



(12) 发明专利申请

(10) 申请公布号 CN 114166117 A

(43) 申请公布日 2022.03.11

(21) 申请号 202111384447.X

(22) 申请日 2021.11.18

(71) 申请人 杭州电子科技大学

地址 310018 浙江省杭州市下沙高教园区2
号大街

(72) 发明人 王文 吕天硕 孙涛 许凯飞
卢科青 陈占锋 王传勇

(74) 专利代理机构 杭州君度专利代理事务所
(特殊普通合伙) 33240

代理人 陈炜

(51) Int.Cl.

G01B 11/00 (2006.01)

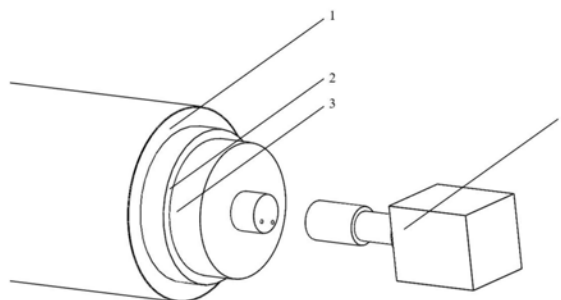
权利要求书2页 说明书5页 附图2页

(54) 发明名称

一种基于机器视觉的主轴径向跳动测量方法

(57) 摘要

本发明公开了一种基于机器视觉的主轴径向跳动测量方法。该方法如下：一、在被测主轴上安装光靶标。二、被测主轴带动靶标上安装的两个发光点旋转，相机记录下发光点的轨迹图像。三、获得两个圆轨迹的圆心位置和最小二乘圆半径。四、获得被测主轴在不同相位的回转误差。本发明不仅能测出主轴的径向跳动范围，还利用测量靶标上两个相互错开90°的光斑旋转形成的圆轨迹，计算出被测主轴在周转中处于任意相位时的横向与纵向跳动，实现了对被测主轴转动过程中径向跳动的精准测量；此外，本发明舍弃了常用主轴径向跳动测量装置所使用的标准棒，从而避免了常用测量方法所需要的繁杂的误差分离计算。



1. 一种基于机器视觉的主轴径向跳动测量方法,其特征在于:步骤一、在被测主轴上安装测量靶标;测量靶标上设置有偏离被测主轴轴线的两个光靶标点;两个光靶标点 to 被测主轴轴线的距离不相等;两个光靶标点在被测主轴上成 90° 圆心角;设置能够拍摄到两个光靶标点随主轴旋转的完整轨迹的相机;

步骤二、被测主轴带动两个光靶标点旋转,相机记录下两个光靶标点的轨迹图像;根据轨迹图像建立两个圆轨迹的点数据集;

步骤三、根据两个圆轨迹的点数据集,获得两个圆轨迹的圆心位置,以及两个圆轨迹的最小二乘圆半径 R_{01} 、 R_{02} ;

步骤四、获得被测主轴在不同相位 φ 的运动误差 $[\Delta X(\varphi), \Delta Y(\varphi)]$ 如下:

$$\theta_1 = \theta_2 + 90^\circ$$

$$\varphi_1 = \varphi + \theta_1$$

$$\varphi_2 = \varphi + \theta_2 + 90^\circ$$

$$\Delta R_1(\varphi_1) = R_1(\varphi_1) - R_{01}$$

$$\Delta R_2(\varphi_2) = R_2(\varphi_2) - R_{02}$$

$$\Delta X(\varphi) = \Delta R_1(\varphi_1) \cos \varphi_1 + \Delta R_2(\varphi_2) \cos \varphi_2$$

$$\Delta Y(\varphi) = \Delta R_1(\varphi_1) \sin \varphi_1 + \Delta R_2(\varphi_2) \sin \varphi_2$$

其中, θ_1 、 θ_2 分别为两个光靶标点相对于被测主轴零相位的相位差; $\Delta X(\varphi)$ 、 $\Delta Y(\varphi)$ 分别为被测主轴处于相位 φ 时被测主轴的横向跳动、纵向跳动; $R_1(\varphi_1)$ 、 $R_2(\varphi_2)$ 分别为被测主轴处于相位 φ 时两个光靶标点投射在圆轨迹上的位置到圆心的距离。

