

doi:10.3969/j.issn.2095-0411.2019.02.006

# 一种新型 2T2R 并联机构及其运动性能分析

朱伟, 刘晓飞, 李寒冰, 沈惠平, 戴志明, 顾开荣

(常州大学 现代机构学研究中心, 江苏 常州 213164)

**摘要:**首先提出一种 2PUS-2PRU 两平移两转动四自由度并联机构, 根据方位特征集(POC)理论, 分析了机构的拓扑结构特性, 导出了机构的运动学逆解模型。运用极限边界搜索法绘制机构的工作空间三维图, 分析了结构参数对工作空间的影响, 为参数优化提供参考。根据运动模型求解机构的雅可比矩阵, 并分析了机构的奇异位置, 包括逆解奇异、正解奇异和混合奇异, 同时给出部分机构奇异位置的佳姿模型。2PUS-2PRU 并联机构具有精度高、转角大、工作空间连续等优点, 在运动模拟器、姿态调平, 特别是高精度转向装置具有较好的应用前景。

**关键词:**并联机构; 运动学; 工作空间; 奇异

**中图分类号:**TH 112

**文献标志码:**A

**文章编号:**2095-0411(2019)02-0044-08

## A Novel 2T2R Parallel Mechanism and Its Kinematic Analysis

ZHU Wei, LIU Xiaofei, LI Hanbing, SHEN Huiping, DAI Zhiming, GU Kairong

(Research Center for Advanced Mechanism Theory, Changzhou University, Changzhou 213164, China)

**Abstract:** 2PUS-2PRU parallel mechanism is introduced and designed which has 4 degree-of-freedom (DOF) motion output consisting of 2DOF translational motion and 2DOF rotational motion. In this paper, the topological structure of the mechanism is analyzed firstly according to the Position Orientation Characteristic theory (POC). Then the inverse kinematics model of the mechanism is deduced. Secondly, some workspace graphs of the mechanism are obtained by using the limit boundary searching method, which include 3-dimensional workspace graphs of the mechanism, and workspace relations between the displacement input of the sliding guides and the angular output of the moving platform. The influence of the structural parameters on the workspace is analyzed, which would provide a reference for optimization of parameters of the mechanism. Thirdly, the Jacobian matrix is deduced on the basis of the previous kinematics model, from which the singular conditions are analyzed

**收稿日期:**2018-11-30。

**基金项目:**国家自然科学基金资助项目(51075045);江苏省自然科学基金资助项目(BK20161192);江苏省大学生创新创业项目(201610292040Y)。

**作者简介:**朱伟(1976—),男,江苏泰兴人,博士,副教授。E-mail: zwillx@126.com

**引用本文:**朱伟, 刘晓飞, 李寒冰, 等. 一种新型 2T2R 并联机构及其运动性能分析[J]. 常州大学学报(自然科学版), 2019, 31(2): 44-51.

including the singular of the inverse solutions, the singular of the positive solutions and the mixed singular. Also, some CAD models of special singular position are present. 2PUS-2PRU parallel mechanism has some advantages of higher precision, larger rotation angle, and continuous workspace. The mechanism has a good application prospects in the field of motion simulator, attitude leveling and solar tracking.

**Key words:** parallel mechanism; kinematics; workspace; singularity

少自由度(自由度少于6)并联机构由于结构简单、制造成本低、控制方便等优点,具有广阔的应用前景<sup>[1]</sup>。四自由度并联机构包含一平移三转动(1T3R)、三平移一转动(3T1R)和两平移两转动(2T2R)3种运动输出形式,前2种机构类型研究比较广泛,出现了多种实用性机型,而2T2R并联机构研究相对较少。事实上,在运动模拟器、姿态调平、火炮转向以及并联机床等领域,通常需要2T2R并联机构并实现较大工作空间范围内的转动。

林玲等<sup>[2]</sup>基于螺旋理论提出了具有对称结构的2T2R并联机构设计方法;罗玉峰等<sup>[3]</sup>基于方位特征集理论对2T2R并联机构进行结构综合与分类;Fan等<sup>[4]</sup>提出了一种基于构型演变和李群理论的构型综合方法,并采用该方法综合了2T2R并联机构构型。目前,各类文献提出的2T2R并联机构构型主要有<sup>[5-9]</sup>:2RRP-RRRRP,2RPU-2SPS,2PRU-RSS,2PRRR-2PRS,2RPRR-2RPU等(P,R,U,S分别表示移动副、转动副、虎克铰、球铰)。

