



(12)发明专利

(10)授权公告号 CN 107747931 B

(45)授权公告日 2019.11.22

(21)申请号 201710720507.8

审查员 古玖旺

(22)申请日 2017.08.21

(65)同一申请的已公布的文献号

申请公布号 CN 107747931 A

(43)申请公布日 2018.03.02

(73)专利权人 上海微泓自动化设备有限公司

地址 201114 上海市闵行区新骏环路245号
第1层E101、第2层E201室

(72)发明人 刘品宽

(74)专利代理机构 上海汉声知识产权代理有限公司

公司 31236

代理人 郭国中

(51)Int.Cl.

G01B 21/22(2006.01)

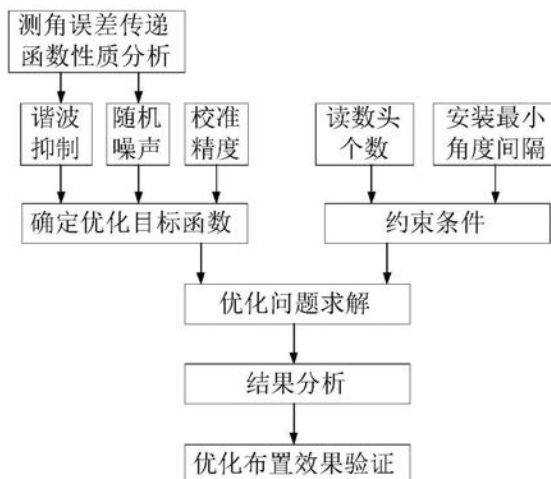
权利要求书2页 说明书6页 附图4页

(54)发明名称

用于角度编码器自校准的读数头优化布置方法

(57)摘要

本发明涉及一种用于角度编码器自校准的读数头优化布置方法,其包括以下步骤:采用傅立叶分析法确定测角误差分析中的传递函数并分析其特性;综合考虑谐波抑制、随机噪声及校准精度等因素确立优化目标;确定读数头个数、校准谐波总数等初始参数及读数头安装最小角度间隔等约束条件,进而求解优化问题等。本发明提出的用于角度编码器自校准的读数头优化布置方法能够实现对角度编码器的高精度、快速、实时、在位校准,且成本更低,其中两读数头最优布置方案特别适用于常规的高精度测试系统,而三读数头优化系统更可被用于超高精度的校准场合。



1. 一种用于角度编码器自校准的读数头优化布置方法,其特征在于,所述用于角度编码器自校准的读数头优化布置方法包括以下步骤:

步骤一:确定测角误差分析中的传递函数并分析其特性:

第k个读数头 H_k 相对于第一个读数头 H_1 的安装间隔角度为 α_k ,其中 $\alpha_1=0$,则在圆光栅码盘旋转的过程中,读数头 H_k 的读数 $H_k(\theta)$ 既包含了真实的旋转角度 θ ,又包含了读数头 H_k 测点处的测角误差 $\varepsilon(\theta+\alpha_k)$,如下公式所示:

$$H_k(\theta) = \theta + \varepsilon(\theta + \alpha_k)$$

在实际测试中通过两个读数头读数的相对差值消去角度 θ ,获得只包含测角误差的关系式,读数头 H_k 与 H_r 的相对差值如下公式所示:

$$\delta_{kr}(\theta) = H_k(\theta) - H_r(\theta) = \varepsilon(\theta + \alpha_k) - \varepsilon(\theta + \alpha_r)$$

又由于角度编码器每旋转一圈便会重复原来的误差,因此其测角误差具有周期性,用傅立叶级数表示,如下公式所示:

$$\varepsilon(\theta) = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} F(n) e^{in\theta}$$

式中, n 表示各阶谐波分量, N 为所要分析的谐波总数, $F(n)$ 为傅里叶系数;基于圆周封闭原理,直流分量 $F(0) = 0$;e为自然底数,实数为2.718281;

对差值函数 $\delta_{kr}(\theta)$ 进行傅立叶变换,设 $E_{kr}(n)$ 为 $\delta_{kr}(\theta)$ 所对应的傅立叶系数,则 $E_{kr}(n)$ 与 $F(n)$ 的相对关系如下公式所示:

$$E_{kr}(n) = (e^{in\alpha_k} - e^{in\alpha_r})F(n) = W_{kr}(n)F(n)$$

$$F(n) = \frac{E_{kr}(n)}{W_{kr}(n)}$$

式中 $W_{kr}(n)$ 即为传递函数, $W_{kr}(n)$ 只与读数头之间的间隔角度有关,因此,测得差值函数 $\delta_{kr}(\theta)$ 后,通过离散傅立叶变换得到其傅立叶系数 $E_{kr}(n)$,进而结合传递函数 $W_{kr}(n)$ 得到测角误差的傅里叶系数 $F(n)$,最后通过离散傅立叶逆变换求得角度编码器测角误差函数 $\varepsilon(\theta)$;

