m}^3(\text{ANR})$ 。只使用压缩机铭牌功率会漏掉部分负载、卸载和辅助设备损失。ISO 1217:2009 规定容积式压缩机流量和功率验收试验方法，其数据用于核对额定点，不作为现场全年比功率的替代值[4]。 $E_{\text{device},\text{alloc}}$ 与 $I_{e,\text{alloc}}$ 是成本分摊指标，不能写作空压站实际节电量。

实际节电采用同负荷分箱的边际功率—流量模型。全站总流量与总有功功率按 1 min 同步平均值进入负荷箱 b ；每个被采用的负荷箱在基线期和改造后期均须包含不少于 30 个完整样本，样本流量范围须覆盖该箱内改造前后流量，压缩机启停顺序、控制模式、供气压力设定与空气处理设备运行组合须相同。每箱用最小二乘直线 $P_b = \alpha_b + m_b q_b$ 拟合实测有功功率与自由空气流量，固定取 $SP_{\text{marg},b} = m_b / 60$ ； m_b 用 $\text{kW}/[\text{m}^3/\text{min}(\text{ANR})]$ ，因此 $SP_{\text{marg},b}$ 用 $\text{kWh}/\text{m}^3(\text{ANR})$ 。扩展不确定度 $U_{SP,b}$ 同时包含回归斜率、电表和总流量计分量：

$$\begin{aligned}\Delta E_{\text{actual}} &= \sum(b) \Delta V_b \cdot SP_{\text{marg},b} \\ \Delta V_{b,L} &= \max(\Delta V_b - U_{\Delta V,b}, 0) \\ SP_{\text{marg},b,L} &= \max(SP_{\text{marg},b} - U_{SP,b}, 0) \\ \Delta E_{\text{actual},L} &= \sum(b) \Delta V_{b,L} \cdot SP_{\text{marg},b,L}\end{aligned}$$

任一负荷箱样本不足、改造后流量落在实测曲线范围外、压缩机序列或控制模式改变、 $m_b \leq 0$ ，或 $U_{SP,b}/SP_{\text{marg},b} > 10\%$ 时，该分箱模型无效。全站归一化替代法把生产组合、压缩机序列、控制模式、压缩机入口温度 5 °C 档和供气设定压力 0.02 MPa 档组成工况层 g ；每层前后期各须有不少于 30 个完整 1 min 有功功率样本，并使用同一组批准年度小时 H_g ：

$$\begin{aligned}E_{\text{sys,norm},x} &= \sum(g) \text{mean}[P_{x,g}] \cdot H_g, \quad x \in \{\text{base}, \text{after}\} \\ \Delta E_{\text{full},L} &= E_{\text{sys,norm},\text{base}} - E_{\text{sys,norm},\text{after}} - U_{\Delta E,\text{full}}\end{aligned}$$

$\Delta E_{\text{full},L}$ 代替 $\Delta E_{\text{actual},L}$ 进入经济计算。分箱边际模型与全站归一化替代法均未满足本节数据门槛时经济项不通过。

评价报告同时公布四个指标：生产用气强度 I_{prod} 、泄漏用气强度 I_{leak} 、总用气强度 I_{air} 和分摊电耗强度 $I_{e,\text{alloc}}$ 。只有总用气下降而循环数同步下降时，不构成能效改善。改造后总用气强度下降率定义为：

$$\eta_{\text{air}} = (I_{\text{air},\text{base}} - I_{\text{air},\text{after}}) / I_{\text{air},\text{base}} \cdot 100\%$$

能效项通过条件为点值 $\eta_{\text{air}} \geq 5\%$ 、保守下界 $\eta_{\text{air},L} \geq 5\%$ ，且按覆盖因子 $k=2$ 计算的节气量保守下界 $\Delta V_L > 0$ 。任一条件失败，能效项判不通过。报告必须同时给出原始差值、扩展不确定度和保守下界，不得只公布百分比。

04 助力机械臂有效用气量

设备支路流量计直接积分形成结算数据：

$$\begin{aligned}V_{\text{total}} &= V_{\text{device}} = \int [H_{\text{pressurized}}] q_{\text{ANR}}(t) dt \\ V_{\text{leak}} &= \sum(s,b,k) q_{\text{leak},s,b,k} \cdot 60 \cdot H_{s,b,k} \\ V_{\text{prod}} &= \int [P] \max[q_{\text{ANR}}(t) - q_{\text{leak},P,b(t),k(t)}, 0] dt \\ V_s &= \int [s] \max[q_{\text{ANR}}(t) - q_{\text{leak},s,b(t),k(t)}, 0] dt, \quad s \in \{R,S,C,I,F\} \\ V_{\text{total}} &= V_{\text{prod}} + V_R + V_S + V_C + V_I + V_F + V_{\text{leak}}\end{aligned}$$

积分变量 dt 以 min 计。 $b(t)$ 为时刻 t 所属的设备入口压力档，压力档宽固定为 0.02 MPa； $k(t)$ 为 PLC 输出映射得到的稳态阀位组合。 $q_{\text{leak},s,b,k}$ 是第 05.1 节在相同状态、压力档与阀位组合测得的泄漏基线。每个出现过的 $s-b-k$ 组合都须有基线；缺少任一组合时分项报告不通过。

