

带外鳍振动驱动机器人的运动机理及试验研究

郭俞良, 郭 瑞, 唐陈伟, 姚红良

(东北大学 机械工程与自动化学院, 辽宁 沈阳 110819)

摘 要: 为了满足垂直管道检测的需求,设计了一种带外鳍振动驱动的机器人,并进行了运动机理研究。根据机器人的结构,考虑摩擦和冲击这两个非光滑非线性因素,建立了机器人系统的非光滑多体动力学模型。进行了机器人的频域和时域响应数值仿真分析,并研究了不同负载质量参数对机器人的影响。开发了机器人样机,包括单片机、无线控制模块等。对机器人进行垂直管道爬行测试,在测试过程中给机器人增加了额外的质量来验证机器人的负载能力。试验结果验证了数值模拟结果的正确性,机器人的最大向上爬行速度为10.8 mm/s。

关 键 词: 振动驱动;非光滑系统;振动冲击;垂直爬行;多体动力学

中图分类号: TD 451 **文献标志码:** A **文章编号:** 1005-3026(2023)10-1448-07

Motion Mechanism and Test Study of Vibration-Driven Robot with External Fins

GUO Yu-liang, GUO Rui, TANG Chen-wei, YAO Hong-liang

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

Corresponding author: YAO Hong-liang, E-mail: hlyao@mail.neu.edu.cn)

Abstract: To satisfy the demand of vertical pipe inspection, a vibration-driven robot with external fins is designed and the motion mechanism is studied. Based on the structure of the robot, the non-smooth multibody dynamics model of the robot system is developed, and the two non-smooth nonlinearities, which are friction and impact, are considered. Numerical simulation analysis of the frequency and time domain response of the robot are carried out and the effects of different load quality parameters on the robot are studied. The robot prototype is developed, including microcontrollers, wireless control modules, etc. The robot is tested for vertical pipe crawling, and additional mass is added to the robot to verify the load capacity of the robot during the test. The test results verify the correctness of the numerical simulation results and the maximum upward crawling speed of the robot is 10.8 mm/s.

Key words: vibration-driven; non-smooth system; vibration impact; vertical crawling; multibody dynamics

在工业领域,有许多用于输送石油、天然气或水的管道。为了确保这些管道的安全并定期检查其内表面的劣化情况,在过去的几十年里,已经开发了各种管道内检查机器人^[1-3]。在其他领域,也开发了许多类似的机器人用于管道类结构的内部检查,如用于肠道疾病诊断的胶囊机器人^[4-6]。根据推进机构,管内机器人可分为许多类型^[1],如轮式、蛇式、蜗牛式和振动驱动式^[7]。

一般来说,振动驱动机器人由外壳体(外壳)和可移动的内部质量组成,随着内部质量与外壳体的周期性相对运动,系统作为整体可以向前或向后移动。振动驱动机器人的优点是结构简单,没有突出的部件。关于振动驱动机器人的研究很多,主要可分为机理研究和结构设计。

机理研究主要是关于各种振动驱动机器人的动力学,如不同摩擦力模型或不同介质的机器人

的运动^[8-10],不同结构的机器人的性能^[7,11]等. 这些研究表明,内部驱动和外部摩擦力都是产生系统运动的关键因素. 为了改变外部摩擦力,本文设计了外鳍来提高机器人的性能.

目前,多种振动驱动机器人结构被设计出来,如 Zhan 等^[12]开发的机器人“外壳”,它采用两个平行振荡器来提供推进力;Liu 等^[13]开发的毫米级的胶囊系统,用于小肠内镜检查. 这些结果验证了振动驱动技术在工程和医疗领域潜在应用的可行性.

目前大多数管道检测用振动驱动机器人是针对水平管道进行分析的,而用于垂直管道检测的管内机器人则很少见. 工程上有很多垂直管道需要检测的情况,因此本文提出了一种垂直管道内检测的振动驱动机器人,为了克服重力采用外鳍来增加摩擦的各向异性. 本文设计了机器人的结构,分析了机器人的运动机理和动力学特性,并进行了试验,验证了机器人用于垂直管道检测的可行性.

1 带外鳍振动驱动机器人结构设计

1.1 机器人结构设计

该机器人由外壳体和内部质量组成,如图 1 所示. 外壳体包括上壳体、下壳体和外鳍. 外鳍插入机器人的外壳中,通过外鳍和管道之间的压力向机器人提供诱导的各向异性摩擦力. 除了克服管道对机器人的摩擦力外,机器人在垂直管道中爬行时还需要克服自身的重力.

