

一种新型玻璃幕墙清洗机器人设计*

高 鹏¹, 龚希祚¹, 臧传飞², 李思维¹

1. 江西科技学院智能工程学院; 2. 吉林大学通信工程学院

摘 要 | 根据真空负压吸附原理设计一种高楼玻璃幕墙清洗机器人。该机器人主要由吸附、移动及清洗 3 大模块及控制系统组成。吸附模块采用多吸盘真空吸附方式, 具有较强的适应性; 移动模块采用真空吸盘履带轮结构设计, 具有良好的通过性及稳定性; 清洗模块采用一种污水过滤循环装置, 能够减轻机器人本体载荷。控制系统由用户上位机和 STM32 芯片下位机组成, 通过 4G 网络远程通信。根据机器人工作静力状态建立受力数学模型, 分析机器人抗倾覆力矩和附着力矩, 结果表明, 当抗倾覆特征角小于壁面倾斜角度时, 机器人不会发生倾翻。该机器人具有较强的自主清洗能力, 可以代替传统人工作业, 为机器人在玻璃幕墙清洗的实际应用中提供了参考。

关键词: 机器人; 负压吸附; 清洗; 受力分析; 倾覆力矩

在现代化的摩天大楼建设中, 玻璃成为高楼幕墙最受追捧的原材料之一, 不仅能够减小上层建筑的质量, 还可以提高室内通透性。然而恶劣的天气易造成玻璃幕墙沾满灰尘, 不仅影响室内的采光, 而且极大的影响了城市整体形象, 因此我国主要城市也将玻璃幕墙清洗纳入政策管控范围^[1-2]。目前玻璃幕墙清洗还主要依赖于传统人工作业, 效率低、成本高, 且存在着极大的安全隐患。为解决这一难题, 玻璃幕墙清洗机器人成为全球部分高校及科研机构的研究热点^[3-5]。

玻璃幕墙清洗机器人作为一种具有爬壁功能的清洗装置, 能够代替人工高空极限作业, 在世界范围得到快速发展, 日本及欧美国家在该领域取得成果较为显著^[6-7]。德

国马格堡的弗劳恩霍费尔自动控制与操作研究所研制了一种清洗建筑物玻璃的自动系统, 该机器人悬挂于墙壁轨道上, 可沿轨道上下左右运动从而实现对整块玻璃墙面的清洗^[8]。日本清水建设株式会社研制的壁面移动玻璃幕墙清洗机器人, 采用真空气体吸附驱动, 具有一定越障(如窗框)能力, 整体结构紧凑、重量轻便, 是最早的壁面清洗机器人之一^[9]。北京航空航天大学研制的一种新型擦窗机器人, 使用涵道风扇产生的推力使其附着于玻璃壁面, 装有摄像头及无线传输系统, 能模仿人工清洗玻璃墙面。2010年, 国内首款擦窗机器人“窗宝”在波兰家居服务机器人博览会上展出, 采用磁力吸附在玻璃窗上沿 Z 字形擦拭。2016年, 德国研发的一种家用型擦窗机器

“HOBOT- 268 玻妞”,可一键启动自动擦洗,真正实现了全智能高效的擦窗过程^[9]。

综上,已出现的玻璃清洗机器人主要是针对于家用小型窗户的擦拭,对于摩天大楼玻璃幕墙的清洗机器人仍处于理论研究状态。本文针对于未来高楼玻璃幕墙的发展趋势及市场需求,基于负压吸附原理与履带式链轮驱动的方式,设计了一种可在玻璃墙面上吸附移动的玻璃幕墙清洗机器人。

