



(12) 发明专利申请

(10) 申请公布号 CN 102757186 A

(43) 申请公布日 2012. 10. 31

(21) 申请号 201210267218. 4

(22) 申请日 2012. 07. 30

(71) 申请人 中国人民解放军国防科学技术大学

地址 410073 湖南省长沙市砚瓦池正街 47  
号中国人民解放军国防科学技术大学  
机电工程与自动化学院机电工程系

(72) 发明人 李圣怡 戴一帆 解旭辉 周林  
任虹宇 袁征

(74) 专利代理机构 湖南兆弘专利事务所 43008  
代理人 赵洪 周长清

(51) Int. Cl.  
C03C 23/00 (2006. 01)

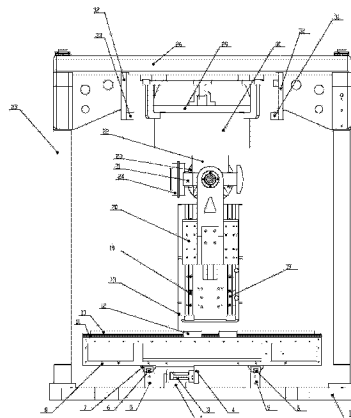
权利要求书 3 页 说明书 8 页 附图 4 页

(54) 发明名称

一种高精度高动态性能的五轴离子束加工装置及其控制方法

(57) 摘要

一种高精度高动态性能的五轴离子束加工装置及其控制方法, 该装置包括数控系统、机架组件、X 轴直线运动组件、Y 轴直线运动组件、Z 轴直线运动组件、A 轴直驱组件、B 轴直驱组件、工件输送组件、离子源, 通过五个方向上的驱动实现了离子源的精确运动。该方法为: 沿光学镜面法向加工时, 在工件坐标系内光学镜面点的位姿经旋转变化转换为机床坐标系内坐标点, 并由法向等靶距加工, 解算出机床各轴的运动位姿; 再采用 S 型速度加工模式, 解算出机床各轴在各个加工点的速度。本发明具有运动平稳、刚性好、精度高、动态性能高等优点。



1. 一种高精度高动态性能的五轴离子束加工装置,其特征在于:包括数控系统(37)、机架组件、X轴直线运动组件、Y轴直线运动组件、Z轴直线运动组件、A轴直驱组件、B轴直驱组件、工件输送组件、离子源(22),所述X轴直线运动组件安装于机架组件上,所述Y轴直线运动组件安装于X轴直线运动组件上并在X轴直线运动组件的驱动下沿X轴做直线运动,所述Z轴直线运动组件安装于Y轴直线运动组件上并在Y轴直线运动组件的驱动下沿Y轴做直线运动,所述A轴直驱组件安装于Z轴直线运动组件上并在Z轴直线运动组件的驱动下沿Z轴做直线运动,所述B轴直驱组件安装于A轴直驱组件上并用来驱动离子源(22),所述离子源(22)通过A轴直驱组件、B轴直驱组件驱动绕X、Y轴旋转。

2. 根据权利要求1所述的高精度高动态性能的五轴离子束加工装置,其特征在于:所述机架组件包括底板(1)、两根以上的立柱(25)、前后横梁(26)以及左右横梁(27),所述两根以上的立柱(25)固定在底板(1)的上方,所述前后横梁(26)和左右横梁(27)固定于立柱(25)的上方,所述前后横梁(26)和左右横梁(27)上设有用来支撑工件夹具(29)的工件夹具支撑梁(28)。

3. 根据权利要求2所述的高精度高动态性能的五轴离子束加工装置,其特征在于:还包括大真空室(36)、小真空室(34)以及大真空室(36)与小真空室(34)之间的闸板阀(35),所述底板(1)安装于大真空室(36)内,夹持有工件(30)的所述工件夹具(29)通过小真空室(34)、闸板阀(35)后进入大真空室(36)并定位在大真空室(36)中的工件夹具支撑梁(28)上。

4. 根据权利要求1或2或3所述的高精度高动态性能的五轴离子束加工装置,其特征在于:所述X轴直线运动组件包括X轴直线电机安装座(2)、X轴直线电机(3)、X轴导轨座(5)、X轴直线导轨(6)、X轴直线导轨滑块(7),所述X轴导轨座(5)固定于机架组件的底部,每个X轴导轨座(5)上均设有一X轴直线导轨(6),所述X轴直线导轨滑块(7)滑设于X轴直线导轨(6)上;所述X轴直线电机(3)通过X轴直线电机安装座(2)固定于机架组件上并用来实现X轴方向上的直线运动。

5. 根据权利要求4所述的高精度高动态性能的五轴离子束加工装置,其特征在于:所述Y轴直线运动组件包括Y轴导轨座(8)、Y轴直线导轨(11)、Y轴直线导轨滑块(12)、Y轴直线电机(10),所述X轴直线导轨滑块(7)安装于Y轴导轨座(8)的底部,所述Y轴导轨座(8)的顶部设有两根以上的Y轴直线导轨(11),所述Y轴直线导轨滑块(12)滑设于Y轴直线导轨(11)上,所述Y轴直线电机(10)通过Y轴直线电机安装座(9)固定于Y轴导轨座(8)上来实现Y轴方向上的直线运动。

6. 根据权利要求5所述的高精度高动态性能的五轴离子束加工装置,其特征在于:所述Z轴直线运动组件包括Z轴平台(13)、Z轴旋转电机(14)、Z轴电机座(15)、Z轴滚珠丝杠(16)、Z轴丝杠螺母(17)、Z轴丝杠浮动支撑(18)、Z轴直线电机导轨及滑块(19),所述Y轴直线导轨滑块(12)安装于Z轴平台(13)的底部,所述Z轴旋转电机(14)的输出端与Z轴滚珠丝杠(16)相连并驱动Z轴滚珠丝杠(16)转动,所述Z轴丝杠螺母(17)通过螺纹配合安装于Z轴滚珠丝杠(16)上并与Z轴平台(13)相连。

7. 根据权利要求6所述的高精度高动态性能的五轴离子束加工装置,其特征在于:所述A轴直驱组件包括A轴支撑座(20)和A轴直驱电机(23),所述A轴支撑座(20)位于Z轴直线电机导轨及滑块(19)上;所述B轴直驱组件包括B轴支撑座(21)和B轴直驱电机

(24),所述 B 轴支撑座 (21) 位于 A 轴支撑座 (20) 上,所述 A 轴直驱电机 (23) 用来驱动 A 轴支撑座 (20) 和 B 轴支撑座 (21);所述离子源 (22) 固定于 B 轴支撑座 (21) 上,所述 B 轴直驱电机 (24) 用来驱动 B 轴支撑座 (21) 和离子源 (22)。

8. 一种高精度高动态性能的五轴离子束加工控制方法,其特征在于:沿光学镜面法向加工时,在工件坐标系内光学镜面点的位姿经旋转变化转换为机床坐标系内坐标点,并由法向等靶距加工,解算出机床各轴的运动位姿;再采用 S 型速度加工模式,解算出机床各轴在各个加工点的速度;结合上述求解出各点的速度,进行加工。

9. 根据权利要求 8 所述的高精度高动态性能的五轴离子束加工控制方法,其特征在于,解算工件位姿坐标的步骤为:

针对某光学镜面  $z = f(x, y)$ ,测得面形误差为  $\gamma(x, y)$ ,根据面形误差选定某一束径去除函数  $p(x, y)$ ,结合机床动态性能,通过正则化算法求解光学镜面各点沿法向的驻留时间为  $t(x, y)$ ,并满足仿真残差最小;假设去除函数  $p(x, y)$  的靶距是  $l_{ba}$ ,离子源顶部到离子源 (22) 旋转轴中心距离为  $l_{中心距}$ ,加工过程中,为满足法向等靶距加工,镜面上各点距离子源旋转轴中心距离为  $l = l_{ba} + l_{中心距}$ ;

