

# 便携式精加工铣床设计与应用

赵安安<sup>1</sup>, 张程<sup>1</sup>, 巴晓甫<sup>1,2</sup>

(1. 航空工业西安飞机工业(集团)有限责任公司制造工程部, 西安 710089;

2. 西北工业大学机电学院, 西安 710072)

**[摘要]** 针对飞机装配制造中大量小型安装面的精加工需求, 提出便携式铣床精加工技术方案, 通过对精加工对象和便携式加工流程的分析, 开展便携式精加工铣床受力分析、动力学建模与详细设计, 并进行应用和对比分析。结果表明: 对于飞机小型安装面批量制造, 就加工效率而言, 便携式精加工铣床相比固定式铣床提高了约3倍, 就加工精度而言, 便携式精加工铣床相比手持打磨器提高了约5倍。

**关键词:** 飞机装配; 便携式; 精加工; 铣床; 铣切头

## Design and Application of Portable Precision Finishing Milling Machine

ZHAO Anan<sup>1</sup>, ZHANG Cheng<sup>1</sup>, BA Xiaofu<sup>1,2</sup>

(1. Department of Manufacturing Engineering, AVIC Xi'an Aircraft Industry (Group) Company Ltd., Xi'an 710089, China;

2. School of Mechanical Engineering, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

**[ABSTRACT]** In order to meet the requirements of finishing a large number of small mounting surfaces in aircraft assembly manufacturing, a technical scheme of finishing with portable milling machine is proposed. Through the analysis of the precision machining object and the portable machining process, carry out force analysis, dynamics modeling and detailed design of the portable precision milling machine, and carry out the application and comparative analysis. The results show: for the batch manufacturing of small mounting surface of aircraft, in terms of processing efficiency, the portable finishing milling machine improves about 3 times compared with the fixed milling machine, and in terms of processing accuracy, the portable finishing milling machine improves about 5 times compared with the hand grinder.

**Keywords:** Aircraft assembly; Portable; Precision finishing; Milling machine; Milling head

**DOI:**10.16080/j.issn1671-833x.2020.11.076

飞机零部件在装配完成后, 由于零件制造和装配制造误差的存在, 某些装配要素(如安装面)无法满足最终质量要求, 需要进一步的精加工。在某些重要部位, 装配误差将关系到飞机的气动外形、结构疲劳寿命和交点运动可靠性<sup>[1]</sup>, 一般在装配完成后, 需对超差的部位进行最终精加工<sup>[2]</sup>。

国内飞机制造精加工技术研究方面, 航空工业西飞为某型号的机身蒙皮研制了一套精准铣切系统, 对刀具设计和气动回路进行了优化分析<sup>[3]</sup>; 航空工业成飞为飞机大部件结合交点精加工, 研究应用了摇臂钻、自动进给钻和精加工专用机床等<sup>[4]</sup>; 航空工业洪都研究了一种智能柔性精加工系统, 提出了基于调姿的数控加工方案, 实现了两个部件对接协调的精加工<sup>[4]</sup>。虽然国内对

飞机制造精加工进行了较多研究, 研制出了一些面向装配现场的加工装备, 但现在主要还是以自动化程度低的装备和工艺方法进行<sup>[5]</sup>。国外飞机制造精加工技术研究方面, 空客 A400M 采用两台五轴数控加工设备对机翼对接装配的接头进行精加工<sup>[6]</sup>; 英国 Grange Square 公司在空客 A320 机翼上研制了一套气动三坐标铣切设备<sup>[7]</sup>, 可以看出, 面向飞机装配的自动化、数字化加工技术及其装备正在深入研究中。但是, 具体到飞机小型安装面的面向装配的精加工, 还缺乏相应便携式的、多轴的和自动化程度较高的精加工技术及其装备的研究。

飞机装配中有很多的小尺寸安装面: 空间狭窄、精度高, 采用便携式加工具有经济性好、易维护、使用方便等显著优点<sup>[8]</sup>, 为了实现便携式加工目标, 需要减轻加

工装备重量,缩小尺寸,减低安全风险。气动系统相对于电动和液压而言,具有操作简单、使用安全、维护方便、灵活性强,特别适用于飞机零部件的制孔、铣边、平面加工等应用场合<sup>[9]</sup>。

