

基于压电驱动的六自由度并联平台运动学分析

祝保财,刘曰涛,于智勇,温尚林,邹大林

(山东理工大学 机械工程学院,山东 淄博 255000)

摘要:提出了一种基于压电驱动的新型六自由度并联平台,针对该并联平台的机械结构分析其运动学问题,并利用修正的 Grübler-Kutzbach 公式验证其自由度。根据平台的结构及运动特点,利用坐标矩阵齐次变化方法推导出平台的运动学解析模型。利用该模型计算出具体运动结果,并与 Adams 软件仿真分析结果进行对比,验证了运动学模型的正确性,为同类压电并联平台的机构构型以及后续实际应用提供了理论基础。

关键词:压电驱动;运动学模型;并联平台;Grübler-Kutzbach 公式

中图分类号:TN384 **文献标识码:**A

Kinematic Analysis of a 6-DOF Parallel Platform Based on Piezoelectric Actuation

ZHU Baocai, LIU Yuetao, YU Zhiyong, WEN Shanglin, ZOU Dalin

(College of Mechanical Engineering, Shandong University of Technology, Zibo 255000, China)

Abstract: A novel 6-DOF parallel platform based on piezoelectric actuation is proposed. The mechanical structure of the platform is examined to analyze its kinematic problems, and the degrees of freedom of the platform are verified using a modified Grübler-Kutzbach formula. Based on the structural and motion characteristics of the platform, the kinematic analytical model is derived using the homogeneous transformation method. The specific motion results obtained from the kinematic model are compared with those derived using Adams simulation software to validate the accuracy of the kinematic model. This research provides a theoretical foundation for the design and future practical applications of similar piezoelectric parallel platforms.

Key words: piezoelectric actuation; kinematic model; parallel platform; Grübler-Kutzbach formula

0 引言

基于压电陶瓷驱动的并联平台和基于电机驱动的并联平台,两者驱动方式不同,其平台构型也不同。电机驱动方式一般经过丝杠推动平台运动,其传动链较长,影响平台精度和响应速度。而压电陶瓷无需转换机构便可直接推动平台运动,因此响应速度和精度有较大提升。也使得并联平台的整体结构得到简化。因此基于压电陶瓷的并联平台运动学具有重要的研究意义。

近年来,大量国内外学者对压电并联平台进行了不同方面的研究,也取得了许多成果。陈攀等^[1]基于双平行四连杆柔顺机构设计了一种结构紧凑、工作台面大的 $x-y-\theta_z$ 三自由度并联压电微动平台。尤晶晶等^[2]提出一种 12-sps 型六自由度压电并联平台,并构建出该机构的运动学正解模型。吴浩然

等^[3]设计出一种二自由度压电并联平台,该平台使用对称的柔性结构和特定的压电驱动方式,对机构的中心框架实现解耦驱动。Pumphrey 等^[4]提出了一种具有球面挠性关节的六自由度压电并联平台,使用四元数法对该机构运动学进行求解。国内外对并联平台的研究中,多自由度的并联平台结构较为复杂,不够紧凑;少自由度并联平台在空间中运动限制较多,工作空间小。

本文提出了一种基于压电驱动的新型六自由度并联平台,采取压电驱动,平台结构更为紧凑。利用修正的 Grübler-Kutzbach 公式计算平台的自由度。并且利用空间位置矢量法推导出机构的运动学逆解模型,通过具体实例进行了验证。研究为同类机构的机构构型以及后续应用提供了理论基础。该并联平台采用压电驱动,驱动精度达到纳米

收稿日期:2024-09-20

作者简介:祝保财(2000-),男,山东省菏泽市人,硕士生。通信作者:刘曰涛,男,副教授,硕士生导师,博士。

级,可用于光学显微领域,例如作为扫描电子显微镜的载物平台。其结构比其他结构的并联平台更紧凑,因此可用于医疗领域,例如依赖于较小尺寸并联平台的显微外科手术平台。

1 平台结构及自由度分析

1.1 平台结构

并联平台由运动平台、固定基座及3条支链组成,初始位置下的结构如图1所示。3条支链在固定基座上按 120° 间隔均匀分布。每条支链由3个移动副以及1个球副组成。用P代表移动副,S代表球副,则该支链称为PPPS支链,该平台又称为3-PPPS并联平台。

