



(12)发明专利申请

(10)申请公布号 CN 109732402 A
(43)申请公布日 2019.05.10

(21)申请号 201910193297.0

(22)申请日 2019.03.14

(71)申请人 西安交通大学

地址 710049 陕西省西安市碑林区咸宁西路28号

(72)发明人 陶涛 殷成明 陈海博 梅雪松
姜歌东 许睦旬

(74)专利代理机构 西安智大知识产权代理事务所 61215

代理人 贺建斌

(51)Int.Cl.

B23Q 17/00(2006.01)

B23Q 17/24(2006.01)

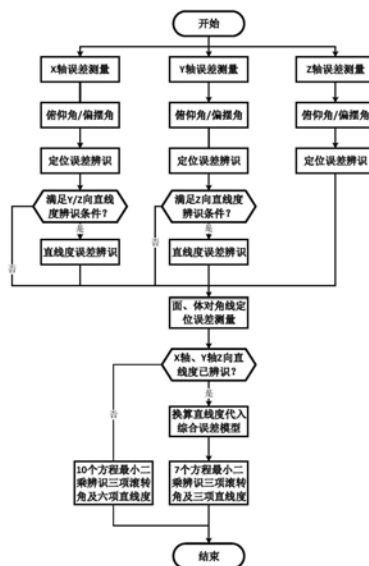
权利要求书3页 说明书7页 附图3页

(54)发明名称

基于激光干涉仪的多线机床空间几何误差测量辨识方法

(57)摘要

基于激光干涉仪的多线机床空间几何误差测量辨识方法,首先在机床行程空间内规划测量空间以及测量路径;其次测量X轴的定位误差、两项非滚转角度误差以及两项直线度误差;再测量Y轴的定位误差、两项非滚转角度误差以及Z向直线度误差;在测量Z轴的定位误差以及两项非滚转角度误差;最后在测量条件满足的情况下辨识直线度误差,再对面对角线以及体对角线进行定位误差的测量,结合空间综合误差模型辨识得到滚转角及三项包含垂直度误差的直线度误差,若之前没有辨识直线度误差,则利用结合直线度误差公式辨识得到三项滚转角及六项直线度误差;本发明能够满足空间几何误差的辨识需求,同时具有高测量效率,高测量精度的优点。



1. 一种基于激光干涉仪的多线机床空间几何误差测量辨识方法,其特征在于,包括以下步骤:

1) 在机床行程空间内规划测量空间,分别在测量空间内设计规划测量路径;

针对X轴,在测量空间内对定位误差、两项非滚转角度误差以及两项互相垂直的直线度误差进行测量,其测量线的位置均平行于X轴,定位误差 $\delta_x(x)$ 测量起点为 $A_1(x_1, y_1, z_1)$ 、绕Y轴转角误差 $\varepsilon_y(x)$ 测量起点 $A_2(x_2, y_2, z_2)$ 、绕Z轴转角误差 $\varepsilon_z(x)$ 测量起点 $A_3(x_3, y_3, z_3)$ 、Y向直线度误差 $\delta_y(x)$ 测量起点 $A_4(x_4, y_4, z_4)$ 、Z向直线度误差 $\delta_z(x)$ 测量起点 $A_5(x_5, y_5, z_5)$,其中定位误差与其中一项角度误差测量时采用角度干涉镜与线性反射镜复合方式测量,即 A_1 与 A_2 或 A_3 测量线重叠,其他测量线根据测量情况重叠或分离;

针对Y轴,在测量空间内对定位误差、两项非滚转角度误差以及Z向直线度误差进行测量,其测量线的位置均平行于Y轴,定位误差 $\delta_y(y)$ 测量起点为 $A_6(x_6, y_6, z_6)$ 、绕X轴转角误差 $\varepsilon_x(y)$ 测量起点 $A_7(x_7, y_7, z_7)$ 、绕Z轴转角误差 $\varepsilon_z(y)$ 测量起点 $A_8(x_8, y_8, z_8)$ 、Z向直线度误差 $\delta_z(y)$ 测量起点 $A_9(x_9, y_9, z_9)$,其中定位误差与其中一项角度误差测量时采用角度干涉镜与线性反射镜复合方式测量,即 A_6 与 A_7 或 A_8 测量线重叠,其他测量线根据测量情况重叠或分离;

针对Z轴,在测量空间内对定位误差、两项非滚转角度误差以及两项互相垂直的直线度误差进行测量,其测量线的位置均平行于Z轴,定位误差 $\delta_z(z)$ 测量起点为 $A_{10}(x_{10}, y_{10}, z_{10})$ 、绕X轴转角误差 $\varepsilon_x(z)$ 测量起点 $A_{11}(x_{11}, y_{11}, z_{11})$ 、绕Y轴转角误差 $\varepsilon_y(z)$ 测量起点 $A_{12}(x_{12}, y_{12}, z_{12})$,其中定位误差与其中一项角度误差测量时采用角度干涉镜与线性反射镜复合方式测量,即 A_{10} 与 A_{11} 或 A_{12} 测量线重叠,其他测量线根据测量情况重叠或分离;

针对面对角线,在测量空间内对XZ平面、XY平面以及YZ平面的三个面对角线的定位误差进行测量,其测量线的位置均平行于各个面对角线,XZ平面的对角线定位误差 $\Delta L_{13}(x, z)$ 测量起点为 $A_{13}(x_{13}, y_{13}, z_{13})$ 、XY平面的对角线定位误差 $\Delta L_{14}(x, y)$ 测量起点为 $A_{14}(x_{14}, y_{14}, z_{14})$ 、YZ平面的对角线定位误差 $\Delta L_{15}(y, z)$ 测量起点为 $A_{15}(x_{15}, y_{15}, z_{15})$;

最后,规划四条体对角线测量路径,在测量空间内对XYZ对角线、-X-YZ对角线、-XYZ对角线以及X-YZ对角线的四条体对角线的定位误差进行测量,其测量线均平行于各自的体对角线,XYZ对角线的定位误差 $\Delta L_{16}(x, y, z)$ 测量起点为 $A_{16}(x_{16}, y_{16}, z_{16})$ 、-X-YZ对角线的定位误差 $\Delta L_{17}(x, y, z)$ 测量起点为 $A_{17}(x_{17}, y_{17}, z_{17})$ 、-XYZ对角线的定位误差 $\Delta L_{18}(x, y, z)$ 测量起点为 $A_{18}(x_{18}, y_{18}, z_{18})$ 、X-YZ对角线的定位误差 $\Delta L_{19}(x, y, z)$ 测量起点为 $A_{19}(x_{19}, y_{19}, z_{19})$ 的同一条测量线进行两次对角线定位误差的测量;

