基于工艺特征结构优化的薄壁腔体构件数控加工刚度增强方法

李佳奇 齐书韬 郑书材 孙玉文*
大连理工大学机械工程学院，大连，116024

摘要：在航空薄壁腔体类构件数控铣削加工过程中，由于材料去除量大，导致型腔腹板等部位加工时刚性不足，极易产生颤振和加工精度下降等问题，同时，一些悬空腹板等加工部位也难以采用辅助支承和外部抑振装置。提出了一种基于工艺特征结构优化的薄壁腔体构件数控加工刚度增强策略。对薄壁腔体构件薄弱区域进行了动态特性分析，基于振动响应幅值设计出工艺特征结构；基于响应曲面法进行了工艺特征结构优化设计，通过有限元和模态试验验证了响应曲面函数的准确性，优化后结构的一阶固有频率提高36.7%，中心点振动幅值降低70.26%；提出了适用于工艺特征结构的粗精混合铣削加工方法，生成了针对工艺特征结构的刀具轨迹。试验结果表明，所提出的刚度增强加工策略能够有效避免颤振和提高加工表面质量。

关键词：薄壁腔体；工艺结构；响应曲面；刀具轨迹规划；刚度增强
中图分类号：TH162.1
DOI:10.3969/j.issn.1004-132X.2026.10.021 **开放科学(资源服务)标识码(OSID)**：

Stiffness Enhancement Method for Thin-walled Cavity Components in CNC Machining Based on Process Feature Structure Optimization

LI Jiaqi QI Shutao ZHENG Shucai SUN Yuwen*
School of Mechanical Engineering, Dalian University of Technology, Dalian, Liaoning, 116024

Abstract: During the CNC milling of aerospace thin-walled cavity components, the large amount of material removal led to insufficient stiffness in regions such as cavity webs, resulting in chatters and reduction of dimensional accuracy. Moreover, suspended webs and similar features were difficult to support with auxiliary fixtures or external vibration suppression devices. To address these issues, a stiffness enhancement strategy for the CNC machining of thin-walled cavity components was proposed based on process feature structure optimization. Dynamic characteristic analysis was conducted to identify weak regions in the structure, and process feature structures were designed based on vibration response amplitudes. Then, response surface methodology was employed to optimize the design of these process feature structures. The accuracy of the response surface model was validated through finite element analysis and modal testing. The results show that the first-order natural frequency of the optimized structure increases by 36.7%, while the vibration amplitude at the center point is reduced by 70.26%. A rough-finish hybrid milling strategy tailored to the process feature structures was proposed, and corresponding tool paths were generated. The experimental results demonstrate that the proposed stiffness enhancement strategy effectively suppresses chatters and improves surface quality during machining.

Key words: thin-walled cavity; process feature structure; response surface; tool path planning; stiffness enhancement

0 引言

薄壁腔体类结构件因其优异的力学性能和轻量化设计而在航空航天、能源动力等领域得到了广泛应用。此类薄壁件数控加工材料去除量大，铣削加工时构件腹板等部位的刚度逐渐下降，使得加工过程极易出现颤振[1-3]、变形等问题，严重影响了构件加工的效率、精度和表面质量。针对以上问题，常采用工艺参数优化、辅助支承[4]、外部抑振装置[5]等手段来实现稳定铣削，但这些方式仍存在效率降低，增加额外的装置设计、制造和维修成本或受空间限制难以采用外部装置等问题。

针对薄壁腔体类构件加工，早期的颤振控制手段常以经验调参为主，通过减小切深、降低进给率等方式来被动抑制颤振的发生。该类方法依赖操作者经验，且加工效率难以保证。稳定性预报

收稿日期：2025-05-18
基金项目：国家自然科学基金(52535011)

方法(stability lobe diagram，SLD)的提出为颤振控制提供了理论依据，通过建立加工系统的动力学模型并绘制稳定域极限图，实现对切削参数的预测与优化[6-7]。随着传感器技术、数控系统与人工智能的发展，国内外学者纷纷探索主动颤振控制手段，如基于实时监测的自适应切削参数调整、变主轴转速加工策略、刀具路径优化等智能控制方法[8-9]，有效提高了颤振识别的准确性与抑制能力。同时，从结构层面出发的动力学优化设计与刚度增强技术也被广泛应用于薄壁类零件的加工工艺规划中。

一些学者提出利用工件未加工部分作为加工时薄弱部位的支撑，从而提高整个加工过程的结构刚度。CORSON等[10]采用增材制造与机械加工相结合的形式，通过对预成型件侧壁进行优化设计来最大限度地降低沉积和加工的综合成本。SMITH等[11]采用工艺加强筋保证薄壁件加工时所需最小刚度。使用这些方式制造的侧壁预成形件或工艺加强筋引入了附加结构，不利于高速铣削加工，并且相关研究多数未针对腹板类零件展开。一些学者提出采用非均匀余量设计策略，其思想也是充分利用薄壁件自身的刚度，以达到精加工时控制变形与加工误差的效果。刘强等[12]研究了阶梯铣削工艺和传统双面对称铣削工艺对GH4169G整体叶盘叶片铣削稳定性的影响。白万金[13]通过数值仿真方法对工字形薄壁件对称铣削进行了分析，提出了减少让刀变形的方法。单晨伟等[14]研究了非均匀余量补偿方法，减小了薄壁悬臂叶片加工中的变形。非均匀余量设计方法虽在加工误差的控制方面取得了一定的效果，但该方式在加工过程中按照常规一次性去除，其切削深度逐渐增大，容易导致加工颤振的问题。

