

基于气腔驱动的柔性夹持器设计与弯曲性能研究

孙龙飞, 梁爽, 时苏杭

(沈阳理工大学 机械工程学院, 沈阳 110159)

摘要: 为了提高夹持器对物体抓取的柔顺性和稳定性, 提出一种基于硅橡胶作为致动层材料的气动刚柔耦合夹持器。首先, 基于描述硅橡胶非线性变形特征的 Yeoh 本构模型与虚功原理, 确定单个夹持器关节气腔充气后的变形量与驱动气压的关系; 然后, 推导出两相邻关节间局部偏转角与致动层气腔变形量的解析关系; 最后, 通过坐标变换得到末端关节相对于近端关节的偏转角度, 建立夹持臂整体弯曲变形性能的预估数学模型。结果表明, 夹持器可通过调整关节数量改变夹持器的姿态和夹持范围实现自适应包络。当气压处于 0 ~ 100 kPa 时, 由 4 个关节串联构成的夹持臂偏转角度可达 $0^{\circ} \sim 20^{\circ}$, 夹持负载可达约 20 N。

关键词: 柔性夹持器; 气动; 自适应包络; 弯曲变形

中图分类号: TP242; TH138 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1003-1251.2026.04.008

Design and Bending Performance Analysis of a Pneumatic Flexible Gripper

SUN Longfei, LIANG Shuang, SHI Suhang

(Shenyang Ligong University, Shenyang 110159, China)

Abstract: To improve the grasping compliance and stability of the gripper, a pneumatic rigid-flexible coupled gripper is proposed, featuring actuation layers made of silicone rubber. Firstly, based on the Yeoh constitutive model describing the nonlinear deformation of silicone rubber and the principle of virtual work, the relationship between the deformation of a single joint's air chamber and the driving pressure is determined. Then, the analytical relationship between the local deflection angle of two adjacent joints and the deformation of the actuation layer's air chamber is derived. Finally, through coordinate transformation, the deflection angle of the end joint relative to the proximal joint is obtained, establishing a mathematical model to predict the overall bending deformation performance of the gripper arm. Experimental results show that the gripper's posture and grasping range can be changed by adjusting the number of joints to achieve adaptive enveloping. When the air pressure is in the range of 0 to 100 kPa, the deflection angle of the gripper arm, which consists of four joints connected in series, ranges from 0° to 20° , and the grasping load can reach approximately 20 N.

Key words: flexible gripper; pneumatic actuation; adaptive enveloping; bending deformation

近年来, 随着仿生学的深入研究、3D 打印技术的革新、柔性材料性能的提升及控制算法的进步, 促进了多技术在机器人夹持器设计中的融合,

推动了夹持器的发展, 使其在替代人力、提升生产效率等方面的应用能力得到增强, 并成为机器人学领域的重要研究方向^[1]。相对于传统刚性夹持

结构,柔性夹持器在柔顺性与安全性方面表现突出,其主要取决于致动方式。目前,主要的致动方式包括:压缩空气、压电响应及形状记忆合金(shape memory alloy, SMA)相变驱动^[2]。多样化的致动方式使柔性夹持器能够胜任传统刚性夹持器难以应对的任务,从而推动了其在人机协作、易损物品搬运等领域的应用。文献[3]基于介电弹性体开发了一款三指柔性夹持器,实现对不同形状物体的抓取。文献[4]基于SMA的相变特性开发了一种模仿人类手部行为的软夹持器,该装置将SMA丝嵌入柔性材料中,通过加热SMA丝实现手指弯曲和恢复原形。此外,气动柔性夹持器凭借制造工艺简单、操控便捷、响应迅速等优势,成为柔性夹持器研究的重要方向^[5]。文献[6]提出了基于热塑性聚氨酯材料3D打印成型气动夹持器,其独特的半椭圆形槽结构在气压驱动下能产生弯曲,以适用于抓取多种形状的物体。文献[7]设计了一种用于包络式抓取的气动无指软夹持器,通过调节气压控制变形,能抓取高度为其6倍、重量为其13倍的物体。然而,现有柔性夹持器在承载稳定性以及对复杂物体轮廓的自适应夹持能力方面仍面临挑战^[8]。

本文设计一种基于气腔驱动的柔性夹持器,其关节采用刚柔耦合设计,通过层叠方式将硬质转动层与硅橡胶致动层融为一体。为精确预估并优化夹持器的弯曲性能,首先,基于虚功原理与超弹性本构理论,建立夹持器末端偏转角度预估模型;然后,通过有限元仿真分析致动层气腔输入气压与偏转角度之间的量化关系;最后,搭建实验平台对样机实际性能进行测试评估。本文可为该类柔性夹持器的设计优化提供理论依据与工程指导,在自动化采摘及医疗辅助等领域具有广阔应用前景^[9-10]。

1 夹持器总体设计

柔性夹持器的致动原理为柔性材质密封气腔充气膨胀。本设计采用左右对称的双夹持臂结构,夹持器总体设计如图1所示。

各夹持臂通过连接关节与Y型气缸连接(图1(a))。每个夹持臂由多个沿其长度方向平行排列的关节构成,是实现抓取功能的核心单元。为了实现柔顺抓取的同时提高夹持器的稳定性,本文提出由转动层和致动层复合叠加的关节基本单元结构(图1(b))。其中,关节串联式硬质转动

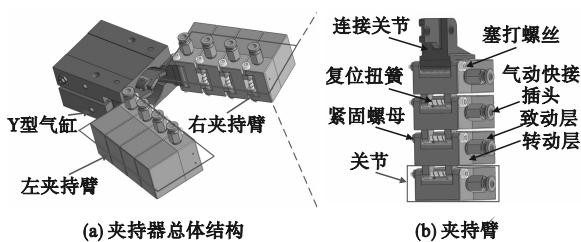


图1 夹持器总体设计图

Fig. 1 Overall design diagram of the gripper

层作为夹持臂承载框架,为柔性致动层提供支撑,使夹持器在包络物体时具有较好的结构刚度与夹持稳定性。为增强抓取表面摩擦力,转动层与物体的接触面覆盖有高摩擦系数硅胶层,以降低冲击和振动。该夹持臂采用模块化设计,操作者可根据抓取对象的尺寸与形态,通过调整关节数量调节其构型与工作范围。此外,各关节间转动连接处通过扭簧实现夹持器的复位动作。

