

DOI: 10.7652/xjtuxb201806010

一种运动分岔并联机构的结构约束与运动模式分析

王冰, 方跃法

(北京交通大学机械工程系, 100044, 北京)

摘要: 为设计得到一种新型运动分岔并联机构,运用螺旋理论对其结构约束和运动模式进行分析,同时分析了输入选取。首先,研究了一种运动分岔单环闭链的运动特性,具有两种不同的单自由度转动和两自由度瞬时转动;其次,将运动分岔单环闭链与四自由度 PPRR(P 表示移动副,R 表示转动副)串联支链相结合,得到一种具有无约束、存在一个约束力偶和一个约束力矢的 3 种不同结构约束的混联支链,并得到了混联支链在不同运动模式下的约束螺旋表达式;最后,利用 3 条相同的混联支链连接定平台和动平台,得到一种新型运动分岔并联机构,并讨论了其输入选取。研究结果表明,该运动分岔并联机构具有 3T3R、3T、3R、2T1R 和 1T2R(T 表示移动,R 表示转动)共 5 种不同运动模式。

关键词: 机器人;并联机构;运动分岔;结构约束;运动模式;螺旋理论

中图分类号: TH112 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2018)06-0062-07

Structural Constraint and Motion Mode Analysis on Parallel Mechanism with Bifurcated Motion

WANG Bing, FANG Yuefa

(Department of Mechanical Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China)

Abstract: To obtain a new kind of parallel mechanism with bifurcated motion, the structural constraint, motion mode and input scheme are analyzed by using screw theory. The motion characteristics of a closed-loop linkage with bifurcated motion is firstly analyzed. In different motion modes, the closed-loop linkage with bifurcated motion has two kinds of single DOF (degree of freedom) finite rotational motions and one 2-DOF instantaneous rotational motion. A kind of hybrid limb with bifurcated motion is then obtained by integrating the closed-loop linkage with 4-DOF PPRR(P-prismatic pair, R-revolute pair) serial limb. The constraint exerted by the hybrid limb can switch among no-constraint, a constraint couple, and a constraint force. The constraint screws associated with the hybrid limb in different motion modes are identified. Lastly, a kind of parallel mechanism with bifurcated motion is constructed with three identical hybrid limbs connecting the fixed base and moving platform, and the actuation scheme for the parallel mechanism is discussed. The result shows that the parallel mechanism has the ability to perform variable motion modes such as 3T3R, 3T, 3R, 2T1R(T-translation, R-rotation) and 1T2R.

Keywords: robot; parallel mechanism; bifurcated motion; structural constraint; motion mode; screw theory

并联机构因闭链结构具有高承载能力、高伺服刚度、高精度及优良的动力性能等优点,使其在重载操作、微纳操作、工业机器人、康复机器人及并联机床等领域得到了重要应用。可重构并联机构具有传统并联机构的全部优点,同时又具有可变结构和自由度特性,使其具有更好的柔性和适应性,吸引了机构学与机器人研究者的极大兴趣,成为新的研究热点之一。可重构并联机构按可重构机理不同,分为变胞并联机构和运动分岔并联机构两类。

变胞并联机构特征在于机构在连续运动中有效杆件数目发生变化,从而导致机构自由度的变化;主要是采用变胞运动副^[1-3]、杆件重合与合并^[4-6]及可锁死关节^[7-8]等方法来实现机构的可重构。运动分岔并联机构^[9-12]与变胞并联机构不同,在连续运动中杆件数目并无变化,机构的拓扑结构也没有改变,而是利用机构的约束奇异特性来实现机构的可重构。运动分岔并联机构在连续运动模式下的自由度小于约束奇异位形下的瞬时自由度数。约束奇异位形为运动分岔并联机构不同运动模式进行切换的初始位形,为保证机构运动的可控,伺服电机数应为机构的瞬时自由度数。

虽然学者们提出了一些特色鲜明的可重构并联机构,但目前已知的具有连续变自由度特性的运动分岔并联机构仍然较少,这类机构的结构综合、结构约束、自由度及运动模式分析等问题都是值得深入研究的机构学基础问题。本文提出一种具有运动分岔特性的新型并联机构,运用螺旋理论对其结构约束和运动模式进行分析,并分析了其输入选取。

