

# 软体机器人纤维增强式三腔体结构设计与分析

冯乃诗, 王宏, 胡佛, 李康

(东北大学 机械工程与自动化学院, 辽宁 沈阳 110819)

**摘 要:** 根据人手三指节结构, 提出纤维增强式三腔体仿人软体机械手和新型布管方式. 采用 Neo Hookean 模型建立了软体机械手单指的大变形数学模型, 分析了软体机械手单指的形变特征, 建立了弯曲模型和扭转模型. 采用 Ecoflex 00-50 与 Dragon skin 30 进行 1:1 比例混合制作软体手指, 并利用测试数据对理论模型进行了误差修正. 结果表明, 提出的新型软体手指结构的理论模型和实际测量数据一致, 相对于其他结构, 新型布管方式增加了整体的稳定性, 得出的结论可为仿人软体机械手的发展提供理论支撑.

**关 键 词:** 软体机器人; 纤维增强; 三腔体; 有限元分析; 传感器

中图分类号: TP 242.6

文献标志码: A

文章编号: 1005-3026(2019)10-1461-06

## Design and Analysis of Fiber-Reinforced Three-Cavity Structure of Soft Robot Hands

FENG Nai-shi, WANG Hong, HU Fo, LI Kang

(School of Mechanical Engineering & Automation, Northeastern University, Shenyang 110819, China.

Corresponding author: WANG Hong, E-mail: hongwang@mail.neu.edu.cn)

**Abstract:** Based on the three-knuckle structure of a human hand, a fiber-reinforced three-cavity human-like soft body manipulator and a new type of pipe-laying method were proposed. The mathematical model of large deformation of the soft manipulator with a single finger was established by using Neo Hookean model. The deformation characteristics of the single-finger of the soft manipulator were analyzed, and the bending model and the torsion model were established. A 1:1 mixture of Ecoflex 00-50 and Dragon skin 30 was used to make soft fingers, and the error correction of the theoretical model was carried out with the test data. The results showed that the theoretical model of the proposed new soft finger structure is consistent with the actual measurement data. Compared with the other structures, the new pipe-laying method increases the overall stability, and the conclusions can provide theoretical support for the development of human-like soft body manipulators.

**Key words:** soft robot; fiber-reinforced; three-cavity; finite element analysis; sensor

基于生物界的灵感, 有来自多软体动物结构, 例如大象鼻子、章鱼<sup>[1-3]</sup>, 哈佛大学科研小组从这些软体动物身上受到启发, 研制出第一款软体机器人<sup>[4]</sup>. 软体机器人的结构多样且材料的变形具有非线性、多自由度等特点<sup>[5]</sup>, 在机器人中使用软体材料是开发机器人的新兴方式. 软体材料还可以承受较大的应变, 并且可以在一定范围内改变自身的尺寸和形状, 具有无限多的自由度. 并且软体机器人不受灰尘或液体等杂质的影响,

可以稳定维持本身固有的运动特性. 因此可以看出, 在未来软体手具有很强大的应用前景且可以在一定程度上弥补刚性手的不足之处.

现有的软体机械手, 多数为刚柔耦合结构, 例如 2016 年 Morrow 等<sup>[6]</sup>将刚性结构嵌入到手指尖端, 实现抓取. 2011 年日本研究人员 Nagase 等<sup>[7]</sup>将刚性元件和柔性原件相结合, 实现了不同柔性物体的抓取. 这些结构均为刚柔耦合且多为单腔体结构, 鲜有纯柔性仿人机械手. 而且对于气

动软体机械手结构,布管方式也有待创新<sup>[8]</sup>.布管方式的改进不仅可以提高整体的美观性也可以提高手指的鲁棒性.

