

DOI:10.16356/j.1005-2615.2022.03.013

一种可重构 3-RRR 平面并联机构及其工作空间分析

徐 帅¹, 尤晶晶^{1,2}, 叶鹏达¹, 李成刚^{2,3}, 沈惠平⁴

(1. 南京林业大学机械电子工程学院, 南京 210037; 2. 南京航空航天大学江苏省精密与微细制造技术重点实验室, 南京 210016; 3. 南京航空航天大学机电学院, 南京 210016; 4. 常州大学机械与轨道交通学院, 常州 213016)

摘要: 在传统三自由度平面并联机构的基础上, 提出了一种新型可重构三自由度平面并联机构。首先, 基于方位特征方程的并联机构拓扑结构设计理论与方法, 设计了一种可重构支链, 实现 3-转动副移动副转动副 (3-revolute-joint, prismatic-joint, revolute-joint, 3-RPR) 型与 3-转动副转动副转动副 (3-revolute-joint, revolute-joint, revolute-joint, 3-RRR) 型平面并联机构之间的切换。然后, 以 3-RRR 构型为例, 分析了机构重要的拓扑指标: 方位特征、自由度及耦合度, 并基于机构的结构特性及几何约束条件, 采用封闭矢量法, 推导出运动学逆解模型。最后, 分别基于支链的几何约束法及逆解模型, 分析了机构的位置工作空间, 并研究了杆长行程变化对工作空间的影响。本文不仅为机构工作空间的分析提供了一种新的思路, 而且为机构的设计提供了一种新的选择。

关键词: 平面机构; 可重构支链; 封闭矢量法; 自由度; 工作空间

中图分类号: TH112 **文献标志码:** A **文章编号:** 1005-2615(2022)03-0466-07

A Reconfiguration 3-RRR Planar Parallel Mechanism and Its Workspace Analysis

XU Shuai¹, YOU Jingjing^{1,2}, YE Pengda¹, LI Chenggang^{2,3}, SHEN Huiping⁴

(1. College of Mechanical and Electronic Engineering, Nanjing Forestry University, Nanjing 210037, China; 2. Jiangsu Key Laboratory of Precision and Micro-manufacturing Technology, Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, Nanjing 210016, China; 3. College of Mechanical and Electrical Engineering, Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, Nanjing 210016, China; 4. School of Mechanical Engineering and Rail Transit, Changzhou University, Changzhou 213016, China)

Abstract: Based on the traditional three degree of freedom (DOF) planar parallel mechanism, a novel reconfigurable 3-DOF planar parallel mechanism is proposed. Firstly, based on the theory and method of topology design of the parallel mechanism position and orientation characteristic (POC). The switch between the 3-revolute-joint, prismatic-joint, revolute-joint (3-RPR) and 3-revolute-joint, revolute-joint, revolute-joint (3-RRR) planar parallel mechanisms is realized through a reconfigurable branch chain. Then, taking 3-RRR configuration as an example, the important topological indexes of the mechanism, such as POC, DOF and coupling degree, are analyzed. Based on the structural characteristics and geometric constraints of the mechanism, the inverse kinematics model is derived by using the closed vector method. Finally, the position workspace of the mechanism is analyzed based on the geometric constraint method of the branched chain and the inverse solution model respectively. This work provides not only a new idea for the analysis of mechanism workspace, but also a new choice for the design of mechanism.

Key words: planar mechanism; reconfigurable branched chain; closed vector method; degree of freedom; work space

基金项目: 国家自然科学基金(51405237); 国家留学基金(201908320035); 江苏省精密与微细制造技术重点实验室开放基金。

收稿日期: 2021-07-26; **修订日期:** 2021-12-02

通信作者: 尤晶晶, 男, 副教授, 硕士生导师, E-mail: youjingjing251010@126.com。

引用格式: 徐帅, 尤晶晶, 叶鹏达, 等. 一种可重构 3-RRR 平面并联机构及其工作空间分析[J]. 南京航空航天大学学报, 2022, 54(3): 466-472. XU Shuai, YOU Jingjing, YE Pengda, et al. A reconfiguration 3-RRR planar parallel mechanism and its workspace analysis[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2022, 54(3): 466-472.