1 运动分岔单环闭链

1.1 初始位形

初始位形下的具有运动分岔特性的单环闭链如图1所示。与叶伟等在可重构并联机构设计中所应用的平行四边形机构不同^[11-12],这里以单环闭链机构的连架杆AB为输出构件,所有杆的杆长为任意,但连架杆AB和CD在初始位形时应相平行且与机架AD正交。连架杆与机架间通过虎克铰相连,连杆与连架杆间通过转动副相连。图1中 $\$i$ ($i=1-6$)为各关节的运动螺旋,建立参考坐标系 $o-xyz$ 于A点虎克铰的几何中心。在初始位形时, x 轴和 y 轴分别与 $\$1$ 和 $\$2$ 同向, $\$1$ 、 $\$3$ 、 $\$4$ 和 $\$5$ 同向, $\$2$ 和 $\$6$ 同轴。输出构件AB通过两条支链与机架AD相连, $\$1$ 和 $\$2$ 为支链一, $\$3$ 、 $\$4$ 、 $\$5$ 和 $\$6$ 为支链二,选取机架副为输入副。支链一和

支链二的运动螺旋系分别为

$$\left. \begin{aligned} \$1 &= (1, 0, 0; 0, 0, 0) \\ \$2 &= (0, 1, 0; 0, 0, 0) \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

$$\left. \begin{aligned} \$3 &= (1, 0, 0; 0, e_3, 0) \\ \$4 &= (1, 0, 0; 0, e_4, f_4) \\ \$5 &= (1, 0, 0; 0, 0, f_5) \\ \$6 &= (0, 1, 0; 0, 0, 0) \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

式中: e_3 、 e_4 及 f_4 、 f_5 均为常数。根据螺旋理论,输出构件AB的运动螺旋系应为两支链运动螺旋系的交集,因此式(1)即为杆AB的当前位形下的运动螺旋系。由式(1)可见,杆AB的瞬时自由度为2,具有绕 x 轴和 y 轴的瞬时转动。

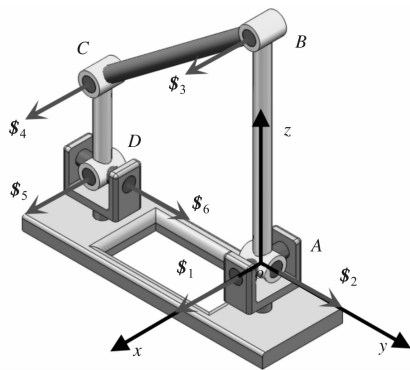


图1 初始位形下的运动分岔单环闭链

1.2 运动模式A

如图2所示,当单环闭链绕 x 轴旋转 α 角,支链一的运动螺旋系变为

$$\left. \begin{aligned} \$1 &= (1, 0, 0; 0, 0, 0) \\ \$2 &= (0, \cos\alpha, \sin\alpha; 0, 0, 0) \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

对式(3)取反螺旋,可得支链一的约束螺旋系为

$$\left. \begin{aligned} \$11 &= (1, 0, 0; 0, 0, 0) \\ \$12 &= (0, 1, 0; 0, 0, 0) \\ \$13 &= (0, 0, 1; 0, 0, 0) \\ \$14 &= (0, 0, 0; 0, -\sin\alpha, \cos\alpha) \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

在当前位形下,支链二的运动螺旋系为

$$\left. \begin{aligned} \$3 &= (1, 0, 0; 0, e_3, f_3) \\ \$4 &= (1, 0, 0; 0, e_4, f_4) \\ \$5 &= (1, 0, 0; 0, 0, f_5) \\ \$6 &= (0, 1, 0; 0, 0, 0) \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

对式(5)取反螺旋,可得当前位形下支链二的约束螺旋系为

$$\left. \begin{aligned} \$21 &= (1, 0, 0; 0, 0, 0) \\ \$22 &= (0, 0, 0; 0, 0, 1) \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

式(4)和式(6)相并即为杆AB的约束螺旋系,对并集取二次反螺旋,可得杆AB的运动螺旋为

$$\mathcal{S}_{AB} = (1, 0, 0; 0, 0, 0) \quad (7)$$

式(7)表明,在此位形下,单环闭链的连续自由度为1,杆AB绕x轴作连续转动,杆AB不能再作绕y轴的转动,称此位形为运动模式A。

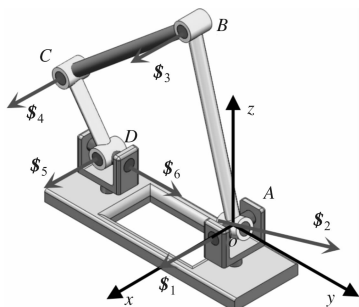


图2 运动模式A下的运动分岔单环闭链

1.3 运动模式B

如图3所示,单环闭链绕y轴旋转 β 角,支链一在此位形下的运动螺旋系与式(1)相同,对其取反螺旋,得约束螺旋系为

$$\left. \begin{aligned} \mathcal{S}_{11}^r &= (1, 0, 0; 0, 0, 0) \\ \mathcal{S}_{12}^r &= (0, 1, 0; 0, 0, 0) \\ \mathcal{S}_{13}^r &= (0, 0, 1; 0, 0, 0) \\ \mathcal{S}_{14}^r &= (0, 0, 0; 0, 0, 1) \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