针对上述问题,本文从软体材料特性和人手运动特点出发,提出了纤维增强式三腔体软体结构.为了模仿人手的运动,增加纤维增强层,利用纤维绳的对称和非对称捆绑,实现手指的弯曲运动和弯扭组合运动.提出了新式布管方式,提高了整体的稳定性,并且建立并分析了软体手指的弯曲模型和扭转模型

# 1 结构设计及力学建模

## 1.1 结构设计

本文设计的仿人软体机械手,参考哈佛大学 Polygerinos 等的工作<sup>[4]</sup>,提出新的模型结构并设计了新型布管结构.材料采用软体材料 Ecofle00-50 和 Dragon skin30 混合制作而成,由并列排列的三腔体构成.单指及其剖视效果如图 1 所示.图中的 A,B,C 代表三个腔体,可以分别通过气管对腔体进行充气,实现三腔体独立弯曲运动.三个独立气管均匀分布在应变层 A 上,将气管埋进应变层 A 中,三个气管的一头分别从 A 的上表面伸出,另一头分别从侧边伸出,实现对三腔体独立充气.限制应变层位于应变层 B 的上表面.

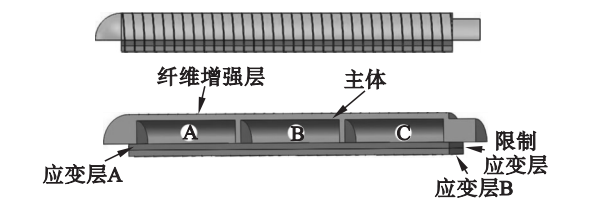


图 1 软体手指示意图及剖面图

Figure 1 Software finger diagram and section view

本文所设计的软体手单指的弯曲原理是利用层与层之间的应变差来产生弯曲运动.即根据每层材料的刚度不同,在相同作用力的情况下,产生的应变大小不同.而在结构设计时,在下面的两层中间添加了限制应变层,限制了手指轴向的变形运动,最终实现了手指的单向弯曲,如图 2 所示.而手指的扭转运动是由于外部纤维增强层即卡夫拉线非对称捆绑,导致两侧力的不对称,最终实现了扭转运动.本文设计中的单指模块分别由三种不同的材料组成,分别是胶体层、玻璃纤维层和纤维增强层.

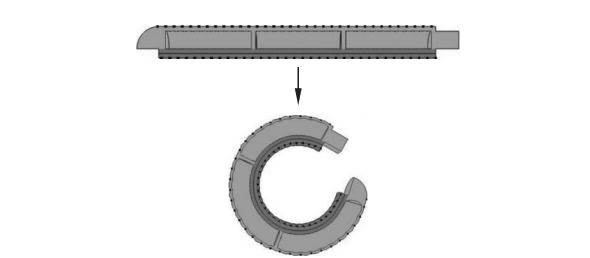


图 2 软体手指弯曲示意图  
Fig. 2 Soft finger bending diagram

## 1.2 基于 Neo Hookean 的静力学分析

软体机器人的材料通常均有非线性特点.施加力时,材料本身可延展多倍于自身的长度,当应力消失时,恢复到原始的状态.有很多的材料模型可以对材料进行模拟,例如多项式模型、Arrudea-Boyca 模型、Marlow 模型和 van der Waals 模型等<sup>[9-10]</sup>.为了简化模型,便于后续的理论分析,本文选择最简单的超弹性模型,即 Neo-Hookean 模型(以下简称 NH 模型).对于 NH 模型<sup>[10]</sup>, $U$  为应变势能,势能公式为

$$U = \frac{\mu}{2} (I_1 - 3). \tag{1}$$

式中: $I_1 = \lambda_1^2 + \lambda_2^2 + \lambda_3^2$ ,  $I_1$  为变形张量不变量,  $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$  为主延伸率(轴向、周向、径向);  $\mu$  为初始剪切模量.三个主延伸率不仅用于度量变形大小还用于定义应变势能.主延伸率的定义公式为

$$\lambda = \frac{L}{L_0} = \frac{L_0 + \Delta u}{L_0}. \tag{2}$$

式中: $L$  为变形后长度;  $L_0$  为变形前长度;  $\Delta u$  为变化长度.势能函数对变形方向应变求偏导,可以得到该方向的应力值  $\sigma_i$ :

