

DOI: 10.13973/j.cnki.robot.240042

变曲率立面自适应爬壁机器人结构的设计与分析

胡晓林, 郭润兰, 黄 华, 张存东

(兰州理工大学机电工程学院, 甘肃 兰州 730000)

摘要: 针对爬壁机器人在变曲率壁面作业时稳定性差和自适应能力不足等问题, 设计了一种自适应模块与机身相对独立的分离式结构爬壁机器人, 并研究它在壁面上的移动性能。首先根据机器人的壁面运动原理建立力学模型, 计算无滑移和无倾覆时纵/横移动方向切换、沿壁面移动和越障所需的吸附力, 并分析在周向曲面和径向曲面上纵向移动和横向移动时机身姿态的变化情况。然后通过永磁体装置的磁路设计和参数化仿真, 分析气隙间距和壁面厚度对吸附力的影响, 对机器人在不同曲面和不同运动模式下的吸附力进行仿真, 优化永磁体的设计。最后通过实验验证了爬壁机器人在不同变曲率壁面上的移动性能和自适应性能。结果表明, 所设计的爬壁机器人具有纵/横切换移动灵活、吸附稳定、变曲率壁面自适应能力强的特点, 最小可适应曲率为 0.46 m 的壁面, 且在 90° 壁面可承载 7.2 kg 的设备。

关键词: 爬壁机器人; 永磁吸附; 变曲率立面; 运动分析

Design and Analysis on an Adaptive Wall-climbing Robot Structure for Variable Curvature Facade

HU Xiaolin, GUO Runlan, HUANG Hua, ZHANG Cundong

(School of Mechanical and Electrical Engineering, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730000, China)

Abstract: To address issues such as weak stability and insufficient adaptability of wall-climbing robots working on variable curvature wall, a wall-climbing robot of separate structure that the adaptive module is relatively independent from the main body is designed, and its motion performance on walls is studied. Firstly, a mechanical model based on the movement principles of robot on a wall is established. The adsorption forces required for longitudinal/lateral direction switching, wall-climbing movement, and obstacle crossing without slipping or overturning are calculated. Additionally, the changes in the robot body posture during longitudinal and lateral movements on circumferential and radial curved surfaces are analyzed. Subsequently, the magnetic circuit design and parametric simulation of the permanent magnet device are performed to analyze the effects of air gap distance and wall thickness on the adsorption force. The adsorption forces of the robot on different curved surfaces and in various motion modes are simulated to optimize the design of the permanent magnet. Finally, experimental validation is performed to assess the climbing performance and adaptability of the climbing robot on variable curvature surfaces. The results show that the designed wall-climbing robot features flexible longitudinal/lateral switching movement, stable adsorption, and strong adaptability to variable curvature surfaces, with a minimum curvature adaptability of 0.46 m and the capability to carry 7.2 kg equipment on a 90° wall.

Keywords: wall-climbing robot; permanent magnet adsorption; variable curvature facade; motion analysis

爬壁机器人可搭载检测设备, 代替人工完成高空作业^[1], 在管道检测、风机检测、船舶检测等领域有广阔的前景^[2]。日益复杂的作业环境, 对机器人的移动性、越障性、灵活性、自适应性提出了更高的要求, 但现有机器人的综合适应能力不能满足复杂工况的需求^[3]。其中, 变曲率壁面作为一种常见的复杂工况环境, 对机器人的自适应移动能力, 纵、横方向快速变换移动能力有较高的要求, 其决定了移动路径的准确性、吸附的稳定性以及壁面

检测的完整性, 从根源上决定着机器人在壁面作业的整体性能^[4]。因此, 提高爬壁机器人的变曲率壁面适应能力、姿态稳定调节能力和快速变向移动能力, 是改善其综合性能的关键。

针对以上 3 方面的问题, 国内外学者进行了大量研究, 并设计了多种适应变曲率壁面的解决方案, 其中移动方式主要为履带式^[5]和轮式^[6], 对于导磁曲面主要使用永磁吸附方式, 并根据磁铁的吸附特性设计了不同的吸附装置^[7]。Jiang 等^[8]设

设计了一款采用双铰链连接的永磁轮式爬壁机器人, 该设计可通过调整运动姿态来适应壁面变化, 机器人使用 N52 级钕磁铁, 并采用间隙型永磁体设计, 保证单个永磁体提供至少 200 N 的吸附力, 实现携带超过 5 kg 的设备对船舶壁面以最小 3 m/min 的速度进行检测。同样针对大型船舶等曲面, Jiang 等^[9] 使用五连杆机构, 开发了一种能够适应各种曲率的爬壁机器人, 能够在曲率半径为 6 m 的壁面上承载 5 kg 的负载, 永磁轮由轮毂、分布在阵列中的 8 个 N48 圆柱形永磁体和橡胶层组成, 能适应最小 1.2 m 曲率半径的曲面。Wang 等^[10] 为解决变曲率壁面的自适应问题, 创新性地提出分体式结构的柔性爬壁机器人, 采用永磁吸附履带移动方式, 永磁机构由轭铁和两块 N48 永磁铁组成, 其最小可适应曲率半径为 1 m 的曲面。Zhang 等^[11] 基于磁轮吸附的方法, 设计了一种柔性表面自适应浮动结构, 提高了机器人的壁面适应能力和移动精度, 永磁吸附装置由轭铁和扇形钕磁铁组成。Lin 等^[12] 设计一种被动顺应悬挂机构, 将其结合到爬壁机器人中, 通过永磁吸附轮式移动的方式, 机器人最小可适应 0.6 m 的管道内壁, 并验证了该设计在变曲率自适应方面的有效性。Hu 等^[13] 设计了一种在凸面上可承载较大载荷的机器人, 采用永磁吸附、履带移动方式, 并引入一种载荷分散的机构和被动悬挂机构, 提高了机器人的吸附稳定性和运动灵活性, 最小可适应曲率半径为 3 m 的凸面, 载重自重比达 2.02。Zhang 等^[14] 基于 Halbach 阵列设计了一种双层叠加磁路磁化方法, 永磁吸附装置与传统的磁路设计方法相比吸附力至少增加 8%, 平均磁能利用率至少提高 16.46%。关于方向切换, 黄华等^[15] 提出一种基于行星带轮与混合双吸补偿的爬壁机器人, 设计了一种快速变向装置, 显著提升了机器人的机动性。

