



(12) 发明专利

(10) 授权公告号 CN 118463807 B

(45) 授权公告日 2024.10.22

(21) 申请号 202410933090.3

审查员 石隽菲

(22) 申请日 2024.07.12

(65) 同一申请的已公布的文献号

申请公布号 CN 118463807 A

(43) 申请公布日 2024.08.09

(73) 专利权人 合肥安迅精密技术有限公司

地址 230088 安徽省合肥市高新区黄山路

602号大学科技园A400室

(72) 发明人 孙海星 董宁 金长明 郭恩政

(51) Int. Cl.

G01B 11/00 (2006.01)

G06F 17/16 (2006.01)

(56) 对比文件

CN 110161969 A, 2019.08.23

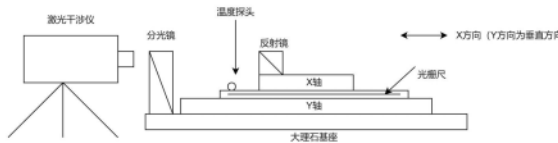
权利要求书4页 说明书7页 附图4页

(54) 发明名称

大理石平台运动位置温度误差标定及补偿方法、系统

(57) 摘要

本发明涉及误差补偿技术领域,公开了一种大理石平台运动位置温度误差标定及补偿方法、系统,标定方法包括以下步骤:构建基于光栅尺测量运动位置的误差模型: $e=A*p(t-t_0)+B(t-t_0)$ ;分别在 $t_0$ 温度和若干组不同温度 $t$ 下,从原点以等间隔移动轴,记录运动位置光栅尺测量值和实际位置,根据光栅尺测量值和实际位置得到 $t_0$ 温度和若干组不同温度 $t$ 下的实际位置误差;基于误差模型和实际位置误差拟合确定 $A$ 和 $B$ 的值;根据误差模型公式计算各个温度下的实际位置误差 $e$ ,完成标定。该方案针对其中的温度影响的误差进行处理,根据模型计算得到的值可以用来补偿掉大部分温度变化引起的误差,能够在一定的温度变化范围内,将误差减小到最大误差的25%以内。



1. 一种大理石平台运动位置温度误差标定方法,其特征在于,包括以下步骤:

构建基于光栅尺测量运动位置的误差模型,公式为: $e = A * p(t - t_0) + B(t - t_0)$ ,其中, $A$ 为位置系数, $B$ 为位置偏置系数, $p$ 为平台移动的目标位置, $t$ 为当前光栅尺测量位置的实际温度, $t_0$ 为起始参考温度, $e$ 为温度带来的实际位置误差;

分别在 $t_0$ 温度和若干组不同温度 $t$ 下,从原点以等间隔移动轴,记录运动位置光栅尺测量值和实际位置,根据光栅尺测量值和实际位置得到 $t_0$ 温度和若干组不同温度 $t$ 下的实际位置误差;

基于误差模型和实际位置误差拟合确定 $A$ 和 $B$ 的值,具体为:以 $t_0$ 温度作为初始温度,并将该温度下的位置误差作为初始误差;不同温度 $t$ 数据均减去初始温度,对应的位置误差数据均减去初始误差,形成 $m$ 个新的温差数据和 $n$ 个位置误差数据,以反映温差带来的位置误差变化;以 $m$ 个新的温差数据作自变量,符号为 $t_s$ , $n$ 个位置误差数据 $e_s$ 作因变量,其中,

$$t_s = \begin{pmatrix} 0 \\ \Delta t_2 \\ \Delta t_3 \\ \dots \\ \Delta t_m \end{pmatrix}_{m \times 1}, e_s = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ e_{21} & e_{22} & e_{23} & \dots & e_{2n} \\ e_{31} & e_{32} & e_{33} & \dots & e_{3n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ e_{m1} & e_{m2} & e_{m3} & \dots & e_{mn} \end{pmatrix}_{m \times n};$$

进行因变量 $t_s$ 扩展,变为 $t$ :

$$t = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & \dots & 1 & 0 \\ 1 & \Delta t_2 & 1 & \Delta t_2 & 1 & \Delta t_2 & \dots & 1 & \Delta t_2 \\ 1 & \Delta t_3 & 1 & \Delta t_3 & 1 & \Delta t_3 & \dots & 1 & \Delta t_3 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 1 & \Delta t_m & 1 & \Delta t_m & 1 & \Delta t_m & \dots & 1 & \Delta t_m \end{pmatrix}_{m \times 2n};$$

计算系数矩阵 $\theta_s$ :

$$\theta_s = \begin{pmatrix} \theta_{1,1} & 0 & \dots & 0 \\ \theta_{1,2} & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \theta_{2,1} & \dots & 0 \\ 0 & \theta_{2,2} & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & \dots & \theta_{n,1} \\ 0 & 0 & \dots & \theta_{n,2} \end{pmatrix}_{2n \times n} = (t^T t)^{-1} t^T e_s, \text{取系数矩阵 } \theta_s \text{ 里角标带有“_2”的}$$

部分,形成斜率矩阵 $\theta$ 作为新的因变量:

$$\theta = \begin{pmatrix} \theta_{1,2} \\ \theta_{2,2} \\ \theta_{3,2} \\ \theta_{4,2} \\ \dots \\ \theta_{n-1,2} \\ \theta_{n,2} \end{pmatrix}_{n \times 1}; \text{新的自变量为设定的平台位置 } p_s = \begin{pmatrix} 0 \\ p_2 \\ p_3 \\ \dots \\ p_n \end{pmatrix}_{n \times 1}, \text{自变量 } p_s$$

扩展为 $p_0$ :

$$p_0 = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 1 & p_2 \\ 1 & p_3 \\ \dots & \dots \\ 1 & p_n \end{pmatrix}_{n \times 2},$$

