DOI: 10.3901/JME.2019.05.027

轮足式仿生软体机器人设计与运动分析*

姚建涛^{1,2} 陈新博¹ 陈俊涛¹ 张弘¹ 李海利¹ 赵永生^{1,2}

(1. 燕山大学河北省并联机器人与机电系统实验室 秦皇岛 066004;

2. 先进锻压成形技术与科学教育部重点实验室(燕山大学) 秦皇岛 066004)

摘要: 基于自然界中弯曲蠕虫的运动原理, 借鉴其结构特点, 设计一种双腔结构的轮足式仿生蠕动软体机器人, 利用硅橡胶材料的超弹性特征, 通过多气囊结构中充气挤压变形使软体机器人本体结构发生弯曲, 周期性的充放气实现软体机器人的蠕动运动。引入轮足式设计, 将软体机器人软体基体的蠕动运动转变为车轮的旋转运动, 加快蠕动型机器人的运动速度, 通过向软体基体双腔充入不同气压, 实现大角度转弯。分析了蠕虫机器人周期性的直线运动和转向运动过程, 研究了机器人运动过程中的非线性力学特性, 测试了软体基体双腔充气状态下变形量与气压的关系以及单腔状态下转弯角度与气压的关系, 分析了软体机器人的最快行进速度和最小转弯半径, 确定了软体机器人的运动性能。

关键词: 软体机器人; 轮足式; 快速行进; 运动研究

中图分类号: TG156

Design and Motion Analysis of a Wheel-walking Bionic Soft Robot

YAO Jiantao^{1,2} CHEN Xinbo¹ CHEN Juntao¹ ZHANG Hong¹
LI Haili¹ ZHAO Yongsheng^{1,2}

(1. Parallel Robot and Mechatronic System Laboratory of Hebei Province,
Yanshan University, Qinhuangdao 066004;

2. Laboratory of Advanced Forging & Stamping Technology and Science (Yanshan University),
Ministry of Education, Qinhuangdao 066004)

Abstract: Based on the movement model and the structural characteristics of worms, a bionic wheel-walking squirming soft robot with a double-cavity structure is proposed. The main body of the soft robot is made of hyperelastic silicon rubber, and its multi-air-bag structures would expand and extrude each other to bend the robot body when air at a certain pressure is pumped into the air bags. The inchworm-like peristaltic movement of the soft robot is realized by periodically charging and releasing air. In addition, the peristaltic motion of the soft robot is changed into rotational motion of the wheels to accelerate its moving speed because of the ingenious wheel-walking device. And a large angle turn can be achieved by fill the two chambers with air of different pressure. The periodic motion and steering movement of the squirming robot are analyzed. the nonlinear mechanical properties of the robot are studied. The relationship between the deformation and the pressure is tested when the two cavities are filled with air of same pressure. And the relationship the turning angle and the pressure is also tested when the single cavity is inflated. The maximum moving speed and the minimum turning radius of the soft robot are analyzed. Based on the results above, the motion performance of the soft robot is determined.

Key words: soft robot; wheel-walking; fast marching; locomotion study

0 前言

传统机器人大多由刚性结构组成, 能够快速、精确、重复地执行任务, 在工业、建筑、医疗等诸多领域具有广泛的应用, 但其存在结构复杂、灵活

度有限、安全性和适应性较差等不足^[1-2]。随着机器人技术的发展, 具有较高柔顺灵活性和较强环境适应能力的软体机器人已成为当前机器人领域的研究热点之一。软体机器人研究是仿生学研究的延续, 软体机器人采用软体材料或柔性材料加工而成, 本身结构具有高度可变性, 从原理上具有无限自由度, 自身具有良好的安全性和柔顺性^[3]。软体机器人可以大幅度弯曲、扭转和伸缩, 可以在有限的空间下

* 国家自然科学基金(51675459)和河北省自然科学基金京津冀合作专项(E2017203387)资助项目。20180604 收到初稿, 20181127 收到修改稿

工作,能够进入传统机器人无法进入的空间^[4],同时软体机器人由于其自身良好的柔顺特性,具有较好的人机交互安全性。

在软体机器人的研究中,软体行走机器人有着自身的优点,可以模仿自然界中各种生物的运动形式^[5-6],通过主动变形使自身处于不同的运动状态,适应人类无法到达的环境,扩大人类的工作范围和探索领域。

