

工装夹具的设计与运用分析

苏亦

凌云科技集团有限责任公司 湖北武汉 430040

摘要：本文针对机翼薄壁件刮胶与打磨工序提出了一种基于真空吸附的柔性工装夹具设计方案。系统整体采用 $M \times N$ 阵列化单元构型，通过伺服电机驱动实现三维调节，结合真空吸盘实现大曲面支承与精准定位。研究首先分析了总体结构、定位支承与吸盘夹紧机构的构型特点，并结合摩擦学与受力平衡理论完成吸附力与有效面积计算，最终选用直径50mm的SMC万向吸盘作为夹紧核心。进一步对真空吸附系统进行了管路与阀控架构设计，并通过冗余与监测策略提升运行可靠性。在仿真环节，利用有限元软件对吸盘夹紧机构进行了静力学分析，结果表明支撑柱头的最大应力为57.206MPa，远低于45号钢的许用应力355MPa，结构具备足够强度储备。同时，对定位/支承单元进行模态分析，前四阶固有频率分别为315.89Hz、326.85Hz、1333.6Hz与1417.7Hz，显著高于伺服电机工作频率范围，有效避免了共振风险。研究结果验证了该柔性工装在强度、刚度与动态稳定性方面的合理性，为航空维修中复杂曲面零件的高效装夹提供了技术支持。

关键词：航空维修；柔性工装；真空吸附；有限元仿真

随着民机维修与制造领域对机翼薄壁件装夹精度和加工效率的要求不断提高，传统的刚性工装已难以兼顾多型号适配与高频切换的需求。尤其在刮胶与打磨工序中，零件表面曲率复杂且壁厚较薄，稍有受力不均即可能引发局部变形，严重影响结构强度与后续工艺质量^[1]。因此，开发具有多点自适应支承、可靠吸附定位及快速切换能力的柔性工装成为必然趋势。近年来，真空吸附技术凭借接触柔和、贴合灵活及控制简便的优势，在航空工装领域逐渐受到重视。

一、工装夹具设计

1. 总体结构设计

本工装夹具面向机翼薄壁件刮胶与后续打磨工序，采用多点真空吸附的柔性架构（图1）。系统以 $M \times N$ 阵列的定位支承单元为核心，通过X向导轨与排架模块构成平面运动平台，Y向伺服电机经齿轮与丝杠传动，驱动单元在排架内独立移位，Z向伺服电机控制吸盘伸缩并设置机械限位与位置锁紧。基座采用可拼接设计，电机与丝杠布置在排架包络内，避免并联运行时的干涉，X与Y端部设置行程开关以防碰撞。单元与排架均模块化互换，阵列能按工件外形划分区域并快速切换，适配多型号机翼壁板^[2]。所有电机均为抱闸伺服型，单元到位即可自锁，避免掉电漂移。吸盘阵列可在工作空间内划分区域，每区单元在限定范围内自由微调，以形成对

曲面包络的最佳支承。为覆盖不同机型的尺度差异，基座边缘采用螺栓拼装方案，连同电缆与气路的快换接口，实现按需扩展与快速维护。系统在X向与Y向分别实现最小216mm与150mm的支承间距，Z向行程达300mm，可以满足小间距密集支承与大行程调高的并行需求，适合高频切换的节拍化生产。

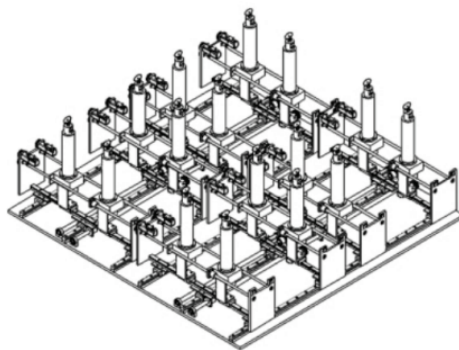


图1 刮胶柔性工装系统

2. 定位/支承设计

定位支承设计围绕薄壁曲面贴合与受力均衡展开。单元由支撑座、导轨滑块、螺纹升降柱与螺纹轴组成，Y向通过丝杠副实现精确移位，Z向由中间螺旋副驱动吸盘上下，导向柱约束侧向偏摆并提升重复定位性。升降至限位高度时机械止挡阻断行程，防止结构脱扣。吸盘采用可转动的万向结构，使吸附面法线自动对准工件局