则最终的系数A和B计算方法如下： $\begin{pmatrix} B \\ A \end{pmatrix} = (p_0^T p_0)^{-1} p_0^T \theta$ ，由此计算可以获得系

数A和B，代入误差模型后，可以得到计算公式；

根据误差模型公式计算各个温度下的实际位置误差 $e$ ，用于误差补偿，完成标定。

2. 根据权利要求1所述的方法，其特征在于，所述分别在 $t_0$ 温度和若干组不同温度 $t$ 下，从原点以等间隔移动轴，记录运动位置光栅尺测量值和实际位置，过程如下：

S1、机器回原，将光栅尺坐标清零；

S2、以等间隔移动轴，通过测量仪器记录实际移动位置，同时记录光栅尺测量值和当前温度 $t_0$ ；

S3、分别使平台升至不同温度 $t$ ，并在当前温度 $t$ 下重复步骤S1-S2。

3. 根据权利要求2所述的方法，其特征在于，所述测量仪器选用干涉仪。

4. 一种大理石平台运动位置温度补偿方法，其特征在于，采用如权利要求1-3中任一所述标定方法获得误差 $e$ 后，将 $e$ 补偿到预设的目标位置 $p_r$ 中，计算公式如下： $p_r = p - e$ ，使平台的轴运动至实际目标位置，使平台的轴实际位置保持和初始温度下实际位置一致。

5. 一种大理石平台运动位置温度补偿系统，其特征在于，包括：

误差模型模块，用于构建基于光栅尺测量运动位置的误差模型，公式为： $e = A * p(t - t_0) + B(t - t_0)$ ，其中，A为位置系数，B为位置偏置系数， $p$ 为平台移动的目标位置， $t$ 为当前光栅尺测量位置的实际温度， $t_0$ 为起始参考温度， $e$ 为温度带来的实际位置误差；

位置测量模块，用于分别在 $t_0$ 温度和若干组不同温度 $t$ 下，从原点以等间隔移动轴，记录运动位置光栅尺测量值和实际位置，根据光栅尺测量值和实际位置得到 $t_0$ 温度和若干组不同温度 $t$ 下的实际位置误差；

拟合模块，用于误差模型和实际位置误差拟合确定A和B的值，具体为：以 $t_0$ 温度作为初始温度，并将该温度下的位置误差作为初始误差；不同温度 $t$ 数据均减去初始温度，对应的

位置误差数据均减去初始误差,形成m个新的温差数据和n个位置误差数据,以反映温差带来的位置误差变化;以m个新的温差数据作自变量,符号为 $t_s$ ,n个位置误差数据 $e_s$ 作因变量,

$$\text{其中, } t_s = \begin{pmatrix} 0 \\ \Delta t_2 \\ \Delta t_3 \\ \dots \\ \Delta t_m \end{pmatrix}_{m \times 1}, e_s = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ e_{21} & e_{22} & e_{23} & \dots & e_{2n} \\ e_{31} & e_{32} & e_{33} & \dots & e_{3n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ e_{m1} & e_{m2} & e_{m3} & \dots & e_{mn} \end{pmatrix}_{m \times n};$$

进行因变量 $t_s$ 扩展,变为 $t$ :

$$t = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & \dots & 1 & 0 \\ 1 & \Delta t_2 & 1 & \Delta t_2 & 1 & \Delta t_2 & \dots & 1 & \Delta t_2 \\ 1 & \Delta t_3 & 1 & \Delta t_3 & 1 & \Delta t_3 & \dots & 1 & \Delta t_3 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 1 & \Delta t_m & 1 & \Delta t_m & 1 & \Delta t_m & \dots & 1 & \Delta t_m \end{pmatrix}_{m \times 2n};$$

计算系数矩阵 $\theta_s$ :

$$\theta_s = \begin{pmatrix} \theta_{1,1} & 0 & \dots & 0 \\ \theta_{1,2} & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \theta_{2,1} & \dots & 0 \\ 0 & \theta_{2,2} & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & \dots & \theta_{n,1} \\ 0 & 0 & \dots & \theta_{n,2} \end{pmatrix}_{2n \times n} = (t^T t)^{-1} t^T e_s, \text{取系数矩阵 } \theta_s \text{ 里角标带有“_2”的}$$

部分,形成斜率矩阵 $\theta$ 作为新的因变量:

$$\theta = \begin{pmatrix} \theta_{1,2} \\ \theta_{2,2} \\ \theta_{3,2} \\ \theta_{4,2} \\ \dots \\ \theta_{n-1,2} \\ \theta_{n,2} \end{pmatrix}_{n \times 1}; \text{新的自变量为设定的平台位置 } p_s = \begin{pmatrix} 0 \\ p_2 \\ p_3 \\ \dots \\ p_n \end{pmatrix}_{n \times 1}, \text{自变量 } p_s$$

扩展为 $p_0$ :

$$p_0 = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 1 & p_2 \\ 1 & p_3 \\ \dots & \dots \\ 1 & p_n \end{pmatrix}_{n \times 2},$$

则最终的系数A和B计算方法如下： $\begin{pmatrix} B \\ A \end{pmatrix} = (p_0^T p_0)^{-1} p_0^T \theta$ ，由此计算可以获得系数A和B，代入误差模型后，可以得到计算公式；补偿模块，用于当在温度t下驱动平台的轴运动，由误差模型计算得到对应的误差e，将e补偿到预设的目标位置中，使平台的轴运动至实际目标位置。

