



(12) 发明专利

(10) 授权公告号 CN 110375694 B

(45) 授权公告日 2020.12.04

(21) 申请号 201910825489.9

(22) 申请日 2019.08.30

(65) 同一申请的已公布的文献号  
申请公布号 CN 110375694 A

(43) 申请公布日 2019.10.25

(73) 专利权人 合肥工业大学  
地址 230009 安徽省合肥市屯溪路193号

(72) 发明人 于连栋 张润 刘士达 赵会宁  
贾华坤

(74) 专利代理机构 北京市科名专利代理事务所  
(特殊普通合伙) 11468

代理人 张亮保

(51) Int. Cl.

G01B 21/04 (2006.01)

(56) 对比文件

CN 107747931 A, 2018.03.02

CN 103217139 A, 2013.07.24

CN 110030953 A, 2019.07.19

CN 103376058 A, 2013.10.30

EP 1182509 A2, 2002.02.27

US 2006043964 A1, 2006.03.02

JP 4090016 B2, 2008.05.28

张文颖等.基于多头读数布局的圆光栅自校准方法研究.《光学学报》.2018,第38卷(第8期),

Liandong Yu等.Elastic instabilities in the electroosmotic.《Electrophoresis》.2019,

审查员 路晓明

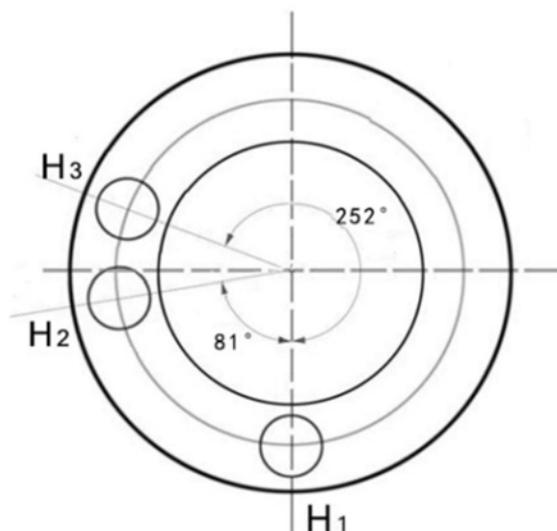
权利要求书2页 说明书8页 附图4页

(54) 发明名称

基于便携关节式坐标测量机圆光栅测角误差的自校准方法

(57) 摘要

本发明公开基于便携关节式坐标测量机圆光栅测角误差的自校准方法,包括如下步骤:建立读数头 $H_j$ 测角函数模型;设置圆光栅测角装置三个读数头的角度间隔,获得三个读数头的圆光栅角度测量值;对三个读数头 $H_1$ 、 $H_2$ 、 $H_3$ 中的两个读数头的差值函数分别进行曲线拟合,分别建立两个读数头测角差值 $H_2-H_1$ 、 $H_3-H_1$ 、 $H_3-H_2$ 与角度位置的函数关系;拟合后的差值曲线进行等角度间隔采样,将采样点进行离散傅里叶变换,并带入其与传递函数的关系式求得傅里叶级数的系数函数 $F(n)$ ;进行离散傅里叶逆变换确定圆光栅测角误差的补偿函数模型 $\epsilon(\theta)$ ;利用多面棱体结合自准直仪的标定方法,验证圆光栅测角误差自校准模型的补偿效果。用少读数头完成多阶次谐波误差补偿,提高产品可靠性。



1. 基于便携关节式坐标测量机圆光栅测角误差的自校准方法, 其特征在于, 包括如下步骤: 1) 建立读数头 $H_j$ 测角函数模型;

2) 设置圆光栅测角装置中安装三个读数头之间的角度间隔, 获得三个读数头的圆光栅角度测量值;

3) 对三个读数头 $H_1$ 、 $H_2$ 、 $H_3$ 中的两个读数头的差值函数分别进行曲线拟合, 分别建立两个读数头测角差值 $H_2-H_1$ 、 $H_3-H_1$ 、 $H_3-H_2$ 与角度位置之间的函数关系;

4) 对拟合后的曲线进行等间隔采样, 将采样值根据步骤1所述的模型进行离散傅里叶变换分别得到 $E_{21}(n)$ 、 $E_{31}(n)$ 、 $E_{32}(n)$  :

$$E_{21}(n) = \text{DFT}\delta_{21}(\theta); E_{31}(n) = \text{DFT}\delta_{31}(\theta); E_{32}(n) = \text{DFT}\delta_{32}(\theta),$$

带入傅里叶级数的系数关系式求出 $F(n)$  :

$$F(n) = \frac{P_{21}(n)E_{21}(n)}{W_{21}(n)} + \frac{P_{31}(n)E_{31}(n)}{W_{31}(n)} + \frac{P_{32}(n)E_{32}(n)}{W_{32}(n)},$$

其中,  $P_{ji}(n)$  为权重系数:

$$P_{ji}(n) = \frac{|W_{ji}(n)|^2}{\sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^3 |W_{ji}(n)|^2},$$

在 $E_{ji}(n)$  已知的前提下, 对 $F(n)$  进行离散傅里叶逆变换 (IDFT) 确定编码器误差补偿函数 $\varepsilon(\theta)$ ;