设工件坐标系为  $xoy$ ,机床坐标系为  $XOY$ ,建立二坐标系的拓补结构,并求解出二坐标的齐次变换矩阵  $T$ ,光学镜面面形为  $z = f(x, y)$ ,镜面上某点  $Q_{ki}$  矢量在两坐标系中的矢量表示分别为  $r_{ki}$  和  $r_{kj}$ ,则两者之间关系为:

$$r_{kj} = Tr_{ki} \quad (1)$$

式中  $r_{ki}$  为  $Q_{ki}$  点在  $z = f(x, y)$  曲线上的法向量, $T$  为经拓补结构求解的  $xoy$  到  $XOY$  的齐次坐标变换矩阵;

通过上式 (1) 可求得工件某加工点在机床坐标系内的矢量,即加工时离子源的姿态;

假设  $Q_{ki}$  点在工件坐标系  $xoy$  中的齐次坐标为  $Q_{ki}(x_{ki}, y_{ki}, z_{ki}, 1)$ ,在机床坐标系为  $XOY$  中的齐次坐标为  $Q_{kj}(x_{kj}, y_{kj}, z_{kj}, 1)$ ,加工  $Q_{kj}$  点时离子源 (22) 在机床坐标系  $XOY$  中坐标为  $P_{kj}(x_{kj}, y_{kj}, z_{kj}, 1)$ ,其满足下式 (2) 的关系:

$$\begin{cases} Q_{kj} = TQ_{ki} \\ |P_{kj}Q_{kj}| = l \\ P_{kj}Q_{kj} = m_j r_{kj} \end{cases} \quad (2)$$

其中  $m_j$  为非 0 常数,通过式 (2) 可求解出加工  $Q_{kj}$  时离子源齐次坐标  $P_{kj}(x_{kj}, y_{kj}, z_{kj}, 1)$ ;通过式 (1) 和 (2) 求解出加工光学镜面各点时离子源矢量方向  $r_{kj}$  以及离子源轴中心的坐标  $P_{kj}(x_{kj}, y_{kj}, z_{kj}, 1)$ 。

10. 根据权利要求 9 所述的高精度高动态性能的五轴离子束加工控制方法,其特征在于,所述 S 型速度加工模式的步骤为:

离子源 (22) 在加工离散间隔为  $s$  的工件过程中,正常完成进给运动,即先作加速度匀速增加的加速运动,后作加速度匀速减小的加速运动,再匀速运动,其中加速度匀速增加系数  $f$  应与数控系统的设置值一样;

假设加工镜面上  $Q_{kj}(x_{kj}, y_{kj}, z_{kj}, 1)$  点时离子源 (22) 的坐标为  $P_{kj}(x_{kj}, y_{kj}, z_{kj}, 1)$ ,运动速度为  $v_k$ ,矢量方向为  $r_{kj}$ ,由上式 (1) 和 (2) 就可得到加工镜面上  $Q_{(k+1)j}(x_{(k+1)j}, y_{(k+1)j}, z_{(k+1)j}, 1)$  点时离子源 (22) 运动到目标点处矢量方向为  $r_{(k+1)j}$ ,坐标为  $P_{(k+1)j}(x_{(k+1)j}, y_{(k+1)j}, z_{(k+1)j}, 1)$ ,

1), 运动过程驻留时间为  $t_{k+1}$ ;

直线运动解算速度时, 在  $k$  点与  $k+1$  点运动期间, 加速运动过程中速度由初始速度  $v_k$  加速到  $v_{k+1}$ , 行程为  $S_1$ , 所花时间为  $t_1$ ; 在匀速运动期间行程为  $S_2$ , 所花时间为  $t_2$ ;

设  $\overline{P_k P_{(k+1)j}} = s_k$ , 即加工工件上相邻点时离子源 (22) 所走位移, 则运动过程中位移与时间需满足关系式 (3):

$$\begin{cases} s_k = s_1 + s_2 \\ t_k = t_1 + t_2 \end{cases} \quad (3)$$

根据 S 型速度模式, 离子源 (22) 在  $k$  与  $k+1$  点运动时速度满足式 (4):

$$v = \begin{cases} v_k + f \cdot t^2 / 2 & 0 \leq t \leq t_1 / 2 \\ v_k - f \cdot t_1^2 / 4 + f \cdot t_1 \cdot t - ft^2 / 2 & t_1 / 2 \leq t \leq t_1 \end{cases} \quad (4)$$

运行位移满足式 (5):

$$\begin{cases} s_k = v_k \cdot t_1 + f \cdot t_1^3 / 8 \\ s_2 = v_{k+1} \cdot t_2 \end{cases} \quad (5)$$

其中  $v(0) = v_k$ ,  $v(t_1) = v_{k+1}$ , 联立 (3)、(4)、(5) 求解加工  $Q_{(k+1)j}$  点速度为  $v_{k+1}$ ; 其中加工初速度以初始点驻留时间  $t_{\text{初始}}$  的平均速度计算, 即  $v_{\text{初始}} = S/t_{\text{初始}}$ ;

旋转运动解算时: 在加工  $Q_{kj}(x_{kj}, y_{kj}, z_{kj}, 1)$  点矢量为  $r_{kj}$ , 离子源 (22) 的旋转速度为  $v_{rk}$ , 运行到下一点  $Q_{(k+1)j}(x_{(k+1)j}, y_{(k+1)j}, z_{(k+1)j}, 1)$  时矢量为  $r_{(k+1)j}$ , 总的旋转角度为  $\theta_{k+1} = \arccos\left(\frac{r_{(k+1)j} \cdot r_{kj}}{|r_{(k+1)j}| \cdot |r_{kj}|}\right)$ , 根据 S 型速度加工模式求解出在驻留时间  $t_{k+1}$  范围内运行到矢量  $r_{(k+1)j}$  时的速度  $v_{r(k+1)}$ 。

## 一种高精度高动态性能的五轴离子束加工装置及其控制方法

### 技术领域

[0001] 本发明主要涉及到离子束加工领域,特指一种具有高精度、高动态性能的五轴离子束加工装置及其控制方法。

### 背景技术

[0002] “离子束修形工艺”是在真空环境下、利用离子源发射的离子束轰击光学镜面时发生的物理溅射效应,达到去除光学元件表面材料的目的是。它具有原子量级的加工精度、无边缘效应、去除函数稳定、面形收敛快等优点,进而使得离子束修形工艺成为解决高精度光学镜面、特别是光刻物镜加工的有效方法。

[0003] 在具体应用中,若极紫外光刻的曝光波长是 13.5nm,分配到单个元件的精度要求将达到 0.1nm,其制造技术要求离子束加工具备高的定位精度、动态性能、去除函数分辨率以及稳定性。

[0004] 目前,离子束设备通常采用 X/Y/Z 三轴滚珠丝杠驱动加工装置,但滚珠丝杠驱动机床的加减速性能较低,对变化剧烈的光刻物镜修形时,某些点的驻留时间精确性得不到保证。另有采用 A/B 轴旋转运动方式的结构,但由于采用减速器连接,使得机床运动存在间隙问题。在加工非球面光刻物镜时,每个加工点将会因陡度变化带来去除函数不一致,不能保证修形的精确性。因此,在现有的离子束修形时,驻留时间在机床上的实现,一般采用梯形速度加工模式,该模式能缩短加减速时间,但是机床运行不平稳,长时间运行机床性能会受影响,该问题也是由于机床的滚珠丝杠加速性能较低约束造成的。另外,若光学镜面是非平面,即镜面表面梯度是变化的,则不能应用该模式求解机床的运行速度。

### 发明内容

[0005] 本发明要解决的技术问题就在于:针对现有技术存在的技术问题,本发明提供一种运动平稳、刚性好、精度高、动态性能高的高精度高动态性能的五轴离子束加工装置及其控制方法。

[0006] 为解决上述技术问题,本发明采用以下技术方案:

[0007] 一种高精度高动态性能的五轴离子束加工装置,包括数控系统、机架组件、X 轴直线运动组件、Y 轴直线运动组件、Z 轴直线运动组件、A 轴直驱组件、B 轴直驱组件、工件输送组件、离子源,所述 X 轴直线运动组件安装于机架组件上,所述 Y 轴直线运动组件安装于 X 轴直线运动组件上并在 X 轴直线运动组件的驱动下沿 X 轴做直线运动,所述 Z 轴直线运动组件安装于 Y 轴直线运动组件上并在 Y 轴直线运动组件的驱动下沿 Y 轴做直线运动,所述 A 轴直驱组件安装于 Z 轴直线运动组件上并在 Z 轴直线运动组件的驱动下沿 Z 轴做直线运动,所述 B 轴直驱组件安装于 A 轴直驱组件上并用来驱动离子源,所述离子源通过 A 轴直驱组件、B 轴直驱组件驱动绕 X、Y 轴旋转。

[0008] 作为本发明加工装置的进一步改进:

[0009] 所述机架组件包括底板、两根以上的立柱、前后横梁以及左右横梁,所述两根以上的立柱固定在底板的上方,所述前后横梁和左右横梁固定于立柱的上方,所述前后横梁和左右横梁上设有用来支撑工件夹具的工件夹具支撑梁。

[0010] 该加工装置还包括大真空室、小真空室以及大真空室与小真空室之间的闸板阀,所述底板安装于大真空室内,夹持有工件的所述工件夹具通过小真空室、闸板阀后进入大真空室并定位在大真空室中的工件夹具支撑梁上。

[0011] 所述 X 轴直线运动组件包括 X 轴直线电机安装座、X 轴直线电机、X 轴导轨座、X 轴直线导轨、X 轴直线导轨滑块,所述 X 轴导轨座固定于机架组件的底部,每个 X 轴导轨座上均设有一 X 轴直线导轨,所述 X 轴直线导轨滑块滑设于 X 轴直线导轨上;所述 X 轴直线电机通过 X 轴直线电机安装座固定于机架组件上并用来实现 X 轴方向上的直线运动。

[0012] 所述 Y 轴直线运动组件包括 Y 轴导轨座、Y 轴直线导轨、Y 轴直线导轨滑块、Y 轴直线电机,所述 X 轴直线导轨滑块安装于 Y 轴导轨座的底部,所述 Y 轴导轨座的顶部设有两根以上的 Y 轴直线导轨,所述 Y 轴直线导轨滑块滑设于 Y 轴直线导轨上,所述 Y 轴直线电机通过 Y 轴直线电机安装座固定于 Y 轴导轨座上来实现 Y 轴方向上的直线运动。

[0013] 所述 Z 轴直线运动组件包括 Z 轴平台、Z 轴旋转电机、Z 轴电机座、Z 轴滚珠丝杠、Z 轴丝杠螺母、Z 轴丝杠浮动支撑、Z 轴直线电机导轨及滑块,所述 Y 轴直线导轨滑块安装于 Z 轴平台的底部,所述 Z 轴旋转电机的输出端与 Z 轴滚珠丝杠相连并驱动 Z 轴滚珠丝杠转动,所述 Z 轴丝杠螺母通过螺纹配合安装于 Z 轴滚珠丝杠上并与 Z 轴平台相连。

[0014] 所述 A 轴直驱组件包括 A 轴支撑座和 A 轴直驱电机,所述 A 轴支撑座位于 Z 轴直线电机导轨及滑块上;所述 B 轴直驱组件包括 B 轴支撑座和 B 轴直驱电机,所述 B 轴支撑座位于 A 轴支撑座上,所述 A 轴直驱电机用来驱动 A 轴支撑座和 B 轴支撑座;所述离子源固定于 B 轴支撑座上,所述 B 轴直驱电机用来驱动 B 轴支撑座和离子源。

[0015] 本发明进一步公开了一种高精度高动态性能的五轴离子束加工控制方法,沿光学镜面法向加工时,在工件坐标系内光学镜面点的位姿经旋转变化转换为机床坐标系内坐标点,并由法向等靶距加工,解算出机床各轴的运动位姿;再采用 S 型速度加工模式,解算出机床各轴在各个加工点的速度;结合上述求解出各点的速度,进行加工。

[0016] 作为本发明加工控制方法的进一步改进:

[0017] 解算工件位姿坐标的步骤为:

[0018] 针对某光学镜面  $z = f(x, y)$ ,测得面形误差为  $\gamma(x, y)$ ,根据面形误差选定某一束径去除函数  $p(x, y)$ ,结合机床动态性能,通过正则化算法求解光学镜面各点沿法向的驻留时间为  $t(x, y)$ ,并满足仿真残差最小;假设去除函数  $p(x, y)$  的靶距是  $l_{ba}$ ,离子源顶部到离子源(22)旋转轴中心距离为  $l_{中心距}$ ,加工过程中,为满足法向等靶距加工,镜面上各点距离离子源旋转轴中心距离为  $l = l_{ba} + l_{中心距}$ ;

[0019] 设工件坐标系为  $xoy$ ,机床坐标系为  $XOY$ ,建立二坐标系的拓补结构,并求解出二坐标的齐次变换矩阵  $T$ ,光学镜面面形为  $z = f(x, y)$ ,镜面上某点  $Q_{ki}$  矢量在两坐标系中的矢量表示分别为  $r_{ki}$  和  $r_{kj}$ ,则两者之间关系为:

$$[0020] \quad r_{kj} = Tr_{ki} \quad (1)$$

[0021] 式中  $r_{ki}$  为  $Q_{ki}$  点在  $z = f(x, y)$  曲面上的法向量,  $T$  为经拓补结构求解的  $xoy$  到  $XOY$  的齐次坐标变换矩阵;

[0022] 通过上式 (1) 可求得工件某加工点在机床坐标系内的矢量, 即加工时离子源的姿态;

[0023] 假设  $Q_{ki}$  点在工件坐标系  $xoy$  中的齐次坐标为  $Q_{ki}(x_{ki}, y_{ki}, z_{ki}, 1)$ , 在机床坐标系为  $XOY$  中的齐次坐标为  $Q_{kj}(x_{kj}, y_{kj}, z_{kj}, 1)$ , 加工  $Q_{kj}$  点时离子源 (22) 在机床坐标系  $XOY$  中坐标为  $P_{kj}(x_{kj}, y_{kj}, z_{kj}, 1)$ , 其满足下式 (2) 的关系:

$$[0024] \quad \begin{cases} Q_{kj} = TQ_{ki} \\ \overline{P_{kj}Q_{kj}} = l \\ \overline{P_{kj}Q_{kj}} = m_j r_{kj} \end{cases} \quad (2)$$

[0025] 其中  $m_j$  为非 0 常数, 通过式 (2) 可求解出加工  $Q_{kj}$  时离子源齐次坐标  $P_{kj}(x_{kj}, y_{kj}, z_{kj}, 1)$ ; 通过式 (1) 和 (2) 求解出加工光学镜面各点时离子源矢量方向  $r_{kj}$  以及离子源轴中心的坐标  $P_{kj}(x_{kj}, y_{kj}, z_{kj}, 1)$

[0026] 所述 S 型速度加工模式的步骤为:

[0027] 离子源 (22) 在加工离散间隔为  $s$  的工件过程中, 正常完成进给运动, 即先作加速度匀速增加的加速运动, 后作加速度匀速减小的加速运动, 再匀速运动, 其中加速度匀速增加系数  $f$  应与数控系统的设置值一样;

[0028] 假设加工镜面上  $Q_{kj}(x_{kj}, y_{kj}, z_{kj}, 1)$  点时离子源 (22) 的坐标为  $P_{kj}(x_{kj}, y_{kj}, z_{kj}, 1)$ , 运动速度为  $v_k$ , 矢量方向为  $r_{kj}$ , 由上式 (1) 和 (2) 就可得到加工镜面上  $Q_{(k+1)j}(x_{(k+1)j}, y_{(k+1)j}, z_{(k+1)j}, 1)$  点时离子源 (22) 运动到目标点处矢量方向为  $r_{(k+1)j}$ , 坐标为  $P_{(k+1)j}(x_{(k+1)j}, y_{(k+1)j}, z_{(k+1)j}, 1)$  运动过程驻留时间为  $t_{k+1}$ ;

