(19)中华人民共和国国家知识产权局

(12)发明专利

(10)授权公告号 CN 110375698 B
(45)授权公告日 2020.12.04

(21)申请号 201910785297.X

(22)申请日 2019.08.23

(65)同一申请的已公布的文献号
申请公布号 CN 110375698 A

(43)申请公布日 2019.10.25

(73)专利权人 河南科技大学
地址 471003 河南省洛阳市涧西区西苑路48号

(72)发明人 王笑一 张利杰

(74)专利代理机构 郑州睿信知识产权代理有限公司 41119
代理人 吴敏

(51)Int.Cl.
G01B 21/20(2006.01) (续)

(56)对比文件
CN 106403863 A,2017.02.15
CN 107063158 A,2017.08.18
CN 107843214 A,2018.03.27
CN 101419063 A,2009.04.29
CN 110044315 A,2019.07.23
CN 106289145 A,2017.01.04
CN 102032861 A,2011.04.27
CN 110095103 A,2019.08.06
CN 201166539 Y,2008.12.17
CN 101586952 A,2009.11.25
CN 205156826 U,2016.04.13
CN 107144212 A,2017.09.08
CN 104303009 A,2015.01.21
CN 101871767 A,2010.10.27
US 2014290082 A1,2014.10.02
US 4642902 A,1987.02.17
JP 2014130154 A,2014.07.10
JP 2017161252 A,2017.09.14 (续)

审查员 马煦

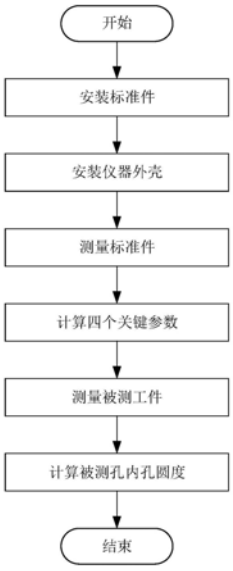
权利要求书2页 说明书7页 附图3页

(54)发明名称

基于参数辨识的内孔圆度在位测量方法

(57)摘要

本发明涉及基于参数辨识的内孔圆度在位测量方法，该方法通过获取标准内孔的采样数据，并根据关键参数、标准内孔圆心坐标和各采样点的角位移计算得到对应采样点的传感器读数的理论距离，得到关键参数的辨识值；根据该关键参数的辨识值对被测工件内孔中各采样点坐标进行最小二乘圆拟合，得到被测工件内孔的圆心坐标和半径，根据圆心坐标各采样点的坐标确定被测工件内孔圆度，该方法避免了安装过程中的精细度无法保证导致的关键参数不准确的现象，可根据实际情况实时调节，使得测量的准确度较高，解决现有技术在检测内圆孔时由于仪器本身的安装误差导致仪器参数识别不准确造成测量结果误差较大的问题。



CN 110375698 B

[转续页]

[接上页]

(51)Int.Cl.

G01B 11/24(2006.01)

G06F 17/15(2006.01)

(56)对比文件

史少杰.基于LabVIEW的新型在线圆度测量装置的研究.《中国优秀硕士学位论文全文数据库工程科技I辑》.2016,B022-830.

黄品松.基于计算机视觉检测的回转体圆度圆柱度检测方法研究与应用.《中国优秀硕士学位论文全文数据库工程科技I辑》.2011,B022-182.

李战 等.基于误差分离技术的圆度误差评定测量软件设计.《机械工程与自动化》.2018,(第3期),147-149.

钟亦林 等.基于改进三点测量法的圆径测量研究.《红外与激光工程》.2019,第48卷(第5期),209-214.

贾媛媛 等.辊筒模具圆度误差测量及补偿方法研究.《航空精密制造技术》.2018,第54卷(第3期),7-10、15.

曹诚.测量圆度方法的新探.《现代工业经济和信息化》.2019,(第1期),22-23、28.

1.一种基于参数辨识的内孔圆度在位测量方法,其特征在于,包括以下步骤:

1)采集数据:

通过主轴带动非接触式位移传感器在标准工件的内孔旋转至少一周,采集非接触式位移传感器在标准工件内孔的待测截面处的一组读数c_i,同时记录相应读数所对应位置处所述非接触式位移传感器的角位移θ_i,旋转过程中,保持非接触式位移传感器的转动轴线与标准工件的轴线平行;

通过主轴带动非接触式位移传感器在被测工件的内孔旋转至少一周,采集非接触式位移传感器在被测工件内孔一组读数d_i,同时记录相应读数d_i所对应位置处所述非接触式位移传感器的角位移β_i,旋转过程中,保持非接触式位移传感器的转动轴线与被测工件内孔的轴线平行;

2)处理数据:

建立非接触式位移传感器的理论测量值与非接触式位移传感器的偏置距、非接触式位移传感器的零示值距离、非接触式位移传感器的角位移、标准工件内孔中心和标准工件内孔半径的关系:

在所述待测截面上,以非接触式位移传感器的测量中心为A点,非接触式位移传感器的示值零点位置为C点,A点向主轴轴线作垂线,其交点为O点,以O点作为原点,建立X-O-Y坐标系,标准工件内孔的中心为H点即(X_H,Y_H),标准工件内孔半径为R,B为M个采样点中的任一个,线段OA为非接触式位移传感器的偏置距a,线段AC为非接触式位移传感器的零示值距离为b,线段CB的长度为理论距离c,θ_i为对应B点的角位移数据,则A、B和C点的坐标分别为:

$$\begin{cases} X_A(\theta_i,a)=a\cdot\cos(\theta_i) \\ Y_A(\theta_i,a)=a\cdot\sin(\theta_i) \end{cases}$$

$$\begin{cases} X_B(\theta_i,a,b,c)=a\cdot\cos(\theta_i)+(b+c)\cdot\cos(\theta_i-\pi/2) \\ Y_B(\theta_i,a,b,c)=a\cdot\sin(\theta_i)+(b+c)\cdot\sin(\theta_i-\pi/2) \end{cases}$$

$$\begin{cases} X_C(\theta_i,a,b)=a\cdot\cos(\theta_i)+b\cdot\cos(\theta_i-\pi/2) \\ Y_C(\theta_i,a,b)=a\cdot\sin(\theta_i)+c\cdot\sin(\theta_i-\pi/2) \end{cases}$$

B点的坐标还满足下式:

$$\begin{cases} (x-X_H)^2+(y-Y_H)^2=R^2 \\ (y-Y_A)=(x-X_A)\cdot\tan(\theta_i-\pi/2) \end{cases}$$

因此,B点的坐标标记为:

$$\begin{cases} X_B(\theta_i,a,\mathrm{b},X_H,Y_H,R) \\ Y_B(\theta_i,a,\mathrm{b},X_H,Y_H,R) \end{cases}$$

则理论距离即线段CB的长度为:

$$\hat{c}(\theta_i,a,b,X_H,Y_H,R)=\sqrt{(X_B-X_C)^2+(Y_B-Y_C)^2}\ ;$$

3)计算非接触式位移传感器的偏置距和非接触式位移传感器的零示值距离:

构建使标准工件内孔的所有采样点的非接触式位移传感器读数c_i与对应理论距离的差值之和最小的目标函数$\min f(a,b,X_H,Y_H)$，求解该函数得到非接触式位移传感器的偏置距、非接触式位移传感器的零示值距离：

其中，

$$f(a,b,X_H,Y_H)=\sum_{i=1}^{M}\left(\hat{c}(\theta_i,a,b,X_H,Y_H,R)-c_i\right)^2$$

限定方程为：

$|a-a_0|\leqslant\delta_a$

$|b-b_0|\leqslant\delta_b$

$$\left|X_H-X_{H0}\right|\leq\delta_{X_H}$$

$$\left|Y_H-Y_{H0}\right|\leq\delta_{Y_H}$$

式中，a_0、b_0、X_{H0}和Y_{H0}分别为非接触式位移传感器的偏置距，非接触式位移传感器的零示值距离、标准工件内孔圆心横坐标和纵坐标的估计值，δ_a、δ_b、δ_{X_H}、δ_{Y_H}分别为非接触式位移传感器的偏置距、非接触式位移传感器的零示值距离、标准工件内孔圆心横坐标和纵坐标的最大偏差值；

4)计算被测工件内孔圆度：

根据得到的非接触式位移传感器的偏置距、非接触式位移传感器的零示值距离、被测工件内孔一组读数d_i、角位移β_i确定被测工件内孔各采样点的坐标：

$$\begin{cases}X_{Bi}(\beta_i,a,b,d_i)=a\cdot\cos(\beta_i)+(b+d_i)\cdot\cos(\beta_i-\pi/2)\\ Y_{Bi}(\beta_i,a,b,d_i)=a\cdot\sin(\beta_i)+(b+d_i)\cdot\sin(\beta_i-\pi/2)\end{cases}$$

对各采样点坐标进行最小二乘圆拟合，得到被测工件内孔的圆心坐标和半径，根据圆心坐标各采样点的坐标确定被测工件内孔圆度。

2.根据权利要求1所述的基于参数辨识的内孔圆度在位测量方法，其特征在于，所述步骤3)中的非接触式位移传感器的偏置距，非接触式位移传感器的零示值距离、标准工件内孔圆心横坐标和纵坐标的估计值是通过测量尺直接测量得到。

3.根据权利要求1所述的基于参数辨识的内孔圆度在位测量方法，其特征在于，所述非接触式位移传感器的位移测量误差小于或者等于被测工件允许公差的1/5，所述非接触式位移传感器的量程大于或等于10mm。

4.根据权利要求1所述的基于参数辨识的内孔圆度在位测量方法，其特征在于，所述主轴的轴向跳动量≤被测工件端面允许公差的1/5、径向跳动量≤被测工件内孔允许公差的1/5。

