



# (12) 发明专利申请

(10) 申请公布号 CN 102128599 A

(43) 申请公布日 2011.07.20

(21) 申请号 201010607342.1

(22) 申请日 2010.12.27

(71) 申请人 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所

地址 130033 吉林省长春市东南湖大路  
3888 号

(72) 发明人 王孝坤 郑立功 张学军

(74) 专利代理机构 长春菁华专利商标代理事务所 22210

代理人 王淑秋

(51) Int. Cl.

G01B 11/24 (2006.01)

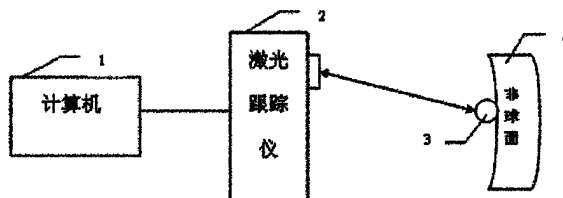
权利要求书 2 页 说明书 5 页 附图 2 页

## (54) 发明名称

接触式非球面面形检验装置

## (57) 摘要

本发明涉及一种接触式非球面面形检验装置,该装置包括计算机和激光跟踪仪;计算机利用激光跟踪仪测量的待测非球面上特征点的位置坐标及 CAD 模型上对应的特征点的位置坐标,通过坐标变换将待测非球面此时的物理坐标系与 CAD 模型的坐标系统一到同一坐标系;然后利用激光跟踪仪测得的统一坐标系下待测非球面上多点的位置坐标进行插值计算得到待测非球面上各点的位置坐标;最后分析求解得到统一坐标系下待测非球面上各点的坐标值与 CAD 数模上对应的各点坐标值之间的偏差,并对偏差数据进行拟合,得到待测非球面面形分布。本发明数据处理和数学运算简单,实验操作简单易行,检测成本很低,测试时间短,适用于非球面加工整个过程的面形检测。



1. 一种接触式非球面面形检验装置,其特征在于包括计算机(1)和激光跟踪仪(2);所述计算机(1)包括存储待测非球面 CAD 模型的装置(11)、坐标变换装置(12)、求解位置坐标的装置(13)和求解待测非球面面形分布的装置(14);激光跟踪仪(2)首先测量待测非球面上特征点的位置坐标并将其传输给坐标变换装置(12),由坐标变换装置(12)利用测量的待测非球面上特征点的位置坐标及 CAD 模型上对应的特征点的位置坐标,通过坐标变换求解得到待测非球面、CAD 模型两个坐标系之间的平移量和旋转量,将待测非球面此时的物理坐标系与 CAD 模型的坐标系统一到同一坐标系;激光跟踪仪(2)测量在统一坐标系下待测非球面上多点的位置坐标并将其传输给求解位置坐标的装置(13),由求解位置坐标的装置(13)利用测得的统一坐标系下待测非球面上多点的位置坐标进行插值计算得到待测非球面上各点的位置坐标;求解待测非球面面形分布的装置(14)分析求解得到统一坐标系下待测非球面上各点的坐标值与 CAD 数模上对应的各点坐标值之间的偏差,并对偏差数据进行拟合,得到待测非球面面形分布。

2. 根据权利要求 1 所述的接触式非球面面形检验装置,其特征在于所述坐标变换装置(12)查找待测非球面的 CAD 模型,提取与激光跟踪仪(2)测量的特征点  $p_1(x_1, y_1, z_1)$ ,  $p_2(x_2, y_2, z_2)$  和  $p_3(x_3, y_3, z_3)$  相对应的 CAD 模型上的特征点的位置坐标  $P_1(X_1, Y_1, Z_1)$ ,  $P_2(X_2, Y_2, Z_2)$  和  $P_3(X_3, Y_3, Z_3)$ ;通过迭代法求解公式(1)和公式(5)联立的非线性方程组,得到待测非球面的物理坐标系相对 CAD 模型的坐标系在 x 方向、y 方向、z 方向上的平移量  $d_x$ 、 $d_y$  和  $d_z$  以及待测非球面的物理坐标系相对 CAD 模型的坐标系绕 x 轴、y 轴、z 轴的转动角度量  $\alpha$ 、 $\beta$  和  $\gamma$ ,进而将两个坐标系统一到同一坐标系;