“Robots”一词最早诞生于20世纪20年代,作为20世纪最伟大的发明之一,机器人在生产生活及其他各个领域的应用已经成为一个国家的重要发展目标。智能机器人作为其中的一种典型产物,在满足自主设计、制造的同时,又要能完成复杂危险的任务,如焊接^[1]、智能感知^[2]和飞行器模拟^[3]等。与此同时,传统并联机构,因机构构型的形式单一、功能简单且适应的工作环境相对固定,已经很难满足任务的需求^[4]。而环境适应能力强与构型可变的可重构并联机构,成为了学者们研究的热点问题^[5]。当前,实现并联机器人重构的方法有4种:(1)切换主动与被动副模式^[6];(2)施加关节运动约束^[7];(3)改变运动副轴线方向^[8];(4)锁合运动副^[9]。基于此,本文采用了方法(4)的思想,设计了一种可重构支链,从而实现机构自由度或运动特性的改变。然而,并联机构结构上存在支链干涉和运动副转角约束的限制,导致动平台转动能力差和环境适应能力弱等问题。少自由度并联机器人由于驱动少、结构紧凑和结构独特等,吸引了国内外学者的研究^[10],其中,三自由度平面并联机构最为典型。工作空间可以反映出机构的运动性能,是进行机构设计、运动规划的重要依据,也是进行尺度综合的基础。因此,研究并联机器人的工作空间具有十分重要的意义。

目前,数值法与迭代搜索法是求解工作空间常用的两种方法。文献[11]提出了一种具有平转解耦特性的3球副移动副球副+3(球副移动副-虎克铰链)(3 spherical-joint, prismatic-joint, spherical-joint+3(spherical-joint, prismatic-joint-universal-joint), 3SPS+3(SP-U))六自由度并联机构,结合柔性铰链回转空间及支链行程范围,采用边界离散点搜索法,得到了机构的位置和姿态可达工作空间。文献[12]以4-SPS并联机构为研究对象,运用数值法求解并绘制了机构的工作空间。文献[13]提出了一种新型可重构3-RRR球面并联机构,利用一个简单的4杆机构,结合杆长约束条件绘制了机构的工作空间。文献[14]提出一种可绕轴线转动的2-移动副可绕转轴线的转动副球副+移动副转动副可按需要工作或锁定的移动副(2-prismatic-joint r-revolute-joint spherical-joint+prismatic-joint revolute-joint locked prismatic-joint spherical-joint, 2-PrRS+PR(P)S)变胞并联机构,采用Monte Carlo法得到该机构的工作空间点云图。文献[15]基于机构结构降耦原理,提出了一种1-转动副转动副转动副转动副+2-转动副转动副转动副(1-revolute-joint revolute-joint revolute-joint revolute-joint+2-revolute-joint revolute-joint revolute-joint, 1-RRRR+2-RRR)并联机构,建立了运动学正解数学模型,基于边界离散法得到了机构的工作空间。

本文提出了一种新型可重构三自由度平面并联机构。首先,利用运动副的锁合模式,实现3-RPR型与3-RRR型机构之间的切换;然后,以3-RRR构型为例,基于方位特征(Position and orientation characteristic, POC)方程的并联机构拓扑设计方法^[16],对该构型进行了拓扑特性分析。其次,基于运动学逆解模型,绘制了3-RRR机构的位置工作空间。最后,基于杆长配比较法,分析杆长行程变化对机构工作空间的影响。

1 三自由度构型设计

典型3-RPR平面并联机构的结构简图和模型图,分别如图1、2所示。它分别由正三角形形状的动平台0、定平台1以及3条结构相同的有序单开链(Single open chain, SOC)构成,且3个分支运动链通常采用等边三角形对称布置,其中,每条SOC又由1个移动副与固结于两端的转动副串联而成,可表示为 $A \perp P \perp C$ (其中, \perp 表示垂直, A 、 C 为转动副, P 为移动副)。

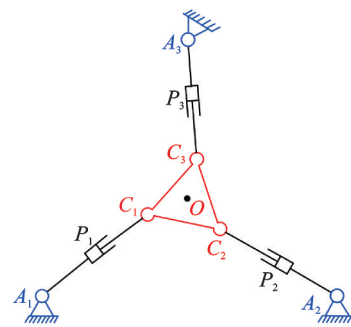


图1 3-RPR平面并联机构结构简图

Fig.1 Schematic diagram of 3-RPR planar parallel mechanism

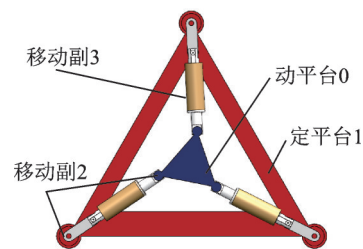


图2 3-RPR平面并联机构结构模型

Fig.2 Structural model of 3-RPR planar parallel mechanism

为了实现机构的重构,本文提出了一种可实现运动副锁合的可重构支链。不失一般性地,所提出的可重构支链驱动方式是依靠电机驱动,为了突出机构学原理,这里省略了驱动部件改为人为切换,简化后的结构模型如图3所示。它主要由连杆1与连杆2两部分组成,其中,连杆2主要由内套筒、外套筒和转换套筒构成^[17]。

