

# 用于飞机蒙皮成形的可重构多点柔性工装设计

申 望, 薛贵军, 邹 方, 张书生

(中航工业北京航空制造工程研究所, 北京 100024)

[摘要] 针对飞机蒙皮等大型薄壁板类零件的外形复杂、曲率变化大、刚度低等特点, 设计了可重构多点柔性工装, 该柔性工装通过其精确定位和保形功能, 可用于蒙皮镜像铣切、蒙皮零件的数控切边等, 应用范围十分广泛。

关键词: 柔性; 可重构; 点阵式; 定位器

DOI: 10.16080/j.issn1671-833x.2016.12.062



申 望  
工程师(机械设计)。研究方向为  
数字化技术柔性装配。

飞机蒙皮是机翼和机身的重要组成部分, 直接构成飞机的整体气动外形, 要求外形准确、流线光滑和表面无缺陷等, 其具有品种多、外形复杂、批量小的特点。因此, 蒙皮零件的制造水平和产品质量直接影响着飞机的气动外形和使用寿命, 已经成为衡量一个国家飞机制造能力的重

要标志之一。

在传统的生产模式中, 蒙皮的生产制造均采用固定实体模具, 每块蒙皮在生产过程中均需要专用模具, 而且这些固定实体模具尺寸规格大, 制造周期长, 存放占用场地大, 利用率低, 飞机外形设计一旦有微小改动, 就要重新制作模具。因此要耗费大量的工时, 使整个零件的研制周期延长。

随着数字化制造技术的发展及其在航空企业中越来越广泛的应用, 数字化制造技术为提高新一代飞机产品质量, 缩短研制周期起到了不可估量的作用。可重构柔性多点技术便是其中之一, 它是利用计算机控制有限的按一定规则排列的可调整的基本体形成所需要的成形曲面, 从而替代传统的实体模具实现钣金件生产制造的一种柔性加工技术, 特别适合蒙皮零件大尺寸、小曲率的特点, 为解决蒙皮制造的突出问题提供了有效途径, 是欧美飞机制造业重点发展和应用的前沿技术。图 1 为美国沃克公司加工蒙皮时应用的工装<sup>[1]</sup>。相比而言, 我国在蒙皮数控切边及柔性工装的研发应用方面比较落后, 目

前仍以传统生产模式即固定工装为主, 而且由于飞机蒙皮等零部件外形结构复杂, 局部曲率变化率大, 为满足飞机结构所设计的固定工装往往结构复杂, 制造成本高, 用途单一, 一个工装只能用于一个机型, 因此国内迫切需要发展先进的蒙皮制造技术与装备, 并掌握蒙皮数字化制造技术<sup>[2-3]</sup>。

本文针对某飞机型号壁板类零件激光精密焊接加工的需求, 研制一套激光精密焊接柔性工装代替固定

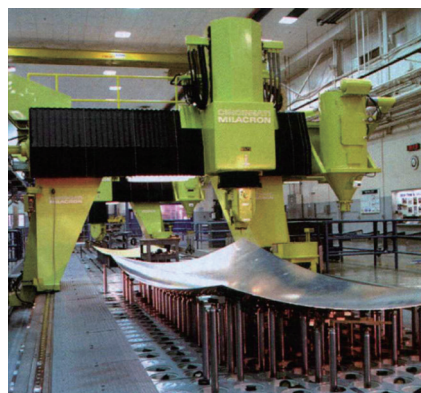


图1 美国沃克公司加工蒙皮时应用的  
柔性工装

Fig.1 Using flexible tooling machining skin  
by US Walker company

工装对零件进行支撑夹持,并与大型桥式激光焊接设备配套使用,在焊接时保证零件状态的稳定性。

## 柔性工装概述

### 1 柔性工装的基本原理

柔性工装是结合了计算机技术在内的一种集成的、数字化工装技术,是一种结合软、硬件的一个综合系统。从硬件上来看,柔性工装包含有多个位置可调的定位夹紧单元;从软件上来看,柔性工装包含一个控制软件,用于控制工装的定位单元进行位置调整。二者缺一不可,并且相辅相成,在二者的共同作用下,完成工装的位置调整,做好夹持工件的准备。