$$\begin{cases} (x_1, y_1, z_1, 1) = (X_1, Y_1, Z_1, 1) \cdot V \\ (x_2, y_2, z_2, 1) = (X_2, Y_2, Z_2, 1) \cdot V \\ (x_3, y_3, z_3, 1) = (X_3, Y_3, Z_3, 1) \cdot V \end{cases} \quad (1)$$

$$V = \begin{bmatrix} \cos \beta \cos \gamma & \cos \beta \sin \gamma & -\sin \beta & 0 \\ \sin \alpha \sin \beta \cos \gamma - \cos \alpha \sin \gamma & \sin \alpha \sin \beta \sin \gamma + \cos \alpha \cos \gamma & \sin \alpha \cos \beta & 0 \\ \cos \alpha \sin \beta \cos \gamma + \sin \alpha \sin \gamma & \cos \alpha \sin \beta \sin \gamma - \sin \alpha \cos \gamma & \cos \alpha \cos \beta & 0 \\ d_x & d_y & d_z & 1 \end{bmatrix} \quad (5)$$

其中  $(x_1, y_1, z_1, 1)$  为  $p_1(x_1, y_1, z_1)$  点在待测非球面的物理坐标系中的坐标行矩阵,  $(X_1, Y_1, Z_1, 1)$  为与  $p_1(x_1, y_1, z_1)$  点相对应的  $P_1(X_1, Y_1, Z_1)$  点在 CAD 模型坐标系中的坐标行矩阵;  $(x_2, y_2, z_2, 1)$  为  $p_2(x_2, y_2, z_2)$  点在待测非球面的物理坐标系中的坐标行矩阵,  $(X_2, Y_2, Z_2, 1)$  为与  $p_2(x_2, y_2, z_2)$  点相对应的  $P_2(X_2, Y_2, Z_2)$  点在 CAD 模型坐标系中的坐标行矩阵;  $(x_3, y_3, z_3, 1)$  为  $p_3(x_3, y_3, z_3)$  点在待测非球面的物理坐标系中的坐标行矩阵,  $(X_3, Y_3, Z_3, 1)$  为与  $p_3(x_3, y_3, z_3)$  点相对应的  $P_3(X_3, Y_3, Z_3)$  点在 CAD 模型坐标系中的坐标行矩阵;  $d_x$ 、 $d_y$  和  $d_z$  分别为待测非球面的物理坐标系相对 CAD 模型坐标系在 x 方向、y 方向、z 方向上的平移量,  $\alpha$ 、 $\beta$  和  $\gamma$  分别为待测非球面的物理坐标系相对 CAD 模型坐标系绕 x 轴、y 轴、z 轴的转动角度量。

3. 根据权利要求 1 所述的接触式非球面面形检验装置,其特征在于所述求解位置坐标的装置(13)利用测量得到的非球面上多点的位置坐标,通过三次样条插值或牛顿插值计

---

算求解得到非球面上各点的位置坐标。

## 接触式非球面面形检验装置

### 技术领域

[0001] 本发明涉及一种接触式光学非球面面形检验装置。

### 背景技术

[0002] 当前,检验非球面元件的方法有很多种,主要分为接触式测量和非接触式测量。接触式测量主要借助轮廓仪或者三坐标测量仪通过对光学元件进行多个离散点的测量,然后经过数据处理,拟合得到面形误差。非接触式测量主要有阴影法、激光扫描法、干涉法等。阴影法主要分为刀口法和哈特曼法(光阑法),该方法主要观察阴影分布的图形和阴影图的明暗对比。这种方法设备简单,对于某些二次曲面测量方便,适于现场检验。但存在主观、定量困难、灵敏度欠高等缺点。激光扫描法可分平移法、旋转法,以及平移旋转法,这是一种利用光的直线性进行面形检测的方法,通过用激光束对被测面进行逐点测量可计算出非球面的面形参数。它通用性强,可以测量各种非球面,而且是对被测面进行绝对测量,精度高,缺点是相应的数据处理比较复杂。干涉法是一种短时间检测非球面的方法,由于它具有高分辨、高精度、高灵敏度、重复性好等优点,但是利用该技术测量非球面面形时,要求非球面表面有很好的光洁度和很高的反射能力。因此,干涉法一般适用于非球面精抛光和最终阶段的检测。

