

一种可重构并联机构的拓扑特性分析

徐 帅¹, 尤晶晶^{1,2}, 沈惠平³, 叶鹏达¹

(1.南京林业大学机械电子工程学院,江苏 南京 210037)

(2.江苏省精密与微细制造技术重点实验室,江苏 南京 210016)

(3.常州大学现代机构学研究中心,江苏 常州 213016)

[摘要] 设计出一种可重构并联机构. 首先,为了实现机构拓扑构型的重构,设计了一种可转换主、从运动和锁合的移动副;然后,将机构中的移动副设置为 6 类锁合方式,共重构出 13 种拓扑构型;接着,以锁合一个移动副为例,采用基于方位特征(POC)和有序单开链(SOC)的并联机构拓扑结构设计理论,详细剖析了机构的 3 个主要拓扑特性:POC 集、自由度、耦合度;最后,列出了其它 12 种重构构型的拓扑指标,这些指标反映了可重构并联机构的运动学及动力学的基本性能,为后续的构型综合及运动控制提供了理论基础,进一步为可重构并联机构的推广提供了应用参考.

[关键词] 并联机构,重构,锁合,方位特征,拓扑特性,有序单开链

[中图分类号] TH112 [文献标志码] A [文章编号] 1001-4616(2021)04-0007-10

Topology Analysis of a Reconfigurable Parallel Mechanisms

Xu Shuai¹, You Jingjing^{1,2}, Shen Huiping³, Ye Pengda¹

(1.College of Mechanical and Electronic Engineering, Nanjing Forestry University, Nanjing 210037, China)

(2.Jiangsu Key Laboratory of Precision and Micro-Manufacturing Technology, Nanjing 210016, China)

(3.Research Center for Advanced Mechanism Theory, Changzhou University, Changzhou 213016, China)

Abstract: A reconfigurable parallel mechanism is designed. Firstly, in order to reconstruct the topology configuration of the mechanisms, a movable pair with convertible principal and slave motion and locking is designed. Secondly, the moving pairs in the structure were set as six types of locking modes, and thirteen topological configurations were reconstructed. Then, taking a moving pair with a lock as an example, the topology design theory of parallel mechanism based on position and orientation characteristics (POC) and ordered single-opened-chain (SOC) is adopted to analyze in detail the three main topology characteristics of POC set, degree of freedom and coupling degree of the mechanism. Finally, the topological indexes of the other twelve reconfigurable parallel mechanisms are listed, which reflect the basic kinematics and dynamics performance of the reconfigurable parallel mechanisms, and provide the theoretical basis for the subsequent configuration synthesis and motion control, and further provide the application reference for the promotion of the reconfigurable parallel mechanisms.

Key words: parallel mechanisms, reconfigurable, locked, position and orientation characteristics, topological characteristics, single open chain

由于传统的并联机器人机构具有不变的拓扑结构和固定的运动副,这限制了并联机构的通用性与适应性. 鉴于此,2006 年,戴建生教授提出了可重构机构^[1],并于 2009 年召开全球首届 IEEE 国际可重构机构与可重构机器人大会,开创了可重构机构新领域. 相比较传统的并联机器人,可重构并联机器人在保留传统并联机构优点的同时又具有多构态变化,满足多任务、多工况与多功能的要求,达到“一机多用”、节约资源与降低能耗等特点,已广泛应用在火星探测车^[2]、卫星天线和太阳能帆板^[3]等领域,吸引了国内外学者的广泛关注.

收稿日期:2020-10-19.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51405237)、国家留学基金资助项目(201908320035).

通讯作者:尤晶晶,博士,副教授,研究方向:可重构并联机器人、六维加速度传感器. E-mail:youjingjing251010@126.com

一些机构所具有的新型运动模式相继被发现,具有多种运动模式的并联机构综合仍然是机构学研究的热点之一. 有研究发现^[4],机构拓扑演变以及活动度可变是可重构机器人的两个基本特征,几何约束是变胞机构变胞的起因. KONG 等^[5]综合了一类具有 3 自由度纯平移和 3 自由度纯转动的多运动模式的并联机构. GALLETTI 等^[6]通过利用特殊的运动副排列,综合了单环和多环运动转向机构,提出了 4 个基本的运动转向单环机构,并构造了具有分岔运动的并联机构. 畅博彦等^[7]提出一种仅含转动副的二维移动放缩单元,通过模块化组合将构造得到的一种平面二维移动放缩机构作为支链,设计了一种新型 3T1R 并联机构. REFAAT 等^[8]基于李群理论提出了一类在分岔点实现两种运动模式的新机构. 以上设计可重构并联机构的基本思路是一致的,都以拓扑综合为主,但还没有同时考虑多工况环境功能的需求和可重构机构本身构型与活动度变化的综合设计方法.

目前,国内外有关并联机构拓扑结构设计的主要方法有:位移子群分析法^[9]、方位特征集分析法^[10]与螺旋理论分析法^[11]. 相比较其他两种方法,基于方位特征集理论与方法,是一种描述机构运动副轴线的线矢簇的几何方法,与基坐标无关,也与运动位置无关;具有运算简单、易操作且物理意义明确,适用于低耦合度的并联机构拓扑结构设计.