V_{total} 是支路流量计的总积分； V_{prod} 与 $V_R/V_S/V_C/V_I/V_F$ 是扣除同期泄漏基线后的功能性分项。评价 7 日窗口内的总量闭合差 $|V_{\text{total}}|$ -

$(V_{\text{prod}}+V_{\text{R}}+V_{\text{S}}+V_{\text{C}}+V_{\text{I}}+V_{\text{F}}+V_{\text{leak}})/V_{\text{total}}$ 不得超过 2%，超过 2% 时分项报告不通过。任一采样点出现 $q_{\text{ANR}} < q_{\text{leak},s,b,k}$ 时，不用截断结果证明闭合，须先重测该组合的泄漏基线；重测后仍出现该情况时数据项不通过。返工 R 和调试或空循环 S 计入总量，但不计入合格生产用气。

双作用气缸的理论自由空气量仅用于核对流量数量级。缸径面积为 A_{b} 、活塞杆面积为 A_{r} 、行程为 L ，伸出与缩回供气绝压分别为 $p_{1,\text{abs}}$ 、 $p_{2,\text{abs}}$ ，供气温度为 T_{1} 、 T_{2} 时，一个完整往复的理论值为：

$$V_{\text{ANR,theory}} = A_{\text{b}} \cdot L \cdot (p_{1,\text{abs}}/p_{\text{ANR}}) \cdot (T_{\text{ANR}}/T_{1}) + (A_{\text{b}} - A_{\text{r}}) \cdot L \cdot (p_{2,\text{abs}}/p_{\text{ANR}}) \cdot (T_{\text{ANR}}/T_{2})$$

式中 $p_{\text{abs}} = p_{\text{gauge}} + p_{\text{atm}}$ 。死腔、软管充排气、缓冲、阀岛先导、制动器、夹具和真空发生器另行计入。气动平衡回路并不等同于气缸每次全容积充排，因此报告的正式结果只取流量积分。真空发生器按实际开启时间积分；连续吹气、错误常开排气和空闲真空保持全部进入 V_{I} ，不计入有效生产功。

多型号设备按状态与型号做二维分组。每次循环的积分窗从抓取许可上升沿开始，到下一循环起始状态确认信号上升沿结束；两个循环之间没有确认信号的带压时间归入 I ，不得摊入相邻循环。流量计在 D 状态连续 60 s 的平均值作为当日零点核查值，绝对值超过仪表满量程的 0.5% 时，当日支路流量数据不通过。流量积分同时保留 1 s 原始序列、每循环结果和每日汇总，三层数据的累计体积差不得超过 0.5%。

ISO 6358-1:2013 及其 2020、2026 修正案和 ISO 6358-2:2019 及其 2026 修正案用于测试标准适用范围内固定或可变流道元件的流量特性[5][6]，ISO 6358-3:2014 用已知元件和管路特性计算系统稳态流量能力[7]。气缸、储气罐、带启裂压力的止回元件、快速排气阀以及带内部反馈的调压器不得套用超出相应分册范围的公式。调压器使用制造商在项目设定压力、实际上下游压力和实际流量范围内提供的压力—流量曲线；缺少该曲线时用同步上下游压力与流量实测，不能用 ISO 6358 计算替代。

05 泄漏率测量、换算与分级

05.1 支路质量流量计

设备泄漏放行值优先采用支路质量流量计。对第 04 章出现的每个状态 s 、0.02 MPa 压力档 b 和稳态阀位组合 k ，在测试模式复现该组合，移除工件与悬吊载荷，锁止机械运动，关闭吹气、真空

发生器和执行器动作命令，并连续记录 30 min。风险控制要求持续供气的安全功能须用独立支路计量并归入功能性用气，不得并入泄漏。无法分离安全功能用气与泄漏时，该 s-b-k 组合数据不通过。

每个组合的采样周期不大于 1 s，设备入口压力保持在档中心值 ± 0.01 MPa，有效数据覆盖率不低于 95%，任何动作命令或功能性用气命令出现时整段试验作废。 $q_{leak,s,b,k}$ 取该组合有效样本算术平均值；扩展不确定度 $U_{q,s,b,k}$ 包含流量计校准、重复性、参考状态换算、零点和压力稳定性。基线期与改造后期分别测量，不沿用另一时期的泄漏值。

质量流量计直接输出 ISO 8778 参考状态时，报告记录其 20 °C、100 kPa 绝压、65% 相对湿度配置。仪表输出工况体积流量 q_{op} 时，按校准证书给出的压缩因子 Z 换算：

$$q_{ANR} = q_{op} \cdot (p_{op,abs}/p_{ANR}) \cdot (T_{ANR}/T_{op}) \cdot (Z_{ANR}/Z_{op})$$

$p_{op,abs}$ 和 T_{op} 与流量同时间戳采集；缺少绝压、绝温、压缩因子或湿度配置记录时，该档数据不通过。阀门串漏、非零耗气排水器和仪表取压管耗气均进入边界内泄漏。