对于读数头个数 $M > 2$ 的编码器自校准系统,通过其中任意两个读数头都能够得到 $F(n)$,因此总共有 C_M^2 个组合,综合利用所有组合能够提升 $F(n)$ 的估算精度,如下公式所示:

$$F(n) = \sum_{k=2}^M \sum_{r=1}^{k-1} \frac{p_{kr}(n) E_{kr}(n)}{W_{kr}(n)}$$

其中, $p_{kr}(n)$ 为加权系数,如下公式所示:

$$\sum_{k=2}^M \sum_{r=1}^{k-1} p_{kr}(n) = 1$$

为了分析传递函数的特性,求取传递函数的模如下式所示:

$$|W_{kr}(n)| = |e^{in\alpha_k} - e^{in\alpha_r}| = |e^{in\alpha_r}| |e^{in(\alpha_k - \alpha_r)} - 1|$$

由于 $|\exp(in\alpha_r)| \equiv 1$,因此对于特定阶次的谐波分量,两读数头传递函数模的大小只与这两个读数头之间的夹角有关,分析可得 $0 \leq |W_{kr}(n)| \leq 2$,取 $|W_{kr}(n)|$ 的阈值为1,当 $|W_{kr}(n)| > 1$ 时该阶次谐波分量可被有效测量;

步骤二:根据步骤一的特性确定合理的优化问题:

对于读数头个数 $M>2$ 的系统,第 n 次特定谐波分量能被有效探测的充分条件是:只要其中有两个读数头对应的传递函数满足 $|W_{kr}(n)|>1$ 即可,即系统检测不到第 n 次谐波分量的条件如下公式:

$$\|W(n)\|_{\infty} = \max_{2 \leq k \leq M, 1 \leq r \leq k-1} |W_{kr}(n)| \leq 1$$

式中, $\|W(n)\|_{\infty}$ 表示由各元素 $W_{kr}(n)$ 组成的向量 $W(n)$ 的无穷范数,设定需要检测的谐波总数为前 N 次,则优化问题总结为如下公式:

$$\min \sum_{n=1}^N \begin{cases} 1, & \|W(n)\|_{\infty} \leq 1 \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases}, \dots$$

$$s. t. \alpha_0 \leq \alpha_2 \leq \alpha_3 - \alpha_2 \leq, \dots, \leq \alpha_k - \alpha_{k-1} \leq, \dots, \leq \alpha_M - \alpha_{M-1} \leq 360^{\circ} - \alpha_M$$

其中优化目标是指不能被有效检测的谐波总数为最少;约束条件的选取是为了求解的唯一性, α_0 表示两个读数头之间的最小角度间隔,至少根据读数头的几何尺寸因素确立;

步骤三:求解优化问题:

针对步骤二中的优化问题进行求解时,首先需要设定初始参数,包括:所用读数头的个数 M 、需要检测的谐波总数 N 、读数头间最小角度间隔 α_0 以及 $|W_{kr}(n)|$ 的阈值,采用启发式算法或者遍历法求解。

2.如权利要求1所述的用于角度编码器自校准的读数头优化布置方法,其特征在于,所述用于角度编码器自校准的读数头优化布置方法得到两个读数头系统自校准最优布置方案:两个读数头处于圆周五等分位置上。

3.如权利要求1所述的用于角度编码器自校准的读数头优化布置方法,其特征在于,采用 0.1° 角度增量的遍历法,选取的初始参数为: $N=100$ 、 $\alpha_0=10^{\circ}$,所述用于角度编码器自校准的读数头优化布置方法得到三个读数头系统的最优布置方案:读数头之间的角度间隔组合分别为 $(27^{\circ}, 36^{\circ}, 63^{\circ})$ 、 $(36^{\circ}, 117^{\circ}, 153^{\circ})$ 和 $(81^{\circ}, 108^{\circ}, 171^{\circ})$ 。

用于角度编码器自校准的读数头优化布置方法

技术领域

[0001] 本发明涉及一种精密测量领域中角度测量装置的校准方法,特别是涉及一种用于角度编码器自校准的读数头优化布置方法。

背景技术

[0002] 角度编码器是精密测量领域中的关键部件,主要应用在角度值的高精度测量装置中,例如机床回转工作台、精密转台以及角度计量国家基准等。典型的角度编码器主要包括圆光栅码盘和读数头。在实际工作过程中,角度编码器的测量精度受多种因素影响,包括:光栅栅距的准确性、信号细分质量、光栅安装变形、读数头的安装与调整误差、光栅相对于轴承的安装偏心、轴承跳动甚而温度变化等。因此就需要通过对编码器进行校准来确定进而补偿由这些因素所导致的测量误差,提升测量精度。

