



(12)发明专利

(10)授权公告号 CN 107806825 B

(45)授权公告日 2019.04.09

(21)申请号 201710912171.5

(22)申请日 2017.09.29

(65)同一申请的已公布的文献号
申请公布号 CN 107806825 A

(43)申请公布日 2018.03.16

(73)专利权人 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 姜歌东 赵鹏巍 陶涛 郭世杰

(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.
G01B 11/00(2006.01)

(56)对比文件

CN 106863014 A, 2017.06.20,
CN 1562563 A, 2005.01.12,
CN 101571374 A, 2009.11.04,
JP H05127729 A, 1993.05.25,
EP 0510204 A1, 1992.10.28,
CN 103268081 A, 2013.08.28,
CN 105492860 A, 2016.04.13,
CN 105538038 A, 2016.05.04,
CN 103791878 A, 2014.05.14,
CN 101982726 A, 2011.03.02,
郭世杰等.数控机床几何误差相关性分析方法研究.《农业机械学报》.2016,第47卷(第10期),第383-389页.

审查员 罗裕

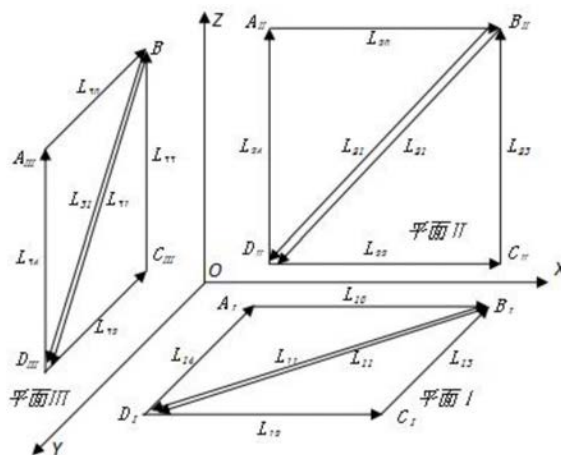
权利要求书3页 说明书7页 附图3页

(54)发明名称

基于平面光栅的三面五线机床空间几何误差测量辨识方法

(57)摘要

基于平面光栅的三面五线机床空间几何误差测量辨识方法,先在XOY、XOZ、YOZ三个测量平面内,分别在平面光栅的测量范围内设计规划测量路径;然后依次对XOY、XOZ、YOZ平面的各项误差进行辨识,先辨识得到测量平面上两轴间的垂直度误差,消除垂直度误差影响后利用不同轨迹间关系辨识得到俯仰和偏摆角度误差,消除角度误差影响后辨识得到定位误差与直线度误差,最后结合三个平面辨识得到的已有误差代入模型辨识得到滚转角度误差;对每项几何误差项进行参数化建模,采用正交多项式拟合的方法得到每项几何误差的误差曲线,最终实现空间几何误差的全部辨识过程;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。



CN 107806825 B

1. 一种基于平面光栅的三面五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XOY、XOZ、YOZ三个测量平面内,分别在平面光栅的测量范围内设计规划测量路径;

针对XOY平面I, $A_I(x_{10}, y_{10}, z_0)$ 为测量平面基准点,在平面光栅测量范围内划定测量路径:路径端点为 $A_I(x_{10}, y_{10}, z_0)$ 、 $B_I(x_{11}, y_{10}, z_0)$ 、 $C_I(x_{11}, y_{11}, z_0)$ 、 $D_I(x_{10}, y_{11}, z_0)$, 首先以 A_I 为起点沿路径 L_{10} 运动至 B_I ; 其次以 B_I 为起点沿路径 L_{11} 运动至 D_I ; 再以 D_I 为起点沿路径 L_{12} 运动至 C_I ; 再以 C_I 为起点沿路径 L_{13} 运动至 B_I ; 再以 B_I 为起点沿路径 L_{11} 运动至 D_I ; 最后以 D_I 为起点沿 L_{14} 运动至 A_I ;

在XOZ平面II, $A_{II}(x_{20}, y_0, z_{20})$ 为测量平面基准点,按相同方式规划路径:路径端点为 $A_{II}(x_{20}, y_0, z_{20})$ 、 $B_{II}(x_{21}, y_0, z_{20})$ 、 $C_{II}(x_{21}, y_0, z_{21})$ 、 $D_{II}(x_{20}, y_0, z_{20})$; 首先以 A_{II} 为起点沿路径 L_{20} 运动至 B_{II} ; 其次以 B_{II} 为起点沿路径 L_{21} 运动至 D_{II} ; 再以 D_{II} 为起点沿路径 L_{22} 运动至 C_{II} ; 再以 C_{II} 为起点沿路径 L_{23} 运动至 B_{II} ; 再以 B_{II} 为起点沿路径 L_{21} 运动至 D_{II} ; 最后以 D_{II} 为起点沿 L_{24} 运动至 A_{II} ;

在YOZ平面III, $A_{III}(x_0, y_{30}, z_{30})$ 为测量平面基准点,按相同方式规划路径:路径端点为 $A_{III}(x_0, y_{30}, z_{30})$ 、 $B_{III}(x_0, y_{31}, z_{30})$ 、 $C_{III}(x_0, y_{31}, z_{31})$ 、 $D_{III}(x_0, y_{30}, z_{31})$; 首先以 A_{III} 为起点沿路径 L_{30} 运动至 B_{III} ; 其次以 B_{III} 为起点沿路径 L_{31} 运动至 D_{III} ; 再以 D_{III} 为起点沿路径 L_{32} 运动至 C_{III} ; 再以 C_{III} 为起点沿路径 L_{33} 运动至 B_{III} ; 再以 B_{III} 为起点沿路径 L_{31} 运动至 D_{III} ; 最后以 D_{III} 为起点沿 L_{34} 运动至 A_{III} ;

2) 对XOY平面I的各项误差进行辨识:

先在XOY测量平面安装平面光栅,进行误差辨识,以路径 L_{10} 和路径 L_{14} 为基准线,首先辨识平面内XY轴间的垂直度误差,实际测得的 L_{10} 和 L_{14} 的趋势线是与规划轨迹存在偏转角度的倾斜直线,依据多个测点的测值,采用最小二乘法拟合求出 L_{10} 和 L_{14} 的趋势线的斜率 a_0, a_4 , 计算得到两条趋势线与X轴和Y轴的倾角 $\alpha_x, \alpha_y \in [0, \pi]$, 进而求得XY轴间垂直度误差为:

$$\alpha_x = \tan^{-1} a_0, \alpha_y = \tan^{-1} a_4,$$

$$S_{xy} = -\frac{\pi}{2} + \alpha_y - \alpha_x;$$

通过两条测量路径辨识得到垂直度误差后,将路径 L_{10} 和路径 L_{14} 的趋势线旋转至平行于X轴和Y轴,消除耦合的垂直度误差影响,得到路径 L_{10} 和 L_{14} 上修正的测点坐标为 (x_{x10}, y_{x10}) , (x_{y10}, y_{y10}) ; 同样,将路径 L_{12} 和路径 L_{13} 上测量的趋势线旋转至平行于X轴和Y轴消除垂直度误差影响,得到路径 L_{12} 和路径 L_{13} 上修正的测点坐标为 (x_{x11}, y_{x11}) , (x_{y11}, y_{y11}) , 对于路径 $L_{10}, L_{12}, L_{13}, L_{14}$, 设其测点理论坐标值分别为 (x_{1x}, y_{10}) (x_{1x}, y_{11}) (x_{11}, y_{1y}) (x_{10}, y_{1y}) , 根据测点理论坐标值和修正的测点坐标,在路径 L_{10} 上得到X轴测量范围内各测点在X轴方向的坐标偏差:

$$\Delta x_0 = x_{x10} - x_{1x};$$

X轴测量范围内在Y方向的坐标偏差为:

$$\Delta y_0 = y_{x10} - y_{10};$$

在路径 L_{14} 上采用相同方法得到Y轴测量范围内各测点在Y方向的坐标偏差:

$$\Delta y_4 = y_{y10} - y_{1y}$$

Y轴测量范围内在X方向的坐标偏差为:

$$\Delta x_4 = x_{y10} - x_{10}$$

路径L₁₂上各测点X坐标偏差值为 $\Delta x_2 = x_{x11} - x_{1x}$,比较其与路径L₁₀上各测点X坐标偏差值 Δx_0 ,求出测量范围内X轴在XY平面内的偏摆角度误差 ε_{zx} :

$$\varepsilon_{zx} = \frac{\Delta x_2 - \Delta x_0}{y_{11} - y_{10}}$$

路径L₁₃上各测点Y坐标偏差值为 $\Delta y_3 = y_{y11} - y_{1y}$,比较其与路径L₁₄上各测点Y坐标偏差值 Δy_4 ,求出测量范围内Y轴在XY平面内的偏摆角度误差 ε_{zy} :

$$\varepsilon_{zy} = \frac{\Delta y_3 - \Delta y_4}{x_{11} - x_{10}}$$

对路径L₁₀和路径L₁₄上辨识得到的坐标偏差进行分析,需要消除角度误差影响才能将耦合在其中的定位误差和直线度误差辨识出来,对路径L₁₀而言,得到X轴的定位误差 δ_{xx} 和Y向直线度误差 δ_{yx} :

$$\delta_{xx} = \Delta x_0 + \varepsilon_{zx} x_{10}$$

$$\delta_{yx} = \Delta y_0 - \varepsilon_{zy} y_{1x}$$

同理消除路径L₁₄上的角度误差得到Y轴的定位误差 δ_{yy} 和X向直线度误差 δ_{xy} :

$$\delta_{xy} = \Delta x_4 + \varepsilon_{zy} y_{1y}$$

$$\delta_{yy} = \Delta y_4 - \varepsilon_{zx} x_{10};$$

3) 在XOZ平面II内按照规划路径进行与XOY平面I内类似的测量和辨识,得到XZ轴间的垂直度误差 S_{xz} ,X轴在XZ平面内的俯仰角度误差 ε_{yx} ,Z轴在XZ平面内的偏摆角度误差 ε_{yz} ,Z轴的定位误差 δ_{zz} ,X轴的Z向直线度误差 δ_{zx} ,Z轴的X向直线度误差 δ_{xz} ;

4) 在YOZ平面III内按照规划路径进行与XOY平面I内类似的测量和辨识,得到YZ轴间的垂直度误差 S_{yz} ,Y轴在YZ平面内的俯仰角度误差 ε_{xy} ,Z轴在YZ平面内的俯仰角度误差 ε_{xz} ,Y轴的Z向直线度误差 δ_{yz} ,Z轴的Y向直线度误差 δ_{yz} ;

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:

$$\begin{cases} \Delta x = -\delta_{xx} - \delta_{xy} + \delta_{xz} - y\varepsilon_{zx} + y\varepsilon_{zz} + z\varepsilon_{yz} + yS_{xy} - zS_{xz} + y_0(\varepsilon_{zx} + \varepsilon_{zy} - \varepsilon_{zz}) \\ \quad - z_0(\varepsilon_{yx} + \varepsilon_{yy} + \varepsilon_{yz}) \\ \Delta y = -\delta_{yx} - \delta_{yy} + \delta_{yz} - x\varepsilon_{zz} - z\varepsilon_{xz} - zS_{yz} - x_0(\varepsilon_{zx} + \varepsilon_{zy} - \varepsilon_{zz}) + z_0(\varepsilon_{xx} + \varepsilon_{xy} - \varepsilon_{xz}) \\ \Delta z = -\delta_{zx} - \delta_{zy} + \delta_{zz} + y\varepsilon_{xx} + x\varepsilon_{yz} - y\varepsilon_{xz} + x_0(\varepsilon_{yx} + \varepsilon_{yy} - \varepsilon_{yz}) - y_0(\varepsilon_{xx} + \varepsilon_{xy} - \varepsilon_{xz}) \end{cases}$$

x_0, y_0, z_0 为对应三个测量平面内基准点A_I, A_{II}, A_{III}在机床工件坐标系下的坐标,工件坐标系原点O为误差原点;

在三个测量平面上对各轴测量范围内具有重合段的公共区域进行滚转误差辨识,在XOY测量平面I,由路径L₁₁的两次测量得到误差值 Δx 和 Δy ;误差模型中 $\Delta z = 0$,得到:

$$\begin{cases} \Delta x = -\delta_{xx} - \delta_{xy} + \delta_{xz} - y\varepsilon_{zx} + y\varepsilon_{zz} + yS_{xy} + y_0(\varepsilon_{zx} + \varepsilon_{zy} - \varepsilon_{zz}) - z_0(\varepsilon_{yx} + \varepsilon_{yy} + \varepsilon_{yz}) \\ \Delta y = -\delta_{yx} - \delta_{yy} + \delta_{yz} - x\varepsilon_{zz} - x_0(\varepsilon_{zx} + \varepsilon_{zy} - \varepsilon_{zz}) + z_0(\varepsilon_{xx} + \varepsilon_{xy} - \varepsilon_{xz}) \end{cases}$$

