



(12) 发明专利

(10) 授权公告号 CN 118578199 B

(45) 授权公告日 2024. 10. 15

(21) 申请号 202411073914.0

(22) 申请日 2024.08.07

(65) 同一申请的已公布的文献号
申请公布号 CN 118578199 A

(43) 申请公布日 2024.09.03

(73) 专利权人 山东大学
地址 250000 山东省济南市历下区经十路
17923号

(72) 发明人 万熠 唐莹 姬帅 梁西昌
王继来 任立伟 何召磊 贾会述
赵慧利

(74) 专利代理机构 济南圣达知识产权代理有限
公司 37221
专利代理师 李圣梅

(51) Int.Cl.

B23Q 17/24 (2006.01)

(56) 对比文件

CN 104374317 A, 2015.02.25

CN 107462881 A, 2017.12.12

审查员 彭娟

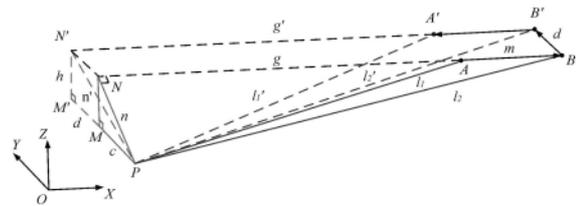
权利要求书2页 说明书10页 附图2页

(54) 发明名称

基于激光跟踪仪的机床精度检测方法、系
统、装置及介质

(57) 摘要

本发明提出了基于激光跟踪仪的机床精度检测方法、系统、装置及介质,属于激光测量技术领域,包括:机床初始位置位于标定点上;机床分别沿X轴、Y轴运动设定段距离,求得机床坐标系下不同位置的激光跟踪仪的坐标;根据激光跟踪仪测量的距离数据得到工作空间内任一点的坐标。该方法依托于激光跟踪仪的距离信息和激光干涉仪、激光测距仪的定位信息实现激光跟踪仪位置快速、高精度标定。



1. 基于激光跟踪仪的机床精度检测方法,其特征是,包括:
 - 机床初始位置位于标定点上;
 - 机床分别沿X轴、Y轴运动设定段距离,求得机床坐标系下不同位置的激光跟踪仪的坐标;
 - 根据激光跟踪仪测量的距离数据得到工作空间内任一点的坐标;
 - 基于得到的坐标实现对于机床直线轴和旋转轴误差的辨识,基于辨识的误差检测机床精度;
 - 所述求得机床坐标系下激光跟踪仪的坐标,具体包括:设激光跟踪仪的测量坐标原点为P,靶球处于位置A时,得到P点到A点的距离为 l_1 ;
 - 将机床主轴沿X轴正方向移动给定距离到B点;
 - 用激光干涉仪测量得到实际的运动距离为 m ,激光跟踪仪此时测量P点到B点的距离为 l_2 ;
 - 由P点、A点、B点可构成一个平面,在平面内P点在直线AB上的投影为点N, $\triangle PNA$ 和 $\triangle PNB$ 分别为直角三角形,求解得到AN的距离 g ,PN的距离 n ;
 - 在B点沿机床Y轴方向设置激光干涉仪,主轴向Y轴正方向运动一段距离到B'点,激光干涉仪测量得到精确移动距离为 d ;
 - 激光跟踪仪测量B'点的距离为 l_2' ;
 - 在B'点沿X轴方向上设置激光干涉仪,得到机床沿X轴负方向运动长度 m' 到达A'点,此时激光干涉仪的测量距离为 l_1' ,求得PN'的距离 n' ,A'N'的距离 g' ;
 - 作PN在过P点的水平面上的投影为PM, $\triangle PMN$ 为直角三角形;作PN'在过P点的水平面上的投影为PM', $\triangle PM'N'$ 为直角三角形,易知 $MN=M'N'$,求解得到: MN 、 $M'N'$ 的长度 h ,投影PM的长度 c ;
 - 在机床坐标系下P点相对于A点的位置,设A点的坐标为: (x, y, z) ,则P点的坐标为 $(x-g, y-c, z-h)$;
 - 若机床的X轴存在倾斜,机床主轴未沿X水平方向移动给定距离到B点时,P点相对于A点在机床坐标系下的位置;
 - 设A点的坐标为 (x, y, z) ,A点在直线PN上的投影为D,在PMN平面PD与水平面的夹角 α 为 $\arctan \frac{h}{c}$,PD在过P点的水平面上的投影大小为 $e \cos \alpha$,在MNQ平面上的投影大小为 $e \sin \alpha$,P点距平面PMN的垂直距离 p ,则P点的坐标为 $(x-p, y-e \cos \alpha, z-e \sin \alpha)$ 。
2. 如权利要求1所述的基于激光跟踪仪的机床精度检测方法,其特征是,将机床初始位置位于标定点上之前还包括激光跟踪仪的安装步骤,包括:将激光跟踪仪的目标靶球由夹具安装于主轴上。
3. 用于机床误差检测的激光跟踪仪位置标定系统,利用如权利要求1所述的基于激光跟踪仪的机床精度检测方法,其特征是,包括:激光跟踪仪、激光干涉仪;
 - 所述激光跟踪仪靶球安装于机床主轴轴线上,所述激光干涉仪反射端安装在主轴台上;
 - 标定时,所述机床的初始位置被配置为位于标定点上;

