

空间4-SPS/CU并联机构运动学分析*

王庚祥 原大宁 刘宏昭 吴现卫

(西安理工大学机械与精密仪器工程学院, 西安 710048)

【摘要】 提出了一种能实现空间三维转动和沿 Z 轴移动的机构模型——空间4-SPS/CU并联机器人机构模型,其中SPS支链为驱动支链,CU为恰约束从动支链。采用螺旋理论分析了4-SPS/CU并联机构实现空间三转动一移动的机构学原理,计算了自由度,给出了位置正解和反解的方法,导出了Jacobian矩阵,分析了速度、加速度性能、奇异位形与工作空间,为该并联机构的实际应用提供了理论依据。

关键词: 并联机构 运动学 奇异位形 工作空间

中图分类号: TH112 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2012)03-0207-06

Kinematics Analysis of Spatial 4-SPS/CU Parallel Mechanism

Wang Gengxiang Yuan Daning Liu Hongzhao Wu Xianwei

(School of Mechanical and Precision Instrument Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China)

Abstract

Spatial parallel mechanism of a novel 4-SPS/CU that can perform three-dimensional rotations and translation about Z axis was presented. The parallel mechanism of 4-SPS/CU, with SPS-limp regarded as the driver and CU-limp regarded as the driven, was synthesized. The principles that the mechanism could perform the above motions were analyzed based on the screw theory, and the degree of freedom of the mechanism was calculated. The forward and reverse solutions of position analysis were presented, then the Jacobian matrix of the mechanism was derived and its velocity, acceleration performance, singular configuration and workspace were analyzed.

Key words Parallel mechanisms, Kinematics, Singular configuration, Workspace

引言

近年来,少自由度并联机构已经成为机器人技术研究的热点,与6自由度并联机构相比,少自由度并联机器人具有驱动元件少、造价低、结构紧凑等特点,因此,有着广阔的应用前景。

空间4自由度并联机构是少自由度并联机构的一个重要分支,4自由度并联机构可分为3大类:3T1R、2T2R、3R1T。第1种对称的4自由度并联机构是由Pierroff Company^[1]提出的H4并联机构,分支中存在闭环子链,能实现3T1R;黄真与赵铁石综合了3T1R的4-UPU完全对称并联机构^[2~3];Chen等^[4]提出了一种2R2T的2RRP/2SPU并联机构;程

佳等^[5]提出了一种3R1T的4-TPS/PS并联机构;另外,马履中、张艳华等人^[6~7]研究了几类4自由度并联机构的运动学问题及综合了几种不同构型的4自由度并联机构。基于此研究背景,本文提出一种具有3个转动和1个沿 Z 轴移动的空间少自由度并联机构,结构上采用恰约束^[8]从动支链——空间4-SPS/CU并联机构。

1 4-SPS/CU并联机构型综合

在并联机构型综合中,目前有3种比较成熟的理论方法:李群综合理论^[9]、构型演变^[9]和约束综合理论^[10]。其中构型演变与约束综合理论在并联机构型综合中应用最为广泛,本文采用后两种方法

收稿日期:2011-01-07 修回日期:2011-02-21

*国家自然科学基金资助项目(50575180)、陕西高校省级重点实验室科研项目(2010JS080)和陕西省重点学科建设专项资金资助项目

作者简介:王庚祥,博士生,主要从事机械设计及理论和机构控制研究,E-mail: wanggengxiang27@163.com

综合该机构。

对于支链含有三杆四副或四杆五副的完全对称并联机构,不但输入运动副难以选取,而且不易控制、性能差。在此基础上,本文继续采用两杆三副的支链模式,应用恰约束从动支链约束上平台的自由度。

为了使驱动电动机能均匀分布在除恰约束从动支链以外的支链上,通过构型演变^[9]对 Steward^[3] 平台进行改进,把原来的 6-SPS 改为 4-SPS,其自由度依然为 6,只是原有的 6 支链变为 4 支链;此时的恰约束从动支链恰好约束掉多余的两个自由度,构成 4 自由度并联机构;从而使驱动电动机分别分布在 4-SPS 的 4 个移动副上,以下是该机构型综合的过程。

机构 4-SPS 的运动螺旋系的标准基为

$$\begin{cases} \mathcal{S}_1 = (1,0,0;0,0,0) \\ \mathcal{S}_2 = (0,1,0;0,0,0) \\ \mathcal{S}_3 = (0,0,1;0,0,0) \\ \mathcal{S}_4 = (0,0,0;1,0,0) \\ \mathcal{S}_5 = (0,0,0;0,1,0) \\ \mathcal{S}_6 = (0,0,0;0,0,1) \end{cases} \quad (1)$$

根据该机构综合的要求,需要约束上平台两个沿 X 轴与 Y 轴的移动,添加恰约束从动支链后,综合机构的运动螺旋系的标准基为^[10]

$$\begin{cases} \mathcal{S}_1 = (1,0,0;0,0,0) \\ \mathcal{S}_2 = (0,1,0;0,0,0) \\ \mathcal{S}_3 = (0,0,1;0,0,0) \\ \mathcal{S}_4 = (0,0,0;0,0,1) \end{cases} \quad (2)$$

