



## (12)发明专利

(10)授权公告号 CN 107422693 B

(45)授权公告日 2019.08.06

(21)申请号 201710650198.1

审查员 杨静

(22)申请日 2017.08.02

(65)同一申请的已公布的文献号

申请公布号 CN 107422693 A

(43)申请公布日 2017.12.01

(73)专利权人 辽宁科技大学

地址 114051 辽宁省鞍山市高新区千山路  
185号

(72)发明人 陈松 喻正好 韩冰 陈燕  
李龙邦

(74)专利代理机构 鞍山贝尔专利代理有限公司  
21223

代理人 颜伟

(51)Int.Cl.

G05B 19/37(2006.01)

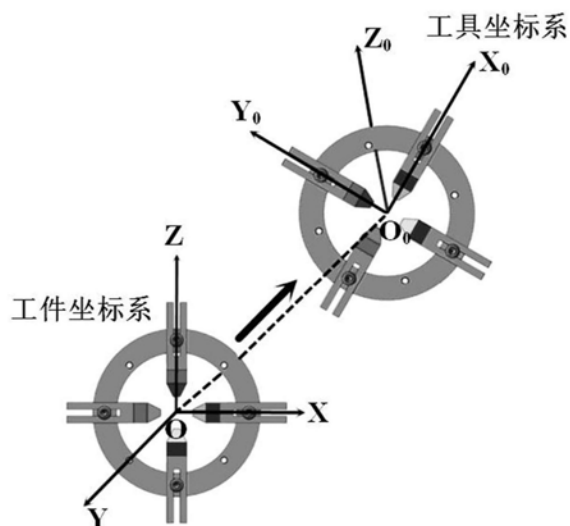
权利要求书3页 说明书6页 附图3页

### (54)发明名称

中心线重构对空间弯管内表面抛光轨迹生成方法

### (57)摘要

本发明属于磁性研磨技术领域,尤其是涉及一种中心线重构对空间弯管内表面抛光轨迹生成方法,其特征在于按如下步骤进行:步骤一:获得空间弯管的外轮廓点云;步骤二:通过曲线拟合获得三条轮廓线;步骤三:利用拟合的外部轮廓线通过截面相交的方法生成;步骤四:将生成的弯管中心线和由测量产生的外部轮廓线进行点的离散化;步骤五:建立空间直角坐标系 $O_0X_0Y_0Z_0$ ,将其定为机器人工具坐标系;步骤六:通过将工件坐标系 $OXYZ$ 平移、旋转转化到工具坐标系;步骤七:通过齐次坐标变换矩阵对坐标系的转换,可以获得此加工时刻的加工路径中的位姿坐标;步骤八:获得最终的机械抛光轨迹。本发明可以对复杂的空间弯管准确的确定加工轨迹,提高工作效率。



1. 一种中心线重构对空间弯管内表面抛光轨迹生成方法,其特征在于按如下步骤进行:

步骤一:获得空间弯管的外轮廓点云;对空间弯管外轮廓通过三坐标测量仪进行扫描,获得空间弯管三条外轮廓线的点云;

步骤二:对点云进行数据化处理,通过曲线拟合获得三条轮廓线;

步骤三:弯管中心线的生成是利用拟合的外部轮廓线通过截面相交的方法生成;

步骤四:将生成的弯管中心线和由测量产生的外部轮廓线进行点的离散化,且两者点化数目相等;

步骤五:选择中心线上任意一点 $O_0$ 与相邻一点及轮廓线上对应一点生成两条共点相互垂直的向量,根据这两条向量由右手法则可建立空间直角坐标系 $O_0X_0Y_0Z_0$ ,将其定为机器人工具坐标系;

步骤六:通过将工件坐标系 $OXYZ$ 平移、旋转转化到工具坐标系;

步骤七:通过齐次坐标变换矩阵对坐标系的转换,可以获得此加工时刻的加工路径中的位姿坐标;

步骤八:将一系列的加工路径中的位姿坐标串联起来就可获得最终的机械抛光轨迹。

2. 根据权利要求1所述的中心线重构对空间弯管内表面抛光轨迹生成方法,其特征在于所述的步骤二具体是指:

步骤二对点云进行数据化处理为了保持待求参数准确性,则对数据中无限个节点处型值进行平滑处理,平滑后的型值由原型值线性迭加而成,相关公式(1)如下所示:

$$\{P_v\}(v = \dots, -1, 0, 1, \dots) \quad (1)$$

$$P_n = \sum_{v=-\infty}^{+\infty} P_v L_{n-v}$$

式(1)中,  $\{L_v\}$  是权因子,  $L_{-v} = L_v$  是偶系列。

为了使得处理后的数据  $\{P_n\}$  比  $\{P_v\}$  平滑,同时能够较好的保持原数据的形貌,还需要其两组数据“偏离”不大,选用高斯(Gaussian)滤波算法进行运算,相关公式(2)如下所示:

$$g_\alpha(t) = \frac{1}{\alpha\lambda_c} e^{-\pi\left(\frac{t}{\alpha\lambda_c}\right)^2} \quad (2)$$