所述机床分别沿X轴、Y轴运动设定段距离,求得机床坐标系下不同位置的激光跟踪仪的坐标;

所述机床根据激光跟踪仪测量的距离数据得到工作空间内任一点的坐标;基于得到的坐标实现对于机床直线轴和旋转轴误差的辨识,基于辨识的误差检测机床精度。

4.一种计算机装置,包括存储器、处理器及存储在存储器上并可在处理器上运行的计算机程序,其特征在于,所述处理器执行所述程序时实现上述权利要求1-2任一所述的方法的步骤。

5.一种计算机可读存储介质,其上存储有计算机程序,其特征在于,该程序被处理器执行时执行上述权利要求1-2任一所述方法的步骤。

基于激光跟踪仪的机床精度检测方法、系统、装置及介质

技术领域

[0001] 本发明属于激光测量技术领域,尤其涉及基于激光跟踪仪的机床精度检测方法及系统。

背景技术

[0002] 本部分的陈述仅仅是提供了与本发明相关的背景技术信息,不必然构成在先技术。

[0003] 机床作为现代工业母机,其精度对产品的制造与加工尤为关键,高精度机床可以提高工件的加工精度与一致性,因此机床的误差测量十分重要。激光测量仪器由于其本身非接触、高精度等特点,在机床精度测量中广泛使用。目前常用的激光测量仪器有激光干涉仪、激光准直仪、激光跟踪仪等。激光干涉仪有非常高的测量精度,分辨率可达到亚微米级,一般用于单轴测量,无法实现对轴间垂直度、旋转轴误差等的测量;激光准直仪实现高精度准直与调整,不适应于一般的长度、角度等测量工作;激光跟踪仪借以实现对于目标的快速跟踪定位,能够对于动态的目标实现实时监控与测量,同时能够对于多个目标进行监控,具有广泛的应用前景。

[0004] 由于激光跟踪仪的测量误差主要来自其角度测量误差,所以目前机床使用其进行高精度测量主要是利用其距离测量信息。对激光跟踪仪的位置进行标定后,通过多个激光跟踪仪或者一个激光跟踪仪多个位置的测量数据,能够得到运动点在机床参考坐标系下的坐标。通过得到运动点的实时坐标,能够计算得到与理论值的偏差,完成其他测量设备难以实现的工作。

[0005] 现有的激光跟踪仪的标定方法主要有基于已知的参考点的标定、标定板的标定等。基于参考点的标定是通过在不同测量位置得到的测量数据进行标定,为了保证标定的精度,所选取的测量点数目一般较多,标定过程及准备工作较为复杂。基于标定板的标定简化了标定流程,但是对于标定板的设计和加工要求非常高,限制了其使用。同时,在现有标定方法中缺乏更精确的参考值,参考值是指实际点的坐标,缺乏参考值是无法获得实际位置点,从而无法判断所取得的坐标是否正确,因此,目前其标定的精度受到自身测量精度的限制。

发明内容

[0006] 为克服上述现有技术的不足,本发明提供了基于激光跟踪仪的机床精度检测方法,该方法依托于激光跟踪仪的距离信息和激光干涉仪、激光测距仪的定位信息实现激光跟踪仪位置快速、高精度标定,同时基于此标定方法实现对于机床直线轴和旋转轴误差的辨识。

[0007] 为实现上述目的,本发明的一个或多个实施例提供了如下技术方案:

[0008] 第一方面,公开了基于激光跟踪仪的机床精度检测方法,包括:

[0009] 机床初始位置位于标定点上;

[0010] 机床分别沿Y轴、X轴运动设定段距离,求得机床坐标系下不同位置的激光跟踪仪的坐标;

[0011] 根据激光跟踪仪测量的距离数据得到工作空间内任一点的坐标;

[0012] 基于得到的坐标实现对于机床直线轴和旋转轴误差的辨识,基于辨识的误差检测机床精度。

[0013] 作为进一步的技术方案,将机床初始位置位于标定点上之前还包括激光跟踪仪的安装步骤,包括:将激光跟踪仪的目标靶球由夹具安装于主轴上,其靶球坐标位置通过机床运动轴确定,则x、y位置已知,通过对刀仪对刀对靶球的z值进行确认。

[0014] 作为进一步的技术方案,所述求得机床坐标系下激光跟踪仪的坐标,具体包括:设激光跟踪仪的测量坐标原点为P,靶球处于位置A时,得到P点到A点的距离为 l_1 ;

[0015] 将机床主轴沿X轴正方向移动给定距离到B点;

[0016] 用激光干涉仪测量得到实际的运动距离为 m ,激光跟踪仪此时测量P点到B点的距离为 l_2 ;

[0017] 由P点、A点、B点可构成一个平面,在平面内P点在直线AB上的投影为点N, $\triangle PNA$ 和 $\triangle PNB$ 分别为直角三角形,求解得到AN的距离 g ,PN的距离 n 。

[0018] 作为进一步的技术方案,所述求得机床坐标系下激光跟踪仪的坐标,具体还包括:在B点沿机床Y轴方向设置激光干涉仪,主轴向Y轴正方向运动一段距离到B'点,激光干涉仪测量得到移动距离为 d ;

[0019] 激光跟踪仪测量B'点的距离为 l_2' ;

