

doi:10.3969/j.issn.1006-8023.2024.01.016

## 木窗双端铣削加工中心关键机构的设计与研究

杨春梅,孟繁伟,丁禹程

(东北林业大学 机电工程学院,哈尔滨 150040)

**摘要:**针对被动式欧式木窗外框铣削加工效率低、加工精度低和人工劳动强度大等问题,设计一种被动式欧式木窗的双端铣削加工中心,用于被动式欧式木窗外框高效率、高精度铣削加工。通过对木窗铣削工艺的分析,采用计算机辅助设计方法对加工中心结构进行详细设计,利用 Solidworks 软件对加工中心进行三维建模,基于有限元分析软件对关键支撑零件的强度、刚度进行分析,使用虚拟试验方法验证加工中心的加工效率。研究结果表明,加工中心理论加工效率约为 400 扇/d,相较于人工加工效率 350 扇/d,效率提升了 14.28%,关键支撑零件的最大应力远小于材料的许用应力,满足使用要求。

**关键词:**木窗;双端铣削;加工中心;结构设计;结构分析

中图分类号:S777

文献标识码:A

文章编号:1006-8023(2024)01-0135-07

## Design and Research of Key Mechanisms of the Double End Milling Machining Center for Wood Windows

YANG Chunmei, MENG Fanwei, DING Yucheng

(College of Mechanical and Electrical Engineering, Northeast Forestry University, Harbin 150040, China)

**Abstract:** Aiming at the problems of low milling efficiency, low machining precision and high manual labor intensity of the outer frame of passive European-style wood windows, a double end milling machining center for passive European-style wood windows was designed and used for high-efficiency and high-precision milling of the outer frame of passive European-style wood windows. Through the analysis of the milling process of wood windows, the detailed design of the machining center structure was carried out using computer-aided design methods. Solidworks software was used for three-dimensional modeling of the machining center, and finite element analysis software was used to analyze the strength and stiffness of the key support parts. Virtual experimental methods was used to verify the machining efficiency of the machining center. The results showed that the theoretical machining efficiency of the machining center was about 400 fans/day, compared with the manual machining efficiency of 350 fans/day, the efficiency was improved by 14.28%, and the maximum stress of the key support parts was far less than the permissible stress of the material, which met the requirements for use.

**Keywords:** Wood windows; double end milling; machining center; structural design; structural analysis

### 0 引言

随着碳达峰、碳中和目标的提出,低能耗、低污染、高利用率的绿色建筑成为未来的发展方向,被动式建筑作为绿色建筑中的一类具有重要意义,拥

有广泛的市场前景<sup>[1-2]</sup>。被动式建筑主要指依靠更好的保温、密封结构与高效率的热回收系统,几乎不需要能源的输入或仅仅消耗较少的能源就能够提供应季且宜人的环境,同时符合绿色建筑基本要求的建筑<sup>[3-6]</sup>。门窗节能是被动式建筑节能的重点<sup>[7]</sup>。木窗是集节能、低碳、环保可持续发展的门窗产品,具有良好的保温隔热效果<sup>[8]</sup>,在被动式门窗中应用广泛。被动式欧式木窗结合了欧式木窗与被动式建筑的特点,有较高的抗压和抗折强度,具有特殊的隔热、隔音和装饰效果等优势<sup>[9]</sup>,同时实现了低碳节能的被动式效果,深受消费者喜爱。被动式欧式木窗产品的机械加工中最为重要的是窗框和窗扇的铣型加工<sup>[10]</sup>。对于木窗框的铣削加工,双端铣机床的应用还没有普及,且双端铣设备大多数处于半自动化状态<sup>[11]</sup>。对于木

收稿日期:2023-04-19

基金项目:黑龙江省重点研发项目(GA21A405);中央高校基本科研业务费专项资金项目(2572020DR12)。

第一作者简介:杨春梅,博士,教授。研究方向为林业与木工机械。E-mail: ycmnefu@126.com

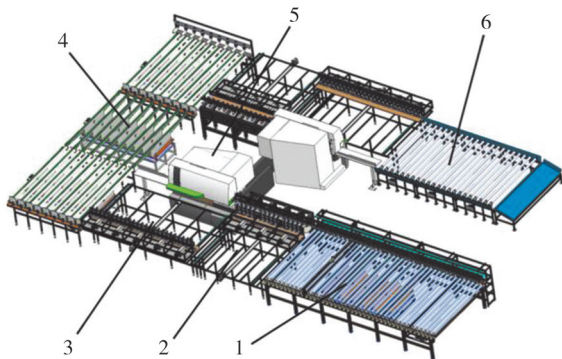
引文格式:杨春梅,孟繁伟,丁禹程.木窗双端铣削加工中心关键机构的设计与研究[J].森林工程,2024,40(1):135-141.