2) 对X轴的误差进行辨识:

安装激光干涉仪,按照测量路径对X轴各项几何误差进行测量,其中角度误差无论在一条测量线上,其测量值即为X轴的角度误差值;

定位误差值根据测量得到的定位误差值、两项非滚转角度误差以及测量线起始点的坐标辨识得到:

$$\delta_x(x) = \Delta x_1(x) + \varepsilon_z(x) y_1 - \varepsilon_y(x) z_1$$

测量直线度时,若 z_4 、 y_5 均为0,对于移动直线度干涉镜,利用测量的直线度误差值、两项非滚转角度误差以及测量线起始点的坐标辨识得到:

$$\begin{cases} \delta_y(x) = \Delta y_4(x) - \varepsilon_z(x)x_4 \\ \delta_z(x) = \Delta z_5(x) + \varepsilon_y(x)x_5 \end{cases}$$

对于移动直线度反射镜,利用测量的直线度误差值、两项非滚转角度误差以及测量线起始点的坐标辨识得到:

$$\begin{cases} \delta_y(x) = \Delta y_4(x) - \varepsilon_z(x)(x_4 - x - L) \\ \delta_z(x) = \Delta z_5(x) + \varepsilon_y(x)(x_5 - x - L) \end{cases}$$

其中, x 为移动距离, L 为测量起点处干涉镜与反射镜之间的初始位置;

若 z_4 、 y_5 不为0,则在步骤5)进行直线度误差的辨识;

3)对Y轴按照规划的测量路径进行与X轴类似的测量和辨识,得到Y轴的定位误差、两项非滚转角度误差,在 z_9 为0时,能够同时辨识得到Y轴的Z向直线度误差,否则,则在步骤5)进行直线度误差辨识,Y轴的X向直线度误差,包含垂直度误差 S_{xy} ,在步骤5)进行辨识;

4)对Z轴按照规划的测量路径进行与X轴类似的测量和辨识,得到Z轴的定位误差、两项非滚转角度误差,Z轴的X向直线度误差以及Y向直线度误差,包含垂直度误差 S_{xz} 以及 S_{yz} ,在步骤5)进行辨识;

5)对于XYTZ型三轴机床,基于多体系统的建模理论,按照体间运动关系得到误差齐次坐标变换矩阵,最终得到机床的空间综合误差模型:

$$\begin{cases} \Delta x = \delta_x(x) + \delta_x(y) - \delta_x(z) + y(\varepsilon_x(x) + \varepsilon_x(y)) + z(\varepsilon_y(x) + \varepsilon_y(y)) - y_t(\varepsilon_z(x) + \varepsilon_z(y) - \varepsilon_z(z)) + z_t(\varepsilon_y(x) + \varepsilon_y(y) - \varepsilon_y(z)) \\ \Delta y = \delta_y(x) + \delta_y(y) - \delta_y(z) - x\varepsilon_z(x) - z(\varepsilon_x(x) + \varepsilon_x(y)) + x_t(\varepsilon_z(x) + \varepsilon_z(y) - \varepsilon_z(z)) - z_t(\varepsilon_x(x) + \varepsilon_x(y) - \varepsilon_x(z)) \\ \Delta z = -\delta_z(x) - \delta_z(y) + \delta_z(z) - x\varepsilon_y(x) + y\varepsilon_x(x) - x_t(\varepsilon_y(x) + \varepsilon_y(y) - \varepsilon_y(z)) + y_t(\varepsilon_x(x) + \varepsilon_x(y) - \varepsilon_x(z)) \end{cases}$$

其中 x_t 、 y_t 、 z_t 对角线测量基准点A在机床工件坐标系下与 x 、 y 、 z 轴的距离,工件坐标系原点0为误差原点;

对于XZ平面,Y轴无运动,其误差公式简化为:

$$\begin{cases} \Delta x_{13} = \delta_x(x) - \delta_x(z) + z\varepsilon_y(x) - y_{t13}(\varepsilon_z(x) - \varepsilon_z(z)) + z_{t13}(\varepsilon_y(x) - \varepsilon_y(z)) \\ \Delta z_{13} = -\delta_z(x) + \delta_z(z) - x\varepsilon_y(x) - x_{t13}(\varepsilon_y(x) - \varepsilon_y(z)) + y_{t13}(\varepsilon_x(x) - \varepsilon_x(z)) \end{cases}$$

则根据误差公式知:

$$\Delta L_{13} = \Delta x_{13} \cdot \frac{L_x}{L_{xz}} + \Delta z_{13} \cdot \frac{L_z}{L_{xz}}$$

同理,对于XY平面,Z轴无运动,其误差公式简化为:

$$\begin{cases} \Delta x = \delta_x(x) + \delta_x(y) + y(\varepsilon_z(x) + \varepsilon_z(y)) - y_{t14}(\varepsilon_z(x) + \varepsilon_z(y)) + z_{t14}(\varepsilon_y(x) + \varepsilon_y(y)) \\ \Delta y = \delta_y(x) + \delta_y(y) - x\varepsilon_z(x) + x_{t14}(\varepsilon_z(x) + \varepsilon_z(y)) - z_{t14}(\varepsilon_x(x) + \varepsilon_x(y)) \end{cases}$$

则根据误差公式可知:

$$\Delta L_{14} = \Delta x_{14} \cdot \frac{L_x}{L_{xy}} + \Delta y_{14} \cdot \frac{L_y}{L_{xy}}$$

同理,对于YZ平面,X轴无运动,其误差公式简化为:

$$\begin{cases} \Delta y = \delta_y(y) - \delta_y(z) - z\varepsilon_x(y) + x_{t15}(\varepsilon_z(y) - \varepsilon_z(z)) - z_{t15}(\varepsilon_x(y) - \varepsilon_x(z)) \\ \Delta z = -\delta_z(y) + \delta_z(z) - x_{t15}(\varepsilon_y(y) - \varepsilon_y(z)) + y_{t15}(\varepsilon_x(y) - \varepsilon_x(z)) \end{cases}$$

则根据误差公式可知:

$$\Delta L_{15} = \Delta y_{15} \cdot \frac{L_y}{L_{yz}} + \Delta z_{15} \cdot \frac{L_z}{L_{yz}}$$

