

曲面薄壁零件柔性装配定位系统设计与实现

Design and Realization of Flexible Assembly Positioning System for Thin-Wall Component

中航工业西安航空动力控制科技有限公司 翟婷婷 张凤英 韩晓光

[摘要] 针对曲面薄壁零件装配过程中存在定位难、易变形的问题进行了研究,建立了基于多点技术以及数字化虚拟装配技术的曲面薄壁零件柔性装配定位系统,实现了薄壁零件定位可靠、不易变形的柔性装配。研究提出了曲面定位点坐标的求解方法,并按照该方法提取工件曲面的几何信息,确定装配定位点,将定位点的坐标转化为定位系统的坐标,形成坐标转换矩阵,将转换矩阵中坐标的位移量转化为伺服电机的转动量。研究结果为更有效解决柔性工装的优化设计问题提供了必要依据。

关键词: 柔性夹具 薄壁零件 定位

[ABSTRACT] Aiming at the problem of difficult positioning, easy deformation in the assembly of thin-wall components, the thin-wall component flexible assembly positioning system based on multipoint technology and digital virtual technology is established. This study proposes the solution to positioning coordinate, and extractes the geometric information of workpiece surface, determines assembly positioning point, transforms positioning coordinate into coordinate positioning system, forms the coordinate transformation matrix, converts the displacement vector of coordinate transformation matrix into the amount of rotation of servo motor. The results provide the necessary basis for a more effective solution to the problem of optimal design of flexible tooling.

Keywords: Flexible fixture Thin-wall component Positioning

传统的薄壁零件装配工装多采用刚性结构,装配模式采用一个组件对应一个型架的一对一模式,因此需要设计、制造大量工装。又因薄壁零件具有结构尺寸大、外形复杂、种类繁多、制造精度要求高、易变形等特点,故在薄壁零件装配过程中大量采用了具有定位、夹紧功能的工艺装备或设备,以保证从零组件到部件装配过程中的精确几何外形^[1]。同时,随着越来越多新型零部件的出现,旧的装配工装已经不能满足装配要求。曲面薄

壁零件柔性装配定位难的问题已经成为国内外各大航空制造企业、科研院所研究的重点。

在国外研究中,柔性工装技术体现得相当明显,典型的有行列式柔性装配工装、多点阵成形真空吸附式柔性工装以及移动装配生产线工装等柔性工装系统^[2]。行列式高速柱阵柔性工装(图1)适用于翼梁以及壁板类零部件的装配,如波音737、727、777以及C-17等系列飞机翼梁和空客公司A340系列飞机机翼壁板的装配。

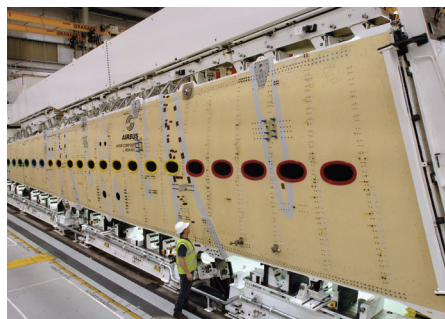


图1 机翼壁板柔性装配工装

Fig.1 Flexible assembly fixture of wing

1994~2001年,美国CAN制造系统公司研发了基于POGO柱单元的柔性工装系统(图2),该系统包括气动的POGO线性运动单元、控制器、末端真空吸盘以及软件和台式框架。2004年西班牙的MTorres公司研发了TORRESTOOL柔性工装系统(图3),该系统采用模块化支撑单元的设计理念,支撑单元由一组伺服系统控制的带真空吸盘的立柱阵列组成,沿三维空间3个坐标轴运动^[3]。

近年来,我国各大航空企业以及科研院校在引进国外先进理念和技术的同时,对工装结构设计方面的研究也在逐渐增多,尤其是关于柔性工装的研究^[4]。哈工大研制了自己的柔性工装系统;清华大学承担了国家自然科学基金项目和863计划项目:薄壁零件多点柔性智能工装系统的开发工作。

