

铁质壁面检测用振动驱动爬壁机器人的设计与实验

李建磊, 唐陈伟, 彭禧, 姚红良

(东北大学 机械工程与自动化学院, 辽宁 沈阳 110819)

摘要: 研究并测试了一种能够在水平至垂直壁面上移动的振动驱动爬壁机器人样机, 可开发用于铁质壁面结构视检等高危工作. 设计了一种具有非对称刚度的弹性底板, 以转子振动电机-弹簧作为致动器, 基于库仑干摩擦模型, 建立了振动驱动爬壁机器人的动力学模型. 通过数值仿真研究了机器人的爬壁运动特性, 分析了致动器激振频率、壁面倾角和永磁铁吸引力对机器人平均速度的影响规律. 对振动驱动爬壁机器人样机进行了壁面运动实验验证. 结果表明, 通过合理配置永磁铁吸引力和致动器激振频率能够有效提高该机器人的平均速度, 并在30°壁面和90°壁面上分别实现了10.6 mm/s和16.7 mm/s的平均爬壁速度, 通过调控激振频率可实现前进与后退运动的切换.

关键词: 振动驱动; 机器人样机; 致动器; 爬壁检测

中图分类号: TD 451 文献标志码: A 文章编号: 1005-3026(2024)05-0690-08

Design and Experiment of a Vibration-Driven Wall-Climbing Robot for Iron Surface Inspection

LI Jian-lei, TANG Chen-wei, PENG Xi, 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: A vibration-driven wall-climbing robotic prototype has been studied and tested to move on horizontal to vertical wall surfaces, which can be developed for high-risk tasks such as the visual inspection of iron wall surface. An elastic substrate with asymmetric stiffness is designed, and the dynamics model of the vibration-driven wall-climbing robot is developed based on the Coulomb dry friction model, with a rotor vibration motor-spring as the actuator. The wall-climbing motion characteristics of the robot are investigated by numerical simulation, and the effects of actuator excitation frequency, wall inclination angle, and permanent magnet attraction on the average speed of the robot are analyzed. The wall motion experiment of the vibration-driven wall-climbing robot prototype is carried out. The results show that the average speed of the robot can be effectively improved by reasonable configuration of the permanent magnetic attraction and the excitation frequency, the average wall-climbing speeds of 10.6 mm/s and 16.7 mm/s are achieved on the 30° and 90° walls, respectively, whereas the forward motion and backward motion can be switched by regulating the excitation frequency.

Key words: vibration-driven; robotic prototype; actuator; wall-climbing; inspection

大型铁质壁面在交通、建筑、石化、电力等工程领域应用广泛, 受使用环境和自然因素的影响, 难免出现表面老化、生锈以及裂纹等不同程度的损伤. 定期检测养护是降低安全事故不可或缺的举措, 如桥梁桁架或船体除锈、焊缝检查等,

这些高危任务不断促使着爬壁机器人的发展与应用^[1-2].

近年来, 用于爬壁作业的机器人层出不穷, 典型的机器人有负压吸附式、磁吸附式、黏性材料吸附式、仿生吸附式等^[3-4]. Xu等^[5]对一种负压

吸附式6足爬壁机器人的运动学和稳定性条件进行了分析. Hu等^[6]研究了一种改进的磁吸履带式爬壁机器人,提出了一种负载分散机构和柔性连接方案,提高了爬壁机器人的有效载荷能力和凸面移动能力. Khan等^[7]设计了一种受尺蠖启发的管道检测爬行机器人,实验结果表明,这种带有软脚趾的电磁脚可以解决机器人连续适应管道表面的问题. Liu等^[8]设计了一种可转向的连杆式爬壁机器人,利用干式黏附材料实现了在平坦垂直表面上的行走运动. 负压吸附式主要用于相对光滑的壁面,磁吸附式主要用于铁质壁面,黏性材料吸附式和仿生吸附式理论上可用于各种壁面. 这些爬壁机器人通常需要复杂的致动器和执行机.

振动驱动是一种新颖的致动方案,它利用“质量-弹簧”谐振系统的激振力进行驱动. 振动驱动机器人被定义为一个由内部振子致动器和外部刚体组成的自推进系统^[9]. 振动驱动方式的优点是在一定程度上可完全摒弃传统检测机器人中的传动链、驱动轮等结构,更易实现小型化、轻量化、密封化的设计^[10-11]. 振动驱动式机器人在医疗检查领域具有一定的应用潜力. Liu等^[12]率先提出了一种毫米级振动冲击胶囊机器人原型,通过参数调节可以有效地控制胶囊的前进或后退,数值分析和实验结果验证了振动驱动技术在医用内窥检测中的可行性. 廖茂林^[13]将振动驱动引入胶囊内窥镜机器人,对比研究了单边和双边弹性约束的振动驱动胶囊系统的非线性动力学行为. 振动驱动式机器人在安全检测、设备养护等方面也日益受到国内外学者的关注. Galajdová等^[14]设计了一种用于管道检测的刚毛式振动驱动机器人,分析了管道几何偏差对其运动的影响. 郭俞良等^[15]针对胶囊式振动冲击机器人难以在大倾角管道内移动的问题,设计了一种外鳍型振动驱动机器人,可用于执行竖直管道内检测作业. Yaguchi等^[16]设计了一种用于大型复杂铁质结构视觉检测的小尺寸磁吸式振动驱动机器人单元,该单元利用形状记忆合金弹簧与倾斜的电磁致动器的配合实现了在水平至垂直的铁质结构壁面上的往复运动,进一步地,通过磁性轮串联振动驱动单元的形式,实现了机器人系统在台阶面和框架内运动.