在XOZ测量平面II,由路径L₂₁的两次测量得到误差值 Δx 和 Δz ;误差模型中 $\Delta y = 0$,得到:

$$\begin{cases} \Delta x = -\delta_{xx} - \delta_{xy} + \delta_{xz} + z\varepsilon_{yz} - zS_{xz} + y_0(\varepsilon_{zx} + \varepsilon_{zy} - \varepsilon_{zz}) - z_0(\varepsilon_{yx} + \varepsilon_{yy} + \varepsilon_{yz}) \\ \Delta z = -\delta_{zx} - \delta_{zy} + \delta_{zz} + x\varepsilon_{yz} + x_0(\varepsilon_{yx} + \varepsilon_{yy} - \varepsilon_{yz}) - y_0(\varepsilon_{xx} + \varepsilon_{xy} - \varepsilon_{xz}) \end{cases}$$

在YOZ测量平面Ⅲ,由路径L₃₁的两次测量得到误差值 Δy 和 Δz ;误差模型中 $\Delta x=0$,得到:

$$\begin{cases} \Delta y = -\delta_{yx} - \delta_{yy} + \delta_{yz} - z\varepsilon_{xz} - zS_{yz} - x_0(\varepsilon_{zx} + \varepsilon_{zy} - \varepsilon_{zz}) + z_0(\varepsilon_{xx} + \varepsilon_{xy} - \varepsilon_{xz}) \\ \Delta z = -\delta_{zx} - \delta_{zy} + \delta_{zz} + y\varepsilon_{xz} - y\varepsilon_{xz} + x_0(\varepsilon_{yx} + \varepsilon_{yy} - \varepsilon_{yz}) - y_0(\varepsilon_{xx} + \varepsilon_{xy} - \varepsilon_{xz}) \end{cases}$$

对于上述三个测量平面上的三条测量线,在其重合区域将对应位置点在不同平面的测量方程联立,三个平面共计6个误差模型方程,代入已经测量辨识得到的X、Y、Z轴的定位误差、直线度误差、垂直度误差、俯仰偏摆角度误差和基准点坐标值,则方程中只包含3项未知数,利用最小二乘法拟合求出最满足方程条件的解,得到机床的三项滚转角度误差 ε_{xx} , ε_{yy} , ε_{zz} ;

对于其他类型的机床,根据求得的综合误差模型,采用相同方法也能够辨识得到滚转角度误差;

6) 辨识得到的各项几何误差是离散的误差数据点,对每项几何误差项进行参数化建模,采用正交多项式拟合的方法得到每项几何误差的误差曲线,最终实现空间几何误差的全部辨识过程。

2. 根据权利要求1所述的一种基于平面光栅的三面五线机床空间几何误差测量辨识方法,其特征在于:所述的步骤1)的测量路径规划中,每个测量平面内的测量路径不必固定从坐标原点开始,利用各测量平面的路径重合段进行辨识,通过基准点距各坐标轴的距离进行坐标位置的转换。

基于平面光栅的三面五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,具体涉及一种基于平面光栅的三面五线机床空间几何误差测量辨识方法。

背景技术

[0002] 机床存在的原始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] 目前误差的消除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,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] 国内外学者针对几何误差补偿做了大量的研究工作,目前空间几何误差辨识的主要方法有:DBB测量法、基于激光干涉仪的多线法、分步体对角线法、分步辨识法等。基于激光干涉仪的多线法包括九线法、十四线法等,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,测量效率上存在一些不足,同时增加了测量误差产生的可能性;分步体对角线法通过对机床测量空间的四条体对角线进行测量辨识得到空间几何误差值,该方法对测量设备安装很敏感,同时单以此方法得到的辨识结果是不可靠的,存在误差间相互掩盖的可能;分步辨识法利用平面光栅进行不同平面上多次不同轨迹的测量,利用不同轨迹独立辨识得到各项误差;这些现象表明现有的空间几何误差辨识方法仍存在测量效率和测量精度上的一些不足。

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平面光栅的三面五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,同时具有高测量效率,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] 一种基于平面光栅的三面五线机床空间几何误差测量辨识方法,包括以下步骤:

[0008] 1) 在XOY、XOZ、YOZ三个测量平面内,分别在平面光栅的测量范围内设计规划测量路径;

[0009] 针对XOY平面I, $A_I(x_{10}, y_{10}, z_0)$ 为测量平面基准点,在平面光栅测量范围内划定测

量路径:路径端点为 $A_I(x_{10}, y_{10}, z_0)$ 、 $B_I(x_{11}, y_{10}, z_0)$ 、 $C_I(x_{11}, y_{11}, z_0)$ 、 $D_I(x_{10}, y_{11}, z_0)$,首先以 A_I 为起点沿路径 L_{10} 运动至 B_I ;其次以 B_I 为起点沿路径 L_{11} 运动至 D_I ;再以 D_I 为起点沿路径 L_{12} 运动至 C_I ;再以 C_I 为起点沿路径 L_{13} 运动至 B_I ;再以 B_I 为起点沿路径 L_{11} 运动至 D_I ;最后以 D_I 为起点沿 L_{14} 运动至 A_I ;

[0010] 在 XOZ 平面 Π , $A_{\Pi}(x_{20}, y_0, z_{20})$ 为测量平面基准点,按相同方式规划路径:路径端点为 $A_{\Pi}(x_{20}, y_0, z_{20})$ 、 $B_{\Pi}(x_{21}, y_0, z_{20})$ 、 $C_{\Pi}(x_{21}, y_0, z_{21})$ 、 $D_{\Pi}(x_{20}, y_0, z_{20})$;首先以 A_{Π} 为起点沿路径 L_{20} 运动至 B_{Π} ;其次以 B_{Π} 为起点沿路径 L_{21} 运动至 D_{Π} ;再以 D_{Π} 为起点沿路径 L_{22} 运动至 C_{Π} ;再以 C_{Π} 为起点沿路径 L_{23} 运动至 B_{Π} ;再以 B_{Π} 为起点沿路径 L_{21} 运动至 D_{Π} ;最后以 D_{Π} 为起点沿 L_{24} 运动至 A_{Π} ;

[0011] 在 YOZ 平面 III , $A_{\text{III}}(x_0, y_{30}, z_{30})$ 为测量平面基准点,按相同方式规划路径:路径端点为 $A_{\text{III}}(x_0, y_{30}, z_{30})$ 、 $B_{\text{III}}(x_0, y_{31}, z_{30})$ 、 $C_{\text{III}}(x_0, y_{31}, z_{31})$ 、 $D_{\text{III}}(x_0, y_{30}, z_{31})$;首先以 A_{III} 为起点沿路径 L_{30} 运动至 B_{III} ;其次以 B_{III} 为起点沿路径 L_{31} 运动至 D_{III} ;再以 D_{III} 为起点沿路径 L_{32} 运动至 C_{III} ;再以 C_{III} 为起点沿路径 L_{33} 运动至 B_{III} ;再以 B_{III} 为起点沿路径 L_{31} 运动至 D_{III} ;最后以 D_{III} 为起点沿 L_{34} 运动至 A_{III} ;

