

(12) 发明专利

(10) 授权公告号 CN 102147331 B

(45) 授权公告日 2012.09.05

(21) 申请号 201010558636.X

CN 101191723 A, 2008.06.04, 全文.

(22) 申请日 2010.11.25

CN 101893430 A, 2010.11.24, 全文.

(73) 专利权人 哈尔滨工业大学

卢春霞等. 偏心圆齿轮齿形误差的测量.《西安工业学院学报》. 1999, 第 19 卷 (第 01 期), 第 71-74 页.

地址 150001 黑龙江省哈尔滨市南岗区西大
直街 92 号刘江省. 定位偏心状态下基于二分法的齿廓
测量算法.《机械工程师》. 2009, (第 04 期), 第
61-62 页.

(72) 发明人 唐文彦 韩连福 马强

王立鼎等. 超精密渐开线齿形的测量方

(74) 专利代理机构 哈尔滨市松花江专利商标事
务所 23109法.《光学精密工程》. 2006, 第 14 卷 (第 06 期),
第 980-985 页.

代理人 牟永林

审查员 李蓓

(51) Int. Cl.

G01M 13/02(2006.01)

G01B 7/312(2006.01)

G01B 7/28(2006.01)

(56) 对比文件

CN 85102882 A, 1987.01.14, 全文.

权利要求书 2 页 说明书 8 页 附图 5 页

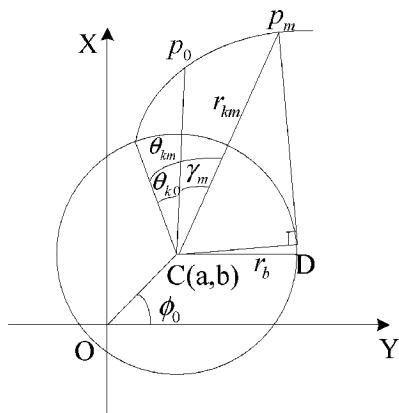
(54) 发明名称

基于 CNC 齿轮测量中心的装卡偏心误差补偿

方法

(57) 摘要

基于 CNC 齿轮测量中心的装卡偏心误差补偿方法, 属于测量技术领域。它解决了现有齿轮测量的过程中, 由于齿轮的几何中心偏离仪器回转中心而影响测量精度的问题。它首先建立工件坐标系和仪器坐标系; 由偏心测量状态下两个坐标系间的转换关系获得装卡偏心矢量的表达式; 设定待测工件初始偏心参数, 获得工件坐标系的原点偏离仪器坐标系的原点的极角的表达式; 在装卡偏心测量的状态下, 建立两个坐标系原点的转换关系; 将待测工件的测量值转换成在仪器坐标系中的空间坐标值; 计算待测工件的初始偏心参数值; 计算装卡偏心矢量值; 对测量值进行补偿并用于误差评定。本发明用于齿轮测量的过程中的 CN 误差补偿。



1. 一种基于 CNC 齿轮测量中心的装卡偏心误差补偿方法, 其特征在于: 它包括以下步骤:

步骤一: 将待测工件装卡在 CNC 齿轮测量中心的测量位置上, 以待测工件的几何中心作为原点建立工件坐标系, 并使工件坐标系和仪器坐标系的 X 轴、Y 轴及 Z 轴的方向相同; 所述仪器坐标系为 CNC 齿轮测量中心的坐标系;

步骤二: 计算理想测量状态下仪器坐标系与工件坐标系之间的转换关系;

步骤三: 计算偏心测量状态下仪器坐标系与工件坐标系之间的转换关系, 获得装卡偏心矢量的表达式;

步骤四: 设定待测工件的初始偏心参数, 获得工件坐标系的原点偏离仪器坐标系的原点的极角的表达式;

步骤五: 计算在待测工件装卡偏心测量的状态下, 工件坐标系的原点在仪器坐标系中的表达式, 并建立仪器坐标系原点与工件坐标系原点之间的转换关系;

步骤六: 通过 CNC 齿轮测量中心对待测工件进行测量, 获得待测工件的渐开线齿廓测量值, 并对该渐开线齿廓测量值进行转换, 获得渐开线齿廓测量值在仪器坐标系中的空间坐标值;

步骤七: 由渐开线齿廓测量值在仪器坐标系中的空间坐标值, 计算待测工件的初始偏心参数值;

步骤八: 由初始偏心参数值计算获得装卡偏心矢量值;

步骤九: 根据装卡偏心矢量建立含装卡偏心矢量的误差补偿模型, 并用于待测工件渐开线齿廓的误差评定; 同时根据装卡偏心矢量调整待测工件的齿距的测量轨迹和待测工件的螺旋线的测量轨迹;

所述步骤二中理想测量状态为: 将仪器坐标系的原点沿其 Z 轴方向平移获得的坐标系原点, 作为工件坐标系原点;

所述理想测量状态下仪器坐标系与工件坐标系之间的转换关系式为:

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_0 \\ y_0 \\ z_0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ c \end{bmatrix},$$

其中 x, y, z 为空间某一点在仪器坐标系中的坐标, x_0, y_0, z_0 为所述空间某一点在工件坐标系中的坐标, c 为理想测量状态下工件坐标系原点在仪器坐标系中的 Z 轴坐标值。

2. 根据权利要求 1 所述的基于 CNC 齿轮测量中心的装卡偏心误差补偿方法, 其特征在于: 步骤三中所述偏心测量状态下仪器坐标系与工件坐标系之间的转换关系式为:

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_0 \\ y_0 \\ z_0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ c \end{bmatrix} + \beta,$$

式中 β 为装卡偏心矢量, 其表达式为:

$$\beta = \begin{bmatrix} a_i \\ b_i \\ 0 \end{bmatrix}, \text{ 式中 } a_i, b_i \text{ 分别为偏心测量状态下, 工件坐标系原点在仪器坐标系中的 X 轴、}$$

Y 轴坐标值。

3. 根据权利要求 2 所述的基于 CNC 齿轮测量中心的装卡偏心误差补偿方法, 其特征在于: 步骤四中所述设定待测工件的初始偏心参数为: 电感测头接触到待测工件的第一个待测齿时的装卡偏心量大小 e 和偏心角 ϕ_0 , 装卡偏心量大小 e 为工件坐标系原点与仪器坐标系原点之间的距离, 偏心角 ϕ_0 为工件坐标系原点与仪器坐标系原点之间的连线与 X 轴的夹角; 当所述齿轮测量中心的主轴转过角度 θ_i 后, 工件坐标系的原点偏离仪器坐标系的原点的极角 ϕ_i 的表达式如下:

$$\phi_i = \phi_0 + \theta_i$$

4. 根据权利要求 3 所述的基于 CNC 齿轮测量中心的装卡偏心误差补偿方法, 其特征在于: 步骤五中所述在待测工件装卡偏心测量的状态下, 工件坐标系的原点在仪器坐标系中的表达式为:

$$\begin{cases} a_i = e \cos \phi_i = e \cos(\phi_0 + \theta_i) \\ b_i = e \sin \phi_i = e \sin(\phi_0 + \theta_i) \\ c_i = c \end{cases}, \text{其中 } c_i \text{ 为工件坐标系原点在仪器坐标系中的 Z 轴坐标值;}$$