支链二在此位形下的运动螺旋系为

$$\left. \begin{aligned} \mathcal{S}_3 &= (\cos\beta, 0, -\sin\beta; 0, e_3, 0) \\ \mathcal{S}_4 &= (\cos\beta, 0, -\sin\beta; d_4, e_4, f_4) \\ \mathcal{S}_5 &= (\cos\beta, 0, -\sin\beta; d_5, 0, f_5) \\ \mathcal{S}_6 &= (0, 1, 0; 0, 0, 0) \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

式中: $d_4 = d_5 = -y_4 \sin\beta$; $f_4 = f_5 = -y_4 \cos\beta$, y_4 为当前位形下C点和D点的y向坐标。由式(9)可得支链二的约束螺旋系为

$$\left. \begin{aligned} \mathcal{S}_{21}^r &= (0, 0, 0; \sin\beta, 0, \cos\beta) \\ \mathcal{S}_{22}^r &= (-\cos\beta, 0, \sin\beta; 0, 0, 0) \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

式(8)和式(10)的并集即为当前位形下杆AB的约束螺旋系,对其取二次反螺旋,得杆AB在当前位形下的运动螺旋为

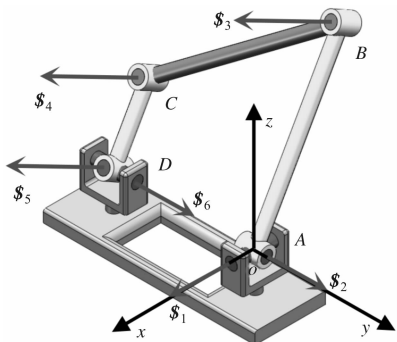


图3 运动模式B下的运动分岔单环闭链

$$\mathcal{S}_{AB} = (0, 1, 0; 0, 0, 0) \quad (11)$$

由式(11)可见,在此位形下杆AB的瞬时自由度为1,作绕y轴的连续转动,此时杆AB不能再绕x轴转动,称此位形为运动模式B。

综上所述,所述单环闭链具有两种互斥的单自由度转动运动模式,初始位形为两种运动模式进行切换的运动分岔点,初始位形即为单环闭链的约束奇异位形。

2 运动分岔混联支链

2.1 无约束模式

考虑到单环闭链的运动分岔特性,可将其引入到运动分岔混联支链的设计,构建具有不同结构约束的混联支链。如图4所示为初始位形下的混联支链,单环闭链的输出构件杆AB与串联支链的杆EF为移动副连接,杆EF与杆FG也为移动副连接,杆FG与杆GH在G点通过转动副连接,混联支链末端H点为连接动平台的转动副,H点和G点的转动副轴线相交于点N。

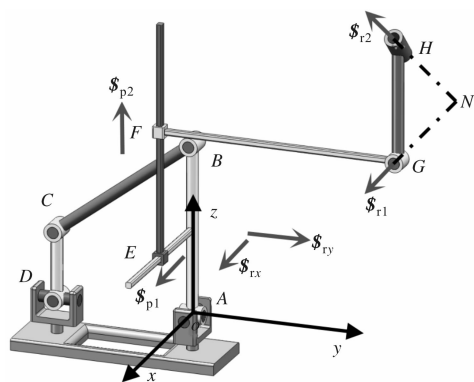


图4 无约束模式下的运动分岔混联支链

图4中运动螺旋 $\mathcal{S}_{rx}$ 和 $\mathcal{S}_{ry}$ 代表单环闭链在初始位形下分别绕x轴和y轴的瞬时转动,运动螺旋 $\mathcal{S}_{p1}$ 和 $\mathcal{S}_{p2}$ 、 $\mathcal{S}_{r1}$ 和 $\mathcal{S}_{r2}$ 分别代表串联支链两个移动副和两个转动副, $\mathcal{S}_{p1}$ 和 $\mathcal{S}_{p2}$ 分别与杆AB正交和平行, $\mathcal{S}_{p1}$ 和 $\mathcal{S}_{p2}$ 正交, $\mathcal{S}_{r1}$ 与B点转动副同向且与 $\mathcal{S}_{r2}$ 相交于点N。混联支链在初始位形下的运动螺旋系为

$$\left. \begin{aligned} \mathcal{S}_{rx} &= (1, 0, 0; 0, 0, 0) \\ \mathcal{S}_{ry} &= (0, 1, 0; 0, 0, 0) \\ \mathcal{S}_{p1} &= (0, 0, 0; 1, 0, 0) \\ \mathcal{S}_{p2} &= (0, 0, 0; 0, 0, 1) \\ \mathcal{S}_{r1} &= (1, 0, 0; 0, e_G, f_G) \\ \mathcal{S}_{r2} &= (a_H, 0, c_H; d_H, e_H, f_H) \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

