

# 三维动态磨削力测量平台结构设计

黄 智,陈士行,万从保,王立平  
( 电子科技大学 机械电子工程学院,四川 成都 611731 )

**摘 要:** 为了实现叶片磨削过程中磨削力的精确测控,针对磨削力变化的高动态特性,提出了采用相互正交的独立弹性元件测量三向正交磨削力的方法,并设计出电阻应变式三维动态磨削力测量平台.通过运用材料力学相关公式进行数学推导和 Workbench 有限元仿真及实际测试实验验证了其性能.实验表明上述方法有效解决了测力仪固有频率与灵敏度之间的矛盾,并在结构上降低了各向磨削力测量之间的向间耦合程度,为实现高频磨削力的实时精确检测提供了技术保障.

**关 键 词:** 叶片磨削;磨削力;测力仪;弹性元件;模态测试

中图分类号: TH 823      文献标志码: A      文章编号: 1005 - 3026( 2016 )09 - 1299 - 06

## Structure Design of the Three-Dimensional Dynamic Grinding Force Measurement Platform

HUANG Zhi , CHEN Shi-xing , WAN Cong-bao , WANG Li-ping  
( School of Mechatronics Engineering , University of Electronic Science and Technology of China , Chengdu 611731 , China. Corresponding author : HUANG Zhi , E-mail : zh Huang@ uestc. edu. cn )

**Abstract :** In order to achieve the accurate measurement and control of grinding force in the blade grinding process , a new measurement method of three-dimensional and orthogonal grinding force with mutual orthogonal and independent elastic elements was put forward , and a three-dimensional grinding force measurement platform of resistance strain was designed based on the high dynamic characteristics of grinding force. The performance of the measurement platform was verified through the mathematical derivation with the related formulas of material mechanics , the finite element simulation with Workbench and the actual testing experiments. The results showed that the above methods can effectively alleviate the dynamometer 's inherent contradiction between its natural frequency and sensitivity , and significantly reduce the measurement platform 's coupling degree among the grinding force measurements in different directions , which may provide technical support for achieving the real-time accurate detection of high frequency grinding force.

**Key words :** blade grinding ; grinding force ; dynamometer ; elastic element ; modal testing

磨削作为叶片加工过程中不可或缺的加工方法,其加工精度将直接地影响工件表面质量和使用性能<sup>[1]</sup>.磨削力作为影响磨削精度和效率的重要因素,如何对其进行精确测量,进而实现磨削力实时控制,成为提高磨削精度和质量的重要制约因素.

目前,广泛使用的切削测力仪有两类:电阻应变式和压电式.电阻应变式测力仪由弹性元件、电阻应变片以及测量电路组成.电阻应变片几乎是无感无容元件,其测量频率范围为0~500 kHz 动态应变<sup>[2-4]</sup>.电阻应变式测力仪的测量精度和动态特性主要取决于弹性元件的结构和所采用的测力方式,弹性元件是其核心部件<sup>[5]</sup>.由于受到弹性元件固有频率和灵敏度之间矛盾的限制,应变式测力仪的固有频率无法提高,可测动态信号频率范围很小,导致应变式测力仪一直落后于瑞士 Kistler 压电式测力仪<sup>[6-7]</sup>.与价格昂贵的压电式测力仪相比,电阻应变式测力仪成本低,制作相对

简单,同时在力矩测量方面有优势. 本文拟采用附加弹性元件法,设计一种新型电阻应变式磨削力测量平台.

### 1 三维动态磨削力测量平台性能指标及要求

由于磨具的磨粒晶体的生长机理和再加工过程的磨粒破碎方式复杂,加之其在砂轮或砂带磨具表面上的分布具有随机状态<sup>[8]</sup>,导致磨粒切削形状很不规则. 同时,各种磨削线速度高达 15 ~ 80 m/s,约为普通切削加工速度的数十倍,使得磨粒与被加工材料在极其短暂的时间内发生滑擦、耕犁和切削作用,导致磨削力处在高速动态变化中,其频率达数千赫兹<sup>[9]</sup>. 为了实现叶片加工过程中动态磨削力的精确测控,本文结合相关课题需要,提出了如表 1 所述的三维动态磨削力测量平台的性能指标.