6. 一种机器可读存储介质，该机器可读存储介质上存储有指令，该指令用于使得机器执行上述权利要求1-3中任一项所述的方法。

7. 一种处理器，其特征在于，用于运行程序，其中，所述程序被运行时用于执行：如权利要求4所述的大理石平台运动位置温度补偿方法的步骤。

8. 一种大理石平台运动位置温度补偿平台，其特征在于，包括大理石平台、光栅尺、干涉仪和温度测量设备，

光栅尺分别设于大理石平台的X轴和Y轴上，用于获取X轴和Y轴的位置坐标；

干涉仪用于分别测量XY轴的不同温度下的实际位置，从而可以得到温度引起的位置变化；

温度测量设备用于测量光栅尺安装位置的温度；

还包括如权利要求7所述的处理器，用于根据光栅尺、干涉仪和温度测量设备的数据执行大理石平台运动位置温度补偿方法的步骤。

## 大理石平台运动位置温度误差标定及补偿方法、系统

### 技术领域

[0001] 本发明涉及误差补偿技术领域,具体地涉及一种大理石平台运动位置温度误差标定及补偿方法、系统。

### 背景技术

[0002] 大理石的特点为质地均匀、稳定性好、强度大、硬度高,极耐磨损、耐酸、耐碱,有很高的耐腐蚀性,永远不会生锈,能在重负荷下保持精度。通常,使用于工业生产和实验室的大理石平台取材于地下优质的岩石层,其经过亿万年自然失效,没有内部应力。此外,大理石系非金属材料,绝无磁性反应,亦无塑性变形,因此精度保持性好,且性能优于优质铸铁和钢材制作的精密测量基准零件,可以获得高而稳定的精度。于是,大理石平台由于其易于加工、平面度好,没有内部应力等优点,通常作为高精度设备的机台,用于生产高精度自动化设备,或者提供高精度检测基准。

[0003] 但是,材料都会存在热胀冷缩,在精密加工中,对于温度问题是绝对不能忽视的。温度是精度的敌人,室温与机器本身产生的热会改变形状与长度。材料热胀冷缩的具体量,取决于材料及温度的变化值。比如,钢材直线膨胀为长度每米在温度变化 $1^{\circ}\text{C}$  时会产生 $12\mu\text{m}$  的变化,即使是高精密的机床,也只有在稳定的温度环境与热平衡状态下才能获得稳定的加工精度。大理石平台同样存在上述问题,在恒温状态下,大理石可以保持 $\mu\text{m}$ 级直线度和平面度;但是,大理石热膨胀系数为 $6.8\mu\text{m}/(\text{m}\cdot\text{K})$ ,使得其热膨胀明显,当环境温度和平台温度变化时,直接导致精度急剧下降。此外,大理石平台通常使用的位置测量传感器也有热膨胀,例如光栅尺的热膨胀系数为 $12\mu\text{m}/(\text{m}\cdot\text{K})$ ,传感器同样受到明显的温度变化影响。

[0004] 为了克服热膨胀引起的大理石平台形变误差,现有的方法通常有两个方向:一个方向是建立完整的恒温系统,改造工厂环境,抑制工作环境的温度变化;以及对具体的平台进行散热设计和增加散热系统,控制平台本身发热;此方法通常成本高,操作方式复杂。另外一个方向是使用温度补偿,不过此方法通常需要积累大量的数据,以及进行插值和复杂的非线性计算,来进行温度的补偿。

### 发明内容

[0005] 为了解决现有技术中的问题,本发明提供一种大理石平台运动位置温度误差标定及补偿方法、系统,较大程度上克服了不同温度下带来的误差增大问题,保证大理石平台运动位置在一定的温度变化范围内的精度不产生明显变化。

[0006] 为了实现上述目的,本发明第一方面提供一种大理石平台运动位置温度误差标定方法,包括以下步骤:

[0007] 构建基于光栅尺测量运动位置的误差模型,公式为: $e = A * p(t - t_0) + B(t - t_0)$ ,其中, $A$ 为位置系数, $B$ 为位置偏置系数, $p$ 为平台移动的目标位置, $t$ 为当前光栅尺测量位置的实际温度, $t_0$ 为起始参考温度, $e$ 为温度带来的实际位置误差;

[0008] 分别在 $t_0$ 温度和若干组不同温度 $t$ 下,从原点以等间隔移动轴,记录运动位置光栅

尺测量值和实际位置,根据光栅尺测量值和实际位置得到 $t_0$ 温度和若干组不同温度 $t$ 下的实际位置误差;

[0009] 基于误差模型和实际位置误差拟合确定 $A$ 和 $B$ 的值;

[0010] 根据误差模型公式计算各个温度下的实际位置误差 $e$ ,用于误差补偿,完成标定。

[0011] 本发明第二方面提供一种大理石平台运动位置温度补偿方法,采用上述标定方法获得误差 $e$ 后,将 $e$ 补偿到预设的目标位置 $p_r$ 中,计算公式如下: $p_r = p - e$ ,使平台的轴运动至实际目标位置,使平台的轴实际位置保持和初始温度下实际位置一致。

[0012] 本发明第三方面提供一种大理石平台运动位置温度补偿系统,包括:

[0013] 误差模型模块,用于构建基于光栅尺测量运动位置的误差模型,公式为: $e = A * p(t - t_0) + B(t - t_0)$ ,其中, $A$ 为位置系数, $B$ 为位置偏置系数, $p$ 为平台移动的目标位置, $t$ 为当前光栅尺测量位置的实际温度, $t_0$ 为起始参考温度, $e$ 为温度带来的实际位置误差;

[0014] 位置测量模块,用于分别在 $t_0$ 温度和若干组不同温度 $t$ 下,从原点以等间隔移动轴,记录运动位置光栅尺测量值和实际位置,根据光栅尺测量值和实际位置得到 $t_0$ 温度和若干组不同温度 $t$ 下的实际位置误差;

