

# 飞机结构件反拉式工装研究应用

陈代鑫,程学森,唐 帅,丛一平,幸 伟,史 磊,曾金华

(航空工业成都飞机工业(集团)有限责任公司,成都 610092)

**[摘要]** 鉴于国内航空产业迅猛发展前景,不断研究飞机结构件的高效加工工艺方法是提升企业竞争力的重要手段之一。针对预拉伸板类典型飞机结构件加工,提出了基于嵌入式和单元式的反拉工装设计方案,总结了此类方案的高效工艺方案,并对典型零件进行了加工验证,试验结果显示:反拉类通用工装在工装管理、装夹效率等方面都体现出了一定的优势,在航空结构件的加工中具有非常好的推广应用价值。

**关键词:** 反拉方式;通用工装;嵌入式;单元式;高效工艺

## Research and Application on Reverse Direction Clamping of Aircraft Structural Parts

CHEN Daixin, CHENG Xuesen, TANG Shuai, CONG Yiping, XING Wei, SHI Lei, ZENG Jinhua

(AVIC Chengdu Aircraft Industrial (Group) Co., Ltd., Chengdu 610092, China)

**[ABSTRACT]** Research on high performance machining plans on aircraft part is one of most significant methods based on the rapid growth of aviation industry. This paper proposes new fixture designs, which are based on the viewpoint of embedded and unit modes, to solve machining efficiency of typical part. A complete solution is given in this paper, and typical parts have been manufactured to validate the feasibility. It can be proved from the experimental results that this new method has a certain advantage in the aspects of fixture management and clamping efficiency, and also has high value of applications.

**Keywords:** Reverse direction clamping; General tooling; embedded mode; Unit mode; High efficiency process

**DOI:**10.16080/j.issn1671-833x.2019.06.091

飞机结构件的材料类型主要有铝合金、钛合金、不锈钢、超高强度钢及复合材料等,其结构类型主要有框、梁、肋、壁板、接头以及回转构件等,其中大部分金属材料结构件都需要通过数控铣削方式进行加工,且其毛坯形式大多是预拉伸板。面对当前航空产业迅速发展的新机遇,对飞机结构件制造企业的高效加工能力提出了很高的要求,企业必须不断改进工艺方法,寻求更加高效的工艺方案以提高生产效率,才能满足市场需求<sup>[1]</sup>。

针对毛坯形式为预拉伸板的飞机结构件加工,常用到大量的专用加工工装,工装的结构形式主要以垫板为主,垫板上的压紧方式一般使用螺钉,即在垫板上镶嵌螺纹钢衬套;其次在待加工零件毛坯部位钻出通孔,使用螺钉逐个穿过通孔并与垫板上的螺纹钢衬套链接,实现压紧功能。这类工装的不足之处在于:因工装由垫板、衬套、螺栓等多部分组成,导致其制造成本较高,当衬套损坏时更换非常困难,并且分离的工装附件同时带来管理维护的成本增高;其次,正向压紧的方式导致零件毛坯需预留较大的面积,使零件的毛坯面积进一步增大,提高了材料成本,从而导致加工成本不

断提高<sup>[2-3]</sup>。

本文结合一种新型的反拉方式,改善了上述正向压紧式工装存在的不足,并开展了通用性夹具的创新设计,总结了一套适用于飞机结构件的高效数控铣削工艺方案,并开展了相应的试验验证。

## 1 常见反拉方式介绍

### 1.1 嵌入式反拉工装设计

传统的正向压紧工装一般是在铝合金工装主体上制造出等距排列的底孔,在底孔上嵌入钢质螺纹衬套。在待加工零件毛坯上制出通孔,再通过螺钉穿过待加工零件上的通孔实现正向压紧<sup>[4]</sup>。

嵌入式反拉工装与正向压紧工装的主要区别在于将螺钉与工装主体设计为一体式结构,即螺钉镶嵌在工装基础板中并可实现与工装基础板不分离。如图1所示,其中反拉通用工装主体上还包括用于连接通用工装主体与机床工作台的压紧结构、用于快速在机床工作台上定位反拉通用工装主体的定位孔、用于穿过反拉螺钉的通孔,在通孔中嵌入反拉单元<sup>[5]</sup>。

