



(12) 发明专利申请

(10) 申请公布号 CN 117571311 A

(43) 申请公布日 2024. 02. 20

(21) 申请号 202311660304.6

(22) 申请日 2023.12.05

(71) 申请人 中国工程物理研究院机械制造工艺研究所

地址 621000 四川省绵阳市绵山路64号

(72) 发明人 杜坤 余泓宇 夏仰球 韩林  
何韬 李强 宋洪睿 滕强 陈衡  
石纯标 许耀宇 袁明记 黄晓明

(74) 专利代理机构 成都行之专利代理有限公司  
51220

专利代理师 史丽红

(51) Int. Cl.

G01M 13/027 (2019.01)

G01B 11/04 (2006.01)

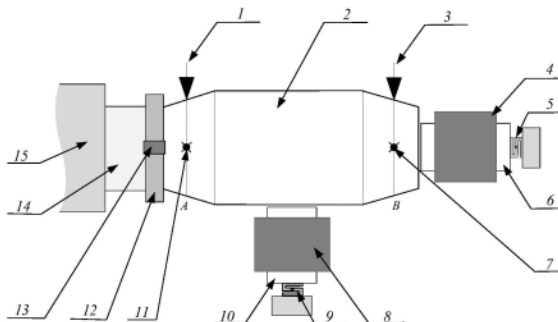
权利要求书3页 说明书10页 附图4页

(54) 发明名称

基于非接触电磁力加载的超精密主轴工作刚度测量装置及方法

(57) 摘要

本发明公开了基于非接触电磁力加载的超精密主轴工作刚度测量装置及方法,包括电磁加载模块与位移测量模块,电磁加载模块包括安装于超精密主轴输出端刀柄上的加载棒、轴向加载单元和径向加载单元;位移测量模块包括测量截面A位移的第一位移传感器和第二位移传感器以及测量截面B位移的第三位移传感器和第四位移传感器;所述截面A与截面B平行且与超精密主轴的轴线垂直。本发明不仅可以准确模拟主轴在多种受力情况下的真实工作状态,同时通过两组位移传感器对加载棒上两个不同截面上相隔90°的两个检测点进行偏移量的测量,可以准确的计算被测超精密主轴在不同工作状态时的轴向刚度、径向刚度和角刚度。



1. 基于非接触电磁力加载的超精密主轴工作刚度测量装置,包括电磁加载模块与位移测量模块,其特征在于,所述电磁加载模块包括安装于超精密主轴(15)输出端刀柄(14)上的加载棒(2),与超精密主轴(15)轴心共线的轴向加载单元、与超精密主轴(15)轴线垂直的径向加载单元;

所述位移测量模块包括测量加载棒(2)上截面A位移的第一位移传感器(1)和第二位移传感器(11)以及测量加载棒(2)上截面B位移的第三位移传感器(3)和第四位移传感器(7);

所述截面A与截面B平行且与超精密主轴(15)的轴线垂直。

2. 根据权利要求1所述的基于非接触电磁力加载的超精密主轴工作刚度测量装置,其特征在于,所述第一位移传感器(1)与第二位移传感器(11)相互垂直安装,安装位置为未加载状态下第一位移传感器(1)水平指向加载棒(2)的轴心,第二位移传感器(11)竖直指向加载棒(2)的轴心;

所述第三位移传感器(3)与第四位移传感器(7)相互垂直安装,安装位置为未加载状态下第三位移传感器(3)水平指向加载棒(2)轴心,第四位移传感器(4)竖直指向加载棒(2)轴心。

3. 根据权利要求1所述的基于非接触电磁力加载的超精密主轴工作刚度测量装置,其特征在于,第一位移传感器(1)、第二位移传感器(11)、第三位移传感器(3)和第四位移传感器(7)均为非接触式位移传感器,通过位移传感器支架(20)安装在检测平台(23)上。

4. 根据权利要求1所述的基于非接触电磁力加载的超精密主轴工作刚度测量装置,其特征在于,所述位移测量模块还包括安装在加载棒(2)上刀柄(14)一侧用于测量超精密主轴(15)角位移的圆形光栅编码器,所述圆形光栅编码器包括圆光栅(12)和读数头(13),所述圆光栅(12)安装在加载棒(2)与刀柄(14)连接的端面,所述读数头(13)通过读数头支架(21)安装在检测平台(23)上。

5. 根据权利要求1所述的基于非接触电磁力加载的超精密主轴工作刚度测量装置,其特征在于,所述加载棒(2)采用硅钢材质,所述加载棒(2)呈中间为圆柱两端为圆台的结构,截面A和截面B分别位于加载棒(2)两端的圆台结构。

6. 根据权利要求1所述的基于非接触电磁力加载的超精密主轴工作刚度测量装置,其特征在于,所述轴向加载单元包括轴向加载铁芯(6)和缠绕其上的轴向加载线圈(4);

所述径向加载单元包括径向加载铁芯(10)和缠绕其上的径向加载线圈(8)。

7. 根据权利要求6所述的基于非接触电磁力加载的超精密主轴工作刚度测量装置,其特征在于,所述轴向加载铁芯(6)和径向加载铁芯(10)均为复合结构,内部为工业纯铁,外部包覆硅钢。

8. 根据权利要求6所述的基于非接触电磁力加载的超精密主轴工作刚度测量装置,其特征在于,所述轴向加载铁芯(6)的末端设置有轴向加载单元支撑座(18),轴向加载单元支撑座(18)与轴向加载铁芯(6)之间安装有轴向测力传感器(5);

所述径向加载铁芯(10)的末端设置有径向加载单元支撑座(16),径向加载单元支撑座(16)与径向加载铁芯(10)之间安装有径向测力传感器(9)。

9. 根据权利要求6所述的基于非接触电磁力加载的超精密主轴工作刚度测量装置,其特征在于,所述轴向加载铁芯(6)和径向加载铁芯(10)的下方均安装有支撑滑块(17)和支撑滑轨(19)。

10.一种根据权利要求1~9任一所示超精密主轴工作刚度测量装置实现的测量方法,包括以下步骤:

S1:将加载棒通过刀柄固定安装在被测超精密主轴上,将第一位移传感器、第二位移传感器、第三位移传感器和第四位移传感器的读数清零;

S2:设定并控制被测超精密主轴某一工作转速下匀速转动,待被测超精密主轴转速稳定后控制轴向加载单元对加载棒进行加载,设定恒定输入电流,通过上位机记录一定采样频率下轴向测力传感器、第一位移传感器、第二位移传感器、第三位移传感器和第四位移传感器的读数 $F_A$ 、 $\delta_{a1}$ 、 $\delta_{a2}$ 、 $\delta_{a3}$ 和 $\delta_{a4}$ 随时间变化的曲线,主轴轴向变形量的表达式为

$$\Delta\delta_a(t) = \frac{1}{4 \tan \alpha} [\delta_{a1}(t) + \delta_{a2}(t) - \delta_{a3}(t) - \delta_{a4}(t)] \quad (1)$$

其中, $\alpha$ 为加载棒两端圆台母线与轴心的夹角;

计算得到,在第*i*次采样时刻,主轴轴向刚度表达式为

$$K_a(i) = \frac{F_A(i)}{\Delta\delta_a(i)}, (i = 1, 2, \dots, tf_s) \quad (2)$$

其中 $f_s$ 为采样频率, $t$ 为采样时间;