综上，为实现难加工材料薄壁腔体类构件的高效稳定加工，本文提出了一种基于工艺特征结构优化的薄壁腔体构件数控铣削加工刚度增强策略与方法。

1　薄壁件动态特性

1.1　动态特性分析

薄壁腔体结构类零件数控加工阶段常有高达80%以上的材料去除率，导致腹板等关键部位的动态刚度随切削进程而持续衰减，出现颤振、变形等问题，薄壁件结构如图1所示。同时，其悬空腹板结构在加工过程中难以采用辅助支承和外部抑振装置，为此本文提出通过改善加工工艺的方法来提高薄壁件加工过程刚度，有效避免颤振和提高加工表面质量。

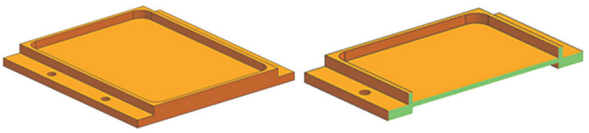


图1　薄壁件结构

Fig.1　Thin-walled components

提高薄壁件刚度最有效的方法是提高构件最薄弱部位的刚度，而结构动态特性分析[15]能够快速准确地找到其薄弱部位。对于多自由度系统，其动力学基本方程可描述为

$$\boldsymbol{M}\ddot{\boldsymbol{x}}+\boldsymbol{C}\dot{\boldsymbol{x}}+\boldsymbol{K}\boldsymbol{x}=\boldsymbol{F} \tag{1}$$

式中：$\boldsymbol{M}$、$\boldsymbol{C}$、$\boldsymbol{K}$分别为系统质量、阻尼与刚度矩阵；$\ddot{\boldsymbol{x}}$、$\dot{\boldsymbol{x}}$、$\boldsymbol{x}$分别为系统各节点自由度方向的加速度、速度和位移向量；$\boldsymbol{F}$为激励力向量。

忽略阻尼影响，并将其视为n自由度的无阻尼自由振动系统，其特征方程可表示为

$$(\boldsymbol{K}-\boldsymbol{\omega}^2\boldsymbol{M})\boldsymbol{\phi}=0 \tag{2}$$

式(2)有零解的充要条件是其系数行列式等于零，即

$$\left|\boldsymbol{K}-\boldsymbol{\omega}^2\boldsymbol{M}\right|=0 \tag{3}$$

求解式(3)即可得到系统的特征值ω_i^2(i=1，2，…，n)，将其开根号后从小到大排序得到该系统的n阶次固有频率。将每阶次固有频率代入特征方程，可求得与之对应的特征向量，即系统各阶模态振型。

系统频响函数的表达式如下：

$$H_{ls}(\omega)=\sum_{r_i=1}^{N_a}\frac{\varphi_{lr_i}\varphi_{sr_i}}{K_{r_i}-\omega^2M_{r_i}+\mathrm{j}\omega C_{r_i}} \tag{4}$$

式中：φ_{lr_i}、φ_{sr_i}为第r_i阶模态振型在节点l和s处的模态坐标，为系统第r_i阶固有频率。

通过对零件进行动态特性分析，可以掌握构件振动幅值的变化规律，并识别出结构刚度薄弱区域。提高工件整体刚度的关键在于增强这些薄弱部位，该过程为后续工艺特征结构(简称“工艺结构”)的优化设计提供了理论依据与设计思路。

1.2　工艺特征结构优化

通过各点频响函数的分析，可获得随构件位置变化的频响函数$H(x,y)$，其幅值$|H(x,y)|$最大值为$H_{\max}$。考虑到腹板结构中心区域为薄弱区域，且该区域内的振动幅度接近最大值，对铣削过程余量变化较为敏感，因此设计为均匀余量加工区域，其位置函数为

$$R_1=\{(x,y)\,\|\,H(x,y)|\geqslant 0.7H_{\max}\} \tag{5}$$

腹板周围靠近侧壁区域刚性较强的支承区域设计为厚度较大的刚度增强区域，其位置函数为

$$R_2=\{(x,y)\,\|\,H(x,y)|\geqslant 0.3H_{\max}\} \tag{6}$$

中间过渡区域采用线性加厚的结构形式。

1.2.1 基于响应面法的工艺特征结构优化

工艺结构对整体结构的动态性能与其高度变量是非线性的，很难在其高度变量和优化目标之间建立精准的表达式，因此需要通过响应面法建立高度变量和整体结构固有频率之间的函数关系。响应面法是数学方法和统计方法结合的产物，通过对过程的回归拟合和响应曲面、等高线的绘制，可方便地求出相应于因素水平的响应值。

响应曲面法[16]的表达式为

$$F=a+\sum_{i=1}^{n}b_ix_i+\sum_{i=1}^{n}c_ix_i^2+\sum_{i=1}^{n-1}\sum_{j=i+1}^{n}d_{ij}x_i \tag{7}$$

