

# 某超长条结构件柔性工装平台结构设计与实现

王新乡<sup>1</sup>, 胡国清<sup>2</sup>, 周海峰<sup>1</sup>

(1. 集美大学轮机工程学院, 福建 厦门 361021; 2. 华南理工大学机械与汽车工程学院, 广东 广州 510640)

**[摘要]** 针对某超长条结构件加工过程中由于使用传统工装夹具造成的工艺准备时间长、工装数量多、材料浪费严重等问题, 开展一种柔性工装平台的研究。该工装平台采用多个可旋转夹臂替代传统夹具进行夹持, 在工件外形变化时, 可通过更换夹臂长度、按压角度等保持良好夹持效果, 满足柔性工装的需求。对该工装平台结构进行设计, 对关键参数进行建模和校核, 通过样机对工装效果进行验证。结果表明, 该工装平台在加工相同工件的情况下, 可节省约3%的零件材料, 缩短310 min工艺准备时间, 同时由于该工装平台采用了新型柔性固持方案, 还提高了加工连续性, 避免由于工艺变化造成大量的夹具浪费, 为超长条结构件的加工提供了一种新的工装固持方案。

**[关键词]** 超长条结构件; 柔性工装平台; 计算机数控(CNC)机床; 柔性固持

**[中图分类号]** TH 165; TG 75

## Design and Implementation of a Flexible Tooling Platform for Extra-Long Strip Workpieces

WANG Xinxiang<sup>1</sup>, HU Guoqing<sup>2</sup>, ZHOU Haifeng<sup>1</sup>

(1. School of Marine Engineering, Jimei University, Xiamen 361021, China;

2. School of Automotive and Mechanical Engineering, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China)

**Abstract:** A flexible tooling platform was developed to address the problems of long process preparation times, high tooling quantities and material wastage caused by the traditional tooling process during the machining of extra-long strip workpieces. The tooling platform uses multiple rotatable clamping arms instead of traditional fixtures for clamping. When the shape of the workpiece changes, the clamping effect can be ensured by changing the length of the clamping arm, the pressing angle, etc. to meet the needs of flexible tooling. In this paper, the structure of the tooling platform was designed, the key parameters were modelled and checked, and the effect of the tooling was verified by a prototype machine. The results show that the tooling platform can save approximately 3% of the part material and shorten the process preparation time by 310 min for the same workpiece. At the same time, the use of the new flexible clamping technology also improved machining continuity and avoided a lot of fixture waste due to process variations, which provides a new way of tooling clamping for the machining of extra-long strip workpieces.

**Keywords:** extra-long strip workpieces; flexible tooling platform; computer numerical control(CNC) machine tools; flexible retention

**[收稿日期]** 2023-02-24

**[基金项目]** 福建省自然科学基金项目“基于传感器网络的海上风机叶片失效及被动检测机理研究”(2019J01704)

**[作者简介]** 王新乡(1974—), 讲师, 从事电气控制及自动化方面的研究。

0 引言

在飞机、汽车、船舶等大型设备制造过程中, 有一类结构件的宽度一般在 100 ~ 300 mm 之间、长度在 2 000 mm 以上, 具有超长条的结构特点, 通常为大型设备的梁、肋构件。这类构件体积庞大, 加工时需要大量夹具进行支撑和定位<sup>[1]</sup>, 但由于此类构件结构细长, 夹具使用量大, 故不适合多指夹具、自牺牲式夹具等柔性固持方案<sup>[2-7]</sup>。而近年针对壁板、蒙皮、舱门等大型结构件开展的多种夹持方案, 例如 Lee 等<sup>[8]</sup>提出的带多固定托盘的夹持系统方案, Pan 等<sup>[9]</sup>提出的基于薄板理论的夹具定位设计方法, 由于这类构件在宽度方向没有足够的夹持空间也不适用。

多年来, 此类结构件数控加工一直沿用的固持技术需要在构件四周预留出工艺凸台, 压板、螺钉、支撑等就夹持在这些工艺凸台上, 待产品加工完成后, 再切除四周工艺凸台, 得到成品<sup>[10]</sup>。这样的固持方案弊病较多, 主要有: 1) 每个工艺凸台都需要夹具夹持, 故工装数量多, 工艺准备时间长, 加工连续性差; 2) 夹持使用的工艺凸台与加工工件为一体, 材料相同, 加工完毕后, 这些工艺凸台需全部切除, 造成大量工件材料被浪费; 3) 该固持方案不可重构扩展。因此, 每隔 3 ~ 4 a, 这些夹具中的 50% ~ 80% 就会由于工艺变化等原因被更换, 而更换时的磨损量仅有 10% ~ 20%<sup>[11]</sup>, 造成大量夹具的浪费。

