



# (12) 发明专利申请

(10) 申请公布号 CN 115077458 A

(43) 申请公布日 2022. 09. 20

(21) 申请号 202210670591.8

G06F 17/14 (2006.01)

(22) 申请日 2022.06.14

G06F 17/16 (2006.01)

G06F 30/20 (2020.01)

(71) 申请人 吉林大学

地址 130025 吉林省长春市前进大街2699号

(72) 发明人 裴永臣 辛清源 刘建尧 张贺龙  
王斌 罗梦演

(74) 专利代理机构 深圳众邦专利代理有限公司  
44545

专利代理师 李茂松

(51) Int. Cl.

G01B 21/20 (2006.01)

G01B 21/24 (2006.01)

G01B 21/32 (2006.01)

G06F 17/10 (2006.01)

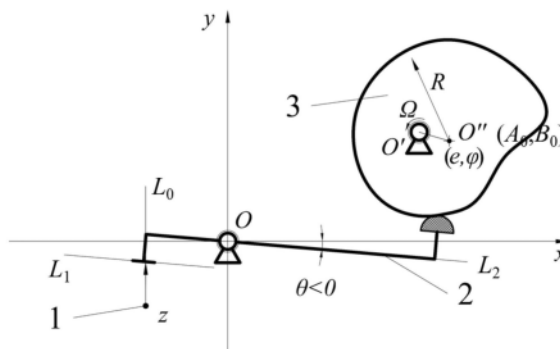
权利要求书3页 说明书7页 附图4页

## (54) 发明名称

回转零件截面弯曲偏心的杠杆球式通用精密测量方法

## (57) 摘要

回转零件截面弯曲偏心的杠杆球式通用精密测量方法属于回转零件截面弯曲偏心检测领域,由测量参数预处理模型和实测数据处理模型两部分组成。首先,将杠杆球式测量机构的结构尺寸和被测截面标准轮廓信息输入参数预处理模型,计算测量机构的杠杆比;进行无偏心工件的回转测量过程仿真,获得形状项参量的傅里叶系数矩阵。之后,将被测截面的实测信号代入实测数据处理模型,求取被测截面初始解的估计值;采用循环迭代方式,获得被测截面偏心的精确解。通过设置测量机构的结构尺寸,本方法可拟合计算任意形状、任意尺寸回转工件的偏心量、偏心角和初始姿态角,本方法应用领域广,通用性强,检测效率高,适宜大范围推广应用。



1. 回转零件截面弯曲偏心的杠杆球式通用精密测量方法, 其主要包括测量参数预处理和实测数据处理两部分, 其中测量参数预处理包括杠杆比求解模型和无偏心零件回转测量模型, 实测数据处理包括测试信号成分分析模型和循环迭代模型。具体操作步骤为:

(1) 根据采集设备的调试及运行状况, 准确获取杠杆球式测量机构2的基本结构尺寸C、r、D、E、s及零件回转中心O的坐标(A, B);

(2) 将参数A、B、C、D、E、r、s输入杠杆比求解模型, 计算杠杆球式测量机构2的杠杆比 $K_b$ ;

(3) 根据被测零件(3)的轮廓函数表达式或实测数据, 计算被测截面在无偏心时的标准轮廓数据 $(x_p, y_p)$ ;

(4) 将标准轮廓数据 $(x_p, y_p)$ 带入无偏心零件的回转测量模型, 模拟仿真无偏心零件的回转测量过程, 获得仿真测试信号z并计算形状项参量的傅里叶系数矩阵A; 至此, 测量参数预处理完成;

(5) 利用带有杠杆球式测量机构2的测量设备获取被测截面的实测信号Z;

(6) 将实测信号Z输入到测试信号成分分析模型, 计算被测截面初始解的估计值 $\hat{\beta}_0$ ,  $\hat{e}$ ,  $\hat{\varphi}_0$ ;

(7) 将估计值 $\hat{\beta}_0$ ,  $\hat{e}$ ,  $\hat{\varphi}_0$ 代入循环迭代模型, 采用循环迭代方式, 对 $\beta_0$ , e,  $\varphi_0$ 进行迭代求解, 循环收敛后获得精确解。

其中, 步骤(2)、步骤(4)分别对应测量参数预处理的杠杆比求解模型和无偏心零件回转测量模型, 步骤(6)、步骤(7)分别对应实测数据处理的测试信号成分分析模型和循环迭代模型。

2. 根据权利要求1所述的回转零件截面弯曲偏心的杠杆球式通用精密测量方法, 其特征在于: 步骤(2)中杠杆比求解模型建立和杠杆比 $K_b$ 的求解过程如下所述:

设 $K_b$ 为杠杆球式测量机构2的杠杆比, 其可实现传感器示数z与偏心量间的折算,  $K_b$ 可通过在 $R_m$ 上施加小扰动 $\varepsilon$ 求取, 传感器示数值信号z及杠杆测量倾角 $\theta$ 估计值可表示为

$$z_\varepsilon(\varepsilon) = C - r \tan(\theta_\varepsilon) - C / \tan(\theta_\varepsilon) \quad (10)$$

$$\theta_\varepsilon = \arctan\left(\frac{B}{A}\right) - \arccos\left(\frac{A^2 + B^2 + D^2 + E^2 - (s + R_m + \varepsilon)^2}{2\sqrt{D^2 + E^2}\sqrt{A^2 + B^2}}\right) - \arctan\left(\frac{E}{D}\right) \quad (11)$$

将(11)带入(10)中, 并对(10)求关于 $\varepsilon$ 的偏导, 化简后可得

$$K_b = (dz_\varepsilon / d\varepsilon)|_{\varepsilon=0} = [(dz_\varepsilon / d\theta_\varepsilon)|_{\varepsilon=0}]^{-1} \\ = \frac{\sqrt{A(A^2 + B^2)(E^2 + D^2) - [(A^2 + B^2) + (E^2 + D^2) - (s + R_m)^2]^2}}{2(s + R_m)[r \sec(\theta_m) + C \tan(\theta_m)] \sec(\theta_m)} \quad (12)$$

3. 根据权利要求1所述的回转零件截面弯曲偏心的杠杆球式通用精密测量方法, 其特征在于: 步骤(4)中无偏心零件的回转测量模型建立、仿真测试信号z获取及形状项参量的傅里叶系数矩阵A的求取过程如下所述:

当零件回转过程中无偏心时, 获得的信号全部来自零件自身形状引起的信号波动, 其反映了零件的形状项参量。无偏心 $e=0$ , 无姿态初始相位角 $\beta_0=0$ , 测量过程仿真测试信号z随转角 $\varphi$ 的变化关系为

$$z(\varphi) = \sum_{k=0} [a_k \cos(k\varphi) + b_k \sin(k\varphi)] \quad (13)$$

对其进行Fourier级数展开可得

$$z(\varphi) = \Phi(\varphi)A \quad (14)$$

其中,

$$\Phi(\varphi) = [1, \cos(\varphi), \sin(\varphi), \cos(2\varphi), \sin(2\varphi), \dots, \cos(k\varphi), \sin(k\varphi), \dots],$$

$$A = [a_0, a_1, b_1, a_2, b_2, \dots, a_k, b_k, \dots]^T.$$

同时,形状项参量的傅里叶系数矩阵A可以表示为

$$A = [\Phi^T(\varphi)\Phi(\varphi)]^{-1}\Phi^T(\varphi)z(\varphi) \quad (15)$$

4. 根据权利要求1所述的回转零件截面弯曲偏心的杠杆球式通用精密测量方法,其特征在于:步骤(6)中截面存在回转偏心的测试信号成分分析模型建立及被测截面初始解估计值 $\hat{\beta}_0$ ,  $\hat{e}$ ,  $\hat{\varphi}_0$ 求取过程如下所述:

在被测截面存在小偏心量e的情况下,测量信号特征可以近似分解为形状项与偏心项的叠加,

$$z(\varphi, \beta_0, e, \varphi_0) \approx f(\varphi, \beta_0) + [x_e \sin(\varphi) + y_e \cos(\varphi) + z_0] \quad (16)$$

对形状项与偏心项分别进行Fourier展开可得

形状项:

$$\begin{aligned} f(\varphi, \beta_0) &= \sum_{k=0} \{a_k \cos(k(\varphi + \beta_0)) + b_k \sin(k(\varphi + \beta_0))\} \\ &= \sum_{k=0} \left\{ \begin{aligned} &[a_k \cos(k\beta_0) + b_k \sin(k\beta_0)] \cos(k\varphi) + \\ &[-a_k \sin(k\beta_0) + b_k \cos(k\beta_0)] \sin(k\varphi) \end{aligned} \right\} \\ &= \Phi(\varphi)\Psi(\beta_0)A \end{aligned} \quad (17)$$

其中,

$$\Psi(\beta_0) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ 0 & \cos(\beta_0) & \sin(\beta_0) & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ 0 & -\sin(\beta_0) & \cos(\beta_0) & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \cos(2\beta_0) & \sin(2\beta_0) & \dots & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -\sin(2\beta_0) & \cos(2\beta_0) & \dots & 0 & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & \cos(k\beta_0) & \sin(k\beta_0) \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & -\sin(k\beta_0) & \cos(k\beta_0) \end{bmatrix}$$

$$\text{偏心项: } x_e \sin(\varphi) + y_e \cos(\varphi) + z_0 = \Theta(\varphi)c \quad (18)$$

其中,  $\Theta(\varphi) = [\sin(\varphi), \cos(\varphi), 1]$ ,  $c = [x_e, y_e, z_0]^T$ 。

因此式(16)可以转化为

$$z(\varphi, \beta_0, e, \varphi_0) \approx \Phi(\varphi)\Psi(\beta_0)A + \Theta(\varphi)c(e, \varphi_0) \quad (19)$$

代入整理

$$[\sim, \hat{\beta}_0] = \min_{\beta_0} \left\{ \int_0^{\varphi_{\max}} \{ [z - \Phi(\varphi)\Psi(\beta_0)A] - \Theta(\varphi)c \}^2 d\varphi \right\} \quad (20)$$

$$c = [\Theta^T(\varphi)\Theta(\varphi)]^{-1}\Theta^T(\varphi)[z - \Phi(\varphi)\Psi(\beta_0)A] \quad (21)$$

离散化形式为

$$[\sim, \hat{\beta}_0] = \min_{\beta_0} \left\{ \Delta_\varphi \sum_{i=1}^N \{ [Z(\varphi_i) - \Phi(\varphi_i)\Psi(\beta_0)A] - \Theta(\varphi_i)c \}^2 \right\} \quad (22)$$

$$c = [\Theta^T(\varphi_v)\Theta(\varphi_v)]^{-1}\Theta^T(\varphi_v)[Z(\varphi_v) - \Phi(\varphi_v)\Psi(\beta_0)A] \quad (23)$$

其中,  $Z(\varphi_i)$ 为接触式位移传感器1的测量值,  $\Delta_\varphi$ 为转角采样间隔,  $\varphi_v$ 为转角向量,  $\varphi_v = [\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3, \dots, \varphi_i, \dots, \varphi_N]^T$ 。

零件被测截面的偏心量和偏心角可以转化为

$$\hat{e} = |\hat{x}_E + i\hat{y}_E| \quad (24)$$

$$\hat{\varphi}_0 = \angle(\hat{x}_E + i\hat{y}_E) \quad (25)$$

其中,  $\hat{x}_E = -K_b x_e$ ,  $\hat{y}_E = -K_b y_e$ 。

至此,即可获得初始解的估计值 $\hat{\beta}_0$ ,  $\hat{e}$ ,  $\hat{\varphi}_0$ 。

5. 根据权利要求1所述的回转零件截面弯曲偏心的杠杆球式通用精密测量方法,其特征在于:循环迭代模型的迭代量为偏心角 $\beta_0$ 、偏心量 $e$ 和初始姿态角 $\varphi_0$ ,收敛评价指标为拟合信号与原始信号的计算误差。依据步骤(6)中获得的初始解估计值 $\hat{\beta}_0$ ,  $\hat{e}$ ,  $\hat{\varphi}_0$ ,采用循环迭代方式,对 $\beta_0$ ,  $e$ ,  $\varphi_0$ 进行迭代求解,循环收敛后获得精确解,迭代函数为

$$\min_{\beta_0, e, \varphi_0} \left\{ \int_0^{\varphi_{\max}} [Z(\varphi) - z(\varphi, \beta_0, e, \varphi_0)]^2 d\varphi \right\} \quad (1)$$

迭代函数的离散化形式为

$$\min_{\beta_0, e, \varphi_0} \left\{ \Delta_\varphi \sum_{i=1}^N [Z(\varphi_i) - z(\varphi_i, \beta_0, e, \varphi_0)]^2 \right\} \quad (2)$$

## 回转零件截面弯曲偏心的杠杆球式通用精密测量方法

### 技术领域

[0001] 本发明属于回转零件截面弯曲偏心检测领域,尤其涉及一种通过杠杆球式测量机构接触式检测回转零件截面弯曲偏心的通用精密测量方法。

### 背景技术

[0002] 回转零件包含标准几何零件和异性回转体零件,其被广泛应用于旋转机械和生产设备中,是现代传动装置中重要的组成部分。随着工业技术的快速发展,制造结构更精密、装配更紧凑,传动更稳定的回转零件成为工业生产领域的重要需求,而零件的精密检测是确保零件几何精度的基础和手段。

