

混合阻塞变刚度软手指设计与实验

李东民 马文平 王 雨 方佳琪 张国辉 丁国伟

(山东科技大学智能装备学院, 泰安 271019)

摘要: 为了解决单一阻塞介质变刚度软机械手抓取复杂外形物体效果不佳的问题,受人体手指结构启发,设计了一种仿指腹结构的混合阻塞变刚度软手指。将其设计为双层结构,外层为气动驱动器,内层为基于主动层干扰与被动颗粒阻塞的混合阻塞变刚度层,使得软手指自动贴合被抓取对象,实现主动驱动的被动适应,并通过调整刚度实现可靠抓取。基于传统缝纫工艺,采用超弹性硅胶材料制造软手指。采用 Euler - Bernoulli 梁理论和虚功原理,建立了基于悬臂梁结构下的多材料软手指的刚度控制模型,并据此提出增大整体刚度的材料筛选方法。弯曲特性实验表明软手指的弯曲性能优异。变刚度和抓取实验结果表明,混合阻塞软手指刚度增大 4.6 倍,建立的刚度模型最大相对误差为 3.4%;在抓取对象表面粗糙度增大的条件下,软手指拉脱力仍增大 17%,达到 1.7 N;相较于单阻塞介质软手指,抓取成功率和承载能力均得到显著提高。

关键词: 软手指; 变刚度; 混合阻塞; 层干扰

中图分类号: TP241 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2024)01-0436-10

OSID:



Design and Experiment of Hybrid Jamming Variable Stiffness Soft Finger

LI Dongmin MA Wenping WANG Yu FANG Jiaqi ZHANG Guohui DING Guowei

(College of Intelligent Equipment, Shandong University of Science and Technology, Taian 271019, China)

Abstract: In order to improve the grasping effect on complex shaped objects of the variable stiffness soft robotic arm with a single jamming medium, inspired by the structure of human fingers, a variable stiffness soft finger with hybrid jamming methods imitating the finger pulp structure was designed. It was a double-layer structure, where the outer layer was used for a pneumatic actuator, and the inner layer was used for a variable stiffness layer with hybrid jamming methods based on active layer jamming and passive particle jamming methods, which can facilitate the soft fingers to fit the profiles of objects grasped automatically, and achieve the effects of passive adaptation under active driving, and objects grasping reliably by stiffness adjustment. Based on the traditional sewing techniques, the soft fingers were manufactured with hyperelastic silicone material. A stiffness control model for multi-material soft fingers based on cantilever beam structure was established by using Euler - Bernoulli beam theory and virtual work principle, furthermore, a selection rule to increase the overall material stiffness was proposed based on the stiffness control model. Experimental results on bendability showed the excellent bendability of the soft fingers. Besides, the stiffness variation and objects grasping experimental results showed that the stiffness of the soft fingers with hybrid jamming method was increased by 4.6 times, and the maximum relative error of the stiffness control model established was only 3.4%. Despite of increasing the surface roughness of the objects grasped, the detachment force of the soft fingers was still increased by 17%, which reached 1.7 N. Therefore, compared with the soft fingers with single jamming medium, the grasp success rate and load capacity were improved significantly.

Key words: soft finger; variable stiffness; hybrid jamming; layer jamming

收稿日期: 2023-06-05 修回日期: 2023-07-27

基金项目: 国家自然科学基金项目(52174145)、山东省自然科学基金项目(ZR2021MF120、ZR2020MF101)、山东省高等学校科技计划项目(J18KB020)和泰安市科技创新发展项目(2021GX052)

作者简介: 李东民(1977—),男,副教授,博士,主要从事软体机器人、流体动力与控制 and 机器学习研究,E-mail: ldm753@163.com

0 引言

近年来,软体机器人备受瞩目^[1]。软体机器人的本体通常由柔性材料制成,具有高度的柔性和可变形性,这些特性使得软体机器人不需要复杂控制方案即可实现环境自适应。

软手指常作为软体机器人的组成部分,其结构刚度、输出力较低,且抗干扰能力有限,难以抓取大负载物体^[2]。因此,变刚度成为软手指增强能力和拓展应用的重要技术之一。变刚度软手指的理想目标是在接触物体时保持柔软,一旦抓取即迅速转换为高刚度状态。现有变刚度技术包括:通过结构之间的相互作用实现变刚度,如对抗布置^[3]、阻塞作用;通过诱导材料物理或化学特性发生变化实现变刚度,如形状记忆材料^[4]、低熔点材料^[5]、电/磁流变液^[6]等。其中,基于阻塞原理的变刚度技术可控性更强,响应速度更快,变刚度范围更大^[7]。

根据阻塞结构中介质材料的不同,基于阻塞原理的变刚度技术可以划分为两个类别,即采用颗粒材料的颗粒阻塞变刚度和采用层状材料的层干扰变刚度。在阻塞变刚度技术研究过程中,颗粒阻塞现象作为一种相变现象被研究^[8]。文献[9]将颗粒阻塞作用应用于一种通用软体夹持器,使其不需要主动反馈即可抓取大量形状不规则的物体。文献[10]建立了两层层干扰结构的解析模型和有限元模型,并提出了新一代通用层干扰结构的形状锁定、变运动学等概念。文献[11]结合主动驱动的网络气动结构与被动驱动的阻塞机构优势,提出了实时变刚度的软体驱动器,并利用赫兹接触模型,建立机器人运动数学模型。

软手指形状自适应极大地影响抓取操作的灵活性与可靠性。文献[12]提出了用于自适应抓取的变刚度软夹持器,其结合纤维增强软致动器和颗粒阻塞作用设计了软手指,其为单一阻塞介质的夹持器,无法兼顾刚度调节和自适应抓取。文献[13]在软机械臂中嵌入一种轻量化的线驱动颗粒阻塞机构,以实现柔顺接触和负载操作的任务,但其关节刚度和绳索长度存在耦合,无法独立控制。文献[14]利用层干扰的变刚度特性和颗粒阻塞的关节硬化作用,设计了双模式仿生软体机械手,实现了连续曲率和离散曲率的弯曲运动,但其输出力未显著提高。

阻塞结构通常由柔性密封腔和阻塞介质组成。当腔内通入真空压力时,阻塞介质之间通过摩擦力产生强烈耦合,从而导致其刚度急剧变化。常用的阻塞介质材料包括:颗粒材料,如咖啡渣^[15]、实心玻璃微珠、食盐等;层状材料,如纸张^[16-17]、PET(聚对

苯二甲酸乙二醇酯)、砂纸等。上述两种介质材料的特点不同,如提高相同的刚度,采用层状材料的层干扰结构比颗粒阻塞结构可占用更少的空间^[18],但颗粒阻塞的表面顺应性更强,抓取更牢固。

现有变刚度软手指普遍采用单一介质方式,抓取效果不佳。为解决该问题,本文结合两种阻塞介质的刚度特性,设计一种仿指腹结构的混合阻塞变刚度软手指,实现软手指变刚度与形状自适应抓取。采用 Euler-Bernoulli 梁理论和虚功原理,建立基于悬臂梁结构的多材料软手指的刚度控制模型。通过弯曲特性实验,验证软手指的弯曲性能。通过变刚度与抓取实验测试其抓取操作的负载能力及可靠性。