计算主轴轴向刚度为

$$K_a = \frac{1}{tf_s} \sum_{i=1}^{tf_s} K_a(i), (i = 1, 2, \dots, tf_s) \quad (3);$$

S3:设定并控制被测超精密主轴在某一工作转速下匀速转动,待被测超精密主轴转速稳定后控制径向加载单元对加载棒进行加载,设定恒定输入电流,通过上位机记录一定采样频率下径向测力传感器、第一位移传感器、第二位移传感器、第三位移传感器和第四位移传感器的读数 $F_R$ 、 $\delta_{r1}$ 、 $\delta_{r2}$ 、 $\delta_{r3}$ 和 $\delta_{r4}$ 随时间变化的曲线;

在测量截面A内,有几何约束关系式

$$\begin{cases} \cos\left(\varphi_A + \frac{\pi}{2}\right) = \frac{\Delta\delta_A^2 + (r_B - \delta_{r1})^2 - r_B^2}{2\Delta\delta_A(r_B - \delta_{r1})} \\ \cos\varphi_A = \frac{r_B^2 + (r_B + \delta_{r2})^2 - \Delta\delta_A^2}{2r_B(r_B + \delta_{r2})} \end{cases} \quad (4)$$

求解得到 $\varphi_A$ 和 $\Delta\delta_A$ ;其中, $\Delta\delta_A$ 为截面A圆心的位移, $\varphi_A$ 为截面A圆心位移矢量与水平面的夹角, $r_A$ 为截面A的半径;

在测量截面B内,有几何约束关系式

$$\begin{cases} \cos\left(\varphi_B + \frac{\pi}{2}\right) = \frac{\Delta\delta_B^2 + (r_B - \delta_{r3})^2 - r_B^2}{2\Delta\delta_B(r_B - \delta_{r3})} \\ \cos\varphi_B = \frac{r_B^2 + (r_B + \delta_{r4})^2 - \Delta\delta_B^2}{2r_B(r_B + \delta_{r4})} \end{cases} \quad (5)$$

求解得到 $\varphi_B$ 和 $\Delta\delta_B$ ;其中, $\Delta\delta_B$ 为截面B圆心的位移, $\varphi_B$ 为截面B圆心位移矢量与水平面的夹角, $r_B$ 为截面A半径;

计算得到,在第*i*次采样时刻,主轴质心位移 $\Delta\delta_m$ 表达式为

$$\Delta\delta_m(i) = \Delta\delta_B(i) - \frac{1}{l}[\Delta\delta_B(i) - \Delta\delta_A(i)](l_m + l), (i=1, 2, \dots, tf_s) \quad (6)$$

其中, $l_m$ 为主轴质心到测量截面A的距离, $l$ 为测量截面A到测量截面B的距离;  
主轴绕瞬心点的转动角度为

$$\theta = \arctan\left(\frac{\Delta\delta_B - \Delta\delta_A}{l}\right) \quad (7)$$

在第*i*次采样时刻,电磁力 $F_R$ 等效作用于质心点的力 $F_m$ 可表示为

$$F_m(i) = \frac{\Delta\delta_B(i)l - \frac{l}{2}[\Delta\delta_B(i) - \Delta\delta_A(i)]}{\Delta\delta_B(i)l - (l+l_m)[\Delta\delta_B(i) - \Delta\delta_A(i)]} \cdot F_R(i) \cos\left(\frac{\varphi_A + \varphi_B}{2}\right), (i=1, 2, \dots, tf_s) \quad (8)$$

由此可计算得到在第*i*次采样时刻,主轴径向刚度表达式为

$$K_r(i) = \frac{F_m(i)}{\Delta\delta_m(i)}, (i=1, 2, \dots, tf_s) \quad (9)$$

计算主轴在该加载力作用下,主轴的径向刚度为

$$K_r = \frac{1}{tf_s} \sum_{i=1}^{tf_s} K_r(i), (i=1, 2, \dots, tf_s) \quad (10)$$

在第*i*次采样时刻,电磁力 $F_R$ 作用于主轴的弯矩 $M_R$ 表达式为

$$M_R(i) = F_R(i) \cos\left(\frac{\varphi_A + \varphi_B}{2}\right) \cdot \left(\frac{\Delta\delta_B l}{\Delta\delta_B - \Delta\delta_A} - \frac{l}{2}\right), (i=1, 2, \dots, tf_s) \quad (11)$$

主轴的角刚度为

$$K_\theta(i) = \frac{M_R(i)}{\theta(i)}, (i=1, 2, \dots, tf_s) \quad (12)$$

计算主轴在该加载力作用下,主轴的角刚度为

$$K_\theta = \frac{1}{tf_s} \sum_{i=1}^{tf_s} K_\theta(i), (i=1, 2, \dots, tf_s) \quad (13)。$$

## 基于非接触电磁力加载的超精密主轴工作刚度测量装置及方法

### 技术领域

[0001] 本发明涉及超精密主轴刚度测量技术领域,具体而言,涉及基于非接触电磁力加载的超精密主轴工作刚度测量装置及方法。

### 背景技术

[0002] 超精密主轴是现代精加工加床的核心功能部件,主要用于高转速小切量的加工工序。超精密主轴的刚度决定着主轴的加工精度和动态性能等重要指标,对主轴的刚度进行准确测量有利于从加工层面对机床加工过程进行预测和补偿,从而有效指导加工,提高零件的加工精度和表面质量。

[0003] 主轴刚度通常分为静止状态时的静刚度和高速转动状态时的动刚度。由于动刚度测试方法存在诸多局限,静刚度测试技术相对更加成熟且易于采用,目前工程中对主轴刚度的检测更多的是采用静刚度测试方法。然而静刚度无法真实反映主轴在高速转动时的动态承载特性,因此,为了更加准确的分析主轴的动态性能,需要研究更加准确的动刚度测试方法。

[0004] 对主轴动刚度进行测量需要考虑两个问题,其一是加载方法,即如何进行加载才能准确模拟主轴真实工作状态下的受力;其二为位移测量方法,即如何准确地对高速转动时的主轴刚度进行测量和计算。

[0005] 目前常见的主轴旋转状态下的加载方式有两种:接触式加载和非接触式加载。

[0006] 接触式加载通常是在主轴轴端或虚拟刀具上安装一个滚动轴承,利用液压装置等方式对滚动轴承进行加载从而进一步达到对主轴进行加载的目的;接触式加载存在诸多问题,例如轴承在高速转动时加载容易产生剧烈的摩擦热、震动及噪声,并且轴承容易因温度急剧升高而出现故障甚至安全隐患,不能长时间运行,难以达到理想的实验效果。

[0007] 目前的非接触式加载主要有两种:气浮式加载和电磁力加载。气浮式加载的缺点在于:1)气浮轴承是通过调节气浮间隙、气压大小来调整加载力,因此这种加载方式仅能提供静载荷,无法提供模拟主轴真实工作状态时的动态受力情况;2)加载过程中气浮轴承容易因各种因素发生偏置从而发生与主轴相碰的事故。电磁力加载则能很好的弥补气浮式加载的缺点,由于电磁力易于调节,通过电磁力作用于加载棒的方式,能够较容易地为主轴提供恒定载荷加载和动态交变载荷加载。