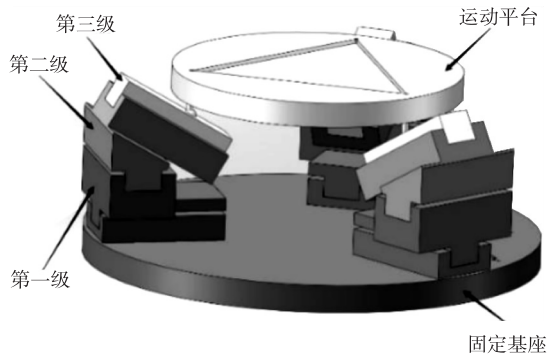


图1 六自由度并联平台结构

PPPS支链也分为三级结构,在这些结构的共同作用下,固定基座被连接到移动平台上。第一级压电直线驱动机构固定在基座上,将该压电直线执行器作为并联平台的驱动机构之一,压电直线驱动机构作为该并联平台的移动副之一。移动副径向指向基座中心,3条支链中的第一级压电直线驱动机构分别称为A-径向、B-径向、C-径向。第二级压电直线驱动机构垂直于第一级径向驱动机构,称为A-切向、B-切向、C-切向。第三级压电直线驱动机构由3个被动导轨组成,通过3个球副将前两级的运动传递给移动平台。

1.2 自由度分析

自由度是机械结构的基本属性。自由度分析不仅是为了确定机器人运动的独立驱动的数量,还可以表示末端执行器可以实现的旋转和移动自由度。因此,自由度分析是机器人研究领域的重要环节,是结构设计、运动学与动力学研究计算、控制策略方法研究等一系列后续工作的前提。通常使用修正的G-K公式来分析并联平台的自由度数值:

$$M = d(n - g - 1) + \sum_{i=1}^g f_i + v \quad (1)$$

式中: M 代表平台的自由度; d 代表平台的阶数; n 为包括固定基座在内的平台构件数; g 为运动副数; f_i 为第*i*个运动副的自由度; v 表示并联平台的过约束数目。

一般平面类型机构的阶数是3,而空间类型机构的阶数为6,该并联平台阶数取6。该并联平台的活动构件个数包括固定基座在内为11个。每条支链有3个移动副及1个球副,3条相同的支链共有12个移动副,其中移动副自由度为1,球副自由度为3^[5]。该并联平台并没有过约束,故 v 取0。根据以上分析,采用式(1)可计算该并联平台自由度:

$$M = 6 \times (11 - 12 - 1) + 18 = 6 \quad (2)$$

由计算结果可知,该并联平台有6个自由度,每条支链的第一级和第二级压电机构为驱动机构,该并联平台共有6个驱动机构,与自由度数量相同,该机构为非冗余并联机构。

2 机构位置分析

2.1 机构坐标建立

该并联平台的逆解是根据实际需要,得到移动平台的位姿,即已知运动平台的位置 $[x, y, z]$ 和姿态 $[\alpha, \beta, \varphi]$,求解6个驱动机构的输入量,即6个压电陶瓷驱动器的位移^[6]。经分析可得,在如图2所示的XY平面中,移动平台的运动不涉及被动导轨,即在XY平面中的运动只有第一级和第二级压电直线驱动机构参与。

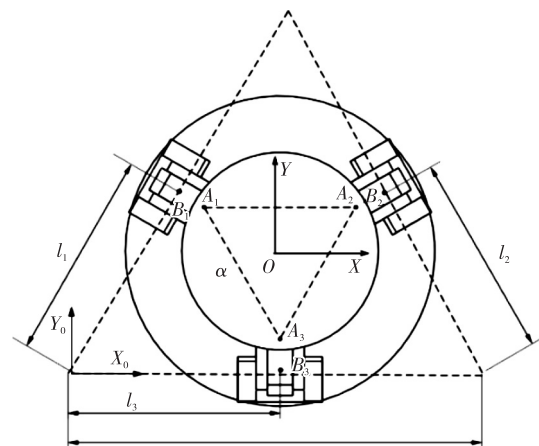


图2 XY平面平台简图

图2中, $B_i (i=1, 2, 3)$ 为第一级机构与第二级机构的交点, $A_i (i=1, 2, 3)$ 是球副的中心点。图中坐标系建立如下:过 B_i 点分别作平行于3个第二

级机构的虚线,形成第二级机构位移三角形。在三角形左下顶点建立全局坐标系 $\{O_0\}$ 。将沿三角形底边向右设为 X_0 轴正方向,将垂直于 X_0 轴向上设为 Y_0 轴正方向。依照 $\{O_0\}$ 的建立方式,在移动平台几何中心设立局部坐标系 $\{O\}$, X 、 Y 轴指向与 $\{O_0\}$ 类似。当第三级被动机构参与并联运动时,三级运动机构与移动平台的运动关系如图 3-4 所示。