2 致动层膨胀变形建模

夹持器的性能受致动层影响,其材料特性和机械结构直接影响夹持器的抓取形态和能力。因此,首先对致动层材料选型,基于材料的拉伸实验数据建立准确的能量密度函数,以此为基础建立致动层变形模型。

2.1 致动层材料能量密度参数确定

为使柔性夹持器具备良好的变形能力和柔顺性,满足非线性变形和超弹性的设计要求,选用998硅橡胶作为致动层材料。由于不同的本构模型适用的应变范围存在差异,本文选用Yeoh模型来表征致动层所用硅橡胶材料受力变形时的力学性能^[11-12]。

对关节进行建模时,为了方便计算,需要对模型进行适当简化并提出以下假设^[13-14]:

- 1) 致动层上各区域各向同性,无迟滞现象;
- 2) 致动层挤压区域的变形高度不受挤压作用影响;
- 3) 致动层与转动层之间相互重叠部分不计入变形区域;
- 4) 各部件之间粘合紧密,无漏气情况;
- 5) 气压和温度稳定不变且分布均匀。

根据上述假设,致动层可视为具有超弹特性的不可压缩体。对于这类材料,其本构关系可通过能量密度函数 U 描述^[12],其表达式为

$$U = (I_1, I_2, I_3) \quad (1)$$

$$\begin{cases} I_1 = \text{tr}(\mathbf{B}) = \lambda_1^2 + \lambda_2^2 + \lambda_3^2 \\ I_2 = \frac{1}{2} [(\text{tr}(\mathbf{B}))^2 - \text{tr}(\mathbf{B}^2)] = \lambda_1^2 \lambda_2^2 + \lambda_2^2 \lambda_3^2 + \lambda_1^2 \lambda_3^2 \\ I_3 = \det(\mathbf{B}) = \lambda_1^2 \lambda_2^2 \lambda_3^2 = J^2 \end{cases} \quad (2)$$

式中: $I_i (i = 1, 2, 3)$ 为第 i 个应变张量不变量; \mathbf{B} 为左 Cauchy-Green 张量; λ_i 为材料在第 i 个主方向的主伸长比; J 表示材料变形后与变形前的体积比, 对于硅橡胶等不可压缩材料, $J = 1$ 。

当使用 3 阶 Yeoh 本构模型时, 其能量密度函数可表示为

$$U = C_{10}(I_1 - 3) + C_{20}(I_1 - 3)^2 + C_{30}(I_1 - 3)^3 \quad (3)$$

式中 C_{10} 、 C_{20} 、 C_{30} 为硅橡胶材料的 Yeoh 模型常数。

为获得理论模型的解析解, 本文假定致动层变形时处于单轴拉伸状态, 即变形主要集中在长度方向。简化处理使主伸长比 λ 满足 $\lambda = \lambda_1$, 且 $\lambda_2^2 = \lambda_3^2 = \lambda^{-1}$ [15-16], 可以得到

$$I_1 = \lambda^2 + 2\lambda^{-1} \quad (4)$$

通过对硅橡胶材料制作的拉伸试样进行分析, 根据文献 [15, 17-18], 可得材料常数 $C_{10} = 1.054\ 34$, $C_{20} = -9.18 \times 10^{-5}$, $C_{30} = 7.59 \times 10^{-9}$ 。

2.2 致动层膨胀变形高度与驱动气压关系

夹持器关节整体结构如图 2 所示。图中: $2w_1$ 为腔室宽度; $2w_2$ 为腔室长度; t_1 为致动层顶部壁厚; t_2 为挤压区域壁厚; t_3 为致动层侧壁壁厚; $2h_1$ 为腔室高度; h_2 为转动层顶部到铰接中心 O 点高度; h_3 为铰接中心 O 点到转动层底部高度; d 为进气口直径; d_1 为铰接中心 O 点到连接环边缘距离; d_2 为铰接中心 O 点到转动层末端距离; d_3 为转动层与物体接触部分长度; d_4 为连接环腔室长度; L 为关节长度。详细结构参数如表 1 所示。

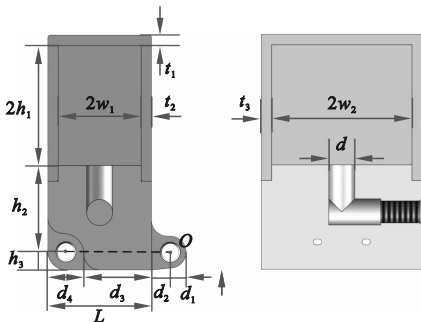


图 2 关节整体结构

Fig. 2 Overall structure of the joint

表 1 关节结构参数

Table 1 Structural parameters of the joint

| 参数 | 数值/mm | 参数 | 数值/mm |
|--------|-------|-------|-------|
| $2w_1$ | 16 | h_3 | 3.5 |
| $2w_2$ | 27 | d | 5 |
| t_1 | 2 | d_1 | 3.5 |
| t_2 | 2 | d_2 | 3.5 |
| t_3 | 2 | d_3 | 13 |
| $2h_1$ | 23 | d_4 | 7 |
| h_2 | 16.5 | L | 20 |