工作空间是评价并联机构性能的重要指标<sup>[9]</sup>,陈建涛等<sup>[10]</sup>采用作图法得到3-RRC并联机构的工作空间,方法简单但精度低。高秀兰等<sup>[11]</sup>应用解析法求得Delta并联机构的工作空间,结果精确但过程颇为繁琐;Cornel Brisan等<sup>[12]</sup>采用数值法分析了一类可重构并联机构的位置工作空间。应用Matlab软件求解结果精确,过程较为简单。奇异位形是并联机构另一重要性能指标<sup>[13-14]</sup>。GOSSELIN等<sup>[15]</sup>利用雅可比矩阵将奇异分为三类;MERLET<sup>[16]</sup>提出了基于Grassman线几何的奇异分析方法;JOSHI等<sup>[17]</sup>运用螺旋理论的互易原理建立了少自由度并联机构的全雅可比矩阵,进而基于该矩阵对3-RPS机构进行奇异分析。

本文根据方位特征集(POC)理论<sup>[15]</sup>,设计一种可实现2T2R运动的2PUS-2PRU并联机构,建立了运动学反解方程,并分析了机构的奇异位形和工作空间等运动性能,为该并联转向装置的尺度综合和优化、设计与应用奠定了理论基础。

## 1 机构拓扑结构分析

### 1.1 机构描述

机构原理图如图1所示。第1,3支链为PRU支链,一端通过滑块 $P_{i1}$ 联结在与静平台固联的水平杆 $B_iC_i$ 上,中间杆 $A_iC_i$ 通过 $R_{i2}$ 副与滑块相连( $i=1,3$ ),另一端通过 $U_{i3}$ 副与动平台联结,其中转动副 $R_{i2}$ 轴线与滑块 $P_{i1}$ 移动方向垂直, $U_{i3}$ 副的2条转轴 $jR_{i3}$ 垂直( $j=1,2$ ),1条转轴与 $R_{i2}$ 副轴线平行,拓扑结构可表示为 $SOC\{-P_{i1} \perp R_{i2} // {}^1R_{i31} \perp {}^2R_{i32} -\}$ 。第2,4支链为PUS支链,支链一端通过滑块 $P_{i1}$ 联结在静平台的水平杆上,中间杆

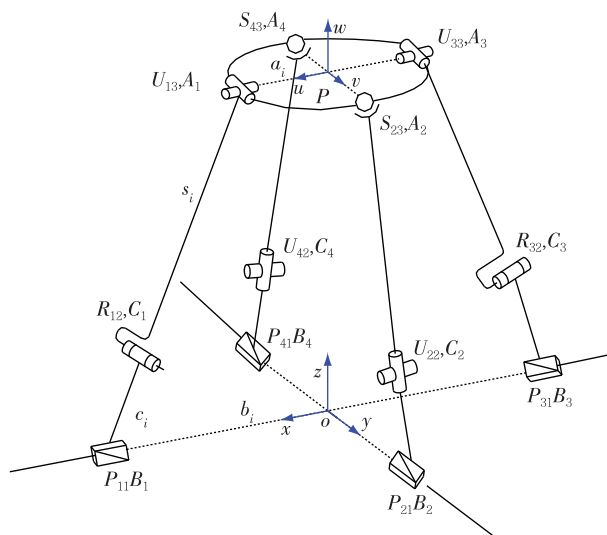


图1 机构简图

$A_iC_i$  通过  $U_{i2}$  副与滑块相连( $i=2,4$ ),另一端通过球副  $S_{i3}$ 与动平台相连, $U_{i2}$ 副的 2 条转轴 ${}^iR_{i2}$ 相互垂直( $j=1,2$ ),其中 1 条转轴与  $P_{i1}$ 副重合,其拓扑结构可表示为  $\text{SOC}\{-P_{i1}||{}^1R_{i31}\perp{}^2R_{i32}-S_{i3}-\}$ 。