基于参数辨识的内孔圆度在位测量方法

技术领域

[0001] 本发明涉及精密测试领域,特别是基于参数辨识的内孔圆度在位测量方法。

背景技术

[0002] 圆度测量是保证机械零件产品质量和使用性能的重要检测手段。圆度测量的基本原理是首先获取被测圆上一系列点的坐标,然后根据需要计算出这些点的最小二乘圆、最小区域圆、最大内接圆或最小外接圆的圆心坐标和对应的轮廓最大、最小半径等信息,最后按照产品几何量技术规范评定圆度误差的方法就可以计算出圆度误差值。

[0003] 传统的圆度误差测量方法均采用把工件放置在圆度仪或三坐标测量机的工作台上进行测量的方式,要想检测大型的零件就必须使用大型的仪器。但大规格的圆度仪和三坐标测量机价格昂贵,且只能固定放置在计量室中使用而不能随意搬动。这就带来生产实践中的两个问题:一是大型零件上的内孔圆度测量非常困难,一般的加工厂都没有检测手段,无从获取内孔圆度的关键数据;二是必须把被测件拆卸下来运到计量室才能测量,无法实现大型零件内孔圆度加工中的在机测量和维修中的在位测量。

[0004] 大型设备制造和维修中的内孔圆度检测是长期以来未能解决的关键难题。现有的大型设备制造和维修中的内孔圆度检测是通过检测仪器将传感器置于内圆孔中心轴上,并沿轴向旋转,在旋转过程中同步采集角位移数据和传感器的读数,对角位移数据和传感器的读数进行处理得到被测内孔的测量数据;但是在上述检测过程中,非接触式位移传感器的测量轴线必须与仪器主轴的回转轴线相交且垂直,而且圆度测量仪器主轴的回转轴线需要和被测内孔轴线同轴,这就对仪器在被测工件或基座上的安装位置精度提出了很高的要求;考虑到安装过程中的误差,检测仪器本身存在一定的安装误差,例如传感器不一定处于仪器的旋转轴上,而是存在一定的偏差值,非接触式位移传感器与旋转轴的偏置安装导致了偏置距的存在,而选用的非接触式位移传感器由于测量原理的不同,可能存在零示值距离,因此实际测量的距离应该为传感器读数与零示值距离的和,由于偏置距和零示值距离等偏差值的存在会造成测量结果的误差增大,因此就需要求出包括传感器偏差值在内的仪器参数,从而对测量值进行调整。

发明内容

[0005] 本发明的目的是提供一种基于参数辨识的内孔圆度在位测量方法,用以解决现有技术在检测内圆孔时由于仪器本身的安装误差导致仪器参数识别不准确造成测量结果误差较大的问题。

[0006] 为了实现上述目的,本发明提供一种基于参数辨识的内孔圆度在位测量方法,包括以下步骤:

[0007] 1)采集数据:

[0008] 通过主轴带动非接触式位移传感器在标准工件的内孔旋转至少一周,采集非接触式位移传感器在标准工件内孔的待测截面处的一组读数c_i,同时记录相应读数所对应位置

处所述非接触式位移传感器的角位移θ_i，旋转过程中，保持非接触式位移传感器的转动轴线与标准工件的轴线平行；

[0009] 通过主轴带动非接触式位移传感器在被测工件的内孔旋转至少一周，采集非接触式位移传感器在被测工件内孔一组读数d_i，同时记录相应读数d_i所对应位置处所述非接触式位移传感器的角位移β_i，旋转过程中，保持非接触式位移传感器的转动轴线与被测工件内孔的轴线平行；

[0010] 2)处理数据：

[0011] 建立非接触式位移传感器的理论测量值与非接触式位移传感器的偏置距、非接触式位移传感器的零示值距离、非接触式位移传感器的角位移、标准工件内孔中心和标准工件内孔半径的关系：

[0012] 在所述待测截面上，以非接触式位移传感器的测量中心为A点，非接触式位移传感器的示值零点位置为C点，A点向主轴轴线作垂线，其交点为O点，以O点作为原点，建立X-O-Y坐标系，标准工件内孔的中心为H点即(X_H,Y_H)，标准工件内孔半径为R，B为M个采样点中的任一个，线段OA为非接触式位移传感器的偏置距a，线段AC为非接触式位移传感器的零示值距离为b，线段CB的长度为理论距离c，θ_i为对应B点的角位移数据，则A、B和C点的坐标分别为：

[0013] $$\begin{cases} X_A(\theta_i,a)=a\cdot\cos(\theta_i) \\ Y_A(\theta_i,a)=a\cdot\sin(\theta_i) \end{cases}$$

[0014] $$\begin{cases} X_B(\theta_i,a,b,c)=a\cdot\cos(\theta_i)+(b+c)\cdot\cos(\theta_i-\pi/2) \\ Y_B(\theta_i,a,b,c)=a\cdot\sin(\theta_i)+(b+c)\cdot\sin(\theta_i-\pi/2) \end{cases}$$

[0015] $$\begin{cases} X_C(\theta_i,a,b)=a\cdot\cos(\theta_i)+b\cdot\cos(\theta_i-\pi/2) \\ Y_C(\theta_i,a,b)=a\cdot\sin(\theta_i)+c\cdot\sin(\theta_i-\pi/2) \end{cases}$$