根据对角线的定位误差

$\Delta L_{16}(x, y, z)$ 、 $\Delta L_{17}(x, y, z)$ 、 $\Delta L_{18}(x, y, z)$ 以及 $\Delta L_{19}(x, y, z)$, 若对角线与X轴、Y轴以及Z轴的夹角分别为 α 、 β 、 γ , 并将各测量位置带入误差模型则有:

$$\begin{cases} \Delta L_{16} = \Delta x_{16} \cdot \cos \alpha + \Delta y_{16} \cdot \cos \beta + \Delta z_{16} \cdot \cos \gamma \\ \Delta L_{17} = -\Delta x_{17} \cdot \cos \alpha - \Delta y_{17} \cdot \cos \beta + \Delta z_{17} \cdot \cos \gamma \\ \Delta L_{18} = -\Delta x_{18} \cdot \cos \alpha + \Delta y_{18} \cdot \cos \beta + \Delta z_{18} \cdot \cos \gamma \\ \Delta L_{19} = \Delta x_{19} \cdot \cos \alpha - \Delta y_{19} \cdot \cos \beta + \Delta z_{19} \cdot \cos \gamma \end{cases}$$

根据7个方程, 利用最小二乘法辨识得到三项滚转角度误差 $\varepsilon_x(x)$ 、 $\varepsilon_y(y)$ 、 $\varepsilon_z(z)$ 以及包含三项垂直度误差 S_{xz} 、 S_{yz} 、 S_{xy} 的直线度误差 $\delta_x(z)$ 、 $\delta_y(z)$ 、 $\delta_x(y)$;

若 $\delta_y(x)$ 、 $\delta_z(x)$ 以及 $\delta_z(y)$ 在本步骤之前未辨识得到, 则有:

$$\begin{cases} \Delta y_4(x) = \delta_y(x) - \varepsilon_x(x)z_4 + \varepsilon_z(x)x_4 \\ \Delta z_5(x) = \delta_z(x) - \varepsilon_y(x)x_5 + \varepsilon_x(x)y_5 \\ \Delta z_9(y) = \delta_z(y) - \varepsilon_y(y)x_9 + \varepsilon_x(y)y_9 \end{cases}$$

结合面对角线以及体对角线共10个方程, 利用最小二乘法便得到所有的直线度误差以及滚转角误差, 至此, 机床几何误差均已辨识完成。

2. 根据权利要求1所述的一种基于激光干涉仪的多线机床空间几何误差测量辨识方法, 其特征在于: 对于其他类型的机床, 根据求得的空间综合误差模型, 采用相同方法也能够辨识得到各直线度误差以及滚转角度误差。

基于激光干涉仪的多线机床空间几何误差测量辨识方法

技术领域

[0001] 本发明属于数控机床加工精度技术领域,具体涉及一种基于激光干涉仪的多线机床空间几何误差测量辨识方法。

背景技术

[0002] 机床存在的几何误差及加工过程中的热误差等误差因素严重影响机床的加工精度,其中几何误差和热误差占全部误差的40%~70%,因此,解决几何误差是提高数控机床精度的关键技术,具有重要意义。几何误差主要由数控机床零部件本身的形位精度及装配过程中产生的装配误差等引起,并且随着机床的运动反映到运动部件上,进而影响机床的加工精度。几何误差属于机床本身固有的误差,包括定位误差、直线度误差、角度误差、垂直度误差等。

[0003] 目前降低误差的方法主要有误差预防法和误差补偿法,误差预防法由于周期长、成本高等问题应用较少,误差补偿法是通过软件反向叠加补偿值的方法,可以快速有效地消除误差影响。针对空间几何误差,其补偿技术主要受限于误差辨识,目前主要采用的方法为单项误差测量和空间几何误差辨识;单项误差测量的效率低、所需仪器多、测量难度大,难以解决生产问题;空间几何误差辨识法通过测量所需信息,利用空间误差模型辨识得到各项几何误差值,进而实现空间几何误差的补偿。

[0004] 国内外学者针对激光干涉仪的几何误差综合测量辨识方法做了大量的研究工作,目前常用九线法、十线法、十二线法等,这些方法需要利用干涉仪测量空间内多条特定直线的误差,其缺点主要有:测量效率上存在一些不足,增加了测量误差产生的可能性;同时测量位置限制较多,增大了现场测量难度;忽略了激光干涉仪对直线度误差的具体测量过程,测量结果无法统一,且使滚转角以及垂直度误差的辨识缺少可信度;在测量过程中需要注意测量位置的选择,否则会造成系数矩阵奇异的问题。

发明内容

[0005] 为了克服上述现有技术的缺点,本发明的目的在于提供一种基于激光干涉仪的多线机床空间几何误差测量辨识方法,能够满足空间几何误差的辨识需求,具有高测量效率,高测量精度的优点。

[0006] 为了实现上述目的,本发明采用如下的技术方案:

[0007] 一种基于激光干涉仪的多线机床空间几何误差测量辨识方法,包括以下步骤:

[0008] 1) 在机床行程空间内规划测量空间,分别在测量空间内设计规划测量路径;

[0009] 针对X轴,在测量空间内对定位误差、两项非滚转角度误差以及两项互相垂直的直线度误差进行测量,其测量线的位置均平行于X轴,定位误差 $\delta_x(x)$ 测量起点为 $A_1(x_1, y_1, z_1)$ 、绕Y轴转角误差 $\varepsilon_y(x)$ 测量起点 $A_2(x_2, y_2, z_2)$ 、绕Z轴转角误差 $\varepsilon_z(x)$ 测量起点 $A_3(x_3, y_3, z_3)$ 、Y向直线度误差 $\delta_y(x)$ 测量起点 $A_4(x_4, y_4, z_4)$ 、Z向直线度误差 $\delta_z(x)$ 测量起点 $A_5(x_5, y_5, z_5)$,其中定位误差与其中一项角度误差测量时采用角度干涉镜与线性反射镜复合方式测量,即 A_1

与A₂或A₃测量线重叠,其他测量线根据测量情况重叠或分离;

[0010] 针对Y轴,在测量空间内对定位误差、两项非滚转角度误差以及Z向直线度误差进行测量,其测量线的位置均平行于Y轴,定位误差 $\delta_y(y)$ 测量起点为A₆(x₆,y₆,z₆)、绕X轴转角误差 $\varepsilon_x(y)$ 测量起点A₇(x₇,y₇,z₇)、绕Z轴转角误差 $\varepsilon_z(y)$ 测量起点A₈(x₈,y₈,z₈)、Z向直线度误差 $\delta_z(y)$ 测量起点A₉(x₉,y₉,z₉),其中定位误差与其中一项角度误差测量时采用角度干涉镜与线性反射镜复合方式测量,即A₆与A₇或A₈测量线重叠,其他测量线根据测量情况重叠或分离;

