

(12) 发明专利申请

(10) 申请公布号 CN 102062575 A

(43) 申请公布日 2011. 05. 18

(21) 申请号 201010539104. 1

(22) 申请日 2010. 11. 10

(71) 申请人 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 郭俊杰 王金栋 邓玉芬 费致根
贾天玖

(74) 专利代理机构 西安通大专利代理有限责任
公司 61200

代理人 朱海临

(51) Int. Cl.

G01B 11/00(2006. 01)

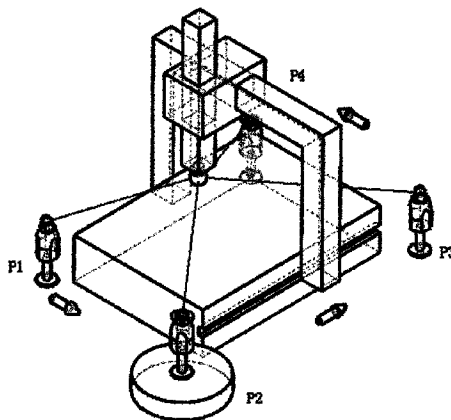
权利要求书 3 页 说明书 8 页 附图 1 页

(54) 发明名称

基于激光多路分时测量的数控机床几何精度
检测方法

(57) 摘要

本发明公开了一种基于激光多路分时测量的数控机床几何精度检测方法,采用一台激光跟踪仪先后在不同的基点位置对机床相同的 3D 空间进给运动进行测量,通过对测量数据处理便能够分离出机床的各项误差。测量过程中,只涉及到位移量的测量,因此具有较高的测量精度。由于采用分时测量原理,与目前多站测量原理相比,系统硬件成本大大降低。同时一次测量便能够分离出机床的各项误差,检测效率大大提高。该方法具有快速、精度高等优点,适合于中高档数控机床的精度检测。



1. 一种基于激光多路分时测量的数控机床几何精度检测方法,其特征在于,包括下述步骤:

(1) 多路分时测量步骤

测量时,控制机床在三维空间进给,并在其运动路径上设置有多个测量点,一台激光跟踪仪先后在至少三个基点位置,对机床相同的运动轨迹进行测量,当机床运动到各测量点位置时,机床停止运动,记下该测量点位置处激光跟踪仪的测距读数,当所有测量点测量完成后,得到不同测量点处的激光跟踪仪的测距读数;然后将激光跟踪仪移动到其它基点位置,重复上述测量过程,直至在所有基点位置都完成了对机床运动的测量;

(2) 测量所得数据处理步骤

包括以下子步骤:

A、激光跟踪仪基点位置自标定

采取每个基点位置坐标单独标定的原则,设 A_0 为机床初始测量点,机床沿着事先设定好的路径运动,各测量点的理论坐标 $A_i(x_i, y_i, z_i)$, $i = 1, 2, \dots, n$, 激光跟踪仪跟踪机床并实时测量测量点到基点的距离变化量,假定瞄准初始测量点 A_0 时,激光跟踪仪的测距读数为 0,则在机床的移动过程中,激光跟踪仪的测距读数就是测量点到基点的相对距离变化量,记初始测量点 A_0 到第一基点 P_1 的距离记为 L_1 ,测量过程中测量点 A_i 到第一基点 P_1 的相对距离变化量记为 l_{1i} ;

设第一基点 P_1 坐标为 (x, y, z) ,对测量点 $A_i(x_i, y_i, z_i)$,按两点距离公式可以建立如下方程组:

$$\begin{cases} \sqrt{(x-x_1)^2+(y-y_1)^2+(z-z_1)^2}=L_1+l_{11} \\ \sqrt{(x-x_2)^2+(y-y_2)^2+(z-z_2)^2}=L_1+l_{12} \\ \text{M} \\ \sqrt{(x-x_i)^2+(y-y_i)^2+(z-z_i)^2}=L_1+l_{1i} \end{cases} \quad (1)$$

将式(1)中的第一个方程两边平方,并展开可得:

$$x_1^2+y_1^2+z_1^2-2x_1x-2y_1y-2z_1z+x^2+y^2+z^2-L^2-2Ll_{11}-l_{11}^2=0 \quad (2)$$

上式为第一基点 $P_1(x, y, z)$ 和 L 的二次非线性方程,令 $C = x^2+y^2+z^2-L^2$,则可将上述方程线性化:

$$x_1^2+y_1^2+z_1^2-2x_1x-2y_1y-2z_1z+C-2Ll_{11}-l_{11}^2=0 \quad (3)$$

根据最小二乘原理,目标函数为

$$F(x, y, z, L, C) = \sum_{i=1}^N (x_i^2 + y_i^2 + z_i^2 - 2x_i x - 2y_i y - 2z_i z + C - 2Ll_{1i} - l_{1i}^2)^2 \quad (4)$$

由极值原理,欲使 F 为极小,则必有

$$\frac{\partial F}{\partial x} = 0 \quad \frac{\partial F}{\partial y} = 0 \quad \frac{\partial F}{\partial z} = 0 \quad \frac{\partial F}{\partial L} = 0 \quad \frac{\partial F}{\partial C} = 0 \quad (5)$$