表 1 三维动态磨削力测量平台性能指标	
Table 1 Performance index of the three-dimensional dynamic grinding force measurement platform	
参数	性能
测力范围	$F_x, F_y: -0.5 \sim 0.5 \text{ kN}$ $F_z: 0 \sim 1 \text{ kN}$
灵敏度	$S_x = S_y \geq 1.5 \mu\text{V/N}$ $S_z \geq 0.40 \mu\text{V/N}$
固有频率	$\geq 3.5 \text{ kHz}$
分力干扰	$\leq 2\%$
分辨率	0.1 N

### 2 三维动态磨削力测量平台结构设计与分析

在分析磨削力物理特性的基础上,为了实现高频动态三维磨削力信号的测量,本文基于附加弹性元件法,采用相对独立弹性元件测正交力,设计出三维动态磨削力测量平台机械结构(见图 1). 其中应变片组贴附在低刚度弹性薄板的表面.

本文采用附加弹性元件法及正交弹性元件法测量三向磨削力. 所谓附加弹性元件法,即采用高刚度立柱承受切削力并产生受力变形,为整体测量平台提供足够的刚度,而采用与其并联的低刚度弹性薄板感知并测量立柱的全部变形量,由于弹性薄板的长度尺寸小,因此其单位长度变形量远大于立柱,可以为测量平台提供较高的灵敏度. 所谓正交弹性元件法,即采用相对独立且正交的弹性元件,测量耦合的正交力,实现结构上的解耦.

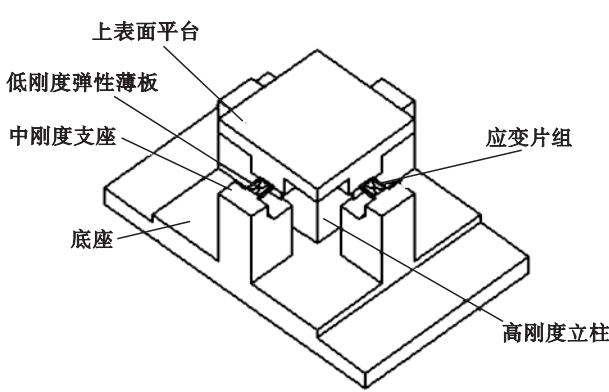


图 1 三维动态磨削力测量平台  
Fig. 1 Three-dimensional dynamic grinding force measurement platform

测量平台材料铝合金 6061,物理参数为:密度  $\rho = 2.8 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ ,弹性模量  $E = 7.17 \text{ GPa}$ ,泊松比  $\mu = 0.33$ . 其主要部件尺寸参数为:上表面平台  $60 \text{ mm} \times 60 \text{ mm} \times 7 \text{ mm}$ ;低刚度弹性薄板,  $8 \text{ mm} \times 6 \text{ mm} \times 1 \text{ mm}$ ;高刚度立柱  $25 \text{ mm} \times 25 \text{ mm} \times 50 \text{ mm}$ .

### 3 三维动态磨削力测量平台关键性能指标数学推导

将测量平台简化,忽略刚度远小于其他部件的弹性薄板的刚度影响,将薄板的质量附加到上表面平台上,得到如图 2 所示的数学模型.

