

DOI:10.19344/j.cnki.issn1671-5276.2026.01.028

复合材料原位加工系统刚柔耦合动力学建模

孔玲怡¹, 姬煜琦², 缪云飞¹, 王子², 张奇¹, 王忠康¹, 李鹏程¹, 江静帆³

(1. 南京航空航天大学, 江苏 南京 210016;

2. 上海飞机制造有限公司, 上海 200120;

3. 西北工业大学, 陕西 西安 710005)

摘要: 利用具备低成本、高灵活性等特点的工业机器人来铣削大型复材构件, 有效替代了传统机床。然而, 复材构件柔性变形是影响其加工质量的主要因素。针对复材构件铣削机器人原位加工场景, 设计复材构件多构型自适应可调节支撑工装, 构建薄壁构件-柔性工装刚柔耦合一体化动力学模型, 研究不同布局下的系统动力学特性, 并通过铣削加工试验验证该方法的可行性和有效性。

关键词: 复合材料; 柔性工装; 工业机器人; 动力学模型

中图分类号: TP242.2 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-5276(2026)01-0150-05

Modeling of Rigid-flexible Coupling Dynamics in In-situ Processing of Composite Materials

KONG Lingyi¹, JI Yuqi², MIAO Yunfei¹, WANG Zi², ZHANG Qi¹, WANG Zhongkang¹, LI Pengcheng¹, JIANG Jingfan³

(1. Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China;

2. Shanghai Aircraft Manufacturing Co., Ltd., Shanghai 200120, China;

3. Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710005, China)

Abstract: Despite that industrial robots milling large composite thin-wall parts with features of low cost and high flexibility etc. effectively substitute for traditional machine tools, the flexible deformation of composite components is the main obstacle affecting the machining quality. This paper, according to the in-situ processing scenario of the composite component milling robot, designs a multi-configuration adaptive and adjustable support tool for the composite component, establishes a rigid and flexible coupling dynamic model of the thin-wall component and flexible tool, and studies the system dynamics characteristics under different layouts. The milling experiments verify the feasibility and effectiveness of the designed method.

Keywords: composite material; flexible tool; industrial robots; dynamic model

0 引言

大型复材构件尺寸大、刚性差, 在工装支撑和加工时容易发生柔性变形及颤振。如何精准预测和控制工件变形, 提高加工精度, 是实现航空大型复材构件高质量加工的一大挑战。在应用柔性工装时, 传统方法是将吸附支撑均匀分布于零件底面, 此方法需要占用较多的资源和调配的时间, 在很大程度上限制了其应用。如何分配大型复材构件的支撑数量和位置, 保障构件支撑刚性、提升加工精度是亟需解决的关键问题。

在柔性工装布局优化算法方面, LI 等^[1] 同时

考虑了工具的装夹和切削加工, 提出了以夹紧力为关键设计变量的多目标约束优化模型, 确定承受准静态加工力的多夹具最佳夹紧力。PADMANABAN 等^[2] 结合有限元方法预测了工件因加工和夹紧力而引起的动态响应, 提出了基于蚁群算法 (ACA) 的离散和连续优化方法来使工装夹具布局最优化, 最大限度地减小了工件弹性变形。陈禹至等^[3] 以减小零件加工变形和变形最均匀化为目标函数, 采用分层优化方法进行夹持点位置与夹持力设计, 优化了零件的夹持布局。王运巧等^[4] 通过有限元仿真模拟连续铣削弧形工件筋板内形的工步, 采用零阶有效解决了工程优化问题。

基金项目: 国防基础科研项目 (JCKY2021204B045); 国家商用飞机制造工程技术研究中心创新项目 (COMAC-SFGS-2022-1878)

第一作者简介: 孔玲怡 (1997—), 女, 内蒙古自治区赤峰人, 硕士研究生, 研究方向为飞机智能装配技术, 2105171@nuaa.edu.cn。

综上所述,目前在柔性工装布局优化方面,主要采用有限元方法建立工件的动力学模型^[5-7]。但是使用有限元方法计算复杂零件产品时采用大量结点,导致处理的矩阵体量过大,延长了计算时间。在铣削过程中,末端刀具、构件、工装等各部件之间存在相互耦合^[8-10],且具有时变特性。因此必须从整个系统的维度建立完备的动力学模型^[11-13],才能够精准分析构件的变形和振动响应。

多体系统传递矩阵法研究多体系统动力学具有无需系统总体动力学方程、系统矩阵阶次低、计算速度快、计算精度高等优点^[14-18]。本文针对复材构件铣削机器人原位加工场景,应用多体系统传递矩阵法,建立薄壁构件-柔性工装的刚柔耦合动力学模型,通过动力学仿真分析预测构件的支撑刚度^[19-20],并通过试验验证建立的复材铣削支撑系统动力学模型的准确性。

