

DOI:10.3969/j.issn.1003-5060.2025.05.001

# 基于四棱柱折叠单元的机械手设计及运动特性分析

朱立红, 谈家恣, 仲佳骏, 曹宇, 赵亮程, 张东

(合肥工业大学 机械工程学院, 安徽 合肥 230009)

**摘要:**在制衣行业中存在裁片尺码跨度大、通用机械手设计难的问题。为了解决制衣过程中抓取不同尺码裁片的要求,文章基于可展结构提出一种 4-RRR 四棱柱折叠单元,得出其单自由度可展的普适性理论;利用 4-RRR 四棱柱折叠单元设计相应的机械手机构,并进行运动特性分析,运用 D-H 参数法建立运动学方程,得出该机构的运动学解;将机械手机构模型导入 ADAMS 进行仿真,验证理论的可靠性,求解机械手的折展比;最后进行实物折展实验。研究表明,由 4-RRR 四棱柱折叠单元设计出的机械手可以满足目标需求,并具有较大的折展比。

**关键词:**可展开机构;四棱柱单元;折展机械手;单自由度;运动学

**中图分类号:**TH122 **文献标志码:**A **文章编号:**1003-5060(2025)05-0577-07

## Design and kinematic characteristics analysis of manipulator based on quadrangular prism folding unit

ZHU Lihong, TAN Jiamin, ZHONG Jiajun, CAO Yu, ZHAO Liangcheng, ZHANG Dong  
(School of Mechanical Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China)

**Abstract:** In the garment industry, there are difficulties in designing a universal manipulator due to the large size span of the pieces. In order to address the requirement of grabbing pieces of different sizes during the garment production process, a 4-RRR quadrangular prism folding unit model is proposed based on the expandable mechanism, and its universal theory of single-degree-of-freedom expandability is explored. The corresponding manipulator mechanism is designed by adopting the 4-RRR quadrangular prism folding unit, and the kinematic characteristics analysis is carried out. Using the D-H parameter method, the kinematic equation is established and the kinematic solution of the mechanism is obtained. Through the ADAMS simulation of the manipulator mechanism, the reliability of the mathematical model is verified, and the folding ratio of the manipulator is also solved. Finally, the physical folding experiment was carried out. The results show that the manipulator designed by the 4-RRR quadrangular prism folding unit can meet the target requirements and has a large folding ratio.

**Key words:** expandable mechanism; quadrangular prism unit; folding manipulator; single degree of freedom; kinematics

制衣行业属于劳动密集型产业,劳动力成本的不断上升推进了制衣自动化,研发制衣专用机械手的需求日益增大。文献[1-2]表明,成衣生产过程中,布料裁片从 XXS 码到 XXL 码尺寸具有较大的跨度,要求裁片夹取机械手能够快速变形,以适应不同尺寸的裁片。可展开机构(也称为可展机构)具有承载力大、结构紧凑、稳定性好等特

点,如文献[3]研究的可展机构收缩后体积小、收放灵活,能够实现大范围空间上的放大和缩小,经锁定后能够保持机构呈稳定状态。利用可展机构的运动特性,有效改变其结构构型,可以设计出满足布料转移抓取的机械手机构。

国内外的学者对可展机构的研究分为理论和应用 2 个方向。在理论研究方面,可展机构的研

收稿日期:2024-02-26;修回日期:2024-03-18

基金项目:国家自然科学基金资助项目(52205014)

作者简介:朱立红(1974—),女,江西抚州人,博士,合肥工业大学副教授,硕士生导师。

究基于基本的折叠单元展开:文献[4]对多个折叠基本单元进行组合与连接,从而形成拥有全新运动特性的展开机构;文献[5]通过研究分析剪切机构和 Sarrus 机构的特点,设计了一种新型的可展单元机构。在应用研究方面,部分学者将可展机构应用于机械手的设计,如文献[6]基于三棱柱可展机构,针对大型目标抓取设计了一种具有运动分岔特性的可展桁架抓取机械手。现有的应用研究大多围绕着航天领域,着眼于可展机构的空间可展能力,而忽视了其在平面上的可展性,使得现有的可展机构在实现平面多形态四边形缩放上具有一定的局限性。

