AUREK
安睿克智能科技

AUREK ENGINEERING RESEARCH REPORT

AUREK-RC-AR-047

技术研究报告

基于三维模型的夹具质量、干涉与接触自动评审研究

CAD-based Fixture Mass, Interference and Contact Review

江苏安睿克智能科技有限公司

V1.0 | 2026-10-25

www.aurek.cn/resources

摘要 ABSTRACT

AUREK-RC-AR-047 / V1.0 / 2026-10-25

本研究以三维模型为依据建立夹具质量、实体干涉、名义接触及运动碰撞的可复算评审流程。从 6 个候选中选取固定吸盘框架 A、圆柱平行夹实体快照 B，以及已有侧夹翻转概念设计 C。三套输入合计 467 个有效实体，保存版本、哈希、长度单位、装配实例及变换记录。采用边界表示体积积分和实体布尔交集，A/B/C 在 0.001 mm³报告阈值下分别得到 154/8/85 对正体积重叠。固定配合、简化包络及数值薄层按语义分开评价。C 的 180 mm 开口相对 152.4 mm 基线新增 12 对重叠；90°翻转存在 6 对跨运动组重叠，锁紧包络与上横梁交集 74592 mm³。C 四个名义平面接触面合计 960 mm²；A 与 B 的曲面相切反例说明零间隙不等于有限接触面积。C 自制部分按原设计密度假设估重 29.200 kg，不能代表整套夹具质量。代表交集经解析式和独立三角积分复算，归档运动端点质心差小于 10^{-8} mm。本方法能够暴露装配语义缺失和检查范围遗漏，不证明强度、夹持保持能力或设备安全。

关键词：夹具；三维模型；质量与重心；实体干涉；名义接触；运动碰撞

CAD-based Fixture Mass, Interference and Contact Review

A reproducible CAD review workflow is developed for fixture mass, solid interference, nominal contact and sampled motion. Six candidates were screened. The selected inputs are a fixed vacuum frame (A), a cylindrical-gripper assembly snapshot (B), and an existing conceptual side-clamping/tilting design (C), containing 467 valid solids in total. Versioned STEP copies, hashes, units and assembly occurrences are retained. B-representation volume integration and Boolean common operations identify 154, 8 and 85 positive-volume overlap pairs at a reporting threshold of 0.001 mm³. These counts include simplified mating representations and are not defect counts. In C, a 180 mm opening adds 12 overlap pairs relative to the 152.4 mm baseline; at 90° tilt, six cross-motion-group overlaps occur, with a maximum pair volume of 74,592 mm³. Four planar pads give 960 mm² of nominal CAD contact. Tangent curved interfaces in A and B demonstrate that zero gap does not imply finite load-bearing contact area. The 29.200 kg estimate for C covers fabricated geometry only under the original density assumptions. Analytical checks, tetrahedral mesh integration and archived endpoint comparisons support the numerical findings. The results do not establish structural capacity, grip retention or safety certification.

Keywords: fixture; CAD; mass and centroid; solid interference; nominal contact; motion collision

核心结论 KEY FINDINGS

- 从 6 个候选中选取 2 套项目装配模型和 1 套既有概念运动算例，共 467 个有效实体；主分析均使用 STEP 副本。
- A/B/C 分别检出 154/8/85 对正体积重叠；这些数量包括简化配合和装配内部重叠，不能直接解释为制造缺陷数。
- C 净开口 180 mm 相对 152.4 mm 基线新增 12 对重叠；90°翻转存在 6 对跨运动组重叠，最大单对为 74592 mm³。
- C 名义平面接触面积 960 mm²；A 曲唇相切和 B 圆柱相切在刚体几何模型中均不形成有限面积，实际有效接触需变形或测量证据。
- C 自制几何部分条件质量 29.200 kg；缺失部件实物质量和密度阻止将其视为整套夹具自重。

研究边界 SCOPE

> A/B 为既有项目装配，C 为既有概念设计运动方法算例。
>
> 无完整密度处仅给条件质量；没有把包络按真实整机质量采用。
>
> 实体求交、名义接触和离散运动分析不构成强度或安全证明。
>
> A 运动项不适用；B 全行程未验证；C 仅覆盖明示动作和采样。

目录 CONTENTS

01 研究问题与适用范围 1
02 输入参数与研究方法 1
03 数学模型与推导过程 5
04 算例与计算结果 7
05 参数敏感性与工程讨论 11
06 结论与验证方法 13
参考文献 14
附录 A 可复算方法与文件关系 14

01 研究问题与适用范围

三维评审的核心问题不是能否输出一个质量数值或一张相交截图，而是输出是否对应正确的装配边界、材料、工件和动作。体积只描述几何占据，接触只描述界面相容性，二者均不自动携带强度或夹持安全含义。本研究围绕这条证据链提出四个可检验问题：实体是否完整计数，密度是否独立于体积，重叠是否来自真实实体交集，以及运动与接触是否具有可解释的输入。

案例 A 和 B 来自既有项目装配导出；案例 C 来自已有项目概念设计，包含执行器安装包络和图样重建工件。模型存在不等于设备已经制造。研究保留 A/B 的几何事实，并利用 C 已有运动参数检验完整的动作评审路径。

表 1 案例选择及模型成熟度

案例	模型身份	选择理由	适用边界
A	2026-10-14 固定吸盘框架	重复实例多，含 30 个吸盘、12 套十字抱压组件	固定作业姿态；无实物工件及完整密度表
B	2026-10-04 圆柱平行夹 V2 快照	55 个源实体加双侧 8 实体拼焊夹爪	保留当前装配形状；运动配合不随快照传递
C	2026-09-18 侧夹翻转概念 V1	同时具有开合、翻转、水平回转参数及归档端点	执行器为包络、工件为重建件，不能视为制造版

另外 3 个候选为玻璃吸盘简化框架、型材承载梁架和既有端盖夹具优化模型。前两者与 A 的结构覆盖重复或缺少执行夹爪边界；后者与原案例族关联，未优先纳入本次其他夹具筛选。候选版本、尺寸单位、密度和运动输入可得性已逐项登记。

> **研究边界** 本研究是对已有 CAD 及明确参数化输入的计算研究。没有实施称重、接触压痕、夹持滑移、强度试验或现场运动试验；没有签署设备安全或投产结论。

02 输入参数与研究方法

输入身份以文件内容 SHA-256 为准，同时保留文件时间戳和 STEP 头部时间。两者用于定位版本，不用于证明设计有效性。分析在独立副本上执行，不连接原生 CAD 活动会话。所有模型明确使用毫米；原件、分析副本与最终重新读取的哈希一致。公开图片仅包含匿名 CAD 形状、坐标和研究编号。[8–10]

表 2 关键输入及证据分类

输入	数值或状态	分类	处理方式
A/B/C 实体数量	305 / 71 / 91	模型提取	逐实例计算；C 含 1 个工件实体
A/B 逐件实际密度	未建立	研究限制	输出体积、体积质心和统一密度参考
C 自制部分密度	2700、7850 kg/m³	原设计假设	依照原脚本逐件分配，仅统计自制子集

