DOI: 10.3901/JME.2020.23.067

基于堵塞原理的变刚度软体机器人设计与试验^{*}

徐丰羽¹ 蒋全胜² 江丰友¹ 申景金¹ 王兴松³ 蒋国平¹

(1. 南京邮电大学自动化学院 南京 210003;

2. 苏州科技大学机械工程学院 苏州 215009;

3. 东南大学机械工程学院 南京 211189)

摘要: 软体机器人运动时具有高柔性, 执行任务时又能展示出强刚度, 在军事侦察、灾难救援等复杂环境探索与检测方面具有重要的应用价值。结合主动驱动的网络气动结构与被动驱动的堵塞机构的优势, 提出实时变刚度的软体驱动器, 研究其变刚度机理和动态建模方法。首先, 提出了气动-堵塞机构耦合的软体驱动器模型; 其次, 利用赫兹接触模型, 建立机器人运动数学模型, 从理论上研究其变刚度形成机理; 再次, 利用有限元对气动驱动结构进行分析, 研究空腔内压强、形状和大小对软体机器人弯曲角度的影响, 并进行了优化; 最后, 制作了变刚度软体机械臂样机, 验证了软体驱动器的变刚度性能与运动性能。该研究有望为变刚度软体机器人设计与刚度调控提供新的理论和技术支持。

关键词: 变刚度; 颗粒堵塞; 软体驱动器; 打印; 试验研究

中图分类号: TP242

Design and Testing of a Soft Robot with Variable Stiffness Based on Jamming Principles

XU Fengyu¹ JIANG Quansheng² JIANG Fengyou¹ SHEN Jingjin¹
WANG Xingsong³ JIANG Guoping¹

(1. College of Automation, Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing 210003;

2. College of Mechanical Engineering, Suzhou University of Science and Technology, Suzhou 215009;

3. College of Mechanical Engineering, Southeast University, Nanjing 211189)

Abstract: A soft robot has high flexibility when performing tasks with moving and high stiffness, so it has important application in exploring and detecting complex environments. Based on the advantages of driving Pneu-Net and driven jamming mechanism, a soft robot with real-time variable stiffness and dynamic modeling methods is proposed. Firstly, the model of the soft actuator coupling pneumatic structure and jamming mechanism is established. Secondly, by using Hertzian contact model, a mathematical model of robot motion and theoretically investigated formation mechanisms of variable stiffness is built. Moreover, the pneumatically-driven structure is analyzed by using the finite element as well as the influences of pressure in cavities, considering shape and size of cavities on the bending angle of the soft robot are studied. Based on this, the pneumatically-driven structure is optimized. Finally, A prototype and testing of the soft robot arm with variable stiffness is implemented, which verified the variable stiffness and motion performances of the soft actuator. This study provides new theoretical and technical support for the design and stiffness control of a soft robot with variable stiffness.

Key words: variable stiffness; particle jamming; soft robot; three-dimensional printing; experimental research

0 前言

基于堵塞原理的驱动器是变刚度结构的典型代

表, 能实现流体状态和固体状态之间相互转化。目前有 2 种堵塞驱动方法: 薄膜内充满颗粒材料和薄膜内充满薄片状材料。这两种方法原理相同, 均是利用施加, 增加弹性薄膜内材料的剪应力; 不同点在于, 颗粒堵塞在流体状态下呈高变形性, 对外界适形能力强; 薄片堵塞变形能力略差, 但可提供的刚度变化范围较大。

BROWN 教授^[1]利用堵塞原理设计了一种万能

^{*} 国家自然科学基金资助项目(51775284)、江苏省重点研发计划(社会发展, BE2018734)、江苏省第十五批“六大人才高峰”高层次人才项目(JY-081)和江苏省自然科学基金面上项目(BK20201379)资助项目。20200405 收到初稿, 20200820 收到修改稿

手爪,可抓持不规则表面的物体,柔性夹持器可根据物体的形状在其周围“流动”,适应其形状,施加真空作用后,颗粒迅速收缩抓持物体。HOU 等^[2]利用负压和颗粒流实现变刚度,提出了一种通用变刚度手爪,具有更高的负载能力。ZHU 等^[3]应用打印多种材料设计了变刚度软体机器人夹持器,包含两个软性手指。针对传统机构弯曲角度较小等问题,LI 等^[4-5]提出了分布式颗粒堵塞机构,在保持转动刚度的同时,大大提高了颗粒阻塞夹持器的弯曲能力。Versaball^[6]是为数不多的商业化万能夹持器之一,对于堵塞机构有较大参考意义。

作为半主动驱动方法,堵塞机构经常与其他驱动方式联合。

(1) 堵塞机构可与特殊机械结构结合形成变刚度机构:WEI 等^[7]将多个串联的球形关节与颗粒堵塞机构集成,提出了可调刚度机械臂,相比没有颗粒堵塞的机械臂刚度提高了 13 倍。WEI 等^[8]提出的这种可变刚度抓手具有可控制的自由度的特征,从而扩展了它们的环境适应性和操纵能力。WU 等^[9]将刚性的内骨骼嵌入软指的内腔,提出了一种新型的具有关节内骨骼结构的可变刚度抓手。