YANG C M, MENG F W, DING Y C. Design and research of key mechanisms of the double end milling machining center for wood windows[J]. Forest Engineering, 2024, 40(1):135-141.

窗框外侧面的铣削加工,目前大多采用单端铣削机床,通过工人的操作,依次加工木窗框的4个外侧面,需要将木窗多次旋转并重新装夹,费时费力,且加工精度不高,出现不合格产品概率较高,造成对森林资源的浪费。本研究设计一种被动式欧式木窗的木窗双端铣削加工中心,用于被动式欧式木窗外框高效率、高精度铣削加工,保障被动式欧式木窗安装后的低碳节能与被动式效果,节省人工劳动力。

## 1 木窗双端铣削加工中心的总体设计及加工工艺分析

结合木窗外框铣削加工工艺,本研究设计的木窗双端铣削加工中心包括:自动上料机构、定位机构、夹紧机构、单端铣削机构、运输机构、送料机构和底座。利用 Solidworks 软件对加工中心进行三维建模,木窗双端铣削加工中心的总体结构,如图 1 所示。



1. 自动进料机构;2. 定位机构;3. 夹紧机构;4. 运输机构;5. 单端铣削机构;6. 送料机构。

1. Automatic feeding mechanism; 2. Locating device; 3. Clamp device; 4. Transportation device; 5. Single end milling mechanism; 6. Sending mechanism

图 1 木窗双端铣削加工中心总体结构

Fig. 1 Overall structure of double end milling machining center for wood windows

加工中心的加工工艺如图 2 所示。由图 2 可以看出,在整个加工环节中,仅木窗上料、下料需要人工完成,相比于传统加工工艺,对工人的加工经验要求不高,极大程度地降低工人的劳动强度。木窗双端铣削加工中心每次加工木窗的 2 个相对窗框的外侧面,多个木窗连续上料进行铣削加工,相较于传统加工工艺,提高加工效率。

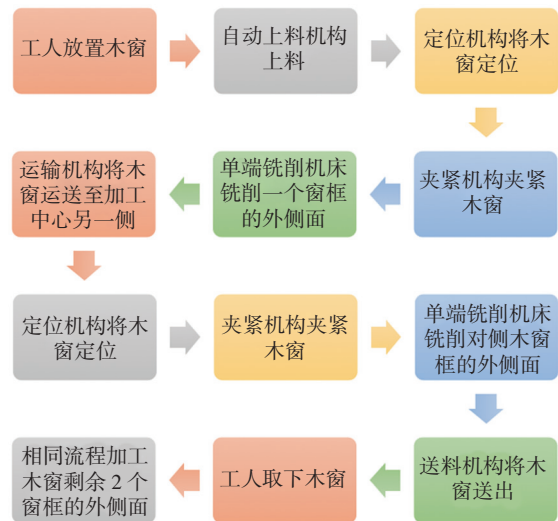


图 2 木窗双端铣削加工中心加工流程图

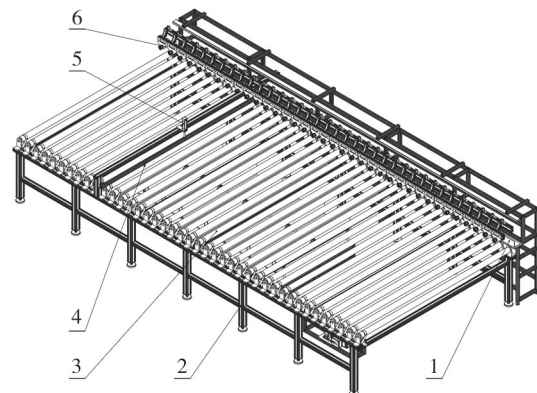
Fig. 2 Flow chart of double end milling machining center for wood windows

## 2 木窗双端铣削加工中心主要机构的设计

### 2.1 自动进料机构的结构设计

自动进料机构需要完成对木窗的输送。实现输送的装置一般有输送皮带、输送链和输送辊台,相比之下,辊台的输送稳定性较高,寿命较长,维修成本较低,故选用辊台作为进料机构的主体结构。

自动进料机构主要由靠尺 A、机架、辊台、靠尺 B、气缸和压辊机构组成,如图 3 所示。靠尺 A、B 的作用分别在于木窗的初步定位与控制木窗的前进。在分析与设计过程中,不同尺寸的木窗需要到达相同的定位基准,故采用换向输送的方法,于辊台的辊