本文首先设计了一种可转换主、从运动以及锁合模式的移动副;接着,通过锁合 1 个移动副,得到了 9 种新构型,并运用基于方位特征(POC)和有序单开链(SOC)的并联机构拓扑结构设计理论与方法,详细推导了机构的 POC 集、自由度、耦合度这 3 个主要拓扑特性指标,揭示了机构的本质属性;最后,给出了锁合 2 个、3 个、4 个、5 个和 6 个移动副后得到的重构构型的拓扑指标值,这些指标反映了可重构机构的运动学及动力学的基本性能,为后续的构型综合及运动控制提供了理论基础,进一步为可重构并联机构的推广提供了应用参考.

1 机构描述

所设计的 9-3(前、后数字分别代表静、动平台上的球铰链个数)并联机构,由三棱锥状的动平台 O、静平台 1 以及 9 条具有相同拓扑结构的 B-P-b(B 为一般球副,P 为移动副,b 为三重复合球铰副)支链组成^[12]. 其中,每三条支链为一组,组合成一个三棱锥. 初始状态下,每组支链上的三条支链两两垂直. 其结构简图与结构模型图分别如图 1、图 2 所示.

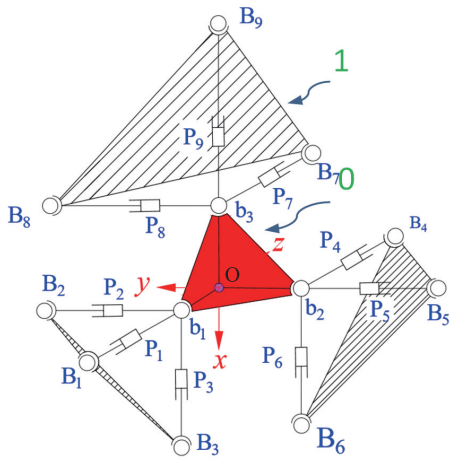


图 1 9-3 并联机构的结构简图
Fig. 1 Schematic diagram of 9-3 parallel mechanism

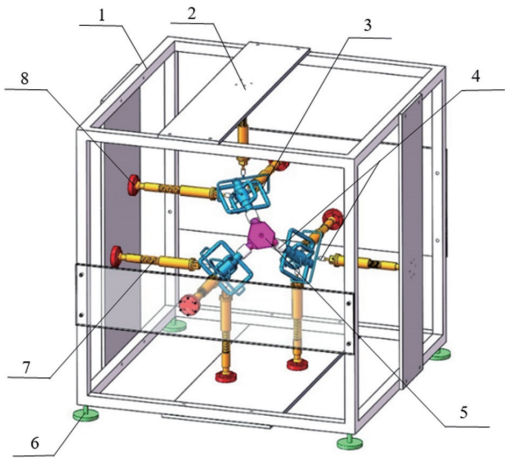
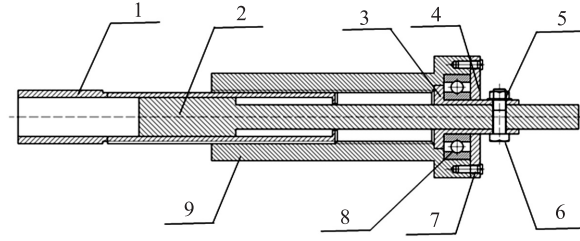


图 2 9-3 并联机构的结构模型
Fig. 2 Structural model of 9-3 parallel mechanism

首先,为了便于可重构并联机构的构型转换,设计了一种可转换主、从运动以及锁合模式的移动副,该支链的具体结构主要包括导杆、内套筒、外套筒和转换套筒,其结构模型如图 3 所示.

该移动副有 3 种工作模式:当转换套筒与导杆通过螺栓和螺母固定时,旋转外套筒,带动转换套筒和导杆一起移动,此时为驱动模式,该工作模式下的移动副又称为驱动副;当转换套筒与导杆无固定时,外套筒不起作用,导杆在内套筒的筒体内光滑移动,此时为从动模式,该工作模式下的移动副又称为从动副;当

转换套筒与导杆通过螺栓和螺母固定时,外套筒固结于内套筒外表面,由于螺纹的自锁,套筒和导杆静止不动,此时为锁合模式,在该工作模式下移动副等效为刚性杆件。



1.内套筒;2.导杆;3.挡环;4.转换套筒;5.螺母;6.螺栓;7.螺钉;8.深沟球轴承;9.外套筒

图3 移动副结构示意图

Fig.3 Schematic diagram of moving pair structure

2 拓扑分析

2.1 机构的 POC 计算

如图4所示,该机构中含5B-3P空间七杆回路的复杂支路.该支路由3个SOC $\{-B-P-B-\}$ 支链在 $b_{副}$ 中心重组成,输出构件在此处又以复合球铰副连接而成,该支链可记作为 $HSOC \{-P^{(5B-3P)}-P^{(5B-3P)}-P^{(5B-3P)}-B-\}$. 其中,利用移动副的不同工作模式,将机构中的 P_1 副设置为锁合模式,将 P_2, P_3, P_4, P_6 以及 P_9 5个移动副设置为驱动模式。