目前,国内外研究学者对软体行走机器人的研究仍处于初步阶段,美国塔夫斯大学 BARRY 研究组研发的 GoQBot 机器人以弯曲爬行虫为参考原型,由形状记忆合金(Shape memory alloy, SMA)驱动,能够实现爬行、翻滚等运动形式^[7]。日本早稻田大学的 NAKAMARU 等^[8]以凝胶为材料,研发了一种外形简单,有着类似蠕虫的运动模式的仿生机器人。利用基于 B-Z 化学反应的凝胶驱动特性,使其能够自由行走。麻省理工学院、哈佛大学和韩国汉城国立大学合作研发的 Meshworm 机器人^[9]由形状记忆合金丝驱动,模仿蚯蚓的运动形式,以仿生蠕虫的方式向前爬行,其运动速度约为 5.25 mm/s。哈佛大学 GEORGE 研究组研发出了充气式蠕动软体机器人^[10-11],该软体机器人通过充气产生运动,可以穿越障碍,进入狭小空间,并且具备很强的抗冲击性能,行走速度约为 25.6 mm/s。意大利 CRIM 实验室参考蚯蚓的运动设计了一种串联蠕虫机器人,运动速度可达 0.22 mm/s^[12]。美国德克萨斯 A&M 大学研发了一款 IPMC 驱动的六足行走机器人^[13],具有输出位移大,运动灵活等特点,行走速度约为 0.5 mm/s。韩国成均馆大学研究团队基于介电高弹体材料,设计了一种首尾连接的蠕虫机器人^[14],运动速度为 2.5 mm/s。中国科学技术大学设计了一个仿海星软体机器人^[15],该机器人每个角都由 SMA 驱动弯曲,可以实现爬行、转弯和翻滚等多种运动形式,其爬行速度约为 2.17 mm/s。

目前,软体行走机器人的行进主要是通过蠕动爬行或多足行走的方式实现的,其行进速度受到限制^[16]。为提高软体机器人的行进速度和转向能力,本文设计了一种轮足式双腔结构蠕动软体机器人,将软体机器人软体基体的蠕动运动转化为车轮的旋转运动,进而实现软体机器人的快速行进功能。本文对轮足式蠕动软体机器人展开了如下研究。

以软体机器人的灵活性和快速行进功能为目标,对轮足式蠕动软体机器人的运动原理进行分析,对软体机器人的结构展开优选设计。

分析轮足式蠕动机器人的运动过程,建立运动过程中软体机器人的运动学模型和非线性力学模

型,为软体机器人的性能评估提供理论依据。

编写控制算法,搭建测试系统,展开轮足式蠕动软体机器人性能测试,评价软体机器人运动性能,探讨轮足式软体机器人的进一步研究与应用。

1 轮足式蠕动软体机器人结构设计

1.1 设计依据

软体动物的结构和运动形式为软体机器人的设计提供了很好的参考,自然界中弯曲蠕虫的运动形式具有结构简单、驱动容易的特点。本文借鉴弯曲蠕虫的运动形式,设计了一种双腔多气囊结构的软体蠕动机器人,利用硅橡胶材料的超弹性特征,通过多气囊结构中充气,利用气压使气囊结构产生较大变形,多个气囊充气膨胀变形后相互挤压使软体机器人本体结构发生弯曲,控制双腔气压值的不同可以实现本体结构的左右摆动运动,周期性的充放气可以实现软体机器人的蠕动运动。目前,蠕动机器人主要是依靠软体基体与路面的摩擦力实现蠕动前进,为加快软体机器人运动速度,引入轮足式设计,将软体机器人软体基体的蠕动运动转变为车轮的旋转运动,变滑动摩擦为滚动摩擦,减小运动阻力,加快软体机器人的运动速度,实现软体机器人快速行进功能。

1.2 结构设计

仿生轮足式蠕动软体机器人结构模型如图 1 和图 2 所示,其结构主要由软体基体和轮足式行走机构两大部分组成。

图 1 蠕动机器人三维模型图

图 2 蠕动机器人试验样机

软体基体是由若干个气腔相连组成的褶皱形结构，采用超弹性硅橡胶材料在模具中分步浇筑而成的。整个软体基体分成两个独立的气腔，可以独立充放气。

在软体基体的两端各安装有一个轮胎支撑架，每个轮胎支撑架的两端分别安装有一个具有单向转动功能的轮胎。在软体基体的下方嵌入有弹簧，可以提高蠕动软体机器人的弹性恢复能力。轮胎采用褶皱式条纹结构设计，可以提高蠕动机器人在复杂路面的通行能力。仿生轮足式蠕动机器人的具体参数如表 1 所示。