[0029] 直线运动解算速度时, 在  $k$  点与  $k+1$  点运动期间, 加速运动过程中速度由初始速度  $v_k$  加速到  $v_{k+1}$ , 行程为  $S_1$ , 所花时间为  $t_1$ ; 在匀速运动期间行程为  $S_2$ , 所花时间为  $t_2$ ;

[0030] 设  $\overline{P_{kj}P_{(k+1)j}} = s_k$ , 即加工工件上相邻点时离子源 (22) 所走位移, 则运动过程中位移与时间需满足关系式 (3):

$$[0031] \quad \begin{cases} s_k = s_1 + s_2 \\ t_k = t_1 + t_2 \end{cases} \quad (3)$$

[0032] 根据 S 型速度模式, 离子源 (22) 在  $k$  与  $k+1$  点运动时速度满足式 (4):

$$[0033] \quad v = \begin{cases} v_k + f \cdot t^2 / 2 & 0 \leq t \leq t_1 / 2 \\ v_k - f \cdot t_1^2 / 4 + f \cdot t_1 \cdot t - ft^2 / 2 & t_1 / 2 \leq t \leq t_1 \end{cases} \quad (4)$$

[0034] 运行位移满足式 (5):

$$[0035] \quad \begin{cases} s_k = v_k \cdot t_1 + f \cdot t_1^3 / 8 \\ s_2 = v_{k+1} \cdot t_2 \end{cases} \quad (5)$$

[0036] 其中  $v(0) = v_k$ ,  $v(t_1) = v_{k+1}$ , 联立 (3)、(4)、(5) 求解加工  $Q_{(k+1)j}$  点速度为  $v_{k+1}$ ; 其中加工初速度以初始点驻留时间  $t_{\text{初始}}$  的平均速度计算, 即  $v_{\text{初始}} = s/t_{\text{初始}}$ ;

[0037] 旋转运动解算时: 在加工  $Q_{kj}(x_{kj}, y_{kj}, z_{kj}, 1)$  点矢量为  $r_{kj}$ , 离子源 (22) 的旋转速度为  $v_{rk}$ , 运行到下一点  $Q_{(k+1)j}(x_{(k+1)j}, y_{(k+1)j}, z_{(k+1)j}, 1)$  时矢量为  $r_{(k+1)j}$ , 总的旋转角度为

$\theta_{k+1} = \arccos\left(\frac{r_{(k+1)j} \cdot r_{kj}}{|r_{(k+1)j}| \cdot |r_{kj}|}\right)$ , 根据 S 型速度加工模式求解出在驻留时间  $t_{k+1}$  范围内运行到矢量  $r_{(k+1)j}$

时的速度  $v_{r(k+1)}$ 。

[0038] 与现有技术相比,本发明的优点在于:本发明的高精度高动态性能的五轴离子束加工装置及其控制方法,能够实现 5 个方向的运动,包括 X/Y/Z3 个方向的直线运动和 A/B 轴两个方向的选择运动;进而可以精确的实现离子源与工件的相对位置调整,保证工件表面与离子源光束垂直,从而获得精确的去除函数。本发明同时结合控制系统,可以实现对光刻物镜的表面面形加工。因此,本发明具有运动平稳、刚性好,精度高,动态性能高等特点,为光刻物镜加工提供硬件设备。

## 附图说明

[0039] 图 1 是本发明五轴离子束加工装置的主视结构示意图。

[0040] 图 2 是本发明五轴离子束加工装置的侧视结构示意图。

[0041] 图 3 是本发明五轴离子束加工装置与真空系统的连接结构示意图。

[0042] 图 4 是本发明控制方法中以直线运动解算速度为例在 k 点与 k+1 点运动期间速度的变化示意图。

[0043] 图 5 是本发明控制方法中以直线运动解算速度为例加速度的变化示意图。

[0044] 图 6 是本发明控制方法中解算工件位姿坐标时的流程示意图。

[0045] 图 7 是本发明控制方法中速度分配求解时的流程示意图。

[0046] 图例说明

[0047] 1、底板;2、X 轴直线电机安装座;3、X 轴直线电机;4、连接座;5、X 轴导轨座;6、X 轴直线导轨;7、X 轴直线导轨滑块;8、Y 轴导轨座;9、Y 轴直线电机安装座;10、Y 轴直线电机;11、Y 轴直线导轨;12、Y 轴直线导轨滑块;13、Z 轴平台;14、Z 轴旋转电机;15、Z 轴电机座;16、Z 轴滚珠丝杠;17、Z 轴丝杠螺母;18、Z 轴丝杠浮动支撑;19、Z 轴直线电机导轨及滑块;20、A 轴支撑座;21、B 轴支撑座;22、离子源;23、A 轴直驱电机;24、B 轴直驱电机;25、立柱;26、前后横梁;27、左右横梁;28、工件夹具支撑梁;29、工件夹具;30、工件;31、工件输送导轨支撑板;32、工件输送齿条;33、工件输送导轨;34、小真空室;35、闸板阀;36、大真空室;37、数控系统。

## 具体实施方式

[0048] 以下将结合说明书附图和具体实施例对本发明做进一步详细说明。

[0049] 如图 1、图 2 和图 3 所示,本发明的高精度高动态性能的五轴离子束加工装置,包括数控系统 37、机架组件、X 轴直线运动组件、Y 轴直线运动组件、Z 轴直线运动组件、A 轴直驱组件、B 轴直驱组件、工件输送组件、离子源 22。X 轴直线运动组件安装于机架组件上,Y 轴直线运动组件安装于 X 轴直线运动组件上并在 X 轴直线运动组件的驱动下沿 X 轴做直线运动,Z 轴直线运动组件安装于 Y 轴直线运动组件上并在 Y 轴直线运动组件的驱动下沿 Y 轴做直线运动,A 轴直驱组件安装于 Z 轴直线运动组件上并在 Z 轴直线运动组件的驱动下沿 Z 轴做直线运动,B 轴直驱组件安装于 A 轴直驱组件上并用来驱动离子源 22,离子源 22 通过 A 轴直驱组件、B 轴直驱组件驱动绕 X、Y 轴(正负  $30^{\circ}$ ) 旋转。

[0050] 本发明的五轴离子束加工装置位于真空罐内。机架组件包括底板 1、两根以上的立柱 25、前后横梁 26 以及左右横梁 27,两根以上的立柱 25 固定在底板 1 的上方,前后横梁 26



和左右横梁 27 固定于立柱 25 的上方。前后横梁 26 和左右横梁 27 上设有工件夹具支撑梁 28,即工件夹具支撑梁 28 位于前后横梁 26 和左右横梁 27 之间,工件夹具支撑梁 28 上设有用来夹持工件 30 的工件夹具 29。底板 1 安装于大真空室 36 内,工件 30 与工件夹具 29 通过小真空室 34、闸板阀 35 后进入大真空室 36,定位在大真空室 36 中间的工件夹具支撑梁 28 上。

[0051] X 轴直线运动组件固定于底板 1 上,X 轴直线运动组件包括 X 轴直线电机安装座 2、X 轴直线电机 3、连接座 4、X 轴导轨座 5、X 轴直线导轨 6、X 轴直线导轨滑块 7,两个 X 轴导轨座 5 固定于底板 1 上,每个 X 轴导轨座 5 上均设有一 X 轴直线导轨 6,X 轴直线导轨滑块 7 滑设于 X 轴直线导轨 6 上;X 轴直线电机 3 通过 X 轴直线电机安装座 2 固定于底板 1 上,用来实现 X 轴方向上的直线运动。

[0052] Y 轴直线运动组件包括 Y 轴导轨座 8、Y 轴直线导轨 11、Y 轴直线导轨滑块 12、Y 轴直线电机 10,X 轴直线导轨滑块 7 安装于 Y 轴导轨座 8 的底部,X 轴直线电机 3 与 Y 轴导轨座 8 通过连接座 4 相连,Y 轴导轨座 8 的顶部设有两根以上的 Y 轴直线导轨 11,Y 轴直线导轨滑块 12 滑设于 Y 轴直线导轨 11 上,Y 轴导轨座 Y 轴直线电机 10 通过 Y 轴直线电机安装座 9 固定于 Y 轴导轨座 8 上,用来实现 Y 轴方向上的直线运动。