[0015] 拟合模块,用于误差模型和实际位置误差拟合确定 $A$ 和 $B$ 的值;

[0016] 补偿模块,用于当在温度 $t$ 下驱动平台的轴运动,由误差模型计算得到对应的误差 $e$ ,将 $e$ 补偿到预设的目标位置中,使平台的轴运动至实际目标位置。

[0017] 本发明第四方面提供一种机器可读存储介质,该机器可读存储介质上存储有指令,该指令用于使得机器执行本申请上述标定方法。

[0018] 本发明第五方面提供一种处理器,用于运行程序,其中,所述程序被运行时用于执行:如上述的大理石平台运动位置温度补偿方法的步骤。

[0019] 本发明第六方面提供一种大理石平台运动位置温度补偿平台,包括大理石平台、光栅尺、干涉仪和温度测量设备,

[0020] 光栅尺分别设于大理石平台的 $X$ 轴和 $Y$ 轴上,用于获取 $X$ 轴和 $Y$ 轴的位置坐标;

[0021] 干涉仪用于分别测量 $XY$ 轴的不同温度下的实际位置,从而可以得到温度引起的位置变化;

[0022] 温度测量设备用于测量光栅尺安装位置的温度。

[0023] 本发明根据大理石平台本身和光栅尺由温度变化引起的误差,提出了一个误差计算模型;该模型针对其中的温度影响的误差进行处理,根据模型计算得到的值可以用来补偿掉大部分温度变化引起的误差,能够在一定的温度变化范围内,将误差减小到最大误差的25%以内;该方案简单,易于实现,只要搭建简单的平台即可实现;进行一次标定即可,基于标定结果,可以保证精度的稳定性;此外,计算简单,运算时间短,不需要积累大量的数据进行复杂的非线性计算,有效降低了大理石平台对环境温度的要求。

[0024] 本发明实施例的其它特征和优点将在随后的具体实施方式部分予以详细说明。

## 附图说明

[0025] 附图是用来提供对本发明实施例的进一步理解,并且构成说明书的一部分,与下面的具体实施方式一起用于解释本发明实施例,但并不构成对本发明实施例的限制。在附图中:

- [0026] 图1是本发明大理石平台运动位置温度误差补偿平台结构示意图；
- [0027] 图2是本发明实施例X轴结构进行误差分析示意图；
- [0028] 图3是本发明实施例大理石平台运动位置温度误差标定及补偿方法流程图；
- [0029] 图4是本发明测试例温度补偿使用和验证流程示意图；
- [0030] 图5是本发明测试例补偿平台的各个位置不同温度下的误差；
- [0031] 图6是本发明测试例补偿后的误差。

### 具体实施方式

[0032] 以下结合附图对本发明实施例的具体实施方式进行详细说明。应当理解的是,此处所描述的具体实施方式仅用于说明和解释本发明实施例,并不用于限制本发明实施例。

[0033] 大理石平台结构如图1所示,大理石基座固定在支撑结构上,然后其上布置Y轴,Y轴由光栅尺、导轨、直线电机、Y轴大理石组成;Y轴上再布置X轴,由光栅尺、导轨、直线电机、X轴大理石组成;X轴平台上可以搭载其他工作负载,带着工作负载实现XY平面移动。值得说明的是,本发明实施例以上述大理石平台结构为例说明,本发明方案适用的结构不限于上述大理石平台结构,还可以是X轴在下Y轴在上的结构,或包含Z轴结构的大理石平台等。

[0034] 固定温度下,大理石平台精度可以满足一定要求;但是经过温度变化后,精度就无法达到该指标要求了。通俗地讲,大理石平台X移动10.000mm时,实际准确的空间位移不一定准确,其可能为10.020mm或者其他值,因此需要进行补偿;此外,如果温度出现变化后,其实际位置可能会进一步变化为10.050mm。

[0035] 以X轴结构进行误差分析为例(Y轴同理),如图2所示,针对图2所示模型进行误差分析。平台在使用时,会先进行回原,然后所有位置以原点为参考。接着,上位机控制轴移动到期望的位置,位置以光栅尺为准。图2模型表示光栅尺安装会产生不理想,例如图中的倾斜,或者局部出现波浪形等,会导致真实位置不正确;此外,电机在持续的运行中,持续发热,会引起温度变化,环境温度也会随着时间产生升降;光栅尺的测量值会进一步随着尺子本身的热胀或者冷缩以及大理石的热胀或者冷缩进一步改变,也会进一步增加和真实位置的误差。

[0036] 基于以上描述,可以知道平台为了运行到准确位置,既需要进行光栅尺本身误差补偿,也需要对温度引起的误差进行补偿。本发明实施例提供一种大理石平台运动位置温度误差标定方法,用来进行温度误差补偿,如图3所示,包括以下步骤:

[0037] S1、构建基于光栅尺测量运动位置的误差模型,公式为: $e = A * p(t - t_0) + B(t - t_0)$ ,其中,A为位置系数,B为位置偏置系数,p为平台移动的目标位置,t为当前光栅尺测量位置的实际温度, $t_0$ 为起始参考温度,e为温度带来的实际位置误差;

[0038] S2、分别在 $t_0$ 温度和若干组不同温度t下,从原点以等间隔移动轴,记录运动位置光栅尺测量值和实际位置,根据光栅尺测量值和实际位置得到 $t_0$ 温度和若干组不同温度t下的实际位置误差;

[0039] S3、基于误差模型和实际位置误差拟合确定A和B的值;