建立仪器坐标系原点与工件坐标系原点之间的转换关系式为:

$$\begin{bmatrix} x_{0i} \\ y_{0i} \\ z_{0i} \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & -a_i \\ 0 & 1 & 0 & -b_i \\ 0 & 0 & 1 & -c_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_i \\ y_i \\ z_i \\ 1 \end{bmatrix} = N \begin{bmatrix} x_i \\ y_i \\ z_i \\ 1 \end{bmatrix},$$

式中 N 为仪器坐标系与工件坐标系原点转换实时向量, x_{0i} , y_{0i} , z_{0i} 为空间某一点在工件坐标系中的坐标值, x_i , y_i , z_i 为空间某一点在仪器坐标系中的坐标值。

5. 根据权利要求 4 所述的基于 CNC 齿轮测量中心的装卡偏心误差补偿方法, 其特征在于: 所述步骤六中待测工件的渐开线齿廓测量值表示为:

$$PMValue_i(g_{xi}+p_{xi}, g_{yi}+p_{yi}, g_{zi}+p_{zi}, \theta_i),$$

其中 i 为测量点的序号, g_{xi} 、 g_{yi} 、 g_{zi} 为齿轮测量中心的光栅在 X、Y、Z 方向的三路示值, p_{xi} 、 p_{yi} 、 p_{zi} 为齿轮测量中心的电感测头在 X、Y、Z 方向的三个读数, θ_i 是齿轮测量中心的主轴旋转角度;

步骤六中所述获得渐开线齿廓测量值在仪器坐标系中的空间坐标值的方法为: 将 $PMValue_i(g_{xi}+p_{xi}, g_{yi}+p_{yi}, g_{zi}+p_{zi}, \theta_i)$ 根据电子展成法原理进行转换, 获得渐开线齿廓在仪器坐标系中的空间坐标值的表达式为:

$$\begin{bmatrix} x_i \\ y_i \\ z_i \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \phi_i & -\sin \phi_i & 0 & 0 \\ \sin \phi_i & \cos \phi_i & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} g_{xi} + p_{xi}, \\ g_{yi} + p_{yi}, \\ g_{zi} + p_{zi}, \\ 1 \end{bmatrix} = M \begin{bmatrix} g_{xi} + p_{xi}, \\ g_{yi} + p_{yi}, \\ g_{zi} + p_{zi}, \\ 1 \end{bmatrix},$$

其中 M 为电子展成转换矩阵。

基于 CNC 齿轮测量中心的装卡偏心误差补偿方法

技术领域

[0001] 本发明涉及一种基于 CNC 齿轮测量中心的装卡偏心误差补偿方法, 属于测量技术领域。

背景技术

[0002] CNC 齿轮测量中心 (Computerized Numerical Control Gear Measuring Center) 作为一种高效的新型精密测量仪器, 是齿轮测量技术从古典的手动方式向现代化自动测试技术过渡的一个里程碑。它的测量原理为电子展成法, 测量的过程中要求被测工件被装卡在仪器理想的位置上, 也就是要求被测工件的几何中心和仪器的回转中心重合。在实际的装卡过程中, 往往采用手动装卡或者手动加精度较低的测量仪器辅助装卡, 由于测量仪器精度和人工手动微进给能力的限制, 导致出现齿轮的几何中心偏离仪器回转中心的现象, 这种由于装卡造成的偏心叫装卡偏心, 由此引起的误差叫装卡偏心误差。

[0003] 在齿轮测量的过程中, 装卡偏心误差是影响测量精度的一个重要的因素, 这在无轴中小模数齿轮和大齿轮的测量过程中尤为明显。在无轴中小模数齿轮的装卡中, 通常采用手动辅以精度较低的千分表进行装卡, 由于千分表的精度和人工手动微进给能力的限制, 很难将工件的几何中心调整到与仪器的回转中心重合; 在大齿轮的测量过程中, 由于大齿轮的直径大、体积大及重量大, 有的会重达几十吨, 在测量的过程中更难调整其装卡位置。然而随着科学技术的进步, 对齿轮测量精度的要求却越来越高, 这也就迫使被测工件的装卡精度提高。一方面, 由于人工微进给能力的限制, 装卡精度不可能无限制的提高; 另一方面, 要想提高装卡精度必然造成安装时间的增加, 大大降低了安装效率, 进而降低了测量效率、提高了测量成本。

发明内容

[0004] 本发明的目的是为了解决现有齿轮测量的过程中, 由于齿轮的几何中心偏离仪器回转中心而影响测量精度的问题, 提供一种基于 CNC 齿轮测量中心的装卡偏心误差补偿方法。

[0005] 本发明包括以下步骤:

[0006] 步骤一: 将待测工件装卡在 CNC 齿轮测量中心的测量位置上, 以待测工件的几何中心作为原点建立工件坐标系, 并使工件坐标系和仪器坐标系的 X 轴、Y 轴及 Z 轴的方向相同; 所述仪器坐标系为 CNC 齿轮测量中心的坐标系;

[0007] 步骤二: 计算理想测量状态下仪器坐标系与工件坐标系之间的转换关系;

[0008] 步骤三: 计算偏心测量状态下仪器坐标系与工件坐标系之间的转换关系, 获得装卡偏心矢量的表达式;

[0009] 步骤四: 设定待测工件的初始偏心参数, 获得工件坐标系的原点偏离仪器坐标系的原点的极角的表达式;

[0010] 步骤五: 计算在待测工件装卡偏心测量的状态下, 工件坐标系的原点在仪器坐标

系中的表达式，并建立仪器坐标系原点与工件坐标系原点之间的转换关系；

[0011] 步骤六：通过 CNC 齿轮测量中心对待测工件进行测量，获得待测工件的渐开线齿廓测量值，并对该渐开线齿廓测量值进行转换，获得渐开线齿廓测量值在仪器坐标系中的空间坐标值；

[0012] 步骤七：由渐开线齿廓测量值在仪器坐标系中的空间坐标值，计算待测工件的初始偏心参数值；

[0013] 步骤八：由初始偏心参数值计算获得装卡偏心矢量值；

[0014] 步骤九：根据装卡偏心矢量建立含装卡偏心矢量的误差补偿模型，并用于被测齿轮渐开线齿廓的误差评定；同时根据装卡偏心矢量调整待测工件的齿距的测量轨迹和待测工件的螺旋线的测量轨迹。

