

双向气动软体执行器的设计与分析*

宋晓娟¹ 刘帅¹ 吕书锋^{2†}

(1. 内蒙古工业大学 机械工程学院, 呼和浩特 010051)(2. 内蒙古工业大学 理学院, 呼和浩特 010051)

摘要 设计了由两种尺寸气囊交替连通而成的新型软体执行器, 该结构可实现两个方向固定角度摆动. 首先建立双向弯曲软体执行器的非线性力学模型, 得到形式为三段的分段函数, 每一段表示软体执行器在相应阶段的弯曲角度和驱动气压的函数关系. 其次, 应用仿真软件描绘出软体执行器的摆动角度和驱动气压的线性关系, 并与经典软体执行器进行了对比, 发现两者不同之处在于未充气侧大小气囊之间挤压的弹性势能. 最后, 制作了双向固定角度摆动的软体执行器模型, 通过实验验证了数值结果的可靠性. 结果表明, 本文提出的双向弯曲气动网格软体执行器的非线性建模和设计是可行的.

关键词 软体执行器, 双向弯曲, 固定摆动角度, 气压驱动

DOI: 10.6052/1672-6553-2020-092

引言

随着三维打印和柔性电子器件等机械和电子信息技术的进步, 软体机器人技术在近些年取得了快速发展. 传统的刚性机器人通常是以刚性结构为主体^[1], 在固定的环境中工作精度较高. 但此类机器人柔软性较差, 难以适应未知的空间和复杂的环境, 在诸如救援现场、军事侦察、科学探索和人机交互等未知环境中的应用受到了约束. 软体机器人常采用硅橡胶、形状记忆合金和纤维等柔软的材料制作而成. 自然界中的蛇^[2]、大象的鼻子^[3]、蚯蚓等软体生物对软体机器人的设计和制作提供了较多思路. 研究人员采用流体弹性驱动^[4]、形状记忆合金驱动^[5]、压电谐振驱动^[6]和化学驱动^[7]等诸多方式作为软体机器人的驱动方式. 其中流体弹性驱动包括液压驱动和气压驱动, 气动执行器具有响应速度快、制作方便、成本低和工作原理简单等优点.

近年来, 软体机器人研究受到国内外学者的广泛关注. 田富洋等^[8]研究了带有主被动关节的树形柔性机器人系统动力学高效建模方法. Shepherd等^[9]采用硅橡胶材料研制出一款四足软体机器人, 增加气压时软体机器人的四肢可以实现蠕动. 刘亭羽^[10]研制出仿生气动蠕动软体机器人. 王宁扬等^[11]以蜂巢为设计灵感, 设计制作出蜂巢网格机构的软

体执行器. Ren等^[12]采用阻塞技术, 制作出表皮由多个阻塞单元构成, 中心部分由一个气囊驱动的软体机器人. Branyan等^[13]设计了一种蠕虫软体机器人, 该机器人能够实现类似于蠕虫的运动. 对软体驱动器弯曲特征的研究, Webster等^[14]提出了软体机器人的分段常曲率假设, 采用D-H参数方法建立了软体机器人的运动学模型. Wakimoto等^[15]应用有限元方法研究了波纹管厚度和半径对驱动器弯曲性能的影响. 费燕琼等^[16]建立了气动网格软体机器人内部压强和弯曲程度的关系函数. 然而, 由于经典的气动网格软体执行器只能向一个方向弯曲, 且弯曲角度难以控制, 还需进行深入的设计和

研究. 本文对经典气动网格软体执行器的结构进行改进, 提出了一种可以实现两个方向弯曲, 同时可以控制弯曲角度的新型软体执行器, 通过控制其步态, 实现运动速度的控制. 两方向弯曲执行器与经典软体执行器相比有以下优势: 第一, 软体执行器可实现两方向弯曲, 而经典执行器只可以向一个方向弯曲. 第二, 响应速度快, 经典软体执行器在恢复未充气状态时, 只能依靠自身的弹性变形恢复, 响应速度慢; 而两方向弯曲执行器在恢复未充气状态或向另一方向弯曲时, 是依靠驱动气压和自身弹性势能来实现的, 响应速度快. 第三, 两方向弯曲执行

2020-06-03 收到第 1 稿, 2020-07-31 收到修改稿.

* 国家自然科学基金资助项目(11962020, 11862020)和内蒙古自治区自然科学基金项目(2019MS05065, 2018LH01014)

† 通讯作者 E-mail: shufenglu@163.com

器已知最大弯曲角度,有利于建立驱动气压和弯曲角度的数学关系,因经典软体执行器另一侧没有限制,导致最大弯曲角度无法确定.

为了进一步分析所提软体执行器的弯曲特性,本文对弯曲角度和驱动气压进行的关系进行建模和仿真,并通过实验来验证仿真结果的正确性.

