

引文格式: 刘海波, 张鸿泽, 王诚鑫, 等. 基于附加质量和电涡流阻尼的薄壁件铣削振动抑制[J]. 航空制造技术, 2023, 66(3): 53–60.  
LIU Haibo, ZHANG Hongze, WANG Chengxin, et al. Vibration suppression of thin-walled parts based on additional mass and eddy current damping [J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2023, 66(3): 53–60.

# 基于附加质量和电涡流阻尼的薄壁件 铣削振动抑制\*

刘海波, 张鸿泽, 王诚鑫, 苗欢欢

(大连理工大学精密与特种加工教育部重点实验室, 大连 116024)

[摘要] 针对薄壁件铣削颤振问题, 提出了基于附加质量和电涡流阻尼的振动抑制方法。首先建立了薄壁件铣削加工动力学模型, 通过颤振稳定性分析, 获得附加质量和电涡流阻尼对加工稳定域的影响规律; 然后提出了薄壁件附加质量优化方法, 获取最佳附加质量布局和质量占比; 最后设计了一套薄壁件加工抑振装置, 开展了薄壁件铣削加工试验, 试验表明, 当同时添加附加质量组合 [15, 10, 15] 和电涡流阻尼时, 薄壁件加工振动得到明显抑制, 验证了所提出方法的抑振效果。

关键词: 薄壁件; 振动抑制; 附加质量; 电涡流阻尼; 模态分析

DOI: 10.16080/j.issn1671-833x.2023.03.053



刘海波

教授, 博士生导师, 教育部青年长江学者, 主要研究方向为测量-加工一体化制造方法与装备, 在机/在位精密测量技术与系统, 相变固持自适应加工方法与技术。

薄壁件广泛应用于航空航天等领域高端装备中, 具有结构复杂、刚性弱、时变性强等特点, 但其在铣削过程中易产生颤振现象, 从而导致加工效率与精度降低, 表面完整性差, 降低了服役性能, 因此, 薄壁件加工颤振抑制一直以来是学者们研究和关注的焦点。施加阻尼是抑制薄壁件加工颤振的主要方式, 常见阻尼包括磁流变阻尼、调谐质量阻尼(TMD)和电涡流阻尼。

磁流变阻尼是利用磁流变液励磁固化后的阻尼特性, 增强薄壁件铣削局部阻尼状态, 从而抑制颤振, 实现薄壁件柔性装夹。Ma等<sup>[1]</sup>设计了一种磁流变阻尼柔性夹具, 基于拉格朗日方程建立了薄壁件-柔性夹具系统动力学模型, 并通过切削试验验证了磁流变阻尼的抑振效果。Liu等<sup>[2]</sup>采取模态仿真和锤击试验相结合的

方法, 研究了磁流变阻尼对薄壁件模态参数的影响规律, 通过调节励磁电流增强磁流变阻尼从而抑制加工颤振, 提升了薄壁件的加工精度和表面质量。Guo等<sup>[3]</sup>提出了一种薄壁件磁流变阻尼-机械复合装夹方法, 切削试验结果表明, 薄壁件加工颤振得到了明显抑制。

调谐质量阻尼是通过振动能量的转移来实现颤振抑制, 主要由质量块、阻尼和刚度元件组成<sup>[4]</sup>。Yuan等<sup>[5]</sup>设计了一种可调变刚度TMD, 考虑了薄壁件材料去除效应, 基于等峰优化设计原理, 对不同加工阶段的阻尼器参数进行了优化, 试验结果表明, 可调变刚度TMD能够有效提升薄壁件加工稳定性。Qin等<sup>[6]</sup>利用多个TMD抑制薄壁壳体工件加工颤振, 基于模态叠加法优化了TMD的布局 and 参数, 显著提升了薄壁壳体工

\* 基金项目: 国家自然科学基金(51975093); 辽宁省自然科学基金优青(2020-YQ-09)。

件的加工稳定性。马鹏举等<sup>[7]</sup>基于TMD抑振原理设计了一套薄壁机匣抑振辅助夹具,有效抑制了薄壁机匣加工振动。

此外,一些学者研究了使用电涡流阻尼抑制颤振的方法,即利用洛伦兹力来实现加工颤振抑制。Ransom等<sup>[8]</sup>将电涡流阻尼应用于铣削加工平台结构中,使加工系统的模态阻尼比提升了229%。Yang等<sup>[9]</sup>设计了一种薄壁工件铣削加工抑振装置,利用固定铜管与永磁铁之间的相对运动产生电涡流阻尼,有效抑制了薄壁件铣削加工振动。程明迪等<sup>[10]</sup>利用电涡流阻尼抑制薄壁圆盘加工振动,建立了薄壁圆盘-电涡流耦合动力学模型,并对阻尼器参数进行优化,切削试验结果表明,电涡流阻尼具有良好的加工抑振效果。

以上阻尼方法虽能够实现薄壁件加工颤振抑制,但是由于其结构的局限性,难以满足一些工况抑振的结构需求。因此,本文提出了一种基于附加质量和电涡流阻尼的薄壁件加工颤振抑制方法。首先进行了薄壁件铣削动力学建模与分析,然后结合颤振稳定性分析对附加质量参数进行优化,最后通过切削试验对所提出方法的抑振效果进行验证。

## 1 薄壁件铣削动力学建模与分析

### 1.1 薄壁件铣削动力学模型

本文以悬臂式薄壁件为研究对象,且附加质量和薄壁件的材质均为非铁磁性金属,提出基于附加质量和电涡流阻尼的颤振抑制方法。其中,电涡流阻尼抑振原理如图1所示,薄壁件加工振动使附加质量跟固定永磁铁发生相对运动,在附加质量表面诱发产生电涡流,永磁铁磁场与电涡流相互作用产生电涡流阻尼,实现振动能量的耗散。