式(2)中,  $t$  为空间域变量。其傅里叶变换相关公式(3)如下所示:

$$G(\lambda) = e^{-\pi\left(\frac{\alpha\lambda_c}{\lambda}\right)^2} \quad (3)$$

式(3)中,  $\lambda$  为波长,  $\lambda_c$  为截止波长,  $\alpha$  是常量。针对于离散型点云数据,应利用公式(1)离散化为公式(3),最终得到公式(4)如下所示,以此适应滤波的需要,

$$g_k = \frac{1}{\alpha\lambda_c} e^{-\pi\left(\frac{k\Delta x}{\alpha\lambda_c}\right)^2} \quad (4)$$

式(4)中,  $g_k$  为高斯权函数的离散表示,  $\Delta x$  是相邻点之间的距离,

原始的点云进行高斯滤波之后需要进行曲线拟合,通过均匀曲线的方法进行拟合,拟

合后可以得到平滑且均匀参数化的节点。

3. 根据权利要求1所述的中心线重构对空间弯管内表面抛光轨迹生成方法,其特征在于所述的步骤三具体是指:

步骤三中的外部轮廓线通过截面相交的方法生成中心线,理想状态的截面交线交为一条线,但由于测量仪器存在一定的误差导致相交线为三条交线;

当三条交线出现时,需要的交线实际为这三条交线构成的几何体的中心线,通过将该几何体进行微分,获得三条交线的相同位置的三点所在的平面,在其平面上过此三点做圆可求其圆心,然后将N个圆心通过积分的方式进行拟合,获得几何体的中心线,就是需要的空间弯管的中心线。

4. 根据权利要求1所述的中心线重构对空间弯管内表面抛光轨迹生成方法,其特征在于所述的步骤六具体是指:

步骤六中,工件坐标系到工具坐标系的转化如下:

首先将工件坐标系的原点通过齐次变换中的平移变换,使得与工具坐标系的原点重合;

进一步地,两坐标系原点重合后,将平移后的新坐标系X轴绕自身坐标系的Z轴进行旋转 $\alpha$ 角度,与原有的工具坐标系的X轴所在平面共面;

从而,将旋转后的新坐标系X轴绕自身坐标系的Y轴进行旋转 $\beta$ 角,使得两轴重合;

进而,同理对旋转后的新坐标系Y轴进行绕自身坐标系的Z轴旋转 $\alpha$ 角度,使两坐标系Y轴共面,最后通过对旋转后的新坐标系中Y轴进行绕自身坐标系的X轴旋转 $\gamma$ 角的变换,从而使得两轴重合,

最终,得到工件坐标系与工具坐标系两者重合。

5. 根据权利要求1所述的中心线重构对空间弯管内表面抛光轨迹生成方法,其特征在于所述的步骤七具体是指:

步骤七中齐次坐标变换矩阵的相关公式(5)如下所示:

$$[n \quad o \quad a \quad p] = \begin{bmatrix} n_x & o_x & a_x & p_x \\ n_y & o_y & a_y & p_y \\ n_z & o_z & a_z & p_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (5)$$

式(5)中, $n_x$ 为动坐标系中X轴与定坐标系X轴夹角的余弦;

$n_y$ 为动坐标系中X轴与定坐标系Y轴夹角的余弦;

$n_z$ 为动坐标系中X轴与定坐标系Z轴夹角的余弦;

$o_x$ 为动坐标系中Y轴与定坐标系X轴夹角的余弦;

$o_y$ 为动坐标系中Y轴与定坐标系Y轴夹角的余弦;

$o_z$ 为动坐标系中Y轴与定坐标系Z轴夹角的余弦;

$a_x$ 为动坐标系中Z轴与定坐标系X轴夹角的余弦;

$a_y$ 为动坐标系中Z轴与定坐标系Y轴夹角的余弦;

$a_z$ 为动坐标系中Z轴与定坐标系Z轴夹角的余弦;

其中旋转角度可以根据以下方程求得:

$$\cos \alpha = \frac{n_x}{\sqrt{n_x^2 + n_y^2 + n_z^2}} \quad (6)$$

$$\cos \beta = \frac{\sqrt{n_x^2 + n_y^2}}{\sqrt{n_x^2 + n_y^2 + n_z^2}} \quad (7)$$

$$\cos \gamma = \frac{\sqrt{o_x^2 + o_y^2}}{\sqrt{o_x^2 + o_y^2 + o_z^2}} \quad (8)$$

通过公式(5)–(8)就可以得到加工轨迹中的位姿坐标为： $(x_0, y_0, z_0, \alpha, \beta, \gamma)$ ，最终得出加工空间弯管时所走的位姿轨迹。