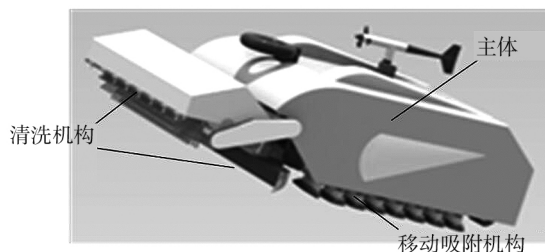


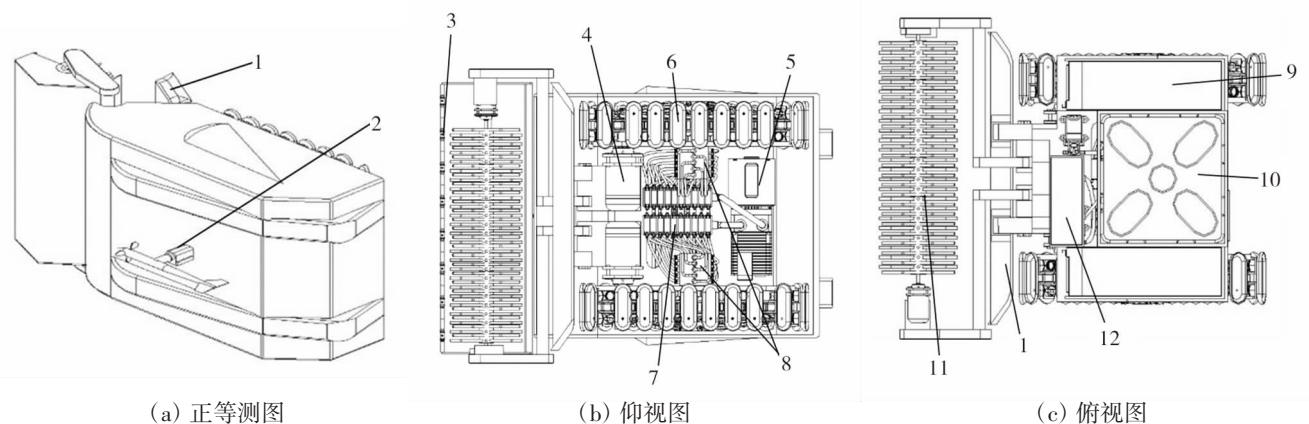
图1 清洗机器人整体效果图

1 总体设计

高空玻璃幕墙清洗机器人主要由机械结构与控制系统组成,整体效果图见图1。机械结构包括机器人主体、移动及吸附机构、清洗机构等。控制系统由上位机 Android

客户端程序及下位机 STM32 单片机组成。

机器人整体结构采用模块化设计思想,如图2所示,主要由吸附装置、移动装置、清洗装置、收集过滤装置4部分组成。



1. 刮板 2. 风速传感器 3. 喷嘴 4. 电机 5. 真空机 6. 真空吸盘 7. 气路分配电磁阀 8. 气滑环 9. 电池电源
10. 水箱 11. 滚刷 12. 污水过滤箱

图2 清洗机器人整体结构

机器人吸附装置采用真空吸盘负压吸附,驱动方式采用履带式驱动,能有效增大吸盘与玻璃墙面的吸附面积,提高机器人在玻璃墙面上的吸附能力。吸附装置具体结构包括伺服电机、驱动链轮、真空吸盘、真空机、多气路分配电磁阀、气滑环以及连接气路所用软管。清洗装置采用滚刷清洗,同时在滚刷后方设置刮水板,可以刮去残留的液滴使得玻璃幕墙表面更洁净。为减轻机器人的自身载荷,机器人内部设有污水回收过滤循环系统,可以在携带少量清洁液的情况下清洗更大范围玻璃表面。机器人还带有风速检测装置,能实时监测工作环境风速,控制系统能够判断实时风速并计算风阻是否利于机器人继续作业,并将工作信息反馈

至操作用户 UI 界面。

2 主要模块设计

2.1 控制系统

玻璃幕墙清洗机器人的控制系统基于无线网络采用 Android 操作系统手机上位机客户端远程控制和下位机 STM32 芯片控制,上下位机之间通过 4G 网络建立数据传输通信交流。控制系统框图如图3所示。