本文正是以如何实现曲面薄壁零件的柔性装配定位为出发点进行研究的。

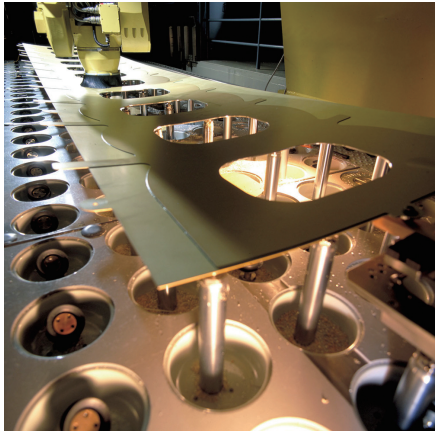


图2 CAN柔性夹具系统
Fig.2 CAN flexible fixture system

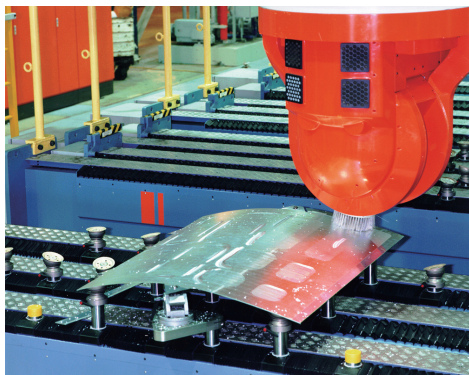


图3 TORRESTOOL柔性夹具
Fig.3 TORRESTOOL flexible fixture

1 总体设计思路

传统的针对刚性体的定位方法以及相应的工艺装备已不能满足易变形的弹性薄壁零件高精度装配,由此严重影响产品总装质量和效率。通过综合考虑和分析现有的工装结构,采用虚拟设计、虚拟装配技术,对设计的机械结构进行相应的分析,验证设计结构的合理性以及可行性。机械结构的设计采用CATIA V5软件设计平台实现。由于薄壁零件具有易变形的特点,所以在实现曲面薄壁零件的定位过程中,要解决曲面易变形的难题。为此,本文采用 3×5 的离散点阵来拟合薄壁零件定位面的三维空间型面,使工装系统的定位点阵完全贴合曲面薄壁零件的工艺点,使曲面薄壁零件实现准确、可靠的定位。在 3×5 的柔性定位点阵中,大致可以划分为4个模块,即 X 、 Y 、 Z 3个方向运动模块及其自适应定位头模块。

2 多点定位夹持机构机理研究及结构设计

2.1 多点定位夹持机构机理研究

曲面薄壁零件装配过程中的柔性定位,一般通过多

点阵真空吸盘式柔性工装或带工艺接头的柔性工装来实现。多点阵真空吸盘式柔性工装由一组带真空吸盘的立柱组成,每个立柱可由程序控制进行独立的三维移动,生成与装配件外形精确吻合的吸附点阵,能精确、牢固地夹持蒙皮或壁板等装配件,同时通过基准孔或边的精确定位实现整个装配件的精确定位。当产品外形发生变化时,柔性工装的吸附外形和布局可以进行相应的调整,从而适应不同产品的定位和夹持的需要,其技术原理如图4所示。

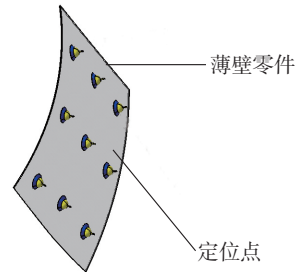


图4 多点定位原理
Fig.4 Multipoint positioning principle

2.2 多点定位夹持机构定位头结构设计

传统的曲面薄壁件定位通常采用型架卡板(靠模)的形式,在本文的研究中,提出了一种通过球面与自由曲面单面接触的方式来实现对薄壁件定位的结构,该结构由刚性定位球、等距分布的3个橡胶吸盘、吸盘基座组成。刚性定位球固定在支撑阵列的顶部,以保证定位精度。夹紧采用的3个真空吸盘可根据薄壁件的姿态和曲率变化情况绕刚性球头旋转,以达到定位头球心和接触点的连线与零件表面在接触点处的法向量重合的目标。在定位过程中,定位头球心与接触点的距离保持不变,使得定位头在三维空间中移动位置的计算过程简单、方便。同时,由于曲面薄壁件的结构尺寸比较大,加之等距分布的橡胶吸盘旋转倾斜角度可达 $\pm 45^\circ$,使得该结构可适用于大部分薄壁件的装配过程中。