由于并联机构动平台的 POC 集与支链末端构件的 POC 集相同,则可通过使用等效拓扑结构,求解机构的自由度,其等效形式如图5所示。

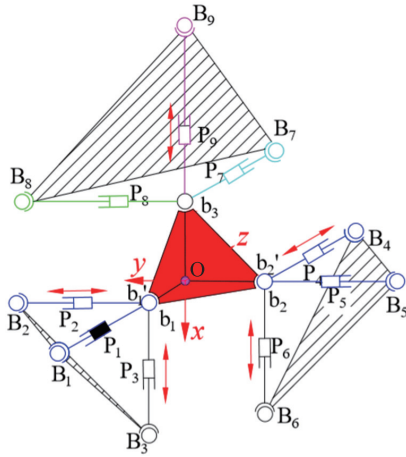


图4 锁合机构结构简图

Fig.4 Structure diagram of reconfigurable mechanism

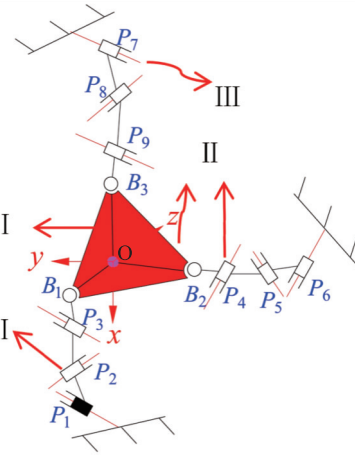


图5 可重构机构的等效拓扑结构简图

Fig.5 Equivalent topology diagram of reconfigurable mechanism

(a) 支链的拓扑结构如下:

混合支链 I 的拓扑结构等效表示为 $HSOC_1 \{-P^{(5B-2P)}-P^{(5B-2P)}-B_1-\}$, 混合支链 II、III 的拓扑分别为 $HSOC_2 \{-P^{(5B-3P)}-P^{(5B-3P)}-P^{(5B-3P)}-B_2-\}$ 、 $HSOC_3 \{-P^{(5B-3P)}-P^{(5B-3P)}-P^{(5B-3P)}-B_3-\}$ 。

(b) 选定动平台上的中点为基点 O。

(c) 确定支链 I 的 POC 集。

$$M_1 = \begin{bmatrix} t^1(//P_2) \\ r^0 \end{bmatrix} \cup \begin{bmatrix} t^1(//P_3) \\ r^0 \end{bmatrix} \cup \begin{bmatrix} t^2(\perp \rho_1) \\ r^3(//\overbrace{R_1^{B_1} R_2^{B_2} R_3^{B_3}}) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} t^3 \\ r^3 \end{bmatrix}, \quad (1)$$

式中, $\overbrace{R_1^{B_1} R_2^{B_2} R_3^{B_3}}$ 表示若干个相邻的 R 副轴线交于一点, $R_1^{B_1}$ 为球铰链 B_1 对应的第 1 个转动副的轴线, 其他相似符号类推。

无约束支链 II、III 的 POC 集与 I 相同。

$$M_2 = M_3 = \begin{bmatrix} r^3 \\ t^3 \end{bmatrix}. \quad (2)$$

(d) 确定动平台 POC 集.

$$M_{pa} = M_1 \cap M_2 \cap M_3 = \begin{bmatrix} t^3 \\ r^3 \end{bmatrix} \cap \begin{bmatrix} t^3 \\ r^3 \end{bmatrix} \cap \begin{bmatrix} t^3 \\ r^3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} t^3 \\ r^3 \end{bmatrix}. \quad (3)$$

值得一提的是,这里虽然有 6 个元素,但是不一定全部独立,而 POC 集的独立元素数目由自由度决定,需进一步求解机构的自由度.

2.2 机构的自由度计算

(1) 并联机构的全周 DOF 公式为

$$\xi_{L_j} = \dim. \{ (\bigcap_{i=1}^j M_{b_i}) \cup M_{b(j+1)} \}, \quad (4)$$

$$F = \sum_{i=1}^m f_i - \sum_{j=1}^v \xi_{L_j}, \quad (5)$$

式中, F 为机构自由度, f_i 为第 i 个运动副的自由度, m 为运动副数, v 为独立回路数 ($v = m - n + 1$, n 为构件数), ξ_{L_j} 为第 j 个独立回路的独立位移方程数, $\bigcap_{i=1}^j M_{b_i}$ 为前 j 条支链组成的子并联机构 POC 集, $M_{b(j+1)}$ 为前 $j+1$ 条支链末端构件的 POC 集.

(2) 确定机构的自由度

(a) 确定由 SOC_1 和 SOC_2 组成的第一回路及其独立位移方程数 ξ_{L_1} .

$$Loop_1: \{-P_2-P_3-B_1-B_2-P_4-P_5-P_6-\},$$

由式(4)得

$$\xi_{L_1} = \dim. \{ M_{b_1} \cup M_{b_2} \} = \dim. \left\{ \begin{bmatrix} t^3 \\ r^3 \end{bmatrix} \cup \begin{bmatrix} t^3 \\ r^3 \end{bmatrix} \right\} = \begin{bmatrix} t^3 \\ r^3 \end{bmatrix} = 6. \quad (6)$$

(b) 确定子并联机构的自由度及 POC.