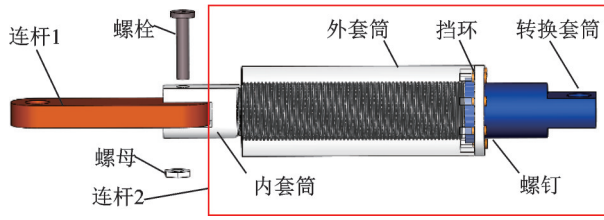


图3 可重构支链结构示意图

Fig.3 Schematic diagram of reconfigurable branch chain structure

将连杆1放置在内套筒的U形插槽中,并通过螺栓和螺母连接,内套筒与外套筒通过螺纹进行传动。外套筒右端设置有凹槽,转换套筒左端设置有凸缘,凸缘放置在外套筒凹槽处。转换套筒与外套筒之间放置深沟球轴承,以保证相互之间独立转动,采用挡环进行轴向定位。

所设计的可重构支链具有2种运动副模式:当连杆1与内套筒通过螺栓与螺母紧配合时,旋转外套筒,带动转换套筒一起移动,此时支链为移动副模式。当连杆1与内套筒松配合时,此时支链为转动副模式。

综上所述,将两种运动副模式分别应用在支链上,可得两类三自由度平面并联机构。即3条支链同时设置为移动副模式,可得到一种3-RPR平面并联机构,结构简图如图1所示;同理,设置为转动副模式,可得到一种3-RRR平面并联机构,结构简图如图4所示。

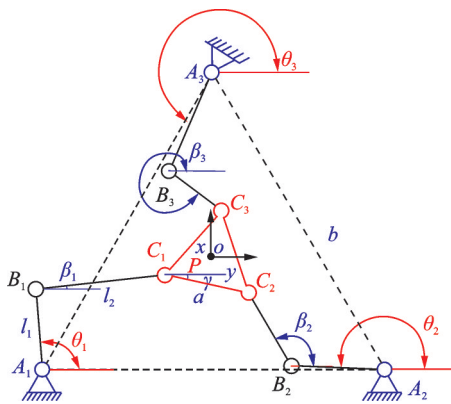


图4 可重构三自由度平面并联机构简图

Fig.4 Schematic diagram of reconfigurable 3-DOF planar parallel mechanism

区别于一般的3-RPR平面并联机构,该机构不局限于一种工作模式。当机构运动出现奇异或工作环境发生改变,可转换为其他构型解决上述问题:如3-RRR构型。

传统3-RRR机构的杆件为固定长度,本文设计的机构的从动杆杆长可在一定的范围内变动,即为一种移动副装置。以构型3-RRR平面并联机构为例,详细分析机构的拓扑结构特征及工作空间。

2 3-RRR构型的拓扑结构分析

方位特征集方法运算较为简单,易操作且物理意义明确,适用于无过约束机构和一般过约束机构的拓扑结构设计。基于机构的拓扑结构设计,可确定机构连续运动的拓扑特征,这些特征也是与运动学性能密切相关的非线性特征,如机构的POC、自由度(Degree-of-freedom, DOF)、耦合度等^[18]。

2.1 机构的POC集

用拓扑学符号来描述机构,可将机构中3条支链用3个单开链支路3-SOC $\{-R|R|R\}$ 表示,即可通过支路中运动副的维数来反映平面机构的POC集。

$${}^S M = \bigcup_{i=1}^m J_i M, {}^P M = \bigcap_{j=1}^{v+1} {}^b M_j \quad (1)$$

式中: ${}^S M$ 为运动副的POC集; $J_i M$ 为第*i*个运动副的POC集; *m*为运动副的个数; ${}^P M$ 为并联机构的POC集; *v*为独立回路数; ${}^b M_j$ 为第*j*条支链末端的POC集。

转动副的POC集为 ${}^R M = [t^1; r^1]$, 据此, 建立回路、机构的POC集。对于支链SOC $\{-A_1|B_1|C_1\}$, 有

$${}^{b_1} M = {}^R M \cup {}^R M \cup {}^R M = [t^2; r^1] \quad (2)$$

同理, SOC $\{-A_2|B_2|C_2\}$ 与SOC $\{-A_3|B_3|C_3\}$ 的POC集分别为

$${}^{b_2} M = [t^2; r^1], {}^{b_3} M = [t^2; r^1] \quad (3)$$

进一步, 确定机构的POC集为

$${}^O M = {}^{b_1} M \cap {}^{b_2} M \cap {}^{b_3} M = [t^2; r^1] \quad (4)$$

2.2 机构的DOF

具有*v*个独立回路的机构可视为由(*v*+1)条支链组成, 因此可确定机构*v*的个数为2。进一步, 可确定该回路机构的自由度。确定SOC $\{-A_1|B_1|C_1\}$ 与SOC $\{-A_2|B_2|C_2\}$ 组成的第1回路LOOP $\{-A_1|B_1|C_1|C_2|B_2|A_2\}$ 的自由度为

$$F_{(1-2)} = \sum_{i=1}^m f_i - \sum_{j=1}^v \xi_{L_j} = 6 - 3 = 3 \quad (5)$$

由LOOP $\{-A_1|B_1|C_1\}$ 与SOC $\{-A_3|B_3|C_3\}$ 构成的第2回路LOOP $\{-A_3|B_3|C_3\}$, 可确定机构的自由度为

$$F_{(1-3)} = \sum_{i=1}^m f_i - \sum_{j=1}^v \xi_{L_j} = 6 + 3 - 3 - 3 = 3 \quad (6)$$

