

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2209447

含柔性吸附材料的攀爬机器人振动特性 与稳定性分析研究*

王学军^{1,2,3}, 张帆^{1,2,3}

(1. 昆明理工大学机电工程学院 昆明 650504; 2. 云南省先进装备智能制造技术重点实验室 昆明 650504;
3. 云南省先进装备智能维护工程研究中心 昆明 650500)

摘要: 为了提升攀爬机器人壁面运动稳定性从而提高其工程应用能力。针对攀爬机器人壁面运动过程的振动与动力学耦合特性问题, 本文设计制作了一种含柔性吸附材料的攀爬机器人。基于刚柔耦合原理, 获得刚性体与柔性体运动学递推关系, 利用拉格朗日原理建立攀爬机器人动力学方程。推导得到反应动力学耦合程度的数学模型。通过仿真分析得到运行相同位移情况下, 通过调整加减速时间比例使得机器人振幅下降 35%, 分析得到一定范围内攀爬机器人刚性质量与吸附材料弹性模量增加通过降低动力学耦合程度降低攀爬机器人振动响应。通过样机实验测量了攀爬机器人负载能力与不同运动阶段真空度与流量的稳定性。研究为攀爬机器人的驱动控制策略与工程应用奠定基础。

关键词: 攀爬机器人; 柔性吸附材料; 刚柔耦合动力学; 振动特性

中图分类号: TH113 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 460.15

Research on vibration characteristics and stability of climbing robot with flexible adsorption material

Wang Xuejun^{1,2,3}, Zhang Fan^{1,2,3}

(1. School of Electrical and Mechanical Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650504, China;
2. Yunnan Provincial Key Laboratory of Advanced Equipment Intelligent Manufacturing Technology, Kunming 650504, China;
3. Yunnan Advanced Equipment Intelligent Maintenance Engineering Research Center School of Mechanical and Electrical Engineering, Kunming 650500, China)

Abstract: By improving the wall motion stability of the climbing robot, its engineering application ability could be enhanced. Aiming at the coupling characteristics of vibration and dynamics in the process of wall motion of the climbing robot, a climbing robot with flexible adsorption material is designed and fabricated in this article. Based on the rigid-flexible coupling principle, the kinematic recurrence relation between the rigid body and the flexible body is obtained. And the dynamic equation of the climbing robot is established by using the Lagrangian principle. A mathematical model of the degree of coupling of reaction kinetics is formulated. Through simulation analysis, it is found that the amplitude of the robot decreases by 35% by adjusting the ratio of acceleration and deceleration time under the same displacement during operation. The analysis shows that the rigid mass of the climbing robot and the elastic modulus of the adsorbent material increase within a certain range, and the degree of dynamic coupling reduces the climbing robot vibration response. Through the prototype experiment, the load capacity of the climbing robot and the stability of vacuum and flow in different movement stages are measured. The research provides the foundation for the driving control strategy and engineering application of the climbing robot.

Keywords: climbing robot; flexible adsorption material; rigid-flexible coupling dynamics; vibration characteristics

0 引 言

攀爬机器人可以代替人工完成诸如管道检测、高楼壁面清洗、应用救援、风电塔架维护等人力难以完成

的工作。目前针对爬壁机器人的研究呈现多样化, 从结构上可以分为刚性与柔性两大类。刚性结构机器人运动较为稳定, 但难以适应复杂环境, 而柔性爬壁机器人^[1-2]相比刚性结构有更高的环境适应性, 但工程应用比较困难。

现有攀爬机器人的攀爬方式主要有负压吸附、磁吸附^[3]、静电吸附、仿生爪^[4-5]式。其中,负压吸附式的爬壁机器人因其适应壁面种类多而应用广泛。基于负压吸附的爬壁机器人壁面运行速度、运行稳定性与负载能力是完成工作的重要前提。Zhu^[6]等研发了一款履带式真空吸附攀爬机器人,22 kg 的自重可使最大有效载荷达到 18 kg。Kim 等^[7]介绍了一种基于真空吸附的履带式爬壁机器人通过在两个履带轮上采用串联链,实现了高爬坡速度为 15 m/min 的连续机车运动。

吸附材料作为一种连续介质可以实现机器人与壁面的连接。除了提供必要的密封性与摩擦力之外,作为爬壁机器人重要组成部分的吸附材料还与爬壁机器人自身的振动有着紧密的联系。Wu 等^[8]研发了具有壁虎模拟粘合履带的垂直爬壁机器人原型,以展示微米粘合剂阵列的粘合能力。Huang 等^[9]发现一种硼酸酯聚合物水凝胶式的吸附材料,通过切换电场方向,水凝胶可以反复附着和脱离各种表面,使得攀爬机器人可以爬上垂直和倒置的铁、铜等导电基板。Liu 等^[10]设计的爬壁机器人采用干胶系统与平面弹性体作为吸附材料,干胶方式适用于各种材料表面。He 等^[11]研究了一种使用胶水模仿蜗牛的湿粘方法,然而胶水会残留在机器人通过时的表面。

为了提高爬壁机器人的工程应用能力,目前大部分研究人员主要从机构设计的角度进行优化。Daniel^[12]等将单一密封腔分隔成多个,来提高对壁面的适应性;Longo 等^[13]通过增加 1 个吸附模块的方式提高机器人壁面吸附性能。Xu 等^[14]基于软材料的高柔韧性,研制的气动柔性爬壁机器人可以通过模拟和使用有限元方法实现攀爬机器人中最佳腔体数的优化计算。

负压攀爬机器人动力源,如真空泵、离心风机等机构自身产生的振动以及机器人内部的柔性结构决定了攀爬机器人在实际应用中稳定性较差,因此建立考虑柔性介质的动力学模型尤为重要。郝瑞等^[15]将压电梁的刚度与挠度关系引入 MEMS 压电振动台的动力学模型中,分析了初始位移对振动特性的影响。将带有弹性底座柔性连杆自由漂浮空间机器人作为研究对象,Huang 等^[16]通过推导机器人系统拉格朗日动力学模型构建了一种振动控制策略。Zhang 等^[17]通过建立手臂关节动力学模型,利用提出的谐振 (PR) 控制器来解决仿人机械臂的共振问题。Zhang 等^[18]通过刚柔耦合动力学模型的建立,分析了刚性和柔性连杆的耦合效应以及末端执行器发生微小位移时即会产生最大的变形量。针对六足腿杆机构仿生跳跃机器人,Zhang 等^[19]使用伪刚体模型建立刚柔耦合动力学模型,分析了结构和安装参数对跳跃性能的影响。