$$\sigma_i = \frac{\partial U}{\partial \lambda_i}. \tag{3}$$

# 2 理论模型建立与分析

## 2.1 三段式手指弯曲模型

在左端端面束空间中,纤维增强型弯曲制动器在压缩空气的驱动下,利用弯曲角度和输入气压值之间的关系建立数学模型.当输入压缩空气时,主体将会产生拉伸现象,而由于限制应变层的存在,应变层 A 和 B 将不会产生变形,导致弯曲制动器将会向着底层弯曲,弯曲的近似半径设为  $R$ ,弯曲角度为  $\varphi$ .假设纤维增强层仅被当作为软体机械手外部的约束,忽略模型中与压力有关的动力学,并假设软体手指是总能够均匀弯曲.软体手指轴向伸长率定义为  $\lambda$ ,由于软体手指的周向变形被忽略,将  $\sigma_1$  并仅将  $\sigma_1$  看作为唯一应力,并

用  $\sigma$  表示. 当手指充入压缩空气并导致整体弯曲时, 将会产生方向相反的抵抗力矩, 产生弯曲的各个位置上将会产生力与之平衡. 本文选取支点  $O_i$  ( $i=1,2,3$ ) 进行静力学建模, 根据力矩平衡的原理, 即空气对于半圆腔体的圆弧面和底面的作用力在  $O_i$  点的合力矩为 0, 取每个  $O_i$  点右侧的截面进行受力分析, 可以得出各个关节弯曲角度和输入气压的对应关系, 如图 3 所示, 得出:

$$M_{a1} = M_{a2} = M_{a3} = M_{\theta}. \quad (4)$$

式中:  $M_{a_i}$  是由于压缩气体充入, 对支点  $O_i$  产生的弯矩. 由于气体的充入, 主体和底部应变层会产生收缩应力, 分别用  $\sigma_t$  和  $\sigma_b$  表示. 两个应力在  $O_i$  点产生的力矩由  $M_{\theta}$  表示. 软体手指的横截面为半径为  $a$  的半圆, 对支点  $O_3$  进行分析, 整个软体手指分为三个等长部分, 每小节长度为  $L$ , 如图 4 所示.

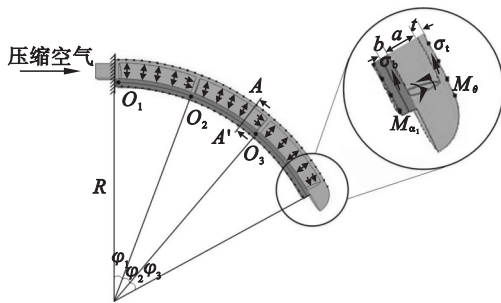


图 3 弯曲受力原理图

Fig. 3 Bending force schematic

$M_{a1}$  可以表示为  $M_{a1} = M_{ab} + M_{ac}$ . 其中  $M_{ab}$  可以表示为气压作用于腔体内半圆和底部的大小差异而引起在  $O_3$  处产生的弯矩. 因为作用于底部而产生的弯矩与作用于顶部而产生的弯矩方向相同, 因此, 在垂直方向, 利用作用于底部的气压产生的弯矩  $M_{ab1}$  减去作用于顶部的气压而产生的弯矩  $M_{ab2}$  得到  $M_{ab}$ . 对于水平方向, 两侧的弯矩大小相同, 方向相反, 因此相互抵消, 不予考虑.  $M_{ac}$  表示气压作用于端面而引起在  $O_3$  处产生的弯矩. 其中因为弯矩等于压力、面积和距离的乘积, 因此为了计算在点  $O_3$  的弯矩, 本文将半圆形截面分成左右两个对称面, 即四分之一圆. 将这个四分之一的圆形看成由若干个矩形组合在一起, 其中由于气压驱动而产生的力矩为

$$M_{a1} = \frac{4a^3\varphi + 3\pi a^2(b\varphi + 2L\sin^2\frac{\varphi}{2})}{6}(P_f - P_b). \quad (5)$$