式(2)中的 4 个螺旋的线性组合有多种一般形式,这里只给出一种支链运动螺旋系

$$\begin{cases} \mathcal{S}'_1 = (l_1,0,0;0,0,r_1) \\ \mathcal{S}'_2 = (0,m_2,0;0,0,r_2) \\ \mathcal{S}'_3 = (0,0,0;0,0,r_3) \\ \mathcal{S}'_4 = (0,0,n_3;0,0,r_4) \end{cases} \quad (3)$$

式中 $\mathcal{S}'_1$ 、 $\mathcal{S}'_2$ ——轴线平行于分支坐标系 X 轴与 Y 轴的转动副

$\mathcal{S}'_3$ ——轴线平行于分支坐标系 Z 轴的移动副

$\mathcal{S}'_4$ ——轴线平行于分支坐标系 Z 轴的转动副

具体支链可以由满足式(3)几何条件的 4 个基本副 RRPR 的多种线性组合形式构成,其中 $\mathcal{S}'_1$ 、 $\mathcal{S}'_2$ 可以看成是一个万向铰(U 副), $\mathcal{S}'_3$ 、 $\mathcal{S}'_4$ 可以看成是一个圆柱副(C 副);这时可以构成如图 1 所示的 4-SPS/CU 并联机构。

2 4-SPS/CU 并联机构结构特点

4-SPS/CU 机构模型及其坐标系的建立如图 1 所示,该机构具有 4 个驱动支链(SPS 支链)和 1 个恰约束从动支链(CU 支链)。该 4 个驱动支链均由 2 个球面副(S 副)和 1 个移动副组成。其中各驱动分支从下平台算起,与下平台相连的球面副为第 1 运动副,移动副为第 2 运动副,与上平台相连的球面副为第 3 运动副;该恰约束从动支链由一个圆柱副(C 副)和一个万向铰(U 副)组成,且圆柱副的轴心与万向铰的中心分别位于下平台与上平台的中心。OXYZ 和 Pxyz 分别是与下平台和上平台固连的坐标系,O 点位于 $B_1B_2B_3B_4$ 组成的边长为 $2b$ 的正方形中心,X 轴平行于 B_2B_3 ,Y 轴平行于 B_1B_2 ,Z 轴垂直下平台向上;P 点位于 $A_1A_2A_3A_4$ 组成的边长为 $2a$ 的正方形中心,x 轴平行于 A_2A_3 ,y 轴平行于 A_1A_2 ,z 轴垂直上平台向上,方向如图 1 所示。

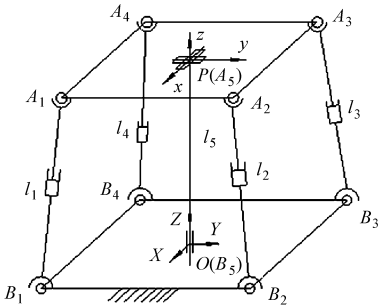


图 1 4-SPS/CU 并联机构简图
Fig. 1 Diagram of 4-SPS/CU parallel mechanism

3 4-SPS/CU 并联机构自由度计算

采用修正的 Kutzbach-Grübler 公式计算机构自由度^[3]

$$M = d(n - g - 1) + \sum_{i=1}^g f_i + v - \xi \quad (4)$$

- 其中
- $d = 6 - \lambda$
- $v = t - k$
- 式中
- d ——机构的阶数
- λ ——公共约束数
- n ——包括机架的构件数目
- g ——运动副的数目
- f_i ——第 i 个运动副的自由度
- v ——多环并联机构在去除公共约束的因素后的冗余约束数目
- t ——多环并联机构所有支链的反螺旋去除公共约束后的反螺旋数目
- k ——多环并联机构所有支链的反螺旋去除公共约束后的反螺旋系最大无关组
- ξ ——机构中存在的局部自由度

根据图 1,4 条驱动支链的运动副轴线在坐标系

$OXYZ$ 中可以用螺旋统一表示为

$$\begin{cases} \mathcal{S}_{i1} = (1, 0, 0; 0, 0, -q_i) \\ \mathcal{S}_{i2} = (0, 1, 0; 0, 0, p_i) \\ \mathcal{S}_{i3} = (0, 0, 1; q_i, -p_i, 0) \\ \mathcal{S}_{i4} = (0, 0, 0; u_i, v_i, w_i) \\ \mathcal{S}_{i5} = (1, 0, 0; 0, l_i, -n_i) \\ \mathcal{S}_{i6} = (0, 1, 0; -l_i, 0, m_i) \\ \mathcal{S}_{i7} = (0, 0, 1; n_i, -m_i, 0) \end{cases} \quad (5)$$

式中 p_i, q_i ——第 1 运动副相对坐标系 $OXYZ$ 的位置
 u_i, v_i, w_i ——第 2 运动副轴线的方向余弦
 l_i, m_i, n_i ——第 3 运动副相对于坐标系 $OXYZ$ 的位置

