



(12) 发明专利

(10) 授权公告号 CN 114636387 B

(45) 授权公告日 2023. 03. 21

(21) 申请号 202210240904.6

G01D 5/26 (2006.01)

(22) 申请日 2022.03.10

G01D 18/00 (2006.01)

(65) 同一申请的已公布的文献号

审查员 刘云

申请公布号 CN 114636387 A

(43) 申请公布日 2022.06.17

(73) 专利权人 西安交通大学

地址 710049 陕西省西安市咸宁西路28号

(72) 发明人 丁建军 李冠群 李常胜 刘昕东

金雨生

(74) 专利代理机构 西安通大专利代理有限责任

公司 61200

专利代理师 高博

(51) Int. Cl.

G01B 11/27 (2006.01)

G01D 5/347 (2006.01)

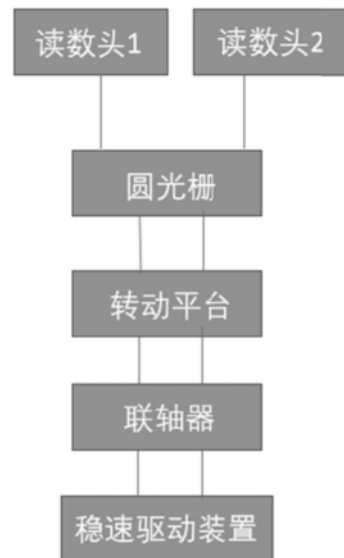
权利要求书2页 说明书12页 附图4页

(54) 发明名称

一种圆光栅编码器双读数头非对称安装偏心误差补偿方法

(57) 摘要

本发明公开了一种圆光栅编码器双读数头非对称安装偏心误差补偿方法,通过模型函数对待估参数做线性近似,转化为线性最小二乘问题的原理,建立圆光栅偏心仿真模型得到偏心参数,计算速度快,结果准确;通过分析在理想状况下双读数头的测角误差补偿原理,建立双读数头对称安装的均值法误差补偿理想模型,加入实际情况下读数头之间存在的安装误差以及随机误差,进而对均值法误差补偿模型进行改进得到双读数头非对称安装误差补偿模型;最后将圆光栅偏心仿真模型求解得到的偏心参数代入双读数头非对称安装误差补偿模型中,消除实际测量中读数头安装误差对测角精度的影响,实现对圆光栅编码器非对称安装双读数头测角偏心误差的精准补偿。



1. 一种圆光栅编码器双读数头非对称安装偏心误差补偿方法,其特征在于,包括以下步骤:

S1、根据圆光栅圆周方向上不同相位正弦信号的合成,基于L-M算法对圆光栅的偏心距及偏心方向进行求解,建立圆光栅偏心参数仿真模型;

S2、建立双读数头对称安装的均值法误差补偿理想模型;

S3、在步骤S2建立的均值法误差补偿理想模型中加入读数头安装误差以及随机误差,建立双读数头非对称安装误差补偿模型;

S4、通过显微镜测量得到圆光栅的偏心距,将偏心距作为初始值代入步骤S1建立的圆光栅偏心参数仿真模型中,通过迭代得到真实的偏心距;

S5、将步骤S4得到的真实的偏心距代入步骤S3建立的双读数头非对称安装误差补偿模型中,实现对圆光栅安装偏心引起的测角误差的精准补偿。

2. 根据权利要求1所述的圆光栅编码器双读数头非对称安装偏心误差补偿方法,其特征在于,步骤S1中,圆周方向上不同位置上两个读数头在同一时刻检测到的正弦信号相位差 $\Delta\psi_{12}$ 为:

$$\Delta\psi_{12} = 360 \times \frac{2e \cdot \sin\varphi}{d}$$

其中,d为光栅栅距,360代表一个电条纹信号周期内的角度数, φ 为两个读数头之间的安装角,e为偏心距。

3. 根据权利要求2所述的圆光栅编码器双读数头非对称安装偏心误差补偿方法,其特征在于,偏心距e具体为:

$$e = \frac{\Delta\psi}{4 \times 360^\circ} \times d$$

其中, $\Delta\psi$ 为两个读数头所读到的总相位差。

4. 根据权利要求1所述的圆光栅编码器双读数头非对称安装偏心误差补偿方法,其特征在于,步骤S2中,均值法误差补偿理想模型具体为:

$$\bar{\theta} = (\varepsilon(\theta + \tau_1) + \psi(\theta_1) + \delta(\theta_1) + \varepsilon(\theta + \tau_2) + \psi(\theta_2) + \delta(\theta_2)) / 2 + \theta$$

其中, $\bar{\theta}$ 为均值法误差补偿结果, θ 为无误差的理论旋转角度, τ_1 为第一读数头所在的安装位置, τ_2 为第二读数头所在的安装位置, $\psi(\theta_1)$ 为第一读数头内部的不一致性引起的测角误差, $\delta(\theta_1)$ 为由于第一读数头的其他不确定因素引起的随机误差, $\psi(\theta_2)$ 为第二读数头内部的不一致性引起的测角误差, $\delta(\theta_2)$ 为由于第二读数头的其他不确定因素引起的随机误差。

5. 根据权利要求1所述的圆光栅编码器双读数头非对称安装偏心误差补偿方法,其特征在于,步骤S3中,双读数头非对称安装误差补偿模型具体为:

$$\hat{\theta} = -\frac{1}{2} \left(\begin{array}{l} \sin^{-1}\left(\frac{e}{R} \sin(\omega - \theta_1)\right) - \sin^{-1}\left(\frac{e}{R} \sin \omega\right) \\ -\sin^{-1}\left(\frac{e}{R} \sin(\eta - \theta_2)\right) + \sin^{-1}\left(\frac{e}{R} \sin \eta - (\theta_1 + \theta_2)\right) \end{array} \right)$$

其中, $\hat{\theta}$ 表示经过新方法补偿后的转动角度测量值, $\hat{\theta} - \theta$ 为补偿后的测角误差,e为偏心距,R为码盘半径, ω 为偏心角, θ_1, θ_2 为第一读数头和第一读数头在旋转过程中测得的旋转

角度, η 为 $\angle O_1OC$ 。

6. 根据权利要求5所述的圆光栅编码器双读数头非对称安装偏心误差补偿方法, 其特征在于, 第一读数头和第二读数头的测角误差分别为:

$$\theta_1 - \theta = \sin^{-1} \left[\frac{e}{R} \sin(\omega - \theta_1) \right] - \sin^{-1} \left[\frac{e}{R} \sin \omega \right]$$

$$\theta_2 - \theta = \sin^{-1} \left[\frac{e}{R} \sin \eta \right] - \sin^{-1} \left[\frac{e}{R} \sin(\eta + \theta_2) \right]$$

其中, θ 为无误差的理论旋转角度。

7. 根据权利要求1所述的圆光栅编码器双读数头非对称安装偏心误差补偿方法, 其特征在于, 步骤S4中, 基于L-M算法对圆光栅的偏心距及偏心方向进行求解具体为:

设定偏心距 e , 偏心角 ω , 码盘半径 R 的初值; 计算雅可比矩阵 J 和函数值; 计算误差, 如果误差小于设定的阈值, 则终止; 否则继续; 计算Hessian矩阵的值: $H = J' \times J$, J' 为对雅可比矩阵 J 求导; 计算搜索步长 d ; 计算新的参数和函数值; 计算新的误差; 如果误差比上一次减小, 则更新参数并减小阻尼系数 μ , 如果误差增大, 则增大阻尼系数, 不更新参数, 返回计算雅可比矩阵 J 和函数值, 继续迭代。