[0011] 针对Z轴,在测量空间内对定位误差、两项非滚转角度误差以及两项互相垂直的直线度误差进行测量,其测量线的位置均平行于Z轴,定位误差 $\delta_z(z)$ 测量起点为A₁₀(x₁₀,y₁₀,z₁₀)、绕X轴转角误差 $\varepsilon_x(z)$ 测量起点A₁₁(x₁₁,y₁₁,z₁₁)、绕Y轴转角误差 $\varepsilon_y(z)$ 测量起点A₁₂(x₁₂,y₁₂,z₁₂),其中定位误差与其中一项角度误差测量时采用角度干涉镜与线性反射镜复合方式测量,即A₁₀与A₁₁或A₁₂测量线重叠,其他测量线根据测量情况重叠或分离;

[0012] 针对面对角线,在测量空间内对XZ平面、XY平面以及YZ平面的三个面对角线的定位误差进行测量,其测量线的位置均平行于各个面对角线,XZ平面的对角线定位误差 $\Delta L_{13}(x,z)$ 测量起点为A₁₃(x₁₃,y₁₃,z₁₃)、XY平面的对角线定位误差 $\Delta L_{14}(x,y)$ 测量起点为A₁₄(x₁₄,y₁₄,z₁₄)、YZ平面的对角线定位误差 $\Delta L_{15}(y,z)$ 测量起点为A₁₅(x₁₅,y₁₅,z₁₅);

[0013] 最后,规划四条体对角线测量路径,在测量空间内对XYZ对角线、-X-YZ对角线、-XYZ对角线以及X-YZ对角线的四条体对角线的定位误差进行测量,其测量线均平行于各自的体对角线,XYZ对角线的定位误差 $\Delta L_{16}(x,y,z)$ 测量起点为A₁₆(x₁₆,y₁₆,z₁₆)、-X-YZ对角线的定位误差 $\Delta L_{17}(x,y,z)$ 测量起点为A₁₇(x₁₇,y₁₇,z₁₇)、-XYZ对角线的定位误差 $\Delta L_{18}(x,y,z)$ 测量起点为A₁₈(x₁₈,y₁₈,z₁₈)、X-YZ对角线的定位误差 $\Delta L_{19}(x,y,z)$ 测量起点为A₁₉(x₁₉,y₁₉,z₁₉)的同一条测量线进行两次对角线定位误差的测量;

[0014] 2)对X轴的误差进行辨识:

[0015] 安装激光干涉仪,按照测量路径对X轴各项几何误差进行测量,其中角度误差无论在每一条测量线上,其测量值即为X轴的角度误差值;

[0016] 定位误差值根据测量得到的定位误差值、两项非滚转角度误差以及测量线起始点的坐标辨识得到:

$$[0017] \quad \delta_x(x) = \Delta x_1(x) + \varepsilon_z(x)y_1 - \varepsilon_y(x)z_1$$

[0018] 测量直线度时,若z₄、y₅均为0,对于移动直线度干涉镜,利用测量的直线度误差值、两项非滚转角度误差以及测量线起始点的坐标辨识得到:

$$[0019] \quad \begin{cases} \delta_y(x) = \Delta y_4(x) - \varepsilon_z(x)x_4 \\ \delta_z(x) = \Delta z_5(x) + \varepsilon_y(x)x_5 \end{cases}$$

[0020] 对于移动直线度反射镜,利用测量的直线度误差值、两项非滚转角度误差以及测量线起始点的坐标辨识得到:

$$[0021] \quad \begin{cases} \delta_y(x) = \Delta y_4(x) - \varepsilon_z(x)(x_4 - x - L) \\ \delta_z(x) = \Delta z_5(x) + \varepsilon_y(x)(x_5 - x - L) \end{cases}$$

[0022] 其中,x为移动距离,L为测量起点处干涉镜与反射镜之间的初始位置;

[0023] 若z₄、y₅不为0,则在步骤5)进行直线度误差的辨识;

[0024] 3) 对Y轴按照规划的测量路径进行与X轴类似的测量和辨识,得到Y轴的定位误差、两项非滚转角度误差,在 z_9 为0时,能够同时辨识得到Y轴的Z向直线度误差,否则,则在步骤5)进行直线度误差辨识,Y轴的X向直线度误差,包含垂直度误差 S_{xy} ,在步骤5)进行辨识;

[0025] 4) 对Z轴按照规划的测量路径进行与X轴类似的测量和辨识,得到Z轴的定位误差、两项非滚转角度误差,Z轴的X向直线度误差以及Y向直线度误差,包含垂直度误差 S_{xz} 以及 S_{yz} ,在步骤5)进行辨识;

[0026] 5) 对于XYTZ型三轴机床,基于多体系统的建模理论,按照体间运动关系得到误差齐次坐标变换矩阵,最终得到机床的空间综合误差模型:

[0027]

$$\begin{cases} \Delta x = \delta_x(x) + \delta_x(y) - \delta_x(z) + y(\varepsilon_z(x) + \varepsilon_z(y)) + z(\varepsilon_y(x) + \varepsilon_y(y)) - y_t(\varepsilon_z(x) + \varepsilon_z(y) - \varepsilon_z(z)) + z_t(\varepsilon_y(x) + \varepsilon_y(y) - \varepsilon_y(z)) \\ \Delta y = \delta_y(x) + \delta_y(y) - \delta_y(z) - x\varepsilon_z(x) - z(\varepsilon_x(x) + \varepsilon_x(y)) + x_t(\varepsilon_z(x) + \varepsilon_z(y) - \varepsilon_z(z)) - z_t(\varepsilon_x(x) + \varepsilon_x(y) - \varepsilon_x(z)) \\ \Delta z = -\delta_z(x) - \delta_z(y) + \delta_z(z) - x\varepsilon_y(x) + y\varepsilon_x(x) - x_t(\varepsilon_y(x) + \varepsilon_y(y) - \varepsilon_y(z)) + y_t(\varepsilon_x(x) + \varepsilon_x(y) - \varepsilon_x(z)) \end{cases}$$

[0028] 其中 x_t, y_t, z_t 对角线测量基准点A在机床工件坐标系下与 x, y, z 轴的距离,工件坐标系原点0为误差原点;