## 1 精加工对象

以翼面部件为例,包括机翼、内襟翼、外襟翼、副翼、安定舵面、方向舵面、扰流板等,在这些部件上都有安装面,图1为波音737MAX飞机翼面部件构成示意图,图2为波音737MAX襟翼安装面示意图。机翼上还有很多安装面,如安装发动机吊挂的安装面,活动翼面上有用来安装滑轨、滑轮架的安装面。这些安装面具有如下特点:

(1)加工精度高,安装面零件装配成部件后,部件刚度还比较弱,无法和机床及其夹紧系统的刚度相提并论。在弱刚度装配站点上实现精加工面相对于飞机坐标系(20m级)0.2mm的位置度、0.12mm的平面度、 $R_a=1.6\mu\text{m}$ 的粗糙度等技术指标,难度较大。

(2)安装面尺寸小,多数不超过400mm×400mm尺寸,以波音737MAX内襟翼滑轨安装面为例,安装面尺寸为281mm×307mm。

(3)装配空间狭窄,存在操作不开敞,不便于人的观察和手持加工设备的操作,不便于加工设备进出、作业和检测,不便于待加工零件的装配和拆卸等问题。

(4)安装面数量多,通常一架大中型飞机所含的小型安装面数量在数十个,现有的以手工打磨为主的精加工方法满足不了加工要求。

## 2 便携式精加工流程

便携式精加工流程包括便携式铣床的定位、精加工和质量检测,具体流程如图3所示。便携式铣床的准确定位和预紧是精加工质量保证的基础,精加工是便携式

铣床的核心功能,质量检测是对铣床定位和精加工功能性、稳定性的必要验证。

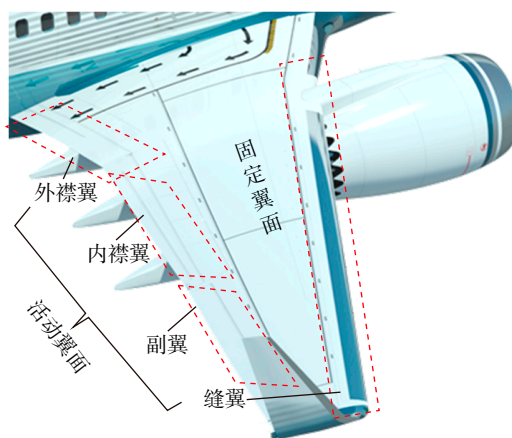


图1 飞机翼面部件构成示意图

Fig.1 Diagram of aircraft wing components

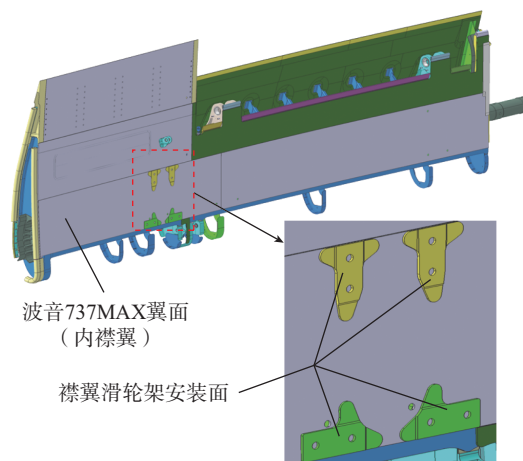


图2 襟翼滑轨安装面示意图

Fig.2 Diagram of flap slide mounting surface

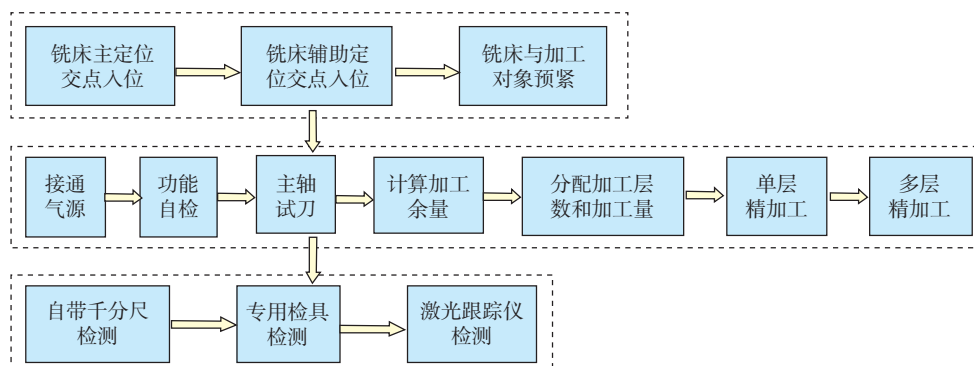


图3 便携式铣床精加工流程

Fig.3 Finishing process of portable milling machine

### 3 便携式精加工铣床设计

#### 3.1 受力分析

便携式精加工铣床的主要受力结构由支撑铰链(含主定位接头和副定位接头)、平板、滑枕、铣切头等组成,对铣床进行受力分析,可得铣床的静力学平衡方程:

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^{i=12} F_i + \sum_{j=1}^{j=3} f_j + M_g = 0 \\ \sum_{i=1}^{i=12} F_i L_i + \sum_{j=1}^{j=3} f_j L_j + M_0 = 0 \end{cases} \quad (1)$$