1 软体执行器设计

软体机器人设计的重要环节就是软体执行器的设计,本文设计的软体执行器能实现左右两方向及固定角度弯曲的功能.双向弯曲执行器是由两个应变层、中间限制应变层和连接气源的气管组成.与经典气动网格软体执行器的不同之处在于:第一,经典气动网格软体执行器由一个应变层和一个限制应变层构成,而双向弯曲软体执行器由两个应变层和一个限制应变层组成,两个应变层中间夹一个应变层,这样的结构是双向弯曲的基础.第二,经典气动网格软体执行器应变层的气囊大小一样,而双向弯曲软体执行器应变层的大小气囊尺寸不一样,这样的结构在一侧应变层充气发生膨胀时,软体执行器发生膨胀弯曲,另一个应变层受到挤压,因大小气囊的尺寸不同,相邻两侧的大气囊包含小气囊,能够加大软体执行器的弯曲角度.第三,经典气动网格软体执行器的弯曲角度很难控制,而双向气动软体执行器的弯曲角度可以固定,这由软体执行器的自身结构决定,当一侧充气膨胀,另一侧受到挤压时,受挤压的一侧限制了软体执行器的弯曲.如图1-图2所示.

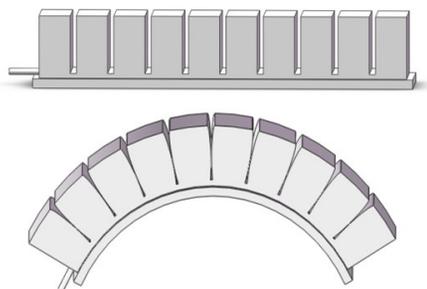


图1 经典气动网格软体执行器

Fig.1 Classic pneumatic grid soft actuator

双向弯曲软体执行器由于所能弯曲的最大角度值是固定的,工作性能相对稳定.通过改变不同应变层的充气,可改变不同方向的弯曲,通过不同频率的切换充气方向,可以实现不同频率的左右两方向弯曲摆动,为软体机器人移动速度的控制提供

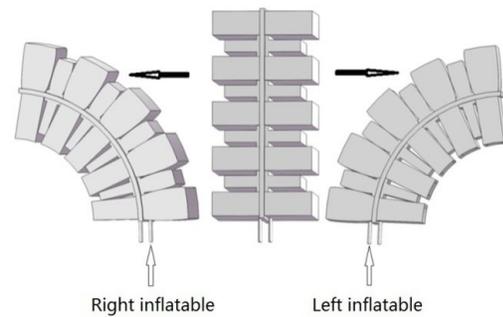


图2 双向弯曲软体执行器

Fig.2 Bidirectional bending soft actuator

了解决方案.

2 建立执行器非线性力学模型

双向弯曲软体执行器充气气压和弯曲变形分为三个阶段,如图3所示:第一个阶段是未充气侧应变层的大小气囊未发生接触,充气侧大小气囊相互作用使软体执行器发生弯曲,该阶段为经典软体执行器的充气气压和弯曲角度的动力学模型,如图3(a)-(b)所示.第二个阶段是未充气侧应变层的大小气囊相互接触,小气囊两侧的大气囊开始包含小气囊,由于大小气囊的气囊壁之间的相互作用力,会阻碍软体执行器发生弯曲变形,如图3(b)-(d)所示.第三个阶段是未充气侧应变层两个大气囊完全包含小气囊,两个大气囊相互接触,这时未充气侧应变层被完全挤压,增大气压也不会发生弯曲变形,弯曲角度达到最大,如图3(d)所示.本节围绕三个阶段描述双向气动执行器的气压和弯曲特性.

2.1 超弹性材料二参数模型

双向气动弯曲执行器是采用大小气囊交叉排

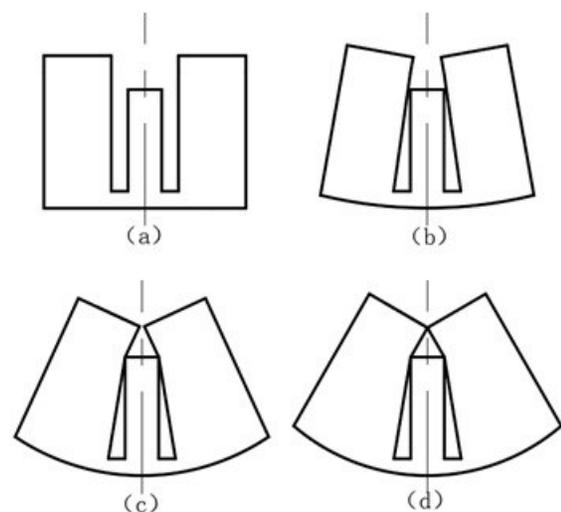


图3 被挤压侧大小气囊状态

Fig.3 Balloon state of squeezed side

列组合并采用硅橡胶材料制作而成的软体执行器,假设硅橡胶材料各项同性和不可压缩,本文采用Yeoh模型^[17],应变能 W 可以表示为:

$$W = C_1(I_1 - 3) + C_2(I_1 - 3)^2 \quad (1)$$

式中, C_1 、 C_2 材料参数,通过对硅胶材料拉伸实验测得, I_1 为变形张量不变量:

$$I_1 = \lambda_1^2 + \lambda_2^2 + \lambda_3^2 \quad (2)$$

其中, λ_1 为气囊长度方向的主拉伸比, λ_2 为气囊宽度方向的主拉伸比, λ_3 为气囊高度方向的主拉伸比的大小^[18].假设宽度方向不发生变形^[19],即:

$$\lambda_3 = 1 \quad (3)$$

硅橡胶材料近似不可压缩,则有:

$$\lambda_1 \lambda_2 \lambda_3 = 1 \quad (4)$$

将(3)式和(4)式联立得:

$$\lambda_1 = \frac{1}{\lambda_2} \quad (5)$$

令 $\lambda_1 = \lambda$,并将(5)式带入(2)式中,得:

$$I_1 = \lambda^2 + \frac{1}{\lambda^2} + 1 \quad (6)$$

将(6)式带入(1)式中得应变能为:

$$W = C_1 \left(\lambda - \frac{1}{\lambda} \right)^2 + C_2 \left(\lambda - \frac{1}{\lambda} \right)^4 \quad (7)$$

2.2 大小气囊变形的数学模型

双向气动弯曲软体执行器是靠气压充气膨胀来实现弯曲,弯曲角度可以看作是单个气囊弯曲角度的累加,定义大气囊的弯曲变形对应的圆心角为 θ_1 ,定义小气囊的弯曲变形对应的圆心角为 θ_2 ,双向弯曲软体执行器的弯曲变形对应的圆心角为 β ,则有单个气囊弯曲角和总弯曲角的关系为:

$$\beta = m\theta_1 + n\theta_2 \quad (8)$$

式中, m 、 n 分别为单侧软体执行器应变层大、小气囊的数量,数量关系为 $m=n+1$,由于材料和气压相同,大小气囊弯曲的曲率相同,即软体执行器的弯曲是平滑的曲线,则:

$$\theta = \theta_1 + \theta_2 \quad (9)$$

式中, θ 为一组大、小气囊的弯曲变形对应的圆心角.软体机器人的弯曲角度可由公式(8)计算得到,如图4所示为双向软体执行器的结构参数, l_1 为大小气囊相邻的气囊壁的厚度, l_2 、 w_1 、 h_2 ; l_4 、 w_3 、 h_4 分别为大气囊和小气囊的长度、宽度和高度, h_3 和 w_2 为大小气囊的气囊壁的厚度, h_6 和 w_4 为气囊气道的高度和宽度.

第一阶段,如图3(a)-(b)所示,未充气侧在相邻大小气囊未相互接触时,假设软体执行器的变形

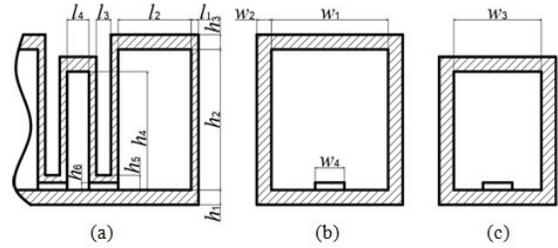


图4 执行器的气囊尺寸

Fig.4 Airbag size of actuator

不考虑自重和外力,受挤压一侧应变层的大小气囊未接触,驱动气压做的功和系统所储存的能量和为0,即驱动气压 P 做的功完全转化为软体执行器变形后储存的能量^[20]:

$$PdV_a = V_r dW \quad (10)$$

式中, V_a 是气室体积, V_r 是硅胶材料体积,假设硅胶材料不可压缩,变形前和变形后体积不变,由图4可得一组大小气囊的体积为:

$$V_r = L_b H_b W_b + l_3(h_1 + h_5)W_b - l_2 h_2 w_1 + L_m H_m W_m + l_3(h_1 + h_5)W_m - l_4 h_4 w_3 \quad (11)$$

式中

$$\begin{cases} L_b = 2l_1 + l_2 \\ H_b = h_1 + h_2 + h_3 \\ W_b = w_1 + 2w_2 \end{cases} \quad (12)$$

和

$$\begin{cases} L_m = 2l_2 + l_4 \\ H_m = h_1 + h_3 + h_4 \\ W_m = w_1 + 2w_2 \end{cases} \quad (13)$$