对关节进行充气仿真测试, 关节致动层轮廓变形情况如图 3 所示。

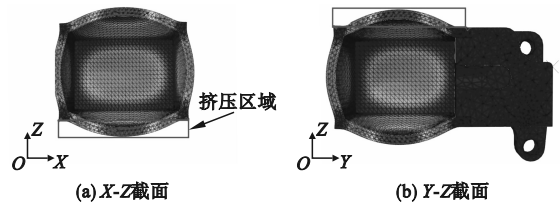


图 3 关节致动层轮廓变形情况

Fig. 3 Deformation profile of the joint actuation layer

由图 3 可见, 两关节之间相互挤压的中心区域变形量最大, 总体形态呈现出近似对称的抛物线形, 该仿真结果为后续模型构建提供依据。

为建立致动层挤压区域变形高度与驱动气压之间的联系, 采用抛物线表征挤压面的变形轮廓, 并据此提出以下假设:

1) 以挤压面中心点为抛物线横轴原点, 此处变形量最大且曲线平滑;

2) 抛物线两端点变形量为 0, 分别位于纵轴两侧, 关于原点对称, 左侧单调递增, 右侧单调递减。

根据上述假设, 设定变形量最大结点的位移为 1, 即 $f(0) = 1$, 描述挤压面变形轮廓的抛物线方程可表示为

$$f(x) = -kx^2 + 1 \quad (5)$$

式中: $x \in [-h_1, h_1]$; $k (k > 0)$ 为决定变形轮廓的曲率。

图 4 为挤压区域变形特征, 图中 H 为挤压区域 (初始尺寸为 $2h_1 \times 2w_2 \times t_2$) 能够达到的最大变形高度。根据抛物线的变形轮廓构建初始曲面函数为

$$Z(x, y) = H \times f(x) \times g(y) \quad (6)$$

式中 $g(y) = -ky^2 + 1, y \in [-w_2, w_2]$ 。

为消除具体尺度对函数几何特征的影响, 通过归一化和变量代换对该函数进行无量纲化处

理,得到标准化表达式为

$$Z(\xi, \eta) = H \times f(\xi) \times g(\eta) \quad (7)$$

式中: $f(\xi) = k\xi^2 + 1, \xi \in [-1, 1]$; $g(\eta) = k\eta^2 + 1, \eta \in [-1, 1]$ 。

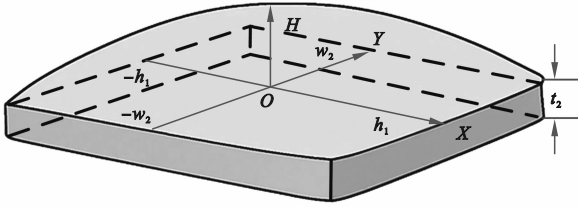


图4 挤压区域变形特征

Fig. 4 Deformation characteristics of the squeeze region

本文研究重点为挤压区域向外鼓起的高度变化情况,即气体在Z轴方向推动挤压区域变形,在X、Y方向的变形为伴随此高度变化的被动扩展。为简化计算,可设挤压区域内任意一点的位移场向量 $\mathbf{u} = (0, 0, Hf(\xi)g(\eta))^T$, 可据此计算出左Cauchy-Green 张量 \mathbf{B} 为

$$\mathbf{B} = \mathbf{F}\mathbf{F}^T = \begin{pmatrix} \lambda_1^2 & 0 & 0 \\ 0 & \lambda_2^2 & 0 \\ 0 & 0 & \lambda_3^2 \end{pmatrix} \quad (8)$$

式中 \mathbf{F} 表示变形梯度函数。

由式(2)、(4)、(8)可得

$$I_1 = 3 + \left[\frac{Hf'(\xi)g(\eta)}{h_1} \right]^2 + \left[\frac{Hf(\xi)g'(\eta)}{w_2} \right]^2 \quad (9)$$

将式(9)代入式(3),可得到挤压区域中任意一点的三阶 Yeoh 能量密度函数表达式 U 。通过该函数对整个挤压区域体积域进行积分,即可求得挤压区域变形的总应变能 E 为

$$E = \int_{-h_1}^{h_1} \int_{-w_2}^{w_2} \int_{-\frac{t_2}{2}}^{\frac{t_2}{2}} U dx dy dz \quad (10)$$

挤压区域变形后的体积 V 可表示为

$$V = H \int_{-h_1}^{h_1} f(x) dx \int_{-w_2}^{w_2} g(y) dy \quad (11)$$

假设挤压区域在变形过程中忽略自重及其他外力。根据虚功原理,对于任意相容的虚位移,即驱动气压 P 所做的虚功等于系统内部储存的总虚应变能,驱动气压做的功完全转化为推动挤压区域变形所需的能量 E ,其关系可表示为

$$\left(\frac{dE}{dH} \right) \delta H = P \left(\frac{dV}{dH} \right) \delta H \quad (12)$$

将相关数据代入式(12)后,可得到挤压区域变形高度 H 与驱动气压 P 的关系式,该式中包含系数 C_{30} 和 k^{12} 多项式项。为简化模型,可通过分析评估移除 C_{30} 项对预估精度的影响;在研究的气

压范围内,由于 C_{30} 的数值远小于 C_{10} 和 C_{20} ,其对变形高度 H 的贡献以高阶非线性为主,且该贡献量极小。故忽略 C_{30} 项所引入的误差处于可接受范围内,因此 H 与 P 的关系可进一步简化为

$$H = \sqrt[3]{\frac{P}{2B} + \sqrt{\frac{P^2}{4B^2} + \frac{A^3}{27B^3}}} + \sqrt[3]{\frac{P}{2B} - \sqrt{\frac{P^2}{4B^2} + \frac{A^3}{27B^3}}} \quad (13)$$

式中:

$$A = \frac{8k^2 t_2 C_{10}}{3 \left(1 - \frac{k}{3}\right)^2} \left(1 - \frac{2k}{3} + \frac{k^2}{5}\right) \left(\frac{1}{h_1^2} + \frac{1}{w_2^2}\right);$$

$$B = \frac{t_2 C_{20}}{\left(1 - \frac{k}{3}\right)^2} \left[5h_1^4 \left(1 - \frac{4k}{3} + \frac{6k^2}{5} - \frac{4k^3}{7} + \frac{k^4}{9}\right) + \frac{128k^4}{h_1^2 w_2^2} \left(\frac{1}{3} - \frac{2k}{5} + \frac{k^2}{7}\right)^2 + \frac{4}{w_2^2} \left(1 - \frac{4k}{3} + \frac{6k^2}{5} - \frac{4k^3}{7} + \frac{k^4}{9}\right)^2 \right].$$