方程组的第1式为力平衡方程,根据分力平衡,又可分为3个独立的分力平衡方程;方程组的第2式,根据分力矩平衡,又可分为3个独立的分力矩平衡方程。式中,  $F_i$  为铣床的支撑铰链所受到的约束反力,共有4个支撑铰链,每个铰链受两个径向分力和一个轴向力;  $f_j$  为铣床的刀具所受到的切削力,含两个径向分力和一个轴向力;  $M_g$  为铣床的总质量;  $L_i$  为  $F_i$  的作用线相对于铣床重心的力臂;  $L_j$  为  $f_j$  的作用线相对于铣床重心的力臂;  $M_0$  为铣床的刀具所受到的切削力偶矩;  $i=1, 2, \dots, 12; j=1, 2, 3$ , 如图4所示。

根据铣床受力分析,结合刚度方程  $\bar{F}_{n \times 1} = K_{n \times n} \bar{L}_{n \times 1}$ , 利用有限元法对结构的刚度和强度进行校核和优化,为便携式铣床的铰链、平板、滑枕、铣切头等关键受力结构的优化设计提供依据。

#### 3.2 动力学模型

便携式精加工铣床的动力与传动系统由刀具、铣切头、传动系统、动力元件、控制系统等组成,采用牛顿欧拉法对铣床进行动力学分析,可得铣床的动力学微分方程组:

$$\begin{cases} m\ddot{\theta} = T_M - T_f \\ m_i \ddot{L}_i' = 2\pi T_i l_i^{-1} \eta_i + m_i g \sin \varphi_i - F_i \end{cases} \quad (2)$$

式中,  $m$  为铣切头中刀具(含紧固件) $N$ 的质量;  $T_M$  为切削气动马达的输出扭矩;  $T_f$  为加工对象反作用于刀具的切削力矩;  $\theta$  为刀具的旋转角位移;  $m_i$  为铣床  $i$  向坐标轴上运动的总质量;  $T_i$  为铣床  $i$  向坐标轴上行走气动马达的输出扭矩;  $\eta_i$  为铣床  $i$  向坐标轴上传动系统的传动效率;  $l_i$  为铣床  $i$  向坐标轴上行走气动马达旋转一周时  $m_i$  所行走的位移;  $L_i'$  为  $N$  在  $i$  向坐标轴上的位移;  $F_i$  为加工对象反作用于  $N$  的  $i$  向坐标轴上的切削阻力;  $\varphi_i$  为铣床  $i$  向坐标轴的轴线与水平面的夹角,当  $N$  向靠近地面运动时,  $\varphi_i$  取正值,当  $N$  向远离地面运动时,  $\varphi_i$  取负值。

根据铣床动力学模块,求解  $T_M$  和  $T_i$ , 为便携式铣床

的刀具、气动马达、传动系统、旋钮的选型、设计、校核等提供依据。

#### 3.3 总体设计

便携式精加工铣床技术指标包含以下几个方面。

- (1) 自由度: 三坐标铣床。
- (2) 自动化: 两个坐标方向为自动化。
- (3) 轻便程度: 便携式,总质量不超过 35kg。
- (4) 加工范围: 长度不大于 400mm, 宽度不大于 400mm。
- (5) 加工对象: 飞机部件安装面的精加工。
- (6) 精度等级: 粗糙度  $R_a 1.6\mu\text{m}$ , 平面度 0.12mm, 位置度 0.2mm。其余关键技术指标如表1所述。