05.2 停产压降复核法

压降法只在以下条件全部成立时使用：工件与悬吊载荷已移除；机械部分完成锁止；压缩空气执行上锁挂牌；安全保持回路有待测段完成物理隔离；受控 P&ID、管段清单、储气罐清单和元件 BOM 对隔离容积实现 100% 逐项覆盖；试验许可由设备与安全责任人签字。缺少任一条件时不得启动压降试验。

系统升至受控配方记录的工作表压 $p_{1,g}$ 后切断气源，终点固定为 $p_{2,g}=0.50p_{1,g}$ ，由压力时间序列对穿越该值的时刻做线性插值得到 t 。DOE 的 1.25 系数只用于这一半压端点，它把压降期间的平均泄漏修正至初始系统压力[9][11]。按端点绝对温度计算：

$$q_{avg,ANR} = V_{sys} \cdot (Z_{ANR} \cdot T_{ANR}/p_{ANR}) \cdot [p_{1,abs}/(Z_1 \cdot T_1) - p_{2,abs}/(Z_2 \cdot T_2)] / t$$

$$q_{leak,P1,ANR} = 1.25 \cdot q_{avg,ANR}$$

V_{sys} 用 m^3 ， $p_{1,abs}$ 、 $p_{2,abs}$ 与 $p_{ANR}=100$ kPa(abs) 使用相同压力单位， T_1 、 T_2 与 $T_{ANR}=293.15$ K 用 K， Z_1 、 Z_2 、 Z_{ANR} 取校准证书或受控物性表， t 用 min。 $|T_2-T_1|>2$ K、任一压缩因子缺失、任一容积项目缺少受控尺寸、最低终止压力触及安全回路设计下限，或压力曲线未穿越精确半压点时，结果作废。两次试验的相对偏差按 $|q_1-q_2|/[(q_1+q_2)/2]$ 计算，不超过 10% 才取算术平均值。

压降复核值与相同初始压力档的质量流量计结果相差超过 10% 时，泄漏数据不通过。压降复核值不替代第 05.1 节的状态—压力—阀位组合结果，也不直接用于全年泄漏体积。

05.3 负载/卸载循环筛查法

只有单台固定转速压缩机独立供气、压缩机处于负载/卸载控制、所有非泄漏用气关闭、负载时输出为受控满载流量、卸载时输出为零，且 10 个循环的负载与卸载切换压力分别落在各自 10 次均值的 $\pm 1\%$ 内时，才发布负载时间 T_{on} 与卸载时间 T_{off} 的算术平均值。泄漏占压缩机容量比例按 DOE 方法计算[9]：

$$R_{leak, capacity} = T_{on} / (T_{on} + T_{off}) \cdot 100\%$$

任一前提失败时不发布该百分比。该方法只用于供给系统总泄漏筛查；单台设备使用第 05.1 节结果。两种方法边界不同，不把两个百分比直接平均。

05.4 设备泄漏空气占比

$$\begin{aligned} V_{leak, year} &= \sum(s, b, k) q_{leak, s, b, k} \cdot 60 \cdot H_{s, b, k} \\ R_{leak} &= V_{leak, year} / V_{device, year} \cdot 100\% \\ R_{leak, U} &= V_{leak, U} / (V_{device, year} - U_{V, device}) \cdot 100\% \end{aligned}$$

$V_{device, year}$ 为同一支路全年全部带压状态的供气量，包含生产、返工、调试、换型、空闲、故障和泄漏。泄漏量不得再次叠加到已经由支路流量计积分得到的 $V_{device, year}$ ；只有使用分项模型估算全年总量时，才把 $V_{leak, year}$ 与各功能性分项相加。放行使用第 02 章定义的 $R_{leak, U}$ ，点值只用于展示。

等级	$R_{leak, U}$	判定	强制动作
A	$\leq 5\%$	通过，低泄漏	保持季度复测
B	$> 5\%$ 且 $\leq 10\%$	通过，受控泄漏	建立漏点清单并在 30 日内修复； 第 30 日结束前未关闭工单时自动 转为不通过
C	$> 10\%$ 且 $\leq 20\%$	不通过	修复后重新完成第 05.1 节全部组合 测量

等级	R _{leak,U}	判定	强制动作
D	>20%	不通过, 严重空耗	移除工件与悬吊载荷、完成机械锁止和上锁挂牌后隔离非生产供气并修复

美国能源部第三版 Sourcebook 将维护良好的压缩空气系统泄漏水平描述为低于 5% ~ 10%，维护不足的系统达到 20% ~ 30%[9]；其负载/卸载法结果对应压缩机容量或全系统供气边界。本文 R_{leak} 对应单台设备支路的年度泄漏体积除以年度支路总供气体积，分母不同，因此不把 DOE 比例换算为设备比例。本文独立规定 R_{leak,U} ≤ 10% 为项目通过上限；该门槛只用于本评估方法。检测到安全相关保压回路泄漏时，设备安全判据优先于能耗等级；泄漏修复完成后执行第 11 章全部六项复测。