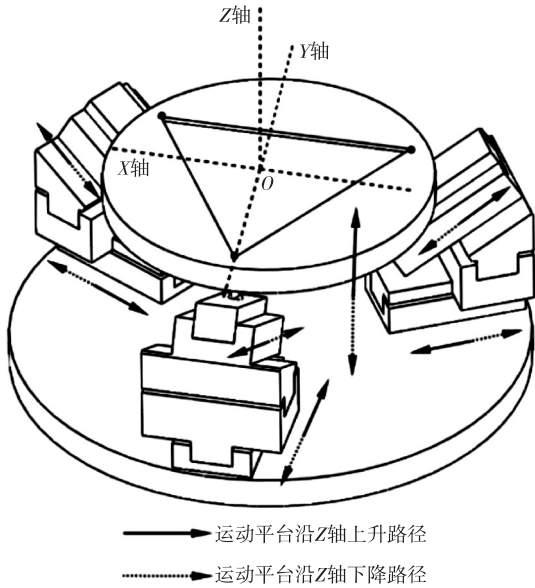


图 3 移动平台平移示意图

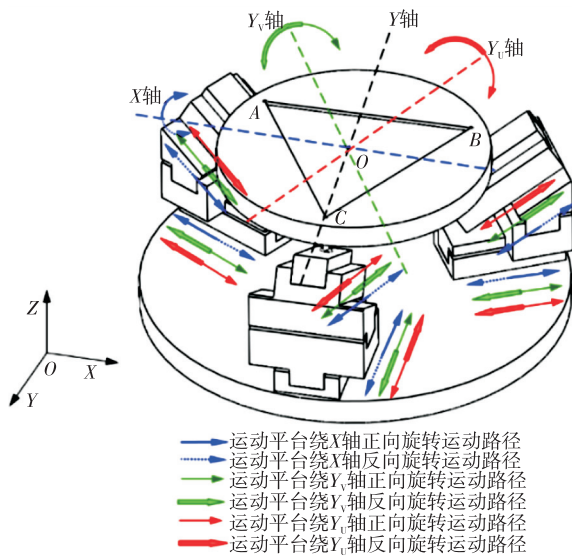


图 4 移动平台旋转示意图

为建立运动学模型,理清各个构件与移动平台间的关系,对移动平台的运动与驱动结构的关系进行分析。在初始位置时,过移动平台几何中心 O 以垂直于移动平台向上为 Z 轴正方向,过 O 点并与 AB 平行指向右为 X 轴正方向。 Y 轴同时垂直于 X

轴、 Z 轴,指向 C 点为其正方向。由图 3 可看出,当 3 个一级压电直线驱动机构同时向固定基座几何中心运动时,移动平台会沿 Z 轴上升,反之则下降,3 个机构的位移量相同。由图 4 可看出,当 3 个一级压电直线驱动机构中的 1 个向固定基座的几何中心移动时,其余 2 个远离,则移动平台会绕 X 轴、 Y 轴旋转运动。 A 、 B 、 C 是 3 个球副的中心点,移动平台可以绕平行于 AB 的 X 轴旋转,绕平行于 BC 的 Y_U 轴旋转,也可以绕平行于 AC 的 Y_V 轴旋转,3 根轴均通过移动平台中心轴。

为涉及第三级被动机构的运动方式建立坐标系,如图 5 所示,图中 C_i 为第一级压电直线机构和第二级压电直线机构的交点, A_i 为球副的中心点。将在固定基座几何中心 O_1 设定为全局坐标系 $\{O_1\}$ 的坐标原点, X_1 轴通过 O_1 点且平行于 C_1C_2 ,当 X_1 轴指向右时设定为 X_1 轴正方向。 Z_1 轴通过 O_1 点并垂直于固定基座,当 Z_1 轴指向上时设定为 Z_1 轴正方向。 Y_1 轴过 O_1 点且垂直于 X_1Z_1 平面指向 C_3 点时为 Y_1 轴正方向。在移动平台上建立局部坐标系 $\{O\}$,其坐标系设计与全局坐标系 $\{O_1\}$ 相似,其中 Y_V 轴过局部坐标系原点 O 且平行于 A_1A_3 , Y_U 轴过原点 O 且平行于 A_2A_3 。三角形 $A_1A_2A_3$ 是以 3 个球副中心点为顶点的等边三角形,其中心是移动平台的几何中心。