式(12)表明,初始位形下,混联支链运动螺旋系

秩为 6,混联支链无约束,称其为无约束模式。

2.2 约束力偶模式

当单环闭链由初始位形切换为运动模式 A,混联支链也相应切换为如图 5 所示的约束力偶模式。此时单环闭链等效为运动螺旋 $\$_{rx}$,混联支链的运动螺旋系也相应变为 5 系螺旋,当前位形下的运动螺旋系为

$$\left. \begin{aligned} \$_{rx} &= (\mathbf{s}_{rx}; \mathbf{s}_{0rx}) = (1, 0, 0; 0, 0, 0) \\ \$_{p1} &= (0, 0, 0; 1, 0, 0) \\ \$_{p2} &= (0, 0, 0; 0, -\sin\alpha, \cos\alpha) \\ \$_{r1} &= (\mathbf{s}_{r1}; \mathbf{s}_{0r1}) = (1, 0, 0; 0, e_G, f_G) \\ \$_{r2} &= (\mathbf{s}_{r2}; \mathbf{s}_{0r2}) = (a_H, b_H, c_H; d_H, e_H, f_H) \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

此时,运动螺旋系的反螺旋为

$$\$^r = (\mathbf{0}; \mathbf{s}^r) = (0, 0, 0; 0, -c_H, b_H) \quad (14)$$

由式(13)和(14)可知

$$\mathbf{s}_{rx} \cdot \mathbf{s}^r = \mathbf{s}_{r1} \cdot \mathbf{s}^r = \mathbf{s}_{r2} \cdot \mathbf{s}^r = 0 \quad (15)$$

式(14)表明,在此模式下,混联支链存在一个约束力偶。式(15)表明, $\mathbf{s}_{rx}$ 与 $\mathbf{s}_{r1}$ 组成一组轴线平行的线矢量, $\mathbf{s}_{r2}$ 为另一组线矢量,两组线矢量的公法线方向即为约束力偶方向,因此称其为约束力偶模式。

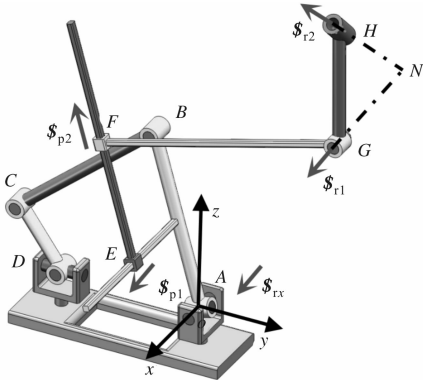


图 5 约束力偶模式下的运动分岔混联支链

2.3 约束力矢模式

当单环闭链由初始位形切换为运动模式 B,混联支链将相应的切换为如图 6 所示的约束力矢模式。此时单环闭链等效为运动螺旋 $\$_{ry}$,混联支链运动螺旋系为 5 系螺旋,此时运动螺旋系为

$$\left. \begin{aligned} \$_{ry} &= (0, 1, 0; 0, 0, 0) \\ \$_{p1} &= (0, 0, 0; \cos\beta, 0, -\sin\beta) \\ \$_{p2} &= (0, 0, 0; \sin\beta, 0, \cos\beta) \\ \$_{r1} &= (\cos\beta, 0, -\sin\beta; d_G, e_G, f_G) \\ \$_{r2} &= (a_H, b_H, c_H; d_H, e_H, f_H) \end{aligned} \right\} \quad (16)$$

用 x_N 和 z_N 表示 N 点 x 和 z 向坐标,则有 $e_G = x_N \sin\beta + z_N \cos\beta$, $e_H = z_N a_H - x_N c_H$ 。对式(16)取反