在上位机手机界面可选择机器人清洗工作模式,包括自动清洗模式与手动介入控制清洗模式,上位机还可以控制规划调节机器人清洗速度,包括低、中、高速。上位机

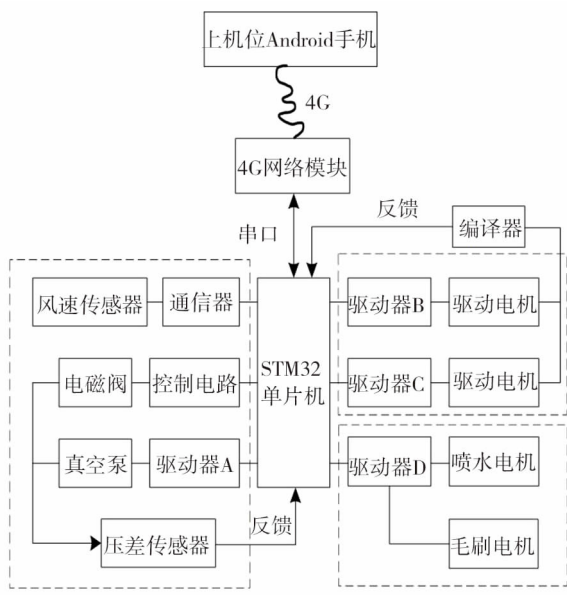


图3 控制系统框图

用户通过 Android 手机界面输入控制指令,指令通过网络传输至无线接收模块,网络模块解析指令数据,通过串口与单片机相连实现数据双向传输。下位机接收信息,控制板根据上位机设定的清洗模式及判断调节相关子程序,使机器人各模块调节至最佳工作模式。

下位机采用 STM32 单片机主控芯片。STM32 具有杰出的功耗控制及众多外设,其自带的 USB 接口可对数据进行快速传输,其工作频率为 72 MHz,内置高速存储器^[1],满足本机器人程序的开发需求。机器人开始工作时,下位机控制板开始接收上位机控制信号,调节真空泵、伺服电机及其他模块工作状态,整个工作过程中循环检测各模块工作状态,并及时向客户端发送工作状态信号,直至工作结束整个检测循环则结束,工作控制流程如图 4 所示。

2.2 清洗及过滤循环系统设计

为保证机器人的吸附安全,清洗系统设计应遵循质量轻、结构简单的原则,因此在内部设计污水过滤循环系

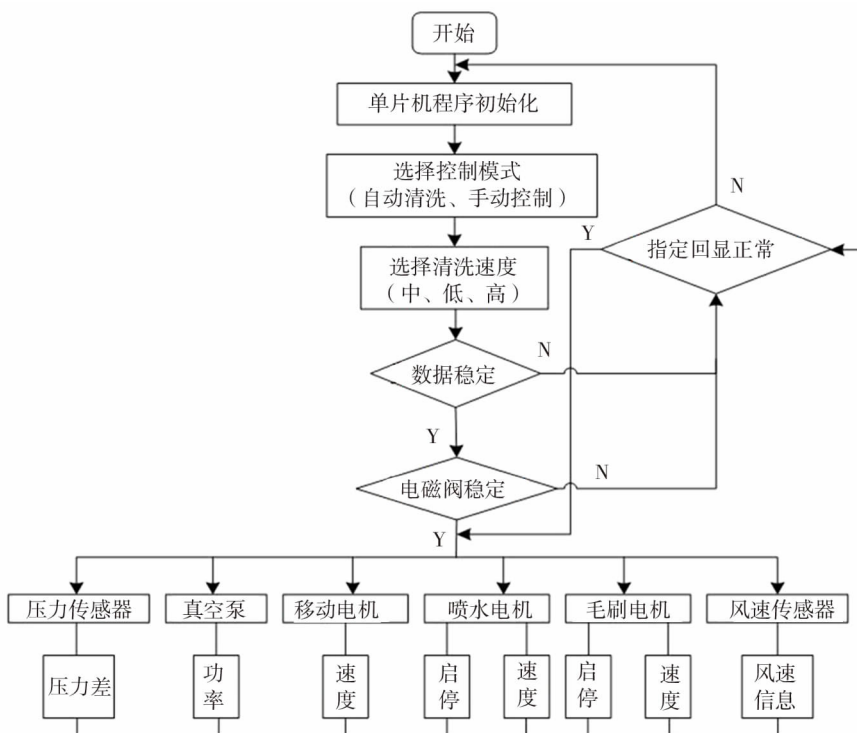
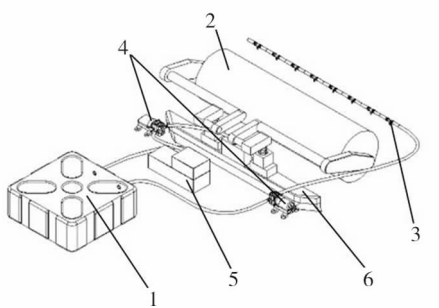


图4 工作过程检测循环流程

统,系统包括水箱、滚刷、喷嘴、水泵、污水过滤箱、刮板 5 部分,其采用雾化水洗、滚刷擦洗及带有硅胶条的刮板汇集清洗污水,实现污水回收过滤循环利用,如图 5 所示。水箱中