[0029] 对于XZ平面,Y轴无运动,其误差公式简化为:

$$\begin{cases} \Delta x_{13} = \delta_x(x) - \delta_x(z) + z\varepsilon_y(x) - y_{t13}(\varepsilon_z(x) - \varepsilon_z(z)) + z_{t13}(\varepsilon_y(x) - \varepsilon_y(z)) \\ \Delta z_{13} = -\delta_z(x) + \delta_z(z) - x\varepsilon_y(x) - x_{t13}(\varepsilon_y(x) - \varepsilon_y(z)) + y_{t13}(\varepsilon_x(x) - \varepsilon_x(z)) \end{cases}$$

[0031] 则根据误差公式知:

$$[0032] \quad \Delta L_{13} = \Delta x_{13} \cdot \frac{L_x}{L_{xz}} + \Delta z_{13} \cdot \frac{L_z}{L_{xz}}$$

[0033] 同理,对于XY平面,Z轴无运动,其误差公式简化为:

[0034]

$$\begin{cases} \Delta x = \delta_x(x) + \delta_x(y) + y(\varepsilon_z(x) + \varepsilon_z(y)) - y_{t14}(\varepsilon_z(x) + \varepsilon_z(y)) + z_{t14}(\varepsilon_y(x) + \varepsilon_y(y)) \\ \Delta y = \delta_y(x) + \delta_y(y) - x\varepsilon_z(x) + x_{t14}(\varepsilon_z(x) + \varepsilon_z(y)) - z_{t14}(\varepsilon_x(x) + \varepsilon_x(y)) \end{cases}$$

[0035] 则根据误差公式可知:

$$[0036] \quad \Delta L_{14} = \Delta x_{14} \cdot \frac{L_x}{L_{xy}} + \Delta y_{14} \cdot \frac{L_y}{L_{xy}}$$

[0037] 同理,对于YZ平面,X轴无运动,其误差公式简化为:

$$\begin{cases} \Delta y = \delta_y(y) - \delta_y(z) - z\varepsilon_x(y) + x_{t15}(\varepsilon_z(y) - \varepsilon_z(z)) - z_{t15}(\varepsilon_x(y) - \varepsilon_x(z)) \\ \Delta z = -\delta_z(y) + \delta_z(z) - x_{t15}(\varepsilon_y(y) - \varepsilon_y(z)) + y_{t15}(\varepsilon_x(y) - \varepsilon_x(z)) \end{cases}$$

[0039] 则根据误差公式可知:

$$[0040] \quad \Delta L_{15} = \Delta y_{15} \cdot \frac{L_y}{L_{yz}} + \Delta z_{15} \cdot \frac{L_z}{L_{yz}}$$

[0041] 根据对角线的定位误差

[0042] $\Delta L_{16}(x, y, z)$ 、 $\Delta L_{17}(x, y, z)$ 、 $\Delta L_{18}(x, y, z)$ 以及 $\Delta L_{19}(x, y, z)$,若对角线与X轴、Y轴

以及Z轴的夹角分别为 α 、 β 、 γ ，并将各测量位置带入误差模型则有：

$$[0043] \quad \begin{cases} \Delta L_{16} = \Delta x_{16} \cdot \cos \alpha + \Delta y_{16} \cdot \cos \beta + \Delta z_{16} \cdot \cos \gamma \\ \Delta L_{17} = -\Delta x_{17} \cdot \cos \alpha - \Delta y_{17} \cdot \cos \beta + \Delta z_{17} \cdot \cos \gamma \\ \Delta L_{18} = -\Delta x_{18} \cdot \cos \alpha + \Delta y_{18} \cdot \cos \beta + \Delta z_{18} \cdot \cos \gamma \\ \Delta L_{19} = \Delta x_{19} \cdot \cos \alpha - \Delta y_{19} \cdot \cos \beta + \Delta z_{19} \cdot \cos \gamma \end{cases}$$

[0044] 根据7个方程，利用最小二乘法辨识得到三项滚转角度误差 $\varepsilon_x(x)$ 、 $\varepsilon_y(y)$ 、 $\varepsilon_z(z)$ 以及包含三项垂直度误差 S_{xz} 、 S_{yz} 、 S_{xy} 的直线度误差 $\delta_x(z)$ 、 $\delta_y(z)$ 、 $\delta_x(y)$ ；

[0045] 若 $\delta_y(x)$ 、 $\delta_z(x)$ 以及 $\delta_z(y)$ 在本步骤之前未辨识得到，则有：

$$[0046] \quad \begin{cases} \Delta y_4(x) = \delta_y(x) - \varepsilon_x(x)z_4 + \varepsilon_z(x)x_4 \\ \Delta z_5(x) = \delta_z(x) - \varepsilon_y(x)x_5 + \varepsilon_x(x)y_5 \\ \Delta z_9(y) = \delta_z(y) - \varepsilon_y(y)x_9 + \varepsilon_x(y)y_9 \end{cases}$$

[0047] 结合面对角线以及体对角线共10个方程，利用最小二乘法便得到所有的直线度误差以及滚转角度误差，至此，机床几何误差均已辨识完成。

[0048] 对于其他类型的机床，根据求得的空间综合误差模型，采用相同方法也能够辨识得到各直线度误差以及滚转角度误差。

[0049] 与现有技术相比，本发明具有以下效果：

[0050] 本发明利用角度干涉镜与线性反射镜复合使用，减少安装以及激光调准时间，降低了测量周期；本发明允许使用移动干涉镜或移动反射镜的方式进行直线度误差的测量，采用不同的处理方式，统一了辨识结果，扩大了适用范围；本发明提出的测量辨识方法，其测量路线没有限制，可以在规划的测量空间中任意选择测量路线，降低了测量要求，优化了测量过程；本发明使用对角线定位误差测量，结合空间综合误差模型，避免了传统测量辨识方法过程中因直线度消除斜率误差而造成的滚转角度误差以及垂直度误差辨识不精确的问题，大大提高了测量辨识精度，增强了测量辨识可信度。