其中，x表示不同区域工艺结构高度；F为一阶固有频率；参数a、b、c、d是需要通过数据拟合求得的系数。为简化计算节约时间，避免限制响应面法的应用范围，保留了常数项、一阶项及二阶平方项，舍去了二阶交叉项，采用以下形式：

$$F=a+\sum_{i=1}^{n}b_ix_i+\sum_{i=1}^{n}c_ix_i^2 \tag{8}$$

根据复相关系数评估公式

$$R^2=1-\sum_{i=1}^{m}(y_i-\hat{y}_i)^2/\sum_{i=1}^{m}(y_i-\bar{y})^2 \tag{9}$$

式中：$\hat{y}_i$为模型预测值；$\bar{y}$为实际一阶固有频率的算数平均值。

为了使工艺结构对整体结构刚度起到有效作用，以工艺结构高度最小为目标，建立如下优化数学模型：

$$\left.\begin{aligned}&\min\ x\\&\text{s.t.}\ \ y=a+\sum_{i=1}^{n}b_ix_i+\sum_{i=1}^{n}c_ix_i^2\geqslant\lambda F_1\\&\qquad 0\leqslant x_1\leqslant x_2\end{aligned}\right\} \tag{10}$$

式中：λ为优化目标系数；F_1为一阶固有频率。

1.3 算例验证

本文利用有限元分析软件hyperworks进行仿真分析，步骤如下。

1）构件几何模型的建立及赋予材料属性。本文选择长方形腔体悬空腹板进行分析，尺寸大小为200 mm×150 mm，中心厚度为2 mm。构件材料采用Ti6Al4V，密度ρ=4.42 g/cm^3，弹性模量E=110 GPa，泊松比ν=0.31。其几何模型见图2。

2）网格划分。该构件有限元模型网格划分在hyperworks中的hypermesh模块下进行，采用壳单元网格。因为当薄壁件的厚度远小于其他两个方向（长度和宽度）的尺寸时，这种几何特性使其在力学行为上更接近于二维结构，而非三维实体。面单元能够很好地捕捉这种二维特性，同时采用壳单元可显著减少网格数量和计算量。有限元仿真模型网格划分如图3所示。

3）约束载荷的施加。边界条件包括位移边界条件和载荷边界条件，该薄壁腔体构件通过夹具

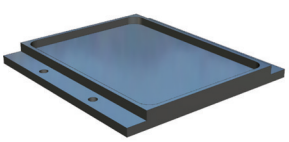


图2 几何模型

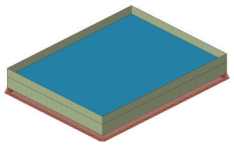


图3 有限元模型

Fig.2 Geometric model Fig.3 Finite element model

紧紧压在铣床的工作台上，所以采用底部完全约束的形式。

4）求解和后处理。在完成腔体零件网格划分、材料参数设定、边界载荷施加之后，设置分析类型为正则模态分析，基于Lanczos算法计算构件特征值，其核心思想是将一个大规模的对称矩阵投影到一个较小的三对角矩阵上，从而降低计算复杂度。通过求解这个三对角矩阵的特征值和特征向量，可以近似得到原矩阵的特征值和特征向量。通过Lanczos算法可以高效地提取系统的低阶模态参数（如固有频率和振型），从而用于后续的动态分析。