[0003] 一种传统的校准方法是将一个更高精度的测角装置(参考编码器或多面棱体等)与被检角度编码器同轴安装,通过连续测量二者的差值来确定被检角度编码器的误差。但是这种方法实时性差、操作繁琐耗时,同时由于忽略了参考测角装置的相关误差,因此其校准精度有限。另一种传统的校准方法称为排列互比法,主要原理是通过将被检角度编码器与陪检测角装置(如多面棱体、多齿分度台等)同轴安装,进行多次转位的比较测量,根据圆周封闭原理进行误差分离,最终可分离出消除了陪检装置误差影响的被检角度编码器的角度误差。排列互比法具有很高的校准精度,但存在操作耗时、校准点数有限等问题。

[0004] 为了避免使用其他的测角装置,同时实现角度编码器在其安装轴上的实时快速校准,近年来自校准技术也被广泛采用。经过现有技术文献的检索发现,专利号为US7840372B2的美国专利利用TDR法校准角度编码器,但是这种方法只能用来校准气浮或磁浮轴承等可忽略摩擦阻力类主轴,且其算法复杂不易操作;专利号为US7143518B2的美国专利采用M个读数头在圆光栅周围等角度间隔均匀分布的方式,可以校准得到角度误差中除M及M的倍数次外的剩余所有谐波成分,但是为了获得较高的校准精度,所需的读数头一般都为五个以上,此种方法既存在读数头安装调整难度大的问题,又增加了相应的成本。也有其他文献给出了若干用于角度编码器自校准的读数头布置方案,但是都存在使用读数头个数较多、布置方式没有经过优化设计等问题。

发明内容

[0005] 本发明所要解决的技术问题是提供一种用于角度编码器自校准的读数头优化布置方法,其能够实现对角度编码器的高精度、快速、实时、在位校准,且成本更低,其中两读数头最优布置方案特别适用于常规的高精度测试系统,而三读数头优化系统更可被用于超高精度的校准场合。

[0006] 本发明是通过下述技术方案来解决上述技术问题的:一种用于角度编码器自校准的读数头优化布置方法,其特征在于,所述用于角度编码器自校准的读数头优化布置方法包括以下步骤:

[0007] 步骤一:确定测角误差分析中的传递函数并分析其特性:

[0008] 第k个读数头 H_k 相对于第一个读数头 H_1 的安装间隔角度为 α_k ($\alpha_1=0$),则在圆光栅码盘旋转的过程中,读数头 H_k 的读数 $H_k(\theta)$ 既包含了真实的旋转角度 θ ,又包含了该测点处的测角误差 $\varepsilon(\theta+\alpha_k)$,如下公式所示:

$$[0009] \quad H_k(\theta) = \theta + \varepsilon(\theta + \alpha_k)$$

[0010] 在实际测试中可以通过两个读数头读数的相对差值消去角度 θ ,获得只包含测角误差的关系式,读数头 H_k 与 H_r 的相对差值如下公式所示:

$$[0011] \quad \delta_{kr}(\theta) = H_k(\theta) - H_r(\theta) = \varepsilon(\theta + \alpha_k) - \varepsilon(\theta + \alpha_r)$$

[0012] 又由于角度编码器每旋转一圈便会重复原来的误差,因此其测角误差具有周期性,可以用傅立叶级数表示,如下公式所示:

$$[0013] \quad \varepsilon(\theta) = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} F(n) e^{in\theta}$$

[0014] 式中, n 表示各阶谐波分量, N 为所要分析的谐波总数, $F(n)$ 为傅里叶系数;基于圆周封闭原理,直流分量 $F(0) = 0$;e为自然底数,实数为2.718281;

[0015] 同样也可对差值函数 $\delta_{kr}(\theta)$ 进行傅立叶变换,设 $E_{kr}(n)$ 为 $\delta_{kr}(\theta)$ 所对应的傅立叶系数,则 $E_{kr}(n)$ 与 $F(n)$ 的相对关系如下公式所示:

$$[0016] \quad E_{kr}(n) = (e^{in\alpha_k} - e^{in\alpha_r})F(n) = W_{kr}(n)F(n)$$

$$[0017] \quad F(n) = \frac{E_{kr}(n)}{W_{kr}(n)}$$

[0018] 式中 $W_{kr}(n)$ 即为传递函数,可以看出 $W_{kr}(n)$ 只与读数头之间的间隔角度有关,因此,测得差值函数 $\delta_{kr}(\theta)$ 后,通过离散傅立叶变换得到其傅立叶系数 $E_{kr}(n)$,进而结合传递函数 $W_{kr}(n)$ 即可得到测角误差的傅里叶系数 $F(n)$,最后通过离散傅立叶逆变换求得角度编码器测角误差函数 $\varepsilon(\theta)$;

[0019] 此外对于读数头个数 $M > 2$ 的编码器自校准系统,通过其中任意两个读数头都可以得到 $F(n)$,因此总共有 C_M^2 个组合,综合利用所有组合可进一步提升 $F(n)$ 的估算精度,如下公式所示:

$$[0020] \quad F(n) = \sum_{k=2}^M \sum_{r=1}^{k-1} \frac{p_{kr}(n) E_{kr}(n)}{W_{kr}(n)}$$