附图说明

[0051] 图1是本发明方法的流程图。

[0052] 图2是本发明X轴测量路径示意图。

[0053] 图3是本发明Y轴测量路径示意图。

[0054] 图4是本发明Z轴测量路径示意图。

[0055] 图5是本发明面对角线轴测量路径示意图。

[0056] 图6是本发明体对角线轴测量路径示意图。

具体实施方式

[0057] 结合附图对本发明作进一步的详细说明。

[0058] 参照图1，一种基于激光干涉仪的多线机床空间几何误差测量辨识方法，包括以下步骤：

[0059] 1) 在机床行程空间内规划测量空间，分别在测量空间内设计规划测量路径；

[0060] 针对X轴，参照图2，在测量空间内对定位误差、两项非滚转角度误差以及两项互相垂直的直线度误差进行测量，其测量线的位置均平行于X轴，定位误差 $\delta_x(x)$ 测量起点为 A_1

(x_1, y_1, z_1) 、绕Y轴转角误差 $\varepsilon_y(x)$ 测量起点 $A_2(x_2, y_2, z_2)$ 、绕Z轴转角误差 $\varepsilon_z(x)$ 测量起点 $A_3(x_3, y_3, z_3)$ 、Y向直线度误差 $\delta_y(x)$ 测量起点 $A_4(x_4, y_4, z_4)$ 、Z向直线度误差 $\delta_z(x)$ 测量起点 $A_5(x_5, y_5, z_5)$ ，其中定位误差与其中一项角度误差测量时采用角度干涉镜与线性反射镜复合方式测量，即 A_1 与 A_2 或 A_3 测量线重叠，其他测量线根据测量情况重叠或分离；

[0061] 针对Y轴，参照图3，在测量空间内对定位误差、两项非滚转角度误差以及Z向直线度误差进行测量，其测量线的位置均平行于Y轴，定位误差 $\delta_y(y)$ 测量起点为 $A_6(x_6, y_6, z_6)$ 、绕X轴转角误差 $\varepsilon_x(y)$ 测量起点 $A_7(x_7, y_7, z_7)$ 、绕Z轴转角误差 $\varepsilon_z(y)$ 测量起点 $A_8(x_8, y_8, z_8)$ 、Z向直线度误差 $\delta_z(y)$ 测量起点 $A_9(x_9, y_9, z_9)$ ，其中定位误差与其中一项角度误差测量时采用角度干涉镜与线性反射镜复合方式测量，即 A_6 与 A_7 或 A_8 测量线重叠，其他测量线根据测量情况重叠或分离；

[0062] 针对Z轴，参照图4，在测量空间内对定位误差、两项非滚转角度误差以及两项互相垂直的直线度误差进行测量，其测量线的位置均平行于Z轴，定位误差 $\delta_z(z)$ 测量起点为 $A_{10}(x_{10}, y_{10}, z_{10})$ 、绕X轴转角误差 $\varepsilon_x(z)$ 测量起点 $A_{11}(x_{11}, y_{11}, z_{11})$ 、绕Y轴转角误差 $\varepsilon_y(z)$ 测量起点 $A_{12}(x_{12}, y_{12}, z_{12})$ ，其中定位误差与其中一项角度误差测量时采用角度干涉镜与线性反射镜复合方式测量，即 A_{10} 与 A_{11} 或 A_{12} 测量线重叠，其他测量线根据测量情况重叠或分离；

[0063] 针对面对角线，参照图5，在测量空间内对XZ平面、XY平面以及YZ平面的三个面对角线的定位误差进行测量，其测量线的位置均平行于各个面对角线，XZ平面的对角线定位误差 $\Delta L_{13}(x, z)$ 测量起点为 $A_{13}(x_{13}, y_{13}, z_{13})$ 、XY平面的对角线定位误差 $\Delta L_{14}(x, y)$ 测量起点为 $A_{14}(x_{14}, y_{14}, z_{14})$ 、YZ平面的对角线定位误差 $\Delta L_{15}(y, z)$ 测量起点为 $A_{15}(x_{15}, y_{15}, z_{15})$ ；

[0064] 最后，规划四条体对角线测量路径，参照图6，在测量空间内对XYZ对角线、-X-YZ对角线、-XYZ对角线以及X-YZ对角线的四条体对角线的定位误差进行测量，其测量线均平行于各自的体对角线，XYZ对角线的定位误差 $\Delta L_{16}(x, y, z)$ 测量起点为 $A_{16}(x_{16}, y_{16}, z_{16})$ 、-X-YZ对角线的定位误差 $\Delta L_{17}(x, y, z)$ 测量起点为 $A_{17}(x_{17}, y_{17}, z_{17})$ 、-XYZ对角线的定位误差 $\Delta L_{18}(x, y, z)$ 测量起点为 $A_{18}(x_{18}, y_{18}, z_{18})$ 、X-YZ对角线的定位误差 $\Delta L_{19}(x, y, z)$ 测量起点为 $A_{19}(x_{19}, y_{19}, z_{19})$ 的同一条测量线进行两次对角线定位误差的测量；

[0065] 2) 对X轴的误差进行辨识：

[0066] 安装激光干涉仪，按照测量路径对X轴各项几何误差进行测量，其中角度误差无论在哪一条测量线上，其测量值即为X轴的角度误差值；

[0067] 定位误差值根据测量得到的定位误差值、两项非滚转角度误差以及测量线起始点的坐标辨识得到：

$$[0068] \quad \delta_x(x) = \Delta x_1(x) + \varepsilon_z(x) y_1 - \varepsilon_y(x) z_1$$

[0069] 测量直线度时，若 z_4, y_5 均为0，对于移动直线度干涉镜，利用测量的直线度误差值、两项非滚转角度误差以及测量线起始点的坐标辨识得到：

$$[0070] \quad \begin{cases} \delta_y(x) = \Delta y_4(x) - \varepsilon_z(x) x_4 \\ \delta_z(x) = \Delta z_5(x) + \varepsilon_y(x) x_5 \end{cases}$$

[0071] 对于移动直线度反射镜，利用测量的直线度误差值、两项非滚转角度误差以及测量线起始点的坐标辨识得到：

$$[0072] \quad \begin{cases} \delta_y(x) = \Delta y_4(x) - \varepsilon_z(x)(x_4 - x - L) \\ \delta_z(x) = \Delta z_5(x) + \varepsilon_y(x)(x_5 - x - L) \end{cases}$$

[0073] 其中, x 为移动距离, L 为测量起点处干涉镜与反射镜之间的初始位置;

[0074] 若 z_4 、 y_5 不为 0, 则在步骤 5) 进行直线度误差的辨识;

[0075] 3) 对 Y 轴按照规划的测量路径进行与 X 轴类似的测量和辨识, 得到 Y 轴的定位误差、两项非滚转角度误差, 在 z_9 为 0 时, 可以同时辨识得到 Y 轴的 Z 向直线度误差, 否则, 则在步骤 5) 进行直线度误差辨识, Y 轴的 X 向直线度误差 (包含垂直度误差 S_{xy}) 在步骤 5) 进行辨识;

