DOI: 10.3901/JME.2020.09.036

气动软体机械臂模块变刚度性能分析*

姚立纲 李敬仪 东 辉

(福州大学机械工程及自动化学院 福州 350116)

摘要: 根据现有的气动软体机械臂的特征,为解决软体机械臂存在的结构刚度不足的问题,提出了一种软体机械臂模块。该模块采用耦合变刚度原理,由上下两端连接板、位于两连接板之间的外部弯曲硅胶气囊和中部变刚度硅胶气囊组成,可实现连续软体机械臂的模块化和变刚度,提升软体机械臂的负载能力。基于硅胶的超弹性材料特征,建立了新型软体机械臂模块的非线性力学模型并通过该模型完成了变刚度性能分析。在充分考虑各硅胶气囊的驱动力矩和模块的弯曲运动的基础上,设计了静态拉伸试验,对模块的变刚度气囊通过施加冗余驱动力矩来实现变刚度的效果进行了分析。通过试验与论证,总结出了模块充气压强与模块结构的刚度之间的变化规律,为气动软体机械臂刚度的计算和这种模块的实际应用提供了理论支持。

关键词: 软体机械臂; 模块化设计; 变刚度; 非线性力学

中图分类号: TP242

Variable Stiffness Analysis on a Pneumatic Soft Manipulator

YAO Ligang LI Jingyi DONG Hui

(School of Mechanical Engineering and Automation, Fuzhou University, Fuzhou 350116)

Abstract: For solving the defect of insufficient structural stiffness in soft manipulator, a module of pneumatic soft manipulator is designed according to the characteristics of currently soft manipulator. The module is designed by variable stiffness principle of coupling and consist of two connecting plates at the upper and lower ends, bending chambers between in the two plates and variable stiffness chamber in the middle. It can realize modularity, stiffness adjustment and load capacity in this continuum soft manipulator. Based on the hyperelastic material characteristics of silicone, a non-linear mechanical model suitable for pneumatic soft manipulator is established for analyzing the variable stiffness. Combining with the torques of the chambers and actual bending process of the module, this paper designed a static tensile test for evaluating the performance of variable stiffness chamber by applying redundant driving moment. Through the experiment and demonstration, the mapping relation between the inflatable pressure and the stiffness of the module is obtained, which provides the mechanical theory support for the stiffness calculation of the pneumatic soft manipulator and the practical application of the module.

Key words: soft manipulator; modular design; variable stiffness; non-linear mechanics

0 前言

随着机器人技术的深入发展,软体机器人正以其灵活和工作环境适应性强的特点,越来越多的被应用到生产和生活当中^[1]。在医疗和搜救等对机器人工作环境有特殊要求的行业,软体机械臂能更好地克服传统刚性机械臂灵活性差、环境适应性弱、安全性低的缺陷,已成为软体机器人的研究热点之一^[2]。目前,软体机械臂的研发主要基于仿生学原

理^[3],已开发出类柔性章鱼触手和象鼻等运动功能相似的软体机械臂^[4]。但软体机械臂自诞生以来也存在运行精度低、输出力矩小的缺陷,这有待科研人员从机械、材料等多个交叉学科入手,在软体机械臂的运动学建模、材料的刚度调节等方面来解决软体机械臂的缺陷问题^[5]。

各种软体机械臂驱动方式中,以流体驱动—尤其是以气动驱动方式设计的软体机械臂最为轻盈和简便。以美国宾夕法尼亚大学研发的 OctArm 仿生象鼻机械手为例,通过使用由低硬度硅胶制成的气动人工肌肉,能够以人工肌肉充气伸长的方式实现机械臂的大范围、大曲率的弯曲运动^[6]。OctArm 三组气动人工肌肉采用圆周对称设计,对之后的气动

* 国家自然科学基金(51605092)、福建省科技厅(2014H2004)、福建省科技厅面上(2017J01691)和福建省教育厅青年(JAT160055)资助项目。
20190530 收到初稿,20190812 收到修改稿

软体机械臂,如德国研发的仿生机械象鼻^[7-9]等,都具有很大的借鉴意义。其他的驱动方式,如形状记忆合金和智能材料驱动方式等,虽然设计结构上不如气动软体机械臂来的简便并且复杂工况下的运行稳定性也有限,但通过对这些驱动方式的研究,也设计出了众多具有新颖性的软体机械臂^[10-11]。这些软体机械臂普遍比气动软体机械臂尺寸更小,带动了软体机械臂朝着模块化、小型化和灵巧化的方向发展。