为了提高爬壁机器人的力学性能,目前主要从改变结构设计^[20-21]的方法进行优化,但此类方法并没有达到

既节省能源又提升运动稳定性的目的。

本文设计一种依附于传统负压吸附与被动柔性吸附材料的攀爬机器人,基于刚柔耦合动力学建立攀爬机器人的动力学模型,推导出影响攀爬机器人动力学耦合程度的影响因子。本文重点分析攀爬机器人吸附运动过程中柔性吸附材料对真空腔体振动特性的耦合关系,以及刚体运动等对攀爬机器人内部动力学耦合程度的影响,从而使攀爬机器人运动稳定性、负载能力提升。

1 攀爬机器人设计与动力学建模

1.1 攀爬机器人设计

本文设计一种含柔性吸附材料的攀爬机器人,机器人系统如图 1(a)所示。攀爬机器人主体由真空腔、弹性连接结构、底盘系统、柔性吸附材料组成。离心风机作为动力源,通过抽取真空腔内的空气使腔体内部形成负压环境,在大气压强作用下将攀爬机器人吸附于壁面。弹性连接结构将真空腔与底盘通过弹簧连接,这样设置的优势在于底盘受到的压力只会来自于弹簧压缩产生的弹力,最大限度的减少底盘与真空腔之间运动与吸附的耦合关系。底盘系统由一对摩擦轮、一对万向轮、驱动电机等动力元件组成。

为了保障攀爬机器人运动的密封性与壁面适应能力,如图 1(b)所示,本文将柔性的缓冲材料,纳米粘性材料与低摩擦材料组合起来形成柔性吸附材料组。另外,柔性吸附材料还与机器人的振动特性与运动稳定性有重要关系。

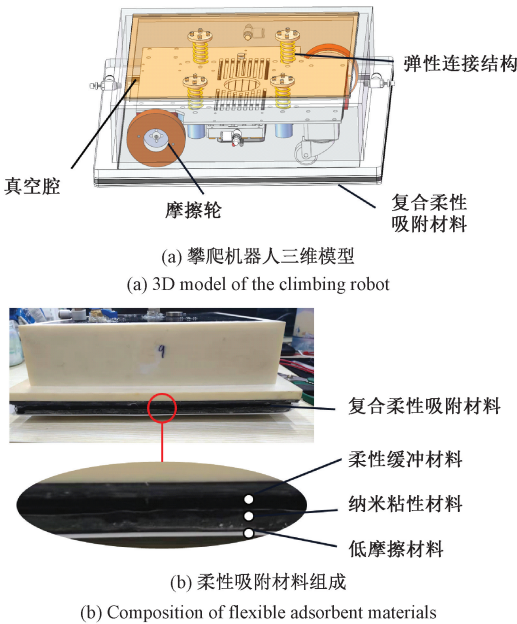


图 1 攀爬机器人系统
Fig. 1 Climbing robot system

1.2 刚柔耦合动力学建模

攀爬机器人是一个复杂的柔性多体系统,结构简图如图2所示,攀爬机器人的运动与姿态会引起柔性吸附材料的压缩变形与振动,柔性吸附材料的变形与振动又会影响攀爬机器人的姿态与运动精度。因此,攀爬机器人上柔性吸附材料的振动与攀爬机器人的运动是相互耦合的,这种耦合使攀爬机器人的动力学建模和力学特点变得更为复杂。

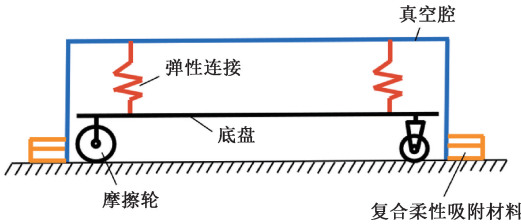


图2 攀爬机器人结构简图

Fig. 2 Structure diagram of the climbing robot

考虑攀爬机器人吸附材料为柔性体,如图3所示,通过集中质量有限元法将吸附材料分为 k 个单元体。移动坐标系 d' 固定在吸附材料的几何中心 O_1 上。

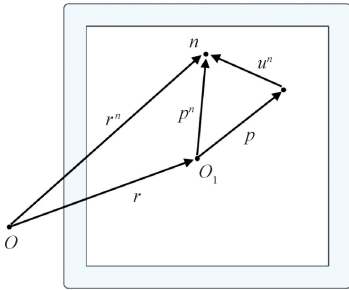


图3 柔性吸附材料示意图

Fig. 3 Schematic diagram of flexible adsorption material

柔性吸附材料的位形速度 v_1 为:

$$v_1 = [\dot{r}^T \quad \omega^T \quad \eta^T]^T \quad (1)$$

$$\begin{cases} \dot{r}^n = E^n v_1 \\ \dot{r}^n = E^n \dot{v}_1 + K^n \\ E^n = [I_3 \quad -\tilde{p}^n \quad \Phi^n] \\ K^n = \tilde{\omega} \Phi^n \dot{\eta} + \tilde{\omega} \tilde{\omega} p^n \end{cases} \quad (2)$$

其中, r^n 为 n 节点的绝对位置矢量, $\dot{r}^n$ 为 n 节点的运动速度, Φ^n 为惯性坐标系下的平动模态矩阵, η 是模态坐标向量。浮动坐标系 d' 下, p^n 为弹性变形后 n 节点相对位置矢量 p 为弹性变形前的相对位置矢量。

得到柔性体的动力学方程为:

$$\delta v_1^T (-M \dot{v}_1 - f^1 + f^2 - f^3) = 0 \quad (3)$$

式中: M 为广义质量矩阵, f^1 是广义速度惯性力向量, f^2 是广义外力向量, f^3 是广义变形力向量,其表达式分

别如式(4)所示。

$$\begin{cases} M = \sum_{n=1}^k m_n E^n T E^n \\ f^1 = m_n E^n T K^n \\ f^2 = E^n T F^n \\ f^3 = [0^T \quad 0^T \quad A_n \dot{\eta} + B_n \eta]^T \end{cases} \quad (4)$$