2. 根据权利要求1所述的一种基于机器视觉的主轴径向跳动测量方法,其特征在于:步骤二中,在主轴不同转速下,均记录光靶标点回转一周的轨迹图像,从而在步骤四中获得主轴在不同转速下的运动误差。

3. 根据权利要求1所述的一种基于机器视觉的主轴径向跳动测量方法,其特征在于:步骤二中所获得的轨迹图像经过包括图像增强,边界提取,腐蚀,中心线提取在内的图像处理运算。

4. 根据权利要求1所述的一种基于机器视觉的主轴径向跳动测量方法,其特征在于:步骤三中,还分别求解两个圆轨迹的圆度误差;根据圆轨迹点数据集计算圆度误差的过程如下:将被求取的圆轨迹点数据集定义为 $P(X_i, Y_i)$, $i=1, 2, \dots, n$; n 为被求取的圆轨迹上的数据点数量;

3-1. 首先建立目标函数 $M(a, b, c)$ 如下:

$$M(a, b, c) = \sum_{i=1}^n (x_i^2 + y_i^2 + ax_i + by_i + c)^2$$

其中, a 、 b 、 c 为目标函数的三个待定参数; x_i 、 y_i 分别为圆轨迹点数据集 P 中的第 i 个数据点的X轴坐标、Y轴坐标;

对目标函数 $M(a, b, c)$ 求偏导,并令其偏导取0,得到方程式如下:

$$\begin{bmatrix} \sum_{i=1}^n x_i^3 + \sum_{i=1}^n x_i y_i^2 \\ \sum_{i=1}^n x_i^2 y_i + \sum_{i=1}^n y_i^3 \\ \sum_{i=1}^n x_i^2 + \sum_{i=1}^n y_i^2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \sum_{i=1}^n x_i^2 & \sum_{i=1}^n x_i y_i & \sum_{i=1}^n x_i \\ \sum_{i=1}^n x_i y_i & \sum_{i=1}^n y_i^2 & \sum_{i=1}^n y_i \\ \sum_{i=1}^n x_i & \sum_{i=1}^n y_i & n \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a \\ b \\ c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

求解得到参数a、b、c；

3-2. 计算最小二乘圆的圆心坐标 (X_0, Y_0) ，最小二乘圆半径 R_0 如下：

$$X_0 = -0.5a,$$

$$Y_0 = -0.5b,$$

$$R_0 = 0.5 \times \sqrt{a^2 + b^2 - 4c}$$

3-3. 计算光斑轨迹数据集P中各个数据点到参考圆圆心O的距离 R_i 如下：

$$R_i = \sqrt{(x_i - X_0)^2 + (y_i - Y_0)^2}$$

3-4. 计算主轴径向跳动峰值 E_{peak} 和谷值 E_{valley} ；

$$E_{\text{peak}} = \max(E_i)$$

$$E_{\text{valley}} = \min(E_i)$$

其中, $E_i = R_i - R_0, i = 1, 2, \dots, n$ ；

3-5. 计算主轴的径向跳动圆度误差 $E_{\text{round}} = E_{\text{peak}} - E_{\text{valley}}$ 。

5. 根据权利要求1、2、3或4所述的一种基于机器视觉的主轴径向跳动测量方法，其特征在于：所述的测量靶标同轴安装在被测主轴上。

6. 根据权利要求1、2、3或4所述的一种基于机器视觉的主轴径向跳动测量方法，其特征在于：步骤二中，相机的曝光时间设置为等于被测主轴的转动周期。

7. 根据权利要求1、2、3或4所述的一种基于机器视觉的主轴径向跳动测量方法，其特征在于：采用的测量装置包括测量靶标(3)和工业相机(4)；测量靶标(3)上偏心设置有两个光斑安装点；两个光斑安装点到测量靶标(3)的中心轴线的距离不相同；两个光斑安装点与测量靶标(3)中心点的连线夹角为 90° ；两个光斑安装点上均安装有发光元器件；工业相机(4)朝向测量靶标(3)，且能够检测到测量靶标(3)转动时的光斑轨迹。