(2) 堵塞机构可与绳索驱动集成:KIM 等^[10]将 NiTi 绳驱动技术与分层堵塞技术集成,设计了仿蛇机器人,获得了与微创手术相融合的机器人特性。CHENG 等^[11]将绳索驱动与颗粒堵塞原理相结合设计了模块化机械手臂,实现了局部刚度的控制。LIN 等^[12]提出了一种变刚度驱动器,将气动致动、真空阻塞和肌腱驱动集成在一起,可应用多种方式调解刚度,实现 10 倍以上变刚度。ZHANG 等^[13]提出一种采用绳索驱动的拮抗式变刚度柔性机器人关节,能够根据任务需要,实时调节关节刚度。

(3) 堵塞机构还可与流体驱动结合:WALL 等^[14]将堵塞机构与气体驱动器相结合,提出变刚度手指。WEI 等^[15]提出了可自适应抓取的变刚度软体夹持器,对物体适形后,通过真空作用可迅速固化使手指保持既有形态,刚度提高 10 倍以上。BROWN 等^[16]设计了一款新型软体移动机器人,在流体状态球形机器人表面布置多个堵塞单元,通过堵塞部分单元格,实现滚动运动。其他较有创新的堵塞机构包括:JIANG 等^[17]提出了一种基于差压驱动的新型颗粒阻塞机构。WANG 等^[18]提出了一种新型层阻塞变刚度技术。YAO 等^[19]设计了一种气动式可变刚度的软体机械臂模块,实现了软体机械臂的模块化。WANG 等^[20]对软体机器人目前的发展现状进行了系统的总结,并提出可变刚度研究方向可能是未来

软体机器人研究新的突破点。

综上所述,堵塞机构多应用小尺寸颗粒材料,由于小颗粒易发生变形和重新排列,可能导致不同运动形态和变刚度失效,降低了机构重复定位精度,甚至定位错误。科研人员目前多试图从试验的角度去分析影响堵塞机构的主要因素^[21-23],包括:分析颗粒数量、形状、尺寸和弹性薄膜的机械特性对刚度的影响。

变刚度的主动驱动方式和半主动驱动方式各有优缺点,将二者结合可形成功能强大软体机器人。本文提出了一种基于大、小颗粒组合的堵塞机构,提出了一种气动-堵塞机构耦合的变刚度软体驱动器;利用赫兹接触模型,建立变刚度结构数学模型,分析其变刚度形成机理;应用 Abaqus 有限元软件对气动驱动结构进行分析,研究空腔内压强、空腔形状和空腔大小对弯曲角度的影响;制作了软体机器人样机,搭建刚度测试平台,验证了变刚度软体机器人的弯曲性能和稳定性。

1 变刚度软体机器人模型

所提出的变刚度软体机器人,主要采用模块化设计思想,将复杂的软体机器人结构分解为单个模块的变刚度软体驱动器相连而成。软体驱动器由三层组成(图 1),最内层为堵塞变刚度结构,底部与颗粒堵塞真空管相连;中间层为气动驱动结构,布置在堵塞结构周围,气动驱动结构内设有 3 个成 120°的空腔通道,空腔通道底部与气动加压管相连;最外层为硅胶-纤维复合结构,用来限制气动结构过度膨胀。

图 1 单元驱动器结构

1.1 堵塞变刚度结构

堵塞变刚度结构形状为圆柱体,结构见图 2a。结构底部通过颗粒堵塞真空管与外界真空泵相连,外部由薄膜包裹而成,薄膜内部的多个菱形骨架通

过柔性绳索连接, 大球颗粒依靠收紧弹簧嵌切在 2 个菱形骨架之间, 空隙填充微小颗粒。

其工作原理为: 加载真空压力后, 膜内的小颗粒物质从流动状态转变为固体状态; 在固体状态下, 密封薄膜将大球颗粒和菱形骨架密封成一体, 大球颗粒和关节骨架间填充有细小颗粒(图 2b), 当机构运动时, 大球颗粒始终嵌切于关节骨架之间, 所有颗粒均不会随机散落, 通过控制膜内真空度来调整机器人刚度。该堵塞机构, 克服了小颗粒堵塞机构在运动过程中颗粒重组导致位置不确定甚至定位错误的缺点。

图 2 大小颗粒组合式堵塞变刚度机构

1.2 气动驱动结构

气动驱动结构由弹性材料制成, 在其圆周方向上设置了 3 个空腔通道。1 个或 2 个空腔加载时, 产生弯曲; 当 3 个外部空腔同时充气, 驱动器沿轴向伸长; 控制不同空腔内压力可调整弯曲的角度和方向, 从而实现万向弯曲运动。

1.3 硅胶纤维复合层

当空腔气动加载时, 外壁可能会过度膨胀, 发生气球效应。硅胶纤维复合层是由多个硅胶纤维构成, 外部呈环状, 由弹性模量较大的材料制成。将多个单环状纤维嵌入驱动器表面, 仅限制了驱动器的径向过度膨胀, 对其轴向拉伸、压缩和弯曲影响较小。同时, 这种纤维复合结构可提高抓取物体时的“粘滞力”, 能提供较大的末端力, 弯曲效率高。