1. 靠尺 A 2. 机架 3. 辊台 4. 靠尺 B 5. 气缸 6. 压辊机构

1. Guiding rule A 2. Frame 3. Roll table 4. Guiding rule B 5. Cylinder 6. Press roller mechanism

图 3 自动进料机构结构

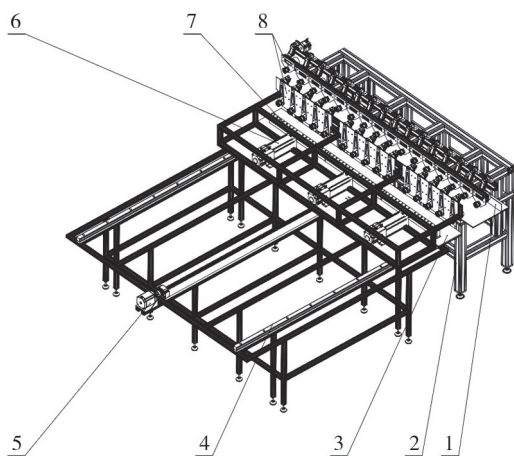
Fig. 3 Automatic feeding mechanism

筒间,沿纵向设置一组顶升单传送皮带,利用顶升皮带实现木窗的换向传输,最终由压辊机构进行夹紧定位。

木窗的横向进给由辊台实现。木窗沿辊台横向进给至被靠尺 B 挡住后,顶升单传送皮带将木窗沿纵向移动,与靠尺 A 贴合,压辊装置向下移动,压辊装置的辊轮将木窗框压紧,完成对木窗的初步定位。气缸带动靠尺 B 升起,木窗在辊台与压辊装置辊轮的作用下继续横向进给,进入定位机构。

## 2.2 定位机构及夹紧机构的结构设计

定位的准确性,会影响木窗框外侧面的加工精度。木窗经过自动进料机构的初步定位后,木窗框与靠尺间会存在一定间隙,不能直接进入夹紧机构进行夹紧与加工。为此设计了定位机构,如图 4 所示,确保了木窗框与靠尺紧密接触,对木窗进行最终定位,保证了后续加工的精度。



1. 靠尺;2. 机架;3. 托板;4. 导轨;5. 丝杠螺母机构;6. 气缸;7. 侧压辊机构;8. 压辊机构。

1. Guiding rule; 2. Frame; 3. Layer board; 4. Guide rail; 5. Screw-nut mechanism; 6. Cylinder; 7. Side press roller mechanism; 8. Press roller mechanism.

图 4 定位机构

Fig. 4 Locating device

木窗进入定位机构后,其主要由托板与靠尺所在平台支撑,为了适应大范围变化的木窗尺寸,设计了一种分级式直线运动结构:托板作用于导轨上,通过丝杠螺母机构实现托板的大行程移动。气缸固定于托板上,其末端连接有侧压辊机构,实现小行程移动,完成对木窗外框的侧定位。压辊机构完成对木窗的上压紧,并通过摩擦力驱动木窗移动。

夹紧机构的结构与定位机构的结构原理相同,不再赘述。但需要注意的是,为了更好地抵抗切削

力给木窗带来的变形,相对于定位机构,夹紧机构侧压辊机构的压紧力更大,压辊数量更多,以防止木窗变形量过大造成加工精度低。

## 2.3 运输机构与送料机构

运输机构由辊台与单传送皮带组成,木窗一侧的窗框加工完成后,木窗由辊台进入运输机构,再由单传送皮带,运输到加工中心的另一侧。送料机构由辊台组成。

## 3 定位机构的可行性分析

在木窗框铣削加工中,定位机构起重要的作用,决定了最终的加工精度。

图 5 为某工厂所加工 2 000 扇木窗的尺寸散点图,由图 5 可以看出,实际加工中,加工的木窗尺寸大多数较为集中,但根据客户定制化需求,仍会有少数木窗的尺寸与其他木窗尺寸差异较大,所以在设计双端铣削加工中心时,各机构需要适应尺寸差异较大的木窗。

本研究根据以上需求设计了定位机构。木窗由自动上料机构进入定位机构时,其一端的窗框由固定的平台支撑,另一端的窗框由托板支撑。通过丝杠螺母结构,托板可以沿着导轨做大行程移动,从而适应尺寸差异较大的木窗。