8. 根据权利要求7所述的一种基于机器视觉的主轴径向跳动测量方法，其特征在于：所述的光斑安装点为直径小于50微米的孔洞。

一种基于机器视觉的主轴径向跳动测量方法

技术领域

[0001] 本发明属于精密测量技术领域,具体涉及一种使用机器视觉测量主轴径向跳动的方法及装置。

背景技术

[0002] 机械工业装备的水平和质量,直接影响国民经济各部门生产技术水平 and 经济效益。近代工业发展迅速,各科技领域的进步都需要制造业支持。精密机床是加工精密零件的必要条件,精密主轴是精密机床的核心部件。有实验研究表明:主轴回转误差对精密机床加工精度的影响占30%至70%,并且机床精度等级越高,主轴回转误差占总误差比例就越大。以单点金刚石车床为例,主轴的径向跳动会直接影响零件的加工精度。所以很有必要对主轴的径向跳动进行检测,甚至根据测量数据对主轴的回转误差进行补偿,以实现更高的加工精度。

[0003] 国内外学者提出了一些方法来测量主轴的径向跳动。这些方法往往使用电容式位移传感器或电涡流位移传感器,且需要安放标准棒在主轴端面上,引入了偏心误差和圆度误差,降低了测量精度,增加了测量系统的复杂性。基于电容式位移传感器的测量系统组成元件较多,信号微弱易受干扰,且对安装精度要求较高。

发明内容

[0004] 本发明的目的在于提供一种基于机器视觉的主轴径向跳动测量方法。该方法在主轴端面上安装光靶标,并在主轴外设置工业相机。通过工业相机对旋转的光靶标进行拍摄从而记录下靶标的运动轨迹,根据光靶标运动轨迹计算主轴的径向跳动。本方法不使用标准棒,避免了偏心误差和圆度误差分离环节。本发明与现有基于机器视觉的主轴径向跳动测量方法的不同点在于一本发明通过设置两个光靶标点实现了在主轴一转中任意相位角处的径向跳动在X和Y方向上的解耦测量。

[0005] 该基于机器视觉的主轴径向跳动测量方法的具体步骤如下:

[0006] 步骤一、在被测主轴上安装测量靶标;测量靶标上设置有偏离被测主轴轴线的两个光靶标点。两个光靶标点到被测主轴轴线的距离不相等。两个光靶标点在被测主轴上成 90° 圆心角。设置能够拍摄到光靶标点发光后随主轴旋转完整轨迹的相机。

[0007] 步骤二、被测主轴带动两个光靶标点旋转,相机记录下两个光靶标点的轨迹图像。根据轨迹图像建立两个圆轨迹的点数据集。

[0008] 步骤三、根据两个圆轨迹的点数据集,获得两个圆轨迹的圆心位置,以及两个圆轨迹的最小二乘圆半径 R_{01} 、 R_{02} 。

[0009] 步骤四、获得被测主轴在不同相位 φ 的运动误差 $[\Delta X(\varphi), \Delta Y(\varphi)]$ 如下:

[0010] $\theta_1 = \theta_2 + 90^\circ$

[0011] $\varphi_1 = \varphi + \theta_1$

$$[0012] \quad \varphi_2 = \varphi + \theta_2 + 90^\circ$$

$$[0013] \quad \Delta R_1(\varphi_1) = R_1(\varphi_1) - R_{O1}$$

$$[0014] \quad \Delta R_2(\varphi_2) = R_2(\varphi_2) - R_{O2}$$

$$[0015] \quad \Delta X(\varphi) = \Delta R_1(\varphi_1) \cos \varphi_1 + \Delta R_2(\varphi_2) \cos \varphi_2$$

$$[0016] \quad \Delta Y(\varphi) = \Delta R_1(\varphi_1) \sin \varphi_1 + \Delta R_2(\varphi_2) \sin \varphi_2$$

[0017] 其中, θ_1 、 θ_2 分别为两个光靶标点相对于被测主轴零相位的相位差。 $\Delta X(\varphi)$ 、 $\Delta Y(\varphi)$ 分别为被测主轴处于相位 φ 时被测主轴的横向跳动、纵向跳动。 $R_1(\varphi_1)$ 、 $R_2(\varphi_2)$ 分别为被测主轴处于相位 φ 时两个光靶标点投射在圆轨迹上的位置到圆心的距离。