式中:  $a$  为腔内半径长度;  $b$  为应变层 A 的厚度;  $\varphi$  为中心角度;  $P_a$  表示充气后的腔内气压;  $P_b$  是充气前的气压. 本文建立局部坐标系  $\tau$ , 方向为由圆

心指向圆周, 将四分之一扇形看成由无数个阴影部分组成. 在底部建立局部坐标系  $\beta$ , 由于超弹性材料而产生的力矩为

$$M_{\theta} = 2 \int_0^L \left( \int_0^{\frac{\pi}{2}} \sigma_t((a + \tau)^2 \sin\theta + b(a + \tau)) d\theta \right) d\tau + 2 \int_0^b \sigma_b(a + t) \beta d\beta. \quad (6)$$

根据 1.2 节可得

$$\lambda_{\beta} = 1 + \frac{\beta\varphi}{L}, \quad (7)$$

$$\lambda_{\tau} = \frac{R + b + \sin\theta(a + \tau)}{R}. \quad (8)$$

式中:  $L$  为软体手指的单节长度; 手指半径  $R = L/\varphi$ ;  $\lambda_{\beta}$ ,  $\lambda_{\tau}$  分别为半圆和底部产生的形变.

$$\sigma_b = \mu(\lambda_{\beta} - \frac{1}{\lambda_{\beta}^3}), \quad (9)$$

$$\sigma_t = \mu(\lambda_{\tau} - \frac{1}{\lambda_{\tau}^3}). \quad (10)$$

对于总体弯曲角度  $\varphi_{all}$  可以表示为三个独立腔体的叠加结果:

$$\varphi_{all} = \varphi_1 + \varphi_2 + \varphi_3. \quad (11)$$

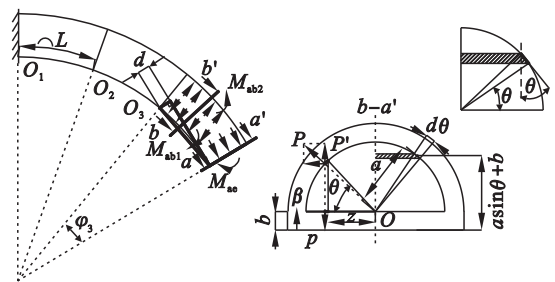


图 4 微元分析示意图

Fig. 4 Microelement analysis diagram

## 2.2 扭转模型建立

在模型运动中, 纤维增强层起到了关键作用, 它限制了主体层的自然膨胀. 假设纤维增强层总体长度不可伸展, 在软体手指运动时, 纤维增强层的密度则起到了重要作用. 纤维层可以看作是螺旋线的变形, 螺旋线具有螺距、起始角度等数学参数, 对于增强层也具有相同的参数. 当螺距改变之后, 那么在相同长度的情况下, 螺旋线的线数也会改变, 线数的改变直接影响着弯曲手指的末端输出力. 而对于弯曲模型而言, 螺旋线的缠绕方式是对称式缠绕, 因此只需要讨论螺距对于弯曲模型的变化情况即可.

对于单纯的扭转式模型, 纤维层捆绑方式和弯曲式模型不同, 扭转式模型只需要对单一一侧进行缠绕. 在气压和弯曲角度模型建立时, 假设的模型为只弯曲, 纤维增强层仅在垂直于表面的方向上起到了作用, 和充入气压对末端  $O$  点的扭矩

的方向垂直,因此对于弯曲的大小没有影响.本节针对的软体模型是只单纯地具有扭转效果的模型,建立纤维增强层的绕线角度和充入气压的大小之间的数学模型.