### 发明内容

[0003] 本发明要解决的技术问题是提供一种适用于非球面加工整个过程的接触式非球面面形检验装置,该装置能够直接实现对非球面的测量,数据处理和数学运算简单,实验操作简单易行,测量时间短、测试成本低。

[0004] 为了解决上述技术问题,本发明的接触式非球面面形检验装置包括计算机和激光跟踪仪;所述计算机包括存储待测非球面 CAD 模型的装置、坐标变换装置、求解位置坐标的装置和求解待测非球面面形分布的装置;激光跟踪仪首先测量待测非球面上特征点的位置坐标并将其传输给坐标变换装置,由坐标变换装置利用测量的待测非球面上特征点的位置坐标及 CAD 模型上对应的特征点的位置坐标,通过坐标变换求解得到待测非球面、CAD 模型两个坐标系之间的平移量和旋转量,将待测非球面此时的物理坐标系与 CAD 模型的坐标系统一到同一坐标系;激光跟踪仪测量在统一坐标系下待测非球面上多点的位置坐标并将其传输给求解位置坐标的装置,由求解位置坐标的装置利用测得的统一坐标系下待测非球面上多点的位置坐标进行插值计算得到待测非球面上各点的位置坐标;求解待测非球面面形分布的装置分析求解得到统一坐标系下待测非球面上各点的坐标值与 CAD 数模上对应的各点坐标值之间的偏差,并对偏差数据进行拟合,得到待测非球面面形分布。

[0005] 所述特征点为在待测非球面上设定的三个点,如侧面或者背部的轻量化圆孔、锥孔的圆心或者三角形孔的中心等。

[0006] 本发明通过扩充激光跟踪仪的现有功能,利用激光跟踪仪的靶标球对非球面表面进行多点接触测量,并将测量的结果与数据模型进行分析对比、处理和运算,获得非球面的

面形分布信息,无需其它辅助光学元件就能够准确的实现对大口径非球面面形的检测。本发明数据处理和数学运算简单,实验操作简单易行,检测成本很低,测试时间短,适用于非球面加工整个过程的面形检测。

### 附图说明

[0007] 下面结合附图和具体实施方式对本发明作进一步详细说明。

[0008] 图 1 是本发明的接触式非球面面形检验装置结构示意图。

[0009] 图 2 是计算机测量软件功能模块示意图。

[0010] 图 3 是待测非球面结构示意图。

[0011] 图 4 是利用本发明对非球面面形进行检验的流程图。

### 具体实施方式

[0012] 如图 1 所示,本发明的接触式非球面面形检验装置包括计算机 1 和激光跟踪仪 2; 所述激光跟踪仪 2 与计算机 1 通过数据线进行连接。

[0013] 激光跟踪仪 2 是一种高精度、大容量的便携式三位坐标测量设备,该激光跟踪仪使用两个旋转角编码器和一个激光距离测量系统,以跟踪和测量靶标球 3 的位置。靶标球 3 是由空心的直角反射镜组成,此反射镜精确固定在加工球体内。球体外表面到中心的距离已知(即球体半径),激光跟踪仪测量软件利用球体半径进行测量偏移或补偿测量。激光跟踪仪发射并接收从靶标球返回的红色氦氖激光,激光跟踪仪机械轴的方向会根据其内部的位置感应探测器接收的两个旋转角编码器及距离测量系统反馈的信息不断进行调整。激光跟踪仪通过测量两个角度和一个距离来确定目标的坐标。这些角度由安装在顶点角轴和方位角轴上的编码器来测量。径向距离是由条纹计数干涉仪或一种相位偏移绝对距离测量系统(XtremeADM)来测量。激光跟踪仪一般用来测量物体之间的相对位置关系,并可以直接检验平面和球面物体的面形,但是对于非球面元件的面形却不能实现直接检验。

[0014] 如图 2 所示,所述计算机 1 的测量软件包括存储待测非球面 CAD 模型的装置 11、坐标变换装置 12、求解位置坐标的装置 13 和求解待测非球面面形分布的装置 14。