[0021] 其中, $p_{kr}(n)$ 为加权系数,如下公式所示:

$$[0022] \quad \sum_{k=2}^M \sum_{r=1}^{k-1} p_{kr}(n) = 1$$

[0023] 为了分析传递函数的特性,求取传递函数的模如下式所示:

$$[0024] \quad |W_{kr}(n)| = |e^{in\alpha_k} - e^{in\alpha_r}| = |e^{in\alpha_r}| |e^{in(\alpha_k - \alpha_r)} - 1|$$

[0025] 由于 $|\exp(in\alpha_r)| \equiv 1$,因此对于特定阶次的谐波分量,两读数头传递函数模的大小只与这两个读数头之间的夹角有关,进一步分析可得 $0 \leq |W_{kr}(n)| \leq 2$,另外由公式也可以看出,当 $|W_{kr}(n)| = 0$ 时,会产生谐波抑制问题,即测角误差的第 n 次谐波分量难以用傅立叶方法求得而只能强置该阶谐波分量为零,导致校准结果偏离其实际值;此外测量过程中的

噪声和随机干扰不可避免地存在,这样会给差值函数 $\delta_{kr}(\theta)$ 所对应的各阶傅立叶系数 $E_{kr}(n)$ 带来一定的测试偏差,并且对于同样大小的偏差, $|W_{kr}(n)|$ 的值越小,导致最终推出的 $F(n)$ 的误差越大;只有 $|W_{kr}(n)|$ 的值大于1时,才会对噪声起到抑制作用,综合考虑以上因素,本发明方法推荐取 $|W_{kr}(n)|$ 的阈值为1,当 $|W_{kr}(n)| > 1$ 时该阶次谐波分量可被有效测量;

[0026] 步骤二:根据步骤一的特性确定合理的优化问题:

[0027] 对于读数头个数 $M > 2$ 的系统,可以认为第 n 次特定谐波分量能被有效探测的充分条件是:只要其中有两个读数头对应的传递函数满足 $|W_{kr}(n)| > 1$ 即可,也就是说,系统检测不到第 n 次谐波分量的条件如下公式:

$$[0028] \quad \|W(n)\|_{\infty} = \max_{2 \leq k \leq M, 1 \leq r \leq k-1} |W_{kr}(n)| \leq 1$$

[0029] 式中, $\|W(n)\|_{\infty}$ 表示由各元素 $W_{kr}(n)$ 组成的向量 $W(n)$ 的无穷范数,设定需要检测的谐波总数为前 N 次,则优化问题可以总结为如下公式:

$$[0030] \quad \min \sum_{n=1}^N \begin{cases} 1, & \|W(n)\|_{\infty} \leq 1 \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases}, \dots$$

$$[0031] \quad \text{s. t. } \alpha_0 \leq \alpha_2 \leq \alpha_3 - \alpha_2 \leq, \dots, \leq \alpha_k - \alpha_{k-1} \leq, \dots, \leq \alpha_M - \alpha_{M-1} \leq 360^\circ - \alpha_M$$

[0032] 其中优化目标的意思是不能被有效检测的谐波总数为最少;约束条件的选取是为了求解的唯一性,避免出现多解以浪费计算资源, α_0 表示两个读数头之间的最小角度间隔,可根据读数头的几何尺寸等因素确立;

[0033] 步骤三:求解优化问题:

[0034] 针对步骤二中的优化问题进行求解时首先需要设定初始参数,包括:所用读数头的个数 M 、需要检测的谐波总数 N 、读数头间最小角度间隔 α_0 以及 $|W_{kr}(n)|$ 的阈值,由于优化问题的目标函数不是凸函数,不存在全局最优解,因此可以采用启发式算法求解,譬如遗传算法、差分进化算法或粒子群算法,当问题的维数较小时,以一定的角度增量采用遍历法亦可进行求解;

[0035] 事实上在角度编码器的工业应用中,测角误差中由圆光栅码盘安装偏心导致的一次谐波误差占主导地位,外加上其他若干幅值较大的低次谐波,而高次谐波由于幅值较小基本可以忽略,本发明发现采用上述优化方法得出的读数头优化布置结果中,两读数头系统足以适用于常规的高精度校准场合,例如机床回转工作台、车床C轴、机械轴承支撑的回转运动平台等角度编码器的应用场合;而三读数头系统足以适用于超高精度的校准场合,例如使用高精度角度编码器及气浮轴承的超精密回转运动平台。

