

# 自动钻铆技术在机身壁板上的应用

王 巍,王诚鑫,周一

(沈阳航空航天大学航空航天工程学部, 沈阳 110136)

**[摘要]** 机身壁板是飞机的重要组成部分,机身壁板的装配工艺直接影响着飞机的气动性,以及飞机寿命。本文对自动钻铆技术在机身壁板上的应用过程进行了简要分析。首先,对机身壁板的装配工艺进行了研究,之后对自动钻铆机的结构与工作原理进行了分析,并对面向自动钻铆机的柔性工装进行设计;最后,对钻铆过程中的在线测量技术进行分析,并对机身壁板的自动钻铆过程进行了仿真。

**关键词:** 机身壁板;装配工艺;工装设计;自动钻铆机;在线测量技术

**DOI:**10.16080/j.issn1671-833x.2018.22.043



王 巍

教授,主要研究方向为数字化飞机制造技术、飞机装配工装的通用性及模块化设计。

目前,国际上各系列飞机多采用了自动钻铆技术,例如美国的 G86、G2000 系列,俄罗斯的 AK-5.5-2.4、AK-2.2-0.5 系列,法国的 PRECA300、PRECA600 系列<sup>[1]</sup>,德国 MPAC、IPAC、RACE 系列。

飞机机身壁板是飞机结构中重要的组成部件,主要承受着机身弯曲、剪切、扭转等载荷。所以机身壁板的装配工艺就显得尤为重要,机身壁板的钻铆工艺是机身壁板装配的关键环节,为提高机身壁板钻铆装配的工作效率与准确度,应顺应国际发展趋势,应该更多的将自动钻铆技术应用到飞机机身装配工艺过程中。

## 机身壁板装配工艺分析

飞机壁板主要由蒙皮和长桁组成,其中蒙皮作为飞机的外形零件,直接决定了飞机的气动外形,所以其成形质量至关重要。该飞机机身蒙皮的材料为厚度 2mm 铝锂合金,利用滚弯成型的方法加工成单曲度蒙皮,并在数控机床上完成机械加工、表面处理、净边裁剪、预制 DA 孔等工序,最终形成标准的蒙皮零件。

长桁与蒙皮内形紧贴,并且一起承受机身弯曲引起的轴向载荷和局部气动力造成的剪切力,是构成飞机

壁板件的重要承载零件之一。长桁根据截面形状一般可以分为 T 型长桁、Z 型长桁、L 型长桁、Ω 型长桁及工字型长桁。本文飞机长桁为 Z 型长桁,材料同样为铝锂合金,厚度 1.6mm。

图 1 所示飞机机身壁板的装配过程是将蒙皮、长桁等零件按照设计工艺与制造工艺等技术条件进行定位、制孔并铆接连接的过程。在预制孔以及之后对机身壁板进行钻孔之前,需要对机身壁板加工出基准孔,其他孔的位置都要以该基准孔为基础进行加工<sup>[2]</sup>。

飞机壁板在自动钻铆之前,需要进行预装配,预装配就是初步完成蒙皮、长桁等零件的初步安装与定位工作,在预装配时,每个蒙皮、长桁关键位置事先要预制孔与铆接,以保证飞机机身壁板在钻铆时的稳定性。之后,将机身壁板通过定位器与夹紧器固定在自动钻铆机的工装上,再将机身壁板与工装的整体通过连接底座

固定在自动钻铆机的托架上。自动钻铆机对固定在托架上的机身壁板进行自动钻铆加工。

机身壁板在自动钻孔过程中,刀的走位与钻孔顺序尤为重要,刀的走位与每次移动的距离可以通过编程来控制。图2为自动钻孔中基准孔的位置,以及自动走刀的方向与顺序。

### 自动钻铆系统

图3所示为自动钻铆机的组成结构。在机身壁板进行钻铆过程中,自动钻铆机主要由托架以及柔性工装对机身壁板进行定位与夹紧,托架与柔性工装通过集成计算机控制其位置的准确性,产品的装夹通过涡流检测传感器进行自动检测<sup>[3]</sup>。