[0008] 目前的位移测量普遍都是通过各类位移传感器进行测量,但是在基于电磁力加载方案的前提下现有的测量方法都存在共性上的不足。由于电磁力加载的特点,电磁力最终作用于加载棒的合力的方向、作用点和作用横截面难以确定,通过现有的各种位移传感器直接进行主轴位移的测量会导致测量的位移难以与加载的等效作用力相统一,因此加载力大小很难换算成位移检测点上的等效载荷,导致动刚度的测量结果存在较大的误差。

[0009] 有鉴于此,特提出本申请。

## 发明内容

[0010] 本发明所要解决的技术问题是无法准确提供能够模拟超精密主轴工作过程中受到的动态高频切削力,且现有位移传感器直接进行主轴位移测量的位移难以与加载的等效作用力相统一,加载力大小很难换算成位移检测点上的等效载荷,导致动刚度的测量结果存在较大的误差,目的在于提供基于非接触电磁力加载的超精密主轴工作刚度测量装置及方法,不仅可以准确模拟主轴在多种受力情况下的真实工作状态,同时通过两组位移传感器对加载棒上两个不同截面上相隔 $90^\circ$ 的两个检测点进行偏移量的测量,可以准确的计算被测超精密主轴在不同工作状态时的轴向刚度、径向刚度和角刚度。

[0011] 本发明通过下述技术方案实现:

[0012] 一方面,本发明提供基于非接触电磁力加载的超精密主轴工作刚度测量装置,包括安装在检测平台上的电磁加载模块与位移测量模块,所述电磁加载模块包括安装于超精密主轴输出端刀柄上的加载棒,与超精密主轴轴心共线的轴向加载单元、与超精密主轴轴线垂直的径向加载单元;

[0013] 所述位移测量模块包括测量加载棒上截面A位移的第一位移传感器和第二位移传感器以及测量加载棒上截面B位移的第三位移传感器和第四位移传感器;

[0014] 所述截面A与截面B平行且与超精密主轴的轴线垂直。

[0015] 在某一具体实施方式中,第一位移传感器、第二位移传感器、第三位移传感器和第四位移传感器均为非接触式位移传感器,通过位移传感器支架安装在检测平台上。采用非接触式位移传感器可以避免在测量主轴动刚度的过程中主轴旋转时位移传感器与加载棒间持续摩擦。

[0016] 在某一具体实施方式中,所述第一位移传感器与第二位移传感器相互垂直安装,即第一位移传感器与第二位移传感器的轴线在位移传感器支架上的位置相互正交,具体安装位置为未加载状态下第一位移传感器水平指向加载棒的轴心,第二位移传感器竖直指向加载棒的轴心;

[0017] 所述第三位移传感器与第四位移传感器相互垂直安装,即第三位移传感器与第四位移传感器的轴线在位移传感器支架上的位置相互正交,具体安装位置为未加载状态下第三位移传感器水平指向加载棒轴心,第四位移传感器竖直指向加载棒轴心。本发明采用两组位移传感器分别测量加载棒上两个不同截面A和截面B上角度相差 $90^\circ$ 位置处的两点的位移变化量。

[0018] 在某一具体实施方式中,所述位移测量模块还包括安装在加载棒上刀柄一侧用于测量超精密主轴角位移的圆形光栅编码器,所述圆形光栅编码器包括圆光栅和读数头,所述圆光栅安装在加载棒与刀柄连接的端面,所述读数头通过读数头支架安装在检测平台上。

[0019] 在某一具体实施方式中,所述加载棒采用硅钢材质,并且要求加载棒质量分布均匀、具有较高的表面加工精度和圆柱度,所述加载棒呈中间为圆柱两端为圆台的结构,截面A和截面B分别位于加载棒两端的圆台结构。

[0020] 在某一具体实施方式中,所述轴向加载单元包括轴向加载铁芯和缠绕其上的轴向加载线圈;所述径向加载单元包括径向加载铁芯和缠绕其上的径向加载线圈。

[0021] 在某一具体实施方式中,所述轴向加载铁芯和径向加载铁芯均为复合结构,内部

为工业纯铁,外部包覆硅钢,这种复合结构能使铁芯具有较低的矫顽力和较高的磁通率的优点,保证加载单元对超精密主轴加载的可靠性。

[0022] 在某一具体实施方式中,所述轴向加载铁芯的末端设置有轴向加载单元支撑座,轴向加载单元支撑座与轴向加载铁芯之间安装有轴向测力传感器;所述径向加载铁芯的末端设置有径向加载单元支撑座,径向加载单元支撑座与径向加载铁芯之间安装有径向测力传感器,用于检测轴向、径向电磁力的大小。

[0023] 在某一具体实施方式中,所述轴向加载铁芯和径向加载铁芯的下方均安装有支撑滑块和支撑滑轨,能够支撑铁芯重量的同时,也更方便调节加载单元与加载棒之间的间隙。

[0024] 本发明通过将加载棒通过刀柄安装在待测超精密主轴上,再利用轴向加载单元与径向加载单元分别对加载棒施加载荷,通过两组位移传感器对加载棒上两个不同截面上相隔 $90^\circ$ 的两个检测点进行偏移量的测量,根据测量结果可以分别计算被测超精密主轴在不同工作状态时的轴向刚度、径向刚度和角刚度。加载单元可以通过调节输入信号模拟主轴在不同工作状态下的受载情况,同时,通过更加准确的位移测量和计算方法,可以测算出更加准确的工作刚读数值,具有更高的参考价值。

[0025] 另一方面,本发明提供一种根据上述超精密主轴工作刚度测量装置实现的测量方法,包括以下步骤:

[0026] S1:将加载棒通过刀柄固定安装在被测超精密主轴上,将第一位移传感器、第二位移传感器、第三位移传感器和第四位移传感器的读数清零;

[0027] S2:设定并控制被测超精密主轴某一工作转速下匀速转动,待被测超精密主轴转速稳定后控制轴向加载单元对加载棒进行加载,设定恒定输入电流,通过上位机记录一定采样频率下轴向测力传感器、第一位移传感器、第二位移传感器、第三位移传感器和第四位移传感器的读数 $F_A$ 、 $\delta_{a1}$ 、 $\delta_{a2}$ 、 $\delta_{a3}$ 和 $\delta_{a4}$ 随时间变化的曲线,主轴轴向变形量的表达式为

$$[0028] \quad \Delta\delta_a(t) = \frac{1}{4\tan\alpha} [\delta_{a1}(t) + \delta_{a2}(t) - \delta_{a3}(t) - \delta_{a4}(t)] \quad (1)$$

[0029] 其中, $\alpha$ 为加载棒两端圆台母线与轴心的夹角;

[0030] 计算得到,在第*i*次采样时刻,主轴轴向刚度表达式为

$$[0031] \quad K_a(i) = \frac{F_A(i)}{\Delta\delta_a(i)}, (i=1, 2, \dots, tf_s) \quad (2)$$

[0032] 其中 $f_s$ 为采样频率, $t$ 为采样时间;

[0033] 计算主轴轴向刚度为

$$[0034] \quad K_a = \frac{1}{tf_s} \sum_{i=1}^{tf_s} K_a(i), (i=1, 2, \dots, tf_s) \quad (3);$$