2 变刚度软体机器人数学建模

机构的刚度主要由小颗粒, 大球和菱形骨架三者间摩擦力所决定。自由状态下, 颗粒可自由运动,

当施加致动气压时, 膜内外压力差将小颗粒、菱形骨架和大球挤压在一起, 形成锁紧力, 不仅限制了小颗粒的移动, 同时也固定了菱形骨架和大球的位置, 获得较高刚度以抵抗外力。

2.1 颗粒间锁紧力建模

为了分析堵塞颗粒对刚度的影响, 当施加真空负压时, 假定膜内的所有颗粒都为刚性, 且被限制为一个整体。图 3a 为堵塞机构的单个模块的结构示意图, 当受外力矩 M 时, 简化受力分析见图 3b, 图 3c 为模块的剖面图, 将薄膜内的大球和颗粒分为上、下两层, 下层颗粒块的锁紧力抵抗外力矩 M 。端部模块的锁紧力分析见图 3d, 当末端受外力 F_E 时, 两个颗粒层沿水平方向发生相对滑动, 对下层颗粒块(图 3d 锁紧区域)受力分析, 锁紧力 F_L 为

$$F_L = 2f_U + f_P + f_L \quad (1)$$

式中, f_L 是颗粒块与接触区域 A_1 (图 3b)的摩擦力, f_P 是颗粒块在锁紧区域(3d)上的静态力, f_U 是下层颗粒块与大球水平方向上的摩擦力。

图 3 锁紧力示意图

颗粒层在锁紧区域上的静态力 f_P , 可通过流体加压模型来估算, 密闭空间内流体的压强能够大小不变的传向各个方向, 见图 4a, 可得

$$P_1 = P_1 = P_1 = P_1 = \frac{F_{\text{ext}}}{A_2} \quad (2)$$

所以, 施加在区域 A_1 上的力 F_{A1} 为

$$F_{A1} = \frac{F_{\text{ext}}}{A_2} A_1 \quad (3)$$

将小颗粒等效成流体, 薄膜等效为一个密闭空间, 其内部被小颗粒填满, 构成如图 4b 所示的静态流体模型, 施加在每一面的力可以通过式(3)计算。颗粒块作用在锁紧区域 A_3 上水平方向上的静态力 f_P 由颗

颗粒与菱形骨架间的压力提供

$$f_p = F_{N2} \sin \alpha = p' A_3 \sin \alpha = \pi R_1^2 p' \sin \alpha \quad (4)$$

式中, F_{N2} 为颗粒块对菱形骨架的正压力, R_1 为薄膜管半径, α 为菱形骨架顶角, P' 为颗粒块施加给菱形骨架和大球的等效压强。则颗粒块在与菱形骨架接触区域 A_1 上的摩擦力 f_L 为

$$f_L = \mu_1 P' A_1 = \pi R_1^2 P' \mu_1 \quad (5)$$

式中, μ_1 为颗粒块与骨架之间的静摩擦因数, A_1 为颗粒块与菱形骨架接触区域的等效面积。大球与颗粒块之间在水平方向的摩擦力 f_U 为

$$f_U = \mu_2 F_{N1} = \mu_2 P' A_2 = \pi R_2^2 P' \mu_2 \quad (6)$$

式中, F_{N1} 为颗粒块对大球的正压力, R_2 为大球半径, μ_2 为颗粒与大球之间的静摩擦因数, A_2 为颗粒块与大球接触的等效面积。将式(4)~(6)代入式(1), 则锁紧力 F_L 为

$$F_L = \pi R_1^2 P' \sin \alpha + 2\pi R_2^2 P' \mu_2 + \pi R_1^2 P' \mu_1 = \pi P' (R_1^2 \sin \alpha + 2R_2^2 \mu_2 + R_1^2 \mu_1) \quad (7)$$

图4 颗粒液体模型

2.2 赫兹接触模型

根据两圆球赫兹接触模型(图 5a), 则两球体相接触后, 其中心相对变形位移和应力分别为

$$\delta^3 = \frac{9}{16} \frac{R_a + R_b}{R_a R_b} \left(\frac{1 - \nu_a^2}{E_a} + \frac{1 - \nu_b^2}{E_b} \right)^{-2} P \quad (8)$$

$$P'^3 = \frac{6}{\pi^3} \left(\frac{R_a + R_b}{R_a R_b} \right)^2 \left(\frac{1 - \nu_a^2}{E_a} + \frac{1 - \nu_b^2}{E_b} \right)^{-2} P \quad (9)$$

式中, R_a 为 a 球半径, R_b 为 b 球半径, ν_a 为 a 球泊松比, ν_b 为 b 球泊松比, E_a 为 a 球弹性模量, E_b 为 b 球弹性模量。自然状态下, 小颗粒半径 R_3 远小于薄膜管半径 R_1 , 单个颗粒正对着的薄膜区域面积较小, 可近似的看成是平面。利用赫兹接触理论对薄膜和颗粒块进行分析, 可建立如图 5b 所示的球体-平面赫兹接触模型, 令公式(8)、(9)中 $R_a = \infty$, $R_b = R_3$ 将薄膜管和小颗粒的参数代入, 得

$$\delta^3 = \frac{9}{16 R_3} \left(\frac{1 - \nu_1^2}{E_1} + \frac{1 - \nu_2^2}{E_2} \right)^{-2} P \quad (10)$$

$$P'^3 = \frac{6}{\pi^3 R_3^2} \left(\frac{1 - \nu_1^2}{E_1} + \frac{1 - \nu_2^2}{E_2} \right)^{-2} P \quad (11)$$