选择hyperworks中的分析模块optistruct进行有限元仿真计算，模态仿真结果如图4所示。

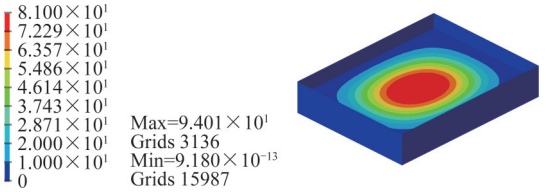


图4 模态振型

Fig.4 Mode shapes

通过有限元频响分析可以得到构件不同节点处频响函数，工件位置划分及不同节点频响函数如图5所示。

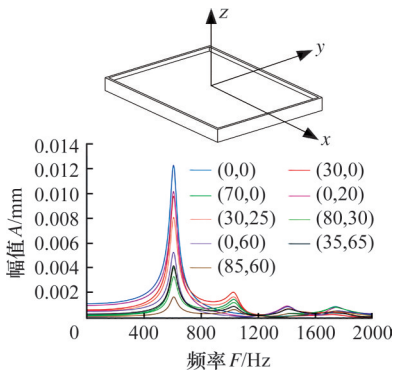


图5 工件位置划分及各点频响函数

Fig.5 Workpiece position division and frequency response function at each point

通过各节点振幅拟合出幅值随构件位置变化三维曲面，如图6所示，过渡位置通过插值得到。

根据上述分析，设计出工艺特征结构构件，如图7所示。

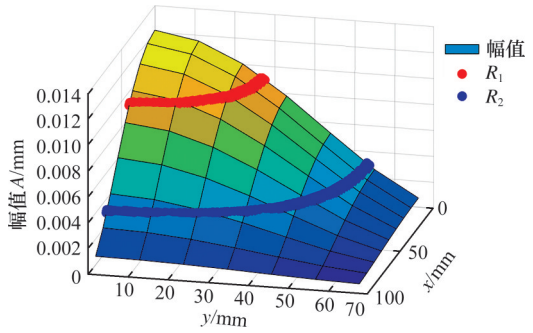


图 6　幅值随构件位置变化图

Fig.6　Amplitude variation with component position graph

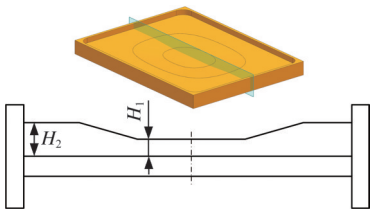


图 7　工艺特征结构构件

Fig.7　Process feature structural component

对不同工艺结构高度工件进行模态分析，工艺结构高度与固有频率的散点图见图 8。

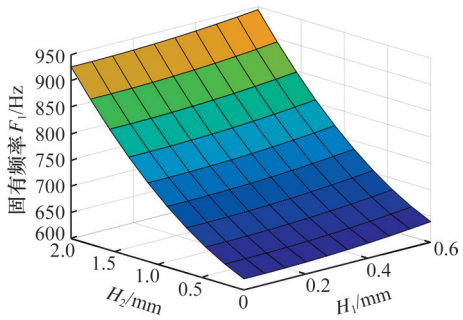


图 8　工艺结构高度与固有频率的散点图

Fig.8　Scatter plot of process structure height and natural frequency

对比不同参数下的固有频率可发现，结构高度变化对固有频率具有显著的非线性影响。第一阶固有频率是结构的最低频率，通常对应于结构的主要振动模式。这个频率通常最容易被外界激励所激发，因此本文针对第一阶固有频率进行响应面拟合。拟合后的二次多项式响应面函数为

$$F_1 = 616 - 2.5H_1 + 69.01H_2 + 54.61H_1^2 + 41.68H_2^2$$

根据复相关系数评估公式进行拟合度评估，得出响应面函数的 R^2 为 0.9956，表明拟合效果优良，说明基于有限元分析得到的固有频率响应面具有较高的拟合精度。

求解优化方程可得，当厚度分别为 0.5、1.5 mm 时，整体结构固有频率由 624 Hz 提高至 824 Hz，为验证响应面数学模型的准确性，对优化前后的结构进行重新建模，并开展有限元频响分析，结果如图 9 所示。

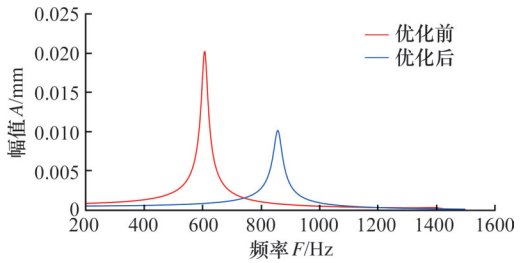


图 9　优化前后频响函数曲线

Fig.9　Frequency response function curves before and after optimization

优化后进行有限元模态分析得到工件一阶固有频率为 858 Hz，与响应面法预测结果的误差为 4.15%。对比频响曲线可见，优化后结构一阶固有频率提高了 32.1%，腹板中心振动幅值下降了 50%，工艺结构的存在使得位移频响曲线出现了明显的移频和降幅，充分说明该结构在提高整体动刚度方面的有效性，同时也进一步验证了响应面数学模型的准确性。

2　非均匀余量加工路径规划

前文分析表明，优化设计后的工艺结构能够为低刚度区域提供有效的刚性支撑，从而显著提高整体结构的动刚度，然而，工艺结构的引入也带来了后续如何高效去除的问题。为此本文提出了一种针对工艺结构的非均匀余量加工策略。

2.1　工艺特征分层粗精混合加工方法

为了便于分析观察，从腹板结构中提取图 10 所示截面。基于粗精混合加工的思想，将工艺特征结构沿待加工表面的法线方向分为区域 A 和区域 B。区域 A 靠近成品件表面，由于该加工位置为腹板刚性较低的薄弱处，因此需要选用较小的切削参数以保证整体的加工质量。区域 B 位置远离成品件表面，其主要功能是增强整个加工过程的结构刚度，从而提高加工过程的稳定性。由于该区域距离成品件表面较远，故可以采取较大切削参数以提高整体加工效率。

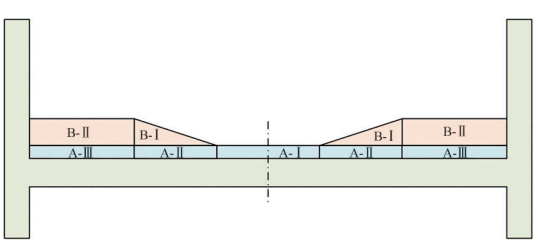


图 10　腹板分层加工示意图

Fig.10　Web layered machining diagram

2.2　工艺特征加工刀具轨迹生成算法

当加工 B-Ⅱ区域时，面临内部为工艺特征曲线 R，外部为型腔外轮廓的问题，如图 11 所示。

采用传统环切铣削的方法加工难以避免加工路径增加、切削效率降低的问题。本文采用放样原理生成非等距刀轨，算法主要包含以下步骤：①根据前文生成外轮廓及工艺特征区域曲线R；②等分曲线R生成放样点p，从放样点出发沿曲线R法线方向生成放样线f，与外轮廓交点为q；③将放样线等分生成控制点，依据控制点生成样条曲线刀轨。