[0012] 2)对 XOY 平面 I 的各项误差进行辨识:

[0013] 先在 XOY 测量平面安装平面光栅,进行误差辨识,以路径 L_{10} 和路径 L_{14} 为基准线,首先辨识平面内 XY 轴间的垂直度误差,实际测得的 L_{10} 和 L_{14} 的趋势线是与规划迹存在偏转角度的倾斜直线,依据多个测点的测值,采用最小二乘法拟合求出 L_{10} 和 L_{14} 的趋势线的斜率 a_0, a_4 ,计算得到两条趋势线与 X 轴和 Y 轴的倾角 $\alpha_x, \alpha_y \in [0, \pi]$,进而求得 XY 轴间垂直度误差为:

$$[0014] \quad \alpha_x = \tan^{-1}a_0, \alpha_y = \tan^{-1}a_4,$$

$$[0015] \quad S_{xy} = -\frac{\pi}{2} + \alpha_y - \alpha_x;$$

[0016] 通过两条测量路径辨识得到垂直度误差后,将路径 L_{10} 和路径 L_{14} 的趋势线旋转至平行于 X 轴和 Y 轴,消除耦合的垂直度误差影响,得到路径 L_{10} 和 L_{14} 上修正的测点坐标为 $(x_{x10}, y_{x10}), (x_{y10}, y_{y10})$;同样,将路径 L_{12} 和路径 L_{13} 上测量的趋势线旋转至平行于 X 轴和 Y 轴消除垂直度误差影响,得到路径 L_{12} 和路径 L_{13} 上修正的测点坐标为 $(x_{x11}, y_{x11}), (x_{y11}, y_{y11})$,对于路径 $L_{10}, L_{12}, L_{13}, L_{14}$,设其测点理论坐标值分别为 $(x_{1x}, y_{10}), (x_{1x}, y_{11}), (x_{11}, y_{1y}), (x_{10}, y_{1y})$,根据测点理论坐标值和修正的测点坐标,在路径 L_{10} 上得到 X 轴测量范围内各测点在 X 轴方向的坐标偏差:

$$[0017] \quad \Delta x_0 = x_{x10} - x_{1x};$$

[0018] X 轴测量范围内在 Y 方向的坐标偏差为:

$$[0019] \quad \Delta y_0 = y_{x10} - y_{10};$$

[0020] 在路径 L_{14} 上采用相同方法得到 Y 轴测量范围内各测点在 Y 方向的坐标偏差:

$$[0021] \quad \Delta y_4 = y_{y10} - y_{1y}$$

[0022] Y 轴测量范围内在 X 方向的坐标偏差为:

$$[0023] \quad \Delta x_4 = x_{y10} - x_{10}$$

[0024] 路径 L_{12} 上各测点 X 坐标偏差值为 $\Delta x_2 = x_{x11} - x_{1x}$,比较其与路径 L_{10} 上各测点 X 坐标偏差值 Δx_0 ,求出测量范围内 X 轴在 XY 平面内的偏摆角度误差 ε_{zx} :

$$[0025] \quad \varepsilon_{zx} = \frac{\Delta x_2 - \Delta x_0}{y_{11} - y_{10}}$$

[0026] 路径L₁₃上各测点Y坐标偏差值为 $\Delta y_3 = y_{y11} - y_{1y}$, 比较其与路径L₁₄上各测点Y坐标偏差值 Δy_4 , 求出测量范围内Y轴在XY平面内的偏摆角度误差 ε_{zy} :

$$[0027] \quad \varepsilon_{zy} = \frac{\Delta y_3 - \Delta y_4}{x_{11} - x_{10}}$$

[0028] 对路径L₁₀和路径L₁₄上辨识得到的坐标偏差进行分析, 需要消除角度误差影响才能将耦合在其中的定位误差和直线度误差辨识出来, 对路径L₁₀而言, 得到X轴的定位误差 δ_{xx} 和Y向直线度误差 δ_{yx} :

$$[0029] \quad \delta_{xx} = \Delta x_0 + \varepsilon_{zx} x_{10}$$

$$[0030] \quad \delta_{yx} = \Delta y_0 - \varepsilon_{zx} y_{1x}$$

[0031] 同理消除路径L₁₄上的角度误差得到Y轴的定位误差 δ_{yy} 和X向直线度误差 δ_{xy} :

$$[0032] \quad \delta_{xy} = \Delta x_4 + \varepsilon_{zy} y_{1y}$$

$$[0033] \quad \delta_{yy} = \Delta y_4 - \varepsilon_{zy} x_{10};$$

[0034] 3) 在XOZ平面II内按照规划路径进行与XOY平面I内类似的测量和辨识, 得到XZ轴间的垂直度误差 S_{xz} , X轴在XZ平面内的俯仰角度误差 ε_{yx} , Z轴在XZ平面内的偏摆角度误差 ε_{yz} , Z轴的定位误差 δ_{zz} , X轴的Z向直线度误差 δ_{zx} , Z轴的X向直线度误差 δ_{xz} ;

[0035] 4) 在YOZ平面III内按照规划路径进行与XOY平面I内类似的测量和辨识, 得到YZ轴间的垂直度误差 S_{yz} , Y轴在YZ平面内的俯仰角度误差 ε_{xy} , Z轴在YZ平面内的俯仰角度误差 ε_{xz} , Y轴的Z向直线度误差 δ_{yz} , Z轴的Y向直线度误差 δ_{zy} ;

[0036] 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:

$$[0037] \quad \begin{cases} \Delta x = -\delta_{xx} - \delta_{xy} + \delta_{xz} - y\varepsilon_{zx} + y\varepsilon_{zz} + z\varepsilon_{yz} + yS_{xy} - zS_{xz} + y_0(\varepsilon_{zx} + \varepsilon_{zy} - \varepsilon_{zz}) \\ \quad \quad \quad - z_0(\varepsilon_{yx} + \varepsilon_{yy} + \varepsilon_{yz}) \\ \Delta y = -\delta_{yx} - \delta_{yy} + \delta_{yz} - x\varepsilon_{zz} - z\varepsilon_{xz} - zS_{yz} - x_0(\varepsilon_{zx} + \varepsilon_{zy} - \varepsilon_{zz}) + z_0(\varepsilon_{xx} + \varepsilon_{xy} - \varepsilon_{xz}) \\ \Delta z = -\delta_{zx} - \delta_{zy} + \delta_{zz} + y\varepsilon_{xx} + x\varepsilon_{yz} - y\varepsilon_{xz} + x_0(\varepsilon_{yx} + \varepsilon_{yy} - \varepsilon_{yz}) - y_0(\varepsilon_{xx} + \varepsilon_{xy} - \varepsilon_{xz}) \end{cases}$$