2.3 机构的耦合度

根据有序SOC的机构组成原理^[19], 该机构的两个单开链回路约束度, 可通过回路1、2分别求出。

$$\Delta_1 = \sum_{i=1}^m f_i - I_i - \xi_{L_i} = 6 - 2 - 3 = 1 \quad (7)$$

$$\Delta_2 = \sum_{i=1}^m f_i - I_i - \xi_{L_i} = 3 - 1 - 3 = -1 \quad (8)$$

机构的耦合度为

$$\kappa = \frac{1}{2} \sum_{j=1}^v f_i |\Delta_j| = 1 \quad (9)$$

这样,该机构包含 1 个 SKC,机构的耦合度 $\kappa = 1$ 。

2.4 位置反解模型

2.4.1 机构的坐标系建立及其参数标注

建立机构的坐标系及其参数的标注,如图 4 所示。该机构定平台 1 上 3 个顶点处的转动副几何中心分别记作 A_1 、 A_2 和 A_3 ,动平台 0 上 3 个顶点处的转动副几何中心分别记作 C_1 、 C_2 和 C_3 。 P 为动平台外接圆的圆心,其半径为 a ; O 为定平台的外接圆圆心,其半径为 b , O - xy 为全局坐标系, x 轴平行于 $L_{A_1A_2}$, y 轴垂直于 $L_{A_1A_2}$ 。其姿态角 γ 为 $l_{C_1C_2}$ 与 x 轴正向的转角,驱动杆杆长 $A_i B_i = l_1$ ($i=1, 2, 3$,下同。),从动杆杆长 $B_i C_i = l_2$, θ_i 、 β_i 分别为机构的驱动角与从动角。

2.4.2 运动学逆解

平面机构运动学逆解,就是利用机构的姿态反求各杆件的位置和姿态^[20]。对于 3-RRR 平面并联机构来说,即用表示动平台位姿的 3 个输出参数 x_p 、 y_p 及 γ ,求输入角 θ_i 。已知定平台的边长,由几何关系可确定 A_1 、 A_2 、 A_3 点在定坐标系中的坐标为

$$A_{1\sim 3} = \begin{bmatrix} x_{A_1} & x_{A_2} & x_{A_3} \\ y_{A_1} & y_{A_2} & y_{A_3} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{\sqrt{3}}{2}b & \frac{\sqrt{3}}{2}b & 0 \\ -\frac{1}{2}b & -\frac{1}{2}b & b \end{bmatrix} \quad (10)$$

C_1 、 C_2 、 C_3 在定坐标系中分别表示为

$$C_{1\sim 3} = \begin{bmatrix} x_{C_1} & x_{C_2} & x_{C_3} \\ y_{C_1} & y_{C_2} & y_{C_3} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a \cos\left(\frac{\pi}{6} + \gamma\right) & a \cos\left(\frac{5\pi}{6} + \gamma\right) & a \sin \gamma \\ a \sin\left(\frac{\pi}{6} + \gamma\right) & a \sin\left(\frac{5\pi}{6} + \gamma\right) & -a \cos \gamma \end{bmatrix} \quad (11)$$

由于 3-RRR 并联机构动平台 $\Delta C_1 C_2 C_3$ 在平面 xy 内运动,其系统结构参数具有对称性,因此选取一条支链对其分析,其他两条支链原理上相同。对于第一条支链,根据闭环几何约束条件可得到

$$OA_i + l_{A_i B_i} + l_{B_i C_i} + l_{C_i P} + l_{PO} = 0 \quad (12)$$

将式(12)分别在 x 、 y 轴上投影展开为

$$\begin{cases} x_{A_i} + l_1 \cos \theta_i + l_2 \cos \beta_i + x_{C_i} - x_P = 0 \\ y_{A_i} + l_1 \sin \theta_i + l_2 \sin \beta_i + y_{C_i} - y_P = 0 \end{cases} \quad (13)$$

已知 A_1 、 C_1 及 P 点的坐标,可将式(13)进一步化简为

$$\begin{cases} l_1 \cos \theta_i - M_{x_i} = -l_2 (\cos \beta_i) \\ l_1 \sin \theta_i - M_{y_i} = -l_2 (\sin \beta_i) \end{cases} \quad (14)$$