5) 利用多面棱体结合自准直仪的标定方法, 验证圆光栅测角误差自校准模型的补偿效果。

2. 根据权利要求1所述基于便携关节式坐标测量机圆光栅测角误差的自校准方法, 其特征在于, 1) 建立所述读数头 $H_j$ 测角函数模型步骤为, 根据EDA模型, 在圆光栅表面设有均布的 $M$ 个读数头, 建立读数头 $H_j$ 测角函数模型:

$$H_j(\theta) = \theta + \varepsilon(\theta + \alpha_j),$$

读数头 $H_j$ 相对于基准读数头 $H_1$ 的定位角度值为 $\alpha_j$ , 旋转角度为 $\theta$ , 编码器测角误差值为 $\varepsilon(\theta)$ , 任意两读数头 $H_j$ 和 $H_i$ 的测角数据差值可得:

$$\delta_{ji}(\theta) = H_j(\theta) - H_i(\theta) = \varepsilon(\theta + \alpha_j) - \varepsilon(\theta + \alpha_i),$$

编码器测角误差值 $\varepsilon(\theta)$ 通过离散傅里叶变换可得:

$$E_{ji}(n) = (e^{in\alpha_j} - e^{in\alpha_i})F(n)$$

其中,  $F(n)$  为傅里叶级数 $\varepsilon(\theta)$ 的系数:

$$F(n) = \sum_{k=0}^{N-1} \varepsilon(\theta_k) e^{-i2\pi nk/N}, 0 \leq n \leq N-1,$$

$$\theta_k = 2\pi k/N,$$

其中,  $N$ 为离散傅里叶变换中所取等间隔角度的数量。

3. 根据权利要求1所述基于便携关节式坐标测量机圆光栅测角误差的自校准方法, 其特征在于, 2) 所述读数头之间的角度间隔步骤为, 圆光栅测角装置中安装三个读数头, 第一读数头 $H_1$ 和第二读数头 $H_2$ 的角度间隔为 $81^\circ$ , 第一读数头 $H_1$ 和第三读数头 $H_3$ 的角度间隔为

252°。

4. 根据权利要求1所述基于便携关节式坐标测量机圆光栅测角误差的自校准方法,其特征在于,2)所述读数头的圆光栅角度测量值步骤为,采集便携关节式坐标测量机基座轴系圆光栅测角装置的角度测量数据,手持关节臂使基座轴系关节处的测角系统平稳匀速绕轴线旋转一周,每间隔3°—10°采集一次读数头数据,每个读数头采集一圈数据为120到360个,所选数据采集角度间隔与每个读数头采集数据总数量对应相乘应满足大于等于360°。

5. 根据权利要求1所述基于便携关节式坐标测量机圆光栅测角误差的自校准方法,其特征在于,3)所述曲线拟合步骤为,对三个读数头差值分别进行曲线拟合,拟合曲线函数:

$$f(\theta) = a_0 + \sum_{i=1}^n (a_i \sin i\theta + b_i \cos i\theta) \quad (i = 1, 2, \dots, n)$$

其中: $a_0$ 为常数项, $a_i$ 和 $b_i$ 为系数, $\theta$ 为采样角度值,

将基准读数头测角数据 $\theta$ 与其差值 $f(\theta)$ 代入上述拟合曲线函数模型中,利用最小二乘法求解模型系数 $a_0$ 、 $a_i$ 和 $b_i$ 。

6. 根据权利要求1所述基于便携关节式坐标测量机圆光栅测角误差的自校准方法,其特征在于,5)对于同一轴系,将测量结果与使用多面棱体与自准直仪计算得到的误差修正值进行比较,以此对 $\varepsilon(\theta)$ 的补偿效果进行验证。

## 基于便携关节式坐标测量机圆光栅测角误差的自校准方法

### 技术领域

[0001] 本发明属于关节式坐标测量机领域,尤其涉及基于便携关节式坐标测量机圆光栅测角误差的自校准方法。

### 背景技术

[0002] 便携关节式坐标测量机是一种模拟人体手臂制成的便携式非正交测量装置,广泛用于模具制造,机械加工和制造业,具有体积小,重量轻,携带方便,测量灵活,测量空间大,环境适应性强等优点。便携关节式坐标测量机通常由底座,旋转关节,测量臂和测头串联组成,这种结构具有误差放大作用。因此,对于安装在旋转关节处的角度编码器进行精度校准非常重要。

[0003] 圆光栅角度编码器是一种整圆周测角装置,在便携关节式坐标测量机的角度测量过程中,测角精度不可避免地受到编码器测角误差的影响。编码器测角误差通常涉及许多误差分量,例如光栅刻划误差、安装偏心误差以及轴系运动误差等。在实际应用中,应减弱甚至消除编码器以上测角误差影响。目前针对编码器误差修正常用的方式为互校准,互校准方法是一种基于误差分离技术的常见角度误差校准方法,需要辅助测量装置,例如多面棱体或其他更高精度辅助角度编码器,与待校准的角度编码器测量数据进行比较,其误差满足由线性方程确定的圆闭合条件。然而,互校准方法随着数据量的增加会非常耗时,并且易受到测量环境改变带来的影响。