下标 $i=1, 2, 3, 4$, 为该机构的驱动支链序号。

式(5)中的 7 个运动螺旋, 其中 6 个线性无关; 与该螺旋系相逆的反螺旋为

$$\mathcal{S}^r = (L^r, M^r, N^r; P^r, Q^r, R^r)$$

通过式(5)由互易积可得: $\mathcal{S}_{ij} \circ \mathcal{S}^r = 0 (i=1, 2, 3, 4; j=1, 2, \dots, 7)$, 该方程组无解; 即没有反螺旋与该螺旋系相逆, 说明该螺旋系没有对上平台产生任何约束。即该机构没有公共约束, 所以 $d=6$ 。

恰约束从动支链 l_5 运动副轴线在坐标系 $Pxyz$ 中螺旋表示为

$$\begin{cases} \mathcal{S}_{s1} = (0, 0, 1; 0, 0, 0) \\ \mathcal{S}_{s2} = (0, 0, 0; 0, 0, 1) \\ \mathcal{S}_{s3} = (1, 0, 0; 0, 0, 0) \\ \mathcal{S}_{s4} = (0, 1, 0; 0, 0, 0) \end{cases} \quad (6)$$

该螺旋系的 4 个运动螺旋线性无关; 设与该螺旋系相逆的反螺旋为

$$\mathcal{S}_s^r = (L_s^r, M_s^r, N_s^r; P_s^r, Q_s^r, R_s^r)$$

通过式(6)由互易积 $\mathcal{S}_{s1} \circ \mathcal{S}_s^r = 0$ 解得线性无关的反螺旋为: $\mathcal{S}_{s1}^r = (1, 0, 0; 0, 0, 0)$; $\mathcal{S}_{s2}^r = (0, 1, 0; 0, 0, 0)$; 即该螺旋系限制了上平台沿 X 轴与 Y 轴的移动, 则有 $t=2, k=2$; 根据公式 $v=t-k=0$, 观察整个机构运动的布置情况, 此机构各驱动支链均存在局部自由度, 即 $\xi=4$ 。

根据式(4)计算该机构自由度 $M=4$ 。即上平台具有绕 X 轴、 Y 轴和 Z 轴的转动自由度, 沿 Z 轴的移动自由度。

4 4-SPS/CU 并联机构运动分析

4.1 4-SPS/CU 并联机构的位置分析

图 1 中 $A_1A_2A_3A_4$ 为边长 $2a$ 的正方形, $B_1B_2B_3B_4$ 为边长 $2b$ 的正方形。图 2 所示为机构初始位置时的俯视图。

设 $(x, y, z, \alpha, \beta, \gamma)$ 为上平台坐标系 $Pxyz$ 相对于

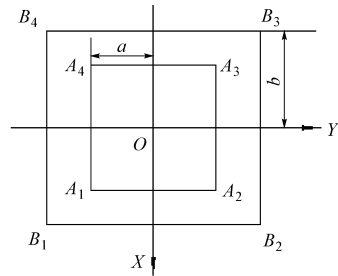


图 2 4-SPS/CU 并联机构俯视简图

Fig. 2 Overhead view of 4-SPS/CU parallel mechanism

下平台坐标系 $OXYZ$ 的位移和转角。其中, 由于上平台只能作三维转动和沿 Z 轴移动, 故有 $x=y=0$, 另外, A_i 点在坐标系 $OXYZ$ 、 $Pxyz$ 中的坐标分别为: (A_{ix}, A_{iy}, A_{iz}) 和 (A_{ix}, A_{iy}, A_{iz}) ; B_i 点在坐标系 $OXYZ$ 中的坐标为 (B_{ix}, B_{iy}, B_{iz}) ; 由此, 根据坐标转换建立方程

$$[A_{ix} \ A_{iy} \ A_{iz}]^T = T[A_{ix} \ A_{iy} \ A_{iz}]^T \quad (7)$$

其中

$$T = \begin{bmatrix} c\beta c\gamma & c\gamma s\beta s\alpha - s\gamma c\alpha & c\gamma s\beta c\alpha + s\gamma s\alpha & 0 \\ c\beta s\gamma & s\alpha s\beta s\gamma + c\gamma c\alpha & s\gamma s\beta c\alpha - c\gamma s\alpha & 0 \\ -s\beta & c\beta s\alpha & c\beta c\alpha & z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