式中

$$M_{x_i} = x_P - x_{A_i} - a \cos\left(\frac{\pi}{6} + \frac{2(i-1)\pi}{3} + \gamma\right)$$

$$M_{y_i} = y_P - y_{A_i} - a \sin\left(\frac{\pi}{6} + \frac{2(i-1)\pi}{3} + \gamma\right)$$

两个约束方程存在两个未知数 θ_i 、 β_i ,将式(14)等号两边平方,并作相加处理,可消去 β_i 得到方程为

$$U_i \sin \theta_i + V_i \cos \theta_i + W_i = 0 \quad (15)$$

式中: $U_i = 2l_1 M_{y_i}$, $V_i = 2l_1 M_{x_i}$, $W_i = M_{x_i}^2 + M_{y_i}^2 + l_1^2 - l_2^2$ 。

式(15)中存在着三角函数,若直接求解方程,输出结果过于冗长。因此这里使用了三角代换,令 $\tan\left(\frac{\theta_i}{2}\right) = u$, 则 $\sin \theta_i = \frac{2u}{1+u^2}$, $\cos \theta_i = \frac{1-u^2}{1+u^2}$ 。

代入式(15)中,化简为

$$F_i u^2 + E_i u + H_i = 0 \quad (16)$$

式中: $F_i = \frac{l_1^2 - l_2^2 + M_{x_i}^2 + M_{y_i}^2}{2l_1} + M_{x_i}$, $E_i =$

$$-2M_{y_i}, H_i = \frac{l_1^2 - l_2^2 + M_{x_i}^2 + M_{y_i}^2}{2l_1} - M_{x_i}$$

进一步,求解式(16)可得

$$\theta_i = 2 \arctan\left(\frac{-E_i \pm \sqrt{E_i^2 - 4F_i H_i}}{2F_i}\right) \quad (17)$$

至此,已构建了 3-RRR 平面并联机器人的位置反解模型。

3 3-RRR 构型的工作空间分析

并联机构的工作空间是指动平台所能运动到空间上所有轨迹点的集合^[21]。传统分析机构工作空间的方法,基于机构的运动学逆解,采用二维搜索法得到机构的位置工作空间图,其方法简单、便捷。基于此,结合杆长行程变化对工作空间的影响,研究工作空间的几何特性。

3.1 支链的工作空间

假设第 i 条分支运动链在动平台中心处断开,此时的运动链可以看作串联机器人,支链末端点在工作空间上的点集,称为支链工作空间。选取第 1 支链作为支链工作空间的分析,如图 5 所示。其中,杆长 $l_{B_1 C_1}$ 可在一定的范围内运动。

以 A_1 为中心作支链扫过的区域,记为第 1 类支链工作空间,如图 6(a),其外半径为

$$r_1 = l_1 + l_2 \quad (18)$$

内孔半径为

$$r_2 = \begin{cases} 0 & l_1 \leq l_2 \\ l_1 - l_2 & l_1 > l_2 \end{cases} \quad (19)$$

显然,当杆长 $l_1 \leq l_2$ 时,机构工作空间不形成空

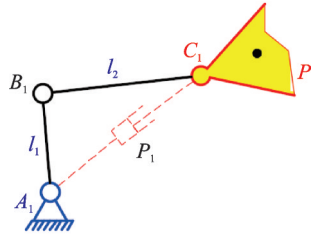


图5 第1分支链

Fig.5 The first branching chain

洞,而当 A_1 副的转角受到约束时,子工作空间形成1个扇形区域,记为第2类支链工作空间,如图6(b)。

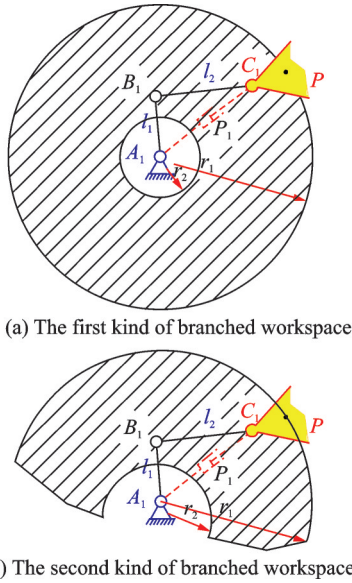


图6 支链工作空间
Fig.6 Branched chain workspace

3.2 位置工作空间

机构动平台有3个输入参数 x_p, y_p 及姿态角 γ 。当 γ 为定值时,只考虑支链1的约束,参考点 P 的运动范围可由支链1的工作空间沿 l_{C_1P} 移动得到;当考虑3条支链的约束时,满足3条支链工作空间分别沿着 $C_jP(j=7,8,9)$ 平移,可得到3条支链工作空间的交集部分,即为机构的位置工作空间,设置动平台边长 $a=160\text{ mm}$,定平台边长 $b=300\text{ mm}$,如图7中绿色区域。