1 软手指设计

1.1 人体手指抓握机理

仿人手指软体机械手通常关注手指关节设计,文献[19]提出了气动弯曲关节和侧摆关节,分别模拟人体手指的弯曲运动和侧摆运动。人手灵活性高,可胜任多种任务,除了多关节、多自由度的骨骼结构外,很大程度依赖于柔软的指腹和可变刚度的指部肌腱。其工作原理如图 1 所示,人手抓握物体时,由表皮和皮下脂肪组成的指腹形成褶皱并紧密贴合物体轮廓,肌腱和韧带绷紧以提高刚度,从而增大手指抓握力。受到上述原理的启发,结合颗粒阻塞的柔顺性和层干扰可变刚度特性,设计仿指腹结构的变刚度软手指。

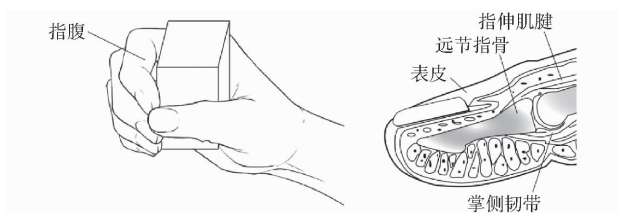


图 1 指腹在物体抓握中的作用

Fig. 1 Role of finger pulp in object grasping

1.2 软手指结构设计

基于指腹结构的变刚度软手指模型如图 2 所示,由外层气动驱动器以及内层混合阻塞结构和应变限制层组成。其中,外层为高驱动效率的多段式矩形气腔结构^[20];内层包括层干扰结构、应变限制层及颗粒阻塞结构,以提高变刚度的灵活性。层干扰结构和颗粒阻塞结构分别为采用层状材料和颗粒材料作为阻塞介质的阻塞变刚度层。应变限制层,即由软手指基板处嵌入的纸张等低弹性层状材料组成的结构。其显著特点是具有较高的轴向刚度,使得在软手指弯曲过程中,应变限制层所在平面的轴

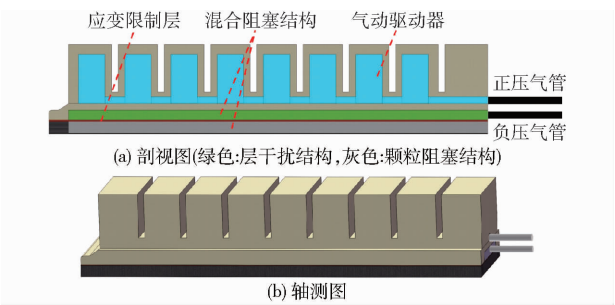


图 2 变刚度软手指模型

Fig. 2 Models of variable stiffness soft finger

向伸长可以被忽略。同时,应变限制层与低轴向刚度的气腔结构在软手指模型中相互作用,形成刚度差,从而使得软手指向应变限制层一侧弯曲,并使软手指的弯曲运动轨迹保持在同一平面上。此外,应变限制层还起到分隔层干扰结构和颗粒阻塞结构的作用。

气动驱动器每段气腔前后壁相比于侧壁具有更小的厚度和更大的表面积。因此,正压增加时会优先扩张前后壁,并使侧壁上产生的应变最小;另外,两相邻腔室的距离较近,膨胀后前后壁相互推挤,进一步增大弯曲变形范围。基于弹性力学理论可知,最大应变发生在指尖处,因此,通过增大指尖壁面厚度,可提高软手指的破裂强度。软手指气动驱动器和层干扰结构分别由正、负压气泵提供动力。

1.3 阻塞变刚度原理

在外界压力作用下,阻塞介质(颗粒或层状材料)之间的摩擦力迅速增大,从而引起材料从流动状态向固态或刚性状态的转变。如图 3a 所示,当柔性薄膜包裹的层状材料在受到外部集中力时,真空压力作用产生的层与层之间的摩擦力和薄膜左右侧施加的压力阻碍了其进一步弯曲。

由阻塞原理可知,不同阻塞介质呈不同特性。因层状材料具有良好的回弹性,变刚度关闭后易恢复到初始状态,故其变刚度效果容易控制。如图 3b 所示,颗粒材料在真空压力作用下具有良好的顺应性,能

紧密接触并贴合物体外形轮廓。但真空消失后,颗粒间呈无序流动,极易导致局部堆积、定位错误。基于上述两种介质特性,提出主动层干扰和被动颗粒阻塞相结合的混合阻塞变刚度方法(即层干扰通过真空压力主动驱动,颗粒阻塞则通过软手指的弯曲使颗粒层收缩实现被动驱动),实现软手指形状顺应性与变刚度控制。

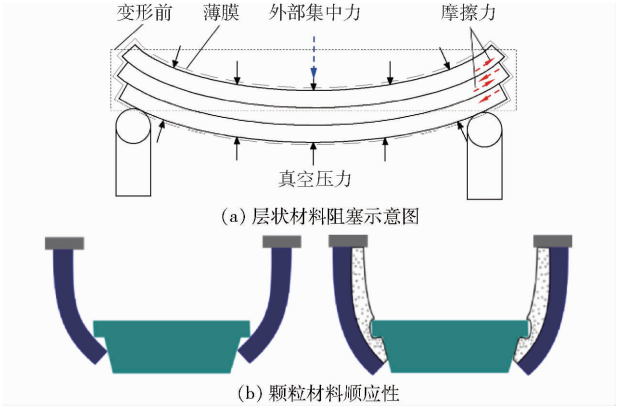


图 3 两种阻塞介质特性对比

Fig. 3 Comparisons of characteristics between two types of jamming media

1.4 软手指

根据本文所设计的软手指双层结构,采用低弹性模量的硅胶材料(Smooth-On, Ecoflex-0050)作为气动驱动器的制造材料。该材料具有良好的相容性,因此可通过模具分步制造,如图 4a~4c 所示。首先,将混合好的液态硅胶放置在真空室消除气泡;然后,采用 3D 打印技术制造气动驱动器模具,通过浇注硅胶制造驱动器腔体和基板,并在基板半凝固状态时嵌入矩形纸片作为应变限制层;最后,在腔体和基板的连接处涂覆一层硅胶,使其粘接成一个整体。

混合阻塞结构制造过程如图 4d~4f 所示。层状材料采用易裁剪、柔软但无弹性的纸张材料。颗粒材料采用轻质、填充性好的粗咖啡颗粒。制作时,首先利用裁纸机将纸张切割成多条 110 mm ×