[0015] 所述坐标变换装置 12 查找待测非球面的 CAD 模型,提取与激光跟踪仪 2 测量的特征点  $p_1(x_1, y_1, z_1)$ ,  $p_2(x_2, y_2, z_2)$  和  $p_3(x_3, y_3, z_3)$  相对应的 CAD 模型上的特征点的位置坐标  $P_1(X_1, Y_1, Z_1)$ ,  $P_2(X_2, Y_2, Z_2)$  和  $P_3(X_3, Y_3, Z_3)$ ,如图 3 所示;通过迭代法求解公式 (1) 和公式 (5) 联立的非线性方程组,得到待测非球面的物理坐标系相对 CAD 模型的坐标系在 x 方向、y 方向、z 方向上的平移量  $d_x$ 、 $d_y$  和  $d_z$  以及待测非球面的物理坐标系相对 CAD 模型的坐标系绕 x 轴、y 轴、z 轴的转动角度量  $\alpha$ 、 $\beta$  和  $\gamma$ ,进而将两个坐标系统一到同一坐标系;

$$[0016] \quad \begin{cases} (x_1, y_1, z_1, 1) = (X_1, Y_1, Z_1, 1) \cdot V \\ (x_2, y_2, z_2, 1) = (X_2, Y_2, Z_2, 1) \cdot V \\ (x_3, y_3, z_3, 1) = (X_3, Y_3, Z_3, 1) \cdot V \end{cases} \quad (1)$$

[0017]

$$V = \begin{bmatrix} \cos \beta \cos \gamma & \cos \beta \sin \gamma & -\sin \beta & 0 \\ \sin \alpha \sin \beta \cos \gamma - \cos \alpha \sin \gamma & \sin \alpha \sin \beta \sin \gamma + \cos \alpha \cos \gamma & \sin \alpha \cos \beta & 0 \\ \cos \alpha \sin \beta \cos \gamma + \sin \alpha \sin \gamma & \cos \alpha \sin \beta \sin \gamma - \sin \alpha \cos \gamma & \cos \alpha \cos \beta & 0 \\ d_x & d_y & d_z & 1 \end{bmatrix} \quad (5)$$

[0018] 其中  $(x_1, y_1, z_1, 1)$  为  $p_1(x_1, y_1, z_1)$  点在待测非球面的物理坐标系中的坐标行矩阵,  $(X_1, Y_1, Z_1, 1)$  为与  $p_1(x_1, y_1, z_1)$  点相对应的  $P_1(X_1, Y_1, Z_1)$  点在 CAD 模型坐标系中的坐标行矩阵;  $(x_2, y_2, z_2, 1)$  为  $p_2(x_2, y_2, z_2)$  点在待测非球面的物理坐标系中的坐标行矩阵,  $(X_2, Y_2, Z_2, 1)$  为与  $p_2(x_2, y_2, z_2)$  点相对应的  $P_2(X_2, Y_2, Z_2)$  点在 CAD 模型坐标系中的坐标行矩阵;  $(x_3, y_3, z_3, 1)$  为  $p_3(x_3, y_3, z_3)$  点在待测非球面的物理坐标系中的坐标行矩阵,  $(X_3, Y_3, Z_3, 1)$  为与  $p_3(x_3, y_3, z_3)$  点相对应的  $P_3(X_3, Y_3, Z_3)$  点在 CAD 模型坐标系中的坐标行矩阵;  $d_x$ 、 $d_y$  和  $d_z$  分别为待测非球面的物理坐标系相对 CAD 模型坐标系在 x 方向、y 方向、z 方向上的平移量,  $\alpha$ 、 $\beta$  和  $\gamma$  分别为待测非球面的物理坐标系相对 CAD 模型坐标系绕 x 轴、y 轴、z 轴的转动角度量。

[0019] 所述特征点  $p_1(x_1, y_1, z_1)$ ,  $p_2(x_2, y_2, z_2)$  和  $p_3(x_3, y_3, z_3)$  为待测非球面侧面或者背部的轻量化圆孔、锥孔的圆心或者三角形孔的中心。可通过先测量圆孔或锥孔边缘上任意三个点的坐标, 然后再计算得到其圆心坐标; 三角形孔中心的坐标可利用三角形三个顶点的坐标通过计算得到。

