

机身骨架装配柔性工装设计*

孙永杰,田 威,廖文和,刘明爽

(南京航空航天大学机电学院,南京 210016)

[摘要] 为解决当前飞机机身装配工装效率低、定位精度不高、通用性差等问题,根据飞机机身结构,分析其装配需求,采用模块化设计思想,研制了面向机身骨架的“龙门式”柔性装配工装。该套柔性工装能够适应截面直径尺寸小于3m、机身筒段长度3~5m的产品,通过伺服电机驱动、手工调整以及更换特殊定位器等来实现对新类型机身的定位。工装操作简单、适应性强,能够以较低的成本提供较大的柔性。

关键词: 柔性工装; 交点孔定位; 机身骨架

Flexible Tooling for Fuselage Skeleton Assembly

SUN Yongjie, TIAN Wei, LIAO Wenhe, LIU Mingshuang

(College of Mechanical & Electrical Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

[ABSTRACT] In order to solve the current problem of low efficiency, low positioning and poor generality accuracy of aircraft fuselage assembly tooling, according to the aircraft fuselage structure, analyze the assembly requirements, and the idea of modular design is developed for the fuselage frame “gantry” flexible assembly tooling. The set of flexible fixture is suitable for products section diameter size being less than 3m, the fuselage tube length being 3–5m, and could implement new type body positioning, etc. by servo motor, manual adjustment and replacement of special locator. Equipment operation is simple, strong adaptability, and can provide greater flexibility at a lower cost.

Keywords: Flexible tooling; Intersection hole orientation; Fuselage frame

DOI:10.16080/j.issn1671-833x.2017.07.086

飞机产品具有零件数量多、刚性低、外形复杂、装配精度要求高等特点^[1],在其装配过程中,不能单靠零件自身形状和尺寸的加工准确性来装配合格的部件^[2],因此,需要大量的工装来保证产品从零组件到部件装配过程中的精确几何外形,限制装配过程中的连接变形,使产品满足准确度及互换协调性要求^[3]。

在传统飞机装配模式下,主要采用刚性专用工装,工装数量多、占地面积大、生产周期长、制造成本高。随着国内新机型号的逐渐增多,多品种、小批量生产的需求特征日趋显著,在航空企业飞机结构零部件已基本实现数控机床加工制造的背景下,传统刚性专用工装已成为实现快速转产和缩短新品研制周期的瓶颈^[4]。

当前,国外在飞机产品各个装配阶段已经发展了相应的柔性工装。而在国内,大部分制造厂在飞机装配过程中仍广泛采用传统的刚性结构专用工装^[5]。近年来,国内在组件、部件装配方面做了大量的研究,取得了一定的成果。如中航工业沈飞研究并工程化的翼身整体

结构后段数字化柔性装配系统^[6]和后机身部件柔性装配系统;西北工业大学设计的部件级数字化柔性工装系统^[7]和机身壁板类组件装配工装^[8];北京航空航天大学和中航工业沈飞公司合作设计的一种可重构调形单元。其中,针对机身部件装配的是沈飞研究的后机身部件柔性装配系统。该系统柔性工装为桥架式结构,上下各5组横梁,每个横梁上有4组定位器,每个定位器在空间具有3个方向的自由度,通过合理调节具有定位功能的构件,带动专用定位器运动至指定的方向和位置^[9],以实现机身加强框的定位。

本文在分析中机身结构特点、装配协调关系及制造工艺性的基础上,针对某型机中机身结构尺寸小、协调关系复杂、产品装配零组件密集、开敞性要求高等特点,设计了一套部件级的数字化柔性装配工装系统,在一套工装上可以完成对多种产品的装配。

1 产品结构特点及装配要求

飞机部件产品装配和定位主要有以骨架为基准和

* 基金项目: 国家科技重大专项资助项目(2014ZX04001071)。

以蒙皮为基准两种定位模式,其中翼面类部件多以蒙皮为基准,机身部件多以骨架为基准。针对本项目面向中机身部件装配的特点,工装定位方式将以骨架为基准定位为主。面向机身部件装配的柔性工装的主要功能需要完成对机身主承力构件和重要结合交点的装配定位,同时充分考虑工人装配时操作空间。中机身部件位于整个飞机的中部,前后分别与前机身和后机身连接,两个侧面连接飞机的机翼,中机身产品具有互换性,同时飞机起落架位于中机身的腹部,要求起落架能够顺利收放。机身的模型是根据实际产品建模简化的,机身的主要结构如图1所示。

