

一种新型可重构 5R 机构的运动学分析

刘伟, 曹亚斌, 张洪军, 王西珍
(西安工程大学, 西安 710048)

摘要: **目的** 提出一种新型可重构 5R 机构, 改变 5R 机构机架的尺寸和位置, 提高基于 5R 机构设计的折箱设备和对不同加工作业适应性。**方法** 使用螺旋副提供驱动而改变定平台的位置和等效尺寸, 从而实现机构的重构, 得到一种新型的 5R 并联机构。使用旋量理论对此机构进行速度分析。**结果** 得到了这种新型 5R 机构的输入-输出速度关系表达式, 使用矢量法和旋量工具, 进行了对比验证, 两者结果一致。**结论** 旋量理论在进行速度分析时, 物理意义明确, 求解模式统一, 使用方便。通过对此新型并联机构进行运动学分析, 可为该机构的优化设计、尺度综合、动力学分析提供理论基础。

关键词: 可重构; 5R; 旋量

中图分类号: TB486; TH113.2⁺2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2018)07-0157-05

DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2018.07.029

Kinematics Analysis of a New Reconfigurable 5R Mechanism

LIU Wei, CAO Ya-bin, ZHANG Hong-jun, WANG Xi-zhen
(Xi'an Polytechnic University, Xi'an 710048, China)

ABSTRACT: The work aims to propose a new reconfigurable 5R mechanism to change the size and location of 5R mechanism rack, and improve the adaptability of folding equipment designed based on 5R mechanism and different processing operations. The position and equivalent size of the fixed platform were changed by the screw pair, and then the reconstruction of the mechanism was realized and a new 5R parallel mechanism was obtained. The speed analysis of this mechanism was carried out with the screw theory. The expression of the velocity relation of this new 5R mechanism was obtained. The vector method and the screw theory were used to verify the results, and the results were consistent. For the velocity analysis, with explicit physical significance and uniform solution mode, the screw theory is easy to use. The kinematics analysis of the new parallel mechanism provides a theoretical basis for the optimization design, scale synthesis and dynamic analysis of the mechanism.

KEY WORDS: reconfigurable; 5R; screw

快递行业近年来发展速度迅猛, 目前市场上包装机械多为定制的流水线作业, 不适合小型电商使用^[1-2]。戴建生等提出并设计了可重构多指式糖果纸盒折叠机器人^[3-5], 将闭环五杆手指机构用于纸盒折叠。5R 平面并联机构是最简单的并联机构之一^[6]。可重构并联机构可分为 3 类: 变自由度^[7]、变胞机构^[8]、通过杆长连续变化实现重构的并联机构。变自由度是由 K.wohlhart 1996 年在定义当机构的全局自由度在通过瞬时奇异位形时运动从一个分支变换到另一分支时创造的。变胞机构是 1996 年由戴建生提

出的, 变胞机构的提出推动了现代机构学的发展。变胞机构的特征和本质是机构具有: 组成可变、邻接关系可变、运动副可变。另外的一类可重构机构的特征是: 通过连续改变机构的尺寸而使得该机构产生新的位姿^[5]。Mori^[9]通过对 2R 运动链的耦合, 设计了 4R/5R 可重构机构, 实现 4R 机构和 5R 机构之间的转换。Dan Zhang 等^[10]设计了一种 3PRS 可重构并联机构, P 副固定在 3RRR 过约束并联机构分支上的连杆, 3RRR 过约束并联机构只有一个自由度, 因此可以使用螺旋副连接 3RRR 过约束并联机构的定平台和动