假设刀具为刚性,当附加质量和电涡流阻尼共同作用时,薄壁件铣削

加工动力学模型如图2所示,附加质量固连在薄壁件非加工表面,永磁铁位置固定并与附加质量相对。

受附加质量的影响,薄壁件质量及系统刚度矩阵发生变化,假设附加质量的个数为 $n$ ,则薄壁件振动系统的动能 $D$ 与势能 $V$ 可以表示为

$$D = \frac{1}{2} \dot{\mathbf{r}}^T \left\{ \mathbf{m}_0 + \sum_{i=1}^n \Delta \mathbf{m}_i \right\} \dot{\mathbf{r}} \quad (1)$$

$$V = \frac{1}{2} \mathbf{r}^T \left\{ \mathbf{k}_0 + \sum_{i=1}^n \Delta \mathbf{k}_i \right\} \mathbf{r} \quad (2)$$

式中, $\mathbf{m}_0$ 、 $\mathbf{k}_0$ 分别为薄壁件的初始质量矩阵和刚度矩阵; $\Delta \mathbf{m}_i$ 、 $\Delta \mathbf{k}_i$ 为第 $i$ 个附加质量对 $\mathbf{m}_0$ 、 $\mathbf{k}_0$ 的改变量; $\mathbf{r}$ 为广义坐标下的薄壁件振动位移向量; $\dot{\mathbf{r}}$ 为薄壁件振动速度向量;上标 $T$ 为刀刃切削频率。

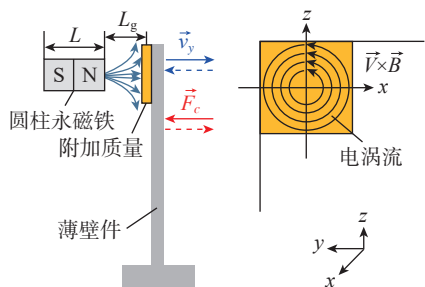
电涡流阻尼会改变薄壁件的阻尼特性,假设第 $i$ 个电涡流阻尼对原始阻尼矩阵 $\mathbf{c}_0$ 的改变量为 $\Delta \mathbf{c}_i$ ,则薄壁件振动系统的瑞利耗散函数 $R$ 为

$$R = \frac{1}{2} \dot{\mathbf{r}}^T \left\{ \mathbf{c}_0 + \sum_{i=1}^n \Delta \mathbf{c}_i \right\} \dot{\mathbf{r}} \quad (3)$$

利用能量法建立薄壁件铣削动力学模型,将式(1)~(3)代入第2类拉格朗日方程,可得薄壁件的铣削加工动力学方程为

$$\mathbf{m} \ddot{\mathbf{r}}(t) + \mathbf{c} \dot{\mathbf{r}}(t) + \mathbf{k} \mathbf{r}(t) = \mathbf{F}(t) = \mathbf{F}_d(t) + \mathbf{F}_0(t) \quad (4)$$

式中, $\ddot{\mathbf{r}}(t)$ 为薄壁件振动加速度向



注: $L$ 为永磁铁长度; $L_g$ 为永磁铁和附加质量之间的垂直间隙; $\dot{v}_y$ 为薄壁件 $y$ 向振动速度; $\vec{F}_c$ 为电涡流阻尼力; $\vec{V} \times \vec{B}$ 为薄壁件振动速度与永磁铁磁感应强度之间的叉乘。

图1 电涡流阻尼抑振原理  
Fig.1 Principle of vibration suppression by eddy current damping

量; $\mathbf{m} = \mathbf{m}_0 + \sum_{i=1}^n \Delta \mathbf{m}_i$ 、 $\mathbf{k} = \mathbf{k}_0 + \sum_{i=1}^n \Delta \mathbf{k}_i$

和 $\mathbf{c} = \mathbf{c}_0 + \sum_{i=1}^n \Delta \mathbf{c}_i$ 分别表示添加 $n$ 个附加质量和电涡流阻尼后薄壁件的质量矩阵、阻尼矩阵和刚度矩阵; $\mathbf{F}(t)$ 表示广义坐标下的铣削力向量; $\mathbf{F}_d(t)$ 、 $\mathbf{F}_0(t)$ 分别表示铣削力的动态分量和静态分量。

基于模态叠加法,经模态坐标变换 $\mathbf{r}(t) = \mathbf{Q}(\omega) \cdot \mathbf{q}(t)$ ,可进一步求得模态空间中的薄壁件铣削动力学方程为

$$\mathbf{M} \ddot{\mathbf{q}}(t) + \mathbf{C} \dot{\mathbf{q}}(t) + \mathbf{K} \mathbf{q}(t) = \mathbf{Q}(\omega) \mathbf{F}(t) \quad (5)$$

式中, $\mathbf{M}$ 、 $\mathbf{C}$ 和 $\mathbf{K}$ 分别为薄壁件的模态质量、阻尼和刚度矩阵; $\ddot{\mathbf{q}}(t)$ 、 $\dot{\mathbf{q}}(t)$ 、 $\mathbf{q}(t)$ 分别为模态坐标下薄壁件的振动加速度、振动速度、振动位移; $\mathbf{Q}(\omega)$ 为薄壁件的模态振型矩阵。

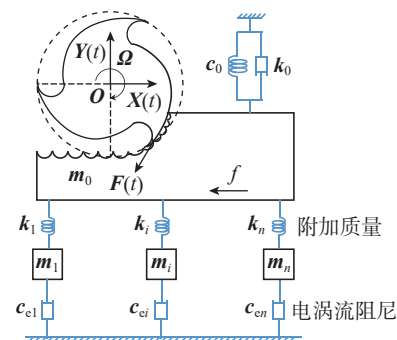
### 1.2 薄壁件铣削颤振稳定性分析

薄壁件在铣削过程中主要发生沿壁厚方向的振动,且加工稳定性由铣削力动态分量 $\mathbf{F}_d(t)$ 决定,薄壁件铣削加工的再生颤振模型如图3所示。

仅考虑铣削力动态分量 $\mathbf{F}_d(t)$ 对薄壁件加工稳定性的影响,则铣削颤振稳定性特征方程<sup>[11]</sup>可表示为

$$\det \left\{ 1 - \frac{N}{4\pi} K_t a_p (1 - e^{i\omega_c T}) \alpha_{yy} \Phi_{yy} \right\} = 0 \quad (6)$$