[0004] 为了解决上述问题,提出了自校准方法。国内外学者对角度编码器的自校准进行了相关研究,目前已广泛应用于各种高精度测量任务。自校准方法应用反演、冗余和误差分离技术,比互校准方法更快,更有效,并且不需要使用外部参考标准。国际公认的方法主要包括EDA(Equal Division Averaged)方法,Ernst方法和PFD(Prime Factor Division)方法以及TDR(Time-measurement Dynamic Reversal)方法。这些自校准方法可以实现用于某些特定的、理想的工作环境中的单个传感器的自校准。

### 发明内容

[0005] 本发明的目的是为了解决这一问题,提供一种基于便携关节式坐标测量机圆光栅测角误差的自校准方法,通过在线测得的数据,拟合误差函数曲线,分析其传递函数特性来获得读数头布局 and 可修正误差分量之间的关系,以达到用较少读数头校正更多误差谐波分量的目的圆光栅测角误差修正方法。

[0006] 为实现上述发明目的,本发明的技术方案是:

[0007] 基于便携关节式坐标测量机圆光栅测角误差的自校准方法,即建立多读数头的圆光栅测角误差补偿模型,其特征在于,包括如下步骤:1) 建立读数头 $H_j$ 测角函数模型;

[0008] 2) 设置圆光栅测角装置中安装三个读数头之间角度间隔,获得三个读数头的圆光栅角度测量值;

[0009] 3) 对三个读数头 $H_1$ 、 $H_2$ 、 $H_3$ 中的两个读数头的差值函数分别进行曲线拟合,分别建

立两个读数头测角差值 $H_2-H_1$ 、 $H_3-H_1$ 、 $H_3-H_2$ 与角度位置之间的函数关系；

[0010] 4) 对拟合后的差值曲线进行等角度间隔采样,对采样点进行离散傅里叶变换,并带入其与传递函数 $W(n)$ 的关系式求得傅里叶级数的系数函数 $F(n)$ ;对系数函数 $F(n)$ 进行离散傅里叶逆变换确定圆光栅测角误差的补偿函数模型 $\varepsilon(\theta)$ ;

[0011] 5) 利用多面棱体结合自准直仪的标定方法,验证圆光栅测角误差自校准模型的补偿效果。

[0012] 优选地,1) 建立所述读数头 $H_j$ 测角函数模型步骤为,根据EDA模型,在圆光栅表面设有均布的 $M$ 个读数头,建立读数头 $H_j$ 测角函数模型:

$$[0013] \quad H_j(\theta) = \theta + \varepsilon(\theta + \alpha_j),$$

[0014] 读数头 $H_j$ 相对于基准读数头 $H_1$ 的定位角度值为 $\alpha_j$ ,旋转角度为 $\theta$ ,编码器测角误差值为 $\varepsilon(\theta)$ ,任意两读数头 $H_j$ 和 $H_i$ 的测角数据差值可得:

$$[0015] \quad \delta_{ji}(\theta) = H_j(\theta) - H_i(\theta) = \varepsilon(\theta + \alpha_j) - \varepsilon(\theta + \alpha_i),$$

[0016] 编码器测角误差值 $\varepsilon(\theta)$ 通过离散傅里叶变换可得:

$$[0017] \quad E_{ji}(n) = (e^{in\alpha_j} - e^{in\alpha_i})F(n)$$

[0018] 其中, $F(n)$ 为傅里叶级数 $\varepsilon(\theta)$ 的系数:

$$[0019] \quad F(n) = \sum_{k=0}^{N-1} \varepsilon(\theta_k) e^{-i2\pi nk/N}, 0 \leq n \leq N-1,$$

$$[0020] \quad \theta_k = 2\pi k/N,$$

[0021] 其中, $N$ 为离散傅里叶变换中所取等间隔角度的数量。

[0022] 优选地,2) 所述读数头之间的角度间隔步骤为,圆光栅测角装置中安装三个读数头,第一读数头 $H_1$ 和第二读数头 $H_2$ 的角度间隔为 $81^\circ$ ,第一读数头 $H_1$ 和第三读数头 $H_3$ 的角度间隔为 $252^\circ$ 。

[0023] 优选地,2) 所述读数头的圆光栅角度测量值步骤为,采集便携关节式坐标测量机基座轴系圆光栅测角装置的角度测量数据,手持关节臂使基座轴系关节处的测角系统平稳匀速绕轴线旋转一周,每间隔 $3^\circ-10^\circ$ 采集一次读数头数据,每个读数头采集一圈数据为120到36个,所选数据采集角度间隔与每个读数头采集数据总数量对应相乘应满足大于等于 $360^\circ$ 。

[0024] 优选地,3) 所述曲线拟合步骤为,对三个读数头差值分别进行曲线拟合,拟合曲线函数:

$$[0025] \quad f(\theta) = a_0 + \sum_{i=1}^n (a_i \sin i\theta + b_i \cos i\theta) \quad (i=1,2,\dots,n),$$

