

# 基于 PLC 的飞机翼类结构件柔性夹具设计\*

高升<sup>1</sup>,王细洋<sup>2</sup>,黄琦<sup>1</sup>

(1. 南昌航空大学航空制造工程学院,南昌 330063;

2. 南昌航空大学飞行器工程学院,南昌 330063)

**[摘要]** 针对航空领域中翼类结构件的高速铣削加工,提出一种干涉小、柔性高、换装快速、自动化程度较高的夹具设计方案。详细论述了该夹具系统的组成、原理以及 PLC 控制程序。采用可调式定位板定位、回转夹紧气缸夹紧,利用传感器感知、PLC 控制以实现电磁阀有序动作、工件可靠夹紧,解决传统装夹中原材料浪费和加工过程中机床刀具与夹具的干涉问题。编制了相应控制程序并调试成功。该夹具设计方案为飞机结构件实际生产和程序控制自动化夹具设计提供了有效的参考依据。

**关键词:** 飞机翼类结构件; 高速铣削; 刀具干涉; PLC 控制; 柔性夹具设计

## Design of Flexible Fixture for Wing Structure of Aircraft Based on PLC

GAO Sheng<sup>1</sup>,WANG Xiyang<sup>2</sup>,HUANG Qi<sup>1</sup>

(1. College of Aeronautical Manufacturing Engineering, Nanchang Hangkong University, Nanchang 330063, China;

2. College of Aircraft Engineering, Nanchang Hangkong University, Nanchang 330063, China)

**[ABSTRACT]** Aiming at the high speed milling of the wing structure in the aviation field, a fixture design scheme with small interference, high flexibility, fast changing and high automation is proposed in this paper. The composition, principle and PLC control program of the fixture system is discussed in detail. In order to solve the problem that the waste of raw materials in the traditional folder and interference between machine tool and fixture in processing, adjustable positioning plate positioning, rotary clamping cylinder clamping, the use of sensor perception, PLC control achieve the electromagnetic valve orderly action and the workpiece reliable clamping in this paper. Correspondingly, the PLC control program is edited successfully. The fixture design can be used in the actual production of the aircraft structural components and the design of the automatic control fixture.

**Keywords:** Aircraft wing structure; High-speed milling; Cutter interference; PLC control; Flexible fixture design

**DOI:**10.16080/j.issn1671-833x.2019.10.093

飞机翼类结构件是飞机结构件中维持翼面形态,传递气动载荷,悬挂部件,承受集中载荷,提供升力的重要组成<sup>[1]</sup>。其特殊功能对形位精度、表面质量、载荷能力要求较高,且具有工艺性能差、易发生变形、精度难以控制的基本特点<sup>[2]</sup>。飞机翼类结构件的夹具设计对其制造精度、使用性能影响很大。

传统的飞机翼类结构件夹具设计中,常采用位置固定的定位元件定位,螺钉压板进行夹紧。对于刚度差的薄壁件常用预留工艺凸台的办法进行加工。由于柔性低,精度差,材料浪费大,加工过程存在干涉,组合夹具和专用夹具的设计使用逐步将其取代。组合夹具柔性

高,可以对多种工件进行装夹,可循环使用,但成本巨大,且多次使用后组合夹具本身精度降低,累计误差加大<sup>[3]</sup>。专用夹具能有效提高结构件加工质量,然而也会产生夹具数量过多、适用面窄、难以管理等问题<sup>[4]</sup>。

目前,“中国制造 2025”逐步推进,更高水平的自动化技术和自动化装备大范围投入到实际生产过程中。利用 PLC 以及现代智能元件,一些企业实现生产设备的自动化,产品加工迅速,产量明显提高<sup>[5]</sup>。刘本刚等<sup>[6]</sup>将 PLC 技术应用到高档机床主轴上,实现了主轴的自动换挡功能。曾燕飞等<sup>[7]</sup>在三面铣组合机床上利用 PLC 设计电气控制系统,提高了加工效率。飞机结构件的夹具设计高柔性、高精度、高自动化的发展方向日益明显。赵亮<sup>[8]</sup>将 PLC 应用到大型航空整体结构件的夹具中,