气囊变形前的体积 V_0 为:

$$V_0 = L_b H_b W_b + L_m H_m W_m + l_3(h_1 + h_5)(W_b + W_m) \quad (14)$$

变形后气室体积为 $V_a = V_1 - V_r$, V_1 为变形后一组大小气囊的体积,近似计算得:

$$V_a = (1 + \lambda)V_0 - V_r \quad (15)$$

根据文献[21],一组大小气囊长度方向的主伸比 λ 可表示为:

$$\lambda = \frac{\theta}{\sin \theta} \quad (16)$$

变形后气室体积 V_a 为一组大小气囊弯曲变形对应圆心角 θ 的函数,将式(7)、式(11)和式(15)带入到式(10)中,并对 θ 求导,得到一组大小气囊弯曲角度同输入压强与结构参数之间的数学模型:

$$P = \frac{(\sin \theta)^2 (V_0 - l_2 h_2 w_1 + l_4 h_4 w_2)}{V_0 (\sin \theta - \theta \cos \theta)} \cdot \frac{dw}{d\theta} \quad (17)$$

式(17)表示第一阶段输入压强和一组大小气囊对

应圆心角 θ 的函数。

第二阶段,如图3(b)-(d)所示,未充气侧应变层的大小气囊相互接触发生弹性形变,大小气囊之间相互作用产生弹力,驱动气压 P 做的功一部分转化为软体执行器变形后储存的能量,另一部分转化为未充气侧应变层的大小气囊相互挤压的弹性势能,则有:

$$PdV_a = V_r dW + \frac{\alpha W_m k X^2}{2} \quad (18)$$

式中, k 为大小气囊发生弹性变形的弹性系数, X 为单个接触面的变形量, α 为接触面的个数。

图5所示为被压接触线在第二阶段变化的示意图, L 为中线,在弯曲的过程中长度不变, l_0 、 l_1 、 l_2 分别为被压接触线的原始长度、开始产生弹性变形长度和弹性变形最大长度。 β_1 、 β_2 分别为开始产生弹性变形的弯曲角度和弹性变形最大角度。在第二阶段过程中软体执行器的中线 L 保持不变,由于相邻的大小气囊相互作用,导致被挤压线缩短,第二阶段开始即接触第一瞬间时被挤压线的长度为 l_1 ,第二阶段结束即弹性变形到达极限时,被挤压线的长度为 l_2 。开始产生弹性变形时也就是第二阶段初软体执行器的角度为 β_1 ,软体执行器变形到达极限,也就是被压接触线到达最短 l_2 时,软体执行器弯曲的角度为 β_2 。

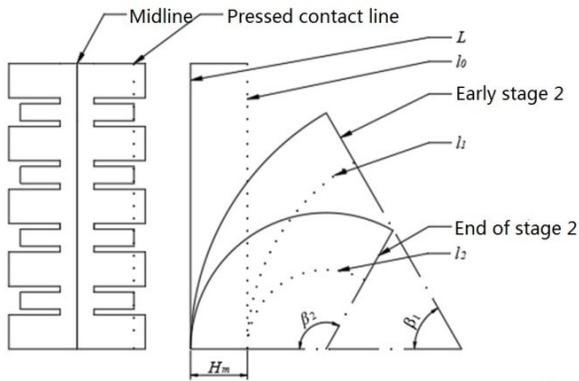


图5 第二阶段被压接触线图

Fig.5 Pressure contact diagram of the second stage

在第二状态下 $\beta_1 \leq \beta \leq \beta_2$, l 为被压接触线的长度, $l_1 \leq l \leq l_2$,故第二阶段初被压接触线的长度为:

$$l_1 = L - H_m \beta_1 \quad (19)$$

在第二阶段中 l 为:

$$l_2 = L - H_m \beta_2 \quad (20)$$

将式(19)与式(20)作差,可得:

$$\Delta l = l_1 - l_2 = H_m (\beta_2 - \beta_1) \quad (21)$$

式中, Δl 为被压接触线的变形量,故单个接触面的

变形量 X 为:

$$X = \frac{\Delta l}{n} = \frac{H_m}{2} (\theta - \theta_{m1}) \quad (22)$$

式中, θ_{m1} 为一组气囊第一阶段末的最大弯曲圆心角,将式(22)代入式(18)得:

$$P = \frac{4(\sin\theta)^2 (V_0 - l_2 h_2 w_1 - l_4 h_4 w_3) \frac{dw}{d\theta}}{8V_0 (\sin\theta - \theta \cos\theta)} + \frac{\alpha k W_m H_m^2 (\theta - \theta_{m1})}{8V_0 (\sin\theta - \theta \cos\theta)} \quad (23)$$

受挤压侧的一组大小气囊相互挤压,产生了阻碍执行器弯曲变形的力,在第二阶段,随着驱动气压的增加,执行器依旧实现不断弯曲.公式(23)仅含有 P 和 θ 两个未知数,通过一组气囊弯曲角度 θ 就可以得出所需驱动气压的大小。