上述研究结果能够有效缩减机器人系统冗余的振动驱动方案,具有重要的研究与应用价值. 本文基于振动驱动原理设计一种磁吸式爬壁机器人,其谐振致动器由转子振动电机和预压弹簧构成,通过一个具有类刚毛“非对称刚度”特征的弹性底板结构与壁面间产生非对称摩擦效应

而实现爬壁运动,具有结构简单、移动速度快的优点,并能在壁面上实现往复运动,可开发用于铁质壁面结构视觉检测等轻载荷工作.

1 整体结构及运动机理

1.1 整体结构

振动驱动机器人主要包括致动器、外壳体、弹性底板、弹簧、永磁铁、橡胶摩擦带等部件,如图1所示.

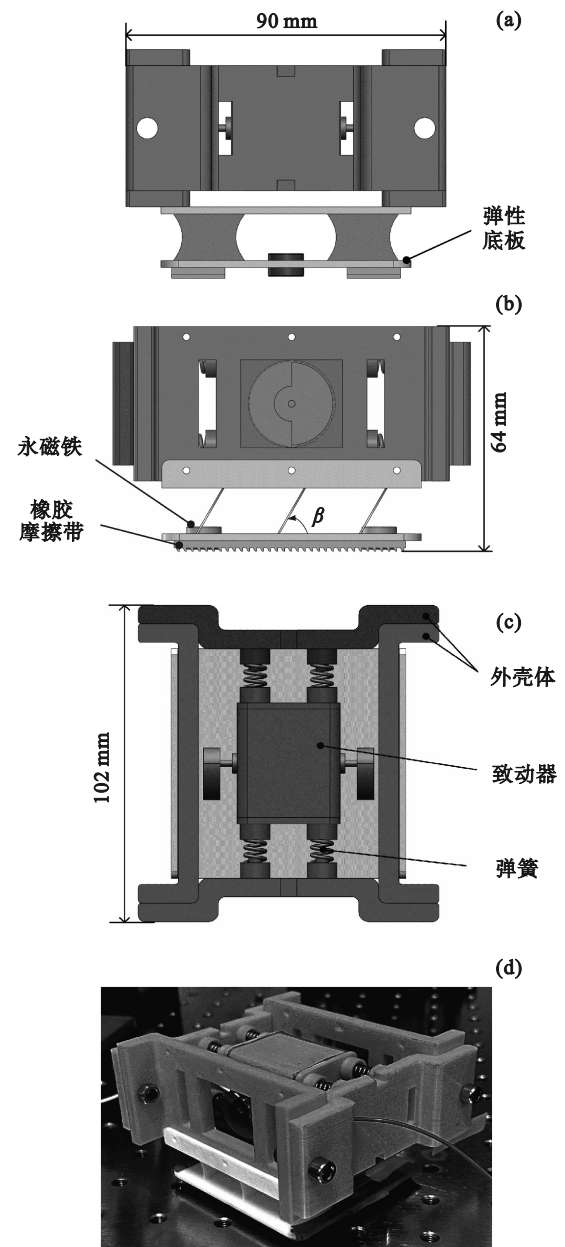


图1 振动驱动机器人的结构

Fig. 1 Structure of the vibration-driven robot
(a)—主视图; (b)—侧视图; (c)—俯视图; (d)—样机图.

致动器作为系统的激励源被两端的弹簧悬挂于外壳体的几何中心,双扇头转子振动电机提

供周期激振力. 模仿刚毛结构设计了一种弹性底板, 其上下底面之间通过阵列的弹性倾斜薄片相连, 并与水平面形成锐角, $\beta=60^\circ$. 永磁铁将粘附于弹性底板下表面的橡胶摩擦带压附于铁质结构壁面, 减少机器人从倾斜壁面脱离的概率, 并进一步增强了振动驱动机器人的摩擦. 此外, 除双扇头转子振动电机、弹簧、永磁铁、橡胶摩擦带外, 其余部件均为 3D 打印件, 整体尺寸为 $102\text{ mm}\times 90\text{ mm}\times 64\text{ mm}$.