[0020] 在B'点沿X轴方向上设置激光干涉仪,得到机床沿X轴负方向运动长度 m' 到达A'点,此时激光干涉仪的测量距离为 l_1' ,求得PN'的距离 n' ,A'N'的距离 g' 。

[0021] 作为进一步的技术方案,所述求得机床坐标系下激光跟踪仪的坐标,具体还包括:作PN在过P点的水平面上的投影为PM, $\triangle PMN$ 为直角三角形;作PN'在过P点的水平面上的投影为PM', $\triangle PM'N'$ 为直角三角形,易知 $MN=M'N'$,求解得到: $MN、M'N'$ 的长度 h ,投影PM的长度 c 。

[0022] 作为进一步的技术方案,在机床坐标系下P点相对于A点的位置,设A点的坐标为: (x,y,z) ,则P点的坐标为 $(x-g,y-c,z-h)$ 。

[0023] 作为进一步的技术方案,还包括:

[0024] 若机床的X轴存在倾斜,机床主轴未沿X水平方向移动给定距离到B点时,P点相对于A点在机床坐标系下的位置。设A点的坐标为 (x,y,z) ,A点在直线PN上的投影为D,在PMN平面PD与水平面的夹角 α 为 $\arctan \frac{h}{c}$,PD在过P点的水平面上的投影大小为 $e \cos \alpha$,在平行于YOZ的平面MNQ平面上的投影大小为 $e \sin \alpha$,P点距平面PMN的垂直距离 p ,则P点的坐标为 $(x-p,y-e \cos \alpha,z-e \sin \alpha)$ 。

[0025] 第二方面,公开了用于机床误差检测的激光跟踪仪位置标定系统,包括:激光跟踪仪、激光干涉仪;

[0026] 所述激光跟踪仪靶球安装于机床主轴轴线上,所述激光干涉仪反射端安装在主轴台上;

[0027] 标定时,所述机床的初始位置被配置为位于标定点上;

[0028] 所述机床分别沿Y轴、X轴运动设定段距离,求得机床坐标系下不同位置的激光跟踪仪的坐标;

[0029] 所述机床根据激光跟踪仪测量的距离数据得到工作空间内任一点的坐标。

[0030] 以上一个或多个技术方案存在以下有益效果:

[0031] 本实施例子的技术方案使用更高精度的测量参考值,快速准确地得到激光跟踪仪相对于机床的位置;通过标定后不同位置激光跟踪仪的测量数据,能够快速、实时得到机床上运动点的坐标,对机床直线轴、旋转轴误差进行了快速检定,相较于其他方法更加便捷高效;本发明方法简便,不受限于具体的机床类型和激光测量仪器位置以及激光跟踪仪本身的测量精度。

[0032] 本发明附加方面的优点将在下面的描述中部分给出,部分将从下面的描述中变得明显,或通过本发明的实践了解到。

附图说明

[0033] 构成本发明的一部分的说明书附图用来提供对本发明的进一步理解,本发明的示意性实施例及其说明用于解释本发明,并不构成对本发明的不当限定。

[0034] 图1为本发明实施例机床主轴沿X轴正方向移动给定距离计算示意图;

[0035] 图2为本发明实施例由于机床存在误差,移动后的B点可能与A点不在一条水平线上计算示意图;

[0036] 图3为本发明实施例偏移角示意图;

[0037] 图4为本发明实施例机床位置示意图。

具体实施方式

[0038] 应该指出,以下详细说明都是示例性的,旨在对本发明提供进一步的说明。除非另有指明,本文使用的所有技术和科学术语具有与本发明所属技术领域的普通技术人员通常理解相同含义。

[0039] 需要注意的是,这里所使用的术语仅是为了描述具体实施方式,而非意图限制根据本发明的示例性实施方式。

[0040] 在不冲突的情况下,本发明中的实施例及实施例中的特征可以相互组合。

[0041] 实施例一

[0042] 本实施例公开了基于激光跟踪仪的机床精度检测方法,包括:

[0043] 首先将激光跟踪仪靶球安装于机床主轴轴线上,其中,机床主轴将旋转运动传递给刀具,主轴轴线是旋转运动的中心轴线,与Z轴平行,激光干涉仪安装在主轴台上,为机床的移动距离提供精准测量值;机床初始位置位于标定点上,然后机床分别沿X轴、Y轴运动三段距离,根据激光跟踪仪测量的距离值以及激光干涉仪测量得到的位移/偏移数据,得到激光跟踪仪原点相对于机床坐标系的位置。本实施例子基于机床本身的标定点,同时引入激光干涉仪的测量精确度,整体的精度超过现有的方法。

[0044] 在一个或者多个实施例子中,最终得到的是激光跟踪仪的原点位置。激光跟踪仪包括一个发射器和一个靶球,测量得到是数据是在跟踪仪坐标系下的靶球坐标。本实施例子是确定跟踪仪靶球在机床下的坐标,从而将跟踪仪坐标系与机床坐标系建立联系。

[0045] 在一个或者多个实施例子中,情况一:如图1所示,点A为机床已经完成标定的点,用以建立机床坐标系与跟踪仪位置的关系。激光跟踪仪的目标靶球由夹具安装于主轴上,其坐标位置通过机床运动轴确定,则靶球的x、y位置已知,可通过对刀仪对刀对靶球的z值进行确认。激光干涉仪反射端安装在机床主轴盘上。