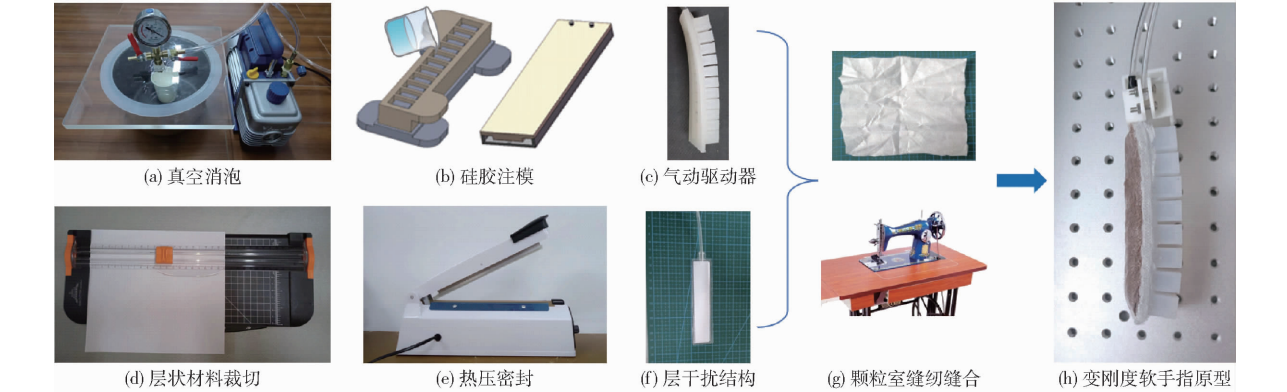


图 4 变刚度软手指设计过程

Fig. 4 Design process of variable stiffness soft fingers

20 mm 的矩形,再通过热压机将其密封在热塑性聚氨酯弹性体 (TPU) 薄膜内;然后将层干扰结构 (图 4f) 装配到驱动器底部腔室,采用有机密封胶 (卡夫特, K-705 型) 对腔室口进行黏合固定;接着采用缝纫中的缝合工艺 (图 4g), 将布条边缘覆盖在驱动器翼板处制作成囊状结构,再倒入颗粒材料并封口 (图 4h)。致密的缝纫线能有效避免颗粒泄漏, 布料的透气性有利于颗粒室被动收缩时多余气体的排出。

2 软手指结构刚度模型

2.1 层干扰结构刚度控制

为避免气动驱动器弯曲时的轴向舒缓作用对混合阻塞结构的变刚度性能产生影响,采用 2 种措施: ①将弯曲变形和变刚度过程分离,即分步激活弯曲变形和变刚度。②在结构设计中,将层干扰和颗粒阻塞结构紧邻中性层 (应变限制层) 装配。如图 5 所示,初始状态下,软手指不受气压作用,处于自然伸长状态;当软手指靠近被抓取物体时,通过向气动驱动器通入正压 P_+ ,使软手指产生弯曲变形并抓握物体;然后,向层干扰结构通入负压 P_- ,激活层干扰结构的变刚度功能,使软手指的刚度增大。从而实现对混合阻塞结构的力学模型的构建,而不需考虑弯曲作用。

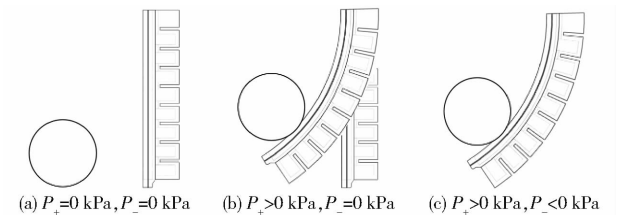


图 5 软手指的主动刚度控制过程

Fig. 5 Active stiffness control process of soft fingers

层干扰结构依靠真空压力产生层与层之间的摩擦力,因此,根据外力与最大摩擦力关系将层干扰的刚度变化划分为预滑移、部分滑移、完全滑移 3 个阶段^[10]。其中,预滑移阶段的外力始终小于最大摩擦力,且刚度最大。通过对预滑移阶段的刚度进行建模,提出外载荷作用下保持最大刚度的控制策略。

根据两层干扰结构刚度的解析模型^[10]与软手指抓取操作中的受力形式,将层干扰结构建立为真空压力 P_1 下的悬臂梁结构,如图 6 所示。

由图 6 可见,层状材料高度 h 远小于其长度 L_0 。为简化计算,仅讨论在 xy 平面的变形,假设层干扰结构产生小变形,并忽略边缘效应。基于 Euler - Bernoulli 梁理论^[21],建立单层层干扰结构的轴向应

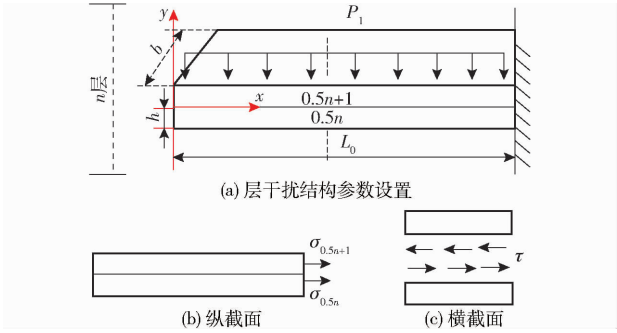


图 6 层干扰结构力学模型

Fig. 6 Mechanical models of layer jamming structures

力场表达式为

$$\sigma_i(x, y) = -E_c k(x) y \quad (1)$$

式中 $k(x)$ ——弯曲界面曲率

E_c ——层状材料弹性模量

在预滑移阶段,层状材料之间由于摩擦力作用相互耦合,可以当作截面宽度为 b 、截面高度为 nh 的梁结构。因此, n 层层干扰结构合力矩为

$$M(x) = \sum_{i=1}^n \int_S -\sigma_i(x, y) y ds = 2k(x) E_c I_c \quad (2)$$

其中

$$I_c = b(nh)^3 / 12$$

式中 I_c ——层状材料惯性矩

对于固支在 $x = L$ 处的具有压力梯度 P_1 的悬臂梁结构,其产生的剪力为

$$F_s(x) = P_1 x \quad (0 \leq x < L_0) \quad (3)$$

虽然软手指的整个挠曲变形不能被视为小变形 (如 Euler - Bernoulli 梁理论的假设),但本文的变形研究范围为力与位移曲线的线性部分。根据层干扰结构的几何特征和刚度测试的加载位置可知,挠曲变形范围要求不得超过 10 mm,远小于结构总长度 L_0 。此外,刚度测试时,软手指弯曲角被设为 0° (驱动气压为 0 kPa),符合小变形假设。因此,曲率可近似表示为

$$k(x) \approx \frac{d^2 w}{dx^2} \quad (4)$$

式中 w ——软手指位移

中性层合力矩为

$$M(x) = 0.5 P_1 x^2 \quad (0 \leq x < L_0) \quad (5)$$

在预滑移阶段,结构具有内聚倾向,因此,基于摩擦力控制方程,将式 (5) 代入式 (2) 并求解,可得

$$\frac{d^2 w}{dx^2} = \frac{M(x)}{2E_c I_c} = \frac{3P_1 x^2}{E_c b n^3 h^3} \quad (6)$$

两端边界条件为

$$\begin{cases} w(L) = 0 \\ \frac{dw}{dx}(L) = 0 \end{cases} \quad (7)$$

因此,对式 (6) 进行双重积分,得

$$w(x) = \frac{3P_1}{E_c b n^3 h^3} \left(\frac{1}{12} x^4 - \frac{1}{3} x L_0^3 + \frac{1}{4} L_0^4 \right) \quad (8)$$

通过载荷与自由端挠度之间的微分关系可得有效刚度为

$$K_c = - \left. \frac{\partial F_s}{\partial w} \right|_{x=0} \quad (9)$$

将式(3)、(8)代入式(9),得到 n 层层干扰结构刚度计算式为

$$K_c = \frac{\partial F_s / \partial x}{\partial w / \partial x} = \frac{E_c b n^3 h^3}{L_0^3} \quad (10)$$

