

DOI:10.19344/j.cnki.issn1671-5276.2025.06.019

航空薄壁加工卷轧整形机械的整形辊动力学特性研究

赵向杰, 房栓娃

(西安航空职业技术学院, 陕西 西安 710089)

摘要:为有效进行机械系统的减振优化设计,对航空薄壁加工卷轧整形机械在振动传递方面的动力学性能进行研究。对航空薄壁加工卷轧整形机械进行结构设计,利用有限元软件进行动力学特性仿真分析,获得模态叠加法下的振动传递特性分析。通过对比获得航空薄壁加工卷轧整形机械的整机动力学特性,同时对其他机械部件和扩展臂不同位置进行了动力学分析。结果表明:该航空薄壁加工卷轧整形机械应该避免在 55 Hz 发生纵向振动和在 59 Hz 附近发生横向共振,该设计方法为后续同类机械设计和优化提供了新的思路。

关键词:航空薄壁;卷轧整形机械;模态分析

中图分类号:V214.4 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-5276(2025)06-0105-05

Research on Dynamic Characteristics of Shaping Rollers in Aviation Thin-walled Processing and Rolling and Shaping Machinery

ZHAO Xiangjie, FANG Shuanwa

(Xi'an Aeronautical Polytechnic Institute, Xi'an 710089, China)

Abstract: For effective vibration reduction optimization design of mechanical systems, a study was conducted on the dynamic performance of aviation thin-walled machining rolling and shaping machinery in terms of vibration transmission. This article presents the structural design of aviation thin-walled processing rolling and shaping machinery, followed by dynamic characteristic simulation analysis using finite element software, obtaining modal superposition method and vibration transmission characteristic analysis. By comparison, the overall dynamic characteristics of the aviation thin-walled processing rolling and shaping machinery can be determined, and dynamic results analysis can be conducted on other mechanical components and different positions of the extension arm. The results indicate that the aviation thin-walled processing rolling and shaping machinery should avoid longitudinal vibration at 55 Hz and transverse resonance near 59 Hz. The designed method provides new ideas for the design and optimization of similar machinery in the future.

Keywords: aviation thin wall; rolling and shaping machinery; model analysis

0 引言

航空薄壁加工卷轧整形作业作为生产加工的重要工艺,其在航空机械加工、薄壁件加工、国防军工等领域均具有重要的研究意义^[1-5],故研究适应于多元化尺寸特征的薄壁加工卷轧整形机械设备具有重要意义。在精细化与智能化的机械发展状况下,对于各种规格特征的航空薄壁件进行适当的尺寸整形,已然成为当下精细化加工的重要方向,尤其对于如何高效整形不同的航空薄壁件并实现精准的整形辊动力学特性分析是人们所广泛关注的重点。现有的机械设计方案中,有的方案是通过制式化的机械系统来实现

整形,或者直接采用手动方式来实现整形作业,其相关方案均存在较大的问题。首先通过制式化的机械系统来实现控制,最大的问题在于与制式化的机械系统相配套的设备较为庞杂,装置柔性差且耗能较大等,不能依据不同航空薄壁件尺寸而进行整形作业^[6-8],所以使用高效的整形航空薄壁加工卷轧整形机械来应对该类问题十分必要。现有的手动整形方式往往整形不均匀,整形效率低,最终表现出效率低,经济效益差等问题,难以满足工程实际建设需要^[9-19]。目前对于航空薄壁加工卷轧整形机械及方法领域,其相关控制手段存在结构复杂,造价昂贵,效果不佳,过程复杂以及使用寿命低等缺点^[20-23],设计航

基金项目:陕西省科技发展计划项目(JK20230214);2023年度陕西高校青年创新团队项目(2023-98);西安航空职业技术学院2024年度科研计划项目(24XHZK-01)