而在实现机械臂变刚度方式上,基于现有的技术,有耦合结构设计、使用可变结构材料和材料发生相变三种方式^[12-13]。从气动软体机械臂的制造成本上考虑,通过耦合结构设计软体机械臂要比后两种对材料要求较高的方式更好些。但就耦合结构变刚度的方式来说,通过冗余的驱动力矩作用,还存在对软体机械臂的结构产生多大的拮抗力从而使结构的刚度发生变化,以及模块内的弯曲驱动力矩会对这种由冗余驱动力矩耦合产生的刚度变化效果造成怎样的影响等问题。这也是本论文研究的重点,也是这类软体器械臂今后在设计理论层面上需要完善的部分。

以往的软体机械臂结合 Cosserat 梁理论,可以建立高精度的动力学模型^[14],但建模过程过于复杂。结合有限元法和材料的非线性力学的 Yeoh 模型,可以准确地建立软体机械臂的静力学模型和描述含力学参数的机械臂运动特征^[15-17]。但对于气动耦合结构变刚度软体机械臂来说,这并不能直观地反映气动软体机械臂材料的伸长与刚度特点。因此,需要从模块的力学建模入手,逐步建立与模块刚度相关的力学模型,以便进行软体机械臂模块的变刚度性能分析。

综上所述,虽然国内外学者对软体机械臂开展大量卓有成效的研究,目前软体机械臂还存在运行精度和结构刚度等问题有待解决,二者都对软体机械臂的运动性能有很大的影响且相互关联。论文将针对软体机械臂的刚度问题开展研究,提出基于柔性材料特性的静力学模型,在充分考虑软体机械臂弯曲运动影响的前提下,通过拉伸试验对气动软体机械臂的变刚度性能进行分析。

1 软体机械臂模块结构设计

软体机械臂结构设计是确保软体机械臂实现运动和刚度调节功能的基础,论文由此提出的新型气动软体机械臂模块由上下两个连接板和位于连接板

中间的硅胶气囊组成,如图 1 所示。为使硅胶气囊具备更好的轴向延展性,气囊设计成与波纹管类似的结构,采用东爵 NE-9530 高拉力气相硅胶,厚度为 3 mm。一个软体机械臂模块的硅胶气囊按功能分为外部三个呈圆周分布的弯曲硅胶囊和位于中部的变刚度气囊,各个气囊的型号与尺寸一致,以便于批量生产和组装。软体机械臂模块结构基本参数如表 1 所示。

图 1 软体机械臂模块

表 1 软体机械臂模块结构基本参数(mm)

参数	数值
硅胶气囊长度 l	195
连接板直径 D	155
硅胶气囊内径 d_1	22
硅胶气囊外径 d_2	30

通过连接板螺栓连接的设计,模块实现了软体机械臂小型化和灵活的模块化串联组装,以便于模

块实际的应用和研究；同时添加了变刚度气囊，实现了耦合结构的可变刚度；一个气囊设有两个气管接口，提升了充放气效率。在制作气囊时，先将气相硅胶切割成气囊厚度的硅胶片，再将整块的硅胶片包裹住模具内模并装入模具整体中，之后将整个模具放入平板硫化机压实并加热至 200 °C 进行硫化成型 30 min，最后从模具中取出气囊并在预设的气管结构位置开孔，从而完成硅胶气囊的制造。硅胶气囊的脱模需要事先在模具内模使用脱模剂并采用气压法脱模，待气囊充气膨胀与内模略为分离后，即可从模具中取出。气囊与 6 mm 的 PU 气管的连接采用管箍及过盈连接，与连接板的组装采用卡槽与胶水粘合的方式来完成，其生产流程如图 2 所示。组装完成的模块样机如图 2b 所示。

(a) 制造软体机械臂模块的流程

(b) 软体机械臂模块的成品样机

图 2 软体机械臂模块的制造

2 静力学模型的建立

气动软体机械臂模块静力学建模的核心是明确模块充气后伸长的力学特性，以便基于这种力学的特征考虑模块的弯曲运动和结构刚度。由于模块的主要部分由硅胶气囊组成，因此模块的应力与伸长的本构关系将通过硅胶的材料力学特性来展开。