[0015] 本发明的优点是：本发明采用误差分离技术实现了 CNC 齿轮测量中心装卡偏心参数的分离，实现了 CNC 齿轮测量中心装卡偏心误差的自动补偿，不仅极大的提高了应用 CNC 齿轮测量中心进行齿轮测量的准确性，而且降低了装卡精度的要求，大大的提高了测量效率。它对于提高齿轮误差评定的准确性、实现齿轮的高精度测量和降低被测工件装卡精度的要求有着重要的意义。

[0016] 本发明能够通过测量值的自动补偿实现待测工件的精密测量；并降低对装卡精度的要求，提高工作效率。

附图说明

[0017] 图 1 为实施方式七中求解初始偏心参数值的示意图；

[0018] 图 2 为待测工件装卡偏心测量状态下工件坐标系原点与仪器坐标系原点之间的转换关系示意图；

[0019] 图 3 为待测工件无装卡偏心测量状态下的示意图，图中 0 是仪器坐标系的原点，OX、OY、OZ 分别是仪器坐标系的 X、Y、Z 轴； O_0 是工件坐标系的原点， Ox_0 、 OY_0 、 OZ_0 分别是工件坐标系的 X、Y、Z 轴； θ 是 CNC 齿轮测量中心的主轴；

[0020] 图 4 为待测工件装卡偏心测量状态下的示意图；

[0021] 图 3 和图 4 中 1 表示 CNC 齿轮测量中心的回转中心，2 表示标定球，3 表示测头；

[0022] 图 5 为无装卡偏心测量状态下内齿轮齿廓误差评定图，无装卡偏心指的是偏心量在符合工况要求范围内，而不是绝对的无偏心，本图所示测量的偏心量为 $1 \mu m$ ；

[0023] 图 6 为装卡偏心量为 $164.3 \mu m$ 时，内齿轮齿廓误差评定图；

[0024] 图 7 为装卡偏心量为 $164.3 \mu m$ 时，经过本发明所述误差分离技术处理后的内齿轮齿廓误差评定图；

[0025] 图 6 和图 7 中的 46, 36, 16, 1 代表待测工件测量齿的序列号，纵坐标代表展长，单位为 μm ，每条曲线的横坐标代表偏差，单位为 μm ，其中的数字 25.159 和 33 分别代表评定起点和评定终点。

[0026] 具体实施方式

[0027] 具体实施方式一：本实施方式包括以下步骤：

[0028] 步骤一：将待测工件装卡在 CNC 齿轮测量中心的测量位置上，以待测工件的几何中心作为原点建立工件坐标系，并使工件坐标系和仪器坐标系的 X 轴、Y 轴及 Z 轴的方向相

同 ;所述仪器坐标系为 CNC 齿轮测量中心的坐标系 ;

[0029] 步骤二 :计算理想测量状态下仪器坐标系与工件坐标系之间的转换关系 ;

[0030] 步骤三 :计算偏心测量状态下仪器坐标系与工件坐标系之间的转换关系, 获得装卡偏心矢量的表达式 ;

[0031] 步骤四 :设定待测工件的初始偏心参数, 获得工件坐标系的原点偏离仪器坐标系的原点的极角的表达式 ;

[0032] 步骤五 :计算在待测工件装卡偏心测量的状态下, 工件坐标系的原点在仪器坐标系中的表达式, 并建立仪器坐标系原点与工件坐标系原点之间的转换关系 ;

[0033] 步骤六 :通过 CNC 齿轮测量中心对待测工件进行测量, 获得待测工件的渐开线齿廓测量值, 并对该渐开线齿廓测量值进行转换, 获得渐开线齿廓测量值在仪器坐标系中的空间坐标值 ;

[0034] 步骤七 :由渐开线齿廓测量值在仪器坐标系中的空间坐标值, 计算待测工件的初始偏心参数值 ;

[0035] 步骤八 :由初始偏心参数值计算获得装卡偏心矢量值 ;

[0036] 步骤九 :根据装卡偏心矢量建立含装卡偏心矢量的误差补偿模型, 并用于被测齿轮渐开线齿廓的误差评定 ;同时根据装卡偏心矢量调整待测工件的齿距的测量轨迹和待测工件 的螺旋线的测量轨迹。

[0037] 具体实施方式二 :本实施方式为对实施方式一的进一步说明, 所述步骤二中理想测量状态为 :将仪器坐标系的原点沿其 Z 轴方向平移获得的坐标系原点, 作为工件坐标系原点 ;

[0038] 所述理想测量状态下仪器坐标系与工件坐标系之间的转换关系式为 :

$$[0039] \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_0 \\ y_0 \\ z_0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ c \end{bmatrix},$$

[0040] 其中 x, y, z 为空间某一点在仪器坐标系中的坐标, x_0, y_0, z_0 为所述空间某一点在工件坐标系中的坐标, c 为理想测量状态下工件坐标系原点在仪器坐标系中的 Z 轴坐标值。

[0041] 可令 $\alpha = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ c \end{bmatrix}$, α 为理想测量状态下工件坐标系与仪器坐标系间的转换矢量。

[0042] 具体实施方式三 :本实施方式为对实施方式二的进一步说明, 步骤三中所述偏心测量状态下仪器坐标系与工件坐标系之间的转换关系式为 :

$$[0043] \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_0 \\ y_0 \\ z_0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ c \end{bmatrix} + \beta,$$

[0044] 式中 β 为装卡偏心矢量, 其表达式为 :

$$[0045] \beta = \begin{bmatrix} a_i \\ b_i \\ 0 \end{bmatrix}, \text{式中 } a_i, b_i \text{ 分别为偏心测量状态下, 工件坐标系原点在仪器坐标系中的 X}$$

轴、Y 轴坐标值。

[0046] 具体实施方式四：本实施方式为对实施方式三的进一步说明，步骤四中所述设定待测工件的初始偏心参数为：电感测头接触到待测工件的第一个待测齿时的装卡偏心量大小 e 和偏心角 ϕ_0 ，装卡偏心量大小 e 为工件坐标系原点与仪器坐标系原点之间的距离，偏心角 ϕ_0 为工件坐标系原点与仪器坐标系原点之间的连线与 X 轴的夹角；当所述齿轮测量中心的主轴转过角度 θ_i 后，工件坐标系的原点偏离仪器坐标系的原点的极角 ϕ_i 的表达式如下：

$$[0047] \quad \phi_i = \phi_0 + \theta_i.$$

[0048] 当齿轮测量中心的主轴相对初始状态旋转 θ_i 后，此时的装卡偏心量大小 e 不变。

[0049] 具体实施方式五：本实施方式为对实施方式四的进一步说明，步骤五中所述在待测工件装卡偏心测量的状态下，工件坐标系的原点在仪器坐标系中的表达式为：

$$[0050] \quad \begin{cases} a_i = e \cos \phi_i = e \cos(\phi_0 + \theta_i) \\ b_i = e \sin \phi_i = e \sin(\phi_0 + \theta_i), \text{ 其中 } c_i \text{ 为工件坐标系原点在仪器坐标系中的 Z 轴坐标} \\ c_i = c \end{cases}$$