第三阶段,如图3(d)所示,受挤压侧应变层被挤压到极限,小气囊完全被两侧的大气囊包裹,此时即使增加驱动气压,软体执行器也不会弯曲,气压不能无限增大,否则软体执行器会撑破,故有:

$$\theta = \theta_{m2}, (P \leq P_m) \quad (24)$$

式中, θ_{m2} 为一组气囊第二阶段末的最大弯曲圆心角, P_m 为驱动气压的极限气压.双向气动软体执行器在弯曲变形过程中可由式(16)、式(23)和式(24)分别表现这三个阶段的驱动气压 P 和一组气囊弯曲角 θ 的关系,确定驱动气压就可以得到软体执行器的弯曲角度。

3 软体执行器弯曲特性仿真

为探究执行器的气压与弯曲角度的关系,设计如表1所示的大、小气囊结构参数.由于大小气囊的气囊壁很薄,很容易发生形变.在第二阶段中根据胡克定律,实验测得弹性系数 $k=0.06\text{N/mm}$,由实验测得第一阶段和第二阶段软体执行器弯曲对应圆心角分别为 $\beta_1=60^\circ$ 、 $\beta_2=120^\circ$,设计的软体执行器一测应变层有5个大气囊和4个小气囊,由于靠近气路管一端的大气囊用于固定,不产生弯曲,所以为4组大小气囊,且有:

$$\theta_1 = \frac{\beta_1}{4}, \theta_2 = \frac{\beta_2}{4} \quad (25)$$

根据上式得到 $\theta_1=15^\circ$ 、 $\theta_2=30^\circ$,即第一阶段和第二阶段一组大小气囊弯曲对应圆心角的范围分别为, $0^\circ \leq \theta \leq 15^\circ$ 和 $15^\circ \leq \theta \leq 30^\circ$,根据以上参数绘制出驱动气压和弯曲角度的关系图形,如图6所示为经典软体执行器驱动气压和弯曲角度的关系^[18].由经典软体执

表 1 大小气囊结构参数

Table 1 Airbag structure parameters

Parameters	Size/mm	Parameters	Size/mm
l_1	1	h_4	16
l_2	10	h_5	4
l_3	2	h_6	2
l_4	4	w_1	20
h_1	2	w_2	2
h_2	20	w_3	16
h_3	2	w_4	4

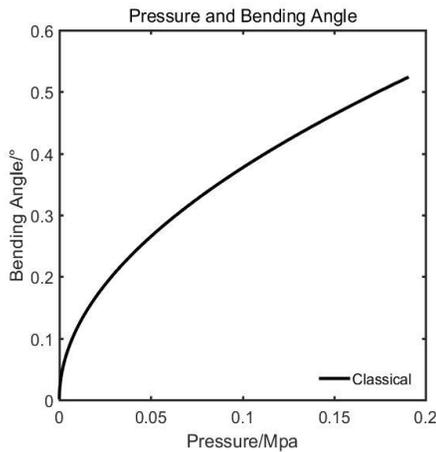


图 6 经典软体执行器
Fig.6 Classic soft actuator

行器气压和弯曲角度关系图可以看出,在刚开始的充气阶段,曲线的斜率很大,说明变形很明显.但是随着气压的增加,曲线的斜率基本保持恒定,这说明气压和弯曲变形近似趋于线性关系.

图 7 所示为双向气动软体执行器的驱动气压和弯曲角度的关系图形,可以发现该曲线为分段函数,包含三条曲线,每条曲线对应一个阶段.根据实验,测得软体执行器所能承受的最大气压为 0.03MPa.两种执行器的弯曲过程在每一阶段都有各自的特点,如图 8 所示为经典软体执行器和双向气动弯曲软体执行器的对比图形.由图 8 可以发现,双向弯曲软体执行器和经典软体执行器在第一个阶段的充气气压和弯曲程度相同.但是在第二阶段,由于未充气应变层一侧大小气囊相互接触,产生弹性力阻碍软体执行器的形变,驱动气压相同下,软体执行器的弯曲角度会减小.反应到关系图中是第二阶段的曲线斜率会相对减小.第三阶段,由于被挤压侧的大小气囊挤压到极限,所以加大驱动气压,也不会产生弯曲角度,形成一条水平直线.