[0035] S3,按照一定的步距逐步改变轴向加载单元输入电流的大小,从而改变输入轴向加载力的大小,按照上述S2的方式计算多组不同加载力时的刚度数值,

[0036] S4:设定并控制被测超精密主轴在某一工作转速下匀速转动,待被测超精密主轴转速稳定后控制径向加载单元对加载棒进行加载,设定恒定输入电流,通过上位机记录一定采样频率下径向测力传感器、第一位移传感器、第二位移传感器、第三位移传感器和第四位移传感器的读数 $F_R$ 、 $\delta_{r1}$ 、 $\delta_{r2}$ 、 $\delta_{r3}$ 和 $\delta_{r4}$ 随时间变化的曲线;

[0037] 在测量截面A内,有几何约束关系式

$$[0038] \begin{cases} \cos\left(\varphi_A + \frac{\pi}{2}\right) = \frac{\Delta\delta_A^2 + (r_B - \delta_{r1})^2 - r_B^2}{2\Delta\delta_A(r_B - \delta_{r1})} \\ \cos\varphi_A = \frac{r_B^2 + (r_B + \delta_{r2})^2 - \Delta\delta_A^2}{2r_B(r_B + \delta_{r2})} \end{cases} \quad (4)$$

[0039] 求解得到 $\varphi_A$ 和 $\Delta\delta_A$ ;其中, $\Delta\delta_A$ 为截面A圆心的位移, $\varphi_A$ 为截面A圆心位移矢量与水平面的夹角, $r_A$ 为截面A的半径;

[0040] 在测量截面B内,有几何约束关系式

$$[0041] \begin{cases} \cos\left(\varphi_B + \frac{\pi}{2}\right) = \frac{\Delta\delta_B^2 + (r_B - \delta_{r3})^2 - r_B^2}{2\Delta\delta_B(r_B - \delta_{r3})} \\ \cos\varphi_B = \frac{r_B^2 + (r_B + \delta_{r4})^2 - \Delta\delta_B^2}{2r_B(r_B + \delta_{r4})} \end{cases} \quad (5)$$

[0042] 求解得到 $\varphi_B$ 和 $\Delta\delta_B$ ;其中, $\Delta\delta_B$ 为截面B圆心的位移, $\varphi_B$ 为截面B圆心位移矢量与水平面的夹角, $r_B$ 为截面A半径;

[0043] 计算得到,在第*i*次采样时刻,主轴质心位移 $\Delta\delta_m$ 表达式为

$$[0044] \Delta\delta_m(i) = \Delta\delta_B(i) - \frac{1}{l}[\Delta\delta_B(i) - \Delta\delta_A(i)](l_m + l), (i = 1, 2, \dots, t f_s) \quad (6)$$

[0045] 其中, $l_m$ 为主轴质心到测量截面A的距离, $l$ 为测量截面A到测量截面B的距离;

[0046] 主轴绕瞬心点的转动角度为

$$[0047] \theta = \arctan\left(\frac{\Delta\delta_B - \Delta\delta_A}{l}\right) \quad (7)$$

[0048] 在第*i*次采样时刻,电磁力 $F_R$ 等效作用于质心点的力 $F_m$ 可表示为

$$[0049] F_m(i) = \frac{\Delta\delta_B(i)l - \frac{l}{2}[\Delta\delta_B(i) - \Delta\delta_A(i)]}{\Delta\delta_B(i)l - (l + l_m)[\Delta\delta_B(i) - \Delta\delta_A(i)]} \cdot F_R(i) \cos\left(\frac{\varphi_A + \varphi_B}{2}\right), (i = 1, 2, \dots, t f_s) \quad (8)$$

[0050] 由此可计算得到在第*i*次采样时刻,主轴径向刚度表达式为

$$[0051] K_r(i) = \frac{F_m(i)}{\Delta\delta_m(i)}, (i = 1, 2, \dots, t f_s) \quad (9)$$

[0052] 计算主轴在该加载力作用下,主轴的径向刚度为

$$[0053] K_r = \frac{1}{t f_s} \sum_{i=1}^{t f_s} K_r(i), (i = 1, 2, \dots, t f_s) \quad (10)$$

[0054] 在第*i*次采样时刻,电磁力 $F_R$ 作用于主轴的弯矩 $M_R$ 表达式为

$$[0055] M_R(i) = F_R(i) \cos\left(\frac{\varphi_A + \varphi_B}{2}\right) \cdot \left(\frac{\Delta\delta_B l}{\Delta\delta_B - \Delta\delta_A} - \frac{l}{2}\right), (i = 1, 2, \dots, t f_s) \quad (11)$$

[0056] 主轴的角刚度为

$$[0057] \quad K_{\theta}(i) = \frac{M_R(i)}{\theta(i)}, (i=1, 2, \dots, t f_s) \quad (12)$$

[0058] 计算主轴在该加载力作用下, 主轴的角刚度为

$$[0059] \quad K_{\theta} = \frac{1}{t f_s} \sum_{i=1}^{t f_s} K_{\theta}(i), (i=1, 2, \dots, t f_s) \quad (13);$$

[0060] S5, 按照一定的步距逐步改变输入电流的大小, 从而改变输入径向加载力的大小, 按照上述S4的方式计算多组不同加载力时的刚度数值;

[0061] S6, 通过圆光栅编码器的主轴转动角度监测和反馈, 可以使位移传感器每次采样的点位相同, 可以方便进行更加深入的主轴工作刚度分析。

[0062] 本发明通过以上方法测得的超精密主轴的工作刚度(包括轴向刚度、径向刚度和角刚度值), 是在超精密主轴模拟真实工作状态下, 即对其在旋转状态下施加不同的载荷时进行的, 通过主轴匀速工作状态下对其施加不同大小的载荷, 连续测量其在工作状态时加载棒上四个测量点位的位移值, 在考虑系统在工作状态时真实的受力与位移情况下对其轴向刚度、径向刚度和角刚度进行分析计算, 并且在计算时将同一载荷作用下连续多次采样的计算结果求平均值, 这样多点多次测量和计算的方式可以使刚度测量结果更具统计意义, 将多次采样结果平均化后能够大大减小最终结果的测量误差, 对于提高超精密主轴工作刚度测量的准确性具有重要意义。

[0063] 本发明与现有技术相比, 具有如下的优点和有益效果:

[0064] 1、本发明实施例提供的基于非接触电磁力加载的超精密主轴工作刚度测量装置及方法, 通过将加载棒安装在待测超精密主轴上, 再利用轴向加载单元与径向加载单元分别对加载棒施加载荷, 通过两组位移传感器对加载棒上两个不同截面上相隔 $90^{\circ}$ 的两个检测点进行偏移量的测量, 根据测量结果可以分别计算被测超精密主轴在不同工作状态时的轴向刚度、径向刚度和角刚度。加载单元可以通过调节输入信号模拟主轴在不同工作状态下的受力情况, 同时, 通过更加准确的位移测量和计算方法, 可以测算出更加准确的工作刚度数值, 具有更高的参考价值;

[0065] 2、本发明实施例提供的基于非接触电磁力加载的超精密主轴工作刚度测量装置及方法, 基于上述装置对所模拟的真实工作状态下的被测超精密主轴进行测量和计算, 通过主轴匀速工作状态下对其施加不同大小的载荷, 连续测量其在工作状态时加载棒上多个测量点位的位移值, 在考虑系统在工作状态时真实的受力与位移情况下对其轴向刚度、径向刚度和角刚度进行分析计算, 并且在计算时将同一载荷作用下连续多次采样的计算结果求平均值, 这样多点多次测量和计算的方式可以使刚度测量结果更具统计意义, 将多次采样结果平均化后能够大大减小最终结果的测量误差, 对于提高超精密主轴工作刚度测量的准确性具有重要意义。