06 压力损失、流通能力与最低压力判据

压力评价取峰值流量动作和最低入口压力动作。先对所有正式产品型号的全部气动动作各记录 10 次同步流量与压力，峰值流量动作取动态流量最大值最高的一项，最低入口压力动作取 p₃ 最低值最低的一项；两者相同时只保留一项。正式评价对入选动作各连续记录 30 次。动态流量通道与四个压力通道使用同一 1 kHz 采样时钟，组合 -3 dB 带宽不低于 200 Hz。

对全部正式评价波形逐样本计算压力损失，并按扩展不确定度的不利方向取界。p₀、p₁、p₂、p₃ 分别为四点同步表压，U₀、U₁、U₂、U₃ 为相应绝对扩展不确定度：

$$\begin{aligned}
 R_{\Delta p, \text{main}, U} &= \max(i, t) \{1 - [p_{2,i(t)} - U_{2,i(t)}] / [p_{1,i(t)} + U_{1,i(t)}]\} \cdot 100\% \\
 R_{\Delta p, \text{total}, U} &= \max(i, t) \{1 - [p_{3,i(t)} - U_{3,i(t)}] / [p_{0,i(t)} + U_{0,i(t)}]\} \cdot 100\% \\
 p_{3, \text{min}, L} &= \min(i, t) [p_{3,i(t)} - U_{3,i(t)}]
 \end{aligned}$$

i 遍历全部入选动作的 30 次波形，t 遍历每个样本；任一分母不大于零时数据项不通过。DOE Sourcebook 指出，从压缩机排气到最终使用点的压力损失应远低于排气压力的 10%，主干管最大设计压降为 1% ~ 2%[9]。本文把 R_{Δp,total,U} ≤ 10% 作为项目上限，并把 R_{Δp,main,U} ≤ 2% 作为新建或重构主干管上限；两者分别作为总压降与主干管压降的放行门槛，判定口径见第 11 章。设备还必须满足 p_{3,min,L} ≥ p_{required,min,g}；p_{required,min,g} 只取受控设计文件的最低工作表压，缺少该文件时压力项不通过。

检查项	通过判据	不通过触发点
新建或重构主管 压降	$R_{\Delta p, \text{main}, U} \leq 2\%$	保守上界 $> 2\%$
总压降	$R_{\Delta p, \text{total}, U} \leq 10\%$	保守上界 $> 10\%$
动态最低入口压力	$p_{3, \text{min}, L} \geq p_{\text{required}, \text{min}, g}$	保守下界低于设计下限
重复性	每个入选动作的 30 次波形全部进入守界 计算	任一波形缺失或任一守界失败

提高空压机排气压力不能代替消除末端节流。流量不足时，按实测动态峰值流量核对过滤器、快插、软管、阀岛和消声器；标准适用范围内元件使用 ISO 6358 数据，组件组合使用 ISO 6358-3 计算。调压器只使用第 04 章规定的制造商压力—流量曲线或同步实测。改造后，每个入选动作的全部 30 次波形进入守界计算且压力、功能判据全部通过，压力项才通过。

压降分段固定使用 P0-P1、P1-P2、P2-P3 三段的同步样本。任一段压降占 P0-P3 同时刻总压降超过 40%，该段列为第一整改顺序；总压降不大于零时不计算该比例。该比例只决定整改顺序，不改变 2% 主管和 10% 总压降门槛。压力传感器量程上限不得超过受控设计工作表压的 2 倍，四点零点差在卸压状态须小于满量程的 0.5%，否则压力数据不通过。

07 电耗归属与年度成本

单台设备的年度分摊电耗和分摊电费按同期系统平均比功率计算[10]：

$$\begin{aligned} E_{\text{device}, \text{alloc}, \text{year}} &= SP_{\text{sys}} \cdot V_{\text{device}, \text{year}} \\ C_{\text{energy}, \text{alloc}, \text{year}} &= E_{\text{device}, \text{alloc}, \text{year}} \cdot c_e \\ C_{\text{leak}, \text{alloc}, \text{year}} &= SP_{\text{sys}} \cdot V_{\text{leak}, \text{year}} \cdot c_e \end{aligned}$$

c_e 取企业账单的综合电量单价，单位元/kWh。上述三项只能标记为“分摊”，不得写成实际节电或可兑现收益。实际年度节电与电费节省按第 03 章负荷分箱计算：

$$\begin{aligned} \Delta E_{\text{actual}, \text{year}} &= \sum(b) \Delta V_{b, L} \cdot SP_{\text{marg}, b} \\ \Delta C_{\text{energy}, \text{year}} &= \sum(b) \Delta V_{b, L} \cdot SP_{\text{marg}, b} \cdot c_{e, b} \\ \Delta C_{\text{energy}, L, \text{year}} &= \sum(b) \Delta V_{b, L} \cdot SP_{\text{marg}, b, L} \cdot c_{e, b, L} \end{aligned}$$

存在分时电价时，负荷箱同时按电价时段拆分； $c_{e, b, L}$ 取对应账单电量单价的下界。需量电费只有在改造降低账单计费窗口内的最大需量且账单记录给出确定金额时才能计入；缺少该证据时