表 1 结构参数表 (mm)

参数	数值
单个气囊宽度 w	10
气囊间隔 e	4
气囊壁厚 t	2
气囊外半径 R	30
软体基体长度 l	150
车轮直径 d	30
机器人总长度 L	156
机器人总宽度 B	92

2 周期性运动过程分析

仿生轮足式蠕动软体机器人的运动过程呈周期性，一个运动周期过程分为充气、放气两个阶段。通过控制两个独立气腔的充放气过程可以实现软体机器人的直行和转弯两种运动模式。

直线行进时，气泵向两个气腔同时充入相同气压的气体，由于气囊的膨胀变形使得软体机器人整体受力向上拱起产生弯曲变形，软体机器人前后两端向内卷曲，产生驱动前后车轮相向运动的驱动力。行进方向前轮由于单向轴承的作用无法向后转动，前轮在地面摩擦力的作用下保持静止不动，后轮在软体基体向上卷曲产生的驱动力的作用下克服轴承摩擦力和地面摩擦力向前滚动。软体基体充气拱起后，弹性体弯曲，产生弹性势能。放气时，弹性体的弹性势能释放，软体基体在弹性恢复力作用下向下运动恢复原状，产生驱动前后车轮相背运动的驱动力。行进方向后轮在单向轴承作用下无法向后转动，在地面摩擦力的作用下保持静止不动，前轮在软体基体产生的驱动力的作用下向前滚动一段距离。气泵的周期性充放气，促使软体机器人不断地弯曲和伸张，进而实现软体机器人的直线行进运动。蠕动机机器人直线行进过程如图 3 所示。

图 3 直线行进运动过程示意图

转弯时，气泵分别向软体机器人两侧的气腔充入不同气压值的气体，两侧气腔因气压不同而产生不同的变形，使软体机器人向一侧偏转。当软体机器人转弯时，两个气腔分别充入气压不同的低压气体，软体基体向上拱起并形成一定的转弯角度，软体基体的两侧产生两个大小不等的驱动车轮相对运动的驱动力。行进方向两个前轮在单向轴承和地面摩擦力的作用下保持静止不动，两个后轮在两侧大小不等的驱动力的作用下克服轴承摩擦力和地面摩擦力向前滚动不同大小的位移。软体机器人完成角度偏转后，继续向两个气腔充入气压不同的高压气体，使软体基体在保持转弯角度的同时向上拱起，软体基体两侧的驱动力随之增大，后轮在驱动力的作用下继续向前滚动。软体基体充气拱起后，弹性体弯曲，产生较大弹性势能。放气时，软体基体两侧气腔分别保持不同的低气压，弹性体的弹性势能释放，气压减小后软体基体在弹性恢复力的作用下向下运动，软体基体两侧产生两个大小不等的驱动前后车轮相背运动的驱动力。行进方向后轮在单向轴承和地面摩擦力的作用下静止不动，前轮在两个大小不等的驱动力的作用下向前滚动不同大小的位移，促使软体机器人依旧保持向一侧偏转的状态。通过周期性地分别向软体机器人两侧的气腔充入不同的高压和低压气体，使得软体机器人保持一定的偏转角度向前行进，进而可以实现软体机器人的转向行进过程，其运动过程如图 4 所示。

图 4 转向行进过程示意图

3 力学模型分析

3.1 硅胶材料本构关系分析

硅橡胶是一种具有超弹性、能够大变形、体积几乎不发生变化(即不可压缩)的非线性材料,考虑其大变形特点及非线性力学性质,采用 Yeoh 模型对蠕动软体机器人进行非线性力学分析^[17-18]。假设硅橡胶材料具有各向同性和不可压缩性,基于应力应变关系建立硅橡胶材料的本构关系,使用应变能函数表示如下

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

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

式中, I_1 、 I_2 、 I_3 为变形张量不变量, λ_1 、 λ_2 、 λ_3 为空间三个方向的主伸长比。

由于硅橡胶材料具有不可压缩性,则

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

假设软体基体在宽度方向上不发生形变,则该方向上的主伸长比 $\lambda_3 = 1$, 则

$$\lambda_2 = \frac{1}{\lambda_1} \quad (4)$$

$$I_1 = I_2 = \lambda_1^2 + \frac{1}{\lambda_1^2} + 1 \quad (5)$$

根据 Yeoh 模型,选用其典型的二项参数的形式,应变能密度函数模型表示如下

$$W = C_1(I_1 - 3) + C_2(I_1 - 3)^2 = C_1\left(\lambda_1 - \frac{1}{\lambda_1}\right)^2 + C_2\left(\lambda_1 - \frac{1}{\lambda_1}\right)^4 \quad (6)$$