## 1.2 自由度分析

根据机构的有序单开链组成原理:自由度(DOF)为  $F$  的并联机构(PKM)可看成由  $F$  个驱动副和  $v$  个有序单开链(SOC)依次连接而成。机构可看成是由第 1,3 支链构成的第一独立回路(记为子并联机构  $M_{Pa(1-3)}$ )、第 2 支链构成的第二独立回路(记为子并联机构  $M_{Pa(1-2-3)}$ )、以及第 4 支链构成第三独立回路(记为并联机构  $M_{Pa}$ )依次连接而成。根据方位特征原理,机构的 POC 集表示为

$$M_{Pa} = \bigcap_{j=1}^{v+1} M_{bj} = \begin{bmatrix} t^2(\perp R_{12}) \\ r^2(||\diamond({}^1R_{13}, {}^2R_{13})) \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中: $v$  为独立回路数, $v=3$ ;  $M_{bj}$  为第  $j$  条支链的 POC 集( $j=1,2,3$ )。

根据机构自由度计算公式

$$F = \sum_{i=1}^m f_i - \sum_{j=1}^v \xi_{L_j} = 20 - (4 + 6 + 6) = 4 \quad (2)$$

式中: $f_i$  为第  $i$  个运动副的自由度(不含局部自由度);  $\xi_{L_j}$  为第  $j$  个独立回路的独立位移方程数。

可见,该机构为两平移两转动 4 自由度运动输出机构。

## 2 并联机构位置分析

已知动平台的位置和姿态,确定 4 条支链中驱动副的输入长度  $h_i$  ( $i=1,2,3,4$ )。由于机构运动输出为两平移两转动,可假设机构动平台的中心  $P$  点的位置为  $x_p, y_p, z_p$ ,绕  $x$  轴、 $y$  轴转动的姿态角分别为  $\alpha$  和  $\beta$ 。

假设动平台为圆形,顶点到中心的距离分别为  $r_a, r_b$ 。在静平台的中心  $O$  点建立静坐标系  $O-xyz$ , $x$  轴沿  $OB_1$  方向, $y$  轴沿  $OB_2$  方向, $z$  轴竖直向上。在动平台的中心  $P$  点建立动坐标系  $P-uvw$ , $u$  轴沿  $OA_1$  方向, $v$  轴沿  $OA_2$  方向, $w$  轴竖直向上,如图 1 所示。静坐标系  $P-uvw$  相对动坐标系  $O-xyz$  的基本旋转矩阵为

$${}^B\mathbf{R}_A = \begin{bmatrix} \cos \beta & \sin \beta \sin \alpha & \sin \beta \cos \alpha \\ 0 & \cos \alpha & -\sin \alpha \\ -\sin \beta & \cos \beta \sin \alpha & \cos \beta \cos \alpha \end{bmatrix} \quad (3)$$

根据图中矢量关系,可得封闭矢量方程

$$r_b \mathbf{b}_i + h_i \mathbf{c}_i + l_i \mathbf{s}_i = \mathbf{P} + r_a \mathbf{R}_A \mathbf{a}_i \quad (4)$$

式中: $\mathbf{a}_i, \mathbf{b}_i$  为  $PA_i, OB_i$  的单位矢量; $h_i, \mathbf{c}_i$  为  $B_iC_i$  的长度和单位矢量; $l_i, \mathbf{s}_i$  为  $C_iA_i$  的长度和单位矢量; $\mathbf{a}_i = \mathbf{b}_i = (\cos \varphi_i \quad \sin \varphi_i \quad 0)^T$ ,其中  $i=1,2,3,4$ ;  $\varphi_i = (i-1)\pi/2, \mathbf{c}_i = (0 \quad 0 \quad 1)^T$ 。

