

DOI:10.16356/j.2097-6771.2026.03.005

## 一种可重构平面并联机器人的运动传递性能

尤晶晶, 张毅, 李飒, 张悦

(南京林业大学机械电子工程学院, 南京 210037)

**摘要:** 传统并联机器人的结构是固定的, 故其性能固定, 难以适应不确定或多变的复杂工况。为此, 设计了一种能够重构 19 686 种拓扑结构的平面并联机器人, 并研究了重构前、后的运动传递性能。首先, 设计了一种变胞装置, 可用于实现低副的变胞以及并联机器人的几何、拓扑重构。其次, 以 3-转动副转动副转动副 (Revolute joint, revolute joint, revolute joint, RRR) 和 3-转动副移动副转动副 (Revolute joint, prismatic joint, revolute joint, RPR) 两种拓扑结构为例, 详细阐释了机器人的重构机理。接着, 运用旋量代数理论, 推导出机器人的运动传递性能函数, 据此, 构造了拓扑重构准则并计算了性能指标值。结果显示: 通过重构, 并联机器人的运动传递性能提升了 96.6%。最后, 基于运动传递性能函数, 辨识出机器人的全部奇异位形。研究结论为可重构并联机器人的推广应用奠定了理论基础。

**关键词:** 并联机器人; 重构; 运动传递性; 螺旋理论; 奇异性

**中图分类号:** TH112 **文献标志码:** A **文章编号:** 1005-2615(2026)03-0521-08

## Motion Transmissibility of a Novel Reconfigurable Planar Parallel Robot

YOU Jingjing, ZHANG Yi, LI Sa, ZHANG Yue

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

**Abstract:** The configuration and scale of the traditional parallel mechanism are fixed, so its performance is fixed, and it is generally not suitable for uncertain and changeable complex application scenarios. A planar parallel mechanism that can be reconfigured into 19 686 topological configurations is designed. The motion transmission performance of the pre-reconfiguration and post-reconfiguration is analyzed and applied to a variable cell manipulator. First, a metamorphic device is designed to realize the metamorphic of the planar motion pair and the geometric reconfiguration and topology reconfiguration of the parallel mechanism. Second, taking the two working modes of 3-RRR and 3-RPR as examples, the reconfiguration method of parallel mechanism is explained in detail. Then, the motion transmission performance model of the parallel mechanism is configured by using the reciprocity theory between spinors, and the performance index values are calculated. Research results show that the motion transmission performance of the parallel mechanism is improved by 96.6% through reconfiguration. Finally, based on the index value, it is easy to identify all the singular configurations of the mechanism. The research conclusions lay a theoretical foundation for the promotion and application of reconfigurable parallel robots.

**Key words:** parallel robot; reconfiguration; motion transmissibility; screw theory; singularity

并联机器人分为 6 自由度并联机器人和少自由度并联机器人两大类, 其中, 3 自由度并联机器

**基金项目:** 国家自然科学基金(52575022)。

**收稿日期:** 2026-02-22; **修订日期:** 2026-05-11

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

**引用格式:** 尤晶晶, 张毅, 李飒, 等. 一种可重构平面并联机器人的运动传递性能[J]. 南京航空航天大学学报(自然科学版), 2026, 58(3): 521-528. YOU Jingjing, ZHANG Yi, LI Sa, et al. Motion transmissibility of a novel reconfigurable planar parallel robot[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics (Natural Science Edition), 2026, 58(3): 521-528.

人是后者中最常见的一种<sup>[1]</sup>。目前,国内外学者研究的 3 自由度并联机器人主要集中在“两转一移”型<sup>[2]</sup>,而对“两移一转”型的研究较少。后者在货物搬运、产品分拣和 3D 打印等领域应用前景广阔。可重构机器人具有良好的适应性以及“变结构、变性能”的特点,适用于高风险或未知的复杂动态场景。鉴于此,本文以“两移一转”型平面并联机器人为对象,研究其重构设计机理和运动传递性能。

Wei 等<sup>[3]</sup>设计了一种能够输出多种运动模式的可重构并联机器人,与单性能、单功能的机器人相比,具有更强的自适应性,在航空航天、医疗健康等领域<sup>[4-5]</sup>应用前景广阔。Huang 等<sup>[6]</sup>对一类可重构并联机器人的运动学性能开展了研究,并对其机构进行了尺度综合。Rosyid 等<sup>[7]</sup>设计了一种 3 自由度并联机器人,通过锁定部分运动关节,可重构为其他 4 种拓扑构型。徐帅等<sup>[8]</sup>设计了一种可重构 3-转动副转动副转动副(Revolute joint, revolute joint, revolute joint, RRR)平面并联机器人,并对比分析了重构前、后的工作空间。沙鑫美<sup>[9]</sup>设计了一种改进型可重构 3-RRR 平面并联机器人,并分析了灵敏度特性。邹琦等<sup>[10]</sup>设计了一种基于离合器与齿轮传动系统的可重构 2-移动副(Prismatic joint, P)RRR+RRR 并联机器人,具有运动灵活、控制简单等特点。沈惠平等<sup>[11]</sup>设计了一种动平台可变胞的转动副平行四边形 3 个转动副(Revolute joint, parallelogram, 3-revolute joint, RPa3R)-转动副(Revolute joint, R)+转动副球面副球面副(Revolute joint, spherical joint, spherical joint, RSS)并联机器人,并分析了运动输出特性。