图4所示的X轴为自动钻铆机底座的移动方向,Y轴为钻铆装置的移动方向,Z/W轴为自动钻铆机身升降柱的移动方向,A轴为旋转托架的移动方向,B/C轴为钻孔机与铆接机的旋转方向。

飞机壁板自动钻铆时首先将飞机机身壁板安装在柔性工装上,再将装有壁板的柔性工装固定在托架上。在对壁板进行钻铆前,将钻头、铆头和铆钉在试板上进行试钻。试钻之后,自动钻铆机开始对机身壁板进行钻铆工作。

自动钻铆机在工作过程中,铆钉的送钉系统尤为重要。送钉系统会根据不同要求,送不同类型的铆钉,铆钉类型有100°精密沉头、平圆头100°剪切沉头等。

图5所示为自动钻铆机铆钉的送钉与检测工艺过程。首先,对要进

行钻铆的工件进行装夹,并对装夹后的工件进行位置检测,如果出现位置偏差则进行调姿处理,当工件处于指定位置的时候,加工头对工件进行制孔与铆窝,然后涂胶密封<sup>[4]</sup>。之后,自动钻铆机进行送钉,自动钻铆机检测系统会对其进行检测,如果没有铆

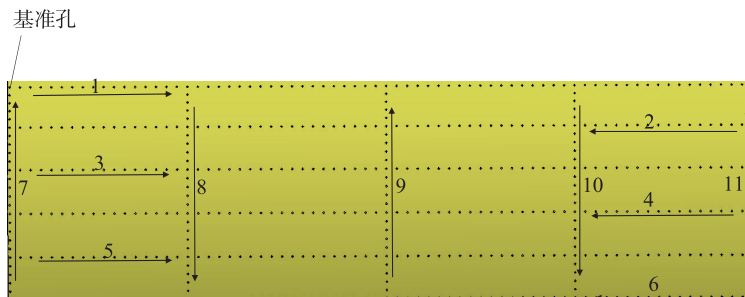


图2 走刀方向与顺序

Fig.2 Feeding direction and order of cutting tool

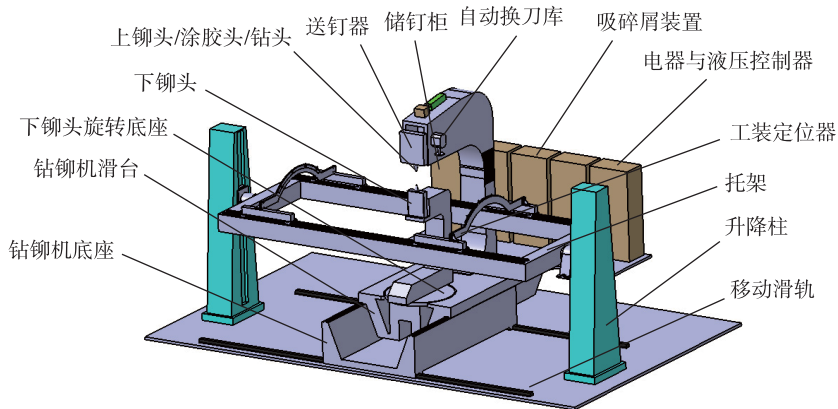


图3 自动钻铆机结构

Fig.3 Automatic riveting machine structure

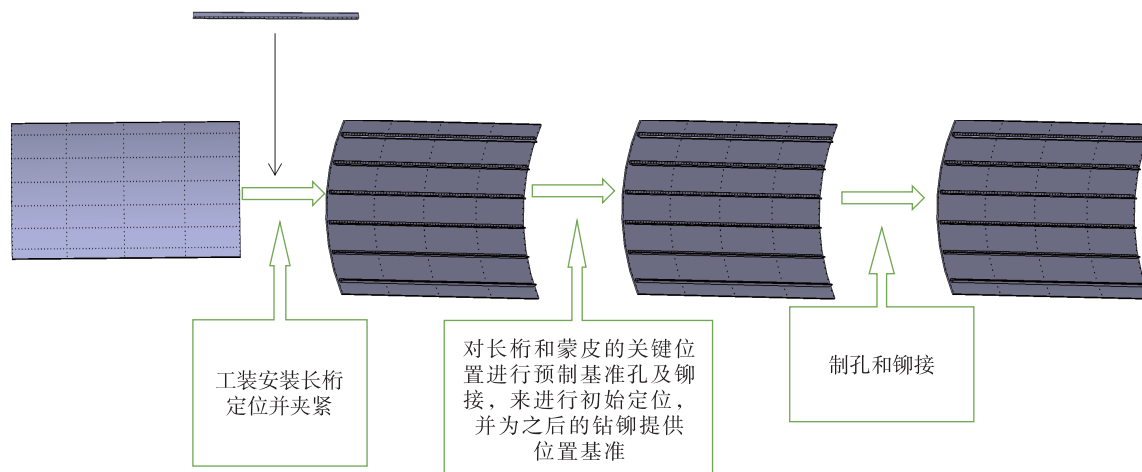


图1 机身壁板装配过程

Fig.1 Assembly process of fuselage panel

钉则再次送钉,如果有铆钉则插入铆钉。插入铆钉后,检测系统会对插入结果进行检测,观察铆钉插入是否到位,如果没有到位则重新送钉,如果到位则进行镟粗、铣平<sup>[5]</sup>。之后,自动钻铆机进入下一个加工位置。