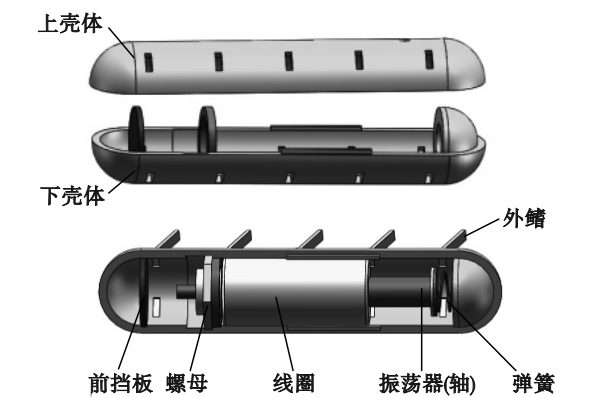


图 1 带外鳍振动驱动机器人模型
Fig. 1 Vibration-driven robot model with external fins

为了便于安装和加工,外鳍通过与壳体上的开口相配合安装在壳体上,通过调整安装外鳍的数量和刷子的结构,可以调整机器人与管道之间的摩擦力. 为了保证外鳍在管道中的受力均匀,在

增加外鳍数量时,刷子应至少上下各安装两圈,其中一层安装 4 个.

机器人的内部由 1 个线圈、1 个振荡器(轴)、1 个弹簧和 1 个垫片等组成.

1.2 运动机理分析

机器人对线圈施加一个周期性的电流信号,使内部振荡器在机器人中周期性地移动. 在运动过程中,内部振荡器始终与弹簧相连. 当振荡器与线圈的相对位移大于振荡器与前挡板之间的距离时,振荡器将与前挡板撞击;同样,当振荡器与线圈的相对位移的绝对值大于振荡器与后挡板之间的距离时,振荡器将与后挡板撞击. 当机器人受到的向上的力大于机器人的重力和摩擦力(机器人和管道之间)的总和时,振荡器将向上移动一小段距离;反之,振荡器将向下移动一小段距离. 在一个周期内,向上的运动大于向下的运动,机器人将向上移动.

2 机器人动力学模型

2.1 机器人的三维模型

该机器人在垂直管道中工作,如图 2a 所示. 外鳍型机器人系统的动力学模型如图 2b 所示,它是一个 2 自由度的非线性系统.

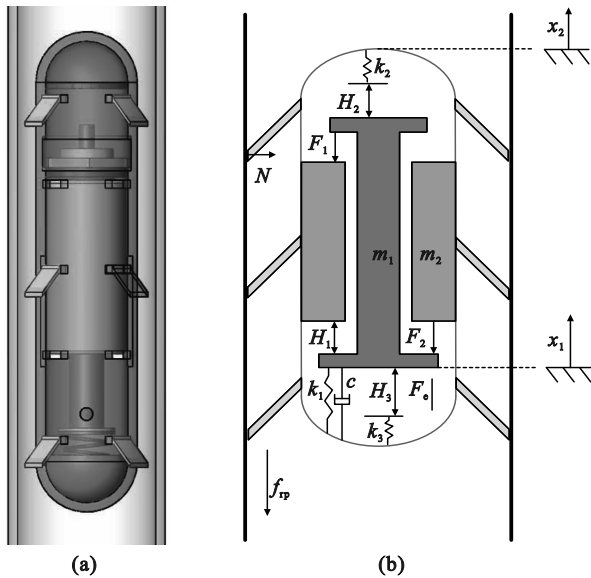


图 2 外鳍型机器人动力学模型
Fig. 2 Dynamics model of the robot with external fins
(a)—机器人在垂直管道中; (b)—机器人的动力学模型.

在图 2b 中, m_1 是系统中振荡器(轴)的质量, m_2 表示固定在壳体上的线圈的质量, c 表示阻尼系数,代表由于线圈和振荡器之间的相对速度而产生的能量耗散. k_1 是轴下方压缩弹簧的刚度,

前面的上、下约束被建模为辅助弹簧,刚度 k_2 和 k_3 分别提供向下和向上的冲击.

振荡器和线圈之间的初始距离为 H_1, H_2 和 H_3 , 分别代表摆动器和上下约束之间的间隙. x_1 是振荡器的位移, x_2 是机器人的位移, f_{rp} 代表机器人和管道之间的摩擦力. $F_1 = m_1 g$ 和 $F_2 = m_2 g$ 分别代表振荡器和线圈的重力. N 是管道对外鳍的支撑力. F_e 是振荡器对线圈的磁性力.

2.2 外鳍的受力分析

外鳍的受力情况如图 3 所示. 当机器人进入管道时, 外鳍受到管道的压力, 使外鳍向下旋转了一个角度 α . 此时, 外鳍与机器人之间的角度为 β .