1 薄壁柔性构件系统铣削动力学建模

复材铣削支撑系统包括弱刚性复材薄壁构件、柔性工作台、真空吸附单元,在通过机器人进行制孔、铣削等大材料去除量的切削作业时,系统受到时变切削力的作用,会产生复杂的振动响应,甚至是颤振,影响构件的加工质量。只有建立了符合实际工况的薄壁构件工装铣削系统振动一体化动力学模型,全面、综合地对系统中各部分进行一体化建模,才能精准分析该系统的结构布局与系统振动特性以及动态响应之间的定量关系。

1.1 薄壁构件-柔性工装系统刚柔耦合动力学建模

本文应用多体系统传递矩阵法,建立薄壁构件-柔性工装刚柔耦合动力学模型,如图1所示。对构件进行统一编号,编号0为系统的边界;将地面对工装的支撑作用视为弹性支撑,编号为1;将柔性工装视为空间振动刚体元件,编号为2;将工装和构件之间的接触通过真空吸盘连接,视为由3个方向的弹簧和扭簧组成的空间弹性铰,编号分别为3、4、5、…、N;柔性构件视为空间振动薄壁板元件,编号为N+1。整个系统可以分为两个子系统,子系统1为在有支撑作用下的薄壁构件,子系统2为在地面支撑下的柔性工装。

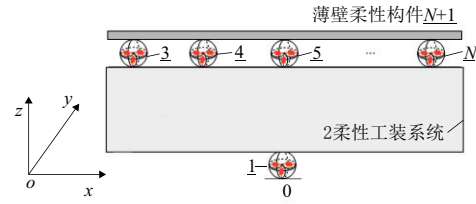


图1 薄壁构件-柔性工装系统动力学模型

空间振动薄壁板元件的网格单元离散化动力学模型如图2所示。考虑薄壁板在 z 轴方向的横向振动,将空间振动板元件离散化为 $n \times m$ 个网格单元,其中沿 x 轴正方向划分 n 个网格单元,沿 y 轴负方向划分 m 个网格单元。每个网格单元由4个无质量梁元件和1个集中质量元件组成。根据板的弹性模量和切变模量,计算每个网格单元中无质量梁元件的等效刚度,并将板的质量均匀分布于每个单元中的集中质量元件。在空间振动板元件传递时,将 x 轴正方向定义为主传递方向, y 轴负方向定义为辅助传递方向;将沿主传递方向相邻网格单元中输出端梁元件和输入端梁元件视为一个元件。因此,划分后的空间振动板元件中共有 $2n+1$ 列、 $2m+1$ 行,网格单元中的无质量梁元件或集中质量元件位置为 (i, j) ,表示所在行为 i ,列为 j 。

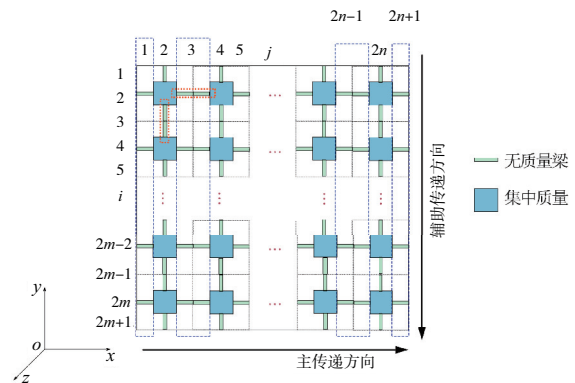


图2 薄壁构件网格单元离散化动力学模型

应用多体系统传递矩阵法,计算得出系统的总传递方程为:

$$U_{\text{all}} Z_{\text{all}} = 0 \quad (1)$$

$$Z_{\text{all}} = \begin{bmatrix} Z_{d_{n+1}, \text{OUT}}^T & Z_{d_1, \text{IN}}^T & Z_{1,0}^T & Z_{v_1, s2}^T & Z_{v_1, s3}^T & \cdots & Z_{v_1, sm}^T & Z_{v_2, s1}^T & \cdots & Z_{v_n, sm}^T \end{bmatrix}^T \quad (2)$$