式中: m_n 为 n 节点质量, A_n 为模态阻尼矩阵, B_n 为模态刚度矩阵。

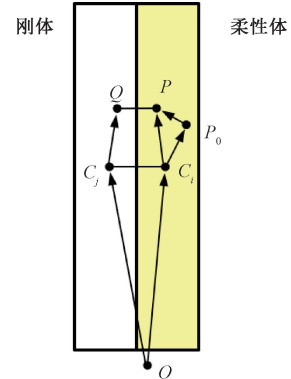


图4 相邻的刚性体与柔性体运动关系图

Fig. 4 Motion diagram of adjacent rigid body and flexible body

真空腔忽略柔性变形后与柔性吸附材料关系示意如图4所示,铰点简化为柔性吸附材料与真空腔上 P 、 Q 两点,铰 h_i 在铰点 P 、 Q 的连线上, P_0 为 P 点变形前铰点, C_i 和 C_j 分别为柔性体与刚体的质心位置。 e^p 、 e^q 、 e^{p_0} 、分别为建立在 P 、 Q 、 P_0 上的局部坐标系,铰的局部坐标系分别为 e^h 、 e^{h_0} 。吸附材料与真空腔的浮动坐标系关于固定坐标系的方向余弦矩阵 A_i 和 A_j 的变换方程为:

$$A_i = A_j A_{ji} = A_j C_{jq} D_i C_{ip}^T B_{ip}^T \quad (5)$$

其中, C_{jq} 为 e^{h_0} 关于 e^q 的方向余弦矩阵, D_i 为 e^h 关于 e^{h_0} 的方向余弦矩阵, C_{ip} 为 e^h 关于 e^p 的方向余弦矩阵, B_{ip} 为 e^p 关于 e^{p_0} 的方向余弦矩阵。

吸附材料与真空腔的角速度 ω_i 与 ω_j 、角加速度 $\dot{\omega}_i$ 与 $\dot{\omega}_j$ 、速度 $\dot{r}_i$ 与加速度 $\ddot{r}_i$ 之间的变换方程为:

$$\begin{cases} \omega_i = \omega_j + \omega_{ri} - \omega_{ri}^p \\ \dot{\omega}_i = \dot{\omega}_j + H_i^{\Omega T} \ddot{q}_i - \psi_i^p \ddot{\eta}_i + \gamma_{i2}^r \\ \dot{r}_i = \dot{r}_j + (-\tilde{p}_j^q - \tilde{h}_i + \tilde{p}_i^p) \omega_j + \\ \quad (H_i^{hT} + \tilde{p}_i^p H_i^{\Omega T}) \dot{q}_i + (-\Phi_i^p - \tilde{p}_i^p \psi_i^p) \dot{\eta}_i \\ \ddot{r}_i = \ddot{r}_j + (-\tilde{p}_j^q - \tilde{h}_i + \tilde{p}_i^p) \dot{\omega}_j + \\ \quad (H_i^{hT} + \tilde{p}_i^p H_i^{\Omega T}) \ddot{q}_i + (-\Phi_i^p - \tilde{p}_i^p \psi_i^p) \ddot{\eta}_i + \gamma_{i1}^r \\ \gamma_{i1}^r = \tilde{\omega}_j \tilde{\omega}_j p_j^q + \tilde{\omega}_j \tilde{\omega}_j h_i - \tilde{\omega}_i \tilde{\omega}_i p_i^p + \\ \quad 2(\tilde{\omega}_j v_{ri} - \tilde{\omega}_i v_{ri}^p) + \tilde{p}_i^p \gamma_{i2}^r \\ \gamma_{i2}^r = \tilde{\omega}_j \omega_{ri} - \tilde{\omega}_i \omega_{ri}^p + \beta_i \end{cases} \quad (6)$$

式中: $\omega_{ri}, \omega_{ri}^p$ 为铰引起的平动与转动角速度, $H_i^{\Omega T}$ 为与铰转动参数矩阵, ψ_i^p 为铰点 P 转动模态矩阵, γ_{i1}, γ_{i2} 为递推矩阵参数。

本文中的攀爬机器人由吸附材料、真空腔、弹簧组成, 得到相邻物体间的递推关系后进一步得到整个机器人的运动学递推关系表示为:

$$\begin{cases} \dot{v}_i = \sum_{B_n \leq B_i} G_{in} \dot{y}_n (i = 1, 2, \dots, N \cap n \neq 0) \\ \ddot{v}_i = \sum_{B_n \leq B_i} G_{in} \ddot{y}_n + g_{in} (i = 1, 2, \dots, N \cap n \neq 0) \end{cases} \quad (7)$$

式中: G_{in} 为真空腔与吸附材料的递推矩阵, g_{in} 为递推矩阵求导后余量。 N 为攀爬机器人系统物体数目。

攀爬机器人外轮廓可视为矩形, 两主动驱动轮分布于底盘的左上角与右下角, 左下角与右上角装有自由万向轮。爬壁机器人差速模型简化为图 5 中的理想模型。以机器人几何中心 O_{CR} 为坐标原点, 垂直向上为 X 轴正方向, 水平向左为 Y 轴正方向。

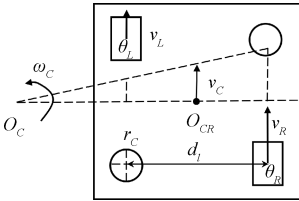


图 5 攀爬机器人刚性系统示意图

Fig. 5 Schematic diagram of the rigid system of the climbing robot

将攀爬机器人底盘运动简化为刚体运动中的平移与旋转运动后, 运动学模型为:

$$\begin{bmatrix} v_c \\ \omega_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{r_l}{2} & \frac{r_l}{2} \\ \frac{r_l}{d_l} & -\frac{r_l}{d_l} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\theta}_R \\ \dot{\theta}_L \end{bmatrix} \quad (8)$$

其中, ω_c 为旋转角速度, v_c 为底盘平移速度, r_l 为摩擦轮半径, d_l 为摩擦轮轴距。

质心平移距离 h_c 为:

$$h_c = \frac{\theta_R r_l + \theta_L r_l}{2} \quad (9)$$

则单车刚性结构动能为:

$$V = \frac{1}{2} M (v_c^2 + J \omega_c^2) \quad (10)$$

势能为:

$$H = Mgh_c + \frac{1}{2} kX^2(p) \quad (11)$$

则系统拉格朗日表达式可表示为:

$$L = V - H \quad (12)$$

得到机器人系统的拉格朗日动力学方程为:

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{q}_i} \right) - \frac{\partial L}{\partial q_i} = Q_i, \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (13)$$

