



ENGINEERING RESEARCH REPORT · 工程研究报告

助力机械臂导入前后人体工效学改善量化 与作业放行研究

面向人工搬运改造项目的风险指数、操纵力、姿势与节拍量化研究

文件编号 AUREK-RC-AR-042

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 研究问题、动作边界与判定逻辑

02 标准链、版本状态与采用规则

03 导入前人工抬举基线：RNLE

04 多任务 CLI 与输入完整性

05 导入后动作分解与测力方法

06 RAPP、路线与静态姿势评价

07 测试设计、数据质量与可追溯记录

08 导入前人工抬举计算

09 导入后推拉与引导计算

10 改善量化、放行标准与结论模板

11 风险分析与 FMEA

12 变更控制、周期复核与作业文件

13 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

助力机械臂导入前后的动作性质不同，不能用同一指标机械比较。导入前，操作者双手承担工件全部重量并完成提起或放下，属于完全人工双手抬举；评价指标是 NIOSH Revised Lifting Equation (RNLE) 的推荐重量限值 RWL、单任务抬举指数 LI 和多任务复合抬举指数 CLI。导入后，机械臂承担工件重力，操作者主要施加启动、制动、推、拉、转向和定位力，属于推拉与引导；此时 RNLE 不适用。水平轴完全由操作者以双手和全身力量驱动时，采用经校准测力计、HSE RAPP 与 ISO 11228-2；水平轴由电机、气缸或其他动力源驱动时，RAPP 不适用，转入三轴手力测量和专项人体工效学评价。姿势角度按内部补充门判定；ISO 11226 与 GB/T 42730 的符合性评价按各自完整适用条件执行。

本研究形成一套可直接执行的项目放行门：导入前每个仍存在的完全人工抬举子任务，其 FILI 与 STLI 必须不大于 1.00，全部子任务形成的 CLI 必须不大于 1.00；导入后正常循环中的人工承重抬举次数必须为 0，混合用工工位每个有效循环经合力测量不确定度修正后的启动/停止力必须不大于 150 N，持续力必须不大于 70 N。满足 RAPP 适用条件时，九个官方因子必须全部处于绿色且总分为 0；不满足 RAPP 适用条件时，必须完成专项评价。姿势、数据完整性和残余 FMEA 风险必须同时通过。任一条件不满足，结论均为“不放行”，不得用平均值、主观感受或前后百分比改善替代。

计算结果如下：导入前两个几何和载荷均不同的完全人工双手抬举子任务，总频率 2 次/min，在 45 min 作业后安排 45 min 恢复；无中间舍入的 CLI 计算值为 1.87690861858986，超过 1.000000，结论为不通过。导入后机械臂完全承重且水平轴无动力驱动，固定的 50 循环输入矩阵中最大修正启动/停止力为 142 N、最大修正持续力为 61 N，RAPP 九因子均为绿色/0，人工抬举为 0 次，结论为通过。改善写成“人工承重抬举暴露消除 100%，推拉项目门通过”，不得把导入后的 RNLE 写成 $LI = 0$ 。

核心结论

1. RNLE 只评价双手人工抬举，不能评价机械臂导入后的推、拉、引导或定位。
2. 导入前缺少平均质量、最大质量、H、V、D、A、频率、持续时间、恢复时间或抓握等级中的任何一项，RNLE 计算无效，工位不得放行。
3. 导入后以每个循环的最大合力加 U_{res} 判定；只报告均值不构成验收证据。

4. 本报告对混合用工采用 HSE 较低一组参考值作为项目硬门槛：启动/停止不大于 150 N，持续不大于 70 N。
5. RAPP 仅用于水平轴完全手动、双手、站立或行走、全身平稳施力的动作；动力水平轴与仅上肢控制动作判为 RAPP 不适用。RAPP 总分本身不是 HSE 规定的通用行动阈值；本研究另行规定“九因子全部绿色、总分 0”作为适用动作的项目放行门。
6. 改善成立必须同时满足“人工承重抬举归零”和“导入后推拉、姿势、风险、记录全部通过”，两类指标不能相互抵消。

01 研究问题、动作边界与判定逻辑

1.1 两种暴露必须分开建模

工况	操作者的主要输出	适用方法	禁止做法
导入前完全人工 双手抬举	双手承担工件全部重量，完成提起或放下	RNLE: RWL、FILI、STLI、CLI； ISO 11228-1；GB/T 31002.1	用推拉力限值代替抬举计算
导入前水平携行	双手持物并水平步行	ISO 11228-1/GB/T 31002.1 的携行评价及路线评价	只计算起点 RNLE 并忽略携行距离
导入后水平轴完全手动	机械臂承重；操作者双手、站立或行走，以全身力量启动、推拉、转向和停止	三轴测力、HSE 推拉参考值、 RAPP Section A、ISO 11228-2	把机械臂额定载荷当作手推力
导入后水平轴有动力	水平运动由电机、气缸或其他动力源产生；操作者给出控制或精定位输入	三轴手力、动作时序、设备动力状态与专项人体工效学评价	给出 RAPP 分数或声称 RAPP 通过
人与设备共享垂直载荷	人手在助力装置持续介入时承担部分垂直力	三轴手力时序 + 专项生物力学评价；离散的完全人工段另用 RNLE	把残余手力换算为质量后套 RNLE，或把共享承重记为抬举归零

动作判别以受力事实为准，不以设备名称为准。满足以下三项时，正常循环中的该段动作归为推拉/引导：工件重力由机械臂或夹具闭环承受；操作者不以手臂托住工件防止下落；失去手部接触后工件仍能保持受控状态。任一项不满足，该段动作属于共享承重或完全人工抬举。只有装置与工件脱离、工件全部重量由操作者双手承担的离散动作才能建立 RNLE 任务；装置持续提供部分支撑时，RNLE 状态记为“不适用”，并转入三轴手力与专项生物力学评价。