## 中心线重构对空间弯管内表面抛光轨迹生成方法

### 技术领域

[0001] 本发明属于磁性研磨技术领域,尤其是涉及一种中心线重构对空间弯管内表面抛光轨迹生成方法。

### 背景技术

[0002] 在航空航天、汽车和其他机械领域,对发动机体积要求越发严格,为减少不必要的空间浪费,采用空间占用率较小的空间弯管进行油气的输导。但由于现代工艺水平等因素影响,会使弯管内表面产生裂纹和凹坑等表面缺陷,在弯曲处尤为严重,致使弯管内部通过流动气体或液体时产生湍流、引起振动,继而影响发动机的平稳运行,降低使用寿命。

[0003] 但空间弯管的加工轨迹的获取较为困难,因此对加工轨迹的规划尤为重要,在一般加工过程中,通常使用手动标定点的方法来对弯管的中心线确定,由于该方法为手动操作,因此存在操作繁琐,定点易受干扰,可能产生较大误差,影响加工效果,降低加工效率。公开号为CN103862330A的专利“基于机器视觉的弯管磁研磨自动导航方法”虽然提出了一种针对空间弯管研磨轨迹的确定方法,但是依然在解决实际加工时存在诸多弊端,无法彻底解决误差大、研磨效率低的问题,尤其是针对复杂的空间弯管,研磨效果不甚理想。

### 发明内容

[0004] 本发明的目的在于克服现有技术中的不足,提供一种中心线重构对空间弯管内表面抛光轨迹生成方法,可以对复杂的空间弯管准确的确定加工轨迹,提高工作效率。

[0005] 本发明的目的是通过下述技术方案来实现的:

[0006] 本发明的中心线重构对空间弯管内表面抛光轨迹生成方法,其特征在于按如下步骤进行:

[0007] 步骤一:获得空间弯管的外轮廓点云;对空间弯管外轮廓通过三坐标测量仪进行扫描,获得空间弯管三条外轮廓线的点云;

[0008] 步骤二:对点云进行数据化处理,通过曲线拟合获得三条轮廓线;

[0009] 步骤三:弯管中心线的生成是利用拟合的外部轮廓线通过截面相交的方法生成;

[0010] 步骤四:将生成的弯管中心线和由测量产生的外部轮廓线进行点的离散化,且两者点化数目相等;

[0011] 步骤五:选择中心线上任意一点 $O_0$ 与相邻一点及轮廓线上对应一点生成两条共点相互垂直的向量,根据这两条向量由右手法则可建立空间直角坐标系 $O_0X_0Y_0Z_0$ ,将其定为机器人工具坐标系;

[0012] 步骤六:通过将工件坐标系 $OXYZ$ 平移、旋转转化到工具坐标系;

[0013] 步骤七:通过齐次坐标变换矩阵对坐标系的转换,可以获得此加工时刻的加工路径中的位姿坐标;

[0014] 步骤八:将一系列的加工路径中的位姿坐标串联起来就可获得最终的机械抛光轨迹。

[0015] 所述的步骤二具体是指：

[0016] 步骤二对点云进行数据化处理为了保持待求参数准确性，则对数据中无限个节点处型值进行平滑处理，平滑后的型值由原型值线性迭加而成，相关公式 (1) 如下所示：

$$[0017] \quad P_n = \sum_{v=-\infty}^{+\infty} P_v L_{n-v} \quad (1)$$

[0018] 式 (1) 中， $\{L_v\}$  是权因子， $L_{-v}=L_v$  是偶系列。

[0019] 为了使得处理后的数据  $\{P_n\}$  比  $\{P_v\}$  平滑，同时能够较好的保持原数据的形貌，还需要其两组数据“偏离”不大，选用高斯 (Gaussian) 滤波算法进行运算，相关公式 (2) 如下所示：

$$[0020] \quad g_\alpha(t) = \frac{1}{\alpha\lambda_c} e^{-\pi\left(\frac{t}{\alpha\lambda_c}\right)^2} \quad (2)$$

[0021] 式 (2) 中， $t$  为空间域变量。其傅里叶变换相关公式 (3) 如下所示：

$$[0022] \quad G(\lambda) = e^{-\pi\left(\frac{\alpha\lambda_c}{\lambda}\right)^2} \quad (3)$$

[0023] 式 (3) 中， $\lambda$  为波长， $\lambda_c$  为截止波长， $\alpha$  是常量。针对于离散型点云数据，应利用公式 (1) 离散化为公式 (3)，最终得到公式 (4) 如下所示，以此适应滤波的需要，

$$[0024] \quad g_k = \frac{1}{\alpha\lambda_c} e^{-\pi\left(\frac{k\Delta x}{\alpha\lambda_c}\right)^2} \quad (4)$$