[0076] 4) 对 Z 轴按照规划的测量路径进行与 X 轴类似的测量和辨识, 得到 Z 轴的定位误差、两项非滚转角度误差, Z 轴的 X 向直线度误差以及 Y 向直线度误差 (包含垂直度误差 S_{xz} 以及 S_{yz}) 在步骤 5) 进行辨识;

[0077] 5) 对于 XYTZ 型三轴机床, 基于多体系统的建模理论, 按照体间运动关系得到误差齐次坐标变换矩阵, 最终得到机床的空间综合误差模型:

[0078]

$$\begin{cases} \Delta x = \delta_x(x) + \delta_x(y) - \delta_x(z) + y(\varepsilon_z(x) + \varepsilon_z(y)) + z(\varepsilon_y(x) + \varepsilon_y(y)) - y_t(\varepsilon_z(x) + \varepsilon_z(y) - \varepsilon_z(z)) + z_t(\varepsilon_y(x) + \varepsilon_y(y) - \varepsilon_y(z)) \\ \Delta y = \delta_y(x) + \delta_y(y) - \delta_y(z) - x\varepsilon_z(x) - z(\varepsilon_x(x) + \varepsilon_x(y)) + x_t(\varepsilon_z(x) + \varepsilon_z(y) - \varepsilon_z(z)) - z_t(\varepsilon_x(x) + \varepsilon_x(y) - \varepsilon_x(z)) \\ \Delta z = -\delta_z(x) - \delta_z(y) + \delta_z(z) - x\varepsilon_y(x) + y\varepsilon_x(x) - x_t(\varepsilon_y(x) + \varepsilon_y(y) - \varepsilon_y(z)) + y_t(\varepsilon_x(x) + \varepsilon_x(y) - \varepsilon_x(z)) \end{cases}$$

[0079] 其中 x_t , y_t , z_t 对角线测量基准点 A 在机床工件坐标系下与 x , y , z , 轴的距离, 工件坐标系原点 0 为误差原点;

[0080] 对于 XZ 平面, Y 轴无运动, 其误差公式简化为:

$$[0081] \quad \begin{cases} \Delta x_{13} = \delta_x(x) - \delta_x(z) + z\varepsilon_y(x) - y_{t13}(\varepsilon_z(x) - \varepsilon_z(z)) + z_{t13}(\varepsilon_y(x) - \varepsilon_y(z)) \\ \Delta z_{13} = -\delta_z(x) + \delta_z(z) - x\varepsilon_y(x) - x_{t13}(\varepsilon_y(x) - \varepsilon_y(z)) + y_{t13}(\varepsilon_x(x) - \varepsilon_x(z)) \end{cases}$$

[0082] 则根据误差公式知:

$$[0083] \quad \Delta L_{13} = \Delta x_{13} \cdot \frac{L_x}{L_{xz}} + \Delta z_{13} \cdot \frac{L_z}{L_{xz}}$$

[0084] 同理, 对于 XY 平面, Z 轴无运动, 其误差公式简化为:

[0085]

$$\begin{cases} \Delta x = \delta_x(x) + \delta_x(y) + y(\varepsilon_z(x) + \varepsilon_z(y)) - y_{t14}(\varepsilon_z(x) + \varepsilon_z(y)) + z_{t14}(\varepsilon_y(x) + \varepsilon_y(y)) \\ \Delta y = \delta_y(x) + \delta_y(y) - x\varepsilon_z(x) + x_{t14}(\varepsilon_z(x) + \varepsilon_z(y)) - z_{t14}(\varepsilon_x(x) + \varepsilon_x(y)) \end{cases}$$

[0086] 则根据误差公式知:

$$[0087] \quad \Delta L_{14} = \Delta x_{14} \cdot \frac{L_x}{L_{xy}} + \Delta y_{14} \cdot \frac{L_y}{L_{xy}}$$

[0088] 同理, 对于 YZ 平面, X 轴无运动, 其误差公式简化为:

$$[0089] \quad \begin{cases} \Delta y = \delta_y(y) - \delta_y(z) - z\varepsilon_x(y) + x_{t15}(\varepsilon_z(y) - \varepsilon_z(z)) - z_{t15}(\varepsilon_x(y) - \varepsilon_x(z)) \\ \Delta z = -\delta_z(y) + \delta_z(z) - x_{t15}(\varepsilon_y(y) - \varepsilon_y(z)) + y_{t15}(\varepsilon_x(y) - \varepsilon_x(z)) \end{cases}$$

[0090] 则根据误差公式知:

$$[0091] \quad \Delta L_{15} = \Delta y_{15} \cdot \frac{L_y}{L_{yz}} + \Delta z_{15} \cdot \frac{L_z}{L_{yz}}$$

[0092] 根据对角线的定位误差

[0093] $\Delta L_{16}(x, y, z)$ 、 $\Delta L_{17}(x, y, z)$ 、 $\Delta L_{18}(x, y, z)$ 以及 $\Delta L_{19}(x, y, z)$ ，若对角线与X轴、Y轴以及Z轴的夹角分别为 α 、 β 、 γ ，并将各测量位置带入误差模型则有：

$$[0094] \quad \begin{cases} \Delta L_{16} = \Delta x_{16} \cdot \cos \alpha + \Delta y_{16} \cdot \cos \beta + \Delta z_{16} \cdot \cos \gamma \\ \Delta L_{17} = -\Delta x_{17} \cdot \cos \alpha - \Delta y_{17} \cdot \cos \beta + \Delta z_{17} \cdot \cos \gamma \\ \Delta L_{18} = -\Delta x_{18} \cdot \cos \alpha + \Delta y_{18} \cdot \cos \beta + \Delta z_{18} \cdot \cos \gamma \\ \Delta L_{19} = \Delta x_{19} \cdot \cos \alpha - \Delta y_{19} \cdot \cos \beta + \Delta z_{19} \cdot \cos \gamma \end{cases}$$

[0095] 根据7个方程，利用最小二乘法辨识得到三项滚转角度误差 $\varepsilon_x(x)$ 、 $\varepsilon_y(y)$ 、 $\varepsilon_z(z)$ 以及包含三项垂直度误差 S_{xz} 、 S_{yz} 、 S_{xy} 的直线度误差 $\delta_x(z)$ 、 $\delta_y(z)$ 、 $\delta_x(y)$ ；

