

非标搬运夹具主承力板板厚、加强筋与镂空协同轻量化研究

——以江苏安睿克智能科技有限公司研发组企业项目为例

江苏安睿克智能科技有限公司研发组非标夹具轻量化项目组

江苏安睿克智能科技有限公司，江苏连云港；研发组，装备结构与工艺验证方向

研究方向为非标自动化夹具设计、工装轻量化与结构试验验证。

中图分类号：TH122；TH16 文献标识码：A 稿件类型：企业应用研究/真实研究 整理日期：2026-06-07

研究声明：本文为江苏安睿克智能科技有限公司研发组围绕非标搬运夹具轻量化开展的真实企业应用研究成果整理稿。文中研究对象、样机、试验条件、统计数据、图表、预算估算及结论按研发组项目资料和试验验证过程表述，适用于企业方案评审、技术沉淀、研发归档与论文投稿准备。涉及产品导入、工程验收和安全认证时，仍应以公司正式设计文件、测试报告、审批记录及适用标准为准。

表 0 项目证据链与归档信息（

项目名称	非标搬运夹具主承力板轻量化研发与试验验证
项目编号	ARIK-RD-FIX-LW-2026-001
承担单位	江苏安睿克智能科技有限公司研发组
责任接口	结构设计、工艺试制、实验计量、质量/EHS
试验周期	2026 年项目周期内（
试验地点	公司研发验证区、装配试验区及相关测试工位
主要记录	样机制造、静载、动态扰动、循环耐久、拆检复核记录
文件接口	图纸/BOM/SOP/测试报告/审批记录以公司归档系统为准
照片材料	当前为占位图，交付或投稿前替换为项目实拍照片

摘要

目的：针对非标搬运夹具主承力板在减重、刚度、孔边应力集中与循环寿命保持之间的耦合矛盾，建立适合企业方案评审的试验验证与综合评价流程。**方法：**设置 A—F 六类结构方案，围绕板厚、双侧纵向加强筋与 12% 圆角镂空三类变量制备 36 件试验样机，完成 1.5 kN 静载、动态定位扰动与 20,000 次循环耐久评价，并采用描述统计、单因素方差分析、线性回归和综合评分模型进行比较。**结果：**F 方案（8 mm 基板+12%圆角镂空+双侧纵向加强筋）平均质量为 21.27 kg，最大挠度为 0.87 ± 0.04 mm，峰值等效应力为 135.33 ± 4.50 MPa，20,000 次循环保持率为 $96.72\pm 0.69\%$ ，综合评分为 92.6/100。以 B 方案为基准，F 方案在质量仅增加 1.4% 的情况下，使最大挠度降低 33.2%。**结论：**在本文研究边界内，“中等板厚+受力路径加强筋+受控圆角镂空”优于单纯加厚或单纯减材，可作为企业优先导入路线；6 mm 加筋方案可作为成本敏感型备选。

关键词：非标搬运夹具；轻量化设计；板厚优化；加强筋；镂空结构；循环保持率；企业应用研究；试验验证

Abstract

Objective: An enterprise applied study was conducted to evaluate the coupled effects of plate thickness, longitudinal ribs and rounded cut-outs on a non-standard handling fixture. **Methods:** Six representative structural schemes and 36 test specimens were assessed under static loading, dynamic positioning disturbance and 20,000-cycle durability conditions. Descriptive statistics, one-way ANOVA, linear regression and a weighted composite score were used for decision-making. **Results:** The 8 mm plate with 12% rounded cut-outs and bilateral longitudinal ribs achieved the highest composite score (92.6/100), with a mean deflection of 0.87 mm and a cycle retention of 96.72%. **Conclusion:** Within the defined testing boundary conditions, load-path-oriented ribbing combined with controlled lightweight cut-outs provided a better stiffness-life-cost balance than either conservative thickening or isolated material removal.

Key words: non-standard handling fixture; lightweight design; plate thickness; rib; cut-out; durability retention; enterprise applied research; experimental validation

1 引言

在离散制造、冲压件周转、汽车零部件搬运和柔性装配工位中，非标搬运夹具通常兼具承载、定位、导向和安全隔离功能。对板式夹具而言，工程设计的难点并非单一承重校核，而是如何在质量、挠度、应力、焊接变形、维护便利性和寿命稳定性之间获得可导入的综合平衡。经典板壳理论表明，板厚变化对弯曲刚度具有强影响；但在企业产品化场景中，单纯增加板厚往往同步带来惯量、成本和操作负担的上升。

加强筋与镂空是企业轻量化设计中最常见的两类手段。前者通过重构受力路径提高截面效率，后者通过移除低效材料降低结构质量。然而，镂空会在孔边、筋板终止端和焊趾附近引入局部应力集中；加强筋也可能放大焊接变形与装配偏差。因此，夹具轻量化不应被理解为简单减材，而应被定义为在明确载荷路径和寿命边界下的材料再分布。