## 附图说明

[0066] 为了更清楚地说明本发明示例性实施方式的技术方案, 下面将对实施例中所需要使用的附图作简单地介绍, 应当理解, 以下附图仅示出了本发明的某些实施例, 因此不应被看作是对范围的限定, 对于本领域普通技术人员来讲, 在不付出创造性劳动的前提下, 还可

以根据这些附图获得其他相关的附图。

[0067] 图1为本发明实施例提供的超精密主轴刚度检测装置的结构原理图的俯视图；

[0068] 图2为本发明实施例提供的超精密主轴刚度检测装置的结构原理图的前视图；

[0069] 图3为本发明实施例提供的超精密主轴刚度检测装置的三维结构示意图；

[0070] 图4为本发明实施例提供的加载棒受轴向载荷时的状态示意图；

[0071] 图5为本发明实施例提供的加载棒受径向载荷时截面A的状态示意图；

[0072] 图6为本发明实施例提供的加载棒受径向载荷时截面B的状态示意图；

[0073] 图7为本发明实施例提供的整个系统在受径向载荷时轴向位移截面的状态示意图；

[0074] 附图中标记及对应的零部件名称：

[0075] 1-第一位移传感器；2-加载棒；3-第三位移传感器；4-轴向加载线圈；5-轴向测力传感器；6-轴向加载铁芯；7-第四位移传感器；8-径向加载线圈；9-径向测力传感器；10-径向加载铁芯；11-第二位移传感器；12-圆光栅；13-读数头；14-刀柄；15-超精密主轴；16-径向加载单元支撑座；17-支撑滑块；18-轴向加载单元支撑座；19-直线滑轨；20-位移传感器支架；21-读数头支架；22-主轴安装支架；23-检测平台。

### 具体实施方式

[0076] 为使本发明的目的、技术方案和优点更加清楚明白，下面结合实施例和附图，对本发明作进一步的详细说明，本发明的示意性实施方式及其说明仅用于解释本发明，并不作为对本发明的限定。

[0077] 在以下描述中，为了提供对本发明的透彻理解阐述了大量特定细节。然而，对于本领域普通技术人员显而易见的是：不必采用这些特定细节来实行本本发明。在其他实施例中，为了避免混淆本本发明，未具体描述公知的结构。

[0078] 在整个说明书中，对“一个实施例”、“实施例”、“一个示例”或“示例”的提及意味着：结合该实施例或示例描述的特定特征、结构或特性被包含在本发明至少一个实施例中。因此，在整个说明书的各个地方出现的短语“一个实施例”、“实施例”、“一个示例”或“示例”不一定都指同一实施例或示例。此外，可以以任何适当的组合和、或子组合将特定的特征、结构或特性组合在一个或多个实施例或示例中。此外，本领域普通技术人员应当理解，在此提供的示图都是为了说明的目的，并且示图不一定是按比例绘制的。这里使用的术语“和/或”包括一个或多个相关列出的项目的任何和所有组合。

[0079] 在本发明的描述中，术语“前”、“后”、“左”、“右”、“上”、“下”、“竖直”、“水平”、“高”、“低”“内”、“外”等指示的方位或位置关系为基于附图所示的方位或位置关系，仅是为了便于描述本发明和简化描述，而不是指示或暗示所指的装置或元件必须具有特定的方位、以特定的方位构造和操作，因此不能理解为对本发明保护范围的限制。

[0080] 实施例1

[0081] 如图1-图3所示，本发明实施例提供基于非接触电磁力加载的超精密主轴工作刚度测量装置，包括检测平台23、电磁加载模块、位移测量模块和主轴安装支架22，检测平台23为整个测量过程的基体，其装配表面即上表面需要保证较高的平整度，以保证其他单元在安装后具有较高的精度条件，主轴安装支架22与检测平台固定连接，其安装位置可以根

据实际情况相对检测平台23可调,被测超精密主轴15可拆卸的安装在主轴安装支架22上,超精密主轴15的输出端首先安装刀柄14,加载棒2与刀柄14连接,圆光栅12固定连接于加载棒2一端,位于加载棒2与刀柄14之间,为保证测量结果的准确性,加载棒2、刀柄14、圆光栅12需要保证较高的同轴度。

[0082] 本实施例中,所述电磁加载模块分为与主轴轴心共线的轴向加载单元、与主轴轴线垂直的径向加载单元和通过刀柄与主轴连接的加载棒2。对于所述加载棒2,为更好的模拟主轴工作状态时的受载状态,其材质选用硅钢这类软磁材料,并且为保证测量准确,要求加载棒2具有较高的表面加工精度和圆柱度,且质量分布均匀,同时在本发明的刚度测量方案中,需要将加载棒的形状设计成两端为圆台、中间为圆柱的结构,圆台的母线角度可以根据实际情况自定。

[0083] 本实施例中,所述轴向加载单元主体部分由轴向加载线圈4与轴向加载铁芯6组成,为实时检测加载棒2与轴向加载铁芯6之间相互作用力的大小,在铁芯末端固定连接一个轴向测力传感器5,轴向测力传感器5另一端与轴向加载单元支撑座18连接,轴向加载单元支撑座18相对固定连接于检测平台23上。

[0084] 为支撑轴向加载单元重量,在轴向加载线圈4下方设有支撑滑块17,支撑滑块17与线圈固定连接,支撑滑块17可以相对直线滑轨19滑动,直线滑轨19固定于检测平台23上。

[0085] 本实施例中,所述径向加载单元主体部分由径向加载线圈8与径向加载铁芯10组成,径向加载铁芯10末端设有一个径向测力传感器9,径向测力传感器9另一端与径向加载单元支撑座16连接,径向加载单元支撑座16相对固定连接于检测平台23上,径向加载线圈8下方与支撑滑块17固定连接。

[0086] 本实施例中,所述轴向加载铁芯6与径向加载铁芯10为复合结构,其外部为硅钢,内部嵌入工业纯铁,这种复合结构能使铁芯具有较低的矫顽力和较高的磁通率的优点,保证加载单元对超精密主轴加载的可靠性。

[0087] 本实施例中,所述位移测量模块包括测量加载棒四个点位的位移传感器,分别是第一位移传感器1、第二位移传感器11、第三位移传感器3和第四位移传感器7,以及测量主轴角位移的圆形光栅编码器。

[0088] 本实施例中,在测量主轴动刚度的测量过程中主轴处于旋转状态,为避免位移传感器与加载棒持续摩擦,所述位移传感器为非接触式位移传感器。

[0089] 本实施例中,所述第一位移传感器1、第二位移传感器11、第三位移传感器3和第四位移传感器7通过位移传感器支架20与检测平台23固定连接。其中,第一位移传感器1与第二位移传感器11用于测量加载棒2的截面A上角度差为 $90^\circ$ 的两点位置处的位移,第三位移传感器3与第四位移传感器7用于测量加载棒2的截面B上角度差为 $90^\circ$ 的两点位置处的位移。

[0090] 第一位移传感器1与第二位移传感器11、第三位移传感器3与第四位移传感器7的轴线在位移传感器支架20上的位置相互正交,第一位移传感器1与第三位移传感器3水平指向加载棒2的轴线,第二位移传感器11与第四位移传感器7竖直向下指向加载棒2的轴线。