式中, $K_t$ 为切向切削力系数; $a_p$ 为极



注: $t$ 为时间; $X(t)$ 、 $Y(t)$ 分别为 $OX$ 轴、 $OY$ 轴随时间不断移动; $f$ 为刀具进给; $c_c$ 为等效电涡流阻尼系数。

图2 薄壁件铣削加工动力学模型  
Fig.2 Dynamic model of milling of thin-walled parts

限轴向切深;  $\omega_c$  为颤振频率;  $\alpha_{yy}$  为  $Y$  方向的平均动态铣削力系数;  $\Phi_{yy}$  为刀具-工件接触区域的传递函数; 上标  $T$  为刀刃切削频率;  $N$  为铣刀刀刃数。

由式(6)可以进一步推出传递函数  $\Phi_{yy}$  和极限轴向切深  $a_p$  的关系为

$$\Phi_{yy} = \frac{4\pi}{NK_t \alpha_{yy} (1 - e^{-i\omega_c T})} \quad (7)$$

传递函数  $\Phi_{yy}$  的实部  $A_R(\omega)$  可表示为<sup>[12]</sup>

$$A_R(\omega) = \frac{1 - r^2}{K[(1 - r^2)^2 + (2\zeta r)^2]} \quad (8)$$

式中, 频率比  $r = \omega/\omega_n$ , 其中  $\omega_n$  为薄壁件固有频率; 模态阻尼比  $\zeta = C/2\sqrt{KM}$ 。

根据式(6)~(8)可进一步求得极限轴向切深  $a_p$  的表达式为

$$a_p = \frac{2\pi}{NK_t \alpha_{yy} A_R(\omega_c)} = \frac{2\pi}{NK_t \alpha_{yy} K \cdot \frac{(1 - r^2)^2 + (2\zeta r)^2}{1 - r^2}} \quad (9)$$

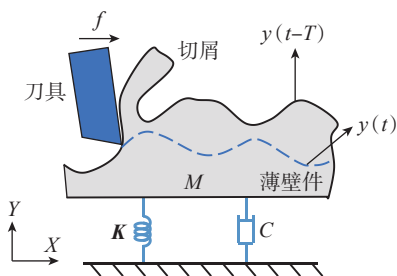
式中,  $\omega_c$  为颤振频率。

由式(9)可得出, 利用附加质量和电涡流阻尼增大薄壁件的模态刚度  $K$  和模态阻尼比  $\zeta$ , 可以获得更大的极限轴向切深  $a_p$ , 提升薄壁件铣削加工稳定性。

## 2 薄壁件附加质量优化方法

### 2.1 薄壁件附加质量布局优化

附加质量可看作对薄壁件结构和动力系统的修改, 通过动态特性灵敏度分析, 获取附加质量对薄壁件固有频率影响较大的区域, 来实现附加质量的布局优化。



注:  $y(t-T)$  为上一铣刀刀齿的振动位移;  $y(t)$  为当前铣刀刀齿的振动位移。

图3 铣削再生颤振模型

Fig.3 Regenerative chatter model of milling

考虑到实际系统阻尼的复杂性, 忽略薄壁件动力学系统阻尼。在  $Z$  自由度无阻尼实模态系统中, 薄壁件第  $s$  阶固有频率和模态振型之间有如下关系<sup>[13]</sup>:

$$(-\omega_s^2 \mathbf{m}_0 + \mathbf{k}_0) \mathbf{U}_s = 0 \quad (10)$$

式中,  $\mathbf{m}_0$ 、 $\mathbf{k}_0$  分别为薄壁件的初始质量、初始刚度矩阵;  $\omega_s$  为薄壁件第  $s$  阶固有频率;  $\mathbf{U}_s$  为薄壁件第  $s$  阶模态振型向量, 可表示为  $\mathbf{U}_s = (u_{1,s}, u_{2,s}, \dots, u_{N,s})^T$ 。

为求得薄壁件固有频率对质量的灵敏度, 将式(10)对质量参数  $m_{i,j}$  求导, 可以得到

$$\left( -2\omega_s \frac{\partial \omega_s}{\partial m_{i,j}} - \omega_s^2 \frac{\partial \mathbf{m}_0}{\partial m_{i,j}} + \frac{\partial \mathbf{k}_0}{\partial m_{i,j}} \right) \mathbf{U}_s + (-\omega_s^2 \mathbf{m}_0 + \mathbf{k}_0) \frac{\partial \mathbf{U}_s}{\partial m_{i,j}} = 0 \quad (11)$$

式中,  $m_{i,j}$  表示薄壁件初始质量矩阵  $\mathbf{m}_0$  第  $i$  行和第  $j$  列的元素。

根据无阻尼系统动力学特征方程  $-\mathbf{U}_s \omega_s^2 \mathbf{m}_0 + \mathbf{U}_s \mathbf{k}_0 = 0$ , 可得

$$-2\omega_s \frac{\partial \omega_s}{\partial m_{i,j}} - \omega_s^2 \mathbf{U}_s^T \frac{\partial \mathbf{m}_0}{\partial m_{i,j}} \mathbf{U}_s +$$