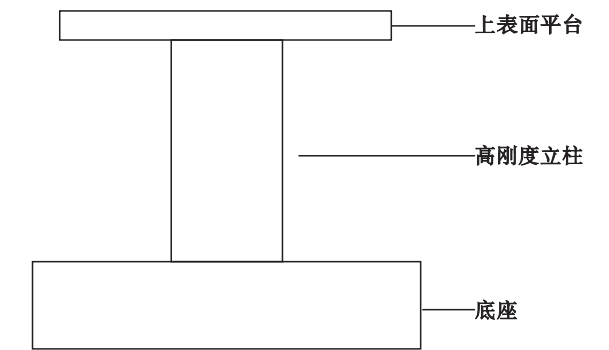


图 2 测量平台数学模型  
Fig. 2 Mathematical model of the measurement platform

计算可得该模型中测量平台除底座外的总质量  $m = 0.172 \text{ kg}$ .

#### 3.1 测量平台 Z 方向关键性能指标推导

当上述测量平台受到作用在上表面平台的竖直 Z 方向压力  $F_z = 1 \text{ N}$  时,立柱的变形量为

$$\Delta l_z = \frac{F_z h}{EA} = 1.12 \times 10^{-9} \text{ m}.$$

其中  $h$  为立柱的高度; $A$  为立柱横截面面积. 测量平台 Z 方向灵敏度为

$$S_z=4\times \Delta l_z\times \frac{1}{L'}=0.56\mu\varepsilon/N.$$

其中  $L'=8\text{ mm}$  为弹性薄板的长度.

测量平台  $Z$  方向固有频率为

$$f_z=\frac{1}{\pi}\sqrt{\frac{K_z}{m}}=\frac{1}{\pi}\sqrt{\frac{F}{\Delta l_z\cdot m}}=22.9\text{ kHz}.$$

其中  $K_z$  为测量平台  $Z$  方向刚度.

3.2 测量平台  $X,Y$  方向关键性能指标推导

基于测量平台  $X,Y$  方向的结构一致性,仅以  $X$  方向为例进行性能指标的推导.当测量平台受到水平方向作用力  $F_x=1\text{ N}$  时,立柱的弯曲变形量为

$$\Delta l_x=\frac{F_x l^3}{3EI}=\frac{4F_x l^3}{Eb h^3}=1.79\times 10^{-8}\text{ m}.$$

其中  $I$  为立柱极惯性矩  $b$  为立柱横截面的宽度.

测量平台  $X$  方向灵敏度为

$$S_x=2\times \Delta l_x\times \frac{1}{L'}=4.475\mu\varepsilon/N.$$

测量平台  $X$  方向固有频率为

$$f_x=\frac{1}{\pi}\sqrt{\frac{K_x}{m}}=\frac{1}{\pi}\sqrt{\frac{F}{\Delta l_x\cdot m}}=5.74\text{ kHz}.$$

测量平台  $Y$  方向的关键性能指标推导过程和结果均与  $X$  方向一致.

通过上述数学推导验证,测量平台在各方向的灵敏度和固有频率均满足所制定性能指标的要求.

4 三维动态磨削力测量平台关键性能指标有限元仿真验证

4.1 测量平台网格划分

在 UG 软件中完成测量平台三维建模,将模型保存为 IGES 文件,导入 Workbench 中,采用六面体单元对测量平台进行网格划分,见图 3.

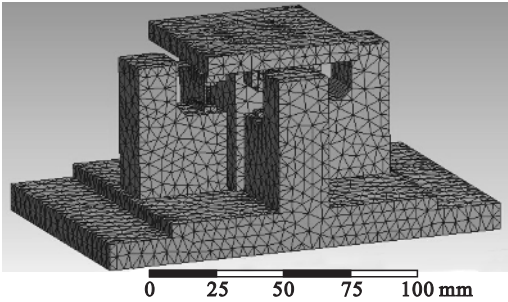


图 3 测量平台网格划分图片  
Fig. 3 Meshing figure of the measurement platform

材料为铝合金,密度  $\rho=2.8\times 10^3\text{ kg/m}^3$ ,弹性模量  $\varepsilon=7.17\text{ GPa}$ ,泊松比  $\mu=0.33$ .