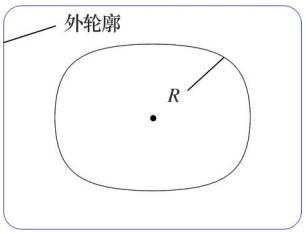


图11 腔体轮廓

Fig.11 Cavity profile

将长度为R_p的工艺特征曲线等距平均分成m份，生成m个放样点，以其中一个放样点p_1为起点，将其余放样点沿顺时针方向标记为p_i，其坐标集合为

$$p=\{p_i \mid i=1,2,\cdots,m\}$$

工艺特征曲线总长度及间隔表达式分别为

$$R_p=\oint\sqrt{1+y^2}\,\mathrm{d}x$$

$$\Delta l=R_p/m$$

从放样点p_i出发沿曲线R法线方向生成放样线：

$$f=\{f_i \mid i=1,2,\cdots,m\}$$

与外轮廓交点为

$$q=\{q_i \mid i=1,2,\cdots,m\}$$

将放样线由外轮廓向内偏置刀具半径r，由工艺特征曲线向外偏置刀具半径r，得到最终的放样线：

$$f_F=\{f_i \mid i=1,2,\cdots,m\}$$

生成结果如图12所示。

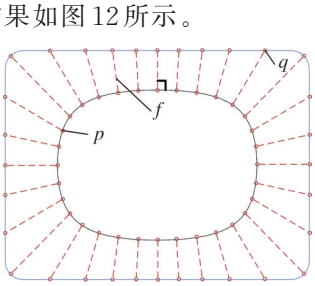


图12 放样线生成

Fig.12 Layout line generation

将放样线f等分为$n-1$份，生成n个控制点：

$$C=\{c_{ij} \mid i=1,2,\cdots,m,\ j=1,2,\cdots,n\}$$

依据控制点生成立方样条曲线，它确保了曲线在每个控制点处不仅连续，而且具有连续的导数。

立方样条曲线的方程形式为

$$S_i(t)=a_it^3+b_it^2+c_it+d_i \qquad t\in[0,1]$$

其中，a_i、b_i、c_i、d_i是通过解线性方程组得到的系数。求解每段样条曲线的系数，算法通过MATLAB实现，最后生成平滑的插值曲线，如图13所示。

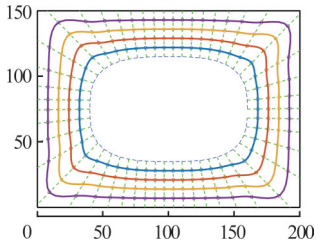


图13 工艺结构刀轨路径

Fig.13 Process structure toolpath

放样点数m可以影响工艺结构加工刀轨的精确程度和光滑程度，当放样点数较小时，刀轨在曲率较大的地方出现波纹状，在实际加工中会带来切削力突变的情况，如图14所示。

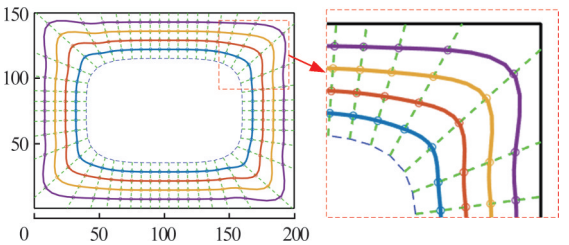


图14 波纹状刀轨路径

Fig.14 Corrugated toolpath

由于工艺特征曲线R角点区域的曲率变化较大，采用上述均匀采样方式会导致放样点在角点区域稀疏，在平滑区域密集，因此，本文引入余弦函数映射的非线性角度分布方法，在保证整体轮廓点均匀性的基础上，实现角点区域的采样密度提高。

非均匀映射公式如下：

$$\tilde{\theta}=\theta+\alpha\sin(4\theta) \qquad \theta\in[0,2\pi)$$

式中：θ为原始均匀分布角度；α为控制采样点密度聚集程度因子；$\sin(4\theta)$在4个角点附近达到极值，从而增强该区域的采样密度。

放样点$m=50$时优化算法生成刀轨对比如图15所示。从图15中可以看出，优化后的算法实现了对角点区域采样密度的增强，非均匀映射方法可以有效控制放样点在角点位置的聚集程度，提高刀轨在边界区域的平滑线与细节描述能力，提高了刀轨生成效率。