值；

[0051] 建立仪器坐标系原点与工件坐标系原点之间的转换关系式为：

$$[0052] \quad \begin{bmatrix} x_{0i} \\ y_{0i} \\ z_{0i} \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & -a_i \\ 0 & 1 & 0 & -b_i \\ 0 & 0 & 1 & -c_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_i \\ y_i \\ z_i \\ 1 \end{bmatrix} = N \begin{bmatrix} x_i \\ y_i \\ z_i \\ 1 \end{bmatrix},$$

[0053] 式中 N 为仪器坐标系与工件坐标系原点转换实时向量， x_{0i} ， y_{0i} ， z_{0i} 为空间某一点在工件坐标系中的坐标值， x_i ， y_i ， z_i 为空间某一点在仪器坐标系中的坐标值。

[0054] 具体实施方式六：本实施方式为对实施方式五的进一步说明，所述步骤六中待测工件的渐开线齿廓测量值表示为：

$$[0055] \quad PMValue_i(g_{xi} + p_{xi}, g_{yi} + p_{yi}, g_{zi} + p_{zi}, \theta_i),$$

[0056] 其中 i 为测量点的序号， g_{xi} 、 g_{yi} 、 g_{zi} 为齿轮测量中心的光栅在 X、Y、Z 方向的三路示值， p_{xi} 、 p_{yi} 、 p_{zi} 为齿轮测量中心的电感测头在 X、Y、Z 方向的三个读数， θ_i 是齿轮测量中心的主轴旋转角度；

[0057] 步骤六中所述获得渐开线齿廓测量值在仪器坐标系中的空间坐标值的方法为：将 $PMValue_i(g_{xi} + p_{xi}, g_{yi} + p_{yi}, g_{zi} + p_{zi}, \theta_i)$ 根据电子展成法原理进行转换，获得渐开线齿廓在仪器坐标系中的空间坐标值的表达式为：

$$[0058] \quad \begin{bmatrix} x_i \\ y_i \\ z_i \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \phi_i & -\sin \phi_i & 0 & 0 \\ \sin \phi_i & \cos \phi_i & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} g_{xi} + p_{xi}, \\ g_{yi} + p_{yi}, \\ g_{zi} + p_{zi}, \\ 1 \end{bmatrix} = M \begin{bmatrix} g_{xi} + p_{xi}, \\ g_{yi} + p_{yi}, \\ g_{zi} + p_{zi}, \\ 1 \end{bmatrix},$$

[0059] 其中 M 为电子展成转换矩阵。

[0060] 具体实施方式七：下面结合图 1 说明本实施方式，本实施方式为对实施方式六的进一步说明，步骤七中所述的计算待测工件的初始偏心参数值的方法为：

[0061] 由渐开线的性质得到待测工件渐开线齿廓上第 m 点 p_m 的展角 θ_{km} 的表达式为：

[0062] $\theta_{km} = \tan \alpha_{km} - \alpha_{km}$,

[0063] 式中 α_{km} 为待测工件渐开线齿廓上第 m 点的压力角,

[0064] 待测工件渐开线齿廓上 p_m 点的向径 r_{km} 的表达式为 :

$$[0065] r_{km} = \sqrt{(x_m - a)^2 + (y_m - b)^2},$$

[0066] 式中 x_m 、 y_m 分别为待测工件渐开线齿廓上 p_m 点在仪器坐标系中的 X 轴、Y 轴坐标值, a, b 为相应渐开线对应的基圆的圆心在仪器坐标系中的 X 轴、Y 轴坐标值,

[0067] 设待测工件渐开线齿廓上第 m 点 p_m 与第 0 点 p_0 分别与所述的基圆的圆心连线形成的夹角为 γ_m , 则 γ_m 的表达式为 :

$$[0068] \gamma_m = \arctan \frac{y_0 - b}{x_0 - a} - \arctan \frac{y_m - b}{x_m - a},$$

[0069] 式中 x_0 、 y_0 分别为待测工件渐开线齿廓上 p_0 点在仪器坐标系中的 X 轴、Y 轴坐标值,

[0070] 令 : $f_m = \theta_{km} - \theta_{k0} - \gamma_m$,

[0071] 式中 θ_{k0} 为待测工件渐开线齿廓上 p_0 点的展角,

[0072] 由测量值的最可依赖值在参数误差平方和最小的条件下求出, 令 :

$$[0073] F_j(a, b, r_b) = \sum_{m=0}^Z f_m,$$

$$[0074] F(a, b, r_b) = \min \sum_{j=0}^{num} F_j(a, b, r_b),$$

[0075] 式中 r_b 为渐开线所对应的基圆的半径, 式中 Z 为待测工件上每个齿的测量点数, num 为待测工件上需要测量的齿数,

[0076] 对上式采用模拟退火的方法求解, 得到装卡偏心量大小 e 和偏心角 ϕ_0 :

$$[0077] \begin{cases} \phi_0 = \arctan(b_i/a_i) \\ e = \sqrt{a_i^2 + b_i^2} \end{cases}.$$

[0078] 在初始偏心参数的求解过程中, 需要用到渐开线齿廓的测量值, 这需要测量渐开线齿廓, 由电子展成法的特点可知, 在测量渐开线时并不要求所走的轨迹是一条严格的渐开线, 在偏心测量的条件下, 虽然存在偏心, 但是测头的运行轨迹仍然是渐开线的一部分。

[0079] 为求解偏心参数, 建立偏心参数估计函数 f_m , 理论上 : $f_m = 0$, 但是在实际生产过程中, 由于制造误差等因素的存在导致 $f_m \neq 0$, 因此对测量值的最可依赖值在参数误差平方和最小的条件下求出。

[0080] 本实施方式中对初始偏心参数进行求解采用的估计方法, 抽象成了一个无约束条件下的非线性方程组的参数估计问题, 为避免一点测量值误差太大, 本实施方式为采用多点替换的方法, 获得一系列的偏心工件坐标系原点, 再采用最小二乘圆的方法估计出 a、b 值。

[0081] 具体实施方式八 : 本实施方式为对实施方式七的进一步说明, 所述步骤八中由初始偏心参数值计算获得装卡偏心矢量值的方法为 :