[0036] 优选地,所述用于角度编码器自校准的读数头优化布置方法得到两个读数头系统自校准最优布置方案:两个读数头处于圆周五等分位置上。

[0037] 优选地,所述用于角度编码器自校准的读数头优化布置方法得到三个读数头系统的最优布置方案。

[0038] 本发明的积极进步效果在于:本发明提出的用于角度编码器自校准的读数头优化布置方法能够实现对角度编码器的高精度、快速、实时、在位校准,且成本更低,其中两读数头最优布置方案特别适用于常规的高精度测试系统,而三读数头优化系统更可被用于超高精度的校准场合。本发明依据校准过程中测角误差传递函数的特性,建立优化目标函数,并结合实际应用得到约束条件,进而对优化问题求解以获得理想的优化布置方案。

附图说明

- [0039] 图1为角度编码器中多读数头布置示意图。
 [0040] 图2为本发明方法的流程图。
 [0041] 图3为两个读数头系统的最优布置方案示意图。
 [0042] 图3a为读数头夹角为72度时的布置方案示意图。
 [0043] 图3b为读数头夹角为144度时的布置方案示意图。
 [0044] 图4为两个读数头系统各次谐波传递函数的幅值示意图。
 [0045] 图5为两个读数头系统校准性能模拟示意图。
 [0046] 图6为三个读数头系统的最优布置方案示意图。
 [0047] 图6a为三个读数头系统的第一种最优布置方案示意图。
 [0048] 图6b为三个读数头系统的第二种最优布置方案示意图。
 [0049] 图6c为三个读数头系统的第三种最优布置方案示意图。
 [0050] 图7为三个读数头系统各次谐波传递函数的幅值示意图。
 [0051] 图8为三个读数头系统校准性能模拟示意图。

具体实施方式

- [0052] 下面结合附图给出本发明较佳实施例,以详细说明本发明的技术方案。
 [0053] 根据附图进一步详细描述本发明所示的方法,角度编码器安装有M个读数头,本发明解决如何布置这M个读数头,以使所获得的校准曲线与编码器真实的角度误差曲线之间的相对误差最小,即校准精度最高,本发明用于角度编码器自校准的读数头优化布置方法包括以下步骤:
 [0054] 步骤一:确定测角误差分析中的传递函数并分析其特性
 [0055] 第k个读数头 H_k 相对于第一个读数头 H_1 的安装间隔角度为 α_k ($\alpha_1=0$),则在圆光栅码盘旋转的过程中,读数头 H_k 的读数 $H_k(\theta)$ 既包含了真实的旋转角度 θ ,又包含了该测点处的测角误差 $\varepsilon(\theta+\alpha_k)$,如下公式(1)所示:
 [0056]
$$H_k(\theta) = \theta + \varepsilon(\theta + \alpha_k) \dots\dots (1)$$

 [0057] 在实际测试中可以通过两个读数头读数的相对差值消去角度 θ ,获得只包含测角误差的关系式,读数头 H_k 与 H_r 的相对差值如下公式(2)所示:
 [0058]
$$\delta_{kr}(\theta) = H_k(\theta) - H_r(\theta) = \varepsilon(\theta + \alpha_k) - \varepsilon(\theta + \alpha_r) \dots\dots (2)$$

 [0059] 又由于角度编码器每旋转一圈便会重复原来的误差,因此其测角误差具有周期性,可以用傅立叶级数表示,如下公式(3)所示:
 [0060]
$$\varepsilon(\theta) = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} F(n) e^{in\theta} \dots\dots (3)$$

 [0061] 式中,n表示各阶谐波分量,N为所要分析的谐波总数,F(n)为傅里叶系数;基于圆周封闭原理,直流分量 $F(0) = 0$;e为自然底数,实数为2.718281;
 [0062] 同样也可对差值函数 $\delta_{kr}(\theta)$ 进行傅立叶变换,设 $E_{kr}(n)$ 为 $\delta_{kr}(\theta)$ 所对应的傅立叶系数,则 $E_{kr}(n)$ 与F(n)的关系如下公式(4)和(5)所示:
 [0063]
$$E_{kr}(n) = (e^{in\alpha_k} - e^{in\alpha_r})F(n) = W_{kr}(n)F(n) \dots\dots (4)$$

$$[0064] \quad F(n) = \frac{E_{kr}(n)}{W_{kr}(n)} \dots\dots (5)$$

[0065] 式中 $W_{kr}(n)$ 即为传递函数,可以看出 $W_{kr}(n)$ 只与读数头之间的间隔角度有关,因此,测得差值函数 $\delta_{kr}(\theta)$ 后,通过离散傅立叶变换得到其傅立叶系数 $E_{kr}(n)$,进而结合传递函数 $W_{kr}(n)$ 即可得到测角误差的傅里叶系数 $F(n)$,最后通过离散傅立叶逆变换求得角度编码器测角误差函数 $\varepsilon(\theta)$;