同时(4)式中各二阶偏导数恒正,即

$$\frac{\partial^2 F}{\partial x^2} = 8 \sum_{i=1}^N x_i^2 > 0 \quad \frac{\partial^2 F}{\partial y^2} = 8 \sum_{i=1}^N y_i^2 > 0 \quad \frac{\partial^2 F}{\partial z^2} = 8 \sum_{i=1}^N z_i^2 > 0 \quad \frac{\partial^2 F}{\partial L^2} = 8 \sum_{i=1}^N l_{1i}^2 > 0$$

$$\frac{\partial^2 F}{\partial C^2} = 1 > 0 \quad (6)$$

由此可知,式(5)中各方程求得的极值是极小值,满足最小二乘条件,整理可得如下正规方程组:

$$\begin{bmatrix} 2\sum_{i=1}^N x_i^2 & 2\sum_{i=1}^N x_i y_i & 2\sum_{i=1}^N x_i z_i & 2\sum_{i=1}^N x_i l_{1i} & -\sum_{i=1}^N x_i \\ 2\sum_{i=1}^N x_i y_i & 2\sum_{i=1}^N y_i^2 & 2\sum_{i=1}^N y_i z_i & 2\sum_{i=1}^N y_i l_{1i} & -\sum_{i=1}^N y_i \\ 2\sum_{i=1}^N x_i z_i & 2\sum_{i=1}^N y_i z_i & 2\sum_{i=1}^N z_i^2 & 2\sum_{i=1}^N z_i l_{1i} & -\sum_{i=1}^N z_i \\ 2\sum_{i=1}^N z_i l_{1i} & 2\sum_{i=1}^N y_i l_{1i} & 2\sum_{i=1}^N z_i l_{1i} & 2\sum_{i=1}^N l_{1i}^2 & -\sum_{i=1}^N l_{1i} \\ -\sum_{i=1}^N x_i & -\sum_{i=1}^N y_i & -\sum_{i=1}^N z_i & -\sum_{i=1}^N l_{1i} & \frac{N}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \\ L_1 \\ C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sum_{i=1}^N x_i (x_i^2 + y_i^2 + z_i^2 - l_{1i}^2) \\ \sum_{i=1}^N y_i (x_i^2 + y_i^2 + z_i^2 - l_{1i}^2) \\ \sum_{i=1}^N z_i (x_i^2 + y_i^2 + z_i^2 - l_{1i}^2) \\ \sum_{i=1}^N l_{1i} (x_i^2 + y_i^2 + z_i^2 - l_{1i}^2) \\ -\frac{1}{2} \sum_{i=1}^N (x_i^2 + y_i^2 + z_i^2 - l_{1i}^2) \end{bmatrix} \quad (7)$$

式(7)中N为总测量点数,当式(7)中的系数行列式不为零时,有唯一确定的解,由此可以解出x、y、z、L₁的值;重复上述过程,即可标定出基点在其它P₂、P₃、P₄、……多个位置处的空间坐标,以及L₂、L₃、L₄、……;

B、测量点空间坐标标定

基于多法定位原理对测量过程中各测量点的实际坐标A'_i(x'_i, y'_i, z'_i)进行标定,设标定得到的多个基点空间坐标为P₁(x_{p1}, y_{p1}, z_{p1})、P₂(x_{p2}, y_{p2}, z_{p2})、P₃(x_{p3}, y_{p3}, z_{p3})、P₄(x_{p4}, y_{p4}, z_{p4})、……标定得到的初始测量点A₀到多个基点的距离分别为L₁、L₂、L₃、L₄、……;

对测量过程中的测量点A'_i(x'_i, y'_i, z'_i),按两点距离公式可以建立如下方程组:

$$\begin{cases} \sqrt{(x'_i - x_{p1})^2 + (y'_i - y_{p1})^2 + (z'_i - z_{p1})^2} = L_1 + l_{1i} \\ \sqrt{(x'_i - x_{p2})^2 + (y'_i - y_{p2})^2 + (z'_i - z_{p2})^2} = L_2 + l_{2i} \\ \dots \\ \sqrt{(x'_i - x_{pj})^2 + (y'_i - y_{pj})^2 + (z'_i - z_{pj})^2} = L_j + l_{ji} \end{cases} \quad (8)$$

采用类似基点P₁的标定步骤来对测量点A'_i(x'_i, y'_i, z'_i)进行标定,结果如下:

$$\begin{bmatrix} 2\sum_{j=1}^N x_{pj}^2 & 2\sum_{j=1}^N x_{pj} y_{pj} & 2\sum_{j=1}^N x_{pj} z_{pj} & -\sum_{j=1}^N x_{pj} \\ 2\sum_{j=1}^N x_{pj} y_{pj} & 2\sum_{j=1}^N y_{pj}^2 & 2\sum_{j=1}^N y_{pj} z_{pj} & -\sum_{j=1}^N y_{pj} \\ 2\sum_{j=1}^N x_{pj} z_{pj} & 2\sum_{j=1}^N y_{pj} z_{pj} & 2\sum_{j=1}^N z_{pj}^2 & -\sum_{j=1}^N z_{pj} \\ -\sum_{j=1}^N x_{pj} & -\sum_{j=1}^N y_{pj} & -\sum_{j=1}^N z_{pj} & \frac{N}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x'_i \\ y'_i \\ z'_i \\ C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sum_{j=1}^N x_{pj} (x_{pj}^2 + y_{pj}^2 + z_{pj}^2 - L_j^2 - 2L_j l_{ji} - l_{ji}^2) \\ \sum_{j=1}^N y_{pj} (x_{pj}^2 + y_{pj}^2 + z_{pj}^2 - L_j^2 - 2L_j l_{ji} - l_{ji}^2) \\ \sum_{j=1}^N z_{pj} (x_{pj}^2 + y_{pj}^2 + z_{pj}^2 - L_j^2 - 2L_j l_{ji} - l_{ji}^2) \\ -\frac{1}{2} \sum_{j=1}^N (x_{pj}^2 + y_{pj}^2 + z_{pj}^2 - L_j^2 - 2L_j l_{ji} - l_{ji}^2) \end{bmatrix} \quad (9)$$

式(9)中,N为基点总数,将得到的各测量点的实际坐标A'_i(x'_i, y'_i, z'_i)与各测量点的理论坐标A_i(x_i, y_i, z_i)进行比对,得到机床在各测量点处的运动误差A_i(Δx_i, Δy_i,