8. 根据权利要求7所述的圆光栅编码器双读数头非对称安装偏心误差补偿方法, 其特征在于, x_i 点的搜索步长 d_i 为:

$$d_i = - \left(J_i^T J_i + \mu_i I \right)^{-1} J_i^T F(x_i)$$

其中, J_i 为雅可比矩阵, μ_i 为阻尼系数, I 为单位矩阵, $F(x_i)$ 为第一读数头和第二读数头的测角误差 $\theta_2 - \theta_1$ 表示的函数式。

9. 根据权利要求1所述的圆光栅编码器双读数头非对称安装偏心误差补偿方法, 其特征在于, 步骤S5中, 双读数头非对称安装测角误差补偿模型具体为:

以圆光栅偏心参数求解模型计算得到的偏心距和偏心方向为输入变量, 以测角偏心误差补偿值为输出变量, 实现对圆光栅编码器由安装偏心以及读数头安装偏差引起的测角误差的精准补偿。

一种圆光栅编码器双读数头非对称安装偏心误差补偿方法

技术领域

[0001] 本发明属于精密测量技术领域,具体涉及一种圆光栅编码器双读数头非对称安装偏心误差补偿方法。

背景技术

[0002] 圆光栅编码器具有分辨率高、体积小、安装方便、响应速度快、处理电路简单等优点,被广泛应用于航空航天、智能机器人、高档数控机床、高精度坐标测量机等领域。而随着科技发展,各种仪器设备趋向于微型化并且对于测角精度的要求越来越高,而小尺寸圆光栅则完美贴合微型化和高精度的要求。同时圆光栅编码器的光电脉冲信号具有较强的抗干扰能力,能够很好的保证数控机床的运行、加工精度。随着技术的不断发展,对圆光栅编码器的测量精度的要求也越来越高。国际高端圆光栅传感器制造与销售龙头企业,德国海德汉公司研究报告明确提出,安装偏心误差约占角度测量误差的80%以上,安装偏心误差对圆光栅编码器的测角精度有很大的影响,测量求出安装偏心误差参数、补偿因偏心误差带来的测量误差至关重要。在安装过程中,圆光栅相对轴系会不可避免地产生偏心,而安装偏心将导致编码器产生测角误差。因此,为保证系统测试精度,需要对圆光栅测量角度加以修正。

[0003] 目前,国内关于圆光栅编码器装配偏心误差对测角精度的影响的研究很多,提出了多种偏心误差补偿方法,其中利用双读数头消除偏心误差简单可靠,并且成本较低。然而对于双读数头圆光栅编码器偏心误差的研究一般认为在光栅圆周上对径安装的双读数头处于理想状态,即两个读数头夹角为 180° 对称布置。然而在实际安装过程中,无论如何提高安装精度,两个读数头之间都会存在安装偏差,对于测角精度要求很高的圆光栅编码器,双读数头的安装偏差对于测角精度的影响不可忽略。

发明内容

[0004] 本发明所要解决的技术问题在于针对上述现有技术中的不足,提供一种圆光栅编码器双读数头非对称安装偏心误差补偿方法,基于圆光栅测角过程中在不同位置的读数头在同一时刻检测到的正弦信号存在相位差的原理,结合理想状态下双读数头对称安装的偏心误差补偿原理构建误差补偿模型,基于L-M算法的圆光栅偏心参数求解模型得到非理想状态下圆光栅安装偏心参数,以此为基础建立圆光栅编码器测角偏心误差补偿模型,实现对圆光栅编码器非对称安装双读数头测角偏心误差的精准补偿。

[0005] 本发明采用以下技术方案:

[0006] 一种圆光栅编码器双读数头非对称安装偏心误差补偿方法,包括以下步骤:

[0007] S1、根据圆光栅圆周方向上不同相位正弦信号的合成,基于L-M算法对圆光栅的偏心距及偏心方向进行求解,建立圆光栅偏心参数仿真模型;

[0008] S2、建立双读数头对称安装的均值法误差补偿理想模型;

[0009] S3、在步骤S2建立的均值法误差补偿理想模型中加入读数头安装误差以及随机误

差,建立双读数头非对称安装误差补偿模型;

[0010] S4、通过显微镜测量得到圆光栅的偏心距,将偏心距作为初始值代入步骤S1建立的圆光栅偏心参数仿真模型中,通过迭代得到真实的偏心距;

[0011] S5、将步骤S4得到的真实的偏心距代入步骤S3建立的双读数头非对称安装误差补偿模型中,实现对圆光栅安装偏心引起的测角误差的精准补偿。

[0012] 具体的,步骤S1中,圆周方向上不同位置上两个读数头在同一时刻检测到的正弦信号相位差 $\Delta\psi_{12}$ 为:

$$[0013] \quad \Delta\psi_{12} = 360 \times \frac{2e \cdot \sin\varphi}{d}$$

[0014] 其中,d为光栅栅距,360代表一个电条纹信号周期内的角度数, φ 为两个读数头之间的安装角,e为偏心距。

[0015] 进一步的,偏心距e具体为:

$$[0016] \quad e = \frac{\Delta\psi}{4 \times 360^\circ} \times d$$

[0017] 其中, $\Delta\psi$ 为两个读数头所读到的总相位差。

[0018] 具体的,步骤S2中,均值法误差补偿理想模型具体为:

$$[0019] \quad \bar{\theta} = (\varepsilon(\theta + \tau_1) + \psi(\theta_1) + \delta(\theta_1) + \varepsilon(\theta + \tau_2) + \psi(\theta_2) + \delta(\theta_2)) / 2 + \theta$$

[0020] 其中, $\bar{\theta}$ 为均值法误差补偿结果, θ 为无误差的理论旋转角度, τ_1 为第一读数头所在的安装位置, τ_2 为第二读数头所在的安装位置, $\psi(\theta_1)$ 为第一读数头内部的不一致性引起的测角误差, $\delta(\theta_1)$ 为由于第一读数头的其他不确定因素引起的随机误差, $\psi(\theta_2)$ 为第二读数头内部的不一致性引起的测角误差, $\delta(\theta_2)$ 为由于第二读数头的其他不确定因素引起的随机误差。

[0021] 具体的,步骤S3中,双读数头非对称安装误差补偿模型具体为:

$$[0022] \quad \hat{\theta} = -\frac{1}{2} \left(\begin{array}{l} \sin^{-1}\left(\frac{e}{R} \sin(\omega - \theta_1)\right) - \sin^{-1}\left(\frac{e}{R} \sin \omega\right) \\ -\sin^{-1}\left(\frac{e}{R} \sin(\eta - \theta_2)\right) + \sin^{-1}\left(\frac{e}{R} \sin \eta - (\theta_1 + \theta_2)\right) \end{array} \right)$$

[0023] 其中, $\hat{\theta}$ 表示经过新方法补偿后的转动角度测量值, $\hat{\theta} - \theta$ 为补偿后的测角误差,e为偏心距,R为码盘半径, ω 为偏心角, θ_1, θ_2 为第一读数头和第一读数头在旋转过程中测得的旋转角度。

[0024] 进一步的,第一读数头和第二读数头的测角误差分别为:

$$[0025] \quad \theta_1 - \theta = \sin^{-1}\left[\frac{e}{R} \sin(\omega - \theta_1)\right] - \sin^{-1}\left[\frac{e}{R} \sin \omega\right]$$

$$[0026] \quad \theta_2 - \theta = \sin^{-1}\left[\frac{e}{R} \sin \eta\right] - \sin^{-1}\left[\frac{e}{R} \sin(\eta + \theta_2)\right]$$