从检索到的文献资料看,目前可重构平面并联机器人的主要不足是重构构型少、几何尺度固定、运动传递性能差等。为此,本文首先设计了 3 种变胞装置,并将其应用于传统 3-RRR 平面并联机器人的运动副中。然后,从变拓扑和变几何两个方面分别阐释了机器人的重构机理。接着,以 3-RRR 型重构成 3-转动副移动副转动副(Revolute joint, prismatic joint, revolute joint, RPR)型为例,构建了可重构平面并联机器人运动传递性能的解析模型,识别了奇异位形,并通过计算机构的局部传递指标值,创建了并联机器人的拓扑重构准则。

## 1 变胞装置及可重构并联机器人

3-RRR 平面并联机器人由静平台  $A_1A_2A_3$ 、动平台  $C_1C_2C_3$  以及 3 条完全相同的支链构成<sup>[12]</sup>,见图 1。每条支链中包含了 3 个转动副、1 根驱动杆  $A_iB_i$  和 1 根从动杆  $B_iC_i$ 。静、动平台均为正三角形,边长分别

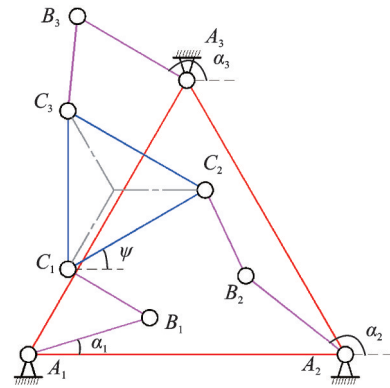
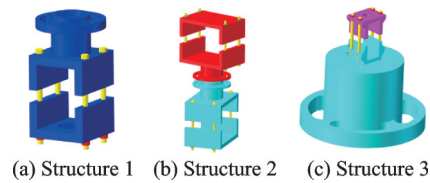


图 1 3-RRR 平面并联机器人  
Fig.1 3-RRR planar parallel robot

为  $R$  和  $r$ 。  $A_iB_i$ 、 $B_iC_i$  的长度分别为  $l_1$  和  $l_2$ 。为便于表述,后文将  $A_i$ 、 $B_i$ 、 $C_i$  分别称为外副、中副和内副。

设计 3 种变胞装置(图 2),可分别通过螺栓螺母连接方式安装在静平台和驱动杆之间、驱动杆和从动杆之间、从动杆和动平台之间。当螺栓螺母为松连接时,对应的两个构件相对可动;为紧连接时,对应的两个构件相对固定。因此,基于变胞装置,不但能够实现转动副、移动副、混合运动副(R+P)之间的转换,而且能够锁合(L)连接该装置的两个构件。



(a) Structure 1 (b) Structure 2 (c) Structure 3  
图 2 3 种变胞装置

Fig.2 Three types of metamorphic devices

将 3 种变胞装置应用于 3-RRR 平面并联机器人的运动副中。进一步地,设计并 3D 打印出可重构并联机器人的物理样机,如图 3 所示。

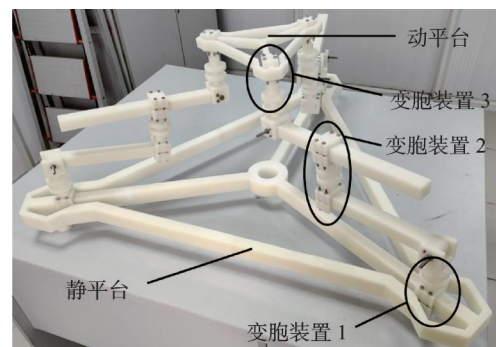


图 3 可重构平面并联机器人  
Fig.3 Reconfigurable planar parallel robot

3 种变胞装置分别对应可变胞运动副 1、2 和 3。以可变胞运动副 1 为例,变胞装置 1 与静平台之间可以实现相对移动或锁合,与驱动杆之间可以实现相对转动或锁合。因此,静平台与驱动杆之间的相对运动就存在 4 种可能情况,包括旋转、平移、锁

合以及旋转与平移的复合运动,见图4(正方形框内的颜色组合代表不同的工作模式)。例如,当变胞装置1与静平台之间以及与驱动杆之间均为锁合状态时,静平台与驱动杆被锁合,即原来的两个构件合并成一个独立构件。

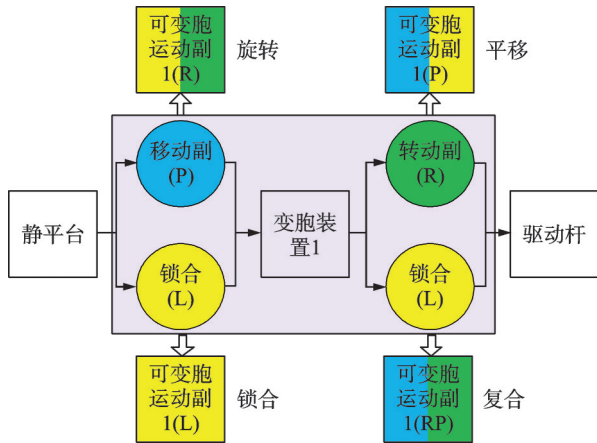


图4 可变胞运动副1

Fig.4 Metamorphic joint 1

## 2 并联机器人的拓扑重构

机器人机构的重构分为拓扑重构与几何重构两类<sup>[13-15]</sup>。其中,拓扑重构是指通过改变机构中运动副的类型、数目、工作模式、布置序列或构件的数目等,从而改变机构的拓扑结构;几何重构是指通过改变机构中构件的尺寸、形状或布置方位等,从而改变机构的几何结构。