为了满足制衣过程中抓取不同尺码裁片的要求,机械手的末端必须等比缩放,且满足尺寸变换所需的折展比。本文提出一种 4-RRR 四棱柱折叠单元,并对其构造方式和自由度进行一定的理论探索;基于该单元拓展设计机械手模型,分析其运动特性;最后,对机械手模型进行运动特性验证,并完成折展特性的实物验证。

## 1 四棱柱折叠单元及其自由度分析

### 1.1 4-RRR 四棱柱单元

一种可折叠 4-RRR 四棱柱单元的三维模型和单元简图如图 1 所示。

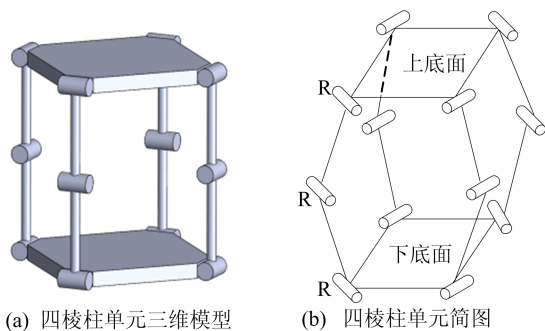


图 1 4-RRR 四棱柱单元

该单元包括 2 个相互平行的平面(组成单元的上、下底面)和 4 根同步折叠杆。折叠杆带有 1 个转动副和 2 根连杆;平面与折叠杆之间通过转动副相连,该转动副轴线与对应的折叠杆转动副轴线平行<sup>[7]</sup>。由此组成一个完整的四棱柱折叠单元。

下文将对该四棱柱单元的折叠特性与自由度进行分析,研究探索适用于 4-RRR 四棱柱单元的普适性单自由度可折叠理论。

### 1.2 基于螺旋理论的自由度分析

以正四棱柱单元为例,正四棱柱 4-RRR 单元的折叠流程如图 2 所示。

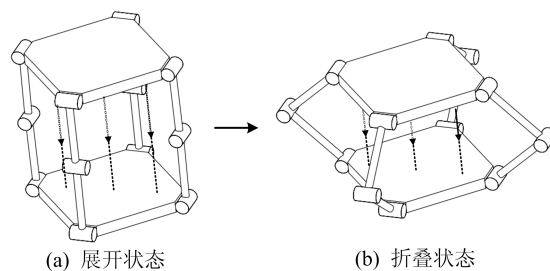


图 2 正四棱柱 4-RRR 单元折叠流程

正四棱柱 4-RRR 机构可视为空间并联 4 分支机构,每个分支均为 RRR 连杆,具有 3 个转动副。正四棱柱相邻连杆转动副轴线相互垂直,并平行于上、下底面。

建立正四棱柱旋量坐标系,如图 3 所示,取下底面几何中心为坐标原点, $x$  轴垂直转动副轴线方向,再根据右手定则建立  $y$  轴、 $z$  轴, $z$  轴垂直下底面向上。

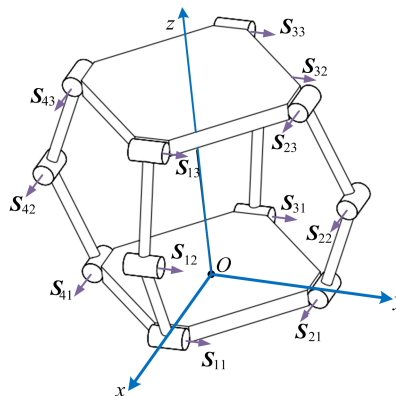


图 3 正四棱柱旋量坐标系

可得分支 1 旋量系<sup>[8]</sup> $S_1$ 为:

$$S_1 = [S_{11} \quad S_{12} \quad S_{13}] = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & a_1 \\ 0 & 0 & 0 & -b_1 & 0 & a_2 \\ 0 & 0 & 0 & -b_2 & 0 & a_1 \end{bmatrix}^T \quad (1)$$

其中: $S_i$  为第  $i$  分支的旋量系; $S_{ij}$  为第  $i$  分支、第  $j$  个运动副的旋量; $a_k$  为旋量  $S_{ij}$  的轴线相对于坐标原点的  $x$  轴分量; $b_i$  为旋量  $S_{ij}$  的轴线相对于坐标原点的  $z$  轴分量。

分支 1 的反旋量系  $S_1^r$  为:

$$S_1^r = [S_{11}^r \quad S_{12}^r \quad S_{13}^r] = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}^T \quad (2)$$