[0082] 由 $\beta = \begin{bmatrix} a_i \\ b_i \\ 0 \\ c_i = c \end{bmatrix}$ 和 $\begin{cases} a_i = e \cos \phi_i = e \cos(\phi_0 + \theta_i) \\ b_i = e \sin \phi_i = e \sin(\phi_0 + \theta_i) \end{cases}$, 得到 $\beta = \begin{bmatrix} a_i \\ b_i \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} e \cos(\phi_0 + \theta_i) \\ e \sin(\phi_0 + \theta_i) \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$ 。

[0083] 具体实施方式九：本实施方式为对实施方式八的进一步说明，步骤九中根据装卡偏心矢量建立含装卡偏心矢量的误差补偿模型为：

[0084]

$$\begin{bmatrix} x_{0i} \\ y_{0i} \\ z_{0i} \\ 1 \end{bmatrix} = NM \begin{bmatrix} g_{xi} + p_{xi} \\ g_{yi} + p_{yi} \\ g_{zi} + p_{zi} \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & -a_i \\ 0 & 1 & 0 & -b_i \\ 0 & 0 & 1 & -c_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos(\phi_0 + \theta_i) & -\sin(\phi_0 + \theta_i) & 0 & 0 \\ \sin(\phi_0 + \theta_i) & \cos(\phi_0 + \theta_i) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} g_{xi} + p_{xi} \\ g_{yi} + p_{yi} \\ g_{zi} + p_{zi} \\ 1 \end{bmatrix}$$

[0085] 将步骤八中由初始偏心参数值计算获得的装卡偏心矢量值对所述误差补偿模型进行补偿。

[0086] 由理想测量状态下工件坐标系与仪器坐标系之间的转换关系和偏心测量状态下工件坐标系与仪器坐标系之间的转换关系可知，只要获得装卡偏心矢量值 β 就可以实现两个坐标系间的无偏转换，建立含有装卡偏心矢量值 β 的上述误差补偿模型后，将已分离出来的装卡偏心矢量值 β 带入误差补偿模型中，将补偿后的模型应用到齿轮渐开线齿廓的误差评定中。

[0087] 渐开线齿廓测量不需要改变轨迹，只需要在评定的过程采用偏心矢量的误差补偿模型进行转换，其具体方法如下：

[0088] $H(x_h, y_h, z_h)$ 为曲线上的任意一点，采用偏心矢量的误差补偿模型将 $H(x_h, y_h, z_h)$ 点转换到无偏条件下的 $H(x_{h'}, y_{h'}, z_{h'})$ 点，其转换表达式如下：

[0089]

$$\begin{bmatrix} x_{h'} \\ y_{h'} \\ z_{h'} \\ 1 \end{bmatrix} = MN \begin{bmatrix} x_h \\ y_h \\ z_h \\ 1 \end{bmatrix}.$$

[0090] 具体实施方式十：本实施方式为对实施方式九的进一步说明，所述根据装卡偏心矢量调整待测工件齿距的测量轨迹的调整公式为：

[0091]

$$\begin{bmatrix} x_b \\ y_b \\ z_b \\ 1 \end{bmatrix} = NM \begin{bmatrix} x_a \\ y_a \\ z_a \\ 1 \end{bmatrix},$$

[0092] 式中 x_b 、 y_b 和 z_b 为理想测量状态下待测工件齿距的坐标值， x_a 、 y_a 和 z_a 为偏心测量状态下齿距的坐标值；

[0093] 根据装卡偏心矢量调整待测工件的螺旋线的测量轨迹的调整公式为：

[0094]

$$\begin{bmatrix} x_t' \\ y_t' \\ z_t' \\ 1 \end{bmatrix} = NM \begin{bmatrix} x_t \\ y_t \\ z_t \\ 1 \end{bmatrix},$$

[0095] 式中 $x_{t'}$ 、 $y_{t'}$ 和 $z_{t'}$ 为理想测量状态下待测工件的螺旋线上点的坐标值, x_t 、 y_t 和 z_t 为偏心测量状态下螺旋线上点的坐标值。

[0096] 根据装卡偏心矢量调整待测工件的齿距的测量轨迹的调整公式中, 可假定理想测量状态下的测量起始点为 A(x_a , y_a , z_a), 由误差补偿模型可将其调整到 B(x_b , y_b , z_b), 同理对测量终点进行同样的调整。

[0097] 根据装卡偏心矢量调整待测工件的螺旋线的测量轨迹的调整公式中, 可假定理想测量状态下测量轨迹为曲线 s1, T(x_t , y_t , z_t) 为曲线上的任意一点, 由误差补偿模型将 T(x_t , y_t , z_t) 调整到无偏条件下的 T' ($x_{t'}$, $y_{t'}$, $z_{t'}$) 点, 曲线 s1 转换到工件坐标系中的曲线 $s' 1'$, 然后采用 PMAC 卡提供的非均匀 B 样条的方式进行测量。

[0098] 具体实施方式十一:下面结合图 1 至图 7 说明本实施方式:

[0099] 一:采用千分表辅助的方法将内齿轮装卡在 CNC 齿轮测量中心的测量平台上, 将偏心量调整到 $1 \mu m$, 启动测量程序, 实现工况条件下无偏心的测量, 其测量结果如图 5 所示;

[0100] 二:关闭测量程序, 调整 CNC 齿轮的偏心量, 使其不大于 $300 \mu m$; 开启渐开线齿廓测量程序, 将测头刚接触渐开线齿廓的瞬间命名为偏心起始位置, 此时的偏心大小为 e , 初始极角为 Φ_0 。由计算机自动记录测量值 $PMValue_i(g_{xi}+p_{xi}, g_{yi}+p_{yi}, g_{zi}+p_{zi}, \theta_i)$;

[0101] 三:根据电子展成法原理将测量值 $PMValue_i(g_{xi}+p_{xi}, g_{yi}+p_{yi}, g_{zi}+p_{zi}, \theta_i)$ 转换成在仪器坐标系中的坐标值;

[0102] 四:如图 1 所示, 采用已知渐开线反求基圆圆心的方法来确定初始偏心参数 e 与初始极角 Φ_0 ;

[0103] 为验证本发明中装卡偏心矢量的分离方法的正确性, 本发明采用千分表数据测量内齿轮求偏心与本方法进行了对比, 对比结果如表 1 所示:

[0104] 表 1 千分表估计法与偏心模型估计法对比

[0105]

千分表估计法	偏心量[μm]	29.3	69.1	100.4	164.5	228.5	300.8	350.2	470.7
	偏心角[$^{\circ}$]	3.30	55.27	42.55	43.71	9.29	186.2	96.28	6.78
偏心模型估计法	偏心量[μm]	29.1	68.1	98.5	164.3	227.2	298.7	356.1	490.7
	偏心角[$^{\circ}$]	3.28	55.34	42.36	43.62	9.33	186.7	90.74	3.54