输入	数值或状态	分类	处理方式
C 工件质量输入	20 kg	设计最大工件质量	与几何估重、实测质量分开
C 净开口 / 单爪设计行程	120–180 / 30 mm	原设计参数	空夹每 5 mm 采样，追加 152.4 mm 基线
C 翻转轴 / 范围	Y 向，经过(0,0,100) mm / 0–90°	原设计参数	每 5°采样，检查全部跨运动组实体
C 水平回转 / 提升	0–180° / 270 mm	原设计参数	回转每 15°；台面假设 z=0
B 研究圆柱	R=113.471265 mm，L=100 mm	反算参数化几何	由四个内向平面等距得到；非实际工件
体积报告阈值	0.001 mm³	数值设定	只筛除数值微量，不是允许干涉量

装配读取采用 XDE 的定义—实例结构，将各级位置矩阵逐级相乘，再对叶节点中的实体计数。A 的 305 个实体并非 305 种独立零件：48 个对拉螺栓、48 个锁紧螺母组件和 30 组吸盘附件必须按实例保留。B 的参考主体是 55 实体快照，不能把一个组件名当成一个实体。体积统计按零件/实体发生次数求和，不先整体融合，也不因名称相同而去重。[4]

$$\begin{bmatrix}\mathbf{x}_w\\1\end{bmatrix} = \mathbf{T}_1\mathbf{T}_2\cdots\mathbf{T}_k\begin{bmatrix}\mathbf{x}_l\\1\end{bmatrix} \qquad \text{式 (1)}$$

T 为 4×4 齐次变换，平移分量单位 mm。变换只用于对应实例，不重复施加已累积的位置。

主流程依次执行输入身份校验、实例展开、实体有效性检查、几何积分、包围盒候选筛选、实体布尔求交、接触语义核对和运动扫描。BRepCheck_Analyzer 仅检查形状拓扑/几何有效性。本次 467 个实体均返回有效；这一结果不评价机构是否可装配，更不评价承载。[5]