通过上述分析,获得单个关节挤压区域变形高度 H 与驱动气压 P 的关系。为进一步表征由多个关节串联构成的夹持臂的弯曲性能,后续需要将挤压区域的局部变形映射到整个夹持臂的弯曲分析中。

3 建立夹持臂偏转角度预估模型

由于致动层上挤压区域的变形高度 H 与能够直接反映夹持臂整体弯曲性能的偏转角度 φ 之间缺乏直接的解析关系,本文采用间接建模的方法来构建夹持臂偏转角度预估模型。首先需要建立由 H 引起的两相邻关节间局部偏转角的数学模型,然后通过坐标变换将各级局部偏转角以及衍生的其他运动学参数映射至夹持臂参考系,最终建立夹持臂偏转角度预估模型。

图5为两相邻关节变形后的接触简图。图中: O 为两关节铰接点; M 、 N 分别为两致动层未变形时挤压面的中心点。为简化计算,假设接触点 Q 位于

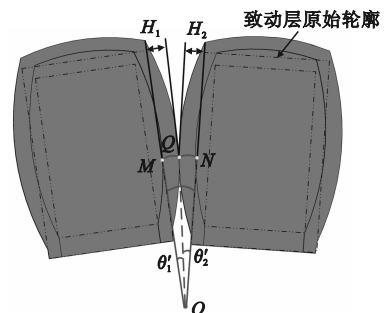


图5 关节接触简图

Fig. 5 Schematic diagram of the joint contact

两致动层变形后挤压面的接触中心,此时圆弧 MQ 的长度可近似等于左侧致动层的变形高度 H_1 ,与 O 点形成夹角 θ'_1 ,同理可得 θ'_2 。

由图 5 与关节结构参数可以得出

$$R = OM = ON = \sqrt{d_2^2 + (h_2 + h_1)^2} \quad (14)$$

由式(14)和弧长公式,可得单关节在驱动气压为 P 条件下相对于铰接中心 O 的单边局部偏转角 $\theta'_i (i=1,2)$ 的计算式为

$$\begin{cases} \theta'_1 = \frac{\widehat{MQ}}{R} = \frac{H_1}{\sqrt{d_1^2 + (h_2 + h_1)^2}} \\ \theta'_2 = \frac{\widehat{QN}}{R} = \frac{H_2}{\sqrt{d_1^2 + (h_2 + h_1)^2}} \end{cases} \quad (15)$$

当两关节上驱动气压 P 相等时,挤压区域变形高度 H_1 等于 H_2 ,即 \widehat{MQ} 与 \widehat{QN} 相等,故 $\theta'_1 = \theta'_2$ 。当驱动气压不等时, $\theta'_1 \neq \theta'_2$ 。

故两关节在受到外界压缩空气挤压后,产生的相对于铰接中心 O 点的局部偏转角 θ_q 为

$$\theta_q = \theta'_{q1} + \theta'_{q2} \quad (16)$$

式中角标 q 表示单边夹持臂上第 q 个铰接点, $q = 1, 2, \dots, n, n$ 为铰接点数量。

获得局部偏转角后,还需进一步分析其在完整两关节模型中引起的其他几何变化,相邻关节变形位置情况对比如图 6 所示。图 6(b)中: α 为末端变化角,连接直线 AC 、 AB 所形成; β 为局部开合角,反映转动层旋转变化情况。

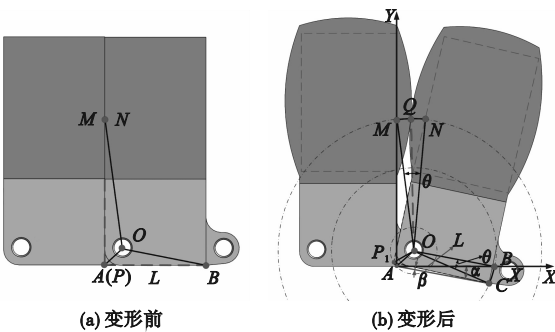


图 6 相邻关节变形位置情况对比

Fig. 6 Comparison of the deformed positions of adjacent joints

由图 6 (b) 可见,当右侧关节上 N 、 B 、 P 三点绕铰接点 O 旋转 θ 角度后,运动轨迹为 MN 、 BC 、 AP_1 三段以 O 点为圆心的圆弧。右侧关节首端点由 P 点运动至 P_1 点,末端点由 B 点运动至 C 点。

根据顺时针旋转公式和坐标位移公式推导出 C 点和 P_1 点在以 A 点为原点的坐标系中的坐标。

C 点坐标为

$$\begin{cases} x_C = d_4(1 - \cos\theta) + L\cos\theta - h_3\sin\theta \\ y_C = h_3(1 - \cos\theta) + (d_4 - L)\sin\theta \end{cases} \quad (17)$$

P_1 点坐标为

$$\begin{cases} x_{p1} = d_4(1 - \cos\theta) - h_3\sin\theta \\ y_{p1} = h_3(1 - \cos\theta) + d_4\sin\theta \end{cases} \quad (18)$$

末端变化角 α 和局部开合角 β 可通过向量夹角公式计算得出,计算式为

$$\alpha = \arccos\left(\frac{\vec{AB} \cdot \vec{AC}}{\|\vec{AB}\| \|\vec{AC}\|}\right) \quad (19)$$

$$\beta = \arccos\left(\frac{\vec{CP}_1 \cdot \vec{CA}}{\|\vec{CP}_1\| \|\vec{CA}\|}\right) \quad (20)$$