收稿日期: 2017-08-31

作者简介: 刘伟 (1985—), 男, 硕士, 西安工程大学讲师, 主要研究方向为并联包装机械设计。

平台,实现 3RRR 与 3RPS 中 P 副相连接的连杆的姿态改变,等价于改变 3PRS 定平台的尺寸和位置,从而实现机构重构。Balmaceda-Santamaria 等^[11]使用螺旋副带动连接有 3 个连杆的平台运动,从而使 Delta 并联机构的动平台的尺寸和位置发生变化。Sánchezalonso R 等^[12]对上述新型 Delta 并联机构进行了分析,分析了改变分支中不同连杆尺寸对并联机构性能的影响。M.John, D.Hayes 设计了一种平面 3RPR 并联机构,证明了这种机构运动学的可行性,可以实现对工作空间形状的改变^[13]。该机构相对传统刚性定平台尺寸固定而言,这种机构的定平台的尺寸可以通过 3 个液压杆伸缩来调整。Llian A.Bonev^[14]指出现有的进行物料作业的“RP-5AH”机器人经过以无奇异工作空间面积为优化指标,对机构参数优化后,无奇异工作空间得到了极大的优化,在 5R 机构不经过第 1 类奇异位形时,第 2 类奇异轨迹在理论工作空间中只由 2 条线段组成,并且这 2 条奇异轨迹线段都处于理论工作空间的边界位置,由此得到了比较理想的工作空间。Llian A.Bonev^[15]同时也指出,上述优化后的 5R 机构工作空间内部存在第 1 类奇异轨迹边界,由于实际工作空间要求是矩形等规则形状的情况较多,因此又提出一种内部不存在第 1 类奇异轨迹的 5R 机构参数,通过轨迹规划使得机器操作手通过第 2 类奇异轨迹,从而对 5R 并联机构工作空间进行了扩大。刘辛军^[16]对 5R 并联机构使用图谱法进行了大量优化设计,由于并联机构优化的目标参数较多,得到所有指标都比较满意的参数还是有困难的。

综上所述,5R 并联机构从工作空间等优化指标做了许多研究,但通过杆长参数的动态连续变化实现机构重构的研究并不多见。文中提出的该新型并联机构可以通过螺杆的旋转改变传统平面 5R 机构中固定杆件的位置和尺寸来实现机构的可重构。基于此机构模型可设计具有重构特性的折箱设备,在提升折箱机构对不同规格纸箱成型的适应性,提升纸箱成型的效率,减少纸箱成型成本方面,具有一定的应用价值和前景。

1 可重构 5R 机构模型

新型的可重构 5R 并联机构的模型见图 1。图 1 中模块 I 的机械结构等效于传统 5R 机构的定平台,即机架。模块 I 中的螺旋副由电机驱动,实现图中杆 D_1D_2 沿 y 轴的移动,杆 D_1D_2 与杆 D_iE_i ($i=1,2$) 通过转动副连接,杆 D_iE_i 与杆 F_iA_i 通过转动副连接。当杆 D_1D_2 沿 y 轴的移动时,杆 F_iA_i 绕 F_i 处转轴转动,从而改变驱动副 A_i 的位置,等效于改变传动 5R 机构的定平台尺寸。模块 II 中的机械结构是传统 5R 机构的运动连杆, A_1, A_2 是转动驱动副。

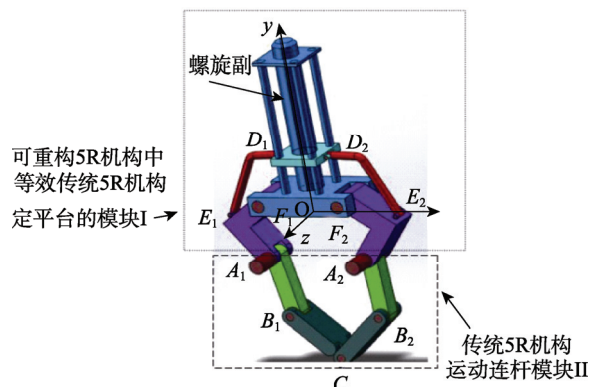


图1 可重构 5R 并联机构模型

Fig.1 Reconfigurable 5R parallel mechanism model

2 自由度分析

该可重构 5R 机构的平面机构结构简图见图 2。图 1 所示机构的结构拓扑图见图 3。图 2 中,机构的连杆数目为 10,运动副数目为 12,其中螺旋副 1 个,转动副 11 个。