[0040] S4、根据误差模型公式计算各个温度下的实际位置误差e,完成标定。

[0041] 进一步地,步骤S2中,所述分别在 $t_0$ 温度和若干组不同温度t下,从原点以等间隔移动轴,记录运动位置光栅尺测量值和实际位置,过程如下:



[0042] 首先,采用干涉仪测量实际位置,光栅尺测量平台坐标位置,机器回原,进行平台坐标位置和干涉仪位置同步;

[0043] 以固定间隔移动轴,此时记录干涉仪位置和平台位置,记录当前温度 $t_0$ ;

[0044] 持续重复运行平台,使平台产生温升;

[0045] 在运行后的当前温度下,重复步骤2)-3);

[0046] 得到 $m$ 个温度下 $n$ 个不同位置的数据。

[0047] 将干涉仪值和平台位置两个测量值相减,得到实际的误差值。

[0048] 将 $t_0$ 作为初始温度和 $t_0$ 下不同位置下的实际误差值作为初始误差值;将各个温度值减去 $t_0$ 得到温差,将各个误差值减去初始误差值得到新的误差值;即得到温差以及温差引起的位置误差的变化。

[0049] 进一步地,步骤S3中,所述基于误差模型和实际位置误差拟合确定 $A$ 和 $B$ 的值,过程如下:

[0050] 测量的 $m$ 个温差和 $n$ 个位置的误差的变化记录为如下:

[0051] 温差是自变量,符号为:

$$[0052] \quad t_s = \begin{pmatrix} 0 \\ \Delta t_2 \\ \Delta t_3 \\ \dots \\ \Delta t_m \end{pmatrix}_{m \times 1};$$

[0053] 位置误差为因变量,符号为:

$$[0054] \quad e_s = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ e_{21} & e_{22} & e_{23} & \dots & e_{2n} \\ e_{31} & e_{32} & e_{33} & \dots & e_{3n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ e_{m1} & e_{m2} & e_{m3} & \dots & e_{mn} \end{pmatrix}_{m \times n};$$

[0055] 进行因变量 $t_s$ 扩展,变为 $t$ :

$$[0056] \quad t = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & \dots & 1 & 0 \\ 1 & \Delta t_2 & 1 & \Delta t_2 & 1 & \Delta t_2 & \dots & 1 & \Delta t_2 \\ 1 & \Delta t_3 & 1 & \Delta t_3 & 1 & \Delta t_3 & \dots & 1 & \Delta t_3 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 1 & \Delta t_m & 1 & \Delta t_m & 1 & \Delta t_m & \dots & 1 & \Delta t_m \end{pmatrix}_{m \times 2n};$$

[0057] 计算系数矩阵 $\theta_s$ :

[0058] 
$$\theta_s = \begin{pmatrix} \theta_{1,1} & 0 & \dots & 0 \\ \theta_{1,2} & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \theta_{2,1} & \dots & 0 \\ 0 & \theta_{2,2} & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & \dots & \theta_{n,1} \\ 0 & 0 & \dots & \theta_{n,2} \end{pmatrix}_{2n \times n} = (t^T t)^{-1} t^T e_s;$$

[0059] 取结果里角标带有“\_2”的部分,形成斜率矩阵 $\theta$ ,为新的因变量

[0060] 
$$\theta = \begin{pmatrix} \theta_{1,2} \\ \theta_{2,2} \\ \theta_{3,2} \\ \theta_{4,2} \\ \dots \\ \theta_{n-1,2} \\ \theta_{n,2} \end{pmatrix}_{n \times 1};$$

[0061] 新的自变量为设定的平台位置 $p_s = \begin{pmatrix} 0 \\ p_2 \\ p_3 \\ \dots \\ p_n \end{pmatrix}_{n \times 1}$ ,自变量 $p_s$ 扩展为 $p_0$ :

[0062] 
$$p_0 = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 1 & p_2 \\ 1 & p_3 \\ \dots & \dots \\ 1 & p_n \end{pmatrix}_{n \times 2};$$

[0063] 则有最终的系数计算方法:

[0064] 
$$\begin{pmatrix} B \\ A \end{pmatrix} = (p_0^T p_0)^{-1} p_0^T \theta。$$

[0065] 由此计算可以获得系数A和B,代入误差模型后,可以得到计算公式。以上即可获得A和B和 $t_0$ ,即可确定模型,基于模型计算得到误差值 $e$ 。

[0066] 基于同一发明构思,本发明实施例第二方面提出一种大理石平台运动位置温度补偿方法,采用上述大理石平台运动位置温度标定方法得到误差值 $e$ 后,基于误差进行补偿计算,将 $e$ 补偿到预设的目标位置 $p_r$ 中, $p_r = p - e$

[0067] 使平台的轴运动至实际目标位置 $p_r$ 。

[0068] 此时可以使得温度引起的误差,大部分被补偿掉,示例性地可以从30微米以上的最大误差,降低到5微米以内的最大误差值。

[0069] 本发明技术方案使用一阶模型计算,建立模型后各个位置可以直接带入计算,不需要再进行其他额外插值或者非线性计算,就可以获得全长度的补偿值,计算简单,运算时间短;该补偿方法在脱离温控环境后,可以继续保证精度,极大降低大理石为了发挥最高精度而对环境温控提出的高要求,在一定程度上可以降低使用的成本,降低了对工厂控温能力的要求。

[0070] 基于同一发明构思,本发明实施例第三方面提出一种大理石平台运动位置温度补偿系统,包括:

[0071] 误差模型模块,用于构建基于光栅尺测量运动位置的误差模型,公式为: $e = A * p(t - t_0) + B(t - t_0)$ ,其中, $A$ 为位置系数, $B$ 为位置偏置系数, $p$ 为平台移动的目标位置, $t$ 为当前光栅尺测量位置的实际温度, $t_0$ 为起始参考温度, $e$ 为温度带来的实际位置误差;