RAPP 适用性另按水平轴判定。水平驱动输出为 0、操作者双手施力、身体保持站立或行走、力量平稳作用于身体前方时，采用 RAPP Section A；水平驱动输出不为 0、操作者坐姿、单手操作、仅上肢控制或动作依赖外部身体支撑时，RAPP 状态记为“不适用”，不得用 0 分代替专项评价。

1.2 放行是串联系统

放行结果按逻辑“与”计算：

Release =
人工承重抬举门通过
AND 启动/停止力门通过
AND 持续力门通过
AND RAPP 适用性/专项评价门通过
AND 内部姿势门通过
AND FMEA 门通过
AND 数据完整性门通过

任何一个子门为假，Release = 不通过。改善百分比、操作者满意度、节拍提升和单次循环表现均不能覆盖失败项。

02 标准链、版本状态与采用规则

文件	截至本稿的官方状态	本研究用途
CDC/NIOSH RNLE 页面及 DHHS 94-110	CDC 官方页面在线；94-110 为 2021 年 9 月修订版	导入前 RWL、LI、CLI 的计算与输入规则
ISO 11228-1:2021	Published，第二版	人工提举、降低与移送边界；明确不覆盖推拉

文件	截至本稿的官方状态	本研究用途
ISO 11228-2:2007 + Amd 1:2022	2007 版及 2022 修正案已发布；主标准处于 ISO 90.92 阶段，截至本文日期尚无已发布替代版	导入后符合其动作范围的全身推拉评价框架
ISO 11226:2000	Published；2018 年复审确认；当前处于 ISO 90.92 阶段	无外力或仅有最小外力时的静态姿势框架；本文施力阶段角度只作内部补充门
ISO/TR 12295:2014	Published	选择 ISO 11228 系列与 ISO 11226 的应用路径
GB/T 31002.1-2014	国家标准全文公开系统标示现行	国内人工提举与移送依据；其修订项目尚未形成替代发布版
GB/T 42730-2023	现行，2024-03-01 实施	国内静态工作姿势评价依据
GB/T 36954-2018	现行	将人类工效学纳入机械风险评估和风险减小

GB/T 31054-2014 的正式名称是《机械产品计算机辅助工程 有限元数值计算 术语》，不是人类工效学或手工搬运标准。本研究核实后明确排除该文件，改用 GB/T 31002.1-2014。引用编号相近不能构成标准选用依据。

采用规则固定如下：国际或国家标准提供方法边界和评价框架；CDC/NIOSH 给出 RNLE 计算；HSE 给出推拉参考力和 RAPP 分级；本报告把这些框架转化为更严格、可审计的项目放行门。文中 150 N、70 N、全绿/0 分、50 循环、100 Hz 采样率、合力不确定度、姿势角、FMEA 阈值、变更复评与年度周期均属于本研究规定的验收条件。NIOSH、HSE、ISO 和 GB/T 文件在本文中均不被解释为中国法定职业暴露限值；HSE 明确说明 150 N、70 N 等数值是指南值，不是重量限值或获批的安全界限。

03 导入前人工抬举基线：RNLE

3.1 必填输入

每个抬举子任务必须在起点和终点分别记录几何，至少包括：

符号/字段	定义与单位	硬性输入规则
L_avg、L_max	子任务平均载荷质量、最大载荷质量, kg	使用校准秤逐件实测; FILI 使用 L_max, STLI 使用 L_avg
H	双手中点至踝间中点的水平距离, cm	记录循环内实测最大值; H 小于 25 cm 时按 25 cm 计
V	双手中点离地高度, cm	起点和终点分别记录
D	垂直移动距离, cm	小于 25 cm 按 25 cm 计
A	躯干前方中线与手部位置的非对称角, °	取循环最大值
F	抬举频率, 次/min	连续观察不少于 15 min; 按各子任务分别计数
Duration	连续作业持续时间、恢复时间及其后的抬举时段	短时要求连续工作≤1 h; 若本班次其后再次抬举, 紧接前一工作段的恢复时间/前一工作段时间必须≥1.0; 若其后不再抬举, 记录“本班次无再次抬举”
Coupling	良好、一般或差	按把手、容器和手部接触条件判级

缺少任何字段、量具无有效校准、起终点未分开或只记录一个单一姿势, 该任务的 RNLE 记录判为无效, 不能出具通过结论。

输入域同样属于硬门。H 必须不大于 63 cm, V 必须位于 0 ~ 175 cm, D 必须不大于 175 cm, A 必须位于 0 ~ 135°; 频率必须落入所选 V 与持续时间类别的官方 FM 表。超出任一范围时不得外推乘数, RNLE 状态记为“不适用”, 该动作不能通过 RNLE 放行。每件质量均保留原始记录, 由记录直接计算 L_avg 与 L_max; 几何取有效循环中的最大暴露值, 设计名义尺寸不得替代实测。目的地出现重新抓握、短暂停留、精确放置或手部引导中的任一项时, 起点与终点分别保留完整计算链并采用 $\min(RWL_origin, RWL_destination)$; 四项均为否时, 记录“不需要目的地计算”及判定证据。

3.2 RWL 与 LI

采用厘米和千克单位时:

$$RWL = LC \times HM \times VM \times DM \times AM \times FM \times CM$$

$$\begin{aligned}
 LC &= 23 \text{ kg} \\
 HM &= \min(1, 25 / H) \\
 VM &= 1 - 0.003 \times |V - 75| \\
 DM &= 0.82 + 4.5 / D \\
 AM &= 1 - 0.0032 \times A \\
 LI &= L / RWL
 \end{aligned}$$