[0025] 式 (4) 中， $g_k$  为高斯权函数的离散表示， $\Delta x$  是相邻点之间的距离，

[0026] 原始的点云进行高斯滤波之后需要进行曲线拟合，通过均匀曲线的方法进行拟合，拟合后可以得到平滑且均匀参数化的节点。

[0027] 所述的步骤三具体是指：

[0028] 步骤三中的外部轮廓线通过截面相交的方法生成中心线，理想状态的截面交线如图二 (a) 所示交为一条线，但由于测量仪器存在一定的误差导致相交线如图二 (b) 所示为三条交线；

[0029] 当三条交线出现时，需要的交线实际为这三条交线构成的几何体的中心线，通过将该几何体进行微分，获得三条交线的相同位置的三点所在的平面，在其平面上过此三点做圆可求其圆心，然后将  $N$  个圆心通过积分的方式进行拟合，获得几何体的中心线，就是需要的空间弯管的中心线。

[0030] 所述的步骤六具体是指：

[0031] 步骤六中，工件坐标系到工具坐标系的转化如下：

[0032] 首先将工件坐标系的原点通过齐次变换中的平移变换，使得与工具坐标系的原点重合；

[0033] 进一步地，两坐标系原点重合后，将平移后的新坐标系  $X$  轴绕自身坐标系的  $Z$  轴进行旋转  $\alpha$  角度，与原有的工具坐标系的  $X$  轴所在平面共面；

[0034] 从而，将旋转后的新坐标系  $X$  轴绕自身坐标系的  $Y$  轴进行旋转  $\beta$  角，使得两轴重合；

[0035] 进而,同理对旋转后的新坐标系Y轴进行绕自身坐标系的Z轴旋转 $\alpha$ 角度,使两坐标系Y轴共面,最后通过对旋转后的新坐标系中Y轴进行绕自身坐标系的X轴旋转 $\gamma$ 角的变换,从而使得两轴重合,

[0036] 最终,得到工件坐标系与工具坐标系两者重合。

[0037] 所述的步骤七具体是指:

[0038] 步骤七中齐次坐标变换矩阵的相关公式(5)如下所示:

$$[0039] \quad \begin{bmatrix} n & o & a & p \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} n_x & o_x & a_x & p_x \\ n_y & o_y & a_y & p_y \\ n_z & o_z & a_z & p_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (5)$$

[0040] 式(5)中, $n_x$ 为动坐标系中X轴与定坐标系X轴夹角的余弦;

[0041]  $n_y$ 为动坐标系中X轴与定坐标系Y轴夹角的余弦;

[0042]  $n_z$ 为动坐标系中X轴与定坐标系Z轴夹角的余弦;

[0043]  $o_x$ 为动坐标系中Y轴与定坐标系X轴夹角的余弦;

[0044]  $o_y$ 为动坐标系中Y轴与定坐标系Y轴夹角的余弦;

[0045]  $o_z$ 为动坐标系中Y轴与定坐标系Z轴夹角的余弦;

[0046]  $a_x$ 为动坐标系中Z轴与定坐标系X轴夹角的余弦;

[0047]  $a_y$ 为动坐标系中Z轴与定坐标系Y轴夹角的余弦;

[0048]  $a_z$ 为动坐标系中Z轴与定坐标系Z轴夹角的余弦;

[0049] 其中旋转角度可以根据以下方程求得:

$$[0050] \quad \cos \alpha = \frac{n_x}{\sqrt{n_x^2 + n_y^2 + n_z^2}} \quad (6)$$

$$[0051] \quad \cos \beta = \frac{\sqrt{n_x^2 + n_y^2}}{\sqrt{n_x^2 + n_y^2 + n_z^2}} \quad (7)$$

$$[0052] \quad \cos \gamma = \frac{\sqrt{o_x^2 + o_y^2}}{\sqrt{o_x^2 + o_y^2 + o_z^2}} \quad (8)$$

[0053] 通过公式(5)-(8)就可以得到加工轨迹中的位姿坐标为:  $(x_0, y_0, z_0, \alpha, \beta, \gamma)$ ,最终得出加工空间弯管时所走的位姿轨迹。

[0054] 本发明的优点:

[0055] 本发明提出的中心线重构对空间弯管内表面抛光轨迹生成方法中,其数据处理方法采用了齐次坐标变换矩阵通过机械测量代替原有的手动标定点的方法,可以对复杂的空间弯管准确的确定加工轨迹,提高工作效率,提出的中心线重构的方法,通过测量空间弯管

外表面轮廓线,生成弯管外轮廓空间点云,进而重构空间弯管不规则几何中心线,计算优化得到弯管抛光轨迹,有效提高了工作效率,计算优化得到弯管抛光轨迹并减少了前期的准备工作。