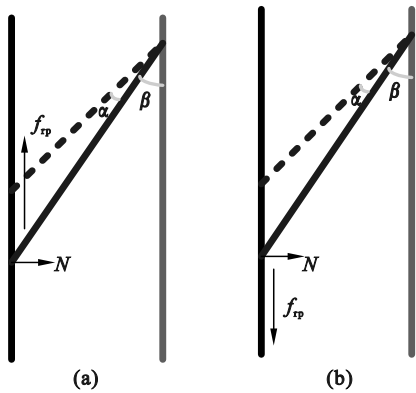


图 3 外鳍受力图

Fig. 3 Force diagram of external fins

(a) 一向下运动; (b) 一向上运动.

如图 3a 所示, 当机器人向下运动时, 基于外鳍的扭矩平衡, 可以得到以下关系:

$$k\alpha = Nl\cos\beta - \mu Nl\sin\beta. \tag{1}$$

其中: k 为外鳍的扭转刚度; l 为外鳍长度; μ 为外鳍与管道间的摩擦系数.

向下运动的机器人所承受的压力为

$$N_1 = \frac{k\alpha}{l\cos\beta - \mu l\sin\beta}. \tag{2}$$

如图 3b 所示, 当机器人向上运动时,

$$k\alpha = Nl\cos\beta + \mu Nl\sin\beta. \tag{3}$$

所以, 向上运动的机器人所承受的压力为

$$N_2 = \frac{k\alpha}{l\cos\beta + \mu l\sin\beta}. \tag{4}$$

根据式(2)和式(4), 可以确定机器人在向上和向下运动时的压力. 可以看出, 机器人向上运动时的压力小于机器人向下运动时的压力. 因此, 机器人向上运动时受到的摩擦力要比向下运动时小.

当机器人在管道中的速度 \dot{x}_2 不为 0 时, 摩擦力的方向与速度方向相反, 摩擦力的大小等于阈值, 即为 f_{rp} . 当机器人的运动速度 \dot{x}_2 等于 0 时, 机

器人受到的摩擦力有两种情况: 当机器人受到的外力的绝对值大于 f_{rp} , 机器人受到的摩擦力等于 f_{rp} , 方向与受到的外力方向相反; 当机器人受到的外力的绝对值小于 f_{rp} , 机器人受到的摩擦力等于 f_{rp} , 方向与受到的外力方向相反. f_{rp} 与机器人运动的速度方向和施加的外力方向不同, 在整体上可以表示为

$$f_{\text{rp}} = \begin{cases} \mu \frac{k\alpha}{l\cos\beta + \mu l\sin\beta}, & \dot{x}_2 > 0; \\ \mu \frac{k\alpha}{l\cos\beta - \mu l\sin\beta}, & \dot{x}_2 < 0; \\ \mu \frac{k\alpha}{l\cos\beta + \mu l\sin\beta}, & \dot{x}_2 = 0, F_z \geq 0; \\ \mu \frac{k\alpha}{l\cos\beta - \mu l\sin\beta}, & \dot{x}_2 = 0, F_z < 0. \end{cases} \tag{5}$$

式中: F_z 是线圈 m_2 所受的力.

2.3 机器人动力学模型

对于缝隙 H_2 和 H_3 的非光滑性, 振荡器的质量 M_m 和限位板之间的相互作用有三种不同的情况: 无接触 ($x_1 - x_2 < H_2$ 和 $x_1 - x_2 > -H_3$), 上接触 ($x_1 - x_2 \geq H_2$) 和下接触 ($x_1 - x_2 \leq -H_3$).

所以振子 m_1 所受的力表达式为

$$F_1 = \begin{cases} F_e - c(\dot{x}_1 - \dot{x}_2) - k_1(x_1 - x_2) - k_3(x_1 - x_2 + H_3) - m_1 g, & (x_1 - x_2) \leq -H_3; \\ F_e - c(\dot{x}_1 - \dot{x}_2) - k_1(x_1 - x_2) - m_1 g, & -H_3 < (x_1 - x_2) < H_2; \\ F_e - c(\dot{x}_1 - \dot{x}_2) - k_1(x_1 - x_2) - k_2(x_1 - x_2 - H_2) - m_1 g, & (x_1 - x_2) \geq H_2. \end{cases} \tag{6}$$

同理, 除摩擦力外, 线圈 m_2 所受的力表达式为

$$F_z = \begin{cases} -F_e + c(\dot{x}_1 - \dot{x}_2) + k_1(x_1 - x_2) + k_3(x_1 - x_2 + H_3) - m_2 g, & (x_1 - x_2) \leq -H_3; \\ -F_e + c(\dot{x}_1 - \dot{x}_2) + k_1(x_1 - x_2) - m_2 g, & -H_3 < (x_1 - x_2) < H_2; \\ -F_e + c(\dot{x}_1 - \dot{x}_2) + k_1(x_1 - x_2) + k_2(x_1 - x_2 - H_2) - m_2 g, & (x_1 - x_2) \geq H_2. \end{cases} \tag{7}$$