[0027] 其中, θ 为无误差的理论旋转角度。

[0028] 具体的,步骤S4中,基于L-M算法对圆光栅的偏心距及偏心方向进行求解具体为:

[0029] 设定偏心距 e , 偏心角 ω , 码盘半径 R 的初值; 计算雅克比矩阵 J 和函数值; 计算误差, 如果误差小于设定的阈值, 则终止; 否则继续; 计算Hessian矩阵的值: $H=J' \times J$; 计算搜索步长 d ; 计算新的参数和函数值; 计算新的误差; 如果误差比上一次减小, 则更新参数并减小阻尼系数 μ , 如果误差增大, 则增大阻尼系数, 不更新参数, 返回计算雅克比矩阵 J 和函数值, 继续迭代。

[0030] 进一步的, x_i 点的搜索步长 d_i 为:

$$[0031] \quad d_i = -(J_i^T J_i + \mu_i I)^{-1} J_i^T F(x_i)$$

[0032] 其中, J_i 为雅可比矩阵, μ_i 为阻尼系数, I 为单位矩阵, $F(x_i)$ 为第一读数头和第二读数头的测角误差 $\theta_2 - \theta_1$ 表示的函数式。

[0033] 具体的, 步骤S5中, 双读数头非对称安装测角误差补偿模型具体为:

[0034] 以圆光栅偏心参数求解模型计算得到的偏心距和偏心方向为输入变量, 以测角偏心误差补偿值为输出变量, 实现对圆光栅编码器由安装偏心以及读数头安装偏差引起的测角误差的精准补偿。

[0035] 第二方面, 本发明实施例提供了一种圆光栅编码器双读数头非对称安装偏心误差补偿系统, 包括:

[0036] 仿真模块, 根据圆光栅圆周方向上不同相位正弦信号的合成, 基于L-M算法对圆光栅的偏心距及偏心方向进行求解, 建立圆光栅偏心参数仿真模型;

[0037] 理想模块, 建立双读数头对称安装的均值法误差补偿理想模型;

[0038] 现实模块, 在理想模块建立的均值法误差补偿理想模型中加入读数头安装误差以及随机误差, 建立双读数头非对称安装误差补偿模型;

[0039] 迭代模块, 通过显微镜测量得到圆光栅的偏心距, 将偏心距作为初始值代入仿真模块建立的圆光栅偏心参数仿真模型中, 通过迭代得到真实的偏心距;

[0040] 补偿模块, 将迭代模块得到的真实的偏心距代入现实模块建立的双读数头非对称安装误差补偿模型中, 实现对圆光栅安装偏心引起的测角误差的精准补偿。

[0041] 与现有技术相比, 本发明至少具有以下有益效果:

[0042] 本发明一种圆光栅编码器双读数头非对称安装偏心误差补偿方法, 通过建立圆光栅偏心仿真模型、建立双读数头对称安装的均值法误差补偿理想模型、建立双读数头非对称安装误差补偿模型、建立基于L-M算法的偏心参数仿真模型, 由于圆光栅的调整带为30微米, 因此用显微镜测量偏心距的难度较大且不准确, 通过建立圆光栅偏心仿真模型可以求解得到准确的偏心参数, L-M算法的关键是用模型函数对待估参数在其领域内做线性近似, 忽略掉了二阶以上的导数项, 从而转化为线性最小二乘问题, 收敛速度快; 在理想状况下, 两个读数头之间没有安装误差, 以此为基础建立的双读数头对称安装的均值法误差补偿理想模型, 在实际情况下没有考虑到读数头之间的安装误差, 因此需要对均值法误差补偿模型进行改进, 加入读数头之间的安装误差以及随机误差, 得到双读数头非对称安装误差补偿模型; 将圆光栅偏心仿真模型计算得到的偏心距作为初始值代入双读数头非对称安装误差补偿模型, 实现对圆光栅安装偏心引起的测角误差的精准补偿。

[0043] 进一步的, 由圆光栅测角原理可知, 激光器发出的单色光经过光栅盘的栅线, 生成干涉条纹, 光电接收器接收到干涉产生的明暗条纹光信号后可以在示波器中产生正弦信

号。当圆光栅存在偏心时,圆周方向上不同位置的读数头在同一时刻检测到的正弦信号存在相位差。利用这一特点,可以根据不同相位正弦信号的合成,检测出圆光栅的偏心方向及偏心距。

[0044] 进一步的,通过圆光栅从极小值点逆时针旋转 180° 到达极大值点期间2个读数头所读到的总相位差为 $\Delta\psi$ 可以计算出圆光栅的偏心距,即以两个读数头的数据为基础建立圆光栅偏心仿真模型进而求解偏心距,避免了采用显微镜测量偏心距的方法带来的测量误差,从而使结果更加准确。。

[0045] 进一步的,在理想情况下,即两个读数头之间不存在安装误差的情况下建立双读数头对称安装的均值法误差补偿理想模型可以简洁明了的对双读数头测角误差进行理论分析,为实际情况下建立误差补偿模型奠定基础。

[0046] 进一步的,在实际情况下,两个读数头之间或多或少会存在一定的安装误差,因此双读数头对称安装的均值法误差补偿理想模型不能对双读数头测角误差进行彻底的补偿,所以建立双读数头非对称安装误差补偿模型可以将两个读数头的安装误差考虑进来,从而对测角误差进行更好的补偿,在保证测量结果准确性的基础上提升测量精度。

[0047] 进一步的,分别给出第一读数头和第二读数头的安装误差求解公式,进而将两个公式联立,即将两个读数头的数据联系在一起,为通过偏心仿真模型求解偏心距奠定基础。

[0048] 进一步的,L-M算法的关键是用模型函数对待估参数在其领域内做线性近似,忽略掉了二阶以上的导数项,从而转化为线性最小二乘问题,收敛速度快。因此通过基于L-M算法对圆光栅的偏心距及偏心方向进行求解不仅计算速度快,而且计算结果也准确。

[0049] 进一步的,Gauss-Newton算法要求雅克比矩阵必须是列满秩的,因此对 x_i 点的搜索步长 d_i 进行改进,得到L-M算法,突破了雅克比矩阵必须是列满秩这一限制,提升了算法的灵活性。

[0050] 进一步的,在实际情况中,由于零件的加工制造误差以及安装不规范等因素的影响,双读数头在安装过程中难以保证完全对径安装,因此两个读数头之间存在安装误差是不可避免的,通过建立双读数头非对称安装测角误差补偿模型将双读数头安装误差考虑在内,进而有效消除双读数头安装误差对于圆光栅测角精度的影响。

[0051] 综上所述,本发明通过用模型函数对待估参数在其领域内做线性近似,忽略掉了二阶以上的导数项,从而转化为线性最小二乘问题的原理建立圆光栅偏心仿真模型进而求解得到准确的偏心参数,不仅计算速度快,而且计算结果也准确;通过分析在理想状况下双读数头的测角误差补偿原理,建立双读数头对称安装的均值法误差补偿理想模型,以此模型为基础加入了在实际情况下读数头之间存在的安装误差以及随机误差,进而对均值法误差补偿模型进行改进得到双读数头非对称安装误差补偿模型;最后将圆光栅偏心仿真模型求解得到的偏心参数代入双读数头非对称安装误差补偿模型中,消除了实际测量中读数头安装误差对测角精度的影响,最终实现对圆光栅编码器非对称安装双读数头测角偏心误差的精准补偿。

[0052] 下面通过附图和实施例,对本发明的技术方案做进一步的详细描述。

附图说明

[0053] 图1为圆光栅编码器安装偏心示意图;