其中 $s\beta = \sin\beta, c\beta = \cos\beta$, 其余类似。

当结构参数 a, b 确定, 若给出上平台位姿参数 $(z, \alpha, \beta, \gamma)$, 则由式(7)可求出 A_i 点在坐标系 $OXYZ$ 的坐标值。根据在同一坐标系中两点间的距离公式可求得机构的位置约束方程为

$$\begin{cases} l_1^2 = (acyc\beta - ac\gamma s\beta s\alpha + as\gamma c\alpha - b)^2 + (asyc\beta - ac\alpha c\gamma - ac\alpha s\beta s\gamma + b)^2 + (-as\beta - as\alpha c\beta + z)^2 \\ l_2^2 = (acyc\beta + ac\gamma s\beta s\alpha - as\gamma c\alpha - b)^2 + (asyc\beta + ac\alpha c\gamma + as\alpha s\beta s\gamma - b)^2 + (-as\beta + as\alpha c\beta + z)^2 \\ l_3^2 = (-acyc\beta + ac\gamma s\beta s\alpha - as\gamma c\alpha + b)^2 + (-asyc\beta + as\alpha c\gamma + as\alpha s\beta s\gamma - b)^2 + (as\beta + as\alpha c\beta + z)^2 \\ l_4^2 = (-acyc\beta - ac\gamma s\beta s\alpha + as\gamma c\alpha + b)^2 + (-asyc\beta - ac\alpha c\gamma - as\alpha s\beta s\gamma - b)^2 + (as\beta - as\alpha c\beta + z)^2 \end{cases} \quad (8)$$

式中 l_i ——杆长

位置正解是已知结构参数 a, b 和 4 个输入杆长 (l_1, l_2, l_3, l_4) , 求解上平台的位姿 $(z, \alpha, \beta, \gamma)$ 。位置反解是已知结构参数 a, b 和上平台的位姿 $(z, \alpha, \beta, \gamma)$, 求解杆长 l_i 。

4.2 4-SPS/CU 并联机构的速度分析

SPS 支链的移动副作为广义输入记为 $l =$

$[l_1 \ l_2 \ l_3 \ l_4]^T$; 上平台广义输出记为 $\varphi = [z \ \alpha \ \beta \ \gamma]^T$; 移动副的广义输入速度表示为 $\dot{l} = [\dot{l}_1 \ \dot{l}_2 \ \dot{l}_3 \ \dot{l}_4]^T$; 上平台广义输出速度表示为 $\dot{\varphi} = [\dot{z} \ \dot{\alpha} \ \dot{\beta} \ \dot{\gamma}]^T$ 。式(8)对时间 t 求导得

其中

$$L \dot{l} = J^\phi \dot{\varphi} \tag{9}$$
$$L = \begin{bmatrix} l_1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & l_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & l_3 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & l_4 \end{bmatrix}$$
$$J^\phi = \begin{bmatrix} J_{11}^\phi & J_{12}^\phi & J_{13}^\phi & J_{14}^\phi \\ J_{21}^\phi & J_{22}^\phi & J_{23}^\phi & J_{24}^\phi \\ J_{31}^\phi & J_{32}^\phi & J_{33}^\phi & J_{34}^\phi \\ J_{41}^\phi & J_{42}^\phi & J_{43}^\phi & J_{44}^\phi \end{bmatrix}$$

矩阵 J^ϕ 中的元素 $J_{ij}^\phi (i=1,2,3,4; j=1,2,3,4)$ 均可对式(8)求一阶导数得出; 因为 L^{-1} 和 $J^{\phi^{-1}}$ 均为满秩矩阵; 所以 L 和 J^ϕ 为非奇异矩阵, 根据式(4)可得

$$\dot{\varphi} = J \dot{l} \tag{10}$$

$$\dot{l} = J^{-1} \dot{\varphi} \tag{11}$$

其中 Jacobian 矩阵 $J = J^{\phi^{-1}} L$ 。通过式(10)、(11)可以求得机构速度的正解和逆解。

4.3 4-SPS/CU 并联机构的加速度分析

根据 4.2 节, 该机构移动副的广义输入加速度表示为 $\ddot{l} = [\ddot{l}_1 \ \ddot{l}_2 \ \ddot{l}_3 \ \ddot{l}_4]^T$; 上平台广义输出加速度表示为 $\ddot{\varphi} = [\ddot{z} \ \ddot{\alpha} \ \ddot{\beta} \ \ddot{\gamma}]^T$ 。式(10)对时间 t 求导得

$$\ddot{\varphi} = J \ddot{l} + \dot{J} \dot{l} \tag{12}$$

因为 J^{-1} 为非奇异矩阵, 则有

$$\ddot{l} = J^{-1} \ddot{\varphi} + \dot{J}^{-1} \dot{\varphi} \tag{13}$$

通过式(12)、(13)可以求得机构加速度的正解和逆解。

5 4-SPS/CU 并联机构的奇异位形分析

目前常用的研究空间机构奇异位形的方法有:

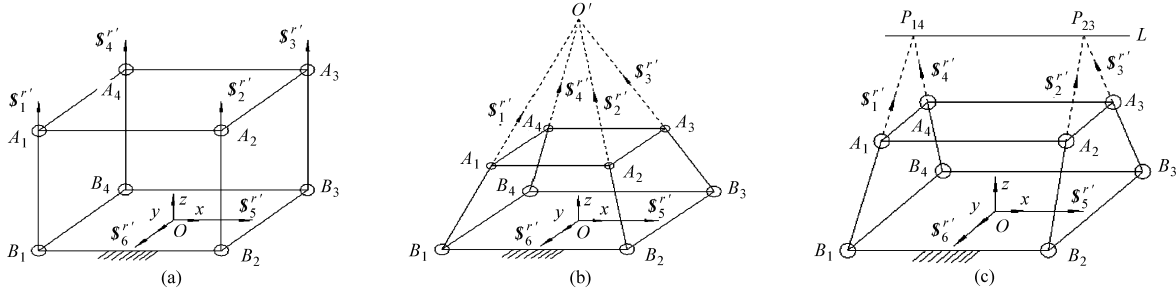


图3 4-SPS/CU 并联机构的奇异位形

Fig.3 Singular configuration of 4-SPS/CU parallel mechanism

Jacobian 代数法^[3]和 Grassmann 线几何法^[11], 其中以 Jacobian 代数法最为常用, 但是根据 4.2 节中得出的 Jacobian 矩阵行列式的表达式太过复杂, 不利于分析, 所以采用后一种方法对该机构的奇异位形进行分析。

5.1 4-SPS/CU 并联机构输入的选取

机构的奇异位形和驱动输入的选取是密切相关的, 为了降低惯性的影响, 提高负载能力, 驱动副应尽量靠近下平台, 所以选择除恰约束支链外的 4 个移动副作为驱动副; 根据并联机构输入选取原理^[12], 锁住 4 个驱动副后, 若上平台的自由度为 0, 则运动副输入选择合理。

机构在锁住 4 个驱动副后, 每个驱动分支上增加了一个沿该分支移动副方向的约束力线矢, 这时该机构在坐标系 OXYZ 中的约束螺旋系为

$$\begin{cases} \mathcal{S}_1' = (L_1', M_1', N_1'; P_1', Q_1', R_1') \\ \mathcal{S}_2' = (L_2', M_2', N_2'; P_2', Q_2', R_2') \\ \mathcal{S}_3' = (L_3', M_3', N_3'; P_3', Q_3', R_3') \\ \mathcal{S}_4' = (L_4', M_4', N_4'; P_4', Q_4', R_4') \\ \mathcal{S}_5' = (1, 0, 0; 0, 0, 0) \\ \mathcal{S}_6' = (0, 1, 0; 0, 0, 0) \end{cases} \tag{14}$$

当该机构结构参数选择合理的情况下, 式(14)中的 6 个约束力线矢是线性无关的, 则有

$$\text{rank}(S) = 6 \tag{15}$$

其中 $S = (\mathcal{S}_1', \mathcal{S}_2', \mathcal{S}_3', \mathcal{S}_4', \mathcal{S}_5', \mathcal{S}_6')$

所以该机构上平台的自由度为零, 即该机构无奇异位形, 运动输入的选择是合理的。

5.2 4-SPS/CU 并联机构奇异位形

锁住 4 个驱动副后对该机构约束螺旋系的线性相关性进行了分析, 得到了如图 3 所示的 3 种奇异位形, 并且根据 Grassmann 线几何原理^[11]对该 3 种奇异位形一一进行说明。

如图 3a, 当约束螺旋 $\mathcal{S}_1', \mathcal{S}_2', \mathcal{S}_3', \mathcal{S}_4'$ 相互平行时, 可知空间相互平行的线矢量的最大线性无关数为 3, 即约束螺旋 $\mathcal{S}_1', \mathcal{S}_2', \mathcal{S}_3', \mathcal{S}_4'$ 这 4 个线矢量线性相关, 所以 $\text{rank}(S) < 6$, 该机构的上平台的自

由度不为零,此时该机构处于奇异位形。

如图3b,当约束螺旋 $\$1'$ 、 $\$2'$ 、 $\$3'$ 、 $\$4'$ 汇交于一点 O' 时,可知空间共点的线矢量的最大线性无关数为3,即约束螺旋 $\$1'$ 、 $\$2'$ 、 $\$3'$ 、 $\$4'$ 这4个线矢量线性相关,所以 $\text{rank}(\mathbf{S}) < 6$,该机构的上平台的自由度不为零,此时该机构处于奇异位形。

如图3c,当约束螺旋 $\$1'$ 、 $\$4'$ 汇交于一点 P_{14} ,约束螺旋 $\$2'$ 、 $\$3'$ 汇交于一点 P_{23} ,且点 P_{14} 、 P_{23} 恰好位于平面 $A_1A_2B_2B_1$ 与平面 $A_4A_3B_3B_4$ 的交线 L 上,可知汇交点在两面交线上的两平面汇交线束的最大线性无关数为3,即约束螺旋 $\$1'$ 、 $\$2'$ 、 $\$3'$ 、 $\$4'$ 这4个线矢量线性相关,所以 $\text{rank}(\mathbf{S}) < 6$,该机构的上平台的自由度不为零,此时该机构处于奇异位形;同理当约束螺旋 $\$1'$ 、 $\$2'$ 的交点与约束螺旋 $\$3'$ 、 $\$4'$ 的交点同时位于平面 $A_1A_4B_4B_1$ 与平面 $A_2A_3B_3B_2$ 的交线上时,同样会使 $\text{rank}(\mathbf{S}) < 6$,此时该机构处于奇异位形。