[0046] 在A点沿机床X轴方向布置激光干涉仪,用以精确测量机床的相对移动。设激光跟踪仪的测量坐标原点为P,靶球处于位置A时的得到P点到A点的距离为 l_1 ,将机床主轴沿X轴正方向移动给定距离到B点,用激光干涉仪测量得到实际的运动距离为 m ,激光跟踪仪此时测量B点的距离为 l_2 。由P点、A点、B点可构成一个平面,在平面内P点在直线AB上的投影为点N, $\triangle PNA$ 和 $\triangle PNB$ 分别为直角三角形,得到:

$$[0047] \quad \begin{aligned} g^2 + n^2 &= l_1^2 \\ (g+m)^2 + n^2 &= l_2^2 \end{aligned}$$

[0048] 上式中, g 为AN的距离, n 为PN的距离。

[0049] 求解得到

$$g = \frac{l_2^2 - l_1^2 - m^2}{2m}$$

$$[0050] \quad n = \sqrt{l_1^2 - \frac{(l_2^2 - l_1^2 - m^2)^2}{4m^2}}$$

[0051] 在B点沿机床Y轴方向设置激光干涉仪,主轴向Y轴正方向运动一段距离到 B' 点,激光干涉仪测量得到精确移动距离为 d 。此时激光跟踪仪测量 B' 点的距离为 l_2' 。在 B' 点沿X轴方向上设置激光干涉仪,与上述操作相同,得到机床沿X轴负方向运动长度 m' 到达 A' 点,此时激光干涉仪的测量距离为 l_1' 。本实施例子中不同位置的激光干涉仪可以是同一个激光干涉仪,也可以是不同的激光干涉仪。同理可以求得

$$g' = \frac{l_2'^2 - l_1'^2 - m'^2}{2m'}$$

$$[0052] \quad n' = \sqrt{l_1'^2 - \frac{(l_2'^2 - l_1'^2 - m'^2)^2}{4m'^2}}$$

[0053] 作PN在过P点的水平面上的投影为PM, $\triangle PMN$ 为直角三角形;作 PN' 在过P点的水平面上的投影为 PM' , $\triangle PM'N'$ 为直角三角形,易知 $MN=M'N'$,建立方程组:

$$[0054] \quad \begin{aligned} c^2 + h^2 &= n^2 \\ (c+d)^2 + h^2 &= n'^2 \end{aligned}$$

[0055] 式中, h 是 MN 、 $M'N'$ 的长度, c 为投影PM的长度。

[0056] 求解得到:

$$c = \frac{n'^2 - n^2 - d^2}{2d}$$

$$[0057] \quad h = \sqrt{n^2 - \frac{(n'^2 - n^2 - d^2)^2}{4d^2}}$$

[0058] 由此可知在机床坐标系下P点相对于A点的位置,设A点的坐标为 (x, y, z) ,则P点的坐标为 $(x - \frac{l_2^2 - l_1^2 - m^2}{2m}, y - \frac{n'^2 - n^2 - d^2}{2d}, z - \sqrt{n^2 - \frac{(n'^2 - n^2 - d^2)^2}{4d^2}})$ 。

[0059] 同理可以求得机床坐标系下不同位置的激光跟踪仪的坐标,根据激光跟踪仪测量的距离数据可以得到工作空间内任一点的坐标。跟踪仪的位置设置大于等于4,通过求解下式得到

$$[0060] \quad \begin{cases} (x_a - x_i)^2 + (y_a - y_i)^2 + (z_a - z_i)^2 = l_{ai}^2 \\ (x_b - x_i)^2 + (y_b - y_i)^2 + (z_b - z_i)^2 = l_{bi}^2 \\ (x_c - x_i)^2 + (y_c - y_i)^2 + (z_c - z_i)^2 = l_{ci}^2 \\ (x_d - x_i)^2 + (y_d - y_i)^2 + (z_d - z_i)^2 = l_{di}^2 \end{cases}$$

[0061] 式中,所要求的空间点的坐标为 (x_i, y_i, z_i) ,激光跟踪仪位置为 (x_a, y_a, z_a) 时测量点 (x_i, y_i, z_i) 的距离为 l_{ai} 。

[0062] 由于仅使用跟踪仪的距离信息,没有使用误差较大的角度信息,其精度大于单个激光的测量精度,通过靶球的运动可以实时测量得到运动点的坐标,同时本方法对于跟踪仪对与跟踪仪位置的确定,相较于使用空间大量点数据进行激光跟踪仪位置拟合更加准确、高效。

[0063] 在一个或者多个实施例子中,实际上,由于机床存在误差,移动后的B点可能与A点相对于X轴不在一条水平线上,如图2、3所示,AB为XOZ平面上的一条相对X轴的斜线。因此造成P点向直线AB所做的垂线PQ不在P点的竖直平面内,则计算P点相较于A点的相对位置时,需要PQ在过P点、平行于YOZ的平面内再次投影,之后重复情况一的运算。

[0064] 在A点和B点沿竖直方向设置激光干涉仪,测量得到B点的垂直偏移 t ,则偏移角为 θ ,由测得的水平移动距离 m 可得 θ 的大小为 $\arctan \frac{t}{m}$ 。