最后对机器人系统的公式进行整理, 得到

$$\left. \begin{aligned} m_1 \ddot{x}_1 + c(\dot{x}_1 - \dot{x}_2) + k_1(x_1 - x_2) + F_n &= F_e - m_1 g, \\ m_1 \ddot{x}_1 - c(\dot{x}_1 - \dot{x}_2) - k_1(x_1 - x_2) - F_n &= -F_e - m_2 g + F_f. \end{aligned} \right\} \tag{8}$$

其中： F_f 表示外鳍所受摩擦力； F_n 表示振荡器对限位板的冲击力。

$$F_n = \begin{cases} k_3(x_1 - x_2 + H_3), & (x_1 - x_2) \leq -H_3; \\ 0, & -H_3 < (x_1 - x_2) < H_2; \\ k_2(x_1 - x_2 - H_2), & (x_1 - x_2) \geq H_2. \end{cases} \quad (9)$$

$$f_{rp} = \begin{cases} -\operatorname{sign}(\dot{x}_2)f_{rp}, & \dot{x}_2 \neq 0; \\ -\operatorname{sign}(F_z)f_{rp}, & \dot{x}_2 = 0, |F_z| \geq f_{rp}; \\ -F_z, \dot{x}_2 = 0, & |F_z| < f_{rp}. \end{cases} \quad (10)$$

3 数值仿真

3.1 参数说明

外鳍型机器人的攀爬能力是由结构参数决定的,如摩擦力阈值 f_{rp} 、弹簧刚度 k_1 、振荡器的质量 M_m 和线圈的质量 M_c 。外鳍型机器人系统的参数如表 1 所示。

在表 1 中, f_{rp1} 和 f_{rp2} 分别代表机器人向上和向下运动时,机器人和管道之间摩擦力的阈值。

3.2 外鳍型机器人系统时域响应

在线圈上施加不同频率的电流,振荡器在线

圈的引力下在机器人内部周期性地移动,这样机器人就可以在垂直管道中移动。 $v_{avg} = X_c/T_c$ 用来计算机器的平均速度,其中 X_c 是外鳍型机器人的总位移, T_c 是总时间消耗。激励信号为方波,占空比 $D = 0.5$ 。

表 1 外鳍型机器人仿真参数

Table 1 Simulation parameters of the robot with external fins

参数	单位	值	参数	单位	值
k_1	N/m	300	H_2	mm	3
k_2	N/m	200 000	H_3	mm	4
k_3	N/m	200 000	c	N·s/m	0.4
M_m	g	45	f_{rp1}	N	3.6
M_c	g	200	f_{rp2}	N	5
H_1	mm	13	g	m/s ²	9.8

将外鳍型机器人的向上运动设为正方向,用 Runge – Kutta 方法得到激励频率在 2 ~ 42 Hz 的机器人的速度 – 频率响应曲线,如图 4 所示。图 4 中局部图显示了振荡器和机器人(外壳)在一些特定频率下的时间波,当激励频率不同时,机器人和振荡器的运动轨迹会发生变化。