[0018] 作为优选,步骤二中,在主轴不同转速下,均记录光靶标点回转一周的轨迹图像,从而在步骤四中获得主轴在不同转速下的运动误差。

[0019] 作为优选,步骤二中所得的轨迹图像经过包括图像增强、边界提取、腐蚀、中心线提取在内的图像处理运算。

[0020] 作为优选,步骤三中,还分别求解两个圆轨迹的圆度误差;根据圆轨迹点数据集计算圆度误差的过程如下:将被求取的圆轨迹点数据集定义为 $P(X_i, Y_i)$, $i=1, 2, \dots, n$; n 为被求取的圆轨迹上的数据点数量。

[0021] 3-1. 首先建立目标函数 $M(a, b, c)$ 如下:

$$[0022] \quad M(a, b, c) = \sum_{i=1}^n (x_i^2 + y_i^2 + ax_i + by_i + c)^2$$

[0023] 其中, a 、 b 、 c 为目标函数的三个待定参数。 x_i 、 y_i 分别为圆轨迹点数据集 P 中的第 i 个数据点的 X 轴坐标、 Y 轴坐标。

[0024] 对目标函数 $M(a, b, c)$ 求偏导,并令其偏导取 0, 得到方程式如下:

$$[0025] \quad \begin{bmatrix} \sum_{i=1}^n x_i^3 + \sum_{i=1}^n x_i y_i^2 \\ \sum_{i=1}^n x_i^2 y_i + \sum_{i=1}^n y_i^3 \\ \sum_{i=1}^n x_i^2 + \sum_{i=1}^n y_i^2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \sum_{i=1}^n x_i^2 & \sum_{i=1}^n x_i y_i & \sum_{i=1}^n x_i \\ \sum_{i=1}^n x_i y_i & \sum_{i=1}^n y_i^2 & \sum_{i=1}^n y_i \\ \sum_{i=1}^n x_i & \sum_{i=1}^n y_i & n \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a \\ b \\ c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

[0026] 求解得到参数 a 、 b 、 c 。

[0027] 3-2. 计算最小二乘圆的圆心坐标 (X_0, Y_0) , 最小二乘圆半径 R_0 如下:

$$[0028] \quad X_0 = -0.5a,$$

$$[0029] \quad Y_0 = -0.5b,$$

$$[0030] \quad R_0 = 0.5 \times \sqrt{a^2 + b^2 - 4c}$$

[0031] 3-3. 计算光斑轨迹数据集 P 中各个数据点到参考圆圆心 O 的距离 R_i 如下:

$$[0032] \quad R_i = \sqrt{(x_i - X_0)^2 + (y_i - Y_0)^2}$$

[0033] 3-4. 计算主轴径向跳动峰值 E_{peak} 和谷值 E_{valley} 。

[0034] $E_{\text{peak}} = \max(E_i)$

[0035] $E_{\text{valley}} = \min(E_i)$

[0036] 其中, $E_i = R_i - R_0, i = 1, 2, \dots, n$;

[0037] 3-5. 计算主轴的圆度误差 $E_{\text{round}} = E_{\text{peak}} - E_{\text{valley}}$ 。

[0038] 作为优选, 所述的测量靶标同轴安装在被测主轴上。

[0039] 作为优选, 步骤二中, 相机的曝光时间设置为等于被测主轴的转动周期。

[0040] 作为优选, 该基于机器视觉的主轴径向跳动测量方法, 采用的测量装置包括测量靶标 (3) 和工业相机 (4)。测量靶标 (3) 上偏心设置有两个光斑安装点。两个光斑安装点到测量靶标 (3) 的中心轴线的距离不相同。两个光斑安装点与测量靶标 (3) 中心点的连线夹角为 90° 。两个光斑安装点上均安装有发光元器件。工业相机 (4) 朝向测量靶标 (3), 且能够检测到测量靶标 (3) 转动时的光斑轨迹。

[0041] 作为优选, 所述的光斑安装点为直径小于50微米的孔洞。

[0042] 本发明具有的有益效果:

[0043] 1、本发明能测出被测主轴的径向跳动范围, 并评估主轴的回转精度。

[0044] 2、本发明利用测量靶标上的两个相互错开 90° 的光斑旋转形成的两条圆轨迹, 计算出被测主轴在周转中处于任意相位时的X方向与Y方向的跳动, 实现了对被测主轴转动过程中误差的精准分析。

[0045] 3、本发明舍弃了现有主轴径向跳动测量装置所使用的标准棒, 省去了偏心误差分离和圆度误差分离技术环节, 提高了测量效率。

附图说明

[0046] 图1是本发明采用的测量装置的整体结构示意图;

[0047] 图2是本发明中光靶标的结构示意图;

[0048] 图3是本发明的回转误差解算原理图。

具体实施方式

[0049] 以下结合附图对本发明进行进一步说明。

[0050] 实施例1

[0051] 如图1、2和3所示, 一种基于机器视觉的主轴径向跳动测量方法, 采用的测量装置包括测量靶标3和工业相机4。进行测量时, 测量靶标3同轴固定在被测量主轴1的主轴端面2。主轴1能够在动力元件的驱动下旋转。测量靶标3上设置有两个光斑安装点。光斑安装点为直径小于50微米的孔洞。

[0052] 两个光斑安装点上均安装有发光元器件。发光元器件采用LED或LD光源。两个光斑安装点均相对于测量靶标3的中心轴线偏心设置; 两个光斑安装点到测量靶标3的中心轴线的距离不相同, 以保证两针孔映射在相机传感器上的轨迹可以清晰分辨。两个光斑安装点与测量靶标3中心点的连线夹角为 90° 。工业相机4朝向测量靶标3。工业相机4的位置能够任意调节; 工业相机4能够检测到测量靶标3上的光斑, 且使光斑轨迹充满相机视野。

[0053] 当主轴1转动时, 测量靶标3随主轴端面2进行圆周运动, 测量靶标3上的光斑点划出圆形轨迹。根据工业相机4检测到的测量靶标3上光斑的轨迹即可分离得到主轴1的径向

跳动。所述测量靶标3光斑直径应尽量小,例如光斑直径为20 μm 。工业相机的4的感光元器件像素数应尽量多,例如5000*5000。

[0054] 测量靶标3采用精密车削加工。光斑安装点采用MEMS工艺加工得到。光斑安装点的加工偏心距设计根据相机的像素数和镜头放大倍数设计,偏心距根据视野大小取值,一般设置为亚毫米级或毫米级,本实施例中设计为亚毫米级。

[0055] 该基于机器视觉的主轴径向跳动测量方法,具体步骤如下:

[0056] 步骤一、在主轴的端面上同轴安装测量靶标,具体使用轴对中装置安装,或者在初步安装测量靶标后缓慢转动主轴用千分表和橡胶棒配合通过敲击反复调整测量靶标轴的位置,使得测量靶标与主轴轴线的偏心误差在3 μm 以下。调整工业相机4的位置,使相机光学轴心和主轴轴心尽可能同轴。之后,调整镜头距离测量靶标的距离使光靶标点成像清晰。之后点亮两个光靶标点,并驱动主轴旋转,调整相机快门使相机快门时间与主轴旋转一周的时间相同。之后逐步提高主轴的转速,相机同步进行拍摄,由此分别得到主轴在不同转速下的光靶标点划出的轨迹图像。轨迹图像上具有两个光斑分别画出的两条圆轨迹。

[0057] 步骤二、得到了在主轴不同转速下光靶标点的轨迹图像之后,对轨迹图像进行处理。经过包括图像增强,边界提取,腐蚀,中心线提取在内的图像处理运算之后,得到了预处理后的轨迹图像。预处理后的轨迹图像上的两圈圆轨迹的像素点数量分别为 n_1 和 n_2 ,建立第一个圆轨迹的点数据集为 $P1(X_{1i}, Y_{1i}), i=1, 2, \dots, n_1$;第二个圆轨迹的点数据集为 $P2(X_{2j}, Y_{2j}), j=1, 2, \dots, n_2$ 。