[0026] 其中: $a_0$ 为常数项, $a_i$ 和 $b_i$ 为系数, $\theta$ 为采样角度值,

[0027] 将基准读数头测角数据 $\theta$ 与其差值 $f(\theta)$ 代入上述拟合曲线函数模型中,利用最小二乘法求解模型系数 $a_0$ 、 $a_i$ 和 $b_i$ 。

[0028] 优选地,4) 对拟合后的曲线进行等间隔采样,将采样值根据步骤1所述的模型进行离散傅里叶变换分别得到 $E_{21}(n)$ 、 $E_{31}(n)$ 、 $E_{32}(n)$ :

$$[0029] \quad E_{21}(n) = \text{DFT}\delta_{21}(\theta); E_{31}(n) = \text{DFT}\delta_{31}(\theta); E_{32}(n) = \text{DFT}\delta_{32}(\theta),$$

[0030] 带入傅里叶级数的系数关系式求出 $F(n)$ :

$$[0031] \quad F(n) = \frac{P_{21}(n)E_{21}(n)}{W_{21}(n)} + \frac{P_{31}(n)E_{31}(n)}{W_{31}(n)} + \frac{P_{32}(n)E_{32}(n)}{W_{32}(n)},$$

[0032] 其中,  $P_{ji}(n)$  为权重系数:

$$[0033] \quad P_{ji}(n) = \frac{|W_{ji}(n)|^2}{\sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^3 |W_{ji}(n)|^2},$$

[0034] 在  $E_{ji}(n)$  已知的前提下, 对  $F(n)$  进行离散傅里叶逆变换 (IDFT) 确定编码器误差补偿函数  $\varepsilon(\theta)$ 。

[0035] 优选地, 5) 对于同一轴系, 将测量结果与使用多面棱体与自准直仪计算得到的误差修正值进行比较, 以此对  $\varepsilon(\theta)$  的补偿效果进行验证。

[0036] 与现有技术相比较, 本发明的有益效果是:

[0037] 本发明相较于以往的补偿方法, 有如下优点: 考虑实际操作环境不同对圆光栅测角精度的影响, 可在线对测角误差进行补偿; 用数量较少的读数头即可完成更多阶次谐波误差的补偿; 多读数头圆光栅测角误差补偿模型可应用于旋转关节, 提高旋转关节测角精度, 进而提高便携关节式坐标测量机的在线测量精度, 提高产品可靠性。

[0038] 本发明基于多读数头谐波分析方法的便携关节式坐标测量机角度编码器的方法, 通过分析传递函数特性来获得读数头布局和可修正误差分量之间的关系, 以达到用较少的读数头完成更高精度测量的目的。进行模拟和实验以验证优化结果, 建立便携关节式坐标测量机关节处角度编码器的校准方法。

## 附图说明

[0039] 此处的附图被并入说明书中并构成本说明书的一部分, 示出了符合本发明的实施例, 并与说明书一起用于解释本发明的原理。

[0040] 图1为本发明基于便携关节式坐标测量机圆光栅测角误差的自校准方法的圆光栅的读数头角度分布示意图。

[0041] 图2为本发明基于便携关节式坐标测量机圆光栅测角误差的自校准方法第二读数头与第一读数头测角数据差值曲线拟合效果图。

[0042] 图3为本发明基于便携关节式坐标测量机圆光栅测角误差的自校准方法第三读数头与第一读数头测角数据差值曲线拟合效果图。

[0043] 图4为本发明基于便携关节式坐标测量机圆光栅测角误差的自校准方法第三读数头与第二读数头测角数据差值曲线拟合效果图。

[0044] 图5为本发明基于便携关节式坐标测量机圆光栅测角误差的自校准方法的对比实验装置示意图。

[0045] 图6为关节臂基轴测量的实验补偿效果图。

## 具体实施方式

[0046] 下面将结合附图对本发明实施例中的技术方案进行清楚、完整地描述。

[0047] 实施例基于便携关节式坐标测量机圆光栅测角误差的自校准方法, 即建立多读数

头的圆光栅测角误差补偿模型,包括如下步骤:1)建立读数头 $H_j$ 测角函数模型;

[0048] 根据EDA模型,在圆光栅表面设有均布的 $M$ 个读数头,读数头 $H_j$ 相对于基准读数头 $H_1$ 的定位角度值为 $\alpha_j$ ,建立读数头 $H_j$ 测角函数模型:

$$[0049] \quad H_j(\theta) = \theta + \varepsilon(\theta + \alpha_j),$$

[0050]  $H_j(\theta)$ 受编码器测角误差值 $\varepsilon(\theta)$ 的影响,而编码器误差通常会由于读数头的位置而产生相移,为了消除未知旋转角度 $\theta$ ,对任意两读数头 $H_j$ 和 $H_i$ 的测角数据差值可得:

$$[0051] \quad \delta_{ji}(\theta) = H_j(\theta) - H_i(\theta) = \varepsilon(\theta + \alpha_j) - \varepsilon(\theta + \alpha_i),$$