[0072] 位置测量模块,用于分别在 $t_0$ 温度和若干组不同温度 $t$ 下,从原点以等间隔移动轴,记录运动位置光栅尺测量值和实际位置,根据光栅尺测量值和实际位置得到 $t_0$ 温度和若干组不同温度 $t$ 下的实际位置误差;

[0073] 拟合模块,用于误差模型和实际位置误差拟合确定 $A$ 和 $B$ 的值;

[0074] 补偿模块,用于当在温度 $t$ 下驱动平台的轴运动,由误差模型计算得到对应的误差 $e$ ,将 $e$ 补偿到预设的目标位置中,使平台的轴运动至实际目标位置。

[0075] 基于同一发明构思,本发明实施例第四方面提出一种大理石平台运动位置温度补偿平台,如图2所示,包括大理石平台、光栅尺、干涉仪和温度测量设备,

[0076] 光栅尺分别设于大理石平台的X轴和Y轴上,用于获取X轴和Y轴的位置坐标;

[0077] 干涉仪,用于用于分别测量XY轴的不同温度下的实际位置,从而可以得到温度引起的位置变化。

[0078] 温度测量设备,用于测量光栅尺安装位置的温度。

[0079] 进一步地,还包括处理器,用于根据光栅尺、干涉仪和温度测量设备的数据执行大理石平台运动位置温度补偿方法的步骤。干涉仪优选为激光干涉仪。

[0080] 本发明平台结构简单,易操作,进行一次标定即可,基于标定结果,可以保证精度的温度稳定。

[0081] 本发明首先搭建和布置一套系统,大理石基座固定在支撑结构上,然后其上布置Y轴,Y轴由光栅尺、导轨、直线电机、Y轴大理石组成;Y上再布置X轴,由光栅尺、导轨、直线电机、X轴大理石组成;X平台上可以搭载其他工作负载,带着工作负载实现XY平面移动。

[0082] 本发明构建了一个温度补偿的数学模型,然后基于误差和温差数据,计算得到模型系数,从而可以利用该模型对位置的温度漂移进行抑制,进而获得准确的运动位置。详细的过程包括:首先基于二维XY大理石平台,先进行其中一个维度的温度误差修正;在该维度上,添加干涉仪测量的光学系统,测量实际位置,同时在光栅尺安装位置增加温度探头;然后平台回原后,同步干涉仪和平台位置数据,并记录当前温度;接着从原点开始进行等间距运动,测量多个点的干涉仪位置和平台位置,并计算干涉仪测量值和平台位置误差;接着进行长时间平台运动,使平台发热,并提升环境温度,然后重复一次以上测量,记录温度和误差数据;收录多组数据后,使用本发明的计算方法进行系数计算,并代入模型后,形成最终的计算公式;另外一个维度可以使用同样方式处理。

[0083] 基于同一发明构思,本发明实施例第五方面提出一种机器可读存储介质,该机器

可读存储介质上存储有指令,该指令用于使得机器执行本申请上述大理石平台运动位置温度误差标定方法的方法。

[0084] 基于同一发明构思,本发明实施例第六方面提出一种处理器,用于运行程序,其中,所述程序被运行时用于执行上述大理石平台运动位置温度补偿方法的步骤。

[0085] 测试例:

[0086] 如图4所示的流程进行测试,基于如图1所示的大理石平台运动位置温度补偿平台,首先测试补偿平台的各个位置不同温度下的误差如图5所示。采用本发明的大理石平台运动位置温度补偿方法进行测试补偿后的误差,结果如图6所示。图中,系列1-9表示为9个位置点,横坐标为温差,将各个温度值减去 $t_0$ 得到温差;纵坐标为温差带来的误差,将干涉仪测量值减去平台位置得到误差,并将 $t_0$ 对应的误差作为初始误差,各个误差值减去初始误差值,得到温差引起的位置误差的变化值。由图6和图5中的数据比较可知,大部分误差被补偿掉,补偿后的误差显著降低,在 $5^{\circ}\text{C}$ 变化时,最大误差从30多 $\mu\text{m}$ 降低到 $5\mu\text{m}$ 以内,将误差减小到最大误差的17%以内。

[0087] 综上所述,本发明技术方案,考虑了大理石平台和光栅尺由温度变化引起的误差,提出了一个温度误差计算模型,针对其中的温度影响的误差进行处理,可以用来补偿掉大部分温度变化引起的误差,能够在一定的温度变化范围内,将误差减小到最大误差的17%以内;上述方案简单,易于实现,只要搭建简单的平台即可实现,进行一次标定即可;基于标定结果,可以保证精度的温度稳定;此外,计算简单,运算时间短,不需要积累大量的数据进行复杂的非线性计算或者插值,有效降低了大理石平台对环境温度的要求。

[0088] 还需要说明的是,术语“包括”、“包含”或者其任何其他变体意在涵盖非排他性的包含,从而使得包括一系列要素的过程、方法、商品或者设备不仅包括那些要素,而且还包括没有明确列出的其他要素,或者是还包括为这种过程、方法、商品或者设备所固有的要素。

[0089] 以上仅为本申请的实施例而已,并不用于限制本申请。对于本领域技术人员来说,本申请可以有各种更改和变化。凡在本申请的精神和原理之内所作的任何修改、等同替换、改进等,均应包含在本申请的权利要求范围之内。