随着外荷载 F 的增加,界面处纵向剪应力随之增加。根据材料力学理论,矩形截面最大剪应力发生在中性轴处,计算式为

$$\tau = \frac{3F_0}{2A} \quad (11)$$

其中 $A = nbh$

式中 τ ——最大剪应力

F_0 ——滑移前最大荷载

A ——层状材料截面面积

b ——层状材料宽度

由于层状材料界面处的最大剪应力即为摩擦极限,即 $F_0 = 2\mu P_1 A/3$,从而可得层干扰结构保持最大刚度的控制方程,即 $F < 2F_0$ 。由于层干扰结构始终处于预滑移阶段,且刚度最大,因此,可得关系式

$$P_1 > \frac{3F}{4\mu A} \quad (12)$$

式中 μ ——层状材料之间的摩擦因数

2.2 颗粒阻塞结构刚度

球形颗粒在挤压作用下的定位和堆积过程大致可划分为3个阶段:①空间足够大,颗粒因重力作用而堆积。②过渡阶段。③受压形成紧密的六方堆积结构^[14]。根据颗粒堆积机理可知,存在阈值 θ_0 ,使得弯曲角 $\theta > \theta_0$ 时,驱动器压紧颗粒,使其相互阻塞,软手指刚度随之增大。

基于悬臂梁结构,建立软手指力学模型如图7所示。软手指弯曲时,应变限制层所在平面长度 L_0 变化较小,可忽略不计;此时,软手指内部的颗粒室被压缩,外部驱动气腔伸长。

颗粒流动具有不确定性,因此,在颗粒阻塞刚度计算中,基于虚功原理,对指尖施加外力 F_R ,从而产生对应的虚位移 Δ_s ,得到其刚度表达式为

$$K_p = \frac{F}{\Delta_s} = \frac{W_f}{\Delta_s^2} \quad (13)$$

式中 W_f ——颗粒移动引起的整体摩擦功

在弯曲过程中,由颗粒层之间的摩擦力作用产

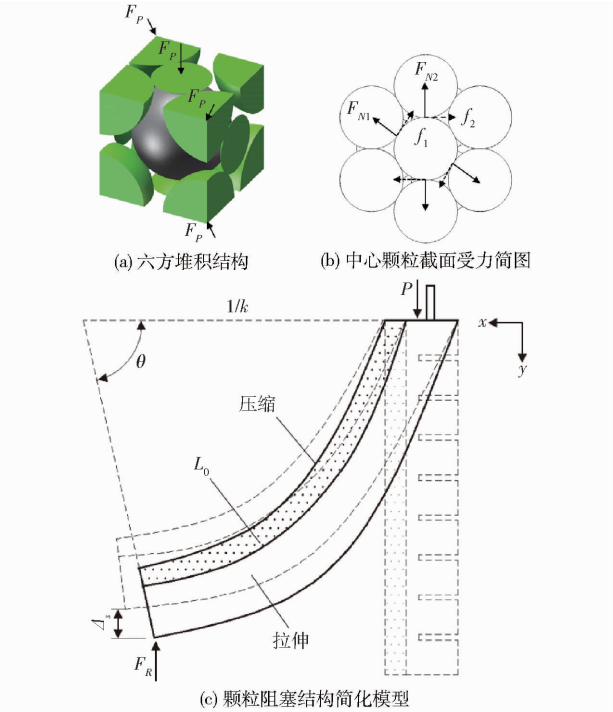


图7 软手指力学模型示意图

Fig.7 Mechanical models of soft fingers

生的阻塞机制影响软手指的整体结构刚度,因此,该过程整体做功为

$$W = F_R \Delta_s = W_g + W_c + W_f \quad (14)$$

式中 W_g ——硅胶材料变形产生的功

W_c ——层干扰结构变形产生的功

考虑到层干扰结构和硅胶材料的刚度影响,根据悬臂梁理论得到

$$W_g + W_c = \frac{3I \Delta_s \bar{E}}{L_0^3} \quad (15)$$

其中

$$I = \frac{b(nh)^2}{12} + \frac{b(nh)^3}{4} + \frac{BH^2 - (B-2t)(H-2t)^3}{12} + \frac{H^2(-4t^2 + 2tH + 2tB)}{2}$$
$$\bar{E} = \nu E_c + (1 - \nu E_g)$$

式中 I ——颗粒材料惯性矩

ν ——合材料体积分数

$\bar{E}$ ——平均弹性模量

E_g ——硅胶弹性模量

B ——气动驱动器截面宽度

H ——气动驱动器截面高度

t ——气动驱动器壁面厚度

颗粒总数 N 和层数 m 计算式分别为

$$N = \frac{3M}{4\pi r^3 \rho} \quad (16)$$

$$m = L_0 / (2r) \quad (17)$$

式中 M ——颗粒总质量 ρ ——颗粒密度

r ——颗粒平均半径

颗粒阻塞作用由气囊收缩被动产生,因此 x 方向的受力和相应位移可以忽略不计,且颗粒间因受到相互作用力而处于准静态。通过静力学分析可得单个颗粒受到的法向力 F_{N1} 和摩擦力 f_1 分别为

$$F_{N1} = \sqrt{3}F_p/3 = \sqrt{3}A(P_s - P_0)/3 \tag{18}$$

$$f_1 = u_f F_{N1} = \sqrt{3}u_f A(P_s - P_0)/3 \tag{19}$$

其中
式中 A ——颗粒占据的有效面积

u_f ——颗粒间摩擦因数
 P_s ——颗粒室受到压缩产生的压力
 P_0 ——软手指弯曲 θ_0 对应的压力

基于 Mooney - Rivlin 本构方程推得橡胶材料的压力-半径关系式^[22],修正后得到

$$P_s = \frac{2|S_-|t_0}{\lambda_1\lambda_2^2g_0}\left(\lambda_1^2 - \frac{1}{\lambda_1^2\lambda_2^2}\right)(S_p + \lambda_2^2) \tag{20}$$

其中 $S_p = -S_+/S_-$

式中 $t_0、g_0$ ——橡胶初始厚度和宽度
 $\lambda_1、\lambda_2$ ——轴向和周向伸长比
 $S_+、S_-$ ——弹性系数, S_+ 取 300 kPa, S_- 取 -30 kPa
 S_p ——弹性比例

软手指弯曲变形时,轴向变形远大于周向变形,因此 $\lambda_2 = 1$ 。假设软手指为常曲率弯曲,其轴向伸长比和位移可表示为

$$\begin{cases} \lambda_1 = \theta/\sin\theta \\ \Delta_s = (1 - \cos\theta)/k \end{cases} \tag{21}$$