[0065] 由平面几何得到PQ与其过P点、平行于XOZ的竖直平面上的投影PN之间的夹角为 θ ,则

$$g = \frac{l_2^2 - l_1^2 - (m^2 + t^2)}{2\sqrt{m^2 + t^2}}$$

$$[0066] \quad q = \sqrt{l_1^2 - \frac{(l_2^2 - l_1^2 - m^2 - t^2)^2}{4(m^2 + t^2)}}$$

$$n = q \cos \theta$$

[0067] A点在直线PN上的投影为D,则P点距平面PMN的距离p为

$$[0068] \quad p = \frac{qt + gm}{\sqrt{m^2 + t^2}}。$$

[0069] P、D点之间的距离e为

$$[0070] \quad e = \frac{qm - gt}{\sqrt{m^2 + t^2}}。$$

[0071] 之后与情况一同理得到 n' 、 d ，计算 c 、 h 的大小，则PD与水平面的夹角 α 为 $\arctan \frac{h}{c}$ ，

PD在过P点的水平面上的投影大小为 $e \cos \alpha$ ，在MNQ平面上的投影大小为 $e \sin \alpha$ 。

[0072] 由此可知P点相对于A点在机床坐标系下的位置，设A点的坐标为 (x, y, z) ，则P点的坐标为 $(x - p, y - e \cos \alpha, z - e \sin \alpha)$ 。本实施例子的验证方法使用标准杆进行精度校准。

[0073] 在本实施例子中，公式中的数值 l_1, l_1', l_2, l_2' 由激光跟踪仪测量， m, m', d, m, t 由激光干涉仪测量。

[0074] 在本实施例子中，基于得到的坐标实现对于机床直线轴和旋转轴误差的辨识，基于辨识的误差检测机床精度，具体过程为：

[0075] 五轴双摆头机床平移、旋转运动的齐次坐标转换式为：

$$[0076] \quad T_x = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & x \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} T_y = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & y \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} T_z = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}；$$

$$[0077] \quad R_A = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \theta_a & -\sin \theta_a & 0 \\ 0 & \sin \theta_a & \cos \theta_a & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} R_C = \begin{bmatrix} \cos \theta_c & -\sin \theta_c & 0 & 0 \\ \sin \theta_c & \cos \theta_c & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}。$$

[0078] 其中， x, y, z 分别为X轴、Y轴、Z轴的移动量， θ_a, θ_c 分别为A轴和C轴的转动量， T_x, T_y, T_z 分别为X轴、Y轴、Z轴的坐标变换矩阵， $R_A(\theta_a), R_C(\theta_c)$ 分别为A轴和C轴的坐标变换矩阵。

[0079] 基于多体运动理论，在无误差情况下五轴机床的运动变换矩阵为

$$U = T_x T_y T_z R_A R_C \cdot u$$

$$[0080] \quad V = T_x T_y T_z R_A R_C \cdot v。$$

[0081] u 为作用点在刀具坐标系下的位置向量， $u = [u_x \quad u_y \quad u_z \quad 1]^T$ ， U 的前三项为运动后的坐标向量， v 为在刀具坐标系下的位置向量，刀具竖直向下时为 $[0 \quad 0 \quad -1 \quad 0]^T$ ， V 的前三项为运动后的方向向量。

[0082] 当进运动X轴，其他轴保持静止时，理想情况下的坐标为 $(u_x + x u_y u_z)$ ，实际情况下的坐标分别为 $(x' \quad y' \quad z')$

$$[0083] \quad \begin{bmatrix} x' \\ y' \\ z' \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & -\varepsilon_z(x) & \varepsilon_y(x) & \delta_x(x) \\ \varepsilon_z(x) & 1 & -\varepsilon_x(x) & \delta_y(x) \\ -\varepsilon_y(x) & \varepsilon_x(x) & 1 & \delta_z(x) \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & x \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_x \\ u_y \\ u_z \\ 1 \end{bmatrix}.$$

[0084] 其中, $\delta_x(x)$ 为X轴的定位误差, $\delta_y(x)$ 、 $\delta_z(x)$ 为X轴沿Y轴、Z轴方向的直线度误差, $\varepsilon_x(x)$ 、 $\varepsilon_y(x)$ 、 $\varepsilon_z(x)$ 分别为绕X轴的滚转角误差、绕Y轴的偏摆角误差和绕Z轴的俯仰角误差。

[0085] 参见附图4所示, 机床初始位置 $A_1(x_1 y_1 z_1)$, 将 A_1 点向x轴正方向运动距离 x , 实际情况的坐标为 B_1 , 理想坐标为 $(x_1 + x x_{y_1} x_{z_1})$, 实际情况与理想情况的偏差记为 $(\Delta x_1 \quad \Delta y_1 \quad \Delta z_1)$:

$$[0086] \quad \begin{aligned} \Delta x_1 &= \delta_x(x) + z_1 \varepsilon_y(x) - y_1 \varepsilon_z(x) \\ \Delta y_1 &= \delta_y(x) - z_1 \varepsilon_x(x) + x_1 \varepsilon_z(x) \\ \Delta z_1 &= \delta_z(x) + y_1 \varepsilon_x(x) - x_1 \varepsilon_y(x) \end{aligned}$$