[0038] x_0, y_0, z_0 为对应三个测量平面内基准点A_I, A_{II}, A_{III}在机床工件坐标系下的坐标,

[0039] 工件坐标系原点O为误差原点;

[0040] 在三个测量平面上对各轴测量范围内具有重合段的公共区域进行滚转误差辨识, 在XOY测量平面I, 由路径L₁₁的两次测量得到误差值 Δx 和 Δy ; 误差模型中 $\Delta z = 0$, 得到:

$$[0041] \quad \begin{cases} \Delta x = -\delta_{xx} - \delta_{xy} + \delta_{xz} - y\varepsilon_{zx} + y\varepsilon_{zz} + yS_{xy} + y_0(\varepsilon_{zx} + \varepsilon_{zy} - \varepsilon_{zz}) - z_0(\varepsilon_{yx} + \varepsilon_{yy} + \varepsilon_{yz}) \\ \Delta y = -\delta_{yx} - \delta_{yy} + \delta_{yz} - x\varepsilon_{zz} - x_0(\varepsilon_{zx} + \varepsilon_{zy} - \varepsilon_{zz}) + z_0(\varepsilon_{xx} + \varepsilon_{xy} - \varepsilon_{xz}) \end{cases}$$

[0042] 在XOZ测量平面II, 由路径L₂₁的两次测量得到误差值 Δx 和 Δz ; 误差模型中 $\Delta y = 0$, 得到:

$$[0043] \quad \begin{cases} \Delta x = -\delta_{xx} - \delta_{xy} + \delta_{xz} + z\varepsilon_{yz} - zS_{xz} + y_0(\varepsilon_{zx} + \varepsilon_{zy} - \varepsilon_{zz}) - z_0(\varepsilon_{yx} + \varepsilon_{yy} + \varepsilon_{yz}) \\ \Delta z = -\delta_{zx} - \delta_{zy} + \delta_{zz} + x\varepsilon_{yz} + x_0(\varepsilon_{yx} + \varepsilon_{yy} - \varepsilon_{yz}) - y_0(\varepsilon_{xx} + \varepsilon_{xy} - \varepsilon_{xz}) \end{cases}$$

[0044] 在YOZ测量平面III, 由路径L₃₁的两次测量得到误差值 Δy 和 Δz ; 误差模型中 $\Delta x = 0$, 得到:

$$[0045] \quad \begin{cases} \Delta y = -\delta_{yx} - \delta_{yy} + \delta_{yz} - z\varepsilon_{xz} - zS_{yz} - x_0(\varepsilon_{zx} + \varepsilon_{zy} - \varepsilon_{zz}) + z_0(\varepsilon_{xx} + \varepsilon_{xy} - \varepsilon_{xz}) \\ \Delta z = -\delta_{zx} - \delta_{zy} + \delta_{zz} + y\varepsilon_{xx} - y\varepsilon_{xz} + x_0(\varepsilon_{yx} + \varepsilon_{yy} - \varepsilon_{yz}) - y_0(\varepsilon_{xx} + \varepsilon_{xy} - \varepsilon_{xz}) \end{cases}$$

[0046] 对于上述三个测量平面上的三条测量线,在其重合区域将对应位置点在不同平面的测量方程联立,三个平面共计6个误差模型方程,代入已经测量辨识得到的X、Y、Z轴的定位误差、直线度误差、垂直度误差、俯仰偏摆角度误差和基准点坐标值,则方程中只包含3项未知数,利用最小二乘法拟合求出最满足方程条件的解,得到机床的三项滚转角度误差 ε_{xx} , ε_{yy} , ε_{zz} ;

[0047] 对于其他类型的机床,根据求得的综合误差模型,采用相同方法也能够辨识得到滚转角度误差;

[0048] 6) 辨识得到的各项几何误差是离散的误差数据点,对每项几何误差项进行参数化建模,采用正交多项式拟合的方法得到每项几何误差的误差曲线,最终实现空间几何误差的全部辨识过程。

[0049] 所述的步骤1)的测量路径规划中,每个测量平面内的测量路径不必固定从坐标原点开始,利用各测量平面的路径重合段进行辨识,通过基准点距各坐标轴的距离进行坐标位置的转换。

[0050] 与现有技术相比,本发明具有以下有益效果:

[0051] 本发明仅使用平面光栅一种测量仪器,不必采用多种仪器配合使用,降低了测量过程的复杂度;本发明通过在三个测量平面仅分别进行一次规划轨迹测量,即可辨识得到空间内全部21项几何误差,简化了测量过程,提高了测量效率;本发明提出的测量轨迹简单,机床仅需要进行基本的单轴移动和简单的对角线移动,减小了机床控制误差的引入,提高了测量精度;本发明在每个平面的测量不需要平面光栅限制在固定的安装位置,可以通过参考坐标系下的初始坐标的改变使用当前安装位置的测量数据建立空间误差模型,优化了测量过程,同时减少了因限制在固定位置引起的安装误差的累积。

附图说明

[0052] 图1是本发明的测量轨迹示意图。

[0053] 图2是本发明的测量辨识流程图。

[0054] 图3是本发明垂直度误差辨识示意图。

[0055] 图4是本发明定位误差和直线度误差辨识示意图。

[0056] 图5是本发明俯仰和偏摆角度误差辨识示意图。

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] 一种基于平面光栅的三面五线机床空间几何误差测量辨识方法,包括以下步骤:

[0059] 1) 参照图1,在XOY、XOZ、YOZ三个测量平面内,分别在平面光栅的测量范围内设计规划测量路径;

[0060] 针对XOY平面I, $A_I(x_{10}, y_{10}, z_0)$ 为测量平面基准点,在平面光栅测量范围内划定测量路径,路径端点为 $A_I(x_{10}, y_{10}, z_0)$ 、 $B_I(x_{11}, y_{10}, z_0)$ 、 $C_I(x_{11}, y_{11}, z_0)$ 、 $D_I(x_{10}, y_{11}, z_0)$;从 A_I 沿 L_{10} 运动至 B_I ,从 B_I 沿 L_{11} 运动至 D_I ,从 D_I 沿 L_{12} 运动至 C_I ,从 C_I 沿 L_{13} 运动至 B_I ,从 B_I 沿 L_{11} 运动至 D_I ,最

后从D_I沿L₁₄运动至A_I;

[0061] 同理针对XOZ平面Ⅱ, A_Ⅱ(x₂₀, y₀, z₂₀)为测量平面基准点, 划定路径, 路径端点为A_Ⅱ(x₂₀, y₀, z₂₀)、B_Ⅱ(x₂₁, y₀, z₂₀)、C_Ⅱ(x₂₁, y₀, z₂₁)、D_Ⅱ(x₂₀, y₀, z₂₀); 从A_Ⅱ沿L₂₀运动至B_Ⅱ, 从B_Ⅱ沿L₂₁运动至D_Ⅱ, 从D_Ⅱ沿L₂₂运动至C_Ⅱ, 从C_Ⅱ沿L₂₃运动至B_Ⅱ, 从B_Ⅱ沿L₂₁运动至D_Ⅱ, 最后从D_Ⅱ沿L₂₄运动至A_Ⅱ;