部法矢，实现在复杂曲面上的面内贴合。为抑制夹紧不均引起的局部变形，在吸盘固定套贴装压力应变片，实时采集应力应变并反馈至控制程序，伺服系统据此微调各单元位置，保证切向载荷与法向载荷合理分配。针对多型号切换，PC程序根据每块区域的检测信号生成独立指令集，在更换零件时自动重置各单元的Z向基准，避免累积误差与调整紊乱^[3]。

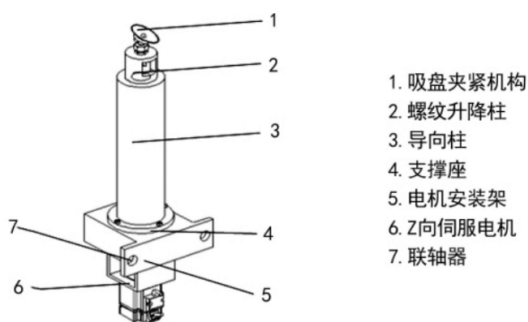


图2 定位/支承单元结构

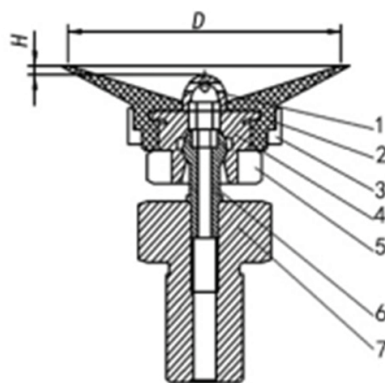
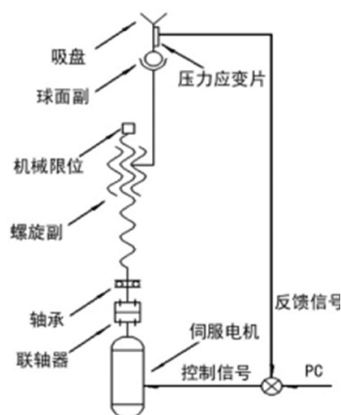


图3 定位/支承单元Z向传动原理图

夹持时不发生宏观位移为理想边界，计算吸附力时将刮胶或打磨的切向载荷作为主导外力，实际用量取高于理论需求的冗余以抵消表面微观粗糙与姿态扰动的不利影响。

2. 吸附力与有效面积计算

在边缘区域进行受力平衡，吸盘与工件的法向力为 F_z ，切向合力为 F_f ，满足库伦摩擦判据： $F_f \leq \mu_s F_z$ 。

将重力在面内与法向的分量与工序切向力合并，可得等效平衡关系 $\mu_s (W + G \cos \theta) = G \sin \theta + F_t$ ，

其中 W 为单杯吸力， μ_s 为静摩擦系数， θ 为吸盘转角， F_t 为切向工况力。

选取橡胶接触的 $\mu_s=0.5$ ，并考虑姿态扰动角度范围 -30° 至 30° ，将打磨阶段的切向力代入后得到单杯所需最大吸力 $W=56.4N$ 。

3. 吸盘夹紧机构设计

吸盘夹紧机构由真空橡胶吸盘、固定套、通气支撑球头与支撑柱头构成。球头材料选用LY12铝合金，侧壁设置通气孔并与负压通道贯通，球铰界面赋予吸盘一定转角范围，实测可满足 $\pm 30^\circ$ 工况下的贴合需要。真空系统由压缩机与发生器提供约0.8bar负压，结合橡胶与铝合金的摩擦特性，按吸附力与稳定性判据计算，在安全系数取二的条件下，直径50mm的万向吸盘可满足刮胶与打磨阶段的载荷需求。（图3）

二、真空吸附系统设计

1. 系统原理与工况假设

本系统以真空压缩机与真空发生器产生的负压作为能量源，经气路接入各吸盘夹紧单元，完成机翼薄壁件的分区吸附与加持。定位完成后施加负压，避免因自重与重心偏置引起的预滑移，从而把吸附力完全用于抵抗刮胶与打磨工序产生的切向扰动。系统设计以薄壁件在