其中: $S_i^r$  为第  $i$  分支的反旋量系; $S_{ij}^r$  为第  $i$  分支、第  $j$  个运动副的反旋量。

分析可知分支 1 受到 2 个反螺旋力偶和 1 个

约束力的共同作用。同理,对其余 3 个分支建立正螺旋系,得到 3 个分支的反螺旋系  $S_2^r, S_3^r, S_4^r$  分别为:

$$S_2^r = [S_{21}^r \quad S_{22}^r \quad S_{23}^r] = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}^T \quad (3)$$

$$S_3^r = [S_{31}^r \quad S_{32}^r \quad S_{33}^r] = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}^T \quad (4)$$

$$S_4^r = [S_{41}^r \quad S_{42}^r \quad S_{43}^r] = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}^T \quad (5)$$

从 4 个分支反螺旋系可知存在相同的反螺旋力偶  $[0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 1]^T$ , 即机构存在 1 个公共约束。另外, 4 个分支在  $x$  轴线方向的约束力偶均在同一个平面上, 即  $S_{12}^r, S_{22}^r, S_{32}^r, S_{42}^r$  线性相关, 可得存在 2 个虚约束。同理, 在  $y$  轴线方向也存在 2 个虚约束。

根据改进 Grubler-Kutzbach (G-K) 公式, 机构自由度为:

$$F = \lambda(n - p) + \sum_{i=1}^p f_i + \lambda_0 - f_a = 5 \times (9 - 12) + 12 + 4 - 0 = 1 \quad (6)$$

其中:  $F$  为机构自由度;  $f_i$  为第  $i$  个运动副的相对自由度;  $\lambda$  为机构的阶数,  $\lambda = 6 - m$ ,  $m$  为公共约束;  $n$  为活动构件数;  $p$  为运动副的总数;  $\lambda_0$  为虚约束;  $f_a$  为局部自由度。

由式(6)可知该机构自由度  $F=1$ , 因此该正四棱柱 4-RRR 机构为单自由度可展单元。

对 4-RRR 四棱柱机构的构型进一步拓展, 并对一般的四棱柱机构自由度进行验证。当上、下底面为任意四边形时, 以下底面运动副  $A_1, B_1$  质心连线的中垂线与  $B_1, C_1$  质心连线的中垂线的交点为坐标原点  $O$ , 以  $O$  到运动副  $A_1$  质心的连线方向为  $x$  轴正方向, 根据右手定则, 在下底面建立坐标系, 如图 4 所示。

可以看出, 第 1 分支链  $A_1 A_2 A_3$  的旋量系  $S_A$  与正四棱柱分支旋量系  $S_1$  相同, 第 2 个分支链  $B_1 B_2 B_3$  的旋量系  $S_B$  可写为:

$$S_B = [S_{B1} \quad S_{B2} \quad S_{B3}] = \begin{bmatrix} \sin \alpha & -\cos \alpha & 0 & 0 & 0 & -a_1 \\ \sin \alpha & -\cos \alpha & 0 & -b_1 \cos \alpha & b_1 \sin \alpha & -a_2 \\ \sin \alpha & -\cos \alpha & 0 & -b_2 \cos \alpha & b_2 \sin \alpha & -a_3 \end{bmatrix}^T \quad (7)$$

则分支链  $B_1 B_2 B_3$  的反旋量系  $S_B^r$  为:

$$S_B^r = [S_{B1}^r \quad S_{B2}^r \quad S_{B3}^r] = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & \cos \alpha & \sin \alpha & 0 \\ \sin \alpha & \cos \alpha & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}^T \quad (8)$$

取原点到第 3 分支链  $C_1 C_2 C_3$  下底面转动副  $C_1$  轴线的垂线与  $x$  轴的夹角为  $\beta$ , 可得第 3 分支链的旋量系为:

$$S_C = [S_{C1} \quad S_{C2} \quad S_{C3}] = \begin{bmatrix} \sin \beta & -\cos \beta & 0 & 0 & 0 & -c_1 \\ \sin \beta & -\cos \beta & 0 & -d_1 \cos \beta & d_1 \sin \beta & -c_2 \\ \sin \beta & -\cos \beta & 0 & -d_2 \cos \beta & d_2 \sin \beta & -c_3 \end{bmatrix}^T \quad (9)$$