如图1所示,中机身垂直放置结构主要包括6个整体加强框、2个900梁(对称)和其他立梁、隔板等,两个框之间通过立梁、隔板连接在一起。加强框从上到下7100框、7880框、8700框、10060框、10460框和10860框均为数控机加框,每个加强框上有4个 $\phi 10$ 的定位交点孔,如图2所示,其中1为工艺交点孔,2为加强框。除了10860框以外,其余5个加强框均为电控悬臂带台阶定位销定位工艺孔及航向后框腹板面,10860框为主受力框,整个中机身重量通过梁传递到10860框上。10860框上的定位器设计为固定式,螺接在平台上。针对加强框上4个交点孔的定位采用孔销配合定位。首先,用1个 $\phi 10$ 的销定位交点孔,限制框的5个自由度,保证框的位置;其次,再用一个 $\phi 10$ 的销定位交点孔,限制框的转动,即可达到完全定位,剩余两个交点孔采用2个 $\phi 9$ 的销定位,此时会出现过定位情况,由于加强框交点孔定位精度为 $\pm 0.1\text{mm}$,所以可以避免销插不进孔的情况。将机身6层加强框上的交点孔投影到底层平面上,交点孔分布如图3所示。

交点孔主要分布在4个区域,其他两点A点和B点为8700框上的交点孔,位置比较特殊,离其他各点较远,且在工装定位交点孔时容易与立梁干涉,交点孔分

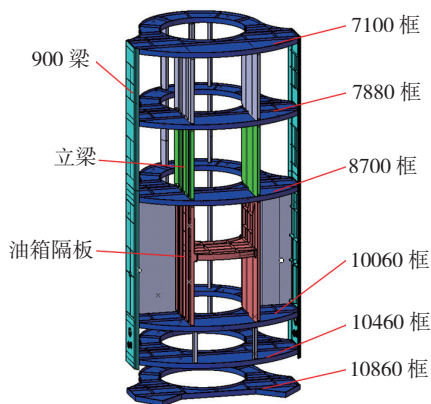


图1 中机身结构

Fig.1 Intermediate fuselage structure

布如图3所示。

900梁分为上900梁和下900梁两个部分,和机身的其他各框之间要进行套合,其定位主要控制Z方向,X方向位置仅作检查。在上900梁上有2个定位交点孔E点和F点,如图4所示。利用两个系统孔在型架横梁上设置2组定位器,在平台底部设置一个端面辅助托板,承受900侧梁重量。

飞机主起落架的顺利收放对主起落架转轴提出同轴度要求。在平台上设置支座,安装“V”型带压紧块的定位器,通过定位工艺轴确定主起落架转轴接头的位置。主起落架大护板3组接头、小护板2组接头需要定位,其中要保证大护板3组接头定位器同轴度 $\phi 0.05$,小护板2组接头定位器同轴度 $\phi 0.05$,具体定位需求如图5所示。

中机身产品的装配和后续的钻铆工作分别在不同的平台上完成,在装配工位完成中机身的装配后,产品由AGV小车从装配工位运输至自动钻铆平台。为保证运输过程中中机身产品的稳定性及减少钻铆时末端执行器压力脚压紧产品对制孔精度的影响,提高产品的刚