真空发生器可稳定提供0.8bar负压，按安全系数 $S=2$ 计，则吸附面积 C 满足 $C=S \cdot W / \Delta p = 2 \times 56.4N \div 80000Pa = 0.00141m^2$ ，即 $14.1cm^2$ 。

选择直径50mm吸盘，其名义面积 $\pi (0.025m)^2 \approx 0.00196m^2$ ，显著大于所需面积，满足设计冗余。

由此在额定负压下单杯可提供法向承载 $F_n = \Delta p \cdot A \approx 80000 \times 0.00196 \approx 157N$ ，对应的抗切向能力约为 $\mu_s F_n \approx 78.5N$ ，高于边界计算的需求，验证了选型的安全度。

3. 管路与阀控架构及压降裕度

系统采用阀岛式分配与分区汇流相结合的管路布局，主干路承担稳定负压供给，支路在吸盘就位后由电磁阀单独开启，既减少无效抽空体积也降低瞬态压降。按照

静态需求核算，在工作压力差 $\Delta p=0.8\text{bar}$ 条件下，单杯提供的法向承载为 157N，其对管路压降的容忍度高，常规长度与直径的支路损失远小于额定差压，不会削弱静态吸力边界。

三、关键部位仿真

1. 吸盘夹紧机构强度分析

针对机翼薄壁件在刮胶工序中的受力需求，本文对吸盘夹紧机构开展了有限元静力学仿真研究。材料参数如表 1 所示：

表 1 所需各材料参数

材料	密度 ρ (kg/m^3)	杨氏模量 E (GPa)	泊松比 λ
丁腈橡胶	1000	0.01	0.499
LY12	2700	73	0.32
45号钢	7890	209	0.269

仿真工况设定为当工装仅依靠四个吸盘夹紧薄壁件并承受最大切向力时，机构处于极限负载静止状态。利用 Ansys Workbench 建立有限元模型，加载真空吸力与刮胶切向载荷后得到应力分布结果。支撑柱头的应力云图显示最大应力值为 57.206MPa，而 45 号钢的许用应力高达 355MPa，两者差距明显，说明支撑柱头在极端工况下依然具备充分的强度储备。丁腈橡胶与 LY12 材料的应力分布同样处于弹性范围内，表明所设计的吸盘夹紧机构不仅满足承载需求，而且具备较高的安全裕度，为柔性夹具在长期运行中提供了可靠性保障。

2. 定位/支承单元模态分析

为了避免定位/支承单元在运行过程中发生共振，采用 Ansys Workbench 对其进行模态分析。仿真结果表明固

有频率均大于 300Hz，具体数值如表 2 所列：

表 2 定位/支承单元前 4 阶模态固有频率

阶数	1	2	3	4
频率 (Hz)	315.89	326.85	1333.6	1417.7

这一结果验证了单元结构在动态工况下的稳定性与可靠性，保证了工装在长时间多循环操作中的夹持精度与安全性。同时，模态分析为优化设计提供了量化依据，使得工程人员能够在后续改进中进一步减轻质量或提高刚度，而不影响整体抗振性能。

结语

本文设计的柔性工装夹具在结构上实现了模块化与可扩展化，结合真空吸盘与分区管路控制技术，有效提升了机翼薄壁件刮胶与打磨工序中的夹持稳定性。结果表明，该柔性工具备有高可靠性和适配性，能够显著降低人工操作风险并提高维修效率。未来工作可在此基础上进一步探索智能监测与自适应控制策略，使其在航空维修自动化和智能化方向上发挥更大作用。

参考文献

- [1] 柳青松, 赵利民. 机械制造工艺编制与机床夹具设计实例 [M]. 化学工业出版社: 201909: 195.
- [2] 蒋铭. 关于机械加工中工装夹具的定位设计分析 [J]. 内燃机与配件, 2019, (10): 53-54.
- [3] 卢晓智, 陈俊超. 数控铣床工装夹具设计内容与改进分析 [J]. 山东工业技术, 2018, (04): 76.
- [4] 魏斌, 张利. 工装夹具在生产实践中的应用设计与分析 [J]. 中国战略新兴产业, 2017, (24): 117.