式中 $\|\vec{AB}\| = L$ 。

通过式(16) ~ (20)可得出夹持臂上多对关节在变形后的各项局部运动学参数,包括局部偏转角 θ_q 、 C_m 点和 P_m 点的坐标 (x_{c_m}, y_{c_m}) 、 (x_{p_m}, y_{p_m}) ,以及末端变化角 α_m 和对应的局部开合角 β_m 。但由于这些参数定义于各自独立的局部坐标系,不能直接描述为夹持臂变形后的状态。为直接描述夹持器与物体间的接触状态,需用末端关节末端点 C'_3 相对于近端关节上末端点 A_1 的偏转角 φ 来宏观反映夹持臂的弯曲性能,夹持臂关节偏转变化如图 7 所示。

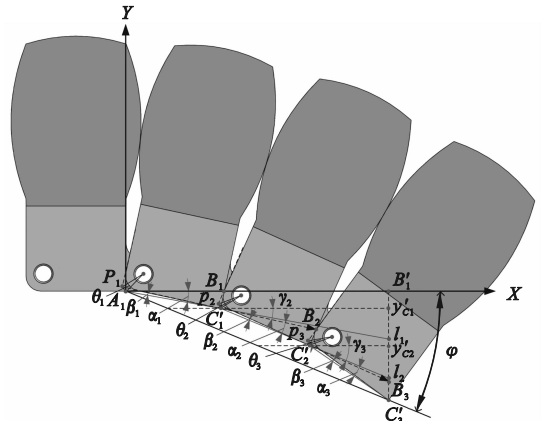


图 7 夹持臂关节偏转变化示意图

Fig. 7 Schematic of the bending angle change of the joints on the gripper arm

通过坐标变换将已获得的各级局部参数整合至以近端关节末端点 A_1 为原点、 A_1 - B'_1 为横轴的全局坐标系中,该坐标通过逐级坐标变换实现统一,首先利用顺时针旋转矩阵,将 C_m 点旋转 γ_m 度,变换到以 C'_{m-1} 为原点、 C'_{m-1} - $y'_{c_{m-1}}$ 为横轴的中间坐标系,再将由此获得的坐标进一步转换至全局坐标系,得

到 C'_m 坐标 (x'_{c_m}, y'_{c_m}) 的计算表达式为

$$\begin{cases} x'_{c_m} = x'_{c_m} \cos \gamma_m + y'_{c_m} \sin \gamma_m + x'_{c_{m-1}} \\ y'_{c_m} = -x'_{c_m} \sin \gamma_m + y'_{c_m} \cos \gamma_m + y'_{c_{m-1}} \end{cases} \quad (21)$$

式中角标 m 表示单边夹持臂上第 m 个关节, $m \geq 2$ 。

结合式(21)与向量夹角公式,可构建夹持臂偏转角度的初步理论预估模型。但该模型的推导过程基于前文所采用的简化假设,即忽略了关节间相互接触挤压时对其膨胀高度的抑制效应。理想化处理导致模型的预估角度系统性地高于仿真与实验值,故引入修正系数 ε 来补偿角度过高问题,得到修正后的预估模型为

$$\varphi = \varepsilon \angle B'_1 A_1 C'_3 = \varepsilon \arccos \left(\frac{\vec{A}_1 B'_1 \cdot \vec{A}_1 C'_3}{\|A_1 B'_1\| \|A_1 C'_3\|} \right) \quad (22)$$

计算结果表明,当修正系数 $\varepsilon = 0.89$ 时,可使模型预估结果与仿真及实验结果趋于一致。

4 实验验证

为验证数学模型与数值方法的准确性,首先制作由多个关节串联构成的夹持器样机,搭建相应的气动实验平台;然后基于该平台对夹持臂的实际弯曲性能进行测试,并将实验结果、有限元仿真结果与理论模型预估结果进行对比,以实现交叉验证并定量评估所提模型的预估精度;最后开展夹持实验,验证夹持器的各项性能。

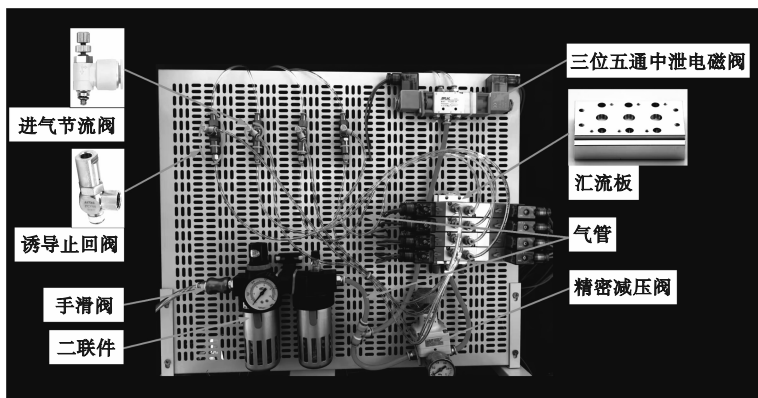


图9 实验控制平台

Fig.9 Experimental control platform

4.2 夹持臂弯曲性能的对比验证与分析

为定量评估本文所提夹持器设计方案与理论模型的有效性,在 $10 \sim 100$ kPa 驱动气压范围(步长 10 kPa)内,对由 4 个关节串联构成的夹持臂的弯曲性能进行实验、理论与仿真三方测试。

夹持臂变形前后的对比结果如图 10 所示。

4.1 夹持器制作与实验平台搭建

依据表 1 参数制作夹持器中关节实物,夹持器各零件和组装如图 1 所示。其中致动层(图 8(a))与转动层(图 8(b))分别采用模具浇注与 3D 打印技术成型,两者通过高分子粘合剂粘合组成独立的关节(图 8(c)),与复位扭簧一起组装于 Y 型气缸上,构成完整的夹持器(图 8(d))。