1.2 运动机理

在永磁铁的吸引力作用下, 振动驱动爬壁机器人会紧密贴合于铁轨道、槽钢等亲磁金属结构壁面上, 双扇头转子振动电机通电后, 致动器的周期振动转化为弹簧的势能, 通过外壳体和弹性底板等转化为爬壁机器人的动能, 当其足够克服摩擦力时, 爬壁机器人将产生运动.

弹性底板为系统创造非对称摩擦效应. 弹性底板在沿着倾斜薄片的方向更容易变形, 即具有非对称刚度特性. 以水平面运动为例, 在图 1b 所示的装配方式下, 倾斜薄片的方向被作为爬壁机器人的后退方向. 当爬壁机器人沿壁面具有向前运动的趋势时, 较硬的倾斜薄片表现出较大的刚度, 使得大部分致动器激振力直接作用于系统. 反之, 当爬壁机器人沿壁面具有向后运动的趋势时, 较软的倾斜薄片通过柔性变形会消耗部分激振力, 则爬壁机器人向后的运动能力被削弱. 本文将这种由弹性底板的非对称刚度造成振动驱动爬壁机器人前后运动的特征差异统一归结为非对称摩擦特性.

2 动力学模型

2.1 激振力计算

振动电机通过扇头旋转产生的离心惯性力可看作振动驱动机器人系统的激振力. 如图 2 所示, 扇头由一个半径为 R 的半圆和半径为 r 的圆两部分组成, 将其由内向外沿半径离散成 p 个半圆环, 则每个圆环的半径差为

$$\Delta r = r_p - r_{p-1} = \frac{R-r}{p}. \quad (1)$$

式中: r_p, r_{p-1} 分别表示第 $p-1$ 个半圆环 C_{p-1} 的外圆半径和内圆半径.

以半圆环 C_{p-1} 为例, 用其中间圆半径表征该半圆环的偏心距 E_{p-1} 为

$$E_{p-1} = r_p - \frac{\Delta r}{2} = r + \left(p - \frac{1}{2}\right)\Delta r. \quad (2)$$

假定单个均质扇头的总质量为 m_s , 根据质量

与体积的比值关系可得到半圆环 C_{p-1} 的质量 m_{p-1} 为

$$m_{p-1} = \frac{m_s(r_p^2 - r_{p-1}^2)}{R^2 + r^2}. \quad (3)$$

该双半圆扇头振动电机以转速 ω 旋转所产生的致动器激振力 F_c 可表示为

$$F_c = 2\omega^2 \sum_{i=1}^p m_i E_i. \quad (4)$$

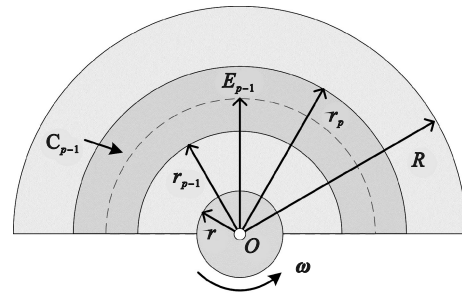


图 2 振动电机扇形头示意图

Fig. 2 Schematic diagram of the vibration motor's fan-shaped head

2.2 动力学方程

图 3 所示为振动驱动爬壁机器人系统的动力学模型, 看作 3 自由度非线性系统. 其中 m_n 为振动电机致动器单元的质量, m_w 为外壳体的质量, m_d 为弹性底板的质量 (包括永磁铁和橡胶摩擦带的质量); k_1 为连接致动器单元与外壳体的弹簧刚度, c_1 为外壳体与致动器单元之间的相对速度导致的能量耗散的阻尼系数; x_n, x_w 和 x_d 分别表示致动器单元、外壳体和振动驱动机器人沿壁面运动的位移; F_c 为致动器激振力, F_e 为永磁体吸引力, F_f 为爬壁机器人与铁质壁面的库仑摩擦阻力; α 为壁面倾角.