柔性工装是指工件的形状和尺寸发生一定变化后, 设备还能适应这种变化并继续使用的一类工装方式。近些年, 柔性工装方式凭借其高度灵活性、可重建可扩展等特点逐渐成为主流<sup>[12]</sup>。考虑到此类结构件的体量和工装数量, 本文将针对此类超长条的结构件, 设计一种新型的柔性工装平台以期能产出较高的经济价值。

1 超长条结构件柔性工装平台设计方案

目前国内和国际上针对柔性夹具的研究多针对小型结构件, 以及壁板、蒙皮、舱门等大体量、异形结构件<sup>[10-18]</sup>, 由于之前所述原因, 这类研究并不适合用于此类超长条结构件柔性工装平台的设计。经分析比较, 对原工装夹持方式进行改进, 新工装平台设计方案如图 1 所示。方案包括: 1) 取消工艺凸台, 夹具的夹持位置由夹持在工艺凸台上更改为直接夹持在工件上。2) 将固定夹具更换为可旋转夹具, 该旋转夹具可在主轴接近时自动旋转避让至安全位置 (图 1 中显示了一干涉区域内的夹具正旋转至安全区域以避让主轴); 主轴离开后重新压紧工件, 以免主轴和夹具相互碰撞。3) 将加工平台和夹具系统整合在一起, 成为完整的自动化工装平台, 工装平台在数控机床上安装固定后, 工件直接吊装至工装平台进行加工; 加工期间, 各旋转夹具在工装平台控制系统的作用下自动夹持锁死工件和避让主轴。4) 每个旋转夹具的长度、角度均可调, 可根据工件形状调整至合适的按压位置, 适配设计尺寸内的所有工件, 起到柔性工装的目的。

本设计方案中旋转夹具的主体采用 Festo CLR 系列旋摆气缸。该型号气缸活塞杆伸缩时可带动夹臂在完成直线运动的同时进行 90° 旋转, 适用于各种类型的夹紧动作, 理论夹紧力最高可达 1 600 N<sup>[19]</sup>。图 2 和图 3 分别显示了该气缸活塞杆缩回和伸出时夹臂及缸体内部的状态。因此, 活塞杆缩回时, 夹臂压紧工件; 活塞杆伸出时, 夹臂处于安全位置, 可以避让主轴。每个旋摆气缸夹臂受系统控制均可单独完成“压紧工件”和“避让主轴”的动作。气缸夹臂尺寸不同, 按需更换, 装夹角度也可随时调整, 因此无论工件表面形状如何, 夹臂可以避开不平整的工件表面, 确保有效按压, 起到柔性夹持效果。气缸夹臂避让主轴后, 重新夹持工件时, 可能夹持在加工切屑上, 影响夹持和加工效果。故每个夹臂压头 (见图 3) 底部都设计了一个吹气孔。在夹臂夹持工

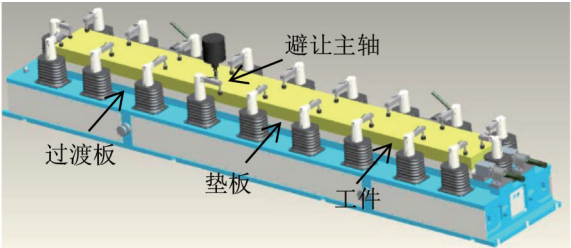


图 1 柔性工装平台设计方案  
Fig.1 Design scheme of the flexible tooling platform

件前，吹气孔释放高压气体吹走下方切屑。吹气由吹气控制阀控制，与旋摆气缸使用不同气源，以确保旋摆气缸工作时的压力稳定。图 3 的压头尺寸和形状亦可改变，以适应精加工需要。