当切换低副(即变移动副为转动副,或变转动副为移动副)时,机构的自由度数、构件数、运动副数和动静平台尺寸均不改变;当锁合运动副时,上述参数的改变情况列于表1中。限于篇幅,本文仅阐释3-RRR构型重构为3-RPR构型(图5)的情况。

表1 两类拓扑重构方式

Table 1 Two kinds of topological reconfiguration methods

结构参量	重构前	拓扑重构方式		
		切换低副	锁合运动副	
			锁1个	锁2个
自由度	3	3	2	1
几何尺度	—	不改变	改变	改变
活动构件数	7	7	6	5
运动副数	9	9	8	7

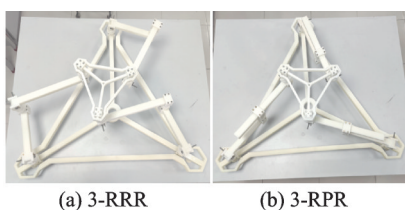


图5 拓扑重构

Fig.5 Topological reconfiguration

### 2.1 切换低副

所研究的平面并联机器人共有3条运动链。借助于变胞装置,每条运动链有27种变换方式(图6),故整个机器人理论上可以生成19 683种3自由度的并联拓扑构型。图中,圆圈内的3个色块分别描述外副、中副和内副的工作状态。

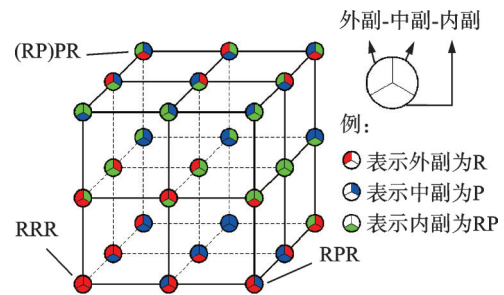


图6 运动链的图形表达

Fig.6 Graphical expression of kinematic chains

### 2.2 锁合运动副

所研究的非冗余平面并联机器人中含有9个运动副。由平面机构的自由度计算公式可知,当锁合3个及以上运动副时,机器人不能正常工作。因此,本文仅聚焦于锁合1个和2个运动副的情况。

具体地说,锁合1个运动副后,机器人重构成2-RRR/RR构型,见图7。此时,构件和运动副的个数均减少了1,故机器人的自由度降为2。这种情况下会有两个构件“合二为一”,因此对应的静平台、运动链和动平台的几何尺寸会随之变化。

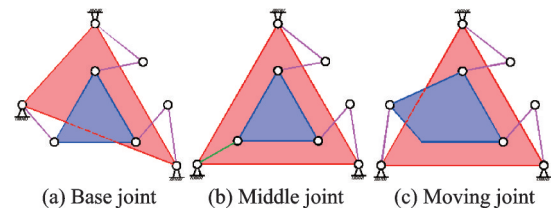


图7 锁合1个运动副

Fig.7 Locking one joint

锁合同一运动链上的2个运动副后,机器人重构为2-RRR/R构型,见图8。此时,机器人的自由度蜕变为1。在几何尺度方面,锁合外副和中副时,静平台和运动链的尺寸发生变化;锁合外副和内副时,静平台、运动链和动平台的尺寸发生变化;锁合中副和内副时,运动链和动平台的尺寸发生变化。

锁合2个外副或2个中副或2个内副时,机器人均重构为2-RR/RRR构型,见图9。此时,机器人的自由度也蜕变为1。锁合2个外副时,静平台和运动链的几何尺寸发生变化;锁合2个中副时,运动链的几何尺寸发生变化;锁合2个内副时,运

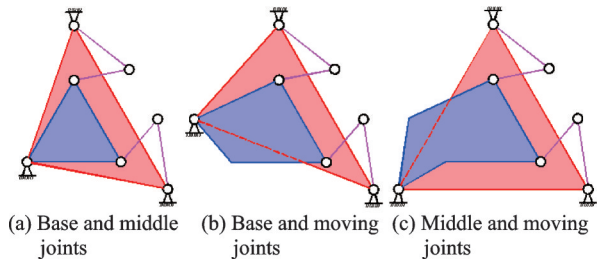


图 8 锁合同一运动链上的 2 个运动副

Fig.8 Locking two joints in one kinematic chain

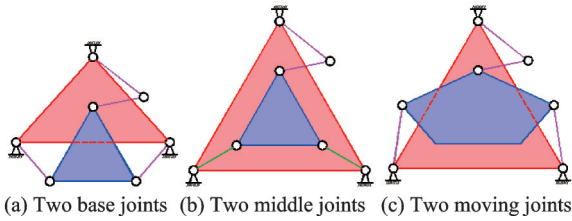


图 9 锁合两条运动链上的同一个运动副

Fig.9 Locking the same type of joint in two kinematic chains

动链和动平台的几何尺寸发生变化。

锁合一条运动链的外副和另一条运动链的中副或内副,或者锁合一条运动链的中副和另一条运动链的内副时,机器人的自由度也蜕变为 1,重构为 2-RR/RRR 构型,见图 10。锁合外副和中副时,静平台和运动链的几何尺寸发生变化;锁合外副和内副时,静平台、运动链和动平台的几何尺寸发生变化;锁合中副和内副时,运动链和动平台的几何尺寸发生变化。