[0066] 此外对于读数头个数 $M>2$ 的编码器自校准系统,通过其中任意两个读数头都可以得到 $F(n)$,因此总共有 C_M^2 个组合,综合利用所有组合可进一步提升 $F(n)$ 的估算精度,如下公式(6)所示:

$$[0067] \quad F(n) = \sum_{k=2}^M \sum_{r=1}^{k-1} \frac{p_{kr}(n)E_{kr}(n)}{W_{kr}(n)} \dots\dots (6)$$

[0068] 其中, $p_{kr}(n)$ 为加权系数,如下公式(7)所示:

$$[0069] \quad \sum_{k=2}^M \sum_{r=1}^{k-1} p_{kr}(n) = 1 \dots\dots (7)$$

[0070] 为了分析传递函数的特性,求取传递函数的模如下式(8)所示:

$$[0071] \quad |W_{kr}(n)| = |e^{in\alpha_k} - e^{in\alpha_r}| = |e^{in\alpha_r} |e^{in(\alpha_k - \alpha_r)} - 1| \dots\dots (8)$$

[0072] 由于 $|\exp(in\alpha_r)| \equiv 1$,因此对于特定阶次的谐波分量,两读数头传递函数模的大小只与这两个读数头之间的夹角有关,进一步分析可得 $0 \leq |W_{kr}(n)| \leq 2$,另外由公式也可以看出,当 $|W_{kr}(n)| = 0$ 时,会产生谐波抑制问题,即测角误差的第 n 次谐波分量难以用傅立叶方法求得而只能强置该阶谐波分量为零,导致校准结果偏离其实际值;此外测量过程中的噪声和随机干扰不可避免地存在,这样会给差值函数 $\delta_{kr}(\theta)$ 所对应的各阶傅立叶系数 $E_{kr}(n)$ 带来一定的测试偏差,并且对于同样大小的偏差, $|W_{kr}(n)|$ 的值越小,导致最终推出的 $F(n)$ 的误差越大;只有 $|W_{kr}(n)|$ 的值大于1时,才会对噪声起到抑制作用,综合考虑以上因素,本发明方法推荐取 $|W_{kr}(n)|$ 的阈值为1,当 $|W_{kr}(n)| > 1$ 时该阶次谐波分量可被有效测量;

[0073] 步骤二:根据步骤一的特性确定合理的优化问题

[0074] 对于读数头个数 $M>2$ 的系统,可以认为第 n 次特定谐波分量能被有效探测的充分条件是:只要其中有两个读数头对应的传递函数满足 $|W_{kr}(n)| > 1$ 即可,也就是说,系统检测不到第 n 次谐波分量的条件如下公式(9):

$$[0075] \quad \|W(n)\|_{\infty} = \max_{2 \leq k \leq M, 1 \leq r \leq k-1} |W_{kr}(n)| \leq 1 \dots\dots (9)$$

[0076] 式中, $\|W(n)\|_{\infty}$ 表示由各元素 $W_{kr}(n)$ 组成的向量 $W(n)$ 的无穷范数,设定需要检测的谐波总数为前 N 次,则优化问题可以总结为如下公式(10)和(11)所示:

$$[0077] \quad \min \sum_{n=1}^N \begin{cases} 1, & \|W(n)\|_{\infty} \leq 1 \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \dots\dots (10)$$

$$[0078] \quad s. t. \alpha_0 \leq \alpha_2 \leq \alpha_3 - \alpha_2 \leq, \dots, \leq \alpha_k - \alpha_{k-1} \leq, \dots, \leq \alpha_M - \alpha_{M-1} \leq 360^\circ - \alpha_M \dots\dots (11)$$

[0079] 其中优化目标的意思是不能被有效检测的谐波总数为最少;约束条件的选取是为了求解的唯一性,避免出现多解以浪费计算资源, α_0 表示两个读数头之间的最小角度间隔,

可根据读数头的几何尺寸等因素确立；

[0080] 步骤三：求解优化问题

[0081] 针对步骤二中的优化问题进行求解时首先需要设定初始参数，包括：所用读数头的个数 M 、需要检测的谐波总数 N 、读数头间最小角度间隔 α_0 以及 $|W_{kr}(n)|$ 的阈值，由于优化问题的目标函数不是凸函数，不存在全局最优解，因此可以采用启发式算法求解，譬如遗传算法、差分进化算法或粒子群算法，当问题的维数较小时，以一定的角度增量采用遍历法亦可进行求解；

[0082] 事实上在角度编码器的工业应用中，测角误差中由圆光栅码盘安装偏心导致的一次谐波误差占主导地位，外加上其他若干幅值较大的低次谐波，而高次谐波由于幅值较小基本可以忽略，本发明发现采用上述优化方法得出的读数头优化布署结果中，两读数头系统足以适用于常规的高精度校准场合，例如机床回转工作台、车床C轴、机械轴承支撑的回转运动平台等角度编码器的应用场合；而三读数头系统足以适用于超高精度的校准场合，例如使用高精度角度编码器及气浮轴承的超精密回转运动平台；