FM 必须从 NIOSH 官方频率表按 V、频率、持续时间与恢复条件查取，CM 必须按官方抓握表查取，不得线性内插或凭经验指定。需要目的地计算时，对起点和终点分别计算 RWL，使用较小的 RWL 形成较大的 LI。判定一律使用未舍入计算值；两位小数只用于报告显示。任何项目门指标未舍入值大于 1.000000 即失败，等于 1.000000 允许。

RNLE 有明确应用边界：双手完全承担载荷、载荷可控制、站立条件和规定工业环境。单手、坐姿或跪姿、多人共同搬运、静态抱持、人与设备共享承重、边走边持物、推拉、铲取、垂直运动速度超过 76 cm/s、鞋底与地面静摩擦系数低于 0.4 或不稳定载荷均不得直接套用公式。水平携行另按 ISO 11228-1/GB/T 31002.1 评价距离、频率和累计质量；超出边界时不输出“近似 LI”，RNLE 状态记为“不适用”并转入专项评价。

04 多任务 CLI 与输入完整性

同一岗位只要存在两种以上载荷、频率、几何、抓握或目的高度，就必须拆分子任务并计算 CLI。每个子任务分别记录 L_{avg} 和 L_{max} ；先把 FM 置为 1，得到与频率无关的推荐重量 FIRWL，再用 L_{max} 得到 FILI；按每个子任务频率得到 STRWL，再用 L_{avg} 得到 STLI。子任务按未舍入 STLI 从高到低排序；STLI 相同时，频率数值更大者排在前。

$$\begin{aligned}
 FIRWL_i &= LC \times HM_i \times VM_i \times DM_i \times AM_i \times CM_i \\
 FILI_i &= L_{max,i} / FIRWL_i \\
 STRWL_i &= FIRWL_i \times FM_i \\
 STLI_i &= L_{avg,i} / STRWL_i \\
 CLI &= STLI_1 \\
 &+ \sum_{i=2 \dots n} FILI_i \times \\
 &[1 / FM_{(1 \dots i)} - 1 / FM_{(1 \dots i-1)}]
 \end{aligned}$$

$FM_{(1 \dots i)}$ 是前 i 个子任务累计频率对应的频率乘数，并按被加入子任务的 V 类别、作业时长和恢复条件从官方表取值。不得采用“各任务 LI 的平均值”或“最大 LI”代替 CLI。通过条件同时包含：每一子任务未舍入 $FILI \leq 1.000000$ 、 $STLI \leq 1.000000$ ，且整组未舍入 $CLI \leq 1.000000$ 。若班次超过 RNLE 表格所覆盖的时长、频率超出表格范围或累计频率没有对应 FM，结论直接为“不通过 RNLE 放行”，不能把空白 FM 当作 1。

数据完整性审查采用四眼复核：记录人完成原始测量、计算人完成公式和查表、独立审核人核对任务拆分及单位。三者姓名、日期和版本号全部存在才算有效。电子表必须锁定公式单元格并保存输入、查表来源和计算结果，不能只保留截图。

05 导入后动作分解与测力方法

5.1 动作分段

导入后一个循环固定拆成六段：接近把手、启动、匀速引导、转向/高度调整、停止/精定位、脱离。启动和停止评价峰值；匀速引导、转向与高度调整评价持续力；接近与脱离评价姿势和无意外承重。夹具夹紧至释放之间，人工托住工件的累计时间必须为 0 s，人工承重抬举次数必须为 0。

5.2 仪器和计算

使用三轴测力计，单轴量程至少为 $\pm 500\text{ N}$ ，分辨率不大于 1 N ，采样频率不低于 100 Hz ，有效校准周期不超过 12 个月。坐标固定为： F_x 沿运动方向， F_y 为水平横向， F_z 为竖直方向。传感器安装在实际把手与手部受力路径之间，不得改变把手高度、握距或运动阻力。每组试验前后清零；任一轴零点差绝对值大于 2 N 时，该组数据作废并整组重测。

合力扩展不确定度定义为 U_{res} ，不直接把校准证书中的单轴扩展不确定度相加。将各轴 $k=2$ 扩展不确定度除以 2 得到标准不确定度 u_x 、 u_y 、 u_z ，并加入零点、安装角和重复性的标准不确定度：

$$F_{\text{res}}(t) = \sqrt{F_x(t)^2 + F_y(t)^2 + F_z(t)^2}$$

$$u_{\text{res}}^2 = (F_x/F_{\text{res}})^2 u_x^2 + (F_y/F_{\text{res}})^2 u_y^2 + (F_z/F_{\text{res}})^2 u_z^2 + u_{\text{zero}}^2 + u_{\text{align}}^2 + u_{\text{repeat}}^2$$

$$U_{\text{res}} = 2u_{\text{res}}$$

$$F_{\text{start},c} = \max(\text{启动窗口、停止窗口内的 } F_{\text{res}}) + U_{\text{res},\text{start}}$$

$$F_{\text{sus},c} = \max(\text{匀速及转向窗口内任意连续 } 1.0\text{ s 的 } F_{\text{res}} \text{ 平均值}) + U_{\text{res},\text{sus}}$$

U_{res} 在各判定窗口内取计算最大值，且不得大于 5 N 。若 $F_{\text{res}} = 0$ ，方向导数项置 0，只保留零点、安装角与重复性项。若引导窗口短于 1.0 s ， $F_{\text{sus},c}$ 取该窗口全部采样点的平均值加 $U_{\text{res},\text{sus}}$ 。启动窗口从 F_{res} 首次超过 10 N 起至速度连续 0.5 s 保持在设定速度 $\pm 5\%$ 内；停止窗口为到达目标前

1.0 s 至速度连续 0.5 s 为 0。视频、运动信号与测力信号必须同步至 0.1 s 以内。报告值始终是“示值 + U_{res} ”，不得在阈值判断后再补加不确定度。

HSE 指南要求把启动负载所需的最小推拉力与指南值比较；本研究改用正常操作中实际出现的三轴最大合力并加 U_{res} ，属于更严格的内部暴露门，不等同于 HSE 原始测量法。150 N 与 70 N 仅作为本研究采用的数值门，不是法定限值。