## 面向自动钻铆机的工装设计

图6所示为自动钻铆机的组成结构,在对机身壁板进行钻铆之前,需要对机身壁板进行预装配,预装配就是将壁板在支撑卡板上进行定位与夹紧,在定位支撑卡板上设置有定位与夹紧器固定模块,该模块上装有蒙皮端部定位器、K孔定位器、蒙皮夹紧器等定位夹紧装置,这些定

位夹紧器起到对机身壁板的固定作用。将预装配后的机身壁板与柔性工装的支撑卡板结合体通过连接座固定在矩形冷弯钢上。通过伺服电机对移动滑块的控制、旋转托盘的旋转和立柱控制旋转托盘的上下移动来控制机身壁板的位置,从而进行钻铆<sup>[6]</sup>。该工装不仅可以适应自动钻铆机对机身壁板自动钻铆的装夹需求,还可以通过改变定位与夹紧器固定模块,以及卡板的型号和蒙皮端部定位器的位置来适应不同类型的机身壁板的自动钻铆过程。

在面向自动钻铆机的柔性工装设计时,考虑到飞机壁板柔性工装,在壁板自动钻铆过程中,主要承受

卡板、定位夹紧器、移动滑块等承载力的作用。现对矩形冷弯钢、滑动模块与托架等组成件的强度与刚度进行分析。

对强度进行分析,梁的应力小于钢的屈服强度 200MPa。对刚度进行分析,设计要求的矩形冷弯钢的变形为 0.35mm,自动钻铆机托架设计要求承载量为 2000kg 左右。某大型飞机机身壁板组件及柔性工装组合件重量为 106.135kg。冷弯钢与移动滑块总重 256.35kg,矩形冷弯钢在相同载重下比 H 型钢、T 型钢等变形最小。选用 200mm × 120mm 型号矩形冷弯钢作为柔性工装与托架连接件。对连接的冷弯钢设计完成后,利用 ANASY 软件,以某型飞机壁板在模块化工装上安装至正确位置时,对关键承力件进行有限元分析。图7所示为应力分析与变形分析云图。矩形冷弯钢在机身壁板装配过程中,最大应力 0.46MPa,满足应力要求,工装的刚度精度最高要求挠度小于 0.1mm,矩形冷弯钢最大变形量为 0.0002mm,均符合设计要求。

其中,柔性工装定位是存在误差的,误差主要分为刚性误差和柔性误差。刚性误差包括托架到移动滑块、移动滑块到卡板、卡板到定位夹紧器的零件制造误差。柔性误差主要是定位器的定位误差,以及零件