4.2 测量平台有限元模态分析

对测量平台底面施加固定约束,上表面平台处于自由状态,进行模态求解(见图 4),求得测量平台固有频率为  $4.274\text{ kHz}$ (见表 2),满足性能指标要求.

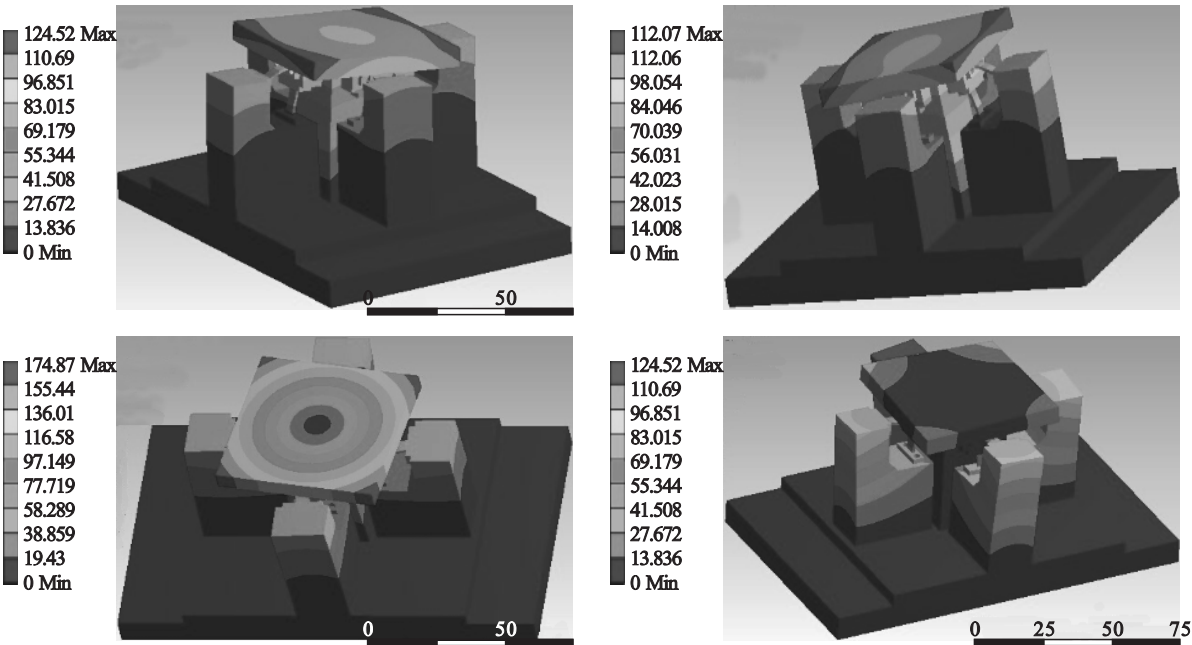


图 4 测量平台模态图  
Fig. 4 Modal figure of the measurement platform

表 2 测量平台固有频率表  
Table 2 Natural frequency table of the measurement platform

阶数	固有频率/Hz
1	4 274
2	4 292
3	7 127
4	7 137

4.3 测量平台有限元静力变形仿真

在 Workbench 静力学结构分析模块中,对测量平台底座底面施加固定约束,上表面平台施加均布载荷,进行静力变形仿真.

4.3.1 Z 方向变形仿真

在测量平台的上表面平台施加 Z 方向竖直压力  $F=1\text{ N}$ ,进行总位移变形求解,见图 5.