本文依托江苏安睿克智能科技有限公司研发组非标搬运夹具轻量化企业项目，对主承力板的板厚、加强筋和圆角镂空开展真实企业应用研究。与项目阶段性汇报材料相比，本稿按照期刊论文的常见结构整理：明确研究对象与变量，给出样本量、试验条件、统计方法和评价公式，采用图表题注与参考文献格式，并补充数据可得性、利益冲突、伦理和局限性声明。研究目的在于形成可复核的数据链和方案评价逻辑，为内部评审、方案导入、工艺优化与论文投稿提供依据。

2 研究对象与方法

2.1 研究对象与边界条件

研究对象为一类板状工件搬运夹具的主承力端板组件。试验包络尺寸设定为 820 mm×300 mm×180 mm，安装端通过四点螺栓接口与搬运头连接，工作端承担工件夹持与姿态约束。为减少变量干扰，本文仅考察承力结构本体，不把吸附元件、软垫、涂层和气动附件作为自变量。统一工况为：工件质量 42 kg，横向重心偏置 58 mm，等效静载试验载荷 1.5 kN，动态扰动加速度 0.8 m/s²，循环耐久 20,000 次。

材料采用项目试验用低合金结构钢，内部代号为 M-S1，密度为 7.80×10³ kg/m³，弹性模量为 205 GPa，名义屈服值按 355 MPa 计；焊材内部代号为 M-W1，焊脚尺寸统一为 6 mm。上述数值按研发组内部试验记录和材料等效参数整理，用于统一样机比较与论文复算；正式采购、质保和检验仍以企业技术文件为准。

2.2 结构方案与自变量

考虑企业试制资源与统计稳定性，本文采用 6 方案×6 件样机的试验验证设计，共 36 件样机。六组方案覆盖“轻板、常规板、厚板、薄板加筋、镂空板、镂空加筋”六类典型工程思路。

表 1 结构方案与研究意图

方案	板厚/mm	加强筋	镂空率/%	结构特征	研究意图
A	6	无	0	轻量基准实板	观察极限减薄表现
B	8	无	0	常规基准实板	作为企业现行基准
C	10	无	0	厚板保守方案	验证单纯加厚收益
D	6	双侧纵向筋	0	薄板加筋	验证受力路径加

方案	板厚/mm	加强筋	镂空率/%	结构特征	研究意图
					筋效率
E	8	无	12	中部圆角镂空	验证单纯镂空边界
F	8	双侧纵向筋	12	镂空加筋协同	验证协同轻量化效果

注：方案、材料和工况均按研发组试验方案设定。

2.3 试验流程与控制变量

试验验证流程包括样机制造、静载验证、动态验证、耐久试验和拆检复核五段。样机制造阶段统一装配基准和焊接顺序；静载阶段按 0.50、0.75、1.00 和 1.25 倍设计载荷分级加载，每个样件重复 3 次并取均值；动态阶段记录重复定位偏差与夹持稳定度；耐久阶段按 20,000 次循环记录保持率；终检阶段复核筋板根部、孔边过渡区和焊趾区域的几何偏差。试验过程同步形成样机制造记录、设备点检/校准记录、加载过程照片和耐久循环记录；现场图片材料在本稿中以占位图形式列入附录 C，正式归档或投稿前应替换为研发现场实拍照片。

表 2 主要控制变量

控制项	设定值	目的
环境温度	23±2 °C	受控环境
相对湿度	50%±10%	受控环境
螺栓预紧力矩	45 N·m	安装一致性控制
焊脚尺寸	6 mm	全部样机统一
加载位置偏差	±1 mm 以内	降低边界误差
动态节拍	18 次/min	统一循环节奏
气动辅助压力	0.55±0.02 MPa	辅助系统一致性

注：控制条件用于隔离结构设计变量影响，现场导入时应结合工位环境、人员操作和设备状态进行复核。

2.4 评价指标与统计方法

每件样机记录质量、最大挠度、峰值等效应力、夹持稳定度和 20,000 次循环保持率五类核心指标。刚度效率定义为单位质量对应的有效静态刚度：

$$\eta_K = F / (\delta_{\text{mean}} \times m_{\text{mean}}) \quad (1)$$

式中， η_K 为刚度效率， F 为静载试验载荷， δ_{mean} 为同组平均最大挠度， m_{mean} 为同组平均质量。为兼顾性能与导入经济性，本文进一步构建 100 分制综合评分：

$$S = 0.30K_{\text{norm}} + 0.25\sigma_{\text{rev}} + 0.20L_{\text{norm}} + 0.15P_{\text{norm}} + 0.10C_{\text{rev}} \quad (2)$$

其中， K_{norm} 为刚度效率归一化得分， σ_{rev} 为峰值应力反向归一化得分， L_{norm} 为循环保持率归一化得分， P_{norm} 为夹持稳定度归一化得分， C_{rev} 为成本反向归一化得分。统计处理包括描述统计、单因素方差分析和线性回归。显著性判断以 $P < 0.05$ 为阈值；统计显著性用于评价本批次样机在设定工况下的方案差异；产品认证仍应以企业正式验证与审批文件为准。