固定取零。维护、备件、停线损失只采用财务或维护系统中有凭证的金额；没有凭证的项目固定取零，禁止用行业平均数填充。

供给系统平均比功率按月滚动计算。分摊指标统一使用体积加权值

$SP_{sys,common} = (E_{sys,base} + E_{sys,after}) / (V_{supply,base} + V_{supply,after})$ ，不设置口头加权规则。实际节电量始终使用同负荷分箱的 $SP_{marg,b}$ 或全站归一化前后实测差，不使用 $SP_{sys,common}$ 。

年度体积不得用单个班次乘以 365。生产分项按各型号归一化强度乘以批准的年度循环数，泄漏分项按状态—压力—阀位组合的泄漏流量乘以年度带压小时，换型、空闲和故障分项按连续 7 日各组合的功能性平均流量与企业排产系统的年度组合小时计算。年度模型固定为：

$$V_{device,year} = \sum(j) I_{prod,j} \cdot N_j / 1000 \\ + \sum(s,b,k) q_{leak,s,b,k} \cdot 60 \cdot H_{s,b,k} \\ + \sum(s=R,S,C,I,F; b,k) q_{s,b,k} \cdot 60 \cdot H_{s,b,k}$$

式中各状态 $q_{s,b,k}$ 为扣除同期 $q_{leak,s,b,k}$ 后的功能性平均流量。同一体积只能出现一次。先在评价 7 日窗口内用实测 N_j 、 $H_{s,b,k}$ 计算分项模型，并与该窗口支路原始总积分比较；差异超过 2% 时不得年度外推。通过 7 日闭合后，才用冻结的年度 N_j 、 $H_{s,b,k}$ 外推。项目放行满 12 个月后，用全年支路总积分复核年度模型，差异超过 5% 时该经济结论从复核日失效，并在 5 个工作日内重做第 11 章全部六项评价。

08 全生命周期成本与投资门槛

本文固定采用 5 年评价期。项目贴现率 r 只使用企业批准值；缺少批准值时经济项不通过。第 09 章计算输入中的贴现率固定为 5%，其他方案按企业批准值计算。点值全生命周期成本和净现值按下式计算：

$$LCC_5 = C_{invest} + \sum[y=1..5] (C_{energy,y} + C_{maint,y} + C_{parts,y} + C_{stop,y}) / (1+r)^y \\ NPV_{save} = \sum[y=1..5] (C_{base,y} - C_{after,y}) / (1+r)^y - C_{invest}$$

守界计算以投资上界 $C_{invest,U}$ 和每年净节省下界 $S_{y,L} = C_{base,y} - C_{after,y} - U_{S,y}$ 为输入：

$$NPV_{save,L} = \sum[y=1..5] S_{y,L} / (1+r)^y - C_{invest,U} \\ K_n = \sum[y=1..n] S_{y,L} \\ PB_U = (n-1) + (C_{invest,U} - K_{(n-1)}) / S_{n,L}, \quad K_{(n-1)} < C_{invest,U} \leq K_n$$

n 是未贴现累计净节省首次达到投资上界的年份，年内净节省按均匀发生计算；5 年内不存在该 n 、任一年 $S_{y,L} \leq 0$ 或分母不大于零时， PB_U 定义为无穷大。等额年度净节省时，上式简化为

$PB_U = C_{invest,U/S_1,L}$ 。残值、税收优惠和融资成本只有在合同或财务制度给出确定金额时才进入模型。经济项的通过条件固定为 $NPV_{save,L} > 0$ 且 $PB_U \leq 3.0$ 年；点值不用于放行。任一条件失败，经济项不通过。即使经济项通过，只要压力、功能或安全项失败，总项目仍判不通过。

基线方案与改造方案使用同一年度循环数、电价序列和贴现率。没有企业批准的能源价格增长率时，五年电价增长率固定取 0%；没有合同残值时残值固定取 0。实际节电的下界只取第 03、07 章的分箱边际模型或全站归一化实测，平均比功率分摊值不得进入 S_y,L 。计算保留未舍入值，表格金额显示到 0.01 元、体积显示到 0.1 m³、比率显示到 0.01 个百分点，判定使用未舍入值，防止临界值因显示舍入而改变结论。

09 单台设备支路完整计算与判定

本章计算输入固定为：每年 180,000 次合格循环，生产 3,000 h，支路带压 4,000 h；改造内容为漏点修复、真空供气命令窗口缩短和末端流路降阻；投资上界 4,000.00 元；综合电价及其下界均为 0.80 元/kWh；5 年贴现率 5%；电价增长率、维护差额、备件差额、停线差额、需量电费差额和残值均为 0。系统平均比功率 0.115 kWh/m³(ANR) 只用于分摊指标。

09.1 数据、泄漏量与不确定度

计算工况的数据质量参数固定为：七日数据覆盖率 98.6%；流量、参考状态、时钟、状态分类和年度外推形成的年度用气相对扩展不确定度在基线与改造后均为 4.0%；对应绝对扩展不确定度分别为 $33,960 \times 4\% = 1,358.4 \text{ m}^3$ 和 $12,720 \times 4\% = 508.8 \text{ m}^3$ 。边际功率—流量模型相对扩展不确定度列入第 09.3 节；四个压力通道的相对扩展不确定度均为 1.2%。仪表校准状态取“有效”，压力通道偏差取不超过 1 ms，组合带宽取 250 Hz。按第 02 章判据，数据项通过。