[0096] 若 $\delta_y(x)$ 、 $\delta_z(x)$ 以及 $\delta_z(y)$ 在本步骤之前未辨识得到，则有：

$$[0097] \quad \begin{cases} \Delta y_4(x) = \delta_y(x) - \varepsilon_x(x)z_4 + \varepsilon_z(x)x_4 \\ \Delta z_5(x) = \delta_z(x) - \varepsilon_y(x)x_5 + \varepsilon_x(x)y_5 \\ \Delta z_9(y) = \delta_z(y) - \varepsilon_y(y)x_9 + \varepsilon_x(y)y_9 \end{cases}$$

[0098] 结合面对角线以及体对角线共10个方程，利用最小二乘法便可以得到所有的直线度误差以及滚转角误差，至此，机床几何误差均已辨识完成。

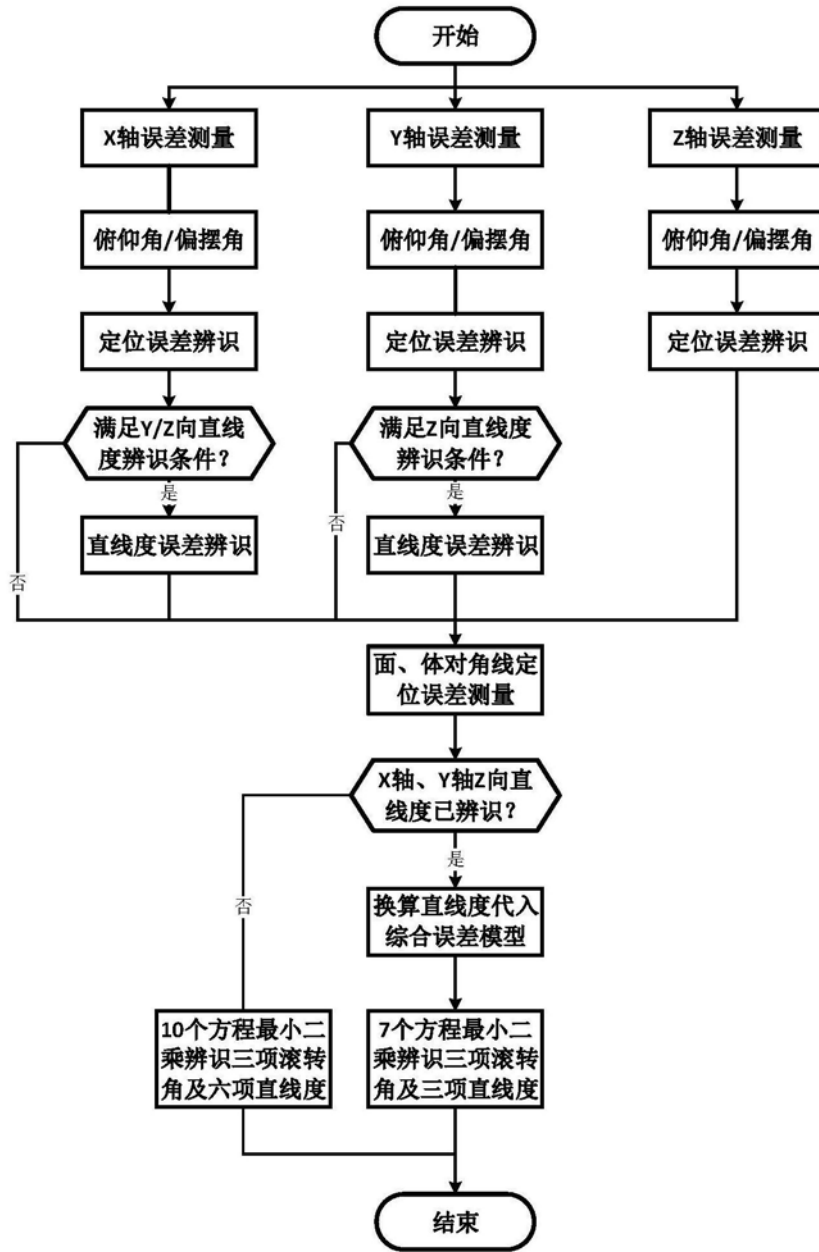


图1

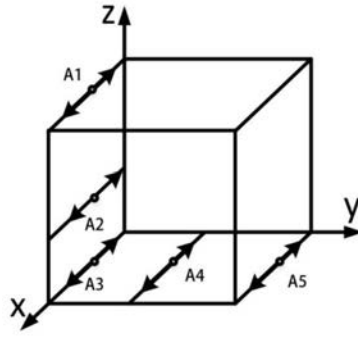


图2

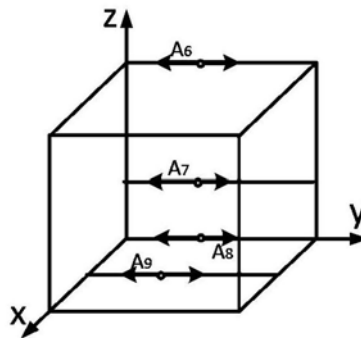


图3

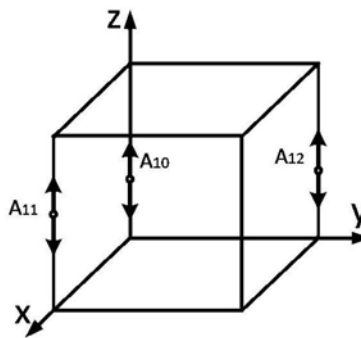


图4

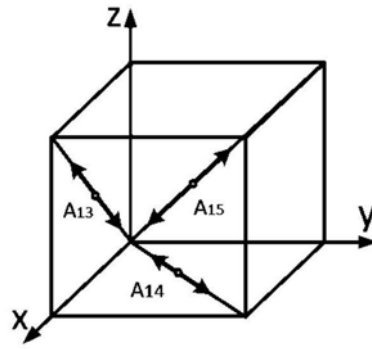


图5

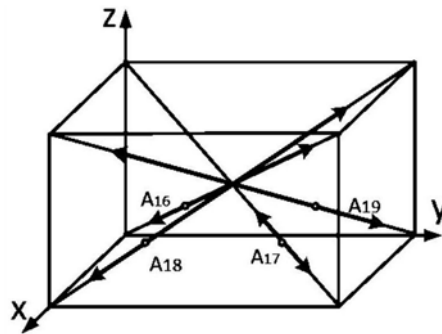


图6