将软体手指看做若干个软体单元排列组成,通过分析每个软体单元的扭转角度大小,推出长度为  $L$  的软体手指的扭转角度大小.每个软体单元如图 5 所示,图 5a 为以纤维绳为受力对象的气压施力方向,图 5b 为纤维绳对软底单元的受力情况.绑上纤维增强层,只有软体单元对纤维绳有作用力,方向为半径方向背离圆心.因为整体处于平衡状态,因此力的大小和气压作用于微元的力相同.纤维绳对软体单元的力和软体单元的力是作用力与反作用力的关系.而对于已经充气的软体手,扭转运动是由于外力的作用(绕线之前本身已经是处于平衡状态),因此与纤维绳的作用力相平衡的力,就是由于材料本身抗剪切的物理性质而产生的力.在软体手指充气运动时,会固定左端.

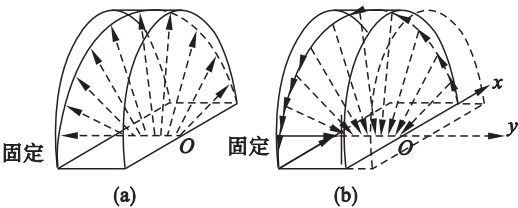


图 5 施力示意图  
Fig. 5 Force diagram

(a)—气压对纤维绳施力;(b)—纤维绳对软底单元施力.

最终得出扭转角度与缠绕圈数  $n$  和形状参数关系式如下:

$$\varphi(n) = \frac{4[(P_f - P_b)\pi a^2 - \sigma_1\pi(r^2 + 2at) - 4\sigma_b b(a+t)](a+t)^2}{nG(r_2^2 - r_1^2)}.$$

(12)

式中: $G$  为材料的切变模量; $r_2$  和  $r_1$  分别为半圆的外径和内径,形状参数与弯曲模型相同.

2.3 有限元仿真

利用 ABAQUS 对软体手指单指进行仿真分析,模型共分为 2 种,分别是弯曲模型和弯扭组合模型.对软体单指进行弯曲仿真,对软体手指分别充入 20,40,60,80,100,120 kPa 的气体,弯曲变形效果如图 6 所示,从 a 到 f 分别表示冲入气压从 20 kPa 至 120 kPa.

对软体手指的扭转情况进行仿真,选取线圈数分别为 33,30,27,24,20,18,对 6 个缠绕线圈数不同的软体手指统一充入 100 kPa 的气体,得到的仿真结果如图 7 所示,可以看出随着缠绕圈数的减少,扭转的角度逐渐增加

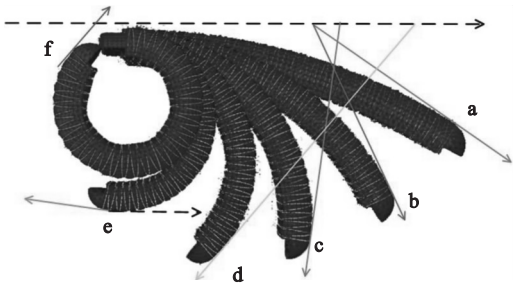


图 6 弯曲变形图  
Fig. 6 Bending deformation

(a)—20 kPa;(b)—40 kPa;(c)—60 kPa;  
(d)—80 kPa;(e)—100 kPa;(f)—120 kPa.

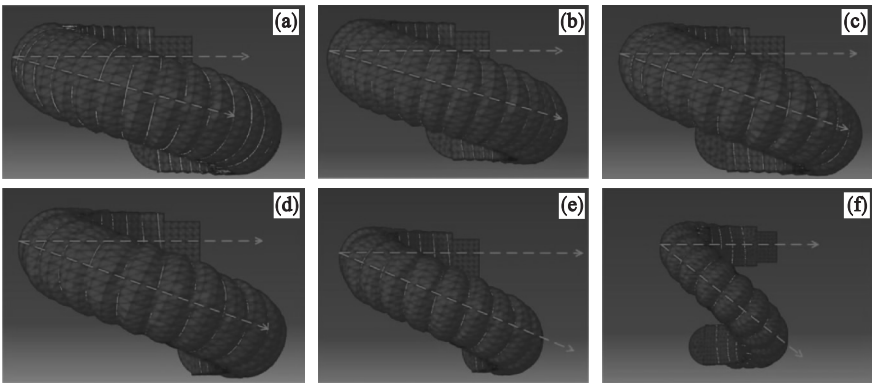


图 7 扭转模型有限元分析  
Fig. 7 Simulation of torsion angles

(a)— $n=33$ ;(b)— $n=30$ ;(c)— $n=27$ ;(d)— $n=24$ ;(e)— $n=20$ ;(f)— $n=18$ .