可得系统的总体刚柔耦合动力学方程为:

$$\begin{bmatrix} M_\alpha & M_{\alpha\beta} & M_{\alpha\gamma} \\ M_{\alpha\beta}^T & M_\beta & M_{\beta\gamma} \\ M_{\alpha\gamma}^T & M_{\beta\gamma}^T & M_\gamma \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{S} \\ \ddot{\varphi} \\ \ddot{\varepsilon} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ D_d^* \varepsilon \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F \\ \tau \\ 0 \end{bmatrix} + F_e \quad (14)$$

其中, M_α 为攀爬机器人刚性结构的惯性矩阵, M_β 为柔性吸附材料的惯性矩阵, M_γ 为柔性模态坐标对应的惯性矩阵, $M_{\alpha\beta}$ 为刚性结构与吸附材料耦合的惯性矩阵, $M_{\alpha\gamma}$ 为刚体与柔性模态的耦合惯量矩阵, $M_{\beta\gamma}$ 为柔性吸附材料与柔性模态的耦合惯量矩阵。 S 为攀爬机器人的位姿坐标, φ 为攀爬机器人的关节运动转角, ε 为模态坐标, D_d^* 为刚度模态矩阵, F, τ 分别为关节处的力和力矩, F_e 为作用于机器人的广义力。

2 模态实验与动力学耦合分析

2.1 不测力法模态试验

攀爬机器人内部含有驱动电机, 外部有离心风机等振动源, 对攀爬机器人进行模态试验获取攀爬机器人固有频率以防止共振对后续分析产生影响。如图 6 所示, 采用 DHDAS 信号测试分析系统对攀爬机器人进行不测力法模态试验。在测试过程中须在测点上依次布置加速度传感器, 结合设备的结构特点和精度要求, 所选的加速度传感器为带有内置放大器的压电式加速度传感器, 本实验选取 28 个测点进行测试, 通过振动幅度较大的负压泵作为攀爬机器人的振动激励源。

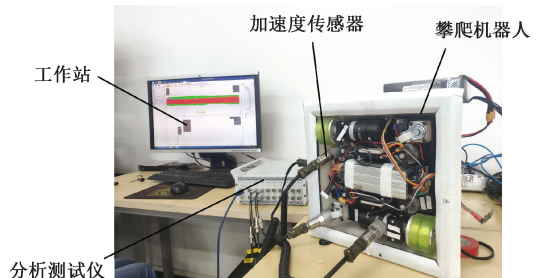


图 6 攀爬机器人不测力法模态试验

Fig. 6 Modal test of climbing robot without force measurement

通过不测力法模态试验得到攀爬机器人固有频率如表 1 所示。攀爬机器人驱动电机频率范围为 0~25 Hz, 离心风机频率为 600 Hz 与机器人系统前 6 阶固有频率不相同, 因此不会发生共振。

表 1 模态试验的各阶固有频率

Table 1 Natural frequencies of each order in the modal test

阶数	固有频率/Hz
1 阶	50.781
2 阶	101.563
3 阶	103.516
4 阶	129.883
5 阶	132.813
6 阶	152.344

2.2 攀爬机器人的振动与动力学耦合特性分析

含柔性吸附材料的攀爬机器人在竖直壁面上运动时存在着明显的动力学耦合问题,系统的耦合性使攀爬机器人的研究变得复杂,本节主要对系统振动特性进行分析,研究柔性体运动规律对机器人振动的影响。

攀爬机器人不受外力作用时,动力学方程式 (14) 第 1 行拆解为:

$$\mathbf{M}_\alpha \ddot{\mathbf{S}} + \mathbf{M}_{\alpha\beta} \ddot{\boldsymbol{\varphi}} + \mathbf{M}_{\alpha\gamma} \ddot{\boldsymbol{\varepsilon}} = \mathbf{0} \quad (15)$$

因此,攀爬机器人广义坐标速度可以表示为:

$$\ddot{\mathbf{S}} = -\mathbf{M}_\alpha^{-1} \mathbf{M}_{\alpha\beta} \ddot{\boldsymbol{\varphi}} - \mathbf{M}_\alpha^{-1} \mathbf{M}_{\alpha\gamma} \ddot{\boldsymbol{\varepsilon}} \quad (16)$$

上式重新表达为:

$$\ddot{\mathbf{S}} = \mathbf{J}_{s\varphi} \ddot{\boldsymbol{\varphi}} + \mathbf{J}_{s\varepsilon} \ddot{\boldsymbol{\varepsilon}} \quad (17)$$

其中,矩阵 $\mathbf{J}_{s\varphi}$ 表示攀爬机器人关节运动与机器人位姿的动力学耦合矩阵,矩阵 $\mathbf{J}_{s\varepsilon}$ 表示攀爬机器人柔性吸附材料振动和攀爬机器人位姿的动力学耦合矩阵。

机器人真空腔绝对速度 $\mathbf{v}_e$ 为:

$$\begin{cases} \mathbf{v}_e = \mathbf{J}_{e\varphi} \ddot{\boldsymbol{\varphi}} + \mathbf{J}_{e\varepsilon} \ddot{\boldsymbol{\varepsilon}} \\ \mathbf{J}_{e\varphi} = \mathbf{D}_a^e \mathbf{L}_v (\mathbf{G}_S \mathbf{J}_{S\varphi} + \mathbf{G}_\varphi) \\ \mathbf{J}_{e\varepsilon} = \mathbf{D}_a^e \mathbf{L}_v (\mathbf{G}_S \mathbf{J}_{S\varepsilon} + \mathbf{G}_\varepsilon) \end{cases} \quad (18)$$

其中, $\mathbf{J}_{e\varphi}$ 为攀爬机器人关节运动到真空腔运动的动力学耦合矩阵, $\mathbf{J}_{e\varepsilon}$ 为柔性吸附材料振动到真空腔运动的动力学耦合矩阵, $\mathbf{G}_S$ 为机器人位姿坐标到系统广义速度的递推矩阵, $\mathbf{G}_\varphi$ 为机器人关节运动到系统广义速度的递

推矩阵, $\mathbf{G}_\varepsilon$ 为模态坐标速度到系统广义速度的递推矩阵, $\mathbf{D}_a^e$ 为真空腔位形速度向绝对速度的转换矩阵。