[0003] 在零件的制造和装配过程中,回转零件的截面形状和轴线的直线度尤为重要,其决定了零件的安装精度和设备的稳定性;而在零件的安装和运行过程中,回转零件的弯曲变形和径向偏心是难以避免的。零件弯曲一方面会导致传动不平稳,传动比不精确;另一方面也会使机械系统发生明显的振动、噪声乃至破坏。当前常规的回转零件形位误差检测主要有两种:光学非接触式测量和平折杠杆式接触测量,前者检测时受周围环境状况的影响较为明显,测量区域内的油污、灰尘、杂质等干扰因素均会导致测量结果不准,同时由于非接触式测量设备往往成本较高,电子元器件有寿命限制,不适于大范围推广;而后者受限于测杆的结构,只能测量截面为凸多变形的回转零件而无法测量凹表面,且在测量正多边形棱柱时,只能采用部分段数据或个别关键点,精度低,重复性差;另外,现有的回转零件测量方法仅适用于测量截面为规则形状的零件,而对于截面形状复杂或形状任意的零件尚缺少有效的测量方法。

[0004] 综上所述,回转零件截面弯曲偏心检测技术的发展迫切需要一种结构简洁、测试高效、价格低廉和精度可控的杠杆球式通用精密测量方法。

### 发明内容

[0005] 本发明的目的在于提供一种回转零件截面弯曲偏心的杠杆球式通用精密测量方法,该测量方法利用测球的圆弧状结构,使零件在旋转过程中,始终与测球有且仅有一个接触点,从而增加有效测试信息,快速准确获取回转零件截面弯曲偏心。

[0006] 为实现上述目的,本发明包括测量参数预处理和实测数据处理两部分,其中测量参数预处理包括杠杆比求解模型和无偏心零件回转测量模型,实测数据处理包括测试信号成分分析模型和循环迭代模型。其具体操作步骤为:

[0007] (1) 根据采集设备的调试及运行状况,准确获取杠杆球式测量机构2的基本结构尺寸 $C$ 、 $r$ 、 $D$ 、 $E$ 、 $s$ 及零件回转中心 $O$ 的坐标 $(A, B)$ ;

[0008] (2) 将参数 $A$ 、 $B$ 、 $C$ 、 $D$ 、 $E$ 、 $r$ 、 $s$ 输入杠杆比求解模型,计算杠杆球式测量机构2的杠杆比 $K_b$ ;

[0009] (3) 根据被测零件(3)的轮廓函数表达式或实测数据,计算被测截面在无偏心时的标准轮廓数据 $(x_p, y_p)$ ;

[0010] (4) 将标准轮廓数据  $(x_p, y_p)$  带入无偏心零件的回转测量模型, 模拟仿真无偏心零件的回转测量过程, 获得仿真测试信号  $z$  并计算形状项参量的傅里叶系数矩阵  $A$ ; 至此, 测量参数预处理完成;

[0011] (5) 利用带有杠杆球式测量机构2的测量设备获取被测截面的实测信号  $Z$ ;

[0012] (6) 将实测信号  $Z$  输入到测试信号成分分析模型, 计算被测截面初始解的估计值  $\hat{\beta}_0, \hat{e}, \hat{\varphi}_0$ ;

[0013] (7) 将估计值  $\hat{\beta}_0, \hat{e}, \hat{\varphi}_0$  代入循环迭代模型, 采用循环迭代方式, 对  $\beta_0, e, \varphi_0$  进行迭代求解, 循环收敛后获得精确解。

[0014] 其中, 步骤(2)、步骤(4) 分别对应测量参数预处理的杠杆比求解模型和无偏心零件回转测量模型, 步骤(6)、步骤(7) 分别对应实测数据处理的测试信号成分分析模型和循环迭代模型。

[0015] 所述步骤(1) 中的杠杆球式测量机构2的基本结构尺寸  $C, r, D, E, s$  及零件回转中心  $O$  点的坐标  $(A, B)$  需根据实际测量设备的安装调试状态确定, 测试前需要首先对试验台标定, 以获得结构尺寸的精确值, 测球可选用整球也可选用半球。

[0016] 所述步骤(3) 中, 在计算被测截面在无偏心时的标准轮廓数据过程中, 若零件截面轮廓的函数表达式已知, 可通过函数计算直接获得零件轮廓数据信息; 若被测零件3为非标准件或截面轮廓函数未知, 可以通过图像识别、零件试测的方式获取轮廓数据信息。

[0017] 所述步骤(4) 中, 用于仿真分析的零件的结合中心与回转中心重合, 且截面姿态初始相位角为  $0$ , 获得信号为仿真信号  $z$ 。

[0018] 所述步骤(5) 中, 实测信号  $Z$  为工程应用中利用杠杆球式测量机构2测量被测零件3时, 获得的工程测试信号, 实测信号  $Z$  与步骤(4) 中的仿真信号  $z$  在数值上通常不相等。

[0019] 本发明的优势在于:

[0020] 1) 本测量方法可以在线检测任意形状、任意尺寸的回转零件, 应用领域广, 检测效率高, 迭代精确高, 极大地提升了回转零件的检测精度。通过更改杠杆球式测量机构2的结构尺寸, 本测量方法可以实现对任意形状、任意尺寸零件的测量处理, 方法通用性强;

[0021] 2) 相较于传统的平折式杠杆测量方法, 本测量方法可以保证在零件旋转过程中有且仅有一个点与被测零件接触, 避免了被测截面为凹多边形时引起的测量信息丢失的问题, 为后续的数据处理提供了准确的轮廓测量信息;

[0022] 3) 相较于光学非接触式测量方法, 本测量方法不受周围环境状况的影响, 测量结果准确, 成本较低, 一次标定即可长期使用, 操作简便。

## 附图说明

[0023] 图1为本发明具体实施流程图

[0024] 图2为本发明杠杆球式测量机构2处于平衡位置的测量原理图

[0025] 图3为本发明杠杆球式测量机构2测量任意截面时的原理图

[0026] 图4为本发明被测零件3在无偏心时的测试原理图

[0027] 图5为本发明被测零件3在有偏心时的测试原理图

[0028] 图6为本发明计算误差随迭代次数增加的变化曲线图

[0029] 图7为本发明迭代项 $\beta_0, e, \varphi_0$ 随迭代次数增加的变化曲线图

[0030] 其中:1:接触式位移传感器,2:杠杆球式测量机构,3:被测零件

### 具体实施方式

[0031] 本发明提供了一种回转零件截面弯曲偏心的杠杆球式通用精密测量方法,为使本发明目的、技术方案及效果更佳明晰,本实施方案附图中以凸轮和摆线轮为例对方案进行进一步说明。本发明描述的具体实例仅用于解释本发明,不用于限定本发明。以下结合附图对本发明进行进一步说明:

[0032] 如图1所示,本发明提供了一种回转零件截面弯曲偏心的杠杆球式通用精密测量方法,其主要包括测量参数预处理和实测数据处理两部分,其中测量参数预处理包括杠杆比求解模型和无偏心零件回转测量模型,实测数据处理包括测试信号成分分析模型和循环迭代模型。

[0033] 具体操作步骤为:

[0034] (1) 根据采集设备的调试及运行状况,准确获取杠杆球式测量机构2的基本结构尺寸 $C, r, D, E, s$ 及零件回转中心 $O$ 的坐标 $(A, B)$ ;

[0035] (2) 将参数 $A, B, C, D, E, r, s$ 输入杠杆比求解模型,计算杠杆球式测量机构2的杠杆比 $K_b$ ;

[0036] (3) 根据被测零件(3)的轮廓函数表达式或实测数据,计算被测截面在无偏心时的标准轮廓数据 $(x_p, y_p)$ ;

[0037] (4) 将标准轮廓数据 $(x_p, y_p)$ 带入无偏心零件的回转测量模型,模拟仿真无偏心零件的回转测量过程,获得仿真测试信号 $z$ 并计算形状项参量的傅里叶系数矩阵 $A$ ;至此,测量参数预处理完成;

[0038] (5) 利用带有杠杆球式测量机构2的测量设备获取被测截面的实测信号 $Z$ ;

[0039] (6) 将实测信号 $Z$ 输入到测试信号成分分析模型,计算被测截面初始解的估计值 $\hat{\beta}_0, \hat{e}, \hat{\varphi}_0$ ;

[0040] (7) 将估计值 $\hat{\beta}_0, \hat{e}, \hat{\varphi}_0$ 代入循环迭代模型,采用循环迭代方式,对 $\beta_0, e, \varphi_0$ 进行迭代求解,循环收敛后获得精确解。

[0041] 其中,步骤(2)、步骤(4)分别对应测量参数预处理的杠杆比求解模型和无偏心零件回转测量模型,步骤(6)、步骤(7)分别对应实测数据处理的测试信号成分分析模型和循环迭代模型。

[0042] 如图2、图3所示,杠杆球式通用精密测量装置由接触式位移传感器1和杠杆球式测量机构2两部分组成,以杠杆球式测量机构2的回转中心 $O$ 为原点,杠杆球式测量机构2下侧折杆水平位置所在直线为 $x$ 轴,其垂直方向为 $y$ 轴建立杠杆球式测量机构2的全局坐标系。杠杆球式测量机构2基本结构尺寸分别为 $C, r, D, E, s$ 。若被测零件3为非圆截面或者回转中心与几何中心不重合,当被测零件3旋转时,杠杆球式测量机构2将围绕回转中心 $O$ 上下摆动。设定杠杆球式测量机构2与 $x$ 轴夹角为 $\theta$ ,回转中心 $O$ 的坐标为 $(0, 0)$ ,位移传感器1示值为 $z$ 。被测零件3外接圆半径为 $R$ ,被测截面几何中心 $O''$ 坐标 $(A_0, B_0)$ ,该截面实际回转中心 $O'$ 坐标为 $(A, B)$ , $e$ 和 $\varphi$ 分别为被测零件3被测截面偏心量(挠度)和偏心角。

[0043] 接触式位移传感器1和杠杆球式测量机构2的两折杆所在直线方程分别为:

$$[0044] \quad L_0: x = -r \quad (1)$$

$$[0045] \quad L_1: y = x \tan(\theta) - C / \cos(\theta) \quad (2)$$

$$[0046] \quad L_2: y = x \tan(\theta) + E / \cos(\theta) \quad (3)$$

[0047] 将式(1)代入式(2),并去除接触式位移传感器1在 $\theta=0$ 时的初始位置 $-C$ ,获得接触式位移传感器1的绝对示值为:

$$[0048] \quad z = C - r \tan(\theta) - C / \cos(\theta) \quad (4)$$

[0049] 根据平面解析几何原理和三角函数关系,零件被测截面几何中心 $O''(A_0, B_0)$ 与实际回转中心 $O'(A, B)$ 的坐标转换关系为:

$$[0050] \quad A_0 = A + e \cos(\varphi_0 + \varphi), \quad B_0 = B + e \sin(\varphi_0 + \varphi) \quad (5)$$

[0051] 式中, $\varphi_0$ 为安装时初始偏心角, $\varphi$ 为测量过程中零件截面转过的角度。

[0052] 当杠杆球式测量机构2处于水平位置时,测量球的球心坐标为 $(D, E)$ ,当杠杆球式测量机构2与x轴夹角为 $\theta$ 时,测量球的球心坐标 $(x_s, y_s)$ 为

$$[0053] \quad \begin{aligned} x_s(\theta) &= D \cos(\theta) - E \sin(\theta) \\ y_s(\theta) &= D \sin(\theta) + E \cos(\theta) \end{aligned} \quad (6)$$

[0054] 无论零件旋转任意角度,零件表面始终与杠杆球式测量机构2的测球接触,当截面无偏心时,杠杆测量倾角 $\theta$ 估计值为

$$[0055] \quad \theta_m = \arctan\left(\frac{B}{A}\right) - \arccos\left(\frac{A^2 + B^2 + D^2 + E^2 - (s + R_m)^2}{2\sqrt{D^2 + E^2}\sqrt{A^2 + B^2}}\right) - \arctan\left(\frac{E}{D}\right) \quad (7)$$

[0056] 被测零件3以其几何中心为坐标原点的轮廓数据点向量为 $(x_p, y_p)$ ,它们可视为截面相角 $\gamma$ 的极坐标函数, $0 < \gamma < 2\pi$ 。截面姿态初始相位角为 $\beta_0$ ,那么当测量转动 $\varphi$ 角后,零件截面坐标变为

$$[0057] \quad \begin{aligned} x_N &= A_0 + x_p \cos(\beta_0 + \varphi) - y_p \sin(\beta_0 + \varphi) \\ y_N &= B_0 + y_p \cos(\beta_0 + \varphi) + x_p \sin(\beta_0 + \varphi) \end{aligned} \quad (8)$$

[0058] 那么零件截面任意点到球心距离

$$[0059] \quad d_{Ns}(\theta) = \min_{\theta, \gamma \in [0, 2\pi]} \sqrt{[x_N(\gamma) - x_s(\theta)]^2 + [y_N(\gamma) - y_s(\theta)]^2} - s \quad (9)$$

[0060] 以 $\theta_m$ 作为初始值,当 $d_{Ns}(\theta) = 0$ 时,就可以数值迭代就可以精确确定 $\theta$ 解。

[0061] 如图3所示,步骤(2)中杠杆比求解模型建立和杠杆比 $K_b$ 的求解过程如下所述:

[0062] 设 $K_b$ 为杠杆球式测量机构2的杠杆比,其可实现传感器示数 $z$ 与偏心量间的折算, $K_b$ 可通过在 $R_m$ 上施加小扰动 $\varepsilon$ 求取,则公式(4)(7)可以转化为

$$[0063] \quad z_\varepsilon(\varepsilon) = C - r \tan(\theta_\varepsilon) - C / \tan(\theta_\varepsilon) \quad (10)$$

$$[0064] \quad \theta_\varepsilon = \arctan\left(\frac{B}{A}\right) - \arccos\left(\frac{A^2 + B^2 + D^2 + E^2 - (s + R_m + \varepsilon)^2}{2\sqrt{D^2 + E^2}\sqrt{A^2 + B^2}}\right) - \arctan\left(\frac{E}{D}\right) \quad (11)$$

[0065] 将(11)带入(10)中,并对(10)求关于 $\varepsilon$ 的偏导,化简后可得

$$K_b = (d\varepsilon / dz_c)|_{\varepsilon=0} = [(dz_c / d\varepsilon)|_{\varepsilon=0}]^{-1}$$

$$[0066] \quad = \frac{\sqrt{4(A^2 + B^2)(E^2 + D^2) - [(A^2 + B^2) + (E^2 + D^2) - (s + R_m)^2]^2}}{2(s + R_m)[r \sec(\theta_m) + C \tan(\theta_m)] \sec(\theta_m)} \quad (12)$$

[0067] 如图4所示,步骤(4)中无偏心零件的回转测量模型建立、仿真测试信号z获取及形状项参量的傅里叶系数矩阵A的求取过程如下所述:

[0068] 当零件回转过程中无偏心时,获得的信号全部来自零件自身形状引起的信号波动,其反映了零件的形状项参量。无偏心 $e=0$ ,无姿态初始相位角 $\beta_0=0$ ,测量过程仿真测试信号z随转角 $\varphi$ 的变化关系为

$$[0069] \quad z(\varphi) = \sum_{k=0} [a_k \cos(k\varphi) + b_k \sin(k\varphi)] \quad (13)$$

[0070] 对其进行Fourier级数展开可得

$$[0071] \quad z(\varphi) = \Phi(\varphi)A \quad (14)$$

[0072] 其中,

$$[0073] \quad \Phi(\varphi) = [1, \cos(\varphi), \sin(\varphi), \cos(2\varphi), \sin(2\varphi), \dots, \cos(k\varphi), \sin(k\varphi), \dots],$$

$$[0074] \quad A = [a_0, a_1, b_1, a_2, b_2, \dots, a_k, b_k, \dots]^T。$$

[0075] 同时,形状项参量的傅里叶系数矩阵A可以表示为

$$[0076] \quad A = [\Phi^T(\varphi)\Phi(\varphi)]^{-1}\Phi^T(\varphi)z(\varphi) \quad (15)$$

[0077] 如图5所示,步骤(6)中截面存在回转偏心的测试信号成分分析模型建立及被测截面初始解估计值 $\hat{\beta}_0$ ,  $\hat{e}$ ,  $\hat{\varphi}_0$ 求取过程如下所述:

[0078] 在被测截面存在小偏心量e的情况下,测量信号特征可以近似分解为形状项与偏心项的叠加,

$$[0079] \quad z(\varphi, \beta_0, e, \varphi_0) \approx f(\varphi, \beta_0) + [x_e \sin(\varphi) + y_e \cos(\varphi) + z_0] \quad (16)$$

[0080] 对形状项与偏心项分别进行Fourier展开可得

[0081] 形状项:

$$f(\varphi, \beta_0) = \sum_{k=0} \{a_k \cos(k(\varphi + \beta_0)) + b_k \sin(k(\varphi + \beta_0))\}$$

$$= \sum_{k=0} \left\{ \begin{aligned} & [a_k \cos(k\beta_0) + b_k \sin(k\beta_0)] \cos(k\varphi) + \\ & [-a_k \sin(k\beta_0) + b_k \cos(k\beta_0)] \sin(k\varphi) \end{aligned} \right\} \quad (17)$$

$$= \Phi(\varphi)\Psi(\beta_0)A$$

[0082] 其中,

$$[0083] \quad \Psi(\beta_0) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 & 0 \\ 0 & \cos(\beta_0) & \sin(\beta_0) & 0 & 0 & \cdots & 0 & 0 \\ 0 & -\sin(\beta_0) & \cos(\beta_0) & 0 & 0 & \cdots & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \cos(2\beta_0) & \sin(2\beta_0) & \cdots & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -\sin(2\beta_0) & \cos(2\beta_0) & \cdots & 0 & 0 \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \cdots & \cos(k\beta_0) & \sin(k\beta_0) \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \cdots & -\sin(k\beta_0) & \cos(k\beta_0) \end{bmatrix}$$

[0084] 偏心项:

$$x_e \sin(\varphi) + y_e \cos(\varphi) + z_0 = \Theta(\varphi) \mathbf{c} \quad (18)$$

[0085] 其中,  $\Theta(\varphi) = [\sin(\varphi), \cos(\varphi), 1]$ ,  $\mathbf{c} = [x_e, y_e, z_0]^T$ 。

[0086] 因此式(16)可以转化为

$$[0087] \quad z(\varphi, \beta_0, e, \varphi_0) \approx \Theta(\varphi) \Psi(\beta_0) \mathbf{A} + \Theta(\varphi) \mathbf{c}(e, \varphi_0) \quad (19)$$

[0088] 代入整理

$$[0089] \quad [\sim, \hat{\beta}_0] = \min_{\beta_0} \left\{ \int_0^{\varphi_{\max}} \{ [z - \Theta(\varphi) \Psi(\beta_0) \mathbf{A}] - \Theta(\varphi) \mathbf{c} \}^2 d\varphi \right\} \quad (20)$$

$$[0090] \quad \mathbf{c} = [\Theta^T(\varphi) \Theta(\varphi)]^{-1} \Theta^T(\varphi) [z - \Theta(\varphi) \Psi(\beta_0) \mathbf{A}] \quad (21)$$

[0091] 离散化形式为

$$[0092] \quad [\sim, \hat{\beta}_0] = \min_{\beta_0} \left\{ \Delta_\varphi \sum_{i=1}^N \{ [Z(\varphi_i) - \Theta(\varphi_i) \Psi(\beta_0) \mathbf{A}] - \Theta(\varphi_i) \mathbf{c} \}^2 \right\} \quad (22)$$

$$[0093] \quad \mathbf{c} = [\Theta^T(\varphi_v) \Theta(\varphi_v)]^{-1} \Theta^T(\varphi_v) [Z(\varphi_v) - \Theta(\varphi_v) \Psi(\beta_0) \mathbf{A}] \quad (23)$$