- [0054] 图2为圆光栅编码器偏心误差原理图；
[0055] 图3为双读数头测量偏心误差原理图；
[0056] 图4为偏心引入的测量误差曲线图；
[0057] 图5为测量系统图；
[0058] 图6为基于L-M算法的偏心参数求解流程图；
[0059] 图7为圆光栅编码器补偿前后测角误差曲线图。

具体实施方式

[0060] 下面将结合本发明实施例中的附图,对本发明实施例中的技术方案进行清楚、完整地描述,显然,所描述的实施例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。

[0061] 在本发明的描述中,需要理解的是,术语“包括”和“包含”指示所描述特征、整体、步骤、操作、元素和/或组件的存在,但并不排除一个或多个其它特征、整体、步骤、操作、元素、组件和/或其集合的存在或添加。

[0062] 还应当理解,在本发明说明书中所使用的术语仅仅是出于描述特定实施例的目的而并不意在限制本发明。如在本发明说明书和所附权利要求书中所使用的那样,除非上下文清楚地指明其它情况,否则单数形式的“一”、“一个”及“该”意在包括复数形式。

[0063] 还应当进一步理解,在本发明说明书和所附权利要求书中使用的术语“和/或”是指相关联列出的项中的一个或多个的任何组合以及所有可能组合,并且包括这些组合,例如,A和/或B,可以表示:单独存在A,同时存在A和B,单独存在B这三种情况。另外,本文中字符“/”,一般表示前后关联对象是一种“或”的关系。

[0064] 应当理解,尽管在本发明实施例中可能采用术语第一、第二、第三等来描述预设范围等,但这些预设范围不应限于这些术语。这些术语仅用来将预设范围彼此区分开。例如,在不脱离本发明实施例范围的情况下,第一预设范围也可以被称为第二预设范围,类似地,第二预设范围也可以被称为第一预设范围。

[0065] 取决于语境,如在此所使用的词语“如果”可以被解释成为“在……时”或“当……时”或“响应于确定”或“响应于检测”。类似地,取决于语境,短语“如果确定”或“如果检测(陈述的条件或事件)”可以被解释成为“当确定时”或“响应于确定”或“当检测(陈述的条件或事件)时”或“响应于检测(陈述的条件或事件)”。

[0066] 在附图中示出了根据本发明公开实施例的各种结构示意图。这些图并非是按比例绘制的,其中为了清楚表达的目的,放大了某些细节,并且可能省略了某些细节。图中所示出的各种区域、层的形状及它们之间的相对大小、位置关系仅是示例性的,实际中可能由于制造公差或技术限制而有所偏差,并且本领域技术人员根据实际所需可以另外设计具有不同形状、大小、相对位置的区域/层。

[0067] 本发明提供了一种圆光栅编码器双读数头非对称安装偏心误差补偿方法,利用圆光栅测角过程中,不同位置读数头在同一时刻检测到的正弦信号存在相位差的原理,结合理想状态下双读数头对称安装的偏心误差补偿原理构建误差补偿模型,基于L-M算法的圆光栅偏心参数求解模型得到非理想状态下圆光栅安装偏心参数,以此为基础建立圆光栅编

码器测角偏心误差补偿模型,从而解决圆光栅编码器双读数头非对称安装状态下偏心误差的精准补偿。

[0068] 请参阅图1,本发明一种圆光栅编码器双读数头非对称安装偏心误差补偿方法,包括以下步骤:

[0069] S1、基于圆光栅测角误差原理,当圆光栅存在偏心时,圆周方向上不同位置的读数头在同一时刻检测到的正弦信号存在相位差,根据不同相位正弦信号的合成,建立圆光栅偏心参数仿真模型;

[0070] 基于圆光栅测角误差原理,激光器发出的单色光经过光栅盘的栅线生成干涉条纹,光电接收器接收到干涉条纹光后,在示波器中产生正弦信号;当圆光栅存在偏心时,圆周方向上不同位置的读数头在同一时刻检测到的正弦信号存在相位差;利用这一特点,根据不同相位正弦信号的合成,检测出圆光栅的偏心方向及偏心距,进而建立圆光栅偏心检测模型。

[0071] 2个光电读数头用于采集条纹信号,第一读数头与第二读数头分别安装在 A_1 、 A_2 位置,以旋转中心OD为中心对径安装。由于圆光栅几何中心相对于旋转轴存在偏心,导致相同时间内经过第一读数头与第二读数头的光栅数不一样,即相同时间内2个光电读数头在光学圆周上所经过的长度不等。因此第一读数头、第二读数头探测到的正弦信号在频率和相位上存在差异。

[0072] 当转轴沿一固定方向转动时,同一时刻,第一读数头与第二读数头在光学圆周上所经过的长度差为 $\widehat{A_2B}$ 。由小角近似理论,可知 $\widehat{A_2B} \approx A_2B$ 且 $O_M E \perp A_1 A_2$,根据图2所示几何相似关系,长度差 $\widehat{A_2B}$ 表示为:

$$[0073] \quad \widehat{A_2B} \approx 2O_M E = 2e \cdot \sin\varphi$$

[0074] 其中, φ 为偏心方向与 $A_1 A_2$ 方向间夹角。

[0075] 长度差 $\widehat{A_2B}$ 在电条纹信号周期内所对应的角度数即为2个读数头探测到的正弦信号间的相位差,第一读数头与第二读数头接收信号间的相对相位差表示为:

$$[0076] \quad \Delta\psi_{12} = 360 \times \frac{2e \cdot \sin\varphi}{d}$$

[0077] 其中,d为光栅栅距,360代表一个电条纹信号周期内的角度数。第一读数头与第二读数头间相位差随转轴转角的变化而变化。

[0078] 被测轴旋转一周的过程中,第一读数头与第二读数头间的偏心路程差会2次达到极值点,如图2所示,分别对应偏心方向与 $A_1 A_2$ 方向正交时接收器2读到的2个点。圆光栅从极小值点 P_{\min} ,逆时针旋转 180° 到达极大值点 P_{\max} 期间2个读数头所读到的总相位差为 $\Delta\psi$;进一步变换整理式,得到偏心距e的计算公式。

$$[0079] \quad e = \frac{\Delta\psi}{4 \times 360^\circ} \times d$$

[0080] 第二读数头读到极值点时开始记录,圆光栅旋转 90° 后,偏心方向将会和 $A_1 A_2$ 方向一致。因此,在示波器中捕捉到相位极值点后,根据正交关系便可确定圆光栅的偏心方向。

[0081] S2、采用双读数头对称安装的方法对圆光栅安装偏心引起的测角误差进行修正补

偿,能够有效对测角误差进行补偿修正,基于此原理建立双读数头对称安装的均值法误差补偿理想模型;

[0082] 采用双读数头的方法对圆光栅安装偏心引起的测角误差进行修正补偿,能够有效对测角误差进行补偿修正,在理想安装情况下,建立双读数头对称误差补偿模型能够有效消除圆光栅安装偏心及轴系径向运动偏差。

[0083] 对于双读数头圆光栅测角系统,采用均值法是常规的误差修正方法。均值法误差补偿理想模型为:

$$\begin{aligned} \bar{\theta} &= (\kappa(\theta) \cos \tau_1 + \varepsilon(\theta + \tau_1) + [x(\theta) \sin \tau_1 - y(\theta) \cos \tau_1] / R \\ [0084] \quad &+ \psi(\theta_1) + \delta(\theta_1) + \kappa(\theta) \cos \tau_2 + \varepsilon(\theta + \tau_2) + [x(\theta) \sin \tau_2 - y(\theta) \cos \tau_2] / R \\ &+ \psi(\theta_2) + \delta(\theta_2)) / 2 + \theta \end{aligned}$$