由式(5)得

$$F = \sum_{i=1}^m f_i - \sum_{j=1}^v \xi_{L_j} = 10 - 6 = 4, \quad (7)$$

该子并联机构的 POC 集为

$$M_{pa(1-2)} = M_1 \cap M_2 = \begin{bmatrix} t^3 \\ r^3 \end{bmatrix} \cap \begin{bmatrix} t^3 \\ r^3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} t^3 \\ r^3 \end{bmatrix}. \quad (8)$$

(c) 再确定由上述子并联机构和支链 III 构成的第二条回路及其独立位移方程 ξ_{L_2} .

$$Loop_2: \{-P_7-P_8-P_9-B_3-R^{[-B_1-B_2-]}-\},$$

$$\xi_{L_2} = \dim. \{ M_{pa(1-2)} \cup M_{b_3} \} = \dim. \left\{ \begin{bmatrix} t^3 \\ r^3 \end{bmatrix} \cup \begin{bmatrix} t^3 \\ r^3 \end{bmatrix} \right\} = \begin{bmatrix} t^3 \\ r^3 \end{bmatrix} = 6. \quad (9)$$

(d) 确定机构的自由度.

$$F_{(1-2)} = \sum_{i=1}^m f_i - \sum_{j=1}^2 \xi_{L_j} = (10+7) - (6+6) = 5, \quad (10)$$

由于新机构 $DOF=5$, M_{pa} 只能有五个独立元素. 因此, 可从 M_{pa} 的六个元素中, 任取五个为独立元素, 其余一个为非独立元素, 组成的方案有:

$$M_{pa} = \begin{bmatrix} t^2 \cup \{t^1\} \\ r^3 \end{bmatrix}, M_{pa} = \begin{bmatrix} t^3 \\ r^2 \cup \{r^1\} \end{bmatrix}.$$

(3) 判断机构消极运动副

已知机构的自由度为 5, 由消极运动副的判定准则(若新机构的自由度小于原机构的自由度, 则选取的移动副为消极运动副)判断 P_2 副是否为消极运动副.

①假设刚化 P_2 副, 得到一个新机构, 第一条支路的拓扑结构改变为 $HSOC_1 \{-P^{(5B-P)}-B_1-\}$. 由串联机构 POC 方程, 其末端构件 POC 集为

$$M_1 = \begin{bmatrix} t^1(//P_2) \\ r^0 \end{bmatrix} \cup \begin{bmatrix} t^2(\perp \rho_1) \\ r^3(//\widehat{R_1^{B_1}R_2^{B_1}R_3^{B_1}}) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} t^3 \\ r^3 \end{bmatrix}. \quad (11)$$

②确定新机构的自由度.

(a)确定第一回路及其独立位移方程数 ξ_{L_1} .

$$\begin{aligned} & Loop_1: \{-P_3-B_1-B_2-P_4-P_5-P_6-\}, \\ & \xi_{L_1} = \dim. \{M_{b_1} \cup M_{b_2}\} = \dim. \left\{ \begin{bmatrix} t^3 \\ r^3 \end{bmatrix} \cup \begin{bmatrix} t^3 \\ r^3 \end{bmatrix} \right\} = \begin{bmatrix} t^3 \\ r^3 \end{bmatrix} = 6. \end{aligned} \quad (12)$$

(b)确定子并联机构的自由度及 POC.

$$F = \sum_{i=1}^m f_i - \sum_{j=1}^v \xi_{L_j} = 9 - 6 = 3. \quad (13)$$

(c)该子并联机构的 POC 集为

$$M_{pa(1-2)} = M_1 \cap M_2 = \begin{bmatrix} t^3 \\ r^3 \end{bmatrix} \cap \begin{bmatrix} t^3 \\ r^3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} t^3 \\ r^3 \end{bmatrix}. \quad (14)$$

(d)再确定由上述子并联机构和支链Ⅲ构成的第二条回路及其独立位移方程 ξ_{L_2} .

$$\begin{aligned} & Loop_2: \{-P_7-P_8-P_9-B_3-R^{(-B_1-B_2-)}-\} \\ & \xi_{L_2} = \dim. \{M_{pa(1-2)} \cup M_{b_3}\} = \dim. \left\{ \begin{bmatrix} t^3 \\ r^3 \end{bmatrix} \cup \begin{bmatrix} t^3 \\ r^3 \end{bmatrix} \right\} = \begin{bmatrix} t^3 \\ r^3 \end{bmatrix} = 6. \end{aligned} \quad (15)$$

(e)新机构的自由度.

$$F_{(1-2)}^* = \sum_{i=1}^m f_i - \sum_{j=1}^v \xi_{L_j} = (9+7) - (6+6) = 4. \quad (16)$$

由于新机构 $DOF(F^*=4)$ 小于原机构的 $DOF(F=5)$, 按照消极运动副判定准则, P_2 副不是消极运动副, 同理可证明所有运动副都不是消极运动副.