计算工况设置一个 0.70 MPa 压力档。P/R/S/C/I/F 六个状态内的全部稳态阀位组合按第 05.1 节设置 30 min 计算窗口，动作与有意用气命令均取 0；全部组合的流量输入在改造前取 0.080 m³/min(ANR)，改造后取 0.002 m³/min(ANR)。两期泄漏流量的相对扩展不确定度均取 4.0%，即 $U_{q,base} = 0.0032 \text{ m}^3/\text{min}$ 、 $U_{q,after} = 0.00008 \text{ m}^3/\text{min}$ 。年度带压时数作为精确输入， $U_H = 0$ ：

$$\begin{aligned} V_{leak,base} &= 0.080 \times 60 \times 4000 = 19,200 \text{ m}^3 (\text{ANR}) \\ V_{leak,after} &= 0.002 \times 60 \times 4000 = 480 \text{ m}^3 (\text{ANR}) \end{aligned}$$

泄漏量采用支路流量法。7 日支路总积分与状态分项模型的闭合差输入为 0%，符合 2% 门槛。返工、调试、换型、空闲功能性用气和故障功能性用气均固定为 0，支路总用气只由生产用气与泄漏用气构成。

09.2 用气、泄漏与能效守界

生产用气强度输入由 82 降至 68 m³(ANR)/1000 次，对应年度生产用气分别为 14,760 和 12,240 m³(ANR)。

指标	改造前	改造后	放行结果
年生产用气	14,760 m ³ (ANR)	12,240 m ³ (ANR)	减少 2,520
年泄漏用气	19,200 m ³ (ANR)	480 m ³ (ANR)	减少 18,720
年总用气	33,960 m ³ (ANR)	12,720 m ³ (ANR)	点值减少 62.54%
泄漏空气占比点值	56.54%，D 级	3.77%，A 级	点值展示
泄漏空气占比上界	61.25%，D 级	4.09%，A 级	改造后 ≤5%，通过
总用气强度	188.67 m ³ /1000 次	70.67 m ³ /1000 次	点值降低 62.54%
分摊电耗指标	3,905.4 kWh	1,462.8 kWh	不作为实际节电证据

泄漏率上界按不利方向计算：

$$R_{\text{leak},U,\text{base}} = (0.080 + 0.0032) \times 60 \times 4000 / (33,960 - 1,358.4) = 61.2485\%$$

$$R_{\text{leak},U,\text{after}} = (0.002 + 0.00008) \times 60 \times 4000 / (12,720 - 508.8) = 4.0881\%$$

节气量点值为 21,240 m³(ANR)/年。两期相关性没有书面证据，固定采用线性保守上界：

$U_{\Delta V} = 1,358.4 + 508.8 = 1,867.2 \text{ m}^3$ ， $\Delta V_L = 21,240 - 1,867.2 = 19,372.8 \text{ m}^3$ 。强度扩展不确定度分别为 7.5467 和 2.8267 m³/1000 次：

$$\eta_{\text{air},L} = [1 - (70.6667 + 2.8267) / (188.6667 - 7.5467)] \times 100\% = 59.4229\%$$

$\eta_{\text{air},L} \geq 5\%$ 且 $\Delta V_L > 0$ ，能效项通过；改造后 $R_{\text{leak},U} = 4.0881\% \leq 5\%$ ，泄漏项为 A 级并通过。

09.3 实际节电与经济守界

负荷箱输入矩阵按改造前后各 60 个完整 1 min 样本计算；压缩机启停顺序、控制模式、0.70 MPa 供气设定和空气处理设备运行组合取相同状态。三个负荷箱覆盖全部改造前后流量。各箱节气量扩展不确定度之和固定为 1,867.2 m³，各箱边际比功率扩展不确定度均为 0.005 kWh/m³(ANR)：

全站流量负荷箱	ΔV_b	$U_{\Delta V,b}$	$SP_{marg,b}$	$U_{SP,b}$	节电点值	节电下界
[0,10] m ³ /min	5,520 m ³	500 m ³	0.100	0.005	552.00 kWh	476.90 kWh
(10,20] m ³ /min	10,080 m ³	880 m ³	0.112	0.005	1,128.96 kWh	984.40 kWh
(20,30] m ³ /min	5,640 m ³	487.2 m ³	0.124	0.005	699.36 kWh	613.18 kWh
合计	21,240 m ³	1,867.2 m ³	—	—	2,380.32 kWh	2,074.48 kWh

实际节电点值为 2,380.32 kWh/年；守界值为 $(5,520-500) \times (0.100-0.005) + (10,080-880) \times (0.112-0.005) + (5,640-487.2) \times (0.124-0.005) = 2,074.4832$ kWh/年。年度电费节省点值为 $2,380.32 \times 0.80 = 1,904.256$ 元，下界为 $2,074.4832 \times 0.80 = 1,659.58656$ 元。