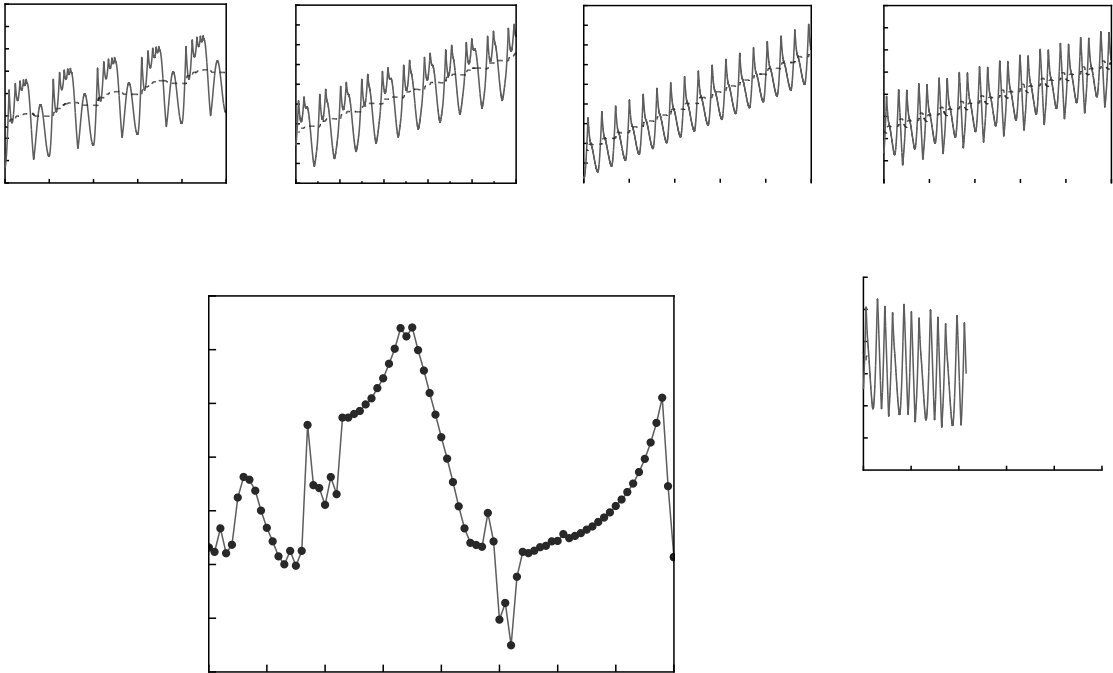


图 4 外鳍型机器人系统的速度 – 频率响应曲线
Fig. 4 Velocity-frequency response curve of the robot system with external fins

如图 4 所示,当激励频率为 19.5 Hz 时,机器人处于最大前进速度 13.2 mm/s。此时机器人在

每个周期内向前移动了一小段距离。通过不断给机器人提供这个激励信号,机器人可以向上移动。

当激励频率为 28 Hz 时,机器人处于最大负速度 4.5 mm/s. 机器人在每个周期都会向下移动一小段距离. 因此,通过不断给机器人提供这个激励信号,机器人可以向下移动.

3.3 外鳍型机器人不同负载质量参数影响分析

为了研究外鳍型机器人系统有额外载荷时的爬行能力,进行了数值模拟,机器人的载荷选择为 0~35 g,以 5 g 的区间变化. 如图 5 所示,随着外鳍型机器人系统负载质量的增加,机器人系统的最大前进速度逐渐减小,最大负运动速度逐渐增大. 从数值上看,负载质量的增加对外鳍型机器人系统前进速度的最大值影响不大,但对负运动速度的最大值有很大影响.

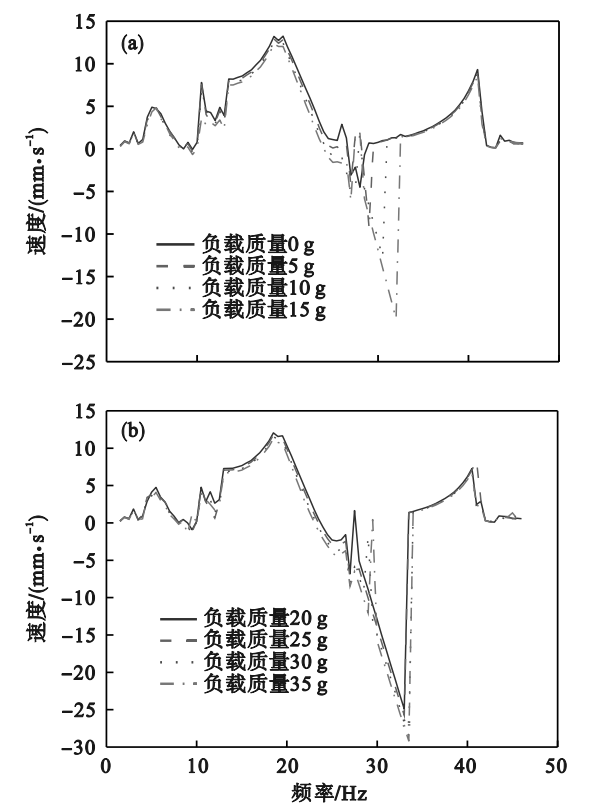


图 5 负载质量对外鳍型机器人系统速度的影响分析
Fig. 5 Analysis of the influence of the load mass on the speed of the robot system with external fins
(a)—较小负载;(b)—较大负载.

在图 6 中可以得到外鳍型机器人系统在负载质量下的最大正向和负向速度. 在负载质量为 5, 10, 15, 20, 25, 30 和 35 g 时,外鳍型机器人系统的正向速度的相应最大值为 12.9, 12.6, 12.3, 12.0, 11.8, 11.2, 10.8 mm/s, 相应的负向速度最大值分别为 9.1, 12.8, 20, 22, 25.7, 28.5 和 29.2 mm/s.

综上所述,外鳍型机器人可以装载一定的负载质量在垂直管道中向上爬行. 随着负载质量的

增加,机器人向上爬行的最大速度逐渐降低,最大负速度逐渐增加.