3 实验及分析

3.1 弯曲模型

利用弯曲传感器对软体手指的弯曲角度进行

标定和采集,本研究的弯曲传感器采用 FlexSensor 公司的 Flex4.5 弯曲传感器,将弯曲传感器固定在软体手指的底部,然后在外部捆绑上纤维增强层.弯曲传感器的工作原理相当于滑动

变阻器,弯曲传感器表面会有一层特殊的电阻材料<sup>[11-12]</sup>,当产生弯曲运动时,电阻值会增加.采用 Arduino UNO 对数据进行采集,利用放大器对弯曲角度进行放大,利用二联件对气压进行稳压.最终,得到的弯曲角度过程示意图如图 8 所示.

将理论模型与实验测量的数据点进行比较,如图 9 所示.通过对比可以看出,理论数据与实测数据趋势相同,均是随着气压的升高,弯曲角度增加的速度逐渐增加.虽然实验测得的数据和理论

数据存在误差,但是整体的误差可以接受.其中产生误差的原因有很多种,例如人为测量误差、制作误差、传感器标定误差等.

改变纤维增强层的缠绕圈数和方式,可以改变其运动方式,共存在三种运动方式,分别为弯曲运动、扭转运动、弯扭组合运动.针对弯扭组合运动,采集扭转角度,对软体手指充入 120 kPa 的气压,缠绕圈数对扭转角度的影响如图 10 所示.

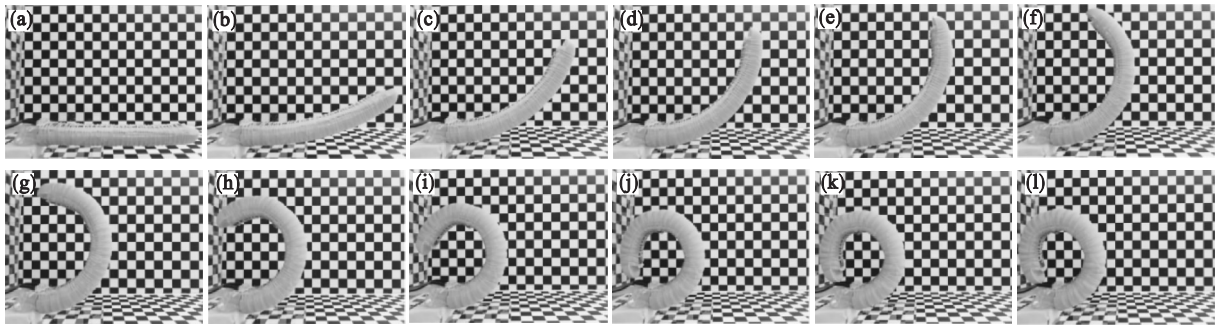


图 8 弯曲过程示意图  
Fig. 8 Bending process diagram

(a)—0; (b)—10 kPa ;(c)—20 kPa; (d)—30 kPa; (e)—40 kPa; (f)—50 kPa ; (g)—60 kPa ;(h)—70 kPa; (i)—80 kPa; (j)—100 kPa; (k)—120 kPa ;(l)—140 kPa .