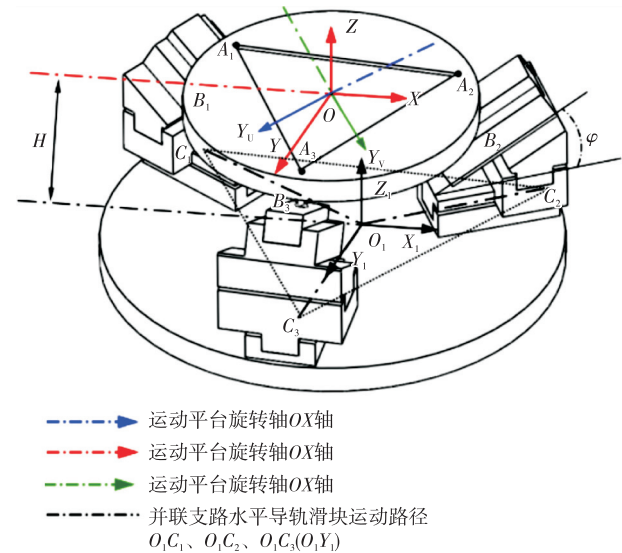


图 5 旋转坐标系简图

2.2 机构运动学解析

在并联平台的运动学逆解中,移动平台的位姿已知。其位置和姿态均是由局部坐标系 $\{O_0\}$ 相对

于全局 $\{O\}$ 的表示。

设 A_i 点在局部坐标系中的位置矢量为 \mathbf{a}'_i ,采用欧拉角变换可得, A_i 在全局坐标系中的位置矢量可表示为

$$\mathbf{a}_i = \mathbf{R}\mathbf{a}'_i + \mathbf{p} \quad i=1,2,3 \quad (3)$$

式中: \mathbf{R} 为局部坐标系 $\{O\}$ 向全局坐标系 $\{O_0\}$ 转换的转换矩阵; \mathbf{a}_i 为 A_i 在全局坐标系中的位置矢量; $\mathbf{p}=[x,y]^T$ 表示局部坐标系相对于全局坐标系的位置矢量。旋转变换矩阵可表示为

$$\mathbf{R} = \mathbf{R}_z(\varphi) = \begin{bmatrix} \cos\varphi & -\sin\varphi \\ \sin\varphi & \cos\varphi \end{bmatrix} \quad (4)$$

A_i 点在 $\{O\}$ 坐标系中的位置矢量可由并联平台的几何结构直接求得:

$$\begin{cases} \mathbf{a}'_1 = \left(-\frac{1}{2}a, \frac{\sqrt{3}}{6}a\right)^T \\ \mathbf{a}'_2 = \left(\frac{1}{2}a, \frac{\sqrt{3}}{6}a\right)^T \\ \mathbf{a}'_3 = \left(0, -\frac{\sqrt{3}}{3}a\right)^T \end{cases} \quad (5)$$

式中 a 为移动平台中球副中心点之间的直线距离。

由矢量法可知,点 A_i 在全局坐标系中的位置矢量可由其他矢量表示:

$$\mathbf{a}_i = \mathbf{b}_i + \mathbf{d}_i \quad i=1,2,3 \quad (6)$$

式中: \mathbf{b}_i 为 B_i 点在 $\{O_0\}$ 坐标系中的位置矢量; \mathbf{d}_i 表示 $\overline{B_iA_i}$ 在 $\{O_0\}$ 坐标系中的位置矢量。

$$\mathbf{b}_1 = l_1\mathbf{j}, \mathbf{b}_2 = l_2\mathbf{j} + b\mathbf{i}, \mathbf{b}_3 = l_3\mathbf{i} \quad (7)$$

$$\mathbf{Rot}(Y_U, \beta) = \begin{bmatrix} \frac{1+3c\beta}{4} & -\frac{\sqrt{3}(1-3c\beta)}{4} & -\frac{\sqrt{3}}{2}s\beta & 0 \\ -\frac{\sqrt{3}(1-3c\beta)}{4} & \frac{3+c\beta}{4} & -\frac{1}{2}s\beta & 0 \\ \frac{\sqrt{3}}{2}s\beta & \frac{1}{2}s\beta & c\beta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (11)$$

当移动平台绕 Y_V 轴做旋转运动时,设旋转角度为 γ ,局部坐标系 $\{O\}$ 向全局坐标系 $\{O_1\}$ 变换的变换矩阵 $\mathbf{Rot}(Y_V, \gamma)$ 由同理可得。

最终可得到使移动平台中任意点的局部坐标向全局坐标系变换的变换矩阵 \mathbf{T} 。设移动平台中任意点的局部坐标空间矢量为 $\mathbf{P}^{[8]}$,该点变换到全局坐标系中的位置矢量设为 \mathbf{P}_1 ,则变换矩阵 \mathbf{T} 为

$$\mathbf{T} = \mathbf{Tran}(Z, h_z) \cdot \mathbf{Rot}(X, \alpha) \cdot \mathbf{Rot}(Y_U, \beta) \cdot \mathbf{Rot}(Y_V, \gamma) \quad (12)$$

式中: l_i 为第二级结构位移量 L_i 与三角形边长 b 的和; \mathbf{i}, \mathbf{j} 分别表示沿 $\{O_0\}$ 坐标系中两轴正方向的单位矢量。联立式(5)-(6),可求得该并联机构中第二级结构的逆解:

$$\begin{cases} L_1 = \frac{1}{2}x + \frac{\sqrt{3}}{2}y - \frac{\sqrt{3}}{3}as\varphi - \frac{b}{2} \\ L_2 = \frac{1}{2}(b-x) + \frac{\sqrt{3}}{2}y + \frac{\sqrt{3}}{3}as\varphi - \frac{b}{2} \\ L_3 = x + \frac{\sqrt{3}}{3}as\varphi - \frac{b}{2} \end{cases} \quad (8)$$