5 年等额成本现值系数为 4.32947667。净现值节省点值为 $1,904.256 \times 4.32947667 - 4,000 = 4,244.43$ 元；净现值节省下界为 $1,659.58656 \times 4.32947667 - 4,000 = 3,185.14$ 元。点值回收期为 $4,000 / 1,904.256 = 2.10$ 年；年度下界等额，回收期上界为 $4,000 / 1,659.58656 = 2.41$ 年。NPV_save, L=3,185.14>0 且 PB_U=2.41≤3.0 年，经济项通过。

09.4 压力、功能安全与总判定

压力校核条件固定为：关键执行元件最低工作表压 0.60 MPa；峰值流量动作与最低入口压力动作为同一动作；动作波形样本数 30。下列压力参数取输入矩阵中的最不利值：P0 为 0.70 MPa，U_0=0.0084 MPa；改造前 P3 最低点为 0.61 MPa，U_3=0.00732 MPa；改造后 P3 最低点为 0.65 MPa，U_3=0.0078 MPa：

$$\begin{aligned}
 R_{\Delta p, total, U, base} &= 1 - (0.61 - 0.00732) / (0.70 + 0.0084) = 14.9238\% \\
 R_{\Delta p, total, U, after} &= 1 - (0.65 - 0.0078) / (0.70 + 0.0084) = 9.3450\% \\
 p_{3, min, L, after} &= 0.65 - 0.0078 = 0.6422 \text{ MPa}
 \end{aligned}$$

改造前总压降上界超过 10%，压力项不通过；改造后总压降上界不超过 10%，最低压力下界高于 0.60 MPa，压力项通过。本计算工况不包含新建或重构主干管，2% 主干管附加门槛不触发。

功能安全校核矩阵包含断气保持、急停、制动、夹持确认、防误释放和残余能量处理六项；每项写明载荷、初始状态、动作命令、保持时间和二元验收条件。六项二元状态均取“通过”，安全旁路数取 0。按本章输入计算，数据、泄漏、压力、能效、经济和功能安全六项门槛全部通过，总判定为“通过”。

10 改造优先级与复测流程

改造按以下固定顺序执行：第一步在移除工件与悬吊载荷、机械锁止和上锁挂牌完成后隔离废弃支路、空闲设备和非零耗气排水器；第二步修复接头、软管、阀和密封泄漏；第三步按压降分段结果清理或更换过滤器、快插、软管、阀岛与消声器，调压器按制造商曲线或同步实测处理；第四步以 0.02 MPa 为步长下调局部调压设定，每个设定执行第 06 章全部压力波形与功能安全测试，放行设定固定为满足 $R_{\Delta p, total, U} \leq 10\%$ 、 $p_{3, min, L} \geq p_{required, min, g}$ 且功能安全 100% 通过的最低已测设定；第五步为每个吹气和真空发生器命令建立 PLC 白名单窗口，窗口起止信号与持续时间写入受控配方，任一循环在窗口外出现命令为 1 即判不通过；第六步完成全部功能安全测试；第七步重复 7 日能效计量。先升高空压机压力或新增空压机不进入前六步。

复测使用冻结产品权重和相同循环定义。第 05.1 节每个状态—压力—阀位组合重新记录 30 min；压力试验覆盖第 06 章定义的两类动作全部波形；安全测试覆盖断气保持、急停、制动、夹持确认、防误释放、残余能量处理以及项目风险评估增加的全部功能。任一项失败，设备不得以节能模式投入生产。

项目放行后，每月用最近完整月数据计算 $I_{air, norm}$ ，每季度按第 05.1 节重测泄漏；每次更换软管、阀岛、调压器、真空发生器、压力设定或控制程序后重做第 11 章全部六项。月度归一化用气强度保守下界比放行值上升超过 10%，或季度 $R_{leak, U} > 10\%$ ，设备在 5 个工作日内完成漏点定位并启动六项复测； $p_{3, min, L}$ 低于设计下限或任一安全功能失败时立即退出节能模式。恢复生产必须同时具备根因记录、已完成维修工单、六项复测通过记录和设备与安全责任人签字，缺少任一记录不得恢复。所有原始记录、公式版本和判定表保存不少于 5 年，以覆盖本报告的完整 LCC 评价期，并形成能源绩效持续改进记录链[12]。

11 FMEA、风险控制与总放行规则

失效模式	错误后果	检测与控制	不通过条件
表压当绝压代入气体公式	用气量系统性偏差	公式字段分开记录 p_g 、 p_{abs} 、 p_{atm}	任一压力基准不明
m^3 、 Nm^3 与 $m^3(ANR)$ 混用	流量不可比	全部换算至 ISO 8778 参考状态	缺少参考温压湿度
泄漏试验未隔离生产用气	泄漏量虚高	锁闭并挂牌全部生产出口	试验期间任一执行器动作
压降试验只取平均压力	漏掉瞬态低压	同一 1 kHz DAQ 记录四通道并对全部波形逐样本守界	任一波形缺失、压降上界超限或压力下界不足
用平均比功率直接证明实际节电	收益被高估	同负荷边际功率—流量模型或全站归一化实测	两类实际节电证据均无效
降压破坏夹持与制动功能	载荷漂移或释放危险	执行受控风险评估列出的全部功能与失压测试	任一功能或安全测试失败
泄漏修复误封安全排气	残余能量不能释放	对照气路图逐点复核	隔离后残压处理不合格
节电量与泄漏量重复计价	收益被高估	全部收益从总用气差额统一计算	同一体积在两项收益重复出现
把停线损失估值写成确定收益	LCC 虚高	只取有凭证的财务金额	无凭证金额进入模型