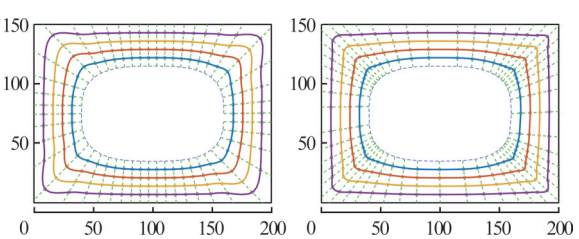


图15 优化前后刀轨路径

Fig.15 Toolpath before and after optimization

2.3　加工时间对比

在UG中生成针对工艺特征的刀轨路径，各个区域径向切深及加工时间如表1所示。

表1　各区域径向切深及加工时间

Tab.1　Radial cutting depth and machining time for each area

区域	径向切深/mm	加工时间/s
A-Ⅰ	4	234
B-Ⅰ	6	530
A-Ⅱ	4	791
B-Ⅱ	6	1218
A-Ⅲ	4	2298

传统等距偏置法[17]是根据外边界轮廓向内生成等距线，直到等距线完全覆盖整个型腔内腔区域为止。传统等距偏置法生成的刀具轨迹线如图16所示。

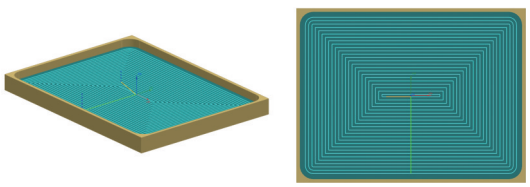


图16　传统等距偏置法刀具轨迹

Fig.16　Traditional equidistant offset toolpath

传统腹板加工通常采用粗加工与精加工分阶段独立进行的工艺方式。在采用相同径向切深条件下，传统等距偏置法所生成的刀具轨迹加工时间为5533 s。而对于引入工艺特征结构后生成的刀具轨迹，其加工时间为5071 s，加工效率提高约8.8%。进一步分析表明，传统腹板在精加工过程中由于缺乏工艺特征结构的有效支撑，所采用的径向切深实际要小于含工艺结构刀轨切深。

3　试验验证

3.1　工艺结构刚度增强模态对比试验

为验证前文所提出的优化设计方法的可行性，对长方形腹板类零件工艺结构的优化结果进行试验。实物及现场布置见图17，所用材料为Ti6Al4V，其尺寸与上述优化设计中的模型一致。

采用力锤对非振型节点进行敲击，得到频率覆盖范围较宽的激振力，利用动态信号测试系统对输入力信号和输出加速度信号进行采集，经信号处理可获得构件优化前后中心点频响函数曲线，如图18所示。试验结果与有限元分析数据结果对比如表2所示。结构优化前后的试验与有限元结果误差为5.88%和5.4%。从图18中可以看出，优化后腹板各点频响曲线幅值均较原始构件明显减小且频响曲线整体右移，固有频率提高了



图17　薄壁件实物及模态试验现场

Fig.17　Thin-walled parts physical and modal testing site

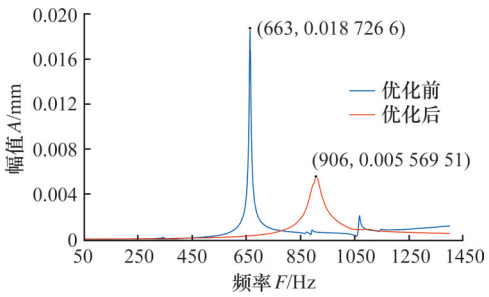


图18　频响曲线对比

Fig.18　Comparison of frequency response

表2　试验与有限元分析结果

Tab.2　Experimental and finite element analysis results

模型		固有频率/Hz
有限元分析	优化前	624
	优化后	858
锤击试验	优化前	663
	优化后	906

36.7%，中心点振动幅值下降70.26%。证明了工艺结构对提高结构整体动刚度的有效性。

3.2　加工试验及加工质量对比

分别制备了两种钛合金长方向腹板零件，设计加工策略如下：①针对等厚度薄壁腔体件采用传统等距偏置法加工；②针对含工艺结构薄壁腔体件采用粗精混合刀轨加工，加工参数如表3所示。

表3　各加工方式加工参数

Tab.3　Machining parameters for each machining method

加工方法		主轴转速/(r·min^{-1})	径向切深/mm	每齿进给/mm	轴向切深/mm
等距偏置刀轨	粗加工	1200	6	0.07	1.0
	精加工	1000	4	0.05	0.5
粗精混合刀轨	粗加工	1200	6	0.07	1.0
	精加工	1000	4	0.05	0.5