3 系统的设计

3.1 曲面定位点坐标求解

对于曲面曲率不是很大的薄壁零件,薄壁零件的截面曲线方程可以用多段方程 $Z=AX^2+BX+C$ 来近似表示,此时可以通过联立圆与曲线的方程求解,得到所要的定位头球心坐标。

设半径为 r 的圆面与曲面多段方程 $Z=AX^2+BX+C$, $y=Y$ 相切,切点的坐标为 $P(X, Z)$,选择曲线的右半部分来求解。由图5中的几何关系可知:

$$\begin{cases} X = X_0 - r \sin \alpha \\ Z = Z_0 + r \cos \alpha \end{cases}, \quad (1)$$

式中, α 为切线与 X 轴的夹角, (X_0, Z_0) 为定位头球心

坐标。

因为：

$$\tan \alpha = 2AX + B \quad (2)$$

所以：

$$\sin \alpha = \frac{\tan \alpha}{\sqrt{1 + \tan^2 \alpha}} = \frac{2AX + B}{\sqrt{1 + (2AX + B)^2}}$$

$$\cos \alpha = \frac{1}{\sqrt{1 + \tan^2 \alpha}} = \frac{1}{\sqrt{1 + (2AX + B)^2}} \quad (3)$$

代入式(1)中,可以得到如下的计算式:

$$X = X_0 - \frac{r(2AX + B)}{\sqrt{1 + (2AX + B)^2}} \quad (4)$$

$$Z = Z_0 + \frac{r}{\sqrt{1 + (2AX + B)^2}} \quad (5)$$

对于给定的 X , 将 X 代入式(4)中, 可以求出

$$X_0 = X + \frac{r(2AX + B)}{\sqrt{1 + (2AX + B)^2}}$$

将 X 代入式(5)中, 则有:

$$Z_0 = AX^2 + BX + C - \frac{r}{\sqrt{1 + (2AX + B)^2}} \quad (6)$$

故定位头球心坐标为 (X_0, Y, Z_0) 。

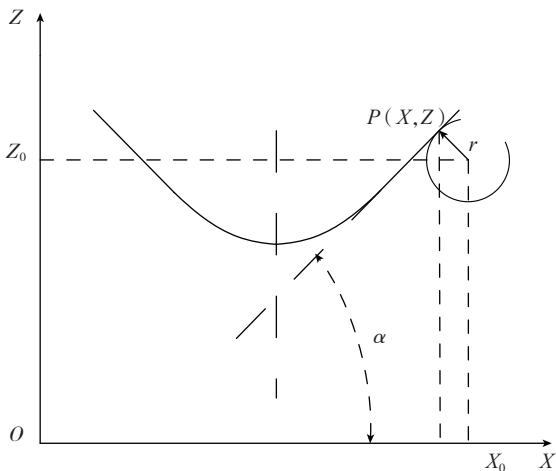


图5 球与曲面相切截面图

Fig.5 Cross-sectional tangent view of spherical and curved surfaces

3.2 坐标变换

3.2.1 坐标系建立

为了实现对柔性定位点的精确控制,需要建立工装系统的运动学模型。为更好地描述工装系统中各个运动副之间的相互运动关系。需要建立系统中各个运动副坐标系相对于工装系统原点坐标系的运动关系。建立如图6所示的定位工装系统坐标系。

(1)在工装系统的基体、Z向立柱单元以及定位头吸盘分别建立平行的全局坐标系 $O-XYZ$, 立柱单元坐标系 $O''-X''Y''Z''$ 以及连体坐标系 $O'-X'Y'Z'$;

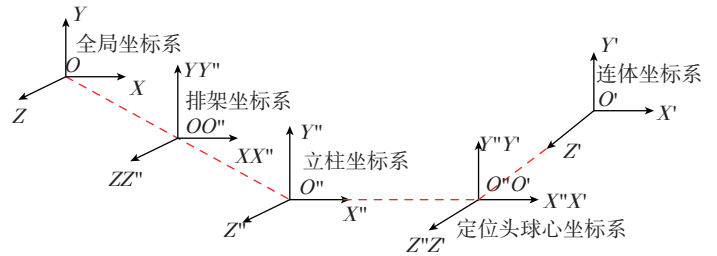


图6 工装系统坐标系

Fig.6 Tooling system coordinate

(2)在基体与立柱运动单元之间的连接体排架建立排架坐标系 $OO''-XX''YY''ZZ''$; 在Z向立柱运动单元与定位头吸盘之间建立一个构件坐标系 $O''O'-X''X'Y''Y'Z''Z'$ 。