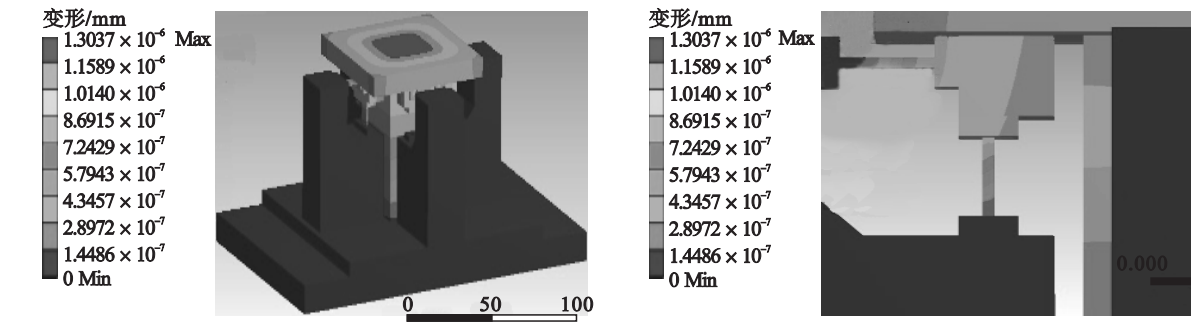


图 5 Z 方向加载变形云图  
Fig. 5 Deformation nephogram in Z direction load

由变形图可得 Z 方向弹性薄板的变形量为  $\Delta l=9.5\times10^{-7}-1.45\times10^{-7}=8.05\times10^{-7}\text{ mm}$ .

由灵敏度定义可得测量平台 Z 方向灵敏度

$$S_z=4\times\Delta l\times\frac{1}{L'}=0.403\mu\varepsilon/\text{N},$$

满足测量平台 Z 方向灵敏度性能指标要求.

4.3.2 X,Y 方向变形仿真

基于测量平台 X,Y 方向的结构一致性,下面仅以 X 方向为例进行仿真分析.在测量平台的上表面平台施加水平方向作用力  $F=1\text{ N}$ ,进行总位移变形求解,如图 6 所示.

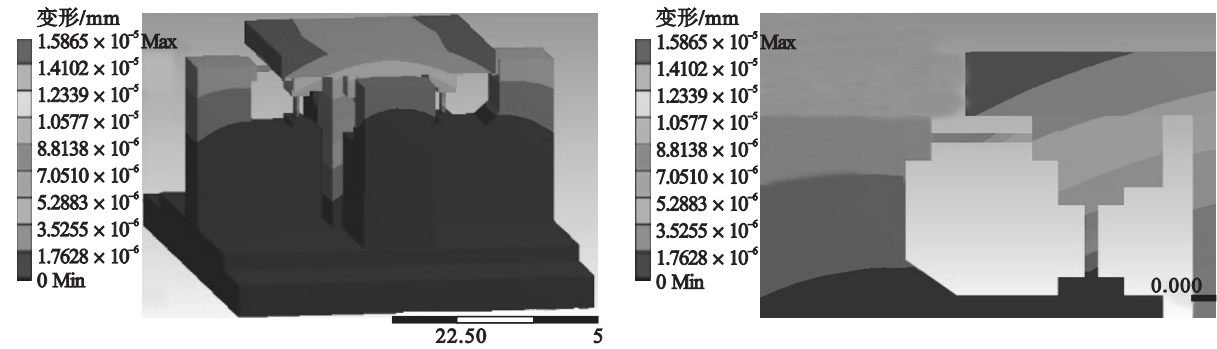


图 6 X 方向加载变形云图  
Fig. 6 Deformation nephogram in X direction load

由变形图可得 X 方向弹性薄板的变形量为  $\Delta l=1.1\times10^{-5}-4\times10^{-6}=7\times10^{-6}\text{ mm}$ .

同理得到测量平台 X 方向灵敏度为

$$S_x=2\times\Delta l\times\frac{1}{L'}=1.758\mu\varepsilon/\text{N},$$

满足测量平台 X,Y 方向灵敏度性能指标要求.

有限元仿真结果与数学计算结果存在误差,是由于数学计算的对象是简化后的数学模型,Workbench 仿真基于有限元法,通过离散单元无限逼近连续实体,模型更加接近实际,其结果更准

确.