螺旋得结构约束为

$$\$^r = (0, 1, 0; -z_N, 0, x_N) \quad (17)$$

式(17)表明,在当前位形下,混联支链存在一个与 y 轴同向,且过 N 点的约束力矢,因此称其为约束力矢模式。

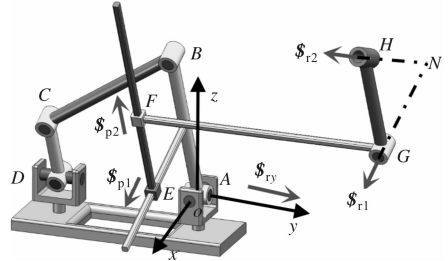


图 6 约束力矢模式下的运动分岔混联支链

3 运动分岔并联机构

利用 3 条对称布置的混联支链连接定平台和动平台,可得到如图 7 所示的运动分岔并联机构。每条混联支链末端两个转动副的交点都汇交于动平台的转动中心 N 点。建立全局坐标系 $o_0-x_0y_0z_0$ 于定平台的几何中心,建立局部坐标系 $o_i-x_iy_iz_i$ 于各混联支链的 A_i 点, $i=1\sim 3$ 。 x_0 与 x_1 同向, o_0 与 o_i 共面,设 o_0 到 o_i 的半径为 r_b 。为保证 3 条支链的约束力矢和约束力偶为不共面的不同结构约束, z_0 与 z_i 间存在一个夹角 γ 。

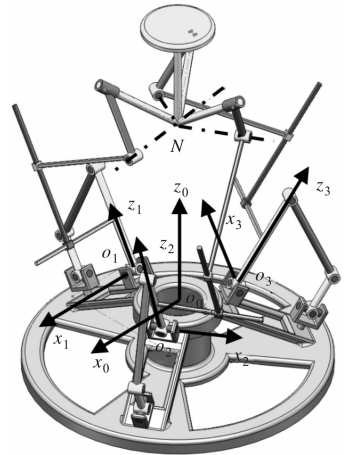


图 7 3T3R 运动模式

3.1 3T3R 运动模式

当 3 条混联支链均为无约束模式,则 3 条混联支链无结构约束作用于并联机构的动平台,并联机构当前位形下的瞬时自由度为 6,其具有 3T3R(T 表示移动,R 表示转动)运动模式。瞬时的 3T3R 运动模式为运动分岔并联机构不同运动模式进行切换的初始位形。

3.2 3T 运动模式

当3条混联支链全部切换为约束力偶模式,则3条混联支链将有3个约束力偶作用于并联机构的动平台。局部坐标系下的结构约束 $\$_{li}^r$ 可通过下式变换为全局坐标系的约束 $\$_{gi}^r$ [13-14]

$$\$_{gi}^r = T_i \$_{li}^r = \begin{bmatrix} R_i & 0 \\ A_i R_i & R_i \end{bmatrix} \$_{li}^r \quad (18)$$

如设局部坐标系原点 o_i 在全局坐标系下的坐标为 $(o_{ix} \ o_{iy} \ o_{iz})^T$,则

$$A_i = \begin{bmatrix} 0 & -o_{iz} & o_{iy} \\ o_{iz} & 0 & -o_{ix} \\ -o_{iy} & o_{ix} & 0 \end{bmatrix} \quad (19)$$

如用 $\text{rot}(k, \theta)$ 表示绕 k 轴旋转 θ 角,则

$$R_i = \text{rot}(z_0, \varphi_i) \text{rot}(x_0, \gamma) \quad (20)$$

式中: $\varphi_i = 2(i-1)\pi/3$ 。由式(14)和式(18),可得动平台的约束螺旋系为

$$\left. \begin{aligned} \$_{g1}^r &= (0, 0, 0; 0, -\delta_1, \delta_2) \\ \$_{g2}^r &= (0, 0, 0; \sqrt{3}\delta_1/2, \delta_1/2, \delta_2) \\ \$_{g3}^r &= (0, 0, 0; -\sqrt{3}\delta_1/2, \delta_1/2, \delta_2) \end{aligned} \right\} \quad (21)$$

式中: $\delta_1 = c_H \cos \gamma + b_H \sin \gamma$; $\delta_2 = -c_H \sin \gamma + b_H \cos \gamma$ 。

式(21)表明,在当前模式下并联机构存在3个不共面的约束力偶,它们约束了动平台的三维转动,此时动平台作如图8所示的3T运动。

3.3 3R 运动模式

当全部混联支链均切换为约束力矢模式,则将在3个约束力矢作用于动平台。由式(17)和式(18),可得全局坐标系下的约束螺旋系为

$$\left. \begin{aligned} \$_{g1}^r &= (0, \cos \gamma, \sin \gamma; -\delta_3, -\delta_4, \delta_5) \\ \$_{g2}^r &= \left(\frac{-\sqrt{3}\cos \gamma}{2}, \frac{-\cos \gamma}{2}, \sin \gamma; \frac{\delta_3 + \sqrt{3}\delta_4}{2}, \right. \\ &\quad \left. \frac{\delta_4 - \sqrt{3}\delta_3}{2}, \delta_5 \right) \\ \$_{g3}^r &= \left(\frac{\sqrt{3}\cos \gamma}{2}, \frac{-\cos \gamma}{2}, \sin \gamma; \frac{\delta_3 - \sqrt{3}\delta_4}{2}, \right. \\ &\quad \left. \frac{\delta_4 + \sqrt{3}\delta_3}{2}, \delta_5 \right) \end{aligned} \right\} \quad (22)$$