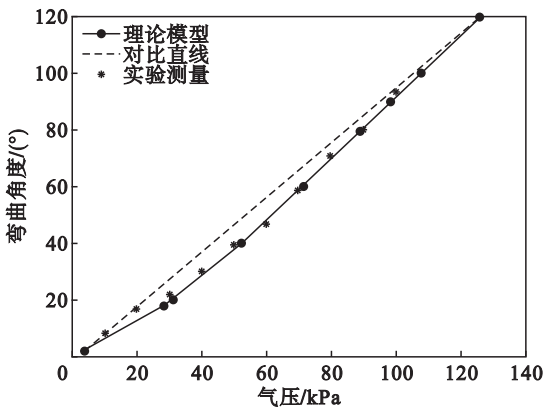


图 9 弯曲角度曲线  
Fig. 9 Bending angle curve

### 3.2 扭转模型

从图 11 可以看出,扭转角度的实际测量值和理论模型值有一定的误差,但是整体的趋势相同.导致误差的原因有很多种情况,经过分析最有可能的原因是在制作过程中,工艺引起的误差,或者是缠线部分引起的误差,亦或者是测量部分引起的误差,均为人为误差,无法彻底避免.因此针对此情况,对理论模型引入了误差补偿,误差补偿可以针对不同的情况得出不同的值,最终得出的误差补偿之后的曲线如图 11 中的虚线所示,可以看出经过误差补偿之后的实际测量曲线和理论模型较为相符.

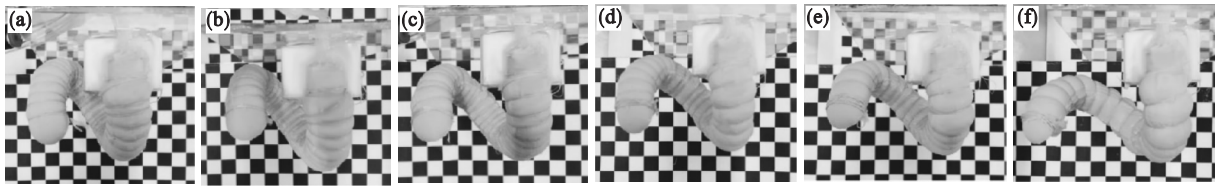


图 10 扭转过程示意图  
Fig. 10 Torsion process diagram

(a)— $n = 33$ ; (b)— $n = 30$  ;(c)— $n = 27$ ; (d)— $n = 24$ ; (e)— $n = 20$ ; (f)— $n = 18$  .

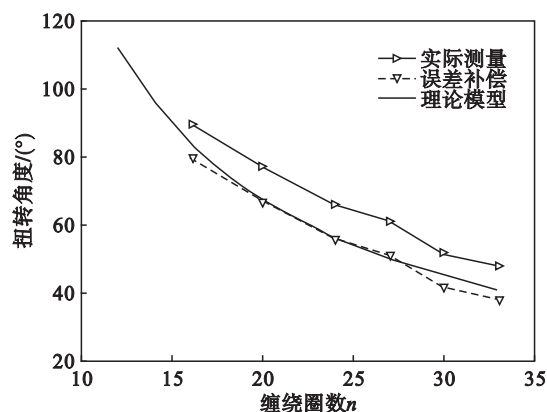


图 11 扭转角度曲线  
Fig. 11 Twist angle curve

4 结 论

- 1) 设计了纤维增强式三腔体软体机械手指结构,并对手指进行建模、仿真和制作. 该结构不仅可以实现三腔体独立运动充气,还能够实现弯曲运动和弯扭组合运动.
- 2) 提出的新式布管方式,可以将气管嵌入应变层处,提高了整体的稳定性和美观性.
- 3) 针对提出的结构,建立了弯曲模型和扭转模型. 实验测得数据和理论模型显示出较好的一致性,计算结果可靠.

参考文献:

[ 1 ] Fiorito G, Scotto P. Observational learning in octopus vulgaris[ J ]. *Science*,1992,256(5056) :545 – 547.

[ 2 ] Kier W M, Smith K K. Tongues, tentacles and trunks; the biomechanics of movement in muscular hydrostats [ J ]. *Zoological Journal of the Linnean Society*, 1985, 83 ( 4 ) : 307 – 324.