由以上结论可以得出,该机构的3种奇异位形都是特殊姿态,可以通过选择适当的结构参数与轨迹规划避开其奇异位形;也就是说,该机构具有良好的传递运动和动力的能力。

6 4-SPS/CU 并联机构工作空间分析

并联机构的工作空间是指末端操作器所能达到的工作区域;工作空间的大小和形状决定了并联机构的活动空间,它是衡量并联机构性能的重要指标之一。

因为并联机构中位置和姿态强耦合的关系,所以自由度大于3的并联机构的工作空间很难在三维直角坐标系中描述,为了实现上平台位姿能力的可视化,需要将位置空间或姿态空间进行降维处理。即给定一个位置或位置范围,分析姿态工作空间;或者给定一个姿态或姿态范围,分析位置工作空间。下面将分别使用两种方法进行讨论。

另外,除了位置方程对并联机构工作空间的约束以外,如杆长限制、关节转角限制、连杆之间的相互干涉,都会对其工作空间产生影响。

根据4.1节的分析可知,机构上平台的广义位置坐标可表示为

$$\varphi = (z, \alpha, \beta, \gamma)$$

其中 z, α, β, γ 为上平台坐标系 $Pxyz$ 相对于坐标系 $OXYZ$ 的位移和转角。驱动支链 l_i ($i = 1, 2, 3, 4$)单位向量分别表示为 $\delta_1, \delta_2, \delta_3, \delta_4$,恰约束从动支链的杆长 l_5 ,它的单位向量表示为 δ_5 ,上下平台的姿态向量为 δ_{n1}, δ_{n2} ,它们的具体方位如图4所示。

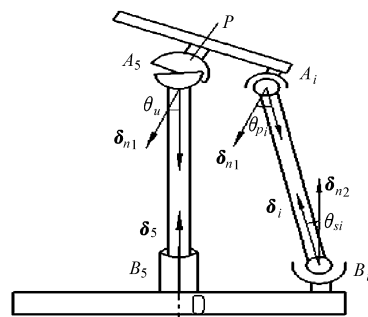


图4 4-SPS/CU 关节的转角约束

Fig. 4 Corner constraint of 4-SPS/CU joint

(1) 杆长限制

驱动支链杆长约束条件

$$l_{\min} \leq l_i \leq l_{\max} \quad (i = 1, 2, 3, 4) \quad (16)$$

式中 $l_{\min}$ ——驱动支链最小限制杆长

$l_{\max}$ ——驱动支链最大限制杆长

恰约束从动支链杆长约束条件

$$l_{5\min} \leq l_5 \leq l_{5\max} \quad (17)$$

式中 $l_{5\min}$ ——恰约束从动支链最小限制杆长

$l_{5\max}$ ——恰约束从动支链最大限制杆长

(2) 关节转角限制

与上平台相连的球铰限制条件

$$\theta_{pi} = \arccos \frac{-\delta_i \cdot ({}^0_P \mathbf{R} \delta_{n1})}{|\delta_i| |\delta_{n1}|} \leq \theta_{imax} \quad (i = 1, 2, 3, 4) \quad (18)$$

其中

$${}^0_P \mathbf{R} = \begin{bmatrix} c\beta c\gamma & c\gamma s\beta s\alpha - s\gamma c\alpha & c\gamma s\beta c\alpha + s\gamma s\alpha \\ c\beta s\gamma & s\alpha s\beta s\gamma + c\gamma c\alpha & s\gamma s\beta c\alpha - c\gamma s\alpha \\ -s\beta & c\beta s\alpha & c\beta c\alpha \end{bmatrix}$$

$$\delta_{n1} = (0, 0, -1)$$

式中 θ_{imax} ——球铰的最大转角

δ_i 可以通过4.1节中式(8)求出。

与下平台相连的球铰限制条件

$$\theta_{si} = \arccos \frac{\delta_i \cdot \delta_{n2}}{|\delta_i| |\delta_{n2}|} \leq \theta_{imax} \quad (i = 1, 2, 3, 4) \quad (19)$$

其中

$$\delta_{n2} = (0, 0, 1)$$

与上平台相连的万向铰限制条件

$$\theta_u = \arccos \frac{-\delta_5 \cdot ({}^0_P \mathbf{R} \delta_{n1})}{|\delta_5| |\delta_{n1}|} \leq \theta_{max} \quad (20)$$

其中

$$\delta_5 = (0, 0, z)$$

式中 θ_{max} ——万向铰的最大转角

与下平台相连的圆柱副限制条件

$$\theta_5 = \arccos \frac{\delta_5 \cdot \delta_{n2}}{|\delta_5| |\delta_{n2}|} = \arccos 1 = 360^\circ \quad (21)$$