3.2.2 转换矩阵

曲面薄壁零件在夹具系统中定位的数学定义可以定义为: 如果工装系统的坐标系用 $\Sigma(OXYZ)$ 表示, 薄壁零件自身的坐标系用 $\Sigma(OX^*Y^*Z^*)$ 表示, 薄壁零件在定位工装系统中的定位可以由 $\Sigma(OX^*Y^*Z^*)$ 在 $\Sigma(OXYZ)$ 中的位姿表述, 即存在一个确定的向量 T , 使得

$$\Sigma(OXYZ) = T \cdot \Sigma(OX^*Y^*Z^*) \quad (7)$$

其中, $T = (S_x, S_y, S_z, \theta_x, \theta_y, \theta_z)$, S_x, S_y, S_z 分别是薄壁零件坐标系的坐标原点相对于工装系统坐标系原点的位移量; $\theta_x, \theta_y, \theta_z$ 分别是工装系统坐标系按顺序沿 X, Y, Z 轴旋转形成薄壁零件自身坐标系所转过的角度。假设薄壁零件上第 i 个要定位的点在自身坐标系 $\Sigma(OX^*Y^*Z^*)$ 中的坐标是 $(X_i^*Y_i^*Z_i^*)$, 定位头的中心在自身坐标系 $\Sigma(OXYZ)$ 中对应的坐标是 (X_i, Y_i, Z_i) , 则一定有 $(X_i, Y_i, Z_i) = T \cdot (X_i^*Y_i^*Z_i^*)$, 定位的本质实际上就是把 T 中的 S_x, S_y, S_z 转换为伺服电机的转动量。

4 系统结构实现

系统的核心是通过计算机控制的矩阵式分布的柔性支撑柱列, 其系统结构主要由基体、导轨、滚珠丝杠、排架、真空系统以及伺服驱动单元等组成。

基体 Y 轴滑枕上装有条道轨, 作为排架沿 Y 向运动的导向结构。在排架上, 有可以沿 X 向滑动的 Z 轴立柱托板。系统中的所有传动部分都是由伺服电机来驱动, 导轨作支撑, 滚珠丝杠传递扭矩。由于 Z 向立柱在实现了定位的情况下要求锁紧, 所以 Z 向伺服驱动电机采用具有抱紧功能的抱闸电机。工装系统的整体结构如图7所示。

5 结论

本文通过对曲面薄壁零件的结构特点以及装配方
(下转第42页)

型装置上的线速度,缠绕速度直接影响生产效率。

(3)环境温度、湿度。缠绕过程中环境的温度、湿度对制品有很大影响,树脂胶液粘度随温度降低而增大,为保证胶纱在缠绕过程中的浸滞效果,同时避免某些固化剂低温析出,因此在缠绕过程中须严格控制温度。在缠绕过程中湿度不应过大,否则纤维吸潮后缠绕到制品上会使纤维与树脂间粘结力降低,加速制品老化。

(4)胶液浸滞及含量控制。复合材料制品中胶液含量的高低变化及分布对纤维缠绕制品性能影响很大,一是直接影响制品质量和厚度,二是从强度角度看,含胶量过高使制品复合强度降低,含胶量过低使制品空隙率增加,制品气密性、耐老化性能及剪切强度下降,同时影响纤维强度的发挥。胶液含量过大的变化会引起不均匀的应力分布,并在某些区域引起破坏,因此纤维浸胶过程必须严格控制含胶量大小^[4-5]。

4.4 缠绕成型装置应用的效果

对图7所测数据进行分析得到:用此缠绕成型装置缠绕的大梁带所受的缠绕应力值仅仅在前几层时增长很快,而当达到一定值后,其值便处于平稳状态,即不随缠绕而改变。在缠绕完毕后各层缠绕成型装置所受缠绕应力从根上实现了等应力分布,可以很好地满足缠绕成型精度的要求。