4.4 测量平台耦合度分析

4.4.1 X,Y 向加载耦合分析

基于结构对称性,以 Y 向为例,在上表面平台施加 Y 方向载荷,载荷 -500 ~ 500 N,以 100 N 为间隔均匀增加.在各弹性元件两端设置总位移探针,将结果数据进行计算得到测量平台各方向的变形量.经过线性拟合得到各向变形曲线,见图 7.

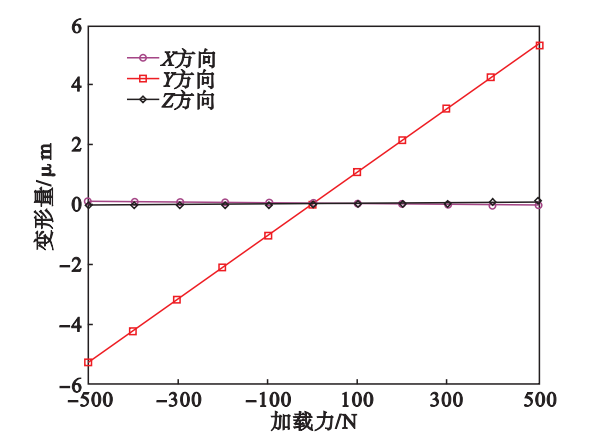


图 7 Y 方向加载耦合图

Fig. 7 Coupling figure in Y direction load

对比上图中各拟合曲线的斜率参数可以得到最大耦合出现在 X 方向 ,耦合程度为 0.91% .

4.4.2 Z 方向加载耦合分析

在上表面平台施加 Z 方向载荷步 ,其余设置及数据处理与之前分析一样 ,结果如图 8 所示.

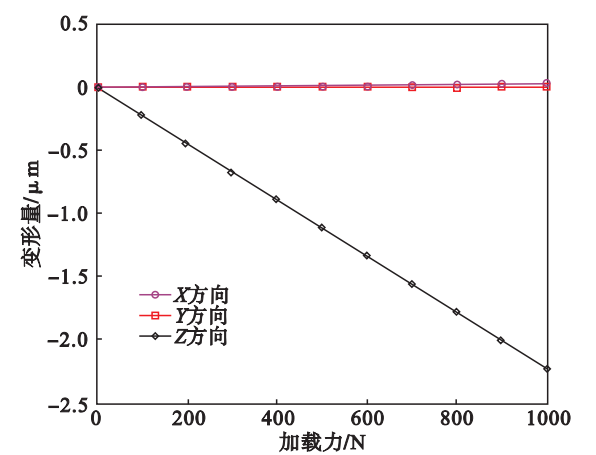


图 8 Z 方向加载耦合图

Fig. 8 Coupling figure in Z direction load

最大耦合出现在 X 方向 ,耦合程度为 0.71% . 因此 ,该测量平台满足耦合度性能要求.

5 测量平台试制与性能测试

5.1 测量平台模态实验

对加工装配得到的三维动态磨削力测量平台进行锤击法模态测试实验 ,实验装置见图 9.

在测量平台上表面选取 4 个测点布置加速度传感器 ,力锤依次敲击 4 个测点 ,通过 DH5922N 通用型动态信号测试分析系统采集加速度传感器响应信号以及力锤端部力传感器信号 ,得到该平台频响函数曲线(见图 10). 将频响函数数据导入模态分析软件 ,采用导纳圆法识别出数据所包含

的模态信息(见表 3) ,并绘制振型图(见图 11).