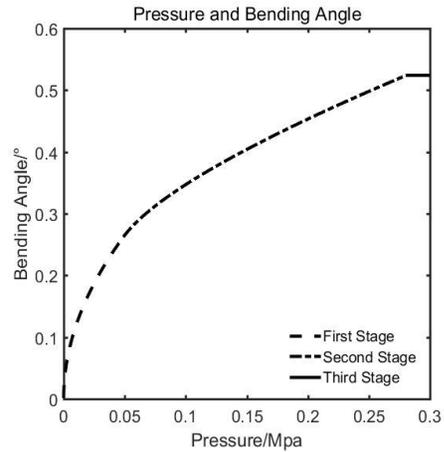


图 7 双向气动执行器

Fig. 7 Bidirectional pneumatic soft actuator

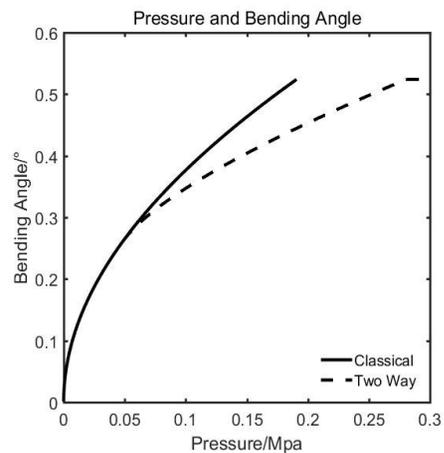


图 8 两种执行器运动过程对比

Fig.8 Comparison of movement of the two actuators

4 实验结果和分析

为了验证新型执行器理论分析的结果,我们采用硅胶材料铸造加工了双向弯曲软体执行器模型,采用控制变量法探究气压和弯曲角的关系.在其它参数不变的情况下,采用数字压力传感器来测量软体执行器的驱动气压值,驱动气压调整范围为 0kPa ~ 300kPa.本文选择了几个弯曲角度的节点,采用数字压力传感器,在等间隔角度上测量驱动气压的值,得到的实验结果如图 9 所示.

根据实验结果,发现当驱动气压为 52kPa 左右时,未充气侧大小气囊刚好接触,当气压达到 281kPa 左右时,软体执行器到达弯曲的极限.将实验结果和数值结果进行比较,如图 10 所示.由图 10 可以发现,实验和数值仿真结果基本吻合,理论模型可以用来预测实验结果.造成实验结果和理论预测值偏差的原因:第一,气源和软体执行器之间需