3.3 杆长行程分析

支链的杆长行程变化,对应的位置工作空间形式存在一定的差异。在此基于运动学逆解模型,选取 $\gamma=0\text{ rad}$,分析杆长对机构位置工作空间的影响。

(1)主动杆 l_1 与从动杆 l_2 不相等。设置 $l_1=120\text{ mm}, l_2=160\text{ mm}$,得到的位置工作空间如图8所示。

(2)主动杆 l_1 与从动杆 l_2 相等。首先,设置 $l_1=l_2=160\text{ mm}$,得到的位置工作空间如图9(a)所示;

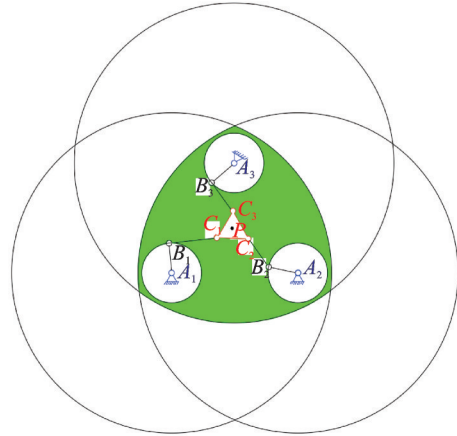


图7 3-RRR机构位置工作空间

Fig.7 3-RRR mechanical position workspace

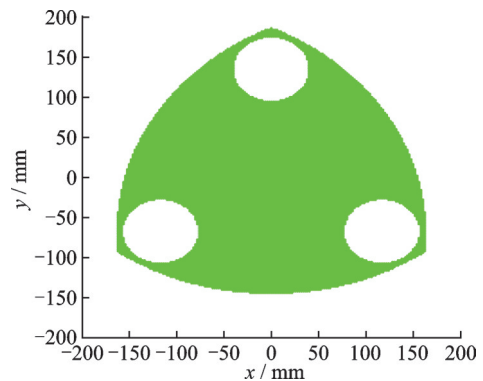


图8 第1类位置工作空间

Fig.8 The first kind of position workspace

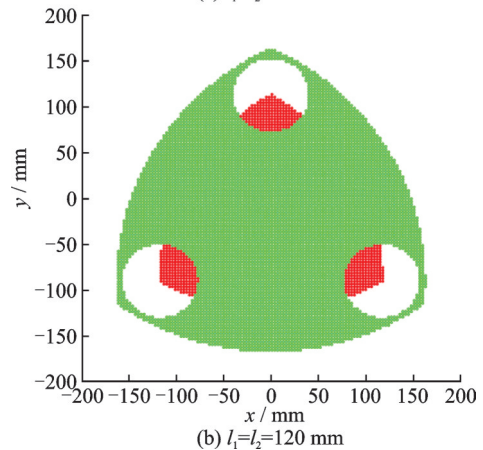
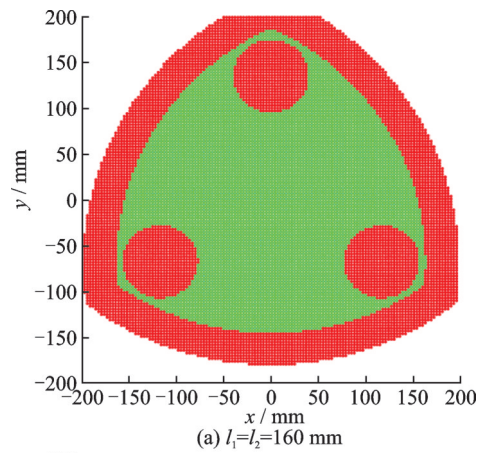


图9 第2类位置工作空间

Fig.9 The second kind of position workspace

接着,设置 $l_1=l_2=120\text{ mm}$,得到的位置工作空间如图 9(b)所示。

由图 9(a)显示, $l_1、l_2$ 的杆长分别为 160 mm 时,机构的工作空间大于第 1 类机构位置工作空间。由图 9(b)显示, $l_1、l_2$ 的杆长分别为 120 mm 时,机构的位置工作空间最小。

(3)设置主动杆 $l_1=120\text{ mm}$, $120\text{ mm}\leq l_2\leq 240\text{ mm}$ 。鉴于从动杆杆长行程较大,在不影响杆长变动范围内,分别选取杆长的最小值、中间值及最大值作为研究对象,画出对应的位置工作空间,分别如图 10(a~c)所示。