(4)选取机构驱动副

基于驱动副判定准则(若新机构的自由度为 0, 则选取的运动副可同时为驱动副), 判断 P_2 、 P_3 、 P_4 、 P_5 与 P_6 副是否同时为驱动副, 假设刚化 P_2 、 P_3 、 P_4 、 P_5 与 P_6 副, 得到一个新机构. 此时, 支链的拓扑结构改变为:

①混合支链Ⅰ的拓扑结构等效表示为 $HSOC_1\{-B_1-\}$, 混合支链Ⅱ、Ⅲ的拓扑分别为 $HSOC_2\{-B_2-\}$ 、 $HSOC_3\{-P^{(5B-3P)}-P^{(5B-3P)}-P^{(5B-3P)}-B_3-\}$.

由串联机构 POC 方程可知, 其末端构件 POC 集如下: 第一、二支路 SOC 的 POC 集为

$$M_i = \begin{bmatrix} t^2(\perp \rho_1) \\ r^3(//\widehat{R_1^{B_1}R_2^{B_1}R_3^{B_1}}) \end{bmatrix}, \quad (i=1, 2). \quad (17)$$

②确定新机构的自由度.

(a)确定由 SOC_1 和 SOC_2 组成的第一回路及其独立位移方程数 ξ_{L_1} .

$$\begin{aligned} & Loop_1: \{-B_1-B_2-\}, \\ & \xi_{L_1} = \dim. \{M_{b_1} \cup M_{b_2}\} = \dim. \left\{ \begin{bmatrix} t^2 \\ r^3 \end{bmatrix} \cup \begin{bmatrix} t^2 \\ r^3 \end{bmatrix} \right\} = \begin{bmatrix} t^3 \\ r^3 \end{bmatrix} = 6. \end{aligned} \quad (18)$$

(b)确定由 SOC_1 和 SOC_2 组成的子并联机构的自由度及 POC.

$$F = \sum_{i=1}^m f_i - \sum_{j=1}^v \xi_{L_j} = 5 - 6 = -1. \quad (19)$$

(c)该子并联机构的 POC 集为

$$M_{pa(1-2)} = M_1 \cap M_2 = \begin{bmatrix} t^3 \\ r^3 \end{bmatrix} \cap \begin{bmatrix} t^3 \\ r^3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} t^3 \\ r^3 \end{bmatrix}. \quad (20)$$

(d)再确定由上述子并联机构和支链Ⅲ构成的第二条回路及其独立位移方程 ξ_{L_2} .

$$\begin{aligned} \text{Loop}_2: \{ -P_7-P_8-P_9-B_3-R^{[-B_1-B_2-]} - \}, \\ \xi_{L_2} = \dim. \{ M_{P_{a(1-2)}} \cup M_{b_3} \} = \dim. \left\{ \begin{bmatrix} t^3 \\ r^3 \end{bmatrix} \cup \begin{bmatrix} t^3 \\ r^3 \end{bmatrix} \right\} = \begin{bmatrix} t^3 \\ r^3 \end{bmatrix} = 6. \end{aligned} \quad (21)$$

(e)新机构的自由度.

$$F_{(1-2)}^* = \sum_{i=1}^m f_i - \sum_{j=1}^2 \xi_{L_j} = (5+7) - (6+6) = 0. \quad (22)$$

由于新机构 $\text{DOF}(F^* = 0)$, 按照判定准则 P_2, P_3, P_4, P_5 与 P_6 副可同时为驱动副.

2.3 耦合度计算

(a) 基于机构拓扑结构分解算法, 任一机构可依次分解为 v 个 SOC_i 并得到其相应的约束度 Δ_i , 第 j 个 SOC_j 的约束度为

$$\Delta_j = \sum_{i=1}^m f_i - I_j - \xi_j = \begin{cases} \Delta_j^- = -5, -4, -3, -2, -1 \\ \Delta_j^0 = 0 \\ \Delta_j^+ = 1, 2, 3, \dots \end{cases} \quad \left(\sum_{j=1}^v \Delta_j = 0 \right). \quad (23)$$

进一步地, 一组有序的 v 个 SOC 可划分成一个独立回路数为 v 的最小子运动链, 它仅含 1 个零自由度 BKC, 进一步地, 对一个 SKC 而言, 须满足

$$\sum_{j=1}^v |\Delta_j| = 0. \quad (24)$$

因此, 耦合度为

$$k = \frac{1}{2} \min \left\{ \sum_{j=1}^v |\Delta_j| \right\} = \frac{1}{2} \min \left\{ \sum_{j=1}^v \left| \sum_{i=1}^m f_i - I_j - \xi_j \right| \right\}, \quad (25)$$

式中, m_i 为第 i 个 SOC_i 的运动副数, I_j 为第 j 个 SOC_j 的驱动副数.