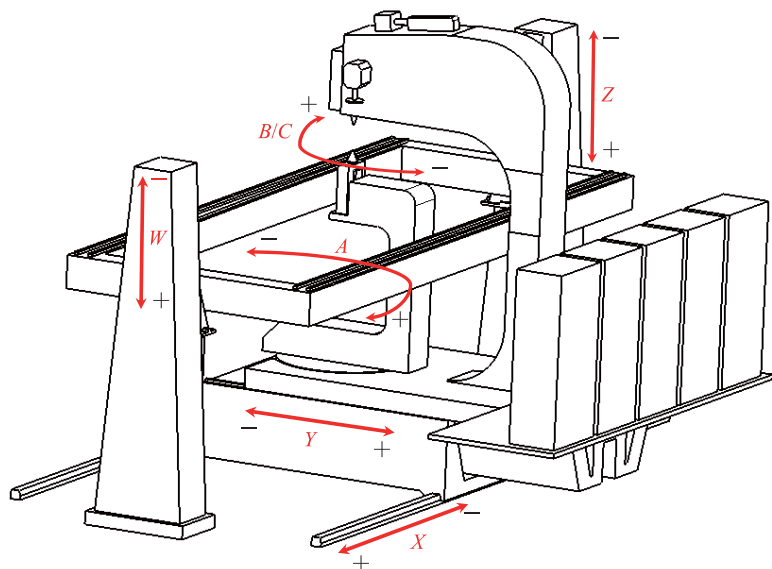


图4 自动钻铆机的运动

Fig.4 Motion of automatic riveting machine

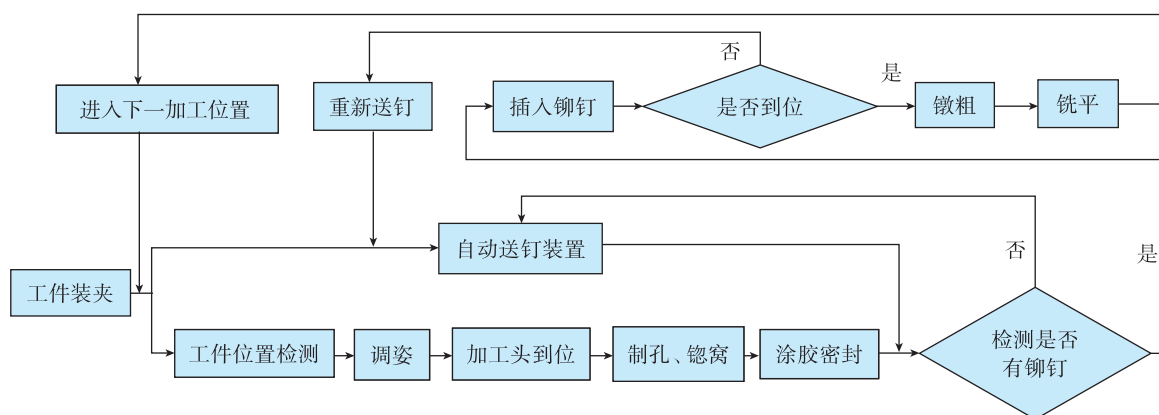


图5 自动钻铆机送钉过程

Fig.5 Automatic riveting machine delivery process

变形误差。

首先,对刚性误差  $\Delta_i$  进行分析,  $\Delta_i$  为定位器定位点在钻铆机自身坐标系下的误差矩阵,  $\Delta_i^x$ 、 $\Delta_i^y$ 、 $\Delta_i^z$  分别为不同方向的误差值。有自动钻铆机的旋转托架或柔性工装上的两个零件 M 和 N, 单独两个零件装配误差传递如图 8 所示。在每个零件上建立一个基准坐标系  $OM$  和  $ON$ , 零件上的每个特征 FM 和 FN 也建立各自的特征坐标系  $OFM$  和  $OFN$ , 其原点和方向按照实际零件装配的特点选取, 影响坐标系中间计算过程, 不影响最终的误差。各个零件通过齐次变换相互关联, 组成封闭环, 得出理想状态的关联零件基坐标系间的坐标变换关系式<sup>[7]</sup>:

$${}^N_M T = {}^M_M T \cdot {}^{FM}_M T \cdot {}^{FN}_M T \cdot {}^N_{FN} T \quad (1)$$