[0058] 步骤三、求解两个圆轨迹的圆度误差(此处的圆度误差和标准棒圆度误差的概念不同,此处的圆度误差指的是圆轨迹与正圆的偏离程度,体现的是主轴径向跳动运动的范围),两圈圆轨迹求取圆度误差的过程同理;将被求取的圆轨迹点数据集定义为 $P(X_i, Y_i), i=1, 2, \dots, n$;n为被求取的圆轨迹上的像素点数量。以下通过公式解释求取过程:

[0059] 3-1. 首先建立目标函数 $M(a, b, c)$ 如下:

$$[0060] \quad M(a, b, c) = \sum_{i=1}^n (x_i^2 + y_i^2 + ax_i + by_i + c)^2$$

[0061] 其中,a、b、c为目标函数的三个待定参数。 x_i 、 y_i 分别为圆轨迹点数据集P中的第i个数据点的X轴坐标、Y轴坐标;

[0062] 对目标函数 $M(a, b, c)$ 求偏导,并令其偏导取0,得到方程式如下:

$$[0063] \quad \begin{bmatrix} \sum_{i=1}^n x_i^3 + \sum_{i=1}^n x_i y_i^2 \\ \sum_{i=1}^n x_i^2 y_i + \sum_{i=1}^n y_i^3 \\ \sum_{i=1}^n x_i^2 + \sum_{i=1}^n y_i^2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \sum_{i=1}^n x_i^2 & \sum_{i=1}^n x_i y_i & \sum_{i=1}^n x_i \\ \sum_{i=1}^n x_i y_i & \sum_{i=1}^n y_i^2 & \sum_{i=1}^n y_i \\ \sum_{i=1}^n x_i & \sum_{i=1}^n y_i & n \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a \\ b \\ c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

[0064] 求解得到参数a、b、c。

[0065] 3-2. 计算最小二乘圆的圆心坐标 (X_0, Y_0) ,最小二乘圆半径 R_0 如下:

$$[0066] \quad X_0 = -0.5a,$$

$$[0067] \quad Y_0 = -0.5b,$$

$$[0068] \quad R_0 = 0.5 \times \sqrt{a^2 + b^2 - 4c}$$

[0069] 3-3. 计算光斑轨迹数据集P中各个数据点到参考圆圆心O的距离 R_i 如下:

$$[0070] \quad R_i = \sqrt{(x_i - X_0)^2 + (y_i - Y_0)^2}$$

[0071] 3-4. 计算主轴径向跳动峰值 E_{peak} 和谷值 E_{valley} 。

$$[0072] \quad E_{\text{peak}} = \max(E_i)$$

$$[0073] \quad E_{\text{valley}} = \min(E_i)$$

[0074] 其中, $E_i = R_i - R_0, i = 1, 2, \dots, n$;

[0075] 3-5. 计算主轴的圆度误差 $E_{\text{round}} = E_{\text{peak}} - E_{\text{valley}}$ 。

[0076] 步骤四、不同于标准棒的圆度误差, 步骤三中获得的圆度误差 E_{round} 用来评价主轴径向误差的大小。此时求取的圆度误差只能描述主轴径向跳动的大小, 或者说是描述径向跳动的范围。求解主轴转动过程中每个相位角的回转误差的大小和方向, 就需要将两个圆轨迹联合求解, 过程如下:

[0077] 通过上一过程我们解得了两个圆轨迹的最小二乘圆圆心, 理论上两个圆心重合, 记为O。同时解得了两个圆轨迹的最小二乘圆半径 R_{01}, R_{02} 。主轴转动至任意位置的相位角记为 φ ; 每个相位角 φ 均对应两个圆轨迹上光斑位置到参考圆圆心O的距离 $R_1(\varphi)$ 、 $R_2(\varphi)$ 。两个光斑相对于主轴零相位的相位差分别记为 θ_1, θ_2 。 $\theta_1 = \theta_2 + 90^\circ$ 。