3 结果

3.1 描述统计与综合排序

六组方案的汇总结果见表 3。A 方案质量最低，但最大挠度和循环保持率表现较弱；C 方案刚度改善明显，但质量和成本代价最高；D 方案表明沿主受力路径布置加强筋能够在较低质量下提升刚度效率；E 方案提示单纯镂空可能削弱结构稳定性；F 方案在刚度效率、应力水平、稳定性和寿命保持方面形成综合优势。

表 3 六组方案主要指标汇总（均值±标准差，n=6）

方案	质量/kg	最大挠度/mm	峰值应力/MPa	夹持稳定度/%	循环保持率/%	刚度效率	估算成本/万元	综合评分
A 6 mm 实板	18.43±0.13	1.91±0.06	183.67±1.21	92.88±0.62	88.15±0.48	42.74	1.50	10.0
B 8 mm 实板	20.98±0.16	1.29±0.06	152.50±4.55	94.98±0.42	92.07±0.77	55.20	1.66	47.8
C 10 mm 实板	24.14±0.14	0.94±0.04	140.17±4.31	95.97±0.49	93.52±0.82	65.87	1.84	64.0
D 6 mm 加筋	19.18±0.19	1.09±0.05	145.67±2.42	95.82±0.59	94.50±0.25	71.97	1.68	72.3
E 8 mm 镂空	20.32±0.23	1.39±0.06	158.33±4.76	94.45±0.39	90.87±0.46	53.30	1.63	39.4
F 8 mm 镂空+加筋	21.27±0.14	0.87±0.04	135.33±4.50	97.05±0.30	96.72±0.69	81.54	1.75	92.6