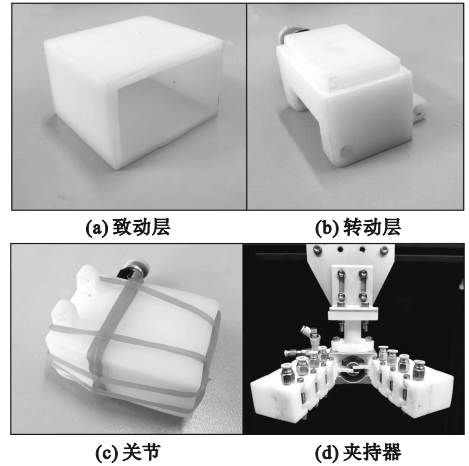


图8 夹持器各零件和组装图

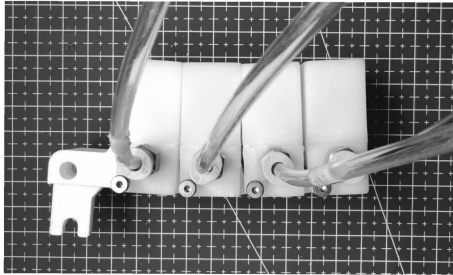
Fig.8 Components and assembly of the gripper

为实现对样机的驱动与控制,搭建如图 9 所示的控制平台。该平台集成空压机、电磁阀、精密调压阀和自主研发的控制系统,能够为后续各种性能测试提供稳定的气压环境。

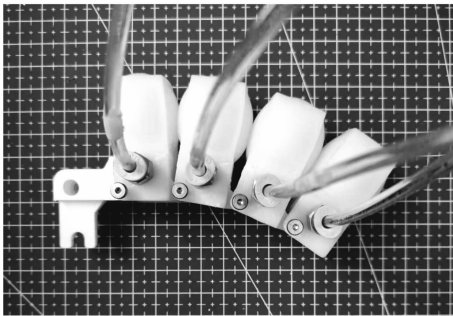
采用刻度板定位法获取变形结果,即在各级气压下,待夹持臂由如图 10(a) 所示的原始状态同步充气达到稳态后(图 10(b)),标记并连接各关节末端点位置形成折线轮廓(见图 11),再使用量角器直接测量其夹角 φ 。

在 Abaqus 中搭建与实验条件相匹配的仿真

环境,通过软件内置工具测量夹持臂变形后的末端变化结果(见图 12)。将表 1 中的参数代入修正后的预估模型,并通过对比不同 k 值下模型预估结果与实验值、仿真值的吻合度,确定最优系数 k 为 0.17。



(a) 夹持臂原始状态



(b) 夹持臂变形后状态

图 10 夹持臂变形前后对比图

Fig. 10 Comparison of the gripper arm before and after deformation

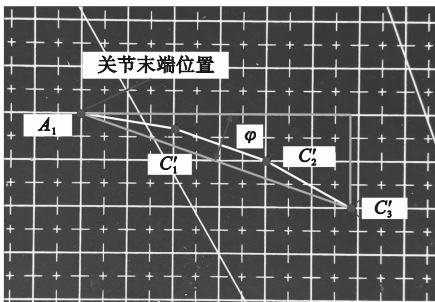


图 11 夹持臂弯曲实验结果

Fig. 11 Bending experiment results of the gripper arm

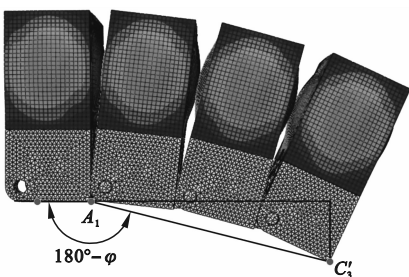


图 12 夹持臂末端变化情况

Fig. 12 End rotation angle change of the gripper arm

夹持器偏转角度结果对比如图 13 所示。

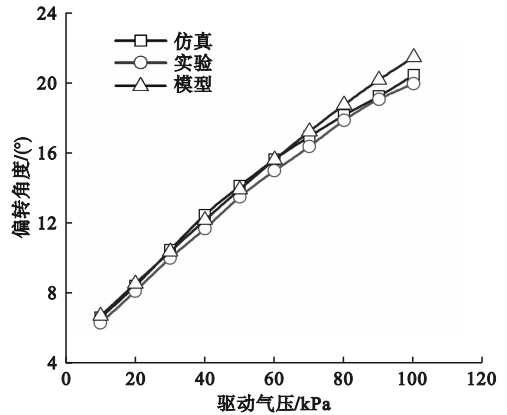


图 13 夹持臂偏转角度结果对比

Fig. 13 Comparison of the bending angle results of the gripper arm

由图 13 可见,在压力加载初期(10 ~ 30 kPa 区间),夹持臂的偏转角度均呈快速增长趋势,实验、仿真与模型结果的平均增长率分别为 0.33、0.35 和 0.34(°)/kPa,理论与仿真结果相对实验结果的偏差均在 0.02% 以内。进入压力加载后期(60 ~ 100 kPa),变形增长速率明显放缓,三者的平均增长率分别降至 0.13、0.12 和 0.15(°)/kPa,三者之间数据吻合良好。

综上,夹持臂在 10 ~ 100 kPa 驱动气压范围内,偏转角度的模型预估值与仿真结果、实验结果高度吻合(相对误差 < 0.02%),表明本文所建立的有限元模型及预估数学模型能够反映夹持臂在不同气压下的实际变形特性。

4.3 夹持器夹持实验

为验证夹持器的负载能力以及夹持物体时的稳定性,分别对具有 3 关节和 4 关节构型的夹持器开展夹持实验,夹持器尺寸参数与负载测量实验装置如图 14 所示。图 14(a)中: A 为夹持臂的长度; B 为最大展开宽度。

夹持器夹持物体后,通过弹簧测力计对物体施加拉力来模拟不同重量的被夹持物体,如图 14(b)所示。实验结果表明:夹持器通过调整关节模块数量,可改变夹持范围和负载能力,4 关节构型夹持器负载可达约 20 N,相关数据如表 2 所示。