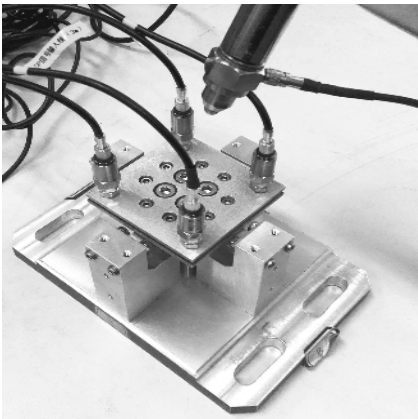


图 9 模态测试实验装置

Fig. 9 Experimental facility of modal testing

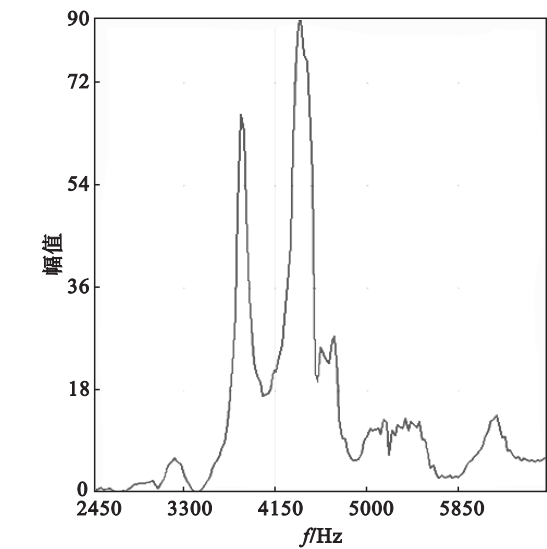


图 10 测量平台频响函数曲线图

Fig. 10 Frequency response curve of the measurement platform

表 3 测量平台模态信息		
Table 3 Modal information of the measurement platform		
阶数	固有频率/Hz	阻尼比/%
1	3 834. 09	1. 42
2	4 414. 77	1. 24
3	4 709. 09	1. 07
4	6 176. 14	1. 47

实验测得该平台固有频率为 3 834 Hz ,满足设计所提出的固有频率大于等于 3. 5 kHz 的要求.

实验测得一阶固有频率低于有限元仿真结果 10% 的原因 :一方面是由于有限元计算时采用的材料特性参数是铝合金的平均值 ;另一方面是由于有限元仿真时采用的模型是理想的整体式结构 ,现实平台是螺钉连接的组合式结构 ,在其连接部位会有一定的刚度损失 ,导致固有频率略有下降.



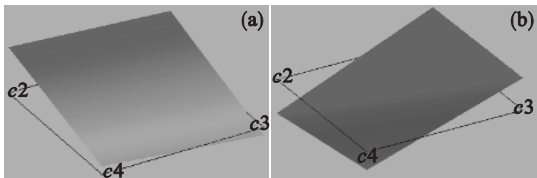


图 11 测量平台模态振型

Fig. 11 Modal shape of the measurement platform  
( a )—一阶振型 ; ( b )—二阶振型.

5.2 在线切削测量实验

为了便于观察测量平台的动态测力性能 ,本次切削实验切削方式采用铣削. 铣削为断续加工 ,其切削力具有周期变化特性 ,可以更好地检验测量平台对动态力的捕捉能力. 切削试件选择铝合金 6061 ,固定在测量平台上. 加工机床选择三轴数控铣床 CNCM3 ,主轴转速 50 ~ 4 200 r/min. 本次切削实验选择主轴转速 2 000 r/min ,铣削深度 1 mm ,铣削宽度 1 mm ,每齿进给量 0.1 mm ,铣削方式为顺铣 ,刀具选择高速钢立铣刀 ,齿数 3 ,直径 8 mm.

图 12 为测量平台所测得的铣削力实时数据 ,可以看出三向铣削力呈现明显周期性变化 ,其中 X 方向为铣削过程中进给运动方向 ,其铣削力数值明显高于其他两个方向. 由此表明该测量平台可以进行切削过程动态力的测量.