第一作者简介:赵向杰(1987—),男,陕西临潼人,副教授,硕士,研究方向为机械设计和自动控制,yuanlizhi1980@163.com。

空薄壁加工卷轧整形机械已然成为机械控制及方法领域的主流趋势。

1 航空薄壁加工卷轧整形机械设计

航空薄壁加工卷轧整形机械在薄壁加工生产中扮演着至关重要的角色,在该机械的动力设计方面,采取手动单驱横向滑轨实现前后辊的对向运动,进而保证整个机械操作流程可以实现较为连续的动力输出作业,保障整个机械运行的稳定高效。对于纵向的作业主要依靠后驱电机驱动皮带传递作业,航空薄壁加工卷轧整形机械如图1所示。

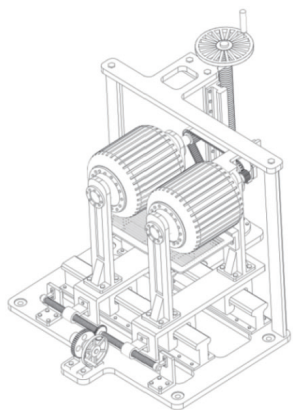


图1 航空薄壁加工卷轧整形机械

航空薄壁加工卷轧整形机械,可以调整整形机位位置、调整预紧程度,实现航空薄壁加工卷轧与整形作业一体化。该装置包括预紧装置、整形装置、固支装置、变距装置和移动装置共5个部分,通过带传动与齿轮传动实现2个整形转筒相向转动,并通过丝杠转动带动预紧齿轮下移实现整个传动带的预紧,通过变距丝杠两端螺纹方向相反最终实现整个装置的同步相向变距运动,便于依据被加工物特征而实现粗磨与精磨相结合以及通过两个整形转筒表面粗糙度和转速差等设定,实现多元化形状航空薄壁件在不同作业距离下单输入源对象粗磨与精磨相结合的全面性整形作业。本机械系统方法可有效实现航空薄壁件粗磨与精磨相结合的控制,其结构具有造价低廉,原理结构简单,高效等特点。

2 结构动力学分析预处理

航空薄壁加工卷轧整形机械通过单一的驱动电机来实现对称整形辊的相向运动,在此过程中的振动源为驱动电机,基于对称化加持及加工作业的设计思路,该机械的驱动方向可以被确定,并

且基于正弦激励方向恒定分析的激励信息在信号发生器上可以较为全面地表征全频段的振动激励信号,所以采取该方式可以较为真实地模拟不同类型的激励工况。在设计的基础上,为保障装置作业的精准性,对该类结构进行结构动力学分析非常必要。通过动力学研究,可以深入了解航空薄壁加工卷轧整形机械关键部件在不同工况下的振动特性以及结构参数对性能的影响规律,为优化设计提供理论依据。同时,动力学研究还可以帮助预测航空薄壁加工卷轧整形机械关键部件在不同使用条件下的寿命和可靠性,为制定维护策略提供参考。

基于机械系统设计的轻便性,此悬臂采用铝合金材料,其余不影响整个机械结构的连接件及相关配件选用钢结构材料,其参数特性如表1所示。

表1 材料材料参数

材料	弹性模量/GPa	密度/(kg·m ⁻³)	泊松比
结构钢	200	7 850	0.30
铝合金	71	2 770	0.33

在两种材料参数的基础上,结合航空薄壁加工卷轧整形过程中通过固定约束类型,对该类航空薄壁加工卷轧整形机械的底板部分进行整个结构面板的固定约束,一方面保证整个机械加工过程的稳定性,另一方面该方式也满足实际工况中的运动特征及安装方式。在有限元建模阶段,首先将UG中构建的精确三维模型通过Parasolid接口导入Ansys Workbench平台。经划分网格处理可知,网格最大和最小的无量纲尺寸分别为0.99和0.25,高于0.20,故有限元的网格划分质量相对较高,满足后续的动力学特性分析。其中,网格尺寸应避免过小,其目的是为了防止网格划分因为结构复杂而出现奇异值,进而会产生不合理的局部模态非正常耦合关系,从而影响整个结构的响应结果。