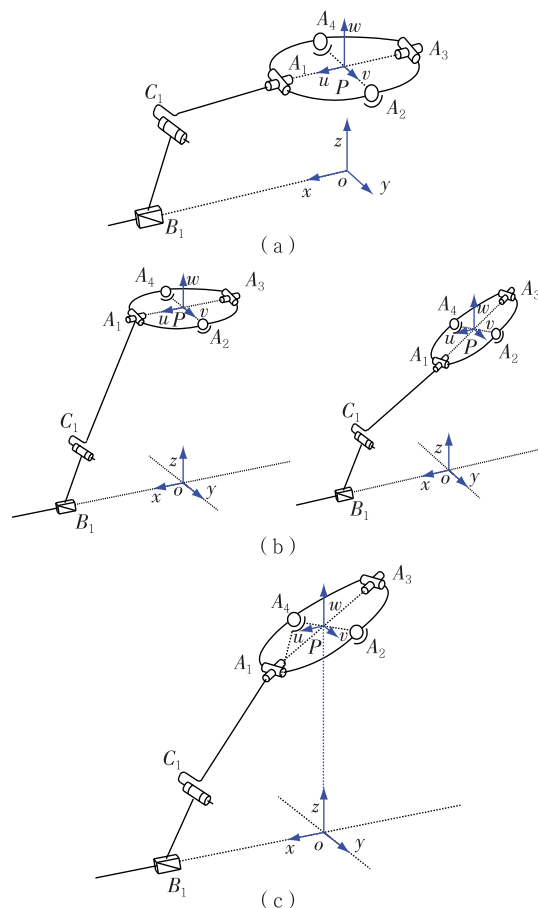


图 2 奇异位姿

根据  $A_iC_i$  杆长约束条件,将式(4)整理后平方,可得四元四次方程组

$$\begin{cases} (r_a \cos \beta + x_p - r_b - h_1)^2 + (y_p)^2 + (-r_a \sin \beta + z_p)^2 = l_s^2 \\ (r_a \sin \alpha \sin \beta + x_p)^2 + (r_a \cos \alpha + y_p - r_b - h_2)^2 + (r_a \sin \alpha \cos \beta + z_p)^2 = l_s^2 \\ (-r_a \cos \beta + x_p + r_b + h_3)^2 + (y_p)^2 + (r_a \sin \beta + z_p)^2 = l_s^2 \\ (-r_a \sin \alpha \sin \beta + x_p)^2 + (-r_a \cos \alpha + y_p + r_b + h_4)^2 + (-r_a \sin \alpha \cos \beta + z_p)^2 = l_s^2 \end{cases} \quad (5)$$

由式(5)可求解出机构的反解方程

$$h_i = d_i - r_b \pm \sqrt{l_s^2 - f_i} \quad (i = 1, 2, 3, 4) \quad (6)$$

式中:

$$\begin{cases} d_1 = r_a \cos \beta + x_p \\ d_2 = r_a \cos \alpha + y_p \\ d_3 = r_a \cos \beta - x_p \\ d_4 = r_a \cos \alpha - y_p \\ f_1 = (y_p)^2 + (-r_a \sin \beta + z_p)^2 \\ f_2 = (r_a \sin \alpha \sin \beta + x_p)^2 + (r_a \sin \alpha \cos \beta + z_p)^2 \\ f_3 = -(r_a \sin \beta + z_p)^2 + (y_p)^2 \\ f_4 = (-r_a \sin \alpha \sin \beta + x_p)^2 + (-r_a \sin \alpha \cos \beta + z_p)^2 \end{cases}$$

### 3 奇异位形分析

#### 3.1 速度分析

本文采用 Jacobian 代数法<sup>[19]</sup>求解得到机构的 Jacobian 矩阵,令该矩阵行列式的值为零,即可得到机构的奇异位形;进一步,按照 Jacobian 矩阵的奇异性,详细研究了机构的逆解奇异、正解奇异及混合奇异。

对方程(5)两边求一阶导数,整理后,可得并联机构动平台输出速度和主动关节输入速度之间的映射关系,有

$$\mathbf{J}_p \begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{z} \\ \dot{\alpha} \\ \dot{\beta} \end{bmatrix} = \mathbf{J}_q \begin{bmatrix} \dot{h}_1 \\ \dot{h}_2 \\ \dot{h}_3 \\ \dot{h}_4 \end{bmatrix} \quad (7)$$

式中:  $\mathbf{J}_p$  为输入速度雅克比矩阵;  $\mathbf{J}_q$  为输出速度雅克比矩阵。

$$\mathbf{J}_p = \begin{bmatrix} G_{11} & G_{12} & G_{13} & G_{14} \\ G_{21} & G_{22} & G_{23} & G_{24} \\ G_{31} & G_{32} & G_{33} & G_{34} \\ G_{41} & G_{42} & G_{43} & G_{44} \end{bmatrix}, \quad \mathbf{J}_q = \begin{bmatrix} R_{11} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & R_{22} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & R_{33} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & R_{44} \end{bmatrix}$$