[0106] 从表 1 可以看出, 偏心量在 $300 \mu m$ 范围内时, 千分表估计法与误差补偿模型参数估计法的偏心量与偏心角基本一致, 但是当偏心量大于 $300 \mu m$ 后, 两种方法偏差较大, 这是因为本次实验所用测头的最佳量程为 $0-300 \mu m$, 大于 $300 \mu m$ 后测头变得不灵敏或者是测头无法接触到渐开线齿廓。

[0107] 在传统的测量方法中需要测量齿轮芯轴的圆周来计算偏心参数, 这有两个缺点:

[0108] 一个是测量效率不高, 由于圆周测量并不是测量必须做的动作, 故测量时做多余动作, 测量效率不高。

[0109] 二是通用性不强:由于传统测量方法需要测量圆周来估计偏心, 这在齿轮滚刀、涡

轮滚刀等测量过程中无法使用。

[0110] 本发明采用测量渐开线的方法来估计初始偏心参数 e 和 ϕ_0 的方法,由于渐开线测量渐开线齿轮检定规程中必检的一项,所以该方法与传统的偏心参数估算方法相比测量效率高、通用性强。

[0111] 本发明适用于 CNC 齿轮测量中心测量内齿轮、外齿轮、锥齿轮、蜗轮、蜗杆等渐开线齿轮传动装置和剃齿刀、插齿刀、齿轮滚刀、蜗轮滚刀等渐开线齿轮加工刀具。