其中,  ${}^N_M T$  为零件 M 到零件 N 的齐次坐标变换矩阵;  ${}^M_M T$  为零件 M 到特征 FM 的变换矩阵;  ${}^{FN}_M T$  为特征 FM 到特征 FN 的变换矩阵;  ${}^N_{FN} T$  为

特征 FN 到零件 N 的变换矩阵。实际装配中零件 M 和考虑误差后的零件 N 的基坐标间的变换关系为

$${}^{N'}_M T = {}^M_M T \cdot {}^{FN'}_M T \cdot {}^N_{FN'} T \quad (2)$$

因此, 得出实际的定位点  $L_i$ ; 与完成装配后的定位点  $L'_i$  的  $\Delta_i$  误差为:

$$\begin{bmatrix} \Delta_i \\ I \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_i^M - L_i^M \\ I \end{bmatrix} = {}^N_M T \cdot \begin{bmatrix} L_i^N \\ I \end{bmatrix} - {}^N_{M'} T \cdot \begin{bmatrix} L_i^N \\ I \end{bmatrix} \quad (3)$$

其中,  $L_i^M$ 、 $L_i^M$  表点  $L_i$  在 M 坐标系下实际状态与理想状态坐标;  $L_i^N$ 、 $L_i^N$  为点  $L_i$  在 N 坐标系下实际状态与理想状态坐标。通过公式(3)可以计算出刚性误差  $\Delta_i$ 。

对柔性误差进行分析, 自动钻铆机的柔性定位件基本采用 N-2-1 定位原则<sup>[8]</sup>, 托架一般以一面两孔或者两面一孔的方式提供定位点, 其自动钻铆机的实际钻铆坐标系和工装实际坐标系已知。对于壁板组件上任

意关键特征点  $A_i$ , 其误差  $\Delta$  主要由 3 部分组成, 即刚性部分误差  $\Delta$ 、柔性变形误差  $\Delta_{di}$  和壁板制造误差  $\Delta_{mi}$ , 误差模型为式

$$\Delta = \Delta_i + \Delta_{di} + \Delta_{mi} \quad (4)$$

其中,  $\Delta$  为柔性工装的误差, 可以通过模拟加工对误差进行判断, 并通过图 9 所示自动钻铆程序的优化过程来降低柔性工装误差对机身壁板自动钻铆所产生的影响。

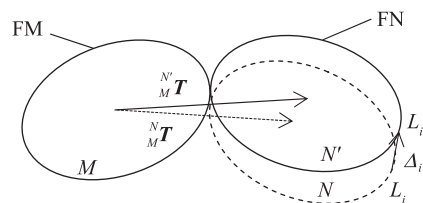


图8 零件间的误差传递

Fig.8 Error transfer between parts

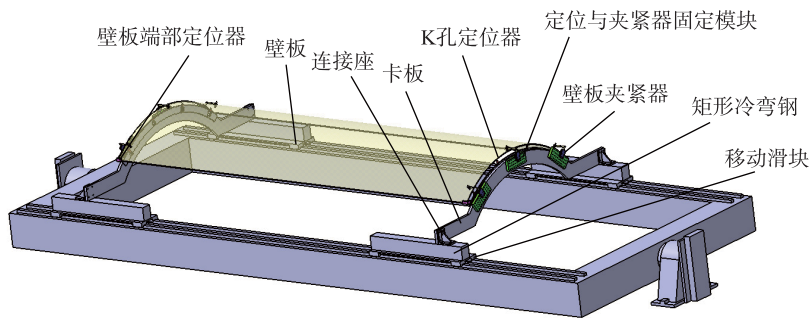
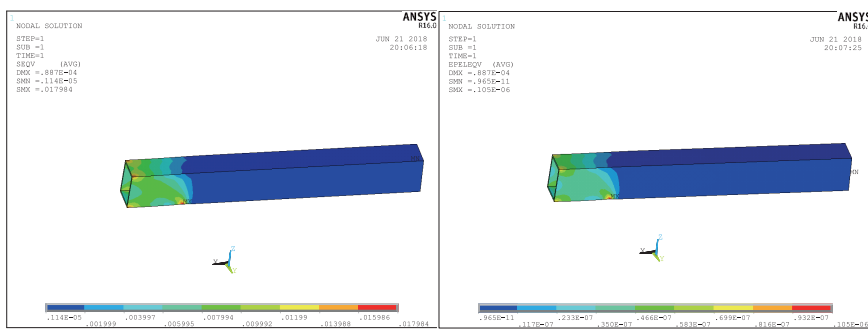