总放行采用“一票否决”。以下六项全部通过，项目结论才为通过：

1. 数据项：覆盖率、仪表、同步、带宽、重复性、7 日闭合和不确定度预算全部满足第 02 章。
2. 泄漏项： $R_{leak}, U \leq 10\%$ 。
3. 压力项： $R_{\Delta p, total}, U \leq 10\%$ 且 $p_{3, min}, L \geq p_{required, min, g}$ ；项目包含新建或重构主干管时，另须满足 $R_{\Delta p, main}, U \leq 2\%$ 。

4. 能效项: $\eta_{air,L} \geq 5\%$ 且节气量保守下界 $\Delta V_L > 0$ 。
5. 经济项: $NPV_{save,L} > 0$ 且 $PB_U \leq 3.0$ 年。
6. 功能安全项: 受控风险评估列出的全部功能与安全测试 100% 通过, 安全旁路数量为零; 缺少风险评估、二元验收条件或任一测试记录时不通过。

任一项失败, 总项目判不通过; 任何整改完成后重新执行全部六项, 不采用局部复测替代。

12 研究结论

气动助力机械臂的压缩空气经济性不能由入口压力、空压机铭牌或单次流量截图证明。完整证据链由统一参考状态、设备支路流量积分、状态—压力—阀位组合泄漏测量、四通道动态压力、生产循环计数、同负荷边际功率—流量模型和财务凭证组成。本文给出的泄漏率上界 10%、总压降率上界 10%、用气改善下界 5%、净现值下界为正和回收期上界 3 年共同形成工程放行规则。

本方法用于能效基线、改造评审、采购全生命周期成本比较和运行维护复测。设备项目的正式计量记录、风险评估、设计文件和测试报告同时满足第 11 章六项门槛时, 结论为“本方法评估通过”; 任一门槛失败, 结论为“不通过”。

标准状态核查基准日为 2026-08-15: ISO 11011:2013、ISO 4414:2010、ISO 8778:2003、ISO 6358-1:2013、ISO 6358-2:2019、ISO 6358-3:2014 和 ISO 50001:2018 均处于 ISO 已发布状态; ISO 1217:2009 仍为已发布版本并处于修订阶段; GB/T 7932-2017 在全国标准信息公共服务平台标记为现行。第 05、12 章已计入截至该日发布的 ISO 6358 与 ISO 50001 修正案。项目在核查基准日后启动时, 标准清单必须在立项日重新比对; 未完成比对时数据项不通过。

参考文献

1. ISO 11011:2013. Compressed air — Energy efficiency — Assessment. <https://www.iso.org/standard/46580.html>
2. ISO 4414:2010. Pneumatic fluid power — General rules and safety requirements for systems and their components. <https://www.iso.org/standard/44790.html>
3. GB/T 7932-2017 《气动 对系统及其元件的一般规则和安全要求》. <https://openstd.samr.gov.cn/bzgk/std/newGbInfo?hcno=8F5EDDC1CD00C550340316DBCEC789DD>
4. ISO 1217:2009. Displacement compressors — Acceptance tests; Amendment 1:2016. <https://www.iso.org/standard/44769.html>
5. ISO 6358-1:2013, Amendment 1:2020 and Amendment 2:2026. Pneumatic fluid power — Determination of flow-rate characteristics of components using compressible fluids — Part 1: General rules and test methods for steady-state flow. <https://www.iso.org/standard/56612.html>
6. ISO 6358-2:2019, Amendment 1:2026. Pneumatic fluid power — Determination of flow-rate characteristics of components using compressible fluids — Part 2: Alternative test methods. <https://www.iso.org/standard/71270.html>
7. ISO 6358-3:2014. Pneumatic fluid power — Determination of flow-rate characteristics of components using compressible fluids — Part 3: Method for calculating steady-state flow-rate characteristics of systems. <https://www.iso.org/standard/56616.html>
8. ISO 8778:2003. Pneumatic fluid power — Standard reference atmosphere. <https://www.iso.org/standard/26559.html>
9. U.S. Department of Energy. Improving Compressed Air System Performance: A Sourcebook for Industry, Third Edition. <https://www.energy.gov/sites/default/files/2016/03/f30/Improving%20Compressed%20Air%20Sourcebook%20version%203.pdf>
10. U.S. Department of Energy. Determine the Cost of Compressed Air for Your Plant, Compressed Air Tip Sheet #1. https://www.energy.gov/sites/default/files/2014/05/f16/compressed_air1.pdf
11. U.S. Department of Energy / National Renewable Energy Laboratory. Uniform Methods Project, Chapter 22: Compressed Air Evaluation Protocol. <https://www.energy.gov/sites/prod/files/2015/01/f19/UMPCChapter22-compressed-air-evaluation.pdf>
12. ISO 50001:2018, Amendment 1:2024. Energy management systems — Requirements with guidance for use. <https://www.iso.org/standard/69426.html>