本节以 $\mathbf{J}_{e\varepsilon}$ 为例介绍代表动力学耦合程度的耦合因子。当不考虑攀爬机器人关节运动时:

$$\mathbf{v}_e = \mathbf{J}_{e\varepsilon} \ddot{\boldsymbol{\varepsilon}} \quad (19)$$

$$\frac{\|\mathbf{v}_e\|}{\ddot{\boldsymbol{\varepsilon}}} = \frac{\langle \mathbf{J}_{e\varepsilon} \ddot{\boldsymbol{\varepsilon}}, \mathbf{J}_{e\varepsilon} \ddot{\boldsymbol{\varepsilon}} \rangle^{\frac{1}{2}}}{\langle \ddot{\boldsymbol{\varepsilon}}, \ddot{\boldsymbol{\varepsilon}} \rangle^{\frac{1}{2}}} = \sqrt{\frac{\ddot{\boldsymbol{\varepsilon}}^T \mathbf{J}_{e\varepsilon}^T \mathbf{J}_{e\varepsilon} \ddot{\boldsymbol{\varepsilon}}}{\ddot{\boldsymbol{\varepsilon}}^T \ddot{\boldsymbol{\varepsilon}}}} \quad (20)$$

将耦合程度转化为对 $\mathbf{J}_{e\varepsilon}^T \mathbf{J}_{e\varepsilon}$ 特征值的求解。

针对不满秩的情况进行奇异值分解得到:

$$\mathbf{J}_{e\varepsilon} = \mathbf{U} \begin{bmatrix} \Sigma & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} \end{bmatrix} \mathbf{V}^H \quad (21)$$

其中, $\mathbf{J}_{e\varepsilon}$ 为 $m \times n$ 阶矩阵,且 $\text{rank}(\mathbf{J}_{e\varepsilon}) = r$, $\mathbf{U}$ 、 $\mathbf{V}$ 分别为 m 阶、 n 阶酉阵, $\Sigma = \text{diag}(s_1, \dots, s_r)$, $s_i \neq 0$ 。其中, s_i 为耦合矩阵 $\mathbf{J}_{e\varepsilon}$ 的奇异值。

定义最大奇异值为 $s_{e\varepsilon}$ 即攀爬机器人柔性吸附材料振动与真空腔运动的耦合因子,表示柔性吸附材料振动与真空腔运动耦合程度的大小。同理, $s_{e\varphi}$ 表示攀爬机器人关节运动与真空腔运动耦合程度的大小。本文通过调整相同位移量下的运动时间、吸附材料弹性模量、攀爬机器人刚性结构质量来验证耦合程度变化。为了研究攀爬机器人的振动与动力学耦合特性,本文借助有限元仿真软件 Ansys 与动力学仿真软件 Adams 对攀爬机器人进行联合仿真。

攀爬机器人在差速驱动下进行弧线运动,运行轨迹为一半圆弧线,0~5 s 内攀爬机器人姿态与吸附材料受力情况如图 7 所示。攀爬机器人仿真参数如表 2 所示,机器人先加速到 $v_a = v_{a1}$ 加速时间为 t_{acc} ,然后以 v_{a1} 的速度匀速转动 t_{con} s,最后经过 t_{dec} s 减速到 0。在固定位移量不变的情况下,改变加速阶段、匀速阶段、减速阶段的时间占比可以在一定程度上控制攀爬机器人的振动。对加速阶段 1 s 匀速阶段 2.5 s 减速阶段 1.5 s 的振动情况如图 8(a) 所示。将加速时间加长到 1.5 s 匀速阶段时间不变并且减速时间减少到 1 s 的振动情况如图 8(b) 所示。这样 5 s 内运动位移相同的情况下,攀爬机器人最大振幅下降约 35%。