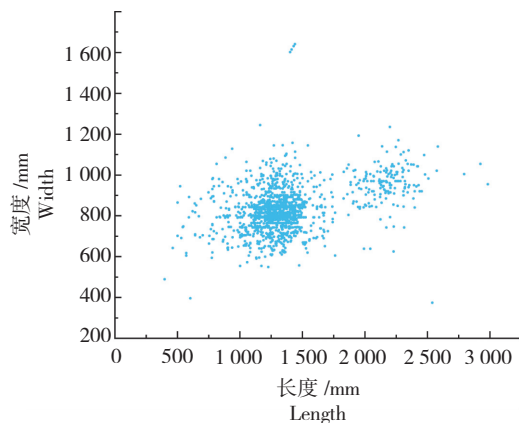


图 5 木窗尺寸散点图

Fig. 5 Scatter diagram of wood window dimensions

还需要注意的另一个问题是,由于加工精度与装配精度限制,木窗在组框后,其窗框不同位置一定会存在不同程度的歪斜,侧定位时,要根据不同位置的歪斜情况柔性定位。为解决上述问题,研究分析后采用了如下设计:托板上设计多组侧压辊机构,每组侧压辊机构的伸出量可单独调节,根据窗框不同位置不同程度的歪斜,按需调整每组侧压辊机构的伸出量,以保证木窗框在各个位置都与靠尺

紧密接触,确保后续加工的精度。定位机构的压辊装置使木窗的底面与托板紧密接触,起到定位作用,同时通过压辊的旋转,利用摩擦力可以使木窗横向进给,不需要设置额外使木窗进给的装置。

综上所述,定位机构能够适应大范围变化的木窗尺寸,并保证木窗定位的准确性。

#### 4 侧压辊机构气缸支架的有限元分析

夹紧机构需要保证足够的夹紧力,才能保证工件稳定加工<sup>[12]</sup>。夹紧机构的核心在于侧压辊机构。侧压辊机构通过气缸末端连接的侧压辊使木窗紧贴靠尺,抵抗铣削时的垂直进给力,保证了加工的稳定性与加工精度。气缸支架的强度保证了加工的可靠性,其振动特性决定是否发生共振现象,如果支架强度不够,或者发生共振现象,也容易使工件飞出造成安全事故,故需要对其静强度与模态进行分析。切削力可以按照如下公式进行计算<sup>[13,16]</sup>。

厚切削时切削功率( $P$ )的计算公式

$$P = 9.807 \left( a_w a_q q + \frac{a_w a_h H}{f_z \sin \theta_p} \right) \frac{b h_x v_f}{1000} = 9.42 \text{ kW}。$$

平均铣削力( $F_x$ )的计算公式

$$F_x = 9.807 \left( a_w a_q q + \frac{a_w a_h H}{f_z \sin \theta_p} \right) \frac{b h_x f_z}{t} = 181.2 \text{ N}。$$

垂直分力( $F_y$ )的计算公式

$$F_y = f_2 - F_2 = 4.2 \text{ N}。$$

$$f_2 = 9.807 \left[ \frac{(1-x) a_w a_h H}{\mu f_z \sin \theta_p} \right] \frac{b h_x f_z}{t} = 52.8 \text{ N}。$$

$$F_2 = 9.807 \left( a_w a_q q + \frac{a_w a_h H}{f_z \sin \theta_p} \right) \frac{b h_x f_z}{t} \tan(90^\circ - \delta - \Phi) = 48.6 \text{ N}。$$

平均运动遇角( $\theta_p$ )的计算公式

$$\sin \theta_p = \sqrt{\frac{h_x}{D}}。$$

垂直进给力( $F_u$ )的计算公式

$$F_u = F_x \sin \theta - F_y \cos \theta = 53.4 \text{ N}。$$

式中: $f_2$ 为单个刀齿在切削宽度上的推力,N; $F_2$ 为单个刀齿在切削宽度上的拉力,N; $a_w$ 为含水率修正系数,取 $a_w = 1$ ; $a_q$ 、 $a_h$ 、 $x$ 为刀具变钝程度修正系数,取 $a_q = 1$ 、 $a_h = 1$ 、 $x = 0.8$ ; $q$ 为单位切削力中与切削角、切削速度有关的参数, $q = 1.016$ ; $H$ 为与树种及相对纤维方向的切削方向有关参数, $H = 0.132$ ; $f_z$ 为每齿进给量, $f_z = 1 \text{ mm/z}$ ; $b$ 为切削宽度, $b = 100 \text{ mm}$ ; $h_x$ 为切削深度, $h_x = 10 \text{ mm}$ ; $v_f$ 为进给量, $v_f = 0.67 \text{ m/s}$ ; $t$ 为齿距, $t = 77.6 \text{ mm}$ ; $\mu$ 为摩擦系数, $\mu = 0.2$ ; $\Phi$ 为