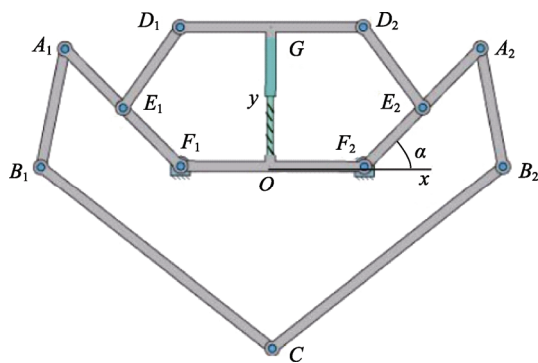


图2 可重构 5R 并联机构

Fig.2 Reconfigurable 5R parallel mechanism

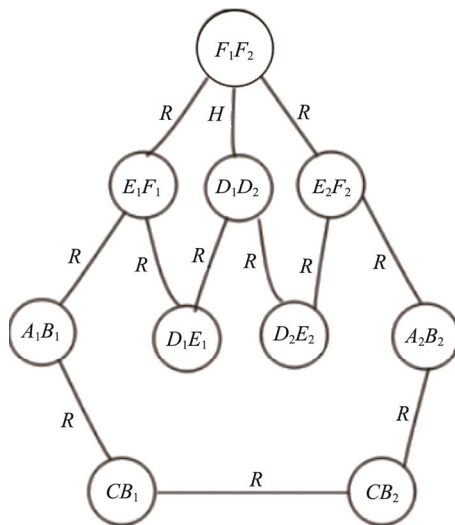


图3 可重构 5R 并联机构拓扑结构

Fig.3 The topology of the reconfigurable 5R parallel mechanism

根据平面机构自由度计算公式:

$$M = 3n - 2P_l - P_h = 3 \quad (1)$$

式中: M 为机构的自由度; n 为机构中包括机架的构件数目; P_l 为低副的数目; P_h 为高副的数目。由于螺旋副是转动和移动耦合的移动副, 转动副和移动副都是低副, 因而螺旋副可以看做是一个低副。

根据式 (1) 计算结果可知该机构的自由度为 3, 该机构的驱动副数目为 3 时才能使机构具有确定的运动。该机构的驱动副为图 3 中连接 F_1F_2 和 D_1D_2 的螺旋副 H、连接 E_1F_1 和 A_1B_1 的 R 副、连接 E_2F_2 和 A_2B_2 的 R 副。

3 可重构 5R 机构运动学分析

3.1 运动学正解和逆解

对该机构的运动学进行分析, 运动学方程见式 (2)。

$$(R_f + R_r \cos \alpha - d_3)^2 + (d_1 + p\varphi - R_r \sin \alpha)^2 = d_2^2 \quad (2)$$

式中: R_f 为基座原点 O 到基座上转动副 F 的距离 $\|OF\|$; R_r 为基座上转动副 E 与驱动副 A 之间的距离 $\|FE\|$; α 为 x 轴转向连接基座上转动副 F 与驱动副 A 的连杆的夹角; d_3 为转动副轴线 D 与螺旋移动平台螺旋副轴线沿 x 轴的距离 $\|GD\|$; d_1 为基座上连杆 FA 与基座平行时, 即 $\alpha=0$ 时, 螺旋移动平台与基座在 y 轴上的距离; 操作平台 D_1GD_2 和定平台 F_1OF_2 使用螺旋副连接, p 为该螺旋副的节距; φ 为螺旋副以 y 轴为转轴的转角; d_2 为连接螺旋移动平台和连杆 EF 的等效长度 $\|DE\|$ 。求解式 (2) [17] 得:

$$k_1 \sin \alpha + k_2 \cos \alpha = k_3 \quad (3)$$

$$k_1 = -2R_r(d_1 + p\varphi), k_2 = 2R_r(R_f - d_3) \quad (4)$$

$$k_3 = d_2^2 - R_f^2 - R_r^2 - d_3^2 + 2R_r d_3 - d_1^2 - p^2 \varphi^2 - 2d_1 p \varphi \quad (5)$$

求解式 (5) 得到 α 的值:

$$\sin \alpha = \frac{2k_1 k_3 \pm \sqrt{4k_1^2 k_3^2 - 4(k_1^2 + k_2^2)(k_3^2 - k_2^2)}}{2(k_1^2 + k_2^2)} \quad (6)$$

驱动副 A_1, A_2 在固定坐标系 xoy 中的坐标为:

$$A_1 = [-\|FA\| \cos \alpha - R_f, \|FA\| \sin \alpha] \quad (7)$$

$$A_2 = [\|FA\| \cos \alpha + R_f, \|FA\| \sin \alpha]$$

驱动副 A_1, A_2 之间的距离为:

$$\|A_1 A_2\| = 2(\|FA\| \cos \alpha + R_f) \quad (8)$$

式中: $R_f, \|FA\|$ 为机构尺寸参数, 是定值。因而 A_1, A_2 之间的距离只与角 α 有关。式 (5) 中: $R_r, R_f, d_1, d_2, d_3, p$ 为机构尺寸参数, 是定值。可知角 α 只与螺旋副的转角 φ 有关。角螺旋副的转角 φ 连续变化, 即可使得 A_1, A_2 之间的距离连续变化, 即等效定平台