反拉式工装主体尺寸可根据机床的工作台面大小进行调整设计,以适应不同机床的加工需求;主体上的通孔排列间距及数量根据该机床适合加工的零件种类设计为固定值,一般为 50mm 均布,以满足不同尺寸零件的压紧需求,起到通用的目的。

反拉单元的结构及工作原理如图 2 所示,主要结构包括反拉螺钉、垫片、压缩弹簧和反向扣盖。当反拉通用工装处于自由状态下时,反拉单元中的反拉螺钉依靠压缩弹簧的顶紧力,螺纹部分能完全伸出工装主体,且反拉螺钉伸出工装主体的长度为固定值,如图 2 (a) 所示状态;当有工件放在反拉通用工装主体上表面时,反拉单元中的反拉螺钉依靠工件的重力能被完全压入反拉单元中,不影响工件定位,如图 2 (b) 所示状态;反拉螺钉头顶部还有标准内六角槽结构,以便使用标准内六角扳手放入内六角槽中旋转反拉螺钉,使反拉螺钉与工件上的螺纹底孔紧密配合,拉紧零件,如图 2 (c) 所示状态。

该反拉通用工装主要适用于一次性装夹能完成加工的零件,针对飞机梁、肋等单面特征的单件或是套裁加工。将待加工零件安装在工装主体上,将对应位置的螺钉拉紧,因零件一次装夹就完成加工,因此可以不设计定位销进行精确找正,粗找正原点后,螺钉拉紧零件即可进行加工。

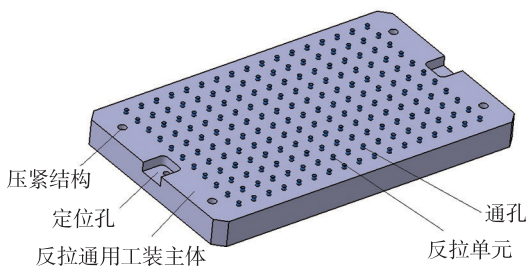


图1 典型工装结构示意图  
Fig.1 Typical diagram of fixture structure

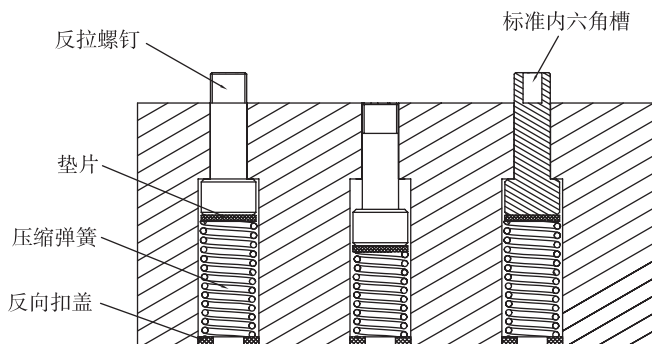


图2 反拉结构工作原理图  
Fig.2 Working principle of fixture structure

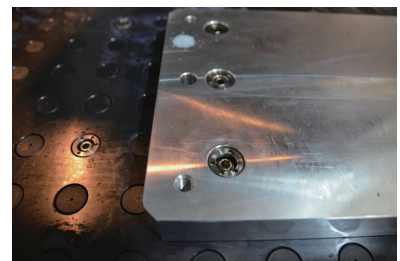
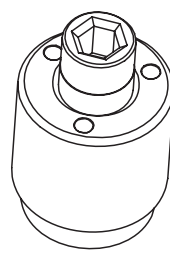
## 1.2 单元式反拉工装设计

单元式反拉工装相较于嵌入式反拉工装,其主要区别在于将反拉单元设计为独立的元器件,可以在不移动工装主体的前提下实现反拉单元的安装、拆卸及更换,因此可以将工装制造、维护成本都能控制得更低。其主要结构与嵌入式相似,并通过螺纹实现与工装主体间的连接,其结构示意图如图 3 (a) 所示。该单元装夹在基础板上后效果如图 3 (b) 所示。