摩擦角, $\Phi = 15^\circ$ ; $D$ 为铣刀直径, $D = 100 \text{ mm}$ 。

由上述计算可知气缸支架需要抵抗的垂直进给力为约为53.4 N。

支架与气缸的连接形式如图6所示,支架底部与托板连接,顶部通过2组螺栓的预紧力将气缸夹紧固定。

粗略计算单个螺栓所需的预紧力为

$$\frac{2F\mu \times 2}{k} = 53.4 \text{ N}。$$

$$F = 106.8 \text{ N}。$$

式中: $F$ 为单个螺栓的预紧力,N; $\mu$ 为支架与气缸间的静摩擦因数, $\mu = 0.15$ ; $k$ 为安全系数, $k = 1.2$ 。

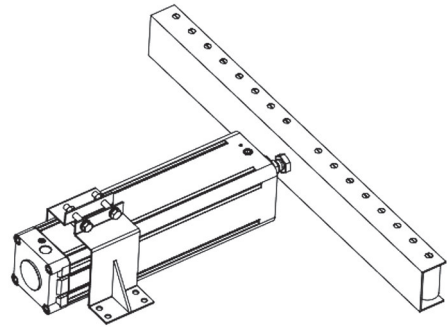


图6 气缸、侧压辊、支架连接示意图

Fig. 6 Connection diagram of cylinder, side press roller and frame

利用有限元分析可以确定关键零部件的强度、形变是否满足要求<sup>[14-17]</sup>。支架的材料选用Q235,壁厚为3 mm,根据机械设计手册,其许用应力约为235 MPa。支架主要受到2个外载荷:螺栓的预紧力( $F$ )、切削带来的垂直进给力( $F_u$ )。通过Solidworks建立支架及螺栓的简化模型,导入Ansys workbench中,根据已知条件进行静力学分析,可以得到支架的受力及应力情况,如图7所示。

考虑支架受垂直进给力的形变时,需要排除螺栓预紧力给支架带来的形变。支架的形变如图8所示。

静力学分析结果表明,受力时支架的最大应力为146.65 MPa,远小于材料许用应力。无垂直进给力时支架的最大形变为1.047 4 mm,受垂直进给力时机架的最大形变为1.057 3 mm,表明垂直进给力对支架的形变情况影响不大。