式中, R_3 为填充颗粒半径, ν_1 为菱形骨架的泊松比, ν_2 为小颗粒泊松比, E_1 为菱形骨架弹性模量, E_2 为填充颗粒弹性模量。

(a) 两圆球接触赫兹模型

(b) 颗粒与平面赫兹接触模型

(c) 简化模型

图5 颗粒与平面接触模型

颗粒与平面接触赫兹简化模型见图 5c, 由等腰 $\triangle ABC$ 、 $\triangle AEC$ 和直角 $\triangle ADC$ 、 $\triangle EDC$ 的性质, 可得

$$AC = \sqrt{2R_3^2 - 2R_3^2 \cos \angle ABC} \quad (12)$$

$$AC = \frac{\delta}{\sin \angle DAC} \quad (13)$$

$$\angle ABC = 2\angle DAC = \angle \beta \quad (14)$$

联立式(12)、(13)、(14), 得薄膜与小球颗粒接触变形后其变形角 β 为

$$\cos \beta = \frac{2R_3 - \sqrt{2}\delta}{2R_3} =$$

$$1 - \left[\frac{9}{32\sqrt{2}R_3^4} \left(\frac{1 - \mu_1^2}{E_1} + \frac{1 - \mu_2^2}{E_2} \right) P \right]^{\frac{1}{3}} \quad (15)$$

机构末端的锁紧力 F_L 为

$$F_L = \left[\frac{6}{\pi^3 R_3^2} \left(\frac{1 - \nu_1^2}{E_1} + \frac{1 - \nu_2^2}{E_2} \right)^{-2} \right]^{\frac{1}{3}} \times (R_1^2 \mu_1 + R_1^2 \sin \alpha + 2R_2^2 \mu_2) P^{\frac{1}{3}} \quad (16)$$

机构的锁紧力矩 M_L 为

$$M_L = F_L \cdot d = \left[\frac{6}{\pi^3 R_3^2} \left(\frac{1 - \nu_1^2}{E_1} + \frac{1 - \nu_2^2}{E_2} \right)^{-2} \right]^{\frac{1}{3}} \times (R_1^2 \mu_1 + R_1^2 \sin \alpha + 2R_2^2 \mu_2) P^{\frac{1}{3}} d \quad (17)$$

式中, r 为薄膜管半径, 取极限真空度 $P_m=101 \text{ kPa}$, 并代入式(17)中, 则最大锁紧力矩 $M_{Lm}=304.5 \text{ N}\cdot\text{mm}$ 。

根据经典线弹性理论, GENT 提出弹性模量值 E 与肖氏硬度值 S 的关系为^[24]

$$E = \frac{0.0981(56 + 7.62336S)}{0.137505(254 - 2.54S)} \quad (18)$$

式中, E 为弹性模量, S 是以 ASTM D2240 标准的硬度计示数。联合式(17)、(18), 可得小颗粒硬度与锁紧力矩的关系

$$M_L = \left[\frac{6}{\pi^3} \left(\frac{0.137505(254 - 2.54S_1)}{0.0981(56 + 7.62336S_1)} + \frac{1 - \nu_2^2}{E_2} \right)^{-2} \right]^{\frac{1}{3}} \times (R_1^2 \mu_1 + R_1^2 \sin \alpha + 2R_2^2 \mu_2) P^{\frac{1}{3}} d \quad (19)$$

2.3 变刚度特性仿真

将软体机器人的参数设置为: 菱形骨架半径, $R_1=14 \text{ mm}$ 大球颗粒半径 $R_2=6.5 \text{ mm}$, 填充颗粒半径 $R_3=3 \text{ mm}$, 根据式(15), 得薄膜变形角 β 与真空压力 P 之间的关系(图 6), 由图可得, 真空压力 P 越大, 薄膜变形角 β 也越大。同时, 随着压力逐渐增大, 压力增量相同时, 薄膜变形角的增量不断减小。

图 6 薄膜变形角 β 与真空压力 P 关系曲线

将参数设置为: $R_1=14 \text{ mm}$, $R_2=6.5 \text{ mm}$, $R_3=3 \text{ mm}$, 薄膜管半径 $r=16 \text{ mm}$ 。根据公式(16), 得到合力矩 M 和真空压力 P 之间的关系(图 7)。从图 7 可见, 真空压力 P 越大, 可承受外力矩 M 越大, 故可通过调整真空压力来控制机构刚度。

图 7 末端力矩 M 与真空压力 P 的关系曲线

将机构的参数设置为: $R_1=14 \text{ mm}$, $R_2=6.5 \text{ mm}$, $P=80 \text{ kPa}$, $r=16 \text{ mm}$, 并将 R_3 范围

设置在 $2 \sim 6 \text{ mm}$ 之间。根据式(17), 得外力矩 M 与小颗粒半径 R_3 之间的关系(图 8a)。从图 8 可知, 小颗粒半径 R_3 越大, 末端力矩 M 越小。且随着小颗粒尺寸的减小, 相同尺寸减量下, 末端力矩的减量越来越小。各参数对比如表 1 所示。