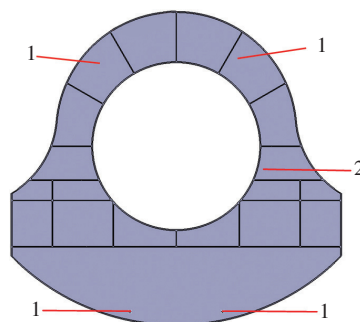


图2 机身加强框

Fig.2 Fuselage strengthen frame

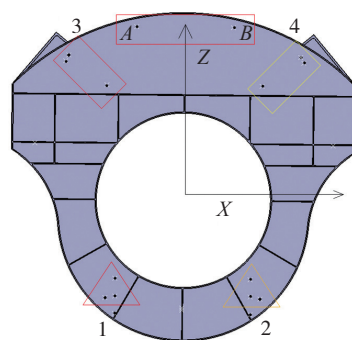


图3 交点孔分布

Fig.3 Intersection hole distribution

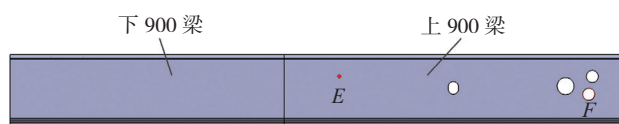


图4 900梁交点孔分布

Fig.4 Intersection hole distribution of 900 beam

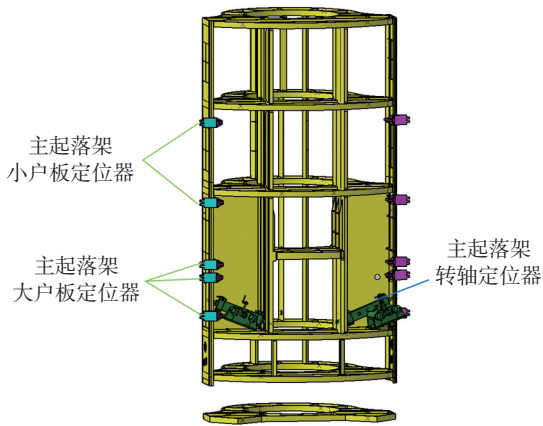


图5 主起落架护板和转轴定位需求
Fig.5 Positioning demand of main landing gear guard board and spindle

性,在 900 侧梁处设置真空吸盘将产品与保型工装连为一体。

2 柔性工装方案设计

根据上述产品结构特点及装配要求分析,柔性工装主要用于定位机身上的加强框和 900 梁,其中加强框的定位主要以孔定位为主。如图 3 所示,交点孔主要分布在 1、2、3、4 区域, A、B 两点离其他区域比较远。根据框交点孔分布情况和 900 梁定位需求确定柔性工装机械结构的整体布局,4 个区域每一个区域上的交点孔共用一个立柱面,以完成在高度方向的柔性,900 梁定位单独对应一个立柱。

由于产品结构复杂、定位特征多、位置集中、空间开敞性差,定位准确度要求高,且对中机身产品的认知有一个过程,因此工装经过了几轮方案设计才得以完成。工装的几个主要结构形式如下:

方案一:该方案采用 6 根立柱式结构,每根立柱对应一个区域的交点孔定位, A 点划在 3 区域, B 点划在 4 区域。每一个交点孔都能实现 3 个方向自由度,其中两个方向是通过电机自动控制,一个方向是通过人工调整。该方案优点是柔性比较大,自动化程度高,产品快速重构时间短;缺点是工装开敞性差,产品框不能水平进出,工人操作不方便,工装结构如图 6 所示。

方案二:该方案采用龙门式结构,针对 4 个区域的交点孔,每个区域对应一个立柱,区域 1 和区域 2 的立柱、区域 3 和区域 4 的立柱分别连到一起成为龙门式结构,900 梁的定位由专门定位立柱完成,且该立柱安装在工装底座上,产品装配完后和产品一起运走。其中针对机身框上的每一个交点孔都能实现 3 个方向自由度,实现自动控制,在 900 侧梁上的交点孔定位实

行刚性工装定位。该方案工装结构优点是开敞性比较好,产品在运输过程中稳定性强;缺点是针对 900 侧梁的定位柔性化程度小,在 900 梁定位柱处开敞性差,装配时产品框不能水平进出,工装结构形式如图 7 所示。

方案三:该方案采用龙门式结构,针对 4 个区域的交点孔,每个区域对应一个立柱,区域 1 和区域 3、区域 2 和区域 4 的立柱分别连到一起成为龙门式结构,900 梁的定位柱安装在保型工装上,随产品一起运走,主起转轴定位器安装在龙门上,结构如图 8 所示。该工装结构优点是开敞性较好,装配时能够满足产品框水平进出,产品运输过程中稳定性好;缺点是主起转轴定位精度不高,900 梁定位立柱刚性不够,产品制孔时末端执