[0094] 其中,  $Z(\varphi_i)$ 为接触式位移传感器1的测量值,  $\Delta_\varphi$ 为转角采样间隔,  $\varphi_v$ 为转角向量,

$$\varphi_v = [\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3, \dots, \varphi_i, \dots, \varphi_N]^T。$$

[0095] 零件被测截面的偏心量和偏心角可以转化为

$$[0096] \quad \hat{e} = |\hat{x}_E + i \hat{y}_E| \quad (24)$$

$$[0097] \quad \hat{\varphi}_0 = \angle(\hat{x}_E + i \hat{y}_E) \quad (25)$$

[0098] 其中,  $\hat{x}_E = -K_b x_e$ ,  $\hat{y}_E = -K_b y_e$ 。

[0099] 至此,即可获得初始解的估计值 $\hat{\beta}_0$ ,  $\hat{e}$ ,  $\hat{\varphi}_0$ 。

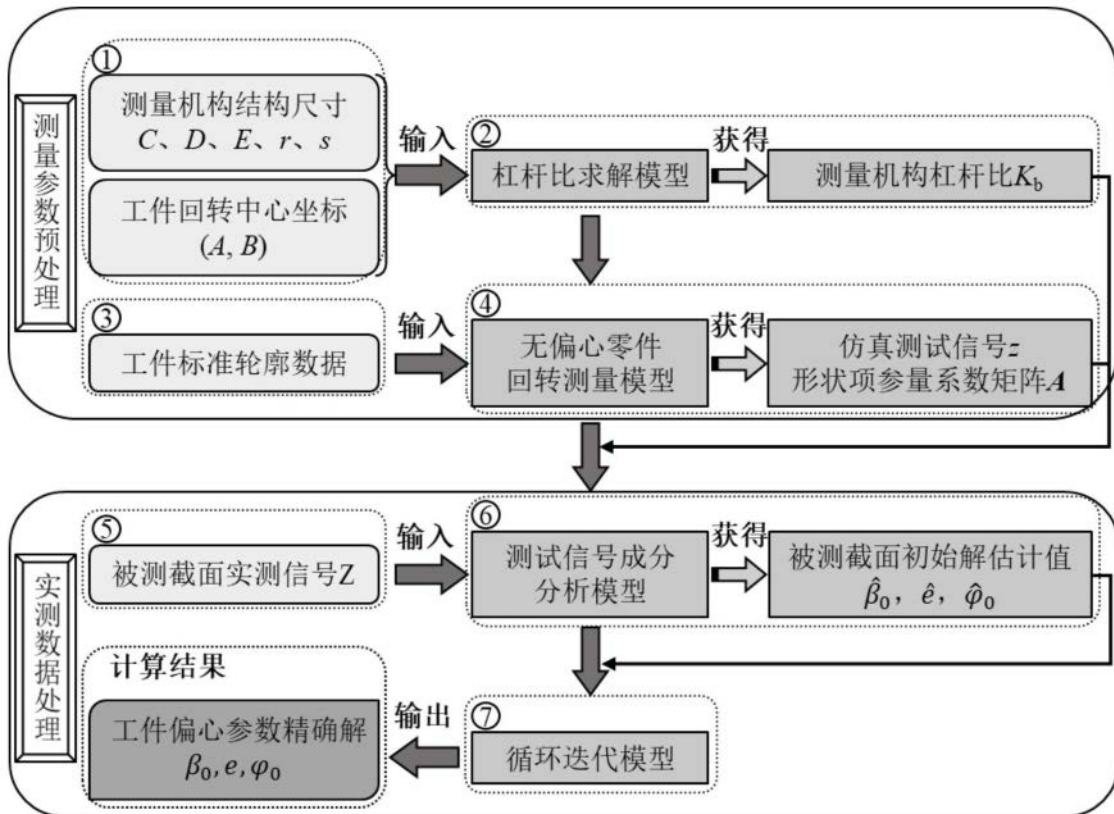
[0100] 如图5,图6所示,循环迭代模型的迭代量为偏心角 $\beta_0$ 、偏心量 $e$ 和初始姿态角 $\varphi_0$ ,收敛评价指标为拟合信号与原始信号的计算误差。迭代求解过程中计算误差随迭代次数增加逐渐减小,通过一定次数的迭代可以获得被测截面的精确解 $\beta_0, e, \varphi_0$ 。图6展示了计算误差随迭代次数增加的变化曲线,图7(a)(b)(c)分别展示了 $\beta_0, e, \varphi_0$ 随迭代次数增加的变化曲线。

[0101] 依据步骤(6)中获得的初始解估计值 $\hat{\beta}_0$ ,  $\hat{e}$ ,  $\hat{\varphi}_0$ ,采用循环迭代方式,对 $\beta_0, e, \varphi_0$ 进行迭代求解,循环收敛后获得精确解,迭代函数为

$$[0102] \quad \min_{\beta_0, e, \varphi_0} \left\{ \int_0^{\varphi_{\max}} [Z(\varphi) - z(\varphi, \beta_0, e, \varphi_0)]^2 d\varphi \right\} \quad (26)$$

[0103] 迭代函数的离散化形式为

$$[0104] \quad \min_{\beta_0, e, \varphi_0} \left\{ \Delta_{\varphi} \sum_{i=1}^N [Z(\varphi_i) - z(\varphi_i, \beta_0, e, \varphi_0)]^2 \right\} \quad (27)$$