[0053] Z 轴直线运动组件包括 Z 轴平台 13、Z 轴旋转电机 14、Z 轴电机座 15、Z 轴滚珠丝杠 16、Z 轴丝杠螺母 17、Z 轴丝杠浮动支撑 18、Z 轴直线电机导轨及滑块 19,Y 轴直线导轨滑块 12 安装于 Z 轴平台 13 的底部,Z 轴旋转电机 14 的输出端与 Z 轴滚珠丝杠 16 相连并驱动 Z 轴滚珠丝杠 16 转动,Z 轴丝杠螺母 17 通过螺纹配合安装于 Z 轴滚珠丝杠 16 上并与 Z 轴平台 13 相连。

[0054] A 轴直驱组件包括 A 轴支撑座 20 和 A 轴直驱电机 23,A 轴支撑座 20 位于 Z 轴直线电机导轨及滑块 19 上;B 轴直驱组件包括 B 轴支撑座 21 和 B 轴直驱电机 24,B 轴支撑座 21 位于 A 轴支撑座 20 上,A 轴直驱电机 23 用来驱动 A 轴支撑座 20 和 B 轴支撑座 21;离子源 22 固定于 B 轴支撑座 21 上,B 轴直驱电机 24 用来驱动 B 轴支撑座 21 和离子源 22。

[0055] 工件输送组件包括工件输送导轨支撑板 31、工件输送齿条 32 和工件输送导轨 33,工件输送导轨支撑板 31 固定于前后横梁 26 和左右横梁 27 上,工件输送导轨 33 连接于工件输送导轨支撑板 31 上,工件输送齿条 32 布置于工件输送导轨 33 的上方。

[0056] 以上的运动组件中,其驱动器均与运动控制卡相连,驱动器受运动控制卡控制,数控系统 37 对驱动器进行控制。X 轴直线电机 3 可采用 U 型直线电机,Y 轴直线电机 10 可采用 U 型直线电机,Z 轴旋转电机 14 可采用真空大力矩低速旋转电机。这样,X/Y 轴的直线运动组件采用 U 型直线电机驱动,具有响应快、运行平稳、动态性能高、定位精度高等特点,最主要的特点是省去了中间的运动转换装置,克服了传统电机存在运动间隙的问题。Z 轴选择电机直接驱动 A 轴支撑座 20,具有负载大、运行平稳等特点。B 轴直驱电机 24 直接驱动 B 轴支撑座 21、离子源 22,省去了中间的连接机构,减少了由于机械结构产生的定位误差,并且配备了圆光栅作为位置反馈,使定位精度达到妙级。本发明采用 X/Y/Z/A/B 的五轴结构,进而可以满足加工光刻物镜的高精度性能。

[0057] 本发明通过数控系统 37 定位工件 30 与离子源 22 在 X/Y/Z/A/B 中的相对位置,计算出坐标变换矩阵;然后根据工件的面形、形状,离子源的去除函数计算离子源在工件上的驻留时间,通过程序转换成数控代码,再通过控制卡给驱动器发送指令,驱动 X/Y/Z/A/B 五

轴联动,实现离子源 22 与工件 30 表面的垂直加工,使其获得满足精度要求的面形。

[0058] 在这过程中,Y 轴导轨座 8 在 X 轴直线电机 3 的驱动下做前后运动,Z 轴平台 13 在 Y 轴直线电机 10 的驱动下做左右运动,A 轴支撑座 20 在 Z 轴旋转电机 14 的驱动下做上下运动,B 轴支撑座 21 在 A 轴直驱电机 23 的驱动下绕 X 轴旋转运动,离子源 22 在 B 轴直驱电机 24 的驱动下绕 Y 轴旋转运动。X、Y 轴的运动分别通过 X 轴直线电机 3、Y 轴直线电机 10 的驱动来实现。X 轴直线电机 3、Y 轴直线电机 10 均采用 U 型直线电机,它具有响应快,运行平稳、动态特性好,不需要中间运动转换装置的特点,且定位精度高;再配上直尺光栅作为位置反馈,整体定位精度能够达到正负 1 微米级。Z 轴的运动通过真空大力矩低转速旋转电机驱动,离子束加工对靶距敏感性相对较弱,Z 轴直接通过电机码盘定位能实现加工要求。

[0059] 在上述的过程中,离子源 22 通过 A 轴直驱电机 23、B 轴直驱电机 24 驱动绕 X、Y 轴正负  $30^\circ$  旋转,没有了中间连接机构,减少了由于机械结构产生的定位误差,并且配备了圆光栅作为位置反馈,使定位精度达到妙级。

[0060] 在上述五轴离子束加工装置的使用过程中,本发明所采用控制方法,即:沿光学镜面法向加工时在工件坐标系内光学镜面点的位姿经旋转变化转换为机床坐标系内坐标点,并由法向等靶距加工,解算出机床各轴的运动位姿;再采用 S 型速度加工模式,解算出机床各轴在各个加工点的速度;结合上述求解出各点的速度,生成数控代码,结合数控系统设置为 S 速度加工模式进行加工。

[0061] 如图 6 所示,工件位姿坐标变化:针对某光学镜面  $z = f(x, y)$ ,测得面形误差为  $\gamma(x, y)$ ,根据面形误差选定某一束径去除函数  $p(x, y)$ ,结合机床动态性能,通过正则化算法求解光学镜面各点沿法向的驻留时间为  $t(x, y)$ ,并满足仿真残差最小;假设去除函数  $p(x, y)$  的靶距是  $l_{ba}$ ,离子源 22 顶部(或者光栏顶部)到离子源 22 旋转轴中心距离为  $l_{中心距}$ ,加工过程中,为满足法向等靶距加工,镜面上各点距离离子源旋转轴中心距离为  $l = l_{ba} + l_{中心距}$ 。

[0062] 设工件坐标系为  $xoy$ ,机床坐标系为  $XOY$ ,建立二坐标系的拓补结构,并求解出二坐标的齐次变换矩阵  $T$ ,光学镜面面形在工件坐标上面形为  $z = f(x, y)$ ,镜面上某点  $Q_{ki}$  矢量在两坐标系中的矢量表示分别为  $r_{ki}$  和  $r_{kj}$ ,则两者之间关系为:

$$[0063] \quad r_{kj} = Tr_{ki} \quad (1)$$

[0064] 式中  $r_{ki}$  为  $Q_{ki}$  点在  $z = f(x, y)$  曲面上的法向量,  $T$  为经拓扑结构求解的  $xoy$  到  $XOY$  的齐次坐标变换矩阵。

[0065] 通过上式 (1) 可求得工件某加工点在机床坐标系内的矢量,即加工时离子源的姿态。

[0066] 假设  $Q_{ki}$  点在工件坐标系  $xoy$  中的齐次坐标为  $Q_{ki}(x_{ki}, y_{ki}, z_{ki}, 1)$ ,在机床坐标系为  $XOY$  中的齐次坐标为  $Q_{kj}(x_{kj}, y_{kj}, z_{kj}, 1)$ ,加工  $Q_{kj}$  点时离子源 22 在机床坐标系  $XOY$  中坐标为  $P_{kj}(x_{kj}, y_{kj}, z_{kj}, 1)$ ,其满足下式 (2) 的关系:

$$[0067] \quad \begin{cases} \overline{Q_{kj}} = T\overline{Q_{ki}} \\ \left| \overline{P_{kj}Q_{kj}} \right| = l \\ \overline{P_{kj}Q_{kj}} = m_j r_{kj} \end{cases} \quad (2)$$