从图 10 可以看出,在 $120\text{ mm}\leq l_2\leq 180\text{ mm}$ 时,机构的位置工作空间随着从动杆杆长的增大而

增大;在 $180\text{ mm}\leq l_2\leq 240\text{ mm}$ 时,机构的位置工作空间随着从动杆杆长的增大而减小。结果表明,当从动杆杆长选取为主动杆杆长的 1.5 倍时,此时 3-RRR 并联机构的位置工作空间最大。

4 结 论

本文通过设计一种可重构支链,提出了一种新型可重构三自由度平面并联机构,并计算分析了其工作空间。主要研究结论如下:

(1)实现了 3-RPR 型与 3-RRR 型平面并联机构之间的切换,为解决传统三自由度平面并联机构杆长尺寸固定、构型单一等问题,提供了一种新的方案。

(2)以 3-RRR 型平面并联机构为例,分析了机构重要的拓扑指标值;建立机构的运动学逆解,并研究了杆长行程变化对工作空间的影响。

(3)基于运动学逆解模型,分析杆长行程变化对位置工作空间的影响。结果表明,当从动杆杆长选取为主动杆杆长的 1.5 倍时,并联机构的位置工作空间最大。

参考文献:

[1] 王学武,汤彬,顾幸生. 焊接机器人避障策略研究[J]. 机械工程学报,2019, 55(17): 77-84.
WANG Xuewu, TANG Bin, GU Xingsheng. Study on obstacle avoidance strategy of welding robot [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2019, 55(17): 77-84.

[2] YOU J J, WANG L K, XI F F, et al. Decoupling algorithm and maximum operation frequency of a novel parallel type six-axis accelerometer[J]. IEEE Sensors Journal, 2020, 20(21): 12637-12651.

[3] 杨廷力,沈惠平,刘安心,等. 机构拓扑学理论的基本思想与数学方法——从方法论角度回顾几种原创性理论与方法[J]. 机械工程学报,2020,56(3): 1-15.
YANG Tingli, SHEN Huipng, LIU Anxin, et al. Basic ideas and mathematical methods of mechanism topology theory——Review of several original mechanism topology theories in a methodological perspective [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2020, 56(3): 1-15.

[4] ZHANG L, DAI J S. An overview of the development on reconfiguration of the mechanism[C]//Proceedings of Reconfigurable Mechanisms and Robots. London: IEEE, 2009: 8-12.

[5] YOU J J, XI F F, SHEN H P, et al. A novel stewart-type parallel mechanism with topological reconfiguration: Design, kinematics and stiffness evaluation [J].