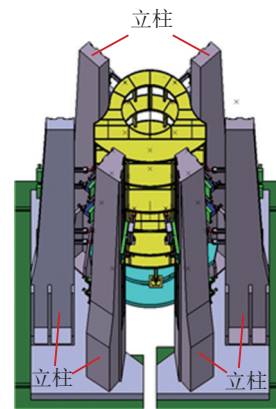


图6 方案一:柔性工装结构
Fig.6 Flexible tooling structure of the first scheme

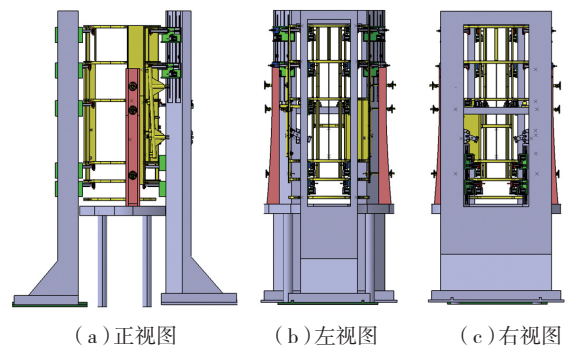


图7 方案二:柔性工装结构
Fig.7 Flexible tooling structure of the second scheme

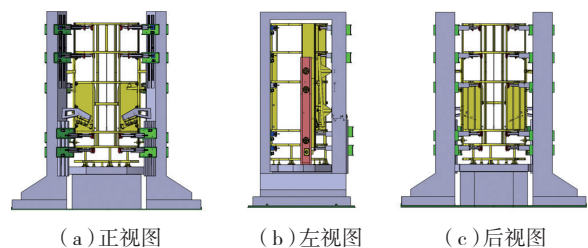


图8 方案三:柔性工装结构
Fig.8 Flexible tooling structure of the third scheme

行器压力脚压紧中机身影响制孔精度。

方案四：该方案采用龙门式结构，针对4个区域的交点孔，每个区域对应一个立柱，区域1和区域3、区域2和区域4的立柱分别连到一起成为龙门式结构，900梁的定位柱结构加强，主起转轴定位器安装在工装底座上，10460框、10060框靠近主起转轴的定位器为刚性定位器，且和主起转轴定位器安装在同一个支撑立柱上，主起护板定位器安装在900梁立柱上，8700框上的A、B两点的定位器为刚性定位器。工装结构形式如图9所示。该方案工装结构优点是开敞性好，工人操作空间比较大，保型工装刚性强，机身产品在后续制孔过程中比较稳，精度比较高；缺点是柔性化程度相对于其他方案低一些。

综合以上4种方案，分析优点和缺点，在合理评估柔性工装需要具备的柔性化程度^[10]，结合产品对装配开敞性要求以及制孔精度要求的情况下，选择方案四作为工装的最终方案。