$A_1 A_2$ 的尺寸是连续变化的。

转动副 B_1, B_2 在固定坐标系中的坐标为:

$$\begin{aligned} B_1 &= [A_{1x} + L_1 \cos {}^1q_{12}, A_{1y} + L_1 \sin {}^1q_{12}] \\ B_2 &= [A_{2x} + L_1 \cos {}^2q_{12}, A_{2y} + L_1 \sin {}^2q_{12}] \end{aligned} \quad (9)$$

式中: ${}^1q_{12}, {}^2q_{12}$ 分别为驱动副 A_1, A_2 相对于 x 轴正向的转角; L_1 为杆 $A_i B_i$ 的杆长 ($A_1 B_1 = A_2 B_2$)。

工作平台 C 点在 xoy 坐标系中坐标为 (x_c, y_c) , $B_i C_i$ 的杆长用 L_2 表示 ($B_1 C_1 = B_2 C_2$), 则可由机构几何关系列出约束方程为:

$$\|B_i C_i\|^2 = (B_{ix} - x_c)^2 + (B_{iy} - y_c)^2 \quad (10)$$

由式 (10) 可得到 C 点坐标 (x_c, y_c) 的运动学正解和逆解。式 (10) 与一般的 5R 机构的运动学正解和逆解的求解过程相同, 因而不再进行详细计算推导。

3.2 使用旋量理论速度分析

螺旋副速度、驱动副速度已知, 可由对位置分析结果求得得到转角 α 的速度。使用 ${}^0V_c^3$ 表示 C 点在坐标系 xoy 中的速度向量, “0”表示坐标系编号“0”, 即定坐标系 xoy 。

$${}^0V_c^3 = \begin{bmatrix} {}^0\omega^3 \\ {}^0v^3 \end{bmatrix}_{6 \times 1} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & \omega_z & v_x & v_y & 0 \end{bmatrix}^T \quad (11)$$

使用旋量建立速度约束方程:

$$\begin{aligned} {}^1\dot{q}_{01} {}^0S_1^1 + {}^1\dot{q}_{12} {}^1S_1^2 + {}^1\dot{q}_{23} {}^2S_1^3 &= {}^0V_c^3 \\ {}^2\dot{q}_{01} {}^0S_2^1 + {}^2\dot{q}_{12} {}^2S_2^2 + {}^2\dot{q}_{23} {}^2S_2^3 &= {}^0V_c^3 \end{aligned} \quad (12)$$

式中: ${}^1\dot{q}_{01}$ 为支链 1, 即 $F_1 A_1 B_1 C$ 中, 杆 $A_1 F_1$ 局部坐标系“1”相对于杆 $F_1 F_2$ 的 xoy 定坐标系“0”的转动速度; ${}^0S_1^1$ 为杆 $F_1 A_1$ 上 C 点相对于 xoy 坐标系“0”的速度旋量; ${}^1S_1^2$ 为杆 $A_1 B_1$ 坐标系“2”上 C 点相对于杆 $F_1 A_1$ 坐标系“1”的速度旋量。

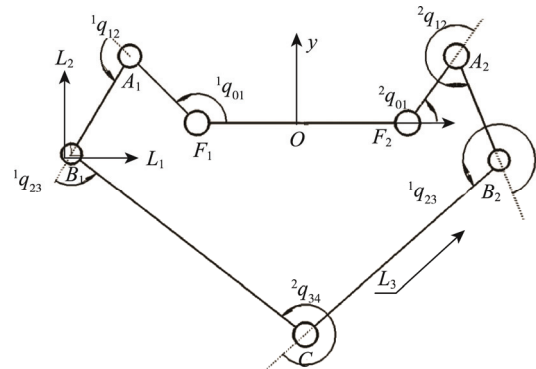


图4 可重构 5R 并联机构等效简图

Fig.4 Equivalent diagram of reconfigurable 5R parallel mechanism

空间中 ${}^0S_1^1$ 是 6×1 的列向量, 称为转动副 F_1 对应的旋量。

$${}^0S_1^1 = \begin{bmatrix} {}^0\omega_1 \\ r_{CF_1} \times {}^0\omega_1 \end{bmatrix}_{6 \times 1} \quad (13)$$