2.1 硅胶气囊伸长本构关系的建立

就硅胶本身的材料性质而言，基于 Yeoh 模型对其进行非线性力学分析^[19-20]。假设硅胶气囊在软体机械臂模块内符合各向同性假设且具备不可压缩性，则可通过应力与应变建立非线性的硅胶气囊材料力学上的本构关系。这可以通过应变能函数模型表示如下

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

式中， I_1 、 I_2 、 I_3 为变形张量不变量。进一步根据 Mooney-Rivlin 模型，有具体的函数关系式

$$\begin{cases} I_1 = \lambda_1^2 + \lambda_2^2 + \lambda_3^2 \\ I_2 = \lambda_1^2 \lambda_2^2 + \lambda_1^2 \lambda_3^2 + \lambda_2^2 \lambda_3^2 \\ I_3 = \lambda_1^2 \lambda_2^2 \lambda_3^2 \end{cases} \quad (2)$$

式中， λ_1 、 λ_2 、 λ_3 分别为空间三个方向的主伸长比。此处根据软体机械臂的固有特性，引入两个限定条件。

(1) 硅胶气囊具备不可压缩性，则

$$I_3 = \lambda_1^2 \lambda_2^2 \lambda_3^2 = 1 \quad (3)$$

(2) 硅胶气囊在径向上无形变，则

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

由此可推出式(5)、(6)

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

$$I_1 = I_2 = \lambda_1^2 + \frac{1}{\lambda_1^2} + 1 \quad (6)$$

基于对气囊采用硅胶的拉伸试验，代入 Yeoh 模型，采用三参形式，可构建能量方程

$$\begin{aligned} W &= C_1(I_1 - 3) + C_2(I_2 - 3)^2 + C_3(I_3 - 3)^4 = \\ &C_1\left(\lambda_1 - \frac{1}{\lambda_1}\right)^2 + C_2\left(\lambda_1 - \frac{1}{\lambda_1}\right)^4 + C_3\left(\lambda_1 - \frac{1}{\lambda_1}\right)^6 \end{aligned} \quad (7)$$

式中含三个材料常数， $C_1 = 0.06$ 、 $C_2 = 0.008$ 和 $C_3 = 0.001$ 。根据应力与应变的关系

$$\sigma = \frac{2}{\lambda_1} \left(\lambda_1^2 - \frac{1}{\lambda_1^2 \lambda_2^2} \right) \left(\frac{\partial W}{\partial I_1} + \lambda_2^2 \frac{\partial W}{\partial I_2} \right) \quad (8)$$

可将式(5)~(7)代入式(8)中，有

$$\sigma = \frac{\lambda_1^4 - 1}{\lambda_1^3} \left(2C_1 + 4C_2 \left(\lambda_1 - \frac{1}{\lambda_1} \right)^2 + 6C_3 \left(\lambda_1 - \frac{1}{\lambda_1} \right)^4 \right) \quad (9)$$

由式(9)展开，但忽略三阶及以上阶数，可得应力与主伸长比的关系式

$$\sigma = 8C_1(\lambda_1^2 - 1) \quad (10)$$

2.2 主伸长比与弯曲参数的推导

进一步地, 根据上一段落对硅胶气囊的两个限定条件, 假设模块底部的连接板为约束条件。可知当硅胶气囊因充气气压发生主方向伸长, 即轴向伸长时, 其受力情况如图 3a 所示。

由于气囊受内部的充气气压 p 的影响, 产生伸长量 Δl , 故硅胶气囊的伸长比可通过式(11)表示

$$\lambda_1 = \frac{l'}{l} = \frac{l + \Delta l}{l} \quad (11)$$

式中, l' 为实际的硅胶气囊长度。考虑到 Δl 存在参数为负, 即硅胶气囊收缩的情况, 则其受力情况如图 3b 所示。

图 3 硅胶气囊伸缩与应力关系图解

图 3 中, σ 为模块上部连接板对硅胶气囊的作用应力。设定变刚度气囊的实际长度为模块的弯曲弧长, 则在弯曲气囊 $\overline{AB}$ 和变刚度气囊 $\overline{CD}$ 组成的平面内, 气囊的伸长与模块存在的弧长 L 和弯曲曲率 k , 存在如图 4 所示的关系, 对于模块运动的三维空间来说, 则弯曲气囊的弧长可表示为

$$L = \frac{l'}{1 + \frac{kD}{2}} \quad (12)$$

(a) 软体机械臂模块在空间中的弯曲示意图

(b) 参数在弯曲气囊和变刚度气囊构成的平面内示意图

图 4 软体机械臂模块的伸长和弯曲示意图

3 输出力矩与模块的刚度

在一个弯曲模块内, 论文基于虚功原理计算三个弯曲气囊对模块运动施加的驱动力矩和变刚度气囊的冗余驱动力矩。由此可以明确气动软体机械臂模块的力矩平衡方程, 以便分析其结构刚度。