式中:

$$\begin{cases}
G_{11} = M_{11} = r_a \cos \beta + x_p - r_b - h_1 \\
G_{12} = M_{13} = -r_a \sin \beta + z_p \\
G_{13} = 0 \\
G_{14} = -M_{11}(r_a \sin \beta) - M_{13}(r_a \cos \beta) \\
G_{21} = M_{21} = r_a \sin \alpha \sin \beta + x_p \\
G_{22} = M_{23} = r_a \sin \alpha \cos \beta + z_p \\
G_{23} = r_a(M_{21} \cos \alpha \sin \beta - M_{22} \sin \alpha + M_{23}(\cos \alpha \cos \beta)) \\
G_{24} = r_a(M_{21} \sin \alpha \cos \beta - M_{22} \sin \alpha \sin \beta) \\
G_{31} = M_{31} = -r_a \cos \beta + x_p + r_b + h_3 \\
G_{32} = M_{33} = r_a \sin \beta + z_p \\
G_{33} = 0 \\
G_{34} = r_a(M_{31} \sin \beta + M_{33} \cos \beta) \\
G_{41} = M_{41} = -r_a \sin \alpha \sin \beta + x_p \\
G_{42} = M_{43} = -r_a \sin \alpha \cos \beta + z_p \\
G_{43} = r_a(-M_{41} \cos \alpha \sin \beta + M_{42} \sin \alpha - M_{43} \cos \alpha \cos \beta) \\
G_{44} = r_a(-M_{41} \sin \alpha \cos \beta + M_{43} \sin \alpha \sin \beta) \\
M_{22} = r_a \cos \alpha + y_p - r_b - h_2 \\
M_{42} = -r_a \cos \alpha + y_p + r_b + h_4 \\
R_{11} = M_{11} \\
R_{22} = M_{22} \\
R_{33} = -M_{31} \\
R_{44} = -M_{42}
\end{cases}$$

则机构的速度雅克比矩阵为

$$\mathbf{J} = \mathbf{J}^{-1q} \mathbf{J}_p \quad (8)$$

若  $\mathbf{J}_p$  非奇异,则

$$\dot{\mathbf{X}} = \mathbf{J} \dot{\mathbf{q}} \quad (9)$$

若  $\mathbf{J}_q$  非奇异,则

$$\dot{\mathbf{h}}_i = \mathbf{J}^{-1} \dot{\mathbf{X}} \quad (10)$$

式中:  $\dot{\mathbf{X}} = [\dot{x} \quad \dot{z} \quad \dot{\alpha} \quad \dot{\beta}]^T$ ;  $\dot{\mathbf{h}}_i = [\dot{h}_1 \quad \dot{h}_2 \quad \dot{h}_3 \quad \dot{h}_4]^T$ 。

式(9),(10)分别为机构速度的正、反解方程。

## 3.2 奇异分析

### 3.2.1 逆解奇异

发生条件为

$$|\mathbf{J}_q| = 0, \quad |\mathbf{J}_p| \neq 0 \quad (11)$$

根据式(11),存在 2 种情况:

1)以第 1 支链为例,连杆  $A_i C_i$  与  $OB_i$  平行,如图 2(a)所示,此时动平台在  $x$  轴方向上移动会产生卡死现象。

2)当驱动副到达极限位置时,机构出现边界奇异。

### 3.2.2 正解奇异

发生条件为

$$|\mathbf{J}_p|=0, |\mathbf{J}_q| \neq 0 \quad (12)$$

1) 当  $x=0, \beta=0$  时, 根据公式(12),  $z_p$  出现多个解, 与设定位置不吻合, 机构运动不确定, 位置如图 2(b)第 1 张图所示。

2) 第 1、第 3 支链连杆  $A_iC_i$  与动平台在 1 条直线上, 如图 2(b)第 2 张图所示, 此时动平台会产生顺时针或逆时针两种运动可能, 机构失去控制。

### 3.2.3 混合奇异

发生条件为

$$|\mathbf{J}_q|=0, \text{ 且 } |\mathbf{J}_p|=0 \quad (13)$$

第 1, 2, 3, 4 支链连杆  $A_iC_i$  与动平台在一条直线上且  $x, \beta$  为零时, 如图 2(c)所示, 此时动平台会产生顺时针和逆时针两种转动可能, 而在  $x$  轴方向上移动会产生卡死现象, 机构失去控制。