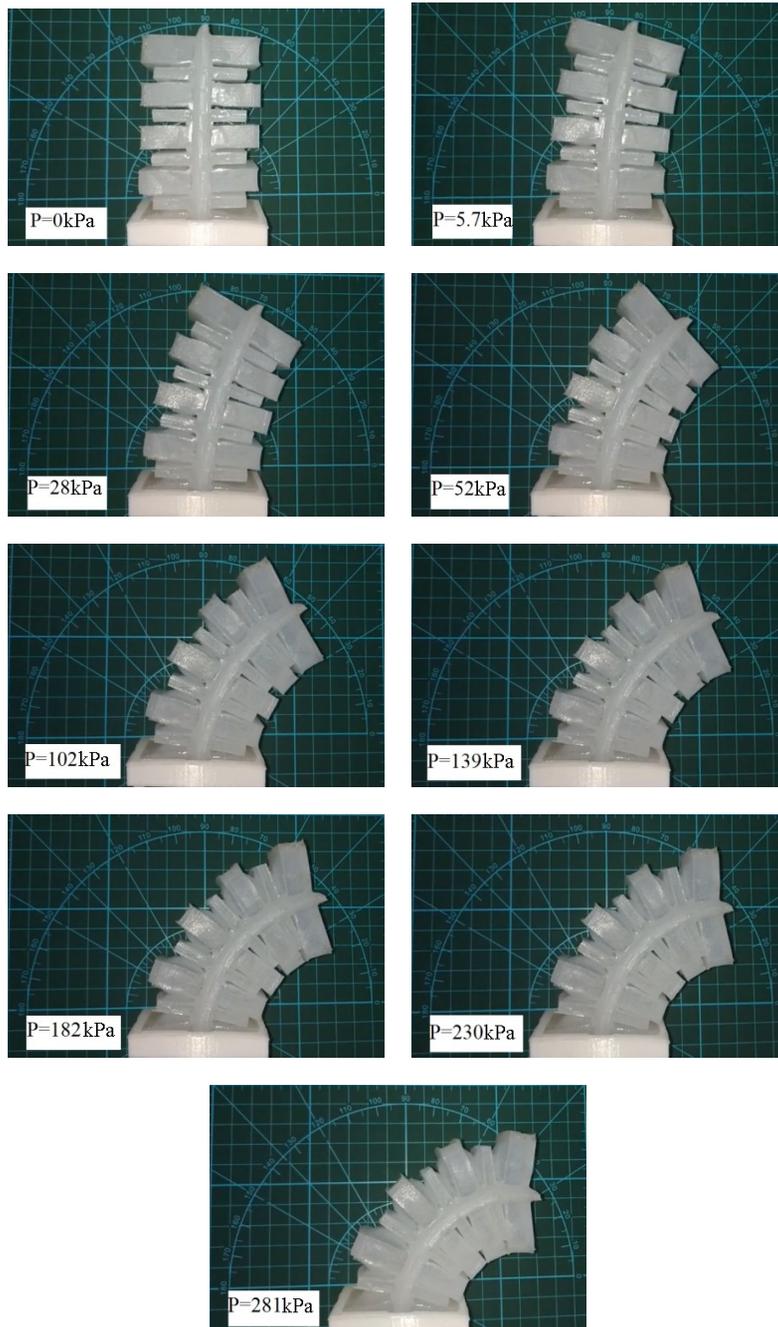


图9 执行器驱动实验

Fig.9 Driven experiment of the actuator

要一个换向阀,控制气流方向的流动,该换向阀削减了一些气压,使实验结果小于理论值;第二,软体执行器在实物操作过程中,各个结构参数会和设计值存在一定的误差;第三,软体执行器由于是用硅胶浇灌而成的,在操作过程中会产生气泡的现象,气泡的存在会影响执行器的弯曲效果,从而带来误差;第四,多腔室驱动器在充气过程中气囊之间由于压强产生力矩作用;第五,在换向阀切换气流方向的频率过高时,由于未充气侧气体没有及时排出,也会造成一定的误差。

实际操作中,为了提高双向气动软体执行器的精度,可以选择气密性高的换向阀,尽量缩小设计值和实际操作的误差;制造模具的精度也需要更加精细,在用模具浇灌完成之后,把模具放置于真空的环境中,可以有效的减少硅胶中的气泡,这些措施都可以减小实验结果和理论值之间的误差。

5 结论

本文设计了一种能够实现两方向、固定角度弯曲的新型软体执行器,该结构由两种尺寸的大小气

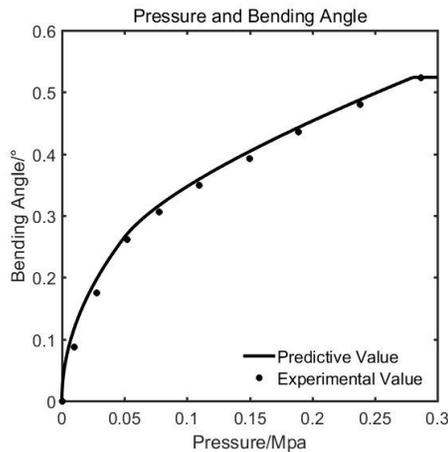


图10 数值解和实验结果比较图

Fig.10 Comparison of numerical and experimental results

囊交替连通组成.基于硅胶材料的超弹性特点和分段常曲率假设,利用虚功原理建立一组大小气囊弯曲角度和驱动气压之间的数学模型.采用数值方法分析了其弯曲摆动过程,发现通过控制驱动气压就可以预测出一组大小气囊的弯曲角度.通过制作执行器模型,采用实验方法验证了理论模型的可靠性,发现实验结果与理论模型吻合较好,理论模型可以用来预测实验结果并指导执行器设计.双向气动弯曲软体执行器的结构简单,可用来设计陆地爬行软体机器人的足,实现步态行走的功能.还可以应用在仿生鱼类动物的尾部,用来为水下仿生机器人提供动力等.本文所设计的双向气动弯曲执行器为软体机器人的设计和制作提供了新思路.

参 考 文 献

- 1 张奇志,周亚丽.伸缩腿双足机器人半被动行走控制研究.动力学与控制学报,2019,17(1):1~6(Zhang Q Z, Zhou Y L. Study on walking control of a semi-passive biped robot with telescopic legs. *Journal of Dynamics and Control*, 2019, 17(1):1~6(in Chinese))
- 2 Onal C D, Rus D. Autonomous undulatory serpentine locomotion utilizing body dynamics of a fluidic soft robot. *Bioinspiration & Biomimetics*, 2013, 8(2): 026003
- 3 Rolf M, Steil J J. Constant curvature continuum kinematics as fast approximate model for the bionic handling assistant. 2012 IEEE International Conference on Intelligent Robots and Systems. IEEE, 2012: 3440~3446
- 4 Mosadegh B, Polygerinos P, Keplinger C, et al. Soft robotics: pneumatic networks for soft robotics that actuate rapidly. *Advanced Functional Materials*, 2014, 24(15): 2109
- 5 Seok S, Onal C D, Cho K, et al. Meshworm: a peristaltic soft robot with antagonistic nickel titanium coil actuators. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 2012, 18(5): 1485~1497
- 6 李逵,徐鉴.压电谐振驱动三足机器人的平面运动.动力学与控制学报,2015,13(6):454~461(Li K, Xu J. Locomotion of three-legged vibration driven robot using piezoelectric actuator. *Journal of Dynamics and Control*, 2015, 13(6): 454~461(in Chinese))
- 7 Wehner M, Truby R L, Fitzgerald D J, et al. An integrated design and fabrication strategy for entirely soft autonomous robots. *Nature*, 2016, 536(7617): 451~455
- 8 田富洋,曹东,董晓宁,等.主被动关节柔性树形机器人系统动力学建模与仿真.动力学与控制学报,2017,15(1):59~67(Tian F Y, Cao D, Dong X N, et al. The dynamic modeling and simulation for flexible tree robots system with active-passive joint. *Journal of Dynamics and Control*, 2017, 15(1):59~67(in Chinese))
- 9 Shepherd R F, Ilievski F, Choi W, et al. Multigait soft robot. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2011, 108(51): 20400~20403
- 10 刘亭羽.仿生气动蠕动软体机器人的研究[硕士学位论文].哈尔滨:哈尔滨工程大学,2018(Liu T Y. Research on biomimetic pneumatic peristaltic soft robot [Master Thesis]. Harbin: Harbin Engineering University, 2018(in Chinese))
- 11 王宁扬,孙昊,姜皓,等.一种基于蜂巢气动网络的软体夹持器抓取策略研究.机器人,2016,38(3):371~377(Wang N Y, Sun H, Jiang H, et al. On grasp strategy of honeycomb pneunets soft gripper. *Robot*, 2016, 38(3): 371~377(in Chinese))
- 12 Ren H, Gu X. Human-compliant body-attached soft robots towards automatic cooperative ultrasound imaging. IEEE International Conference on Computer Supported Cooperative Work in Design. IEEE, 2016
- 13 Branyan C, Fleming C, Remaley J, et al. Soft snake robots: Mechanical design and geometric gait implementation. IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics. Macao, China IEEE, 2017: 282~289
- 14 Webster R J, Jones B A. Design and kinematic modeling of constant curvature continuum robots: a review. *The International Journal of Robotics Research*, 2010, 29(13): 1661~1683
- 15 Wakimoto S, Suzumori K, Ogura K. Miniature pneumatic curling rubber actuator generating bidirectional motion with one air supply tube. *Advanced Robotics*, 2011, 25(9-10): 1311~1330
- 16 费燕琼,庞武,于文博.气压驱动软体机器人运动研