在以上设计方案中，工装平台的控制系统必须能得到主轴实时位置，才能控制各夹具及时避让主轴或压紧工件。为此，可在工装平台上设置“对刀点”，工装平台和 CNC 机床都以“对刀点”为原点建立坐标系，两方控制系统使用的坐标系相同，只要读取 CNC 机床的主轴坐标就可得到工装平台上主轴的实时位置。系统控制框图如图 4 所示，工装平台下位 PC 机通过 Ethernet 读取 CNC 机床上位 PC 机中主轴的实时坐标。由于工装平台中各旋转夹具的旋转中心坐标、摆臂长度、旋摆用时等数据均可在加工前得到，工装平台下位 PC 机通过这些参数判断出主轴是否进入某个旋转夹具的干涉区域，并将相应夹具“避让”命令传送给工装平台可编程逻辑控制器（programmable logic controller, PLC）主机，PLC 主机立即控制相应夹具进行旋摆避让。同理，一旦主轴离开旋转夹具干涉区域，则立即控制相应夹具“压紧工件”。

为确保加工时 CNC 机床坐标系与工装平台坐标系完全一致，平台底部对角线方向各设一工艺孔，如图 5a 所示。以“直角边预定位，工艺孔定位”的方式，确保机架与机床平行；同时机架两侧分别设主、次定位销，主定位销为气动销（如图 5b 所示），次定位销为插销，工件吊装完毕后，气动销上升且自动涨紧固定住工件，确保工件在加工过程中坐标不变。机架端部两“对刀点”位置如图 5c 所示，加工前，CNC 机床就以此为基准点进行对刀并建立坐标系。考虑到翻面加工情况，两对刀点相对机架严格对称。

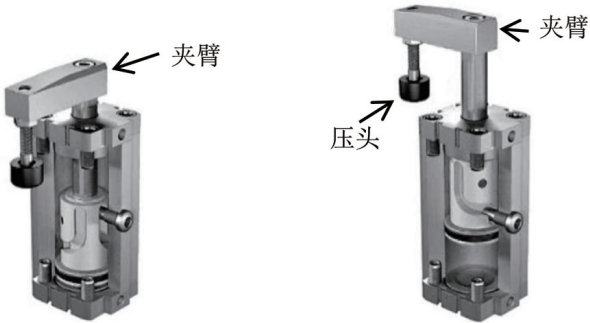


图 2 活塞杆缩回

图 3 活塞杆伸出

Fig.2 Retraction of piston rod

Fig.3 Extension of piston rod

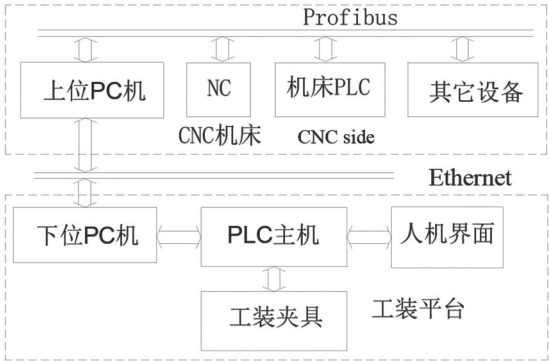
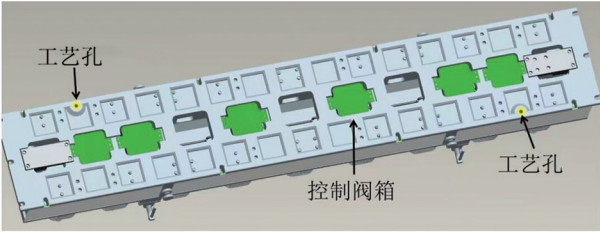
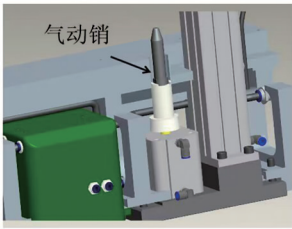


图 4 系统控制框图

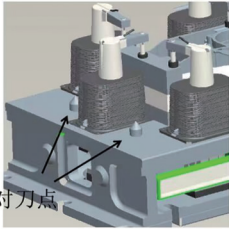
Fig.4 The structural framework of control system



a) 工艺孔



b) 气动销



c) 对刀点

图 5 平台结构细节

Fig.5 Details of the platform structure

## 2 工装平台关键参数的设计和计算

### 2.1 设计依据

工装平台参数设计所依托的 CNC 机床为 V2 2500B 数控龙门铣床，采用直柄立铣刀，直径为 20 mm，3 齿，每齿进给量为 0.1 mm，加工深度为 3~4 mm，宽度为 10 mm，转速为 20 000 r/min，速度 < 2.4 m/min。