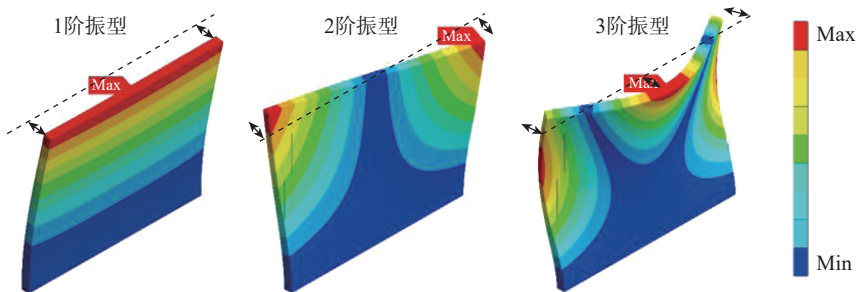


图4 薄壁件模态振型

Fig.4 Modal shapes of thin-walled parts

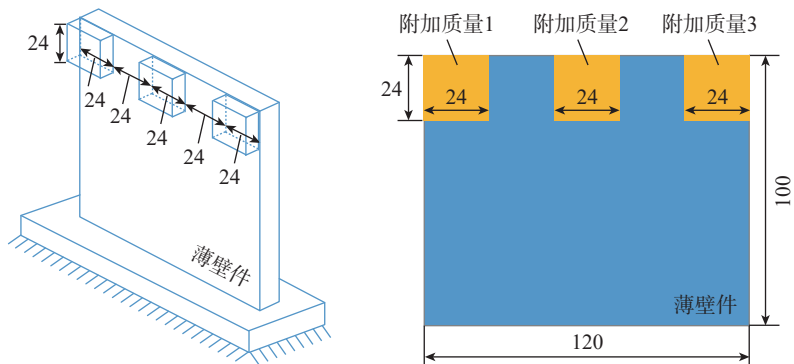


图5 附加质量优化布局(mm)

Fig.5 Optimized layout of added mass (mm)

$\mu=0.33$ ,弹性模量  $E=115 \times 10^9 \text{ N/m}^2$ 。

## 2.2 基于响应面法的附加质量占比优化

根据薄壁件颤振稳定性分析结果,可知添加附加质量能够增强薄壁件模态刚度,从而扩大稳定切削域,最终提高薄壁件铣削稳定性。但附加质量与薄壁件模态刚度之间呈现非线性关系,建立优化模型过程复杂烦琐,效率较低。响应面方法可以简化复杂的建模过程,高效准确地建立附加质量与薄壁件模态刚度间的关联模型,从而降低优化难度<sup>[14]</sup>。

响应面优化模型中,设计变量为各附加质量占薄壁件总质量的百分比,记为  $\mathbf{x}=[x_1, x_2, x_3]$ ,  $x_i \in [5, 15]$ 。为获得更高的铣削稳定性,选取薄壁件的前两阶模态刚度,构建目标响应  $\Theta=K_1+K_2$ 。之后,基于 BBD 试验设计方法,确定构建响应面优化模型所需的附加质量组合,对添加不同附加质量组合的薄壁件进行有限元模态分析,得到薄壁件模态刚度值,从而求得目标响应值  $\Theta$ 。具体的试验方案设计如表 1 所示。

对所得试验数据进行拟合处理,得到包含交叉项的响应面近似函数为

$$\bar{\omega}(\mathbf{x})=4.31 \times 10^5 - 2156x_1 + 31314x_2 + 2246x_3 - 12x_1x_2 + 2159x_1x_3 - 16x_2x_3 - 1129x_1^2 - 1359x_2^2 - 1132x_3^2 \quad (14)$$

对所得响应面近似函数进行统计学精度检验,可得决定系数  $R^2$  为 0.9972,伴随决定系数  $R_{\text{adj}}^2$  为 0.9936,均接近于 1,说明该近似函数具有较高的拟合精度。因此,面向附加质量占比的响应面优化模型可以写为

$$\begin{cases} \text{求 } \mathbf{x} \in \mathbf{E}^n \\ \text{使 } \bar{\omega}(\mathbf{x}) = \Theta \rightarrow \max \\ \text{s.t. } 5 \leq x_1 \leq 15 \\ \quad 5 \leq x_2 \leq 15 \\ \quad 5 \leq x_3 \leq 15 \end{cases} \quad (15)$$

式中,  $\mathbf{E}^n$  是响应面优化模型的设计变量域。

求解上述响应面优化模型,得到附加质量占比优化结果如表 2 所示。

表 1 试验方案设计

Table 1 Design of experimental scheme

序号	设计变量/%			目标响应 $\Theta/(\text{N} \cdot \text{m}^{-1})$
	$x_1$	$x_2$	$x_3$	
1	10	15	15	601490
2	10	10	10	639520
3	5	15	10	591457
4	10	15	5	591457
5	15	10	15	646627
6	10	5	5	552154
7	15	10	5	529069
8	5	10	15	528916
9	10	5	15	563793
10	15	15	10	601588
11	15	5	10	563703
12	5	5	10	552394
13	5	10	5	627224

表 2 附加质量占比优化结果

Table 2 Optimization results of proportion of added mass

最优附加质量占比			预测值 $\bar{\Theta}^{\text{op}}/(\text{N} \cdot \text{m}^{-1})$	实际值 $\Theta^{\text{op}}/(\text{N} \cdot \text{m}^{-1})$	误差 $\epsilon/\%$
$x_1^{\text{op}}/\%$	$x_2^{\text{op}}/\%$	$x_3^{\text{op}}/\%$			
15	10.32	14.97	653839	649583	0.7

可以看出,薄壁件目标响应的实际值  $\Theta^{\text{op}}$  与预测值  $\bar{\Theta}^{\text{op}}$  之间的误差不到 1%,证明响应面法能够准确预估薄壁件的模态刚度,优化附加质量相对于薄壁件总质量的占比。针对附加质量的布局和质量占比进行离线优化,此优化过程可视作对附加质量参数的调整,从而获得更高的铣削稳定性。