A | 固定吸盘框架 CAD 示意

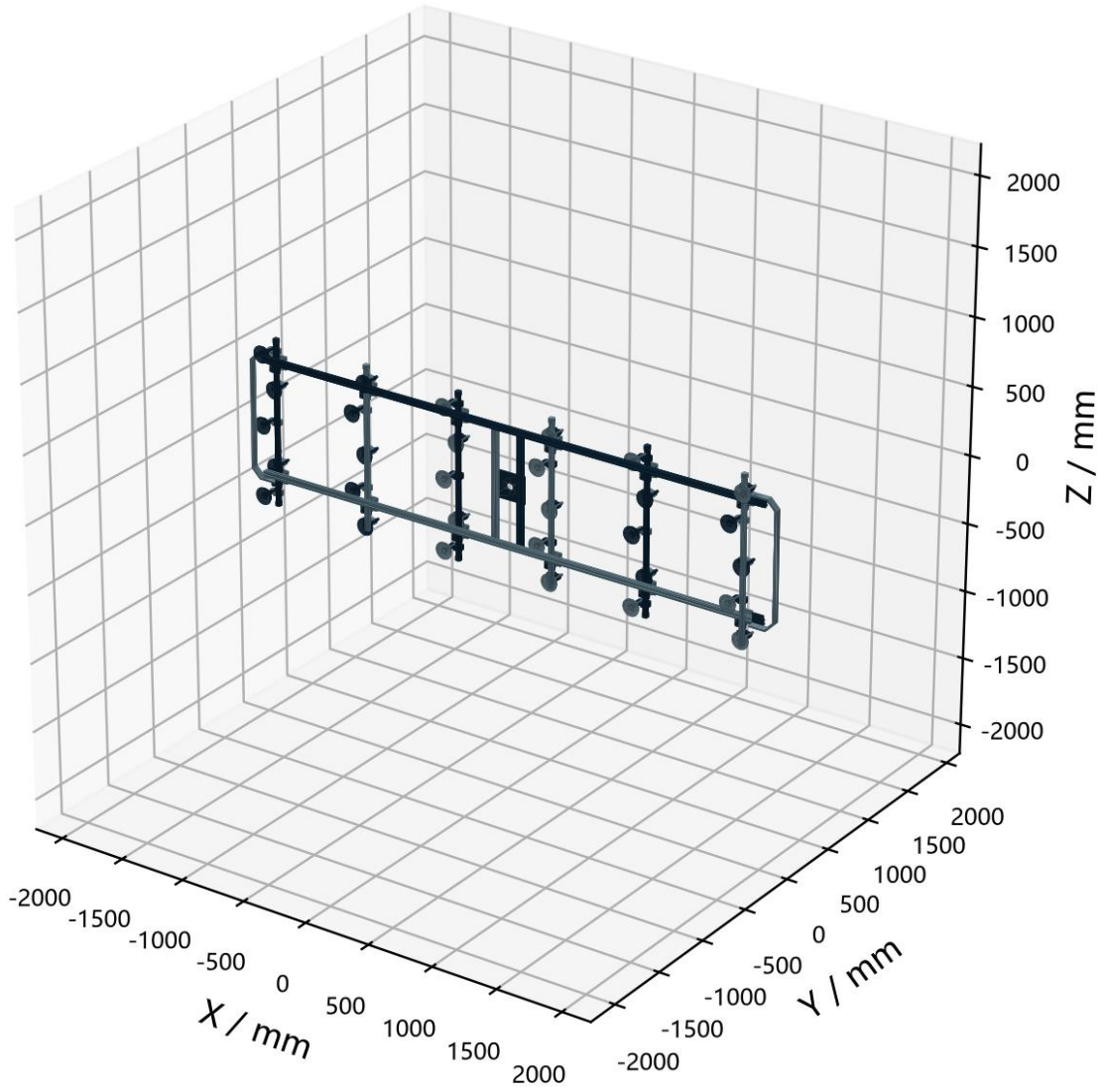


图 1 固定吸盘框架 A 的匿名 CAD 几何示意；不是设备实拍。

B | 圆柱平行夹 CAD 快照

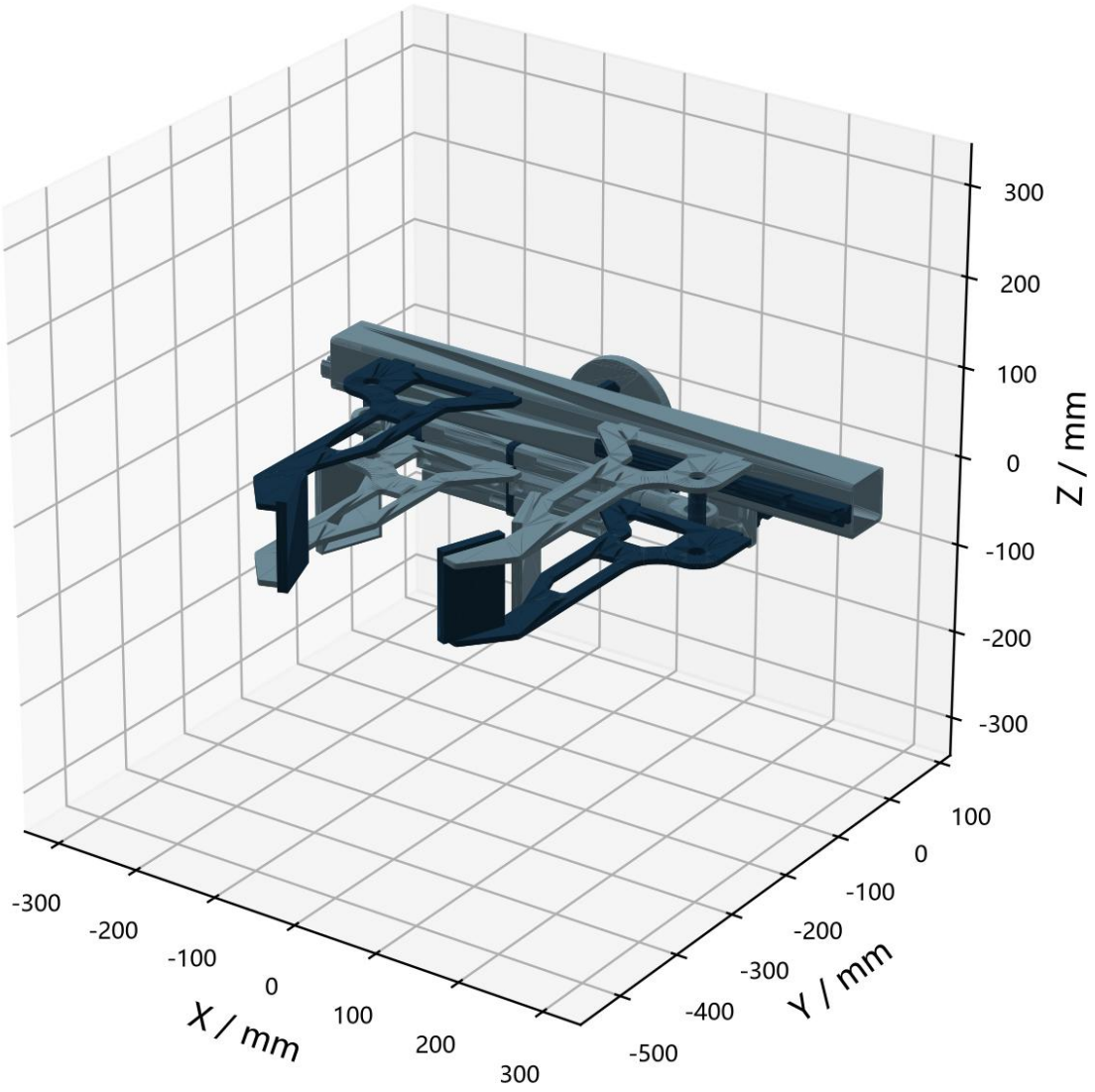


图 2 圆柱平行夹 B 的匿名固定姿态 CAD 快照。

C | 侧夹翻转概念 CAD 示意

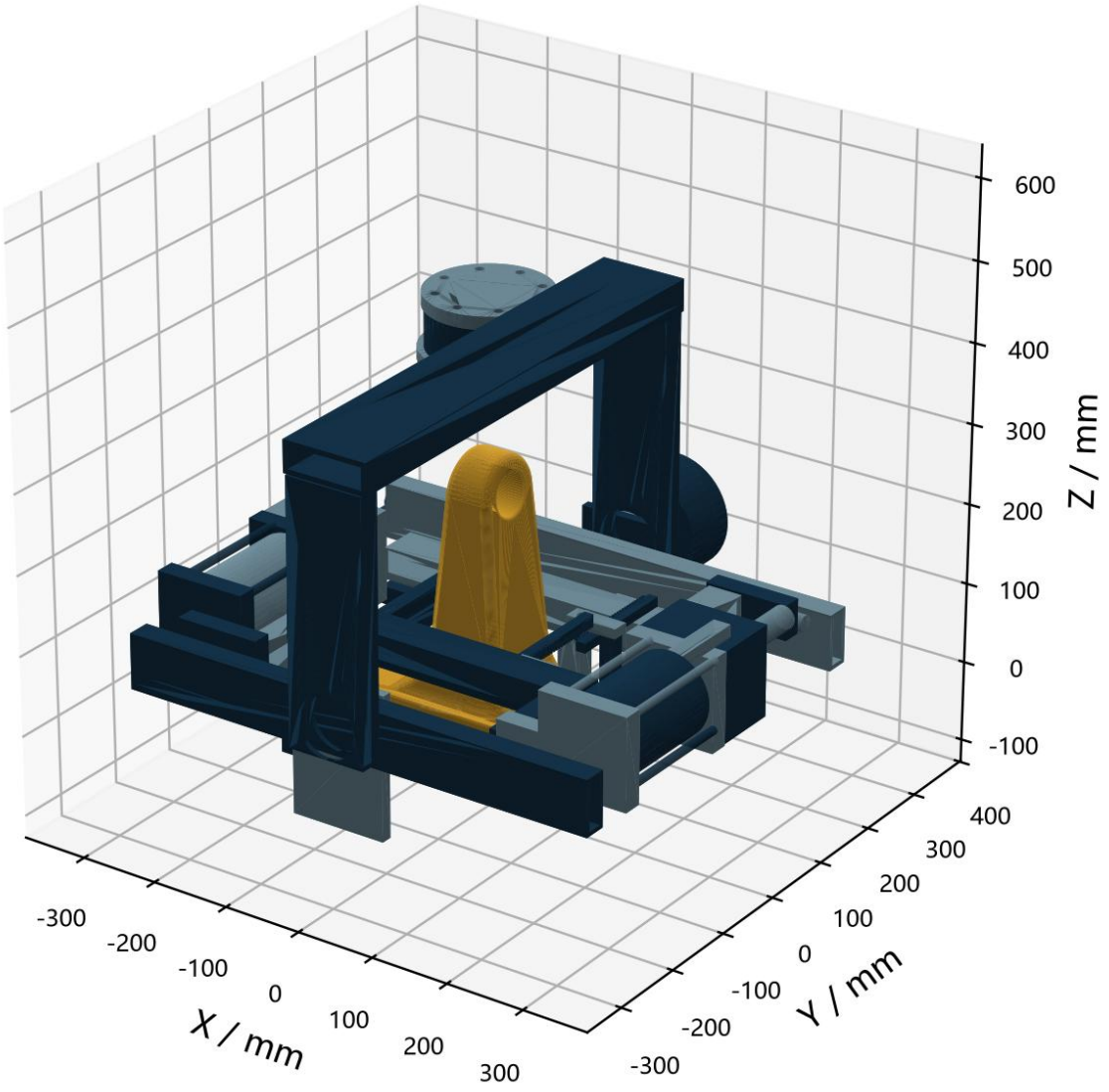


图 3 侧夹翻转 C 的概念 CAD 算例，黄色为重建工件；执行器采用安装包络。

03 数学模型与推导过程

体积积分对每个封闭实体独立进行。内核的 Mass 返回值在未赋密度的体积属性框架中表示体积，并非 kg。材料密度由单独输入表赋予，毫米体积换算成 m³时使用 10^{-9}。[1]

$$m_i = 10^{-9}\rho_i V_i, m = \sum_i m_i, \mathbf{c}_G = \frac{\sum_i m_i\,\mathbf{c}_i}{\sum_i m_i} \qquad \text{式 (2)}$$