式中: ${}^0\omega_1$ 表示转动副的轴向; r_{CF_1} 为矢量 CF_1 。对速度约束方程进行研究, 为了建立驱动运动副速度变量与输出速度变量之间的关系, 需要消去被动运动副速度变量, 因此对速度约束方程等式两边进行互易积运算, 分别消去旋量 ${}^2S_1^3, {}^2S_2^3$ 。

互易积的计算方法为:

$$S_1 = [\omega_{x1} \ \omega_{y1} \ \omega_{z1} \ v_{x1} \ v_{y1} \ v_{z1}]^T \quad (14)$$

$$S_2 = [\omega_{x2} \ \omega_{y2} \ \omega_{z2} \ v_{x2} \ v_{y2} \ v_{z2}]^T$$

$$\{S_1; S_2\} = \omega_1 v_2 + \omega_2 v_1 =$$

$$\omega_{x1} \cdot v_{x2} + \omega_{y1} \cdot v_{y2} + \omega_{z1} \cdot v_{z2} + \omega_{x2} \cdot v_{x1} + \omega_{y2} \cdot v_{y1} + \omega_{z2} \cdot v_{z1} \quad (15)$$

式中: $\{ ; \}$ 为 2 个旋量的互易积, 其中:

$$\{S_1; S_2\} = S_1 \cdot \Delta S_2 \quad (16)$$

式中: “ $\cdot$ ” 表示矢量点积。

$$\Delta = \begin{bmatrix} \theta_{3 \times 3} & E_{3 \times 3} \\ E_{3 \times 3} & \theta_{3 \times 3} \end{bmatrix}_{6 \times 6} \quad (17)$$

与分支 1, 2 中被动运动副旋量互易的线矢量旋量坐标为:

$$\{L_1; {}^2S_1^3\} = 0; \{L_2; {}^2S_2^3\} = 0 \quad (18)$$

$$L_1 = [s_{L_1} \ 0]^T$$

$$s_{L_1} = \begin{bmatrix} \cos({}^1q_{01} + {}^1q_{12} + {}^1q_{23}) & \sin({}^1q_{01} + {}^1q_{12} + {}^1q_{23}) & 0 \end{bmatrix} \quad (19)$$

$$L_2 = [s_{L_2} \ 0]^T, r_{CB_2} = CB_2$$

$$s_{L_2} = \begin{bmatrix} \cos({}^2q_{01} + {}^2q_{12} + {}^2q_{23}) & \sin({}^2q_{01} + {}^2q_{12} + {}^2q_{23}) & 0 \end{bmatrix} \quad (20)$$

速度约束方程分别与线矢 L_1, L_2 取互易积, 得到方程:

$$B\dot{q} = A^0V_c^3 \quad (21)$$

$$B = \begin{bmatrix} L_1\Delta^0S_1^1 & L_1\Delta^1S_1^2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & L_2\Delta^0S_2^1 & L_2\Delta^1S_2^2 \end{bmatrix} \quad (22)$$

$$L_1\Delta^0S_1^1 = s_{L_1} \cdot r_{CF_1} \times z = CB_1 \times CF_1 \cdot z$$

$$L_1\Delta^1S_1^2 = s_{L_1} \cdot r_{CA_1} \times z = CB_1 \times CA_1 \cdot z \quad (23)$$

$$L_2\Delta^0S_2^1 = s_{L_2} \cdot r_{CF_2} \times z = CB_2 \times CF_2 \cdot z$$

$$L_2\Delta^1S_2^2 = s_{L_2} \cdot r_{CA_2} \times z = CB_2 \times CA_2 \cdot z$$

即:

$$B = \begin{bmatrix} CB_1 \times CF_1 \cdot z & CB_1 \times CA_1 \cdot z & 0 & 0 \\ 0 & 0 & CB_2 \times CF_2 \cdot z & CB_2 \times CA_2 \cdot z \end{bmatrix} \quad (24)$$

$$A = [\Delta L_1, \Delta L_2]_{2 \times 6} \frac{1}{2} \quad (25)$$

$$\dot{q} = [{}^1\dot{q}_{01} \ {}^1\dot{q}_{12} \ {}^2\dot{q}_{01} \ {}^2\dot{q}_{12}]^T \quad (26)$$