在图 7 所示的六方紧密堆积结构中,每个颗粒受到 4 个摩擦力作用。边界条件为:靠近指尖的颗粒受到蒙皮挤压,而靠近固定端的颗粒接近静止。假设不同层颗粒对摩擦功的有效位移的贡献线性递减,则第 i 层位移为

$$\Delta_i = -(i-1)\Delta_s/m + \Delta_s \quad (i = 1, 2, \cdots, m) \tag{22}$$

为简化计算,引入平均位移的概念,即 $\overline{\Delta_s} = 0.5\Delta_s$ 。可得颗粒阻塞摩擦功 W_f 为

$$W_f = Nm w_{f1} = 4Nm \cos 30^\circ f_1 \overline{\Delta_s} = \sqrt{3}NL_0 u_f r \Delta_s (P_s - P_0) \tag{23}$$

将式(23)代入式(13),得到被动颗粒阻塞刚度表达式为

$$K_p = \sqrt{3}NL_0 u_f r (P_s - P_0) / \Delta_s = \frac{\sqrt{3}NL_0 u_f r k (P_s - P_0)}{1 - \cos\theta} \quad (P_s \geq P_0) \tag{24}$$

其中, P_s 由式(20)给出。因此,被动颗粒阻塞刚度 K_p 只与弯曲角 θ 和弯曲曲率 k 有关。

2.3 整体结构刚度

基于所设计软手指的多材料结构可知,软手指

整体结构刚度 K 为层干扰结构刚度 K_c 、驱动器刚度 K_g 及颗粒阻塞结构刚度 K_p 的组合,即

$$K = K_g + K_p + K_c \tag{25}$$

当驱动气压为 0 时,软手指仅有外层气动驱动器起作用,此时,可测得气动驱动器的固有结构刚度。此外,气动驱动器的硅胶材料在小应变范围内,其应力与应变近似为线性^[23]。因此,将气动驱动器近似看作线弹性梁,其刚度计算为

$$K_g = \frac{3E_g I_g}{L_0^3} \tag{26}$$

综上,由式(10)、(24)~(26)可得,软手指整体刚度为

$$K = \frac{\sqrt{3}NL_0 u_f r k (P_s - P_0)}{1 - \cos\theta} + \frac{3E_g I_g}{L_0^3} + \frac{E_c b n^3 h^3}{L_0^3} \tag{27}$$

由式(27)可知,当软手指弯曲不同角度时,被动颗粒阻塞结构的刚度会随之改变,且整体刚度 K 与软手指构型参数(弯曲角 θ 、弯曲曲率 k)有关,而气动驱动器与层干扰结构的刚度均与软手指构型参数无关,为精确控制软手指的刚度提供了理论依据。

3 实验与结果分析

3.1 弯曲特性实验

依据人体手指结构特征及常见水果等抓取对象尺寸,软手指原型主要结构参数如表 1 所示,其中气动驱动器关键尺寸参数如图 8 所示。

表 1 软手指结构参数

Tab.1 Structural parameters of soft fingers

参数	数值
纸张宽度 g/mm	20
纸张高度 h/mm	0.1
纸张层数 n	20
颗粒半径 r/mm	1
颗粒质量 M/g	20
气动驱动器长度 L/mm	127
应变限制层长度 L_0/mm	110

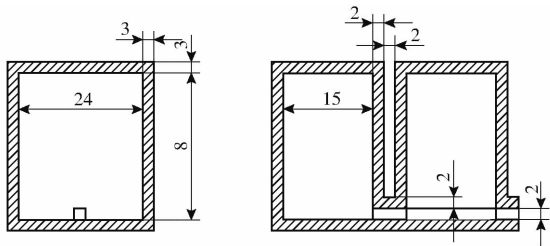


图 8 气动驱动器结构参数

Fig.8 Structural parameters of pneumatic actuators

通过硅胶材料拉伸实验对比 Neo - Hooken、Mooney - Rivlin、Yeoh 等超弹性模型的适用范围,其中 Mooney - Rivlin 模型在等效应变 200% 以下准确

度高且计算量小^[24]。不含颗粒室的软手指有限元分析结果如图 9 所示,最大实验压力(70 kPa)下产生的等效应变最大值为 21.207%,由上述模型特点,选择 Mooney – Rivlin 二参数模型建立硅胶材料的非线性应力应变关系。

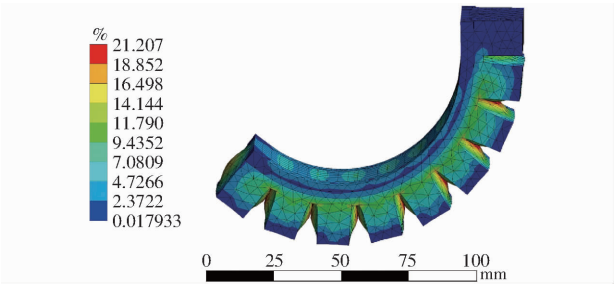


图 9 不含颗粒室的软手指有限元仿真结果
Fig. 9 Simulation results of soft fingers without particle chamber using finite element analysis

其中,材料系数 C_{10} 、 C_{01} 根据开源数据库^[25] 计算可得 $C_{10} = 0.767$ 、 $C_{01} = -0.397\ 3$,设置材料密度为 $1\ 042\ \text{kg}/\text{m}^3$,层干扰结构采用矩形柔性板形式。软手指底端为固定约束,为每个气囊的前后壁面接触域添加无摩擦接触,以解决大变形下气囊间相互接触而无法收敛的问题。经过多次仿真和实物实验,发现软手指的弯曲响应时间远小于 $2\ \text{s}$,因此仿真条件设定为 $2\ \text{s}$ 内,使气动驱动器的壁面压力从 $0\ \text{kPa}$ 线性增加到 $70\ \text{kPa}$,从而得到不同压力下软手指弯曲变形特征。图 9 为随机截取压力 $70\ \text{kPa}$ 下的仿真结果。

弯曲实验装置如图 10 所示,采用 3D 打印的夹具将软手指底部竖直固定于支架横梁上,将正负压气管分别连接至气泵的对接口,在支架正面设置高帧率数码相机进行拍照记录。

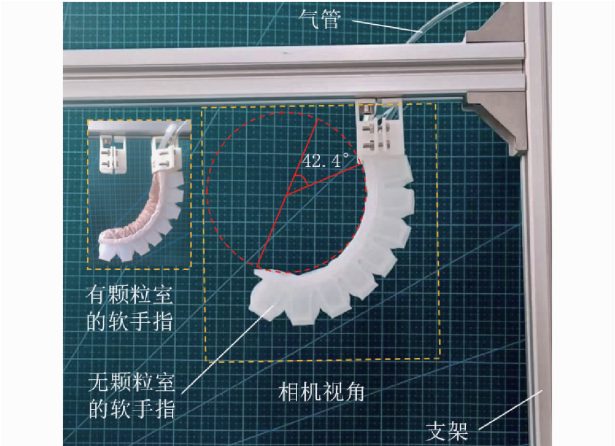
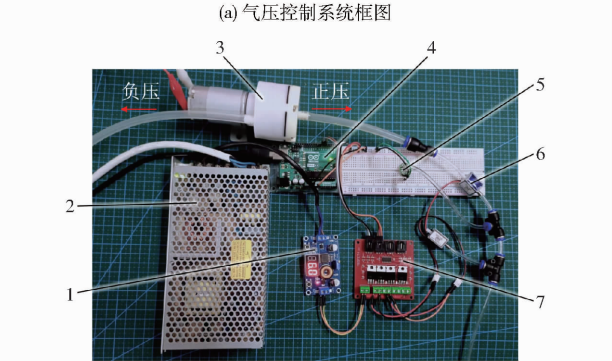
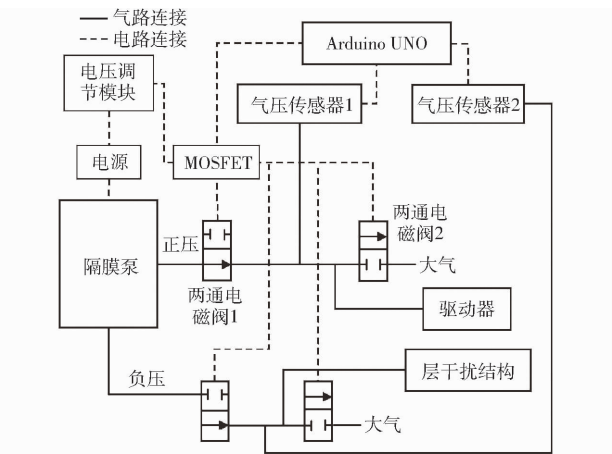