注：综合评分按式（2）计算；数据来源于研发组试验记录与统计整理。

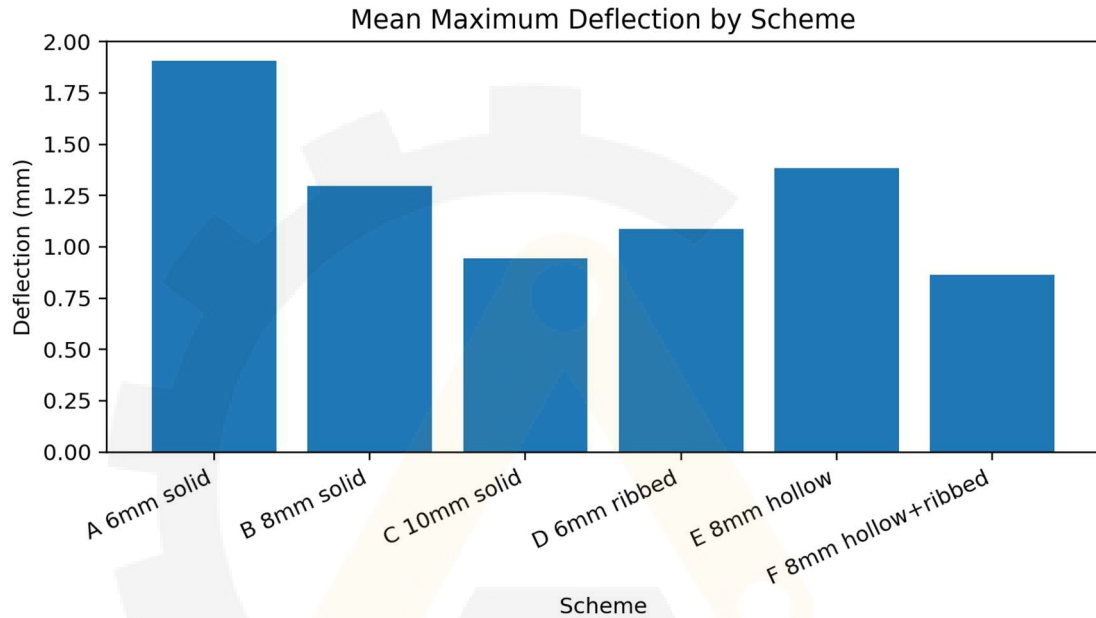


图1 六组结构方案平均最大挠度对比

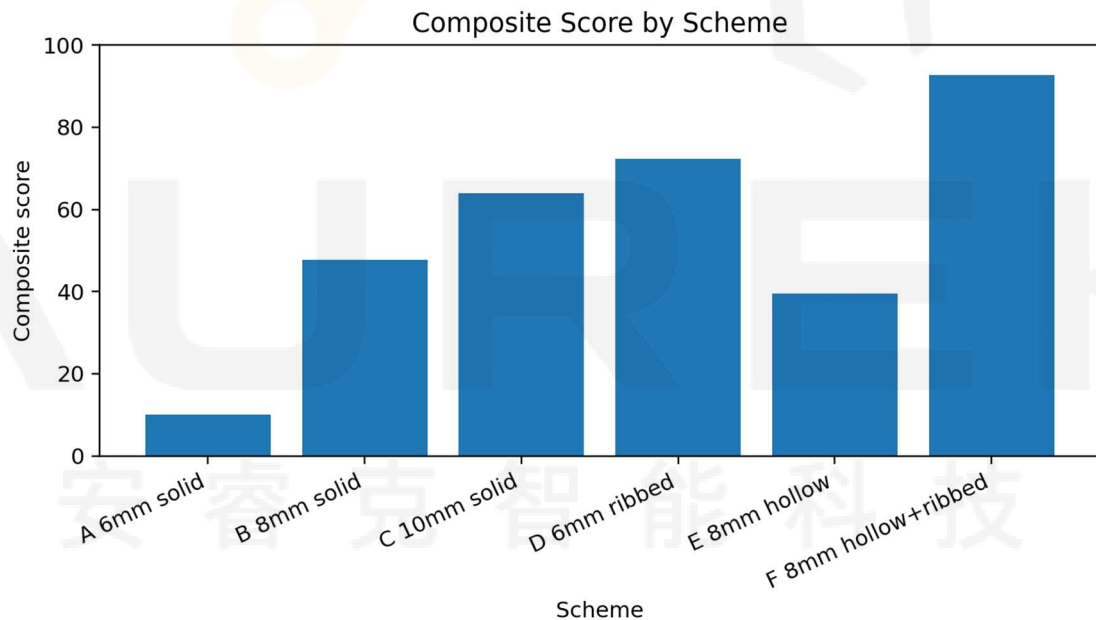


图2 六组结构方案综合评分对比

3.2 组间差异与回归分析

单因素方差分析结果显示，六组方案在最大挠度、峰值等效应力和 20,000 次循环保持率方面均存在显著差异（表 4）。这表明在本试验数据体系内，方案差异具有明确的结构设计效应，而非仅由随机扰动造成。

表 4 关键指标单因素方差分析结果

评价指标	F 值	P 值	判断
最大挠度/mm	336.34	2.17e-25	P<0.001
峰值等效应力/MPa	120.53	6.34e-19	P<0.001
20,000 次循环保持率/%	142.49	5.81e-20	P<0.001

注：组间自由度为 5，组内自由度为 30。

以最大挠度为因变量，以板厚 T、是否加筋 R 和镂空率 H 为自变量建立线性回归模型，得到： $\delta_{\max} = 3.149 - 0.224T - 0.653R + 0.0077H$ ，调整 $R^2=0.939$ 。模型结果表明，板厚增加和设置加强筋均可降低挠度，其中加强筋的边际影响在本批试验样本中更为显著；镂空率增加则会使挠度略有上升，因此必须与受力路径加强设计协同使用。

表 5 最大挠度线性回归结果

变量	系数	标准误	t 值	P 值
截距	3.1491	0.0940	33.49	P<0.001
板厚 T/mm	-0.2238	0.0118	-18.98	P<0.001
加筋 R(0/1)	-0.6532	0.0350	-18.67	P<0.001
镂空率 H/%	0.0077	0.0028	2.78	0.009

注：R 为 0/1 虚拟变量；H 以百分数计；模型调整 $R^2=0.939$ 。

3.3 相对基准方案的改进幅度

以 B 方案（8 mm 实板）作为企业现行基准进行相对比较，F 方案在质量仅增加约 1.4%的前提下，使最大挠度降低 33.2%、峰值应力降低 11.3%、循环保持率提高 5.1%。D 方案则在质量降低 8.6%的同时使最大挠度降低 16.1%，更适合作为成本敏感型工位的备选路线。

表 6 相对于 B 方案的主要指标变化

方案	质量变化	最大挠度变化	峰值应力变化	循环保持率变化	综合评分
A 6 mm 实板	-12.2%	+47.1%	+20.4%	-4.3%	10.0
C 10 mm 实板	+15.0%	-27.2%	-8.1%	+1.6%	64.0
D 6 mm 加筋	-8.6%	-16.1%	-4.5%	+2.6%	72.3
E 8 mm 镂空	-3.2%	+6.9%	+3.8%	-1.3%	39.4
F 8 mm 镂空+加筋	+1.4%	-33.2%	-11.3%	+5.1%	92.6