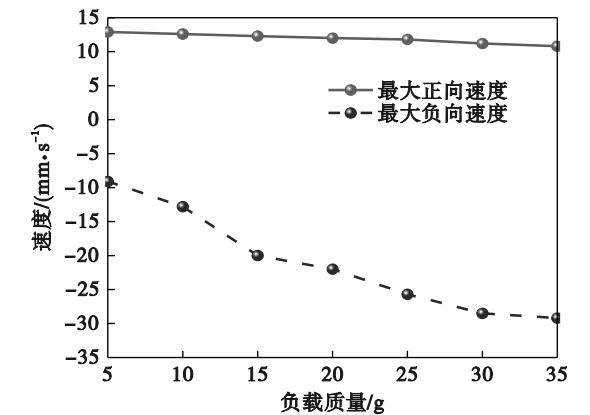


图 6 不同负载质量下外鳍型机器人系统稳态速度极值
Fig. 6 Steady-state velocity extremes of the robot system with external fins under different load masses

4 试验结果

4.1 试验装置

外鳍结构通过 3D 打印制造,材料为 PLA. 通过改变外鳍的结构,可以改变机器人和管道之间的摩擦. 为了方便试验和加工,外鳍和机器人外壳被设计成可拆卸的结构. 外鳍型机器人的实际结构如图 7 所示.

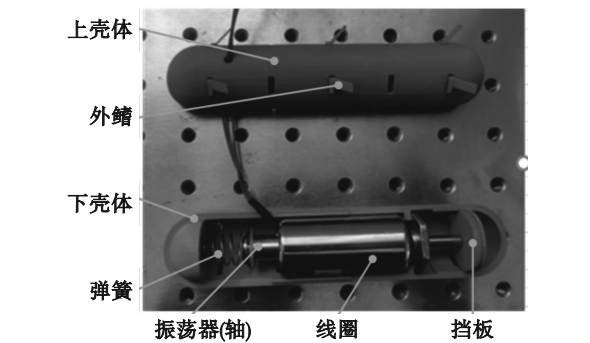


图 7 外鳍型机器人的实际结构
Fig. 7 The actual structure of the robot with external fins

外鳍型机器人测试台如图 8 所示. 透明管道通过管道支架垂直固定在测试台上,传感器支架固定在型材上,将激光位移传感器 (LK - F400MN) 挂在管道口上方. 管道支架和传感器支架都是 3D 打印的.

4.2 控制系统设计

基于 Arduino 建立的控制电路如图 9 所示. 控制系统由 Arduino 开发板、继电器、WiFi 模块、摇杆模块和 12 V 直流电源组成. 操作者可以使用

操纵杆模块和手机(通过 WiFi 模块)来控制机器人. 操纵杆模块和手机控制 Arduino 给继电器一个不同频率的方波信号,继电器控制 12 V 直流电源,而 12 V 直流电源又控制电磁铁的开关频率.

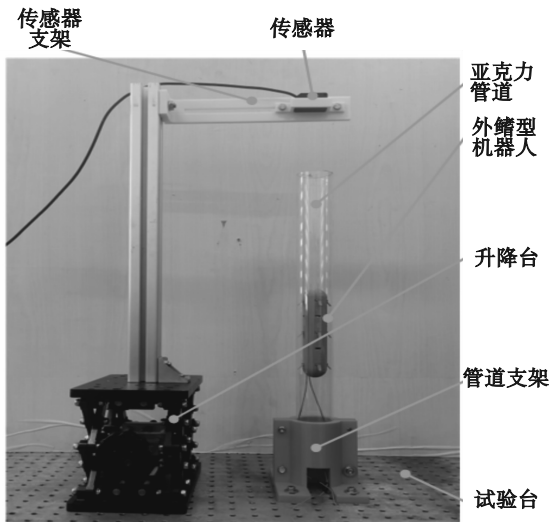


图 8 外鳍型机器人试验台

Fig. 8 Test bench of the robot with external fins

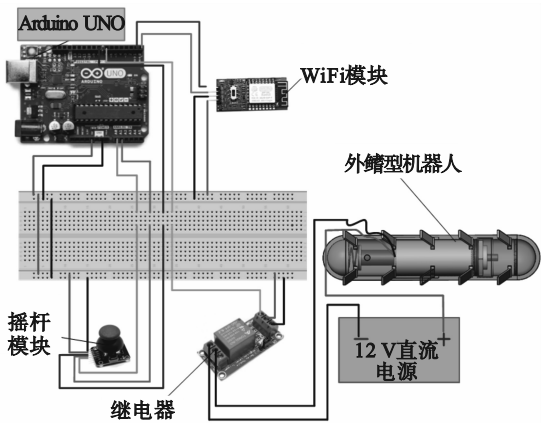


图 9 控制电路连接图

Fig. 9 Control circuit connection diagram

4.3 外鳍型机器人系统验证试验

试验中,外鳍型机器人的参数与表 1 相同,对机器人施加激励电流信号,当机器人达到稳定状态时,由激光位移传感器采集机器人的位移和运动时间,并记录机器人的速度. 图 10 显示了外鳍型机器人的速度 - 频率响应曲线的仿真和试验对比. 如图 10 所示,当激励频率为 20 Hz 时,机器人的最大正向速度为 10.8 mm/s. 同时,当激励频率为 28 Hz 时,机器人的最大负向速度为 5.4 mm/s.