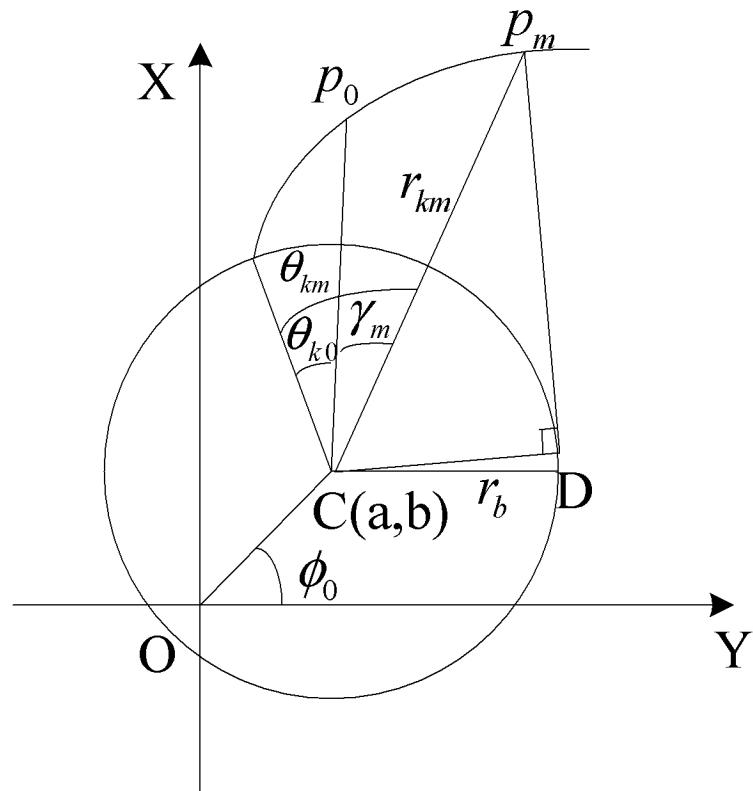


图 1

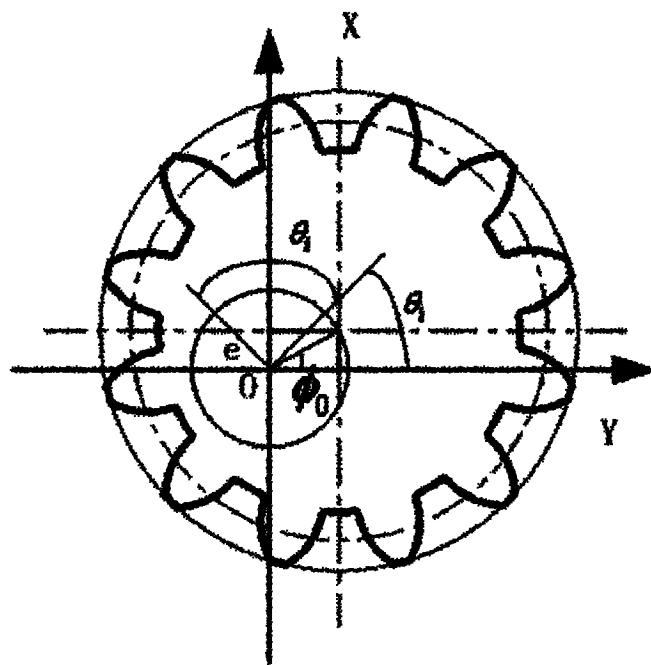


图 2

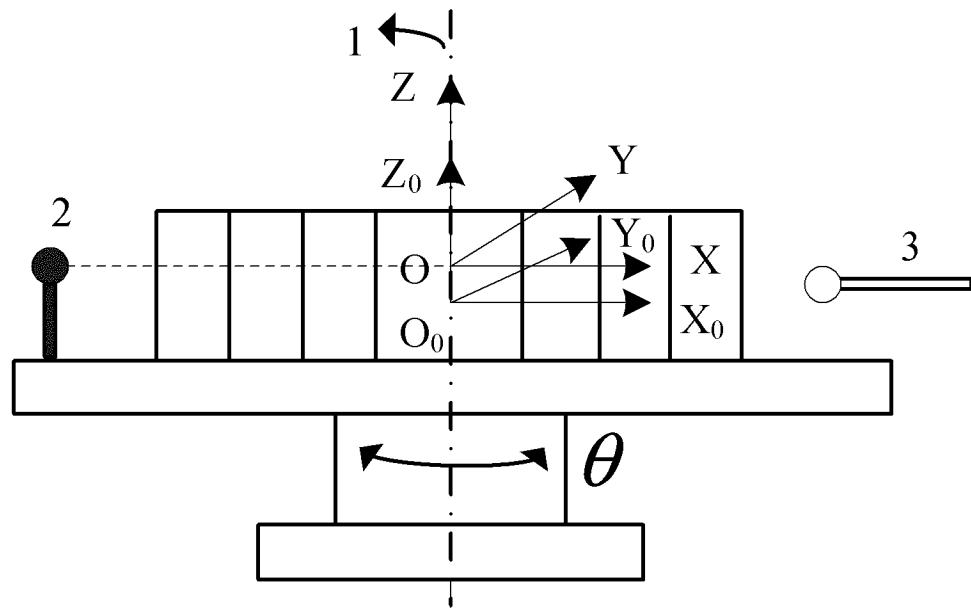


图 3

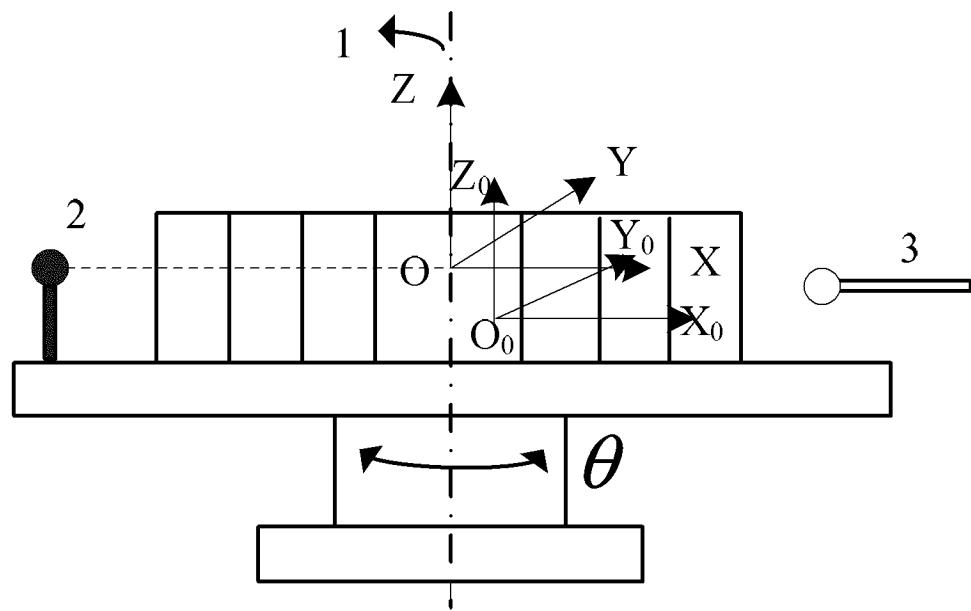