式中: $\delta_3 = z_N + r_b \sin \gamma$; $\delta_4 = x_N \sin \gamma$; $\delta_5 = x_N \cos \gamma$ 。

式(22)表明,此时存在3个相交于 N 点且不共面的约束力矢,它们约束了动平台的三维移动,动平台作如图9所示的3R运动,转动中心为 N 点。

3.4 2T1R 运动模式

如设混联支链一切换为约束力矢模式,混联支链二和三切换为约束力偶模式,由式(14)、式(17)和

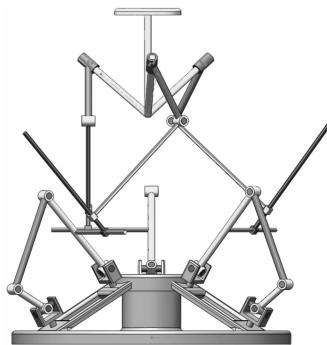


图8 3T 运动模式

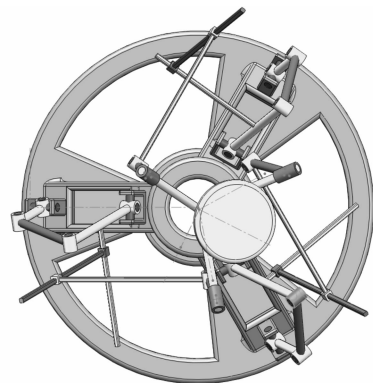


图9 3R 运动模式

式(18),可得全局坐标系下的约束螺旋系为

$$\left. \begin{aligned} \$_{g1}^r &= (0, \cos \gamma, \sin \gamma; -\delta_3, -\delta_4, \delta_5) \\ \$_{g2}^r &= (0, 0, 0; \sqrt{3}\delta_1/2, \delta_1/2, \delta_2) \\ \$_{g3}^r &= (0, 0, 0; -\sqrt{3}\delta_1/2, \delta_1/2, \delta_2) \end{aligned} \right\} \quad (23)$$

式(23)表明,此时存在一个约束力矢和两个约束力偶,它们约束了动平台的一维移动和二维转动,动平台作如图10所示的2T1R运动。

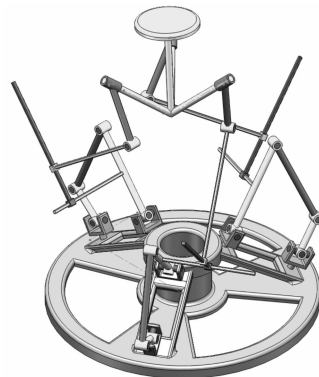


图10 2T1R 运动模式

3.5 1T2R 运动模式

如混联支链一切换为约束力偶模式,混联支链二和三切换为约束力矢模式,由式(14)、式(17)和式(18),可得全局坐标系下的约束螺旋系为

$$\left. \begin{aligned} \mathcal{S}_{g1}^r &= (0, 0, 0; 0, -\delta_1, \delta_2) \\ \mathcal{S}_{g2}^r &= \left(\frac{-\sqrt{3}\cos\gamma}{2}, \frac{-\cos\gamma}{2}, \sin\gamma; \frac{\delta_3 + \sqrt{3}\delta_4}{2}, \right. \\ &\quad \left. \frac{\delta_4 - \sqrt{3}\delta_3}{2}, \delta_5 \right) \\ \mathcal{S}_{g3}^r &= \left(\frac{\sqrt{3}\cos\gamma}{2}, \frac{-\cos\gamma}{2}, \sin\gamma; \frac{\delta_3 - \sqrt{3}\delta_4}{2}, \right. \\ &\quad \left. \frac{\delta_4 + \sqrt{3}\delta_3}{2}, \delta_5 \right) \end{aligned} \right\} \quad (24)$$