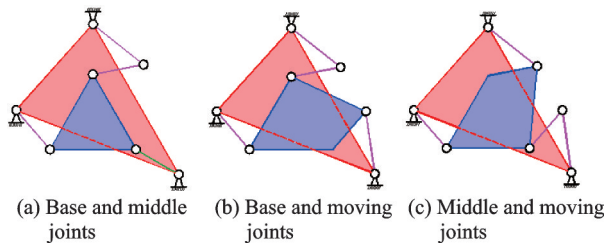


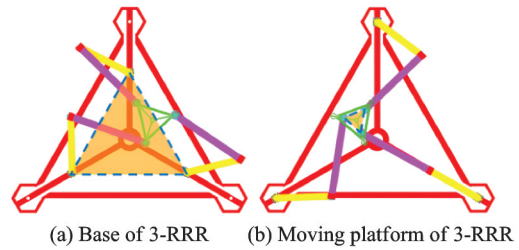
图 10 锁合两条运动链上的 2 个运动副

Fig.10 Locking two joints in two kinematic chains

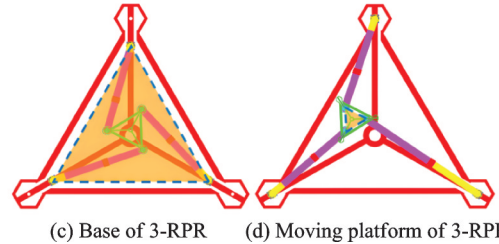
### 3 并联机器人的几何重构

基于图 2 所示的变胞装置,还可以实现平面并联机器人的几何重构,如图 11 所示。以 3-RRR 构型的静平台重构为例,当可变胞运动副 1 工作于平移模式时,驱动外副在静平台的滑轨上自由移动;待位置选定后,将其锁紧,即完成机器人的几何重构操作。

值得一提的是,并联机器人的拓扑重构与几何重构均能改变构件的几何尺度。但是,由于两种重构的机理不同(表 2),则几何尺度改变的原理也不同,故在实际应用时应分开讨论。



(a) Base of 3-RRR (b) Moving platform of 3-RRR



(c) Base of 3-RPR (d) Moving platform of 3-RPR

图 11 几何重构

Fig.11 Geometric reconfiguration

表 2 拓扑重构与几何重构的区别

Table 2 Differences between topological and geometric reconfigurations

结构参数	重构前	锁合 1 个运动副	几何重构
自由度	3	2	3
几何尺度	—	改变	改变
活动构件数	7	6	7
运动副数	9	8	9

### 4 并联机器人的运动传递性能

在运动学层面,用于评价并联机器人性能指标主要包括基于雅可比矩阵代数特征值的性能指标和基于螺旋理论的运动传递性能指标。但是,前者仅能应用于非混合自由度的并联机器人。本文所研究的“两移一转”型平面并联机器人具有移动和转动的混合自由度,故采用后者来表征运动学性能。

#### 4.1 3-RRR 构型的性能指标

##### 4.1.1 输入传递指标

如图 12 所示,建立坐标系  $\{A_1-XY\}$ 。以支链 1 (即运动链  $A_1B_1C_1$ ) 为例,推导支链的传递指标函数。假设锁合(剖面线表示)  $A_2$ 、 $A_3$ ,并将  $A_1$  作为驱动副。

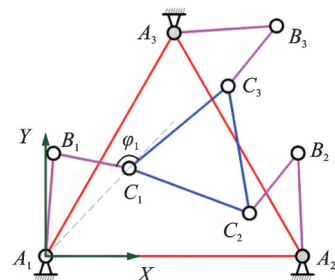


图 12 假设锁合  $A_2$ 、 $A_3$

Fig.12 Hypothetically locking  $A_2$  and  $A_3$

支链 1 上 3 个转动副构成的运动旋量为

$$\begin{cases} \$_{11}=(0,0,1;0,0,0) \\ \$_{21}=(0,0,1;L_{A_1B_1}\times(0,0,1)) \\ \$_{31}=(0,0,1;L_{A_1C_1}\times(0,0,1)) \end{cases} \quad (1)$$

将  $A_i$ 、 $B_i$ 、 $C_i$  的坐标分别记为  $[x_{A_i}, y_{A_i}]$ 、 $[x_{B_i}, y_{B_i}]$ 、 $[x_{C_i}, y_{C_i}]$ 。根据螺旋理论并结合式(1),计算支链 1 的传递力旋量

$$\$_{T_1}=(x_{B_1}-x_{C_1}, y_{B_1}-y_{C_1}, 0; 0, 0, x_{C_1}y_{B_1}-y_{C_1}x_{B_1})= (L_{C_1B_1}; r_{C_1}\times L_{C_1B_1}) \quad (2)$$

输入运动旋量为  $\$_{I_1}=\$_{11}$ ,故

$$\$_{T_1}\circ \$_{I_1}=-|L_{C_1B_1}||L_{A_1C_1}|\sin\varphi_1=-|L_{C_1B_1}||L_{A_1B_1}|\sin\angle A_1B_1C_1 \quad (3)$$