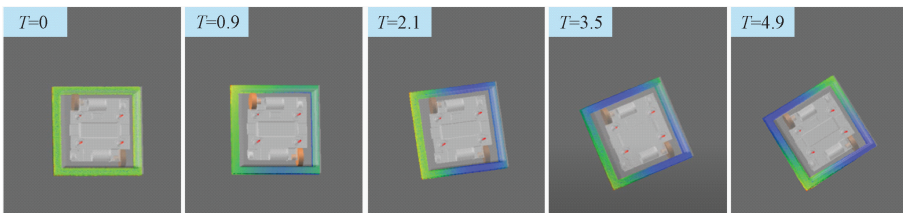


图 7 攀爬机器人联合仿真

Fig. 7 Co-simulation of climbing robot

针对柔性吸附材料的弹性模量与刚性结构质量分析攀爬机器人的耦合关系。在仿真环境中对耦合因子进行

分析验证,利用控制变量的思路在有限元软件中做好不同弹性模量的柔性吸附材料代入动力学仿真软件中,在

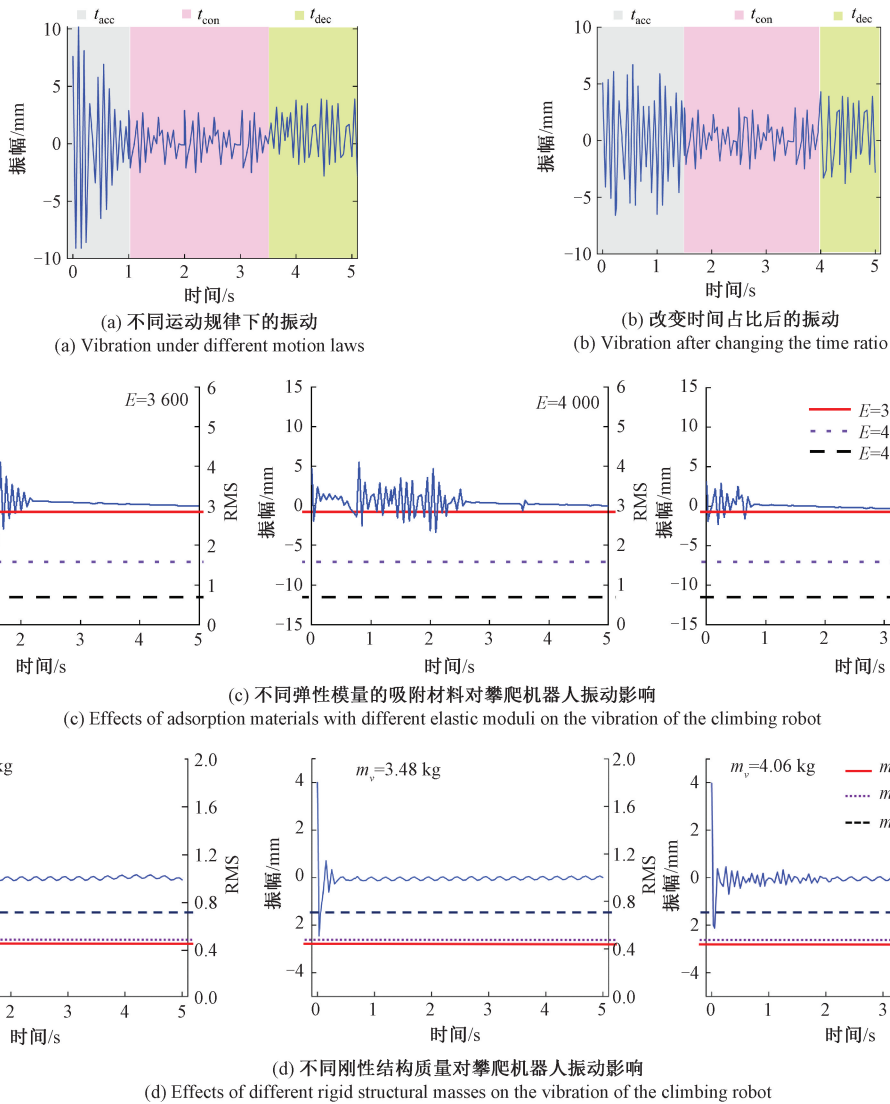


图 8 攀爬机器人振动特性

Fig. 8 Vibration characteristics of climbing robot

表 2 攀爬机器人仿真结构参数

Table 2 Structural parameters of climbing robot simulation

结构参数	数值
真空腔质量 m_1/kg	0.82
底盘质量 m_2/kg	1.93
柔性吸附材料质量 m_3/kg	0.081
吸附材料弹性模量 E/kPa	3 600
吸附材料泊松比	0.51
摩擦系数	0.28
真空腔惯性矩阵 $I_1/(\text{kg} \cdot \text{cm}^{-2})$	$\begin{bmatrix} 47.35 & 0 & 0 \\ 0 & 26.22 & 0 \\ 0 & 0 & 25.99 \end{bmatrix}$
底盘惯性矩阵 $I_2/(\text{kg} \cdot \text{cm}^{-2})$	$\begin{bmatrix} 6.51 & 0 & 0 \\ 0 & 4.06 & 0 \\ 0 & 0 & 2.79 \end{bmatrix}$

仅改变柔性吸附材料弹性模量下观察攀爬机器人腔体的振动情况。如图 8(c) 所示,选取 3 种弹性模量分别为 3 600、4 000、4 500 kPa 时,真空腔质心处的振幅发生明显变化,用代表振动能量的 RMS 值反应分别为 2.952、1.620、0.675,最大振幅下降 73%。这表面在一定范围内随着柔性吸附材料弹性模量的增加,动力学耦合因子 s_{ee} 减小。

通过在动力学仿真软件中改变材料密度进而改变真空腔刚性质量,从而研究刚性质量对耦合程度的影响。根据图 8(d)可知,仿真使用 4 500 kPa 弹性模量的吸附材料,在 3 种刚性结构质量为 2.9、3.48、4.06 kg 的情况下,真空腔质心的振幅发生变化,RMS 值分别为 0.705、0.517、0.510。则可知在一定的刚性结构质量增加的情况下,攀爬机器人刚柔耦合程度下降。

3 攀爬机器人样机实验

3.1 动力学振动特性实验验证

用 DHDAS 信号测试分析系统对攀爬机器人真空腔上表面进行振动测试。测试过程中在真空腔上表面几何中心布置测点,样机实验如图 9 所示。

调整柔性吸附材料中低摩擦材料、纳米粘结材料、缓冲材料的占比调整吸附材料的弹性模量。将柔性吸附材料的弹性模量分别调整至 $E_1=3\ 600\ \text{kPa}$, $E_2=4\ 000\ \text{kPa}$, $E_3=4\ 500\ \text{kPa}$ 后,分别测试 3 种弹性模量下真空腔体几何中心处的振动如图 10(a) 所示,将刚性结构质量分别调整至 $m_{v1}=2.9\ \text{kg}$, $m_{v2}=3.48\ \text{kg}$, $m_{v3}=4.06\ \text{kg}$ 后,分别测试 3 种刚性结构质量下真空腔体几何中心处的振动如

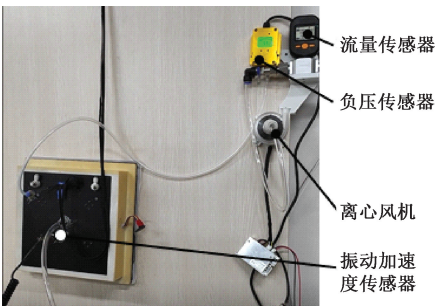
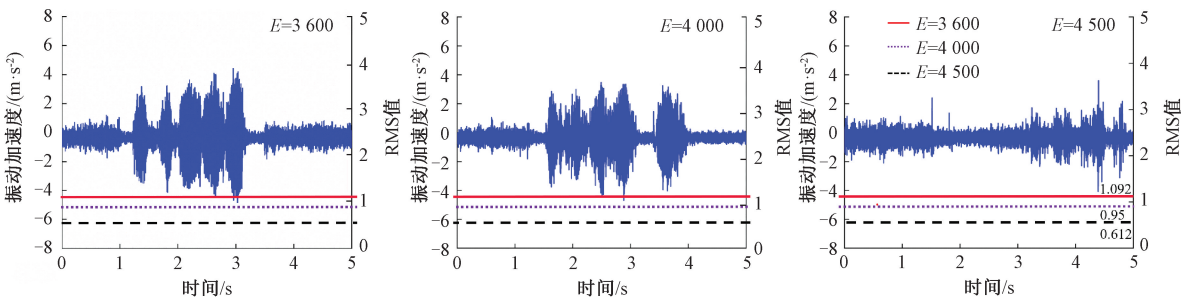
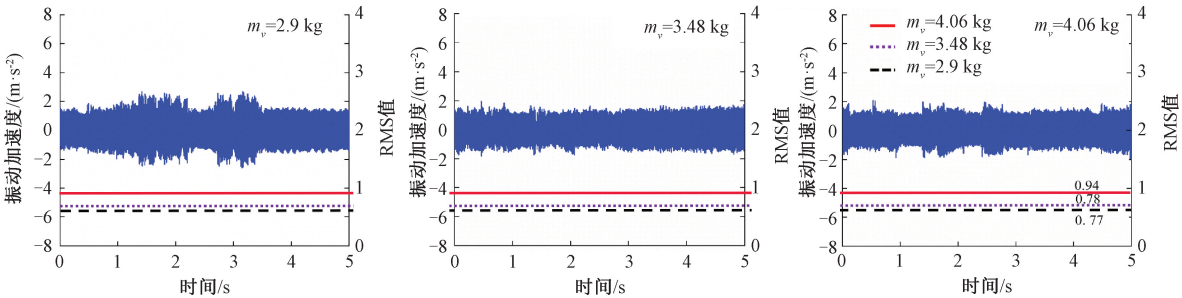