2.2 平台主体结构参数的确定

根据超长条结构件的尺寸特点, 本工装平台整体尺寸设计为 3 260 mm×610 mm×460 mm, 结构主体采用高强度铸件, 紧凑型设计。如图 1 所示, 平台底面通过定位键和 T 型螺栓与机床固定, 上表面为基础平面(过渡板), 垫板材质与待加工件材质相同, 若因让刀下陷等工艺因素造成垫板受损, 可拆卸更换。平台中部放置工件。旋摆气缸共 20 个, 机台平面开孔, 旋摆气缸被内置安装于机台下平面, 气缸缸径为 63 mm, 行程为 75 mm, 缸体总长度为 274.5 mm。相比将气缸直接安装在平台上, 平台高度可从 661 mm 降低到 460 mm, 过渡板厚度减小, 系统重量将大大减轻。各旋摆气缸横向间距为 300 mm, 沿平台四周均匀分布; 为避免数控加工时切屑液、切屑对气缸的侵蚀, 气缸外部用波纹管封罩。

2.3 旋摆气缸工作压力的确定

根据用户提供经验公式

$$\begin{cases} F = C_p a_p^{0.86} f_z^{0.72} D^{-0.86} B z K_p, \\ K_p = \left( \frac{\sigma_b}{736} \right)^{0.8} \end{cases} \tag{1}$$

计算切削力。其中:  $C_p$  为高速钢铣刀铣削时, 考虑工件材料及铣刀类型的系数, 此处为 669;  $a_p$  为铣削深度 (mm);  $f_z$  为每齿进给量 (mm);  $D$  为铣刀直径 (mm);  $B$  为铣削宽度 (mm), 指平行于铣刀轴线方向测得的切削层尺寸;  $z$  为铣刀齿数;  $K_p$  为高速钢铣削时, 考虑工件材料机械性能不同的修正系数;  $\sigma_b$  为材料抗拉强度, 此处为 650 MPa。将龙门铣床各参数:  $a_p=4$ ;  $f_z=0.1$ ;  $D=20$ ;  $B=10$ ;  $z=3$  代入式 (1) 中, 可计算得出切削力  $F$  为 872.7 N。再根据公式

$$W_k = \frac{K \cdot F}{\mu_1 + \mu_2} \tag{2}$$

计算夹紧力。其中:  $W_k$  为夹紧力(N);  $\mu_1$  为夹紧元件与工件间的摩擦系数, 此处取 0.17;  $\mu_2$  为工件与夹具支撑面间的摩擦系数, 此处取 0.17;  $K$  为安全系数, 此处取 2.75;  $F$  为切削力(N)。由式 (2) 可计算出  $W_k$  为 7 058.8 N。

按两个旋摆气缸同时避让主轴, 仅剩 18 个旋摆气缸处于夹紧状态的极限情况, 可求出这 18 个气缸的平均夹紧力大约为 393 N。经实验测试, 旋摆气缸在不同气体压力状态下的夹紧力如表 1 所示。考虑到现场气源情况, 最终将旋摆气缸工作压力确定在 0.24 ~ 0.4 MPa 之间。

表 1 不同气体压力下的气缸夹紧力

Tab.1 Cylinder clamping forces for different gas pressures

气体压力/MPa	夹紧力/N
0.60	1 386
0.50	825
0.40	660
0.24	393

2.4 夹臂最长长度(两受力点的中心距)及可加工零件范围的计算

由官网可查询到 CLR-63-20 旋摆气缸的允许弯矩为 107 N·m<sup>[19]</sup>。如表 1 所示, 在保证最高使用压力不超过 0.4 MPa 的前提下, 气缸夹紧力不超过 660 N, 故夹臂最长长度  $L \leq$  允许弯矩  $M$ /夹紧力  $W_k = 107(N \cdot m)/660(N) \approx 162$  mm。

由于工装平台相对气缸的夹臂旋转中心距离为 410 mm, 过渡板宽度为 250 mm, 故综合考虑安全性及余量后, 可加工零件宽度范围可确定为 130 ~ 250 mm。结合平台设计尺寸, 最大可加工零件范围最终确定为 2 800 mm×250 mm×70 mm。