[0020] 所述求解位置坐标的装置 13 利用测量得到的非球面上多点的位置坐标, 通过三次样条插值或牛顿插值方法计算求解得到非球面上各点的位置坐标。

[0021] 如图 4 所示, 利用本发明对非球面面形进行检验的步骤如下:

[0022] 1) 首先, 建立待测非球面的 CAD 模型, 并将该 CAD 模型导入计算机 1 的测量软件中;

[0023] 2) 利用激光跟踪仪 2 测量待测非球面侧面或者背部的三个特征点  $p_1, p_2$  和  $p_3$  的位置坐标  $p_1(x_1, y_1, z_1)$ ,  $p_2(x_2, y_2, z_2)$  和  $p_3(x_3, y_3, z_3)$ ;

[0024] 3) 查找非球面的 CAD 模型, 提取与测量的特征点  $p_1(x_1, y_1, z_1)$ ,  $p_2(x_2, y_2, z_2)$  和  $p_3(x_3, y_3, z_3)$  相对应的 CAD 数模上的特征点的位置坐标  $P_1(X_1, Y_1, Z_1)$ ,  $P_2(X_2, Y_2, Z_2)$  和  $P_3(X_3, Y_3, Z_3)$ ;

[0025] 4) 通过坐标变换, 可以求解得到两个坐标系之间的平移量和旋转量, 从而使得待测非球面此时的物理坐标系与 CAD 模型的坐标系一致;

[0026] 具体算法步骤如下:

[0027] 设定  $p_1$  点在待测非球面的物理坐标系中的坐标表示为行矩阵  $(x_1, y_1, z_1, 1)$ , 与  $p_1$  相对应的  $P_1$  点在 CAD 模型坐标系中的坐标表示为行矩阵  $(X_1, Y_1, Z_1, 1)$ ; 假定待测非球面的物理坐标系相对 CAD 模型的坐标系在 x 方向、y 方向、z 方向上的平移量分别为  $d_x$ 、 $d_y$  和  $d_z$ , 待测非球面的物理坐标系相对 CAD 模型的坐标系绕 x 轴、y 轴、z 轴的转动角度量分别为  $\alpha$ 、 $\beta$  和  $\gamma$ , 则根据坐标变换理论, 待测非球面的物理坐标系上的特征位置坐标与 CAD 模型上对应特征的位置坐标有如下关系:

$$[0028] \quad \begin{cases} (x_1, y_1, z_1, 1) = (X_1, Y_1, Z_1, 1) \cdot V \\ (x_2, y_2, z_2, 1) = (X_2, Y_2, Z_2, 1) \cdot V \\ (x_3, y_3, z_3, 1) = (X_3, Y_3, Z_3, 1) \cdot V \end{cases} \quad (1)$$

[0029] 其中  $V$  为两个坐标系之间的变换矩阵,它是平移变换矩阵  $T$  和旋转变换矩阵  $R$  之间的乘积,即:

$$[0030] \quad V = T \cdot R \quad (2)$$

[0031]

$$T = T_x \cdot T_y \cdot T_z = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ d_x & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ d_y & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ d_z & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ d_x & d_y & d_z & 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

[0032] 其中  $T_x$ 、 $T_y$  和  $T_z$  分别为两个行矩阵在  $x$  方向、 $y$  方向和  $z$  方向上的平移矩阵。

[0033]

$$R = R_x \cdot R_y \cdot R_z = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \alpha & \sin \alpha & 0 \\ 0 & -\sin \alpha & \cos \alpha & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \beta & 0 & -\sin \beta & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ \sin \beta & 0 & \cos \beta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \gamma & \sin \gamma & 0 & 0 \\ -\sin \gamma & \cos \gamma & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$[0034] \quad = \begin{bmatrix} \cos \beta \cos \gamma & \cos \beta \sin \gamma & -\sin \beta & 0 \\ \sin \alpha \sin \beta \cos \gamma - \cos \alpha \sin \gamma & \sin \alpha \sin \beta \sin \gamma + \cos \alpha \cos \gamma & \sin \alpha \cos \beta & 0 \\ \cos \alpha \sin \beta \cos \gamma + \sin \alpha \sin \gamma & \cos \alpha \sin \beta \sin \gamma - \sin \alpha \cos \gamma & \cos \alpha \cos \beta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