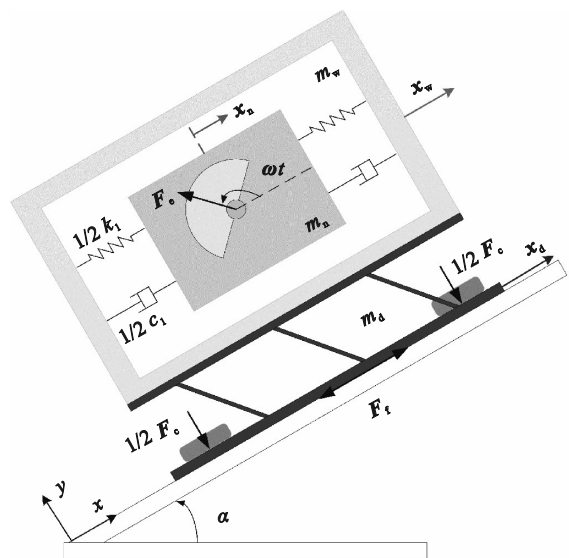


图 3 振动驱动机器人的动力学模型

Fig. 3 Dynamics model of the vibration-driven robot

在 x 方向上,由牛顿第二定律可得振动驱动爬壁机器人系统的动力学方程为

$$\left. \begin{aligned} m_n \ddot{x}_n + F_{k1} &= F_c \cos(\omega t) - m_n g \sin \alpha, \\ m_w \ddot{x}_w - F_{k1} + F_{k2} &= -m_w g \sin \alpha, \\ m_d \ddot{x}_d - F_{k2} &= F_f - m_d g \sin \alpha, \\ F_{k1} &= c_1(\dot{x}_n - \dot{x}_w) + k_1(x_n - x_w), \\ F_{k2} &= c_2(\dot{x}_w - \dot{x}_d) + k_2(x_w - x_d). \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

式中: F_{k1} 为致动器与外壳体之间的相互作用力; g 为重力加速度; k_2 和 c_2 分别为外壳体与弹性底板间的连接刚度以及相应的阻尼系数; F_{k2} 为外壳体与弹性底板之间的相互作用力,当 $x_n - x_w < 0$ 时, $k_2 = k_{21}$, 反之, $k_2 = k_{22}$, 且 $k_{21} < k_{22}$, 理想情况下,当 k_{22} 足够大到使 $x_w - x_d$ 趋于 0 时,振动驱动机器人系统可作 2 自由度模型.

假定滑动摩擦力近似等于最大静摩擦力,考虑双向黏滑效应,振动驱动爬壁机器人系统在壁面具有以下 3 种运动状态:① 振动驱动机器人瞬时速度不为零;② 振动驱动机器人瞬时速度为零但加速度不为零;③ 振动驱动机器人保持静止. 相应的爬壁机器人摩擦力 F_f 可用符号函数具体表示为

$$F_f = \begin{cases} -\text{sign}(\dot{x}_w) f, & \dot{x}_d \neq 0, \\ -\text{sign}(F_k) f, & \dot{x}_d = 0 \& |F_k| \geq f, \\ -\text{sign}(F_k) F_k, & \dot{x}_d = 0 \& |F_k| < f. \end{cases} \quad (6)$$

式中: $f = \mu F_N$, μ 为爬壁机器人橡胶摩擦带与壁面的动摩擦系数; F_N 为爬壁机器人系统对壁面的正压力, $F_N = m_n g \cos \alpha + F_c - F_s \sin(\omega t)$; $F_k = F_{k1} - F_{k2} - m_d g \sin \alpha$, m_d 与爬壁机器人的总质量 m_m 的关系为 $m_m = m_n + m_w + m_d$; sign 为符号函数.

将式(6)代入式(5)即可得到振动驱动爬壁机器人系统沿壁面运动的动力学方程.此外,跳跃和倾覆是振动驱动机器人在倾斜壁面上移动需要避免的两种现象.跳跃现象发生在垂直壁面的 y 方向上,倾覆现象容易出现在沿壁面向下的 $-x$ 方向上,因此,致动器激振力要满足如下条件:

$$\left. \begin{aligned} F_{c1} &= m_m g \cos \alpha + F_c, \\ F_{c2} &= \frac{l}{2h} F_{c1} - m_m g \sin \alpha, \\ F_c &\leq \min(F_{c1}, F_{c2}). \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

式中: F_{c1} 和 F_{c2} 分别为发生跳跃和倾覆现象的临界激振力; l 和 h 分别为振动驱动机器人的长度和高度.

3 数值仿真

3.1 仿真参数

运动速度是衡量振动驱动机器人移动特性的重要指标.为了研究致动器激振频率、壁面倾角、永磁铁吸引力等参数对振动驱动爬壁机器人系统的动力学响应,本节利用 4 阶 Runge-Kutta 方法来数值求解初始状态为零的动力学方程,仿真参数如表 1 所示,参数的测定方法见 4.1 节.