其中:  $c_k (k=1, 2, 3)$  为旋量  $S_{Ck}$  轴线相对于坐标原点的  $x$  轴分量;  $d_l (l=1, 2)$  为旋量  $S_{Cj}$  轴线相对于坐标原点的  $z$  轴分量。

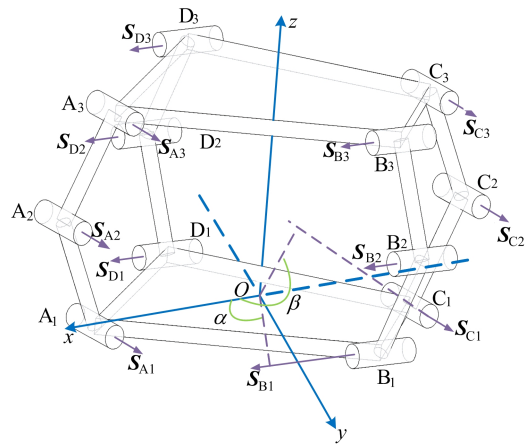


图 4 四棱柱旋量坐标系

该分支链的反旋量系  $S_C^r$  为:

$$S_C^r = [S_{C1}^r \quad S_{C2}^r \quad S_{C3}^r] = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & \cos \beta & \sin \beta & 0 \\ \sin \beta & \cos \beta & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}^T \quad (10)$$

由第 3 分支链的反旋量系  $S_C^r$  可知, 当  $\sin \beta \neq 0$ , 即第 1 分支链和第 2 分支链转轴不平行时, 始终有第 3 分支链的约束力和约束力偶可以被第 1、第 2 分支链线性表示, 即对于第 3 分支链, 始终存在 2 个虚约束。

同理, 对于第 4 分支链  $D_1 D_2 D_3$ , 当第 1、第 2、第 3 分支链存在两者不平行时, 第 4 分支链可以由两者线性表示, 始终存在 2 个虚约束; 并且当分支链存在两者不共线时, 反旋量系有且仅有 1 个公共约束。因此对于改进 Grubler-Kutzbach 公式,  $\lambda_0=4$  不变,  $m=1$  不变, 即机构的自由度不

变,始终为 1。

综上所述,由旋量理论可得,本文所构建的 4-RRR 四棱柱单元的自由度与转动副轴线方向直接相关。

对于所提出的 4-RRR 四棱柱可折叠单元,实现其单自由度可展的普适性理论可总结为:构造单自由度可展的 4-RRR 四棱柱单元体时,必须存在 2 个或者 2 个以上的支链,相邻链位于下底面

的转动副轴线相交。

## 2 机械手设计及运动特性分析

### 2.1 构型设计

对 4-RRR 四棱柱折叠单元进行拓展,将链接中间转动副的两杆中的一侧直杆沿直线方向延伸,设计构建机械手,机械手的收展过程如图 5 所示。

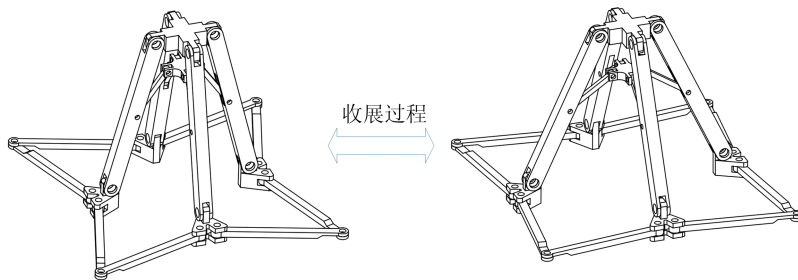


图 5 机械手收展过程

该机械手设计使得四棱柱单元的折展特性从竖直方向折展转换为水平方向上平面四边形的伸缩。在延伸杆末端加装动力模块,可实现对任意平面四边形物体的夹持,从而满足机械夹爪的功能需求。在底部加上并联伸缩杆机构,使得机械爪底部在能够保持水平的同时,提高机构的刚度和稳定性。

### 2.2 折展机械手运动特性分析

将模型简化,取单个分支采用 D-H 参数法对其进行运动学分析。因为机构为并联机构,形成闭链,所以将机构在 C 处虚拟断开,得到一个等价的树状机构开式运动链,从而建立的坐标系如图 6 所示。