2.5 加工形变应力校验

校验前提: 铝合金加工件固定在基座上, 加工最薄处为 1 ~ 5 mm 的铝合金工件, 压紧部件为接触面可变的丝杆, 截面最小直径为 10 mm。

由于旋摆气缸和铝合金垫板同时安装在基座上, 加工件与垫板间接合紧密, 旋摆气缸作用在铝合金部件上的压紧点正投影下方有基座作为平面支撑, 没有悬空。在此情况下发生应变的压力与加工件



和垫板的厚度都没有关系，工装平台加工时产生的形变可以看成金属板轴向压缩时的变形问题。根据应力与正压力关系公式

$$F_n = \frac{\sigma \pi D^2}{4}$$

(3)

计算应力。其中： $F_n$  为铝合金发生形变时的应力（N）； $\sigma$  为铝合金的屈服强度（MPa），此处为 30.0 MPa； $D$  为压紧部件最小接触面直径（mm）。将压紧部件最小接触直径  $D=10\text{ mm}$ ，代入式（3），可计算出铝合金加工件发生形变时的应力为 2 356.194 3 N。由表 1 可知，旋摆气缸工作于最大工作压力时的压紧力仅为 660 N，即使在 0.6 MPa 压力下，压紧力也仅有 1 386 N，不会对工件造成压伤。

2.6 气动系统响应时间分析

从工装平台系统 PLC 输出“旋摆避让”控制信号，到旋摆气缸真正完成“旋摆避让”的控制动作，系统具有一定滞后性，即存在响应延时。对此，常规控制算法是：将夹臂旋转轴作为圆心，夹臂长度加主轴半径乘以一定安全系数形成实际干涉半径  $R_d$ ，将旋摆气缸响应延迟时间内主轴的运动距离  $L_s$  也计入干涉半径，形成夹臂干涉区域，如图 6 所示。一旦主轴进入干涉区域，系统就发出“旋摆避让”信号。精确控制算法是：工装平台系统 PC 机从 CNC 机床得到主轴的实时坐标数据后，结合主轴接下来的运动轨迹对主轴多久后进入旋摆气缸摆臂干涉区域进行预判，形成夹臂是否旋摆避让主轴的意见。

两种算法中，常规算法控制简单，但容易造成夹臂不必要的避让动作。图 6 的主轴运动轨迹，如采用常规算法，则夹臂在主轴到达 A 点开始避让，离开 B 点回位，到达 C 点时再次执行避让；若采用精确算法，从主轴进入实际干涉区域临界点 E 算起，主轴可一直运动到距离 E 点  $L_s$  路程的 D 点时，夹臂才执行避让，大大增加了夹臂的夹持时间。但无论采用何种算法，都需要计算旋摆气缸响应延迟时间内主轴的运动距离  $L_s$ ，需要探究旋摆气缸不同运动状态下的动作响应时间。

由于 Festo CLR-63-75 是定制气缸，缺少相关技术参数，由官网 CLR-63-20 旋摆气缸的转动惯量—动作时间关系来看<sup>[19]</sup>，转动惯量从  $18\text{ kg}\cdot\text{cm}^2$  增加到  $53\text{ kg}\cdot\text{cm}^2$ ，动作时间增加了近 0.5 s，显示负载转动惯量可能对气缸动作时间影响较大。同时考虑到气缸动作可能影响气源压力，因此分别对不同气源压力以及不同转动惯量下气缸的响应速度进行测试。通过编写 PLC 程序，不断向旋摆气缸发出旋摆指令，让旋摆气缸在 1 min 时间内不间断地持续进行“旋摆避让”和“压紧工件”动作，最后统计 1 min 内气缸完成动作的次数，计算出气缸完成一个“旋摆避让”和一个“压紧工件”动作的平均响应时间。PLC 控制测试流程图如图 7 所示。实验分 2 种情况进行：1）让旋摆气缸负载保持不变，改变气路压力，测得不同气路压力下的气缸动作时间，结果表明，气路压力从 0.2

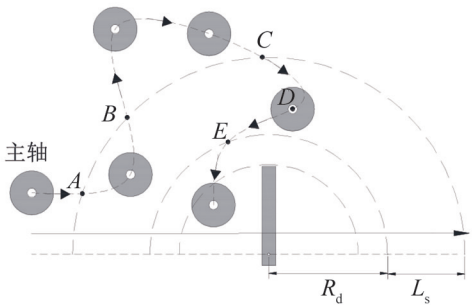


图 6 不同控制算法对夹臂运动影响  
Fig.6 Influence of different control algorithms on clamping arm movements