3.1 力矩平衡方程的推导

在一个模块内, 对一个弯曲气囊充入的气压 p 能对模块上部的连接板产生的力矩为

$$M_n = 4 \left(\int_0^{\frac{\pi}{2}} \int_0^{r_1} p_n r^2 \sin \theta dr d\theta + \int_0^{\frac{\pi}{2}} \int_{r_1}^{r_2} A_n \sigma_n r^2 \sin \theta dr d\theta \right) = \frac{4}{3} [p_n r_1^3 + A_n \sigma (r_2^3 - r_1^3)] \quad (13)$$

式中, r_1, r_2 分别为气囊内径 d_1 的半径和外径 d_2 的半径。考虑到一个模块含有三个弯曲气囊, 则力矩 $M_n \in M_a, M_b, M_c$, 气压 $p_n \in p_a, p_b, p_c$, σ 为气囊的硅胶基体所受到的总应力, 而 A_a, A_b, A_c 为模块弯曲方向产生的应力集中影响系数。同理, 考虑变刚度气囊与模块结构的耦合因素, 则对模块上部的连接板产生的力矩为

$$M_s = 4 \left(\int_0^{\frac{\pi}{2}} \int_0^{r_1} P_s r^2 \sin \theta dr d\theta + \lambda_1 \frac{E}{\rho} \int_0^{\frac{\pi}{2}} \int_{r_1}^{r_2} r^2 \sin \theta dr d\theta \right) = \frac{4}{3} \left[P_s r_1^3 + \lambda_1 \frac{E}{\rho} (r_2^3 - r_1^3) \right] \quad (14)$$

式中, ρ 为模块的弯曲曲率半径, P_s 为变刚度气囊充入的气压, 此处 λ_1 为硅胶变刚度气囊基体的主伸长比, E 为硅胶的弹性模量。可以看出, 硅胶气囊通过充气伸长能对连接板产生驱动力矩。运动弯曲气囊产生的驱动力矩大小会受到应力集中的影响, 而变刚度气囊作为模块运动中的冗余驱

动力矩, 不受应力集中的影响但容易受到连接板间弯曲变形程度的影响, 论文基于此可列出模块内的力矩平衡方程

$$M_a + M_b + M_c + M_s = 0 \quad (15)$$

图 5 模块静态超弹性体结构示意图

将式(13)、(14)代入式(15), 有

$$\begin{aligned} P_s &= P + R(\sigma' - e) \\ \sigma' &= (A_a + A_b + A_c)\sigma \\ e &= \lambda_1 \frac{E}{\rho} \quad R = \frac{r_2^3}{r_1^3} - 1 \end{aligned} \quad (16)$$

式(16)即为变刚度气囊充气气压 P_s 对弯曲模块力学性能影响的表达式。从中可以看出, 当弯曲气囊充入的总气压 P 一定时, 变刚度气囊的气压 P_s 的变化能有效影响弯曲气囊的硅胶基体所受到的应力。在静应力模型中, 模块驱动力矩与载荷情况如图 5 所示, 在弯曲气囊作为超弹性体为主并联组成的模块结构中, 变刚度气囊可视为阻尼器, 通过对其充气气压的调节, 改变结构静态的应力与应变特性, 从而优化结构力学性能, 提升模块的负载能力, 使模块发生刚度变化。

3.2 应力集中影响系数的确定

从力矩平衡方程的组成要素中可以看出, 影响模块变刚度效果的一大主要因素是模块的弯曲方向角。结合实际的模块弯曲运动分析, 如图 6a、6b 所示, 设定气囊 b, c 充气的情况为模块在空间坐标系中角 $\Phi=0$ 的状态。则此时弯曲气囊 b, c 对模块输出全部的力矩产生伸长变形而弯曲气囊 a 相应地作为超弹性体在结构内受到集中的应力, 此时有 $A_b = A_c = 0, A_a = 1$ 。当 $\Phi=180^\circ$ 时, 弯曲气囊 $A_b = A_c = 0.5, A_a = 0$, 即在软体机械臂模块内弯曲气囊 a 对模块输出全部的力矩且输出的力矩而弯曲气囊 b, c 分别受到集中的应力。综上可归纳出角 Φ 与弯曲影响系数 A_a, A_b, A_c 的变化关系如表 2 所示。