式中,材料常数 $C_1 = 0.09$, $C_2 = 0.02$ 。

结合式(1)~(6),由 Piola-Kirchhoff 应力和 Cauchy-Green 应变关系可推导出主应力为

$$\sigma = \frac{2}{\lambda_1} \left(\lambda_1^2 - \frac{1}{\lambda_1^2 \lambda_2^2} \right) \left(\frac{\partial W}{\partial I_1} + \lambda_2^2 \frac{\partial W}{\partial I_2} \right) \quad (7)$$

将式(4)~(6)代入式(7)中,得应力和主伸长比的关系式为

$$\sigma = \frac{\lambda_1^4 - 1}{\lambda_1^3} \left(2C_1 + 4C_2 \left(\lambda_1 - \frac{1}{\lambda_1} \right)^2 \right) = (2C_1 - 8C_2)\lambda_1 + 4C_2\lambda_1^3 - \frac{2C_1 - 8C_2}{\lambda_1^3} - \frac{4C_2}{\lambda_1^5} \quad (8)$$

3.2 单腔充气状态弯曲角度与气压关系分析

图 5 所示为软体基体结构的横截面示意图,采用两个 1/4 圆气腔结构。

图 5 单个气囊中部横截面结构示意图

蠕动软体机器人在低压转弯时,软体基体单腔充入一定的气压,使软体基体发生弯曲,其结构形状参数如图 6 所示。

图 6 单腔充气时结构形状参数示意图

软体基体的主伸长比为

$$\lambda_1 = \frac{l + t\phi_1}{l} \quad (9)$$

式中, ϕ_1 为软体基体充气后中间腔壁的弯曲角度。单腔充入的气体压力 P_1 对 A-A 处产生的力矩为

$$M_{PA} = \int_0^{\frac{\pi}{2}} \int_{r_1}^{r_2} P_1 r^2 \sin \theta dr d\theta = \frac{1}{3} P_1 (r_2^3 - r_1^3) \quad (10)$$

假设软体基体充气一腔的应力均匀分布,外侧的圆环形腔壁的应力对 A-A 处产生的力矩为

$$M_{SA} = \int_0^{\frac{\pi}{2}} \int_{r_2}^R \sigma r^2 \sin \theta \, dr d\theta + \int_0^R \sigma t y dy + \int_0^t \sigma R y dy = \sigma \left[\frac{1}{3} (R^3 - r_2^3) + \frac{1}{2} t R^2 + \frac{1}{2} R t^2 \right] \quad (11)$$

底部弹簧产生的弯矩为

$$M_{T1} = \frac{EI}{\rho} = \frac{EI \phi_1}{l} \quad (12)$$

式中, ρ 为曲率半径; EI 为弹簧的抗弯刚度, $EI = 1.86 \times 10^4 \, \text{N} \cdot \text{mm}^2$

考虑软体基体中应力分布的不均匀性, 引入影响系数 k 对软体基体中应力产生的力矩加以修正, 由力矩平衡可知

$$M_{PA} = k M_{SA} + M_{T1} \quad (13)$$

联立式(8)~(13), 可得气压 P 与软体基体弯曲角度 ϕ_1 的关系式为

$$P_1 = f_1(\phi_1) = \frac{k D_1 G}{E_1} \left[(1 + J_1 \phi_1) - (1 + J_1 \phi_1)^{-3} \right] - \frac{k D_1 H}{E_1} \left[(1 + J_1 \phi_1)^3 - (1 + J_1 \phi_1)^{-5} \right] + \frac{F_1}{E_1} \phi_1 \quad (14)$$

$$D_1 = \frac{1}{3} (R^3 - r_2^3) + \frac{1}{2} t R^2 + \frac{1}{2} R t$$

$$E_1 = \frac{1}{3} (r_2^3 - r_1^3) \quad F_1 = \frac{EI}{l} \quad G = 2C_{10} - 8C_{20}$$