Δz_i), $i = 1, 2, \dots, n$;

C、机床误差分离

利用测量得到的各测量点处的运动误差 $A_i(\Delta x_i, \Delta y_i, \Delta z_i)$, 采用九线法的误差分离方法, 建立各轴同一位置处多个测量点的运动误差方程, 采用最小二乘法对该方程组求解, 获得对应位置处机床的各项几何误差。

2. 如权利要求 1 所述的基于激光多路分时测量的数控机床几何精度检测方法, 其特征在于, 所述步骤 (1) 中, 激光跟踪仪所在的多个基站位置应不在同一平面, 且高度差 $> 100\text{mm}$ 。

3. 如权利要求 1 所述的基于激光多路分时测量的数控机床几何精度检测方法, 其特征在于, 所述步骤 (1) 中, 每个基点位置对机床运动测量包括正向运动测量和反向运动测量, 测量次数 ≥ 2 次。

基于激光多路分时测量的数控机床几何精度检测方法

技术领域

[0001] 本发明涉及激光精密测量技术,特别涉及一种基于激光多路分时测量的数控机床的几何精度检测方法。

背景技术

[0002] 随着制造业和精密加工技术的不断发展,对数控机床加工精度的要求日益提高。因此,如何快速并准确检测出机床各项误差并进行误差补偿,对提高数控机床的加工精度起着及其重要的作用。由于几何误差受环境影响较小,重复性好,易于进行误差补偿,所以是机床误差补偿的主要研究方向。

[0003] 目前,国内外用来检测数控机床几何误差的方法有很多,常见的有:实物基准测量法、激光球杆仪、正交光栅测量法、激光干涉测量法等,但这些方法在检测精度、检测效率以及通用性上存在着不足,不能够满足机床快速、高精度的检测要求。

[0004] 随着机器人广泛应用于制造业,为了适应测量机器人的动作及一些大型工件装配的要求,三维坐标动态跟踪测量技术迅速发展起来。激光跟踪测量系统具有快速、动态、高精度的特点,满足了大范围、现场测量、无导轨柔性测量、实现动态跟踪测量等新要求,已成为许多领域中不可替代的工具。国内虽也有采用激光跟踪仪检测机床的例子,但多为单站式直接测量,当对中高端机床进行检测时,测量精度有待进一步的提高。

[0005] 激光跟踪三维坐标测量系统主要是基于球坐标法、三角法、多边法三种原理,按跟踪系统的数量还可将其分为单站、多站两种配置。

[0006] 采用单站法测量机床精度时,由于转角的测量精度有限,而且角度测量本身的测量不确定会随距离的增大而增大,与激光干涉的测距精度相差甚远,影响了空间坐标整体精度。一般来说,激光测距可保证 1×10^{-6} 的测量精度,但考虑到测角误差的影响,这种系统的坐标测量不确定度为 $\pm 1 \times 10^{-5}$,因此,采用单站法对高精度机床检测时,测量精度难以保证。多站测量是基于多边形定位原理,测量过程中只用激光跟踪仪的测距信息,而不用其测角信息,因此具有较高的测量精度,但需要多台激光跟踪仪同时对目标点进行测量,成本太高,工程应用起来比较困难。

[0007] 综上所述,针对目前数控机床精度检测方法的不足,有必要提出一种新的数控机床精度检测方法,以实现数控机床的快速和高精度检测。

发明内容

[0008] 为了克服目前检测方法不能够满足机床精度的快速、高精度检测要求,本发明的目的是提供一种基于激光多路分时测量的数控机床精度检测方法,该方法具有快速、精度高等优点,适合中高端数控机床的精度检测。

[0009] 为达到以上目的,本发明是采取如下技术方案予以实现的:

[0010] 一种基于激光多路分时测量的数控机床几何精度检测方法,其特征在于,包括下述步骤:

[0011] (1) 多路分时测量步骤

[0012] 测量时,控制机床在三维空间进给,并在其运动路径上设置有多个测量点,一台激光跟踪仪先后在至少三个基点位置,对机床相同的运动轨迹进行测量,当机床运动到各测量点位置时,机床停止运动,记下该测量点位置处激光跟踪仪的测距读数,当所有测量点测量完成后,得到不同测量点处激光跟踪仪的测距读数;然后将激光跟踪仪移动到其它基点位置,重复上述测量过程,直至在所有基点位置都完成了对机床运动的测量;

[0013] (2) 测量所得数据处理步骤

[0014] 包括以下子步骤:

[0015] A、激光跟踪仪基点位置自标定

[0016] 采取每个基点位置坐标单独标定的原则,设 A_0 为机床初始测量点,机床沿着事先设定好的路径运动,各测量点的理论坐标 $A_i(x_i, y_i, z_i)$, $i = 1, 2, \dots, n$,激光跟踪仪跟踪机床并实时测量测量点到基点的距离变化量,假定瞄准初始测量点 A_0 时,激光跟踪仪的测距读数置为 0,则在机床的移动过程中,激光跟踪仪的测距读数就是测量点到基点的相对距离变化量,记初始测量点 A_0 到第一基点 P_1 的距离记为 L_1 ,测量过程中测量点 A_i 到第一基点 P_1 的相对距离变化量记为 l_{1i} ;

[0017] 设第一基点 P_1 坐标为 (x, y, z) ,对测量点 $A_i(x_i, y_i, z_i)$,按两点距离公式可以建立如下方程组:

[0018]

$$\begin{cases} \sqrt{(x-x_1)^2 + (y-y_1)^2 + (z-z_1)^2} = L_1 + l_{11} \\ \sqrt{(x-x_2)^2 + (y-y_2)^2 + (z-z_2)^2} = L_1 + l_{12} \\ \dots \\ \sqrt{(x-x_i)^2 + (y-y_i)^2 + (z-z_i)^2} = L_1 + l_{1i} \end{cases} \quad (1)$$