单元式反拉单元已有商品化产品可直接购买(如 ELIJAH Tooling),同时根据该原理市场上也有其他开发或改进的产品。其在工装设计时具有更高的灵活性,采取不同的设计方案可以适应不同的工艺方案,主要体现在:

(1) 在工装主体上设计等距排列的反拉单元安装孔系,在加工时仅在零件对应孔位安装反拉单元即可实现零件的装夹。该方式具有较强通用性,使用范围与嵌入式相同。

(2) 在工装主体上再设计一块转接板,零件装夹在转接板上加工。该方式主要考虑了机外装夹需求,将零件在机床装夹在转接板上后,再安装在工装主体上,进一步减少占机时间,提高主轴利用率。其次,还可以根据不同零件类型设计不同的转接板,从而实现多品种的柔性装夹和加工,如图 4 所示。



(a) 结构示意图 (b) 基础板效果

图3 单元结构示意图  
Fig.3 Typical structure of fixture unit

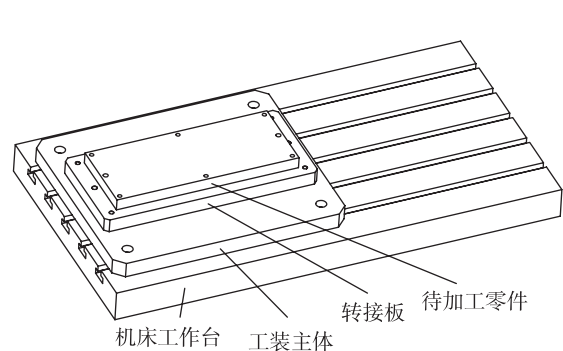


图4 带转接板的反拉工装结构图  
Fig.4 Typical fixture structure with a conversion device

### 1.3 反拉工装的优劣势分析

反拉工装在预拉伸板类航空结构件上具有非常广阔的推广应用前景,其优势主要体现在以下4个方面:

(1)装夹效率提升:传统螺钉压紧/压板压紧方式较为粗放,效率偏低,而采用反拉螺钉单元方式其装夹效率能提升明显。特别当零件轮廓尺寸增大,使用的螺钉/压板增多时,装夹效率提升更为明显。

(2)工装附件管理提升:传统螺钉/压板压紧方式,螺钉/压板与工装主体是分离的,螺钉/压板可能出现遗失等情况,管理相对繁琐,而且当螺纹出现磨损时,需要更改主体上的螺纹钢衬套及螺钉,成本较高;采用反拉螺钉方式,螺栓单元与工装主体是一体的,管理简单,如螺纹磨损只需要取出反拉单元进行更换即可,更换简单,成本较低。

(3)机加工工艺可实现标准化:采用等距排列的通用反拉板,可以使用多种零件在工装上的通用性装夹,使得工艺流程更加标准,装夹流程更加简化。

(4)减少加工中的潜在干涉:采用传统螺钉/压板方式,在设计工艺方案及刀具轨迹时必须考虑螺钉/压板与刀具之间的干涉,编程时必须进行避让,以减少质量隐患,而采用反拉螺钉则可避免该问题,刀具轨迹更加简洁及高效。

同时,该方式同样存在一定的局限性,主要体现在:该方式较适合于铝合金板材类零件,且板材厚度必须控制在一定范围内,对于厚板材、或难加工材料零件的通孔螺纹加工质量难以保证。

## 2 典型工艺流程及试切验证

### 2.1 典型工艺流程

配合反拉类工装及其他配套装夹方案的应用,将典型零件的工艺流程整理为以下两类:

#### 2.1.1 适用于小型结构件的典型工艺流程

小型飞机结构件轮廓尺寸一般在350mm以下,主要以肋/角盒类零件为主。结合小结构件常用的虎钳装夹方式,可将虎钳与反拉工装同时放在机床工作台上,实现工序流转。该类零件的典型工艺流程可归纳如下:

(1)修毛坯对侧面,保证平行度。

(2)虎钳装夹对侧面,修上表面、钻螺纹通孔、定位孔、粗精铣第1面。

(3)反拉工装装夹,粗精铣第2面。

#### 2.1.2 适用于中大型结构件的典型工艺流程

中大型飞机结构件轮廓尺寸一般在350mm以上,主要以框、梁类零件为主。该类零件不适宜采用虎钳装夹方式,其典型工艺流程可归纳如下:

(1)毛坯垫高,使用侧面顶紧,修毛坯上表面,钻螺

纹孔、定位孔。

(2)反拉工装定位装夹零件,粗精铣第1面。

(3)反拉工装定位装夹零件,粗精铣第2面。

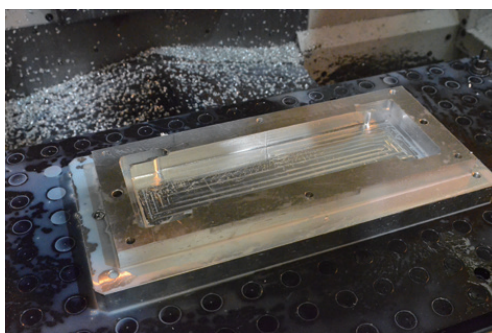
### 2.2 零件试切验证

为验证上述工艺方案,选取典型零件进行了试切验证,如图5所示。材料为7050-T7451铝合金预拉伸板,零件结构类型为短梁和肋类零件,毛坯尺寸分别为470mm×190mm×30mm和330mm×160mm×30mm。

试验过程主要针对反拉方式的装夹过程、可行性进行验证,并与传统螺钉压紧/压板压紧方式进行对比。试验采用了基于单元式的孔系反拉通用工装作为基础板,通过在基础板上增加转接板进行装夹对短梁类零件进行了试切,通过直接在基础板上装夹对肋类零件进行了试切加工。零件装夹工具采用传统的六方扳手。

试切结果显示,在装夹效率提升方面确实能体现出前文所述的优势,传统单个螺钉/压板装夹时间约30s,采用反拉螺钉单元单个螺钉的装夹时间约10s,装夹效率提升明显。采用转接板后更可实现机外装夹,进一步缩短占机时间,提高主轴利用率。其次,在工装吊装、拆卸及清理铝屑过程中,作为整体的反拉工装与传统的分离式工装比较,现场机床操作者对此反馈效果较好。

同时发现,在以下方面改善能更好的提高反拉方式的应用效果:首先是工艺标准化的贯彻执行,即将基础



(a) 典型梁类零件加工效果图



(b) 典型肋类零件加工效果图

图5 典型零件加工效果图

Fig.5 Processing results of typical parts

板作为附件长期放置在机床台面,而对应的零件应全部按照该方式进行工艺标准化改进,统一定位原点及压紧孔位,这样能实现不同零件的高效更换。其次,装夹辅助工具采用电动、低转速六方扳手替代手动扳手能进一步缩短装夹时间。

### 3 结论

本文结合一种新型的反拉方式,分别提出了嵌入式和单元式的反拉通用工装设计方案,总结了一套适用于飞机结构件的高效数控铣削工艺方案,并针对典型航空结构件进行了加工验证,试验结果显示,反拉类通用工装在工装管理、装夹效率等方面都体现出了一定的优势,可以在航空结构件的加工中进行推广应用。成飞公司已在试验加工的基础上针对肋类零件进行了初步工程化应用,在装夹效率提升、毛坯成本降低等方面都有明显效果。后续针对工艺标准化、辅助工具等方面的改进也将继续开展研究,进一步完善基于反拉方式的高效工艺方案。

#### 参考文献

[1] 高鑫,龚清洪,孙超,等. 飞机结构件智能制造关键技术研究[J]. 制造技术与机床, 2017(8): 45-49.

GAO Xin, GONG Qinghong, SUN Chao, et al. Key technologies research of intelligent manufacturing for aircraft structural parts[J]. Manufacturing Technology & Machine Tool, 2017(8): 45-49.

[2] 黄军军,张保林,王雪岭,等. 五轴加工中心用通用加工工装结构的设计与夹具选型[J]. 机械制造, 2013, 51(10): 76-78.