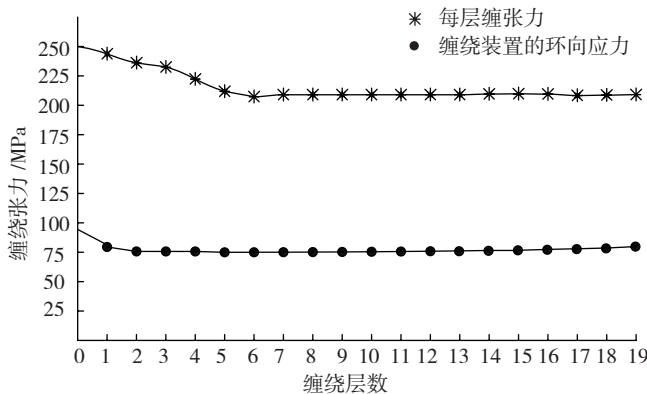


图7 大梁带缠绕成型装置缠绕应力变化曲线

Fig.7 Variation curve of winding stress of aircraft crossbeam strap winding device

5 结论

(1)采用逐层缠绕一步到位的缠绕方法,解决了传统缠绕成型装置裁剪时所造成原材料的浪费和成型误差。

(2)可以实现直接裁剪一次成型,不需要再进行二次加工,解决了缠绕成型效率低的问题。

(3)采用参数化和模块化的方法可以有效地改变缠绕层的厚度,适合任意长度产品的加工,弥补了传统缠绕工艺的不足。

(4)只需更换芯模和滑块组件的数量就可以满足任何机型飞机大梁带缠绕成型工艺要求。该缠绕成型装置具有较高的通用性和实用性,达到了飞机大梁带缠绕成型国内国外相应标准的要求,获得国内外专家的认可,在国内同行业处于领先水平。

参考文献

- [1] 黄家康. 复合材料成型技术. 北京: 化学工业出版社, 1999:41-42.
- [2] 沃丁柱. 复合材料大全. 北京: 化学工业出版社, 2000:36-39.
- [3] 沈观林, 胡更开. 复合材料力学. 北京: 清华大学出版社, 2006.
- [4] 车剑飞. 复合材料及其工程应用. 北京: 机械工业出版社, 2008.
- [5] 尹洪峰, 魏剑. 复合材料. 北京: 冶金工业出版社, 2010:4-10.

(责编 亿霖)

(上接第29页)

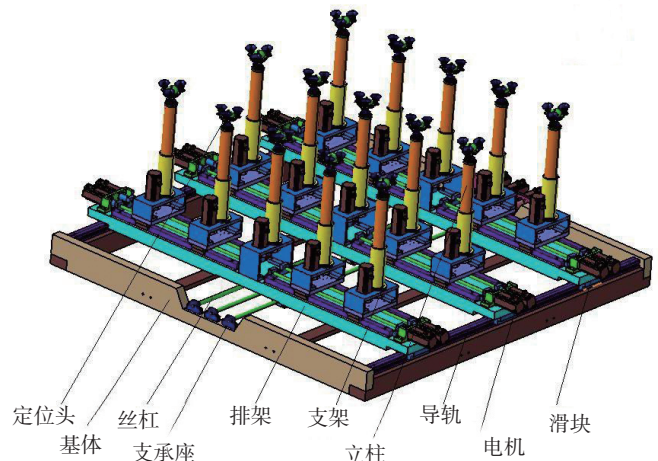


图7 定位工装系统的结构图

Fig.7 Structure diagram of tooling system

法的研究,提出了曲面定位点坐标的求解方法,通过系统结构的柔性设计,使得一个工装系统可以同时满足多个薄壁类零部件的快速装夹要求,实现装配工艺的柔性化、敏捷化。

参考文献

- [1] 范玉青. 航空宇航制造工程飞行器制造技术. 重庆: 重庆出版社, 2000.
- [2] 张楠, 汤军社. 数字化飞机钣金件加工定位用柔性夹具的设计. 中国制造业信息化, 2010, 39(1): 41-44.
- [3] 邹方, 薛汉杰. 飞机数字化柔性装配关键技术及其发展. 航空制造技术, 2006(9): 30-35.
- [4] 范玉青. 现代飞机制造技术. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2001.

(责编 深蓝)