加工试验均在数控中心上进行，采用TM-4R-R16-R3圆弧铣刀，加工试验现场及刀具见图19。



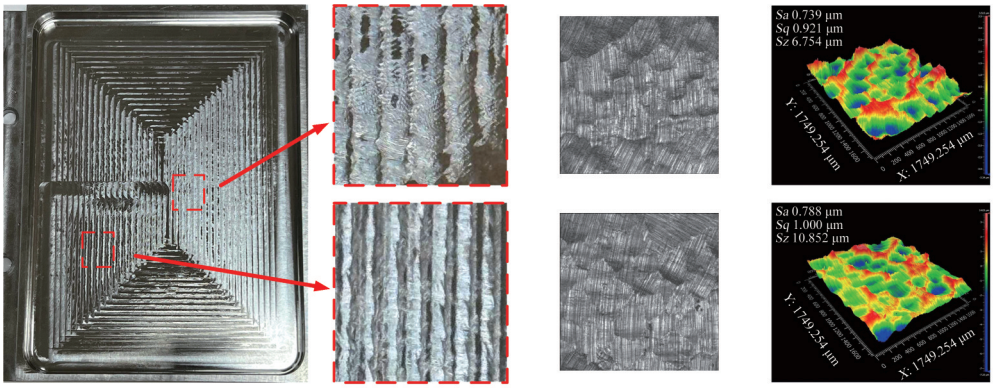
图19 加工试验现场及刀具

Fig.19 Machining test site and tool

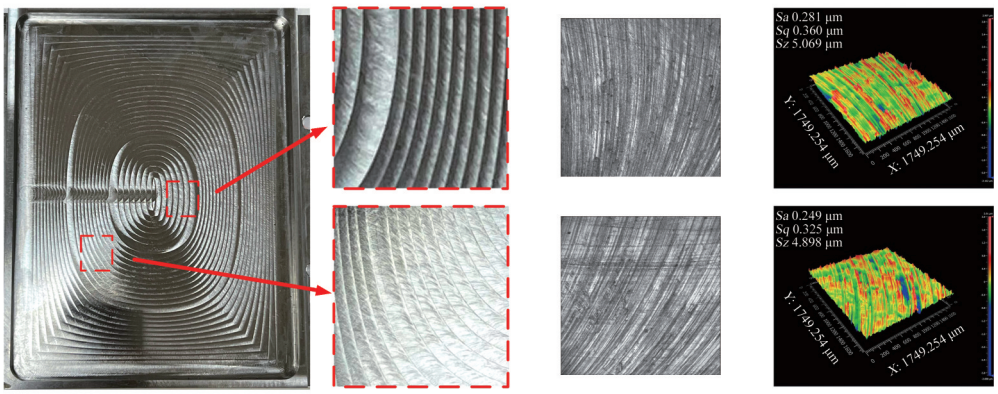
工件加工完成后使用New View 9000 3D表面轮廓仪测量两种工件的表面粗糙度。为验证含工艺结构加工策略对加工质量的影响，对比两者加工区域相同位置的粗糙度，如图20所示。

对比两种加工表面质量可以明显发现，粗精混合刀轨加工出的工件表面光滑，没有明显的振纹，测得表面粗糙度分别为0.249 μm和0.281 μm；而采用传统等距偏置法加工的表面有明显的振纹，测得表面粗糙度分别为0.739 μm和0.788 μm。由此说明含有工艺结构的粗精混合加工策略可有效提高工件表面加工质量。

在含工艺结构长方形腹板的三个切削层区域内分别取点进行粗糙度测量，结果如图21所示，可以看出，各区域内表面粗糙度均在0.22 μm至0.28 μm之间，说明提出的分层粗精混合加工策略加工质量一致性好。



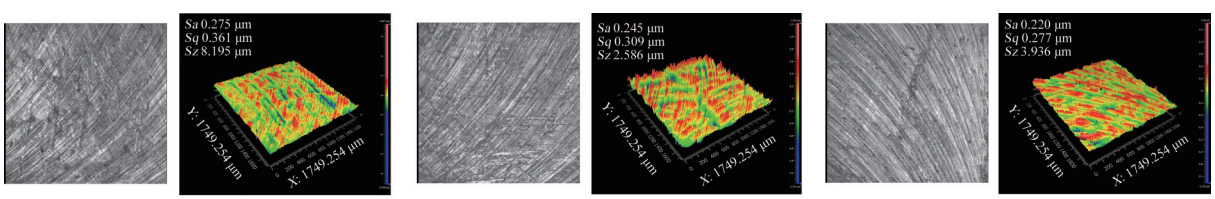
(a)等距偏置法加工表面质量



(b)含工艺结构加工表面质量

图20 两者加工表面质量对比

Fig.20 Comparison of the surface quality of the two machined surfaces



(a)区域A-Ⅰ表面粗糙度　(b)区域A-Ⅱ表面粗糙度　(c)区域A-Ⅲ表面粗糙度

图21 各区域表面粗糙度

Fig.21 Surface roughness of each area

4　结论

1)基于响应面法建立了工艺结构高度与固有频率的回归方程,并通过有限元分析及试验验证了所构建的响应面模型的准确性,构建了工艺结构优化数学模型,模态试验结果表明,优化后构件的一阶固有频率从663 Hz提高到906 Hz,中心点振动幅值下降了70.26%。

2)提出了一种去除工艺结构的加工策略,利用MATLAB生成针对工艺结构的刀具轨迹,相比于传统等距偏置加工方式,该加工策略在小幅提高效率的情况下能够有效避免颤振,提高工件加工表面质量,且各区域加工表面质量一致性好。

参考文献:

[1] SUN Y, ZHENG M, JIANG S, et al. A State-of-the-art Review on Chatter Stability in Machining Thin-walled Parts [J]. Machines, 2023,11(3): 1-44.

[2] ADETORO O B, SIM W M, WEN P H. An Improved Prediction of Stability Lobes Using Nonlinear Thin Wall Dynamics [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2010, 210(6/7): 969-979.