$$U_{\text{all}} = \begin{bmatrix} -I_{6m \times 6m} & U_{\text{all}}^m & U^s & & \\ & 0_{6 \times 6m} & 0_{6 \times 6m} & G_{1-2} & G'_{4-2} & 0_{6 \times 6} & \cdots & 0_{6 \times 6} & 0_{6 \times 6} & \cdots & 0_{6 \times 6} \\ & 0_{6 \times 6m} & 0_{6 \times 6m} & G_{1-2} & 0_{6 \times 6} & G'_{5-2} & \cdots & 0_{6 \times 6} & 0_{6 \times 6} & \cdots & 0_{6 \times 6} \\ & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ & 0_{6 \times 6m} & 0_{6 \times 6m} & G_{1-2} & 0_{6 \times 6} & 0_{6 \times 6} & \cdots & 0_{6 \times 6} & 0_{6 \times 6} & \cdots & G'_{N-2} \\ & 0_{6N \times 6m} & 0_{6N \times 6m} & & & G_{p,N} & & & & \cdots & \end{bmatrix} \quad (3)$$

式中:

$$U^s = U_{\text{support}} U^g \quad (4)$$

$$U^g = \begin{bmatrix} U_3 U_{2,I_1} U_1 & U_3 U_{2,I_2} U_4 C & U_3 U_{2,I_3} U_5 C & \cdots & U_3 U_{2,I_K} U_N C \\ 0_{6 \times 6} & I_6 & 0_{6 \times 6} & \cdots & 0_{6 \times 6} \\ 0_{6 \times 6} & 0_{6 \times 6} & I_6 & \cdots & 0_{6 \times 6} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0_{6 \times 6} & 0_{6 \times 6} & 0_{6 \times 6} & \cdots & I_6 \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$\begin{cases} G_{1-2} = -H_{2,1} U_{2,I_1} U_1 \\ G'_{4-2} = H_{2,4} U_{2,I_2} U_4 C \\ \vdots \\ G'_{N-2} = H_{2,N} U_{2,I_K} U_N C \end{cases} \quad (6)$$

式中 $G_{p,N}$ 为空间振动板上支撑点之间的几何矩阵。

结合系统边界条件,薄壁板四边自由,力和力矩为0,工装与地面接触边界位移为0,则有

$$\begin{cases} Z_{d_n,i,\text{OUT}} = [Z \ \Theta_x \ \Theta_y \ 0 \ 0 \ 0]^T \quad (i=2,4,\cdots,2m) \\ Z_{d_1,i,\text{OUT}} = [Z \ \Theta_x \ \Theta_y \ 0 \ 0 \ 0]^T \quad (i=2,4,\cdots,2m) \\ Z_{1,0} = [0 \ 0 \ 0 \ M_x \ M_y \ Q_z]^T \\ Z_{v_k,sj} = [Z \ \Theta_x \ \Theta_y \ M_x \ M_y \ Q_z]^T \quad (k=2,3,\cdots,n; j=1,2,\cdots,m) \\ Z_{v_1,sj} = [Z \ \Theta_x \ \Theta_y \ M_x \ M_y \ Q_z]^T \quad (j=2,3,\cdots,m) \end{cases} \quad (7)$$

去掉总传递矩阵中的零元素,同时根据布局方案删掉无支撑节点对应的矩阵块,最终得到系统传递方程

$$\bar{U}_{\text{all}} \bar{Z}_{\text{all}} = 0 \quad (8)$$

求解特征矩阵得到固有振动频率和状态矢量,然后应用元件的传递方程得到系统中任一点的状态矢量,进而可得系统固有频率对应的振型。

1.2 薄壁柔性构件铣削动力学方程

应用多体系统传递矩阵法求解机器人加工系统的动力学响应问题不同于一般动力学方法中必需的系统总体动力学方程,多体系统传递矩阵法中的系统总体动力学方程形式简单,且由于多体系统中各元件之间的相互约束关系已反映在系统的总传递矩阵中,在推导系统的总体动力学方程时无需考虑,为推导过程与后续的系统动力响应计算减少了大量的计算过程,提高了计算效率。

联立各元件的体动力学方程,可得到系统的总体动力学方程为

$$Mv_u + Cv_l + Kv = f \quad (9)$$

式中: M 、 C 、 K 为增广算子; v 为系统的位移坐标列阵; f 为系统的外力列阵。

应用模态展开定理,将系统位移 v 写成模态坐标形式

$$v_j = \sum_{k_1=1}^n V_j^{k_1} q^{k_1}(t) \quad (10)$$

式中 $q^k(t)$ 为广义坐标。

将上式代入总体动力学方程,得

$$\sum_{k_1=1}^n (M_j V_j^{k_1}) \ddot{q}^{k_1}(t) + \sum_{k_1=1}^{+\infty} (C_j V_j^{k_1}) \dot{q}^{k_1}(t) + \sum_{k_1=1}^n (K_j V_j^{k_1}) q^{k_1}(t) = f_j \quad (11)$$