式(24)表明,此时存在一个约束力偶和两个相交于 N 点的约束力矢,它们约束了动平台的一维转动和二维移动,动平台作如图 11 所示的 1T2R 运动。

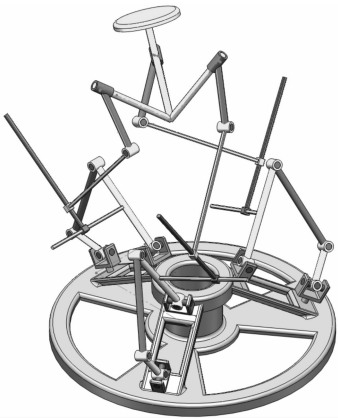


图 11 1T2R 运动模式

4 输入选取分析

根据输入选取原理^[15],如刚化并联机构的全部输入副,动平台的约束螺旋系秩为 6,则输入选取合理;如秩小于 6,则输入选取不合理。

如同时锁死混联支链的两个输入副,则有 $\mathcal{S}_{rx}$ 和 $\mathcal{S}_{ry}$ 同时为 0,此时混联支链的运动螺旋系变为

$$\left. \begin{aligned} \mathcal{S}_{p1} &= (0, 0, 0; 1, 0, 0) \\ \mathcal{S}_{p2} &= (0, 0, 0; 0, 0, 1) \\ \mathcal{S}_{r1} &= (1, 0, 0; 0, z_N, -y_N) \\ \mathcal{S}_{r2} &= (a_H, 0, c_H; c_H y_N, a_H z_N - c_H x_N, -a_H y_N) \end{aligned} \right\} \quad (25)$$

式中: $(x_N \ y_N \ z_N)^T$ 为图 4 中的 N 点坐标。对式(25)取反螺旋,可得混联支链的在局部坐标系的约束螺旋系为

$$\left. \begin{aligned} \mathcal{S}_1^i &= (0, 0, 0; 0, 1, 0) \\ \mathcal{S}_2^i &= (0, 1, 0; -z_N, 0, x_N) \end{aligned} \right\} \quad (26)$$

由式(26)和式(18),可得并联机构在全局坐标系下的约束螺旋系为

$$\left. \begin{aligned} \mathcal{S}_{g1}^r &= (0, 0, 0; 0, \cos\gamma, \sin\gamma) \\ \mathcal{S}_{g2}^r &= \left(0, 0, 0; \frac{-\sqrt{3}\cos\gamma}{2}, \frac{-\cos\gamma}{2}, \sin\gamma \right) \\ \mathcal{S}_{g3}^r &= \left(0, 0, 0; \frac{\sqrt{3}\cos\gamma}{2}, \frac{-\cos\gamma}{2}, \sin\gamma \right) \\ \mathcal{S}_{g4}^r &= (0, \cos\gamma, \sin\gamma; -\delta_3, -\delta_4, \delta_5) \\ \mathcal{S}_{g5}^r &= \left(\frac{-\sqrt{3}\cos\gamma}{2}, \frac{-\cos\gamma}{2}, \sin\gamma; \right. \\ &\quad \left. \frac{\delta_3 + \sqrt{3}\delta_4}{2}, \frac{\delta_4 - \sqrt{3}\delta_3}{2}, \delta_5 \right) \\ \mathcal{S}_{g6}^r &= \left(\frac{\sqrt{3}\cos\gamma}{2}, \frac{-\cos\gamma}{2}, \sin\gamma; \right. \\ &\quad \left. \frac{\delta_3 - \sqrt{3}\delta_4}{2}, \frac{\delta_4 + \sqrt{3}\delta_3}{2}, \delta_5 \right) \end{aligned} \right\} \quad (27)$$

式(27)表明,如刚化输入副,动平台的约束螺旋系秩为 6,因此输入选取是合理的,且全部输入副为机架副,有利于改善系统的动态性能。

5 结 论

(1)基于螺旋理论分析了一种单环闭链的运动分岔特性,其具有两种互斥的不同转动模式;将运动分岔单环闭链与四自由度 PPRR 串联支链相结合,得到一种具有无约束、存在一个约束力偶、存在一个约束力矢 3 种不同结构约束的混联支链。

(2)利用 3 条对称布置的混联支链连接定平台和动平台,得到一种具有运动分岔特性的并联机构;运动分岔并联机构具有 3T3R、3T、3R、2T1R 和 1T2R 共 5 种不同运动模式。

参考文献:

- [1] ZHANG Ketao, DAI Jiansheng, FANG Yuefa. Geometric constraint and mobility variation of two 3S_vPS_v metamorphic parallel mechanisms [J]. ASME Journal of Mechanical Design, 2013, 135(1): 011001.
- [2] GAN Dongming, DIAS Jiansheng, SENEVIRATNE L. Unified kinematics and optimal design of a 3rRPS metamorphic parallel mechanism with a reconfigurable revolute joint [J]. Mechanism and Machine Theory, 2016, 96: 239-254.
- [3] GAN Dongming, DAI Jiansheng, LIAO Qizheng. Constraint analysis on mobility change of a novel metamorphic parallel mechanism [J]. Mechanism and Machine Theory, 2010, 45(12): 1864-1876.
- [4] TIAN Chunxu, FANG Yuefa, GUO Sheng, et al. A class of reconfigurable parallel mechanisms with five-bar metamorphic linkage [J]. Journal of Mechanical