3 航空薄壁加工卷轧整形机械动力学性分析

3.1 模态叠加法分析

采取模态叠加原理对该机械系统进行分析,其具体分析步骤如下。

1) 基于系统的结构模型构建多自由度系统的动力学方程为

$$M\ddot{u} + C\dot{u} + Ku = F(t) \quad (1)$$

式中: M 、 C 、 K 分别为质量矩阵、阻尼矩阵、刚度矩

阵; $\mathbf{u}$ 为位移向量; $\mathbf{F}(t)$ 为外激力。

2) 通过求解无阻尼自由振动的特征值,求得

$$(\mathbf{K}-\omega_i^2\mathbf{M})\boldsymbol{\phi}_i=0 \quad (2)$$

式中: ω_i 为系统求得的固有频率; $\boldsymbol{\phi}_i$ 为系统求得的固有频率的响应振型。

3) 将物理位移进行模态坐标变换,可得到各阶模态的线性组合为

$$\mathbf{u} = \sum_{i=1}^n \boldsymbol{\phi}_i q_i(t) \quad (3)$$

式中 q_i 为模态坐标。

4) 利用模态的正交性(对质量矩阵、刚度矩阵和比例阻尼成立),原方程可解耦为独立的单自由度方程:

$$\mathbf{M}_i \ddot{q}_i + \mathbf{C}_i \dot{q}_i + \mathbf{K}_i q_i = Q_i(t) \quad (4)$$

式中: $\mathbf{M}_i$ 、 $\mathbf{C}_i$ 、 $\mathbf{K}_i$ 分别为模态质量矩阵、模态阻尼矩阵、模态刚度矩阵; $Q_i(t)$ 为广义力。

对每个解耦方程分别求解 $Q_i(t)$, 利用 Duhamel 积分或频域法,最终物理响应为各模态响应的叠加:

$$\mathbf{U}(t) = \sum_{i=1}^n \boldsymbol{\phi}_i Q_i(t) \quad (5)$$

基于上述原理,在航空薄壁加工卷轧整形机械的边界条件设定上,依据整个机械系统在运行过程中的结构安装特征,其在整形过程中会产生竖直/水平方向上往复运动,所以在约束条件上选取板螺纹固定孔进行固定约束。其整个机械在不同零件安装条件下,它们之间的相互作用会产生耦合振动,而本文中机械零件的耦合机制主要是依据不同零件的模态特性而进行耦合,综合其机械设计特点,可以获取航空薄壁加工卷轧整形机械的主要 6 阶模态结果,如图 2 所示。

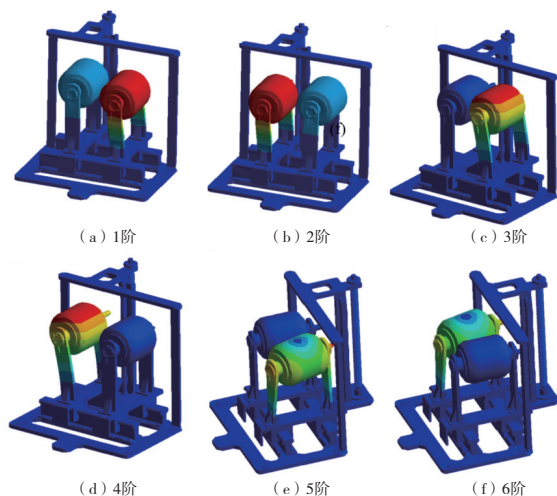


图 2 航空薄壁加工卷轧整形机械的模态振型

航空薄壁加工卷轧整形机械的 1~6 阶模态的振型云图如图 2(a)—图 2(f) 所示。在得到上述整机的模态振型的同时,也进一步得到这 6 阶航空薄壁加工卷轧整形机械的对应固有频率,如表 2 所示。

表 2 航空薄壁加工卷轧整形机械的模态

阶数	频率/Hz	振型
1	54.404	前辊侧弯
2	55.594	后辊侧弯
3	58.278	前辊正弯
4	59.262	后辊正弯
5	191.540	前辊扭转
6	194.700	后辊扭转