根据精加工对象分析和铣床技术指标,便携式精加工铣床由平板、滑台、铣切头、控制系统等组成,如图5

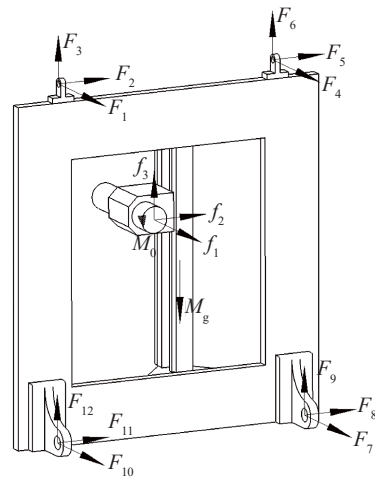


图4 便携式铣床受力图

Fig.4 Force diagram of portable milling machine

表1 便携式精加工铣床关键技术指标

Table 1 Key technical indexes of portable finishing milling machine

序号	设计项	设计指标/mm	导轨长/mm
1	X 导轨平行度	0.02	450
2	X 导轨平面度	0.02	450
3	Y 导轨平行度	0.03	600
4	Y 导轨平面度	0.03	600
5	X-Y 垂直度	0.02	—
6	Z-X 垂直度	0.01	—
7	Z-Y 垂直度	0.01	—
8	最大切深量	0.50	—
9	每转进给量/(r·mm <sup>-1</sup> )	0.20	—

所示。

### 3.4 平板组件设计

平板组件是便携式精加工铣床的基础结构,由平板、气源接口、主定位接头、副定位接头、X轴导轨、X轴传动机构、便携把手、吊环、分气盒和控制盒组成。

平板是一个中间带有开口的回字形板状结构,开口是为了留出加工通路,开口的大小由加工范围决定。在平板下部设计一对平行且同轴的主定位接头,在平板上部设计一对平行且同轴的副定位接头。X轴导轨装在平板沿口字型开口的上下两侧,X轴传动机构安装在平板沿口字型开口的下侧。X轴传动机构依次由轴承座、丝杠螺母、联轴器、法兰座、气动马达组成,分气盒设置在平板的左侧,控制盒设置在平板的右侧,该结构如图6所示。

按照400mm×400mm的加工范围需求,开口尺寸设置为510mm×470mm,平板轮廓尺寸设置为770mm×740mm,平板厚度为24mm,选用7075铝合金材料。

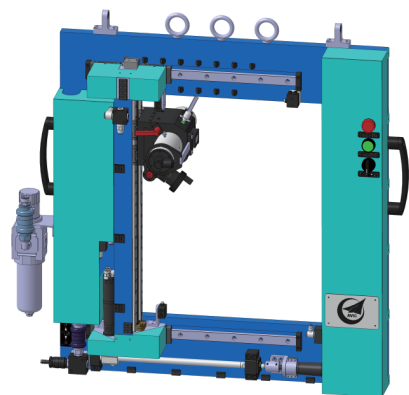


图5 便携式铣床结构示意图

Fig.5 Structure diagram of portable milling machine

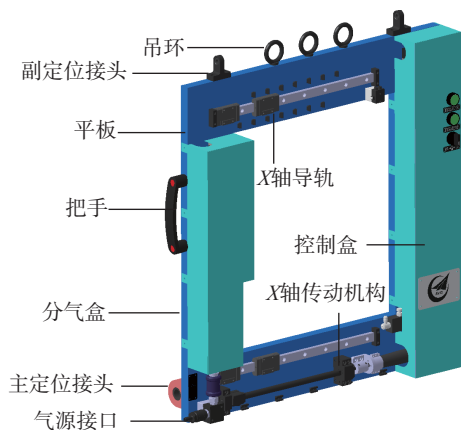


图6 平板组件结构示意图

Fig.6 Structure diagram of panel component

### 3.5 滑枕组件设计

滑枕组件为立柱状结构,由滑枕、上连接件、下连接件、Y轴导轨、Y轴传动机构组成,滑枕安装在平板组件的X轴导轨上,滑枕侧面安装有Y轴导轨,滑枕下端安装有Y轴传动机构。Y轴传动机构依次由轴承座、同步轮、同步带、法兰座、气动马达组成。滑枕组件结构如图7所示。