[0087] 由于处于 A_1 点时存在初始误差, 因此还需要减去初始误差 $(x'_1 - x_1 \quad y'_1 - y_1 \quad z'_1 - z_1)$ 。同理从 A_2 点向X轴负方向运动至 B_2 、 A_3 点向X轴正方向运动至 B_3 、 A_4 点向X轴负方向运动至 B_4 。点 A_1 和 A_3 位于一竖直线上, x 、 y 值相同, z 值不同; 点 A_2 和 A_4 位于一竖直线上, x 、 y 值相同, z 值不同; 点 A_1 和 A_2 、点 A_3 和 A_4 高度分别相同。 B_1 、 B_2 、 B_3 和 B_4 的理论 x 值相同, 整理得到:

$$[0088] \quad \begin{bmatrix} \Delta x_1 \\ \Delta y_1 \\ \Delta z_1 \\ \vdots \\ \Delta x_4 \\ \Delta y_4 \\ \Delta z_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & z'_1 & -y'_1 \\ 0 & 1 & 0 & -z'_1 & 0 & x'_1 \\ 0 & 0 & 1 & y'_1 & -x'_1 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ -1 & 0 & 0 & 0 & -z'_8 & y'_8 \\ 0 & -1 & 0 & z'_8 & 0 & -x'_8 \\ 0 & 0 & -1 & -y'_8 & x'_8 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \delta_x(x) \\ \delta_y(x) \\ \delta_z(x) \\ \varepsilon_x(x) \\ \varepsilon_y(x) \\ \varepsilon_z(x) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} x'_1 - x_1 \\ y'_1 - y_1 \\ z'_1 - z_1 \\ \vdots \\ x'_8 - x_8 \\ y'_8 - y_8 \\ z'_8 - z_8 \end{bmatrix}.$$

[0089] 通过解耦得到X轴的几何误差。同理可以得到Y轴、Z轴的几何误差。直线轴间的误差通过拟合相邻的两条直线轴线得到。

[0090] 旋转轴A轴和C轴的误差分为与位置相关的误差和与位置无关的误差。当仅旋转C轴, 仅考虑C轴的误差, 所测量的到的点应位于同一平面上, 空间平面方程为

$$[0091] \quad p_1 x + p_2 y + p_3 z - 1 = 0.$$

[0092] 其中, p_1 、 p_2 、 p_3 为平面系数。

[0093] n 个测量点处于同一平面上所组成的方程组为

$$[0094] \quad H \cdot A = L.$$

[0095] 其中, $H = \begin{bmatrix} x_1 & x_2 & \cdots & x_n \\ y_1 & y_2 & \cdots & y_n \\ z_1 & z_2 & \cdots & z_n \end{bmatrix}^T$, $P_l = [p_1 \ p_2 \ p_3]^T$, $L = [1 \ 1 \ \cdots \ 1]^T$ 。

[0096] 拟合平面的法向量的系数K为:

[0097] $K = (H^T H)^{-1} H^T L$ 。

[0098] 由空间圆所在球体的中垂面方程相关性, n 个点可以得到 $n(n-1)/2$ 个呈线性无关的中垂面的方程, 球心 O_p 的坐标为 $(x_0 \ y_0 \ z_0)$, 整理得到

[0099] $B \cdot O_p = S$ 。

[0100] 其中, $B = \begin{bmatrix} \Delta x_{12} & \Delta y_{12} & \Delta z_{12} \\ \Delta x_{13} & \Delta y_{13} & \Delta z_{13} \\ \cdots & \cdots & \cdots \\ \Delta x_{1n} & \Delta y_{1n} & \Delta z_{1n} \\ \Delta x_{23} & \Delta y_{23} & \Delta z_{23} \\ \Delta x_{24} & \Delta y_{24} & \Delta z_{24} \\ \cdots & \cdots & \cdots \\ \Delta x_{2n} & \Delta y_{2n} & \Delta z_{2n} \\ \cdots & \cdots & \cdots \\ \Delta x_{(n-1)n} & \Delta y_{(n-1)n} & \Delta z_{(n-1)n} \end{bmatrix}$, $O_p = \begin{bmatrix} x_0 \\ y_0 \\ z_0 \end{bmatrix}$, $S = \begin{bmatrix} s_1 \\ s_2 \\ \cdots \\ s_{(n-1)n/2} \end{bmatrix}$, $\Delta x_{ij} = x_j - x_i$,

$$\Delta y_{ij} = y_j - y_i, \Delta z_{ij} = z_j - z_i, s_i = \frac{x_{i+1}^2 + y_{i+1}^2 + z_{i+1}^2 - x_i^2 - y_i^2 - z_i^2}{2}。$$

[0101] 上述为超定方程, 已知圆心 O_p 一定在上述平面上, 即

[0102] $P_l \cdot O_p = 1$ 。

[0103] 通过在上式约束下的最优化方程求解中垂面方程组, 即

[0104] $f(O_p) = \|B \cdot O_p - S\|^2 + \lambda(P_l \cdot O_p - 1)$ 。

[0105] 其中, λ 为拉格朗日乘子。

[0106] 求解得到圆心坐标和 O_p 和 λ 为

[0107] $\begin{bmatrix} O_p \\ \lambda \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} B^T B & P_l \\ P_l^T & 0 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} B^T S \\ 1 \end{bmatrix}$ 。

[0108] 已求得所测量点法向量为 $K(k_1, k_2, k_3)$, 即C轴方向向量为 K , X、Y轴的方向向量分别是 $\vec{x} = (1, 0, 0)$ 、 $\vec{y} = (0, 1, 0)$, 则C轴与位置无关的误差AOC、BOC分别为