ρ 以 kg/m³计，V 以 mm³计，m 以 kg 计，c 以 mm 计。若各实体统一密度，所得重心恰为体积质心；实际多材料装配未必如此。

零件实体互相穿透时，本研究仍保留按零件定义的条件质量之和，并另外报告穿透问题。把所有实体融合后求质量会悄悄扣除重叠材料，掩盖装配或包络问题。对空心执行器外形而言，即便体积计算无误，将其按实心钢赋重仍属于物理模型错误。

$$\Omega_{ij} = S_i \cap S_j, V_{ij} = \int_{\Omega_{ij}} dV, \mathbf{c}_{ij} = \frac{1}{V_{ij}} \int_{\Omega_{ij}} \mathbf{x}\, dV \quad \text{式 (3)}$$

S 为 BRep 实体。Vij 大于报告阈值才列为正体积重叠，记录交集质心和包围范围。接触面或边线可以具有零交集体积。

包围盒相交只用于减少待求交的实体对；每一条正体积记录都由布尔 Common 操作得到。布尔失败单独报错，不归入“无干涉”。两两交集体积总和不是所有重叠区域的并集体积，也不能用来直接修正总质量。[2]

$$A_{\text{nom}} = \sum_k \int_{\Gamma_k} dA, \mathbf{n}_k \cdot \mathbf{n}_w \approx -1, N_k = \int_{\Gamma_k} p(\mathbf{x})\, dA \quad \text{式 (4)}$$

Γ 为经工件边界验证的名义共面接触片，n 为朝向。N 为法向力，p 为实际压力。只有几何面积与法向时，不能反求压力或法向力。

首先选取实际面并考虑拓扑朝向，再检查工件距离、对向法向和共面范围。最小距离为零可能仅代表点或线相切；将整块夹垫表面积或吸盘内缩环面直接相加会夸大接触。有效承压面积还受柔性、粗糙度、预紧力、局部屈服和密封状态影响。本研究仅在刚体边界模型中定义名义几何接触面积。[3,6]

$$b(\delta) = 2\sqrt{2R\delta - \delta^2}, A_{\text{band}}(\delta) = 4Lb(\delta) \quad \text{式 (5)}$$

B 的研究圆柱被平面几何截入 δ 时，截线满足(R−δ)²+(b/2)²=R²。取 L=100mm；此式是带宽代理，不是 Hertz 接触或橡胶变形解。

$$\mathbf{x}(\theta) = \mathbf{o} + \mathbf{R}_y(\theta)(\mathbf{x}_0 - \mathbf{o}), \mathbf{o} = (0,0,100)^{\mathsf{T}} \quad \text{式 (6)}$$

C 转动组绕给定 Y 向轴线刚性旋转；叉架组不随该翻转。升降在转动后另加(0,0,270)mm，不能覆盖旋转轴引入的平移分量。

$$\Delta y_{\pm} = \pm\frac{w - 152.4}{2}, h(\theta) = 270 + \min_{\mathbf{x} \in S_{\text{rotor}}(\theta)} z(\mathbf{x}) \quad \text{式 (7)}$$

w 为净开口 mm。夹梁、夹指、滑块及齿条按原设计分组运动；气缸杆的包络长度随 w 变化，按原源码重建。h 为相对假设台面的最低余隙。

开爪、翻转、水平回转按已有动作分别扫描，不把不相容动作任意组合。C 开口扫描为空夹，翻转扫描采用 152.4mm 夹持基线及工件随动；水平回转在 90°翻转后检查运动组与上部固定接口。A 在固定设置下没有开爪自由度，该项不适用。B 保留的三组件固定快照不足以恢复原约束，运动项列为未验证，不伪造开爪行程。

04 算例与计算结果

表 3 质量与质心结果及定义

案例	几何体积 / mm³	质量结果 / kg	质心 / mm	结果含义
A	22327994.879	60.286（ρ=2700）；175.275（ρ=7850）	(0.000, −37.449, 0.095)	统一密度参考值与体积质心；不是实际总重区间
B	3286767.426	8.874（ρ=2700）；25.801（ρ=7850）	(−0.254, −139.429, 0.036)	统一密度参考值；双爪单独按 7850 估计 8.732kg
C	自制子集按原设计逐件积分	29.200（仅自制部分）	(5.950, −26.753, 183.095)	排除工件、执行器、导轨、轴承包络及未建附件

A 与 B 的材料输入不足以给出实际整套质量和实际重心，表 3 刻意保留条件性质。A/B 统一密度从 2700 变为 7850kg/m³时质量成比例改变，体积质心不动；这不意味着多材料装配的重心不变。B 双爪实体体积 1112407.842mm³，按钢量级密度 7850kg/m³得到 8.732kg；其余 2174359.584mm³仍需真实部件质量闭合。

C 重建工件体积 3237841.623mm³，若按 7850kg/m³均质钢估重为 25.417kg，高于原设计 20kg 工件输入约 27.1%。这一差异可能来自重建内部几何或材料假设，不能选择更小数值作为结论。20kg 是设计输入，25.417kg 是条件几何推算，均不是称重结果；本研究不据任一数值宣布负载适用。

表 4 静态实体求交统计

案例	全部实体对	包围盒候选	零体积候选	正体积重叠	两两交集体积和 / mm³
A	46360	686	532	154	167310.068
B	2485	109	101	8	4888.833
C	4095	179	94	85	300993.699

注：全部候选布尔运算成功。统计阈值为 0.001mm³；交集体积和不是并集体积。

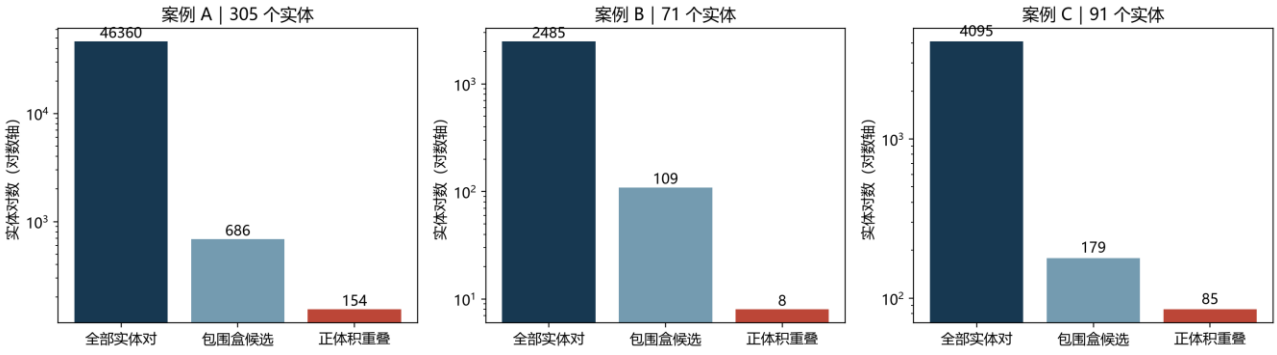


图 4 全部实体对、包围盒候选与真实正体积交集对数；纵轴为对数。

A 的 150 对较大重叠集中在 30 组重复吸盘附件内部，每组 5 对。应结合杆、螺母和支架的简化螺纹/配合表达判定，不能只凭零件名称自动豁免。其余 4 对发生于上压板和末端防撞构件，单对体积约 0.003369 或 0.018000mm³、X 向穿入厚度约 0.000060mm，属于数值/名义贴合敏感项，需与模型公差区分。