①~⑦ 表示回转零件截面弯曲偏心的杠杆球式通用精密测量方法数据处理步骤,  $n=1,2,\dots,7$

图1

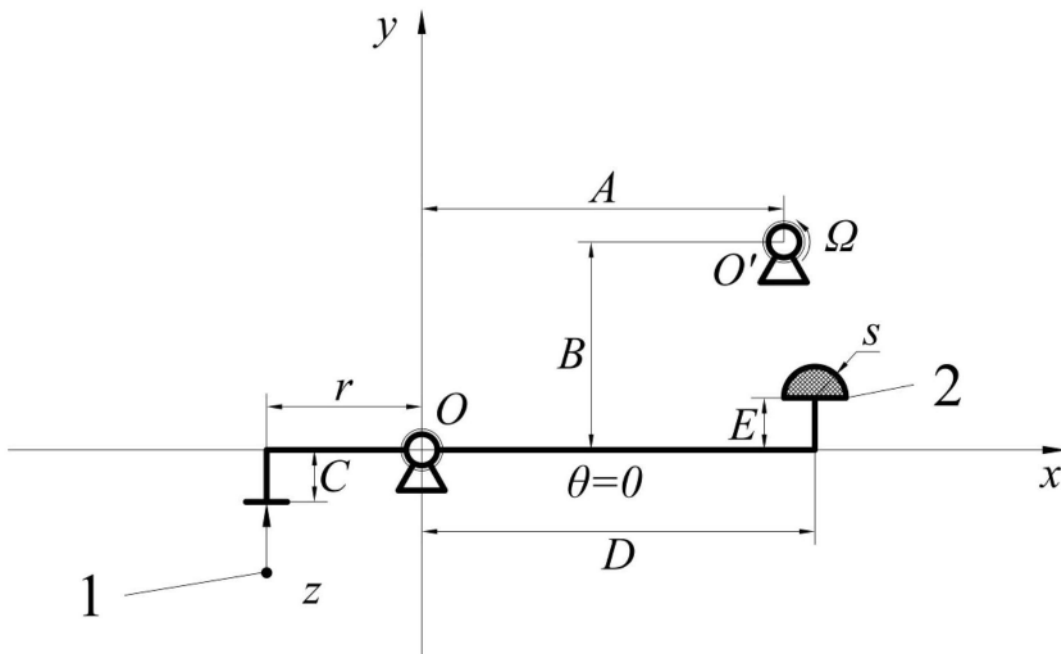


图2

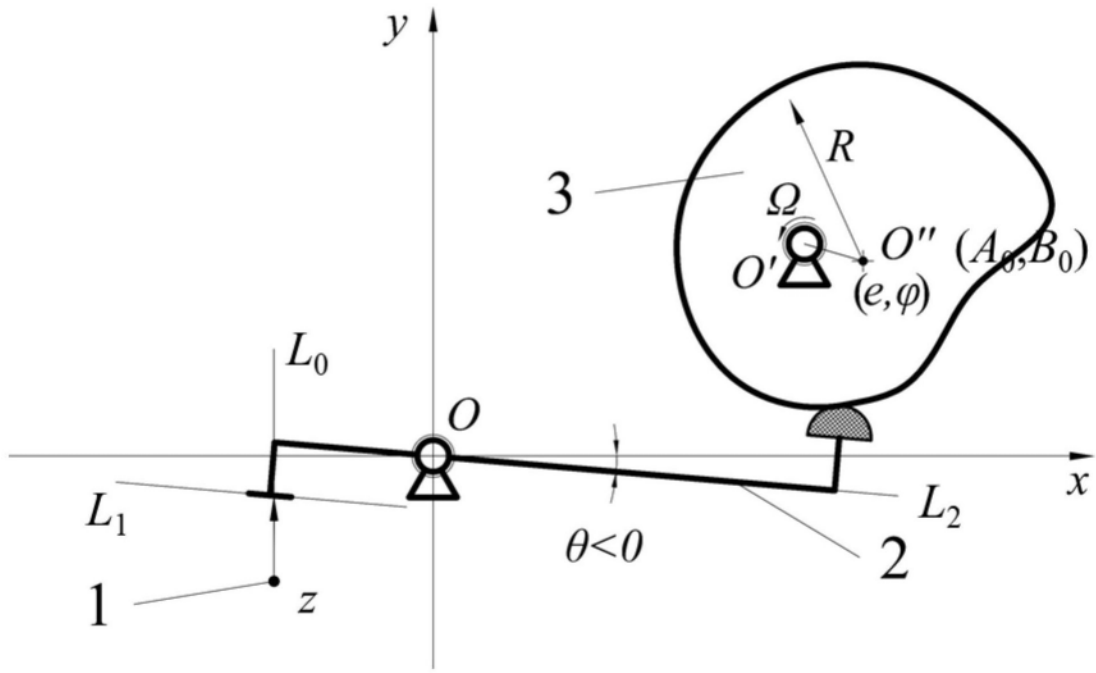


图3