[0016] B点的坐标还满足下式：

[0017] $$\begin{cases} (x-X_H)^2+(y-Y_H)^2=R^2 \\ (y-Y_A)=(x-X_A)\cdot\tan(\theta_i-\pi/2) \end{cases}$$

[0018] 因此，B点的坐标标记为：

[0019] $$\begin{cases} X_B(\theta_i,a,\mathrm{b},X_H,Y_H,R) \\ Y_B(\theta_i,a,\mathrm{b},X_H,Y_H,R) \end{cases}$$

[0020] 则理论距离即线段CB的长度为：

[0021] $$\hat{c}(\theta_i,a,b,X_H,Y_H,R)=\sqrt{(X_B-X_C)^2+(Y_B-Y_C)^2}\ ;$$

[0022] 3)计算非接触式位移传感器的偏置距和非接触式位移传感器的零示值距离：

[0023] 构建使标准工件内孔的所有采样点的非接触式位移传感器读数c_i与对应理论距离的差值之和最小的目标函数$\min f(a,b,X_H,Y_H)$，求解该函数得到非接触式位移传感器的偏置距、非接触式位移传感器的零示值距离：

[0024] 其中，

[0025] $$f(a,b,X_H,Y_H)=\sum_{i=1}^{M}\left(\hat{c}(\theta_i,a,b,X_H,Y_H,R)-c_i\right)^2$$

[0026] 限定方程为：

[0027] $|a-a_0|\leqslant\delta_a$

[0028] $|b-b_0|\leqslant\delta_b$

[0029] $\left|X_H-X_{H0}\right|\leq\delta_{X_H}$

[0030] $\left|Y_H-Y_{H0}\right|\leq\delta_{Y_H}$

[0031] 式中，a_0、b_0、X_{H0}和Y_{H0}分别为非接触式位移传感器的偏置距，非接触式位移传感器的零示值距离、标准工件内孔圆心横坐标和纵坐标的估计值，δ_a、δ_b、δ_{X_H} 、 δ_{Y_H}分别为非接触式位移传感器的偏置距、非接触式位移传感器的零示值距离、标准工件内孔圆心横坐标和纵坐标的最大偏差值；

[0032] 4)计算被测工件内孔圆度：

[0033] 根据得到的非接触式位移传感器的偏置距、非接触式位移传感器的零示值距离、被测工件内孔一组读数d_i、角位移β_i确定被测工件内孔各采样点的坐标：

[0034] $$\begin{cases}X_{Bi}(\beta_i,a,b,d_i)=a\cdot\cos(\beta_i)+(b+d_i)\cdot\cos(\beta_i-\pi/2)\\Y_{Bi}(\beta_i,a,b,d_i)=a\cdot\sin(\beta_i)+(b+d_i)\cdot\sin(\beta_i-\pi/2)\end{cases}$$

[0035] 对各采样点坐标进行最小二乘圆拟合，得到被测工件内孔的圆心坐标和半径，根据圆心坐标各采样点的坐标确定被测工件内孔圆度。

[0036] 有益效果是，根据理论距离与传感器读数进行关键参数的辨识，避免了安装过程中的精细度无法保证导致的关键参数不准确的现象，可根据实际情况实时调节，使得测量的准确度较高，解决现有技术在检测内圆孔时由于仪器本身的安装误差导致仪器参数识别不准确造成测量结果误差较大的问题。

[0037] 进一步地，为了得到更精准的数据，所述步骤3)中的非接触式位移传感器的偏置距、非接触式位移传感器的零示值距离、标准工件内孔圆心横坐标和纵坐标的估计值是通过测量尺直接测量得到。

[0038] 进一步地，为了保证测量的精度，所述非接触式位移传感器的位移测量误差小于或者等于被测工件允许公差的1/5，所述非接触式位移传感器的量程大于或等于10mm。

[0039] 进一步地，为了保证测量的精度，所述主轴的轴向跳动量≤被测工件端面允许公差的1/5、径向跳动量≤被测工件内孔允许公差的1/5。

附图说明

[0040] 图1是本发明的一种基于参数辨识的内孔圆度在位测量装置的结构示意图；

[0041] 图2是本发明的一种基于参数辨识的内孔圆度在位测量方法的流程图；

[0042] 图3是本发明的测量装置与内圆孔的关系原理图；

[0043] 图4是本发明的一种基于参数辨识的内孔圆度在位测量方法的使用示意图；

[0044] 图中，1为仪器外壳，2为仪器主轴，3为传感器支架，4为非接触式位移传感器，5为标准工件，6为被测工件。

具体实施方式

[0045] 下面结合附图对本发明做进一步详细的说明。

[0046] 本发明提供一种基于参数辨识的内孔圆度在位测量方法，该测量方法可以同一种基于参数辨识的内孔圆度在位测量装置实现，如图1和图4所示，该测量装置包括机械系统和控制系统，机械系统包括仪器外壳1、仪器主轴2、传感器支架3和非接触式位移传感器4，传感器支架3设置在仪器主轴2的外端，该传感器支架3上安装有非接触式位移传感器4；控制系统包括Z轴电机驱动系统、C轴电机驱动系统、传感器信号采集系统和处理器。