### 2 柔性工装的分类

根据定位单元的移动特点,柔性工装有两种结构形式。

结构一:基于三坐标定位器的柔性工装(图2),该柔性工装由分离式床身、移动箱体、定位器等部件组成,机构的每个定位器在系统的自动控制下可以实现X、Y、Z 3个方向的伺服移动。X向的运动是移动箱体在分离式导轨上移动来实现的;Y向移动是定位器与箱体的相对运动来实现的。系统由许多个定位器组成,形成一定大小的矩形方阵。每个点都可以实现X、Y、Z 3个方向的伺服移动,定位器顶端的吸盘万向(球面)摆角范围45°。结构二:基于插拔式的柔性工装(图3)。该柔性工装采用固定式结构,设备以床身为基座,多个定位器固定在床身连接机构

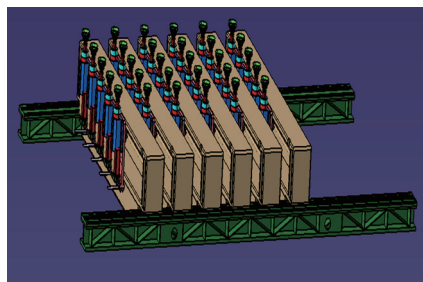


图2 基于三坐标定位器的柔性工装  
Fig.2 Flexible tooling based on three-coordinate positioner

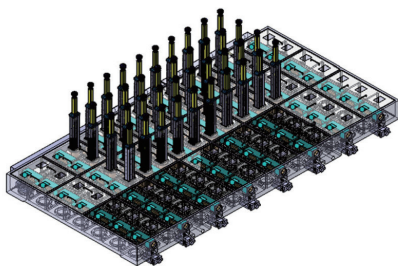


图3 基于插拔式固定点阵的柔性工装  
Fig.3 Flexible tooling based on pluggable fixed lattice

上,由此可以组成不同组合的方阵,每个定位器通过伺服控制可以实现Z向的移动。结构一和结构二的优缺点如表1所示。

## 柔性工装的设计方案

### 1 柔性工装总体设计

为满足工装整体吊装,拆装方便,可重构性强等需求,利用静态固

定框架与柔性多点支撑单元相结合的方式,实现蒙皮壁板类零件的定位夹持和固定,并与铣削设备配合使用,使工装具备柔性化。在考虑总体方案时,工装底座由多个相同大小的小尺寸的底座单元拼装而成(图4),底座单元上设计有连接固定机构,用于立柱夹紧单元的固定,由此可以组成不同组合的方阵,每个立柱夹持单元通过伺服控制可以实现纵向移动。立柱夹持单元作为一个模块机构,可以和工装底座连接机构上的其他立柱互换并在工装底座任一槽内拆装,可重构性强。其中X方向立柱间距300mm, Y向立柱间距340mm, Z向最大行程200mm。

### 2 柔性工装底座设计

该柔性工装的底座由多个相同大小的小尺寸底座单元拼装而成。

表1 两种柔性工装的比较

结构形式	优点	缺点
结构一	(1) 每个定位器都能实现三坐标移动,可以定位不同的加工外形型面 (2) 采用分离式床身结构,总体重量可大大减轻	由于采用分离式床身,拆卸不方便,安全性不好
结构二	(1) 系统扩展性强,可以任意增加、减少立柱个数 (2) 立柱与立柱均可以实现互换 (3) 整体式床身结构,设备的结构稳定,可以整体吊装 (4) 单轴驱动,便于控制	设备单轴驱动,使得工作范围有一定的限制