[0068] 其中  $m_j$  为非 0 常数, 通过式 (2) 可求解出加工  $Q_{kj}$  时离子源齐次坐标  $P_{kj}(x_{kj}, y_{kj}, z_{kj}, 1)$ 。通过式 (1) 和 (2) 求解出加工光学镜面各点时离子源矢量方向  $r_{kj}$  以及离子源轴中心的坐标  $P_{kj}(x_{kj}, y_{kj}, z_{kj}, 1)$

[0069] 为实现光学镜面的法向加工, 并且保证机床的平稳运行, 本发明采用 S 型速度加工模式, 求解出机床在修行过程中各轴的速度分配, 达到驻留时间与数控系统的匹配, 满足驻留时间的精确实现。

[0070] 如图 7 所示, 速度分配求解: S 型速度加工模式 (参见图 4), 离子源 22 在加工离散间隔为  $s$  的工件过程中, 离子源 22 在进给步距  $s$  内, 正常完成进给运动, 即先作加速度匀速增加的加速运动, 后作加速度匀速减小的加速运动, 再匀速运动, 其中加速度匀速增加系数  $f$  应与数控系统 37 的设置值一样。

[0071] 假设加工镜面上  $Q_{kj}(x_{kj}, y_{kj}, z_{kj}, 1)$  点时离子源坐标为  $P_{kj}(x_{kj}, y_{kj}, z_{kj}, 1)$ , 运动速度为  $v_k$ , 矢量方向为  $r_{kj}$ , 由上式 (1) 和 (2) 就可得到加工镜面上  $Q_{(k+1)j}(x_{(k+1)j}, y_{(k+1)j}, z_{(k+1)j}, 1)$  点时离子源运动到目标点处矢量方向为  $r_{(k+1)j}$ , 坐标为  $P_{(k+1)j}(x_{(k+1)j}, y_{(k+1)j}, z_{(k+1)j}, 1)$ , 运动过程驻留时间为  $t_{k+1}$ 。

[0072] 以直线运动解算速度为例, 在  $k$  点与  $k+1$  点运动期间, 加速运动过程中速度由初始速度  $v_k$  加速到  $v_{k+1}$ , 行程为  $S_1$ , 所花时间为  $t_1$ ; 在匀速运动期间行程为  $S_2$ , 所花时间为  $t_2$ , 其速度与加速度曲线如图 5 所示:

[0073] 为实现驻留时间的精确性, 设  $\overline{P_k P_{(k+1)j}} = s_k$ , 即加工工件上相邻点时离子源 22 所走位移, 则运动过程中位移与时间需满足关系式 (3):

$$[0074] \quad \begin{cases} s_k = s_1 + s_2 \\ t_k = t_1 + t_2 \end{cases} \quad (3)$$

[0075] 根据 S 型速度模式, 离子源在  $k$  与  $k+1$  点运动时速度满足式 (4):

$$[0076] \quad v = \begin{cases} v_k + f \cdot t^2 / 2 & 0 \leq t \leq t_1 / 2 \\ v_k - f \cdot t_1^2 / 4 + f \cdot t_1 \cdot t - ft^2 / 2 & t_1 / 2 \leq t \leq t_1 \end{cases} \quad (4)$$

[0077] 运行位移满足式 (5):

$$[0078] \quad \begin{cases} s_k = v_k \cdot t_1 + f \cdot t_1^3 / 8 \\ s_2 = v_{k+1} \cdot t_2 \end{cases} \quad (5)$$

[0079] 其中  $v(0) = v_k, v(t_1) = v_{k+1}$ , 联立 (3)、(4)、(5) 求解加工  $Q_{(k+1)j}$  点速度为  $v_{k+1}$ 。其中加工初速度以初始点驻留时间  $t_{\text{初始}}$  的平均速度计算, 即  $v_{\text{初始}} = s/t_{\text{初始}}$ ;

[0080] 同理, 旋转运动解算为: 在加工  $Q_{kj}(x_{kj}, y_{kj}, z_{kj}, 1)$  点矢量为  $r_{kj}$ , 离子源 22 的旋转速度为  $v_{rk}$ , 运行到下一点  $Q_{(k+1)j}(x_{(k+1)j}, y_{(k+1)j}, z_{(k+1)j}, 1)$  时矢量为  $r_{(k+1)j}$ , 总的旋转角度为

$$\theta_{k+1} = \arccos\left(\frac{r_{(k+1)j} \cdot r_{kj}}{|r_{(k+1)j}| \cdot |r_{kj}|}\right)$$

同理根据 S 型速度加工模式求解出在驻留时间  $t_{k+1}$  范围内运行到矢量  $r_{(k+1)j}$  时的速度  $v_{r(k+1)}$ 。

[0081] 最后根据得到的加工工件各点时离子源 22 的位姿  $r_{(k+1)j}, P_{(k+1)j}, (x_{(k+1)j}, y_{(k+1)j}, z_{(k+1)j}, 1)$  结合上述求解出各点的速度, 生成数控代码, 结合数控系统设置为 S 速度加工模式进行加工

[0082] 加工过程中, 首先通过 X/Y/Z 三个方向的运动机构调整离子源与工件在 X/Y/Z 三

个方向的相对位置,然后通过上述速度分配求解计算出的各轴速度、位置曲线,通过控制卡各驱动器发送指令,驱动 X/Y/Z/A/B 五轴运动,实现离子束驻留时间的精确性,保证光刻物镜的高精度加工。本发明中通过设置 S 型速度模式运行,使加速度设置参数与速度解算中加速度设置参数一致,速度解算中最大运行速度与机床最大运行速度匹配。

[0083] 以上仅是本发明的优选实施方式,本发明的保护范围并不仅限于上述实施例,凡属于本发明思路下的技术方案均属于本发明的保护范围。应当指出,对于本技术领域的普通技术人员来说,在不脱离本发明原理前提下的若干改进和润饰,应视为本发明的保护范围。