当移动平台做升降运动(即沿 Z 轴运动)时,局部坐标系 $\{O\}$ 向全局坐标系 $\{O_1\}$ 变换的变换矩阵为

$$\mathbf{Tran}(Z, h_z) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & h_z + H \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (9)$$

当移动平台绕 X 轴做旋转运动时,设旋转角度为 α ,局部坐标系 $\{O\}$ 向全局坐标系 $\{O_1\}$ 变换的变换矩阵 $^{[7]}$ 为

$$\mathbf{Rot}(X, \alpha) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\alpha & -\sin\alpha & 0 \\ 0 & \sin\alpha & \cos\alpha & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (10)$$

当移动平台绕 Y_U 轴做旋转运动时,设旋转角度为 β ,局部坐标系 $\{O\}$ 向全局坐标系 $\{O_1\}$ 变换的变换矩阵为

$$\mathbf{T} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & -\frac{\sqrt{3}}{2}\beta + \gamma & 0 \\ 0 & 1 & \frac{\gamma - (2\alpha + \beta)}{2} & 0 \\ \frac{\sqrt{3}}{2}(\beta + \gamma) & \frac{2\alpha + \beta - \gamma}{2} & 1 & h_z + H \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (13)$$

$$\mathbf{P}_1 = \mathbf{T} \cdot \mathbf{P} \quad (14)$$

当移动平台绕 XY 轴旋转时,第一级压电直线驱动机构单独作为并联平台的输入。设 3 个第一级压电直线驱动机构的输入为 L_{j-3} 、 L_{j-4} 、 L_{j-5} , j 表示移动平台绕某轴做的旋转运动。 $j = \alpha$ 表示移动平台绕 X 轴的旋转角度,其余旋转角度类似。

首先求出球副中心点 A_i 在局部坐标系 $\{O\}$ 中的位置矢量 \mathbf{O}_{A_i} ($i = 1, 2, 3$), 根据并联平台的几何关系可得:

$$\begin{cases} \mathbf{O}_{A_1} = \left(-\frac{\sqrt{3}}{2}R, -\frac{1}{2}R, 0\right)^T \\ \mathbf{O}_{A_2} = \left(\frac{\sqrt{3}}{2}R, -\frac{1}{2}R, 0\right)^T \\ \mathbf{O}_{A_3} = (0, R, 0)^T \end{cases} \quad (15)$$

式中 R 是以 3 个球副中心点为顶点的等边三角形的边长。

经变换矩阵变换后可得球副中心在全局坐标系中的空间位置矢量 \mathbf{O}_{1A_i} ($i = 1, 2, 3$), 变换表达式为

$$\mathbf{O}_{1A_i} = T_1 \cdot \mathbf{O}_{A_i} + (0, 0, h_z + H)^T \quad (16)$$

联立式(15)-(16)可得空间位置矢量 \mathbf{O}_{1A_i} ($i = 1, 2, 3$):

$$\begin{cases} \mathbf{O}_{1B_1} = \left[-\frac{\sqrt{3}}{2}(R_1 + b \cos \varphi \tan \theta_{i-1}), -\frac{1}{2}(R_1 + b \cos \varphi \tan \theta_{i-1}), H - b \cos \varphi + b \sin \varphi \tan \theta_{i-1}\right]^T \\ \mathbf{O}_{1B_2} = \left[\frac{\sqrt{3}}{2}(R_1 + b \cos \varphi \tan \theta_{i-2}), -\frac{1}{2}(R_1 + b \cos \varphi \tan \theta_{i-1}), H - b \cos \varphi + b \sin \varphi \tan \theta_{i-2}\right]^T \\ \mathbf{O}_{1B_3} = [0, R_1 + b \cos \varphi \tan \theta_{i-3}, H - b \cos \varphi + b \sin \varphi \tan \theta_{i-2}]^T \end{cases} \quad (19)$$

根据球副与移动平台连接杆的长度可得:

$$|\mathbf{O}_{1A_i} - \mathbf{O}_{1B_i}| = b \quad (20)$$

将式(17)、(19)代入式(20)可得:

$$\begin{cases} \theta_{i-1} = \frac{b^2 \sin^2 \varphi - m^2 + 2nb \cos \varphi}{2mb \cos \varphi + 2nb \sin \varphi - 2b^2 \sin \varphi \cos \varphi} \\ \theta_{i-2} = \frac{b^2 \sin^2 \varphi - m^2 + 2pb \cos \varphi}{2mb \cos \varphi - 2pb \sin \varphi - 2b^2 \sin \varphi \cos \varphi} \\ \theta_{i-3} = \frac{b^2 \sin^2 \varphi - m^2 + 2qb \cos \varphi}{2mb \cos \varphi + 2qb \sin \varphi - 2b^2 \sin \varphi \cos \varphi} \end{cases} \quad (21)$$