$$H = 4C_2 \quad J_1 = \frac{t}{l}$$

则软体基体弯曲角度 ϕ_1 与充气气压 P_1 的关系表达式为

$$\phi_1 = f_1^{-1}(P_1) \quad (15)$$

3.3 双腔充气状态前进位移与气压关系分析

蠕动软体机器人直线前进运动时, 软体基体双腔同时充入相同气压, 软体基体向上拱起, 其结构形状参数如图 7 所示。

图 7 双腔充气时结构形状参数示意图

双腔充气后, 软体基体的主伸长比为

$$\lambda_2 = \frac{l + t \phi_2}{l} \quad (16)$$

式中, ϕ_2 为软体基体充气后的弯曲角度。

双腔中的气压对 $A-A$ 处产生的力矩为

$$M_{PB} = 2 \int_0^{\frac{\pi}{2}} \int_{r_1}^{r_2} P_2 r^2 \sin \theta \, dr d\theta = \frac{2}{3} P_2 (r_2^3 - r_1^3) \quad (17)$$

假设软体基体中的应力均匀分布, 软体基体中的应力对 $B-B$ 处产生的力矩为

$$M_{SB} = \int_0^{\pi} \int_{r_2}^R \sigma r^2 \sin \theta \, dr d\theta + \int_0^R \sigma t y dy + \int_0^t 2 \sigma R y dy = \sigma \left[\frac{2}{3} (R^3 - r_2^3) + \frac{1}{2} t R^2 + R t^2 \right] \quad (18)$$

底部弹簧产生的弯矩为

$$M_{T2} = \frac{EI}{\rho} = \frac{EI \phi_2}{l} \quad (19)$$

式中, 抗弯刚度, $EI = 1.86 \times 10^4 \, \text{N} \cdot \text{mm}^2$

由力矩平衡可知

$$M_{PB} = k M_{SB} + M_{T2} \quad (20)$$

蠕动软体机器人单次运动周期的行进距离 s 与软体基体弯曲角度 ϕ_2 的关系为

$$d = l - 2 \frac{l}{\phi_2} \sin \frac{\phi_2}{2} \quad (21)$$

联立式(16)~(21)以及式(8), 可得气压 P_2 与软体基体弯曲角度 ϕ 的关系式为

$$P_2 = f_2(\phi_2) = \frac{k D_2 G}{E_2} \left[(1 + J_2 \phi_2) - (1 + J_2 \phi_2)^{-3} \right] - \frac{k D_2 H}{E_2} \left[(1 + J_2 \phi_2)^3 - (1 + J_2 \phi_2)^{-5} \right] + \frac{F_2}{E_2} \phi_2 \quad (22)$$

$$D_2 = \frac{2}{3} (R^3 - r_2^3) + \frac{1}{2} t R^2 + R t^2$$

$$E_2 = \frac{2}{3} (r_2^3 - r_1^3) \quad F_2 = \frac{EI}{l} \quad J_2 = \frac{t_2}{l}$$

则单次运动周期的前进位移 s 与充气气压 P_2 的关系式为

$$s = l - 2 \frac{l}{\phi_2} \sin \frac{\phi_2}{2} = l - 2 \frac{l}{f_2^{-1}(P_2)} \sin \left(\frac{f_2^{-1}(P_2)}{2} \right) \quad (23)$$

4 试验与测试

4.1 影响系数的确定与力学模型的建立

为确定力学模型中的影响系数 k , 采用试验数据分析的方法来确定影响系数 k 。本次试验选用单腔充气状态下的软体基体的转弯角度作为研究对象, 通过向软体基体一侧气腔充入不同气压值的气体, 测量软体基体的转弯角度, 测量的试验数据如

图8所示。

图8 弯曲角度与气压关系试验数据点

将试验数据进行分析、拟合,通过 Matlab 分析计算,得出影响系数 $k=0.35$ 。将影响系数 k 的值代入式(14)、(15)中,求得软体基体弯曲角度 φ_1 与充气气压 P_1 的关系模型为

$$\varphi_1 = \left[\sqrt{(1.38 \times 10^7 P + 1.77 \times 10^7)^2 + 3.81 \times 10^{15}} + 1.38 \times 10^7 P + 1.77 \times 10^7 \right]^{\frac{1}{3}} - 1.56 \times 10^5 \left[1.77 \times 10^7 + \sqrt{(1.38 \times 10^7 P + 1.77 \times 10^7)^2 + 3.81 \times 10^{15}} + 1.38 \times 10^7 P \right]^{\frac{1}{3}} - 75 \quad (24)$$