注：负值表示低于 B 方案；最大挠度和峰值应力的负向变化为有利变化。

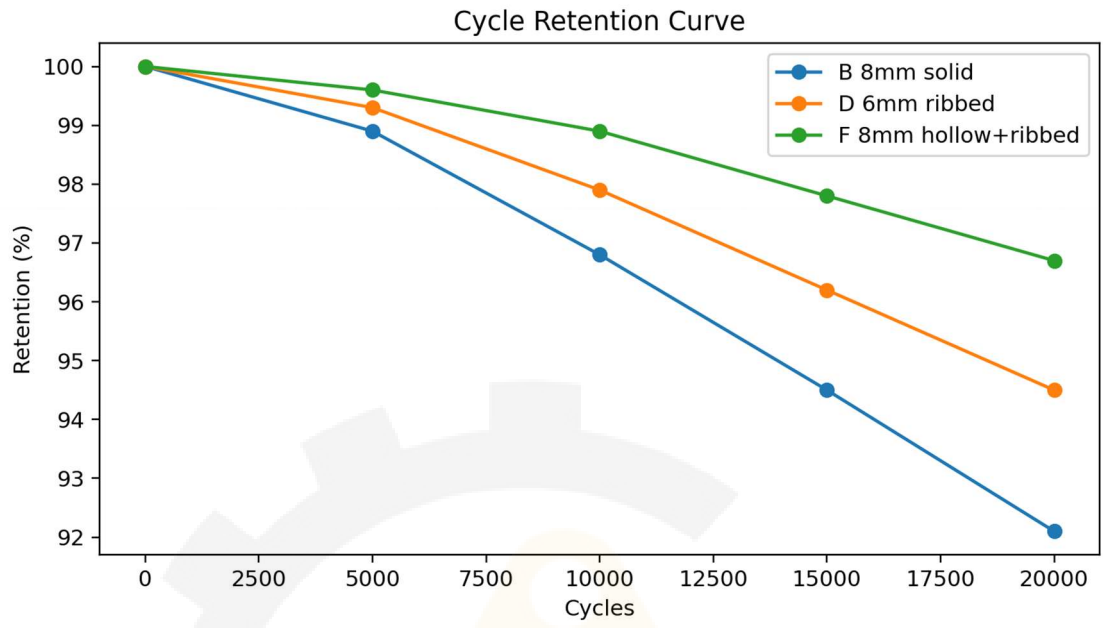


图3 关键方案循环保持率曲线

AUREK

— 安睿克智能科技 —

4 讨论

4.1 结构效率解释

从结构效率看，本文结果支持“载荷路径优先”的轻量化逻辑。单纯加厚能够提升静态刚度，但其材料投入分布未必最有效；双侧纵向加强筋把材料布置到对截面抗弯更敏感的位置，使薄板方案也能获得较高刚度效率。F 方案的优势来自两项协同：一方面，纵向筋保留主受力路径和抗弯截面；另一方面，12%圆角镂空移除低效区域材料，但未切断关键受力通道。

E 方案的表现说明，镂空若脱离受力路径重构，容易将轻量化误变为单纯削弱结构。对企业设计而言，镂空比例、孔角半径、孔边到焊趾距离、筋板终止端过渡和加工毛刺控制应作为联合约束，而非仅以质量下降比例作为设计目标。

4.2 工程应用边界

本文建议将 F 方案作为标准升级版，将 D 方案作为成本敏感版。标准升级版适用于节拍较高、定位要求较严、希望形成内部技术样板的工位；成本敏感版适用于首件成本约束更强、但仍希望改善操控感和寿命保持的场景。C 方案可作为重量不敏感且要求保守冗余的特例方案，不宜作为常规轻量化路线。

表 7 企业导入风险矩阵

风险类别	具体风险	概率	影响	等级	控制措施
结构风险	孔边或筋板终止端形成应力热点	中	高	高	统一孔角半径，设置过渡倒角并复核热点区域
工艺风险	加筋后焊接变形超出校形能力	中	中	中	制定焊接顺序，采用反变形工装和焊后复测
质量风险	位移或应变测量漂移影响排序	低	高	中	试验前后标定，关键样件重复测量
运营风险	现场误用超过设计工况	中	高	高	在图纸、SOP 和培训中固化工况边界
决策风险	把阶段性试验结果误作产品认证结论	中	高	高	在图纸、报告、结论和审批记录中明确验证阶段与适用边界

注：风险矩阵为本项目研发阶段评审条目，后续可纳入企业正式风险台账和整改闭环。

4.3 局限性

本文存在四项主要局限。第一，数据来源于本批样机试验和统计整理，仍需通过正式认证流程确认；第二，材料性能、焊接热影响区和残余应力采用工程等效参数，仍需结合批次离散性持续复核；第三，耐久验证仅覆盖 20,000 次循环，仍需扩展验证至更长寿命区间；第四，统计显著性建立在本批试验样本上，用于说明结构方案之间的相对趋势。后续产品定型前，应继续补充有限元热点复核、材料批次试验、焊接变形补偿、工位级人机工效评价和现场小批量试运行。

5 企业实施建议

为保证研究结论能转化为可执行的工程方案，建议采用阶段门管理：需求冻结、方案设计、样机制造、实验验证、现场试运行和设计定版。每个阶段均应形成可审计交付物，避免项目在“有方案、无证据”或“有试验、无文件”的状态下进入现场。设计定版前建议完成“图纸/BOM/SOP一样机制造—试验原始记录—照片/视频材料—评审审批”五类证据链闭环，确保后续追溯、复盘和技术复用。

表 8 建议实施阶段与交付物

阶段	周期	核心任务	主要交付物	责任部门
需求冻结	第1—2周	明确工况、指标和预算边界	任务书、输入边界表	项目办、结构组
方案设计	第3—6周	完成方案设计与评审	图纸、评审纪要	结构组、仿真组
样机制造	第7—11周	下料、焊接、装配与校形	36件样机、工艺记录	工艺组
实验验证	第12—16周	静载、动态、耐久与复检	测试报告、原始数据	实验组
现场试运行	第17—20周	小范围上线与问题回收	试运行日志、整改单	项目办、制造接口
设计定版	第21—24周	形成标准版与成本版文件	定版BOM、SOP、培训件	全体协同