[0078] 由此, 我们可以解算出主轴在正交坐标系X-Y上的运动误差: $[\Delta X(\varphi), \Delta Y(\varphi)]$

$$[0079] \quad \theta_1 = \theta_2 + 90^\circ$$

$$[0080] \quad \varphi_1 = \varphi + \theta_1$$

$$[0081] \quad \varphi_2 = \varphi + \theta_2 + 90^\circ$$

$$[0082] \quad \Delta R_1(\varphi_1) = R_1(\varphi_1) - R_{01}$$

$$[0083] \quad \Delta R_2(\varphi_2) = R_2(\varphi_2) - R_{02}$$

$$[0084] \quad \Delta X(\varphi) = \Delta R_1(\varphi_1) \cos \varphi_1 + \Delta R_2(\varphi_2) \cos \varphi_2$$

$$[0085] \quad \Delta Y(\varphi) = \Delta R_1(\varphi_1) \sin \varphi_1 + \Delta R_2(\varphi_2) \sin \varphi_2$$

[0086] 其中, φ_1 、 φ_2 分别为两个光靶标点在被测主轴处于相位 φ 时, 相对于正交坐标系X的角度; $\Delta R_1(\varphi_1)$ 、 $\Delta R_2(\varphi_2)$ 分别为两个光靶标点在被测主轴处于相位 φ 时, 相对于自身对应的标准圆轨迹的偏移量。被测主轴的相位 φ 即为其初始位置相对于正交坐标系X轴的夹角。

[0087] 由此得到了主轴在 φ 相位下的横向跳动 $\Delta X(\varphi)$ 和纵向跳动 $\Delta Y(\varphi)$, 由此实现主轴转动至不同位置下回转误差的测量。由此我们可以解算出主轴在转动至不同相位角时, 主轴在某一特定方向上的回转误差。此项数据在车削时尤其重要, 因为车削的刀具是沿着主轴径向的某一特定方向进给的。例如刀具沿着X轴的正方向进给运动。此外例如在铣削时我们想评估铣槽在刀路法向上的误差, 那我们就需要解出主轴在刀路法向上的回转误差。