[0062] 同理针对YOZ平面Ⅲ, A_Ⅲ(x₀, y₃₀, z₃₀)为测量平面基准点, 划定路径, 路径端点为A_Ⅲ(x₀, y₃₀, z₃₀)、B_Ⅲ(x₀, y₃₁, z₃₀)、C_Ⅲ(x₀, y₃₁, z₃₁)、D_Ⅲ(x₀, y₃₀, z₃₁); 从A_Ⅲ沿L₃₀运动至B_Ⅲ, 从B_Ⅲ沿L₃₁运动至D_Ⅲ, 从D_Ⅲ沿L₃₂运动至C_Ⅲ, 从C_Ⅲ沿L₃₃运动至B_Ⅲ, 从B_Ⅲ沿L₃₁运动至D_Ⅲ, 最后从D_Ⅲ沿L₃₄运动至A_Ⅲ;

[0063] 2) 参照图2, 对XOY平面I的各项误差进行辨识:

[0064] 先在XOY测量平面安装平面光栅, 进行误差辨识, 以路径L₁₀和路径L₁₄为基准线, 对路径L₁₀和路径L₁₄进行分析得到XY的垂直度误差, 具体辨识原理参照图3, 实际测得的路径L₁₀和路径L₁₄的趋势线是与规划迹存在偏转角度的倾斜直线, 根据多个测点的测值, 采用最小二乘法拟合求出路径L₁₀和路径L₁₄的趋势线: L_{0y}=a₀x+b₀和L_{4x}=a₄y+b₄。可求得:

$$[0065] \quad a_0 = \frac{(\sum x_i^2)(\sum y_i) - (\sum x_i)(\sum x_i y_i)}{N(\sum x_i^2) - (\sum x_i)^2}, \quad b_0 = \frac{N(\sum x_i y_i) - (\sum x_i)(\sum y_i)}{N(\sum x_i^2) - (\sum x_i)^2}$$

$$[0066] \quad a_4 = \frac{(\sum y_i^2)(\sum x_i) - (\sum y_i)(\sum x_i y_i)}{N(\sum y_i^2) - (\sum y_i)^2}, \quad b_4 = \frac{N(\sum x_i y_i) - (\sum x_i)(\sum y_i)}{N(\sum y_i^2) - (\sum y_i)^2}$$

[0067] 式中(x_i, y_i)为测量各点的实际坐标值;

[0068] 利用趋势线斜率a₀, a₄, 即可求得两条趋势线与X轴和Y轴的倾角α_x, α_y ∈ [0, π], 从而求得XY轴间的垂直度误差为:

$$[0069] \quad \alpha_x = \tan^{-1} a_0, \quad \alpha_y = \tan^{-1} a_4$$

$$[0070] \quad S_{xy} = -\frac{\pi}{2} + \alpha_y - \alpha_x$$

[0071] 至此可在XOY平面辨识得到XY轴间垂直度误差S_{xy};

[0072] 参照图4, 辨识得到垂直度误差后, 将路径L₁₀和路径L₁₄的趋势线旋转至平行于X轴和Y轴, 即将耦合的垂直度误差影响消除, 得到新的曲线L₁₀=L_{0y}-a₀x和L₁₄=L_{4x}-a₄y, 此时各点坐标为(x_{x10}, y_{x10}); 对路径L₁₀曲线, 其理论坐标值为(x_{1x}, y₁₀), 则可得X轴各点的定位误差为Δx₀=x_{x10}-x_{1x}, 在Y方向的直线度误差为Δy₀=y_{x10}-y₁₀, 对路径L₁₄同理可得Y轴各点的定位误差为Δy₄=y_{y10}-y_{1y}, Δx₄=x_{y10}-x₁₀;

[0073] 按照相同方法对路径L₁₂进行处理, 得到路径L₁₂上实际测值与理论坐标比较, 得到偏差值(Δx₂, Δy₂), 与路径L₁₀上对应各点偏差值(Δx₀, Δy₀)的x坐标进行比较, 则有:

$$[0074] \quad \Delta x_2 - \Delta x_0 = (y_{11} - y_{10}) \varepsilon_{zx}$$

[0075] 参照图5, 通过对测量路径上的全部点进行相同操作, 即可得到测量范围内X轴在XY平面内的角度误差ε_{zx},

$$[0076] \quad \varepsilon_{zx} = \frac{\Delta x_2 - \Delta x_0}{y_{11} - y_{10}}$$

[0077] 同理可对路径L₁₃和路径L₁₄进行相同操作, 即可辨识得到测量范围内Y轴在XY平面内的角度误差ε_{zy}, 至此可在XOY平面辨识得到X轴和Y轴各一项角度误差(非滚转误差);

[0078] 对于路径L₁₀和路径L₁₄上辨识得到的定位误差和直线度误差,需要消除角度误差影响才能得到X轴的定位误差 δ_{xx} 和Y向直线度误差 δ_{yx} ,对路径L₁₀而言:

$$[0079] \quad \delta_{xx} = \Delta x_0 + \varepsilon_{zx}x_{10}$$

$$[0080] \quad \delta_{yx} = \Delta y_0 - \varepsilon_{zx}y_{1x}$$

[0081] 同理消除路径L₁₄上的角度误差得到Y轴的定位误差 δ_{yy} 和X向直线度误差 δ_{xy} :

$$[0082] \quad \delta_{xy} = \Delta x_4 + \varepsilon_{zy}y_{1y}$$

$$[0083] \quad \delta_{yy} = \Delta y_4 - \varepsilon_{zy}x_{10}$$

[0084] 至此可在XOY平面辨识得到X轴的定位误差 δ_{xx} 和Y向直线度误差 δ_{yx} 以及Y轴的定位误差 δ_{yy} 和X向直线度误差 δ_{xy} ;

[0085] 3) 在XOZ平面Ⅱ内按照规划路径进行与XOY平面I内类似的测量和辨识,得到XZ轴间的垂直度误差 S_{xz} ,X轴在XZ平面内的俯仰角度误差 ε_{yx} ,Z轴在XZ平面内的偏摆角度误差 ε_{yz} ,Z轴的定位误差 δ_{zz} ,X轴的Z向直线度误差 δ_{zx} ,Z轴的X向直线度误差 δ_{xz} ;