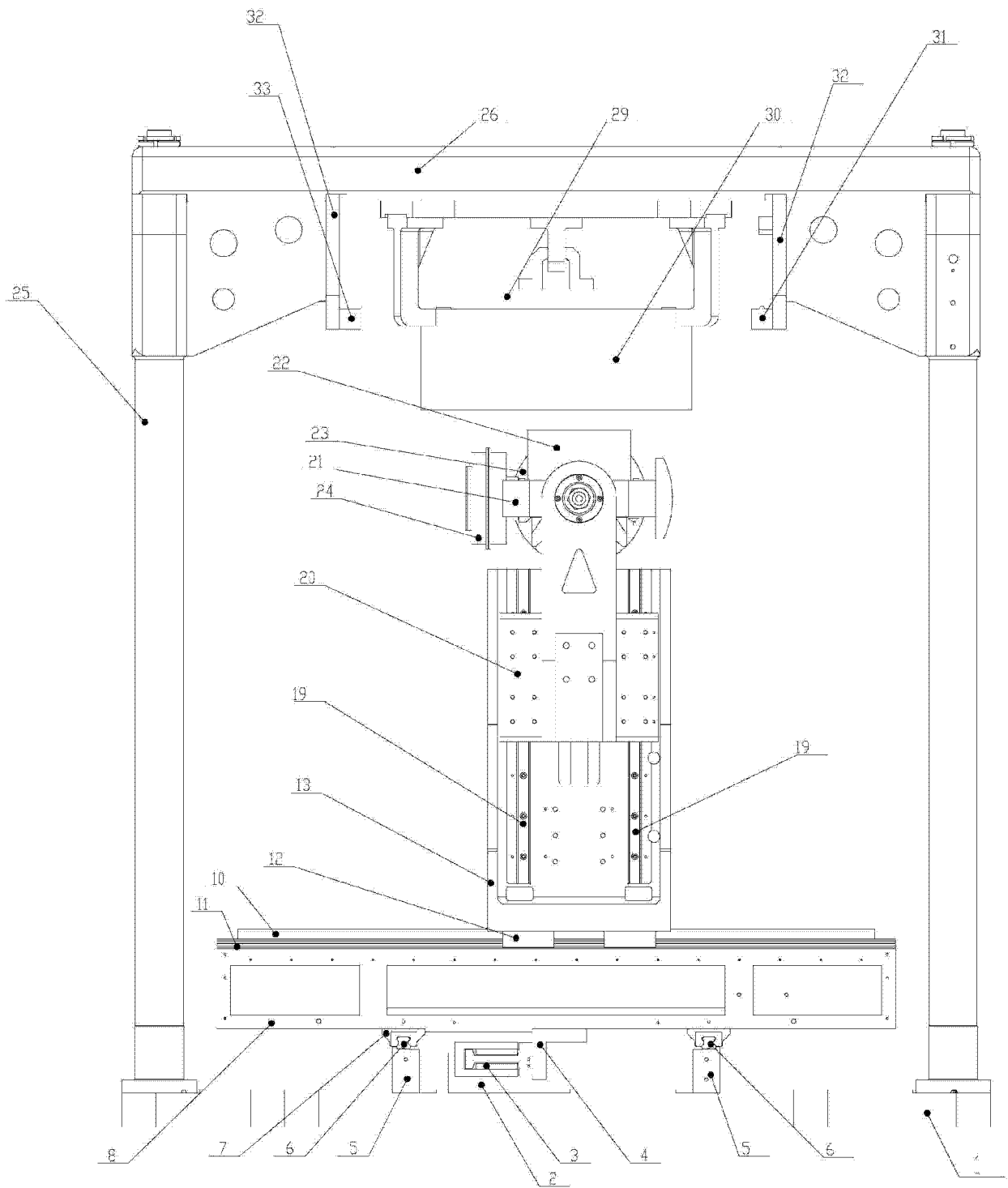


图 1

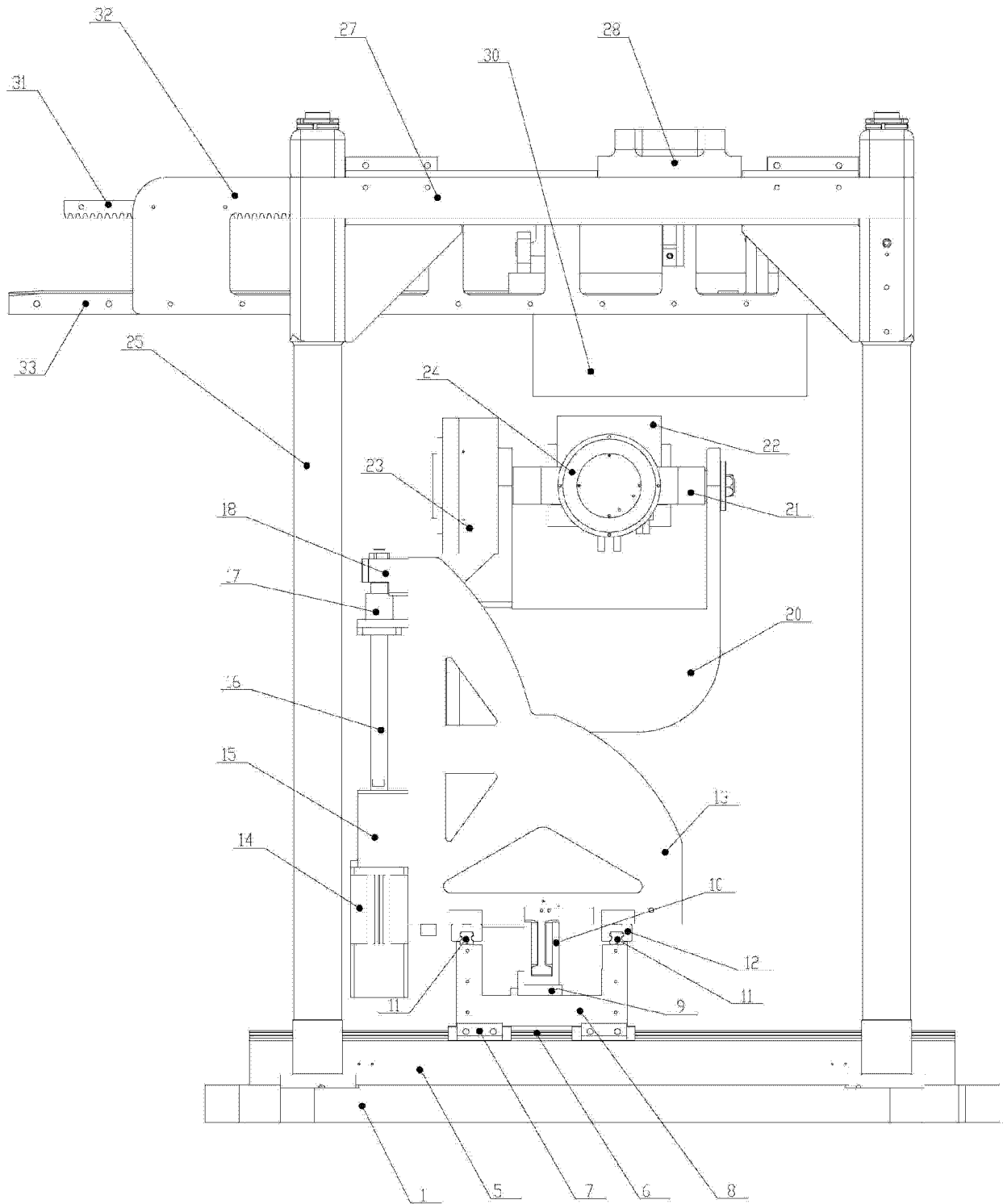


图 2

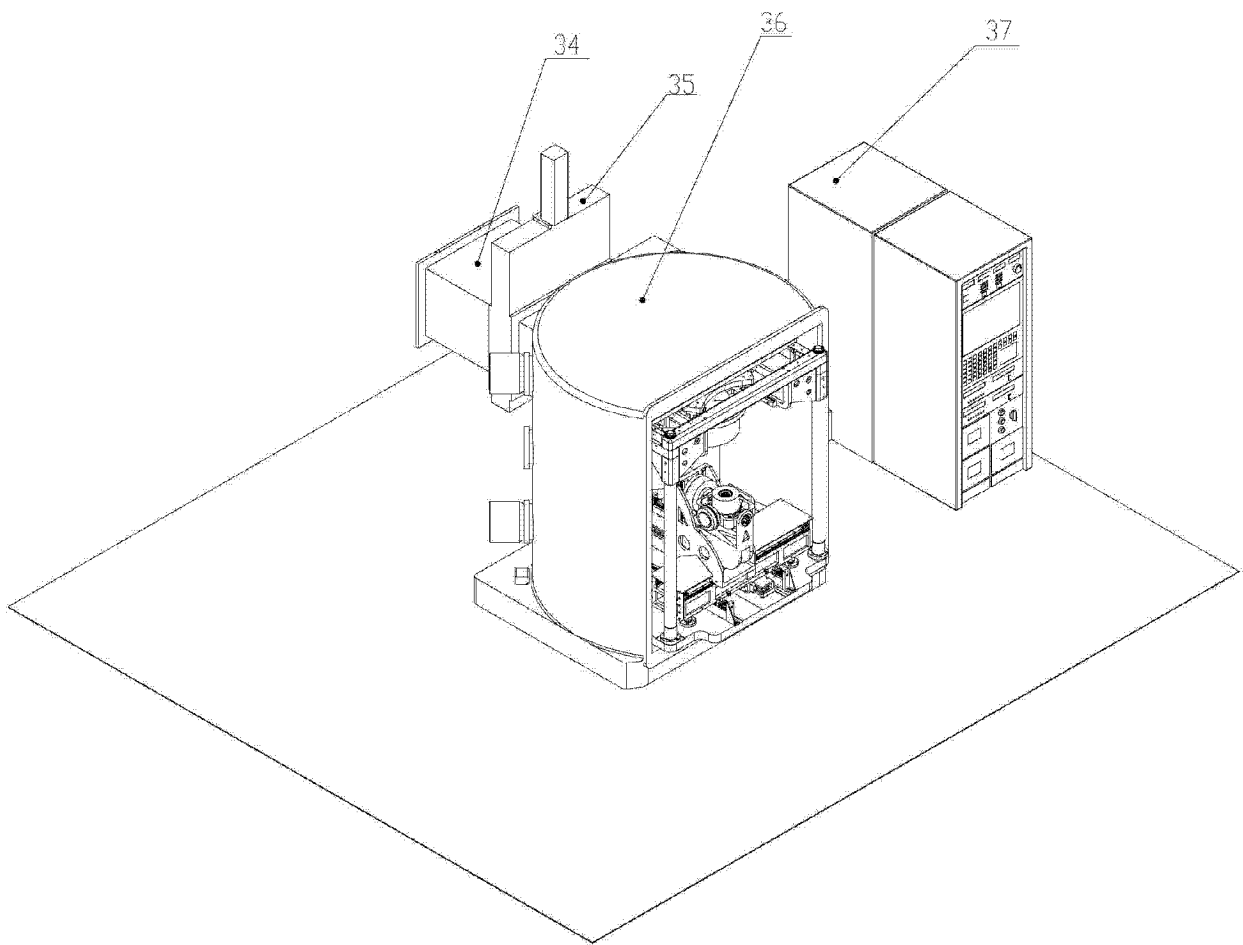


图 3

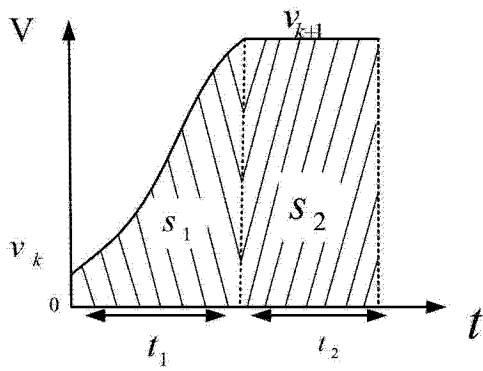