- Engineering Science, 2017, 231(11): 2089-2099.
- [5] KONG Xianwen, JIN Yan. Type synthesis of 3-DOF multi-mode translational/spherical parallel mechanisms with lockable joints [J]. Mechanism and Machine Theory, 2016, 96: 323-333.
- [6] YE Wei, FANG Yuefa, GUO Sheng. Reconfigurable parallel mechanisms with planar five-bar metamorphic linkages [J]. Science China Technological Science, 2014, 57(1): 210-218.
- [7] CARBONARI L, CALLEGARI M, PALMIERI G, et al. A new class of reconfigurable parallel kinematic machines [J]. Mechanism and Machine Theory, 2014, 79: 173-183.
- [8] KONG Xianwen, JIN Yan. Type synthesis of 3-DOF multi-mode translational/spherical parallel mechanisms with lockable joints [J]. Mechanism and Machine Theory, 2016, 96: 323-333.
- [9] LI Qinchuan, HERVE J M. Parallel mechanism with bifurcation of Schoenflies motion [J]. IEEE Transaction on Robotics, 2009, 25(3): 401-410.
- [10] YE Wei, FANG Yuefa, ZHANG Ketao, et al. A new family of reconfigurable parallel mechanism with diamond kinematotropic chain [J]. Mechanism and Machine Theory, 2014, 74: 1-9.
- [11] 叶伟, 方跃法, 郭盛, 等. 基于运动限定机构的可重构并联机构设计 [J]. 机械工程学报, 2015, 51(13): 137-143.
- YE Wei, FANG Yuefa, GUO Sheng, et al. Design of reconfigurable parallel mechanism with discontinuously movable mechanism [J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2015, 51(13): 137-143.
- [12] 叶伟, 方跃法, 郭盛, 等. 一种新型并联机构的运动分岔特性及其运动学分析 [J]. 机械工程学报, 2013, 49(13): 8-16.
- YE Wei, FANG Yuefa, GUO Sheng, et al. Bifurcated motion and kinematics of novel parallel mechanism [J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2013, 49(13): 8-16.
- [13] DAI Jiansheng, HUANG Zhen, LIPKIN H. Mobility of overconstrained parallel mechanism [J]. ASME Journal of Machine Design, 2006, 128: 220-229.
- [14] YE Wei, FANG Yuefa, ZHANG Ketao, et al. Mobility variation of a family of metamorphic parallel Mechanisms with reconfigurable hybrid limbs [J]. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 2016, 41: 145-162.
- [15] 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 mechanism [J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2000, 36(10): 81-85.

[本刊相关文献链接]

- 张铁, 林康宇, 邹焱飏, 等. 用于机器人末端残余振动控制的控制误差优化输入整形器. 2018, 52(4): 90-97. [doi: 10. 7652/xjtuxb201804013]
- 黄昔光, 黄旭. 利用共形几何代数的平面并联机构位置正解求解方法. 2018, 52(3): 76-82. [doi: 10. 7652/xjtuxb201803011]
- 杨航, 刘凌, 倪骏康, 等. 双关节刚性机器人自适应 BP 神经网络算法. 2018, 52(1): 129-135. [doi: 10. 7652/xjtuxb201801019]
- 栾玉亮, 荣伟彬, 吴方勇, 等. 3-PPSR 柔性并联机器人力控制研究. 2017, 51(4): 85-90. [doi: 10. 7652/xjtuxb201704013]
- 周雪峰, 孙广彬, 刘晓光, 等. 应用扩展零力矩点预观控制和分解动量控制的仿人机器人全身运动规划方法. 2016, 50(12): 58-63. [doi: 10. 7652/xjtuxb201612010]
- 王海龙, 王刚, 陈曦, 等. 仿海蟹机器人游泳足水动力学分析与实验研究. 2015, 49(8): 75-83. [doi: 10. 7652/xjtuxb201508013]
- 刘冠初, 熊静琪, 乔林, 等. 四足机器人自由步态规划建模与算法实现. 2015, 49(6): 84-89. [doi: 10. 7652/xjtuxb201506014]
- 张晓艳, 孙建桥, 丁千. 五自由度机械臂的运动学分析及及时滞控制. 2013, 47(10): 103-108. [doi: 10. 7652/xjtuxb201310018]
- 邹创, 陶涛, 梅雪松, 等. 机器人关节短筒谐波减速器接触计算与分析. 2013, 47(5): 82-87. [doi: 10. 7652/xjtuxb201305015]
- 杨德伟, 冯祖仁, 张翔. 新型三臂巡线机器人机构设计及运动分析. 2012, 46(9): 43-48. [doi: 10. 7652/xjtuxb201209009]

(编辑 杜秀杰 葛赵青)