[0085] 均值法计算简单,但对两读数头的安装精度要求较高;当读数头没有安装误差时,其中, $\tau_1 = 0^\circ$, $\tau_2 = 180^\circ$ 。

[0086] 此时,上式可变形为:

$$[0087] \quad \bar{\theta} = (\varepsilon(\theta + \tau_1) + \psi(\theta_1) + \delta(\theta_1) + \varepsilon(\theta + \tau_2) + \psi(\theta_2) + \delta(\theta_2)) / 2 + \theta$$

[0088] 其中,由于圆光栅安装偏心及轴系径向跳动引起的测角误差都被消除了。但是,当读数头存在安装误差的时候,均值法是不能完全消除这两项误差的影响的。通过以上对圆光栅测角系统中的误差来源和影响机理的分析可知,双读数头均值法应用在有较大的读数头安装误差的环境下存在一定的局限性。

[0089] S3、在步骤S2建立的均值法误差补偿理想模型中加入读数头安装误差以及随机误差,建立双读数头非对称安装误差补偿模型;

[0090] 在实际安装过程中,双读数头不能达到理想状态,即两个读数头之间会有安装偏差,因此无法有效消除安装偏心对测角精度的不利影响。

[0091] 通过采用非对径安装双读数头的圆光栅偏心误差修正方法一方面可以减小对径安装误差对测量结果的不利影响;另一方面突破了读数头必须对径安装的限制,提高了仪器设备在结构设计时的自由度。

[0092] 在精密测量条件下,随机误差和系统误差的幅值经常是接近的;在系统误差得到正确的修正之后,随机误差的幅值有可能超过系统误差的幅值,在双读数头对称安装误差补偿模型中加入随机误差成分,能够有效消除随机误差对补偿结果的影响。

[0093] 请参阅图3, O_1 为轴系回转中心, O 为圆光栅盘的几何中心, C 、 D 为两读数头的安装位置; OO_1 为圆光栅盘的偏心距,用 e 表示; $\angle O_1OD$ 为圆光栅盘的偏心角,用 ω 表示; $\angle O_1OC$ 用 η 表示;为方便表达,图3中轴和圆光栅盘固定,而读数头绕回转中心 O_1 逆时针旋转,从 C 、 D 点分别旋转 θ 角到达 A 、 B 点; θ_1 、 θ_2 为两个读数头在这个旋转过程中测得的旋转角度;两个读数头的安装角 $\angle CO_1D$ 用 φ 表示;当双读数头是严格的对径安装,即没有读数头安装位置误差时, $\varphi = 180^\circ$ 。

[0094] 由三角形外角等于不相邻两内角和,可得第一读数头的测角误差:

$$[0095] \quad \theta_1 - \theta = \sin^{-1} \left[\frac{e}{R} \sin(\omega - \theta_1) \right] - \sin^{-1} \left[\frac{e}{R} \sin \omega \right]$$

[0096] 同理得第二读数头的测角误差:

$$[0097] \quad \theta_2 - \theta = \sin^{-1} \left[\frac{e}{R} \sin \eta \right] - \sin^{-1} \left[\frac{e}{R} \sin (\eta + \theta_2) \right]$$

[0098] 由图3可知

$$[0099] \quad \sin \eta [\sin \alpha + \cos (\omega + \gamma + \phi) \sin (\omega - \theta_1)] + \cos \eta \sin (\omega + \gamma + \phi) \sin (\omega - \theta_1) = 0$$

[0100] 令 $m = \sin \alpha + \cos (\omega + \gamma + \phi) \cdot \sin (\omega - \theta_1)$, $n = \sin (\omega + \gamma + \phi) \cdot \sin (\omega - \theta_1)$, 则:

$$[0101] \quad m \cdot \sin \eta + n \cdot \cos \eta = 0$$

[0102] 根据辅助角公式得:

$$[0103] \quad \sqrt{m^2 + n^2} \cdot \sin (\eta + \sigma) = 0$$

$$[0104] \quad \eta = 180 - \tan^{-1} \frac{\sin \left[\omega + \tan^{-1} \left(\frac{e}{R} \sin (\omega) \right) + \phi \right]}{\cos \left[\omega + \tan^{-1} \left(\frac{e}{R} \sin (\omega) \right) + \phi \right] + \frac{e}{R}}$$

[0105] 由以上式子可得两读数头测量值与偏心参数之间的关系式:

$$[0106] \quad \theta_2 - \theta_1 + \sin^{-1} \left(\frac{e}{R} \sin (\omega - \theta_1) \right) - \sin^{-1} \left(\frac{e}{R} \sin \omega \right) + \sin^{-1} \left(\frac{e}{R} \sin \eta - \theta_2 \right) - \sin^{-1} \left(\frac{e}{R} \sin \eta \right) = 0$$

[0107] 其中,只包含两个读数头的读数和圆光栅的安装偏心参数。其中两个读数头读数 θ_1, θ_2 可由数据采集系统进行采集。将轴系旋转一周即可获得一系列的 θ_1, θ_2 , 使用最小二乘法即可拟合出圆光栅安装偏心参数,从而实现圆光栅安装偏心参数的标定

[0108] 由上述分析得双读数头非对称安装误差补偿模型如下:

$$[0109] \quad \hat{\theta} = -\frac{1}{2} \left(\begin{array}{l} \sin^{-1} \left(\frac{e}{R} \sin (\omega - \theta_1) \right) - \sin^{-1} \left(\frac{e}{R} \sin \omega \right) \\ -\sin^{-1} \left(\frac{e}{R} \sin (\eta - \theta_2) \right) + \sin^{-1} \left(\frac{e}{R} \sin \eta - (\theta_1 + \theta_2) \right) \end{array} \right)$$

[0110] 其中, $\hat{\theta}$ 表示经过新方法补偿后的转动角度测量值,补偿后的测角误差可表示为 $\hat{\theta} - \theta$ 。实际应用中,首先让被测轴系带动圆光栅旋转一周,以获取圆光栅安装偏心参数和两个读数头的安装位置误差参数,然后将两读数头的读数 θ_1, θ_2 代入,即可得到补偿后的测角结果,其中已经消除了圆光栅安装偏心和读数头对径安装误差的不利影响。

[0111] S4、通过显微镜测量得到圆光栅的偏心距,将偏心距作为初始值代入步骤S1建立的圆光栅偏心参数仿真模型中,通过迭代得到真实的偏心距;

[0112] 圆光栅偏心参数求解模型具体为:

[0113] 基于Gauss-Newton算法,对搜索步长进行改进,消除Gauss-Newton算法中雅克比矩阵必须是列满秩的限制,进而得到基于L-M算法的圆光栅偏心参数求解模型。

[0114] 研究使用L-M算法求解圆光栅的偏心参数。

[0115] 将

$$\theta_2 - \theta_1 + \sin^{-1} \left(\frac{e}{R} \sin (\omega - \theta_1) \right) - \sin^{-1} \left(\frac{e}{R} \sin \omega \right) + \sin^{-1} \left(\frac{e}{R} \sin \eta - \theta_2 \right) - \sin^{-1} \left(\frac{e}{R} \sin \eta \right) = 0 \text{ 记为F}$$

$(x_i) = 0$, 其中, $x_i = [e_i, R_i, \omega_i]$ 。则偏心误差参数辨识问题表示为:

$$[0116] \quad \min_{x \in R^n} f(x) = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^m F^2(x_i)$$

[0117] 目标函数 f 的梯度和Hessian矩阵分别为:

$$[0118] \quad g(x_i) = \sum_{i=1}^m F(x_i) \nabla F(x_i)$$

$$[0119] \quad G(x_i) = \sum_{i=1}^m \nabla F(x_i) (\nabla F(x_i))^T + \sum_{i=1}^m F(x_i) \nabla^2 F(x_i) = J(x)^T J(x) + S(x)$$