式(21)说明圆柱副的转角没有限制。

(3) 连杆之间的相互干涉

$$D_{\min} \leq D_i \leq D_{\max} \quad (i = 1, 2, 3, 4, 5) \quad (22)$$

式中 D_i ——各连杆的直径

$D_{\min}$ ——连杆的最小限制直径

$D_{\max}$ ——连杆的最大限制直径

对于所研究的 4-SPS/CU 并联机构, 由于其杆件较少且分布较分散, 在上平台与下平台的边长选择适当以及连杆的半径选择适当的情况下, 就不会发生连杆之间的相互干涉。

在满足式(16)~(22)的同时, 联立该并联机构的位置约束方程(8)构成工作空间的约束条件, 把满足该约束条件的所有的点都记录下来, 那么由这些点所组成的体积就构成了该并联机构的工作空间。

机构的结构参数如下: $a = 0.1 \text{ m}$, $b = 0.2 \text{ m}$; 分别取: $l_{\min} = 0.1 \text{ m}$, $l_{\max} = 0.4 \text{ m}$, $l_{5\min} = 0.08 \text{ m}$, $l_{5\max} = 0.3 \text{ m}$; $\theta_{i\max} = 90^\circ$, $\theta_{i\min} = 90^\circ$; $D_{\min} = 0.008 \text{ m}$, $D_{\max} = 0.01 \text{ m}$ 。

当姿态角 $\alpha = \beta = \gamma = 0$ 时, 该并联机构的位置工作空间为一条与 z 轴重合的连续的线段, 研究它没有意义; 当位置 $z = 0.1 \text{ m}$ 时, 该并联机构的姿态工作空间如图 5 所示。

由图 5 可知, $\alpha_{\max} = 48^\circ$, $\beta_{\max} = 48^\circ$, $\gamma_{\max} = 65^\circ$ 。说明该机构具有相对较大的姿态工作空间, 适合应

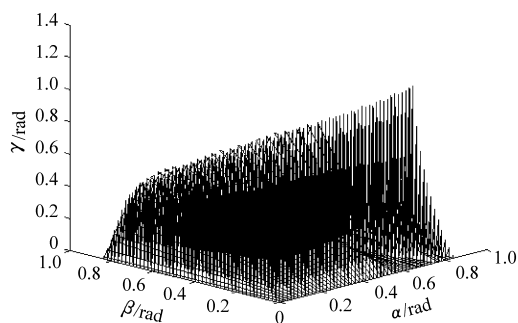


图 5 4-SPS/CU 并联机构姿态工作空间

Fig. 5 Attitude workspace of 4-SPS/CU parallel mechanism

用在工作空间要求较大的工作场合。

7 结论

(1) 提出了一种具有 3 个转动 1 个移动的并联机构, 阐述了其型综合过程, 分析了机构各支链具有的自由度, 利用修正的 Kutzbach-Grübler 公式计算得到的上平台自由度为 4, 与支链分析结果吻合。

(2) 以 4 个驱动杆杆长作为输入, 建立机构位置方程, 通过对位置方程的一阶微分与二阶微分给出了分析该机构速度与加速度的方法, 分析了奇异位形与工作空间, 为该机构在实际中的应用提供了理论基础。

参 考 文 献

- Pierrot Company O. H4: a new family of 4-DOF parallel robot [C]//Proceedings of IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics, AIM'99, New York: IEEE, 1999: 508~513.
- 赵铁石, 陈江, 王家春, 等. 4-UPU 并联机器人机构及其运动学[J]. 中国机械工程, 2005, 16(22): 2034~2038.
Zhao Tieshi, Chen Jiang, Wang Jiachun, et al. 4-UPU parallel manipulator mechanism and kinematics [J]. China Mechanical Engineering, 2005, 16(22): 2034~2038. (in Chinese)
- 黄真, 赵永生, 赵铁石. 高等空间机构学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2006.
- Chen W J, Zhao M Y. A novel 4-DOF parallel mechanism and its kinematic modeling [C]//Proceedings-IEEE International Conference on Robotics and Automation, 2001(6): 3350~3355.
- Cheng Jia, Wang Xuanyin, Fu Xiaojie, et al. Research on the operating characteristics of parallel 4-DOF electric platform with 4TPS-PS structure [J]. Journal of Zhejiang University Science A, 2007, 8(11): 1800~1807.
- 马晓丽, 马履中, 周兆忠. 新型 4 自由度并联机构的运动学建模与分析[J]. 农业机械学报, 2006, 37(3): 99~104.
Ma Xiaoli, Ma Lüzhong, Zhou Zhaozhong. Kinematics modeling and analysis of a 4-DOF parallel mechanism [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2006, 37(3): 99~104. (in Chinese)
- 张艳华, 陈立辉. 新型 2UPU/2SPS 并联机器人计算机辅助几何分析[J]. 机械设计, 2009, 26(3): 40~42.
Zhang Yanhua, Chen Lihui. Computer aided geometric analysis of new typed 2UPU/2SPS parallel robot [J]. Journal of Machine Design, 2009, 26(3): 40~42. (in Chinese)
- 黄田, 李朦, 吴孟丽, 等. 可重构 PKM 模块的选型原则——理论与实践[J]. 机械工程学报, 2005, 41(8): 36~41.
Huang Tian, Li Meng, Wu Mengli, et al. Criteria for conceptual design of reconfigurable PKM modules—theory and application [J]. Chinese Journal of Mechanism Engineering, 2005, 41(8): 36~41. (in Chinese)
- 范彩霞, 刘宏昭, 张彦斌. 基于构型演变和李群理论的 2T2R 型四自由度并联机构型综[J]. 中国机械工程, 2010, 21(9): 1101~1105.
Fan Caixia, Liu Hongzhao, Zhang Yanbin. Type synthesis of 2T2R 4-DOF parallel mechanism based on configuration evolution and lie group theory [J]. China Mechanical Engineering, 2010, 21(9): 1101~1105. (in Chinese)