[0035] 其中  $R_x$ 、 $R_y$  和  $R_z$  分别为两个行矩阵在  $x$  方向、 $y$  方向和  $z$  方向上的旋转矩阵。

[0036] 则由 (3)-(4) 可推导得到两个坐标系之间的变换矩阵  $V$  为公式 (5),

[0037]

$$V = \begin{bmatrix} \cos \beta \cos \gamma & \cos \beta \sin \gamma & -\sin \beta & 0 \\ \sin \alpha \sin \beta \cos \gamma - \cos \alpha \sin \gamma & \sin \alpha \sin \beta \sin \gamma + \cos \alpha \cos \gamma & \sin \alpha \cos \beta & 0 \\ \cos \alpha \sin \beta \cos \gamma + \sin \alpha \sin \gamma & \cos \alpha \sin \beta \sin \gamma - \sin \alpha \cos \gamma & \cos \alpha \cos \beta & 0 \\ d_x & d_y & d_z & 1 \end{bmatrix} \quad (5)$$

[0038] 因为三个特征点分别在两个坐标系中的坐标值是已知的,通过迭代法求解公式 (1) 和公式 (5) 联立的非线性方程组,即可得到待测非球面的物理坐标系相对 CAD 模型的坐标系在  $x$  方向、 $y$  方向、 $z$  方向上的平移量  $d_x$ 、 $d_y$  和  $d_z$  以及待测非球面的物理坐标系相对 CAD 模型的坐标系绕  $x$  轴、 $y$  轴、 $z$  轴的转动角度量  $\alpha$ 、 $\beta$  和  $\gamma$ ,从而可以将两个坐标系统一起来;

[0039] 5) 两个坐标系一致后,利用激光跟踪仪 1 测量在统一坐标系下待测非球面上多点的位置坐标;

[0040] 6) 利用测量得到的待测非球面上多点的位置坐标,通过三次样条插值计算求解得到待测非球面上各点的位置坐标;