针对不同重量、形状、尺寸的物体进行的夹持稳定性实验,如图 15 所示。

由图 15 可知:3 关节构型夹持器能够稳定抓取耳机(约 65 g)、齿轮(约 293 g)等物体;4 关节构型通过增加关节数量,其包络范围和承载能力均

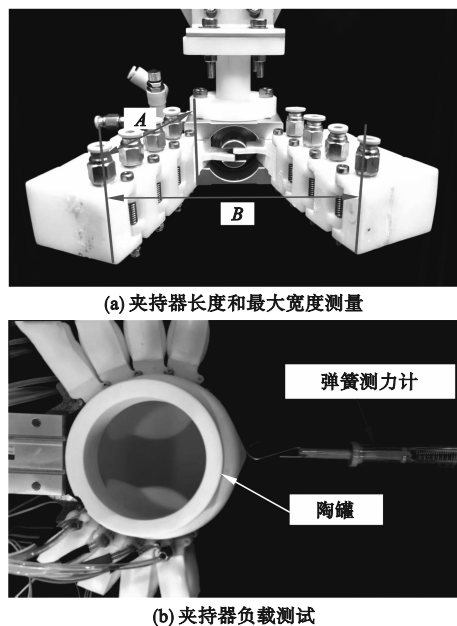


图 14 夹持器尺寸参数与负载测量实验装置

Fig. 14 Experimental setup for dimensional parameters and load measurement

表 2 两种构型夹持器的尺寸与负载参数

Table 2 Dimensional and load parameters of the two configurations

| 夹持器构型 | 夹持臂长度 A/mm | 夹持器最大展开宽度 B/mm | 负载/N |
|-------|------------|----------------|------|
| 3 关节 | 63 | 83 | 14 |
| 4 关节 | 84 | 96 | 20 |

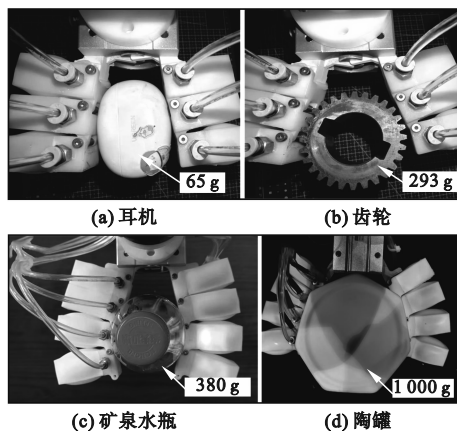


图 15 不同构型夹持器的稳定抓取实验

Fig. 15 Stable grasping experiments of different configurations

得到提升,能够成功抓取矿泉水瓶(约 380 g)、陶罐(约 1 000 g)等物体。夹持器在水平抓取重物时夹持臂无明显挠曲变形,因此,夹持器未出现常见软体夹持器因结构刚度不足而导致的变形或下坠现象。

5 结论

1) 本文设计并验证了一种气动刚柔耦合夹持器,该夹持器有效融合了刚性结构的稳定性与软体结构的适应性。

2) 为预测夹持器弯曲性能,构建了从材料本构到宏观运动的多级解析模型。通过 4 关节构型夹持臂的理论预估、仿真分析与实验测试三方结果对比,验证了模型的准确性(相对误差小于 0.02%)。

3) 通过弯曲与夹持性能测,试夹持器最大偏转角度可达 20°,夹持负载约 20 N,表明夹持器具具备较好的弯曲性能与承载能力。

本文提供了一套具有较高精度的解析预估模型,为探索具有不同关节数量的夹持器在设计空间、预测性能方面提供理论基础,同时为柔性抓取技术在复杂、非结构化环境下的应用提供新的设计思路。

参考文献(References):

- [1] Dzedzickis A, Petronienė J J, Petkevičius S, et al. Soft grippers in robotics: progress of last 10 years [J]. *Machines*, 2024, 12(12): 887.
- [2] Abozaid Y A, Aboelrayat M T, Fahim I S, et al. Soft robotic grippers: a review on technologies, materials, and applications [J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2024, 372: 115380.
- [3] Meng X Y, Xie J Q, Pang H R, et al. Design of dielectric elastomer actuator and its application in flexible gripper [J]. *Micromachines*, 2025, 16(1): 107.
- [4] Pan J, Yu J J, Pei X. A novel shape memory alloy actuated soft gripper imitated hand behavior [J]. *Frontiers of Mechanical Engineering*, 2022, 17(4): 44.
- [5] Xu M, Liu Y, Li J L, et al. Review of flexible robotic grippers, with a focus on grippers based on magnetorheological materials [J]. *Materials*, 2024, 17(19): 4858.
- [6] Hiremath S, Mathias K A, Kim T W. 3D-Printed soft pneumatic actuators: enhancing flexible gripper capabilities [J]. *ROBOMECH Journal*, 2025, 12(1): 26.
- [7] Xu S M, Du H M, Zhang S S, et al. A pneumatic fingerless soft gripper for envelope gripping [J]. *Actuators*, 2024, 13(10): 418.
- [8] Li L T, Crosby D, Shuttleworth M, et al. A comparative analysis and scoping review of soft - rigid and industrial parallel rigid grippers [J]. *Advanced Intelligent Systems*, 2025, 7(5): 2400503.
- [9] Navas E, Shamshiri R R, Dworak V, et al. Soft gripper for small fruits harvesting and pick and place operations [J]. *Frontiers in Robotics and AI*, 2024, 10: 1330496.
- [10] Liu Y X, Hou J X, Li C Y, et al. Intelligent soft robotic grippers for agricultural and food product handling: a brief review with a focus on design and control [J]. *Advanced Intelligent Systems*, 2023, 5(12): 2300233.