清洗液可溶解玻璃墙面大部分污垢,雾化润湿的玻璃幕墙通过滚刷的机械摩擦去除硬质污垢达到清洗效果。同时刮板刮除玻璃面残留的清洁污水,将清洗污水汇流至刮板中



1. 水箱 2. 滚刷 3. 喷嘴 4. 水泵 5. 污水过滤箱 6. 刮板

图5 清洗过滤系统

央,通过微型泵回收至过滤箱中过滤,即清洗过程中产生的污水回收过滤净化后再循环使用,其原理如图6所示,此系统具有节水、低噪、环保、对玻璃无损伤的优点。

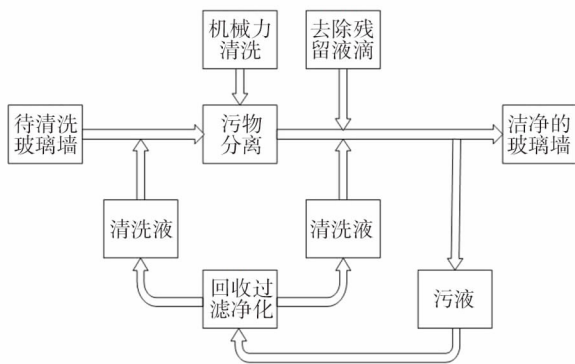


图6 清洗循环系统实现原理

2.3 吸附移动机构设计

吸附真空采用气体转移式真空泵工作抽取,能够瞬时产生真空,并依次通过软管、多气路分配电磁阀、气滑环使得接触玻璃墙面的吸盘处于真空吸附状态。多气路分配电磁阀对真空泵输出的真空气路进行分配,能够使未接触或将脱离墙面的吸盘处于正常气压状态,利于真空吸盘产生稳定压力差。

移动模块采用带有真空吸盘链轮移动,选用2个12V直流伺服电机作为动力来源,伺服电机与驱动齿轮刚性连接带动链轮转动。整体构架如图7所示,主要由驱动链轮、驱动齿轮、真空吸盘、张紧轮,及张紧架等部件组成。在工作时,真空泵将吸盘抽真空处于吸附状态,同时伺服电机驱动链轮实现机器人的移动。真空吸盘固定于

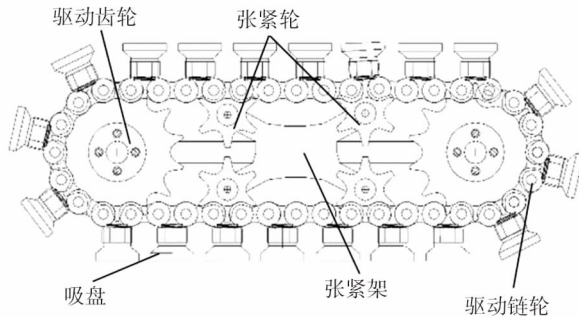


图7 驱动链轮总成

驱动链轮上,成排的真空吸盘可以有效增大吸附力,保证吸附安全。在机器人移动的过程中,与玻璃墙面接触的真空吸盘紧密吸附,驱动链轮对吸盘施加一个切向作用力,这个作用力是推动清机器人的驱动力。当驱动力足以克服自身重力时,清洁机器人就会向前移动。

2.4 移动清洗方案设计

机器人在实际操作时,配备安全绳辅助装置,由带有平滑轨道的吊机装置辅助完成整个清洗过程,如图8所示。

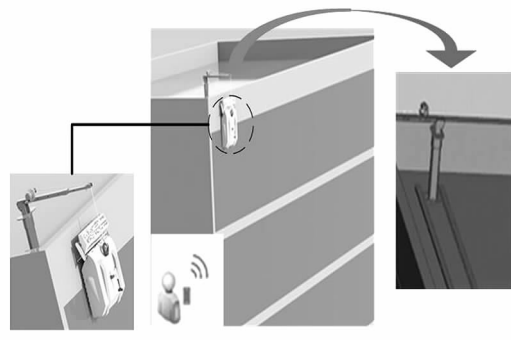


图8 机器人清洗方案图

安全绳索绑在机器人头部,另一端与吊机连接,楼顶的电机绳索的收放速度与机器人移动速度同步。吊机作为安全辅助装置,防止机器人在工作时遇突发状况坠落。在工作时,机器人在玻璃墙面自下而上进行清洗作业,在完成一列玻璃清洗后,根据用户预先设定的程序,吊机在固定的平滑轨道基座上向左或向右滑动适当距离,并将机器人通过吊机绳索重新返回地面进行下一列墙面的清洗,依次循环。这种自下而上的清洗方式,可使清洗污水在重力作用下流入刮板汇集,有利于残留污水的回收;同