[0041] 7) 分析求解得到统一坐标系下待测非球面上各点的坐标值与对应 CAD 模型上各

---

点坐标值的偏差,对偏差数据进行拟合,即为待测非球面的面形分布。



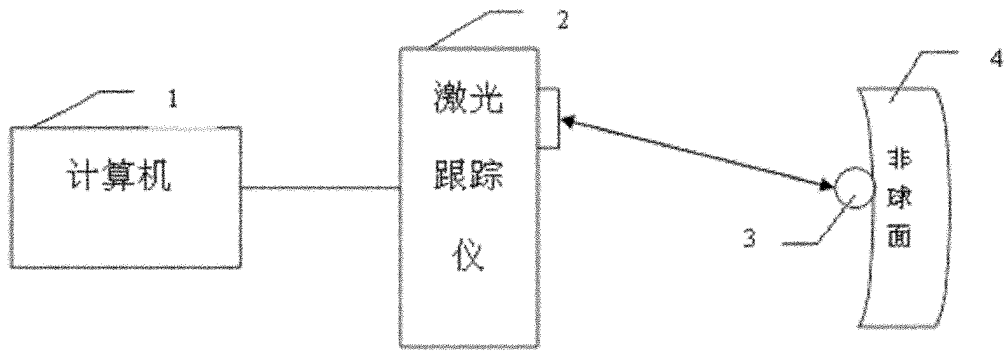


图 1

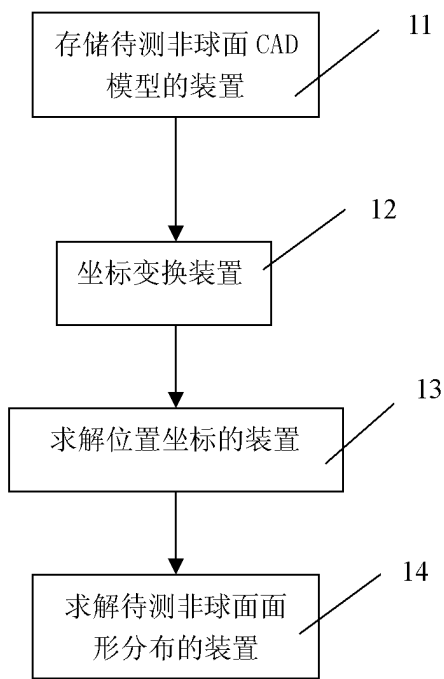


图 2

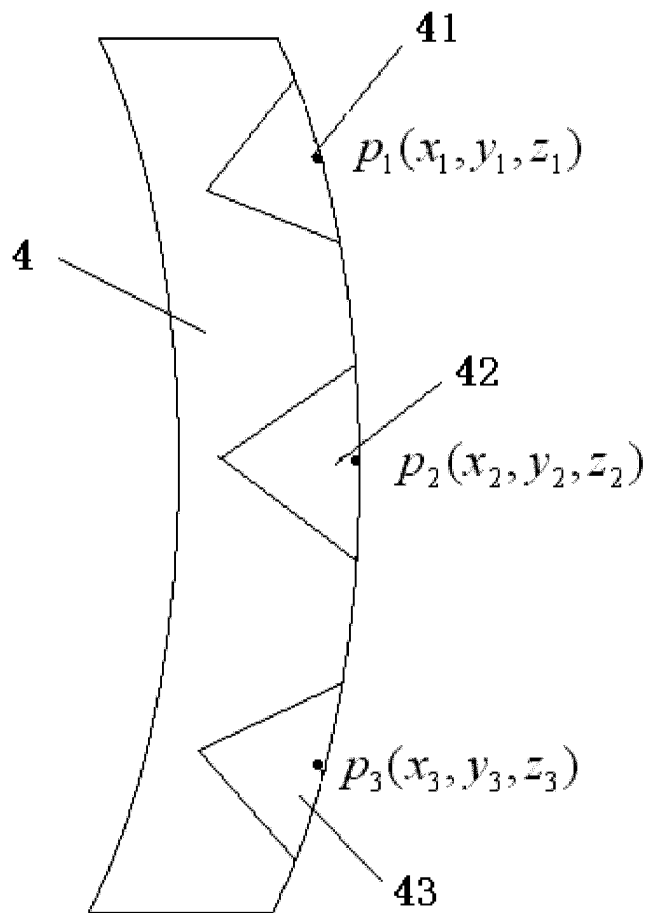


图 3

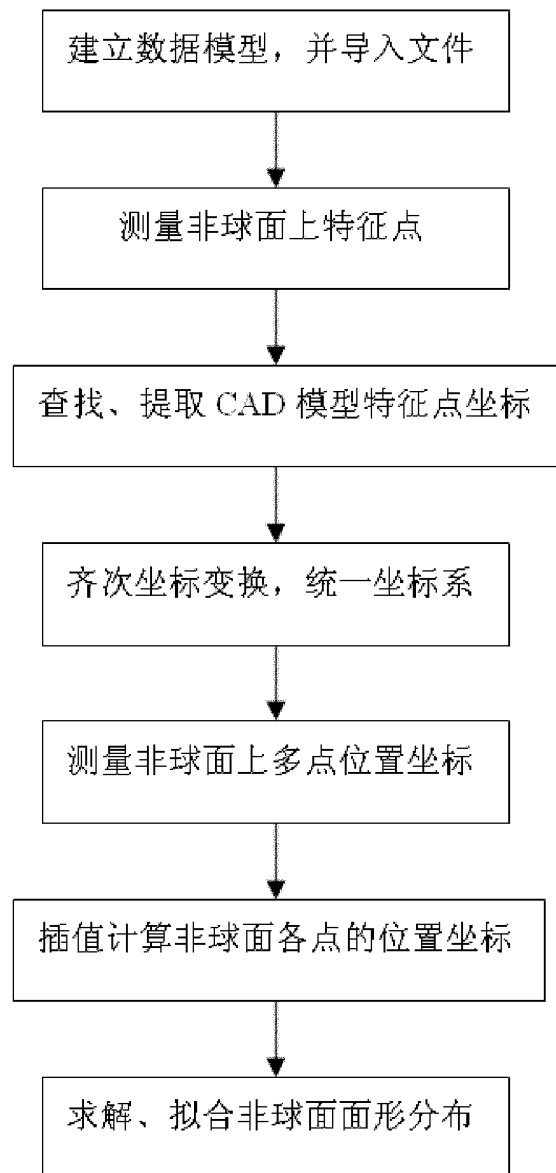


图 4