\* 基金项目: 武装预研基金(AA201506033)。

实现了加工过程避让刀具的功能,但是夹具整体柔性程度较低,适用面窄。张国政等<sup>[9]</sup>成功将 PLC 应用到联轴器零件的夹具设计中,简化了工步,生产效果显著,自动化程度高,但是只适用于特定工件。Du 等<sup>[10]</sup>对于不规则的平面工件设计了可编程的自动柔性夹具,柔性大、夹紧效率高,但定位精度低,易产生加工误差。刘众<sup>[11]</sup>对多工位组合钻床设计了 PLC 控制的专用夹具,提高了生产效率及夹具自动化水平,但属于专用夹具范围。本文分析了飞机翼类结构件工艺特性,设计了翼类结构件柔性夹具,以 PLC 为控制基础,融合现代智能元件规划了夹具气动回路,可以提高自动化装夹的水平、产品生产率,缓解工人劳动强度、减少加工工时、降低加工成本。

### 1 飞机翼类结构件工艺分析

飞机翼类结构件的毛坯材料一般多选用性能优越,质量较轻的航空铝合金、钛合金或者复合材料<sup>[12]</sup>,本文结构件材料选用钛合金,毛坯成型方法为精密模锻成型。工件尺寸 500~800mm,质量在 120~250kg,单面加工余量为 3~4mm。飞机翼类结构件机械加工方式主要是铣削加工,其结构特征是在铣床上从整块毛坯件逐步控制成形<sup>[13]</sup>。基于材料性质,普通机床加工效率低,易产生高切削力和切削热,刀具寿命会因此急剧降低,机床的加工能力不能得到充分发挥,故需要在高速铣床上采用加强刃的 PCD 刀具完成相应的机加工,刀具前角采用 5°~15°,后角采用 8°~15°。铣削要素采用高切削速度、中进给速度、小切削深度。铣削方式采用顺铣,缓慢切入工件,以降低切削热并减小径向力。起刀点选在翼类结构件的翼端位置(图 1)。

如图 1 所示,飞机翼类结构件图上具有复杂的腔槽、筋和减轻孔等特征。工序安排为先铣外轮廓→粗铣平面→精铣平面→粗铣腔槽→精铣腔槽→铣筋→铣减轻孔→去毛刺。铣平面时注意走刀路径的选定,避免空刀过多,耗费工时。铣腔槽时,采用行切法和环切法组

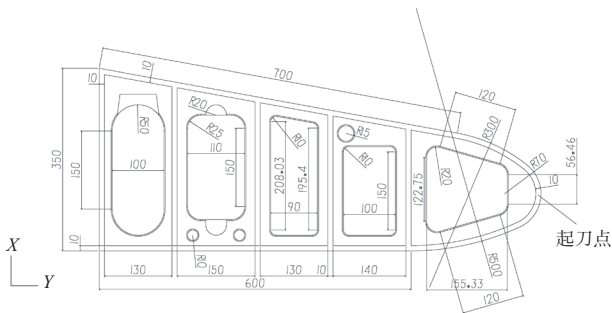


图1 飞机翼类结构件尺寸简图

Fig.1 Aircraft wing structure dimensions diagram

合的混合铣削方式。由于腔槽铣削加工,筋的侧面以及约束面已经被顺带加工成形,故而加工筋特征时只要加工顶筋面的圆弧倒角特征。外轮廓和减轻孔的铣削加工在其他工位完成加工。该结构件采用大平面定位限制  $\bar{Z}$ 、 $\bar{X}$ 、 $\bar{Y}$  3 个自由度,侧边定位板限制  $\bar{Y}$ 、 $\bar{Z}$  两个自由度,可调式定位板限制  $\bar{X}$ 、 $\bar{Z}$  3 个自由度,为过定位,符合模锻后外轮廓铣削完成的精度较高的机加工,夹紧元件采用回转夹紧气缸夹紧。此结构件具有 5 个腔槽,材料去除率大,要求在加工过程中夹紧单元能够避免走刀路径以保证铣削过程连续。