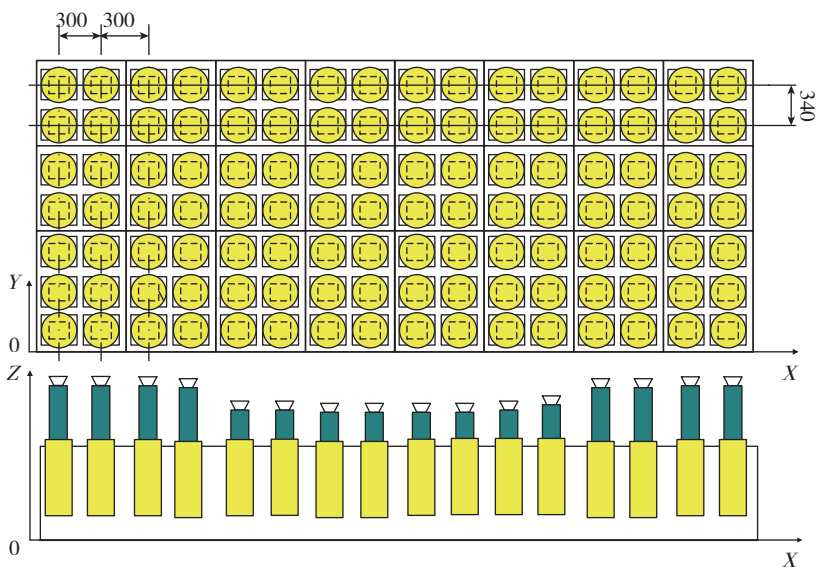


图4 柔性工装总体结构示意图  
Fig.4 Schematic diagram of flexible tooling's overall structure

底座单元上设计有连接固定机构,用于立柱夹紧单元的固定,根据可固定立柱单元的数量,底座单元有两种形式,一种可固定4组立柱;一种可固定6组立柱。这种拼装方式可以根据所夹持工件的尺寸方便地改变底座大小,此外还可以任意增加或减少立柱个数。

底座内部的侧壁都开有凹槽,每两个相邻的槽之间放有走线槽,使安装在槽中的立柱单元之间实现内部走线,线的另一端置于外走线槽内。通过内走线槽,逐级分线,完成电气布线功能。这样既使得柔性工装整体看起来美观,又避免了由于线缆暴露在工装外表造成的加工过程中的干扰问题。

### 3 柔性工装定位夹持单元设计

柔性工装的定位夹持单元是一个能实现单向伸缩移动且定位精度高、吸附能力强、工作可靠的执行单元。定位夹持单元通过一空心圆柱筒与工装底座连接,分别连接定位器外壳法兰和工装底座法兰。该定位单元主要由电机、联轴器、轴承、丝杠螺母、丝杠、导轨、滑块、升缩柱、真空吸盘组成(图5)。考虑到其结构紧凑性,以及工作的安全性,本设计采用了单导轨双滑块驱动,并在Z向运动方向上分别设有限位开关和机械限位,Z向电机均带有抱闸制动,保证工装系统在突然断电时立柱的位置不会发生改变。Z向定位精度0.1mm,重复定位精度0.05mm。

在对蒙皮进行加工铣切时,要保证零件的加工精度与加工质量,不仅要保证精确的定位,还要保证在切削过程中零件可靠稳定的夹持,防止零件发生振动,造成零件的超差。因此要实现对工件的可靠夹持。本工装依靠安装在定位器顶端的真空吸盘来实现对工件的夹持功能。真空吸盘的详细结构主要由吸盘附件、吸盘底座、吸盘球腕、吸盘挡块、吸盘箍等组成(结构见图6)。该吸盘采用了