[0109] $AOC = \arccos(K \cdot \vec{y} / \|K\| \|\vec{y}\|) - \pi/2$

$BOC = \arccos(K \cdot \vec{x} / \|K\| \|\vec{x}\|) - \pi/2$ 。

[0110] AOC、BOC分别为C轴对Y轴、X轴的垂直度。

[0111] 已知C轴方向向量及圆心,则可知C轴直线为

$$[0112] \quad \frac{x-x_0}{k_1} = \frac{y-y_0}{k_2} = \frac{z-z_0}{k_3}。$$

[0113] k_1 、 k_2 、 k_3 为方向向量K在坐标轴上的分量,前述已求得向量K。

[0114] 由此有 $z=0$ 可以计算得到

$$[0115] \quad XOC = -\frac{k_1 z_0}{k_3} + x_0;$$

$$[0116] \quad YOC = -\frac{k_2 z_0}{k_3} + y_0;$$

[0117] 其中,XOC、YOC为C轴的X方位、Y方位。

[0118] 由此求得C轴与位置无关的四项误差,进行平移和旋转,将C轴旋转至z轴方向且圆心处于名义位置。此时,C轴仅存在与位置相关的误差, $(x_1' \ y_1' \ z_1')$ 为圆周上上一点,旋转角度 θ_c 到角度 c 上的坐标偏差为

$$Vx = \delta_x(c) + z_1 \varepsilon_y(c) - (x_1 \sin \theta_c + y_1 \cos \theta_c) \varepsilon_z(c) + x_1' - x_1$$

$$[0119] \quad Vy = \delta_y(c) - z_1 \varepsilon_x(c) + (x_1 \cos \theta_c - y_1 \sin \theta_c) \varepsilon_z(c) + y_1' - y_1$$

$$Vz = \delta_z(c) + (x_1 \sin \theta_c + y_1 \cos \theta_c) \varepsilon_x(c) + (y_1 \sin \theta_c - x_1 \cos \theta_c) \varepsilon_y(c) + z_1' - z_1$$

[0120] 通过旋转不同的角度 θ_c 到角度 c 处,进行求解可以得到旋转轴C轴 c 处的与位置相关的误差。

[0121] 同理,可以求得A轴与位置相关的误差和与位置无关的误差。

[0122] 实施例二

[0123] 本实施例的目的是提供一种计算机装置,包括存储器、处理器及存储在存储器上并可在处理器上运行的计算机程序,所述处理器执行所述程序时实现上述方法的步骤。

[0124] 实施例三

[0125] 本实施例的目的是提供一种计算机可读存储介质。

[0126] 一种计算机可读存储介质,其上存储有计算机程序,该程序被处理器执行时执行上述方法的步骤。

[0127] 实施例四

[0128] 本实施例的目的是提供用于机床误差检测的激光跟踪仪位置标定系统,包括:激光跟踪仪、激光干涉仪;

[0129] 激光跟踪仪靶球安装于机床主轴轴线上,激光干涉仪安装在主轴台上;

[0130] 标定时,机床的初始位置被配置为位于标定点上;

[0131] 机床分别沿X轴、Y轴运动设定段距离,求得机床坐标系下不同位置的激光跟踪仪的坐标;

[0132] 机床根据激光跟踪仪测量的距离数据得到工作空间内任一点的坐标。基于得到的坐标实现对于机床直线轴和旋转轴误差的辨识,基于辨识的误差检测机床精度。

[0133] 以上实施例二、三和四的装置中涉及各步骤与方法实施例一相对应,具体实施方式可参见实施例一的相关说明部分。术语“计算机可读存储介质”应该理解为包括一个或

多个指令集的单个介质或多个介质;还应当被理解为包括任何介质,所述任何介质能够存储、编码或承载用于由处理器执行的指令集并使处理器执行本发明中的任一方法。

[0134] 本领域技术人员应该明白,上述本发明的各模块或各步骤可以用通用的计算机装置来实现,可选地,它们可以用计算装置可执行的程序代码来实现,从而,可以将它们存储在存储装置中由计算装置来执行,或者将它们分别制作成各个集成电路模块,或者将它们中的多个模块或步骤制作成单个集成电路模块来实现。本发明不限制于任何特定的硬件和软件的结合。

[0135] 上述虽然结合附图对本发明的具体实施方式进行了描述,但并非对本发明保护范围的限制,所属领域技术人员应该明白,在本发明的技术方案的基础上,本领域技术人员不需要付出创造性劳动即可做出的各种修改或变形仍在本发明的保护范围以内。