[ 14 ] 闫玉涛,李雪娟,胡广阳,等. 石墨密封材料高温摩擦磨损行为及预测[ J ]. *航空动力学报*,2014,29(2) :314 – 320.  
( Yan Yu-tao, Li Xue-juan, Hu Guang-yang, et al. Friction/ wear behaviors and predication of graphite seal material under high temperature[ J ]. *Journal of Aerospace Power*,2014,29 ( 2 ) :314 – 320. )

[ 15 ] Soltani R,Heydarzadeh S M, Ansari M, et al. Effect of APS process parameters on high-temperature wear behavior of nickel-graphite abradable seal coatings [ J ]. *Surface & Coatings Technology*,2017,321:403 – 408.

[ 16 ] Rajaram G, Kumaran S, Rao T S, et al. Studies on high

[ 3 ] 肖宇. 气动软体机械手设计及实验研究[ D ]. 南京:东南大学,2016.  
( Xiao Yu. Design and experimental research of pneumatic soft robot hand[ D ]. Nanjing :Southeast University,2016. )

[ 4 ] Polygerinos P, Lyne S, Wang Z, et al. Towards a soft pneumatic glove for hand rehabilitation [ C ]//IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. Tokyo,2014:1512 – 1517.

[ 5 ] Tsuji T, Fukuda O, Shigeyoshi H, et al. Biomimetic impedance control of an EMG-controlled prosthetic hand[ J ]. *Intelligent Robots & Systems*,2000(1) :377 – 382.

[ 6 ] Morrow J, Shin H S, Phillips-Grafflin C, et al. Improving soft pneumatic actuator fingers through integration of soft sensors, position and force control, and rigid fingernails[ C ]// IEEE International Conference on Robotics and Automation. Beijing,2016:5024 – 5031.

[ 7 ] Nagase J, Wakimoto S, Satoh T, et al. Design of a variable-stiffness robotic hand using pneumatic soft rubber actuators [ J ]. *Smart Materials & Structures*, 2011, 20 ( 10 ) : 105015 – 105023.

[ 8 ] Yang Y, Chen Y, Li Y, et al. Bioinspired robotic fingers based on pneumatic actuator and 3D printing of smart material[ J ]. *Soft Robotics*,2017,4(2) :147 – 162.

[ 9 ] 张晞,王刚,何明,等. 液压支架蕾形复合密封圈材料特性实验和有限元分析[ J ]. *矿业科学学报*,2016(1) :64 – 72.  
( Zhang Xi, Wang Gang, He Ming, et al. Experimental and numerical study on bud shaped composite sealing ring of hydraulic support [ J ]. *Journal of Mining Science and Technology*,2016(1) :64 – 72. )

[ 10 ] Gwinner J. Non-linear elastic deformations [ J ]. *Acta Applicandae Mathematica*,1988,11(2) :191 – 193.

[ 11 ] Furer J, Castañeda P P. Macroscopic instabilities and domain formation in Neo-Hookean laminates [ J ]. *Journal of the Mechanics & Physics of Solids*,2018,118:98 – 114

[ 12 ] Homberg B S, Katzschmann R K, Dogar M R, et al. Haptic identification of objects using a modular soft robotic gripper [ C ]//IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. New York,2015:1698 – 1705.

(上接第 1460 页)

temperature wear and its mechanism of Al-Si/graphite composite under dry sliding conditions [ J ]. *Tribology International*,2010,43(11) :2152 – 2158.

[ 17 ] 布尚 B. 摩擦学导论[ M ]. 葛世荣,译. 北京:机械工业出版社,2007.  
( Bhushan Bharat. Introduction to tribology [ M ]. Translated by Ge Shi-rong. Beijing :China Machine Press,2007. )

[ 18 ] 王伟,赵宗坚,张振生. 单环圆周密封装置设计和应用研究 [ J ]. *航空发动机*,2009,35(4) :6 – 11.  
( Wang Wei, Zhao Zong-jian, Zhang Zhen-sheng. Design and application of single circumferential seal [ J ]. *Aeroengine*, 2009,35(4) :6 – 11. )