[0083] 下面本发明给出根据优化目标公式及约束条件公式求得的两读数头及三读数头的优化结果，采用 0.1° 角度增量的遍历法，选取的初始参数为： $N=100$ 、 $\alpha_0=10^\circ$ 。

[0084] 所述一种优化方法得到的两个读数头系统自校准最优布置方案：两个读数头处于圆周五等分位置上，即二者角度间隔为 72° 或者 144° 。

[0085] 所述一种优化方法得到的三个读数头系统的最优布置方案：总共有3种，读数头之间的角度间隔组合分别为 $(27^\circ, 36^\circ, 63^\circ)$ 、 $(36^\circ, 117^\circ, 153^\circ)$ 和 $(81^\circ, 108^\circ, 171^\circ)$ 。

[0086] 综上所述，本发明提出的用于角度编码器自校准的读数头优化布置方法在较少个数读数头的基础上就能获得很高的校准精度，因此能够很大地减少安装调试难度及相关成本，具有很好的实用价值。本发明的方案能够用于角度编码器的高精度、快速、实时、在位校准，且成本更低，其中两读数头优化布置方案非常适用于常规的高精度测试系统，而三读数头优化系统更可被用于超高精度的校准场合。

[0087] 以上所述的具体实施例，对本发明的解决的技术问题、技术方案和有益效果进行了进一步详细说明，所应理解的是，以上所述仅为本发明的具体实施例而已，并不用于限制本发明，凡在本发明的精神和原则之内，所做的任何修改、等同替换、改进等，均应包含在本发明的保护范围之内。