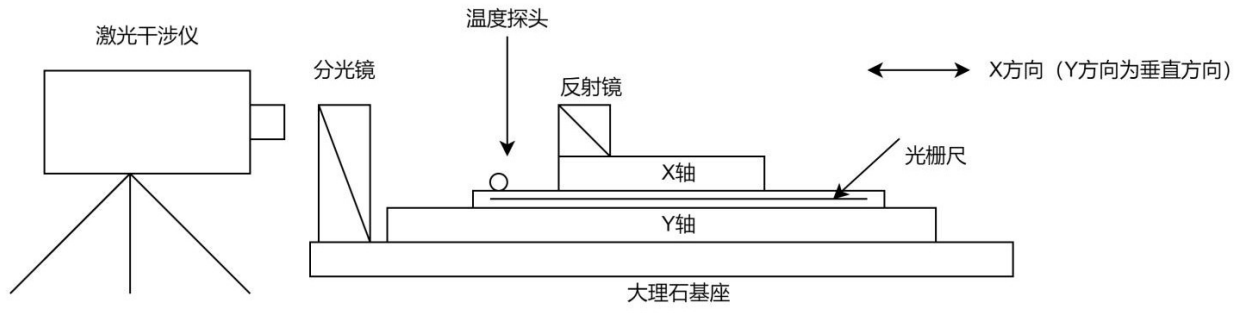


图 1

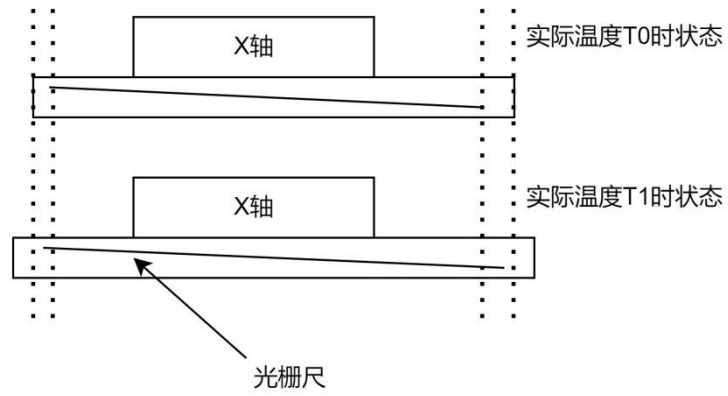


图 2

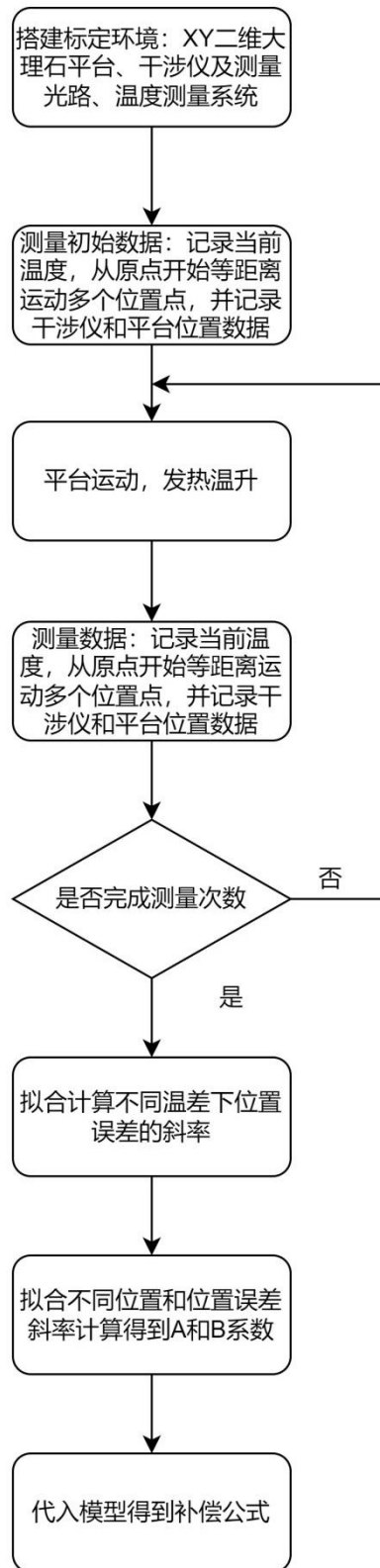


图 3