表 1 仿真参数
Table 1 Simulation parameters

参数	数值	参数	数值
m_n/g	93	$c_2/(N \cdot s \cdot m^{-1})$	0.25
m_w/g	106.5	μ	0.62
m_d/g	70.2	F_c/N	6.8
$k_1/(N \cdot mm^{-1})$	47.2	m_d/g	8
$c_1/(N \cdot s \cdot m^{-1})$	0.5	R/mm	11.75
$k_{21}/(N \cdot mm^{-1})$	15.1	r/mm	5
$k_{22}/(N \cdot mm^{-1})$	42.5	p	5

3.2 激振频率的影响

基于表 1 所示的基本参数,在激振频率为 20~40 Hz 时,得到振动驱动机器人的激振频率与平均速度响应如图 4 所示.激振频率在 20~25 Hz 之间时,振动驱动机器人沿壁面向下运动,并在 24 Hz 附近具有最大的后退平均速度 -2.72 mm/s. 振动驱动机器人在激振频率为 25~35 Hz 时以较小的速度保持沿壁面向上运动,并在激振频率为 33 Hz 时出现局部最大前进平均速度.当激振频率在 35~40 Hz 之间时,振动驱动机器人的移动速度先快速增加,然后逐渐放缓,平均速度能达到约 50 mm/s. 图 5 表征了致动器与机器人在指定激振频率下的运动状态,机器人位移基本为恒值的时间段表示振动驱动机器人的黏滑运动状态,这是库仑干摩擦作用下的非光滑系统的典型行为;同时,当一个步距的净位移大于 0 时,机器人才会产生向上运动.

3.3 壁面倾角的影响

由 3.2 节可知,振动驱动机器人沿壁面向上运动的激振频率主要在 30~38 Hz,其他参数不变,壁面倾角 α 从 0° 变化至 90°,得到振动驱动机器人的倾角-激振频率-平均速度响应如图 6 所示.各个激振频率下,随着壁面倾角的增加,平均速度由大变小、由正变负,意味着振动驱动机器人在壁面上逐渐由前进转为后退运动.在激振频率

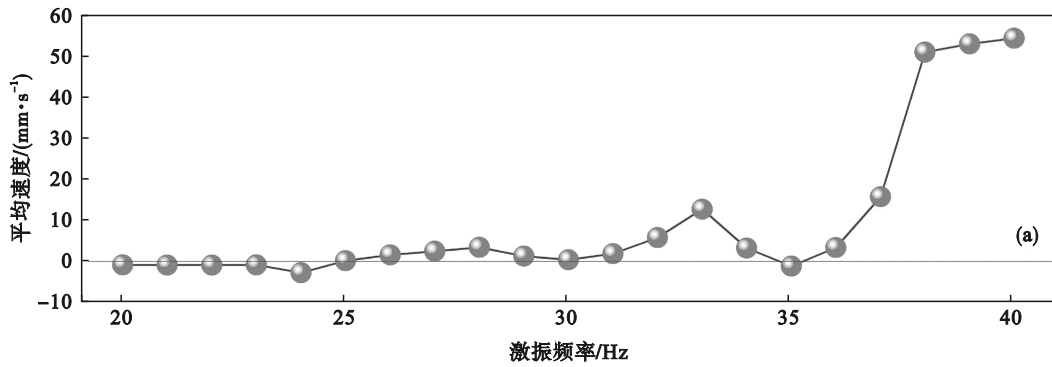


图 4 激振频率与平均速度响应

Fig. 4 Response of excitation frequency and average velocity

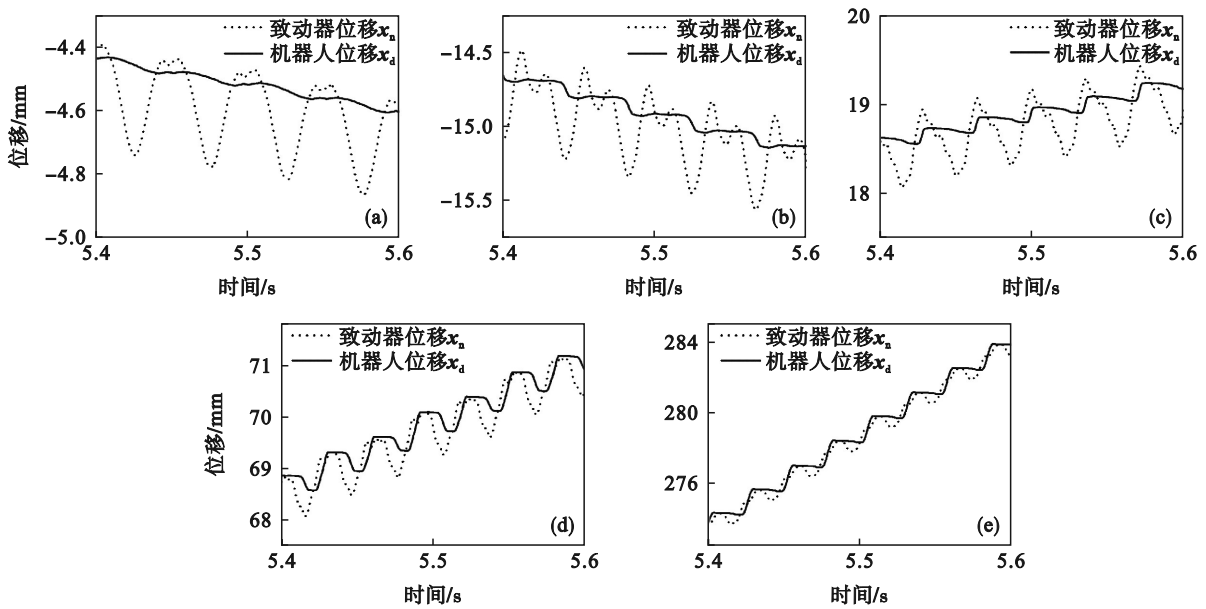


图 5 不同激振频率下的瞬时位移

Fig. 5 Instantaneous displacement at different excitation frequency

(a)—20 Hz; (b)—24 Hz; (c)—28 Hz; (d)—33 Hz; (e)—38 Hz.