### 3.6 铣切头设计

铣切头总体设计方面,为了既能实现加工精度和效率,又能实现重量和尺寸的最小优化,对铣切头的关键设计指标进行限定,如表2所示。

铣切头为了实现完整的铣切功能,需集成进给装

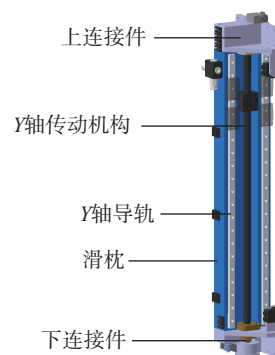


图7 滑枕组件结构示意图

Fig.7 Structure diagram of slide pillow component

表2 铣切头关键技术指标

Table 2 Key technical indexes of milling head

设计项	设计指标	实际参数
切削气动主轴的重量/kg	≤ 10	9.16
Z轴的行程范围/mm	12	12
平面度/mm	≤ 0.12	0.1
位置度/(mm·m <sup>-1</sup> )	≤ 0.2/20	0.12/20
粗糙度 R <sub>a</sub> /μm	1.6	1.6
手动进给分辨率/mm	0.02	0.01
旋转1周Z轴进给/mm	≤ 1	0.5
精密气动马达	不可反转	不可反转
气动主轴跳动量/mm	≤ 0.02	0.02
气动主轴的轴向尺寸/mm	280 ± 20	285
气动主轴空载转速/(r·min <sup>-1</sup> )	10200	10200
气动主轴额定扭矩/(N·m)	2.1	2.1
额定扭矩下的转速/(r·min <sup>-1</sup> )	5100	5100
刀具类型	四齿端铣刀	四齿端铣刀
刀具切削直径φ/mm	40	40

置、切削主轴、测量装置、冷却装置、导屑装置和刀具等。对于便携式精加工铣床而言,铣切头需要小型化、集成化,铣切头的总体结构如图 8 所示。

### 3.6.1 Z轴进给机构

Z轴进给机构由Z轴导向座、Z轴传动机构、导向杆组成。Z轴导向座上安装有Z轴传动机构和导向杆,Z轴导向座的导向孔对铣切头的Z轴进行导向。Z轴传动机构含有手动旋钮、一对90°相交斜齿轮、丝杠螺母,Z轴传动机构通过手动控制旋钮的角度来精确控制斜齿轮啮合带动丝杠螺母运动,从而实现铣切头模块在Z轴的精确进给与后退,Z轴传动机构如图9所示。

### 3.6.2 锁紧机构

切削主轴进行铣切加工时,进给方向的运动必须锁定,锁紧装置由开口的圆环形筒夹、可调节手柄和螺栓组成,其中圆环形筒夹安装在Z轴导向座的端面上,圆环形筒夹的内圆柱孔与切削主轴的外圆柱配合形成滑动副,螺栓连接圆环形筒夹开口的两端,通过调节手柄的旋向,实现对切削主轴的夹紧与松开,锁紧机构如图10所示。