将得出的数据采用二项高斯函数进行周期性的关联拟合, 可得出影响系数与方向角 Φ 的关系式

$$\begin{cases} A_a = 1.5 \exp\left(-\left(\frac{\varphi-337}{35.5}\right)^2\right) + 1.5 \exp\left(-\left(\frac{\varphi-23}{35.5}\right)^2\right) \\ A_b = 53 \exp\left(-\left(\frac{\varphi-120}{80}\right)^2\right) - 50 \exp\left(-\left(\frac{\varphi-120}{85}\right)^2\right) \\ A_c = 25 \exp\left(-\left(\frac{\varphi-240}{80}\right)^2\right) - 20 \exp\left(-\left(\frac{\varphi-240}{85}\right)^2\right) \end{cases} \quad (17)$$

$$\varphi \in [0, 360]$$

(a) 方向角 $\Phi=0$ 时模块的弯曲情况

(b) 方向角 $\Phi=180^\circ$ 时模块的弯曲情况

图 6 模块弯曲的方向角变化示意图

表 2 方向角 φ 与应力集中影响系数的关系

方向角 $\Phi(^{\circ})$	0	60	120	180	240	300
系数 A_a	1	0.5	0	0	0	0.5
系数 A_b	0	0.5	1	0.5	0	0
系数 A_c	0	0	0	0.5	1	0.5

4 试验与验证

首先对机械臂模块进行充气弯曲试验, 验证模块的非线性力学模型; 其次通过拉伸试验得出模块拉力与位移的变化规律, 以便从中分析变刚度气囊气压变化与模块刚度的规律; 最后通过等效替代试验静态分析变刚度效果, 验证模型精度并得出结论。

4.1 气压与模块曲率参数关系的验证

对于气动变刚度软体机械臂模块来说, 其弯曲的曲率与弯曲气囊内充入的气压有关且模块在气压驱动和运动空间上存在如图 7 所示的映射关系, 因此首先要进行试验论证弯曲气囊气压与模块弯曲曲率的关系, 以便分析冗余驱动力矩对结构的刚度影响。结合之前的论述, 由力矩平衡方程中变刚度气囊弯曲曲率半径可推导出模块的弯曲曲率, 结合式 (15)~(17), 则可知曲率 k 与气压参数 P 的关系式, 有

$$k = \frac{P - P_s}{R\lambda_1} + \frac{\sigma'}{\lambda_1} \quad (18)$$

图 7 充气气压对模块运动构型的映射关系图

设定弯曲气囊的最大充气气压为 10 kPa, 方向角 $\varphi \in (0^\circ, 360^\circ)$, 变刚度气囊气压为 0 且最大伸长比已知, 模块内的总应力 σ' 为常数但应力集中影响系数随方向角变化而不同。可通过 Matlab 绘制出极坐标函数图像, 以弯曲气囊总气压 P 为变量, 各弯曲气囊气压的变化规律与表 2 和式(17)中列出的应力集中影响系数类似应力集中影响系数的变化规律相似, 从而确定理论最大弯曲曲率和在函数闭合区间内弯曲气囊的曲率变化范围。论文在方向角变化的区间内平均选定 24 个角度, 按式(12)依据测量结果推导模块实际的最大弯曲曲率, 将数据样本拟合成实际极坐标函数图像与理论函数图像进行比对, 结果如图 8 所示。

图 8 模块最大曲率随方向角变化示意图

可以看出, 由式(18)绘制的理论弯曲曲率随方向角的变化平均保持在 8.5 m^{-1} 左右, 与试验数据的偏差不大, 从而可知力学模型的精度是可靠的。

4.2 变刚度效果验证

变刚度效果是这种软体机械臂模块设计的核心指标。已知对变刚度气囊的充气会以拮抗力耦合结构的形式改变模块的刚度, 因此试验通过对竖直状态下的软体机械臂模块施加一组径向的拉力, 来推算模块刚度的变化。如图 9a 所示, 该试验平台由测力计(NK-20N)、刻度尺、压力表(0~0.1 MPa, YN60)组成, 分别用来记录施加径向拉力的大小、模块的径向位移、变刚度气囊充入的气压。若变刚度气囊充入不同气压的压强, 但同样拉动模块使其横向偏移 10 mm, 则测力计便会记录下不同的数值。在变刚度气囊最大充气气压 10 kPa 的范围内, 依次进行 20 次拉伸试验, 得到的数据如图 9b 所示。