[0091] 为保证较高的测量精度,要求位移传感器支架20的传感器安装孔有较高的位置精度;四个位移传感器与位移传感器支架20、位移传感器支架20与检测平台23之间需要有较高的安装精度。

[0092] 本实施例中,所述圆形光栅编码器分为圆光栅12和读数头13两部分,圆光栅12安装在加载棒2的内端面,读数头13安装在读数头支架21上,读数头支架21与检测平台23固定连接。为获取更加准确的主轴运动角位置参数,需要保证圆光栅12与主轴轴线有较高的同轴度。

[0093] 本实施例提供的超精密主轴刚度测量装置通过将加载棒2通过刀柄14安装在待测超精密主轴15上,再利用轴向加载单元与径向加载单元分别对加载棒2施加载荷,通过两组位移传感器对加载棒2上两个不同截面上相隔90°的两个检测点进行偏移量的测量,根据测量结果可以分别计算被测超精密主轴在不同工作状态时的轴向刚度、径向刚度和角刚度。加载单元可以通过调节输入信号模拟主轴在不同工作状态下的受载情况,同时,通过更加准确的位移测量和计算方法,可以测算出更加准确的工作刚读数值,具有更高的参考价值。

[0094] 实施例2

[0095] 本发明实施例还提供一种主轴工作刚度的检测方法,该方法基于上述测量装置实现,具体地,该方法包括以下步骤:

[0096] S1,测试前的工作准备:将各工作组件按照相应的精度要求安装到位,同时,需要保证实验环境的温度适宜,如控制温度在 $20^{\circ}\text{C} \pm 0.5^{\circ}$ ,防止温度变化对实验结果造成较大影响;将刀柄14、加载棒2依次安装到被测超精密主轴15上,安装和调节第一位移传感器1,第二位移传感器11,第三位移传感器3,第四位移传感器7与读数头13至要求的位置;控制主轴至匀速转动状态,然后分别控制轴向加载单元与径向加载单元对主轴进行试加载,试加载可以排除实验前传感器的安装误差问题,同时可以根据超精密主轴15的转动情况与轴向测力传感器5和径向测力传感器9的数值变化情况调节加载单元与加载棒2之间的间隙;

[0097] S2,设定并控制超精密主轴15在某一工作转速下匀速转动,待主轴转速稳定后控制轴向加载单元对加载棒2进行加载,设定恒定输入电流,通过上位机记录一定采样频率下轴向测力传感器5、第一位移传感器1、第二位移传感器11、第三位移传感器3和第四位移传感器7的读数 $F_A$ 、 $\delta_{a1}$ 、 $\delta_{a2}$ 、 $\delta_{a3}$ 和 $\delta_{a4}$ 随时间变化的曲线;

[0098] 如图4,根据变形前后的几何关系可以推导主轴轴向变形量的表达式为

$$[0099] \quad \Delta\delta_a(t) = \frac{1}{4 \tan \alpha} [\delta_{a1}(t) + \delta_{a2}(t) - \delta_{a3}(t) - \delta_{a4}(t)] \quad (1)$$

[0100] 其中, $\alpha$ 为加载棒2两端圆台母线与轴心的夹角,此处根据超精密主轴15在受轴向载荷的情况下的变形特点,通过求加载棒2上四个采集点位移数值的平均值的方式,减少偶然性误差出现的可能,增加位移测量结果的准确性;

[0101] 进一步可计算得到,在第*i*次采样时刻,超精密主轴15轴向刚度表达式为

$$[0102] \quad K_a(i) = \frac{F_A(i)}{\Delta\delta_a(i)}, (i = 1, 2, \dots, t f_s) \quad (2)$$

[0103] 其中 $f_s$ 为采样频率, $t$ 为采样时间;

[0104] 计算主轴轴向刚度为

$$[0105] \quad K_a = \frac{1}{t f_s} \sum_{i=1}^{t f_s} K_a(i), (i = 1, 2, \dots, t f_s) \quad (3)$$

[0106] S3,进一步的,按照一定的步距逐步改变轴向加载单元输入电流的大小,从而改变

输入轴向加载力的大小,按照上述S2的方式计算多组不同加载力时的刚度数值;

[0107] S4,设定并控制超精密主轴15在某一工作转速下匀速转动,待超精密主轴15转速稳定后控制径向加载单元对加载棒2进行加载,设定恒定输入电流,通过上位机记录一定采样频率下径向测力传感器9、第一位移传感器1、第二位移传感器11、第三位移传感器3和第四位移传感器7的读数 $F_R$ 、 $\delta_{r1}$ 、 $\delta_{r2}$ 、 $\delta_{r3}$ 和 $\delta_{r4}$ 随时间变化的曲线;

[0108] 如图5,在测量截面A内,有几何约束关系式

$$[0109] \quad \begin{cases} \cos\left(\varphi_A + \frac{\pi}{2}\right) = \frac{\Delta\delta_A^2 + (r_B - \delta_{r1})^2 - r_B^2}{2\Delta\delta_A(r_B - \delta_{r1})} \\ \cos\varphi_A = \frac{r_B^2 + (r_B + \delta_{r2})^2 - \Delta\delta_A^2}{2r_B(r_B + \delta_{r2})} \end{cases} \quad (4)$$

[0110] 其中, $\Delta\delta_A$ 为截面A圆心的位移, $\varphi_A$ 为截面A圆心位移矢量与水平面的夹角, $r_A$ 为截面A的半径;

[0111] 通过式(4)求解得到 $\varphi_A$ 和 $\Delta\delta_A$ ;

[0112] 同样,如图6,在测量截面B内,有几何约束关系式

$$[0113] \quad \begin{cases} \cos\left(\varphi_B + \frac{\pi}{2}\right) = \frac{\Delta\delta_B^2 + (r_B - \delta_{r3})^2 - r_B^2}{2\Delta\delta_B(r_B - \delta_{r3})} \\ \cos\varphi_B = \frac{r_B^2 + (r_B + \delta_{r4})^2 - \Delta\delta_B^2}{2r_B(r_B + \delta_{r4})} \end{cases} \quad (5)$$

[0114] 其中, $\Delta\delta_B$ 为截面B圆心的位移, $\varphi_B$ 为截面B圆心位移矢量与水平面的夹角, $r_B$ 为截面A半径;

[0115] 通过式(5)求解得到 $\varphi_B$ 和 $\Delta\delta_B$ ;

[0116] 如图7,进一步可求得,在第*i*次采样时刻,主轴质心位移 $\Delta\delta_m$ 表达式为

$$[0117] \quad \Delta\delta_m(i) = \Delta\delta_B(i) - \frac{1}{l}[\Delta\delta_B(i) - \Delta\delta_A(i)](l_m + l), (i = 1, 2, \dots, t_f) \quad (6)$$

[0118] 其中 $l_m$ 为主轴15质心到测量截面A的距离, $l_m$ 表征了主轴15的重心位置,需要在开始实验前进行测量, $l$ 为测量截面A到测量截面B的距离;

[0119] 超精密主轴15绕瞬心点的转动角度为

$$[0120] \quad \theta = \arctan\left(\frac{\Delta\delta_B - \Delta\delta_A}{l}\right) \quad (7)$$