表 1 变刚度仿真参数表

曲线图参数设置	菱形骨架半径 R_1/mm	大球半径 R_2/mm	小颗粒半径 R_3/mm	薄膜管半径 r/mm	真空压力 P/kPa
β 与 P	14	6.5	3	16	0~80
M 与 P	14	6.5	3	16	0~80
M 与 R_3	14	6.5	2~6	16	80
M 与 R_1	10~15	6.5	3	16	80
M 与 R_2	14	3~7	3	16	80
M 与 S_1	14	6.5	3	16	80

(a) 末端力矩 M 与小颗粒半径 R_3 的关系曲线

(b) 末端力矩 M 与菱形骨架半径 R_1 的曲线关系

(c) 末端力矩 M 与小球半径大小 R_2 的对应关系

(d) 末端力矩 M 与颗粒硬度 S_1 的对应关系

图 8 机构末端承受力矩仿真结果

将机构的参数设置为: $R_2 = 6.5 \text{ mm}$, $R_3 = 3 \text{ mm}$, $r = 16 \text{ mm}$, $P = 80 \text{ kPa}$, 并将菱形骨架半径 R_1 范围设置在 $10 \sim 15 \text{ mm}$ 之间。根据式(17), 得末端力矩 M 与菱形骨架 R_1 之间的关系(图 8b), 可得, 菱形骨架的半径 R 越大, 末端力矩 M 越大。

将机构的参数设置为: $R_1 = 14 \text{ mm}$, $R_3 = 3 \text{ mm}$, $r = 16 \text{ mm}$, $P = 80 \text{ kPa}$, 并将大球颗粒半径 R_2 设置为 $3 \sim 7 \text{ mm}$ 之间。根据式(17), 可得末端外力矩 M 与大球半径尺寸 R_2 之间的关系(图 8c)。可见大球半径尺寸越大, 机构末端的合力矩越大。且随着大球半径的增大, 相同尺寸增量下, 末端力矩的增量越来越大。

将机构的参数设置为: $R_1 = 14 \text{ mm}$, $R_2 = 6.5 \text{ mm}$, $R_3 = 3 \text{ mm}$ 。根据式(17), 得末端力矩 M 与颗粒硬度 S_1 之间的关系(图 8d)。从图 8 中可见, 小颗粒硬度 S_1 越大, 机构的末端力矩 M 越大。且随着小颗粒硬度的增大, 相同增量下, 末端力矩的增量越来越小。

3 机器人样机制作

为验证机器人可变刚度能力, 制作了机器人样机, 搭建了机器人测试平台, 完成了机器人变刚度试验。

3.1 变刚度软体驱动器制备

根据第 2 节提出的结构模型, 设计了机器人的主要组件见图 9, 堵头和菱形骨架均留有半径 4 mm 的圆孔, 供柔性绳索穿过, 在堵头模型中, 上通孔供柔性绳索穿过, 下通孔与气管相连, 供气流进出。这 3 个组件经过 SolidWorks 设计后, 应用 PLA 材料打印制造。

图 9 变刚度软体驱动器组件模型

柔性绳索采用 2.8 mm 的弹力皮筋, 薄膜采用厚度为 0.24 mm 的 PE 材料制成, 填充颗粒选用半径为 3 mm 的刚玉材质颗粒。

具体装配流程: 先将柔性绳索穿过堵头和等间距的放置菱形骨架的中心通孔, 接着应用胶水进行胶粘固定。同时, 将气管与通气堵头的凸槽相连接(图 10a)。再将该组件的菱形骨架逐个装入薄膜中,

并填充颗粒。最后, 使用硅酮胶对两端密封, 堵塞机构样机见图 10b。

图 10 变刚度结构实物效果图

3.2 气动驱动结构制备

气动驱动结构选用壁厚 2 mm 的半圆形空腔, 为了便于模具拆除, 采用目前主流的分体式模具设计方法, 利用 3D 打印机制造模具, 再按照图 11 流程进行装配: ① 将底座和堵塞机构模具进行组装(图 11a); ② 将 3 个空腔模具的气孔端插入底座上预留的空隙(图 11b); ③ 将 2 个外环套筒, 分别套在模具外侧并组装(图 11c); ④ 将封口膜缠绕在外壳和底座的表面, 用皮筋箍紧; ⑤ 将调制好的 ECOFLEX-0030 硅胶注入模具中; ⑥ 整体加热待硅胶凝固后, 移除底座 1 和空腔模具, 翻转柔性体, 将底座 2 模具与套筒进行组装(图 11e), 外部套上封口膜; ⑦ 继续将调制好的 Dragon Skin 硅胶注入, 充满底座 2 模具间隙, 并与柔性体充分接触; ⑧ 整体再加热, 凝固后移除全部模具; ⑨ 在空腔细孔处插入硅胶软管, 应用 703 硅胶粘接和密封(图 11f)。