### 3.6.3 测量装置

测量装置由带支脚的精密尺、带顶针的数显读数头

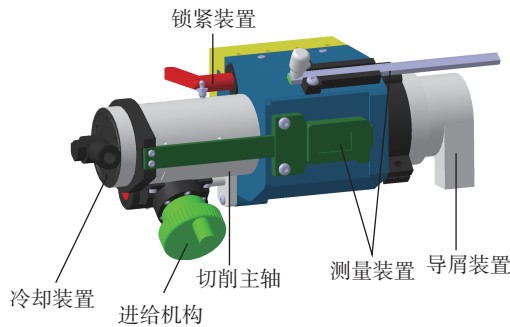


图8 铣切头结构示意图  
Fig.8 Structure diagram of milling head

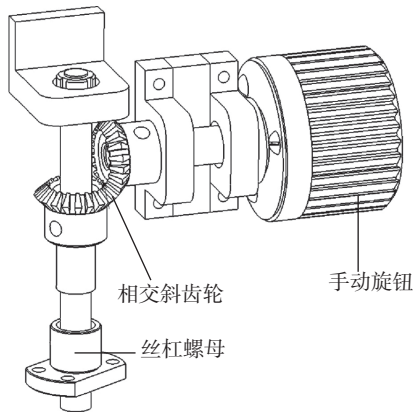


图9 Z轴传动机构示意图  
Fig.9 Z-axis drive mechanism diagram

组成。其中精密尺与读数头通过移动副连接,精密尺通过其支脚安装在切削主轴的外圆柱面上,读数头通过其顶针安装在Z轴导向座的端面上,测量装置如图11所示。

测量仪器采用精度为0.01mm数显游标卡尺,并进行相应的改造,确保其精度的稳定性和用尺安全。

检测装置方法为:在卡尺上设置有两条刻度线,分别表示两个极限偏差位置,在游标上有一条刻度线,当进行产品检测时,将游标端面与精加工面贴合,当游标的刻度线在卡尺上两条刻度线中间时,说明加工合格。

### 3.6.4 冷却装置

冷却装置由分气接头、冷却气管和冷却气嘴组成,其特征在于按分气接头→冷却气管→冷却气嘴依次相连,构成便携式三坐标铣床中铣切头的冷却系统,冷却装置如图12所示。

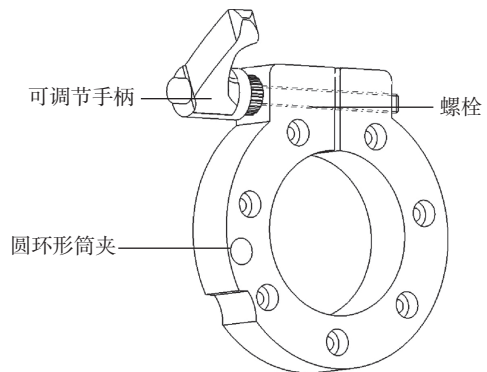


图10 锁紧机构示意图  
Fig.10 Locking mechanism diagram

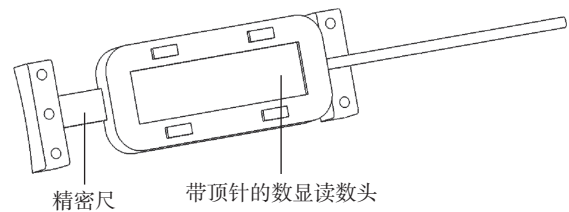


图11 测量装置示意图  
Fig.11 Measuring device diagram

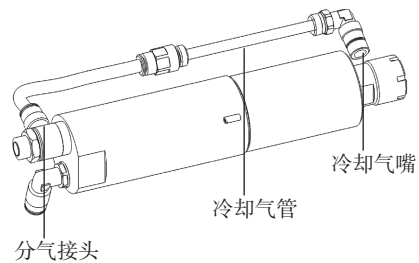


图12 冷却装置示意图  
Fig.12 Cooling device diagram

### 3.6.5 导屑装置

导屑装置是一个带安装法兰的圆筒型漏斗结构,一端通过法兰安装在切削主轴的端面上,另一端通过圆筒套在刀具上,导屑装置如图 13 所示。

为了能更好地进行导屑和对刀具进行冷却,将主轴排出的气体导入到导屑器内,可以将风直接作用在刀具上,降低刀具的温度,同时迅速将铝屑吹走,减少对表面的划伤。研制的铣切头实物如图 14 所示。

### 3.6.6 刚度校核

当铣切头切深达到设计最大值 0.5mm 时,铣切头每转进给量为 0.2mm/r,加工对象硬铝合金的单位切削力为 834MPa,铣切头的轴向切削分力为<sup>[10]</sup>:

$F_z = pa_p f = 83N$ , 其中  $p$  为单位切削力;  $a_p$  为切深;  $f$  为进给量。由于在切削合力中,轴向切削分力约占 80%,考虑到理论计算的误差,以轴向切削力的两倍(166N)作为有限元分析的载荷,得到铣床的变形数值:

(1) 切削头处于铣床加工范围中的边缘时,刀具端头的最大变形为 0.008mm,如图 15 所示。

(2) 切削头处于铣床加工范围的中间时,刀具端头的最大变形为 0.012mm,如图 16 所示。

## 4 应用分析

便携式精加工铣床交付用户后,进行型号生产应

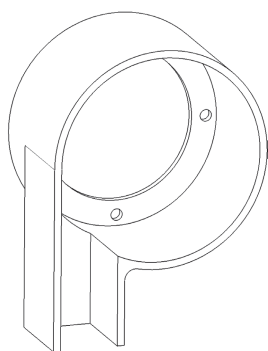


图13 导屑装置示意图

Fig.13 Chip guide device diagram



图14 铣切头实物

Fig.14 Physical photo of milling head

用,如图 17 所示,具体的加工工艺参数如下:

(1) 选用直径为 $\phi 40\text{mm}$ 的端铣刀,在圆周上布置 4 个刀片。

(2) 铣切头在 0.6MPa 标准气压下的空载转速为

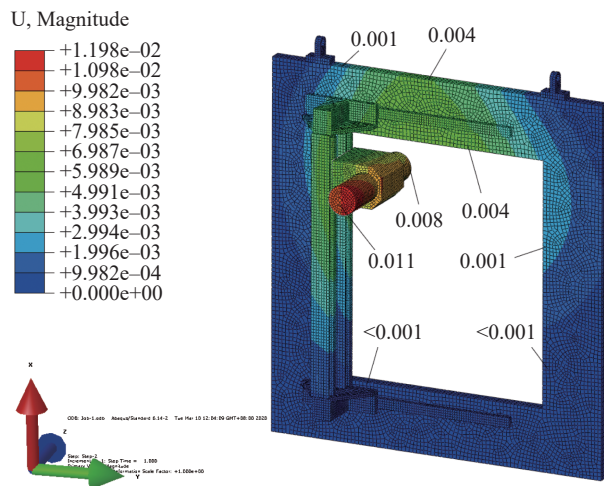


图15 刀具处于加工范围边缘的变形云图

Fig.15 Deformation of station one

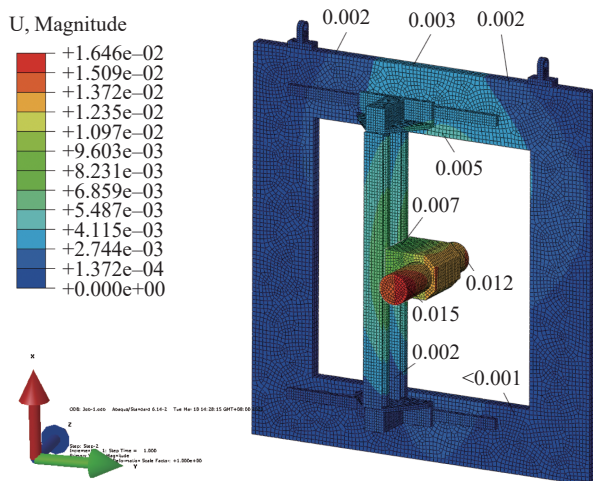


图16 刀具处于加工范围中间的变形云图

Fig.16 Deformation of station two



图17 应用现场

Fig.17 Application of scene

10200r/min,在 2.1N·m 的额定扭矩下的额定转速为 5100 r/min。

(3) 3mm 厚的实际加工余量,依次按照每层 0.5mm → 0.5mm → 0.5mm → 0.5mm → 0.4mm → 0.3mm → 0.2mm → 0.1mm 切深量来进行加工,共加工 8 层。

(4) 进给速度控制在 0.15~0.30mm/r 之间。同时将便携式铣床加工方案、固定机床加工方案、手持打磨器加工方案的结果进行对比分析,相关数据如表 3 所示。

对比分析表明:

(1) 便携式精加工铣床方案的加工精度高,远高于手持打磨器方案。

(2) 便携式精加工铣床方案的加工效率高于固定机床和手持打磨器方案。

(3) 解决了批量生产的急迫问题。

(4) 具有良好的通用性,便携移动性能好。

## 5 结论

对于飞机小型安装面数量多、尺寸小、空间局限性和加工精度较高的特点,研制了一套便携式精加工铣床,应用表明:便携式精加工铣床的加工精度较高、性能稳定、方便提携、满足飞机小型安装面批量制造需求。

## 参考文献

[1] 高红,陈允全,秦龙刚.飞机大部件结合交点精加工[J].航空制造技术,2010,53(23):26-29.