[0052] 为了获得编码器误差值 $\varepsilon(\theta)$ ,通过离散傅里叶变换(DFT)可得:

$$[0053] \quad E_{ji}(n) = (e^{in\alpha_j} - e^{in\alpha_i})F(n),$$

[0054] 其中, $F(n)$ 为傅里叶级数 $\varepsilon(\theta)$ 的系数:

$$[0055] \quad F(n) = \sum_{k=0}^{N-1} \varepsilon(\theta_k) e^{-i2\pi nk/N}, 0 \leq n \leq N-1,$$

$$[0056] \quad \theta_k = 2\pi k/N,$$

[0057] 其中, $N$ 为DFT中所取等间隔角度的数量,在 $E_{ji}(n)$ 已知的前提下,可通过离散傅里叶逆变换(IDFT)确定编码器误差补偿模型:

$$[0058] \quad \varepsilon(\theta) = \text{IDFT}(F(n)).$$

[0059] 2)设置圆光栅测角装置中安装三个读数头之间角度间隔,获得三个读数头的圆光栅角度测量值;

[0060] 为了达到用较少读数头校正更多误差谐波分量的目的,圆光栅测角装置中安装三个读数头,第一读数头 $H_1$ 和第二读数头 $H_2$ 的角度间隔为 $81^\circ$ ,第一读数头 $H_1$ 和第三读数头 $H_3$ 的角度间隔为 $252^\circ$ 。

[0061] 根据误差修正原理,记传递函数为:

$$[0062] \quad W_{ji}(n) = e^{in\alpha_j} - e^{in\alpha_i}$$

$$[0063] \quad |W_{ji}(n)| = |e^{in\alpha_j} - e^{in\alpha_i}| = \sqrt{2 - 2\cos n(\alpha_j - \alpha_i)},$$

[0064] 由此可得,若读数头安装位置角度间隔等于 $2\pi k/M$ ,其中 $k=1,2,\dots,M-1$ , $|W_{ji}(n)|=0$ ,会出现谐波抑制现象。基于对传递函数特性的分析,可知适当的角度间隔是影响谐波误差的关键因素;

[0065] 定义 $f_n(\alpha_2, \alpha_3)$ 来判断在三个读数头角度间隔分别为 $\alpha_2, \alpha_3$ 的情况下, $n$ 阶谐波误差是否可以被修正:

$$[0066] \quad f_n(\alpha_2, \alpha_3) = \begin{cases} 1, \max(|W_{21}(n)|, |W_{31}(n)|, |W_{32}(n)|) \leq 1 \\ 0, \text{其他} \end{cases},$$

[0067] 则前 $N$ 阶所有不能被检测到的谐波分量可表示为:

$$[0068] \quad f(\alpha_2, \alpha_3) = \sum_{n=1}^N f_n(\alpha_2, \alpha_3);$$

[0069] 如图1所示,在三个读数头的测角系统中,由 $f(\alpha_2, \alpha_3) - \alpha_2, \alpha_3$ 函数关系式推得三个读数头优化方案角度间隔为 $81^\circ$ 和 $252^\circ$ ;

[0070] 以采集便携关节式坐标测量机基座轴系圆光栅测角装置的角度测量数据的处理为例,手持关节臂使基座轴系关节处的测角系统平稳匀速绕轴线旋转一周,每间隔 $3^{\circ}$ — $10^{\circ}$ 采集一次读数头数据,每个读数头采集一圈数据为120到36个,所选数据采集角度间隔与每个读数头采集数据总数量对应相乘应满足大于等于 $360^{\circ}$ 。

[0071] 表1圆光栅读数头测角数据及差值(基座轴系)

[0072]

数据	读数头 1	读数头 2	读数头 3	2-1	3-1	3-2
1	-0.043726	-0.043602089	-0.043602089	0.000451684	0.000107909	-0.00034377
2	8.538464	8.536498335	8.536727518	-0.001102499	-0.00133168	-0.00022918
3	16.660437	16.65737308	16.6570293	-0.003841745	-0.00418552	-0.00034377
4	26.298523	26.2925753	26.29160127	-0.007011444	-0.00832924	-0.00131780
5	37.790112	37.78055118	37.77877501	-0.011087845	-0.01274942	-0.00166157
6	50.784192	50.76979109	50.76824411	-0.013970743	-0.01557502	-0.00160428
7	61.523877	61.50518689	61.50335343	-0.017483379	-0.01920225	-0.00171887
8	71.296875	71.2750342	71.27388828	-0.02111167	-0.02208569	-0.00097402
9	78.162561	78.13849574	78.13826656	-0.024415567	-0.02407179	0.000343775
10	85.08197	85.05678935	85.05690394	-0.025908868	-0.02436188	0.001546986
11	92.673083	92.64630302	92.64767812	-0.026498529	-0.02414940	0.002349127
12	100.207947	100.1811565	100.1832192	-0.027150616	-0.02348368	0.00366693

[0073]