[0047] 处理器运行测量过程控制软件通过Z轴电机驱动系统控制相应的电机实现仪器主轴2的轴向运动即Z轴运动，并且处理器运行测量过程控制软件通过C轴电机驱动系统控制相应的电机实现仪器主轴2的周向运动即C轴运动，仪器主轴2的回转精度很高，例如，要满足轴向跳动量≤被测工件端面允许公差的1/5、径向跳动量≤被测工件内孔允许公差的1/5等要求。

[0048] 传感器信号采集系统用于采集仪器主轴沿Z轴方向的直线位移信号、仪器主轴带动非接触式位移传感器沿C轴方向旋转时的非接触式位移传感器读数信号以及与各读数信号对应的沿C轴方向的角位移信号，处理器运行测量过程处理软件实现对上述各信号的处理，从而计算出待测内孔的尺寸、位置和圆度信息。

[0049] 非接触式位移传感器4基于非接触式测量原理，可选用基恩士公司型号为IL-S025的CMOS激光位移传感器，其重复精度为1μm，当测量直径≥120mm且精度不高于IT4级的孔时，其位移测量误差≤被测零件允许公差的1/5，且具有大于或等于10mm的量程。非接触式位移传感器4具有固定的死程量，传感器读数为零时实际上是有一个固定的检测距离的，即为零示值距离，这个固定的检测距离就是死程量；即传感器读数不是实测距离，传感器读数加上死程量等于实测距离。

[0050] 上述测量装置在使用时采用基于参数辨识的内孔圆度在位测量方法，在测量过程中，可以根据测量数据精确计算出非接触式位移传感器4在仪器主轴2上的安装位置偏差和仪器主轴2与被测内孔轴线之间的相对位置偏差等四个关键系统参数，从而不再需要精确调整传感器在仪器主轴2上的安装位置和仪器主轴2相对于被测内孔轴线的相对位置。如图2所示，包括采集数据、处理数据、计算关键参数和计算被测工件内孔圆度，具体方法包括以下步骤：

[0051] 1)采集数据包括对标准工件的数据采集和对被测工件的数据采集：

[0052] 通过主轴带动非接触式位移传感器在标准工件的内孔旋转至少一周，采集非接触式位移传感器在标准工件内孔的待测截面处的一组读数c_i，同时记录相应读数所对应位置处所述非接触式位移传感器的角位移θ_i，旋转过程中，保持非接触式位移传感器的转动轴线与标准工件的轴线平行。

[0053] 通过主轴带动非接触式位移传感器在被测工件的内孔旋转至少一周，采集非接触式位移传感器在被测工件内孔一组读数d_i，同时记录相应读数d_i所对应位置处所述非接触式位移传感器的角位移β_i，旋转过程中，保持非接触式位移传感器的转动轴线与被测工件内孔的轴线平行。

[0054] 2)对采集的标准工件的数据进行处理：

[0055] 建立非接触式位移传感器的理论测量值与非接触式位移传感器的偏置距、非接触

式位移传感器的零示值距离、非接触式位移传感器的角位移、标准工件内孔中心和标准工件内孔半径的关系：

[0056] 在待测截面上，如图3所示，以非接触式位移传感器的测量中心为A点，非接触式位移传感器的示值零点位置为C点，A点向主轴轴线作垂线，其交点为O点，以O点作为原点，建立X-O-Y坐标系，标准工件内孔的中心为H点即(X_H,Y_H)，标准工件内孔半径为R，B为M个采样点中的任一个，线段OA为非接触式位移传感器的偏置距a，线段AC为非接触式位移传感器的零示值距离为b，线段CB的长度为理论距离c，θ_i为对应B点的角位移数据，则A、B和C点的坐标分别为：

[0057] $$\begin{cases} X_A(\theta_i,a)=a\cdot\cos(\theta_i) \\ Y_A(\theta_i,a)=a\cdot\sin(\theta_i) \end{cases}$$

[0058] $$\begin{cases} X_B(\theta_i,a,b,c)=a\cdot\cos(\theta_i)+(b+c)\cdot\cos(\theta_i-\pi/2) \\ Y_B(\theta_i,a,b,c)=a\cdot\sin(\theta_i)+(b+c)\cdot\sin(\theta_i-\pi/2) \end{cases}$$

[0059] $$\begin{cases} X_C(\theta_i,a,b)=a\cdot\cos(\theta_i)+b\cdot\cos(\theta_i-\pi/2) \\ Y_C(\theta_i,a,b)=a\cdot\sin(\theta_i)+c\cdot\sin(\theta_i-\pi/2) \end{cases}$$

[0060] B点的坐标还满足下式：

[0061] $$\begin{cases} (x-X_H)^2+(y-Y_H)^2=R^2 \\ (y-Y_A)=(x-X_A)\cdot\tan(\theta_i-\pi/2) \end{cases}$$

[0062] 因此，B点的坐标标记为：

[0063] $$\begin{cases} X_B(\theta_i,a,\mathrm{b},X_H,Y_H,R) \\ Y_B(\theta_i,a,\mathrm{b},X_H,Y_H,R) \end{cases}$$