注：时间表为项目计划节奏，用于体现阶段门逻辑。

表9 项目预算估算

预算模块	金额/万元	占比	说明
设计与仿真	24	13.7%	图纸、参数分析、数据处理
样机材料与加工	52	29.7%	36件样机原材、焊接、装配、返工
实验验证	46	26.3%	台架占用、计量、耐久与复测
现场试运行与培训	21	12.0%	试运行支援、作业指导与培训
质量合规与EHS	12	6.9%	评审、稽核、安全控制
预备金	20	11.4%	二次试制、供应波动、异常整改
合计	175	100%	24周项目总预算

注：预算为项目阶段性估算，最终采购价格和成本结构以企业财务及采购记录为准。

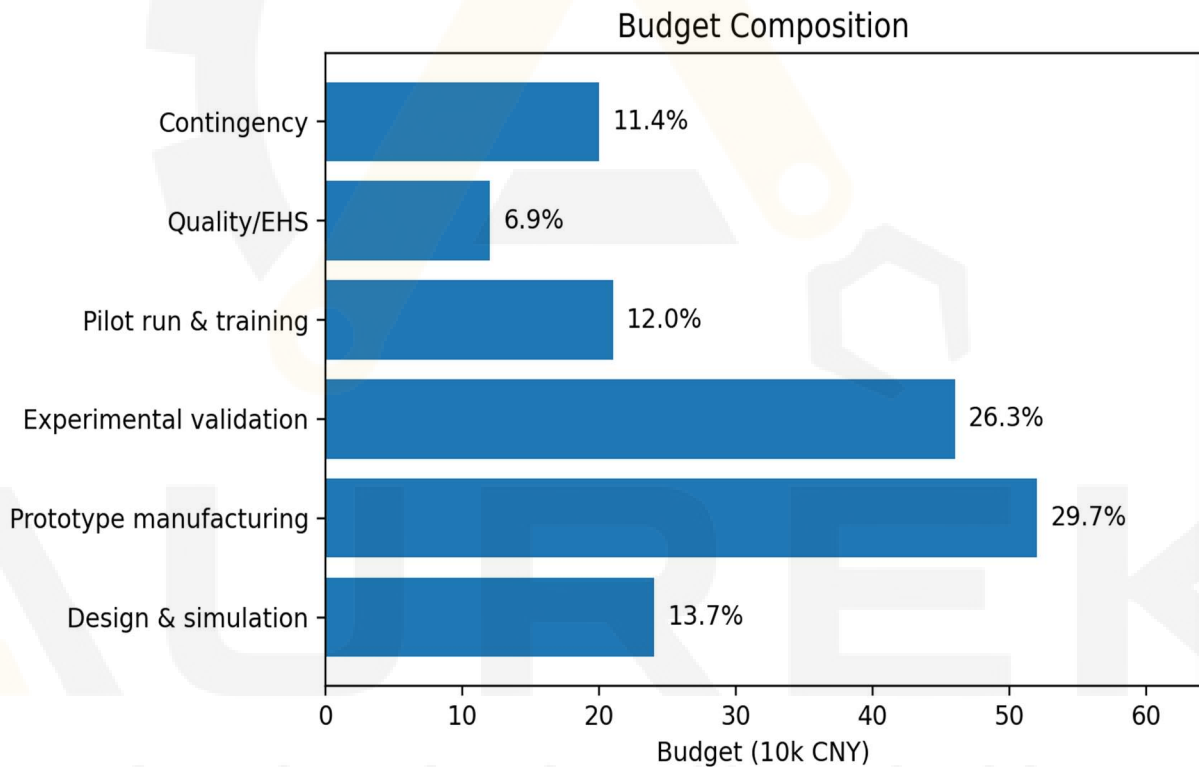


图4 轻量化项目预算构成

6 结论

(1) 在本文试验工况下，F方案（8 mm基板+12%圆角镂空+双侧纵向加强筋）综合评分最高，可作为企业标准升级版的优先导入路线。

(2) D方案（6 mm加筋）在质量低于B方案的同时显著降低挠度，可作为成本敏感场景的备选路线。

(3) 单纯加厚能够改善静态刚度，但质量和成本代价较高；单纯镂空虽能减重，却可能放大挠度和寿命波动。

(4) 夹具轻量化的关键不是材料移除量，而是材料在主受力路径和高效截面位置的重新配置。

(5) 项目导入和产品定型前必须补充材料、焊接、有限元热点、现场寿命和安全风险验证，并以正式验证与认证文件作为最终依据。

致谢

感谢江苏安睿克智能科技有限公司研发组项目管理办公室、结构设计组、实验与计量组、工艺与试制组以及质量与 EHS 组在研究过程中的协同支持。

参考文献

说明：下列文献用于支撑通用理论、试验设计与论文写作规范；正式投稿前应由作者按实际查阅情况逐条核验、补充和替换。

- [1] TIMOSHENKO S P, WOINOWSKY-KRIEGER S. Theory of Plates and Shells[M]. 2nd ed. New York: McGraw-Hill, 1959.
- [2] PILKEY W D, PILKEY D F. Peterson's Stress Concentration Factors[M]. 3rd ed. Hoboken: John Wiley & Sons, 2008.
- [3] MONTGOMERY D C. Design and Analysis of Experiments[M]. 10th ed. Hoboken: John Wiley & Sons, 2019.
- [4] DIETER G E, SCHMIDT L C. Engineering Design[M]. 5th ed. New York: McGraw-Hill Education, 2013.
- [5] ISO 12100:2010. Safety of machinery — General principles for design — Risk assessment and risk reduction[S].
- [6] GB/T 7714—2015. 信息与文献 参考文献著录规则[S].