13	107.372681	107.3454209	107.3480565	-0.026448021	-0.02232272	0.004125296
14	116.851904	116.8243203	116.8280445	-0.02758083	-0.02122099	0.006359832
15	125.415088	125.3870601	125.3925604	-0.028248228	-0.01867983	0.009568395
16	134.096265	134.0680583	134.0758506	-0.028795778	-0.01624800	0.012547776
17	145.584558	145.5548883	145.5661183	-0.028655034	-0.01352894	0.015126086
18	152.526819	152.4970743	152.5101377	-0.028234371	-0.01098834	0.01724603
19	161.227991	161.1986417	161.2133667	-0.02799932	-0.00869064	0.019308678
20	167.288708	167.2592748	167.275776	-0.026936596	-0.00602363	0.02091296
21	175.946045	175.9171256	175.9357467	-0.026033881	-0.00277179	0.023262087
22	185.579626	185.5512965	185.5724959	-0.024367501	0.000441572	0.024809073
23	196.306348	196.2795303	196.3029643	-0.023921132	0.002549518	0.026470651
24	203.852966	203.8267024	203.8523136	-0.023057923	0.004615939	0.027673862
25	212.224329	212.1989338	212.2259774	-0.022184013	0.005948215	0.028132228
26	218.496313	218.4717331	218.4997507	-0.019650062	0.008711349	0.028361411
27	226.299902	226.276507	226.3050976	-0.016482157	0.01044686	0.026929017
28	232.793372	232.7710983	232.799517	-0.014631539	0.011552633	0.026184172
29	240.823608	240.8032792	240.8312968	-0.01187533	0.012074306	0.023949636
30	249.322522	249.3051709	249.3326156	-0.00880403	0.01210893	0.02091296
31	257.107104	257.091381	257.1175651	-0.006456081	0.012623414	0.019079495
32	266.827917	266.8144176	266.8388256	-0.004485461	0.010640625	0.015126086
33	279.177319	279.167216	279.1884155	-0.002860342	0.010088505	0.012948846
34	287.359058	287.3514599	287.3696227	-0.00022377	0.008141414	0.008365184
35	296.569226	296.5640484	296.5790026	0.001448797	0.007121079	0.005672282
36	306.661267	306.6578461	306.6694198	0.002542723	0.006496132	0.003953409
37	315.802002	315.8008203	315.8086125	0.002767543	0.004486416	0.001718873
38	325.918982	325.9199999	325.9242398	0.002068205	0.003099529	0.001031324
39	335.098499	335.099185	335.1021071	0.002424333	0.002309741	-0.00011459
40	344.663635	344.6644291	344.6658615	0.001129505	0.001014914	-0.00011459
41	353.361401	353.3617567	353.3625016	-0.000465746	-0.00023656	0.000229183
42	358.164954	358.1640598	358.164862	0.000451684	0.000107909	-0.00034377
43	-0.043726	-0.043602089	-0.059644907	-0.001102499	-0.00133168	-0.00022918

[0074] 3) 对三个读数头H<sub>1</sub>、H<sub>2</sub>、H<sub>3</sub>中的两个读数头的差值函数分别进行曲线拟合,分别建立两个读数头测角差值H<sub>2</sub>-H<sub>1</sub>、H<sub>3</sub>-H<sub>1</sub>、H<sub>3</sub>-H<sub>2</sub>与角度位置之间的函数关系;如图2、图3、图4所示拟合效果;

[0075] 由于数据采集的非均匀性,无法直接进行傅里叶变换,需要对差值数据H<sub>2</sub>-H<sub>1</sub>、H<sub>3</sub>-H<sub>1</sub>、H<sub>3</sub>-H<sub>2</sub>分别进行曲线拟合。拟合曲线函数如下:

[0076] 
$$f(\theta) = a_0 + \sum_{i=1}^n (a_i \sin i\theta + b_i \cos i\theta) \quad (i = 1, 2, \dots, n)$$

[0077] 其中:a<sub>0</sub>为常数项,a<sub>i</sub>和b<sub>i</sub>为系数,θ为采样角度值。

[0078] 将基准读数头测角数据θ与读数头测角数据差值f(θ)代入上述拟合曲线的函数模型中,利用最小二乘法求解模型系数a<sub>0</sub>、a<sub>i</sub>和b<sub>i</sub>,部分数据如表2所示。

[0079] 表2读数头测角数据差值拟合函数模型系数(部分)

环境温度		2-1	3-1	3-2
[0080] 展开式系数	$c_0$	-0.000243409	-0.000069692	0.000173717
	$a_1$	-0.000177303	-0.000292260	-0.000114957
	$b_1$	0.000221043	-0.000004423	-0.000225466
	$a_2$	-0.000017362	0.000031415	0.000048777
	$b_2$	0.000012135	0.000044873	0.000032737
	$a_3$	0.000015145	0.000014633	-0.000000512
	$b_3$	0.000003998	0.000016522	0.000012524
	$a_4$	0.000000101	0.000000494	0.000000392
	$b_4$	0.000000798	0.000001503	0.000000705
	$a_5$	-0.000000164	0.000001491	0.000001656
	$b_5$	-0.000005979	-0.000000407	0.000005572
	$a_6$	0.000001808	0.000001790	-0.000000018
	$b_6$	0.000011880	0.000008642	-0.000003238
	$a_7$	0.000002904	0.000002786	-0.000000118
	$b_7$	0.000003778	0.000001506	-0.000002272
	$a_8$	0.000004399	0.000005105	0.000000706
	$b_8$	-0.000001143	0.000003425	0.000004568
	$a_9$	-0.000000486	0.000001541	0.000002027
	$b_9$	-0.000003816	-0.000003405	0.000000412
	$a_{10}$	0.000003687	0.000001235	-0.000002452
$b_{10}$	0.000000349	-0.000001180	-0.000001525	