[0121] 在第*i*次采样时刻,电磁力 $F_R$ 等效作用于质心点的力 $F_m$ 可表示为

$$[0122] \quad F_m(i) = \frac{\Delta\delta_B(i)l - \frac{1}{2}[\Delta\delta_B(i) - \Delta\delta_A(i)]}{\Delta\delta_B(i)l - (l + l_m)[\Delta\delta_B(i) - \Delta\delta_A(i)]} \cdot F_R(i) \cos\left(\frac{\varphi_A + \varphi_B}{2}\right), (i = 1, 2, \dots, t_f) \quad (8)$$

[0123] 由此可计算得到在第*i*次采样时刻,超精密主轴15径向刚度表达式为

$$[0124] \quad K_r(i) = \frac{F_m(i)}{\Delta\delta_m(i)}, (i = 1, 2, \dots, t_f) \quad (9)$$

[0125] 计算超精密主轴15在该加载力作用下,超精密主轴15的径向刚度表达式为

$$[0126] \quad K_r = \frac{1}{tf_s} \sum_{i=1}^{tf_s} K_r(i), (i=1, 2, \dots, tf_s) \quad (10)$$

[0127] 在第*i*次采样时刻,电磁力 $F_R$ 作用于超精密主轴15的弯矩 $M_R$ 表达式为

$$[0128] \quad M_R(i) = F_R(i) \cos\left(\frac{\varphi_A + \varphi_B}{2}\right) \cdot \left(\frac{\Delta\delta_B l}{\Delta\delta_B - \Delta\delta_A} - \frac{l}{2}\right), (i=1, 2, \dots, tf_s) \quad (11)$$

[0129] 在第*i*次采样时刻,超精密主轴15的角刚度为

$$[0130] \quad K_\theta(i) = \frac{M_R(i)}{\theta(i)}, (i=1, 2, \dots, tf_s) \quad (12)$$

[0131] 计算超精密主轴15在该加载力作用下,超精密主轴15的角刚度表达式为

$$[0132] \quad K_\theta = \frac{1}{tf_s} \sum_{i=1}^{tf_s} K_\theta(i), (i=1, 2, \dots, tf_s) \quad (13);$$

[0133] S5,进一步的,按照一定的步距逐步改变输入电流的大小,从而改变输入径向加载力的大小,按照上述S4的方式计算多组不同加载力时的刚度数值;

[0134] S6,进一步的,通过圆光栅编码器(圆光栅12和读数头13)的主轴转动角度监测和反馈,可以使位移传感器每次采样的点位相同,可以方便进行更加深入的主轴工作刚度分析。

[0135] 通过以上方法测得的超精密主轴的工作刚度(包括轴向刚度、径向刚度和角刚度值),是在超精密主轴模拟真实工作状态下,即对其在旋转状态下施加不同的载荷时进行的,根据力传感器测得的数值大小计算主轴所承受的载荷,再根据加载棒上四个点位测量得到的位移变化量,由几何关系计算主轴的变形量,并且将实验得到的动态计算结果进行平均化处理以降低测量误差,保证测量结果的精确性和准确性,从而提高该方法的参考价值与实际意义。

[0136] 以上所述的具体实施方式,对本发明的目的、技术方案和有益效果进行了进一步详细说明,所应理解的是,以上所述仅为本发明的具体实施方式而已,并不用于限定本发明的保护范围,凡在本发明的精神和原则之内,所做的任何修改、等同替换、改进等,均应包含在本发明的保护范围之内。