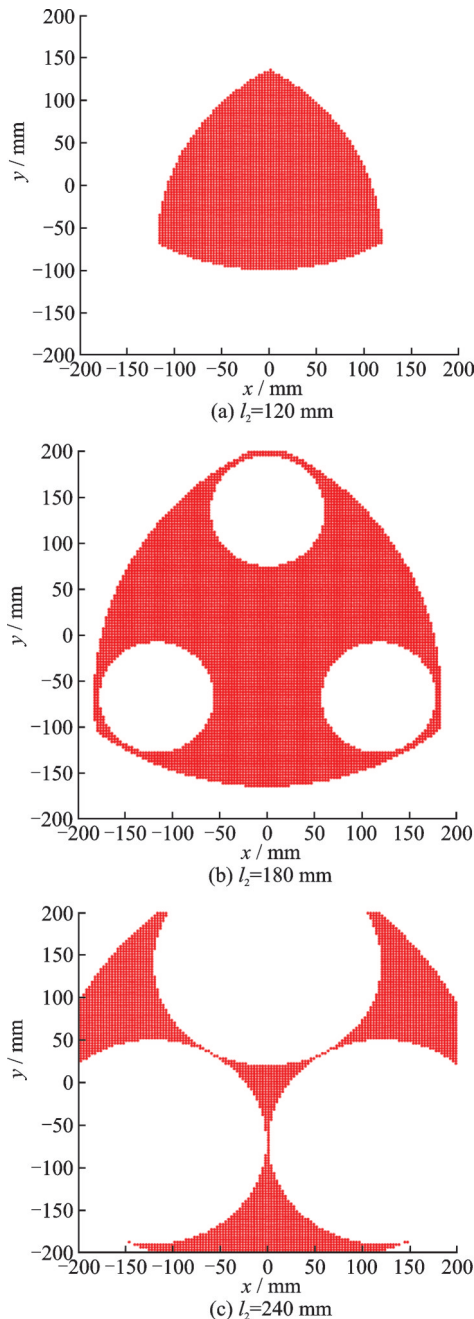


图 10 第 3 类位置工作空间

Fig.10 The third kind of position workspace

- Mechanism and Machine Theory, 2021(162):104329.
- [6] KONG X W, HUANG C T. Type synthesis of single-DOF single-loop mechanisms with two operation modes[C]//Proceedings of ASME/IFTOMM International Conference on Reconfigurable Mechanisms and Robots. Cambridge: Cambridge University Press, 2009: 136-141.
- [7] GAN D M, DAI J S, LIAO Q Z. Mobility change in two types of metamorphic parallel mechanisms[J]. Mech Robot, 2009(4): 1-9.
- [8] GAN D M, DIAS J, SENE CIRATNE L. Unified kinematics and optimal design of a 3rRPS metamorphic parallel mechanism with a reconfigurable revolute joint [J]. Mechanism and Machine Theory, 2016, 25 (96): 239-254.
- [9] CARBONARI L, CALLEGARI M, PALMIERI G, et al. A new class of reconfigurable parallel kinematic machines[J]. Mechanism and Machine Theory, 2014, 13(79): 173-183.
- [10] 吴范徐齐,许蕾,刘生,等. 3-UPS/RPP 并联机构设计与运动特性研究[J]. 机械传动, 2020, 44(5): 59-64.
WU Fanxun, XU Qiang, LIU Sheng, et al. Design and kinematic characteristics of 3-UPS/RPP parallel mechanism[J]. Mechanical Transmission, 2020, 44 (5): 59-64.
- [11] 程颖,杨德华,吴常铖,等. 新型六自由度微动并联机构的工作空间分析[J]. 机械科学与技术, 2019, 38 (3): 433-439.
CHENG Ying, YANG Dehua, WU Changcheng, et al. Workspace analysis of a novel 6-DOF parallel mechanism with micro displacement[J]. Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering, 2019, 38(3): 433-439.
- [12] 季晔,刘宏昭,原大宁. 4-SPS/PPU 型并联机构工作空间与尺度分析[J]. 农业机械学报, 2013, 44 (11): 322-328.
JI Ye, LIU Hongzhao, YUAN Daning. Workspace and scale analysis of 4-SPS/PPU parallel mechanism [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(11): 322-328.
- [13] WU G L, BAI S P. Design and kinematic analysis of a 3-RRR spherical parallel manipulator reconfigured with four-bar linkages[J]. Robotics and Computer Integrated Manufacturing, 2019, 56: 55-65.
- [14] 田海波,马宏伟,马琨,等. 一种三构态变胞并联机构运动学及工作空间分析[J]. 机器人, 2019, 41(3): 414-424.
TIAN Haibo, MA Hongwei, MA Kun, et al. Kinematics and workspace analysis of a metamorphic parallel mechanism[J]. Robot, 2019, 41(3): 414-424.
- [15] 许可,沈惠平,邓嘉鸣,等. 3-RRR 平面并联机构的拓扑结构优化及其运动学性能改善[J]. 机械科学与技术, 2017, 36(12): 1866-1872.
XU Ke, SHEN Huiping, DENG Jiaming, et al. Topological structure optimization and kinematics performance improvement of 3-RRR planar parallel mechanism[J]. Mechanical Science and Technology, 2017, 36(12): 1866-1872.
- [16] 沈惠平,王达,李菊,等. 1T2R 并联机构拓扑降耦设计与运动性能分析[J]. 农业机械学报, 2021(5): 370-377, 426.
SHEN Huiping, WANG Da, LI Ju, et al. Topological decoupling design and kinematic performance analysis of 1T2R parallel mechanism[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021 (5): 370-377, 426.
- [17] 仇鑫,尤晶晶,徐帅,等. Stewart 衍生型并联机器人的拓扑构型及结构模型[J]. 机械科学与技术, 2021, 40(5): 678-689.
QIU Xin, YOU Jingjing, XU Shuai, et al. Topological configuration and structural model of Stewart derived parallel robot[J]. Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering, 2021, 40 (5) : 678-689.
- [18] 邓嘉鸣,余同柱,沈惠平,等. 基于方位特征的六自由度并联机构型综合[J]. 中国机械工程, 2012, 23 (21): 2525-2530, 2640.
DENG Jiaming, YU Tongzhu, SHEN Huiping, et al. Type synthesis for 6-DOF novel parallel mechanisms based on POC set method[J]. China Mechanical Engineering, 2012, 23(21): 2525-2530, 2640.
- [19] ZHU X, SHEN H P, WU C, et al. Computer-aided mobility analysis of parallel mechanisms[J]. Mechanism and Machine Theory, 2020, 45(148): 10-35.
- [20] PAN Y L, HUANG J, LI F, et al. Aerodynamic robust optimization of flying wing aircraft based on interval method[J]. Aircraft Engineering & Aerospace Technology, 2017, 89(3): 491-497.
- [21] MERLET J P. Interval analysis and robotics[J]. Robotics Research, 2010, 66: 147-156.

(编辑:陈璐)