[0081] 4) 对拟合后的差值曲线进行等角度间隔采样,将采样点根据步骤1所述的模型进行离散傅里叶变换分别得到 $E_{21}(n)$ 、 $E_{31}(n)$ 、 $E_{32}(n)$ ：

[0082]  $E_{21}(n) = \text{DFT}\delta_{21}(\theta)$  ;  $E_{31}(n) = \text{DFT}\delta_{31}(\theta)$  ;  $E_{32}(n) = \text{DFT}\delta_{32}(\theta)$  ,

[0083] 带入其与传递函数 $W(n)$ 的关系式求出傅里叶级数的系数函数 $F(n)$ ：

[0084] 
$$F(n) = \frac{P_{21}(n)E_{21}(n)}{W_{21}(n)} + \frac{P_{31}(n)E_{31}(n)}{W_{31}(n)} + \frac{P_{32}(n)E_{32}(n)}{W_{32}(n)}$$
 ,

[0085] 其中, $P_{ji}(n)$  为权重系数：

[0086] 
$$P_{ji}(n) = \frac{|W_{ji}(n)|^2}{\sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^3 |W_{ji}(n)|^2}$$
 ,

[0087] 根据1所述的原理,在 $E_{ji}(n)$  已知的前提下,对系数函数 $F(n)$  进行离散傅里叶逆变换(IDFT)确定圆光栅测角误差补偿函数模型 $\varepsilon(\theta)$ 。

[0088] 5) 对于同一轴系,将测量结果与使用多面棱体与自准直仪计算得到的误差修正值进行比较,以此对 $\varepsilon(\theta)$  的补偿效果进行验证。

[0089] 如图5所示,对比实验装置,包括光电自准直仪1、多面棱体2、轴体3、恒温箱4,如图6所示,为了验证已建立新型圆光栅测角误差自校准模型的补偿效果,对于同一轴系,将测量结果与使用多面棱体2与光电自准直仪1测量计算得到的误差修正值进行比较,以此对 $\varepsilon$

(θ)的补偿效果进行验证。

[0090] 以上所描述的实施例仅仅是本发明一部分实施例,而不是全部的实施例。基于本发明中的实施例,本领域普通技术人员在没有做出创造性劳动前提下所获得的所有其他实施例,都属于本发明保护的范围。