不考虑 $\Delta L_i, i=1,2$ 中的零元素, 容易发现 s_{L_i} 中的 2 个非零元素对应单位向量 CB_i , 即: $A = \begin{bmatrix} CB_1 \\ CB_2 \end{bmatrix}$ 。

当螺旋副转速已知, 则可根据式 (5) 求得 ${}^1\dot{q}_{01}, {}^2\dot{q}_{01}$, 易知 ${}^1\dot{q}_{01} = -{}^2\dot{q}_{01}$, 再给定另外 A_1, A_2 处 2 个驱动副速度 ${}^1\dot{q}_{12}, {}^2\dot{q}_{12}$, 可得到 C 点的速度 ${}^0V_c^3$ 。

3.3 对旋量理论速度分析的结果进行验证。

如图 4 所示, 一般情况下, C 点的角速度不做研究, 因而 C 点的移动速度可表示为 $V_c = (V_{cx}, V_{cy}, 0)^T$ 。

$${}^1\dot{q}_{01} \times F_1 A_1 + ({}^1\dot{q}_{01} + {}^1\dot{q}_{12}) \times A_1 B_1 +$$

$$({}^1\dot{q}_{01} + {}^1\dot{q}_{12} + {}^1\dot{q}_{23}) \times B_1 C = V_c \quad (27)$$

$${}^2\dot{q}_{01} \times F_2 A_2 + ({}^2\dot{q}_{01} + {}^2\dot{q}_{12}) \times A_2 B_2 +$$

$$({}^2\dot{q}_{01} + {}^2\dot{q}_{12} + {}^2\dot{q}_{23}) \times B_2 C = V_c \quad (28)$$

式中: ${}^1\dot{q}_{01} = [0 \ 0 \ {}^1\dot{q}_{01}]$ 。式 (28) 可写成式 (29) 的形式。

$${}^1\dot{q}_{01} \times F_1 C + {}^1\dot{q}_{12} \times A_1 C + {}^1\dot{q}_{23} \times B_1 C = V_c \quad (29)$$

$${}^2\dot{q}_{01} \times F_2 C + {}^2\dot{q}_{12} \times A_2 C + {}^2\dot{q}_{23} \times B_2 C = V_c \quad (30)$$

式 (29) 左右点乘向量 $B_1 C_1$, 式 (30) 左右点乘向量 $B_2 C$, 得:

$${}^1\dot{q}_{01} \times F_1 C \cdot B_1 C + {}^1\dot{q}_{12} \times A_1 C \cdot B_1 C = V_c \cdot B_1 C \quad (31)$$

$${}^2\dot{q}_{01} \times F_2 C \cdot B_2 C + {}^2\dot{q}_{12} \times A_2 C \cdot B_2 C = V_c \cdot B_2 C \quad (32)$$

又因为 $A \times B \cdot C = B \times C \cdot A$, 则式 (31—32) 可写成式 (33—34) 的形式

$$F_1 C \times B_1 C \cdot {}^1\dot{q}_{01} + A_1 C \times B_1 C \cdot {}^1\dot{q}_{12} = V_c \cdot B_1 C \quad (33)$$

$$F_2 C \times B_2 C \cdot {}^2\dot{q}_{01} + A_2 C \times B_2 C \cdot {}^2\dot{q}_{12} = V_c \cdot B_2 C \quad (34)$$

式 (33—34) 写成矩阵的形式, 得到:

$$\begin{bmatrix} F_1 C \times B_1 C \cdot z & A_1 C \times B_1 C \cdot z & 0 & 0 \\ 0 & 0 & F_2 C \times B_2 C \cdot z & A_2 C \times B_2 C \cdot z \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} {}^1\dot{q}_{01} \\ {}^1\dot{q}_{12} \\ {}^2\dot{q}_{01} \\ {}^2\dot{q}_{12} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} B_1 C \\ B_2 C \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} V_{cx} \\ V_{cy} \\ 0 \end{bmatrix} \quad (35)$$

式 (35) 与 3.2 节通过旋量理论计算的机构输入-输出速度关系相同, 从而可知使用旋量理论得到的结果是正确的。

4 结 语

提出了一种新型的 5R 并联机构, 其特点在于可

以改变传统平面5R机构定平台的位置和尺寸,从而能实现扩大工作空间、减少工作空间奇异轨迹的作用。使用旋量方法计算了机构的输入-输出速度关系,并且对其正确性进行了验真,得到的结果对此并联机构的优化设计、尺寸综合、动力学分析提供了基础。