式中: $\varphi_1$ 为  $C_1B_1$ 和  $A_1C_1$ 的夹角,“ $\circ$ ”表示旋量之间的互易积运算。

因此,支链 1 的输入传递指标  $\lambda_1$  为

$$\lambda_1=|\sin\angle A_1B_1C_1| \quad (4)$$

同理,支链 2、3 的输入传递指标  $\lambda_2$ 、 $\lambda_3$  分别为

$$\lambda_2=|\sin\angle A_2B_2C_2| \quad (5)$$

$$\lambda_3=|\sin\angle A_3B_3C_3| \quad (6)$$

这样,机器人整机的输入传递指标  $\gamma_1$  为

$$\gamma_1=\min\{\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3\} \quad (7)$$

#### 4.1.2 输出传递指标

根据  $B_2C_2$  与  $B_3C_3$  平行与否,将输出传递指标函数的推导拆解为以下两个子问题来分别处理。

(1) 当  $B_3C_3$  与  $B_2C_2$  不平行时(图 13),根据速度瞬心法,确定动、静平台的绝对瞬心  $P_1$  为  $B_2C_2$  与  $B_3C_3$  的交点。因此,该瞬时动平台绕  $P_1$  点转动,再结合 Mozzi-Chasles 定理可得

$$\$_{T_1}\circ \$_{O_1}=|L_{C_1B_1}|((h_{T_1}+h_{O_1})\cos\varepsilon-d_1\sin\varepsilon)= |L_{C_1B_1}|d_1 \quad (8)$$

式中: $h_{T_1}$ 、 $h_{O_1}$  分别为  $\$_{T_1}$  与  $\$_{O_1}$  的节距, $\varepsilon$ 、 $d_1$  分别为  $\$_{T_1}$  和  $\$_{O_1}$  轴线之间的夹角与间距。

根据旋量性质并结合式(8),计算支链 1 的输出传递指标  $\eta_{1-1}$

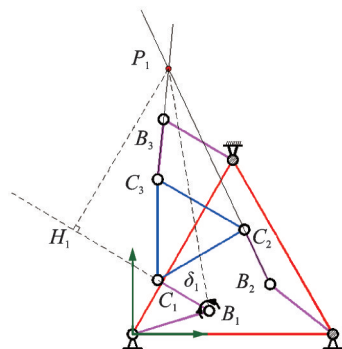


图 13 第 2、3 根从动杆不平行的位形

Fig.13 Non-parallel configuration of the second and third driven links

$$\eta_{1-1}=\frac{|\$_{T_1}\circ \$_{O_1}|}{|\$_{T_1}\circ \$_{O_1}|_{\max}}=\frac{d_1}{d_{1\max}} \quad (9)$$

由旋量间距的定义可知, $d_1$  实际上是  $P_1$  至  $B_1C_1$  的距离,即  $P_1H_1$ 。又因为  $B_1$ 、 $P_1$  分别为传递力旋量原部和输出运动旋量原部上一点,故

$$\eta_{1-1}=\frac{|L_{P_1H_1}|}{|L_{P_1B_1}|}=|\sin\delta_1| \quad (10)$$

式中  $\delta_1$  为  $P_1B_1$  和  $B_1H_1$  的夹角。

同理计算其余两条支链的输出传递指标  $\eta_{2-1}$ 、 $\eta_{3-1}$

$$\eta_{2-1}=|\sin\delta_2| \quad (11)$$

$$\eta_{3-1}=|\sin\delta_3| \quad (12)$$

式中  $\delta_2$ 、 $\delta_3$  的定义方式与  $\delta_1$  相同。

(2) 当  $B_3C_3\parallel B_2C_2$  时(图 14),动平台做瞬时平移运动,故

$$\$_{O_1}=(0,0,0;(0,0,1)\times L_{C_3B_3}) \quad (13)$$

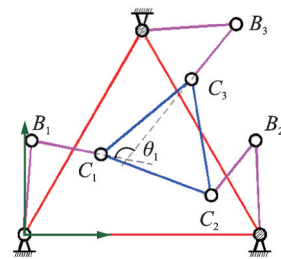


图 14 第 2、3 根从动杆平行的位形

Fig.14 Parallel configuration of the second and third driven links

联立式(2,13),整理可得

$$\$_{T_1}\circ \$_{O_1}=|L_{C_3B_3}||L_{C_1B_1}|\sin\theta_1 \quad (14)$$

式中  $\theta_1$  为  $C_3B_3$  和  $C_1B_1$  的夹角。

因此,支链 1 的输出传递指标  $\eta_{1-2}$  为

$$\eta_{1-2}=|\sin\theta_1| \quad (15)$$

其余支链的输出传递指标  $\eta_{2-2}$ 、 $\eta_{3-2}$  为

$$\eta_{2-2}=\eta_{2-1} \quad (16)$$

$$\eta_{3-2}=\eta_{3-1} \quad (17)$$

这样,机器人整机的输出传递指标  $\gamma_o$  和局部传递指标(Local transmission index, LTI) $\gamma$  分别为

$$\gamma_o=\begin{cases} \min\{\eta_{1-1}, \eta_{2-1}, \eta_{3-1}\} & B_3C_3 \text{ 不平行于 } B_2C_2 \\ \min\{\eta_{1-2}, \eta_{2-2}, \eta_{3-2}\} & B_3C_3 \parallel B_2C_2 \end{cases} \quad (18)$$