[0019] 将式 (1) 中的第一个方程两边平方,并展开可得:

$$[0020] \quad x_1^2 + y_1^2 + z_1^2 - 2x_1x - 2y_1y - 2z_1z + x^2 + y^2 + z^2 - L_1^2 - 2L_1l_{11} - l_{11}^2 = 0 \quad (2)$$

[0021] 上式为第一基点 $P_1(x, y, z)$ 和 L 的二次非线性方程,令 $C = x^2 + y^2 + z^2 - L^2$,则可将上述方程线性化:

$$[0022] \quad x_1^2 + y_1^2 + z_1^2 - 2x_1x - 2y_1y - 2z_1z + C - 2Ll_{11} - l_{11}^2 = 0 \quad (3)$$

[0023] 根据最小二乘原理,目标函数为

[0024]

$$F(x, y, z, L, C) = \sum_{i=1}^N (x_i^2 + y_i^2 + z_i^2 - 2x_i x - 2y_i y - 2z_i z + C - 2Ll_{1i} - l_{1i}^2)^2 \quad (4)$$

[0025] 由极值原理,欲使 F 为极小,则必有

$$[0026] \quad \frac{\partial F}{\partial x} = 0 \quad \frac{\partial F}{\partial y} = 0 \quad \frac{\partial F}{\partial z} = 0 \quad \frac{\partial F}{\partial L} = 0 \quad \frac{\partial F}{\partial C} = 0 \quad (5)$$

[0027] 同时式 (4) 中各二阶偏导数恒正,即

$$[0028] \quad \frac{\partial^2 F}{\partial x^2} = 8 \sum_{i=1}^N x_i^2 > 0 \quad \frac{\partial^2 F}{\partial y^2} = 8 \sum_{i=1}^N y_i^2 > 0 \quad \frac{\partial^2 F}{\partial z^2} = 8 \sum_{i=1}^N z_i^2 > 0 \quad \frac{\partial^2 F}{\partial L^2} = 8 \sum_{i=1}^N l_{1i}^2 > 0$$

[0029]

$$\frac{\partial^2 F}{\partial C^2} = 1 > 0 \quad (6)$$

[0030] 由此可知,式(5)中各方程求得的极值是极小值,满足最小二乘条件,整理可得如下正规方程组:

[0031]

$$\begin{bmatrix} 2\sum_{i=1}^N x_i^2 & 2\sum_{i=1}^N x_i y_i & 2\sum_{i=1}^N x_i z_i & 2\sum_{i=1}^N x_i l_{1i} & -\sum_{i=1}^N x_i \\ 2\sum_{i=1}^N x_i y_i & 2\sum_{i=1}^N y_i^2 & 2\sum_{i=1}^N y_i z_i & 2\sum_{i=1}^N y_i l_{1i} & -\sum_{i=1}^N y_i \\ 2\sum_{i=1}^N x_i z_i & 2\sum_{i=1}^N y_i z_i & 2\sum_{i=1}^N z_i^2 & 2\sum_{i=1}^N z_i l_{1i} & -\sum_{i=1}^N z_i \\ 2\sum_{i=1}^N z_i l_{1i} & 2\sum_{i=1}^N y_i l_{1i} & 2\sum_{i=1}^N z_i l_{1i} & 2\sum_{i=1}^N l_{1i}^2 & -\sum_{i=1}^N l_{1i} \\ -\sum_{i=1}^N x_i & -\sum_{i=1}^N y_i & -\sum_{i=1}^N z_i & -\sum_{i=1}^N l_{1i} & \frac{N}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \\ L_1 \\ C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sum_{i=1}^N x_i (x_i^2 + y_i^2 + z_i^2 - l_{1i}^2) \\ \sum_{i=1}^N y_i (x_i^2 + y_i^2 + z_i^2 - l_{1i}^2) \\ \sum_{i=1}^N z_i (x_i^2 + y_i^2 + z_i^2 - l_{1i}^2) \\ \sum_{i=1}^N l_{1i} (x_i^2 + y_i^2 + z_i^2 - l_{1i}^2) \\ -\frac{1}{2} \sum_{i=1}^N (x_i^2 + y_i^2 + z_i^2 - l_{1i}^2) \end{bmatrix} \quad (7)$$

[0032] 式(7)中N为总测量点数,当式(7)中的系数行列式不为零时,有唯一确定的解,由此可以解出x、y、z、L₁的值;重复上述过程,即可标定出基点在其它P₂、P₃、P₄、……多个位置处的空间坐标,以及L₂、L₃、L₄、……;

[0033] B、测量点空间坐标标定

[0034] 基于多边法定位原理对测量过程中各测量点的实际坐标A'_i(x'_i, y'_i, z'_i)进行标定,设标定得到的多个基点空间坐标为P₁(x_{p1}, y_{p1}, z_{p1})、P₂(x_{p2}, y_{p2}, z_{p2})、P₃(x_{p3}, y_{p3}, z_{p3})、P₄(x_{p4}, y_{p4}, z_{p4})、……标定得到的初始测量点A₀到多个基点的距离分别为L₁、L₂、L₃、L₄、……;

[0035] 对测量过程中的测量点A'_i(x'_i, y'_i, z'_i),按两点距离公式可以建立如下方程组:

$$[0036] \begin{cases} \sqrt{(x'_i - x_{p1})^2 + (y'_i - y_{p1})^2 + (z'_i - z_{p1})^2} = L_1 + l_{1i} \\ \sqrt{(x'_i - x_{p2})^2 + (y'_i - y_{p2})^2 + (z'_i - z_{p2})^2} = L_2 + l_{2i} \\ \sqrt{(x'_i - x_{p3})^2 + (y'_i - y_{p3})^2 + (z'_i - z_{p3})^2} = L_3 + l_{3i} \\ \sqrt{(x'_i - x_{p4})^2 + (y'_i - y_{p4})^2 + (z'_i - z_{p4})^2} = L_4 + l_{4i} \end{cases}$$