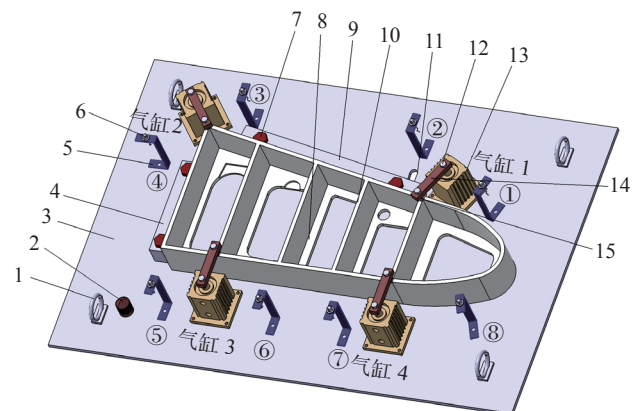
### 2 柔性夹具系统方案

#### 2.1 柔性夹具系统的结构组成

针对上述飞机翼类结构件,设计了如图 2 所示的 PLC 控制的柔性夹具系统。该夹具系统主要分为机械部分和气动控制部分。机械部分主要包括工件、底板、起吊螺钉、对刀仪、回转夹紧气缸、气缸紧固螺栓、定位块、定位块螺栓,主要实现工件的定位和夹紧;气动控制部分主要包括气源装置、导气管、接近开关、托架、位置检测传感器、单向阀、节流阀、两位四通电磁换向阀以及 PLC 控制器相关组件,主要实现信号检测、回路供给、气缸动作,其中与机床连接部件图 2 中未体现。

#### 2.2 柔性夹具系统的功能原理

飞机翼类结构件具有不同倾斜面,传统夹具对此特征缺乏系统办法,常产生基准不重合误差。为适应多种翼类结构件机加工,在夹具底板上设计有刻度线的圆环槽(图 2),角度范围为 0°~15°。为检测工件是否进入工位,在工位处底板上嵌入位置检测传感器。回转夹紧气缸内部存在导程,在抬起和回落时会旋转一定角度,因



1—起吊螺钉;2—对刀仪;3—底板;4—定位板;5—传感器托架;6—接近开关;7—定位板螺栓;8—位置传感器;9—可调定位板;10—工件;11—带刻度圆环槽;12—夹紧臂螺栓;13—回转夹紧气缸;14—夹紧臂;15—夹头

图2 飞机翼类结构件夹具总装图

Fig.2 Aircraft wing structure of fixture assembly diagram

此,在放松和夹紧工件时也避让刀具路径。工件定位后,气缸夹头长度调整至回落时充分夹紧工件表面。依据高速铣削钛合金材料的轴向力和径向力大小,设计时选用的气缸,能够保证在一个气缸避让刀具时,其余气缸仍可靠夹紧结构件,不会引起工件松动而产生加工误差及刀具损坏。在图2所示的4个特定位置安装气缸,为了检测铣刀位置,提供电平信号至PLC程序控制器,气缸左右特定距离分别布置两个接近开关,共计8个。

飞机翼类结构件为钛合金材料,槽腔边缘设计厚度为10mm,具备较高强度、韧性,所以夹头部位夹紧点始终在顶筋面面积较大位置且不导致工件变形(图3)。基于定位板的安装位置以及工件加工所需的力平衡。夹具系统中,起吊螺钉,便于夹具吊装;对刀具便于机床铣刀快速定位对刀,减小刀具误差。

上位机编译PLC程序成功后,控制器接收夹具系统中位置传感器和接近开关电信号,输出一系列动作指令,规定气缸动作,实现自动夹紧、快速换装、避让刀具的功能。本文设计中使用的PLC程序控制器为西门子公司的S7-200系列,该控制器结构简单、指令丰富、易