时机器人向上移动经过的是已经被清洗的洁净壁面,使吸附性更加可靠稳定,提高了机器人的清洗效率和工作安全性。

3 清洗机器人受力及稳定性分析

3.1 履带轮受力分析

高空玻璃幕墙清洗机器人在垂直玻璃幕墙上移动时,主要受到自身重力、各吸盘吸附力、法相载荷、静摩擦力及侧向风阻力共同作用^[2]。要使得机器人在墙面上安全吸附并移动,吸盘所产生的摩擦力需大于机器人自重及机器人其他部分与玻璃幕墙接触所产生的滑动摩擦力之和,除此之外机器人应具备足够的抗翻倒能力。

机器人吸附移动机构的真空吸盘与玻璃墙面是局部柔性接触,总体来看,局部柔性接触对机器人整体的受力影响很小^[3],为简化机器人受力分析模型,假设机器人吸盘及机器人为钢体。清洗机器人的钢体受力结构可简化为图9所示平面图。建立描述机器人运动的坐标系 $o-xyz$, x 轴为平行玻璃墙面方向, y 轴为机器人的前进方向, z 轴为玻璃墙面法线方向, θ 为玻璃墙面与水平面夹角(大部分玻璃墙面 $\theta=0^\circ$), L 为履带轮吸盘前端与后端距离, h 为机器人重心与墙面的法向距离, G 为机器人自身

重力, β 为机器人壁面接触下支点与重心的连线和工作法平面的夹角,称为抗倾覆特征角。根据摩擦理论可知,当外力作用角小于摩擦力作用角时,无论外力多大,机器人都处于安全吸附状态。为保证机器人在玻璃墙面上不产生滑移,需要真空吸盘产生的摩擦力大于机器人自重及玻璃相面方向产生的分力,即 $F_f \geq G \sin \theta$ 。在平衡状态下,根据图中的受力分析可建立平衡方程(1)。

$$\begin{cases} \sum X = \sum F_i - F_w = 0 \\ \sum Y = \sum F_i - G \sin \theta = 0 \\ \sum Z = \sum N_i - \sum P_i - G \cos \theta = 0 \end{cases} \quad (1)$$

式中: F_i 为机器人吸盘所产生的摩擦力; F_w 为机器人所受到的侧向风阻力; N_i 为吸盘等效吸附力; P_i 为吸盘接触的反力。

3.2 倾覆力矩分析

为保证机器人不发生纵向翻转倾覆,需要吸盘产生的吸附力矩来平衡倾覆力矩。清洗机器人的履带链节之间依靠铰链连接,并不传递力矩,抗倾覆力矩 M 是履带与玻璃墙面接触最末端支点前面的力系所提供,则用 $M_{01}(G)$ 表示倾覆力矩大小, $M_{02}(G)$ 表示吸附力矩大小。吸附力矩越大倾覆力矩越小,表明抗倾翻能力越强,附着性越好。当机器人的结构固定时,机器人的倾覆力矩也随之确定。如图9,根据力学模型及倾覆力矩定律可得出倾覆力矩公式(2):

$$\sum M_{01} = 0.5 \sqrt{L^2 + 4h^2} G \sin(\theta - \beta) \quad (2)$$

由倾覆力矩公式(2)分析可知,当 $\theta \leq \beta$, 机器人没有翻倒趋势,不存在倾覆力矩;当 $\theta > \beta$ 时,倾覆力矩存在。故倾覆力矩可表示为:

$$\begin{cases} \sum M_{01} = 0.5 \sqrt{L^2 + 4h^2} G \sin(\theta - \beta) & \theta > \beta \\ \sum M_{01} = 0 & \theta \leq \beta \end{cases} \quad (3)$$

由公式(3)可知,当 $\theta = \beta$, 为倾覆力矩存在的临界角度, β 值大小由机器人本身结构所确定,当抗倾覆特征角小于壁面倾斜角度时,机器人不会发生倾翻。为保证机器人的抗倾翻能力应尽量降低机器人重心,分析可知抗倾覆临界特征角为:

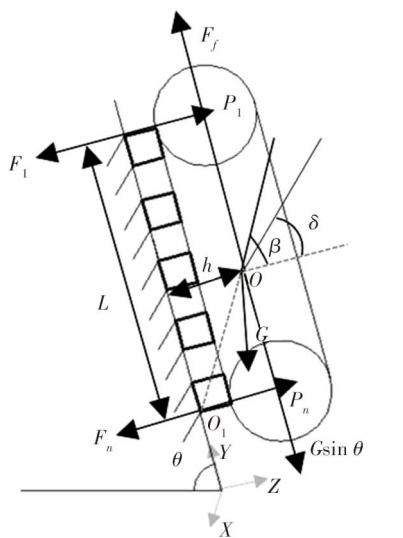


图9 机器人受力分析图

$$\theta = \beta = \arctan\left(\frac{l}{2h}\right) \quad (4)$$

3.3 附着力矩分析

机器人的抗倾覆能力基本由吸附力矩所提供,附着力矩取决于机器人的附着力系及机器人的结构特点。以 O_1 下支点为参考,则机器人的整体附着力系为:

$$\Sigma N_0 = \Sigma_{x=1}^n N_i - P_i \quad (5)$$

整体附着力矩为:

$$\Sigma M_{02}(G) = \frac{L}{2} \Sigma_{x=1}^n N_i - P_i \quad (6)$$

3.4 吸附稳定性分析

通过上述分析可知,要保证机器人不发生倾翻,则需机器人本身重力沿壁面的分力小于履带轮所产生的摩擦力,或所产生的矢量合摩擦力系与重力方向的作用夹角 δ 小于壁面倾斜角度时,倾覆力矩小于附着力矩,即 $\Sigma M_{01} < \Sigma M_{02}$ 。结合公式(3)可知,机器人安全吸附的稳定性可表示为公式(7):

$$\begin{cases} \delta < \theta \text{ 或 } F_f = G \sin \theta \\ \theta \leq \beta \text{ 或 } \delta \leq \theta, M_{01}(G) < M_{02}(G) \end{cases} \quad (7)$$

当清洗机器人工作条件满足上述公式时,能够稳定地吸附在玻璃墙面。

4 结束语

本文针对玻璃幕墙的特性设计高空玻璃幕墙清洗机器人,对其总体结构及控制系统方案进行设计,并确定了机器人实际清洗方案及路径规划。最后对该机器人吸附能力及抗倾覆能力建立力学模型分析,确定了吸附稳定条件,对其他爬壁机器人力学研究有理论参考价值,对今后更高端智能清洗机器人的研究发展具有很好的借鉴及推动作用。

参考文献

- [1] 钱志源,付庄,刘仁强,等. 玻璃幕墙清洗机器人壁面适应能力分析[J]. 上海交通大学学报,2006(7):1157-1160,1165.
- [2] 杨小彪. 高层建筑清洗行业的现状与市场浅析 [J]. 洗净技术,2003(3):46-48.
- [3] 张海洪. 机器人壁面自动清洗系统的工程研究[D]. 上海:上海大学,2001.
- [4] 刘星. 高层玻璃幕墙清洗机器人设计与分析[D]. 青岛:山东科技大学,2017.
- [5] 张子博,刘荣,杨慧轩. 用于玻璃幕墙清洗的爬壁机器人的研制[J]. 自动化与仪表,2016,31(5):6-9,28.
- [6] 汪家斌,李丽荣,陈咏华,等. 壁面移动机器人吸附方式的研究现状与发展[J]. 机械,2012,39(1):1-5.
- [7] Kolhalkar N R, Patil S M. Wall Climbing Robots: A Review [J]. International Journal of Engineering and Innovative Technology, 2012, 1(5): 227-229.
- [8] 胡启宝. 多吸盘式玻璃幕墙清洗机器人本体设计[D]. 上海:上海交通大学,2007.
- [9] 田静眉. 真空吸附式壁面清洗机器人结构设计与研究[D]. 西安:西南交通大学,2013.
- [10] 王思佳,吴珊红,李雷. 爬壁机器人技术研究现状及展望 [J]. 科技风,2019(2):2.
- [11] 刘坤,宋戈,赵红波. 51 单片机 C 语言应用开发技术大全 [M]. 北京:人民邮电出版社,2008.
- [12] 马香峰. 机器人机构学[M]. 北京:机械工业出版社,1991.
- [13] Luk B L, White T S, Cooke D S, et al. Climbing Service Robot for Duct Inspection and Maintenance Applications in a Nuclear Reactor [J]. Proceedings of the 32nd International Symposium on Robotics, 2001: 19-21.