图 7 测试流程图  
Fig.7 The flow chart of the test

MPa 增加到 0.5 MPa, 气缸动作往返时间没有变化, 而本工装平台系统正常工作时的气路压力范围为 0.24 ~ 0.4 MPa, 因此, 可以认为气压波动对气缸的动作响应时间几乎没有影响; 2) 让气路压力保持不变, 更换旋摆气缸的负载, 以改变气缸总转动惯量, 测得不同转动惯量下的气缸动作时间, 结果如表 2 所示。

从表 2 可以看出, 对于 CLR-63-75 旋摆气缸, 当测试总转动惯量从  $7.76\text{ kg}\cdot\text{cm}^2$  增加到  $82.17\text{ kg}\cdot\text{cm}^2$  时, 往返动作时间相差不到 8%, 显示不同转动惯量对气缸动作时间的影响并非设想那样大。经测算, 实际加工时的总转动惯量在  $31.9\sim58.48\text{ kg}\cdot\text{cm}^2$  之间, 即往返动作时间差在 3% 内, 故实际控制时可忽略气缸转动惯量影响, 取实际加工时的最大气缸响应时间计算干涉半径。由于实际加工时最大转动惯量对应的气缸往返动作时间为 1.153 8 s, 气缸往返动作时间相同, 故气缸响应时间最终认定为 0.576 9 s。

### 3 柔性工装平台与常规平台现场加工测试对比

根据本设计完成的柔性工装平台实物如图 8 所示。实际加工证明, 当加工  $2\,800\text{ mm}\times210\text{ mm}\times50\text{ mm}$  的零件时, 常规平台所需材料宽度为 270 mm, 而柔性工装平台仅需 210 mm。因柔性工装平台无需工艺凸台, 以每个工艺凸台材料体积  $30\text{ mm}\times30\text{ mm}\times50\text{ mm}$  计算, 可以节省约  $600\text{ mm}\times30\text{ mm}\times50\text{ mm}$  体积约 3% 的零件材料, 整体加工时间还可缩短 310 min 以上, 两种工装平台各环节用时对比如表 3 所示。若加工件外形变化, 柔性工装平台也只需更换合适尺寸的夹臂和压头, 并适当调整夹臂装夹角度, 即可确保有效按压。为确保安全运行, 建议实际加工运行前, 给 CNC 机床加装软刀头, 模拟运行通过后再进行正式加工。

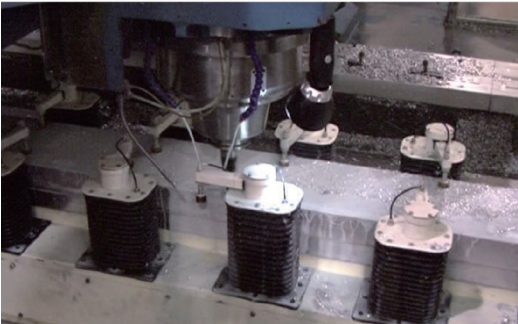


图 8 柔性工装平台  
Fig.8 Flexible tooling platform

### 4 结论

对于结构宽度在 100 ~ 300 mm 之间、长度在 2 000 mm 以上这样一类超细长的结构件, 因其夹具数量较多, 进行自动化柔性工装改造能产生较大的经济收益, 但其超细长的特点不适合套用小型件或普通大型件的工装方式。本文设计的柔性工装平台, 将这类结构件使用的固定夹具改为尺寸可调的智能夹具, 同时改变夹持方式、夹持位置, 将加工平台和夹具系统整合在一起配合控制系统, 成为完整

表 2 不同转动惯量与气缸动作时间关系  
Tab.2 Relation between different moment of inertia and cylinder action time

负载	自身转动惯量/ ( $\text{kg}\cdot\text{cm}^2$ )	负载转动惯量/ ( $\text{kg}\cdot\text{cm}^2$ )	总转动惯量/ ( $\text{kg}\cdot\text{cm}^2$ )	气缸 1 min 动作次数 /次	气缸往返动作时间 /s
1	7.76	0	7.76	54	1.111 1
2	7.76	29.89	37.65	53	1.132 0
3	7.76	50.72	58.48	52	1.153 8
4	7.76	65.32	73.08	51	1.176 5
5	7.76	74.41	82.17	50	1.200 0

表 3 柔性工装平台与常规工装平台加工各环节用时对比  
Tab.3 Comparison of time spent on the flexible and conventional tooling platforms