[0064] 则理论距离即线段CB的长度为：

[0065] $$\hat{c}(\theta_i,a,b,X_H,Y_H,R)=\sqrt{(X_B-X_C)^2+(Y_B-Y_C)^2}\ 。$$

[0066] 3)计算关键参数即计算非接触式位移传感器的偏置距和非接触式位移传感器的零示值距离：

[0067] 构建使标准工件内孔的所有采样点的非接触式位移传感器读数c_i与对应理论距离的差值之和最小的目标函数min f(a,b,X_H,Y_H)，求解该函数得到非接触式位移传感器的偏置距、非接触式位移传感器的零示值距离：

[0068] 其中，

[0069] $$f(a,b,X_H,Y_H)=\sum_{i=1}^{M}\left(\hat{c}(\theta_i,a,b,X_H,Y_H,R)-c_i\right)^2$$

[0070] 限定方程为：

[0071] $|a-a_0|\leqslant\delta_a$

[0072] $|b-b_0|\leqslant\delta_b$

[0073] $$\left|X_H - X_{H0}\right| \le \delta_{X_H}$$

[0074] $$\left|Y_H - Y_{H0}\right| \le \delta_{Y_H}$$

[0075] 式中，a_0、b_0、X_{H0}和Y_{H0}分别为非接触式位移传感器的偏置距，非接触式位移传感器的零示值距离、标准工件内孔圆心横坐标和纵坐标的估计值，δ_a、δ_b、δ_{X_H}、δ_{Y_H}分别为非接触式位移传感器的偏置距、非接触式位移传感器的零示值距离、标准工件内孔圆心横坐标和纵坐标的最大偏差值。

[0076] a_0、b_0、X_{H0}和Y_{H0}为使用测量尺测量得到，例如卷尺或卡尺，以此将最小的过程限制在一定范围内，便于计算。用通用的数学方法求解$f(a,b,X_H,Y_H)$最小，即可得到四个关键参数a、b、X_H、Y_H的精确值。

[0077] 4)计算被测工件内孔圆度：

[0078] 根据得到的非接触式位移传感器的偏置距、非接触式位移传感器的零示值距离、被测工件内孔一组读数d_i、角位移β_i确定被测工件内孔各采样点的坐标：

[0079] $$\begin{cases} X_{Bi}(\beta_i,a,b,d_i)=a\cdot\cos(\beta_i)+(b+d_i)\cdot\cos(\beta_i-\pi/2) \\ Y_{Bi}(\beta_i,a,b,d_i)=a\cdot\sin(\beta_i)+(b+d_i)\cdot\sin(\beta_i-\pi/2) \end{cases}$$

[0080] 对各采样点坐标进行最小二乘圆拟合，得到被测工件内孔的圆心坐标和半径，根据圆心坐标各采样点的坐标确定被测工件内孔圆度。

[0081] 为了得到更精准的数据，当非接触式位移传感器沿轴向旋转一周以上时，对采样点相同的多个传感器读数求平均值得到该采样点的采样数据。非接触式位移传感器每一次旋转的角度可以均相等，也可以不等，但为了更好的计算，采用相邻采样点与回转中心O点构成的各夹角均相等，在内孔圆度测量过程中，仪器主轴2每旋转一定角度，同步采集一次仪器主轴2的角位置和非接触式位移传感器4的读数。在测量中，采集和记录仪器主轴2在各个角位置处的传感器读数，记为c_i，i＝1，2，…，n，其中n为总采样点数。假设本次测量中，每间隔1°采集一次数据，在整个圆周可采样360次，即n＝360，可获取的数据如表1所示。

[0082] 表1

[0083]

序号	角位移θ_i(°)	传感器读数c_i(mm)
1	0	15.001
2	1	14.875
……	……	……
360	359	14.999

[0084] 由于内孔圆度在位测量仪器的四个关键参数的精确值已经在步骤(4)中得到，通过B点的坐标标记公式：

[0085] $$\begin{cases} X_B(\theta,a,\mathrm{b},X_H,Y_H,R) \\ Y_B(\theta,a,\mathrm{b},X_H,Y_H,R) \end{cases},$$

[0086] 就可以计算出被测工件孔的数据构成的表2中每一组数据(β_i,d_i)对应的孔表面的一点在仪器坐标系X-O-Y中的坐标：

[0087] $$\begin{cases} X_{Bi}(\beta_i,a,b,d_i)=a\cdot\cos(\beta_i)+(b+d_i)\cdot\cos(\beta_i-\pi/2) \\ Y_{Bi}(\beta_i,a,b,d_i)=a\cdot\sin(\beta_i)+(b+d_i)\cdot\sin(\beta_i-\pi/2) \end{cases}$$