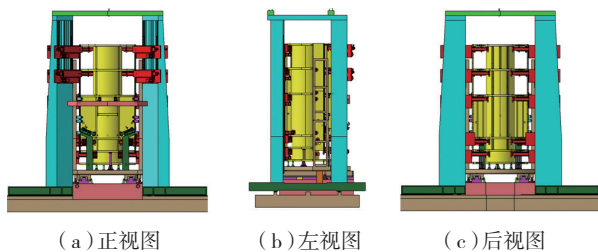


图9 方案四：柔性工装结构

Fig.9 Flexible tooling structure of the fourth scheme

3 产品工艺试验

为了确定工装各定位器在中机身变形中的作用，对完成架内铆接的中机身做了一系列的工艺试验，相关试验及结果如图10、表1、表2所示。

根据试验得出结论：

(1) 900梁定位器的固定对于中机身受力变形影响

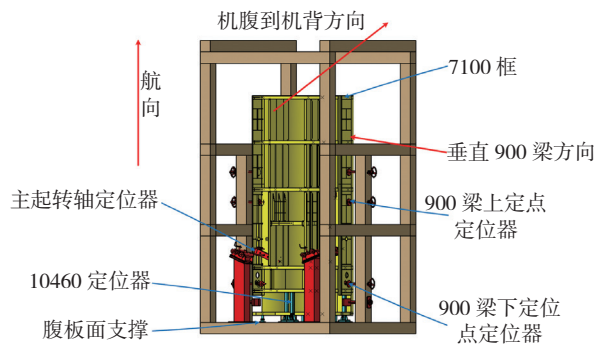


图10 完成架内铆接的中机身

Fig.10 Intermediate fuselage after riveting inside the fixture

表1 中机身5种固持方式

产品固持状态	固持位置
状态一	10460框定位器(腹板面支撑、工艺孔插销未上螺母)和左右900梁定位器(上下定位点固定),主起转轴定位器松开
状态二	10460框定位器(仅有腹板面支撑)和左右900梁定位器(上下定位点固定),主起转轴定位器松开
状态三	10460框定位器(腹板面支撑、工艺孔插销未上螺母)和左右900梁定位器(仅下定位点固定且未加螺母),主起转轴定位器松开
状态四	10460框定位器(腹板面支撑、工艺孔插销上一侧螺母)和左右主起转轴定位器
状态五	10460框定位器(腹板面支撑、工艺孔插销上一侧螺母)和左右主起转轴定位器、900梁定位器(仅有下定位孔固定且未加螺母)

表2 5种固持方式下不同方向施加500N力时产品最高点处变形量 mm

固持状态 / 受力方向	状态一	状态二	状态三	状态四	状态五
机背到机腹	0.8~0.9	0.8~0.9	晃动大, 没试验	1.13~1.15	1.10~1.12
机腹到机背	0.9~0.95	0.9~1.0	晃动大, 没试验	1.2~1.22	1.21~1.23
900梁方向	0.25~0.3	0.49~0.51	0.94 (300N)	1.15~1.18	1.1~1.12

较大,其次为主起转轴定位器;

(2) 在中机身底部10460框定位器主要起支撑作用,其与工艺孔的固定状态对中机身受力变形影响不大;

(3) 900梁定位器比主起转轴定位器对中机身的稳定性更强;

(4) 如果只固定900梁定位器中的下定位器,对于中机身的稳定性影响不大;

(5) 在固定900梁定位器时中机身机腹到机背方向变形大于垂直900梁方向的变形;

(6) 在固定主起转轴定位器时中机身机腹到机背方向和900梁方向的受力变形量大体一致。

4 柔性工装机械结构

4.1 柔性工装总体结构

根据中机身结构特点及装配定位需求,确定柔性工装方案设计,其主要结构如图11所示,主要包括产品、龙门、龙门搭扣、保型工装、主起转轴定位器、主起护板定位器、移动单元模块、定位器快换模块、刚性定位器等。各个部分在产品装配过程中起到的作用如下:开始时,保型工装安装在底座上,龙门合拢,龙门搭扣锁紧,移动各移动单元模块和刚性定位器,安装主起转轴定位

器和主起护板定位器,装配产品,快换接头位于各定位器顶部,可以更换。

4.2 柔性工装外形轮廓尺寸

柔性工装总体尺寸为 5997mm × 4320mm × 2986mm,如图 12 所示。

4.3 移动单元模块

工装柔性化具体体现在移动单元模块的柔性化。对于移动单元模块来说,柔性工装有 3 个方向的柔性, X 方向通过作动筒前后移动, Y 方向通过移动单元在导轨上下移动, Z 方向上可以通过更换垫片和微调快换接头实现,如图 13 所示。