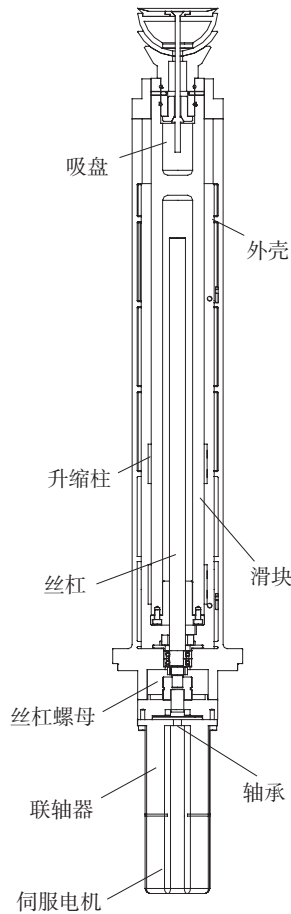


图5 夹持单元  
Fig.5 Clamping unit

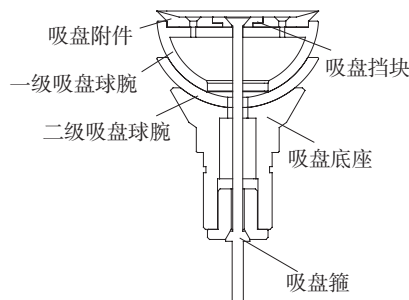


图6 真实吸盘结构  
Fig.6 Real structure of sucker

二级吸盘球腕,有两个旋转部分组成,加大了旋转角度。因此可以对一定曲率范围工件实现定位,自动适应不同的工件型面达到充分吸附。

### 4 柔性工装真空系统方案设计

柔性工装单元配备有专用真空系统,由每个吸盘立柱内部真空管路通到吸盘凹面。每个吸盘有单独真空控制开关。真空单元包括真空泵、方

向控制阀、真空表、真空传感器等。利用真空单元实现工件的固定或松开。

真空系统主要由正压气源和真空发生器组成,完成蒙皮零件的真空吸附夹持功能。使用过程中,由于零件的不同,所使用的升缩立柱数量也不同,并且要求每个升缩立柱都能独立完成真空吸附,同时不影响其他升缩柱的真空吸附,即每个升缩立柱都需要安装一个真空发生器。零件在加工完毕后需要进行拆卸,虽然此时已经不再继续产生吸力,但是吸盘此前产生的吸力不可能马上释放,必须对已有的吸力进行破坏,因此需要每个升缩立柱都具有吹气功能以释放由真空产生的吸力。

### 5 气动锁紧机构设计

当立柱上升到位,即机构调型完毕后,由于机械传动过程立柱上升高度大,容易引起弹性变形,并导致定位器的定位精度降低,因此要消除此变形。气动锁紧机构可以实现以上要求,它通过扩大定位夹紧区域,使立柱夹持单元上升到位在端口处通过压缩气体锁紧,减小立柱夹持单元的变形量(图7)。

### 6 柔性工装的控制系统设计

柔性工装系统控制工装定位,接收控制代码,经过运算输出控制信号,控制驱动单元的运动,同时接收测量反馈单元对运动单元的实际运动位置进行实测的位置实测值,对比分析后,计算出修正值,再次输出给驱动单元,实现误差补偿。

由于系统要控制的轴数目众多,采用常规的数控系统很难实现。因此采用了基于现场总线的多轴智能伺服驱动控制技术对整个夹持系统进行控制,主要包括工业显示电脑、多轴控制管理器、数字伺服驱动器、交流伺服电机、输入输出模块等,在外围还连接有各种输入输出开关等。其工作原理以智能数字伺服驱动器为终端对每个电机进行控制和进行I/O处理,同时通过基于现场总线组