早收敛,增强了算法全局寻优的能力。

(3)以某企业的几种产品协同制造加工为例,进行了仿真实验,并与其他算法进行了对比,仿真结果表明该算法求出的 Pareto 非劣解集数量多于 GA 和 IGA,从而验证了该算法的有效性和可行性。

参 考 文 献

1 王世进,周炳海,奚立峰. 基于过滤定向搜索的柔性制造系统动态调度优化[J]. 上海交通大学学报,2007,41(1):94~99.
Wang Shijin, Zhou Binghai, Xi Lifeng. A filtered-beam-search based approach for FMS dynamic scheduling[J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 2007,41(1):94~99. (in Chinese)

2 Laguna M, Barnes J W, Glover F. Intelligent scheduling with tabu search an application to jobs with linear delay penalties and sequence-dependent setup coats and times [J]. Journal of Applied Intelligence,1993, 3(2):159~172.

3 Taillard E D. Parallel taboo search techniques for the job-shop scheduling problem [J]. ORSA Journal on Computing,1994, 16(2):108~117.

4 廖莉莉. 遗传算法在制造网格资源调度中的应用[J]. 武汉理工大学学报,2007,29(12):123~128.
Liao Lili. Application of genetic algorithms in manufacturing grid resource scheduling [J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2007, 29 (12):123~128. (in Chinese)

5 王云,冯毅雄,谭建荣,等. 基于多目标粒子群算法的柔性作业车间调度优化方法[J]. 农业机械学报,2011,42(2):190~196.
Wang Yun, Feng Yixiong, Tan Jianrong, et al. Optimization method of flexible job-shop scheduling based on multiobjective particle swarm optimization algorithm[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011,42(2):190~196. (in Chinese)

6 莫宏伟. 人工免疫系统原理与应用[M]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学出版社,2002:6~7.

7 Khalid K, Henri P, Nasser M. Using multi-agent architecture in FMS for dynamic scheduling [J]. Journal of Intelligent Manufacturing, 1997, 8(1): 41~47.

8 Zitzler E, Thiele L. Evolution algorithms for multi-objective optimization. methods and application[D]. Zurich: Swiss Federal Institute of Technology, 1999.

9 孟红云,刘三阳. 基于自适应领域选择的多目标免疫进化算法[J]. 系统工程与电子技术,2004,26(8):1 107~1 111.
Meng Hongyun, Liu Sanyang. Adaptive neighborhood-based selection for multi-objective immunity genetic algorithm [J]. Systems Engineering and Electronics, 2004, 26(8):1 107~1 111. (in Chinese)

10 漆安慎. 免疫系统的非线性模型[M]. 上海:上海科学教育出版社,1998.

11 谢胜利,黄强,董金祥. 求解 JSP 的遗传算法中不可行调度的方案[J]. 计算机集成制造系统, 2002,8(11):902~906.
Xie Shengli, Huang Qiang, Dong Jinxiang. A method to resolve unfeasible scheduling of JSP by GA[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2002, 8(11):902~906. (in Chinese)

12 王凌. 车间调度及其遗传算法[M]. 北京:清华大学出版社,2003.

(上接第 212 页)

10 黄真,李秦川. 少自由度并联机器人机构的型综合原理[J]. 中国科学: E 辑,2003,33(9):813~819.

11 伞红军,钟诗胜,王知行. 新型 2-TPR/2-TPS 空间 4 自由度并联机构[J]. 机械工程学报,2008,44(11):298~303.
San Hongjun, Zhong Shisheng, Wang Zhixing. Novel 2-TPR/2-TPS spacial 4-DOF parallel mechanism[J]. China Journal of Mechanism Engineering, 2008, 44(11): 298~303. (in Chinese)

12 赵铁石,黄真. 欠秩空间并联机器人输入选取的理论与应用[J]. 机械工程学报,2000,36(10):81~85.
Zhao Tieshi, Huang Zhen. Theory and application of selecting actuating components of spatial parallel mechanisms[J]. China Journal of Mechanism Engineering, 2000, 36(10): 81~85. (in Chinese)