(b) 确定机构的耦合度

耦合度可以作为评价正运动学复杂度的一个指标^[13]. 为了评估并联机构的耦合度, 必须将机构分解为多个 SOC 和独立回路. 如图 6 所示, 红色双箭头表示该移动副为驱动副, 不同颜色用来区分分解的各个回路, 分解的具体流程如下: 第一个独立回路 Loop_1 可以通过固联 SOC_1 的两端构件来定义, 而第二个独立回路 Loop_2 则是通过将 Loop_1 作为子运动链, 并将 SOC_2 的两端构件连接到 Loop_1 来实现的. 类似地, 其他独立的回路 $\text{Loop}_i (i=3 \sim 9)$ 是通过将 $\text{SOC}_i (i=3 \sim 9)$ 的两端构件连接到 $\text{Loop}_j (j=2 \sim 8)$ 来定义 (参见图 6).

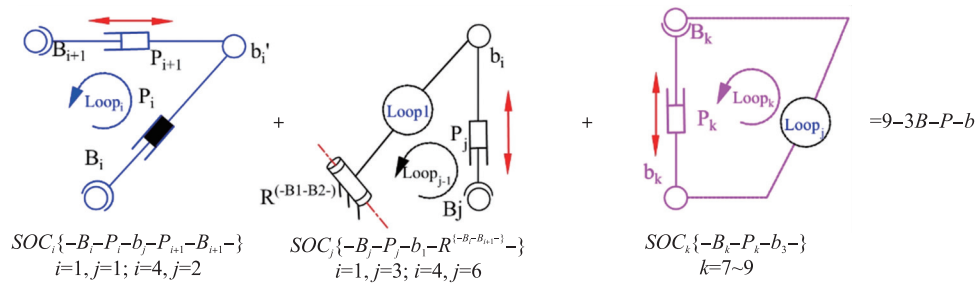


图 6 9-3 并联机构构型分解

Fig. 6 Configuration decomposition of 9-3 parallel mechanism

①第 1 个回路 $\text{SOC}_1 \{ -B_1-b_1-P_2-B_2- \}$ 的约束度为

$$\Delta_1 = \sum_{i=1}^{m_1} f_i - I_1 - \xi_{L1} = 7-1-6=0, \quad (26)$$

②第 2 个回路 $\text{SOC}_2 \{ -R^{[-B_1-B_2-]}-b_1-P_3-B_3- \}$ 的约束度为

$$\Delta_2 = \sum_{i=1}^{m_2} f_i - I_2 - \xi_{L2} = 7-1-6=0, \quad (27)$$

计入绕 $(-B_1-B_2-)$ 副的球心连线的局部转动自由度 $R^{[-B_1-B_2-]}$, 但未计含绕 b_1 与 B_3 副球心连线的局部自由度.

③第3个回路 $SOC_3 \{-B_4-P_4-b_2-P_6-B_6-\}$ 的约束度为

$$\Delta_3 = \sum_{i=1}^{m_3} f_i - I_3 - \xi_{L3} = 8 - 2 - 6 = 0, \quad (28)$$

④第4个回路 $SOC_4 \{-B_5-P_5-b_2-\}$ 的约束度为

$$\Delta_4 = \sum_{i=1}^{m_4} f_i - I_4 - \xi_{L4} = 6 - 0 - 6 = 0, \quad (29)$$

⑤第5个回路 $SOC_5 \{-B_7-P_7-b_3-\}$ 的约束度为

$$\Delta_5 = \sum_{i=1}^{m_5} f_i - I_5 - \xi_{L5} = 6 - 0 - 6 = 0, \quad (30)$$

⑥第6个回路 $SOC_6 \{-B_8-P_8-b_3-\}$ 的约束度为

$$\Delta_6 = \sum_{i=1}^{m_6} f_i - I_6 - \xi_{L6} = 6 - 0 - 6 = 0, \quad (31)$$

⑦第7个回路 $SOC_7 \{-B_9-P_9-b_3-R^{[-b_2-b_1]}-\}$ 的约束度为

$$\Delta_7 = \sum_{i=1}^{m_7} f_i - I_7 - \xi_{L7} = 7 - 1 - 6 = 0, \quad (32)$$

⑧第8个回路 $SOC_8 \{-b_1-b_2-\}$ 的约束度为

$$\Delta_8 = \sum_{i=1}^{m_8} f_i - I_8 - \xi_{L8} = 5 - 0 - 5 = 0, \quad (33)$$

⑨由 BKC 的判定方法,其耦合度为

$$\kappa = \frac{1}{2} \sum_{j=1}^8 |\Delta_j| = 0. \quad (34)$$

(c) 自由度类型

由于图3所示并联机构包含8个BKC,按照自由度类型判定准则(机构的DOF个驱动副位于不同的SKC中,机构具有部分自由度),可知该机构具有部分自由度.