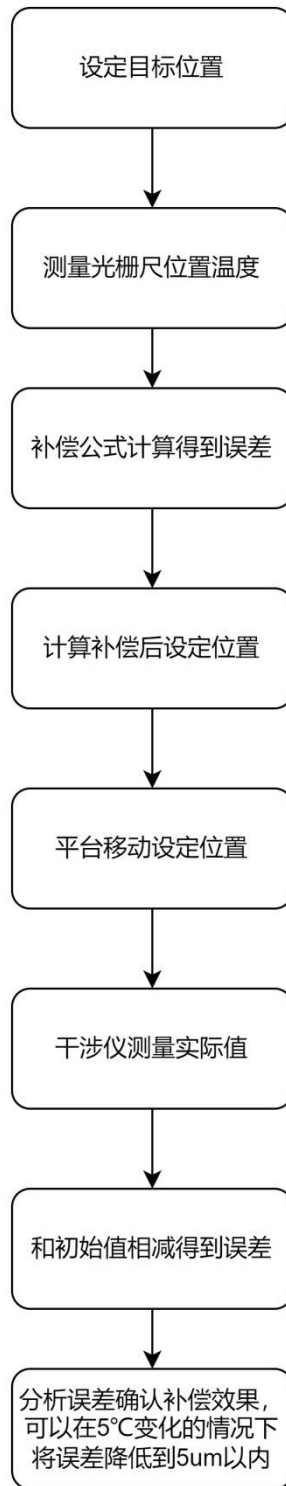


图 4

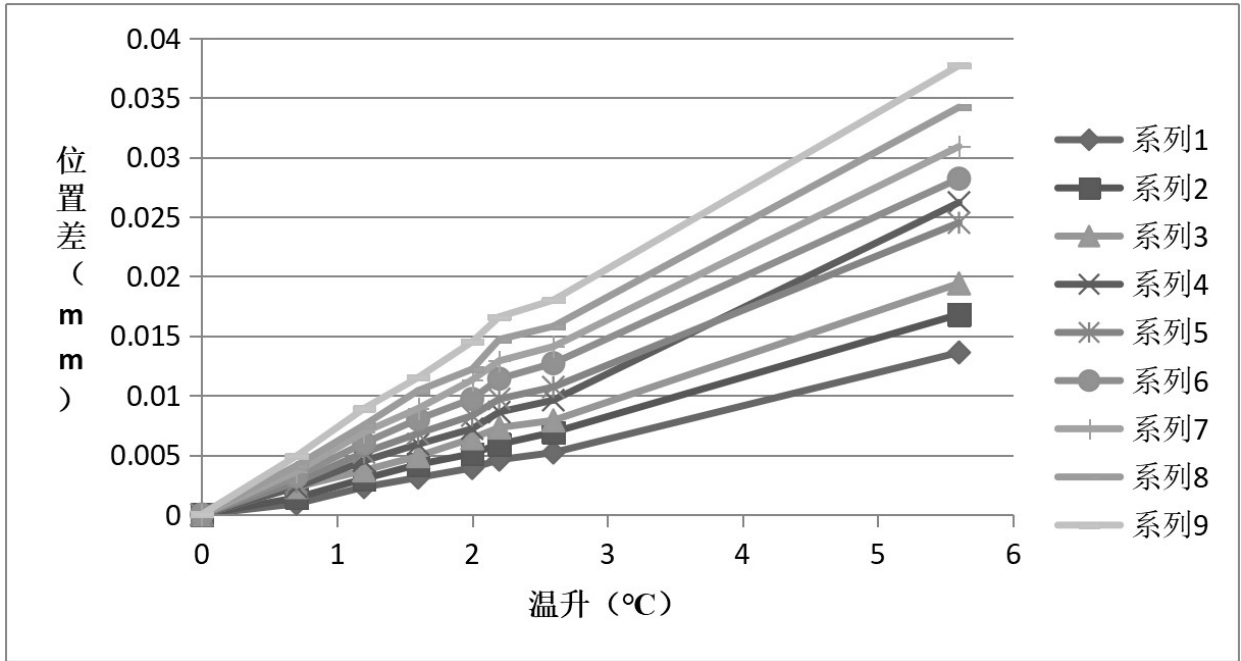


图 5

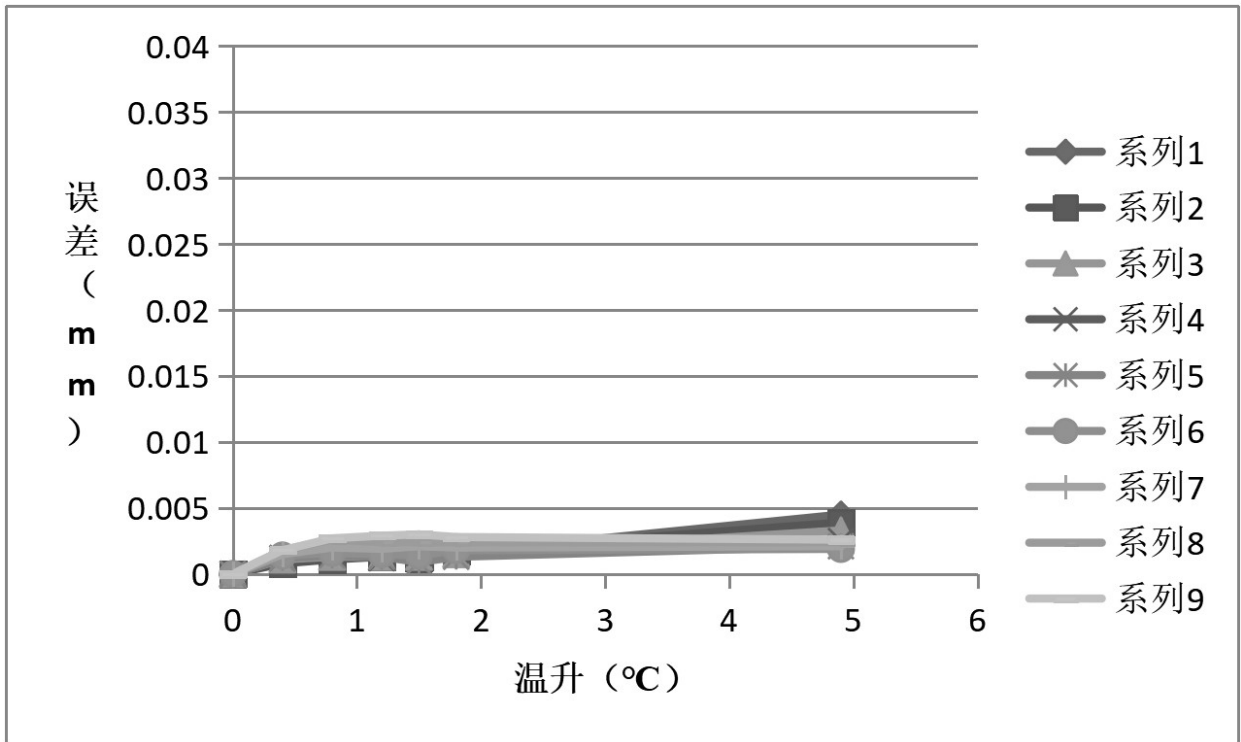


图 6