对支架进行模态分析时,为了简化问题,将2个机架上端的螺栓连接处设置为固定约束。对支架进行约束与分析后,可以得到前6阶模态振型图,如图9所示,固有频率见表1。

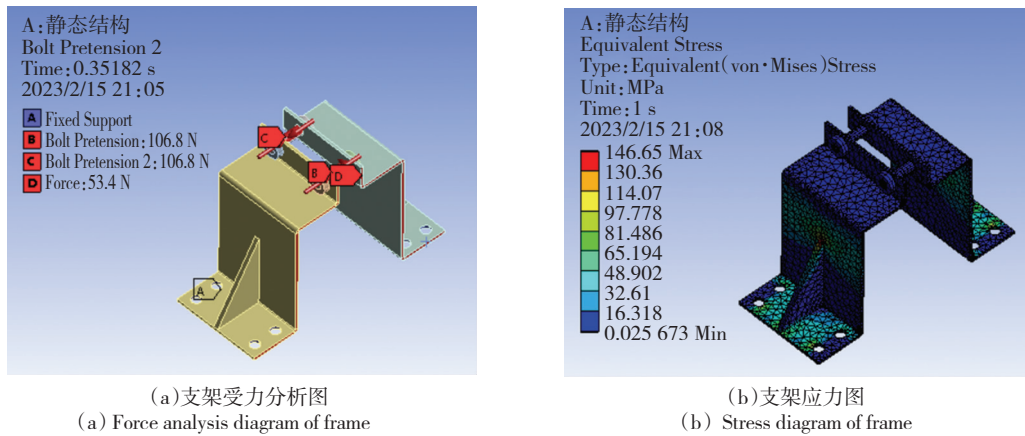


图 7 支架的受力及应力图

Fig. 7 The force and stress diagram of frame

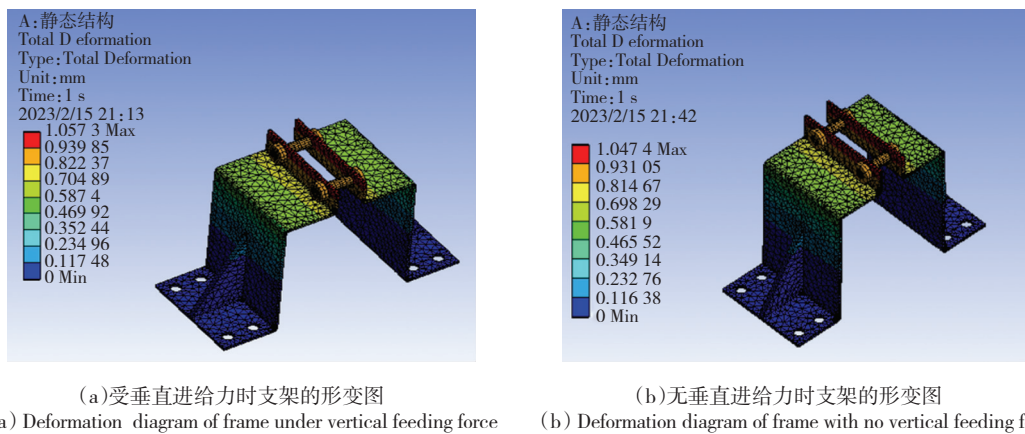


图 8 支架的形变图

Fig. 8 Deformation diagram of frame

表 1 机架的固有频率与振型描述

Tab. 1 Natural frequency and vibration mode description of the frame

阶数 Order	固有频率/Hz Natural frequency	振型描述 Vibration mode
1	1 116.8	支架上下摆动
2	1 317.7	支架左右摆动
3	2 370.0	支架上部前后振动
4	2 437.9	支架底部前后振动
5	2 619.6	支架两侧前后振动
6	3 136.7	支架扭转摆动

通过对支架进行模态分析,得到了支架的前 6 阶固有频率。结果表明,并未有零部件的振动频率与支架相同,故不会发生共振现象。

### 5 加工中心加工效率的虚拟试验验证与分析

根据某木窗加工工厂实际数据,一台 UC6 单端铣削加工机床由 2 名工人进行操作,窗户加工效率

为 350 扇/d。对加工中心的加工效率进行虚拟试验验证,根据实际生产节拍进行试验分析,见表 2。

表 2 加工节拍表

Tab. 2 Processing cycle time table

节拍名称 Cycle name	参数值 Parameters value
人工上料时间 Manual feeding time	3 s
自动上料机构辊台速度 Automatic feeding mechanism roller table speed	1 m/s
初步定位时间 Preliminary positioning time	3 s
⋮	⋮
机床加工速度 Machine processing speed	6 m/min
回料输送时间 Return conveying time	30 s
人工下料与转运时间 Manual unloading and transfer time	10 s