在航空薄壁加工卷轧整形机械的模态叠加分析中,首先需要确定框架的固有频率和相应的振型。这些固有特性可以通过有限元分析等数值方法获得其代表框架在不同振动模式下的自然运动形态,将所有的模态响应叠加起来,得到框架在实际载荷作用下的总响应。

3.2 结构频率响应分析

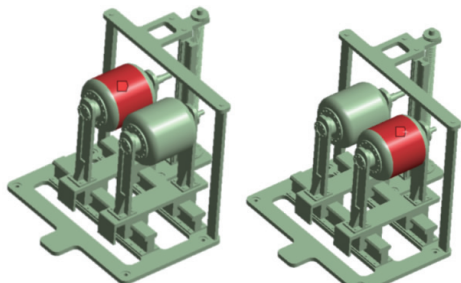
通过 3.1 节表 2 可知航空薄壁加工卷轧整形机械的 1~6 阶模态的结果,在明确航空薄壁加工卷轧整形的固定约束基础作用下,整个机械作业部件中,首先前后辊在振动环境下低阶振动中主要表现出侧向的弯曲振型,其前辊侧弯振型和后辊侧弯振型的固有频率分别为 54.404 Hz 和 55.594 Hz,两者结构的固有频率差异主要集中于前后辊子的垂直升降部件配套的质量不同而导致其固有频率存在的差异,而这种差异也导致前辊正弯振型和后辊正弯振型所对应的固有频率存在差异,其两者分别为 58.278 Hz 和 59.262 Hz,而后两种模态则是薄壁加工整形执行机构的组合模态。固有频率 191.540 Hz 的主振型主要由前辊扭转构成,同时也结合后辊的弯曲振形,不过两者中主要还是表现为前辊扭转。固有频率 194.700 Hz 的主振型主要由后辊扭转构成,同时也结合者前辊的弯曲振形,不过两者中的主要还是表现为后辊扭转,符合实际工程现象。对于上述中的后辊与前辊的位置如图 3 所示。

在图 3 和表 2 的基础上,基于模态叠加原理进行振动传递特性分析,其通过在固定支撑的基础上增设恒定谐波竖直方向的 1 mm 正弦波激

励,并采取振动传递的隔振统计公式进行描述:

$$P = 20 \log (A_{\text{out}}/A_{\text{in}}) \quad (6)$$

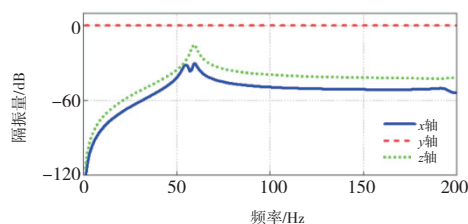
式中: A_{out} 为振动输出幅值; A_{in} 为振动输入幅值。经计算,获取其航空薄壁加工卷轧整形机械上框面的振动传递结果如图4所示。