## 4 工作空间

根据如图 1 所示的机构简图, 考虑到  $B_iC_i$  杆和滑块  $P_{i1}$  或  $A_iB_i$  杆之间可能发生干涉, 故二者间的夹角  $\rho_i$  应大于  $0^\circ$ , 设定动平台姿态角  $\alpha, \beta$  的运动范围为  $\pm 55^\circ$ , 机构几何参数如表 1 所示。选择动平台中心  $P$  点作为参考点, 采用极限边界搜索法<sup>[20]</sup>对机构进行定姿态工作空间搜索, 找出所有可达点的集合。

通过 Matlab 软件编程, 搜索得到 2PRU-2PUS 并联机构的三维工作空间, 如图 3 所示, 为关于  $z, \alpha, \beta$  的工作空间关系, 机构可达的转动工作空间范围较大, 当  $z=100$  mm 附近,  $\alpha, \beta$  转角达到最大  $\pm 60^\circ$ , 当  $z > 100$  mm, 工作空间呈规则的四棱锥形状,  $\alpha, \beta$  转角工作空间随着  $z$  的增大而逐步减小。

当沿  $x, z$  轴方向的位移确定, 转角  $\alpha, \beta$  的工作空间范围取决于滑块的运动范围。假设  $x, z$  轴方向的位移分别为  $x=0, z_0=100$  mm, 通过搜索可得滑块位移  $h_i$  与  $\alpha, \beta$  转角的工作空间谱图如图 4 所示。可见,  $\alpha, \beta$  在  $\pm 60^\circ$  范围内, 滑块的位移  $h_i$  范围在  $[20, 60]$  区间内, 且 4 个驱动对动平台转角的影响相差不大。

值得注意的是, 上述图形均是在给定  $B_iC_i$  杆  $l_s=140$  mm 情况下得到的, 若  $B_iC_i$  杆长过短, 则会导致  $h_i$  运动范围变小, 从而使  $\alpha, \beta$  的转动工作空间变小; 若  $B_iC_i$  杆长过长, 尽管  $\alpha, \beta$  的工作空间变大, 但也会导致杆  $B_iC_i$  因刚度下降而出现弯曲现象。因此, 在实际工程应用中, 应综合考虑机构的各项几何参数, 使机构运动性能达到最优。

## 5 样机建模

该 2T2R 并联机构的虚拟样机设计, 如图 5 所示, 它包含静平台 2、动平台 1、PRU 支链 2 以及 PUS

表 1 机构参数

| 参数                                  | 数值                        |
|-------------------------------------|---------------------------|
| 动平台 $r_a$ /mm                       | 80                        |
| 定平台 $r_b$ /mm                       | 120                       |
| $C_iA_i$ 杆长 $l_s(i=1, 2, 3, 4)$ /mm | 140                       |
| 定、动平台初始距离 $z_0$ /mm                 | 100                       |
| 球铰许用转角 $\eta_i$ /rad                | $\pi/3$                   |
| 姿态角 $\alpha, \beta/(^\circ)$        | $-65^\circ \sim 65^\circ$ |