图 10 弯曲特性实验设置
Fig. 10 Experimental setup for bending characteristics

设计实验气压控制系统如图 11 所示,对气动驱动器的腔内压力进行精确控制。系统采用电压调节模块将开关电源(明伟企业股份有限公司, NES –



(a) 气压控制系统框图
(b) 气压控制系统实物图
图 11 气压控制系统
Fig. 11 Pneumatic control system

1. 电压调节模块 2. 开关电源 3. 隔膜泵 4. Arduino UNO 5. 气压传感器 6. 两通电磁阀 7. MOSFET 模块

100 – 12 型)输出电压 $12\ \text{V}$ 转换为 $6\ \text{V}$ 对电磁阀进行供电。系统中正负压分别单独控制,控制逻辑相同。正压控制时,通过使用气压传感器(CFSensor, $-100 \sim 100\ \text{kPa}$)检测当前气压,并利用 Arduino UNO 开发板产生 PWM 信号控制 MOSFET(金氧半场效晶体管)隔离功率模块,以控制两通电磁阀 1、2 的开启频率,从而实现对气压的精确控制。

为测试不考虑层干扰作用的软手指弯曲变形,将真空压力设置为 $0\ \text{kPa}$,设定驱动器气压初始值为 $0\ \text{kPa}$,并以 $10\ \text{kPa}$ 的递增步长逐渐增加至 $70\ \text{kPa}$;利用开源运动跟踪软件 Tracker 计算得到不同压力下软手指弯曲角。

由图 12 可知,在压力 $0 \sim 70\ \text{kPa}$ 的范围内,建立的有限元模型与实际实验数据之间的误差逐渐增大,但增长速度缓慢。最大误差出现在 $70\ \text{kPa}$ 时,为 3% 。这符合软手指整体变形的趋势。此外,颗粒对软手指的弯曲变形存在阻碍作用,使得弯曲角减少 6° 。因此,为更好发挥混合阻塞结构的优势,可采取措施减小被动颗粒阻塞对弯曲性能的阻碍影响。

3.2 变刚度性能实验

设计变刚度性能实验装置如图 13 所示,分别测试层干扰结构变刚度性能和软手指整体刚度,实验

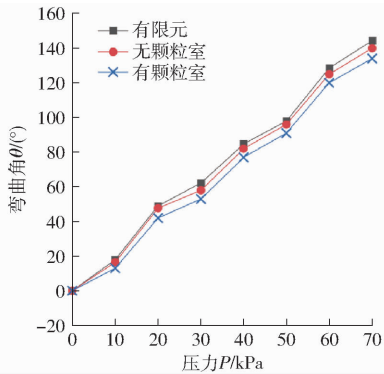


图 12 弯曲特性实验结果

Fig. 12 Experimental results of bending characteristics

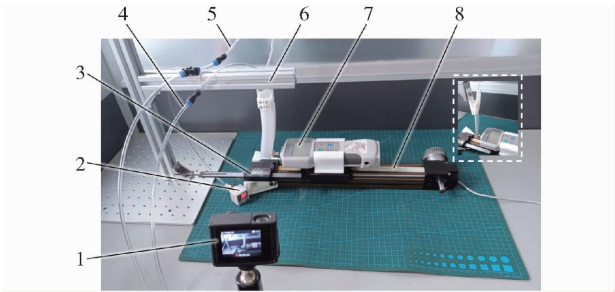


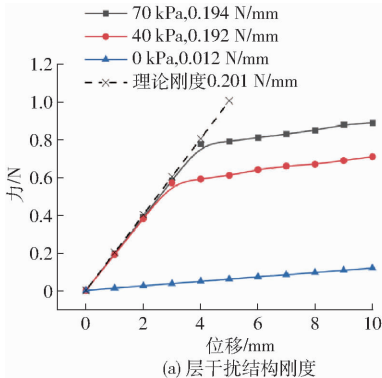
图 13 刚度性能测试实验装置

Fig. 13 Stiffness performance testing experimental device

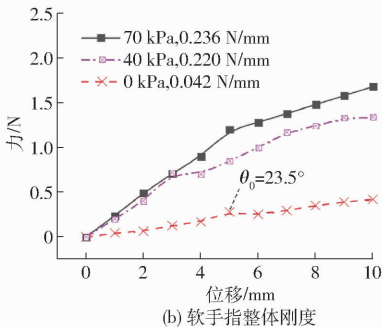
1. 高帧率相机 2. 压力传感器 3. 数显游标卡尺 4. 负压气管
5. 正压气管 6. 支架 7. 测力计 8. 直线导轨

中层干扰结构设置为 20 层。安装时,为了减小重力效应的影响,层干扰结构竖直固定在支架上,测力仪 (AIGU,ZP-5 型) 安装在横向放置的直线导轨上,其加载点位于软手指指尖上方 10 mm 处,在导轨上设置数显游标卡尺检测指尖位移。通过缓慢转动直线导轨上的转轮,推动测力计向前移动。在 2.3 节气动驱动器的硅胶材料的小应变范围条件下,选择在刚度测试过程中,将气动驱动器的气压统一设置为 0 kPa。实验时,设置不同真空负压 (0、40、70 kPa),并在对应真空负压下分别进行 3 次实验,取平均值绘制力与位移关系曲线。

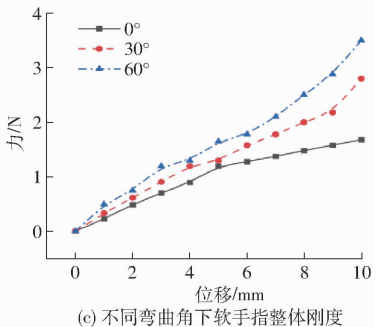
对实验数据进行 3 次 B 样条曲线拟合得到力与位移关系曲线,如图 14a 所示,图中曲线斜率即为