HUANG Junjun, ZHANG Baolin, WANG Xueling, et al. Design and fixture selection of universal machining tooling for five axis machining center[J]. Machinery, 2013, 51(10): 76-78.

[3] 王继均,康志文,刘卫武,等. 基于DMC125U机床的方箱工装多件柔性加工技术[J]. 制造技术与机床, 2016(4): 102-105, 110.

WANG Jijun, KANG ZHIWEN, LIU Weiwu, et al. Quad-faces multiple parts flexible machining technology based on DMC125U machine[J]. Manufacturing Technology & Machine Tool, 2016(4): 102-105, 110.

[4] 黄军军,王立夫,勾波,等. 通用加工工装结构的模块化设计[J]. 机械制造, 2013, 51(2): 67-69.

HUANG Junjun, WANG Lifu, GOU Bo, et al. Modular design of general machined tooling structure[J]. Machinery, 2013, 51(2): 67-69.

[5] 航空工业成都飞机工业(集团)有限责任公司. 一种板类结构件压紧工装, CN201220253206.1[P]. 2012-12-19.

AVIC Chengdu Aircraft Industrial (Group) Co., Ltd. A kind of plate structure part press assembly: china, CN201220253206.1[P]. 2012-12-19.

通讯作者: 陈代鑫,高级工程师,研究方向为航空结构件高效加工及工艺标准化, E-mail: dysonchen@126.com。

(上接第90页)

status and development trend of the support technology of mirror milling[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2018, 39(4): 1-14.

[8] MELI F, KUENG A, THALMANN R. Ultraprecision micro-CMM using a low force 3D touch probe[J]. Measurement Science & Technology, 2007, 18(2): 319-327.

[9] HOLLOWAY A J, JONAS K B, WRIGHT D A. Surface sensing device with optical sensor: U.S. Patent 6,633,051[P]. 2003-10-14.

[10] LUMMES S E, MCMURTRY D R. Touch probe: U.S. Patent 7, 281, 336[P]. 2007-10-16.

[11] 陶冶. 大型零件在机接触式跟踪扫描测量方法及关键技术[D]. 大连: 大连理工大学, 2014.

TAO Ye. Methods and key technologies of on-machine contact scantracking measurement for large-scale parts[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2014.

[12] 朱建伟. 薄壁曲面加工变形分析与补偿方法研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2015.

ZHU Jianwei. Research on deformation analysis and compensation method of surface machining on thin-walled parts[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2015.

[13] ZHANG Y, YANG J, JIANG H. Machine tool thermal error modeling and prediction by grey neural network[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2012, 59(9-12): 1065-1072.

[14] HUNG T C, DING C H, DING C H, et al. Improvement of residual error in hydrodynamic polishing by recursive error compensation strategy[J]. Microelectronic Engineering, 2012, 93(5): 27-34.

[15] WEI Z C, WANG M J, CAI Y J, et al. Form error estimation in ball-end milling of sculptured surface with Z-level contouring tool path[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2013, 65(1-4): 363-369.

[16] 樊建勋,徐仁乾,胡自化,等. 基于直纹曲面重构的铝合金薄壁件加工变形误差补偿方法[J]. 航空制造技术, 2017, 60(11): 99-104.

FAN Jianxun, XU Renqian, HU Zihua, et al. Compensation method for machining deformation error of aluminum alloy thin wall based on straight line surface reconstruction[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2017, 60(11): 99-104.

[17] 武凯,何宁,廖文和,等. 薄壁腹板加工变形规律及其变形控制方案的研究[J]. 中国机械工程, 2004, 15(8): 670-674.

WU Kai, HE Ning, LIAO Wenhe, et al. Study on deformation rule and deformation control scheme of thin-walled webs[J]. China Mechanical Engineering, 2004, 15(8): 670-674.

[18] LIU H B, WANG Y Q, JIA Z Y, et al. Integration strategy of on-machine measurement (OMM) and numerical control (NC) machining for the large thin-walled parts with surface correlative constraint[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2015, 80(9-12): 1721-1731.

通讯作者: 向兵飞,博士研究生、工程师,研究方向为数控加工技术, E-mail: x8375987@126.com。

(责编 古京)

(责编 古京)