外鳍型机器人在 16 ~ 28 Hz 典型频率下 0 ~ 10 s 的位移曲线如图 11 所示. 各个频率下的测试数据和仿真结果的趋势是相同的.

从图 10,图11 中可以看出,试验数据与仿真

结果之间存在一定的差异,但总体趋势相同,数值结果相近. 造成这种差异的原因可能是由于试验过程中对机器人摩擦阈值的测量不准确以及电源线对机器人的影响.

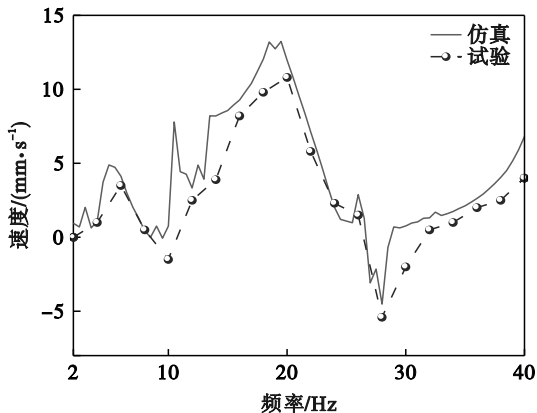


图 10 外鳍型机器人仿真和试验对比图

Fig. 10 Comparison diagram of simulation and test for the robot with external fins

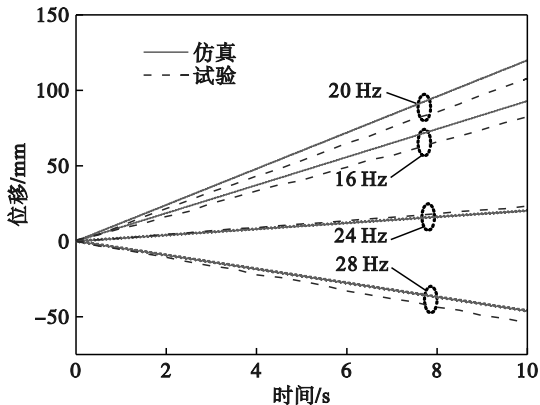


图 11 机器人在典型频率下的位移 - 时间曲线的仿真与试验对比

Fig. 11 Simulation and test comparison of displacement-time curves for the robot at typical frequencies

4.4 外鳍型机器人不同负载质量验证试验

机器人的负载质量是通过在机器人外壳上安装不同的质量来改变的. 使用表 1 中的参数,机器人的所有其他参数都保持不变. 通过对机器人施加不同频率的激励信号,根据机器人的运动时间和位移计算出机器人的平均运动速度,并通过试验分析了不同负载质量对外鳍型机器人运动速度的影响,结果如图 12 所示.

从不同负载质量的外鳍型机器人系统的频率响应曲线可以得到外鳍型机器人系统的最大正向和负向速度,如图 12 所示,并可以得到机器人模拟和测试速度极值的对比,如图 13 所示. 在机器人负载质量为 0,10,20 和 30 g 时,机器人系统在稳定状态下的最大正向速度分别为 10.8,10.2,

9.4 和 8.2 mm/s, 相应的最大负向速度分别为 5.4, 14.2, 27 和 32 mm/s. 随着机器人负载质量的增加, 最大正向速度逐渐减小, 最大负向速度逐渐增大.

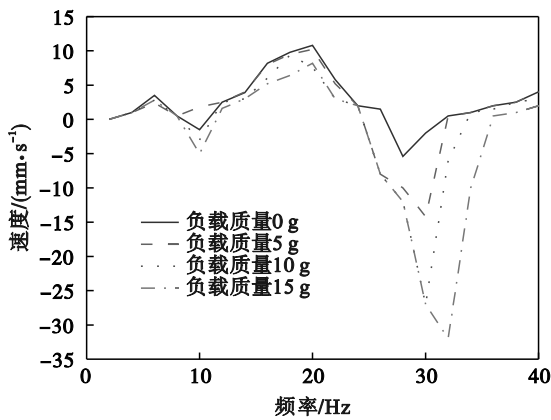


图 12 外鳍型机器人不同负载试验对比
Fig. 12 Comparison of different load tests for the robot with external fins