式中: $m = R_1 - R$; $n = (\alpha + 2\beta + \gamma) \cdot R/2$; $p = (\beta + 2\gamma - \alpha) \cdot R/2$; $q = (2\alpha + \beta - \gamma) \cdot R/2$ 。

根据并联平台的结构几何关系可得,球副的转角 θ_{i-j} ($i = \alpha, \beta, \gamma; j = 1, 2, 3$) 与第二级直线驱动机构的输入位移 L_{j-k} 为

$$L_{j-k} / \cos \varphi = -b \cdot \tan \theta_{j-k} \quad (22)$$

$$\begin{cases} \mathbf{O}_{1A_1} = \left[-\frac{\sqrt{3}}{2}R, -\frac{1}{2}R, -\frac{R}{2}(\alpha + 2\beta + \gamma) + h_z + H\right]^T \\ \mathbf{O}_{1A_2} = \left[\frac{\sqrt{3}}{2}R, -\frac{1}{2}R, \frac{R}{2}(\beta + 2\gamma - \alpha) + h_z + H\right]^T \\ \mathbf{O}_{1A_3} = \left[0, R, \frac{R}{2}(2\alpha + \beta - \gamma) + h_z + H\right]^T \end{cases} \quad (17)$$

点 C_i 到固定基座中心点 O_1 的距离为 R_1 , 根据此几何关系可求得点 C_i 在全局坐标系 $\{O_1\}$ 中的空间位置矢量:

$$\begin{cases} \mathbf{O}_{1C_1} = \left(-\frac{\sqrt{3}}{2}R_1, -\frac{1}{2}R_1, 0\right)^T \\ \mathbf{O}_{1C_2} = \left(\frac{\sqrt{3}}{2}R_1, -\frac{1}{2}R_1, 0\right)^T \\ \mathbf{O}_{1C_3} = (0, R_1, 0)^T \end{cases} \quad (18)$$

在并联平台中, $A_i B_i$ 为球副与移动平台连接杆的长度, 设为 b 。当压电直线驱动机构运动时, 设球副产生的转角为 θ_{i-j} ($i = \alpha, \beta, \gamma; j = 1, 2, 3$), 第三级被动直线机构的倾斜角为 φ 。根据并联平台的几何关系可得球副与第三级被动直线机构交点 B_i 在全局坐标系下的空间位置矢量 \mathbf{O}_{1B_i} ($i = 1, 2, 3$) 为

联立式(21)-(22), 可得 L_{j-3} 、 L_{j-4} 、 L_{j-5} :

$$\begin{cases} \sum_{i=\alpha}^{\gamma} L_{j-3} = \frac{m^2 - b^2 \sin^2 \varphi - 2nb \cos \varphi}{2m + 2n \tan \varphi - 2b \sin \varphi} \\ \sum_{i=\alpha}^{\gamma} L_{j-4} = \frac{m^2 - b^2 \sin^2 \varphi + 2pb \cos \varphi}{2m - 2n \tan \varphi - 2b \sin \varphi} \\ \sum_{i=\alpha}^{\gamma} L_{j-5} = \frac{m^2 - b^2 \sin^2 \varphi + 2qb \cos \varphi}{2m - 2q \tan \varphi - 2b \sin \varphi} \end{cases} \quad (23)$$

由图 3 可知, 当 3 个第一级压电直线驱动机构同时向固定基座几何中心运动时, 移动平台会沿 Z 轴上升, 反之则下降, 其位移量相同。此时有:

$$L_{h_z-3} = L_{h_z-4} = L_{h_z-5} = \frac{m^2 - b^2 \sin^2 \varphi + 2h_z b \cos \varphi}{2m - 2h_z \tan \varphi - 2b \sin \varphi} \quad (24)$$

3 运动学仿真

确定并联平台各部件尺寸参数: 压电并联平台

固定基座直径为 $\varnothing 110$ mm, 运动平台直径为 $\varnothing 70$ mm, 在初始位置固定基座与运动平台的距离为 40 mm, $OA_i = 31$ mm, $OC_i = 38$ mm, 压电直线驱动机构的总长为 30 mm, 行程设为 16 mm。采用 SolidWorks 建模, 将模型导入 Adams 仿真软件中, 并添加移动副及球副等约束, 如图 6 所示。正确添加约束后可得模型自由度为 6, 与上述分析相符^[9]。