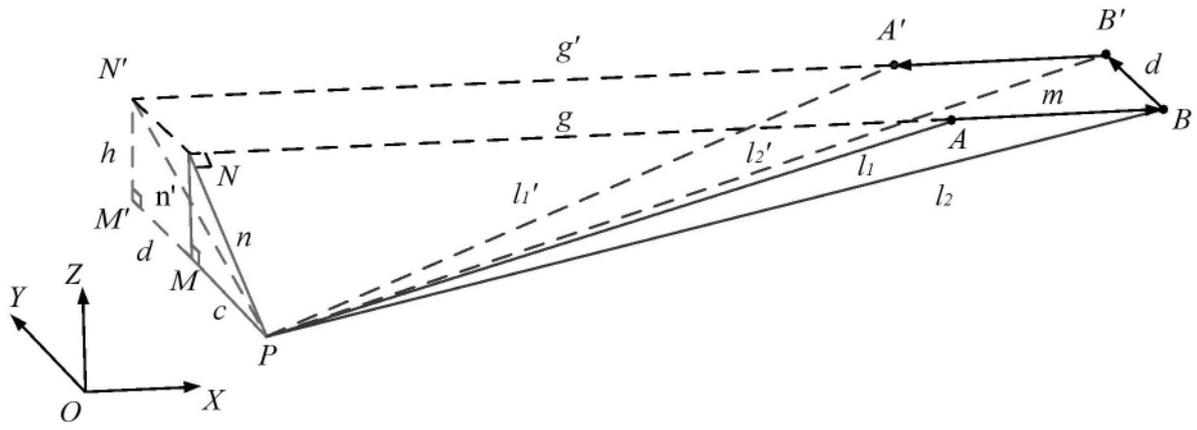


图1

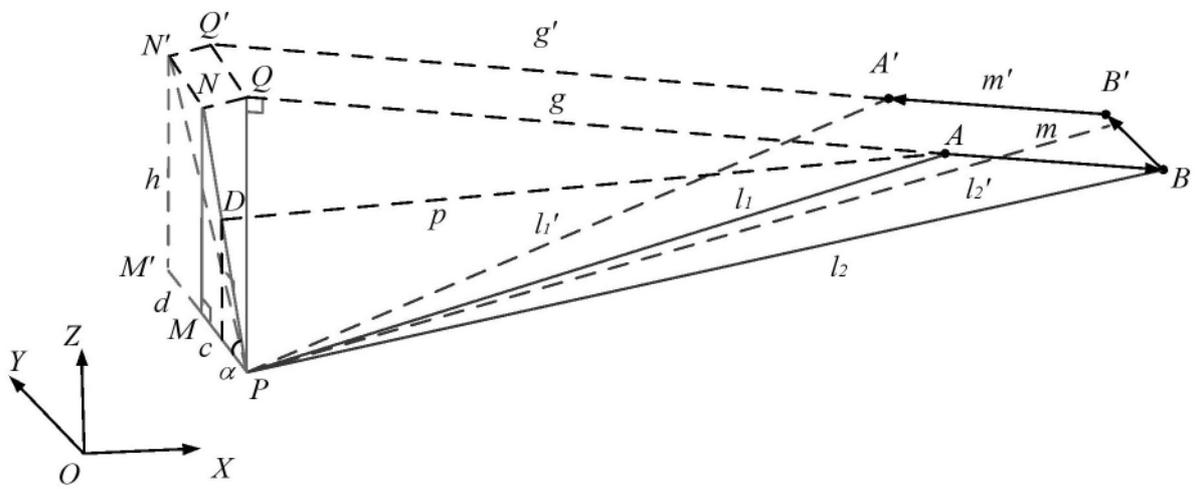


图2

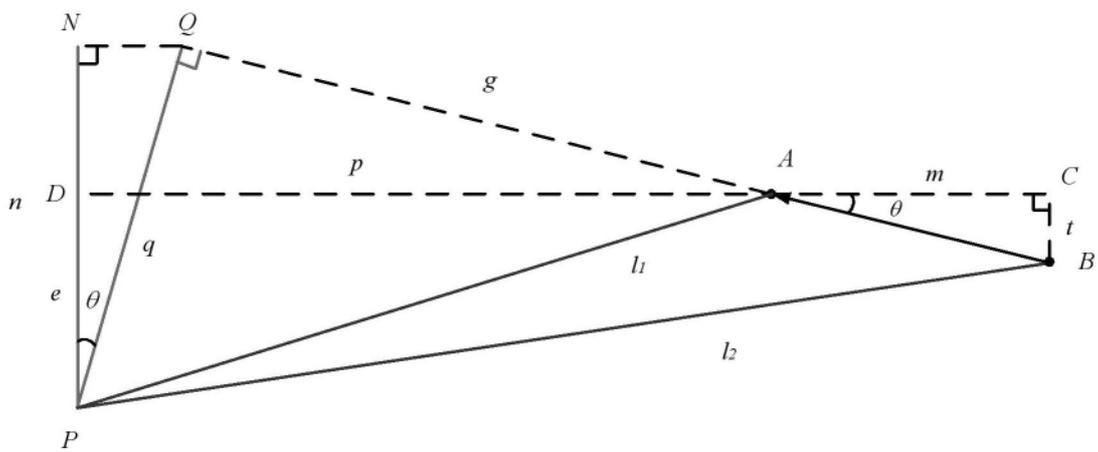


图3

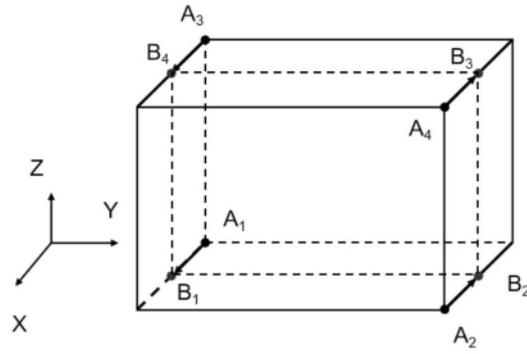


图4