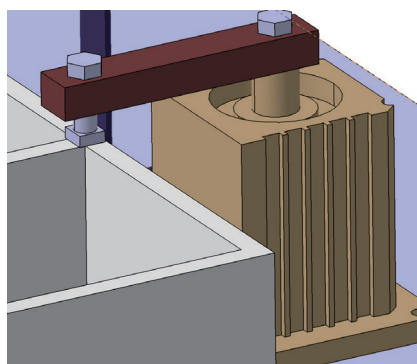


图3 夹头局部放大图

Fig.3 Partial enlarged diagram of chuck

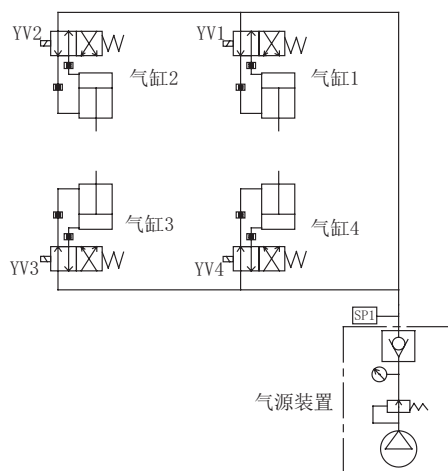


图4 夹具系统气动原理图

Fig.4 Pneumatic schematic diagram of fixture system

于编程,可以单机运行和拓展其他模块。

### 2.3 柔性夹具系统的气动设计

根据各气缸动作顺序和安装位置,设计如图4所示的气动原理图,主要部件为气泵、回转夹紧气缸、两位四通电磁换向阀、单向阀、节流阀、气压表、减压阀。设计选用的气源装置为提供足够压力。通过电磁换向阀控制导管中气压的方向,从而控制气缸的抬起和回落。该系统要求运行平稳,冲击较小,节流阀的使用可以满足设计要求。此外,选用单向阀起保压和支撑作用,选用气压表可方便调节预定气压大小。气动控制清洁高效、便于操作、成本低。

## 3 PLC控制系统

### 3.1 系统控制要求

首先,位置检测后,按下启动按钮后快速夹紧工件;其次,在加工过程中,准确消除特定位置处刀轨干涉;最后,按下停止按钮,快速松开工件。该PLC控制系统的信号采集、数据计算、指令传输均由位置传感器、接近开关、PLC控制器联合完成,不依赖数控机床,减少机床计算负荷,各部件可多次拆卸组合使用,装备经济成本低,系统本身便于改进。

### 3.2 夹具动作流程

夹具系统的动作流程如图5所示,包括了工件吊装、位置检测、工件定位、工件夹紧、工件加工等多个步

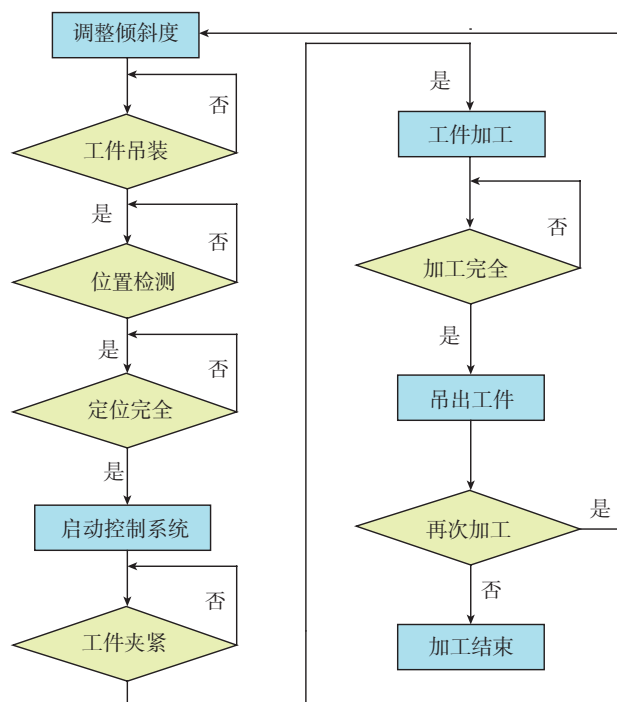


图5 动作流程图

Fig.5 Action flow diagram

骤。具体说明如下：

(1) 根据翼类结构件倾斜面角度, 调整定位板倾斜角度。

(2) 工件吊装进入工位, 位置检测传感器响应, 定位工件。

(3) 打开气泵, 按下启动按钮, 全部回转夹紧气缸同时夹紧工件。

(4) 启动机床, 机床对刀完毕进入起刀点, 按逆时针方向加工。接近开关传输信号, PLC 控制电磁阀动作, 使得气缸回转抬起放松工件, 让出铣刀路径, 回落时重新夹紧工件。