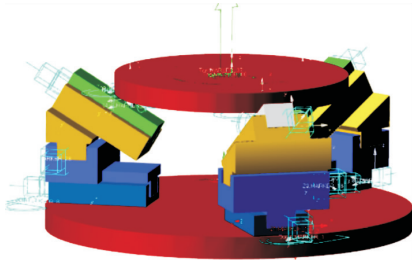


图 6 并联平台仿真模型

3.1 仿真结果分析

对并联平台进行仿真分析是为了对比仿真结果与利用运动模型计算出的并联平台反解结果, 以此验证并联平台运动学模型的正确性^[10]。

在运动平台几何中心 O 添加一般驱动, 使动平台沿 Z 轴运动 20 mm, 仿真时间设为 10 s, 可得仿真结果如图 7 所示。由图可看出, 当并联平台的运动平台只沿 Z 轴运动时, 6 个压电直线驱动机构中只有第一级压电驱动机构(即 L1、L2、L3)参与运动, 而 L4、L5、L6 不动, 且 L1、L2、L3 的位移完全相同, 仿真结果与上述运动分析相符。

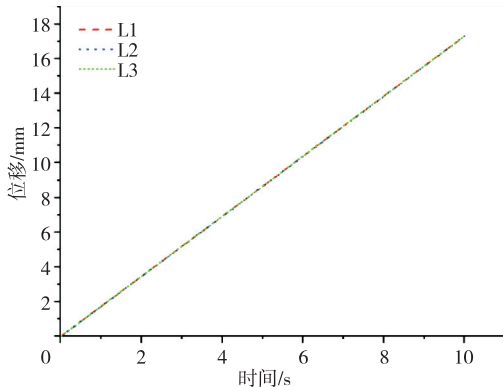


图 7 Z 方向位移仿真结果

在运动平台几何中心 O 添加一般驱动, 使动平台绕 X 轴旋转 20° , 仿真时间设为 10 s, 可得仿真结果如图 8 所示。当动平台绕 X 轴运动时, 只有第一级压电直线运动机构参与运动, 并带动第三级被动机构运动, 使得运动平台绕轴转动。由图 8 可看出, L1、L3 位移相同且与 L2 位移相反, 因此运动平台绕 X 轴运动, 绕 Y 轴同理。仿真结果与上述分析相符。

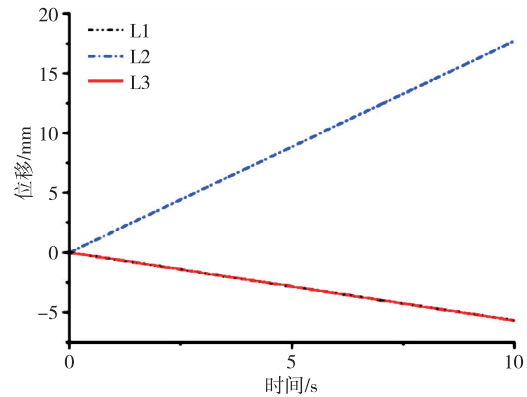
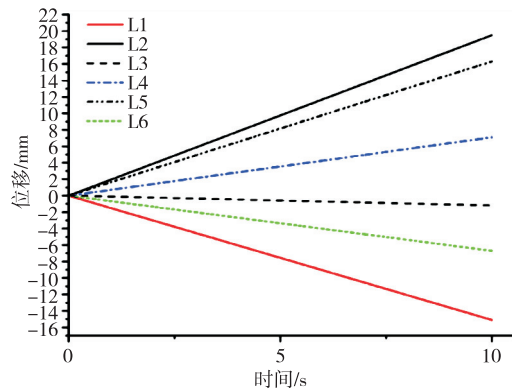


图 8 绕 X 转动仿真结果

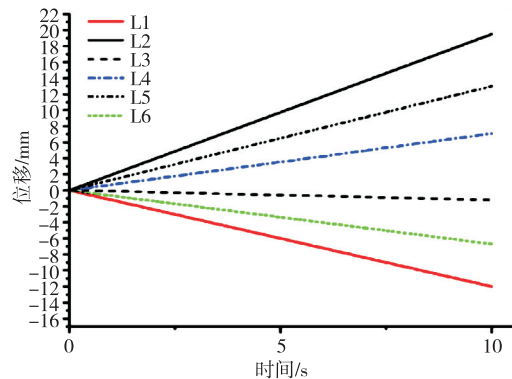
在运动平台几何中心 O 添加一般驱动, 仿真时间设为 10 s, 其运动数据如下:

$$\begin{cases} X = -0.001 \cdot \text{time} \\ Y = 0.001 \cdot \text{time} \\ Z = 0.001 \cdot \text{time} \\ \alpha = -1d \cdot \text{time} \\ \beta = 0.5d \cdot \text{time} \\ \gamma = -1d \cdot \text{time} \end{cases} \quad (25)$$