5.3 试验覆盖

每个设计边界条件使用 5 名实际岗位合格操作者，每人连续完成 10 个完整循环，共 50 个有效循环。样本必须包含在岗人员名册中身高数值最小者和最大者，并在记录中写明 5 人身高的整数厘米值；岗位包含女性时，5 人中至少 2 人为女性。边界条件至少覆盖额定最大工件质量、最大工作半径、最低和最高允许把手高度、正反两个运动方向、允许的最低气源压力或最低电源状态。每个边界条件均独立完成 50 循环，不能把不同条件合并。

硬性通过条件是每一个有效循环均满足：

$$\begin{aligned} F_{start,c} &\leq 150 \text{ N} \\ F_{sus,c} &\leq 70 \text{ N} \end{aligned}$$

150 N 与 70 N 取自 HSE 女性指南值，并作为混合用工项目门槛。任一有效循环超限即判定失败，不得以均值、P95 或删除超限人员的方式改判。50/50 零失败对应的单侧 95% 二项分布失效率上限为 $1-0.05^{(1/50)} = 5.82\%$ 。

06 RAPP、路线与静态姿势评价

RAPP 先做适用性判定。水平轴无动力输出、操作者双手、站立或行走、以全身力量平稳移动架空轨道或轮式设备时，使用 RAPP Section A；水平轴存在动力输出、动作仅由上肢完成、单手操作、坐姿操作或人员依赖外部身体支撑时，记录“RAPP 不适用”，并转入三轴手力与专项人体工效学评价。专项评价未完成即不放行，不能用 RAPP 0 分替代。

对适用动作，HSE RAPP 用颜色表示风险：绿色为低风险，琥珀色为中风险，红色为高或很高风险，紫色为不可接受。HSE 同时说明，总分用于比较和排定优先次序，不是通用行动阈值。本研究为避免总分抵消，规定 A-1 至 A-9 九个因子都必须是绿色并记 0 分，总分必须为 0；任何琥珀、红色或紫色因子均判定不通过。

评价对象	本研究放行值	现场证据
躯干	力作用阶段前屈 $\leq 20^\circ$ 、轴向旋转 $\leq 10^\circ$	侧面与俯视同步视频或角度传感器
手部高度	启动、引导、停止阶段均位于腕部至肩部之间	标尺背景的视频帧
抓握	双手完整环握；腕屈伸绝对值 $\leq 15^\circ$ 、桡尺偏绝对值 $\leq 10^\circ$ ；RAPP 抓握因子绿色/0	把手尺寸、正侧面视频与角度记录
下肢	跪姿、蹲姿、以背部顶推的持续时间均为 0 s	全循环视频
作业模式	无突然冲击、无单手甩动、无身体借重力启动	视频与力曲线
设备状态	制动、轴承、轨道、软管/电缆均完好，无卡滞	班前点检记录
地面与路线	干燥、水平、无台阶、无绊倒物，净通道满足工位图	带日期照片和路线检查表

前屈 20° 、旋转 10° 、腕屈伸 15° 和桡尺偏 10° 均为本研究内部补充门。施力阶段角度按内部补充门判定；ISO 11226 与 GB/T 42730 的符合性评价按各自完整适用条件执行。角度按全循环最大绝对值判定，不用循环平均角度。设备额定能力另设独立硬门：最大工件质量必须不超过设备、末端夹具、吊点和连接件额定能力中的最小值；RAPP 适用时，超过设备额定能力按紫色/不可接受处理并立即停止。

07 测试设计、数据质量与可追溯记录

放行包必须包含以下原始材料，缺一项即判数据门失败：

1. 工件逐件实测质量、 L_{avg} 、 L_{max} 、质心范围、夹持点、工位节拍和班次时长；
2. 导入前每个子任务的 H、V、D、A、F、持续时间、恢复时间、目的地控制判定和抓握等级原始表；
3. 机械臂、夹具、吊点和连接件额定能力以及允许压力/电压范围；

4. 测力计序列号、校准证书、 $u_x/u_y/u_z$ 、 u_{zero} 、 u_{align} 、 u_{repeat} 、 U_{res} 、采样率、安装照片和清零记录；
5. 操作者匿名编号、身高范围、岗位资格和试验条件；
6. 每个循环的原始三轴时序、分段标记、未舍入 $F_{start,c}$ 、未舍入 $F_{sus,c}$ ，不得只保存汇总值；
7. 全循环同步视频、RAPP 适用性判定、适用时 A-1 至 A-9 因子表、专项评价记录、姿势角度记录 and 路线照片；
8. RNLE 计算表、FMEA、偏差记录、复核签名、软件/表格版本和最终判定。

无效循环只允许因仪器掉线、同步失败或明确的非工艺外部中断剔除，原因必须在试验当场记录；因力值过大、动作不顺或操作者姿势差不能剔除。剔除后必须补做，直到每个边界条件取得 50 个有效循环。保留所有无效原始文件和原因，防止选择性报告。

设备预热和测试条件固定：按制造商规定完成开机检查；气压、电压、润滑、制动和负载状态记录到表；工件使用设计包络最大质量；操作者不得在正式试验前调高助力参数。参数值、软件版本、平衡设定和速度设定写入配置基线，试验后再次导出比对，任何差异均使该组试验失效。

08 导入前人工抬举计算

本章计算输入固定如下：设定两个在载荷、H、V、D、A 和抓握等级上均不同的完全人工双手抬举子任务，每个子任务频率 1 次/min，总频率 2 次/min。连续抬举 45 min 后安排 45 min 坐姿监控工作，恢复时间/工作时间 = 1.0，之后不再开始新的抬举时段，因此使用短时 FM。两个子任务在目的地的重新抓握、悬停、精确放置和手部引导四项均为否，只用起点计算。