(5) 当机床铣削加工完毕回至起刀点, 机床主轴抬起, 按下 PLC 夹具系统停止按钮, 回转夹紧气缸全部回转抬起, 吊出工件, 等待再次加工。

### 3.3 PLC控制系统的接口分配、接线及控制程序

根据该 PLC 控制系统的硬件选择, 确定输入输出设备, 分配 I/O 接口, 具体分配如表 1 所示。并且给出了 PLC 接口的接线图(图 6)。

分解加工过程夹具动作, 采用了步的编程方式, 步的划分如图 7 所示。经验证, 编写正确且能够实现规定动作。

表1 输入输出划分及I/O口分配表

Table 1 Input/output and I/O part distribution table

序号	信号方式	信号地址	设备代号	设备名称	注释
1		I0.0	S0	传感器	检测工位有无工件
2		I0.1	S1	接近开关①	回转夹紧气缸 1 复位信号
3		I0.2	S2	接近开关②	回转夹紧气缸 1 置位信号
4		I0.3	S3	接近开关③	回转夹紧气缸 2 复位信号
4		I0.4	S4	接近开关④	回转夹紧气缸 2 置位信号
6	输入设备	I0.5	S5	接近开关⑤	回转夹紧气缸 3 复位信号
7		I0.6	S6	接近开关⑥	回转夹紧气缸 3 置位信号
8		I0.7	S7	接近开关⑦	回转夹紧气缸 4 复位信号
9		I1.0	SB1	启动按钮	启动信号
10		I1.1	S8	接近开关⑧	回转夹紧气缸 4 置位信号
11		I1.2	SB2	停止按钮	停止信号
12		Q0.1	YV1	电磁换向阀 1	回转夹紧气缸 1 动作
13	输出设备	Q0.2	YV2	电磁换向阀 2	回转夹紧气缸 2 动作
14		Q0.3	YV3	电磁换向阀 3	回转夹紧气缸 3 动作
15		Q0.4	YV4	电磁换向阀 4	回转夹紧气缸 4 动作

## 4 结论

主要研究了 PLC 气动控制在航空制造技术领域飞机翼类结构件的铣削加工的应用。飞机翼类结构件材料昂贵, 难以加工, 精度要求高, 寿命使用严格, 机加工效率低。针对该结构件的结构特征的高速数控铣削加工。

(1) 分析了飞机翼类飞机结构件加工工艺, 研究了该结构件的结构特征。

(2) 设计了基于 PLC 控制的柔性工装夹具, 成功编译 PLC 程序, 实现自动夹紧和避让动作, 在一定程度上

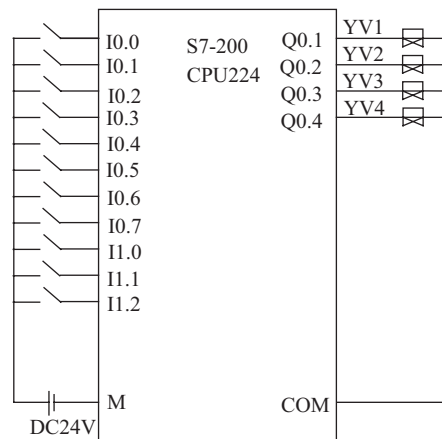


图6 S7-200 PLC接线图

Fig.6 S7-200 PLC wiring diagram

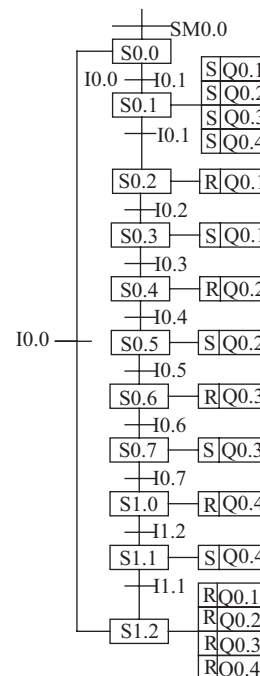


图7 PLC程序步划分

Fig.7 PLC step division

体现了夹具的柔性,解决机加工过程刀具与夹具的干涉问题,夹具自动化水平得到提升,减少了工作量和加工准备时间,提高了产品生产率。

(3)为其他飞机结构件的机械加工自动化夹具设计提供了参阅价值。但是本设计中也存在着一定不足,例如夹紧力的大小依然根据经验所定,没有数字化的精确控制。夹头结构柔性较低,需要进一步改进。接下来的工作就以上所述方面问题开展相关科研努力。