## 附图说明

- [0056] 图1为本发明抛光轨迹坐标系变换前后图。  
 [0057] 图2中a为理想状态下的截面交线图,b为实际状态下的截面交线图。  
 [0058] 图3为本发明工件坐标系通过平移向工具坐标系转化图。  
 [0059] 图4为本发明工件坐标系X轴绕自身Z轴旋转 $\alpha$ 角变换前后图。  
 [0060] 图5为本发明工件坐标系X轴绕自身Y轴旋转 $\beta$ 角变换前后图。  
 [0061] 图6为本发明工件坐标系Y轴绕自身X轴旋转 $\gamma$ 角变换前后图。

## 具体实施方式

- [0062] 下面结合附图进一步说明本发明的具体实施方式。  
 [0063] 如图1、2、3、4、5和6所示,本发明的中心线重构对空间弯管内表面抛光轨迹生成方法,其特征在于按如下步骤进行:  
 [0064] 步骤一:获得空间弯管的外轮廓点云;对空间弯管外轮廓通过三坐标测量仪进行扫描,获得空间弯管三条外轮廓线的点云;  
 [0065] 步骤二:对点云进行数据化处理,通过曲线拟合获得三条轮廓线;  
 [0066] 步骤三:弯管中心线的生成是利用拟合的外部轮廓线通过截面相交的方法生成;  
 [0067] 步骤四:将生成的弯管中心线和由测量产生的外部轮廓线进行点的离散化,且两者点化数目相等;  
 [0068] 步骤五:选择中心线上任意一点 $O_0$ 与相邻一点及轮廓线上对应一点生成两条共点相互垂直的向量,根据这两条向量由右手法则可建立空间直角坐标系 $O_0X_0Y_0Z_0$ ,将其定为机器人工具坐标系;  
 [0069] 步骤六:通过将工件坐标系 $OXYZ$ 平移、旋转转化到工具坐标系;  
 [0070] 步骤七:通过齐次坐标变换矩阵对坐标系的转换,可以获得此加工时刻的加工路径中的位姿坐标;  
 [0071] 步骤八:将一系列的加工路径中的位姿坐标串联起来就可获得最终的机械抛光轨迹。  
 [0072] 所述的步骤二具体是指:  
 [0073] 步骤二对点云进行数据化处理为了保持待求参数准确性,则对数据中无限个节点处型值进行平滑处理,平滑后的型值由原型值线性迭加而成,相关公式(1)如下所示:

$$\{P_v\}(v = \dots, -1, 0, 1, \dots) \quad (1)$$

$$P_n = \sum_{v=-\infty}^{+\infty} P_v L_{n-v}$$

- [0074] 式(1)中,  $\{L_v\}$  是权因子,  $L_{-v} = L_v$  是偶系列。  
 [0075] 为了使得处理后的数据  $\{P_n\}$  比  $\{P_v\}$  平滑,同时能够较好的保持原数据的形貌,还需要其两组数据“偏离”不大,选用高斯 (Gaussian) 滤波算法进行运算,相关公式(2)如下所



示：

$$[0077] \quad g_{\alpha}(t) = \frac{1}{\alpha \lambda_c} e^{-\pi \left( \frac{1}{\alpha \lambda_c} \right)^2} \quad (2)$$

[0078] 式(2)中,t为空间域变量。其傅里叶变换相关公式(3)如下所示：

$$[0079] \quad G(\lambda) = e^{-\pi \left( \frac{\alpha \lambda_c}{\lambda} \right)^2} \quad (3)$$

[0080] 式(3)中, $\lambda$ 为波长, $\lambda_c$ 为截止波长, $\alpha$ 是常量。针对于离散型点云数据,应利用公式(1)离散化为公式(3),最终得到公式(4)如下所示,以此适应滤波的需要,

$$[0081] \quad g_k = \frac{1}{\alpha \lambda_c} e^{-\pi \left( \frac{k \Delta x}{\alpha \lambda_c} \right)^2} \quad (4)$$

[0082] 式(4)中, $g_k$ 为高斯权函数的离散表示, $\Delta x$ 是相邻点之间的距离,

[0083] 原始的点云进行高斯滤波之后需要进行曲线拟合,通过均匀曲线的方法进行拟合,拟合后可以得到平滑且均匀参数化的节点。

[0084] 所述的步骤三具体是指：

[0085] 步骤三中的外部轮廓线通过截面相交的方法生成中心线,理想状态的截面交线如图二(a)所示交为一条线,但由于测量仪器存在一定的误差导致相交线如图二(b)所示为三条交线；

[0086] 当三条交线出现时,需要的交线实际为这三条交线构成的几何体的中心线,通过将该几何体进行微分,获得三条交线的相同位置的三点所在的平面,在其平面上过此三点做圆可求其圆心,然后将N个圆心通过积分的方式进行拟合,获得几何体的中心线,就是需要的空间弯管的中心线。