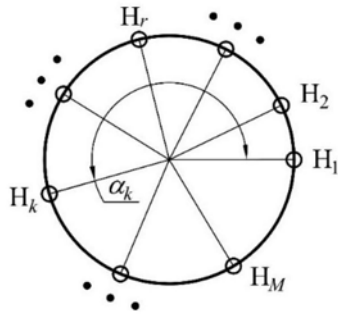


图1

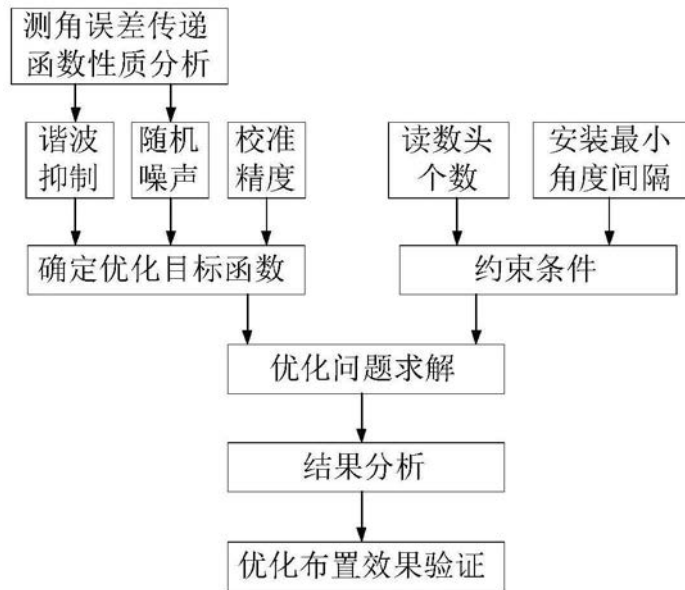


图2

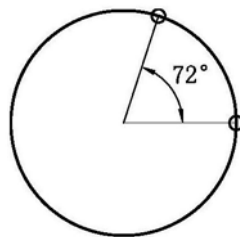


图3a

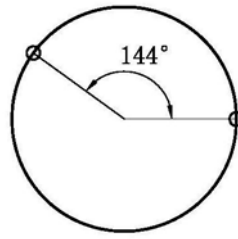


图3b

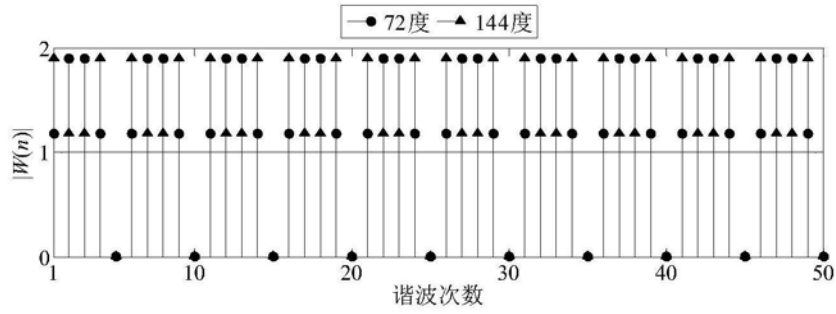


图4

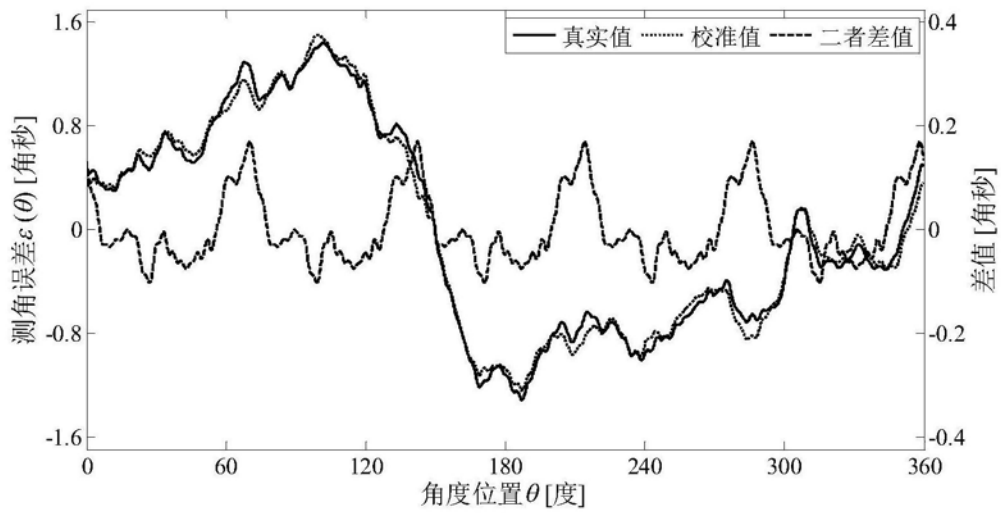


图5

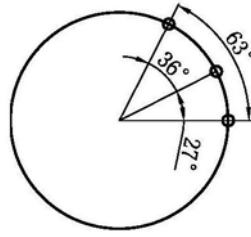


图6a

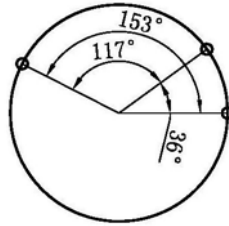


图6b

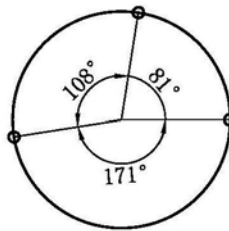


图6c

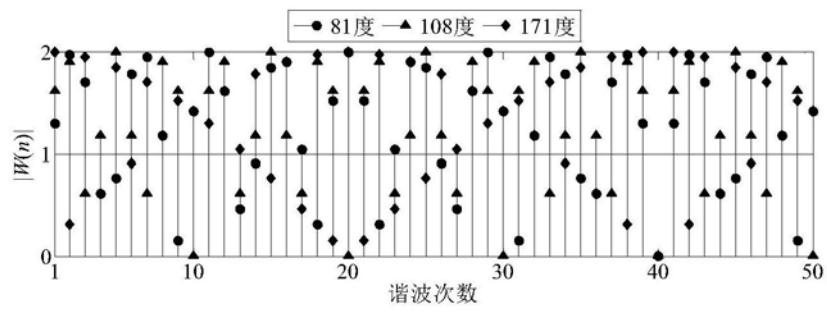


图7

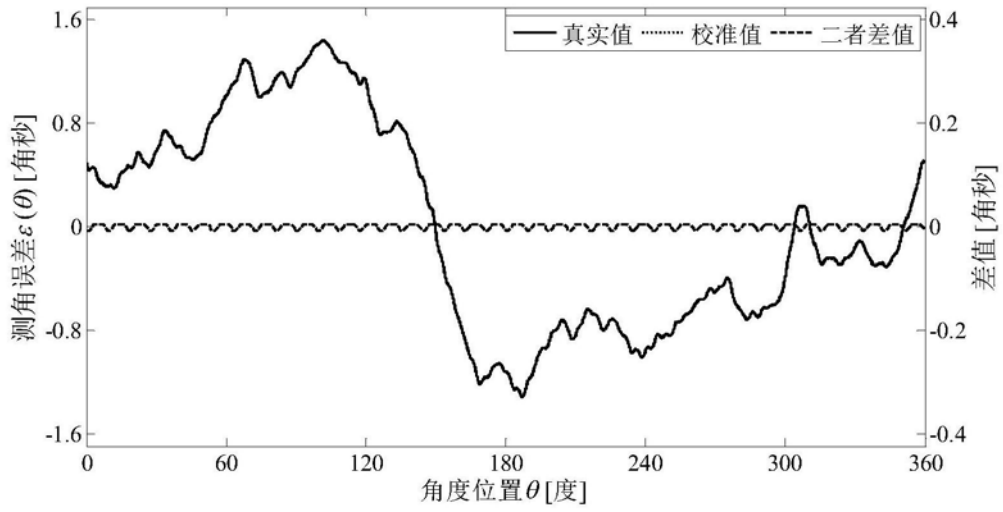


图8