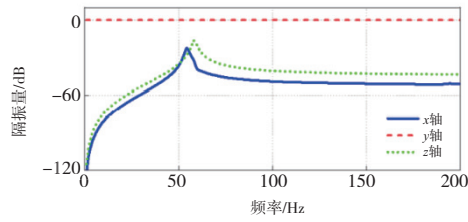
(a) 后辊位置示意图

(b) 前辊位置示意图

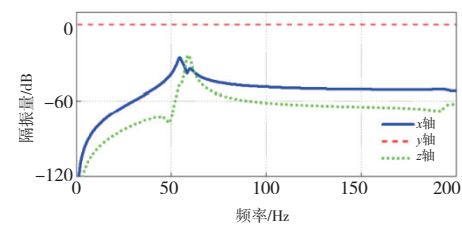
图3 航空薄壁加工卷轧整形机械的辊子位置示意图



(a) 后辊不同方向振动响应



(b) 前辊不同方向振动响应



(c) 整机不同方向振动响应

图4 航空薄壁加工卷轧整形机械的扩展臂的竖直激励下振动传递结果

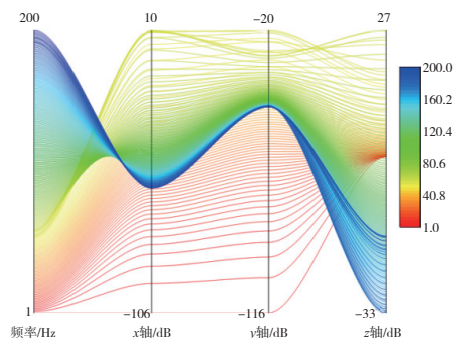
通过上述结果可知,横坐标为扫频频率范围,纵坐标为振动传递率。通过竖直激励可以获得航空薄壁加工卷轧整形机械前后辊子及整机的振动传递结果,主要表现在纵向方向上,其振动传递基本与激励源的振幅一致,但同时基于整个机械模态耦合下的结果可知整个系统会在横向存在相应的振动响应分量,其共振频率在55 Hz附近,相较于

于水平方向,竖直方向的振动传递率所具有的振动传递量级较大,说明其在纵向方向上的振动传递能量较大,而在横向上的振动传递较小,进而该整机在机械设计上的振动传递耦合较小。在实际机械运行过程中其工作频段为0~200 Hz,所以该航空薄壁加工卷轧整形机械应该避免低频段55 Hz附近发生共振频段,或者可以采取相应的措施来降低相关振动传递过程,不过该振动传递特性基本对本机械不造成较大影响,属于可接受的范围。

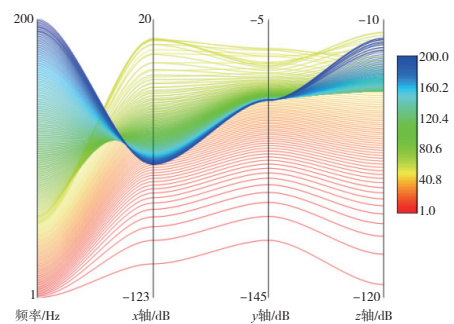
3.3 后驱位置的力学特性分析

在上述航空薄壁加工卷轧整形机械的动力学分析基础上,进一步采用表1中的参数进行该整形机械后驱传动轴端位置的力学特性进行分析。

与航空薄壁加工卷轧整形机械模型中不同辊子部位的结构动力学结果相对比,后驱传动轴端位置依据其附属于辊子响应的不同,其动力学特性也有差异,在此对于后驱传动轴端位置分别进行不同方向下的激励输入,获取扩展臂不同位置的振动传递结果如图5所示。



(a) 竖直振动响应



(b) 横向振动响应

图5 后驱传动轴端位置不同方向激励下的振动传递结果

通过观察图5的结果可以明显看出,第1纵轴为扫频频率范围,其余3纵轴为不同方向下的后驱传动轴端位置的振动传递率。由结果可知,在纵向激励下航空薄壁加工卷轧整形机械的后驱

传动轴端位置主要的频率分布振动响应还是在于纵向。同时,基于其结构耦合作用,其横向振动方向上会在中高频呈现出横向响应的特点,而在横向振动下,后驱传动轴端位置上的横向振动传递曲线明显高于其他位置上的振动传递率,说明该类机械在设计上受横向振动影响较为明显,结合整个机械设计的穿钉方案主要为纵向上的力学预紧,所有在后续的振动抑制上可针对该类机械的动力学特性来进行防振结构设计,以满足整个机械装置特定工况下高精度的作业需求。

4 结语

本文对比分析了航空薄壁加工卷轧整形机械关键部件在不同工况下振动传递的表现。结果表明,该航空薄壁加工卷轧整形机械需要避免在 55 Hz 的纵向振动和 59 Hz 发生横向方向上的共振,通过对于整个机械装置的动力学特性分析,可有效地对整个机械的振动响应作出评价。同时,在低频振动影响下,面向复杂激励下振动环境中,振动传递主要表现在水平方向上,所以需要在后续的设计优化以及结构的振动抑制布局上加以关注,保证其在其他水平振动传递方面依然保持相对稳定性。