## 3 薄壁件加工试验验证

### 3.1 薄壁件加工抑振试验装置设计

基于电涡流阻尼原理,设计薄壁件加工抑振装置,如图 6 所示,主要包括底座、支架、永磁铁、附加质量等。其中,底座采用具备良好力学性能和焊接性能的 Q235 钢制成,底座两侧各焊接一个马蹄形结构,配合紧

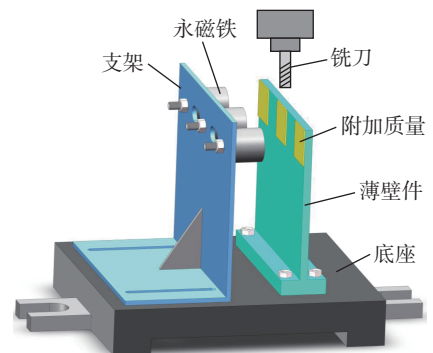


图 6 加工抑振装置示意图

Fig.6 Schematic diagram of processing vibration suppression device

固螺栓和 T 型槽将底座固连在机床工作台上,底座表面上开有多个 M5 螺纹孔,薄壁件通过 4 个 M5 螺钉与底座固连。支架材料为铝合金 6061,通过螺钉固定在底座上,支架竖直面

上开有圆形通孔和槽型通孔,圆形通孔用于安装永磁铁,槽型通孔用于安装位移传感器,可通过移动支架调节附加质量与永磁铁之间的距离,肋板用于增加支架刚度。贴合于薄壁件非加工表面的附加质量,材质为T2紫铜;永磁铁材质为钕铁硼 NdFeB-52,固定在支架上且正对附加质量。

### 3.2 加工稳定域预测

为获得薄壁件的模态参数,采用DASP模态测试系统对薄壁件进行模态锤击测试,模态锤击试验装置如图7所示。

测得薄壁件模态参数如表3所示,组合 $[a, b, c]$ 代表各附加质量的质量分数,对响应面法求得的最优附加质量组合取近似值可得 $[a, b, c]=[15, 10, 15]$ ;  $\omega_{n1}$ 、 $\omega_{n2}$ 、 $\zeta$ 分别代表薄壁件的1阶固有频率、2阶固有频率和模态阻尼比。在附加质量和电涡流阻尼的综合作用下,薄壁件的固有频率降低,模态阻尼比增加。

由于材料去除率较小,不考虑薄壁件动态特性随刀具位置的变化<sup>[15]</sup>。利用所得模态参数,参考文献[16]的算法,绘制铣削稳定性叶瓣图,所得结果如图8所示,其中,“有阻尼”表示添加电涡流阻尼;“无阻尼”表示不添加电涡流阻尼。可以看出,在附加质量和电涡流阻尼的综合作用下,薄壁件的稳定切削域扩大,铣削稳定性增强。与普通附加质量组合相比,利用响应面法得到的最优附加质量组

合能获得更大的薄壁件模态刚度,从而能够获得更大的铣削稳定域。只添加最优附加质量 $[15, 10, 15]$ 而不添加电涡流阻尼时,铣削稳定域增加幅度会减小。

另外,综合考虑机床工作范围与工件尺寸,在图8中选取 $Q$ 点,其横坐标代表主轴转速 $2500\text{ r/min}$ ,纵坐标代表轴向切深 $1.5\text{ mm}$ 。由叶瓣图可知,当抑振参数为“最优附加质量 $[15, 10, 15]$ ,有电涡流阻尼”时,点 $Q$ 在铣削稳定域内,说明薄壁件在此组参数作用下切削稳定;而当抑振参数为“最优附加质量 $[15, 10, 15]$ 、

无电涡流阻尼”以及“普通附加质量 $[10, 10, 10]$ ,有电涡流阻尼”时,点 $Q$ 在铣削稳定域外,说明薄壁件在这两组参数作用下切削不稳定。

### 3.3 薄壁件加工抑振试验

为验证附加质量和电涡流阻尼的综合抑振效果,开展薄壁件铣削加工试验,试验设置如表4所示,1~3组加工试验均根据叶瓣图中的点 $Q$ 来选择切削参数,所选主轴转速为 $2500\text{ r/min}$ ,轴向切深为 $1.5\text{ mm}$ ,径向切深为 $0.5\text{ mm}$ ,刀具进给速度为 $300\text{ mm/min}$ ,铣削方式为顺铣。另外,为尽可能增大电涡流阻尼,可通过移

表3 模态测试结果  
Table 3 Result of modal test

附加质量组合	电涡流阻尼	$\omega_{n1}/\text{Hz}$	$\omega_{n2}/\text{Hz}$	$\zeta/\%$
[0, 0, 0]	无	360.57	715.65	1.36
[10, 10, 10]	有	314.05	595.73	2.95
[15, 10, 15]	有	263.67	496.17	3.87
[15, 10, 15]	无	262.45	494.64	1.83

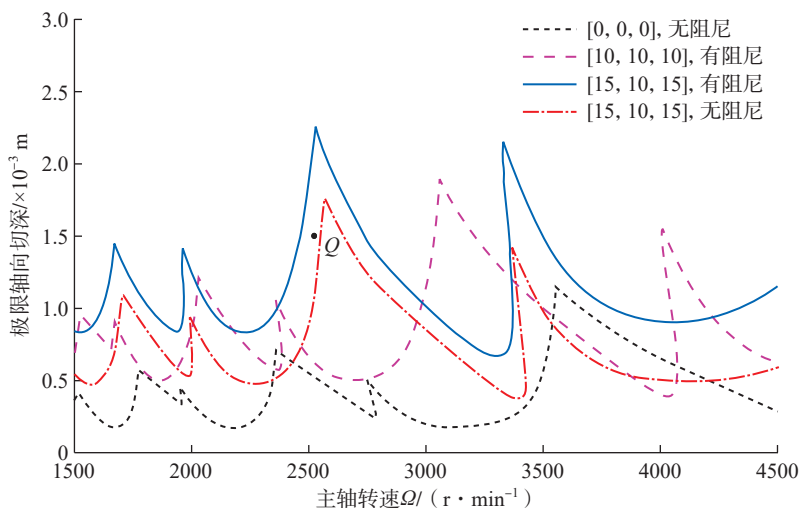


图8 稳定性叶瓣图  
Fig.8 Stability lobe diagram

表4 铣削加工试验具体设置  
Fig.4 Specific settings for milling experiments

试验组号	附加质量组合	电涡流阻尼	附加质量与永磁铁的间距/mm
1	[10, 10, 10]	有	1.5
2	[15, 10, 15]	有	1.5
3	[15, 10, 15]	无	—