[0087] 所述的步骤六具体是指：

[0088] 步骤六中,工件坐标系到工具坐标系的转化如下：

[0089] 首先将工件坐标系的原点通过齐次变换中的平移变换,使得与工具坐标系的原点重合；

[0090] 进一步地,两坐标系原点重合后,将平移后的新坐标系X轴绕自身坐标系的Z轴进行旋转 $\alpha$ 角度,与原有的工具坐标系的X轴所在平面共面；

[0091] 从而,将旋转后的新坐标系X轴绕自身坐标系的Y轴进行旋转 $\beta$ 角,使得两轴重合；

[0092] 进而,同理对旋转后的新坐标系Y轴进行绕自身坐标系的Z轴旋转 $\alpha$ 角度,使两坐标系Y轴共面,最后通过对旋转后的新坐标系中Y轴进行绕自身坐标系的X轴旋转 $\gamma$ 角的变换,从而使得两轴重合,

[0093] 最终,得到工件坐标系与工具坐标系两者重合。

[0094] 所述的步骤七具体是指：

[0095] 步骤七中齐次坐标变换矩阵的相关公式(5)如下所示：

$$[0096] \quad [n \quad o \quad a \quad p] = \begin{bmatrix} n_x & o_x & a_x & p_x \\ n_y & o_y & a_y & p_y \\ n_z & o_z & a_z & p_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (5)$$

[0097] 式(5)中,  $n_x$  为动坐标系中X轴与定坐标系X轴夹角的余弦;

[0098]  $n_y$  为动坐标系中X轴与定坐标系Y轴夹角的余弦;

[0099]  $n_z$  为动坐标系中X轴与定坐标系Z轴夹角的余弦;

[0100]  $o_x$  为动坐标系中Y轴与定坐标系X轴夹角的余弦;

[0101]  $o_y$  为动坐标系中Y轴与定坐标系Y轴夹角的余弦;

[0102]  $o_z$  为动坐标系中Y轴与定坐标系Z轴夹角的余弦;

[0103]  $a_x$  为动坐标系中Z轴与定坐标系X轴夹角的余弦;

[0104]  $a_y$  为动坐标系中Z轴与定坐标系Y轴夹角的余弦;

[0105]  $a_z$  为动坐标系中Z轴与定坐标系Z轴夹角的余弦;

[0106] 其中旋转角度可以根据以下方程求得:

$$[0107] \quad \cos \alpha = \frac{n_x}{\sqrt{n_x^2 + n_y^2 + n_z^2}} \quad (6)$$

$$[0108] \quad \cos \beta = \frac{\sqrt{n_x^2 + n_y^2}}{\sqrt{n_x^2 + n_y^2 + n_z^2}} \quad (7)$$

$$[0109] \quad \cos \gamma = \frac{\sqrt{o_x^2 + o_y^2}}{\sqrt{o_x^2 + o_y^2 + o_z^2}} \quad (8)$$

[0110] 通过公式(5)–(8)就可以得到加工轨迹中的位姿坐标为:  $(x_0, y_0, z_0, \alpha, \beta, \gamma)$ , 最终得出加工空间弯管时所走的位姿轨迹。

[0111] 最终坐标系转化如图1所示。

[0112] 因此本发明提供一种中心线重构对空间弯管内表面抛光轨迹生成方法, 代替原有的手动标定点的方法, 可以对复杂的空间弯管准确的确定加工轨迹, 提高工作效率, 计算优化得到弯管抛光轨迹并减少了前期的准备工作。