[0037] 采用类似基点P₁的标定步骤来对测量点A'_i(x'_i, y'_i, z'_i)进行标定,结果如下:

[0038]

$$\begin{bmatrix} 2\sum_{j=1}^N x_{pj}^2 & 2\sum_{j=1}^N x_{pj}y_{pj} & 2\sum_{j=1}^N x_{pj}z_{pj} & -\sum_{j=1}^N x_{pj} \\ 2\sum_{j=1}^N x_{pj}y_{pj} & 2\sum_{j=1}^N y_{pj}^2 & 2\sum_{j=1}^N y_{pj}z_{pj} & -\sum_{j=1}^N y_{pj} \\ 2\sum_{j=1}^N x_{pj}z_{pj} & 2\sum_{j=1}^N y_{pj}z_{pj} & 2\sum_{j=1}^N z_{pj}^2 & -\sum_{j=1}^N z_{pj} \\ -\sum_{j=1}^N x_{pj} & -\sum_{j=1}^N y_{pj} & -\sum_{j=1}^N z_{pj} & N/2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x'_i \\ y'_i \\ z'_i \\ C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sum_{j=1}^N x_{pj}(x_{pj}^2 + y_{pj}^2 + z_{pj}^2 - L_j^2 - 2L_j l_{ji} - l_{ji}^2) \\ \sum_{j=1}^N y_{pj}(x_{pj}^2 + y_{pj}^2 + z_{pj}^2 - L_j^2 - 2L_j l_{ji} - l_{ji}^2) \\ \sum_{j=1}^N z_{pj}(x_{pj}^2 + y_{pj}^2 + z_{pj}^2 - L_j^2 - 2L_j l_{ji} - l_{ji}^2) \\ -\frac{1}{2}\sum_{j=1}^N (x_{pj}^2 + y_{pj}^2 + z_{pj}^2 - L_j^2 - 2L_j l_{ji} - l_{ji}^2) \end{bmatrix} \quad (9)$$

[0039] 式(9)中, N为基点总数,将得到的各测量点的实际坐标 $A'_i(x'_i, y'_i, z'_i)$ 与各测量点的理论坐标 $A_i(x_i, y_i, z_i)$ 进行比对,得到机床在各测量点处的运动误差 $A_i(\Delta x_i, \Delta y_i, \Delta z_i)$, $i = 1, 2, \dots, n$;

[0040] C、机床误差分离

[0041] 利用测量得到的各测量点处的运动误差 $A_i(\Delta x_i, \Delta y_i, \Delta z_i)$,采用九线法的误差分离方法,建立各轴同一位置处多个测量点的运动误差方程,采用最小二乘法对方程组求解,获得对应位置处机床的各项几何误差。

[0042] 上述方案中,所述步骤(1)中,激光跟踪仪所在的多个基站位置应不在同一平面,且高度差 $> 100\text{mm}$ 。每个基点位置对机床运动测量包括正向运动测量和反向运动测量,测量次数 ≥ 2 次。

[0043] 本发明的有益效果是:提供一种基于激光多路分时测量的数控机床几何精度检测方法,由于测量过程中只涉及到位移量,因此该方法具有较高的测量精度。该原理与多站测量原理相比,系统硬件的成本大为降低,同时通过一次测量便可以分离出机床的各项误差,检测效率较高,满足了快速、高精度的检测要求,适合中高档数控机床的几何精度检测。

附图说明

[0044] 下面结合附图及具体实施方式对本发明作进一步详细说明。

[0045] 图1为四路分时测量数控机床精度的原理图。测量时,控制机床在3D空间进给,激光跟踪仪先在基点P1处对机床运动进行测量,当机床走完预先设定的路径之后,将激光跟踪仪移到基点P2处,再次对机床相同的运动进行测量,以此类推,直至激光跟踪仪在四个基点位置都完成了对机床相同运动轨迹的测量。

[0046] 图2为四路分时测量数控机床精度的数学模型,其中P1、P2、P3、P4为基点的四个位置,机床运动区域按正方体给出,其中A0为初始测量点,同时在正方体的每条边上分布着多个测量点,测量点的数目可以根据测量的精度和实际情况进行设置。

具体实施方式

[0047] 如图1、图2所示:一种基于激光多路分时测量的数控机床几何精度检测方法,其特征在于,包括下述步骤:

[0048] (1) 多路分时测量步骤

[0049] 测量时,控制机床在三维空间进给,并在其正方体运动区域的每条边上设置4个测量点,一台激光跟踪仪先后在至少三个基点位置,对机床相同的运动轨迹进行测量,当机

床运动到各测量点位置时,机床停止运动,记下该测量点位置处激光跟踪仪的测距读数,当所有测量点测量完成后,得到不同测量点处的激光跟踪仪的测距读数;然后将激光跟踪仪移动到其它基点位置,重复上述测量过程,直至在所有基点位置都完成了对机床运动的测量;激光跟踪仪所在的多个基点位置应不在同一平面,且高度差 $> 100\text{mm}$ 。每个基点位置对机床运动测量包括正向运动测量和反向运动测量,测量次数 ≥ 2 次。多次测量可以提高测量不确定的评价精度同时可以减小分时测量引起的测量误差。

[0050] (2) 测量所得数据处理步骤

[0051] 包括以下子步骤:

[0052] 采用多路分时方法测量时,如何通过测量得到的大量数据准确分离出机床各项误差是算法中的核心问题,应先标定出激光跟踪仪不同位置测量时其上基点的位置,然后再对空间测量点坐标进行标定,最后进行误差分离。下面以四站分时测量为例,对上述过程进行阐述。

[0053] 1) 基点空间位置自标定

[0054] 采取每个基点位置坐标单独标定的原则,设 A_0 为机床初始测量点,机床沿着事先设定好的路径运动,各测量点的理论坐标 $A_i(x_i, y_i, z_i)$, $i = 1, 2, \dots, n$,激光跟踪仪跟踪机床并实时测量测量点到基点的距离变化量,由于激光跟踪仪测距是基于激光干涉原理,且测量点到基点距离的相对变化量与激光跟踪仪的测距零位设置无关,因此,假定瞄准初始测量点 A_0 时,激光跟踪仪的测距读数置为0,则在机床的移动过程中,激光跟踪仪的测距读数就是测量点到基点的相对距离变化量,记初始测量点 A_0 到第一基点 P_1 的距离记为 L_1 ,测量过程中测量点 A_i 到第一基点 P_1 的相对距离变化量记为 l_{1i} ;

[0055] 设基点 P_1 坐标为 (x, y, z) ,对测量点 $A_i(x_i, y_i, z_i)$,按两点距离公式可以建立如下方程组:

[0056]

$$\begin{cases} \sqrt{(x-x_1)^2+(y-y_1)^2+(z-z_1)^2}=L_1+l_{11} \\ \sqrt{(x-x_2)^2+(y-y_2)^2+(z-z_2)^2}=L_1+l_{12} \\ \dots \\ \sqrt{(x-x_i)^2+(y-y_i)^2+(z-z_i)^2}=L_1+l_{1i} \end{cases} \quad (10)$$

[0057] 基点标定时实际所取测量点数往往多于4个,这时自标定方程组将是超定方程组,可用最小二乘法求解。为了避免迭代初值的选定,采用解析的方法对上述最小二乘问题进行求解。

[0058] 将式(10)中的第一个方程两边平方,并展开可得:

$$[0059] \quad x_1^2+y_1^2+z_1^2-2x_1x-2y_1y-2z_1z+x^2+y^2+z^2-L^2-2Ll_{11}-l_{11}^2=0 \quad (11)$$

[0060] 上式为第一基点 $P_1(x, y, z)$ 和 L 的二次非线性方程,令 $C = x^2+y^2+z^2-L^2$,则可将上述方程线性化:

$$[0061] \quad x_1^2+y_1^2+z_1^2-2x_1x-2y_1y-2z_1z+C-2Ll_{11}-l_{11}^2=0 \quad (12)$$

[0062] 根据最小二乘原理,目标函数为

[0063]

$$F(x, y, z, L, C) = \sum_{i=1}^N (x_i^2 + y_i^2 + z_i^2 - 2x_i x - 2y_i y - 2z_i z + C - 2Ll_i - l_i^2)^2 \quad (13)$$

[0064] 由极值原理, 欲使 F 为极小, 则必有

$$\frac{\partial F}{\partial x} = 0 \quad \frac{\partial F}{\partial y} = 0 \quad \frac{\partial F}{\partial z} = 0 \quad \frac{\partial F}{\partial L} = 0 \quad \frac{\partial F}{\partial C} = 0 \quad (14)$$

[0066] 同时式 (13) 中各二阶偏导数恒正, 即

$$\frac{\partial^2 F}{\partial x^2} = 8 \sum_{i=1}^N x_i^2 > 0 \quad \frac{\partial^2 F}{\partial y^2} = 8 \sum_{i=1}^N y_i^2 > 0 \quad \frac{\partial^2 F}{\partial z^2} = 8 \sum_{i=1}^N z_i^2 > 0 \quad \frac{\partial^2 F}{\partial L^2} = 8 \sum_{i=1}^N l_i^2 > 0$$

[0068]

$$\frac{\partial^2 F}{\partial C^2} = 1 > 0 \quad (15)$$

[0069] 由此可知, 式 (14) 中各方程求得的极值是极小值, 满足最小二乘条件, 整理可得如下正规方程组

[0070]

$$\begin{bmatrix} 2 \sum_{i=1}^N x_i^2 & 2 \sum_{i=1}^N x_i y_i & 2 \sum_{i=1}^N x_i z_i & 2 \sum_{i=1}^N x_i l_i & -\sum_{i=1}^N x_i \\ 2 \sum_{i=1}^N x_i y_i & 2 \sum_{i=1}^N y_i^2 & 2 \sum_{i=1}^N y_i z_i & 2 \sum_{i=1}^N y_i l_i & -\sum_{i=1}^N y_i \\ 2 \sum_{i=1}^N x_i z_i & 2 \sum_{i=1}^N y_i z_i & 2 \sum_{i=1}^N z_i^2 & 2 \sum_{i=1}^N z_i l_i & -\sum_{i=1}^N z_i \\ 2 \sum_{i=1}^N x_i l_i & 2 \sum_{i=1}^N y_i l_i & 2 \sum_{i=1}^N z_i l_i & 2 \sum_{i=1}^N l_i^2 & -\sum_{i=1}^N l_i \\ -\sum_{i=1}^N x_i & -\sum_{i=1}^N y_i & -\sum_{i=1}^N z_i & -\sum_{i=1}^N l_i & \frac{N}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \\ L_1 \\ C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sum_{i=1}^N x_i (x_i^2 + y_i^2 + z_i^2 - l_i^2) \\ \sum_{i=1}^N y_i (x_i^2 + y_i^2 + z_i^2 - l_i^2) \\ \sum_{i=1}^N z_i (x_i^2 + y_i^2 + z_i^2 - l_i^2) \\ \sum_{i=1}^N l_i (x_i^2 + y_i^2 + z_i^2 - l_i^2) \\ -\frac{1}{2} \sum_{i=1}^N (x_i^2 + y_i^2 + z_i^2 - l_i^2) \end{bmatrix} \quad (16)$$