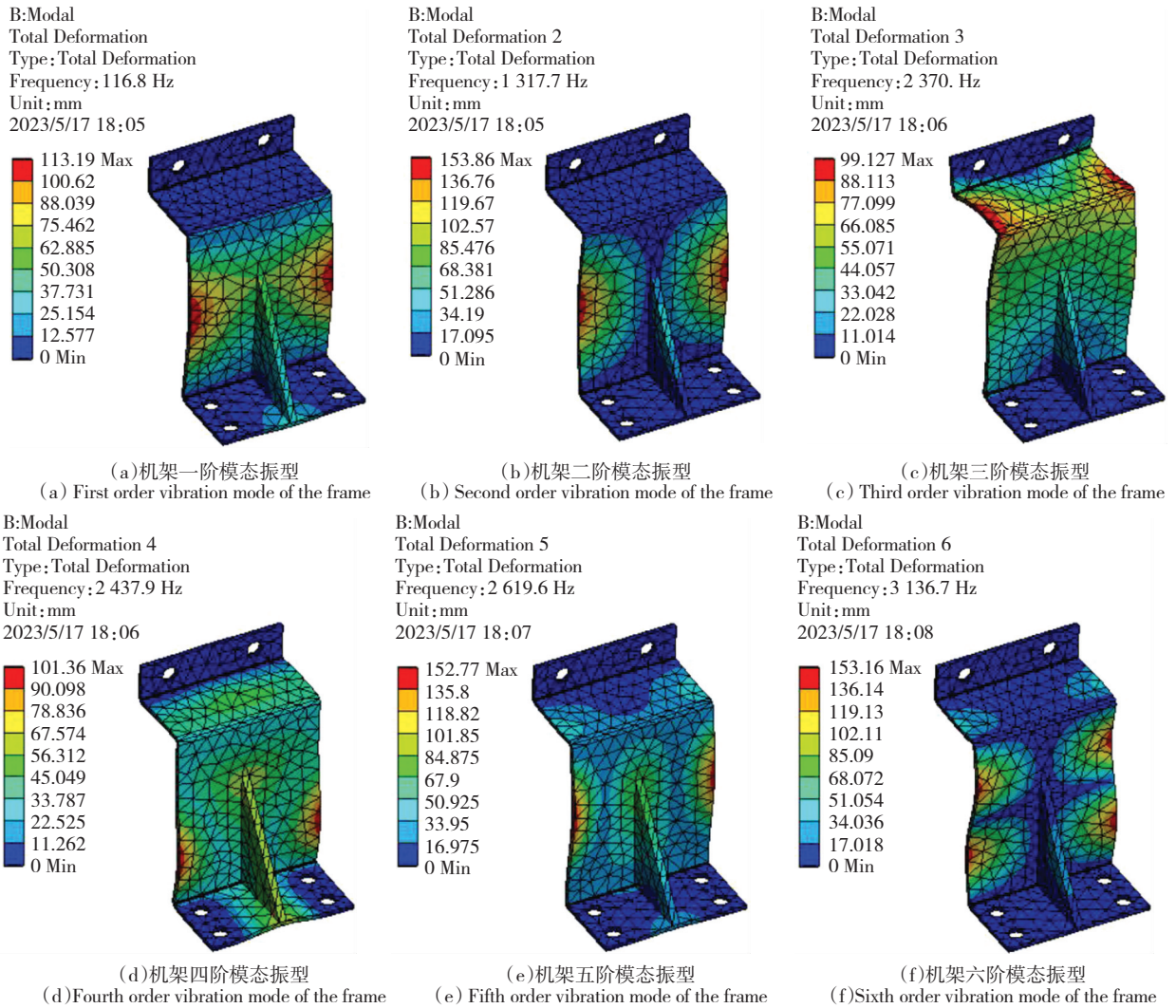


图 9 支架的模态振型

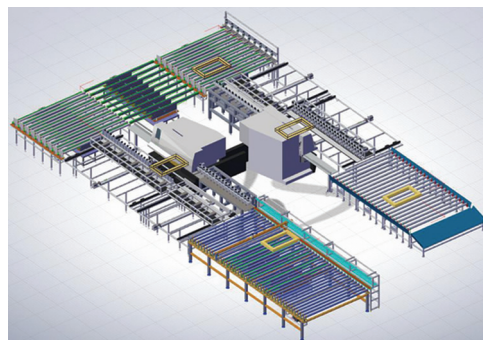
Fig. 9 Vibration mode of the frame

利用 Solidworks Composer 平台进行虚拟试验验证,按照设计节拍,得到理论加工中心的窗户加工效率为 800 扇/d,由于加工中心由 2 台单端铣削机

床组成,折合每台机床的窗户加工效率为 400 扇/d,加工效率提升 14.28%,并且加工中心仅需一人进行简单上下料操作,节省了人工劳动力,如图 10 所示。



(a) Existing UC6 single-end milling machine



(b) The machining center designed in this paper

图 10 现有加工设备与加工中心对比图

Fig. 10 Comparison of existing machining equipment and machining centers

## 6 结论

针对被动式欧式木窗对窗框铣削加工的精度和效率要求,本研究提出一种木窗双端铣削加工中心的设计方案。对加工中心的各个关键机构和零部件进行了详细结构设计,通过 solidworks 进行了三维建模,利用 Ansys 软件对关键气缸支架进行了静力学与动态特性分析,研究结果表明,本研究设计的加工中心能够达满足加工精度和效率的要求,加工效率提升了 14.28%,满足实际生产使用。