项目	柔性工装平台用时/min	常规工装平台用时/min
加工 20 个工艺孔	0	$\geq200$
工件吊装	相同	相同
工件定位和装夹	$\leq0.5$	$\geq15$
工件加工	相同	相同
夹具拆卸	$\leq0.5$	$\geq10$
移除工艺凸台	0	$\geq25$
钳工打磨	0	$\geq60$
合计	$\leq1$	$\geq310$

的自动化工装平台,达到工件改变平台不变的柔性工装效果。本平台的设计能够为其他一些采用类似加工固持方式的超长条结构件的工装升级改造提供一些借鉴和思路。

## [ 参 考 文 献 ]

- [1]董云龙,李翔飞,刘行,等. 航空航天领域机器人化智能装配技术综述[J]. 人工智能,2022(3):6-20.
- [2]余建军,任治军,王辉. 先进焊接工装夹具及其在机械装备制造业中的应用[J]. 机床与液压,2011,39(12):115-121.
- [3]DING G Z,WANG Y F,YUAN S M,et al. Research on rapid and accurate fixture design for non-intervention machining of complex parts[J]. Metals,2022,12(7):1174.
- [4]陈思涛,温良,李国华. 柔性高效装夹技术的研究与应用[J]. 制造技术与机床,2017(4):138-141.
- [5]IVANOV V,BOTKO F,DEHTIAROV I,et al. Development of flexible fixtures with incomplete locating:connecting rods machining case study[J]. Machines,2022,10(7):493.
- [6]于兰萍,周涛. 工装设计优化技术的现状及发展趋势[J]. 导航与控制,2016,15(2):18-23.
- [7]张玉叶,张靖. 夹具定位原理在机械产品设计中的应用[J]. 现代制造技术与装备. 2023,59(1):183-185.
- [8]LEE D K,SHIN J H,LEE D H. Operations scheduling for an advanced flexible manufacturing system with multi-fixturing pallets[J]. Computers & Industrial Engineering,2020,144:106496.
- [9]PAN Z M,LIU Y,SUN Z C,et al. Fixture design in flexible tooling of aircraft panel based on thin plate theory[J]. Mathematical Problems in Engineering,2022,2022(1):6602155.
- [10]王新乡,胡国清,周海峰. 大型 CNC 机床柔性随行夹具的开发与实现[J]. 集美大学学报(自然科学版),2021,26(3):253-258.
- [11]李茂鹏,刘智. 现代工业制造中工装夹具的设计发展分析[J]. 新型工业化,2022,12(2):143-144,148.
- [12]LI H,CHEN W F,SHI S J. Design and application of flexible fixture[J]. Procedia,2016,56:528-532.
- [13]FRITZSCHE R,VOIGT E,SCHAFFRATH R,et al. Automated design of product-flexible car body fixtures with software-supported part alignment using particle swarm optimization[J]. Procedia CIRP,2020,88:157-162.
- [14]MENG S,ZHENG L Y,FAN W,et al. Intelligent layout optimization of reconfigurable flexible flxture for assembling multiple aircraft panels[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology,2023,126(3/4):1261-1278.
- [15]DO M D,SON Y H,CHOI H J. Optimal workpiece positioning in flexible fixtures for thin-walled components[J]. Computer-Aided Design,2018,95:14-23.
- [16]YANG B,WANG Z Q,YANG Y,et al. Multi-objective optimization of fixture locating layout for sheet metal part using kriging and moba[J]. Procedia CIRP,2022,112:418-423.
- [17]LI C,WANG Z Q,TONG H,et al. Optimization of the number and positions of fixture locators for curved thin-walled parts by whale optimization algorithm[J]. Journal of Physics:Conference Series,2022,2174(1):012013.
- [18]MA J J,ZHANG D H,WU B H,et al. Vibration suppression of thin-walled workpiece machining considering external damping properties based on magnetorheological fluids flexible fixture[J]. Chinese Journal of Aeronautics,2016,29(4):1074-1083.
- [19]费斯托公司. 直线/回转式夹紧气缸 CLR[EB/OL]. [2022-10-24]. [https://www.festo.com.cn/media/catalog/209853\\_documentation.pdf](https://www.festo.com.cn/media/catalog/209853_documentation.pdf)

(责任编辑 彭海滨 英文审校 郑青榕)