[0120] 其中, $J(x) = (\nabla F(x_1), \dots, \nabla F(x_m))^T$ 为雅各比矩阵, $S(x) = \sum_{i=1}^m F(x_i) \nabla^2 F(x_i)$ 。

[0121] 利用牛顿迭代法得到:

$$[0122] \quad x_{i+1} = x_i - (J_i^T J_i + S_i)^{-1} J_i^T F(x_i)$$

[0123] 忽略其中的 $S(x)$, 得到:

$$[0124] \quad x_{i+1} = x_i + d_i$$

[0125] 其中, $d_i = -(J_i^T J_i)^{-1} J_i^T F(x_i)$, 是 $f(x)$ 在 x_i 点的搜索步长。上式就是Gauss-Newton算法, 但是此算法要求雅各比矩阵必须是列满秩的。

[0126] 对搜索步长 d_k 进行改进:

$$[0127] \quad d_i = -(J_i^T J_i + \mu_i I)^{-1} J_i^T F(x_i)$$

[0128] 其中, I 为单位矩阵, μ_i 为阻尼系数。此时得到的式子就是L-M算法。

[0129] 请参阅图6, L-M算法求解偏心参数的具体步骤如下:

[0130] 1) 设定偏心距 e , 偏心角 ω , 码盘半径 R 的初值;

[0131] 2) 计算雅各比矩阵 J 和函数值;

[0132] 3) 计算误差, 如果误差小于设定的阈值, 则终止。否则继续;

[0133] 4) 计算Hessian矩阵的值: $H = J' \times J$;

[0134] 5) 计算搜索步长 d ;

[0135] 6) 计算新的参数和函数值;

[0136] 7) 计算新的误差;

[0137] 8) 如果误差比上一次减小, 则更新参数并减小阻尼系数 μ , 如果误差增大, 则增大阻尼系数, 不更新参数, 返回步骤2) 继续迭代。

[0138] L-M算法能够通过使用MATLAB软件里的nlinfit函数实现。对于偏心误差补偿模型的求解需要设定偏心距 e , 偏心角 ω , 码盘半径 R 这3个参数的初值。偏心距 e , 偏心角 ω 的初值采用随机数设定, 码盘半径根据实际选用圆光栅尺寸设定。

[0139] S5、将步骤S4得到的真实的偏心距代入步骤S3建立的双读数头非对称安装误差补偿模型中, 实现对圆光栅安装偏心引起的测角误差的精准补偿。

[0140] 双读数头非对称安装测角误差补偿模型具体为:

[0141] 以圆光栅偏心参数求解模型计算得到的偏心距和偏心方向为输入变量, 以测角偏心误差补偿值为输出变量, 实现对圆光栅编码器由安装偏心以及读数头安装偏差引起的测

角误差的精准补偿。

[0142] 为使本发明实施例的目的、技术方案和优点更加清楚，下面将结合本发明实施例中的附图，对本发明实施例中的技术方案进行清楚、完整地描述，显然，所描述的实施例是本发明一部分实施例，而不是全部的实施例。通常在此处附图中的描述和所示的本发明实施例的组件可以通过各种不同的配置来布置和设计。因此，以下对在附图中提供的本发明的实施例的详细描述并非旨在限制要求保护的本发明的范围，而是仅仅表示本发明的选定实施例。基于本发明中的实施例，本领域普通技术人员在没有作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。

[0143] 请参阅图5，稳速驱动装置通过联轴器带动平台转动，圆光栅安装在转动平台上随平台进行转动，第一读数头和第二读数头安装在圆光栅的栅线上方，对圆光栅旋转过的角度进行测量。

[0144] 请参阅图4，曲线是在单读数头测量角度时圆光栅安装偏心对于测角精度的影响，从图中可以看出圆光栅安装偏心对于测角精度的影响十分显著，因此本发明采用双读数头对称安装的测量方法对偏心引起的测角误差进行修正。

[0145] 请参阅图7，两条曲线分别是补偿前后由于圆光栅安装偏心引入的测量误差，可以看出在采用双读数头非对称安装误差补偿模型进行补偿后，圆光栅系统的测角精度显著提升。

[0146] 综合分析模型结果，设偏心距 $e=10\mu\text{m}$ ，圆光栅盘半径 $R=26\text{mm}$ ，偏心角为 $\omega=60^\circ$ ，两读数头安装误差为 2° ，将以上预设参数代入模型中，用最小二乘法对仿真数据进行拟合，得到偏心距 $e=10.070\mu\text{m}$ ，偏心角 $\omega=59.465867^\circ$ ，两读数头安装误差为 2.000030° ，与输入参数基本一致，证明了偏心参数拟合算法的正确性。因此可以对在气浮转台上承载的圆光栅进行测量。安装对径方向安装了两个读数头A和B，使用的是雷尼绍公司的RCDM20-108系列的圆光栅编码器，圆光栅的直径为108mm。转动圆光栅，观察读数头A的值，每隔 15° 记录下读数头A和B的值，直至旋转一周共得到24组数据，根据实验数据使用L-M算法可以求解出圆光栅的偏心参数。求解需要设定偏心率 a 、偏心角 w 和两个读数头的夹角 α 这3个参数的初值，因为两个读数头是近似对径安装，因此将两个读数头夹角 α 的初值设为 180° 。偏心率 a 和偏心角 w 的初值采用随机数设定，最终经过69次迭代求解出圆光栅的偏心参数分别为：偏心距 $e=1.8\mu\text{m}$ ，两个读数头的夹角 $\alpha=179.250^\circ$ 。将求解得到的参数代入下式

$$[0147] \quad \hat{\theta} = -\frac{1}{2} \begin{pmatrix} \sin^{-1}\left(\frac{e}{R}\sin(\omega-\theta_1)\right) - \sin^{-1}\left(\frac{e}{R}\sin\omega\right) \\ -\sin^{-1}\left(\frac{e}{R}\sin(\eta-\theta_2)\right) + \sin^{-1}\left(\frac{e}{R}\sin\eta - (\theta_1 + \theta_2)\right) \end{pmatrix}$$

[0148] 通过模型分析，偏心误差是在安装过程中由于圆光栅的几何中心和被测轴旋转中心不重合所产生的，是一种有规律的系统误差，其误差值随着转轴转角周期性变化。偏心量越大，则测角误差越大；同样的偏心量下，光栅圆环直径越大，测角误差越小；测角偏心误差随光栅圆环的旋转而呈周期性变化，轴系旋转一周而误差变化一个周期，在误差频谱中表现为一次谐波。通过采用双读数头对称误差补偿模型能够有效消除圆光栅安装偏心及轴系径向运动偏差，从而从理论上构建了圆光栅安装偏心补偿模型。在考虑了实际安装过程中两个读数头之间微小的安装偏差，通过采用非对径安装双读数头的圆光栅偏心误差修正方

法一方面可以减小对径安装误差对测量结果的不利影响;另一方面突破了读数头必须对径安装的限制,提高了仪器设备在结构设计时的自由度。基于圆光栅偏心参数求解模型,以该模型计算得到的偏心距和偏心方向为输入变量,以测角偏心误差补偿值为输出变量,实现对圆光栅编码器由安装偏心以及读数头安装偏差引起的测角误差的精准补偿。结合实验结果来看,补偿前圆光栅编码器的测角的平均误差为 $6.81''$,补偿后圆光栅编码器的测角的平均误差为 $2.28''$,通过采用非对径安装双读数头的圆光栅偏心误差修正方法可以有效补偿偏心引起的测角误差,将编码器测角精度提升了 $4.53''$ 。补偿前的分度误差峰谷值为 $10.52''$,补偿后的分度误差峰谷值为 $2.83''$,精度提升了 $7.69''$ 。综上所述可以得出,采用非对径安装双读数头的圆光栅偏心误差修正模型可以有效消除码盘安装偏心对于圆光栅测角准确性的影响,对于提升圆光栅编码器测角精度具有重要意义。