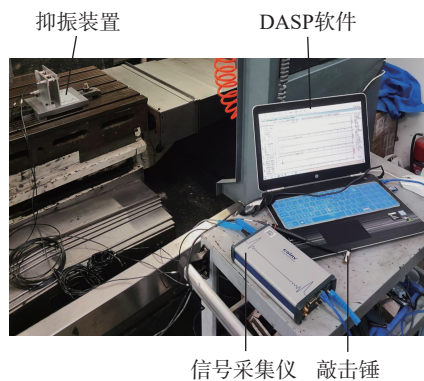


图7 模态锤击试验装置  
Fig.7 Modal hammering experimental device

动支架调整永磁铁和各附加质量的间距为 1.5 mm,在第 2 组试验中,处于中间位置的永磁铁需要添加 5 mm 厚的垫圈来保证间距一致。

切削试验所采用的铣刀型号为 WIDIA-HANGITA 5013,材质为硬质合金,刀齿数 3、直径 10 mm、长度 100 mm,其中悬伸长度设置为 50 mm,目的是提高铣刀刚度,从而忽略铣刀振动对切削过程的影响。薄壁件铣削加工试验现场如图 9 所示,位移传感器安装在支架上用来采集加工振动信号,前置器可将薄壁件振动位移转换为电压输出信号,位移传感器型号为 MIRAN-ML33-A-V1-3;数据采集卡需配合位移传感器和信号采集软件共同使用,其型号为 ADLINK-USB-1902。

依次进行 3 组薄壁件铣削加工试验,每组试验完成后需要更换相同规格的薄壁件,重新找正对刀后添加对应的附加质量和电涡流阻尼,方可进行下一组试验。对采集到的振动信号进行处理,得到的振动位移时域信号以及 FFT 频谱如图 10 所示。图 10 中,“SF”代表主轴转速频率;

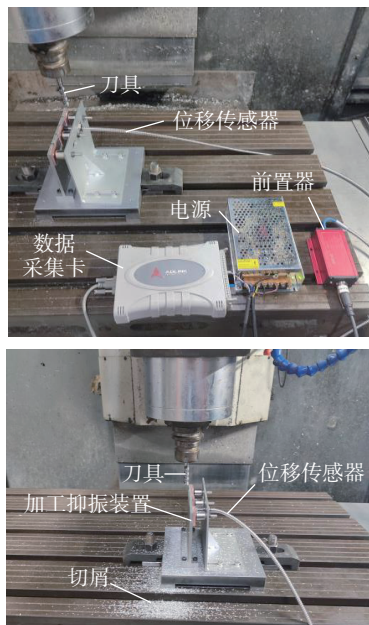
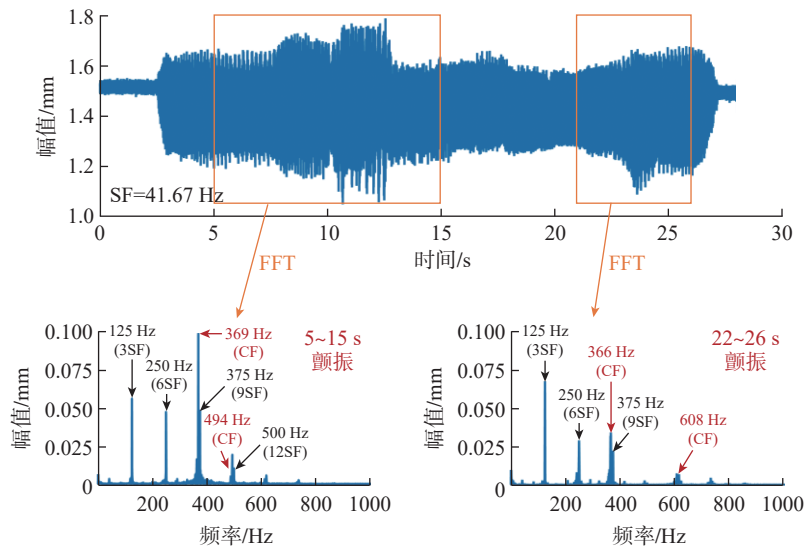
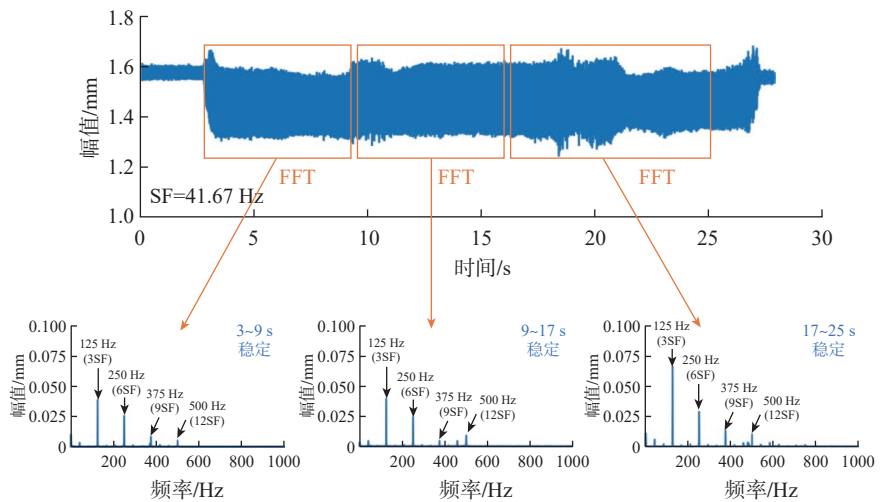