输入	子任务 A	子任务 B
L_avg	18.0 kg	12.0 kg
L_max	18.0 kg	14.0 kg
H	40 cm	35 cm
V	50 cm	80 cm
D	50 cm	40 cm

输入	子任务 A	子任务 B
A	30°	15°
抓握	一般	良好
频率	1 次/min	1 次/min
持续时间/恢复	45 min/45 min	45 min/45 min

8.1 乘数与单任务结果

子任务 A:

$$\begin{aligned}
 HM_A &= 25 / 40 = 0.6250000 \\
 VM_A &= 1 - 0.003 \times |50 - 75| = 0.9250000 \\
 DM_A &= 0.82 + 4.5 / 50 = 0.9100000 \\
 AM_A &= 1 - 0.0032 \times 30 = 0.9040000 \\
 CM_A &= 0.9500000 \\
 FIRWL_A &= 23 \times 0.625 \times 0.925 \times 0.910 \times 0.904 \times 0.95 \\
 &= 10.3916141875 \text{ kg} \\
 FILI_A &= L_{\max,A} / FIRWL_A \\
 &= 18 / 10.3916141875 = 1.73216592487162 \\
 FM_A(1 \text{ 次/min, 短时, } V < 75 \text{ cm}) &= 0.94 \\
 STRWL_A &= 10.3916141875 \times 0.94 = 9.76811733625 \text{ kg} \\
 STLI_A &= L_{\text{avg},A} / STRWL_A \\
 &= 18 / 9.76811733625 = 1.84272970731024
 \end{aligned}$$

子任务 B:

$$\begin{aligned}
 HM_B &= 25 / 35 = 5 / 7 \text{ (显示为 } 0.714285714285714) \\
 VM_B &= 1 - 0.003 \times |80 - 75| = 0.9850000 \\
 DM_B &= 0.82 + 4.5 / 40 = 0.9325000 \\
 AM_B &= 1 - 0.0032 \times 15 = 0.9520000 \\
 CM_B &= 1.0000000 \\
 FIRWL_B &= 23 \times (5 / 7) \times 0.985 \times 0.9325 \times 0.952 \times 1 \\
 &= 14.3655355 \text{ kg} \\
 FILI_B &= L_{\max,B} / FIRWL_B \\
 &= 14 / 14.3655355 = 0.974554690286345 \\
 FM_B(1 \text{ 次/min, 短时, } V \geq 75 \text{ cm}) &= 0.94 \\
 STRWL_B &= 14.3655355 \times 0.94 = 13.5036034 \text{ kg} \\
 STLI_B &= L_{\text{avg},B} / STRWL_B \\
 &= 12 / 13.50360337 = 0.888651693270224
 \end{aligned}$$

上述乘数按输入精确计算，计算链不使用显示位数反算；FIRWL、FILI、STRWL、STLI 和 CLI 的门槛判定使用电子计算表中的完整数值。按未舍入 STLI 排序，子任务 A 排第一，子任务 B 排第二。A 的 FILI 和 STLI 均超过 1.000000，单任务项目门已经失败；B 的 FILI 和 STLI 均通过。

8.2 复合任务 CLI

加入子任务 B 后累计频率为 2 次/min。CLI 增量项必须按被加入的子任务 B 的 V 类别查表：短时、 $V \geq 75$ cm 时，前序累计频率 $\Sigma F_A = 1$ 次/min 对应 $FM_B(\Sigma F_A) = 0.94$ ，加入 B 后 $\Sigma(F_A+F_B) = 2$ 次/min 对应 $FM_B[\Sigma(F_A+F_B)] = 0.91$ ：

$$\begin{aligned} CLI &= STLI_A + FILI_B \times \{1 / FM_B[\Sigma(F_A+F_B)] - 1 / FM_B(\Sigma F_A)\} \\ &= 1.84272970731024 \\ &\quad + 0.974554690286345 \times (1 / 0.91 - 1 / 0.94) \\ &= 1.87690861858986 \end{aligned}$$

指标	计算值	放行值	判定
子任务 A FILI	1.73216592487162	≤ 1.000000	不通过
子任务 A STLI	1.84272970731024	≤ 1.000000	不通过
子任务 B FILI	0.974554690286345	≤ 1.000000	通过
子任务 B STLI	0.888651693270224	≤ 1.000000	通过
两任务 CLI	1.87690861858986	≤ 1.000000	不通过
人工承重抬举频率	2 次/min	导入前基线记录项	已量化

导入前确定结论：无中间舍入的 CLI 计算值为 1.87690861858986，且子任务 A 的 FILI、STLI 均超限，该计算工况不通过人工抬举放行。不能用“18 kg 低于 23 kg”判定安全，因为 23 kg 只是载荷常数；子任务 A 的几何、非对称、频率和抓握已经把 STRWL 降至 9.76811733625 kg。

09 导入后推拉与引导计算

工件质量继续取 18 kg。机械臂和夹具在整个正常循环中独立承受工件重力，人工托举时间 0 s、人工承重抬举频率 0 次/min。竖直轴由设备承重，水平轴驱动输出固定为 0；操作者站立或行走

并始终双手握持把手，以全身力量完成启动、2 m 水平引导、转向、停止和定位。因此该动作满足本报告 RAPP Section A 适用条件，不计算 RNLE。

本章采用每名人员 10 次循环的最大值作为计算输入；每个结果的 U_{res} 均为 3 N，修正值等于输入最大值加 3 N。

人员组	人员条件	输入启动/停止最大值 N	修正启动/停止力 N	输入持续力最大值 N	修正持续力 N	10 循环判定
O1	152 cm/男	115	118	39	42	10/10 通过
O2	160 cm/女	123	126	44	47	10/10 通过
O3	168 cm/男	128	131	48	51	10/10 通过
O4	172 cm/女	134	137	52	55	10/10 通过
O5	185 cm/男	139	142	58	61	10/10 通过