图6 自动钻铆机工装结构

Fig.6 Flexible tooling structure of automatic riveting machine



(a) 应力分析云图

(b) 变形分析云图

图7 ANSYS分析图

Fig.7 ANSYS analysis diagram

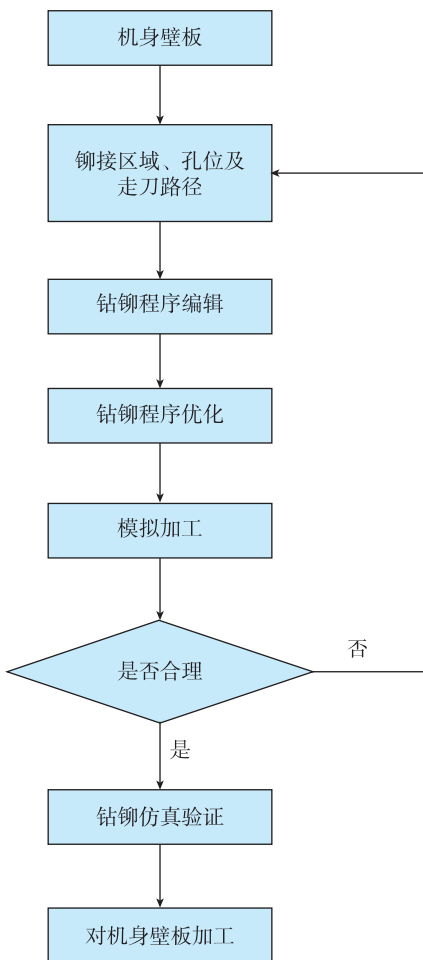


图9 自动钻铆程序优化

Fig.9 Optimizing process of automatic drilling and riveting

## 机身壁板的自动钻铆

机身壁板的自动钻铆过程需要进行跟踪测量,目前国内多采用激光跟踪仪进行测量。激光跟踪仪测量技术是测量被测量目标点的绝对距离、水平方位角和垂直方位角的球坐标测量系统。其中,角度编辑器负责测量两个方位角;距离分量通过反射标靶装置测量,可以实时在线对空间点位进行测量,最终测量得到球坐标系中的3个位置分量 $\alpha$ 、 $\beta$ 、 $L$ 。

在壁板工装上设置有4个基准圆孔,如图10所示,分别为 $TP_1$ 、 $TP_2$ 、 $TP_3$ 和 $TP_4$ ,在飞机机身壁板预装配,使用激光跟踪仪根据这些基准圆孔建立飞机机身壁板坐标系,在该坐标系下在线测量装配准确度,使机身壁板外型偏差保持在要求范围内<sup>[9]</sup>。

机身壁板的自动钻铆需要程序来控制,要编写自动钻铆机工作的程序,从而实现钻铆机对于机身壁板的全自动钻铆。自动钻铆程序需要根据加工情况不断更改,来对钻铆程序进行不断优化。

图11为自动钻铆过程仿真。在实际工作中,将壁板预装配后吊装在自动钻铆机的托架上,再将壁板柔性工装放置在托架上进行固定,在钻铆过程中,计算机集成系统中会根据程序控制钻孔机、铆接机以及旋转托架的运动,来适应自动钻铆机对壁板进行制孔和铆接制造过程中的位置要求,并应用激光跟踪仪对自动钻铆过