低于 36 Hz 时,这种趋势的转变在 30°左右;在激振频率为 38 Hz 时,振动驱动机器人在当前参数下的最大爬行坡度约 60°.

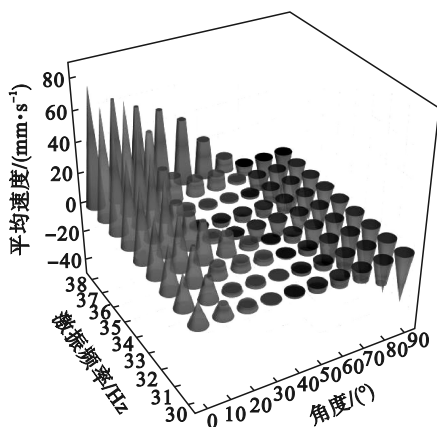


图 6 倾角-激振频率-平均速度响应

Fig. 6 Response of angle-excitation frequency-average velocity

3.4 永磁铁吸引力的影响

本节探究永磁铁吸引力对振动驱动机器人平均速度的影响.为实现振动驱动机器人在 60°~90°大倾角壁面上的移动,以 37 Hz 的激振频率为例,增加永磁铁的吸引力至 12 N,得到振动驱动机器人的永磁铁引力-倾角-平均速度响应,如图 7 所示.随着永磁铁吸引力的增加,该振动驱动机器人的壁面爬行能力愈发明显,平均速度的差异逐渐趋于相同.对于 60°壁面,当永磁铁吸引力取 11 N 时,振动驱动机器人获得最大的平均速度.

4 实验验证

4.1 参数测定

1) 滑动摩擦系数.通过测量摩擦角的方法得到橡胶摩擦带的滑动摩擦系数.如图 8a 所示,将爬壁机器人(未粘附永磁铁)置于铁质壁面上,

缓慢调整滚珠丝杠滑台的高度,逐渐缩小爬壁机器人能够匀速下滑的倾角,记录下最小的壁面倾角 θ ,摩擦系数即为 θ 的正切值,测量结果见表 1 中参数 μ .

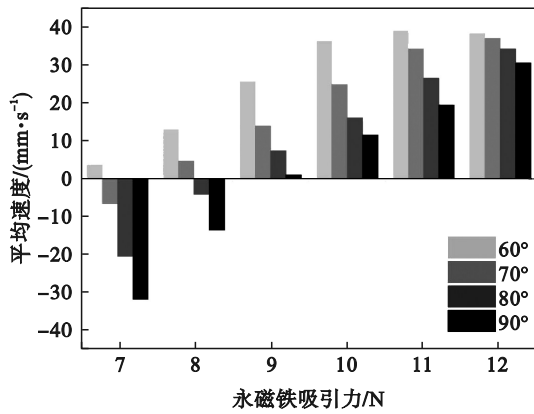


图 7 永磁铁-吸引力-倾角-平均速度响应
Fig. 7 Response of permanent magnetic attraction-angle-average velocity

2) 弹性底板刚度.通过测量压力与形变量得到弹性底板的刚度.测量装置如图 8b 所示,利用推拉力计实验台可同时得到压力与位移值,在小变形范围内,将各组压力与对应位移比值的平均值视为弹性底板的刚度,测量结果见表 1 中参数 k_{21} 和 k_{22} .

3) 永磁铁吸引力.通过测量竖直拉力得到永磁铁对铁质面的吸引力.如图 8c 所示,将爬壁机器人置于水平铁质面,缓慢增加拉力计的高度,记录下爬壁机器人脱离铁质面过程中的峰值拉力,则永磁铁吸引力即为此峰值拉力减去爬壁机器人的总重力,重复测量取均值作为参数 F_c .

4) 激振频率.利用激光转速表测量双扇头转子振动电机在指定电压下的激振频率.测量装置如图 8d 所示,扇头上贴有反光条,激光转速表和振动驱动机器人保持相对静止.调节直流电源至指定电压,激光转速表测量稳压后的电机转速,重复测量取均值再除以 60 作为该电压下的实际激振频率.