[0088] 如图4所示，通过对标准工件1进行测量，标定出关键参数，然后对被测工件6进行测量，实现被测工件的内圆孔的测量。由上式得到的坐标系X-O-Y中360个被测点的位置后，获取的N个数据可以看作是极坐标下的N个被测点的位置坐标，采用通用的圆度误差计算方法就可以拟合出这些点的最小二乘圆的圆心坐标，例如最小二乘法。从最小二乘圆的圆心出发，可以计算出每个被测点到该圆心的距离，这些距离值中的最大值-最小值即为按照最小二乘圆圆心计算出的被测内孔圆度误差。类似的，参照上述数据处理过程也可以获得按照最小区域圆、最大内接圆或最小外接圆的圆心计算出的圆度误差。

[0089] 表2

[0090]

序号	角位移β_i(°)	传感器读数d_i(mm)
1	0	15.005
2	1	15.001
……	……	……
360	359	14.994

[0091] 至此，基于四个关键参数辨识，实现了在非接触式位移传感器的安装位置存在较大偏差、仪器主轴和被测孔的同心度存在较大偏差的条件下对被测孔圆度等信息的精确在位测量。使用本发明提出的方法极大减轻了测量系统安装找正的工作量，可在保证测量精度的前提下显著提高内孔圆度在位测量的效率。