将式(24)在 Matlab 中绘图并与试验数据对比,如图9所示。

图9 弯曲角度与气压关系

为验证影响系数的准确性,进行第二组试验,本组试验以双腔充气后软体基体前后车轮中心距的改变量(即软体机器人单次运动周期的前进位移)为研究对象,试验过程中给软体基体的双腔充入相同压力值的气体,测量得出车轮中心距改变量数值。

将影响系数 k 的数值代入式(22)、(23)中,求得单次运动周期前进位移 s 与气压 P_2 的关系模型为

$$s = 150 - \frac{300 \sin \left(\frac{A}{2} - \frac{46868}{A} - \frac{75}{2} \right)}{A - \frac{93737}{A} - 75} \quad (25)$$

$$A = \left[\sqrt{(1.67 \times 10^7 P + 1.06 \times 10^7)^2 + 8.24 \times 10^{14}} + 1.67 \times 10^7 P + 1.06 \times 10^7 \right]^{\frac{1}{3}}$$

将式(25)在 Matlab 中绘图并与试验数据及其拟合曲线相对比,如图10所示。

图10 单次运动周期位移与气压的关系

从上述两组试验中可以得出,影响系数 $k=0.35$ 的取值较为准确,适用于该蠕动软体机器人的力学分析。由影响系数 $k < 1$ 可以看出:进行力学分析时,软体应力产生的力矩理论计算值相对实际较大,导致力学模型产生偏差。分析其原因,可以得知:这一结果是由于假设应力是均匀分布引起的,进行力矩平衡分析时,参考位置选择在应力较大处,导致假设的平均应力值过大。

4.2 最快行进速度测试与分析

行进速度是衡量软体行走机器人运动性能的一个重要指标,行进速度主要受气压与运动周期时间两大因素影响。本次试验通过选取不同的气压值和充放气周期时间,测量蠕动软体机器人通过 500 mm 的距离所需要的运动时间,进而可以得出蠕动软体机器人的平均速度。将测得的试验数据进行三维绘图分析,如图11所示。

由图11c可知,蠕动软体机器人的运动速度受运动周期时间和气压两个因素的共同影响,运动周期时间并非越短越好,充气气压亦非越大越好。

为进一步研究两种因素对运动速度的影响,选取试验中测得的最快行进速度 127.88 mm/s 所在的气压值为 0.046 MPa 的一组试验数据进行行进速度与充放气周期时间的关系进行分析,其关系曲线如图11a所示。并从多组试验数据中选取每种气压下最快行进速度的数值进行绘图,拟合的曲线如图12b所示。

从图11a中可以看出:随着运动周期时间(充放气时间)的增大,软体基体的气腔进气量增多,行进位移增大,行进速度加快。随着充放气时间的逐渐

图 11 双因素作用下行进速度变化图

增大, 当达到气腔的最大进气量后, 行进位移不再增大, 平均行进速度便逐渐降低。

由图 11b 可知, 随着充气气压的增大, 软体基体气腔膨胀反应时间减小, 行进速度逐渐增大, 但由于结构变形限制, 行进速度逐渐趋于稳定, 但气压过大时容易降低软体基体的耐疲劳性, 故应考虑运动周期时间和气压两个因素的共同影响, 选择合适的气压和充放气时间。

4.3 最小转弯半径测试与分析

最小转弯半径表征了软体行走机器人转向行进时所需要的最小运动空间, 是衡量软体行走机器人运动性能的一个重要参数。本次试验通过对制作的软体机器人的左右腔分别充入不同压力的气体(左腔气压大于右腔气压), 测量确定软体行走机器人的最小转弯半径, 其试验数据拟合图形如图 12 所示。

图 12 不同气压下软体机器人转弯半径

由图 12 可知, 软体基体左右两腔的气压差越大, 转弯半径越小。试验中测得的最小转弯半径(外径)为 109 mm, 但在试验过程中发现: 较大的压强差可以减小蠕动软体机器人的转弯半径, 但由于结构的限制, 过大的压强差会极大降低软体机器人的运动灵活性, 故应根据不同的路况来选择合适的软体基体左右两腔的气压值。

4.4 蠕动机器人越障能力测试

机器人的越障能力是衡量软体行走机器人性能的一个重要指标, 仿生轮足式蠕动软体机器人的运动是将软体基体的蠕动转换为车轮的滚动, 其越障能力将很大程度上取决于车轮的通过能力。本次越障能力测验选取了 4 种较有代表性的不同路况进行测试, 如图 13 所示, 图 13a 为坑洼型路面, 图 13b 为疏松型路面, 图 13c 为光滑阶梯型路面, 图 13d 为角度约 20° 的平整斜坡。