$$\gamma=\min\{\gamma_1, \gamma_o\} \quad (19)$$

## 4.2 3-RPR 构型的性能指标

### 4.2.1 输入传递指标

如图 15 所示,建立坐标系  $\{A_1-XY\}$ ,并将  $A_1A_2$  与  $A_1C_1$  的夹角记作  $\omega_{i0}$

运动链  $A_1B_1C_1$  上 3 个运动副构成的运动旋量为

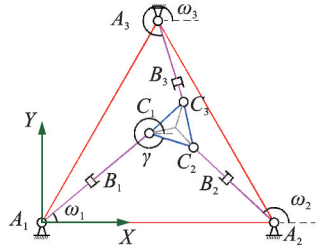


图 15 3-RPR 的机构简图

Fig.15 Schematic diagram of 3-RPR

$$\begin{cases} \$_{11}=(0,0,1;0,0,0) \\ \$_{21}=(0,0,0;\cos\omega_1,\sin\omega_1,0) \\ \$_{31}=(0,0,1;y_{C_1},-x_{C_1},0) \end{cases} \quad (20)$$

根据螺旋理论并结合式(20),推导支链 1 的传递力旋量

$$\$_{T_1}=(\cos\omega_1,\sin\omega_1,0;0,0,0) \quad (21)$$

又因为输入运动旋量为  $\$_{11}=\$_{21}$ ,故支链 1 的输入传递指标  $\lambda_1$  为

$$\lambda_1=\frac{|\$_{T_1}\circ \$_{11}|}{|\$_{T_1}\circ \$_{11}|_{\max}}=1 \quad (22)$$

同理,计算支链 2、3 的输入传递指标  $\lambda_2,\lambda_3$

$$\lambda_2=\lambda_3=1 \quad (23)$$

这样,机器人整机的输入传递指标  $\gamma_1$  为

$$\gamma_1=\min\{\lambda_1,\lambda_2,\lambda_3\}=1 \quad (24)$$

#### 4.2.2 输出传递指标

假想锁合(剖面线表示) $B_2,B_3$ 。接下来分两种情况讨论。

(1)当  $A_3C_3$  不平行于  $A_2C_2$  时,如图 16 所示,容易确定动、静平台的绝对速度瞬心  $Q_1$ (即  $A_3C_3$  与  $A_2C_2$  的交点)。该瞬时,动平台绕着  $Q_1$  点转动。根据旋量代数可得

$$\$_{T_1}\circ \$_{O_1}=-d_1 \quad (25)$$

式中  $d_1$  为  $Q_1$  至  $A_1C_1$  的距离,即  $Q_1K_1$ 。

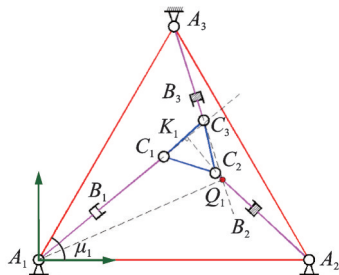


图 16 第 2、3 条支链不平行的位形

Fig.16 Non-parallel configuration of the second and third limbs

又因为  $A_1,Q_1$  分别为传递力旋量原部和输出运动旋量原部上一点,故支链 1 的输出传递指标  $\eta_{1-1}$  为

$$\eta_{1-1}=\frac{|\$_{T_1}\circ \$_{O_1}|}{|\$_{T_1}\circ \$_{O_1}|_{\max}}=\frac{|L_{Q_1K_1}|}{|L_{Q_1A_1}|}=|\sin\mu_1| \quad (26)$$

式中  $\mu_1$  为  $Q_1A_1$  和  $A_1K_1$  的夹角。

同理,其余两条支链的输出传递指标  $\eta_{2-1},\eta_{3-1}$  为

$$\eta_{2-1}=|\sin\mu_2| \quad (27)$$

$$\eta_{3-1}=|\sin\mu_3| \quad (28)$$

式中  $\mu_2,\mu_3$  的定义与  $\mu_1$  相同。

(2)当  $A_3C_3\parallel A_2C_2$  时(图 17),动平台沿垂直于  $A_3C_3$  的方向做瞬时平移运动,故

$$\$_{O_1}=(0,0,0;(0,0,1)\times L_{A_3C_3}) \quad (29)$$

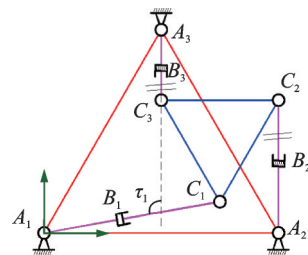


图 17 第 2、3 条支链平行的位形

Fig.17 Parallel configuration of the second and third limbs

联立式(21,29),可得

$$\$_{T_1}\circ \$_{O_1}=(0,0,1)\cdot(L_{A_3C_3}\times(\cos\omega_1,\sin\omega_1,0)) \quad (30)$$

因此,支链 1 的输出传递指标  $\eta_{1-2}$  为

$$\eta_{1-2}=\frac{|\$_{T_1}\circ \$_{O_1}|}{|\$_{T_1}\circ \$_{O_1}|_{\max}}=\frac{|L_{A_3C_3}|\sin\tau_1}{|L_{A_3C_3}|}=|\sin\tau_1| \quad (31)$$