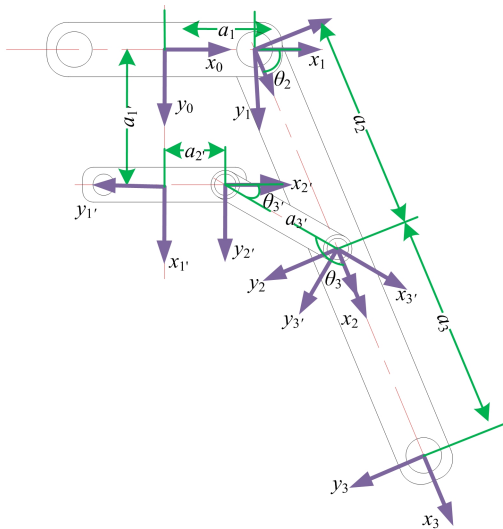


图 6 D-H 坐标系

可得树状机构 D-H 参数见表 1 所列。

表 1 D-H 参数表

$i$	$a_i$	$\alpha_i$	$d_i$	$\theta_i$
1	$a_1$	0	0	0
2	$a_2$	0	0	$\theta_2$
3	$a_3$	0	0	$\theta_3$
1'	$a_1'$	$-\pi/2$	0	0
2'	$a_2'$	$\pi/2$	0	0
3'	$a_3'$	0	0	$\theta_3'$

由 D-H 参数表可得,树状机构开式运动链的 2 个变换矩阵<sup>[9]</sup>分别为:

$$T_2^0 = \begin{bmatrix} \cos \theta_2 & -\sin \theta_2 & 0 & a_1 + a_2 \cos \theta_2 \\ \sin \theta_2 & \cos \theta_2 & 0 & a_2 \sin \theta_2 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (11)$$

$$T_{3'}^0 = \begin{bmatrix} \cos \theta_{3'} & -\sin \theta_{3'} & 0 & a_1' + a_3' \cos \theta_{3'} \\ \sin \theta_{3'} & \cos \theta_{3'} & 0 & a_3' \sin \theta_{3'} - d_2' \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (12)$$

因为  $\theta_3$  为定值,所以连杆 2 与连杆 3 之间的常值变换矩阵为:

$$T_3^2 = \begin{bmatrix} \cos \theta_3 & -\sin \theta_3 & 0 & a_3 \cos \theta_3 \\ \sin \theta_3 & \cos \theta_3 & 0 & a_3 \sin \theta_3 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (13)$$

由于转动关节 2 和转动关节 3' 为同一转动关节,则有:

$$\begin{bmatrix} \mathbf{v}_2 \\ \boldsymbol{\omega}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{v}_{3'} \\ \boldsymbol{\omega}_{3'} \end{bmatrix} \quad (14)$$

其中:  $\mathbf{v}_2$ 、 $\mathbf{v}_{3'}$  为关节速度映射到机械手末端的线速度;  $\boldsymbol{\omega}_2$ 、 $\boldsymbol{\omega}_{3'}$  为关节速度映射到机械手末端的角速度。

设转动关节 2 和转动关节 3' 的关节速度分别为  $\mathbf{q}_2$  和  $\mathbf{q}_{3'}$ , 则该分支运动链应满足的约束条件为:

$$\begin{bmatrix} \mathbf{z}_2 \times^2 \mathbf{p}_n^0 \\ \mathbf{z}_2 \end{bmatrix} \mathbf{q}_2 = \begin{bmatrix} \mathbf{z}_{3'} \times^3 \mathbf{p}_n^0 \\ \mathbf{z}_{3'} \end{bmatrix} \mathbf{q}_{3'} \quad (15)$$

其中:  ${}^i \mathbf{p}_n^0$  为坐标原点相对坐标系  $\{i\}$  的位置矢量在基坐标系  $\{0\}$  中的表示;  $\mathbf{z}_i$  为坐标系  $\{i\}$  的  $z$  轴

$$\sin \theta_2 = \frac{a_2'(a_2^2 - a_3'^2) + K \sqrt{[(a_2 - a_3')^2 + K^2 + a_2'^2][(a_2 + a_3')^2 - K^2 - a_2'^2]}}{2a_2(K^2 + a_2'^2)} + \frac{a_2'}{2a_2} \quad (19)$$

$$\cos \theta_2 = \frac{K(a_2^2 - a_3'^2) - a_2' \sqrt{[(a_2 - a_3')^2 + K^2 + a_2'^2][(a_2 + a_3')^2 - K^2 - a_2'^2]}}{2a_2(K^2 + a_2'^2)} - \frac{K}{2a_2} \quad (20)$$