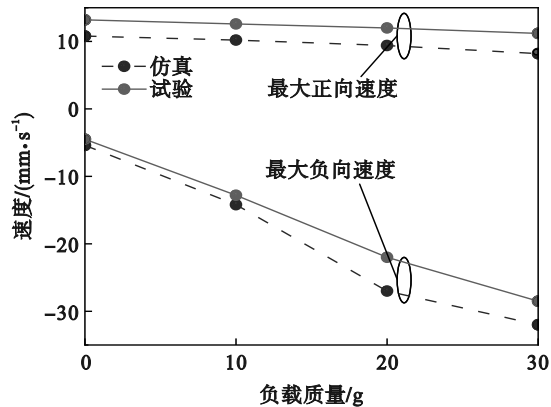


图 13 机器人不同负载质量的速度极值仿真与试验对比
Fig. 13 Simulation and test comparison of speed extremes for the robot with different load masses

将试验结果与仿真结果相比较, 可以看出试验结果与 3.3 节的仿真结果总体趋势相同, 数值相近, 这证明了仿真结果的准确性.

综上所述, 外鳍型机器人可以在垂直管道中向上爬行, 机器人的运动速度随着机器人与管道之间摩擦阈值的增加而逐渐降低. 随着机器人负载质量的增加, 机器人向上爬行的最大速度有所下降, 但机器人可以向上爬行, 这证明机器人具有一定的负载能力. 从图 13 中可以看出, 试验数据与仿真结果的变化趋势是一致的, 但仍存在一些差异, 这可能是由于摩擦力阈值测量不准确或机器人安装误差造成的.

5 结 论

1) 对外鳍型机器人进行了理论和试验研究, 结果表明, 机器人的最大向上爬行速度在模拟中为 13.2 mm/s, 在试验中为 10.8 mm/s.

2) 通过给机器人增加额外的负载质量并进行测试, 结果表明, 随着额外负载质量的增加, 最大前进速度下降, 但仍能向上爬行, 说明这种结构具有一定的负载能力.

参考文献:

[1] Rashid M Z A, Yakub M F M, Salim S A Z B S, et al. Modeling of the in-pipe inspection robot: a comprehensive review[J]. *Ocean Engineering*, 2020, 27 (2) : 107206.

[2] Virgala I, Gmiterko A, Kelemen M. Motion analysis of in-pipe robot based on SMA spring actuator[J]. *Journal of Automation and Control*, 2013, 1 (1) : 21 – 25.

[3] Wang Z L, Appleton E. The concept and research of a pipe crawling rescue robot[J]. *Advanced Robotics*, 2003, 17 (4) : 339 – 358.

[4] Diao B B, Zhang X X, Fang H B, et al. Bi-objective optimization for improving the locomotion performance of the vibration-driven robot[J]. *Archive of Applied Mechanics*, 2021, 91 (5) : 2073 – 2088.

[5] Shi Q Y, Liu T Y, Song S, et al. An optically aided magnetic tracking approach for magnetically actuated capsule robot [J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2021, 70 (5) : 1 – 9.

[6] Zheng L L, Guo S X, Wang Z X, et al. A multi-functional module-based capsule robot [J]. *IEEE Sensors Journal*, 2021, 21 (10) : 12057 – 12067.

[7] Liu Y, Chávez J P, Guo B Y, et al. Bifurcation analysis of a vibro-impact experimental rig with two-sided constraint[J]. *Meccanica*, 2020, 55 (12) : 2505 – 2521.

[8] Liu P C, Yu H N, Cang S. Modelling and analysis of dynamic frictional interactions of vibro-driven capsule systems with viscoelastic property[J]. *European Journal of Mechanics A—Solids*, 2019, 74 : 16 – 25.

[9] Yan Y, Liu Y, Manfredi L, et al. Modelling of a vibro-impact self-propelled capsule in the small intestine[J]. *Nonlinear Dynamics*, 2019, 96 (1) : 123 – 144.

[10] Tian J Y, Liu Y, Chen J N, et al. Finite element analysis of a self-propelled capsule robot moving in the small intestine [J]. *International Journal of Mechanical Sciences*, 2021, 206 : 106621.

[11] Guo B Y, Liu Y. Three-dimensional map for a piecewise-linear capsule system with bidirectional drifts[J]. *Physica D: Nonlinear Phenomena*, 2019, 399 : 95 – 107.

[12] Zhan X, Xu J, Fang H B. A vibration-driven planar locomotion robot—shell [J]. *Robotica*, 2018, 36 (9) : 1402 – 1420.

[13] Liu Y, Chávez J P, Zhang J J, et al. The vibro-impact capsule system in millimetre scale: numerical optimisation and experimental verification [J]. *Meccanica*, 2020, 55 (10) : 1885 – 1902.