图 9 薄壁件铣削加工试验现场

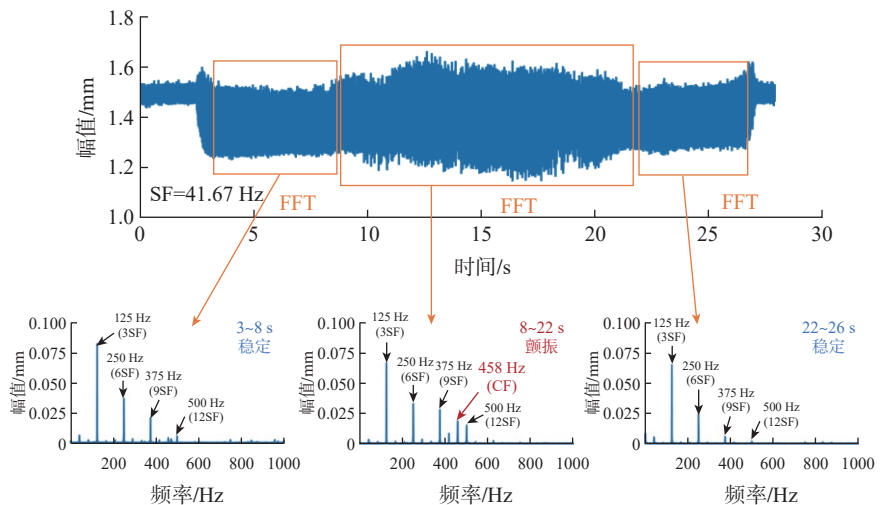
Fig.9 Experiment site of milling processing of thin-walled parts



(a) 第1组(附加质量组合[10, 10, 10],有电涡流阻尼)



(b) 第2组(附加质量组合[15, 10, 15],有电涡流阻尼)



(c) 第3组(附加质量组合[15, 10, 15],无电涡流阻尼)

图 10 3 组试验结果

Fig.10 Three groups of test results

“CF”代表铣削颤振频率,其中 125 Hz(刀齿切削频率)、250 Hz、375 Hz 和 500 Hz 均为主轴转速频率的谐波频率。

在第 1 组试验中(图 10(a)),当同时添加普通附加质量组合 [10, 10, 10] 和电涡流阻尼时,在频率 369 Hz、494 Hz、366 Hz、608 Hz 处振幅较大,说明薄壁件加工过程失稳并出现颤振,这与稳定性叶瓣图中颤振预测结果相吻合。

在第 2 组试验中(图 10(b)),当同时添加优化附加质量组合 [15, 10, 15] 和电涡流阻尼时,薄壁件铣削振动得到明显抑制,加工过程较为稳定,频谱图中刀齿切削频率及其倍频处振幅较大,且低频幅值相对较高,说明薄壁件加工振动能量主要集中在低频范围内,加工过程没有出现颤振。

另外,在第 3 组切削试验中(图 10(c)),只添加优化附加质量组合 [15, 10, 15] 但不添加电涡流阻尼时,薄壁件加工振动幅值有一定程度的升高,加工开始阶段(3~8 s)较为稳定,但随后出现颤振。由 8~22 s 频谱可知 458 Hz 为颤振频率,振动位移时域信号幅值明显增加且不平稳。这说明不添加电涡流阻尼时薄壁件的铣削稳定性会降低,更容易发生颤振。

基于上述薄壁件切削试验结果,说明同时添加优化附加质量组合 [15, 10, 15] 和电涡流阻尼能更好地提升薄壁件铣削加工稳定性,获得更好的加工抑振效果。同时通过对试验结果的对比分析验证了所提出附加质量优化方法的可行性。

## 4 结论

(1) 针对薄壁件铣削加工颤振的问题,利用附加质量和电涡流阻尼增强薄壁件铣削加工稳定性,实现了铣削颤振抑制。建立了薄壁件铣削加工动力学模型,通过颤振稳定性分析得出附加质量和电涡流阻尼对铣

削稳定域的影响规律。

(2) 开展薄壁件动态特性灵敏度分析,结合薄壁件 1、2 阶模态振型确定附加质量的优化布局。之后利用响应面方法优化各附加质量的质量占比,获得了更大的薄壁件模态刚度和铣削稳定域,从而进一步提升了薄壁件铣削加工稳定性。

(3) 设计了一套薄壁件加工抑振试验装置,通过模态试验获得薄壁件模态参数,绘制稳定性叶瓣图用来选择切削参数,进行了多组薄壁件铣削加工试验,试验结果表明,附加质量和电涡流阻尼能够有效抑制薄壁件铣削加工颤振。