(下转第 74 页)

- (5):135-140.
- Liu A Q, Li Q, Shi X Q, et al. Simulation and optimization of extractive dividing wall column for cyclohexane/cyclohexene separation [J]. *Petroleum Processing and Petrochemicals*, 2024, 55(5):135-140. (in Chinese)
- [9] Huang J H, Zhang Q J, Liu C J, et al. Optimal design of the ternary azeotrope separation process assisted by reactive-extractive distillation for ethyl acetate/isopropanol/water [J]. *Separation and Purification Technology*, 2023, 306:122708.
- [10] Pan C, Liu Y P, Hu Y F, et al. Heat integrated extractive coupled pressure-swing distillation with dividing wall column technology for separating phenol/pyridine from coal gasification wastewater [J]. *Chemical Engineering Science*, 2025, 304:121038.
- [11] Labarta J A, Olaya M M, Marcilla A F. What does the NRTL model look like? Determination of boundaries for different fluid phase equilibrium regions [J]. *AIChE Journal*, 2022, 68(10):e17805.
- [12] Smith T E, Bonner R F. Vapor-liquid equilibrium still for partially miscible liquids [J]. *Industrial & Engineering Chemistry*, 1949, 41(12):2867-2871.
- [13] Ma Z Y, Yao D, Zhao J G, et al. Efficient recovery of benzene and *n*-propanol from wastewater via vapor recompression assisted extractive distillation based on techno-economic and environmental analysis [J]. *Process Safety and Environmental Protection*, 2021, 148:462-472.
- [14] Yerazunis S, Plowright J D, Smola F M. Vapor-liquid equilibrium determination by a new apparatus [J]. *AIChE Journal*, 1964, 10(5):660-665.
- [15] Iqbal A, Ahmad S A. Pressure swing distillation of azeotropic mixture; a simulation study [J]. *Perspectives in Science*, 2016, 8:4-6.
- [16] 李进龙,袁本峰,叶贞成. COSMO-SAC 模型预测含丙三醇体系的汽液相平衡 [J]. *计算机与应用化学*, 2017, 34(3):217-221.
- Li J L, Yuan B F, Ye Z C. Prediction of vapor-liquid phase equilibrium for binary mixture containing glycerol with COSMO-SAC [J]. *Computers and Applied Chemistry*, 2017, 34(3):217-221. (in Chinese)
- [17] 戚律,崔佳,徐荣,等. COSMO-SAC 法筛选环戊烷/新己烷分离萃取剂及过程模拟 [J]. *常州大学学报(自然科学版)*, 2021, 33(5):43-49.
- Qi L, Cui J, Xu R, et al. Solvents screening for extractive distillation of cyclopentane and neohexane based on COSMO-SAC model and process simulation [J]. *Journal of Changzhou University (Natural Science Edition)*, 2021, 33(5):43-49. (in Chinese)
- [18] 孙小情,党明岩. 萃取精馏分离丙酮-正庚烷的模拟与优化 [J]. *沈阳理工大学学报*, 2023, 42(3):68-74.
- Sun X Q, Dang M Y. Simulation and optimization of extractive distillation for separation of acetone and *n*-heptane [J]. *Journal of Shenyang Ligong University*, 2023, 42(3):68-74. (in Chinese)
- [19] 程晓鹏. 甲苯氧化制苯甲酸反应-分离循环全流程稳态序贯模拟的迭代求解与工艺优化 [D]. 北京:中国石油大学(北京), 2021.

(责任编辑:宋颖韬)

(上接第66页)

- [11] 王国权,刘萌,姚艳春,等. 不同本构模型对橡胶制品有限元法适应性研究 [J]. *力学与实践*, 2013, 35(4):40-47.
- Wang G Q, Liu M, Yao Y C, et al. Application of different constitutive models in the nonlinear finite element method for rubber parts [J]. *Mechanics in Engineering*, 2013, 35(4):40-47. (in Chinese)
- [12] 闫昱全,宋国臣. 基于 Mooney-Rivlin 模型的船用密封圈设计及试验验证 [J]. *橡胶科技*, 2023, 21(7):325-329.
- Yan Y Q, Song G C. Design and experimental verification of marine sealing ring based on mooney-rivlin model [J]. *Rubber Science and Technology*, 2023, 21(7):325-329. (in Chinese)
- [13] Liu X M, Wang Y Q, Geng D X, et al. Mechanical characteristics analysis on PAM with elongation and torsion [C]//2011 International Conference on Mechatronic Science, Electric Engineering and Computer (MEC). Jilin, China. IEEE, 2011:613-616.
- [14] Dong D, Li X N. Development of a novel parallel-spool pilot operated high-pressure solenoid valve with high flow rate and high speed [J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2015, 28(2):369-378.
- [15] 黄建龙,解广娟,刘正伟. 基于 Mooney-Rivlin 模型和 Yeoh 模型的超弹性橡胶材料有限元分析 [J]. *橡胶工业*, 2008, 55(8):467-471.
- Huang J L, Xie G J, Liu Z W. FEA of hyperelastic rubber material based on Mooney-Rivlin model and Yeoh model [J]. *China Rubber Industry*, 2008, 55(8):467-471. (in Chinese)
- [16] 郑明军,王文静,陈政南,等. 橡胶 Mooney-Rivlin 模型力学性能常数的确定 [J]. *橡胶工业*, 2003, 50(8):462-465.
- Zheng M J, Wang W J, Chen Z N, et al. Determination for mechanical constants of rubber Mooney-Rivlin model [J]. *China Rubber Industry*, 2003, 50(8):462-465. (in Chinese)
- [17] 董虎,王保兴,李巍,等. 基于单向气动驱动器的软体手变形机理 [J]. *东华大学学报(自然科学版)*, 2020, 46(2):288-296,303.
- Dong H, Wang B X, Li W, et al. The deformation mechanism of soft hand based on one-way pneumatic actuator [J]. *Journal of Donghua University (Natural Science)*, 2020, 46(2):288-296,303. (in Chinese)
- [18] 王玲,张驻军,吴鑫,等. 硬度耦合刚度增强型软体夹持器设计研究 [J]. *机械设计*, 2024, 41(2):22-31.
- Wang L, Zhang Z J, Wu X, et al. Design and research of soft holder with hardness coupling and stiffness enhancement [J]. *Journal of Machine Design*, 2024, 41(2):22-31. (in Chinese)

(责任编辑:徐淑姣)