(a) 层干扰结构刚度



(b) 软手指整体刚度



(c) 不同弯曲角下软手指整体刚度

图 14 变刚度性能实验结果

Fig. 14 Experimental results of variable stiffness performance

刚度。计算得到预滑移阶段刚度模型最大相对误差为 3.4%,表明本文所建立的理论刚度模型准确性较高。图中标记了不同真空压力下的最大刚度,基本保持不变(0.201 N/mm 左右)。但真空压力增大会导致最大静摩擦力随之增大,相应地,最大刚度的保持范围也随之增大。当载荷进一步增大时,相邻层之间开始发生滑移,刚度因此迅速降低。

嵌入混合阻塞结构的软手指整体刚度如图 14b 所示。①真空压力为 0 kPa 时,气动驱动器的结构刚度较小。②层干扰变刚度激活后,软手指整体刚度增大 4.6 倍。③对比图 14a、14b 可得,在真空压力 70 kPa 时层干扰结构对整体刚度的贡献达到 82.2%。又由式(10)可知,层干扰刚度与层数 n 的立方成正比,因此,通过增加层干扰层数可以快速增大整体刚度。

当真空压力为 0 kPa 时,层干扰结构刚度可以忽略,而气动驱动器刚度为常数,因此,力与位移的关系曲线仅与颗粒阻塞结构刚度有关,如图 14b 所示。颗粒阻塞对整体刚度的影响明显呈阶段化,其原因为软手指的制造误差,使得软手指开始弯曲时空腔过大而颗粒无阻塞,实验测得产生被动阻塞时对应的弯曲角 θ_0 为 23.5°。

如图 14c 所示,软手指整体刚度随着弯曲角的增大而增大。而弯曲角的增加引起硅胶材料显现非线性力学特性,因此,由硅胶材料制成的气动驱动器不能被简化为线性弹性梁。另一方面,气动驱动器刚度在整体刚度中逐渐占据主导地位,使得力与位移的关系曲线呈现更为明显的非线性特征,因此,为消除非线性特性的影响,驱动气压为 0 kPa 时测得的刚度性能指标具有更广泛的适用性,此时,软手指不呈弯曲状态。

为进一步分析颗粒阻塞变刚度效果,根据式(24)采用 Matlab 拟合得到颗粒材料对阻塞刚度的影响如图 15 所示。由图 15 可见,颗粒半径与刚度负相关,而摩擦因数与刚度正相关。随着弯曲角

的增大,阻塞结构刚度先增大后减小,表明被动颗粒阻塞结构存在类似于层干扰结构的滑移失效过程。为进一步提高软手指刚度,发挥混合阻塞结构优势,由图 15 可知,应优先选择颗粒半径 0.2 ~ 2 mm、摩擦因数小于 0.56 的轻质颗粒材料。

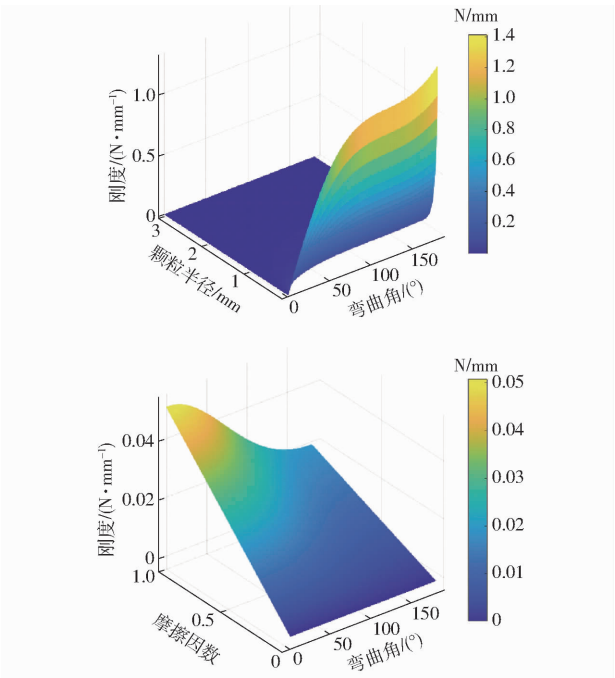


图 15 颗粒材料对阻塞刚度的影响

Fig. 15 Influence of particle material on jamming stiffness

3.3 两指夹持器抓取实验

基于软手指原型设计两指夹持器如图 16a 所示。采用实物抓取时的拉脱力来表征夹持器最大承载能力,而拉脱力即为将物体从夹持器中拉脱所需的峰值力。根据理论分析与实验测试可知,刚度越大,将物体从夹持器拉脱所需的力越大。此外,物体的复杂外形轮廓目前并没有统一的评价标准,但从几何结构上分析,物体的复杂外形可近似为有限个标准几何体的组合。因此,测试对象采用 3 种标准几何体:圆环、三棱柱及长方体。其中,圆环表示规则、连续的曲面外形,而长方体比三棱柱的棱边数量更多,表面不平整度更高。为消除物体自重影响,采用细绳穿过滑轮连接到测力计上,实验中真空压力设为 70 kPa。

拉脱力测试结果如图 16b 所示,变刚度激活时,抓取长方体拉脱力最大,达到 1.7 N。以抓取圆环获得的拉脱力为标准,得到拉脱力增长率曲线。定义增长率为变刚度激活与未激活时拉脱力之比,如图 16b 所示,即使物体表面不平整度增大,三棱柱与长方体拉脱力增长率仍达到 1.10 和 1.17。结果表明混合阻塞变刚度结构增强了夹持器对复杂外形轮廓物体的抓取能力。

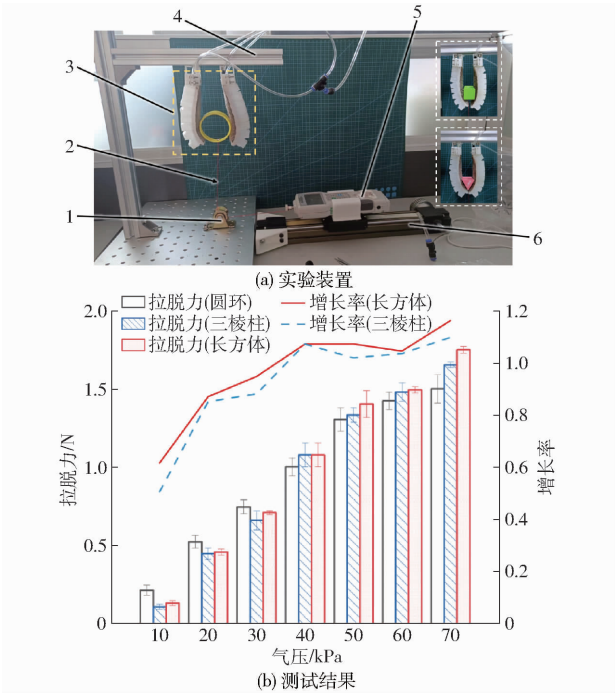


图 16 拉脱力测试实验

Fig. 16 Pulling force test experiment

1. 滑轮 2. 细绳 3. 两指夹持器 4. 支架 5. 测力计 6. 直线导轨

拉脱力与颗粒阻塞结构的作用有关,在压缩空气的主动驱动下,夹持器通过颗粒阻塞结构的顺应性与物体实现柔性接触,颗粒紧密包裹物体凹凸不平的表面,如图 3b 所示。在夹持器的抓取操作中,拉脱力由夹持器的刚度、表面摩擦力以及颗粒包裹部分产生的支撑力直接决定。比如,对于测试对象长方体,由于其接触面不平整引起摩擦力降低,但该值小于被动颗粒阻塞结构产生的支撑力,因此拉脱力增大。综上,主动驱动的被动适应使夹持器与物体之间的接触更加紧密,提高了抓取操作的稳定性与可靠性。