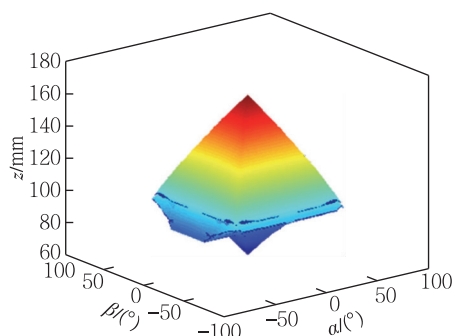


图 3 三维工作空间

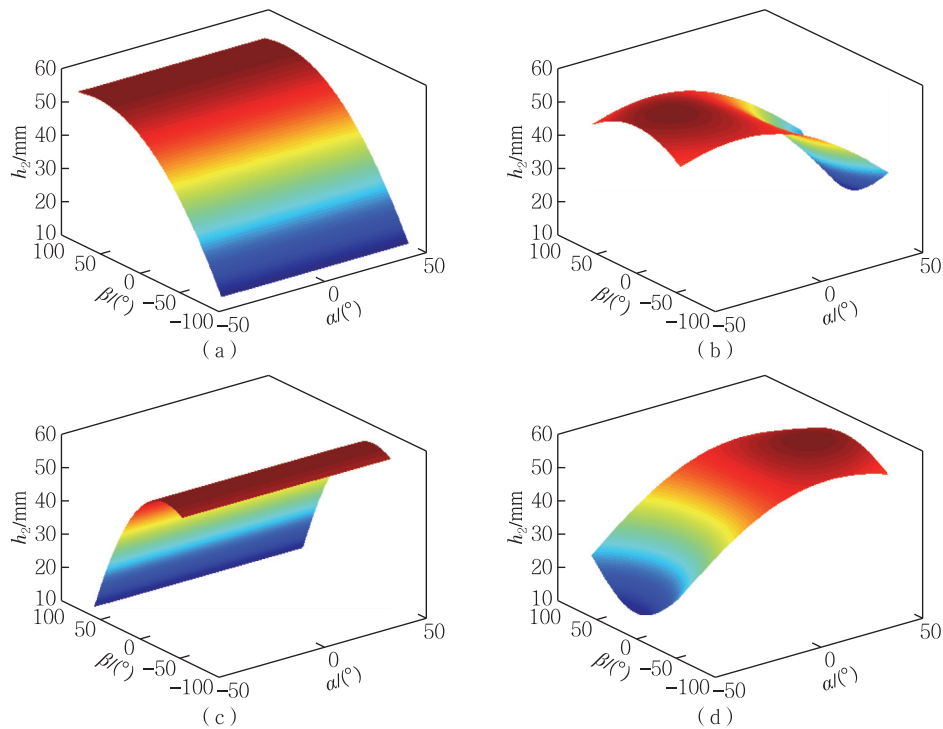


图 4 驱动工作空间

支链 3,动平台 1 选用 10mm 厚的铝板,静平台 2 中,由 4 根滚珠丝杠两两垂直安装,支链是该并联转向装置传递运动及载荷的重要单元,支链的结构设计需在满足刚度和强度的前提下,应尽量减小其质量。为此,4 条支链中移动副均由步进电机驱动的滚珠丝杠实现,而连杆均采用碳纤维管,该型材具有密度小、强度高、抗拉性高等特点。支链 3 为 PRU 结构,支链 4 为 PUS 结构,其中,从动副球铰与动平台链接处使用外斜 30°的结构,可充分增大球铰的转角范围,球铰链、万向节可选择标准件,而转动铰链可采用径向轴承实现。其 CAD 结构如图 6 所示。

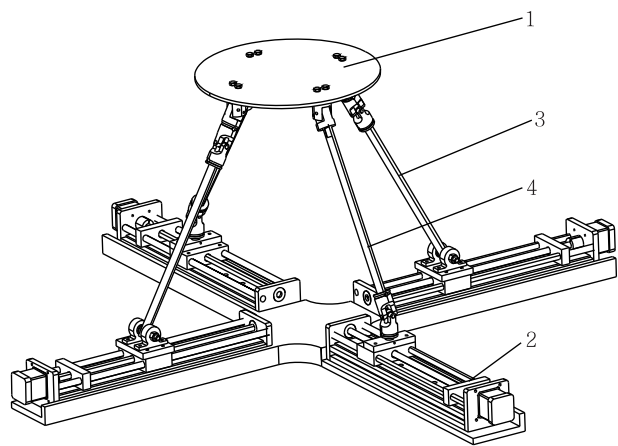


图 5 并联转向装置 CAD 造型

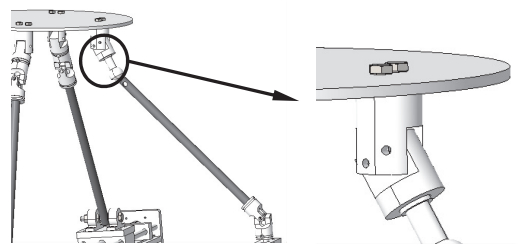


图 6 并联转向装置支链

动平台 1 选用 10 mm 厚的铝板,它通过 2 个球铰链与 2 个万向节连接 4 根碳纤维管,然后与 2 个转动铰链 2 个万向节链接,其中,球铰链、万向节可选择标准件,而转动铰链可采用径向轴承实现。而静平台 2 由滚珠丝杠组成,4 个伺服电机再对称地安装于钢板上。