(d) 运动输入-输出解耦性

并联机构动平台的方向与位置是运动输入的函数,即

$$M_{pa} = \begin{bmatrix} x(\theta_1, \dots, \theta_F) & y(\theta_1, \dots, \theta_F) & z(\theta_1, \dots, \theta_F) \\ \alpha(\theta_1, \dots, \theta_F) & \beta(\theta_1, \dots, \theta_F) & \gamma(\theta_1, \dots, \theta_F) \end{bmatrix}. \quad (35)$$

式中, M_{pa} 为动平台的方向变量, $x(\theta_1, \dots, \theta_F)$, $y(\theta_1, \dots, \theta_F)$, $z(\theta_1, \dots, \theta_F)$ 为动坐标系原点在定坐标系的位置变量, $\alpha(\theta_1, \dots, \theta_F)$, $\beta(\theta_1, \dots, \theta_F)$, $\gamma(\theta_1, \dots, \theta_F)$ 为动坐标系原点在定坐标系的方向变量, θ_i 为第 i 个运动输入量, F 为机构的自由度.

由式(35)可知,当动平台的部分方位变量只是部分运动输入量($r < F$)的函数时,机构运动输入-输出变量之间存在部分解耦性,进一步可知,该机构满足运动输入-输出解耦性.

3 六类锁合并联机构及其拓扑分析

根据设计的一种可转换主、从运动以及锁合的移动副,将结构中的移动副分别设置为锁合1个、2个、3个、4个、5个和6个,共六类锁合类型,重构出13种拓扑结构,如表1所示.第2章以<1-0-0>类型(共有9种配置(CN=9))为例,基于方位特征(POC)和有序单开链(SOC)的并联机构拓扑结构设计理论,详细剖析了机构的POC集、自由度(F)、耦合度(κ)这3个主要拓扑特性指标.对于另外12种拓扑构型.它们的拓扑分析与计算过程与类型1相同,限于篇幅,不再详细推导,直接给出了它们的CN、 F 、 κ 和POC这4类指标的结果.其中,类型1~5中的POC元素并不是完全独立的,而独立元素的个数等于它们的自由度个数;对于<3-3-3>与<3-0-0>构型,可确定具体的独立元素.

从表1中可以看出

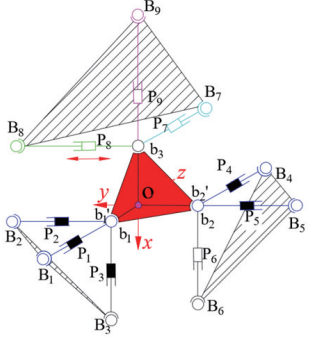
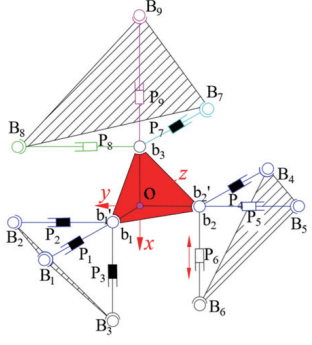
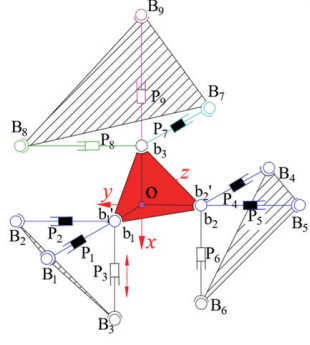
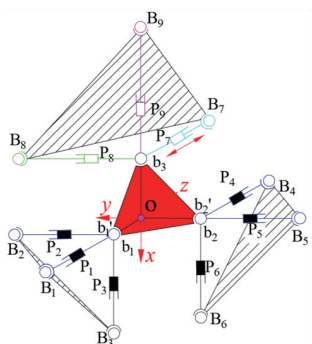
(1)类型1~5中,机构的自由度个数与锁合移动副的个数之和都为6,且都存在3个被动支链,因此,在保持动平台输出运动不变的情况下,可简化结构,便于对其结构进行拓扑分析.

表 1 可重构并联机构的拓扑结构特征

Table 1 Topology characteristics of reconfigurable parallel mechanism

锁合类型	拓扑分析		
类型 1	$\langle 1-0-0 \rangle; F=5, \kappa=0, CN=9, M_{Pa}=[t^3 r^3]$		
类型 2	$\langle 2-0-0 \rangle; F=4, \kappa=0, CN=9, M_{Pa}=[t^3 r^3]$	$\langle 1-1-0 \rangle; F=4, \kappa=0, CN=27, M_{Pa}=[t^3 r^3]$	
类型 3	$\langle 3-0-0 \rangle; F=3, \kappa=0, CN=3$ $M_{Pa}=[t^0 r^3]$	$\langle 2-1-0 \rangle; F=3, \kappa=0, CN=54$ $M_{Pa}=[t^3 r^3]$	$\langle 1-1-1 \rangle; F=3, \kappa=0, CN=27$ $M_{Pa}=[t^3 r^3]$
类型 4	$\langle 3-1-0 \rangle; F=2, \kappa=0, CN=18$ $M_{Pa}=[t^3 r^3]$	$\langle 2-2-0 \rangle; F=2, \kappa=0, CN=27$ $M_{Pa}=[t^3 r^3]$	$\langle 2-1-1 \rangle; F=2, \kappa=0, CN=81$ $M_{Pa}=[t^3 r^3]$

续表 1 Table 1 continued

锁合类型	拓扑分析		
类型 5	$\langle 3-2-0 \rangle: F=1, \kappa=0, CN=18$ $M_{pa} = [t^3 r^3]$	$\langle 3-1-1 \rangle: F=1, \kappa=0, CN=27$ $M_{pa} = [t^3 r^3]$	$\langle 2-2-1 \rangle: F=1, \kappa=0, CN=81$ $M_{pa} = [t^3 r^3]$
类型 6			
	$\langle 3-3-0 \rangle: F=1, \kappa=0, CN=3, M_{pa} = [t^0 r^1]$		
			

(2)类型 1~6 中的耦合度值 κ 都为 0,基于方位特征理论可知,耦合度值 κ 的大小与机构运动学求解难易性有关,耦合度值 κ 越大,机构运动学求解越复杂,对于耦合度值 $\kappa=0$ 的机构可容易直接求解其解析正解.