(a) 抗弯刚度拉伸试验平台

(b) 变刚度气囊气压与模块径向拉力变化关系图

图 9 变刚度气囊气压与模块刚度变化试验

根据式(12)、(16)、(18)以及广义胡克定律, 在弯曲气囊内的充气气压相对恒定的情况下, 可得出模块的变刚度气囊充气气压对结构的刚度 k_{st} 影响的表达式

$$k_{st} = 0.8EI \sqrt{\frac{P_s}{1.04} + 1} \lambda_1 \quad (19)$$

式中, I 为变刚度气囊的截面惯性矩; E 为硅胶的弹性模量; P_s 为变刚度气囊的充气气压; λ_1 来自式(10)。设三个弯曲气囊的气压全为零, 将试验中气压的参数代入式(19), 则可在 Matlab 中得到理论刚度变化曲线。同时将拉伸试验获得的数据进行计算, 可以得出模块的刚度数据, 对其进行拟合仿真。如图 10 所示, 将二者进行对比, 即可论证出式(19)的精度。

图 10 变刚度气囊气压与模块刚度变化论证

可以看出, 变刚度气囊从压力表为 0 时的初始气压到最大充气气压, 将模块的刚度提升了近 7 倍。即相比于没有安装变刚度气囊的模块, 安装了变刚度气囊的模块能大幅提升并调节结构的抗弯刚度, 改善模块的负载能力。为对上一变刚度效果的试验结果进行论证, 论文设计了一个等效替代试验。可基于连接板将变刚度气囊替换为两种型号的弹簧组成含弹簧的模块, 弹簧的刚度已知。如图 11a 所示, 对其进行拉伸试验, 记录下拉力和位移的变化。通过对式(19)的运用, 能以设定各气囊充气气压的方式, 将原先的模块设定为与弹簧相同的刚度, 作为理论刚度值的设定模块进行径向拉伸试验并记录下原先的模块拉力和位移的变化。两组数据结合 Matlab 进行拟合仿真, 数据的对比结果如图 11b 所示。

(a) 试验平台

图 11 用弹簧替代变刚度气囊进行变刚度论证试验

图中基于式(19)的理论刚度值的变刚度弯曲气囊模块拉伸试验数据的拟合曲线与弹簧组装的模块的拉伸试验数据拟合的结果近乎相同。由此可以看出: 弹簧对模块施加的刚度影响与变刚度气囊通过充气对结构的刚度产生的影响基本一致。这充分说明了气动耦合结构变刚度的有效性。

5 结论

(1) 论文基于现有的力学理论和气动软体机械臂的特点, 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, 使其能作为通用的工业化机器人零部件满足自动化生产的需要并能够通过耦合结构变刚度的方式, 在机械设计的层面解决软体机械臂材料刚度不足的缺点。对单个该型软体机械臂模块的变刚度性能分析表明: 基于冗余驱动力矩的并联耦合结构变刚度设计能够优化模块结构的应力应变特性, 实现刚度的调节, 提升机械臂的负载特性。

(2) 通过 Yeoh 模型, 基于硅胶的柔性材料特性进行了模块的非线性力学建模。从推导气压对硅胶气囊伸长量的关系式入手, 逐步推出弯曲气囊充气气压与模块弧长和曲率的关系式进而基于虚功原理列出了模块的力矩平衡方程。在建模过程中充分考虑了能使模块结构能发生刚度变化的因素并结合实际气动软体机械臂模块的运行情况, 推导出了各弯曲气囊在总应力上的应力集中影响系数。

(3) 模块在最大充气气压 10 kPa 的范围内, 最大弯曲曲率为 10.1 m^{-1} 。通过设置在模块中部的耦合变刚度气囊在最大充气气压的范围内, 能将刚度变化调节为 80~550 N/m, 其中当刚度在 100 N/m 和 200 N/m 时, 模块的刚度特性与相同刚度系数弹簧组装的模块相似。