4.2 壁面运动实验

在倾角 α 分别为 30° 和 90° 的壁面上进行移动实验,实验装置如图 9 所示,主要包括振动驱动机器人、直流电源、铁质结构壁、直尺、激光测振仪.由于安装误差、摩擦力不均匀等因素,爬壁机器人难以严格直线移动,所以在铁质结构壁面设有平行轨道,且轨道宽度大于弹性底板的宽度.对于 30° 壁面,基础参数如表 1 所示,致动器激振频率分别为 24.34 Hz 和 36.45 Hz.对于 90° 壁面,致动器激振频率分别为 28.47 Hz 和 37.65 Hz,永磁体

吸引力 $F_c=10.38$ N.

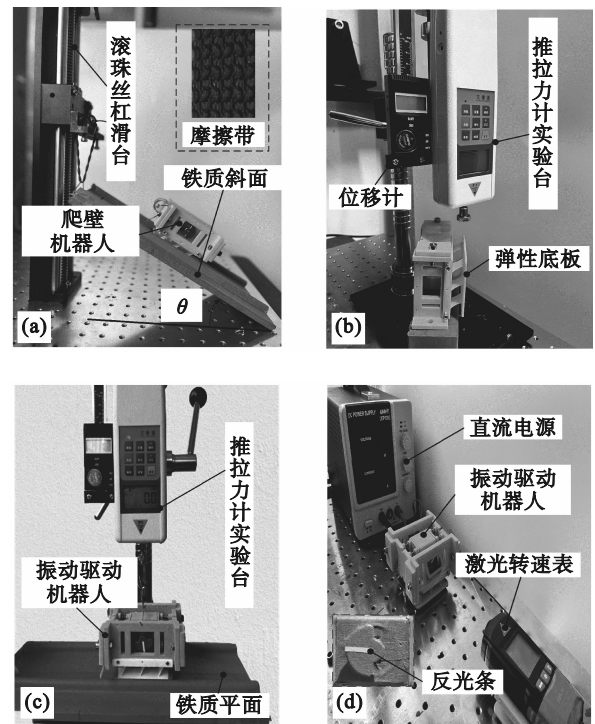


图 8 关键参数测量装置
Fig. 8 Measurement devices for key parameters
(a)滑动摩擦系数;(b)弹性底板刚度;
(c)永磁铁吸引力;(d)激振频率.

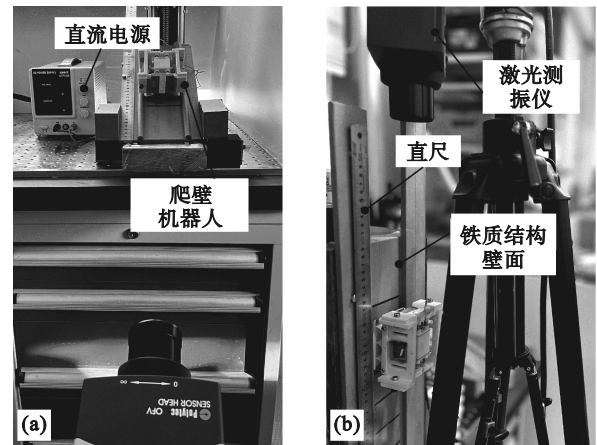


图 9 壁面运动实验装置
Fig. 9 Experimental device for motion on wall surface
(a)— 30° 壁面实验;(b)— 90° 壁面实验.

振动驱动机器人平均速度的实验和仿真结果分别如表 2 和表 3 所示,在两组实验参数中,实验值较仿真值小,且较低激振频率下的平均速度相对误差较大,这主要是由于实际运动中机器人与壁面的非理想库仑干摩擦造成,而较低激振频率驱动下的振动电机处于低电压工作状态,转速较不稳定.对于 90° 壁面,机器人向上运动的误差较大,因为此时致动器的激振频率接近倾覆频率(37.56 Hz),振动驱动机器人在运动过程中与壁

面产生碰撞而造成运动失稳.此外,还存在测量误差、弹性底板的非线性刚度、电源电流不稳定等不确定性因素.

表 2 30°壁面运动的实验值与仿真值对比
Table 2 Comparison of experimental and simulated values for 30° wall surface motion

激振频率 Hz	平均速度/(mm·s ⁻¹)		
	仿真值	实验值	误差
24.34	-2.33	-3.54	-1.21
36.45	12.20	10.64	-1.56

表 3 90°壁面运动的实验值与仿真值对比
Table 3 Comparison of experimental and simulated values for 90° wall surface motion

激振频率 Hz	平均速度/(mm·s ⁻¹)		
	仿真值	实验值	误差
28.47	-1.86	-2.88	-1.02
37.65	23.32	16.72	-6.60

另一方面,对于30°壁面和90°壁面的爬壁实验,通过激光测振仪对机器人外壳体的瞬时速度进行了测量,图10为激振频率为36.45 Hz时,在30°壁面上外壳体的速度,图11为激振频率为37.65 Hz时,在90°壁面上外壳体的速度.如图10和图11所示,与仿真得到的瞬时速度区间大致相同.验证了该振动驱动机器人原型样机的运动能力.