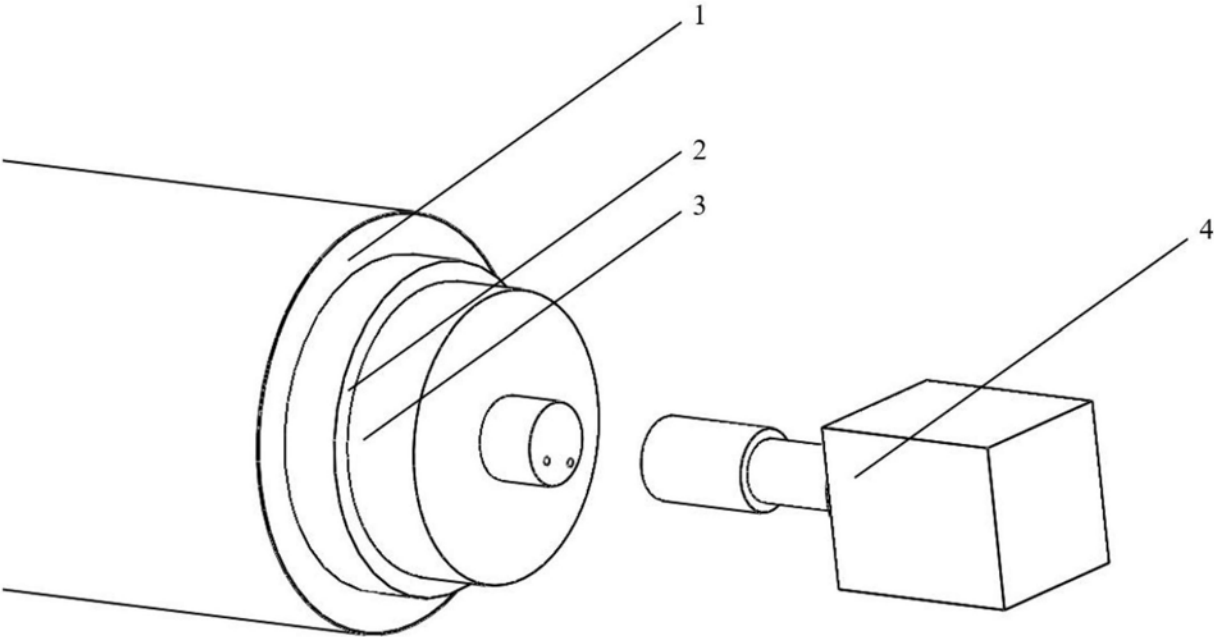


图1

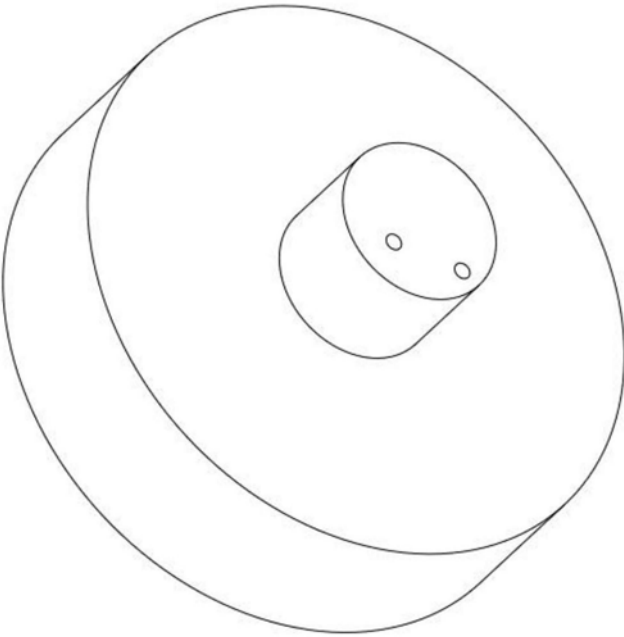


图2

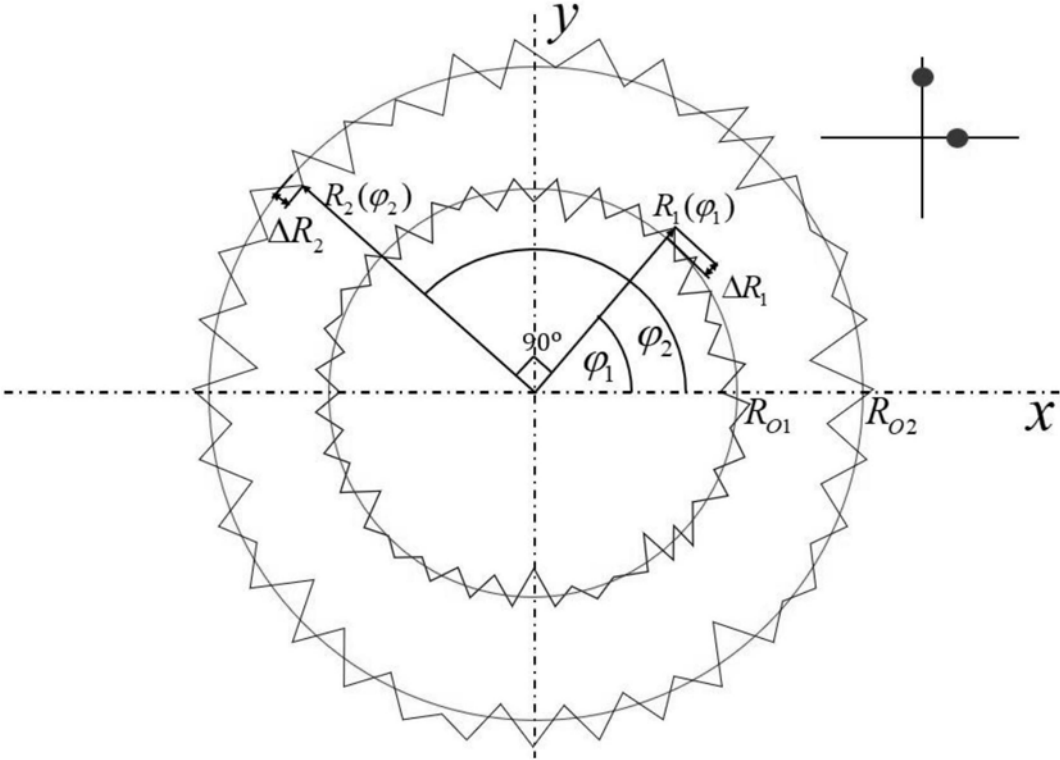


图3