根据上述参数可得六自由度运动学仿真结果, 如图 9 所示。仿真结束后, 并联平台位姿如图 10 所示。



(a) 仿真位移结果



(b) Matlab理论位移结果

图 9 并联平台压电驱动机构位移

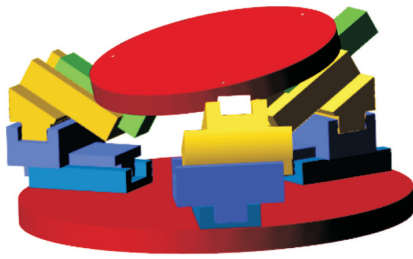


图10 并联平台模型位姿图

由图9可看出,6个压电直线驱动机构初始时刻同时开始做直线运动,L1、L2、L3正方向设为指向固定基座几何中心,L4、L5、L6正方向设为沿固定基座切线方向指向右。从仿真软件中生成的运动仿真动画中,并联平台的6个压电直线驱动互不干扰,表示其具有较好的运动性能。对比仿真软件得到的运动学曲线和Matlab计算的理论曲线,两者基本吻合,验证了该运动学模型的正确性。

4 结束语

研究了一种基于压电驱动的六自由度并联平台,利用修正的Grübler-Kutzbach公式计算平台的自由度,根据并联平台的机械结构建立了局部和全局坐标系,利用齐次坐标变换方法构建了并联平台的位姿反解。利用仿真软件Adams对六自由度并联平台展开了仿真研究,结果表明仿真模型与运动学模型一致,验证了运动学模型的正确性,为同类压电并联平台的机构构型研究以及后续实际应用提供了依据。

参考文献:

- [1] 陈攀,朱春莉,崔玉国,等. $x-y-\theta_z$ 大行程无耦合并联压电微动平台的设计[J]. 压电与声光, 2023, 45(5): 705-709.
CHEN Pan, ZHU Chunli, CUI Yuguo, et al. Design of a $x-y-\theta_z$ large stroke uncoupled parallel piezoelectric micro-positioning stage[J]. Piezoelectrics & Acousto-optics, 2023, 45(5): 705-709.
- [2] 尤晶晶,严飞,周为,等. 压电驱动式台体型并联机构的位置正解研究[J]. 压电与声光, 2017, 39(6): 829-833.

YOU Jingjing, YAN Fei, ZHOU Wei, et al. Forward displacement analysis of piezoelectric-drive general parallel mechanism[J]. Piezoelectrics & Acousto-optics, 2017, 39(6): 829-833.

- [3] 吴浩然,李英杰. 基于压电驱动的二维并联精密平台的设计与分析[J]. 仪表技术, 2021(6): 37-41.
WU Haoran, LI Yingjie. Design and analysis of two dimensional parallel precision platform based on piezoelectric actuator [J]. Instrumentation Technology, 2021(6): 37-41.
- [4] PUMPHREY M, ABOUZARKHANIFARD A, ZHANG Lihong, et al. A parallel type micro-robotic system for semi-conductor manufacturing machines: preliminary results [C] // Delft, Netherlands: 2021 IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics (AIM), 2021: 532-539.
- [5] 杨志浩. 若干具有连续运动能力的3-DOF并联机构型综合[D]. 秦皇岛: 燕山大学, 2017.
- [6] 谢俊,左飞飞,杨启志,等. 一种三自由度弱耦合并联机构运动学分析[J]. 机床与液压, 2022, 50(1): 36-43.
XIE Jun, ZUO Feifei, YANG Qizhi, et al. Kinematics analysis of a three degrees of freedom parallel mechanism with low coupling degree[J]. Machine Tool & Hydraulics, 2022, 50(1): 36-43.
- [7] 刘锋. 齐次变换矩阵在机器人运动学中的应用[J]. 河南科技, 2020, 39(28): 22-24.
LIU Feng. The application of homogeneous transformation matrices in robot kinematics[J]. Henan Science and Technology, 2020, 39(28): 22-24.
- [8] 刘艳浩. 六自由度并联平台的动力学分析与结构参数优化[D]. 沈阳: 沈阳建筑大学, 2021.
- [9] 朱祺珩,尹凝霞,魏远鹏,等. 基于直线电动机的3-PSS并联机器人机构设计与仿真分析[J]. 机械工程师, 2021(11): 111-115.
ZHU Qiheng, YIN Ningxia, WEI Yuanpeng, et al. Mechanism design and simulation analysis of 3-PSS robot based on linear motors[J]. Mechanical Engineer, 2021(11): 111-115.
- [10] 王婷. 并联机构解耦机理研究与仿真分析[D]. 廊坊: 华北科技学院, 2021.