图 13 蠕动机器人越障测试与爬坡测试

通过试验测试可知: 蠕动机器人的越障能力受到气压的影响和车轮结构、尺寸的限制。气压值的大小影响着蠕动机器人的行进能力, 而车轮的结构、尺寸直接决定了蠕动机器人的通过能力。试验测试表明: 蠕动机器人能越过障碍物的高度约为车轮直径的二分之一。

5 结论

本文基于自然界中弯曲蠕虫的运动原理, 借鉴弯曲蠕虫的结构特点, 设计了一种双腔结构的仿生轮足式蠕动软体机器人, 通过双腔的气压值的控制和周期性的充放气可以实现软体机蠕动机器人的直线行进和转向行驶运动。

(1) 基于 Yeoh 模型, 推导出蠕动软体机器人单

个运动周期的前进距离与充气气压的关系模型和单腔充气下软体基体转弯角度与充气气压的关系模型,依据试验数据采用影响系数对关系模型加以修正,并对修正后的关系模型加以分析与总结,为软体机器人的设计与分析提供一定的理论参考。

(2) 针对蠕动软体机器人的行进速度和最小转弯两项运动性能参数展开试验与分析,测试表明,轮足式蠕动机器人在充气气压为 0.046 MPa,充放气时间为 0.25 s 时,行进速度达到最快,为 127.88 mm/s,较目前软体机器人的行走速度由较大的提升。最小转弯半径为 109 mm,具有较好的运动灵活性。

(3) 轮足式仿生软体机器人在保持软体蠕动机器人柔顺灵巧、运动灵活,环境适应性强等性能优点的同时,引入轮足式设计,可以提高软体机器人的行进速度。此外,通过对车轮的变构态设计可以提高其越障能力,使软体机器人在平缓路面上可以快速行进,在崎岖路面上可以大幅度弯曲、扭转和伸缩,可以在有限空间下工作,进入人类无法到达的环境,在救援救灾领域具有较大的应用价值。与此同时,轮足式软体机器人具有良好的柔顺性和人机交互安全性,其运动灵活,蠕动爬行运动方式具有良好的趣味性,在玩具机器人领域具有较大的发展前景和市场潜力。

(4) 在接下来的研究工作中,将进一步优化软体基体的结构设计,推进驱动装置小型化设计,并对行进车轮展开变构态设计,进一步提升蠕动软体机器人的行进速度与越障能力。

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] 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.
- [3] RUS D, TOLLEY M T. Design, fabrication and control of soft robots[J]. Nature, 2015, 521(7553): 467.
- [4] FEI Y, PANG W. Analysis on nonlinear turning motion of multi-spherical soft robots[J]. Nonlinear Dynamics, 2016, 88(2): 1-10.
- [5] MARCHESE A D, ONAL C D, RUS D. Autonomous soft robotic fish capable of escape maneuvers using fluidic elastomer actuators[J]. Soft Robotics, 2014, 1(1): 75.
- [6] SFAKIOTAKIS M, KAZAKIDI A, TSAKIRIS D P. Octopus-inspired multi-arm robotic swimming[J]. Bioinspiration & Biomimetics, 2015, 10(3): 035005.
- [7] LIN H T, LEISK G G, TRIMMER B. GoQBot: A caterpillar-inspired soft-bodied rolling robot[J]. Bioinspiration & Biomimetics, 2011, 6(2): 026007.
- [8] NAKAMARU S, MAEDA S, HARA Y, et al. Development of novel self-oscillating gel actuator for achievement of chemical robot[C]// IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. IEEE, 2009: 4319-4324.
- [9] SEOK S, ONAL C D, CHO K J, et al. Meshworm: A peristaltic soft robot with antagonistic nickel titanium coil actuators[J]. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 2013, 18(5): 1485-1497.
- [10] SHEPHERD R F, ILIEVSKI F, CHOI W, et al. Multigait soft robot[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2011, 108(51): 20400.
- [11] MORIN S A, WHITESIDES G M. Camouflage and display for soft machines[J]. Science, 2012, 337(6096): 828.
- [12] MENCIASSI A, GORINI S, PERNORIO G, et al. A SMA actuated artificial earthworm[C]// IEEE International Conference on Robotics and Automation, 2004, Proceedings ICRA. IEEE, 2004: 3282-3287.
- [13] CHANG Y C, KIM W J. Aquatic ionic-polymer-metal-composite insectile robot with multi-DOF legs[J]. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 2013, 18(2): 547-555.
- [14] JUNG K, KOO J C, NAM J D, et al. Artificial annelid robot driven by soft actuators[J]. Bioinspiration & Biomimetics, 2007, 2(2): S42.
- [15] MAO S, DONG E, JIN H, et al. Gait study and pattern generation of a starfish-like soft robot with flexible rays actuated by SMAs[J]. Journal of Bionic Engineering, 2014, 11(3): 400-411.
- [16] 李铁风,李国瑞,梁艺鸣,等. 软体机器人结构机理与驱动材料研究综述[J]. 力学学报, 2016, 48(4): 756-766. LI Tiefeng, LI Guorui, LIANG Yiming, et al. Review of materials and structures in soft robotics[J]. Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics, 2016, 48(4): 756-766.
- [17] 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.