移动单元模块作为柔性工装自动控制的执行模块,主要包括移动滑台、作动筒移动杆、作动筒基座、垫片等

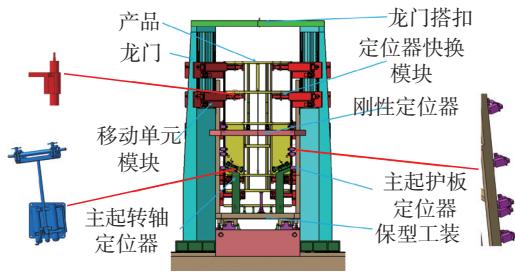


图11 柔性工装模块

Fig.11 Flexible tooling modules

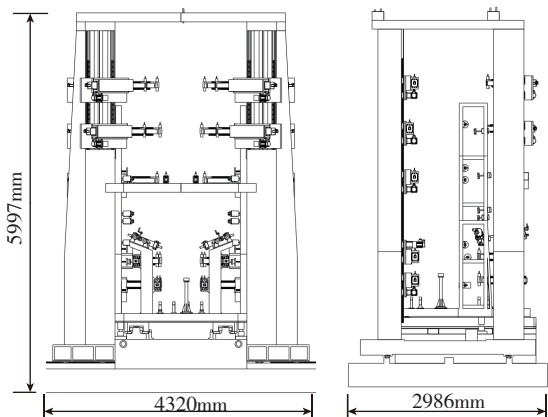


图12 柔性工装整体尺寸

Fig.12 Integral dimension of flexible tooling

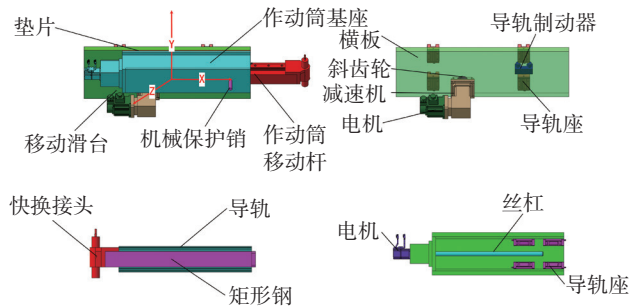


图13 移动单元模块

Fig.13 Mobile unit module

几个关键部分。移动滑台由电机、直角减速机、斜齿轮、横板、导轨制动器、导轨座等组成,电机连接减速机,通过齿轮齿条传动实现移动单元的上下移动;作动筒移动杆由矩形钢、导轨和快换接头组成;作动筒基座由导轨座、丝杠、电机和外筒组成;电机带动丝杠传动,从而移动杆在导轨上滑行,实现前后移动。通过更换垫片、微调快换接头或更换快换接头可以实现移动单元在左右方向的柔性。

4.4 定位器快换模块

定位器快换模块固定在作动筒的末端,包括一个可左右调整的定位器快换接头等,该接头上有一排精密定位孔,接头上不同位置的孔和作动筒上的孔通过螺栓连接,可实现定位器左右方向的调动,当产品交点孔类型改变后可通过更换定位器接头实现对交点孔的定位。快换模块如图 14 所示。

4.5 刚性定位器

刚性定位器模块为定位产品时不方便或不需实现柔性化的定位器主要安装在龙门上,产品改变后刚性定位器也需改变。如图 15 所示为刚性定位器,该定位器包括支撑杆和移动单元两个部分,在龙门对合时刚性定位器通过销、孔方式对合,可增加刚性定位器的刚性和定位精度。

4.6 主起转轴定位器

主起转轴定位器包括立柱、支座、手摇装置、护腕、丝杠、V 型件、安装工艺轴、压板、销等,如图 16 所示。安装在保型工装底座上,主要保证主起落架壁板上的两

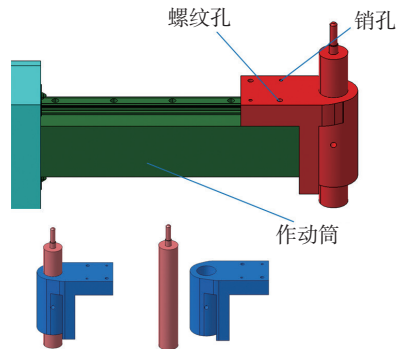


图14 快换模块

Fig.14 Quick change module

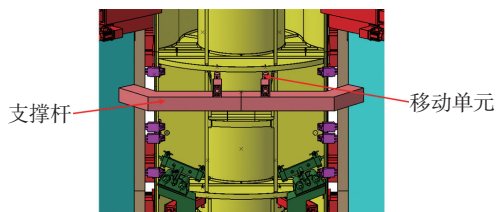


图15 刚性定位器

Fig.15 Rigid positioner

个孔处于同一个轴上,而且还能增强产品在制孔时的稳定性。

4.7 主起护板定位器

主起护板定位器主要包括支座和定位器 2 个部分,安装在保型工装 900 梁加强框上,5 个定位器独立定位,通过交点量规协调,保证 900 梁上下两个板处于同一个平面上(图 17)。

4.8 保型工装

保型工装包括工装底座、液压销、导轨、导向块、滚球、底座组件、加强框、点定位器、真空吸附定位器等,如图 18 所示。保型工装安装在产品底部,通过底座组件定位产品的底层框,通过侧面的 2 个点定位器定位 900 梁,通过侧面的真空吸附定位器支撑、夹持 900 梁。从刚开始产品装配,直到产品完成装配,保型工装起着保持产品形状位置、保证产品装配准确性和稳定性的作用。装配完成后,保型工装的液压销下移,保型工装上部分和产品一起沿导轨移动,运到移动小车上。一种保型工装对应一种产品,产品改变后只需更换保型工装即可。