程进行跟踪测量,使机身壁板的自动钻铆过程可以高效有序进行<sup>[10]</sup>。

## 结论

飞机制造过程的自动化是提高飞机制造精度与效率的有效途径。飞机壁板作为飞机机身的重要组成部分,其钻铆过程的自动化既能提高机身壁板钻铆工作的效率,也能保证钻铆工作的精度。本文详细叙述了自动钻铆机在机身壁板钻铆过程中的应用。

目前我国在自动钻铆技术研究方面已经有了长足的进步,特别是在自动钻铆机仿真方面,通过钻铆机仿真建立钻铆工艺参数,为实际的制造加工提供工艺方案,但是自动钻铆机各子系统集成性较低,大幅度限制了我国自动钻铆机向着高精度和柔性化发展。其中自动化设计也是自动钻铆机的核心技术之一。随着我国大飞机项目的不断创新与发展,我国的航空制造领域应该将更多的自动化制造技术应用到飞机制造当中,只有这样,未来我国在大飞机制造方面才能走到世界前列。

## 参考文献

- [1] 喻龙,章易镰,王宇晗,等.飞机自动钻铆技术研究现状及其关键技术[J].航空制造技术,2017,60(9):16-25.
- [2] YU Long, ZHANG Yilian, WANG Yuhang, et al. Research status of automatic drilling and riveting technology for aircraft and its key technologies[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2017, 60(9): 16-25.

Technology, 2017, 60(9): 16-25.

[2] 王仲奇,王赢,郭飞燕,等.壁板组件柔性装配工装技术[J].航空制造技术,2013,56(12):44-47.

WANG Zhongqi, WANG Ying, GUO Feiyan, et al. Flexible wall panel assembly technology[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2013, 56(12): 44-47.

[3] 吴静.自动钻铆机实现机翼壁板的自动钻铆研究[D].西安:西北农林科技大学,2017.

WU Jing. Research on automatic drilling and riveting of wing wall panel by automatic drilling and riveting machine[D]. Xi'an: Northwest Agricultural and Forestry University, 2017.

[4] 刘连喜,李西宁,王仲奇,等.无头铆钉自动钻铆工艺试验研究[J].西北工业大学学报,2013,31(1):77-82.

LIU Lianxi, LI Xining, WANG Zhongqi, et al. Experimental study on automatic drilling and riveting technology of headless rivets[J]. Journal of Northwest University of Technology, 2013, 31(1): 77-82.

[5] 殷俊清,王仲奇,康永刚,等.自动钻铆环境下铆接工艺研究[J].航空制造技术,2014,57(1/2):79-83.

YIN Junqing, WANG Zhongqi, KANG Yonggang, et al. Research on riveting technology in the environment of automatic drilling and riveting[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2014, 57(1/2): 79-83.

[6] 张杨,高明辉,周万勇,等.自动钻铆系统中工业机器人协同控制技术[J].航空制造技术,2013,56(20):87-90,94.

ZHANG Yang, GAO Minghui, ZHOU Wanyong, et al. Research on collaborative control technology of industrial robots in automatic drilling and riveting system[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2013, 56(20): 87-90, 94.

[7] 齐振超,张开富,李原,等.大型壁板自动钻铆定位误差分析与优化[J].航空学报,2015,36(10):3439-3449.

QI Zhenchao, ZHANG Kaifu, LI Yuan, et al. Analysis and optimization of positioning error of automatic riveting for large wall drilling[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2015, 36(10): 3439-3449.

[8] 俞鸿均.面向自动钻铆机的飞机柔性工装设计技术研究[D].沈阳:沈阳航空航天大学

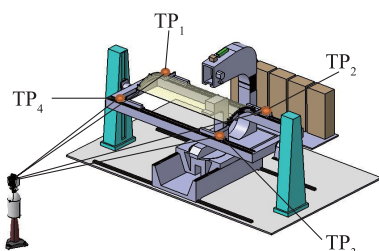


图10 测量基准点分布与仿真

Fig.10 Distribution of measurement datum points

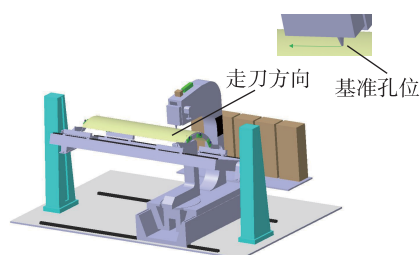


图11 自动钻铆仿真

Fig.11 Automatic drilling and riveting simulation

天大学, 2016.