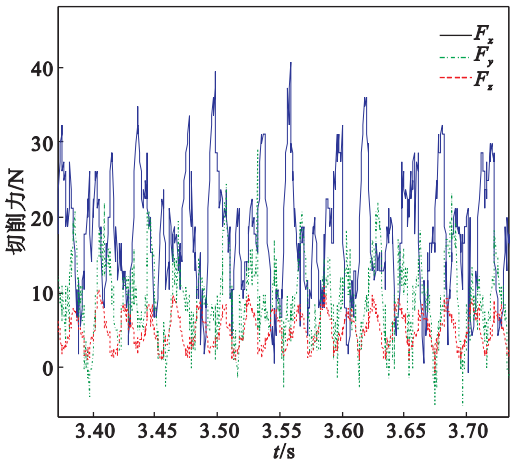


图 12 三向切削力数据图

Fig. 12 Datagram of three-directional cutting force

6 结 论

本文以叶片加工过程产生的高频动态磨削力

为测量对象 ,提出了基于相对独立附加弹性元件方式进行正交力磨削力测量的方法 ,完成了三维动态磨削力测量平台的结构设计. 经过数学推导和 ANSYS Workbench 有限元仿真以及锤击法模态测试实验 ,验证了该测量装置的关键性能指标完全满足了三维动态磨削力测量平台性能指标要求 ,对开展高性价比的动态磨削力的测控研究具有一定参考价值.

参考文献 :

[ 1 ] 任敬心 ,华定安. 磨削原理[ M ]. 北京 :电子工业出版社 , 2011 1 - 60.  
( Ren Jing-xin ,Hua Ding-an. Grinding principle [ M ]. Beijing :Publishing House of Electronics Industry ,2011 : 1 - 60. )

[ 2 ] Zhang J ,Bai Y ,Qian M. Static properties research of grinding dynamometer for wafer grinding[ J ]. *Advanced Materials Research* 2012 ,565 603 - 608.

[ 3 ] Süleyman Y ,Faruk ü ,Hacı S ,et al. Design ,development and testing of a four-component milling dynamometer for the measurement of cutting force and torque[ J ]. *Mechanical Systems and Signal Processing* 2007 21( 3 ) :1499 - 1511.

[ 4 ] Murthy K S ,Rajendran I. Design and development of strain gauge based milling tool dynamometer[ J ]. *International Journal of Machining and Machinability of Materials* 2010 7 ( 3/4 ) 304 - 316.

[ 5 ] Liu C H ,Chen C C A ,Lin C Y ,et al. A three-component strain gage dynamometer for grinding and polishing force measurement[ J ]. *Journal of Materials Engineering and Performance* 2005 ,14( 2 ) :173 - 178.

[ 6 ] Ricardo L C ,Viéville P ,Lipinski P. Correction of dynamic effects on force measurements made with piezoelectric dynamometers[ J ]. *International Journal of Machine Tools & Manufacture* 2006 46( 14 ) :1707 - 1715.

[ 7 ] Zhang J ,Liu B ,Qian M ,et al. A novel piezoelectric grinding dynamometer for monitoring ultra-precision grinding of silicon wafers[ J ]. *Advanced Materials Research* ,2010 ,126/127/128 707 - 712.

[ 8 ] 修世超 ,刘明贺 ,张修铭 ,等. 基于冲击原理的磨削接触区及磨削力建模[ J ]. 东北大学学报( 自然科学版 ) ,2014 ,35 ( 2 ) 268 - 272.  
( Xiu Shi-chao ,Liu Ming-he ,Zhang Xiu-ming ,et al. Grinding contact area and grinding force modeling based on impact principle[ J ]. *Journal of Northeastern University( Natural Science )* 2014 ,35( 2 ) 268 - 272. )

[ 9 ] Nguyen T A ,Bulter D L. Simulation of precision grinding process ,part1 :generation of the grinding wheel surface[ J ]. *International Journal of Machine Tools & Manufacture* 2005 ,45( 11 ) :1321 - 1328.