50 个循环中的修正最大值为 142 N 和 61 N：

$$\text{启动/停止力余量} = (150 - 142) / 150 \times 100\% = 5.33333333333333\%$$

$$\text{持续力余量} = (70 - 61) / 70 \times 100\% = 12.8571428571429\%$$

$$\text{人工承重抬举消除率} = (2 \text{ 次/min} - 0 \text{ 次/min}) / 2 \text{ 次/min} \times 100\% = 100\%$$

RAPP 计算采用 Section A 的九个官方因子。大型架空轨道移动部分和末端夹具共 22 kg，加 18 kg 工件后评估移动质量为 40 kg；设备允许移动质量为 60 kg。

RAPP Section A 因子	评价输入	分值/判定
A-1 设备类型/载荷质量	大型架空轨道设备；移动质量 40 kg < 600 kg 且 ≤ 60 kg 允许值	绿色/0
A-2 姿势	躯干前屈最大 16°、旋转最大 7°；双手始终在髋肩之间	绿色/0
A-3 手部抓握	双手完整动力握；腕屈伸最大 12°、桡尺偏最大 8°	绿色/0

RAPP Section A 因子	评价输入	分值/判定
A-4 作业模式	2 次转移/min < 5 次/min; 操作者自主启动每次转移	绿色/0
A-5 移动距离	每次 2 m ≤ 10 m	绿色/0
A-6 设备状况	月度预防维护计划有效; 试验前制动、轨道、轴承和软管功能检查全部通过	绿色/0
A-7 地面	环氧地面, 坡度 0°, 干燥、清洁、坚实且无破损	绿色/0
A-8 路线障碍	拖曳电缆、凸起边缘、坡道、台阶、关闭或狭窄门、屏风或受限空间、路线弯角和固定障碍各 0 处; 方向改变在 2 m 开放区域内完成	绿色/0
A-9 其他因素	设备和载荷不稳定、视线遮挡、锐利/高温接触面、照明不足、阵风或强气流、PPE 或服装妨碍操作各 0 项; 照度 500 lx、温度 22°C、相对湿度 45%、室内风速 0 m/s	绿色/0
合计	A-1 至 A-9 全部绿色	0

放行项	结果	门槛	判定
人工承重抬举	0 次/min	必须为 0 次/min	通过
RNLE	不适用	禁止用于推拉	方法正确
RAPP 适用性	水平轴无动力、双手、站立/行走、全身施力	四项必须同时满足	通过
修正启动/停止力	142 N	≤ 150 N	通过

放行项	结果	门槛	判定
修正持续力	61 N	≤70 N	通过
RAPP	A-1 至 A-9 全绿、0 分	九因子全绿、0 分	通过
内部姿势门	前屈 16°、旋转 7°、腕 屈伸 12°、桡尺偏 8°	≤20°、≤10°、≤15°、≤10°	通过

导入后确定结论：在本章固定计算输入和 50 循环汇总数据下，全部项目门通过，该工况放行。

50/50 零失败对应确定性的项目抽样接收结论；总体失效率按第 5.3 节的统计上界解释。正确的改善表述是“人工承重抬举频率由 2 次/min 降至 0 次/min，消除率 100%；导入后推拉力与 RAPP 项目门通过”。错误表述包括“CLI 从 1.87690861858986 降到 0”和“LI 改善 100%”，因为导入后 RNLE 的状态是不适用，不是零。

10 改善量化、放行标准与结论模板

10.1 量化指标

改善报告必须并列呈现，不把不同量纲合并成一个分数：

$$\text{人工抬举消除率} = (\text{导入前人工抬举次数} - \text{导入后人工抬举次数}) / \text{导入前人工抬举次数} \times 100\%$$

$$\text{启动力余量} = (150 - \text{最大修正启动/停止力}) / 150 \times 100\%$$

$$\text{持续力余量} = (70 - \text{最大修正持续力}) / 70 \times 100\%$$

当导入后仍存在离散的完全人工双手抬举时，必须对该任务重新计算 FILI、STLI、CLI，并报告残留抬举频率；此时人工抬举消除率低于 100%，不能写“完全消除”。人与设备共享承重时不计算 RNLE，改用三轴手力和专项生物力学评价。力余量小于 0 即失败，正余量只说明通过门槛，不等同于产品额定能力或安全系数。

10.2 一票否决放行表

编号	放行项目	通过条件	不通过条件
G1	方法边界	完全人工双手抬举用 RNLE；共享承重用三轴手力和专项评价；推拉按水平动力状态分流	RNLE 用于共享承重/推拉，或动力水平轴给出 RAPP 分数
G2	残留人工抬举	每个未舍入 FILI、STLI $\leq$ 1.000000 且 CLI $\leq$ 1.000000；若声明完全助力，正常循环抬举频率 = 0 次/min	任一 FILI/STLI/CLI 超限，或仍有人工托举
G3	启动/停止力	所有有效循环 Fstart,c $\leq$ 150 N	任一循环 > 150 N
G4	持续力	所有有效循环 Fsus,c $\leq$ 70 N	任一循环 > 70 N
G5	RAPP/专项评价	RAPP 适用时 A-1 至 A-9 全部绿色/0；不适用时专项评价完成并通过	适用性判错、任一 RAPP 因子非绿，或专项评价缺失/失败
G6	内部姿势门	前屈 $\leq$ 20°、旋转 $\leq$ 10°、腕屈伸 $\leq$ 15°、桡尺偏 $\leq$ 10°，手在髌肩之间，跪/蹲/背推 = 0 s	任一项超限
G7	额定能力	工件质量不超过全链条最小额定能力	超载或额定资料缺失
G8	数据	每一边界条件 5 人 $\times$ 10 循环；原始三轴力、U_res、视频、校准和配置完整；判定使用未舍入值	样本、边界、原始时序、不确定度或记录缺失
G9	风险	所有残余 RPN < 20；S = 5 项有两道独立控制	RPN $\geq$ 20，或 S = 5 仅一道控制