式中  $\tau_1$  为  $A_1C_1$  和  $A_3C_3$  的夹角。

其余两条支链的输出传递指标  $\eta_{2-2},\eta_{3-2}$  为

$$\eta_{2-2}=\eta_{2-1} \quad (32)$$

$$\eta_{3-2}=\eta_{3-1} \quad (33)$$

这样,机器人整机的输出传递指标  $\gamma_0$  和局部传递指标  $\gamma$  分别为

$$\gamma_0=\begin{cases} \min\{\eta_{1-1},\eta_{2-1},\eta_{3-1}\} & A_3C_3 \text{ 不平行于 } A_2C_2 \\ \min\{\eta_{1-2},\eta_{2-2},\eta_{3-2}\} & A_3C_3 \parallel A_2C_2 \end{cases} \quad (34)$$

$$\gamma=\min\{\gamma_1,\gamma_0\} \quad (35)$$

#### 4.3 数值算例

由螺旋理论可知, $\gamma$  的值(介于 0 和 1 之间)越大,表明机器人的运动传递性能越优异,也即从输入部件至输出部件的运动传递效率越高。又因为  $\gamma$  值由机器人的结构及位形共同决定,故在机器人的运动过程中,为了确保最优传递性能,在特定的位形下,应将其重构成具有较大 LTI 的特定结构。本文将该逻辑关系命名为并联机器人的“拓扑重构”

准则”。

不失一般性地,任意选取一组结构参数: $R=400\text{ mm}$ , $r=200\text{ mm}$ , $l_1=150\text{ mm}$ , $l_2=120\text{ mm}$ 。建立可重构并联机器人的虚拟样机(图 18)。添加驱动,使动平台整体做平移运动,且运动轨迹为图 19 所示的圆形(圆心为坐标原点,半径为 50 mm)。

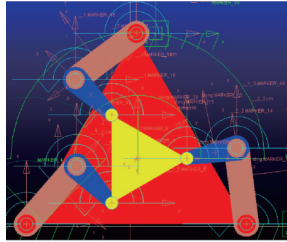


图 18 可重构平面并联机器人的虚拟样机

Fig.18 Virtual prototype of reconfigurable planar parallel robot

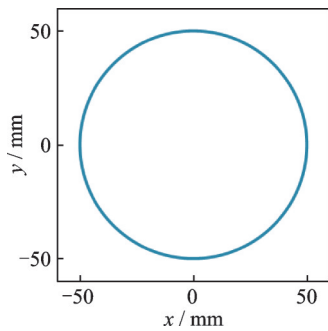
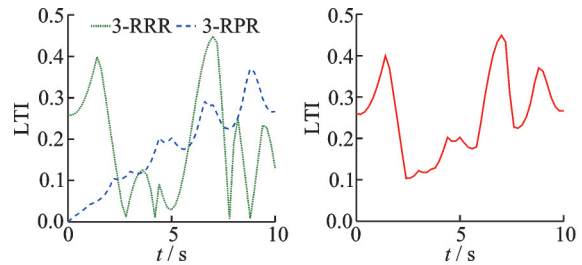


图 19 动平台的运动轨迹

Fig.19 Motion trajectory of moving platform

采用 4.1、4.2 节构建的运动传递性能函数,分别计算两个构型整体的 LTI 并绘制性能曲线,如图 20(a)所示。观察发现,不同构型的性能曲线之间会出现多个“交叉点”。依据拓扑重构准则可知,当机器人运动至“交叉点”位形时,执行重构操作,可以获得更优的运动传递性能。实验结果如图 20(b)所示。经计算,通过拓扑重构,并联机器人的 LTI 值提升了 96.6%,这验证了本文所提出的运动性能提升方法的有效性和可行性。



(a) LTIs of 3-RRR and 3-RPR (b) LTI of reconfigurable 3-RRR


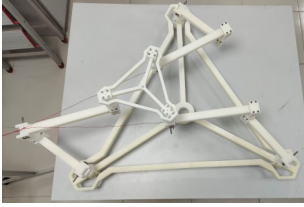
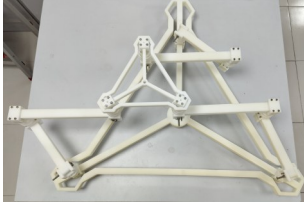

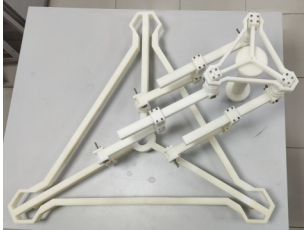
图 20 运动传递性能曲线

Fig.20 Motion transmission performance curves

由机构学理论可知,当机器人的输入、输出传递指标值等于 0 时,分别对应第 1 类、第 2 类奇异位形。运用式(7, 18, 24, 34),分析两种构型的以上两类位形,结果如表 3 所示。该结果与文献[8, 12]的结论完全吻合,这验证了本文所推导的运动传递性能函数的正确性。

表 3 LTI 与奇异位形之间的关联

Table 3 Relationship between LTI and singularity

拓扑构型	第 1 类奇异位形	第 2 类奇异位形	
	$\gamma_1=0$	$\gamma_0=0$	
		Case 1: $\eta_{1-1}=0$	Case 2: $\eta_{1-2}=0$
3-RRR			
3-RPR	无		