B 的 8 对重叠包含两侧气缸杆与杆端件/锁母的配合区，以及 4 组导向组件内部的薄层区域。夹爪拼焊实体未在当前姿态产生新增正体积相交。导向组件的 717.2mm³重叠是 65.2×11×1mm 矩形薄层，不能将其误

报为两侧夹爪与工件发生碰撞。C 静态 85 对中包含实心包络、导轨滑块、齿条齿轮和自制接合区域；原设计是概念布局，数量本身不等价于制造缺陷数。

表 5 代表实体交集的位置及判断

案例与对象	体积 / mm³	交集质心 / mm	工程解释
A 支架—吸盘轴向附件	3619.115	(1910.000, −35.000, 520.402)	重复配合区；需真实孔/螺纹/装配定义判定
B 导向组件内部两实体	717.200	(87.000, −88.500, 0.000)	组件内部矩形薄层；解析式复算一致
C 180mm 开口，叉耳桥—侧框	14094.000	(−217.500, −231.250, 93.500)	相对夹持基线新增，属于运动部件与侧框冲突
C 90°翻转，锁紧包络—上横梁	74592.000	(0.000, 41.300, 398.209)	跨运动组冲突；概念布局需修改或替换实际元件后复核

注：坐标采用各案例导入坐标系；公开图形中不含客户标识。

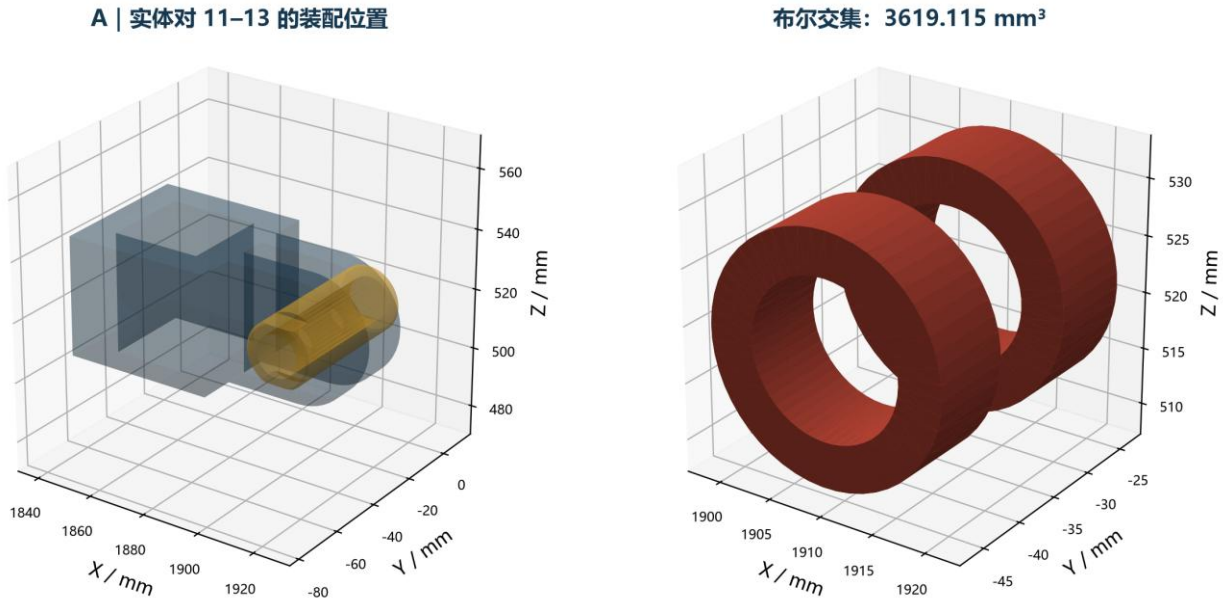


图 5 A 代表配合区的实体位置和布尔交集；右侧单独显示交集几何。

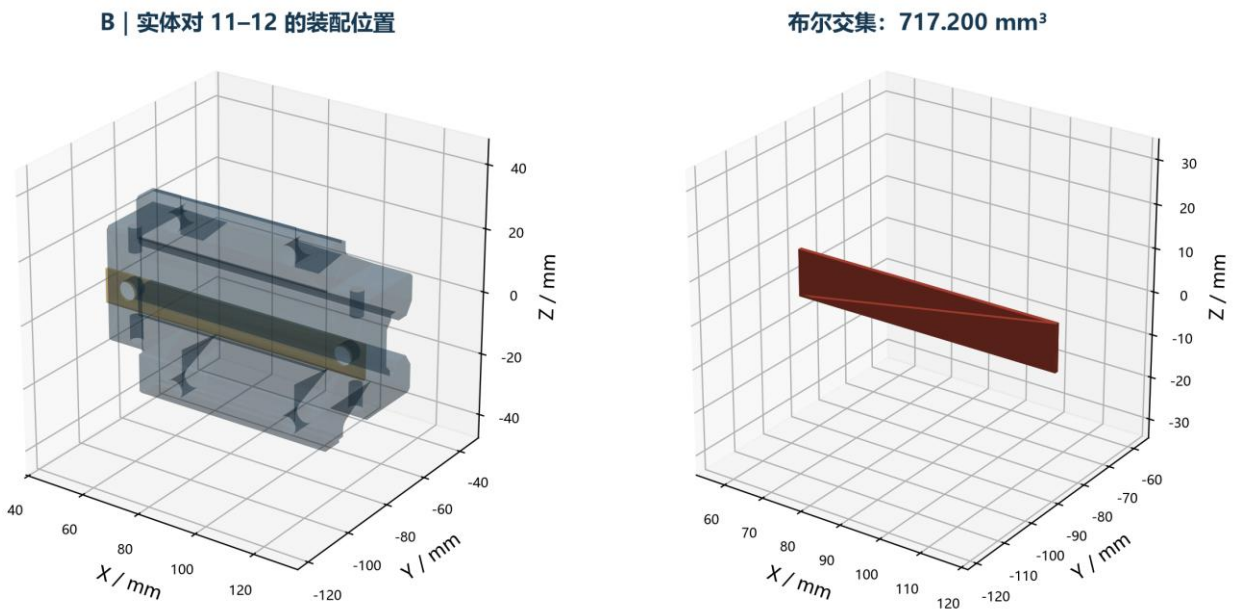


图 6 B 导向组件薄层重叠，布尔交集与 65.2×11×1mm 解析体积一致。

表 6 接触面积与法向评审

案例	界面定义	几何面积结果	法向与分布	不能据此推断
A	30 个未变形曲唇各自对参考切平面	有限面积为 0；拒绝内缩环面 20911.226mm²	参考工作法向(0,−1,0)；吸盘分布见图 1	实际密封面积、真空保持力、柔性压缩
B	四夹垫对研究相切圆柱	刚体线接触面积 0；可用夹垫总面 29238.044mm²	(±0.939693, ±0.342020,0)；接触线沿 Z，长度 100mm	实际工件接触带、压力和防滑能力
C	4 块平垫对 152.4mm 工件平面	4×30×8=960mm²	两侧法向±Y；X=±52.5mm，Z=6–14mm	粗糙表面真实承压面积及保持力

A 每个内缩平面环面积 697.040870mm²，几何上等于 π(45.625²−43.125²)，但该平面比曲唇最外缘后退 7.500mm。因此 20911.226mm²不能作为工作接触面积。30 个曲唇分别对各自参考切平面求交均无有限面域；切平面 Y 位置存在约 0.00012mm 的模型差异，不能进一步宣称 30 杯在一个理想刚性平面上完全同时贴合。

B 的四内向夹垫平面到圆心(0,−370,0)的距离均为 113.471265mm。构建同半径、100mm 长的参考圆柱后，四处最小间隙小于 10^{-9}mm、实体交集体积为 0、共同表面积也为 0。它是相切线接触的几何反例。有限的实际接触面积须由衬垫或工件变形产生，不能以四个夹垫全面接触替代。

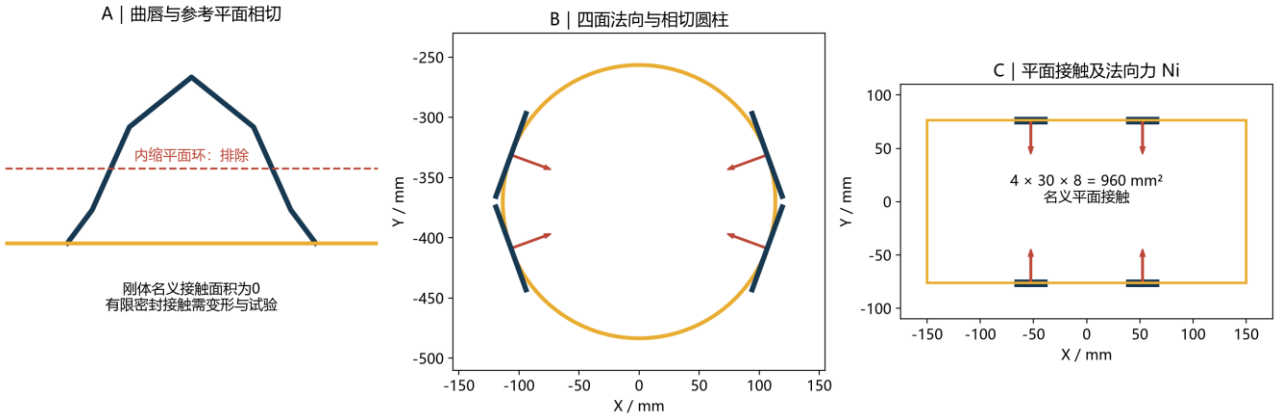


图 7 三类接触与法向力示意。A 为原理示意；B 采用由模型平面反算的研究圆柱；C 为名义平垫接触。

表 7 运动工况及检出结果

动作	采样	实体求交结果	适用解释
A 开爪	不适用	固定式作业设置没有开爪自由度	未虚构行程
B 开爪	未验证	固定快照无法恢复完整运动约束	不能用当前姿态结果外推全行程
C 空夹开口	120–180mm 每 5mm，另加 152.4mm，共 14 态	175mm 新增 4 对；180mm 新增 12 对	新增相对 152.4mm 基线；170mm 采样未出现新增对
C 翻转	0–90°每 5°，共 19 态	70°采样起出现跨组重叠；90°为 6 对	不是首次接触角的连续求解
C 水平回转	90°翻转后，0–180°每 15°，共 13 态	对上部固定接口未检出正体积交集	不消除既存翻转干涉；未含外部设备和管线

C 开口 175mm 时，4 个叉耳桥与侧框发生新增重叠；开口 180mm 时扩展到执行臂、叉耳桥和销轴共 12 对。翻转 90°时，两侧框、一个后盖、缸筒、前盖和锁紧包络均与上横梁相交。最大交集 74592mm³并非数值微量。原资料局限于旋转部件对叉架立柱的检查，未覆盖上横梁，因此本次扩大实体对集合后检出冲突，不应沿用原局部“无穿透”结论。[10]

按原设计提升 270mm 后，翻转采样的最小台面余隙约 46.933mm，出现在 80°；90°时为 52mm。台面余隙为正，同时仍有内部上横梁碰撞，这说明扫掠最低点检查和内部实体碰撞是两个独立条件。提升整个夹具不会改变内部部件之间的相对穿透。