图 11 软体驱动器制作流程

3.3 硅胶纤维复合层制备

采用同样方法, 设计的硅胶纤维复合层模具见

图 12a, 经 3D 打印后, 与底座进行组装(图 12b), 再将气动驱动结构放置在内, 将配置好的液态硅胶注入模具, 制作纤维复合层, 成型后移除模具。液态硅胶采用弹性模量较大的 Dragon skin-10 硅胶配制而成, 该材料的弹性模量和硬度远高于 Ecoflex-0030。

图 12 硅胶纤维复合层结构

4 变刚度软体机器人性能测试

刚度反应了软体机器人抵抗外力的能力, 是重要评价指标, 为验证所提出机器人的变刚度性能和稳定性能, 开展了弯曲刚度测试试验和变刚度稳定性试验。

4.1 试验平台

试验平台见图 13a, 包含夹持器、支撑杆、步进电动机、数字压力传感器和线性导轨。机器人一端由夹持装置固定在支架上, 另一端竖直自由悬空, 可方便调整高度和角度。数字压力传感器测量端固定在线性导轨的滑块上, 导轨由步进电动机驱动, 沿水平方向移动, 其步距角为 1.8° , 转矩为 $0.9 \text{ N}\cdot\text{m}$, 可实现的控制精度为 0.1 mm 。数显压力传感器精度为 0.01 N , 量程达 20 N 。

测试过程中, 机器人末端与传感器相接触, 传感器移动的距离由步进电动机控制, 范围为 $0 \sim 20 \text{ mm}$, 每次移动 2 mm , 传感器的读数即为机器人末端力。

图 13 变刚度软体机器人测试平台

4.2 刚度测试

选取半径为 3 mm 的填充颗粒, 设置真空压力分别为 0 kPa 、 40 kPa 、 60 kPa 、 80 kPa , 测量机构在不同真空压力下末端力与位移的关系, 共进行 4 组试验, 每组重复 4 次, 共计 16 次试验。计算平均值, 试验结果见图 14a, 可得: 堵塞机构内真空度越大, 相同位移下传感器测出的末端力越大, 真空度增量相同时, 末端力的增量逐渐减少。

机器人的刚度 k 表示为

$$k = F_c / d_c \quad (20)$$

式中, F_c 末端所受压力, 即传感器测量出的压力; d_c 为机器人末端位移, 即线性导轨滑块位移。真空压力分别设置为 0 kPa 、 20 kPa 、 40 kPa 、 60 kPa 、 70 kPa 、 80 kPa , 滑块位移范围在 $0 \sim 20 \text{ mm}$, 每次移动 2 mm 。对每组气压下的试验数据进行拟合, 得机器人的刚度与输入真空气压的对应关系, 见图 14b。可得, 随输入真空气压的增加, 机构的刚度逐渐增加, 且增幅也逐渐增加。

图 14c 为机器人的理论刚度仿真值与实际测量值对比图, 可得, 在真空度 60 kPa 以下, 理论值和试验值的差值变化较小, 在 $5.05 \text{ N}\cdot\text{mm}$ 左右, 差值为实际测量值的 2.76% 。当真空度高于 60 kPa , 差值逐渐增加, 真空度为 80 kPa 时, 差值达到

12.47 N·mm, 差值为实际测量值的5.72%。差值逐渐变大的原因是当真空压力较大时, 机构内颗粒结构发生变形, 刚度提升趋势减小。

(a) 不同真空度下末端力与位移变化曲线

(b) 机构末端刚度与真空压力的关系

(c) 理论分析和实际测量结果对比

图14 刚度测试结果

4.3 影响机器人刚度的因素分析

第3节的理论分析将变刚度机构内填充颗粒视为整体, 并认为填充颗粒能将真空压力均匀地传递到接触表面。实际上, 压力的传递与颗粒的数量, 尺寸和结构等均有关, 这些因素都对变刚度机构的刚度性能产生影响。从颗粒尺寸的角度, 对填充颗粒半径为4 mm, 3 mm和2 mm的机构在80 kPa和0 kPa压力下进行测试, 具体数据见图15a。

对试验数据进行线性拟合, 得到不同尺寸颗粒时机器人的刚度见表2。颗粒半径为2 mm的机构在80 kPa和0 kPa压力下刚度之比为5.10, 颗粒半径为3 mm的机构在80 kPa和0 kPa压力下刚度之比为6.57, 颗粒半径为4 mm的机构在80 kPa和0 kPa压力下刚度之比为4.53。如果颗粒过小, 根据第4.4节对小颗粒与大颗粒堵塞机构的重复定位精度实验以及BROWN教授^[1]提出的小颗粒机构可知, 小颗粒机构重复定位精度偏低, 需要改进; 如果颗粒过

大则会使堵塞机构整体结构的偏大化而不利于执行复杂环境的任务, 以及对驱动的要求过高。因此, 填充颗粒半径为3 mm的机构刚度变化率最大, 这对机构优化设计提供了重要参考。

表2 不同尺寸颗粒机器人刚度结果

填充颗粒半径/mm	80 kPa 下刚度/(N/mm)	0 kPa 下刚度/(N/mm)	刚度变化之比
2	0.076 05	0.014 9	5.10
3	0.135 5	0.020 6	6.58
4	0.158 1	0.034 9	4.53