图 9 攀爬机器人样机试验
Fig. 9 Climbing robot prototype test

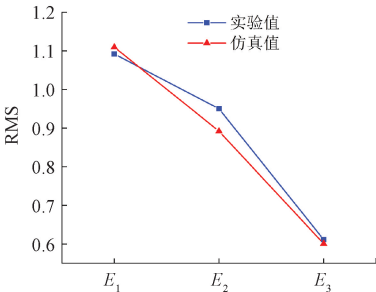
图 10(b) 所示。为了验证前文中负压移动模块柔性吸附材料与刚性结构的耦合分析,对图 8(c), (d) 仿真结果中的振幅经过两次求导得到的振动加速度与图 10(a), (b)



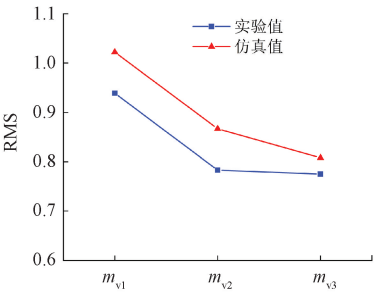
(a) 不同弹性模量的吸附材料对攀爬机器人振动影响
(a) Effects of adsorption materials with different elastic moduli on the vibration of the climbing robot



(b) 不同刚性结构质量对攀爬机器人振动影响
(b) Influence of different rigid structural masses on the vibration of the climbing robot



(c) 吸附材料弹性模量对振动影响实验与仿真对比
(c) Comparison of experiment and simulation of the influence of elastic modulus of adsorbent material on vibration



(d) 刚性结构质量对振动影响实验与仿真对比
(d) Comparison of experiment and simulation on the effect of rigid structure mass on vibration

图 10 攀爬机器人振动特性分析

Fig. 10 Analysis of Vibration Characteristics of Climbing Robot

进行对比分析,将实验值与仿真值中振动加速度的 RMS 值进行对比分析如图 10(c),(d)所示,由图可得仿真与实验系统的振动表现虽然有误差,但是 RMS 值的变化趋势基本一致。

3.2 攀爬机器人稳定性分析

为了验证带有柔性吸附材料的攀爬机器人具备一定的工程应用能力,对攀爬机器人的负载能力进行测试。图 11 为攀爬机器人不同真空度下竖直木材壁面的动态负载与静态负载,真空度为 3 kPa 时,攀爬机器人动态负载与静态负载的中位线分别为 39.454,34.205 N。在一定真空度范围内,随着真空度的增加静态负载与动态负载均增加。当真空度升至 7 kPa 时,动态负载与静态负载的中位线分别为 81.584,76.833 N。而真空度达到 10 kPa 的时候,动态负载与静态负载的中位线分别为 50.062,105.493 N。由于负压产生的摩擦阻力增加,因此静态负载的增加却伴随着动态负载的下降。因此,真空度的控制决策应该依靠应用环境的变化而变化,高真空度适应静态高负载的场合,低真空度适应高速低载场合。攀爬机器人最大有效静态负载为 107.476 N,负载自重比为 2.985。最大有效动态负载为 85.231 N,负载自重比为 2.368。

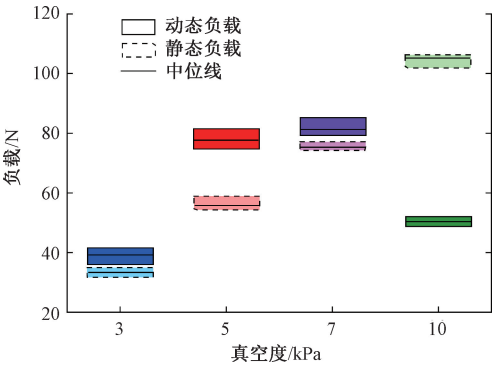


图 11 攀爬机器人的动态负载与静态负载

Fig. 11 Dynamic load and static load of climbing robot

攀爬机器人壁面运动时真空腔体内形成负压环境,吸附材料挤压变形,机器人机身抖动等均会造成不同程度的气体泄漏,从而导致机器人真空度与流量变化,因此真空度与流量是衡量机器人运动稳定性的重要参数。对攀爬机器人壁面运动的吸附阶段、低匀速运动与加速运动进行真空度与流量测试。如图 12 所示为不同运动阶段下真空度与流量变化,线条表示平均值,误差棒表示标准差,吸附阶段随着攀爬机器人与壁面接触程度增加,真空度上升而流量下降,低匀速阶段真空度与流量均为比较稳定的阶段,而加速阶段真空度会有所下降而流量有一定程度的上升,这是因为腔体振动增加并且加速造成腔体与壁面的密封性降低。

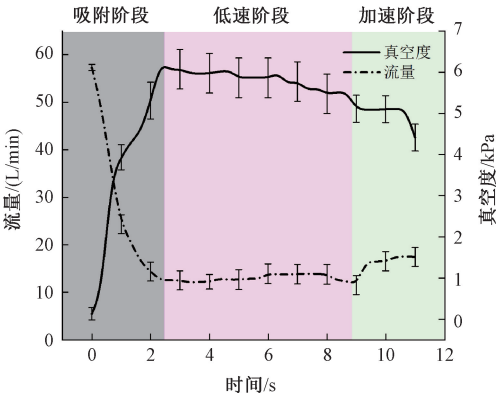


图 12 攀爬机器人真空度与流量变化

Fig. 12 Change of vacuum degree and flow rate of climbing robot

4 结 论

设计制作了带有柔性吸附材料的攀爬机器人,基于刚柔耦合的原理利用拉格朗日动力学方程对攀爬机器人完成了动力学建模。推导了反应攀爬机器人动力学耦合程度的数学模型并通过有限元软件和动力学软件的联合仿真,分析得到相同时间内运行相同位移的情况下,通过改变加速时间与减速时间的占比可以有效的减小攀爬机器人的振动幅值。通过观察振动响应,得到柔性吸附材料弹性模量增加与刚性结构质量增加降低吸附材料与攀爬机器人刚性部分动力学耦合程度。对攀爬机器人进行样机实验,测试了攀爬机器人不同真空度下的动态负载与静态负载最大有效负载自重比为 2.985。从真空度与流量的角度分析了攀爬机器人稳定性与不同壁面适应性,为攀爬机器人的驱动控制与工程应用奠定基础。研究中忽略了吸附材料变形与机器移动对密封性的影响,造成结果与实际有一定的误差。在后续的工作中,考虑对耦合模型进行改进优化,使耦合模型更加贴合实际。

参考文献

[1] LIAO B, ZANG H, CHEN M, et al. Soft rod-climbing robot inspired by winding locomotion of snake[J]. Soft Robotics, 2020, 7(4): 500-511.