## 参考文献

- [1] MA J J, ZHANG D H, WU B H, et al. Vibration suppression of thin-walled workpiece machining considering external damping properties based on magnetorheological fluids flexible fixture[J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2016, 29(4): 1074-1083.
- [2] LIU H B, WANG J P, LUO Q, et al. Effect of controllable magnetic field-induced MRF solidification on chatter suppression of thin-walled parts[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2020, 109(9-12): 2881-2890.
- [3] GUO W C, ZHANG Y, JIANG X H, et al. Improvement of stiffness during milling thin-walled workpiece based on mechanical/magnetorheological composite clamping[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2021, 68: 1047-1059.
- [4] 杨毅青, 裴行政, 刘强. 被动阻尼减振技术及数控加工应用[J]. 航空制造技术, 2016, 59(18): 16-23.
- [5] YANG Yiqing, PEI Xingzheng, LIU Qiang. Passive vibration control technology and applications in CNC machining[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2016, 59(18): 16-23.
- [6] YUAN H, WAN M, YANG Y, et al. A tunable passive damper for suppressing chatters in thin-wall milling by considering the varying modal parameters of the workpiece[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2019, 104(9-12): 4605-4616.
- [7] QIN P, LIU Y N, WANG M, et al. Milling vibration control of semiconical shell workpiece with multiple distribution tuned mass dampers[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2021, 115(7-8): 2175-2190.
- [8] 马鹏举, 徐汶, 高延, 等. 薄壁机匣铣削加工颤振抑制研究[J]. 航空制造技术, 2018, 61(11): 16-23.
- [9] MA Pengju, XU Wen, GAO Yan, et al. Research on chatter suppression in thin-walled casing milling[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2018, 61(11): 16-23.
- [10] RANSOM T, HONEYCUTT A, SCHMITZ T. A new tunable dynamics platform for milling experiments[J]. Precision Engineering, 2016, 44: 252-256.
- [11] YANG Y Q, XU D D, LIU Q. Vibration suppression of thin-walled workpiece machining based on electromagnetic induction[J]. Materials and Manufacturing Processes, 2015, 30(7): 829-835.
- [12] 程明迪, 郭家杰, 李卓, 等. 基于电涡流阻尼的薄壁盘加工振动抑制[J]. 机械工程学报, 2018, 54(17): 76-84.
- [13] CHENG Mingdi, GUO Jiajie, LI Zhuo, et al. Vibration suppression for thin-wall plate machining using eddy current damping[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2018, 54(17): 76-84.
- [14] ALTINTAS Y, STEPAN G, MERDOL D, et al. Chatter stability of milling in frequency and discrete time domain[J]. CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology, 2008, 1(1): 35-44.
- [15] TANG A J, LIU Z Q. Three-dimensional stability lobe and maximum material removal rate in end milling of thin-walled plate[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2009, 43(1-2): 33-39.
- [16] 傅志方, 华宏星. 模态分析理论与应用[M]. 上海: 上海交通大学出版社, 2000.
- [17] FU Zhifang, HUA Hongxing. Theory and application of modal analysis[M]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University Press, 2000.
- [18] 隋允康, 宇慧平. 响应面方法的改进及其对工程优化的应用[M]. 北京: 科学出版社, 2011.
- [19] SUI Yunkang, YU Huiping. Improvement of response surface methodology and its application to engineering optimization[M]. Beijing: Science Press, 2011.
- [20] 王民, 曹帅鹏, 晁涛. 基于切削稳定理论的铣削材料去除率[J]. 北京工业大学学报, 2014, 40(5): 674-677.
- [21] WANG Min, CAO Shuaipeng, ZAN

Tao. Milling material removal rate based on machining stability theory[J]. Journal of Beijing University of Technology, 2014, 40(5): 674-677.  
[16] DING Y, ZHU L M, ZHANG X J, et al. A full-discretization method for prediction of milling stability[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2010, 50(5): 502-509.

## Vibration Suppression of Thin-Walled Parts Based on Additional Mass and Eddy Current Damping

LIU Haibo, ZHANG Hongze, WANG Chengxin, MIAO Huanhuan

(Key Laboratory for Precision and Non-Traditional Machining Technology of Ministry of Education, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

**[ABSTRACT]** Aiming at the chatter problem of milling thin-walled parts, a vibration suppression method based on additional mass and eddy current damping is proposed. Firstly, a dynamic model of milling machining of thin-walled parts is established, and the influence law of additional mass and eddy current damping on the machining stability region is obtained through flutter stability analysis; Then an optimization method for added mass of thin-walled parts is proposed to obtain the optimal added mass layout and mass proportion; Finally, a set of thin-walled parts processing vibration suppression device was designed, and the thin-walled parts milling experiment was carried out. The research results show that when the additional mass combination [15,10,15] and eddy current damping are added at the same time, the thin-walled workpiece machining vibration is significantly suppressed, which verifies the effectiveness of the proposed vibration suppression method.

**Keywords:** Thin-walled parts; Vibration suppression; Additional mass; Eddy current damping; Modal analysis

(责编 七七)

(上接第 52 页)

## Tool Wear State Identification Method of Thin-Walled Parts Milling Process Driven by Digital Twin

SONG Qinghua<sup>1,2</sup>, PENG Yezhen<sup>1,2</sup>, WANG Runqiong<sup>1,2</sup>, LIU Zhanqiang<sup>1,2</sup>

(1. Shandong University, Jinan 250061, China;

2. Key Laboratory of High Efficiency and Clean Mechanical Manufacture, Shandong University, Ministry of Education, Jinan 250061, China)

**[ABSTRACT]** Due to its weak rigidity, thin-walled parts are prone to chatter and deformation in the milling process, which aggravates tool wear. In order to improve the milling efficiency and surface quality of thin-walled parts, a tool wear state recognition method driven by the fusion of digital twin and support vector machine (SVM) is proposed. The feature vectors are extracted by time-frequency domain analysis and wavelet packet transform. The super parameters are optimized by grid search and cross validation (GSCV). Combined with SVM algorithm, the wear state recognition model of milling tool for thin-walled parts is constructed. The experimental results show that SVM algorithm has obvious advantages in the classification and recognition of high-dimensional and small sample data. The recognition accuracy of different milling cutter wear states reaches 96% and 90.16% respectively, and has good generalization ability. Combined with machine learning algorithm, a high fidelity and lightweight digital twin is constructed and embedded into the milling process monitoring platform of thin-walled parts, so as to solve the problems of real-time signal monitoring and online recognition of tool wear state in the machining process.

**Keywords:** Digital twin; Support vector machine; Tool wear; Wavelet packet decomposition; Online identification; Thin-walled parts

(责编 晓月)