标准结论只能使用以下两种句式：

- 通过：“所列设计边界内，G1 ~ G9 全部满足，工况放行；超出边界必须重新评价。”

- 不通过：“G〔编号〕不满足，工况不放行；完成纠正并按完整方案重测后方可重新申请放行。”

正式判定只有“通过”和“不通过”两种状态，不得输出第三种状态。

11 风险分析与 FMEA

本研究采用 1~5 级严重度 S、发生度 O、探测度 D， $RPN = S \times O \times D$ 。项目门规定残余 RPN 必须小于 20；严重度 S = 5 的失效即使 RPN 小于 20，也必须具有两道相互独立的控制，一道预防、一道探测或隔离。评分定义固定如下：

分值	严重度 S	发生度 O	探测度 D
1	无人员伤亡，停机≤15 min	失效路径已被结构消除，或必须有两道独立控制同时失效	安全功能在人员暴露前自动阻止动作，规定故障注入全部通过
2	仅需现场急救，无损失工作日	一道受监控控制失效且另一道独立控制被绕过后才发生	当前循环内自动检测并安全隔离
3	需医疗处置或损失工作日 1~3 d	单一硬件、软件或操作错误即可触发	班前或固定周期检查能够检出，运行中不自动检出
4	住院、永久部分功能损失或损失工作日 > 3 d	在规定维护周期内存在可测退化路径	只能通过操作者观察到的声音、阻力或姿势变化检出
5	死亡、永久完全功能损失或悬吊载荷失控	该状态在每个正常循环存在	无检测方法或检测发生在伤害之后

O 或 D 只有在控制架构、试验记录和复核签名同时存在时才允许降低；缺少其中任一证据，沿用初始分值。下表按固定输入计算 FMEA 的初始风险、控制措施与残余风险。

失效模式	后果	初始 S/O/D/RPN	固定控制	O/D 降低条件	残余 S/O/D/RPN	结论
把 RNLE 用于共享承重或推拉	风险评价方法错误	4/3/4/48	方法决策表 + 独立审核	E1: 50/50 份记录须完成方法判别和双人签名	4/1/3/12	通过

失效模式	后果	初始 S/O/D/RPN	固定控制	O/D 降低条件	残余 S/O/D/RPN	结论
未覆盖最大半径或最低压力	实际力超过试验值	5/3/4/60	边界矩阵预防 + 参数锁定/日志探测	E2: 全部边界须各完成 50 循环; 10/10 次越界参数须被自动锁止	5/1/2/10	通过
只看平均力, 漏掉启动峰值	短时过载未识别	4/3/4/48	100 Hz 原始时序 + 逐循环最大值加 U_res	E3: 10 组峰值注入须被算法保留并在验收复核中判为超限	4/1/3/12	通过
把手位置造成躯干或腕部越线	肩背或腕部暴露增加	4/3/3/36	髋肩高度机械限位 + 角度视频复核	E4: 50/50 循环限位须有效; 角度记录须逐循环复核	4/1/3/12	通过
轨道、制动或软管增阻	启动力超限或负载失控	5/2/4/40	机械限力/保持预防 + 班前功能检查探测	E5: 10/10 次增阻注入须被限力; 30/30 次设定故障须被班前检查检出	5/1/2/10	通过
参数或工件变更未复评	原放行边界失效	4/3/4/48	受控配方 + 变更审批互锁	E6: 10/10 次未授权变更须被锁止并留有日志	4/1/2/8	通过

失效模式	后果	初始 S/O/D/RPN	固定控制	O/D 降低条件	残余 S/O/D/RPN	结论
操作者样本未覆盖名册身高边界	身高边界人员超限	3/3/4/36	纳入名册最小/最大身高者+逐人硬门	E7: 152、160、168、172、185 cm 五种人员条件须各完成 10 循环且记录完整	3/1/3/9	通过

E1 ~ E7 是 O/D 降低条件。对应记录齐全并经复核后采用表中残余分值；否则沿用初始分值。

FMEA 与测力、RNLE 共同构成放行证据。任何失效模式控制发生变化时，重新计算残余风险并完整执行 G1 ~ G9；不得只修改 RPN 数字。

12 变更控制、周期复核与作业文件

以下任一触发条件发生，原放行立即失效并完整重做 G1 ~ G9：

1. 工件质量超过已放行最大值，或质心超出已放行三维包络；
2. 工作半径、把手高度、移动距离、速度或加速度超出试验冻结的最小—最大范围；
3. 循环频率、连续作业时长、恢复时间或班次结构超出 RNLE/RAPP 放行输入；
4. 机械臂、夹具、吊点、把手、制动、轨道、软管、电缆、气压、电压、速度或控制配方发生变更；
5. 路线新增坡度、台阶、转角、湿滑源或障碍；
6. 出现一次失控下落、碰撞、夹持失效、启动力超限、持续力超限或工效学伤害事件；
7. 测力计校准失效、原始数据丢失或发现计算公式/任务拆分错误。

不存在免复评百分比或尺寸容差。任何值即使只超出冻结边界 1 个最小记录单位，也立即取消放行；5%、50 mm、100 mm 或 10% 不得用作放行边界之外的豁免。

即使没有变更，班前必须完成设备、夹具、制动、轨道和路线点检；年度必须复测冻结矩阵中产生最大 $F_{start,c}$ 或 $F_{sus,c}$ 的边界条件 50 循环，并更新 RAPP、姿势记录和 FMEA。年度周期从正式放行签字日计算，超过 12 个月未完成复测时，工位状态自动转为“不放行”。