(3)类型 1~6 中的 13 种构型, $\langle 1-0-0 \rangle$ 与 $\langle 2-0-0 \rangle$ 分别有 9 种配置方式, $\langle 1-1-0 \rangle$ 、 $\langle 1-1-1 \rangle$ 、 $\langle 2-2-0 \rangle$ 与 $\langle 3-1-1 \rangle$ 分别有 27 种配置方式, $\langle 3-0-0 \rangle$ 与 $\langle 3-3-3 \rangle$ 分别有 3 种配置方式, $\langle 2-1-1 \rangle$ 与 $\langle 2-2-1 \rangle$ 分别有 81 种配置方式, $\langle 2-1-0 \rangle$ 有 54 种配置方式, $\langle 3-1-0 \rangle$ 与 $\langle 3-2-0 \rangle$ 分别有 18 种配置方式,这表明该类型机构具有多构态,多功能作用.

4 结论

针对传统并联机构的工作空间有限以及具有固定的运动副问题,本文设计了一种可转换主、从运动以及锁合模式的移动副,将机构中的移动副分别设置为锁合 1 个、2 个、3 个、4 个、5 个和 6 个,共 6 类锁合类型,重构出 13 种拓扑结构,再基于方位特征(POC)和有序单开链(SOC)的并联机构拓扑结构设计理论与方法,得到了 13 种拓扑结构的 POC 集、自由度(F)、耦合度(κ)及配置个数(CN)这 4 个主要拓扑特性指标,研究分析表明,本文重构得到的 13 种构型的耦合度 κ 值均为 0,表明了机构的可容易直接求解其解析正解,并且利用所设计的移动副装置,很方便的对并联机构进行构型转换,大大提高了并联机构的通用性和适应性.接下来的工作将研究不同构型各自所适用的工作环境以及并联机构随着环境改变去选择最优的拓扑构型.

[参考文献]

[1] 康熙,戴建生. 机构学中机构重构的理论难点与研究进展-变胞机构演变内涵、分岔机理、设计综合及其应用[J]. 中国机械工程,2020,31(1):57-71.

- [2] 姜东,徐宇,王桂伦,等. 锁定状态下球铰连接桁架的刚度性能[J]. 东南大学学报,2019,49(5):820-825.
- [3] CUI L,DAI J S. Posture,workspace,and manipula bility of the metamorphic multifingered hand with an articulated palm[J]. Journal of mechanisms robotics,transactions of the ASME,2011,3(2):021001-1.
- [4] 丁希仑. 未来大型航天器的基础:空间可折叠机构[J]. 科技导报,2014,32(23):84-92.
- [5] KONG X,GOSSELIN C M. Type synthesis of parallel mechanisms with multiple operation modes[J]. Journal of mechanical design,transactions of the ASME,2007,129(6):595-601.
- [6] GALLETI C,FANGHELLA P. Single-loop Kinemato tropic Mechanisms[J]. Mechanism and machine theory,2001,36(6):743-761.
- [7] 畅博彦,李晓宁,金国光,等. 具有整周回转能力的 3T1R 并联机构运动学分析[J]. 农业机械学报,2019,50(7):406-416.
- [8] REFAAT S,HERVE J M,NAHAVANDI S,et al. Cambridge University Press,2007. Two-mode overconstrained three-DOFs rotational-translational linear-motor-based parallel-kinematics mechanism for machine tool applications[J]. Robotica,2007,25(4):461-466.
- [9] HERVÉ J. Design of parallel manipulators via the displacement group[J]. Proceedings of the 9th world congress on the theory of machines and mechanisms,1995,35(2):2079-2082.
- [10] ZHU X R,SHEN H P,WU C Q,et al. Computer-aided mobility analysis of parallel mechanisms[J]. Mechanism and machine theory,2020,25(7):148-156.
- [11] FANG Y F,TSAL L W. Structure synthesis of a class of 3-DOF rotational parallel manipulators[J]. IEEE transactions on robotics & automation,2004,20(1):117-121.
- [12] 尤晶晶,李成刚,吴洪涛,等. 六维加速度传感器的两类解耦算法及其对比研究[J]. 中国机械工程,2013,24(21):2938-2943.
- [13] LIU H T,XU K,SHEN H P,et al. Type synthesis of 1T2R parallel mechanisms using structure coupling-reducing method[J]. Chinese journal of mechanical engineering,2019,32(1):89-97.

[责任编辑:顾晓天]