### 【参 考 文 献】

- [1] 周霞菊. 被动式建筑在我国冬冷夏热地区应用现状及发展[J]. 住宅与房地产, 2023, 675(2):50-53.  
ZHOU X J. Application status and development of passive buildings in cold winter and hot summer areas in China [J]. Housing and Real Estate, 2023, 675(2):50-53.
- [2] WANG Y P, HU L, HOU L C, et al. Study on energy consumption, thermal comfort and economy of passive buildings based on multi-objective optimization algorithm for existing passive buildings[J]. Journal of Cleaner Production, 2023, 425:138760.
- [3] 马伊硕,郝生鑫,曹恒瑞. 中国被动式低能耗建筑的发展模式和发展趋势[J]. 建设科技, 2020, (19):8-12,28.  
MA Y S, HAO S X, CAO H R. The development model and trend of passive low energy buildings in China[J]. Construction Science and Technology, 2020, 416(19):8-12,28.
- [4] 李九阳,陈立,郭金鹏,等. 双碳背景下被动式超低能耗建筑发展的影响因素及对策[J]. 建筑经济, 2023, 44(S1):364-366.  
LI J Y, CHEN L, GUO J P, et al. Research on the development and suggestions of passive ultra-low energy buildings in the context of carbon peak and neutrality[J]. Construction Economy, 2023, 44(S1):364-366.
- [5] ANAND V, KADIRI V L, PUTCHA C. Passive buildings: A state-of-the-art review[J]. Journal of Infrastructure Preservation and Resilience, 2023,4(1):3.
- [6] 房丹. 被动式超低能耗建筑设计浅谈与应用[J]. 城市建设理论研究(电子版), 2023(13):82-85.  
FANG D. Passive ultra-low energy building design and application[J]. Theoretical Research in Urban Construction, 2023(13):82-85.
- [7] 魏贺东,赵及建,李秀峰,等. 被动式门窗安装位置与建筑节能性能分析[J]. 建设科技, 2017, (17):54-56.  
WEI H D, ZHAO J J, LI X F, et al. Analysis of passive door and window installation position and building energy saving performance[J]. Construction Science and Technology, 2017(17):54-56.
- [8] 马俊清. 节能:中国木窗产业的发展方向[J]. 中国建筑金属结构, 2013(13):46-47.  
MA J Q. Energy saving: The development direction of wood window industry in China [J]. China Construction Metal Structure, 2013(13):46-47.
- [9] 姜新波,郭璨,马岩,等. 欧式木窗表面双端砂光机的设计与分析[J]. 林产工业, 2017, 44(5):14-18.  
JIANG X B, GUO C, MA Y, et al. Design and analysis of the double-end surface sanding machine of European type wooden Windows [J]. China Forest Products Industry, 2017, 44(5):14-18.
- [10] 夏兴华,倪贵林,陈峰. 浅谈欧式木窗产品窗框和窗扇的铣型加工[J]. 门窗, 2012(2):22-25.  
XIA X H, NI G L, CHEN F. Brief analysis of process for window frame and window sash milling of European-style wood window[J]. Doors&Windows, 2012(2):22-25.
- [11] 张自鹏,黄友智,张寒松. 数控双端铣榫机整机结构的设计研究[J]. 木工机床, 2021(2):1-5,9.  
ZHANG Z P, HUANG Y Z, ZHANG H S. Design and research of the whole machine structure of CNC double end milling tenon machine[J]. Woodworking Machinery, 2021(2):1-5,9.
- [12] 尚伟,张巨香,申小平. 机油泵转子轴上销孔的钻床夹具设计[J]. 粉末冶金工业, 2016, 26(6):67-70.  
SHANG W, ZHANG J X, SHEN X P. The design of drilling fixture for the pin hole on oil pump rotor shaft [J]. Powder Metallurgy Industry, 2016, 26(6):67-70.
- [13] 贾娜. 木材切削原理与刀具[M]. 哈尔滨:东北林业大学出版社, 2013.  
JIA N. The principles of wood cutting and tools [M]. Harbin: Northeast Forestry University Press, 2013.
- [14] 王慧,崔生乐,安洋,等. 竹材切割机械臂及关键零部件设计仿真[J]. 包装工程, 2022, 43(17):165-173.  
WANG H, CUI S L, AN Y, et al. Design and simulation of bamboo cutting manipulator and parts[J]. Packing Engineering, 2022, 43(17):165-173.
- [15] 娄章迪,童科挺,吕博,等. 钢-竹组合箱形梁抗剪性能有限元分析[J]. 森林工程, 2023, 39(4):170-179.  
LOU Z D, TONG K T, LYU B, et al. Finite element analysis of shear behavior of steel-bamboo composite box beams[J]. Forest Engineering, 2023, 39(4):170-179.
- [16] 宋欣,陈龙宝,单梁,等. 增材制造机机元件静力验证试验设计及实现[J]. 哈尔滨理工大学学报, 2022, 27(5)70-78  
SONG X, CHEN L B, SHAN L, et al. Design and implementation of static verification tests for additively manufactured civil aircraft components[J]. Journal of Harbin University of Science and Technology, 2022, 27(5):70-78.
- [17] 战丽,张志文,杨春梅,等. 履带式林间剩余物集材机关键部件设计与试验研究[J]. 森林工程, 2023, 39(3):131-139.  
ZHAN L, ZHANG Z W, YANG C M, et al. Design and experimental study on key components of crawler forest residue skidder[J]. Forest Engineering, 2023, 39(3):131-139.
- [18] 李志强,李俊,刘方凯. 铝合金托盘有限元分析及优化设计[J]. 包装工程, 2018, 39(5):126-131.  
LI Z Q, LI J, LIU F K. Finite element analysis and optimum design of aluminum alloy pallet[J]. Packaging Engineering, 2018, 39(5):126-131.