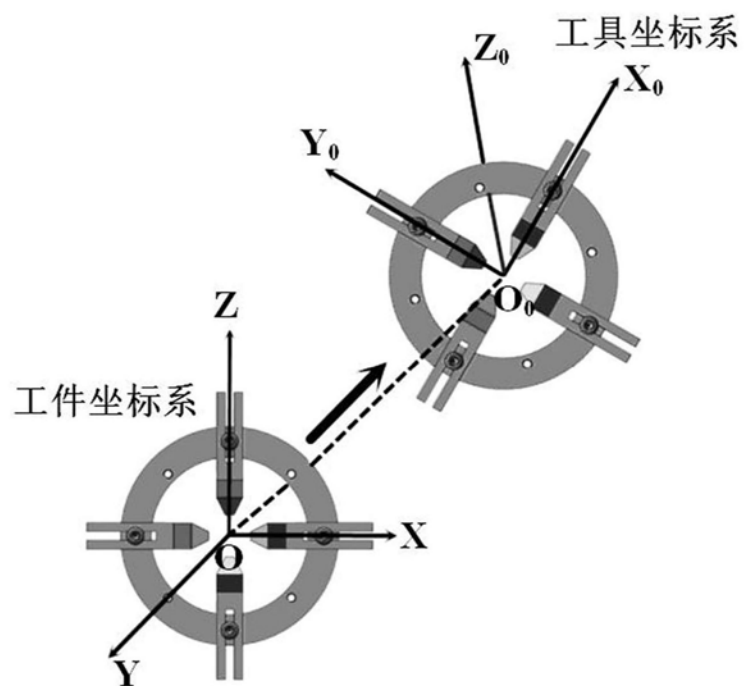


图1

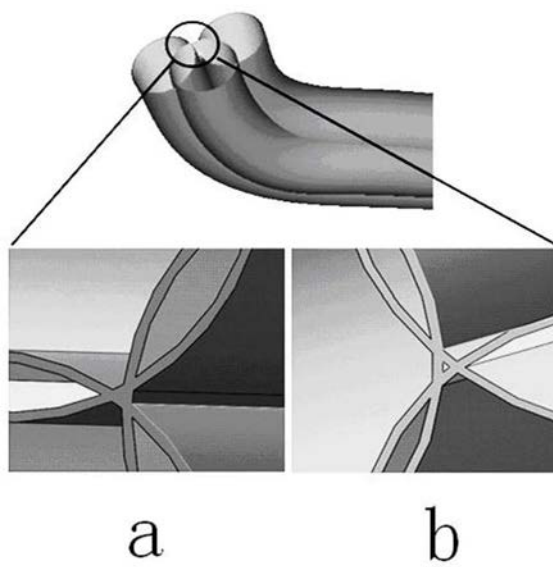


图2

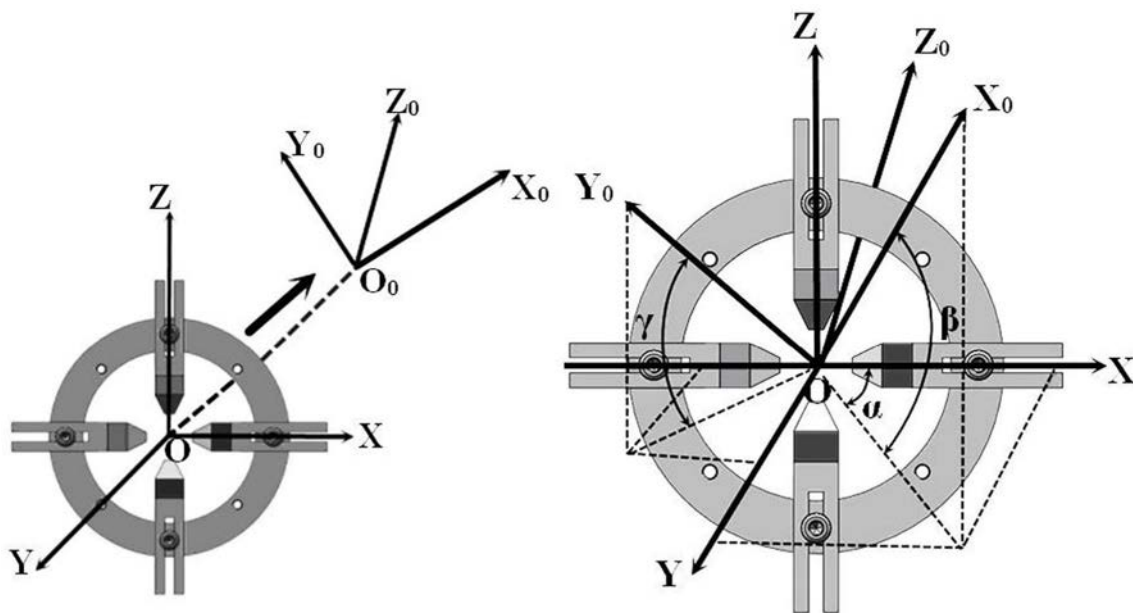


图3