[0149] 综上所述,本发明一种圆光栅编码器双读数头非对称安装偏心误差补偿方法,采用双读数头对称误差补偿模型能够有效消除圆光栅安装偏心及轴系径向运动偏差,从而从理论上构建了圆光栅安装偏心补偿模型。在考虑了实际安装过程中两个读数头之间微小的安装偏差,通过采用非对径安装双读数头的圆光栅偏心误差修正方法一方面可以减小对径安装误差对测量结果的不利影响;另一方面突破了读数头必须对径安装的限制,提高了仪器设备在结构设计时的自由度。基于圆光栅偏心参数求解模型,以该模型计算得到的偏心距和偏心方向为输入变量,以测角偏心误差补偿值为输出变量,实现对圆光栅编码器由安装偏心以及读数头安装偏差引起的测角误差的精准补偿。结合实验结果来看,补偿前圆光栅编码器的测角的平均误差为 $6.81''$,补偿后圆光栅编码器的测角的平均误差为 $2.28''$,通过采用非对径安装双读数头的圆光栅偏心误差修正方法可以有效补偿偏心引起的测角误差,将编码器测角精度提升了 $4.53''$ 。补偿前的分度误差峰谷值为 $10.52''$,补偿后的分度误差峰谷值为 $2.83''$,精度提升了 $7.69''$ 。综上所述可以得出,采用非对径安装双读数头的圆光栅偏心误差修正模型可以有效消除码盘安装偏心对于圆光栅测角准确性的影响,对于提升圆光栅编码器测角精度具有重要意义。

[0150] 本领域内的技术人员应明白,本申请的实施例可提供为方法、系统、或计算机程序产品。因此,本申请可采用完全硬件实施例、完全软件实施例、或结合软件和硬件方面的实施例的形式。而且,本申请可采用在一个或多个其中包含有计算机可用程序代码的计算机可用存储介质(包括但不限于磁盘存储器、CD-ROM、光学存储器等)上实施的计算机程序产品的形式。

[0151] 本申请是参照根据本申请实施例的方法、设备(系统)、和计算机程序产品的流程图和/或方框图来描述的。应理解可由计算机程序指令实现流程图和/或方框图中的每一流程和/或方框、以及流程图和/或方框图中的流程和/或方框的结合。可提供这些计算机程序指令到通用计算机、专用计算机、嵌入式处理机或其他可编程数据处理设备的处理器以产生一个机器,使得通过计算机或其他可编程数据处理设备的处理器执行的指令产生用于实现在流程图一个流程或多个流程和/或方框图一个方框或多个方框中指定的功能的装置。

[0152] 这些计算机程序指令也可存储在能引导计算机或其他可编程数据处理设备以特定方式工作的计算机可读存储器中,使得存储在该计算机可读存储器中的指令产生包括指令装置的制造品,该指令装置实现在流程图一个流程或多个流程和/或方框图一个方框或多个方框中指定的功能。

[0153] 这些计算机程序指令也可装载到计算机或其他可编程数据处理设备上,使得在计算机或其他可编程设备上执行一系列操作步骤以产生计算机实现的处理,从而在计算机或其他可编程设备上执行的指令提供用于实现在流程图一个流程或多个流程和/或方框图一个方框或多个方框中指定的功能的步骤。

[0154] 以上内容仅为说明本发明的技术思想,不能以此限定本发明的保护范围,凡是按照本发明提出的技术思想,在技术方案基础上所做的任何改动,均落入本发明权利要求书的保护范围之内。