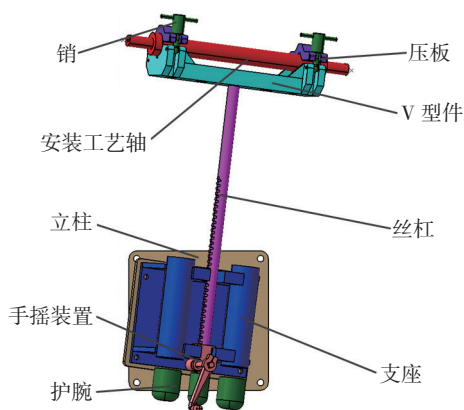


图16 主起转轴定位器

Fig.16 Main landing gear shaft positioner

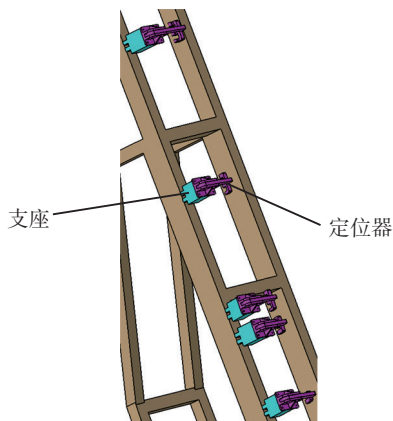


图17 主起护板定位器

Fig.17 Main landing gear supporting plate positioner

保型工装的基本尺寸为 4433mm × 3600mm × 2400mm,如图 19 所示。

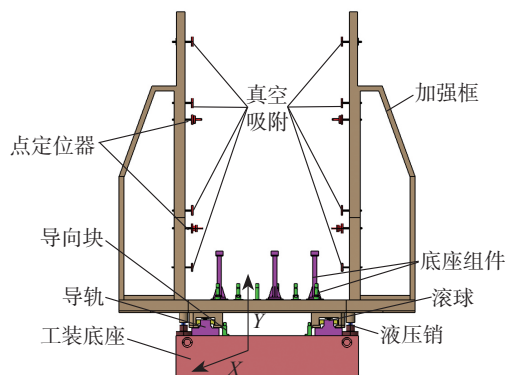


图18 保型工装

Fig.18 Protection tool

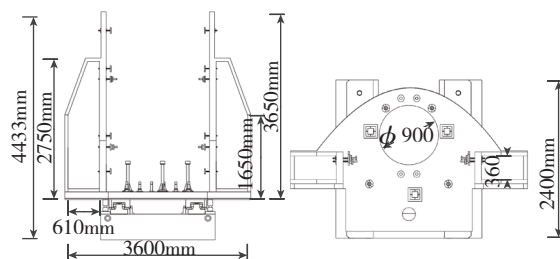


图19 保型工装基本尺寸

Fig.19 Basic dimensions of protection tool

5 结论

本文针对机身骨架装配,借鉴国内外工装研究方法,采用机床“龙门式”工装结构,设计了机身骨架装配柔性工装,通过控制系统调整移动单元位置、更换快换接头以实现截面直径尺寸小于 3m,筒段 3~5m 的多种产品的定位。其应用可减少专用刚性型架,缩短研制周期,具有效率高、可重构时间短、精度高等优点,对于提高国内柔性装配的水平,促进飞机制造企业研制能力的发展具有重要意义。

参考文献

- [1] 郭洪杰,康晓峰,王亮,等.飞机部件装配数字化柔性工装技术研究[J].航空制造技术,2011(22):94-97.
GUO Hongjie, KANG Xiaofeng, WANG Liang, et al. Research on flexible tooling technology for digital assembly of aircraft fuselage[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2011(22): 94-97.
- [2] 王亮,李东升,刘凤贵.飞机壁板类组件数字化装配柔性工装技术及应用[J].航空制造技术,2010(10):58-61.
WANG Liang, LI Dongsheng, LIU Fenggui. Flexible tooling technology and application for digital assembly of aircraft panel component[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2010(10):58-61.
- [3] 王亮,李东升.飞机数字化装配柔性工装技术体系研究[J].航空制造技术,2012(7):34-39.
WANG Liang, LI Dongsheng. Flexible tooling technology system

(下转第96页)