[0071] 式 (16) 中 N 为总测量点数, 当式 (16) 中的系数行列式不为零时, 有唯一确定的解, 由此可以解出 x、y、z、L₁ 的值; 重复上述过程, 即可标定出基点在其它 P₂、P₃、P₄ 位置处的空间坐标, 以及 L₂、L₃、L₄;

[0072] 2) 测量点空间坐标标定

[0073] 当对激光跟踪仪的四个基点位置标定完后, 基于多边法定位原理便可对测量过程中各测量点的实际坐标 A'_i(x'_i, y'_i, z'_i) (i = 1, 2, ..., n) 进行标定。设标定得到的四个基点空间坐标为 P₁(x_{p1}, y_{p1}, z_{p1})、P₂(x_{p2}, y_{p2}, z_{p2})、P₃(x_{p3}, y_{p3}, z_{p3})、P₄(x_{p4}, y_{p4}, z_{p4}), 标定得到的初始测量点 A₀ 到四个基点的距离分别为 L₁、L₂、L₃、L₄。

[0074] 对测量过程中的测量点 A'_i(x'_i, y'_i, z'_i), 按两点距离公式可以建立如下方程组:

$$\begin{cases} \sqrt{(x'_i - x_{p1})^2 + (y'_i - y_{p1})^2 + (z'_i - z_{p1})^2} = L_1 + l_i \\ \sqrt{(x'_i - x_{p2})^2 + (y'_i - y_{p2})^2 + (z'_i - z_{p2})^2} = L_2 + l_{2i} \\ \sqrt{(x'_i - x_{p3})^2 + (y'_i - y_{p3})^2 + (z'_i - z_{p3})^2} = L_3 + l_{3i} \\ \sqrt{(x'_i - x_{p4})^2 + (y'_i - y_{p4})^2 + (z'_i - z_{p4})^2} = L_4 + l_{4i} \end{cases} \quad (17)$$

[0076] 采用类似基点 P_1 的标定步骤来对测量点 $A'_i(x'_i, y'_i, z'_i)$ 进行标定, 结果如下:

[0077]

$$\begin{bmatrix} 2\sum_{j=1}^4 x_{pj}^2 & 2\sum_{j=1}^4 x_{pj}y_{pj} & 2\sum_{j=1}^4 x_{pj}z_{pj} & -\sum_{j=1}^4 x_{pj} \\ 2\sum_{j=1}^4 x_{pj}y_{pj} & 2\sum_{j=1}^4 y_{pj}^2 & 2\sum_{j=1}^4 y_{pj}z_{pj} & -\sum_{j=1}^4 y_{pj} \\ 2\sum_{j=1}^4 x_{pj}z_{pj} & 2\sum_{j=1}^4 y_{pj}z_{pj} & 2\sum_{j=1}^4 z_{pj}^2 & -\sum_{j=1}^4 z_{pj} \\ -\sum_{j=1}^4 x_{pj} & -\sum_{j=1}^4 y_{pj} & -\sum_{j=1}^4 z_{pj} & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x'_i \\ y'_i \\ z'_i \\ C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sum_{j=1}^4 x_{pj}(x_{pj}^2 + y_{pj}^2 + z_{pj}^2 - L_j^2 - 2L_j l_{ji} - l_{ji}^2) \\ \sum_{j=1}^4 y_{pj}(x_{pj}^2 + y_{pj}^2 + z_{pj}^2 - L_j^2 - 2L_j l_{ji} - l_{ji}^2) \\ \sum_{j=1}^4 z_{pj}(x_{pj}^2 + y_{pj}^2 + z_{pj}^2 - L_j^2 - 2L_j l_{ji} - l_{ji}^2) \\ -\frac{1}{2}\sum_{j=1}^4 (x_{pj}^2 + y_{pj}^2 + z_{pj}^2 - L_j^2 - 2L_j l_{ji} - l_{ji}^2) \end{bmatrix}$$

[0078] 将得到的各测量点的实际坐标 $A'_i(x'_i, y'_i, z'_i)$ 与各测量点的理论坐标 $A_i(x_i, y_i, z_i)$ 进行比对, 得到机床在各测量点处的运动误差 $A_i(\Delta x_i, \Delta y_i, \Delta z_i)$, $i = 1, 2, \dots, n$;

[0079] 3) 机床误差分离

[0080] 利用测量得到的各测量点处的运动误差, 采用九线法的误差分离方法, 建立各轴同一位置处四个测量点的运动误差方程, 采用最小二乘法对该方程组求解, 获得对应位置处的各项几何误差。

[0081] 以下给出应用多路测量方法检测一台数控铣床精度的实例。

[0082] 测量时, 控制铣床在 3D 空间进给, 运动区域设定为 $500\text{mm} \times 600\text{mm} \times 400\text{mm}$, 猫眼安装在刀具附近, 测量过程中, 激光跟踪仪实时跟踪猫眼的运动, 从而对铣床运动轨迹进行测量。铣床沿 X、Y、Z 方向运动时, 每运动 100mm 设置一个测量点, 当铣床运动到各测量点处时, 铣床停下 6 秒, 记下当前位置激光跟踪仪的测距读数。在每个基点位置测量时, 对铣床运动进行两次测量, 每次测量时, 包括对铣床正向运动和反向运动测量各一次。当铣床从起始点位置运动到终点位置时, 正向测量结束, 正测时 73 个测量点。然后铣床反向运动, 当铣床从终点位置运动到起始点位置时, 反向测量结束, 反测时 72 个测量点。当完成正向测量和反向测量时, 第一次测量结束, 共 145 个测量点。然后重复上述过程, 对铣床运动进行第二次测量。当完成上述两次测量时, 第一个基点位置的测量结束, 然后将激光跟踪仪移动到其它基点位置, 重复上述测量过程, 直至在所有基点位置都完成了对铣床运动的测量。