[3] 刘强,尹力. 一种面向数控工艺参数优化的铣削过程动力学仿真系统研究[J]. 中国机械工程, 2005, 16(13): 1146-1150.
LIU Qiang, YIN Li. Study on Milling Process Dynamics Simulation System about the Process Parameter Optimization of NC Machine Tools[J]. China Mechanical Engineering, 2005, 16(13): 1146-1150.

[4] ZENG S, WAN X, LI W, et al. A Novel Approach to Fixture Design on Suppressing Machining Vibration of Flexible Workpiece[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2012, 58: 29-43.

[5] 杨毅青,谢日成,徐东东. 旋转变刚度阻尼器抑制薄壁零件铣削颤振[J]. 振动与冲击, 2018, 37(2): 72-75.
YANG Yiqing, XIE Richeng, XU Dongdong. Milling Chatter Suppression for Thin-walled Part Using Rotary Passive Damper with Tunable Stiffness[J]. Journal of Vibration and Shock, 2018, 37(2): 72-75.

[6] JIN X, SUN Y, GUO Q, et al. 3D Stability Lobe Considering the Helix Angle Effect in Thin-wall Milling[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2016, 82(9): 2123-2136.

[7] 宋清华,艾兴,万熠,等. 小径向切深下进给量对铣削稳定性的影响[J]. 中国机械工程, 2008, 19(10): 1148-1152.
SONG Qinghua, AI Xing, WAN Yi, et al. Stability Prediction for High-speed Milling Including Feed Rate in Low Radial Immersion [J]. China Mechanical Engineering, 2008,19(10): 1148-1152.

[8] YAN S, SUN Y. Early Chatter Detection in Thin-walled Workpiece Milling Process Based on Multi-synchrosqueezing Transform and Feature Selection[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2022, 169: 108622.

[9] WU S, MA W, BAI H, et al. Engagement Angle Modeling for Multiple-circle Continuous Machining and Its Application in the Pocket Machining[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2017, 30(2): 256-271.

[10] CORSON G, TYLER C, DVORAK J, et al. Minimum Cost, Stability Constrained Preform Optimization for Hybrid Manufacturing[J]. Manufacturing Letters, 2024, 39: 1-5.

[11] SMITH S, WILHELM R, DUTTERER B, et al. Sacrificial Structure Preforms for Thin Part Machining[J]. CIRP Annals, 2012, 61(1): 379-382.

[12] 刘强,柳万珠. GH4169G整体叶盘阶梯铣削稳定性研究[J]. 航空动力学报, 2016, 31(5): 1025-1031.
LIU Qiang, LIU Wanzhu. Stability Research on Step Milling of GH4169G Blisk[J]. Journal of Aerospace Power, 2016, 31(5): 1025-1031.

[13] 白万金. 航空薄壁件精密铣削加工变形的预测理论及方法研究[D]. 杭州:浙江大学, 2009.
BAI Wanjin. Study on Deformation Prediction Theory and Methods of the Aerospace Thin-walled Components during Precision Milling Process[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2009.

[14] 单晨伟,赵颖,刘维伟,等. 一种薄壁悬臂叶片数控加工非均匀余量刚度补偿方法[J]. 航空学报, 2013, 34(3): 686-693.
SHAN Chenwei, ZHAO Ying, LIU Weiwei, et al. A Nonuniform Offset Surface Rigidity Compensation Strategy in Numerical Controlled Machining of Thin-walled Cantilever Blades[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2013, 34(3): 686-693.

[15] 于长亮,张辉,王仁彻,等. 机床整机动刚度薄弱环节辨识与优化方法研究[J]. 机械工程学报,2013,49(21):11-17.
YU Changliang, ZHANG Hui, WANG Renche, et al. Study on Method for Weak Link Identification of Dynamic Stiffness of a Machine Tool and Optimization Design[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2013,49(21):11-17.

[16] 王永菲,王成国. 响应面法的理论与应用[J]. 中央民族大学学报(自然科学版), 2005, 14(3): 236-240.
WANG Yongfei, WANG Chengguo. The Application of Response Surface Methodology[J]. Journal of Minzu University of China (Natural Sciences Edition), 2005, 14(3): 236-240.

[17] 高晓平. 基于等距法的数控加工刀具轨迹规划[D]. 大连:大连理工大学, 2006.
GAO Xiaoping. Offset Algorithm Based Tool-path Planning for NC Machining[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2006.

(编辑　袁兴玲)

作者简介:李佳奇,男,2000年生,硕士研究生。研究方向为航空薄壁件数控加工技术。E-mail: 15834123428@163.com。**孙玉文***(通信作者),男,1971年生,教授、博士研究生导师。研究方向为数字化制造与数控加工技术。E-mail: ywsun@dlut.edu.cn。

本文引用格式:

李佳奇,齐书韬,郑书材,等. 基于工艺特征结构优化的薄壁腔体构件数控加工刚度增强方法[J]. 中国机械工程,2026,37(10):2586-2593.

LI Jiaqi, QI Shutao, ZHENG Shucai, et al. Stiffness Enhancement Method for Thin-walled Cavity Components in CNC Machining Based on Process Feature Structure Optimization[J]. China Mechanical Engineering, 2026, 37(10): 2586-2593.