[2] SHAH D S, POWERS J P, TILTON L G, et al. A soft robot that adapts to environments through shape change[J]. Nature Machine Intelligence, 2020, 3(1): 51-59.

[3] 贾云辉,张志宏,何宏. 基于 ARM-Linux 的爬壁机器人控制器研究[J]. 电子测量与仪器学报, 2017, 31(9): 1459-1466.

JIA Y H, ZHANG ZH H, HE H. Research on the controller of wall-climbing robot based on

- ARM-Linux [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2017, 31(9): 1459-1466.
- [4] LIU Y, WANG L, NIU F, et al. A track-type inverted climbing robot with Bio-inspired spiny grippers [J]. Journal of Bionic Engineering, 2020, 17(5): 920-931.
- [5] 俞志伟, 宫俊, 张昊, 等. 基于三维力反馈的仿壁虎机器人单腿运动控制[J]. 仪器仪表学报, 2011, 32(12): 2674-2680.
- YU ZH W, GONG J, ZHANG H, et al. Single-leg motion control of a gecko-like robot based on three-dimensional force feedback [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2011, 32(12): 2674-2680.
- [6] ZHU J, SUN D, TSO S K. Development of a tracked climbing robot [J]. Journal of Intelligent and Robotic Systems, 2002, 35(4): 427-443.
- [7] KIM H, KIM D, YANG H, et al. Development of a wall-climbing robot using a tracked wheel mechanism [J]. Journal of Mechanical Science and Technology, 2008, 22(8): 1490-1498.
- [8] WU X, WANG D, ZHAO A, et al. A wall-climbing robot with biomimetic adhesive pedrail [M]. New York: Advanced Mechatronics and MEMS Devices, 2013: 179-191.
- [9] HUANG J, LIU Y, YANG Y, et al. Electrically programmable adhesive hydrogels for climbing robots [J]. Science Robotics, 2021, 6(53): 1-11.
- [10] LIU Y, LIM B, LEE J W, et al. Steerable dry-adhesive linkage-type wall-climbing robot [J]. Mechanism and Machine Theory, 2020, 153: 1-16.
- [11] HE B, WANG Z, LI M, et al. Wet adhesion inspired bionic climbing robot [J]. IEEE/Asme Transactions on Mechatronics, 2013, 19(1): 312-320.
- [12] DANIEL S, BERNS K. Development and applications of a simulation framework for a wall-climbing robot [C]. IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, Piscataway, USA: IEEE, 2013: 2321-2326.
- [13] LONGO D, MUSCATO G. The Alicia 3 climbing robot: A threemodule robot for automatic wall inspection [J]. IEEE Robotics and Automation Magazine, 2006, 13(1): 42-50.
- [14] XU F, QUAN J, LU Y, et al. Modelling of a soft multi-chambered climbing robot and experiments [J]. Smart Materials and Structures, 2021, 30(3): 1-18.
- [15] 郝瑞, 周昊, 彭倍. 存在初始位移的 MEMS 振动台的振动特性分析[J]. 仪器仪表学报, 2021, 42(11): 71-78.
- HAO R, ZHOU W, PENG B. Analysis of vibration characteristics of MEMS shaking table with initial displacement [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2021, 42(11): 71-78.
- [16] HUANG X Q, CHEN L. Anti-dead-zone integral sliding control and active vibration suppression of a free-floating space robot with elastic base and flexible links [J]. Journal of Beijing Institute of Technology, 2020, 29(1): 120-128.
- [17] ZHANG W, DU Q, ZHAO Z, et al. Resonance suppression strategy for humanoid robot arm [J]. Journal of Beijing Institute of Technology, 2020, 29(4): 456-465.
- [18] ZHANG Q, ZHAO X, LIU L, et al. Dynamics analysis of spatial parallel robot with rigid and flexible links [J]. Mathematical Biosciences and Engineering, 2020, 17(6): 7101-7129.
- [19] ZHANG Z Q, WANG L, LIAO J, et al. Rigid-flexible coupling dynamic modeling and performance analysis of a bioinspired jumping robot with a six-bar leg mechanism [J]. Journal of Mechanical Science and Technology, 2021, 35(8): 3675-3691.
- [20] LU X R, GUO D H, CHEN Y. Design and optimization of the magnetic adsorption mechanism of a pipeline-climbing robot [J]. Journal of Mechanical Science and Technology, 2021, 35(11): 5161-5171.
- [21] ETO H, ASADA H. Development of a wheeled wall-climbing robot with a shape-adaptive magnetic adhesion mechanism [C]. 2020 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA), 2020: 9329-9335.

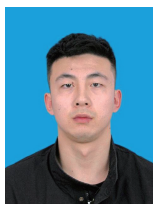
作者简介



王学军, 1996 年于昆明理工大学获得学士学位, 2004 年于昆明理工大学获得硕士学位, 2017 年于昆明理工大学获得博士学位, 现为昆明理工大学副教授, 主要研究方向: 机械结构与系统动力学、机器人技术及应用。

E-mail: 69509143@qq.com

Wang Xuejun received his B. Sc. degree, M. Sc. degree, and Ph. D. degree all from Kunming University of Science and Technology in 1996, 2004, and 2017, respectively. He is currently an associate professor at Kunming University of Science and Technology. His main research interests are mechanical structures and systems dynamics, Robotics and Applications.



张帆(通信作者), 2018 年于长沙理工大学获得学士学位, 现为昆明理工大学在读研究生, 主要研究方向为机器人动力学。

E-mail: 1013928897@qq.com

Zhang Fan (Corresponding author) received his B. Sc. degree from Changsha University of Science and Technology in 2018. He is currently a master student at Kunming University of Science and Technology. His main research direction is robot dynamics.