### 参考文献

- [1] 王向明,刘文琰.飞机钛合金结构设计与应用[M].北京:国防工业出版社,2010.
- WANG Xiangming, LIU Wenting. Structural design and application of aircraft titanium alloy[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2010.
- [2] LI Y, LIU C, HAO X, et al. Responsive fixture design using dynamic product inspection and monitoring technologies for the precision machining of large-scale aerospace parts[J]. CIRP Annals-Manufacturing Technology, 2015, 64(1): 173-176.
- [3] 李娟,刘洪伟.柔性制造系统中组合夹具在制造业中的应用[J].重型机械科技,2007(1): 51-52.
- LI Juan, LIU Hongwei. Application of combined fixture of flexible manufacturing system in manufacturing industry[J]. Heavy Machinery Technology, 2007(1): 51-52.
- [4] 张广胜.专用夹具设计及其应用[J].硅谷,2012(18): 159.
- ZHANG Guangsheng. Special fixture design and application[J]. Valley, 2012(18): 159.
- [5] LIU L P. Application of PLC technology in the control system of plate shearing machine[J]. Applied Mechanics and Materials, 2013, 312: 777-781.
- [6] 刘本刚,刘天冬,王碧玲.高档机床主轴自动换挡 PLC 控制及实现[J].航空制造技术,2016,59(1/2): 120-123.
- LIU Bengang, LIU Tiandong, WANG Biling. Realization of high-grade spindle automatic shift by PLC control[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2016, 59(1/2): 120-123.
- [7] 曾燕飞,李虎山.基于 PLC 的三面铣组合机床电气控制系统设计[J].组合机床与自动化加工技术,2010(1): 44-46.
- ZENG Yanfei, LI Hushan. Design of electrical control system for three-face milling machine based on PLC[J]. Modular Machine Tool & Automatic Manufacturing Technique, 2010(1): 44-46.
- [8] 赵亮.大型航空结构件加工自动避让夹具系统研究[D].大连:大连理工大学,2016.
- ZHAO Liang. Research on automatic avoidance fixture system for large-scale aerospace structural parts processing[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2016.
- [9] 张国政,刘有余. PLC 控制的多工序气动夹具设计[J].机床与液压,2012,4(6): 40-44.
- ZHANG Guozheng, LIU Youyu. Design of multi-stage pneumatic fixture controlled by PLC [J]. Machine Tool and Hydraulics, 2012, 4(6): 40-44.
- [10] DU H, LIN G C I. Development of an automated flexible fixture for planar objects[J]. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 1998, 14(3): 173-183.
- [11] 刘众.多工位组合钻床的夹具设计及 PLC 控制[D].锦州:辽宁工业大学,2015.
- LIU Zhong. Fixture design of multi-position combination drilling and PLC control [D]. Jinzhou: Liaoning University of Technology, 2015.
- [12] 王细洋.现代制造技术[M].北京:国防工业出版社,2010: 8-9.
- WANG Xiyang. Modern manufacturing technology [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2010: 8-9.
- [13] 王细洋.飞机结构件的高速铣削工艺[J].航空制造技术,2013,56(14): 64-69.
- WANG Xiyang. High-Speed milling process of aircraft structural part [J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2013, 56(14): 64-69.
- 通讯作者:王细洋,博士、教授,研究方向为数控加工、工装设计、高速切削飞机结构件数控加工及过程监控,E-mail: 838796648@qq.com.
- (责编 大漠)
- (上接第 92 页)
- [D].杭州:杭州电子科技大学,2016.
- WU Shengyou. Research on fracture mechanism of ultrasonic cutting for NOMEX honeycomb composites[D]. Hangzhou: Hangzhou Dianzi University, 2016.
- [19] 柯映林,金成柱,刘刚. NOMEX 蜂窝芯高速铣削加工工艺的优化[J].中国机械工程,2006,17(12): 1299-1302.
- KE Yinglin, JIN Chengzhu, LIU Gang. Optimization of high-speed milling process for NOMEX honeycomb[J]. China Mechanical Engineering, 2006, 17(12): 1299-1302.
- [20] 李杰. NOMEX 纸基蜂窝材料的组合铣刀高速铣削研究[D].大连:大连理工大学,2012.
- LI Jie. Research on high-speed milling NOMEX paper-based honeycomb material with interlocked cutter[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2012.
- [21] 刘望子,管海新,许漂,等.一种提高双型面全尺度蜂窝成型精度的工装:CN206536228U[P].2017-10-03.
- LIU Wangzi, GUAN Haixin, XU Piao, et al. Improve frock of dimorphism face full-scale honeycomb moulding precision: CN206536228U[P]. 2017-10-03.
- 通讯作者:刘望子,硕士,工程师,研究方向为复合材料,E-mail: wangziliu\_87@163.com.
- (责编 大漠)