YU hongjun. Research on aircraft flexible tooling design technology for automatic drilling and riveting machine[D]. Shenyang: Shenyang Aerospace University, 2016.

[9] 王少锋, 张进华, 刘志刚, 等. 大型飞机机身壁板装配位姿调整系统的运动规划[J]. 西安交通大学学报, 2011, 45(3):

102-106.

WANG Shaofeng, ZHANG Jinhua, LIU Zhigang, et al. Motion planning of position adjustment system for large aircraft fuselage panel assembly[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2011, 45(3): 102-106.

[10] 王仲奇, 殷俊清, 康永刚. 飞机自动钻铆仿真技术[J]. 航空制造技术, 2008,

51(20): 44-47.

WANG Zhongqi, YIN Junqing, KANG Yonggang. Aircraft automatic drilling and riveting simulation technology[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2008, 51(20): 44-47.

通讯作者: 王巍, E-mail: wwsh595@163.com。

## Application of Automatic Drilling Riveting Technology on Fuselage Panel

WANG Wei, WANG Chengxin, ZHOU Tianyi

(Aerospace Engineering College, Shenyang Aerospace University, Shenyang 110136, China)

**[ABSTRACT]** The fuselage panel is an important component of aircraft. Assembly process of fuselage panel directly affects aircraft aerodynamics and aircraft life. In this paper, the application process of automatic drilling and riveting technology on fuselage panel is briefly analyzed. First of all, the assembly process of fuselage panel was studied; then the structure and working principle of automatic drilling and riveting machine were analyzed, and the automatic drilling and riveting machine oriented flexible fixture was designed; finally, on-line measurement technology in the process of drilling and riveting was analyzed, and automatic drilling and riveting process of fuselage panel was simulated.

**Keywords:** Fuselage panel; Assembly process; Tooling design; Automatic riveting; On-line measurement technique

(责编 铃兰)

(上接第42页)

Technology, 2015, 35(5): 35-38.

[9] 张靛, 李明, 郁菁菁, 等. 物体空间动态测量方法研究 [J]. 机械制造, 2007, 45(12): 54-56.

ZHANG Liang, LI Ming, YU Jingjing, et al. Study on dynamic mesurement method

of object in space[J] Machinery, 2007, 45(12): 54-56.

[10] 刘霜. 工业现场新型 6D 大尺寸自动化测量技术 [J]. 航空制造技术, 2012, 55(11): 100-101.

LIU Shuang. New 6D automatic

measurement technology for large-scale work field[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2012, 55(11): 100-101.

通讯作者: 梁雪梅, E-mail: 13693600725@163.com。

## Real-Time Acquisition Method of Flexible Positioning Tooling Unit in Aircraft Assembly

LIANG Xuemei, LI Guangli

(AVIC Manufacturing Technology Institute, Beijing 100024, China)

**[ABSTRACT]** During some of the aircraft components assembly process, the flexible positioning tooling unit (tooling unit) is composed of a parallel mechanism. The pose of the aircraft component is determined by poses of the moving platforms of the tooling units. The differences between current rod lengths and object rod lengths of a unit can be calculated in real time by the current pose of the moving platform. These differences can direct the tooling unit to be adjusted to the object pose quickly, therefore the aircraft component arrives the object pose. A method was presented to obtain the real time pose of mobile platform of the tooling unit by using laser tracker and its STS six dimensional sensor (6D-Device). The working principles of tooling unit and 6D-Device were researched. The pose of 6D-Device was obtained by software interface, the pose matrix of the 6D-Device and the moving platform were derived by the pose. Experiment scheme was designed and the correctness of the algorithm was verified by experiments.

**Keywords:** Aircraft assembly; 6D measurement; Parallel mechanism; Flexible tooling positioning unit ; Laser tracker

(责编 铃兰)