[0086] 4) 在YOZ平面Ⅲ内按照规划路径进行与XOY平面I内类似的测量和辨识,得到YZ轴间的垂直度误差 S_{yz} ,Y轴在YZ平面内的俯仰角度误差 ε_{xy} ,Z轴在YZ平面内的俯仰角度误差 ε_{xz} ,Y轴的Z向直线度误差 δ_{yz} ,Z轴的Y向直线度误差 δ_{yz} ;

[0087] 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,进而得到机床的空间综合误差模型:

$$[0088] \quad \begin{cases} \Delta x = -\delta_{xx} - \delta_{xy} + \delta_{xz} - y\varepsilon_{zx} + y\varepsilon_{zz} + z\varepsilon_{yz} + yS_{xy} - zS_{xz} + y_0(\varepsilon_{zx} + \varepsilon_{zy} - \varepsilon_{zz}) \\ \quad \quad \quad - z_0(\varepsilon_{yx} + \varepsilon_{yy} - \varepsilon_{yz}) \\ \Delta y = -\delta_{yx} - \delta_{yy} + \delta_{yz} - x\varepsilon_{zz} - z\varepsilon_{xz} - zS_{yz} - x_0(\varepsilon_{zx} + \varepsilon_{zy} - \varepsilon_{zz}) + z_0(\varepsilon_{xx} + \varepsilon_{xy} - \varepsilon_{xz}) \\ \Delta z = -\delta_{zx} - \delta_{zy} + \delta_{zz} + y\varepsilon_{xx} + x\varepsilon_{yz} - y\varepsilon_{xz} + x_0(\varepsilon_{yx} + \varepsilon_{yy} - \varepsilon_{yz}) - y_0(\varepsilon_{xx} + \varepsilon_{xy} - \varepsilon_{xz}) \end{cases}$$

[0089] x_0, y_0, z_0 为对应三个测量平面内基准点A_I, A_{II}, A_{III}在机床工件坐标系下的坐标,

[0090] 工件坐标系原点O为误差原点;

[0091] 通过对三个平面的测量结果进行上述过程,已经辨识得到垂直度误差、每根轴的非滚转角度误差、螺距误差、直线度误差,在三个测量平面上对各轴测量范围内具有重合段的公共区域进行滚转误差辨识,在XOY测量平面I,由路径L₁₁的两次测量得到误差值 Δx 和 Δy ;误差模型中 $\Delta z = 0$,可以得到:

$$[0092] \quad \begin{cases} \Delta x = -\delta_{xx} - \delta_{xy} + \delta_{xz} - y\varepsilon_{zx} + y\varepsilon_{zz} + yS_{xy} + y_0(\varepsilon_{zx} + \varepsilon_{zy} - \varepsilon_{zz}) - z_0(\varepsilon_{yx} + \varepsilon_{yy} + \varepsilon_{yz}) \\ \Delta y = -\delta_{yx} - \delta_{yy} + \delta_{yz} - x\varepsilon_{zz} - x_0(\varepsilon_{zx} + \varepsilon_{zy} - \varepsilon_{zz}) + z_0(\varepsilon_{xx} + \varepsilon_{xy} - \varepsilon_{xz}) \end{cases}$$

[0093] 在XOZ测量平面Ⅱ,由路径L₂₁的两次测量得到误差值 Δx 和 Δz ;误差模型中 $\Delta y = 0$,得到:

$$[0094] \quad \begin{cases} \Delta x = -\delta_{xx} - \delta_{xy} + \delta_{xz} + z\varepsilon_{yz} - zS_{xz} + y_0(\varepsilon_{zx} + \varepsilon_{zy} - \varepsilon_{zz}) - z_0(\varepsilon_{yx} + \varepsilon_{yy} + \varepsilon_{yz}) \\ \Delta z = -\delta_{zx} - \delta_{zy} + \delta_{zz} + x\varepsilon_{yz} + x_0(\varepsilon_{yx} + \varepsilon_{yy} - \varepsilon_{yz}) - y_0(\varepsilon_{xx} + \varepsilon_{xy} - \varepsilon_{xz}) \end{cases}$$

[0095] 在YOZ测量平面Ⅲ,由路径L₃₁的两次测量得到误差值 Δy 和 Δz ;误差模型中 $\Delta x = 0$,得到:

$$[0096] \quad \begin{cases} \Delta y = -\delta_{yx} - \delta_{yy} + \delta_{yz} - z\varepsilon_{xz} - zS_{yz} - x_0(\varepsilon_{zx} + \varepsilon_{zy} - \varepsilon_{zz}) + z_0(\varepsilon_{xx} + \varepsilon_{xy} - \varepsilon_{xz}) \\ \Delta z = -\delta_{zx} - \delta_{zy} + \delta_{zz} + y\varepsilon_{xx} - y\varepsilon_{xz} + x_0(\varepsilon_{yx} + \varepsilon_{yy} - \varepsilon_{yz}) - y_0(\varepsilon_{xx} + \varepsilon_{xy} - \varepsilon_{xz}) \end{cases}$$

[0097] 对于上述三个测量平面上的三条测量线,在其重合区域将对应位置点在不同平面的测量方程联立,三个平面共计6个误差模型方程,代入已经测量辨识得到的X、Y、Z轴的定

位误差、直线度误差、垂直度误差、俯仰偏摆角度误差和基准点坐标值,则方程中只包含3项未知数,理论上而言所有方程可同时成立满足条件,但由于实际测量过程中除几何误差外还存在伺服误差等其他误差项的影响,联立的误差方程可能不一定同时成立,因此利用最小二乘法拟合求出最满足方程条件的解,即机床的三项滚转角度误差 $\varepsilon_{xx}, \varepsilon_{yy}, \varepsilon_{zz}$;

[0098] 对于其他类型的机床,根据求得的综合误差模型,采用相同方法也能够辨识得到滚转角度误差;

[0099] 6) 辨识得到的各项几何误差值是离散的误差数据点,对每项几何误差项进行参数化建模,采用正交多项式拟合的方法得到每项几何误差的误差曲线,至此得到三轴机床空间21项几何误差项全部辨识结果,完成基于平面光栅的三面五线机床空间几何误差测量辨识。

[0100] 以上内容是结合具体的优选实施方式对本发明所作的进一步详细说明,不能认定本发明的具体实施方式仅限于此,对于本发明所属技术领域的普通技术人员来说,在不脱离本发明构思的前提下,还可以做出若干简单的推演或替换,都应当视为属于本发明由所提交的权利要求书确定专利保护范围。