为了测试混合阻塞变刚度软手指抓取的自适应性,根据耶鲁大学提出的用于机器人抓取的测试标准^[26],选择 6 种常见物体进行测试(香皂盒(108 g),卷纸(71 g),马克杯(48 g),猕猴桃(95 g),香蕉(66 g),薯片(40 g)),如图 17 所示。抓取时夹持器的两个软手指分别通入相同的 3 种气压(20、40、70 kPa),分别测试变刚度激活前后(即真空压力为 0、70 kPa)各 20 次的实物抓取效果,实验结果如图 18 所示,采用改善率(即变刚度激活前后抓取成功率的差值)表示变刚度激活后对抓取成功率的改善效果。

实验结果表明,变刚度关闭后,即单一阻塞介质的作用下,此时的夹持器只对轻质、大轮廓物体具有较好抓取效果;变刚度激活后,不同驱动器压力下的

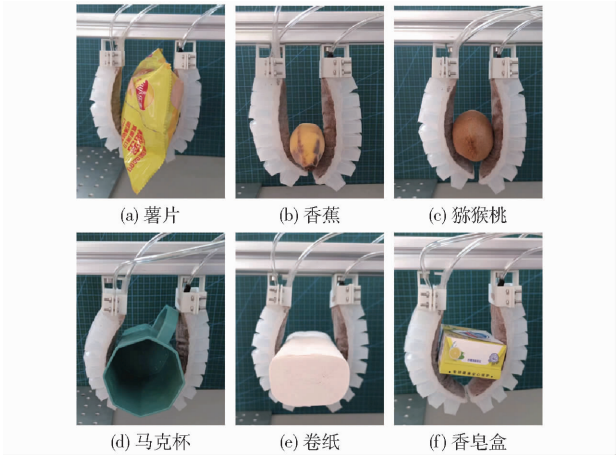


图 17 两指夹持器的抓取适应性演示

Fig. 17 Grasping adaptation of two-finger gripper

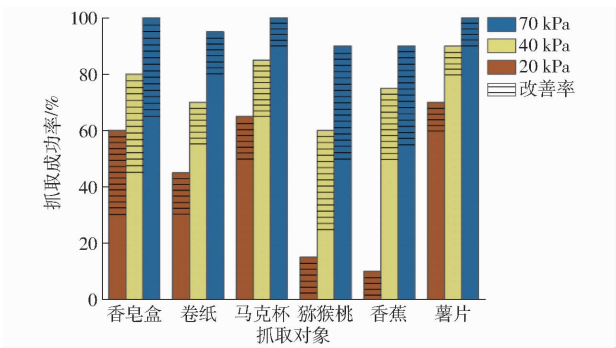


图 18 不同压力下软手指抓取实验结果

Fig. 18 Experimental results of soft finger grasping under different pressures

抓取成功率均大幅提高,在驱动压力 70 kPa 下整体达到 90% 以上;随着驱动器压力的增大,一方面软手指自身的承载能力随之增大,另一方面混合阻塞

的顺应性作用也随之增大,从而促进抓取成功率的提高;在高驱动压力(40、70 kPa)条件下,混合阻塞结构呈现较高的刚度和优异的顺应性能。对于肥皂盒等质量较大且表面不平整的抓取对象,变刚度激活后,混合阻塞结构表现出显著的改善效果,其改善率一直保持在 30% 以上。这表明混合阻塞变刚度结构不仅可以提高表面不平整物体的抓取成功率,而且还可以增强对于较重物体的承载能力。

4 结论

(1)受到人手指腹结构的启发,基于主动层干扰和被动颗粒阻塞原理设计一种具有指腹结构的混合阻塞变刚度软手指,实现了承载能力的提高和对复杂外形物体的自适应抓取。

(2)采用 Euler – Bernoulli 梁理论和虚功原理,建立了多材料软手指的刚度控制模型。基于该模型,分析得到提升整体刚度的最优途径为增加层干扰层数弱化颗粒阻塞作用,即颗粒材料选用范围为:轻质、颗粒半径 0.2 ~ 2 mm、摩擦因数低于 0.56。

(3)搭建实验装置并进行了软手指弯曲、变刚度及抓取测试。弯曲特性实验结果表明,压力 70 kPa 下的软手指弯曲角可达 134°,弯曲性能满足要求;变刚度测试实验结果表明,阻塞激活后软手指刚度增大 4.6 倍;抓取实验结果表明,即使物体表面不平整度增大,拉脱力仍增大 17%,且实物抓取成功率均在 90% 以上。提出的混合阻塞变刚度方法极大增强了软手指对复杂轮廓物体的抓取与负载能力。

参 考 文 献

[1] KIM S, LASCHI C, TRIMMER B. Soft robotics: a bioinspired evolution in robotics[J]. Trends in Biotechnology, 2013, 31(5): 2100086.

[2] 范需,戴宁,王宏涛,等. 气动网格软体驱动器弯曲变形预测方法[J]. 中国机械工程, 2020, 31(9): 1108 – 1114.

FAN Xu, DAI Ning, WANG Hongtao, et al. Bending deformation prediction method of soft actuators with pneumatic networks [J]. China Mechanical Engineering, 2020, 31(9): 1108 – 1114. (in Chinese)

[3] 姚立纲,李敬仪,东辉. 气动软体机械臂模块变刚度性能分析[J]. 机械工程学报, 2020, 56(9): 36 – 44.

YAO Ligang, LI Jingyi, DONG Hui. Variable stiffness analysis on a pneumatic soft manipulator[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2020, 56(9): 36 – 44. (in Chinese)

[4] YANG Y, CHEN Y H, LI Y T, et al. Bioinspired robotic fingers based on pneumatic actuator and 3D printing of smart material [J]. Soft Robotics, 2017, 4(2): 147 – 162.

[5] OH B K, PARK Y G, JUNG H B, et al. Untethered soft robotics with fully integrated wireless sensing and actuating systems for somatosensory and respiratory functions[J]. Soft Robotics, 2020, 7(5): 564 – 573.

[6] 李特,崔博尧,刘海波,等. 磁致变刚度原理的气动软体致动器设计与试验[J]. 机械工程学报, 2023, 59(3): 1 – 12.

LI Te, CUI Boyao, LIU Haibo, et al. Design and experiment of a soft pneumatic actuator with variable stiffness by magnetic-induced[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2023, 59(3): 1 – 12. (in Chinese)

[7] NARANG Y S, AKTAŞ B, ORNELLAS S, et al. Lightweight highly tunable jamming-based composites[J]. Soft Robotics, 2020, 7(6): 724 – 735.

[8] SONG C M, WANG P, MAKSE H A. A phase diagram for jammed matter[J]. Nature, 2008, 453(7195): 629 – 632.

[9] BROWN E, RODENBERG N, AMEND J, et al. Universal robotic gripper based on the jamming of granular material[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2010, 107(44): 18809 – 18814.