[0083] 根据各测量点的理论坐标 $A_i(x_i, y_i, z_i)$ ($i = 1, 2, \dots, n$) 和四个基点位置激光跟踪仪的测距读数 Δl_{1i} 、 Δl_{2i} 、 Δl_{3i} 、 Δl_{4i} ($i = 1, 2, \dots, n$), 利用前面的基点空间位置自标定算法和测量点空间坐标标定算法, 就可标定出铣床运动过程中各测量点的实际坐标 $A'_i(x'_i, y'_i, z'_i)$ ($i = 1, 2, \dots, n$), 同时可以分离出铣床的各项误差

[0084] 表 1 给出了采用四路分时测量时, 标定得到的部分测量点坐标, 表 2 给出了 X 轴不同位置处辨识出的铣床各项几何误差, 其中表 (1) 中数据单位均为 mm, 表 (2) 中各物理量的含义和单位如下: $\delta_x(x)$ 为定位误差, 单位 mm; $\delta_y(x)$ 、 $\delta_z(x)$ 为直线度误差, 单位 mm; $\epsilon_x(x)$ 为滚转误差, 单位为 rad; $\epsilon_y(x)$ 为俯仰误差, 单位为 rad; $\epsilon_z(x)$ 为偏摆误差, 单位为 rad。

[0085] 表 1 四路分时测量部分测量点标定结果

[0086]

测量点	x	y	z
A ₁	-100.01346	0.00825	-0.00779
A ₂	-200.02169	0.00943	-0.01155
A ₃	-300.02641	0.00861	-0.00401
A ₄	-500.01859	-99.99307	-0.00662

[0087] 表 2X 轴不同位置处辨识出的各项几何误差

[0088]

误差	$\delta_x(x)$	$\delta_y(x)$	$\delta_z(x)$	$\varepsilon_x(x)$	$\varepsilon_y(x)$	$\varepsilon_z(x)$
x = 100	0.02725	-0.01053	-0.01438	-0.000019	0.000018	-0.000105
x = 200	0.02574	-0.00627	-0.02244	-0.000015	0.000032	-0.000098
x = 300	0.02352	-0.00741	-0.01788	-0.0000049	0.000019	-0.000089
x = 400	0.01739	-0.01233	-0.02096	0.0000020	0.000015	-0.000096
x = 500	0.01095	-0.01416	-0.02205	0.000011	0.000028	-0.000109

[0089] 本次测量过程中,铣床运动测量一次(包括正向运动和反向运动)大概要 25 分钟,每个基站位置对刀具运动要测量两次,大概要 50 分钟左右,四个基点位置完成对铣床运动的测量大概要 200 分钟,然后通过计算便可以分离出铣床的各项误差,检测效率大大提高,并且检测精度较高,满足了中高档数控机床的快速、高精度检测要求。

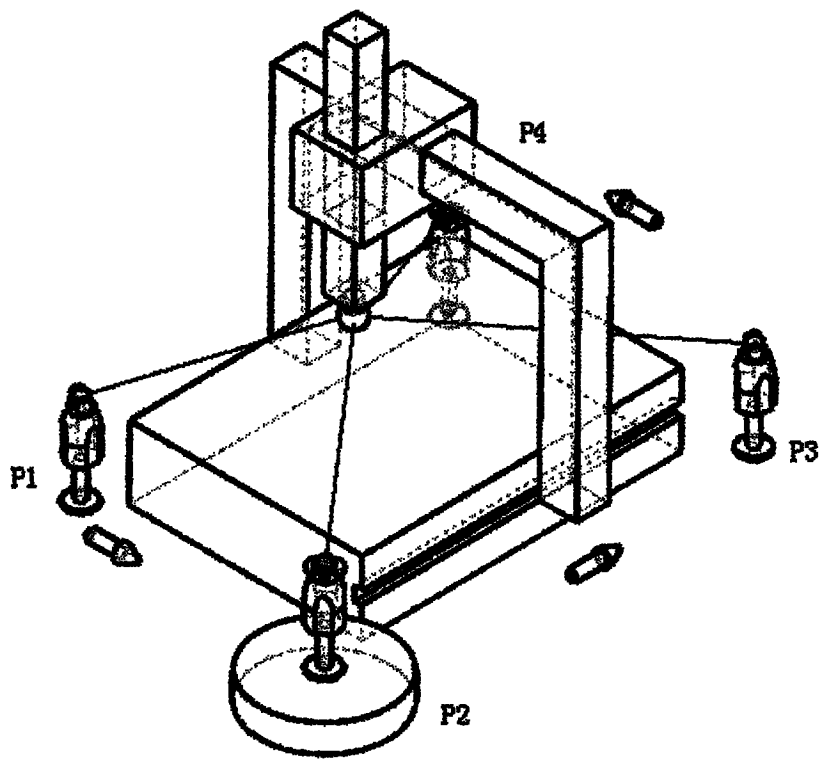


图 1

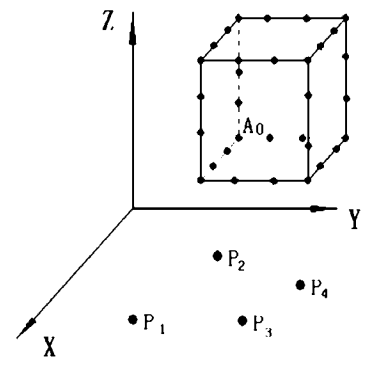


图 2