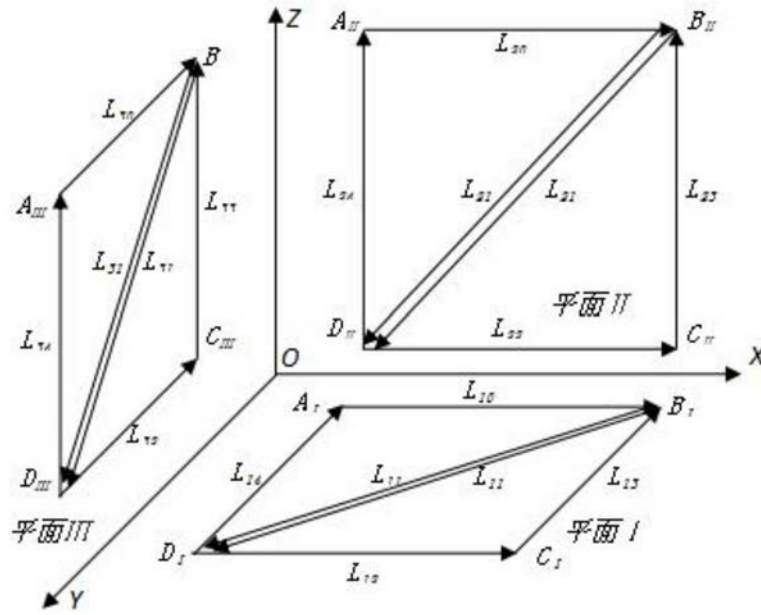


图1

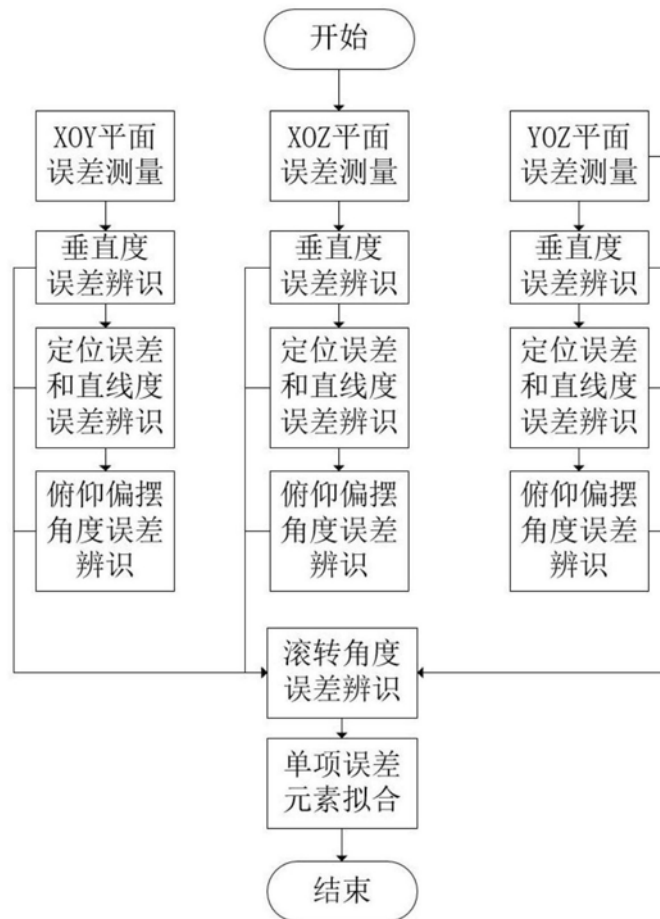


图2

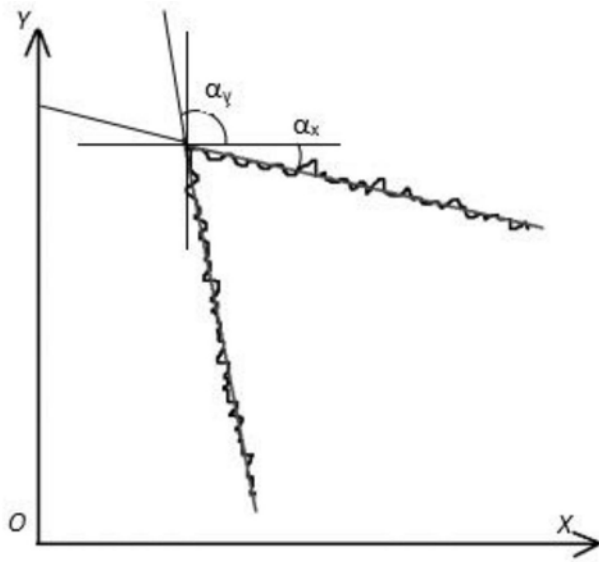


图3

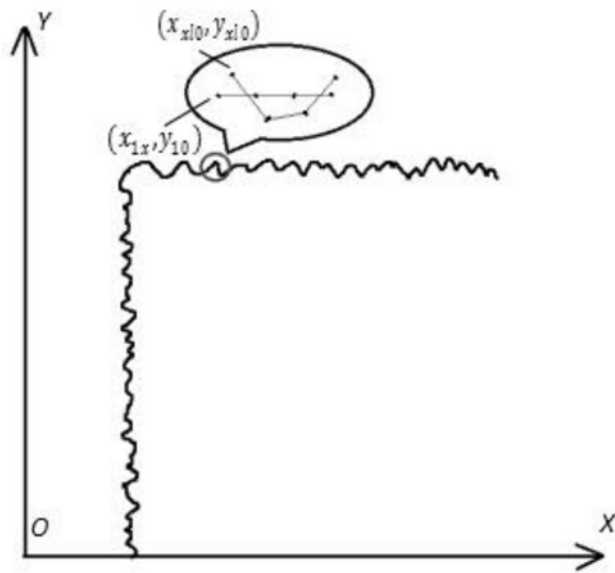


图4

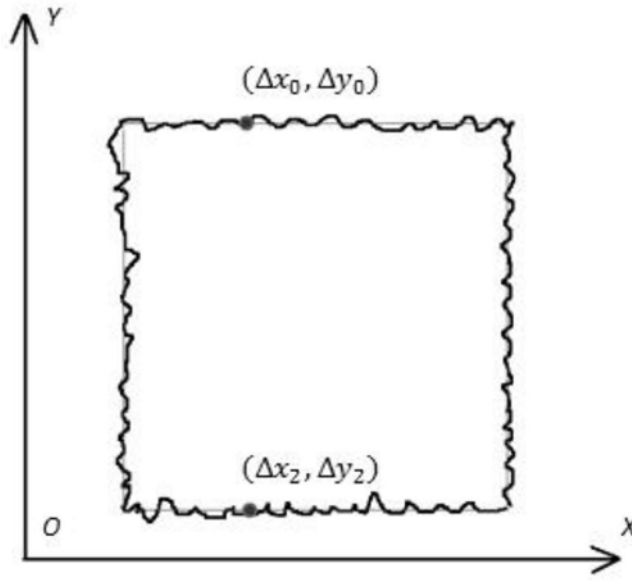


图5