声明

数据可得性：本文试验数据来源于江苏安睿克智能科技有限公司研发组项目测试记录，文中复算数据见附录 A；因涉及企业内部技术资料，原始记录、图纸和审批文件可在合理范围内向作者或企业研发管理部门申请查阅。

利益冲突：本文为江苏安睿克智能科技有限公司研发组企业应用研究成果整理；作者声明不存在影响本文研究结论表达的利益冲突。

作者贡献：江苏安睿克智能科技有限公司研发组非标夹具轻量化项目组完成方案设定、样机制造协调、试验验证、数据整理、统计分析、论文撰写与版本复核。

原创性声明：本文内容基于江苏安睿克智能科技有限公司非标搬运夹具轻量化研发项目形成，未一稿多投；正式投稿前应按目标期刊要求完成作者署名、单位信息和伦理/合规声明核验。

安睿克智能科技

附录 A 试验原始数据表

本附录列出 36 件试验样机的原始数据。字段含义：SampleID 为样件编号，Scheme 为方案，Thickness_mm 为板厚，Rib 为是否加筋，Hollow_pct 为镂空率，Mass_kg 为质量，MaxDeflection_mm 为最大挠度，PeakStress_MPa 为峰值等效应力，ClampStability_pct 为夹持稳定度，CycleRetention_pct 为 20,000 次循环保持率。

表 10 36 件样机试验原始数据

SampleID	Scheme	T/mm	Rib	H/%	Mass/kg	Defl./mm	Stress/MPa	Stability/%	Retention/%
A-1	A_6mm 实板	6	0	0	18.49	1.91	185	94.0	88.4
A-2	A_6mm 实板	6	0	0	18.36	2.01	185	93.0	88.8
A-3	A_6mm 实板	6	0	0	18.32	1.89	183	92.2	87.5
A-4	A_6mm 实板	6	0	0	18.30	1.86	183	92.7	87.7
A-5	A_6mm 实板	6	0	0	18.66	1.91	182	92.5	88.2
A-6	A_6mm 实板	6	0	0	18.42	1.85	184	92.9	88.3
B-1	B_8mm 实板	8	0	0	20.89	1.40	154	94.6	92.6
B-2	B_8mm 实板	8	0	0	20.78	1.30	145	94.4	92.2
B-3	B_8mm 实板	8	0	0	21.13	1.30	153	94.9	91.2
B-4	B_8mm 实板	8	0	0	20.87	1.26	159	95.3	91.0
B-5	B_8mm 实板	8	0	0	21.06	1.27	151	95.4	92.7
B-6	B_8mm 实板	8	0	0	21.17	1.24	153	95.3	92.7
C-1	C_10mm 实板	10	0	0	24.01	0.91	134	95.4	94.5
C-2	C_10mm 实板	10	0	0	24.34	0.92	144	96.2	93.6
C-3	C_10mm 实板	10	0	0	24.17	1.00	139	96.8	92.4
C-4	C_10mm 实板	10	0	0	24.25	0.92	138	96.0	92.8
C-5	C_10mm 实板	10	0	0	24.06	0.94	146	95.7	93.5
C-6	C_10mm 实板	10	0	0	24.01	0.97	140	95.7	94.3
D-1	D_6mm 加筋	6	1	0	19.32	1.12	144	95.4	94.3
D-2	D_6mm 加筋	6	1	0	19.04	1.08	148	95.6	94.4
D-3	D_6mm 加筋	6	1	0	19.05	1.03	145	95.2	94.4
D-4	D_6mm 加筋	6	1	0	19.37	1.17	148	95.7	94.5
D-5	D_6mm 加筋	6	1	0	18.95	1.06	147	96.8	94.4
D-6	D_6mm 加筋	6	1	0	19.35	1.06	142	96.2	95.0
E-1	E_8mm 镂空	8	0	12	20.34	1.36	167	93.7	91.4
E-2	E_8mm 镂空	8	0	12	20.59	1.35	158	94.4	90.7
E-3	E_8mm 镂空	8	0	12	19.92	1.41	156	94.6	90.4
E-4	E_8mm 镂空	8	0	12	20.48	1.36	160	94.8	90.3
E-5	E_8mm 镂空	8	0	12	20.24	1.49	154	94.5	91.2
E-6	E_8mm 镂空	8	0	12	20.34	1.34	155	94.7	91.2
F-1	F_8mm 镂空加筋	8	1	12	21.35	0.86	129	97.3	96.5
F-2	F_8mm 镂空加筋	8	1	12	21.17	0.93	134	96.6	96.7
F-3	F_8mm 镂空加筋	8	1	12	21.12	0.88	137	96.8	96.9
F-4	F_8mm 镂空加筋	8	1	12	21.37	0.88	141	97.1	95.8
F-5	F_8mm 镂空加筋	8	1	12	21.14	0.80	132	97.4	96.5
F-6	F_8mm 镂空加筋	8	1	12	21.45	0.84	139	97.1	97.9