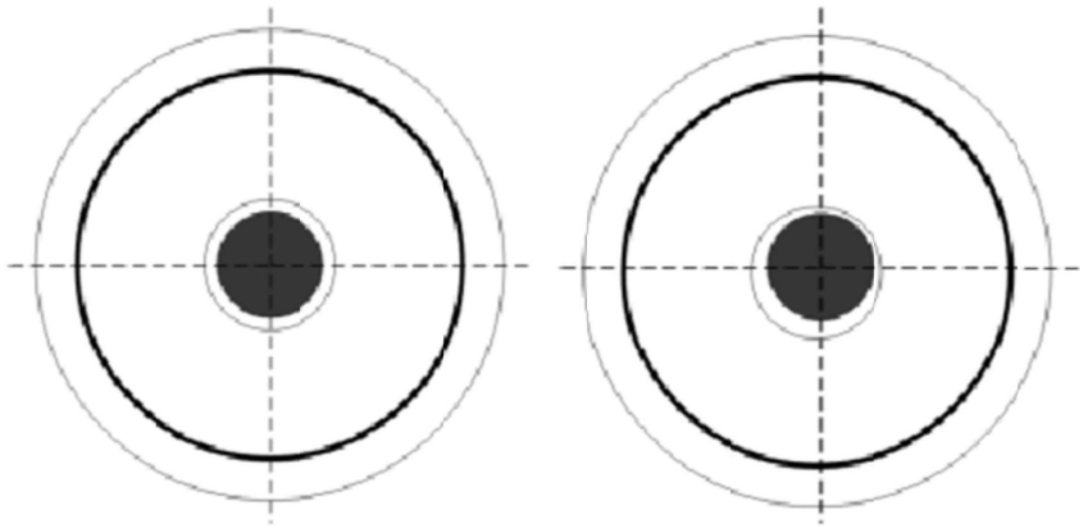


图1

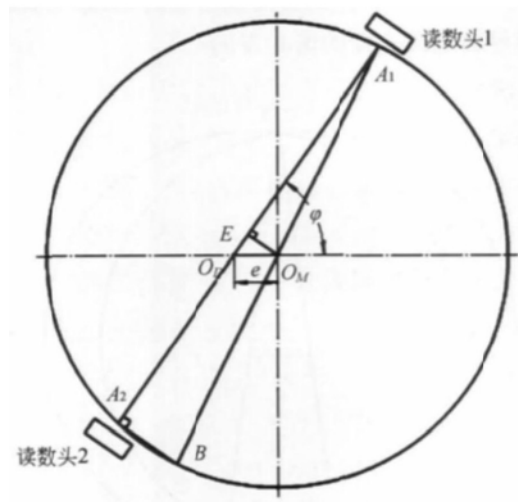


图2

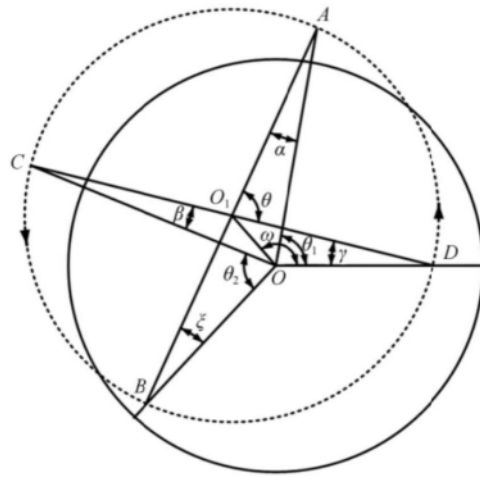


图3

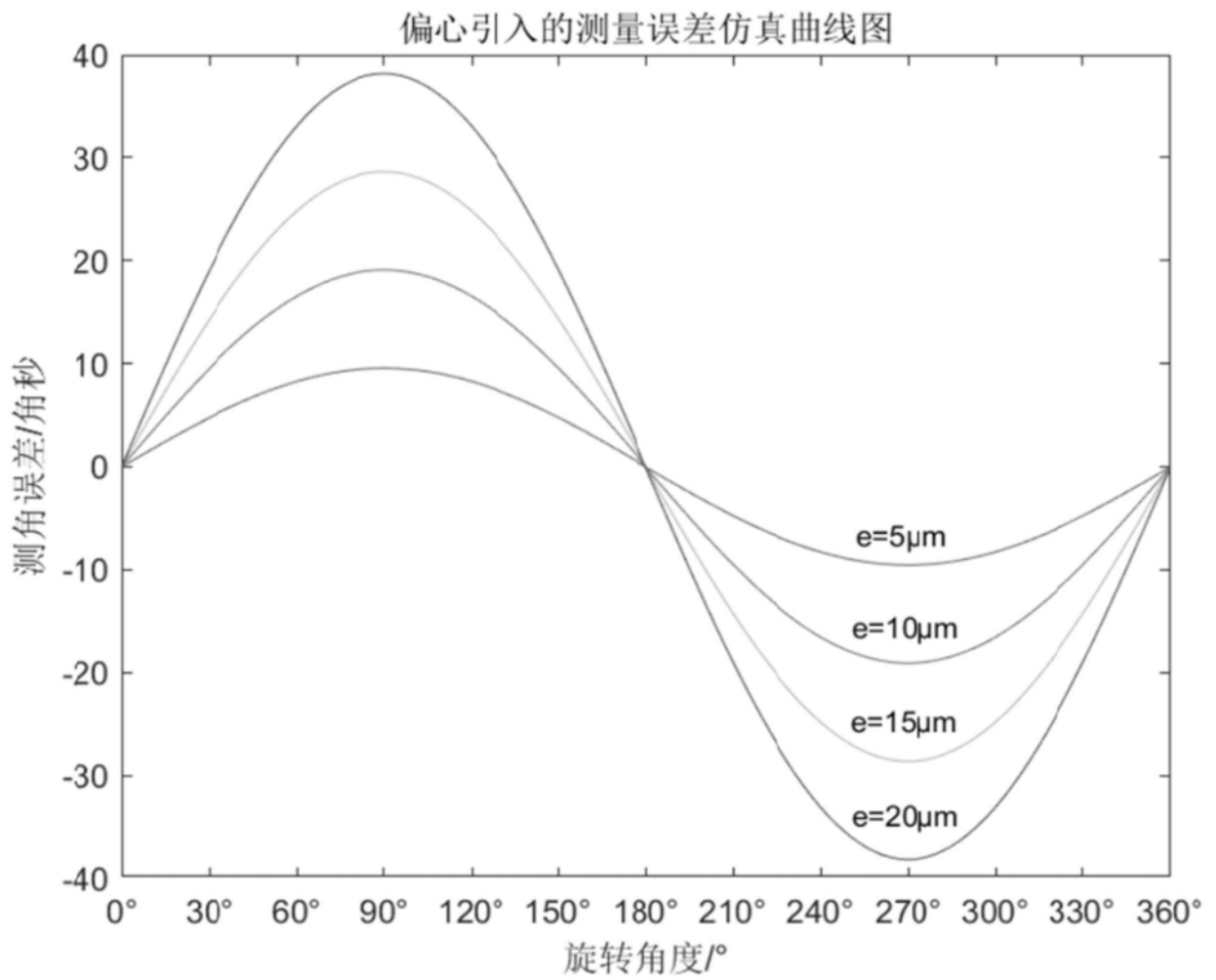


图4

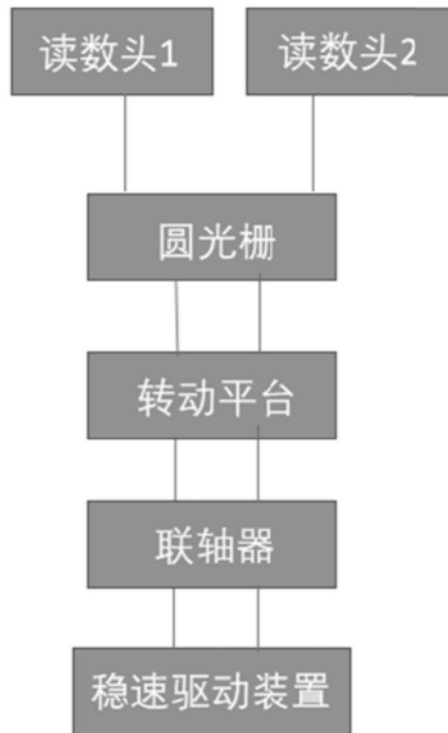


图5

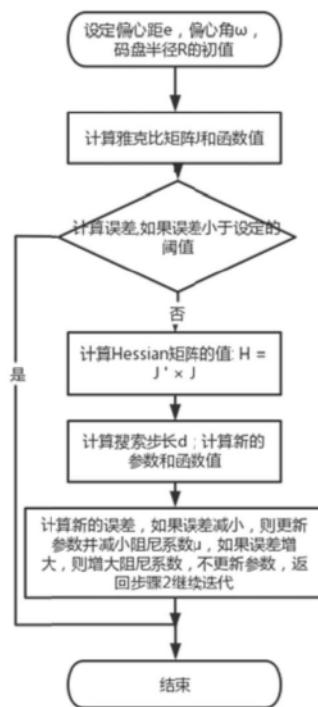


图6

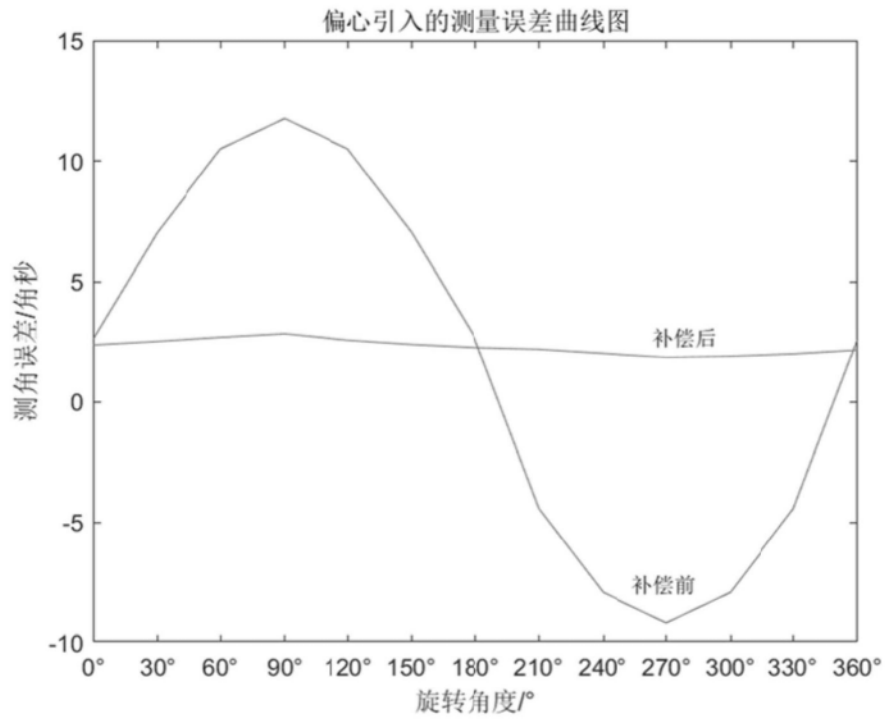


图7