参考文献:

- [1] 罗天龙,钱应平,陈亮,等. 整体网格壁板滚弯成形工艺研究[J]. 锻压技术,2025,50(4):37-46,85.
- [2] 刘崇强,张红兵,李万祥. 含惰轮的齿轮传动系统动力学分析[J]. 机械制造与自动化,2025,54(2):52-56.
- [3] 张玉璞,李如玉,黄树涛,等. 悬空尺寸对高强钢薄壁板钻削力及变形的影响[J]. 兵器装备工程学报,2025,46(2):275-284.
- [4] 童璨瑜,王咏梅,杜娟,等. 铝合金整体壁板时效成形-轴压承载联合仿真方法与试验验证[J]. 精密成形工程,2025,17(2):19-26.
- [5] 宋健,王忠堂,梁海成,等. 镁合金壁板压弯成形曲率半径及回弹分析[J]. 精密成形工程,2025,17(1):51-59.
- [6] 申翔宇. 碳纤维壁板结构倒角边数控铣削刀具试验[J]. 现代制造技术与装备,2024,60(12):186-188.
- [7] 王忠堂,李艳娟,柳泉,等. 变曲率网格式镁合金壁板级进压弯成形数值模拟及实验研究[J]. 稀有金属材料与工程,2024,53(11):3217-3223.
- [8] 李庆涛,陈金传,石宪章,等. 可重塑 CFRP 加强筋壁板模压塑形模具设计与仿真分析[J]. 模具工业,2024,50(10):1-15.
- [9] 陈文亮,李奕星,冯素玲. 飞机复合材料机身壁板装配技术分析 with 展望[J]. 航空制造技术,2024,67(16):59-73.
- [10] 孟庆勋,徐贺,张辉,等. CFRP 壁板螺栓填隙补偿连接过程变形及局部应力分析[J]. 航空制造技术,2024,67(16):130-137.
- [11] 赵北. 基于弹性边界的多墙式盒段结构复合材料壁板屈曲分析方法[D]. 大连:大连理工大学,2024.
- [12] 王梓帆. 运载火箭结构舱段承力壁板设计与制造技术研究[D]. 廊坊:北华航天工业学院,2024.
- [13] 张明哲. 基于 DEM-FEM 耦合建模的喷丸应力场计算及铝合金壁板成形预测[D]. 长春:吉林大学,2024.
- [14] 徐贺. CFRP 壁板螺栓连接过程变形机制及其均衡控制方法[D]. 沈阳:沈阳航空航天大学,2024.
- [15] 蒋泽文. 整体带筋壁板激光喷丸成形特性及拉伸性能研究[D]. 镇江:江苏大学,2024.
- [16] 苏永玺,董航,齐国强,等. 复合材料帽型加筋壁板典型件共固化成型技术研究[J]. 工程技术研究,2024,9(6):122-124.
- [17] 董泽明. 基于功率平滑的飞机壁板类零件切削参数优化研究[D]. 杭州:浙江大学,2024.
- [18] 周益星,陈云,邓枫,等. 大型整体壁板加工变形控制技术[J]. 工具技术,2024,58(3):102-106.
- [19] 刘红军,邵泓斌. 基于数字孪生的航空壁板制孔位置实时监控研究[J]. 机床与液压,2024,52(2):34-41.
- [20] 赵艳秋,占小红,顾远之,等. 框桁式火箭贮箱壁板结构激光焊接变形仿真研究[J]. 宇航材料工艺,2023,53(6):69-74.
- [21] 范伟源. 飞机整体壁板和空心梁结构件的喷丸成形研究现状及进展[J]. 航空精密制造技术,2023,59(6):48-51,25.
- [22] 呼泉. 万吨重载列车提速试验及动力学性能分析[J]. 机械制造与自动化,2025,54(1):85-90.
- [23] 毋焱磊,张磊,李怀,等. 盾构机前盾翻身吊装静力学分析与研究[J]. 机械制造与自动化,2025,54(1):95-103,174.

收稿日期:2025-06-27