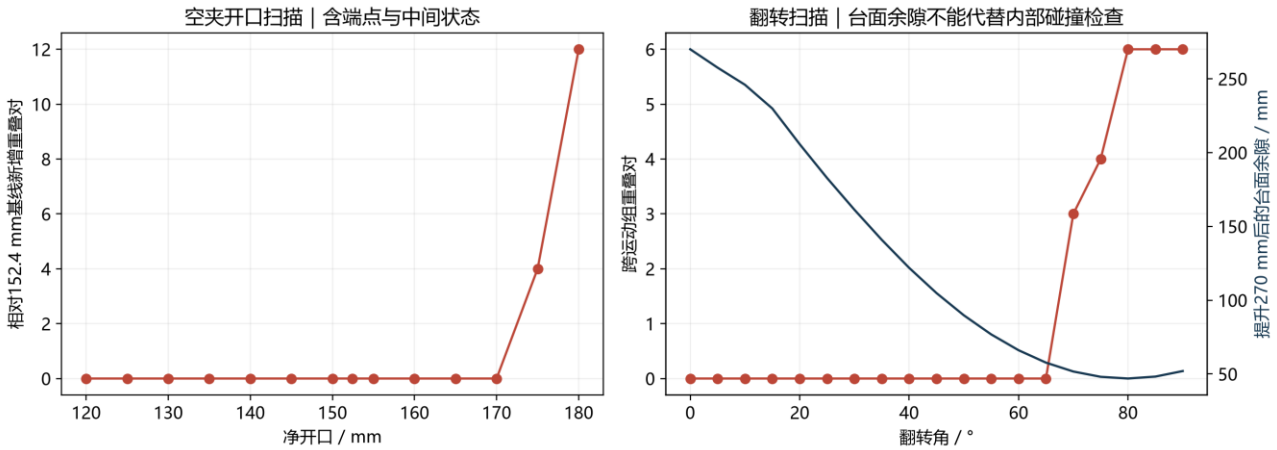


图 8 C 开口新增重叠及翻转跨组重叠；右侧曲线并列显示假设台面余隙。

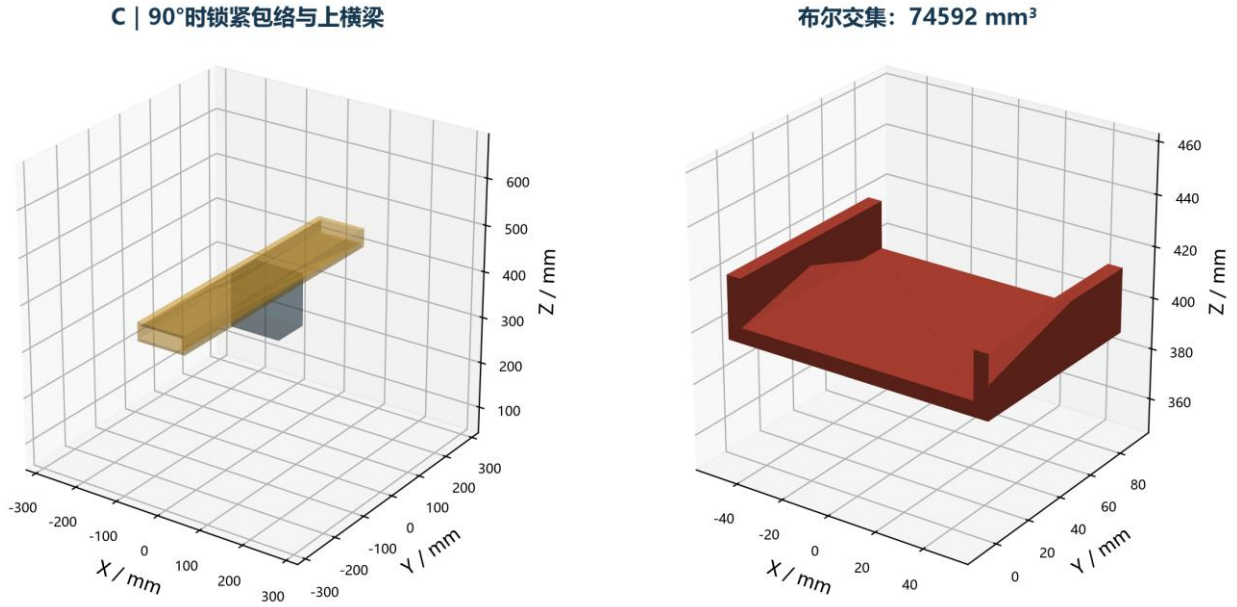


图 9 C 翻转 90°时锁紧包络与上横梁的真实布尔交集，体积 74592mm³。

05 参数敏感性与工程讨论

密度的共同缩放体现质量模型的线性。C 自制部分密度共同乘以 0.9–1.1，条件质量由 26.280kg 变为 32.120kg，部分重心保持不变。这只是方法扰动范围，不是材料密度允许公差。若只改变某一组件密度，重心将向该组件偏移；因此补全真实部件质量时必须重新加权，不能沿用统一密度体积质心。

$$\frac{\partial m}{\partial \rho_j} = 10^{-9} V_j, \frac{\partial \mathbf{c}_G}{\partial \rho_j} = \frac{10^{-9} V_j}{m} (\mathbf{c}_j - \mathbf{c}_G) \qquad \text{式 (8)}$$

单件密度变化的灵敏度。远离当前重心的未知部件对重心误差更敏感。

B 几何带宽代理中，δ=0.01、0.1、1mm 分别得到四条带总面积约 1205.142、3810.239、12025.108mm²。它说明即使 R 和 L 已知，微小压入量也能显著改变接触面积。该计算既未建立材料本构，也未由夹紧力求 δ，不能据曲线求实际接触压强。真实夹垫接触研究须同时给出预紧、材料、厚度、曲率及边界约束。

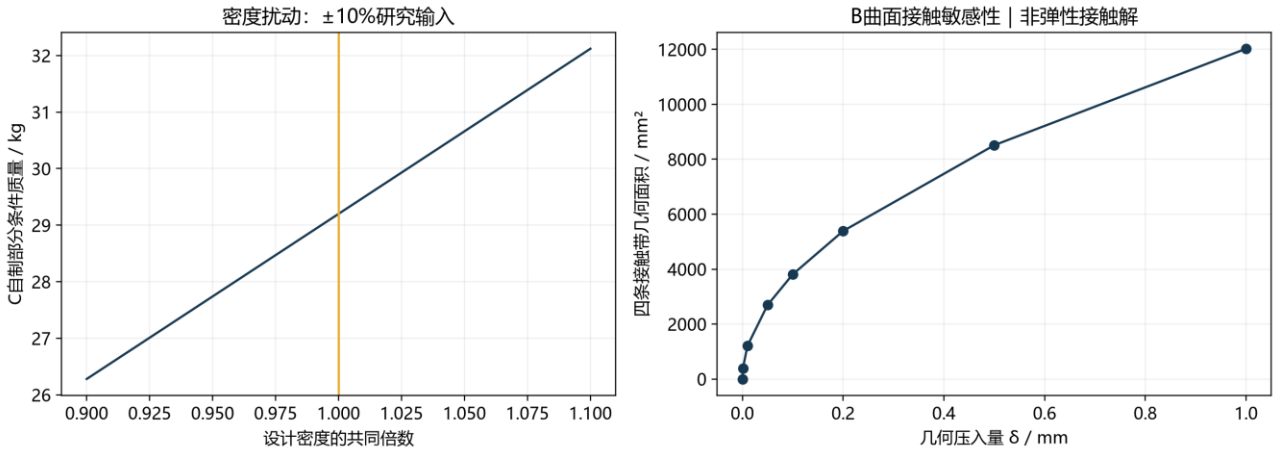


图 10 C 自制部分密度扰动与 B 接触带几何代理的参数敏感性；均为明确标注的研究输入。

提高报告阈值能够隐藏数值薄层，却不能解决大尺度碰撞。A 阈值从 0.001 提高至 0.01mm³时由 154 对变为 152 对，提高至 0.1mm³时为 150 对；B 与 C 在 0.001–100mm³范围内分别保持 8 和 85 对。0.000060mm 薄层与数万 mm³动态碰撞显然不应使用同一处置。阈值并非制造公差；允许配合必须由真实接口定义。

运动采样可发现碰撞，但未检出碰撞不等于连续路径无碰撞。角度步长 Δθ 对应半径 r 处约 rΔθ 的位移上界，狭窄障碍可能落在采样点之间。当前结果足以否定 C 既有概念布局的全程无碰撞假设；不需要用“采样不连续”弱化已经存在的正体积交集。若要证明一条修改后的路径可用，应采用自适应细分、保守距离界或连续碰撞算法，并纳入接料设备、管线和实际附件。