图 4

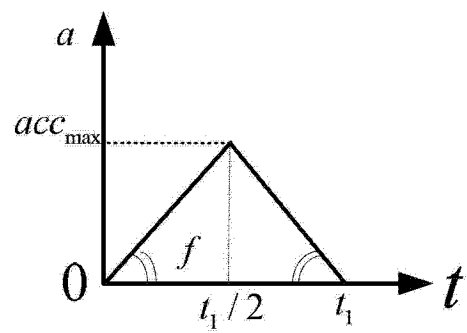


图 5

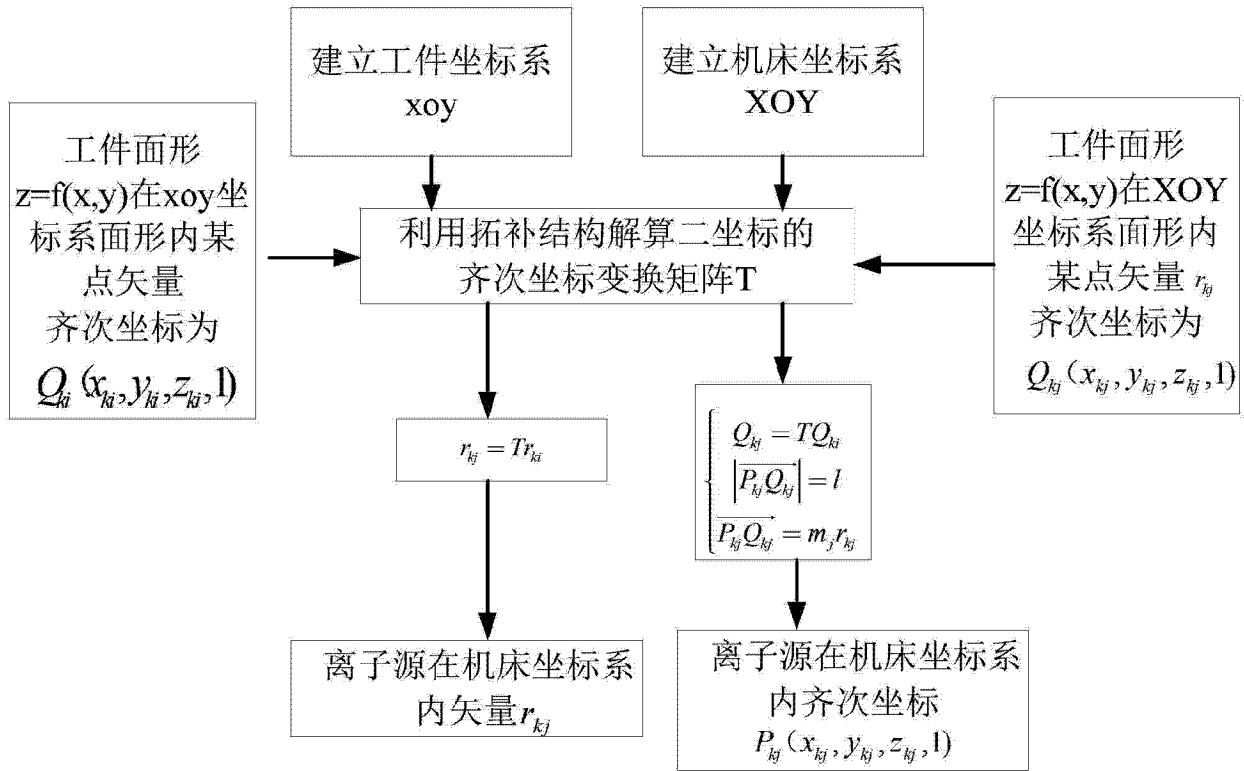


图 6

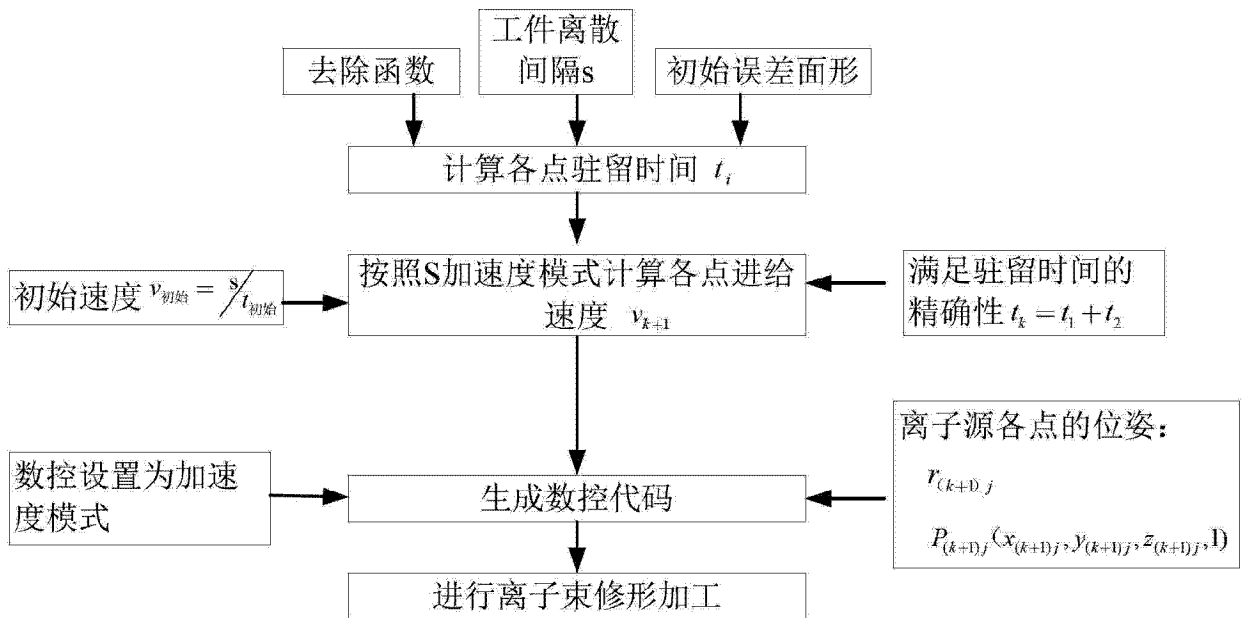


图 7