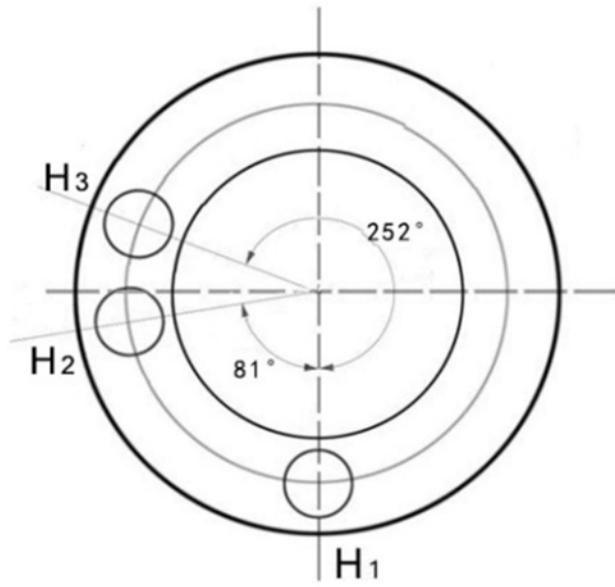


图1

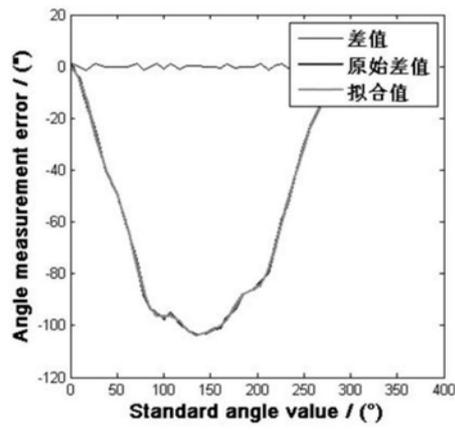


图2a

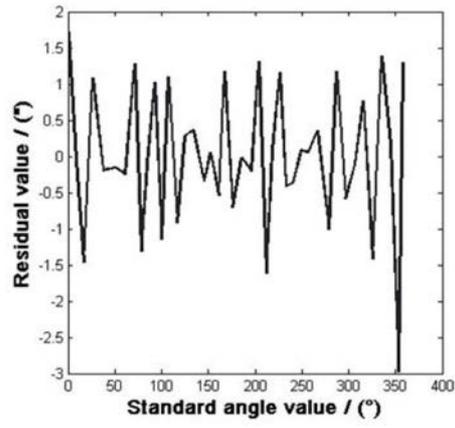


图2b

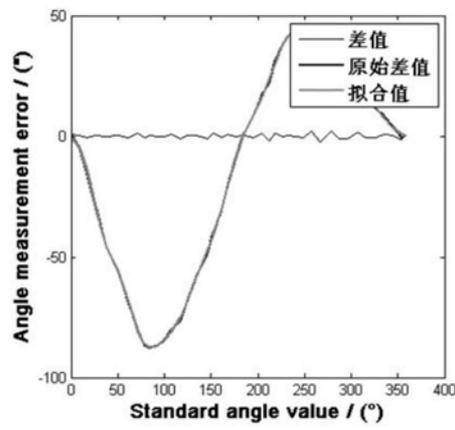


图3a

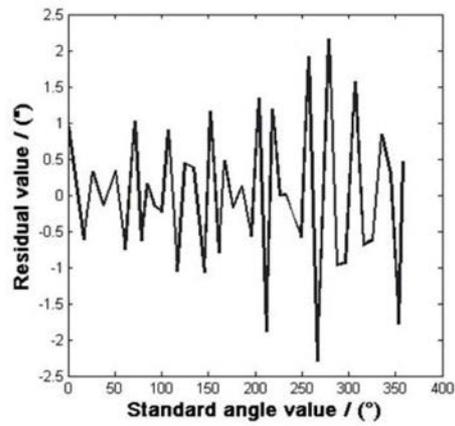


图3b

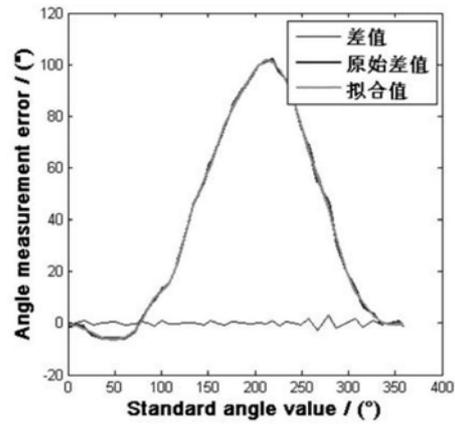


图4a

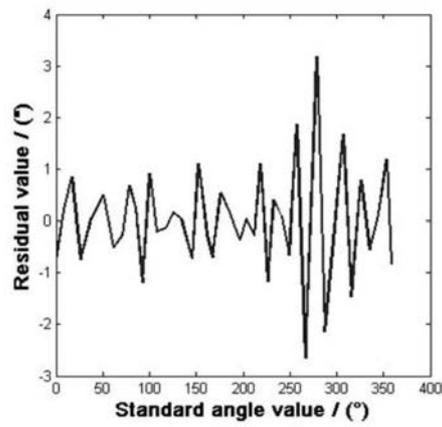


图4b

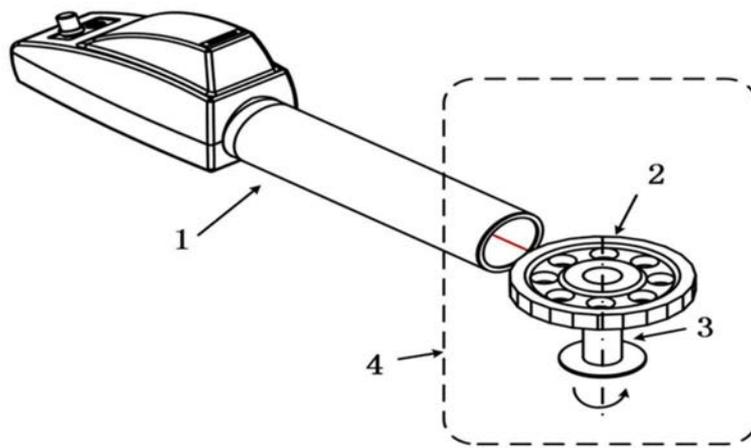


图5

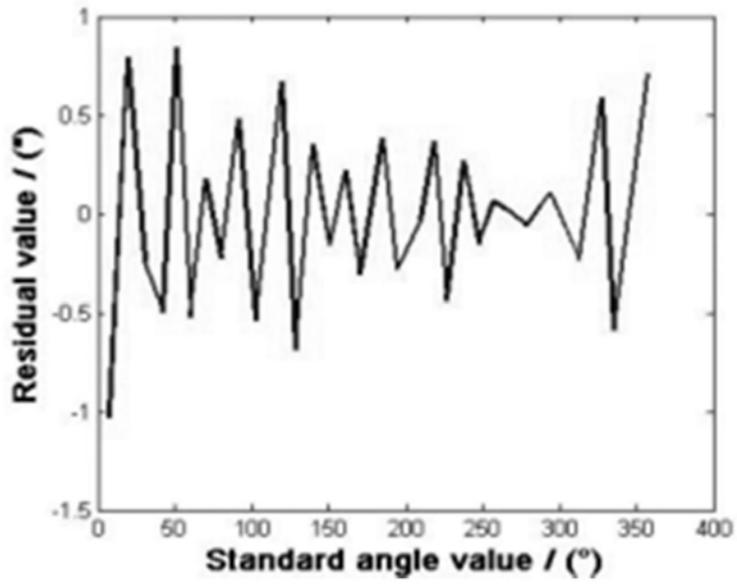


图6