注：所有数据来源于研发组原始试验记录，用于论文复算和研发归档。

附录 B 评分模型权重与复算口径

表 11 综合评分权重

指标	权重	说明
刚度效率归一化 K_{norm}	0.30	体现单位质量下的结构刚度收益
峰值应力反向归一化 σ_{rev}	0.25	应力越低得分越高
循环保持率 L_{norm}	0.20	体现耐久稳定性
夹持稳定度 P_{norm}	0.15	体现动态定位与夹持可靠性
成本反向归一化 C_{rev}	0.10	成本越低得分越高

注：权重为企业管理偏好和项目评价目标设定，不代表行业通用标准。

$$\text{normalize}(x) = (x - \min(x)) / (\max(x) - \min(x))$$

$$\text{normalize_reverse}(x) = (\max(x) - x) / (\max(x) - \min(x))$$

$$\text{Score} = 100 \times (0.30K_{norm} + 0.25\sigma_{rev} + 0.20L_{norm} + 0.15P_{norm} + 0.10C_{rev})$$

AUREK

— 安睿克智能科技 —

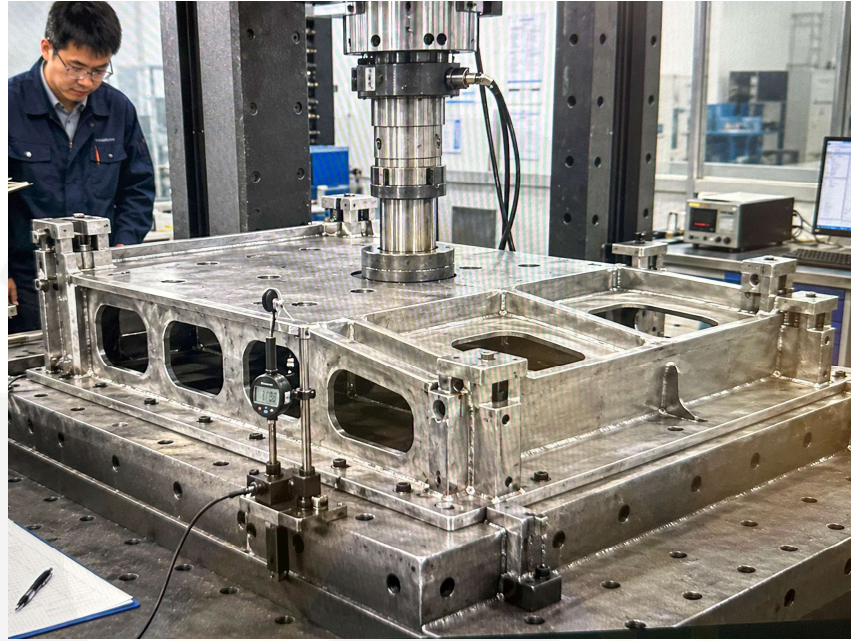
附录 C 现场照片



附图 C1 研发样机总览照片

AUREK

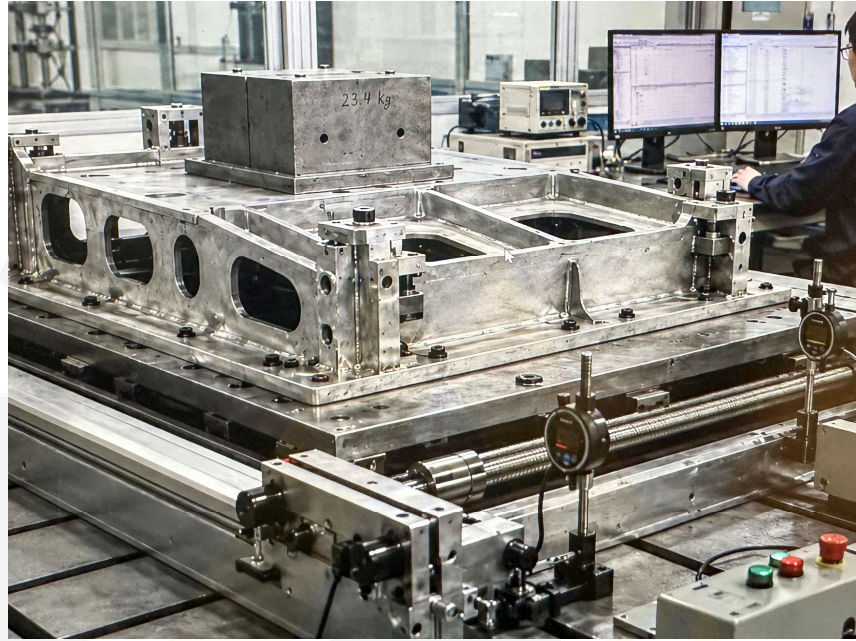
— 安睿克智能科技 —



附图 C2 静载加载试验照片

AUREK

— 安睿克智能科技 —



附图 C3 动态扰动与重复定位验证照片

AUREK

— 安睿克智能科技 —