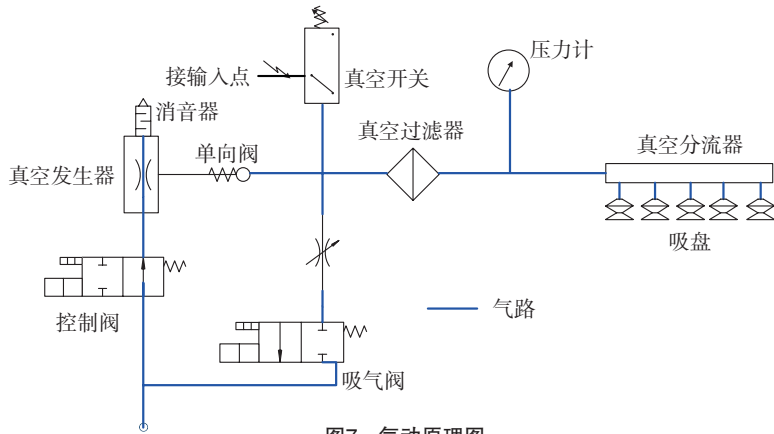


图7 气动原理图  
Fig.7 Pneumatic theory diagram

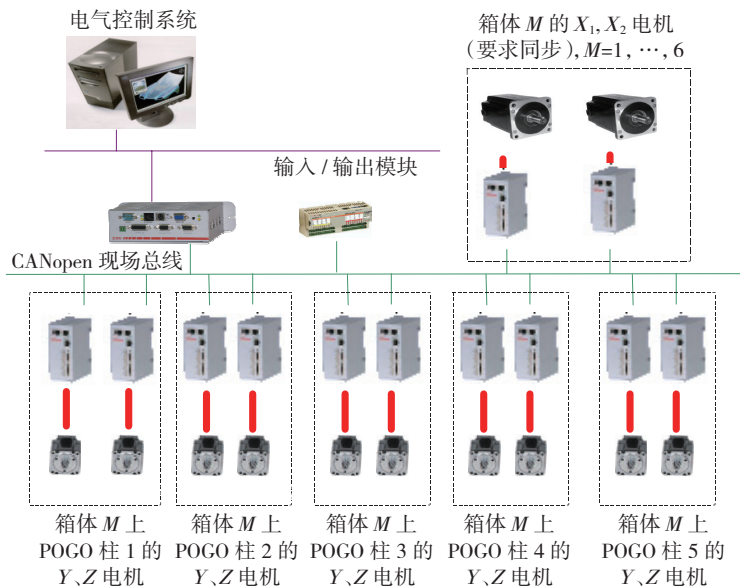


图8 电气控制原理示意图  
Fig.8 Schematic diagram of electrical control

成一个控制系统,整体由多轴管理器协调管理,并通过以太网与工业显示电脑或者手持单元通信实现人机交互,接收控制数据,实现所有夹持单元的快速准确定位。

柔性工装其中一排立柱单元的电气控制原理如图8所示。

### 结束语

综上所述,在设计可重构柔性工

装时应注意以下几点:

- (1) 根据飞机蒙皮尺寸定义柔性工装定位尺寸的范围;
- (2) 根据飞机蒙皮加工形式定义柔性工装定位点最大及最小可到达高度;
- (3) 根据飞机蒙皮曲率变化情况定义柔性工装的定位器数量。

柔性工装属于数字化柔性装配设备,与传统的蒙皮壁板支撑工装夹具有较大的区别,制造过程中以数字化形式进行数据传递,同时合理安排和使用人工经验在制造过程中发挥的作用,实现蒙皮、壁板类零件在切割、焊接过程中的精密可靠定位,最终实现蒙皮、壁板零件的精密装配。

### 参考文献

[1] 邹方. 柔性工装关键技术与发展前景[J]. 航空制造技术, 2009(10): 34-38.  
ZOU Fang. Key technology of flexible fixture and its development future[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2009(10):34-38.

[2] 周凯. 飞行器大型薄壁件制造的柔性工装技术[J]. 航空制造技术, 2012(3):34-39.  
ZHOU Kai. Flexible tooling and fixture technology of large thin-wall part manufacturing for aircraft[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2012(3):34-39.

[3] 郭志敏, 蒋君侠, 柯映林. 一种精密三坐标设计与精度研究[J]. 浙江大学学报, 2009(9):1649-1654.  
GUO Zhimin, JIANG Junxia, KE Yinglin. Design and accuracy for POGO stick with three-axis[J]. Journal of Zhejiang University, 2009(9):1649-1654.

## Design of Reconfigurable Multi-Point Flexible Tooling for Forming of Aircraft Skin

SHEN Wang, XUE Guijun, ZOU Fang, ZHANG Shusheng

(AVIC Beijing Aeronautical Manufacturing Technology Research Institute, Beijing 100024, China)

**[ABSTRACT]** As for the character of the complicated shell, high curvature, low rigidity of aircraft skin, this paper designs a reconfigurable and flexible tooling, which is being widely used for aircraft skin mirror milling, aircraft skin CNC Trimming and so on, based on the function of the accurate positioning and the conformal.

**Keywords:** Flexible; Reconfiguration; Dot-Matrix; Positioner

(责编 大漠)