(4) 通过试验充分证明了软体机械臂耦合结构变刚度的合理性以及气压对结构刚度的可控性, 同时推导出了变刚度气囊充气气压与模块刚度之间的关系式, 并且从模块的弯曲曲率和刚度参数的层面逐步验证了这个公式的准确性。未来的研究将着重于优化力学建模与试验平台的搭建上, 通过更高精度的软体机械臂运动及刚度控制试验的设计, 对模块驱动和刚度变化的各种耦合因素进行更深入而全面的分析, 从而使这种气动软体机械臂的设计和理论创新上得到提升。

参 考 文 献

- [1] 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.
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.
- [2] ONG Z, XIE Z, YANG X, et al. Design, fabrication and kinematic modeling of a 3D-motion soft robotic arm[C] //IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics, 2016: 509-514.
- [3] RENDA F, CIANCHETTI M, GIORELLI M, et al. A 3D steady-state model of a tendon-driven continuum soft manipulator inspired by the octopus arm[J]. Bioinspiration & Biomimetics, 2012, 7(2): 025006.
- [4] RUS D, TOLLEY M T. Design, fabrication and control of soft robots[J]. Nature, 2015, 521(7553): 467.
- [5] 耿仕能, 王友渔, 陈丽莎, 等. 变刚度连续型机械臂设计与控制[J]. 宇航学报, 2018, 12(39): 1391-1400.
GENG Shineng, WANG Youyu, CHEN Lisha, et al. Design and control of a continuum arm with variable stiffness[J]. Chinese Journal of Astronautics, 2018, 12(39): 1391-1400.
- [6] TRIVEDI D, LOTFI A, RAHN C D. Geometrically exact models for soft robotic manipulators[J]. IEEE Transactions on Robotics, 2018, 114(24): 773-780.
- [7] MELINGUI A, MERZOUKI R, MBEDE J B, et al. Performances evaluation of inverse kinematic: Models of a compact bionic handling assistant[C]//Proceedings of the 2017 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics, 2017: 264-269.
- [8] MAHL T, HILDEBRANDT A, SAWODNY O. A variable curvature continuum kinematics for kinematic control of the bionic handling assistant[J]. IEEE Transactions on Robotics, 2014, 30(4): 935-949.
- [9] LASCHI C, MAZZOLAI B, MATTOLI V, et al. Design of a biomimetic robotic octopus arm[J]. Bioinspiration & Biomimetics, 2009, 4(1): 015006.
- [10] WANG H, CHEN J, HENRY L, et al. Motion planning based on learning from demonstration for multiple segment flexible soft robots actuated by electroactive polymers[J]. IEEE Robotics and Automation Letters, 2016, 1(1): 391-398.
- [11] KIM Y, CHENG S, KIM S, et al. A novel layer jamming mechanism with tunable stiffness capability for minimally invasive surgery[J]. IEEE Transactions on Robotics, 2013, 29(4): 1031-1042.
- [12] 闫继宏, 石培沛, 张新彬, 等. 软体机械臂仿生理、驱、动及建模控制研究发展综述[J]. 机械工程学报, 2018, 54(15): 1-14.
YAN Jihong, SHI Peipei, ZHANG Xinbin, et al. Review of biomimetic mechanism, actuation, modeling and control in soft manipulators[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2018, 54(15): 1-14.
- [13] 曹玉君, 尚建忠, 梁科山, 等. 软体机器人研究现状综述[J]. 机械工程学报, 2012, 48(3): 25-33.
CAO Yujun, SHANG Jianzhong, LIANG Keshan, et al. A review on the soft robotics[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2012, 48(3): 25-33.
- [14] RENDA F, CACUCCILOLO V, DIAS J, et al. Discrete Cosserat approach for soft robot dynamics: A new piece-wise constant strain model with torsion and shears[C] //IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS), 2016: 5495-5502.
- [15] 姚建涛, 陈新博, 陈俊涛, 等. 轮足式仿生软体机器人设计与运动分析[J]. 机械工程学报, 2018, 54(11): 1-8.
YAO Jiantao, CHEN Xinbo, CHEN Juntao, et al. Design and motion analysis of a wheel-walking bionic soft robot[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2018, 54(11): 1-8.
- [16] KRISTIN M P, OLIVER M O. On the development of rod-based models for pneumatically actuated soft robot arms: A five-parameter constitutive relation[J]. International Journal of Solids and Structures, 2017, 120: 226-235.
- [17] BOSMAN J, BIEZE T M, LAKHAL O, et al. Domain decomposition approach for FEM quasistatic modeling and control of continuum robots with rigid vertebrae[C] //IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA), 2015: 4373-4378.
- [18] 姚鹏飞. 长臂式仿生软体机器人弯曲建模及实验研究