将试验数据处理后, 与仿真数据进行对比见图15b, 试验测量的不同尺寸颗粒的刚度效果要低于理论分析的数值, 且颗粒尺寸越大, 差值越小。

(a) 机器人末端力与位移的关系

(b) 理论刚度与实验刚度对比

图15 不同尺寸颗粒对机器人刚度影响分析

选用菱形骨架半径为13 mm, 14 mm和15 mm的机构进行测试试验, 结果见图16a。可得骨架半径越大, 其刚度越大。同时, 随着位移增大, 位移增量相同时, 末端力的增量在逐渐减小, 这与理论分析(图8b)仿真结果相吻合。

根据公式(20), 对末端力和位移的数据进行拟合可得, 菱形骨架半径为13 mm、14 mm和15 mm时, 机构的刚度分别为0.085 N/mm、0.133 N/mm和0.180 N/mm。将试验数据处理后, 与所得仿真数据进行对比, 结果见图16b, 可见, 试验测量出的不同菱形骨架尺寸的刚度要低于理论分析的结果, 且骨架尺寸越大, 差值越大。

图 16 不同尺寸菱形骨架对刚度的影响

填充颗粒材料分别选取相同半径(3 mm)的刚玉颗粒、圆黄豆颗粒和聚丙烯颗粒,在 80 kPa 的压力下,进行测试。结果见图 17,采用刚玉材质作为填充颗粒的变刚度结构,在试验中的刚度表现最好,这与刚玉颗粒的表面粗糙度直接相关。

图 17 不同材料填充颗粒的刚度结果

利用公式 (20),对末端力和位移的数据进行拟合可得出,选用聚丙烯材料的机构刚度为 0.080 5 N/mm,选用圆黄豆材料的刚度为 0.131 N/mm,选用刚玉材料的机构的刚度为 0.158 N/mm,可得选用刚玉材料的机构刚度具有明显优势。

4.4 重复刚度精度与稳定性测试

由于软体机器人应用不同尺寸堵塞机构实现变刚度,在相同负压驱动下,即使运动到同一状态,刚度也会存在差别,因此,重复刚度精度是衡量机器人稳定性的重要参数。应用步进电动机驱动力传感器每次移动固定距离 20 mm,记录传感器数据后,再还原初始位置,分别对大球颗粒和小球颗粒堵塞机构重复测试 100 次。通过 100 组数据计算出的标准偏差、变异系数和最大绝对偏差,来衡量机构的

稳定性和刚度精度。

对基于大小颗粒的变刚度机构和基于小颗粒的变刚度机构进行刚度测试试验后,对试验所得数据进行处理,计算数据的标准偏差,变异系数和最大绝对偏差,结果见表 3。

由表 2 可知,在同等试验条件下,本文提出的基于大小颗粒组合的机器人的变刚度数据标准偏差为 0.002 1 N/mm,变异系数为 1.542 7%,而基于小颗粒的机器人的变刚度数据的标准偏差为 0.002 9 N/mm,变异系数为 2.183 7%,标准偏差减小 27.59%,变异系数降低 29.355%,稳定性明显提高。本文机构刚度的最大绝对偏差(重复精度)为 0.006 25 N/mm,与小颗粒机构的 0.007 8 N/mm 相比,降低 19.871 8%,重复精度明显提高。

表 3 机器人测试刚度数据对比

	标准偏差 (N/mm)	变异系数(%)	最大绝对偏差(N/mm)
本文机构	0.002 1	1.542 7	0.006 25
小颗粒机构	0.002 9	2.183 7	0.007 8
降低百分比(%)	27.59	29.355 0	19.871 795

5 结论

本文设计了一款包含堵塞变刚度结构层、气动驱动结构层、硅胶-纤维复合结构层三层结构的气动与堵塞机构耦合的变刚度软体驱动器;建立了变刚度软体机器人的刚度模型,推导出机构末端的刚度与真空压力、大球尺寸、菱形骨架尺寸和填充颗粒参数之间的关系;制作了变刚度软体机器人样机,进行刚度和弯曲性能测试试验,利用多次试验所得数据的标准偏差,变异系数和平均绝对误差表征了机器人的变刚度特性和刚度稳定性能。

仿真和试验表明:应用半径为 2 mm, 3 mm 和 4 mm 的刚玉颗粒,在 -80 kPa 真空压力下刚度变化比分别为 5.10, 6.58 和 4.53。因此,填充颗粒半径为 3 mm 的机构刚度变化率最大。所提出的基于大小颗粒组合的机器人变刚度的标准偏差为 0.002 1 N/mm,变异系数为 1.542 7%,而基于小颗粒的机器人的变刚度数据的标准偏差为 0.002 9 N/mm,变异系数为 2.183 7%,标准偏差减小 27.59%,变异系数降低 29.355%,稳定性明显提高。本文机构刚度的最大绝对偏差(重复精度)为 0.006 25 N/mm,与小颗粒机构的 0.007 8 N/mm 相比,降低 19.871 8%,重复精度有所提高。