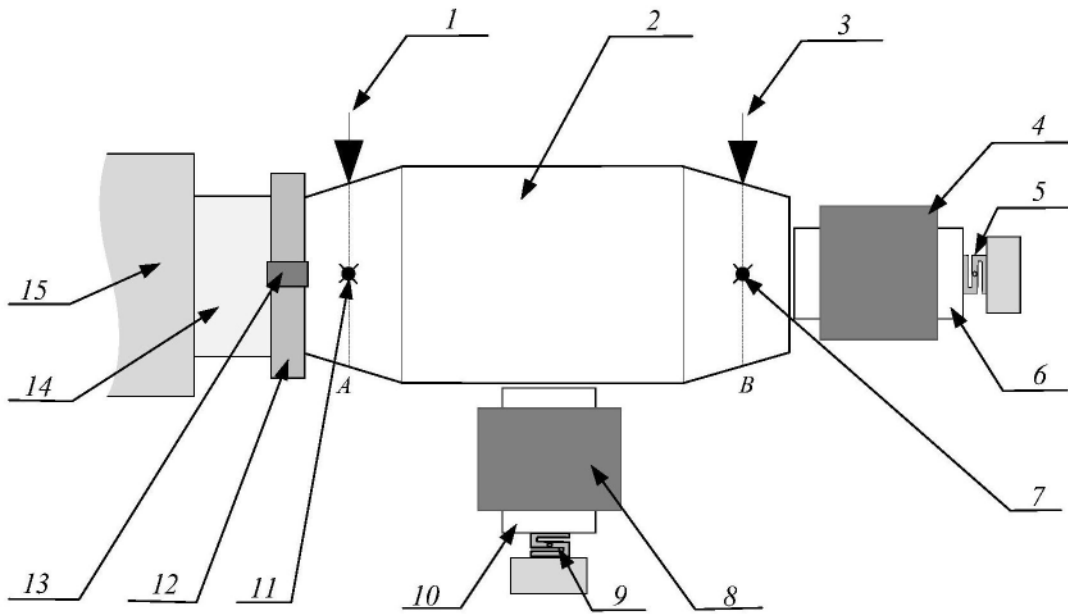


图1

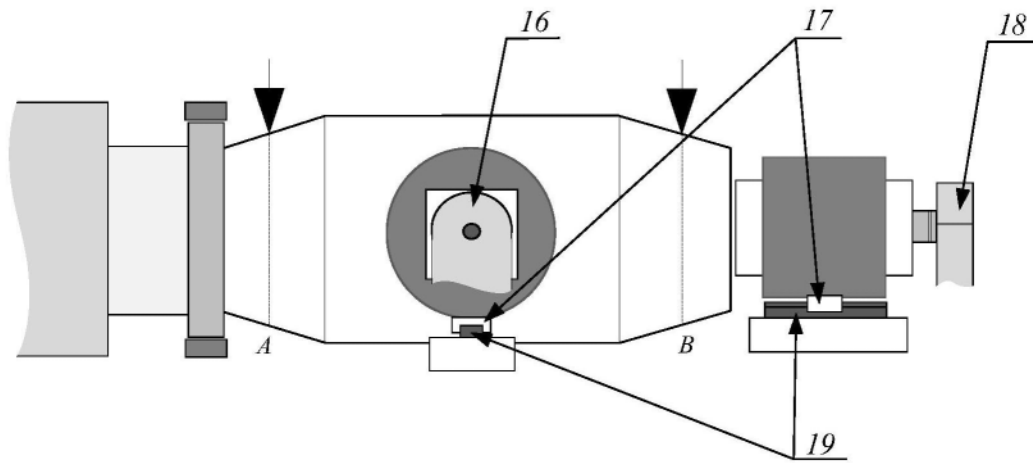


图2

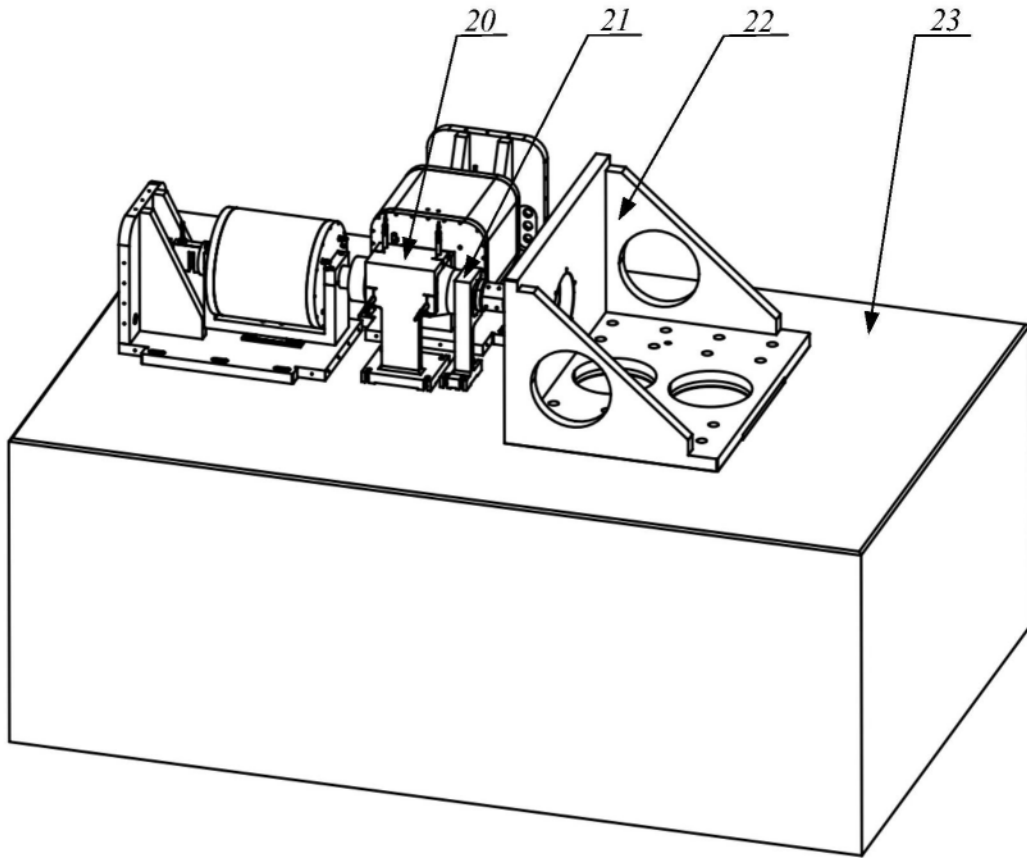
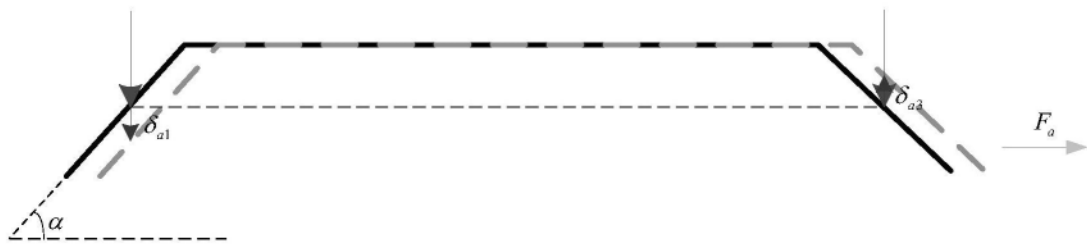


图3



(a) 俯视图



(b) 前视图

图4

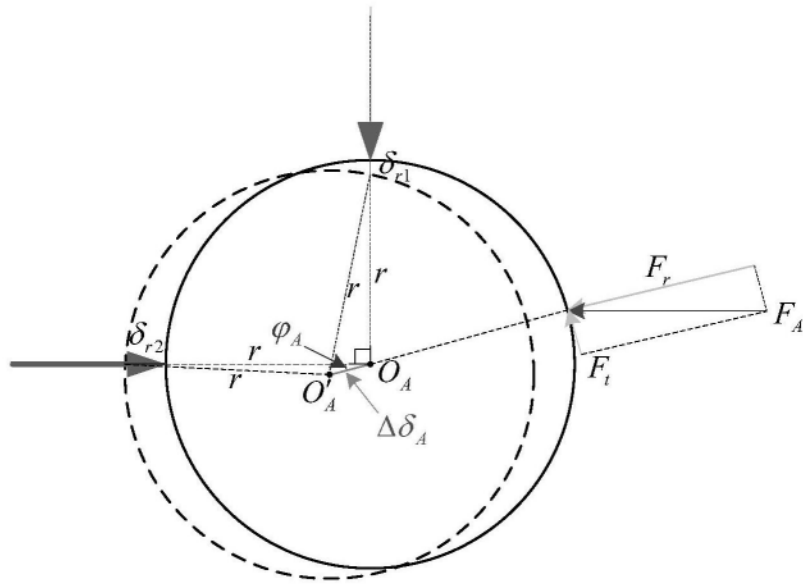


图5

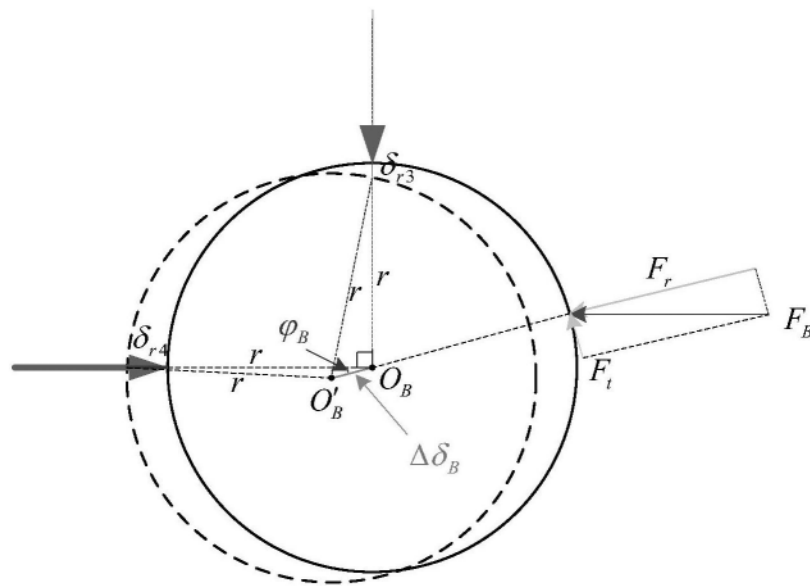


图6

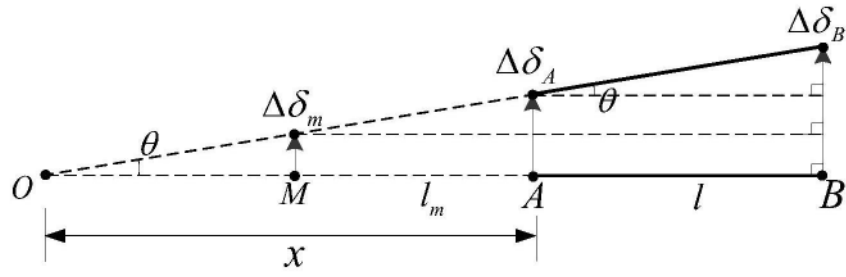


图7