## 6 结 论

1)设计出一种 2PUS-2PRU 两平移两转动四自由度并联机构,结构简单、制造装配容易。

2)建立了机构的运动学反解模型,基于机构位置反解,求解了机构的雅克比矩阵,分析了机构的奇异位形,同时分析了机构的工作空间性能。总体而言,2PUS-2PRU 并联机构奇异较少,转角工作空间大,具有较好地应用潜力。

## 参考文献:

- [1]路懿,胡波.少自由度并联机构研究进展[J].燕山大学学报,2011,35(5):377-384.
- [2]林玲,刘辉.基于螺旋理论的 2R2T 四自由度并联机器人机构综合[J].机械管理开发,2006,93(6):147-149.
- [3]罗玉峰,姚伟科,石志新,等.基于方位特征集的两平移两转动并联机构[J].机床与液压,2011,39(3):22-25.
- [4]FAN C, LIN H, ZHANG Y. Type synthesis of 2T2R, 1T2R and 2R parallel mechanisms [J]. Mechanism and Machine Theory, 2012, 61: 184-190.
- [5]温如凤,方跃法,陈亚琼.一种 2R2T 并联机构的运动学及性能分析[J].北京交通大学学报,2016,40(1):72-79.
- [6]刘敏剑,马履中.空间四自由度并联机器人的智能化型综合[J].机械设计与制造,2008(6):160-162.
- [7]范彩霞,刘宏昭,张彦斌.基于构型演变和李群理论的 2T2R 四自由度并联机构型综合[J].中国机械工程,2010,21(9):1101-1105.
- [8]OSCAR A. Design of a solar tracking parallel mechanism with low energy consumption[J]. Institution of Mechanical Engineers, 2014, 18(4): 1039-1873.
- [9]朱伟,沈惠平,刘晓飞,等.含方位特征支链并联机构构型综合与结构优化[J].农业机械学报,2016,47(8):378-387.
- [10]OSCAR S, OSCAR A, VÍCTOR P, et al. Synthesis and design of a novel 3T1R fully-parallel manipulator[J]. Journal of Mechanical Design, 2008, 130(4): 042305-042312.
- [11]ANDREEA A, OLIVIER C. Design of Lambda-Quadriglide, a new 4-DOF parallel kinematics mechanisms for Schönflies motion[C]//Proceedings of the ASME 2010 International Design Engineering Technical Conferences & Computers and Information in Engineering Conference. Montreal: [s.n.], 2010.
- [12]RICHARD P L, GOSSELIN C, KONG X. Kinematic analysis and prototyping of a partially decoupled 4-DOF 3T1R parallel manipulator[J]. ASME J Mech Des, 2007, 129(6): 611-616.
- [13]OLIVIER C, SÉBASTIEN K, FRANÇOIS P. Internal singularity analysis of a class of lower mobility parallel manipulators with articulated traveling plate[J]. IEEE TRANSACTIONS ON ROBOTICS, 2006, 22(1): 283-295.
- [14]曹永刚,张玉茹. 6-RSS 型并联机构奇异性分析[J]. 机械工程学报, 2008, 44(6): 79-87.
- [15]杨廷力,罗玉峰,沈惠平,等.机器人机构拓扑机构设计[M].北京:科学出版社,2012:8-54.
- [16]朱伟,刘晓飞,戴志明.一种四自由度姿态调平机构:105563467A[P].2016-05-11.
- [17]朱伟,刘晓飞,戴志明.一种并联调姿隔振复合平台:104924293B[P].2015-09-23.
- [18]朱伟,刘晓飞,戴志明.两平移一转动并联机器人:105500349A[P].2015-10-09.
- [19]GOSSELIN C, ANGELES J. Singularity analysis of closed-loop kinematic chain [C]// IEEE International Conference on Robotics and Automation. Cincinnati: Computer Society Press, 1990: 281-290.
- [20]徐宗刚. 3-PCR 并联机构工作空间及轨迹规划的研究与应用[D]. 淄博: 山东理工大学, 2009.

(责任编辑:李艳)