## 5 结 论

设计了一种可变胞运动副,能够实现平面并联机器人的拓扑重构和几何重构。通过运动旋量与

力旋量之间的互易积运算,揭示并对比了机器人在重构前、后的运动传递规律。

(1) 所设计的平面并联机器人可在 19 686 种拓扑构型之间自由切换,包括 19 683 种(含同构构

型)3自由度机构,1种2自由度机构(即2-RRR/RR型)和2种单自由度机构(即2-RRR/R型和2-RR/RRR型)。因此,理论上,该机器人可应用于具有不确定性的复杂动态场景下,如深空探测、灾难救援等。

(2) 根据所创建的拓扑重构准则,结构参数  $R$ 、 $r$ 、 $l_1$ 、 $l_2$  分别取 400、200、150 和 120 mm 的 3-RRR 平面并联机器人在执行重构操作后,运动传递性能提升了 96.6%。基于所推导的运动传递性能函数,能够在不计算雅可比矩阵的前提下快速识别出机器人在重构前、后的全部奇异位形。

本研究聚焦于重构设计与运动性能算法的创新以及虚拟环境下的可行性验证。未来的工作包括:(1)设计机器人的动力学控制算法,解决重构过程中可能出现的振动和冲击问题;(2)结合具体应用场景,开展可重构并联机器人的物理样机实验,进一步验证其工程实用价值。

#### 参考文献:

- [1] LI Luquan, FANG Yuefa, YAO Jiaqiang, et al. Type synthesis of a family of novel parallel leg mechanisms driven by a 3-DOF drive system[J]. Mechanism and Machine Theory, 2022, 167: 104572.
- [2] NIKOLAOS S, CHARALAMPOS V, VASSILIS C M. Experimental verification of optimized anatomies on a serial metamorphic manipulator[J]. Sensors, 2022, 22(3): 918.
- [3] WEI Jun, DAI Jiansheng. Lie group based type synthesis using transformation configuration space for reconfigurable parallel mechanisms with bifurcation between spherical motion and planar motion[J]. Journal of Mechanical Design, 2020, 142(6): 063302.
- [4] NURAHMI L, CARO S, WENGER P, et al. Reconfiguration analysis of a 4-RUU parallel manipulator [J]. Mechanism and Machine Theory, 2016, 96: 269-289.
- [5] YOU Jingjing, XI Fengfeng, SHEN Huiping, et al. A novel stewart-type parallel mechanism with topological reconfiguration: Design, kinematics and stiffness evaluation[J]. Mechanism and Machine Theory, 2021, 162: 104329.
- [6] HUANG Guanyu, ZHANG Dan, ZOU Qi, et al. Analysis and design method of a class of reconfigurable parallel mechanisms by using reconfigurable platform[J]. Mechanism and Machine Theory, 2023, 181: 105215.
- [7] ROSYID A, STEFANINI C, EL-KHASAWNEH B. A novel reconfigurable 3-DOF parallel kinematics machine[J]. Journal of Mechanisms and Robotics-Transactions of the ASME, 2024, 16(2): 021005.
- [8] 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.
- [9] 沙鑫美.改进型平面可重构3-RRR并联机构输出灵敏度分析[J].中国工程机械学报,2025,23(3):460-464.  
SHA Xinmei. Output sensitivity analysis of improved planar reconfigurable 3-RRR parallel mechanism[J]. Chinese Journal of Construction Machinery, 2025, 23(3): 460-464.
- [10] 邹琦,曲海波,郭盛.一种三自由度可重构并联机构优化设计及性能分析[J].中国机械工程,2018,29(10):1172-1178.  
ZOU Qi, QU Haibo, GUO Sheng. Optimal design and performance analysis of a 3-DOF reconfigurable parallel mechanism[J]. China Mechanical Engineering, 2018, 29(10): 1172-1178.
- [11] 沈惠平,赵迎春,许可,等.一种可重构、部分运动解耦的空间  $n$  维平移 1 维转动并联机构的拓扑及其运动学设计[J].中国机械工程,2019,30(4):413-422.  
SHEN Huiping, ZHAO Yingchun, XU Ke, et al. Topology and kinematics design of spatially  $n$ T1R-type reconfigurable and partial motion decoupling parallel mechanism[J]. China Mechanical Engineering, 2019, 30(4): 413-422.
- [12] 王澍声,尤晶晶,黄宁宁,等.一种新的可重构三自由度平面并联机构的结构设计及运动学分析[J].南京航空航天大学学报,2023,55(3):437-443.  
WANG Shusheng, YOU Jingjing, HUANG Ningning, et al. Structural design and kinematic analysis of a new reconfigurable 3-DOF planar parallel mechanism [J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2023, 55(3): 437-443.
- [13] KAPILAVAI A, NAWRATIL G. Singularity distance computations for 3-RPR manipulators using extrinsic metrics[J]. Mechanism and Machine Theory, 2024, 195: 105595.
- [14] LAMBERT P, CRUZ L D, BERGELES C. Mobility of overconstrained parallel mechanisms with reconfigurable end-effectors[J]. Mechanism and Machine Theory, 2022, 171: 104722.
- [15] KARIMI A, MASOULEH M T, CARDOU P. Avoiding the singularities of 3-RPR parallel mechanisms via dimensional synthesis and self-reconfigurability[J]. Mechanism and Machine Theory, 2016, 99: 189-206.