现场标准作业书必须写明最大工件质量、允许工作半径、把手高度范围、允许压力/电压、速度配方、正常动作顺序、禁止人工托举、异常停机步骤和班前点检项。培训记录只证明人员接受过培训，不替代能力确认；操作者必须在受控条件下完成 10 个连续循环且全部符合力和姿势门，才取得岗位资格。

13 研究结论

助力机械臂的人体工效学价值不能由“载荷被机械臂吊起”单独证明。有效的量化路径是：先用 RNLE 对导入前完全人工双手抬举建立 RWL、FILI、STLI、CLI 基线；再确认导入后人工承重是否归零。共享承重转入三轴手力与专项生物力学评价；完全助力后的推拉逐循环测量启动/停止峰值和持续力，并按水平动力状态决定使用 RAPP 或专项评价，最后与内部姿势门、额定能力、数据完整性和 FMEA 串联放行。

本报告把方法边界和判定写成硬门：RNLE 的未舍入 FILI、STLI、CLI 均不大于 1.000000；导入后人工承重抬举为 0 次/min；所有循环启动/停止合力加 U_{res} 后不大于 150 N，持续合力加 U_{res} 后不大于 70 N；RAPP 适用时九因子全绿且 0 分，不适用时专项评价通过；内部姿势门要求前屈不大于 20°、旋转不大于 10°、腕屈伸不大于 15°、桡尺偏不大于 10°；残余 RPN 小于 20；证据包完整。任何一项失败即不放行。

确定结果如下：导入前子任务 A 的 FILI = 1.73216592487162、STLI = 1.84272970731024，两任务 CLI = 1.87690861858986，不通过；导入后人工抬举消除率 100%，最大修正启动/停止力 142 N、最大修正持续力 61 N、RAPP 九因子全绿且总分 0，全部门槛通过。上述结果对应本报告所列工况与计算输入，总体失效率按第 5.3 节给出的单侧 95% 上界解释；正式结论只输出“通过”或“不通过”。

参考文献

1. CDC/NIOSH. Revised NIOSH Lifting Equation. <https://www.cdc.gov/niosh/ergonomics/about/rnle.html>
2. CDC/NIOSH. Applications Manual for the Revised NIOSH Lifting Equation, DHHS (NIOSH) Publication No. 94-110, revised September 2021. <https://www.cdc.gov/niosh/docs/94-110/default.html>
3. Waters TR, Putz-Anderson V, Garg A. Applications Manual for the Revised NIOSH Lifting Equation. Cincinnati, OH: National Institute for Occupational Safety and Health; DHHS (NIOSH) Publication No. 94-110, revised September 2021. DOI: 10.26616/NIOSH-PUB94110-revised092021. <https://stacks.cdc.gov/view/cdc/110725>
4. Garg A, Waters T, Putz-Anderson V. Multiple-Task Analysis Using Revised NIOSH Equation for Manual Lifting. Advances in Industrial Ergonomics and Safety VI, 1994:67–70. CDC Stacks hosted copy. https://stacks.cdc.gov/view/cdc/191326/cdc_191326_DS1.pdf
5. UK Health and Safety Executive. Risk assessment of pushing and pulling. <https://www.hse.gov.uk/msd/pushpull/index.htm>
6. UK Health and Safety Executive. INDG478: Risk assessment of pushing and pulling (RAPP) tool. <https://www.hse.gov.uk/pubns/indg478.htm>
7. UK Health and Safety Executive. INDG478 RAPP tool, official PDF. <https://www.hse.gov.uk/pubns/indg478.pdf>
8. UK Health and Safety Executive. Assessing pushing and pulling risks, including guideline forces. <https://www.hse.gov.uk/msd/pushpull/assessment.htm>
9. ISO. ISO 11228-1:2021 Ergonomics — Manual handling — Part 1: Lifting, lowering and carrying. <https://www.iso.org/standard/76820.html>
10. ISO. ISO 11228-2:2007 Ergonomics — Manual handling — Part 2: Pushing and pulling. <https://www.iso.org/standard/26521.html>
11. ISO. ISO 11228-2:2007/Amd 1:2022. <https://www.iso.org/standard/80954.html>
12. ISO. ISO 11226:2000 Ergonomics — Evaluation of static working postures. <https://www.iso.org/standard/25573.html>
13. ISO. ISO/TR 12295:2014 Ergonomics — Application document for International Standards on manual handling and evaluation of static working postures. <https://www.iso.org/standard/51309.html>
14. 国家市场监督管理总局、国家标准化管理委员会. GB/T 31002.1-2014《人类工效学 手工操作 第1部分：提举与移送》. <https://openstd.samr.gov.cn/bzgk/std/newGbInfo?hcno=7C21BD4A0BD8998FFF1118EEC6B2F17D>
15. 国家标准化管理委员会. 国家标准计划通知，计划 20256325-T-469《人类工效学 手工操作 第1部分：提举、放低与移送》. <https://std.samr.gov.cn/noc/search/nocPlanDetailed?id=4507276B92189390E06397BE0A0AD3B9>
16. 国家市场监督管理总局、国家标准化管理委员会. GB/T 42730-2023《人类工效学 静态工作姿势评估》. <https://openstd.samr.gov.cn/bzgk/std/newGbInfo?hcno=56FED88EAF0FD6FA568584085949ED71>
17. 国家市场监督管理总局、国家标准化管理委员会. GB/T 36954-2018《机械安全 人类工效学原则在风险评估与风险减小中的应用》. <https://openstd.samr.gov.cn/bzgk/std/newGbInfo?hcno=5D9BBA21BFF65103898B5E84240A0A60>
18. 国家市场监督管理总局、国家标准化管理委员会. GB/T 31054-2014《机械产品计算机辅助工程 有限元数值计算术语》. <https://openstd.samr.gov.cn/bzgk/std/newGbInfo?hcno=F0BE9B45DFE8EA0528C0BCBD8D57065D>