- [D]. 杭州: 浙江工业大学, 2017.
- YAO Pengfei. Bending modeling and experimental study on a novel long-arm bio-soft robot[D]. Hangzhou: Zhejiang University of Technology, 2017.
- [19] 费燕琼, 庞武, 于文博. 气压驱动软体机器人运动研究[J]. 机械工程学报, 2017, 53(13): 14-18.
- FEI Yanqiong, PANG Wu, YU Wenbo. Movement of air-driven soft robot[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2017, 53(13): 14-18.
- [20] 王鹭, 付宾, 杨晓翔. 炭黑填充天然橡胶 Mullins 效应的仿真与计算分析[J]. 计算力学学报, 2017, 34(3): 372-377.
- WANG Lu, FU Bin, YANG Xiaoxiang. Numerical simulation and analysis of carbon-reinforced rubber's Mullins effect[J]. Chinese Journal of Computational Mechanics, 2017, 6(4): 372-378.

作者简介: 姚立纲, 男, 1964 年出生, 博士, 教授, 博士研究生导师。主要研究方向为机器人机构及机械传动学、康复机器人、现代设计方法、复杂曲面建模及精确制造。
E-mail: ylgiao@fzu.edu.cn

东辉(通信作者), 女, 1985 年出生, 博士, 副教授。主要研究方向为医疗康复机器人和机器人运动学及控制算法。
E-mail: hdong@fzu.edu.cn

第 9 届上银优秀机械博士论文奖——佳作奖

植物油基纳米粒子射流微量润滑磨削机理与磨削力预测模型及实验验证

作者: 张彦彬

毕业学校: 青岛理工大学

指导教师: 李长河

纳米粒子射流微量润滑技术是一种准干式绿色制造方法, 是十三五规划、中国制造 2025 发展重点。然而, 然而对于磨削加工应用, 存在以下技术瓶颈: 高比能导致微量润滑换热能力不足; 砂轮高速旋转存在气障层导致润滑剂有效流量过低; 砂轮/工件复杂空间润滑剂输运成膜、减摩换热等科学本源问题尚未解决; 高速高温高压界面润滑作用影响的材料去除机制及力学行为尚未揭示。

围绕纳米粒子射流微量润滑磨削科学本源问题、技术瓶颈与应用, 论文开展了植物油基纳米粒子射流微量润滑磨削机理的研究工作, 进行了纳米粒子射流微量润滑强化换热、减摩抗磨性能和材料去除机理及力学行为的理论研究, 并进行了大量的磨削实验验证和理论建模工作。论文主要包括以下内容。

(1) 率先从理论上揭示了植物油基纳米流体分子结构(脂肪酸饱和度、碳链长度、极性基团)、物理特性(黏度、表面张力)对磨削区换热性能和摩擦学特性的影响机制; 建立了纳米粒子射流微量润滑热/力性能评价方法与工艺优化策略。

(2) 提出了 MoS₂/CNTs 混合纳米粒子射流微量润滑工艺, 揭示了混合纳米粒子“物理协同作用”下的磨削区减摩抗磨、强化换热增效机制; 通过摩擦因数、工件表面粗糙度 R_a 、工件表面烧伤检测、工件表面轮廓自相关分析, 得到了高温镍基合金磨削加工优选参数, 解决了难加工材料磨削烧伤难题。

(3) 揭示了砂轮/工件润滑工况下材料去除机理, 建立了单颗磨粒几何学与运动学模型、普通砂轮磨削区动态有效磨粒分布及切削深度数学模型; 提出了以切削效率作为耕犁与切削的判据, 得到了切削效率随切削深度的变化规律; 以此为基础, 构建了基于材料去除和塑性堆积耦合的耕犁与切削力预测新模型, 实现了不同润滑工况下的磨削力预测, 误差由 10.28%降低到 4.19%。

(4) 研究了纳米粒子射流微量润滑磨削“速度效应”, 揭示了高速绝热、高速等温边界条件下单颗磨粒第一变形区、第二变形区的材料去除力学行为; 揭示了纳米粒子射流微量润滑对切削区热/力边界的影响机制, 发展了单颗磨粒不同润滑工况条件下的应变率数学模型。