对两边和 V^k 作内积,可得

$$\ddot{q}^k(t) + \frac{\sum_j \langle \sum_{k_1=1}^n (C_j V_j^{k_1}) \dot{q}^{k_1}(t), V_j^k \rangle}{d^k} + \frac{\sum_j \langle f_j, V_j^k \rangle}{d^k} = \omega_k^2 q^k(t) \quad (12)$$

对于比例阻尼 $C_j = \alpha M_j + \beta K_j$, 则有

$$\sum_j \langle \sum_{k_1=1}^{+\infty} (C_j V_j^{k_1}) \dot{q}^{k_1}(t), V_j^k \rangle = (\alpha + \beta \omega_k^2) \dot{q}^k(t) d^k \quad (13)$$

从而,可得系统广义坐标方程

$$\ddot{q}^k(t) + (\alpha + \beta \omega_k^2) \dot{q}^k(t) + \omega_k^2 q^k(t) = p^k(t) \quad (14)$$

$$\text{式中 } p^k(t) = \sum_j \langle f_j, V_j^k \rangle / d^k, \quad d^k = \sum_j \langle M_j V_j^k, V_j^k \rangle \quad (15)$$

结合系统的初始条件,采用数值积分方法求出广义坐标 $q^k(t)$,代入式(10),即可求得物理坐标下薄壁柔性构件铣削系统的动力响应。

2 固有频率仿真与试验验证

试验模态是一种用来分析系统动力学特性的方法,通过振动测试来确定系统的固有频率、振型、阻尼比等模态参数。为了验证本文所提出的复材铣削支撑系统动力响应计算方法的准确性,在第1章建立的虚拟样机模型的基础上,用图3所示的柔性工装支撑单元进行动力响应计算。

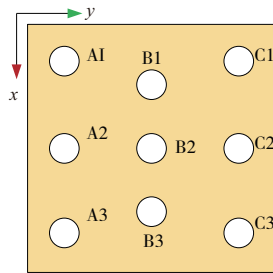


图3 工装支撑布局

试验设备主要包括冲击力锤、加速度传感器、信号采集系统和信号动态分析软件,机器人加工系统的模态试验平台如图4所示,采用3个加速度传感器同时进行信号的采集,激励力锤的范围为0~122 N,可以激励出系统的低阶频率。为了描述系统的整体振型,设置的测点如图5所示。

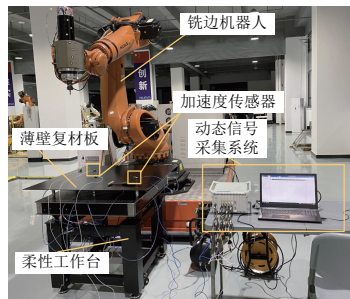


图4 复材铣削支撑系统模态试验平台

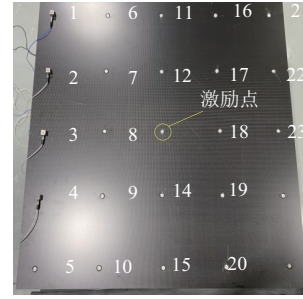


图5 加速度传感器测点位置分布图

采用单点激励,多点拾振的试验模态分析方法开展模态试验,依次测量各测试点的振动响应,并通过曲线拟合得到模态参数。在测量频率响应函数的过程中,通过检查相干函数曲线来确保测量数据的可靠性。一般情况下,各阶模态频率附近的相干函数都在0.8以上,说明测量数据是有效的和可信的。仿真计算及模态试验得到的系统前8阶固有频率对比值如表1所示,可以看出计算结果与试验结果误差在20%以内,验证了模型、参数和方法的正确性和可行性。

表1 薄壁复材板固有频率试验与仿真结果

模态阶次	试验值/Hz	计算值/Hz	相对误差/%
1	34.18	31.04	9.19
2	73.24	77.14	5.33
3	117.19	111.83	4.57
4	136.72	135.46	0.92
5	170.90	165.69	3.05
6	180.66	197.90	9.54
7	234.38	218.75	6.67
8	268.56	230.40	14.21

3 结语

1) 针对复材构件铣削机器人原位加工系统,建立了薄壁构件-柔性工装刚柔耦合动力学模型与空间振动薄壁板元件的网格单元离散化动力学模型;应用多体系统传递矩阵法,推导了薄壁工件-柔性工装刚柔耦合系统的总传递方程、总传递矩阵,建立了薄壁柔性构件铣削动力学响应方程。

2) 进行了固有频率仿真,通过模态试验对比,仿真误差小于20%,计算结果与实测结果基本吻合,验证了方法的准确性。

参考文献:

- [1] LI B, MELKOTE S N. Fixture clamping force optimisation and its impact on workpiece location accuracy[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2001, 17(2): 104-113.
- [2] PADMANABAN K P, ARULSHRI K P, PRABHAKARAN G. Machining fixture layout design using ant colony algorithm based continuous optimization method[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2009, 45(9): 922-934.
- [3] 陈禹至, 陈蔚芳, 施圣杰. 一种薄壁件柔性多点加工工装布局优化技术[J]. 机械制造与自动化, 2018, 47(5): 61-63.
- [4] 王运巧, 梅中义, 范玉青. 薄壁弧形件装夹布局有限元优化[J]. 机械工程学报, 2005, 41(6): 214-217, 223.
- [5] RUI X, BESTLE D. Reduced multibody system transfer matrix method using decoupled hinge equations[J]. International Journal of Mechanical System Dynamics, 2021, 1(2): 182-193.
- [6] 马创业, 田威, 胡俊山, 等. 铣削工业机器人数字孪生驱动模型的构建与验证[J]. 机械制造与自动化, 2023, 52(4): 160-163.
- [7] 田威, 李鹏程, 缪云飞, 等. 大型复材薄壁构件工业机器人高精度原位铣边加工新方法[J]. 机械工程学报, 2025, 61(7): 120-133.
- [8] 白权. 大型舱体构件原位加工双机器人协同高精度控制方法研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2023.
- [9] 刘少睿, 田威, 沈建新, 等. 面向机器人原位加工的大型飞船舱体变位姿态优化方法[J]. 2023, 40(3): 239-252.
- [10] 崔光裕. 大型舱体类构件机器人铣削加工系统动力学建模与振动抑制[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2022.
- [11] 崔光裕, 李波, 乐毅, 等. 弱刚性构件双机器人协同加工振动抑制方法[J]. 振动. 测试与诊断, 2024, 44(1): 147-152, 203.
- [12] 孙连军. 大型弱刚性构件机器人旋转超声铣削颤振主动抑制及应用研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2023.
- [13] ZHAN Z H, RUI X T, RONG B, et al. Design of active vibration control for launcher of multiple launch rocket system[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part K: Journal of Multi-body Dynamics, 2011, 225(3): 280-293.
- [14] 芮筱亭, 于海龙, 何斌, 等. 舰炮振动分析的多体系统有限元传递矩阵法[J]. 兵工学报, 2007, 28(9): 1036-1040.
- [15] 陈坤. 机器人铣削加工动态响应分析与颤振机理研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2023.
- [16] 刘辛军. 大型复杂构件机器人原位高性能铣削加工技术及装备[D]. 北京: 清华大学, 2023.
- [17] 张剑龙. 航空复材构件机器人制孔/铣边高精度加工关键技术研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2022.
- [18] 刘淑杰, 张磊. 大型薄壁件多点位自动化柔性支撑系统的位置优化研究[J]. 机床与液压, 2024, 52(1): 115-120.
- [19] 王张浩, 李东升, 翟雨农. 弱刚性薄壁件夹具布局优化方法研究概述[J]. 航空制造技术, 2023, 66(14): 118-135.
- [20] 刘洋, 关世玺, 赵宏, 等. 薄壁结构件的随动定位支承布局优化[J]. 组合机床与自动化加工技术, 2022(10): 10-15.

收稿日期: 2024-01-17

(上接第 125 页)

- [15] 屈源昊, 张丰收, 昌继宝, 等. 基于 Hough 变换和深度学习的条形码识别[J]. 现代电子技术, 2025, 48(1): 157-162.
- [16] 潘新, 李海伟, 张函力, 等. 基于优化 Hough 变换的铆接高度差亚像素检测方法研究[J]. 航空制造技术, 2024, 67(17): 102-108, 121.
- [17] 闫向彤, 张健, 乔煜哲, 等. 基于改进海鸥优化算法的 BP 神经网络及其应用[J]. 传感器与微系统, 2024, 43(7): 165-168.
- [18] 陈将宏, 李伟亮, 王羲沐. 基于反向变异海鸥优化算法的最优潮流计算[J]. 燕山大学学报, 2024, 48(5): 396-407.
- [19] 董跃华, 李俊, 朱东林. 基于 Halton 序列改进蝠鲼算法的 K-means 图像分割[J]. 电光与控制, 2023, 30(2): 91-98.
- [20] 钟华庚, 罗高生, 王芳, 等. 一种 Halton 序列的 HDRRT 移动机器人融合规划算法[J]. 控制与决策, 2023, 38(6): 1551-1559.

收稿日期: 2024-01-02