本研究没有计算应力或安全系数。即使所有重叠被消除，仍需按真实负载路径评价夹指、焊缝、销轴、螺栓、轴承、执行器和制动；即使名义面积达到 960mm²，也不能证明摩擦保持、软垫承压或失压保持。模型几何只能提供这些研究的输入，不能取代它们。

06 结论与验证方法

1. 装配实例、单位和密度应分开管理。本次 467 个有效实体证明几何输入可分析；A/B 实际密度缺失、C 包络简化仍限制真实总质量结论。
2. 实体布尔交集是干涉记录的依据。A/B/C 的 154/8/85 对正体积交集必须按配合语义处置，不能把包围盒候选数当作碰撞数。
3. 完整的运动组检查揭示 C 在大开口和翻转终端存在布局冲突。180mm 新增 12 对，90°跨组 6 对；局部立柱检查和台面余隙都不足以覆盖上横梁。
4. 接触评审必须先确认工件和有效界面。A 内缩环面应被排除；B 刚体圆柱相切只有线接触；C 得到 960mm²名义平面面积，但真实压力分布仍未确定。
5. 研究结果支持修正模型、补齐物理输入和扩大检查范围；不构成承载、安全或制造放行。

表 8 实质复核结果

对象	独立方法	结果	覆盖范围
A 代表交集	1072 三角面定向四面体积分	3616.309 vs BRep 3619.115mm³；相对差 0.07754%	独立离散积分，非第二 CAD 内核
B 代表交集	65.2×11×1mm 解析式及 12 三角面积分	717.200mm³，浮点精度内一致	组件内薄层交集
C 关键 90°交集	空心截面解析：(110×25−98×19)×84	74592mm³，与布尔结果一致	锁紧包络—上横梁
C 接触面	4×30×8mm 解析式	960.000mm²	名义平面接触
C 归档端点	180mm 开口、90°翻转 STEP 独立读取比较	最大质心差<10^{-8}mm，最大体积差<1.1×10^{-7}mm³	90/91 个实体逐件比对
B 历史源 CAD 体积	55 个源实体体积和对照 STEP	相对差−0.0001466%	验证快照体积转换量级
A/B/C 代表工况	匿名局部图、坐标和交集逐项目视核对	每例至少 1 工况已完成研究执行者复核	未替代独立工程师签署

14 项数值复核均在各自阈值内。解析式验证 B 薄层尺寸和 C 空心横梁交集；三角积分以独立的定向四面体公式重算代表体积，A 存在可解释的离散曲面误差。[7] C 归档端点比较能够检验旋转轴位置和变换累积，而不仅是同一函数的自洽。

数值核对通过只说明所列检查实际通过。未执行项目包括 A/B 完整实物称重和质心测量、B 全行程运动复原、全部案例真实有效接触面积测量、连续全路径碰撞证明、强度/安全认证以及独立工程师签署。A 运动项为不适用，与 B 运动项未验证应严格区分。

后续实体试验可用分件称重与多点支承反力求重心，用压敏介质或可量化压痕确认接触带，再以实际附件装配进行低速轨迹验证。称重应扣除工件与悬挂附件的边界差异；接触试验应记录预紧、材料、表面和压力条件。上述方法属于提出的验证路径，本研究未把它们记为已执行试验。

参考文献

[1] Open CASCADE Technology. BRepGProp Class Reference. OCCT 8.0.1. https://occt3d.com/dev/doc/refman/html/class_b_rep_g_prop.html（访问日期：2026-10-25）

[2] Open CASCADE Technology. BRepAlgoAPI_Common Class Reference. OCCT 8.0.1. https://occt3d.com/dev/doc/refman/html/class_b_rep_algo_a_p_i___common.html（访问日期：2026-10-25）

[3] Open CASCADE Technology. BRepExtrema_DistShapeShape Class Reference. OCCT 8.0.1. https://occt3d.com/dev/doc/refman/html/class_b_rep_extrema___dist_shape_shape.html（访问日期：2026-10-25）

[4] Open Cascade SAS. Extended Data Exchange (XDE), official project documentation archive. https://github.com/Open-Cascade-SAS/OCCT/wiki/xde（访问日期：2026-10-25）

[5] Open CASCADE Technology. BRepCheck_Analyzer Class Reference. OCCT 8.0.1. https://occt3d.com/dev/doc/refman/html/class_b_rep_check___analyzer.html（访问日期：2026-10-25）

[6] Open CASCADE Technology. BRepAdaptor_Surface Class Reference. OCCT 8.0.1. https://occt3d.com/dev/doc/refman/html/class_b_rep_adaptor___surface.html（访问日期：2026-10-25）

[7] Open CASCADE Technology. BRepMesh_IncrementalMesh Class Reference. OCCT 8.0.1. https://occt3d.com/dev/doc/refman/html/class_b_rep_mesh___incremental_mesh.html（访问日期：2026-10-25）

[8] 匿名项目档案 A. 固定吸盘框架装配 STEP 与结构说明，2026-10-14 状态；本研究证据快照。（访问日期：2026-10-25）

[9] 匿名项目档案 B. 圆柱平行夹拼焊夹爪 V2 装配 STEP 及源实体快照记录，2026-10-04；本研究证据快照。（访问日期：2026-10-25）

[10] 匿名项目档案 C. 侧夹翻转夹具概念布局 V1，2026-09-18；参数化源码、状态 STEP 及设计说明。（访问日期：2026-10-25）

附录 A 可复算方法与文件关系

归档输入表与模型副本共同构成复算基线。运行计算入口后依次得到实体库存、静态交集、名义接触、运动状态、质量敏感性、科学图与独立复核结果。模型坐标、变换矩阵、每个交集体积/位置、失败项及原始哈希保存在研究数据中。公开文稿仅展示匿名身份。

$$V_{\mathrm{mesh}} = \frac{1}{6}\sum_t \mathbf{a}_t \cdot (\mathbf{b}_t \times \mathbf{c}_t), \mathbf{c}_{\mathrm{mesh}} = \frac{\sum_t V_t\,(\mathbf{a}_t + \mathbf{b}_t + \mathbf{c}_t)/4}{\sum_t V_t} \qquad \text{式 (9)}$$

三角面定向一致且封闭时，以原点为第四顶点的定向四面体积分。负向三角面按拓扑朝向修正；曲面三角化产生近似误差。

主要依赖为 Python 3.12 和 OCP/OCCT 8.0.1，科学绘图使用 Matplotlib 与 NumPy。几何布尔求交使用原 BRep，不使用图像像素或包围盒体积代替。输入模型不重新生成，原项目源码只作为运动与密度依据保留。

AUREK
安睿克智能科技

关于本报告

ABOUT THIS REPORT

本报告属于安睿克技术研究报告系列。报告中的研究对象、输入、模型与结论以正文及其引用依据为准。适用于具体工程项目时，应结合实际工况、设计条件与验证记录进行评价。

发布单位

江苏安睿克智能科技有限公司

资料中心

www.aurek.cn/resources

AUREK-RC-AR-047