表3 便携式精加工铣床应用情况

Table 3 Application of portable finishing milling machine

对比项	飞机内襟翼安装面的精加工方案		
	便携式铣床	固定机床	手持打磨器
加工零件是否拆装	不需要	需要	不需要
加工场所	飞机装配现场	机加车间	飞机装配现场
轮廓度 (激光跟踪仪)	0.08mm/10m	0.15m/10m	0.3m/10m
平面度 (标准平板)/mm	0.025	0.01	0.2
粗糙度 (粗糙度仪) $R_a/\mu\text{m}$	1.6	1.6	3.2
加工效率/ ( $\text{min}\cdot\text{单件}^{-1}$ )	30	120	60
200 架份年产量	可满足	不可满足	不可满足
便携程度 (电子称)/kg	35	不可便携	易便携

GAO Hong, CHEN Yunquan, QIN Longgang. Finish machining of joints between aircraft major parts[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2010, 53(23): 26-29.

[2] 曾六生. 飞机部件装配精加工[J]. 航空制造技术, 2002, 45(10): 63-66.

ZENG Liusheng. Finish machining in assembling aircraft component[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2002, 45(10): 63-66.

[3] 郭峰,郝勇智. 机身蒙皮精准铣切系统研制[J]. 航空制造技术, 2016, 59(4): 72-75.

GUO Feng, HAO Yongzhi. Development of efficient milling system for fuselage skin[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2016, 59(4): 72-75.

[4] 吴小刚,吴振勇,熊千,等. 飞机部件智能柔性精加工技术研究[J]. 教练机, 2018, 59(1): 44-48.

WU Xiaogang, WU Zhenyong, XIONG Qian, et al. Research on intelligent flexible finish machining technology of aircraft parts[J]. Trainer, 2018(1):44-48.

[5] 张洪双. 机翼数字化调姿精加工系统若干关键技术研究[D]. 杭州:浙江大学, 2017.

ZHANG Hongshuang. Study on key technologies of digital posture alignment and finish machining system for wings[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2017.

[6] 刘楚辉. 飞机机身数字化对接装配中的翼身交点加工关键技术研究[D]. 杭州:浙江大学, 2011.

LIU Chuhui. Study on key techniques of wing-fuselage joints machining in digital aircraft assembly[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2011.

[7] 巴晓甫,周健,李欢欢,等. 飞机襟翼铣切设备一键式全气动控制系统设计[J]. 液压与气动, 2018(2): 86-91.

BA Xiaofu, ZHOU Jian, LI Huanhuan, et al. Design of one-key all pneumatic control system for aircraft flap milling equipment[J]. Chinese Hydraulics & Pneumatics, 2018(2): 86-91.

[8] 刘晋春,韦东波,自鹏翰,等. 便携式、多功能、模块化、小型数控电火花加工机床系列的开发研制[J]. 电加工与模具, 2015(6): 55-58.

LIU Jinchun, WEI Dongbo, ZI Penghan, et al. Design and manufacture of miniature EDM NC machine series with portability, multifunction and modularization[J]. Electromachining & Mould, 2015(6): 55-58.

[9] 巴晓甫,李欢欢,王永宏,等. 气动平衡助力机械手反馈控制系统设计[J]. 液压与气动, 2017(12): 90-94.

BA Xiaofu, LI Huanhuan, WANG Yonghong, et al. Design of feedback control system for pneumatic balance assisted manipulator[J]. Chinese Hydraulics & Pneumatics, 2017(12): 90-94.

[10] 孔德音. 机械加工工艺基础[M]. 北京:机械工业出版社, 1998.

KONG Deyin. Fundamentals of machining technology[M]. Beijing: China Machine Press, 1998.

通讯作者: 巴晓甫,博士研究生,主要研究方向为飞机数字化装配、自动控制、流体控制和有限元分析等, E-mail: baxiaofu@aliyun.com。

(责编 古京)