综上所述, 将上述方程简化后, 最终可得所构建的机械手末端轨迹正运动学方程为:

$$\begin{aligned} \mathbf{T}_3^0 &= \mathbf{T}_2^0 \mathbf{T}_3^2, \\ \sin \theta_2 &= y_1(a_2'^2), \\ \cos \theta_2 &= y_2(a_2'^2) \end{aligned} \quad (21)$$

通过所得方程, 可以对机构进行进一步的速度仿真与验证。

### 3 折展机械手机构仿真分析

#### 3.1 运动仿真校验

为了验证上文自由度分析和运动学理论分析的正确性, 应用 ADAMS 仿真软件进行运动仿真。将建立好的机械手模型导入 ADAMS 中, 如图 7 所示。

由于机械手为对称机构, 可取机械手的一部分进行仿真分析。

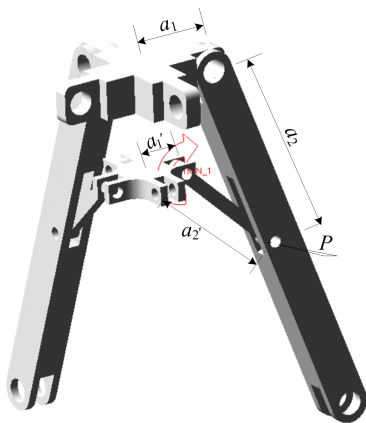


图 7 机械手简化模型

单位向量在基坐标系  $\{0\}$  中的表示。

由约束条件可得, 各参数应满足方程:

$$\begin{aligned} a_1 + a_2 \cos \theta_2 - a_1' - a_3' \cos \theta_3' &= 0, \\ a_2 \sin \theta_2 - a_3' \sin \theta_3' - a_2' &= 0 \end{aligned} \quad (16)$$

为了简化计算, 令:

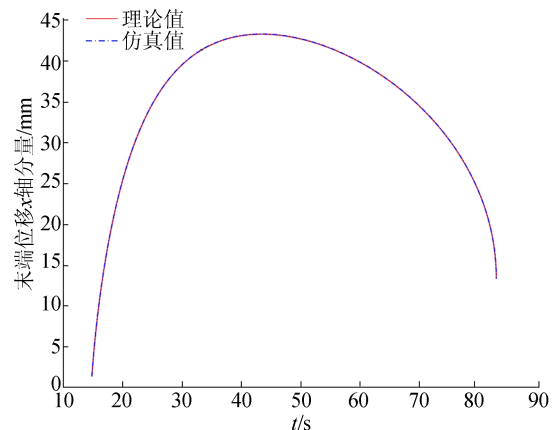
$$a_1 - a_1' = K \quad (17)$$

由机构的几何特性可知, 机构在运动过程中应满足三角形法则, 因此参数  $a_2'$  应满足:

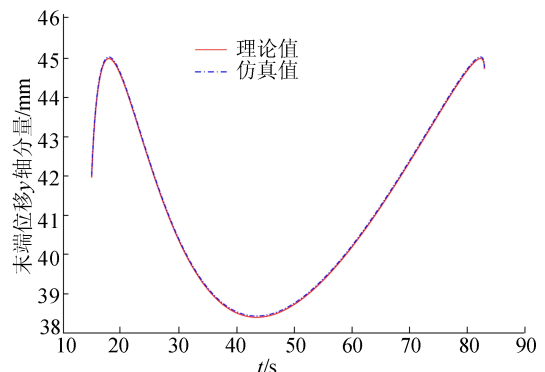
$$\sqrt{(a_2 - a_3')^2 - K^2} \leq a_2' \leq \sqrt{(a_2 + a_3')^2 - K^2} \quad (18)$$

将  $a_2'$  代入约束方程, 可得参数  $d_2'$  与参数  $\theta_2$  的约束方程为:

取  $a_1 = 18.50 \text{ mm}$ ,  $a_2 = 50.04 \text{ mm}$ ,  $a_1' = 10.00 \text{ mm}$ ,  $a_2' = 33.35 \text{ mm}$  代入运动学方程中, 再将折展机械手的驱动设置为  $90^\circ/\text{s}$ , 仿真折展机械手在  $90 \text{ s}$  之内的折展过程, 测试中间节点  $P$  的位移和角速度随时间变化的曲线, 其理论值和仿真值分别如图 8 所示。



(a) 节点 P 在 x 轴上的位移



(b) 节点 P 在 y 轴上的位移

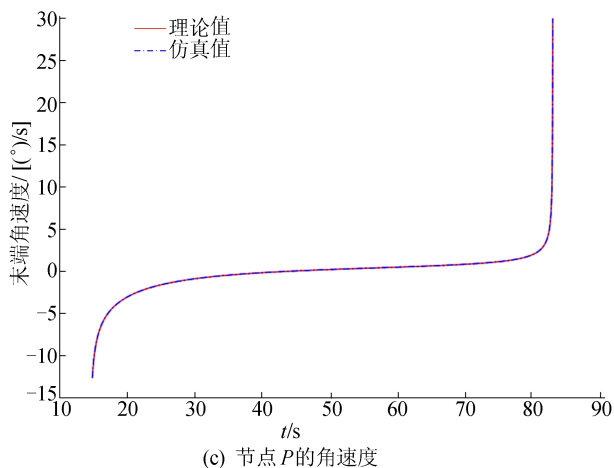


图 8 节点  $P$  位移及角速度的理论值与仿真值对比

由图 8 可知:4-RRR 四棱柱机械手中间节点  $P$  在折展过程中,位移以类三角函数形式变化, $x$  轴分量随着时间  $t$  的增大逐渐达到极值点,再逐渐变小; $y$  轴分量在达到极小值点后发生一定的突变,函数曲率发生变化;当  $t \in [15, 85]$  s,节点  $P$  的角速度变化较为平缓,当  $t > 85$  s 时,角速度产生较大的突变。

由于仿真建立的模型大小为实际模型的尺寸

大小,与理论值存在一定的误差,但仿真结果仍然验证了理论分析的正确性。

### 3.2 折展比计算

4-RRR 四棱柱折展单元在空间折叠过程中存在多个方向上的尺寸变化,因此选取不同的参考点将得到不同的参考折展比。

对于本文构建的机械手,其在平面上的折展能力决定了其工作能力,故本文选取参考点  $P$  作为参考对象,并取  $x$  轴坐标进行对比。

由仿真和理论计算可得, $x$  轴坐标存在极值点,故可得折展比为:

$$\lambda = \frac{x_{\max}}{x_{\min}} = \frac{43.35}{1.38} = 31.4 \quad (22)$$

对于生产实际使用的裁片,用于衣身的裁片与用于领部的裁片尺寸差距最大,最高面积比可达 1:20。由此可知,机械手的折展比满足实际生产需求。

## 4 实 验

加工和装配实验机械手样本并进行相关的折展实验,如图 9 所示。

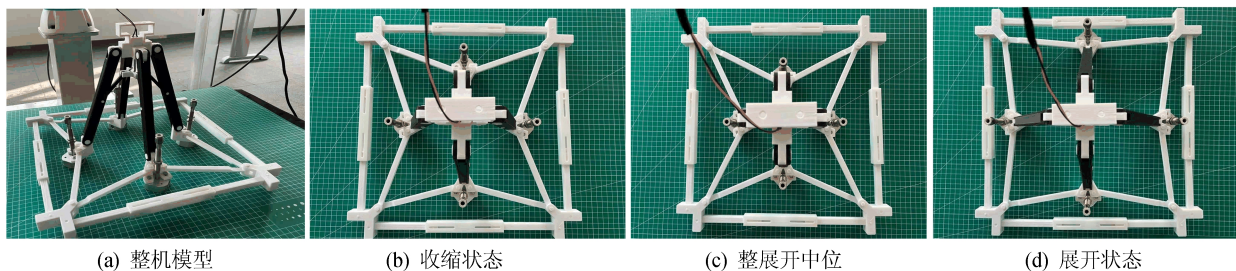


图 9 机械手样机折展实验

通过电机驱动使机械手实现展开和合拢,并通过控制位移参数的大小实现末端位姿的调整。实验验证了折展比大小的正确性和 4-RRR 四棱柱折展机械手的可折展性。

在机械手上加装针对布料的末端执行件,并将其安装在机械臂之上,测试机械手在实际工况下的工作能力。机械手抓取布料的各个状态如图 10 所示。



图 10 机械手抓取状态图

- tion; a comprehensive review[J]. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, 2016, 53: 373-407.
- [5] GRAZZINI G, MARIANI A. A simple program to design a multi-stage jet pump for refrigeration cycles[J]. *Energy Convers Manage*, 1998, 39: 1827-1834.
- [6] KONG F, KIM H D. Optimization study of a two-stage ejector-diffuser system[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2016, 101: 1151-1162.
- [7] CHEN W X, XUE K K, WANG Y C, et al. Numerical assessment on the performance of two-stage ejector to boost the low-pressure natural gas[J]. *Journal of Natural Gas Science & Engineering*, 2016, 34: 575-584.
- [8] YADAV S K, PANDEY K M, KUMAR V, et al. Computational analysis of a supersonic two-stage ejector[J]. *Materials Today: Proceedings*, 2021, 38: 2700-2705.
- [9] KONG F, KIM H D. Analytical and computational studies on the performance of a two-stage ejector-diffuser system[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2015, 85: 71-87.
- [10] SHARIFI N. Axisymmetric and three dimensional flow modeling within thermal vapor compressors[J]. *Heat and Mass Transfer*, 2013, 49(10): 1489-1501.
- [11] GARCÍA DEL VALLE J, SAÍZ JABARDO J M, CASTRO RUIZ F, et al. An experimental investigation of a R-134a ejector refrigeration system[J]. *International Journal of Refrigeration*, 2014, 46: 105-113.

(责任编辑 胡亚敏)

### (上接第 582 页)

测试结果表明,本文所设计的机械手能够针对裁片形状做出适应性变化,并能够对布料裁片实现抓取转移效果,实现目标要求。

## 5 结 论

1) 本文针对制衣行业机械手存在的难点问题,基于可展理论提出了一种 4-RRR 四棱柱折叠单元,并进行了构型分析。基于螺旋理论进行的自由度分析得出,使 4-RRR 四棱柱折叠单元成为单自由度折展单元,必须满足存在 2 个或者 2 个以上的支链,且其位于下底面的转动副轴线相交。这一结论拓展了可展机构的相关理论。

2) 基于 4-RRR 四棱柱折叠单元设计了机械手,分析了其运动学特性,得出目标点的正运动学解,同时对目标的位置、速度以及姿态进行了仿真验证。

3) 通过实验验证了机械手的可折展性,证明了该机械手能够实现目标要求,同时具有较高的折展比,具有一定的工程应用价值。

### [参 考 文 献]

- [1] 刘汉邦,李新荣,刘立东. 服装面料的自动抓取转移方法的

研究进展[J]. *纺织学报*, 2021(42): 191-196.

- [2] FANTONI G, SANTOCHI M, DINI G, et al. Grasping devices and methods in automated production processes[J]. *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, 2014, 63(2): 679-701.
- [3] 陈耀,冯健. 对称可展结构:形态、展开过程与应用研究[M]. 南京:东南大学出版社, 2015: 530.
- [4] 付立. 折叠机构:理论研究及其在机械手装置中的设计应用[D]. 上海:华东理工大学, 2015.
- [5] LU S, ZLATANOV D, DING X, et al. A new family of deployable mechanisms based on the Hoskens linkage[J]. *Mechanism and Machine Theory*, 2014, 73: 130-153.
- [6] 郭金伟,许允斗,郭路瑶,等. 一种三棱柱可展单元机构及其自由度分析[J]. *燕山大学学报*, 2020, 44(1): 18-24, 31.
- [7] ZHANG Y, GAO C, XU P, et al. Type synthesis of deployable and symmetrical single-loop mechanisms for constructing aerospace platforms[J]. *Mechanism and Machine Theory*, 2023, 181: 105212.
- [8] ZHOU C, CHEN H, GUO W, et al. Novel bundle folding deployable mechanisms to realize polygons and polyhedrons[J]. *Mechanism and Machine Theory*, 2023, 181: 105210.
- [9] WANG S, HUANG H L, JIA G L, et al. Design of a novel three-limb deployable mechanism with mobility bifurcation[J]. *Mechanism and Machine Theory*, 2022, 172: 104789.

(责任编辑 胡亚敏)