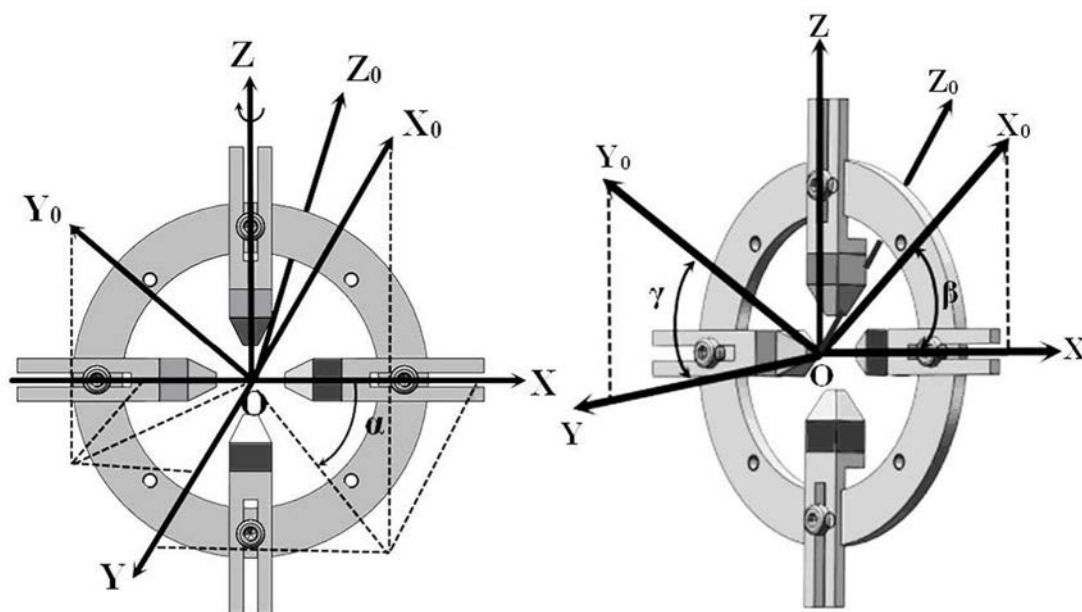


图4

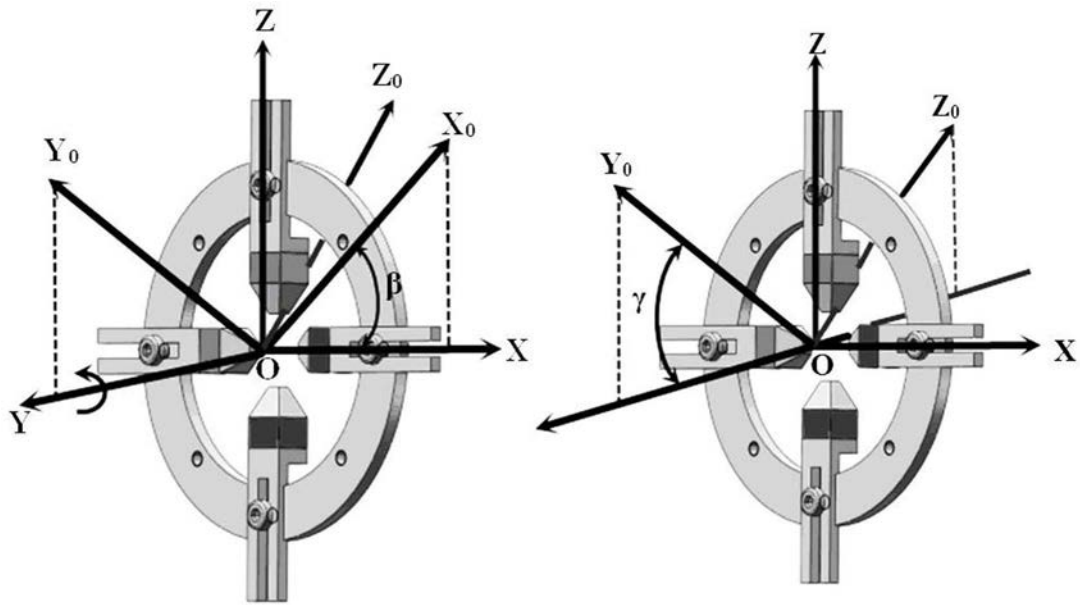


图5

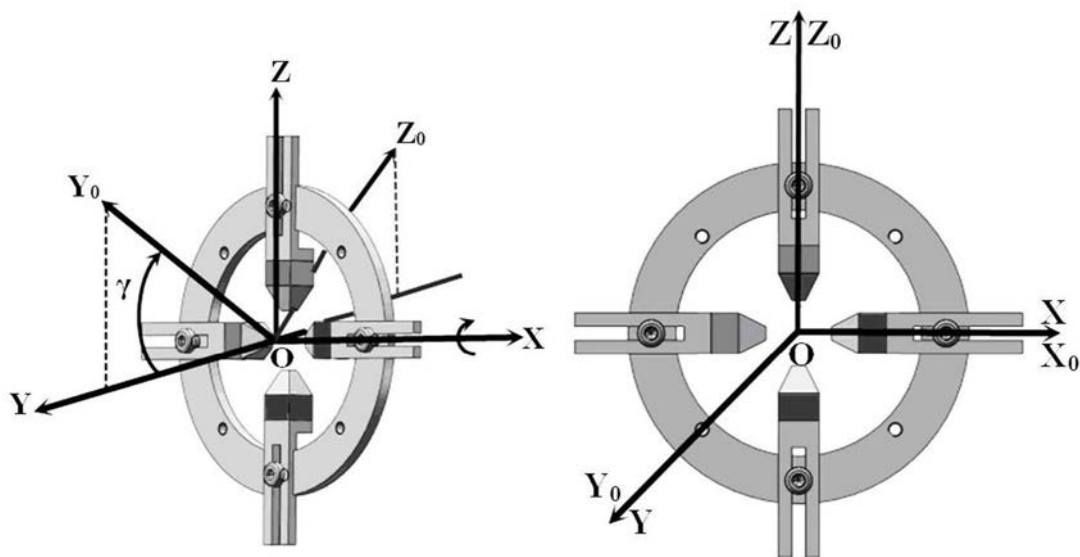


图6