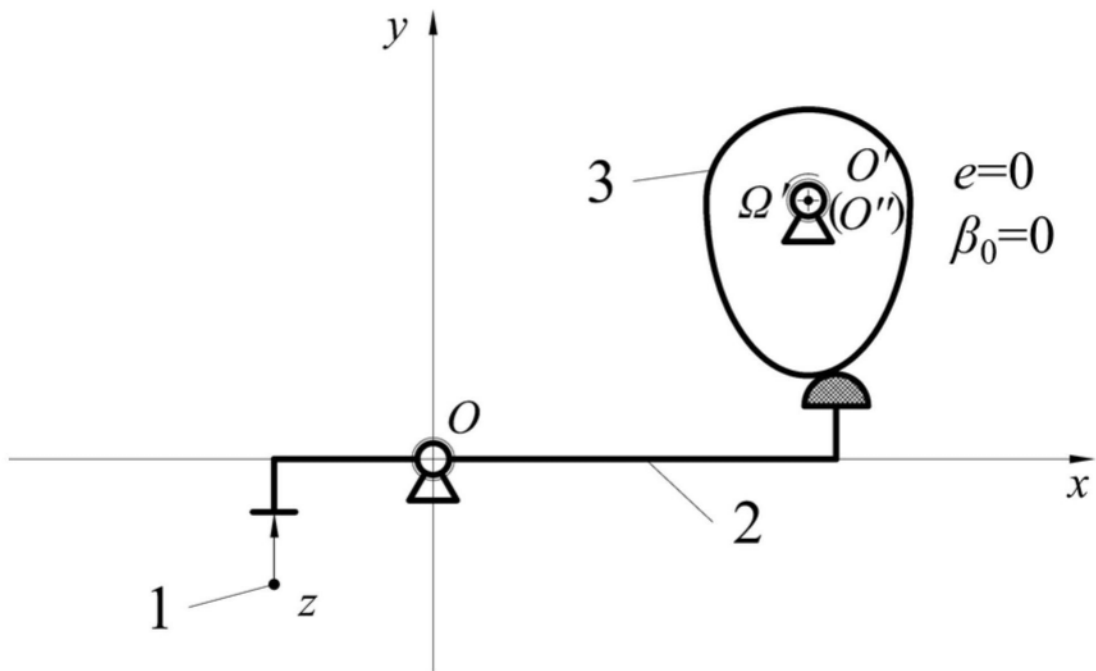


图4

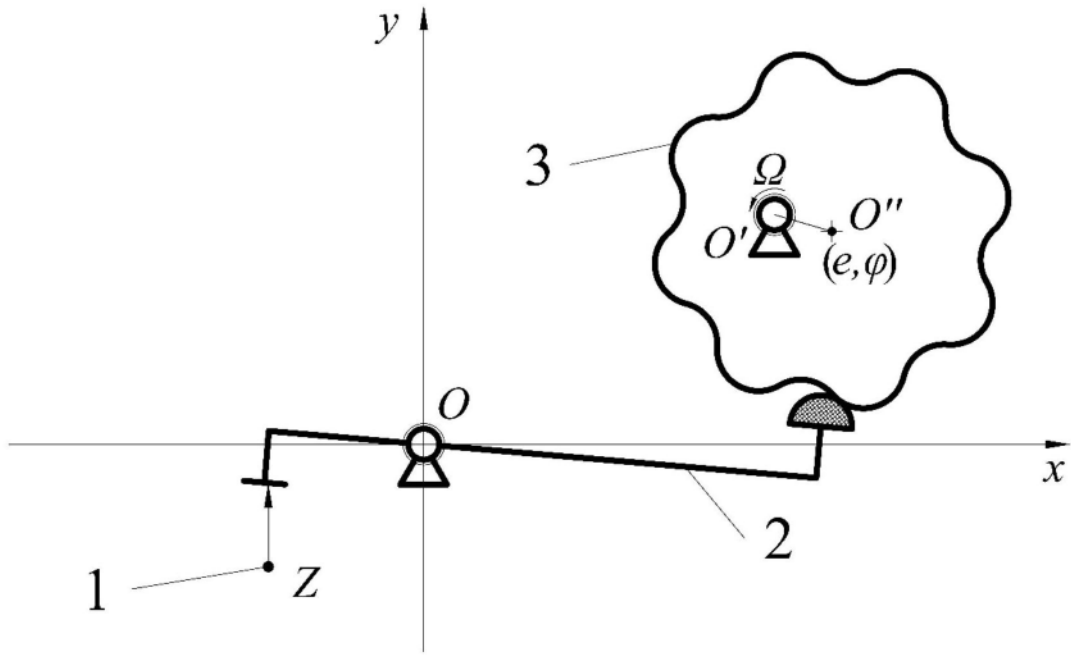


图5

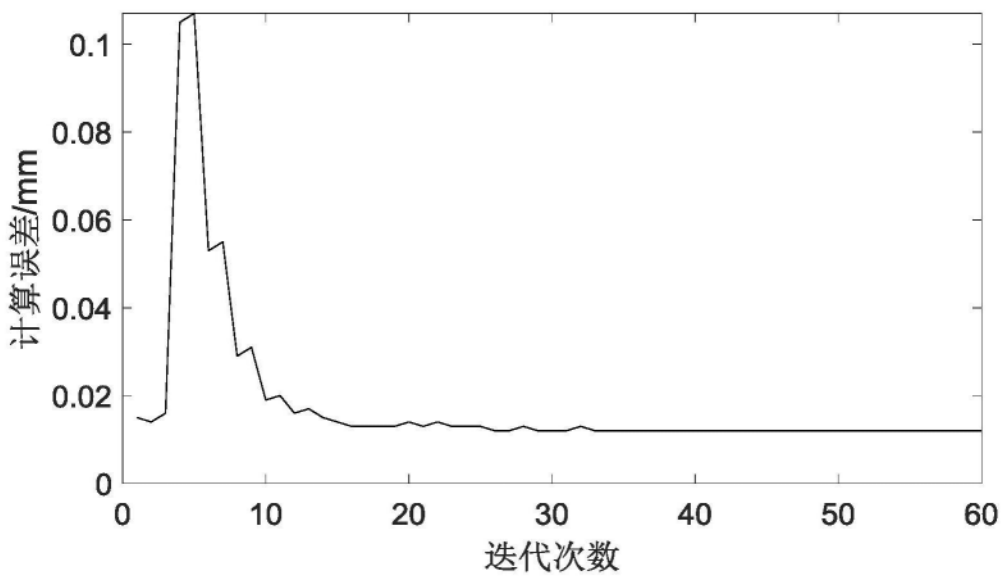


图6

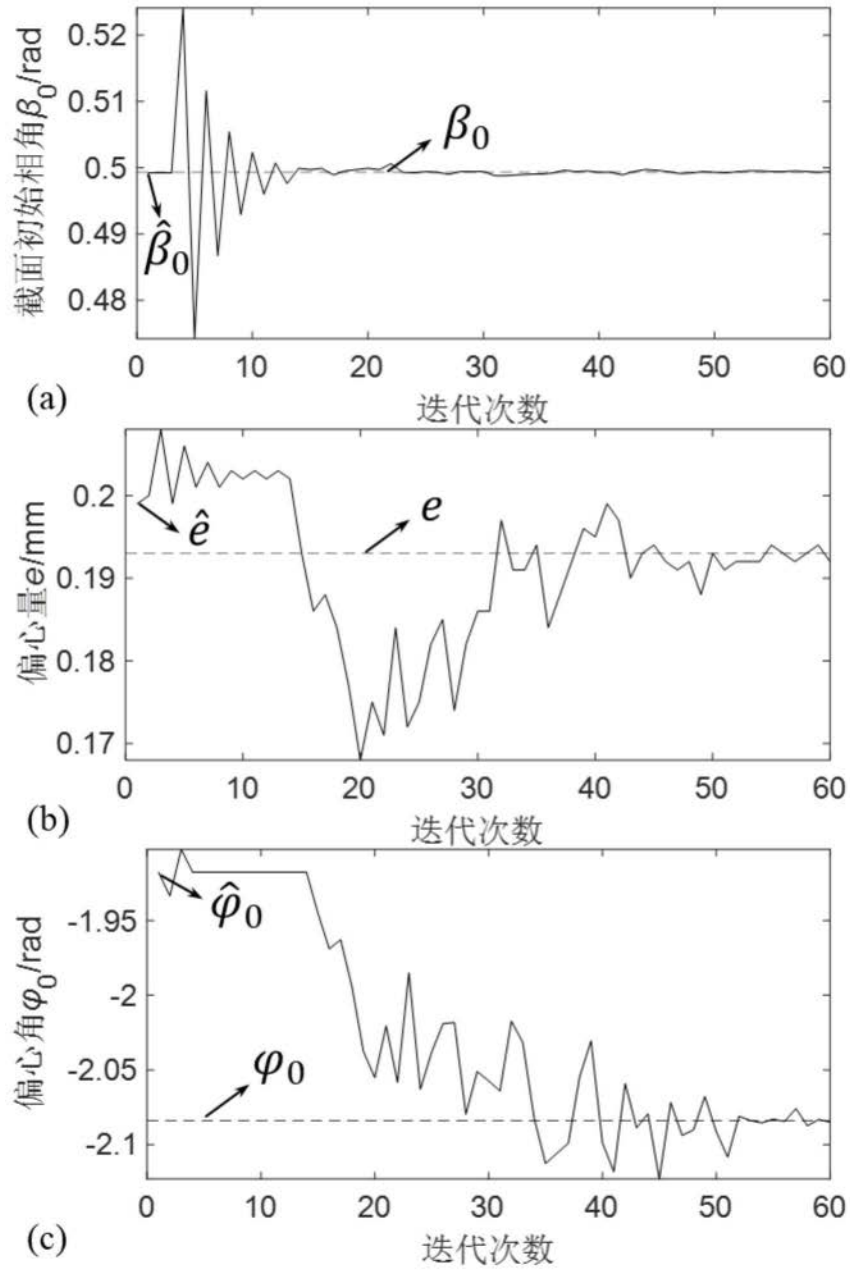


图7