图 4

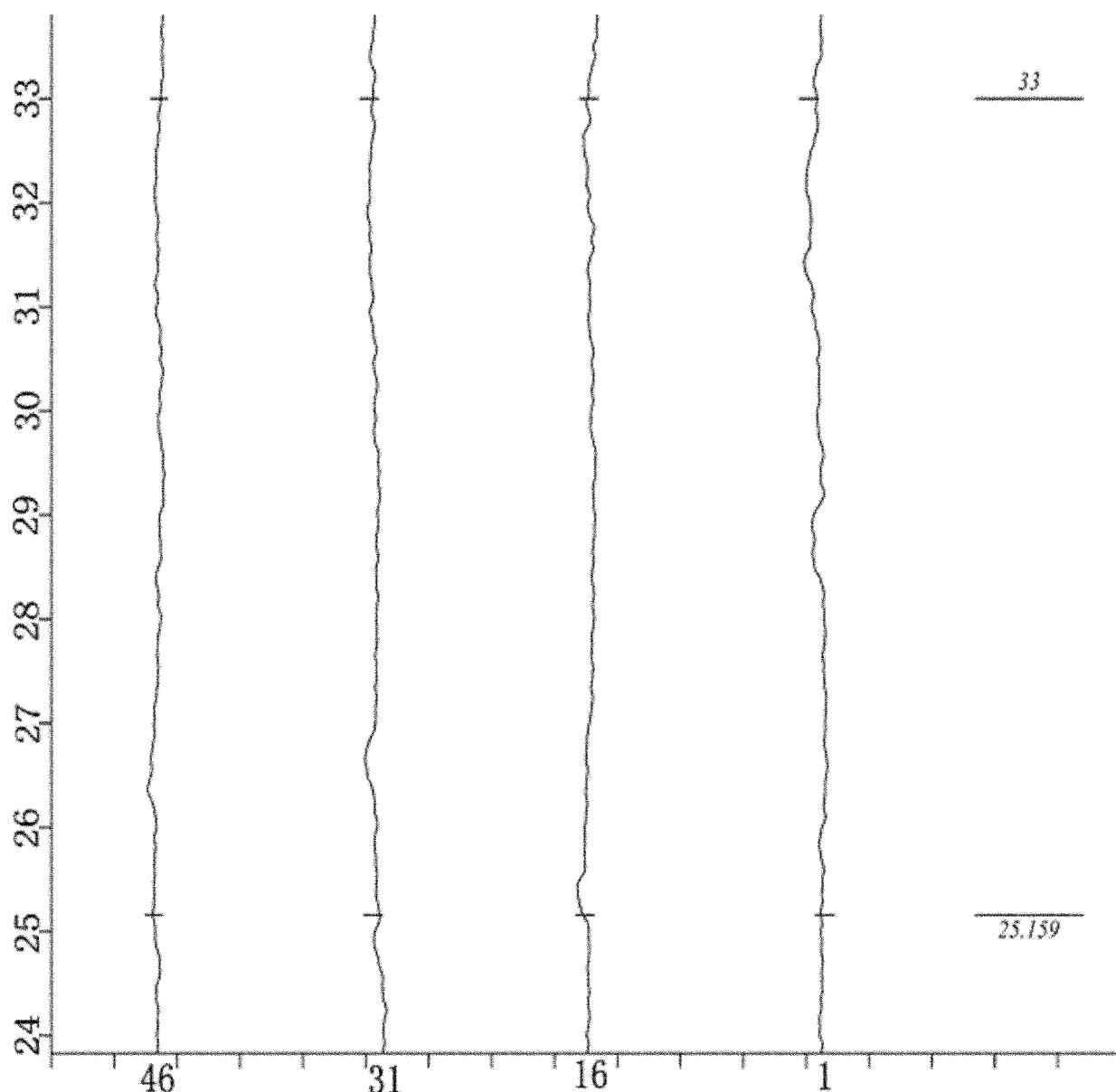


图 5

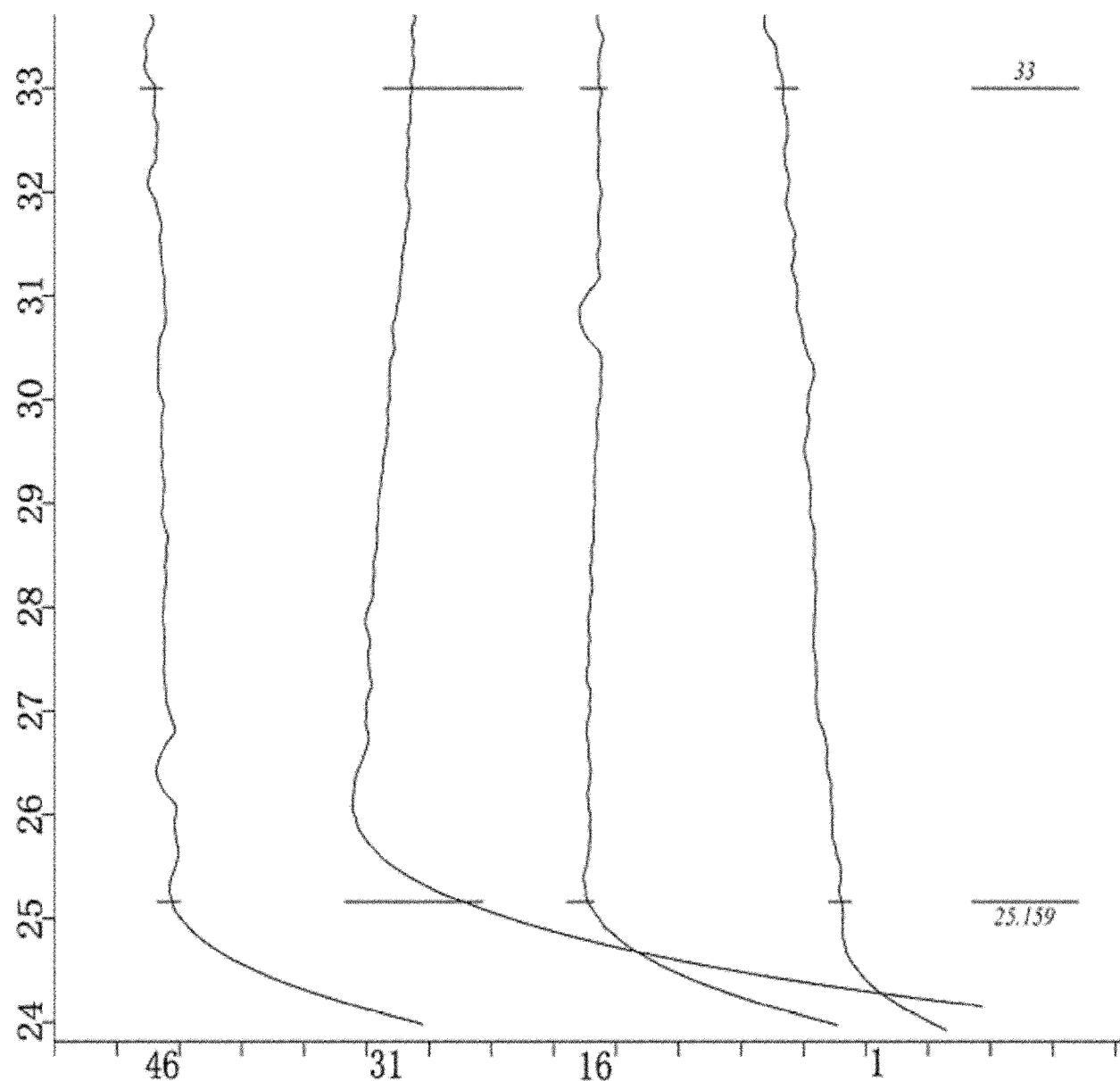


图 6

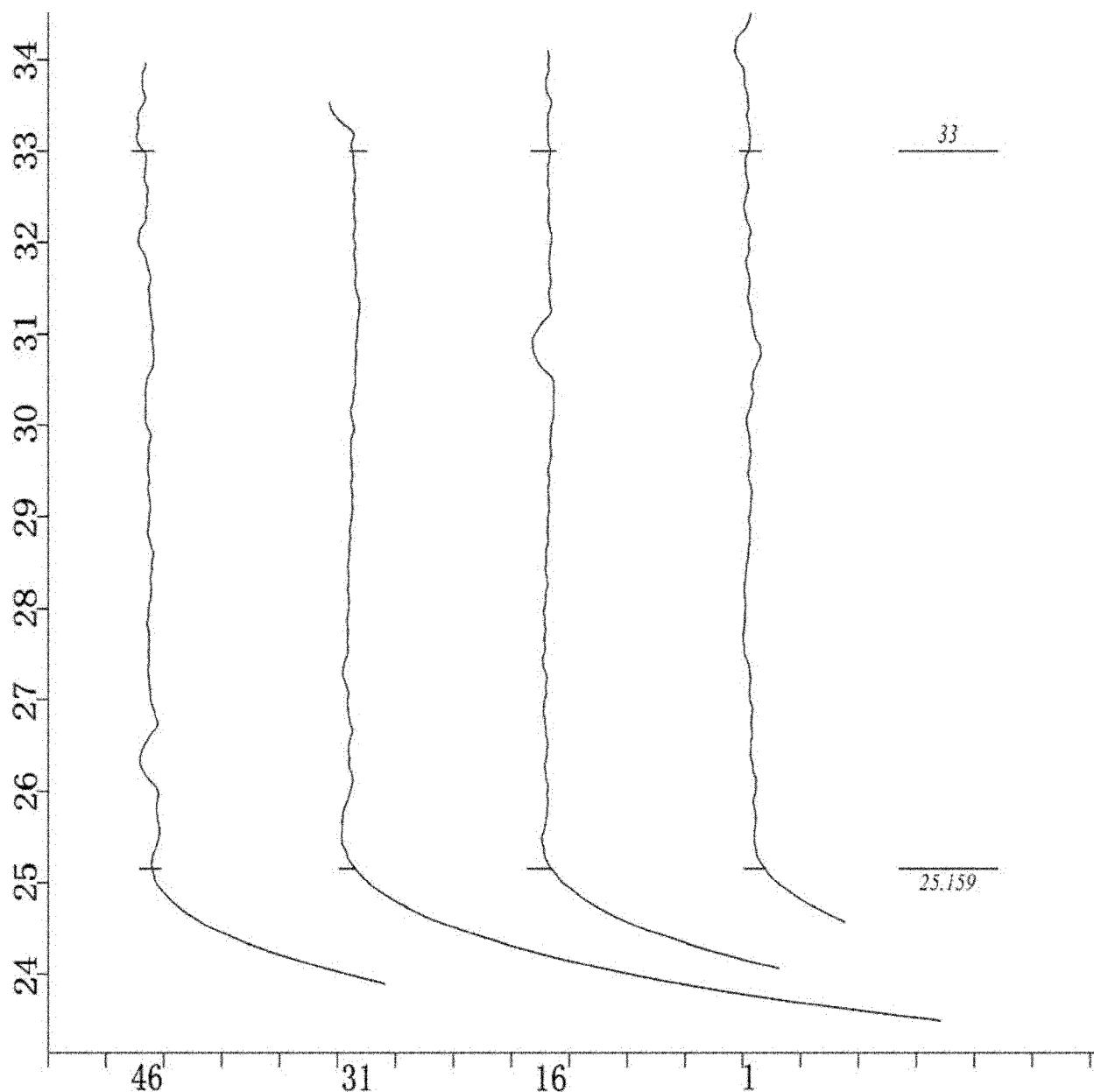


图 7