参考文献:

- [1] 孙西卓,冯小平,贾同飞,等.一种自动化包装装置:中国,201210309131.9[P].2015-02-18.
SUN Xi-zhuo, FENG Xiao-ping, JIA Tong-fei, et al. An Automatic Packaging Device: China, 2012103-09131.9[P]. 2015-02-18.
- [2] 李丽阁,张有良,段移丽,等.纸箱包装机纸板取送机构的设计与研究[J].包装与食品机械,2014,32(4): 28—30.
LI Li-ge, ZHANG You-liang, DUAN Yi-li, et al. Design and Research of the Sucking and Delivery Mechanism for the Carton Packing Machine[J]. Packaging and Food Machinery, 2014, 32(4): 28—30.
- [3] FERDINANDO C, DAI J S. Origami-Carton Tuck-in with a Reconfigurable Linkage[C]// ASME/IFToMM International Conference on Reconfigurable Mechanisms and Robots, London, UK, 2009: 512—520.
- [4] YAO W, DAI J S. A Reconfigurable Robotic Folding System for Confectionery Industry[J]. Industrial Robot: An International Journal, 2010, 37(6): 542—551.
- [5] YAO W, CANNELLA F, DAI J S. Automatic Folding of Cartons Using a Reconfigurable Robotic System[J]. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 2011, 27(3): 604—613.
- [6] 刘伟. 5R平面机构在不同装配、工作模式下的工作空间[J]. 包装工程, 2017, 38(5): 58—62.
LIU Wei. 5R Plane Mechanism Work Space in Different Assembly Modes and Work[J]. Packaging Engineering, 2017, 38(5): 58—62.
- [7] GOGU G. Branching Singularities in Kinematotropic Parallel Mechanisms[M]. Computational Kinematics. Springer Berlin Heidelberg, 2009.
- [8] ZHANG W, DING X, LIU J. A Representation of the Configurations and Evolution of Metamorphic Mechanisms[J]. Mechanical Sciences, 2016, 7(1): 39—47.
- [9] MORI O, OMATA T. Coupling of Two 2-link Robots with a Passive Joint for Reconfigurable Planar Parallel robot[C]// IEEE International Conference on Robotics and Automation, Proceedings ICRA IEEE, 2002, 4: 4120—4125.
- [10] ZHANG D, SHI Q. Novel Design and Analysis of a Reconfigurable Parallel Manipulator Using Variable Geometry Approach[M]. Springer Berlin Heidelberg: Practical Applications of Intelligent Systems, 2011.
- [11] BALMACEDA-SANTAMARÍA A L, CASTILLO-CASTANEDA E, GALLARDO-ALVARADO J. A Novel Reconfiguration Strategy of a Delta-type Parallel Manipulator[J]. International Journal of Advanced Robotic Systems, 2016, 13: 1.
- [12] SÁNCHEZALONSO R E, CASTILLOCASTAÑEDA E, GONZÁLEZBARBOSA J J. Kinetostatic Performance Analysis of a Reconfigurable Delta-Type Parallel Robot[J]. Ingeniería e Investigación Tecnológica, 2015, 16(2): 213—224.
- [13] HAYES M, JOHN D. Reconfigurable Planar Three-Legged Parallel Manipulators[M]. Springer Vienna: ROMANSY 18 Robot Design, Dynamics and Control, 2010.
- [14] CAMPOS L, BOURBONNAIS F, BONEV I A, et al. Development of a Five-Bar Parallel Robot With Large Workspace[C]// ASME 2010 International Design Engineering Technical Conferences, 2010: 917—922.
- [15] BOURBONNAIS F, BIGRAS P, BONEV I A. Minimum-Time Trajectory Planning and Control of a Pick-and-Place Five-Bar Parallel Robot[J]. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 2015, 20(2): 740—749.
- [16] LIU X J, WANG J. Parallel Kinematics: Type, Kinematics, and Optimal Design[M]. Springer Tracts in Mechanical Engineering, 2014.
- [17] BALMACEDA-SANTAMARÍA A L, CASTILLO-CASTANEDA E. A Reconfiguration Strategy of a Parallel Delta-Type Robot to Improve the Kinematic Performance[M]. Robotics and Mechatronics, Springer International Publishing, 2016.