参 考 文 献

- [1] AMEND J R, BROWN Jr E, RODENBERG N, et al. A positive pressure universal gripper based on the jamming of granular material[J]. IEEE Trans. Robotics, 2012, 28(2): 341-350.
- [2] HOU Taogang, YANG Xingbang. Design and experiment of a universal two-fingered hand with soft fingertips based on jamming effect[J]. Mechanism and Machine Theory, 2019, 133: 706-719.
- [3] ZHU Mingzhu. A fully multi-material three-dimensional printed soft gripper with variable stiffness for robust grasping[J]. Soft Robotics, 2019, 6(4): 1-13.
- [4] LI Yingtian, CHEN Yonghua, LI Yunquan. Distributed design of passive particle jamming based soft grippers[C]// 2018 IEEE International Conference on Soft Robotics (RoboSoft), April 24-28, 2018, Livorno, Italy, Malaysia: IEEE, 2018: 547-552.
- [5] LI Yingtian, CHEN Yonghua, YANG Yang. Soft robotic grippers based on particle transmission[J]. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 2019, 24(3): 969-978.
- [6] AMEND J, CHENG N, FAKHOURI S, et al. Soft robotics commercialization: Jamming grippers from research to product[J]. Soft Robotics, 2016, 3(4): 213-222.
- [7] WEI Ying, CHEN Yonghua, YANG Yang, et al. A soft robotic spine with tunable stiffness based on integrated ball joint and particle jamming[J]. Mechatronics, 2016, 33: 84-92.
- [8] WU Zhaoping, LI Xiaoning, GUO Zhonghua. A novel pneumatic soft gripper with a jointed endoskeleton structure[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2019, 32(1): 78-89.
- [9] WEI Dunwen, GAO Tao, MO Xiaojuan, et al. Flexible bio-tensegrity manipulator with multi-degree of freedom and variable structure[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2020, 30(3): 56-66.
- [10] KIM Y J, CHENG S, KIM S, et al. A novel layer jamming mechanism with tunable stiffness capability for minimally invasive surgery[J]. IEEE Trans. Robot, 2013, 29(4): 1031-1042.
- [11] CHENG N G, LOBOVSKY M B, KEATING S J, et al. Design and analysis of a robust, low-cost, highly articulated manipulator enabled by jamming of granular media[C]// 2012 IEEE International Conference on Robotics Automation, May 14-18, 2012, RiverCentre, Saint Paul, Minnesota, USA: IEEE, 2012: 4328-4333.
- [12] LIN Nan. IMU-based active safe control of a variable stiffness soft actuator[J]. IEEE Robotics and Automation Letters, 2019, 4(2): 1247-1254.
- [13] 张明, 房立金, 孙凤, 等. 永磁变刚度柔性关节的力学分析与控制器设计[J]. 机械工程学报, 2019, 55(5): 89-96.
- [14] ZHANG Ming, FANG Lijin, SUN Feng, et al. Mechanical analysis and controller design of the permanent magnetic variable stiffness flexible joint[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2019, 55(5): 89-96.
- [15] WALL V, DEIMEL R, BROCK O. Selective stiffening of soft actuators based on jamming[C]// 2015 IEEE International Conference on Robotics Automation, May 26-30, 2015, Seattle, Washington, USA: IEEE 2015, 252-257.
- [16] WEI Ying, CHEN Yonghua, REN Tao, et al. A novel, variable stiffness robotic gripper based on integrated soft actuating and particle jamming[J]. Soft Robotics, 2016, 3(3): 134-143.
- [17] STELTZ E, MOZEIKA A, RODENBERG N, et al. JSEL: Jamming skin enabled locomotion[C]// 2009 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, October 11-15, 2009, St.Louis, USA: IEEE 2009: 5672-5677.
- [18] JIANG Pei. A variable stiffness gripper based on differential drive particle jamming[J]. Bioinspiration & Biomimetics, 2019, 14(5): 1-14.
- [19] WANG Tao, ZHANG Jinhua, LI Yue, et al. Electrostatic layer jamming variable stiffness for soft robotics[J]. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 2019, 24(2): 424-433.
- [20] 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.
- [21] YAO Ligang, LI Jingyi, DONG Hui. Variable stiffness analysis on a pneumatic soft manipulator[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2020, 56(9): 36-44.
- [22] 王田苗, 郝雨飞, 杨兴帮, 等. 软体机器人: 结构、驱动、传感与控制[J]. 机械工程学报, 2017, 53(13): 1-13.
- [23] WANG Tianmiao, HAO Yufei, YANG Xingbang, et al. Soft robotics: Structure, actuation, sensing and control[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2017, 53(13): 1-13.
- [24] ANDREW D, MARCHESE, ROBERT K, et al. A recipe for soft fluidic elastomer robots[J]. Soft Robotics, 2014,

2(1): 7-25.

[22] MARCHESE A, TEDRAKE R, RUS D. Dynamics and trajectory optimization for a soft spatial fluidic elastomer manipulator[J]. International Journal of Robotics Research, 2016, 35(8): 1000-1019.

[23] MARCHESE A, RUS D. Design, kinematics, and control of a soft spatial fluidic elastomer manipulator[J]. International Journal of Robotics Research, 2016, 35(7):

840-869.

[24] GENT A N. On the relation between indentation hardness and Young's modulus[J]. Rubber Chemistry and Technology, 2008, 31(4): 896-906.

作者简介：徐丰羽，男，1979年出生，博士，教授，硕士研究生导师。
主要研究方向为机器人及自动化，机电一体化技术。

E-mail: xufengyu598@163.com