- 究. 机械工程学报, 2017, 53(13): 14~18 (Fei Y Q, Pang W, Yu W B. Movement of air-driven soft robot. *Journal of Mechanical Engineering*, 2017, 53(13): 14~18 (in Chinese))
- 17 Shintake J, Sonar H, Piskarev E, et al. Soft pneumatic gelatin actuator for edible robotics. 2017 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS). *IEEE*, 2017
- 18 黄建龙, 解广娟, 刘正伟. 基于 Mooney-Rivlin 和 Yeoh 模型的超弹性橡胶材料有限元分析. 橡塑技术与装备, 2008, 34(12): 22~26 (Huang J L, Jie G J, Liu Z W. Finite element analysis of super-elastic rubber materials based on the Mooney-Rivlin and Yeoh model, *China Rubber/Plastics Technology and Equipment*, 2008, 34(12): 22~26 (in Chinese))
- 19 王江北, 方晔阳, 童歆, 等. 多气囊仿生软体机器人设计及其运动特性分析. 上海交通大学学报, 2018, 52(1): 20~25 (Wang J B, Fang Y Y, Tong X, et al. Design and locomotion properties of a multi-airbag bionic soft robot. *Journal of Shanghai Jiaotong University*, 2018, 52(1): 20~25 (in Chinese))
- 20 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研究. 中国机械工程, 2019(12): 2~3 (Fan X, Dai N, Wang H T, et al. Research on bending deformation prediction method of soft actuator with pneumatic networks. *China Mechanical Engineering*, 2019(12): 2~3 (in Chinese))
- 21 Polygerinos P, Lyne S, Wang Z, et al. Towards a soft pneumatic glove for hand rehabilitation. IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots & Systems. *IEEE*, 2013: 1512~1517

DESIGN AND ANALYSIS OF A BIDIRECTIONAL PNEUMATIC SOFT ACTUATOR *

Song Xiaojuan¹ Liu Shuai¹ Lu Shufeng^{2†}

(1. College of Mechanical Engineering, Inner Mongolia University of Technology, Hohhot, 010051, China)

(2. College of Science, Inner Mongolia University of Technology, Hohhot, 010051, China)

Abstract A new type of pneumatic grid is designed, actuator which can realize bidirectional bending with fixed angle. Firstly, a nonlinear mechanical model of the bidirectional bending soft actuator is established, and three piecewise functions are obtained, each of which represents functional relationships between the bending angle and the driving pressure of the soft actuator at corresponding stages. Secondly, the relationship between the bending angle and driving air pressure of the soft actuator is described by a simulation method. By comparing the pressure and bending angle of the two soft actuators, it is found that the difference lies in the elastic potential energy squeezed between the airbags on the uninflated side. Finally, the soft actuator model with two bending directions is made experimentally and the theoretical model is verified by experiments. The results show that the nonlinear modeling and design of the bidirectional bending pneumatic grid soft actuator proposed in this study are feasible.

Key words soft actuator, bidirectional bending, fixed angle swing, pneumatic driving

Received 3 June 2020, Revised 31 July 2020.

* The project supported by the National Natural Science Foundation of China (11962020, 11862020) and the Inner Mongolia Natural Science Foundation (2019MS05065, 2018LH01014)

† Corresponding author E-mail: shufenglu@163.com