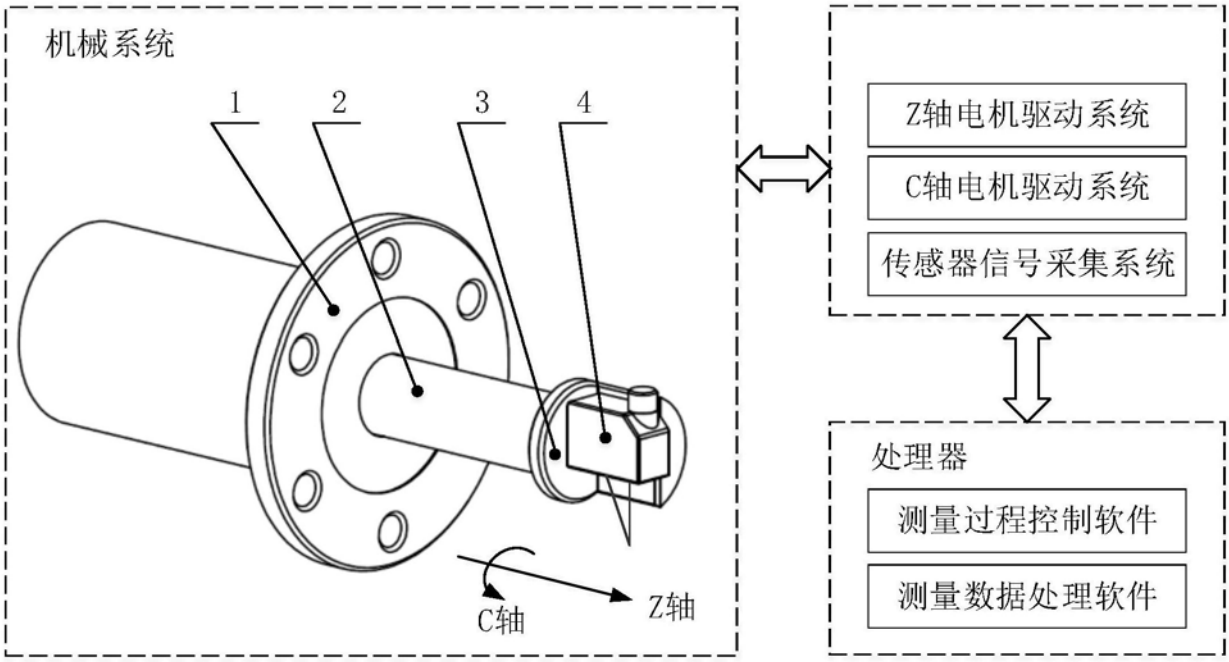

机械系统
1
2
3
4
C轴
Z轴
Z轴电机驱动系统
C轴电机驱动系统
传感器信号采集系统
处理器
测量过程控制软件
测量数据处理软件

图1

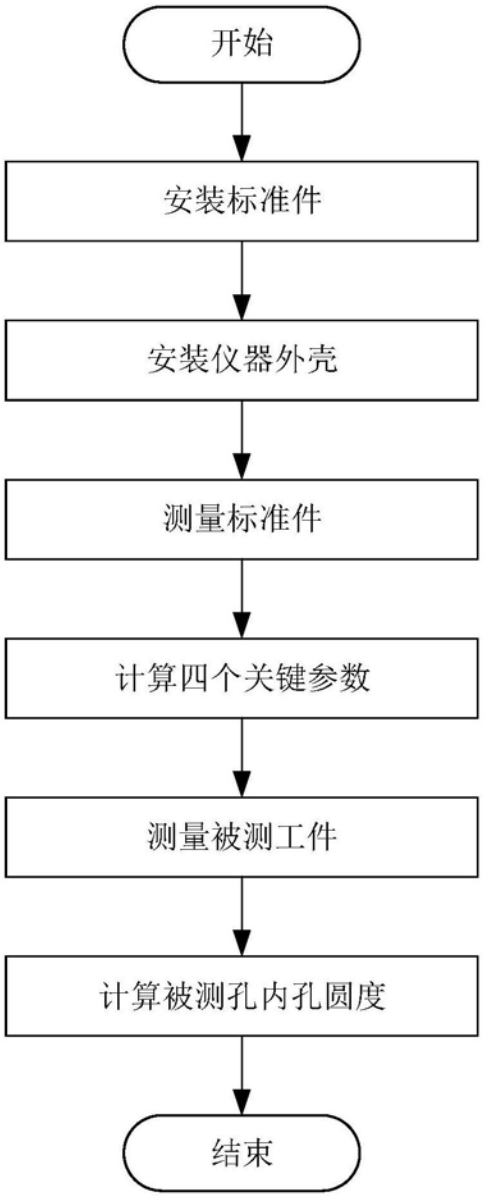


图2

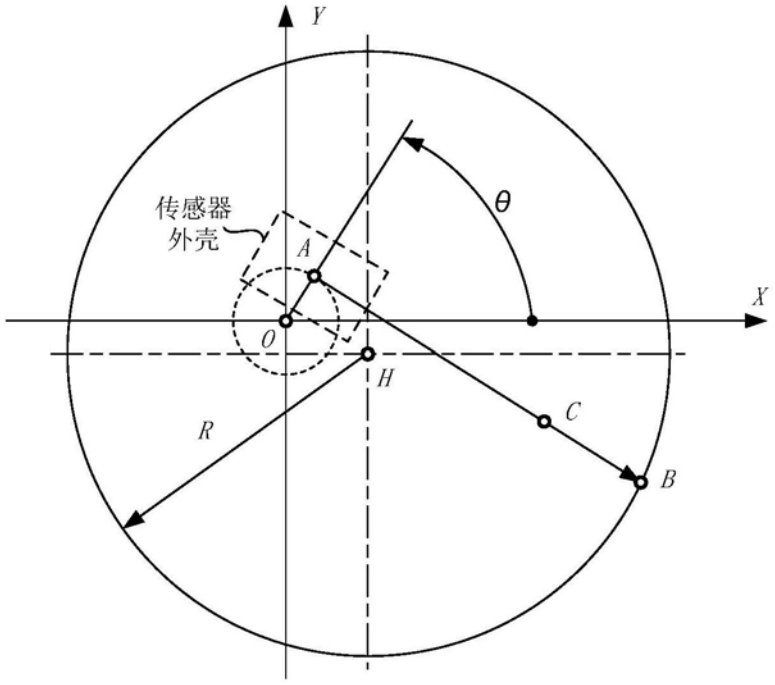


图3

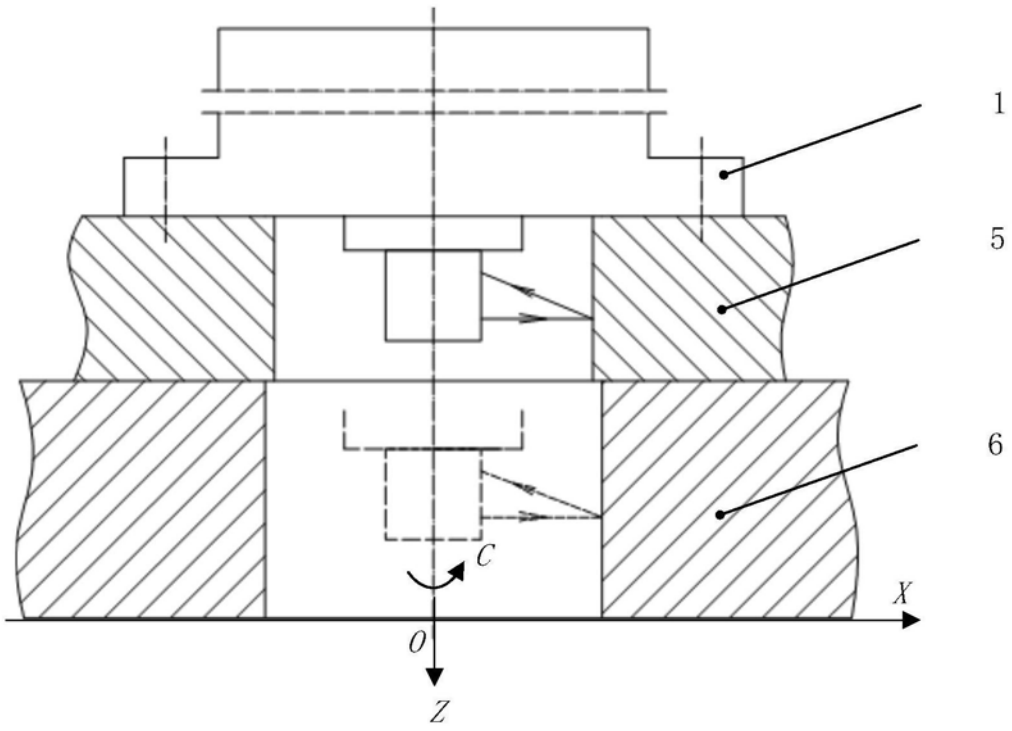


图4