- [18] 黄建龙, 解广娟, 刘正伟. 基于 Mooney-Rivlin 模型和 Yeoh 模型的超弹性橡胶材料有限元分析[J]. 橡胶工业, 2008, 55(8): 467-471.

HUANG Jianlong, XIE Guangjuan, LIU Zhengwei. The finite element analysis of super-elastic rubber material

based on Mooney-Rivlin model and Yeoh model[J]. China Rubber Industry, 2008, 55(8): 467-471.

作者简介: 姚建涛(通信作者), 男, 1980 年出生, 教授。主要研究方向为机器人机构理论及多维力感知机构。

E-mail: jtyao@ysu.edu.cn

陈新博, 男, 1993 年出生, 硕士研究生。主要研究方向为连续体机器人理论及应用。

E-mail: 1028778558@qq.com

第 8 届上银优秀机械博士论文奖——优秀奖

超导磁力与液膜力复合轴承的应用基础研究

作者: 许吉敏

毕业学校: 西安交通大学

指导教师: 袁小阳

论文以液氢液氧火箭涡轮泵为应用背景, 将超导磁悬浮技术与流体支撑技术引入到涡轮泵轴系支撑中, 提出了新型超导磁力与液膜力复合轴承。充分利用了液体火箭的天然低温液体环境, 能自动激发超导态并能为流场提供润滑介质。围绕磁液两种力场的物理复合、结构实现及复合轴承的服役性能和模拟涡轮泵工况的高速试验等重要应用基础问题, 开展理论和试验研究。主要研究内容: 新型超导磁液复合轴承及热粘磁性能分析模型; 高性能超导瓦块的制备及摩擦学性能研究; 超导瓦块磁力承载性能仿真与测量技术; 超导瓦块准动态磁力特性的试验研究; 超导磁液复合轴承的服役性能分析; 超导磁液复合轴承的高速试验研究。

论文取得的创新成果有: ① 提出了新型超导磁液复合轴承, 系统研究了多种结构, 针对高速和可重复使用火箭涡轮泵给出了磁液优势互补、启停磨损与高速振动稳定性较优的复合轴承设计; ② 研究了先进的超导瓦块制备工艺技术, 为超导磁液复合轴承的构建提供了高性能关键组件, 发展了圆形超导瓦块的前驱粉末除碳工艺, 揭示了残余碳含量对超导性能的影响机制, 碳含量达到了目前公开报道的最低水平 0.012%, 由此制备的超导瓦块悬浮力密度最高约为 12.4 N/cm^2 , 达到了国内外先进水平; ③ 建立了以微小间隙为特色的超导磁力仿真研究和测量体系, 在超导瓦块磁力性能的准动态实验中观察到了一系列新的物理现象, 为复合轴承的磁力设计奠定了理论和物质基础; ④ 建立了复合轴承热粘磁性能分析模型, 计及了温升对超导磁力、润滑膜相变对液膜力的影响。研制了高速立式试验台、支持了模拟火箭涡轮泵工况的试验验证, 首次进行了最高转速 $10\,000 \text{ r/min}$ 、液氮环境下的复合轴承性能试验, 验证了磁液复合的可行性和先进性。论文形成了复合轴承设计技术基础、复合轴承制造技术基础、超导磁力理论与试验技术基础、复合轴承计算与试验的成套工程技术基础, 为超导磁液复合轴承在我国新一代高速、可重复使用火箭涡轮泵的应用奠定了较为坚实的基础。