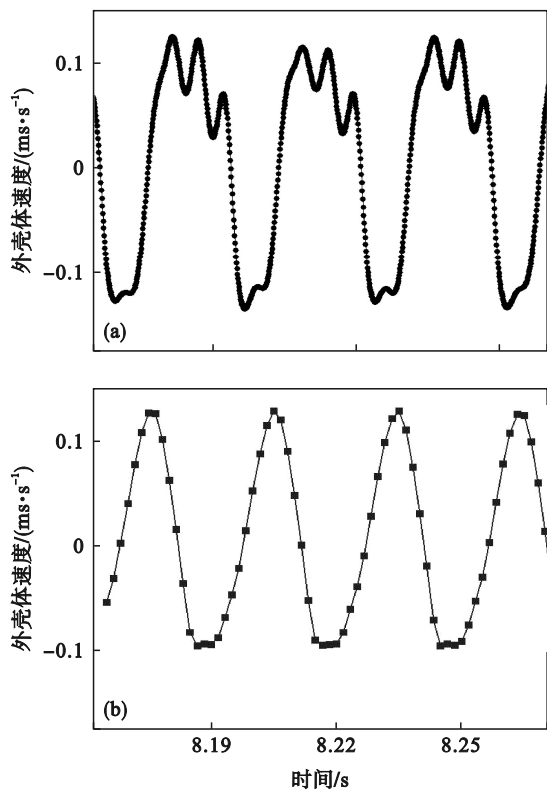


图 10 30°壁面上外壳体速度

Fig. 10 Shell velocity on 30° wall surface
(a)—仿真速度曲线;(b)—实测速度曲线.

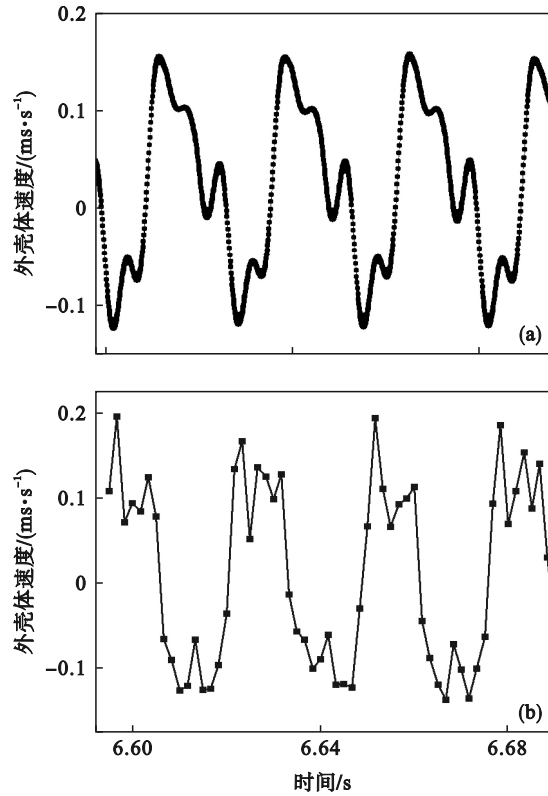


图 11 90°壁面上外壳体速度

Fig. 11 Shell velocity on 90° wall surface
(a)—仿真速度曲线;(b)—实测速度曲线.

5 结 论

1) 数值仿真和实验结果表明,在致动器激振频率不发生跳跃和倾覆的范围之内,该振动驱动爬壁机器人的平均速度随着激振频率的增加而经历由负变正、由小变大的过程.因此,不依赖复杂的机构与控制即可实现低频后退和高频前进两种运动模式的切换.

2) 通过合理配置磁铁吸引力和致动器激振频率,该振动驱动爬壁机器人能够分别以10.6 mm/s和16.7 mm/s的平均速度在30°壁面和90°壁面上移动.

参考文献:

[1] La H M, Dinh T H, Pham N H, et al. Automated robotic monitoring and inspection of steel structures and bridges[J]. *Robotica*, 2019, 37(5): 947-967.

[2] Nguyen S T, La H M. A climbing robot for steel bridge inspection [J]. *Journal of Intelligent & Robotic Systems*, 2021, 102(4): 75.

[3] Wang S Y. Research status and future development of wall-climbing robot [C]//2021 International Conference on Electronics, Circuits and Information Engineering (ECIE). Zhengzhou, 2021: 122-130.

[4] Fang Y, Wang S, Bi Q S, et al. Design and technical development of wall-climbing robots: a review [J]. *Journal of Bionic Engineering*, 2022, 19(4): 877-901.

(下转第 720 页)