上述研究表明, 目前对爬壁机器人在自适应、越障、吸附三方面研究较多, 但对机器人如何通过机构自适应调节得到最大的有效接触面积和以较小的姿态变化快速变向的研究较少。针对上述问题, 本文设计了一种分离式结构的变曲率立面爬壁机器人。通过结构设计和力学模型研究, 建立仿真模型和样机进行实验验证, 得到一种提高爬壁机器人稳定性和自适应能力的解决方案。

1 结构设计 (Structural design)

机器人整体结构左右对称, 重心位于中轴线上。机器人结构如图 1 所示, 机身两边分别对称安

装有弹簧辅助装置 1、变向装置 2、驱动模块 3、永磁吸附装置 5、自适应装置 6, 机器人可在壁面上实现自适应移动、越障和转向等功能。自适应装置 6 连接机身 4 和变向装置 2, 变向装置 2 再连接到驱动模块 3, 为增加机器人在变曲率壁面上的适应能力设置了弹簧辅助装置 1。

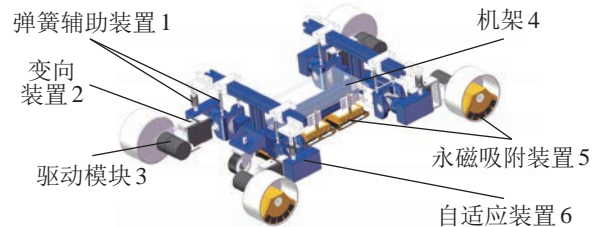


图 1 结构设计图
Fig.1 Structural design

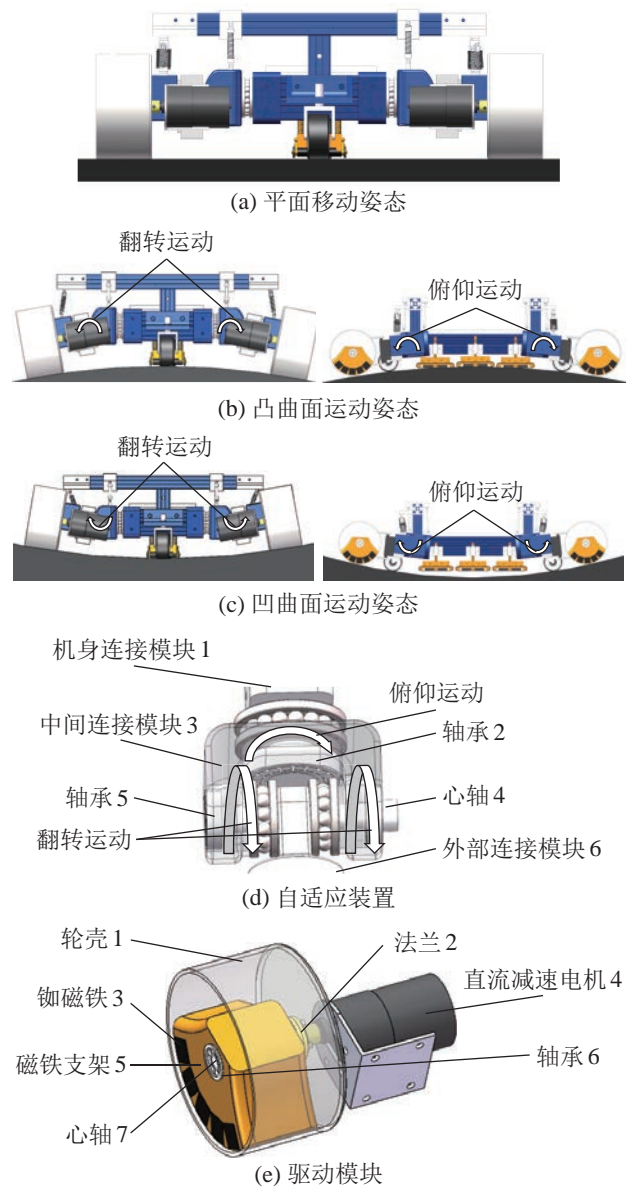


图 2 自适应移动结构
Fig.2 Adaptive mobile structure

1.1 自适应移动结构设计

爬壁机器人快速移动和稳定吸附是其性能的重要体现。传统的履带设计虽然能提供强大的驱动力，但限制了机器人的机动性，且一体式履带底盘结构无法有效调节履带和曲面的接触角度，导致在曲面作业时有效接触面积较小，极大地削弱了吸附的稳定性。因此，本文设计的机器人采用轮式移动方式，4个驱动轮相对于机身独立，自适应连接模块将其连接到机架。当机器人在不同曲率的壁面上工作时，4个驱动轮可以独立完成一定角度的俯仰和翻滚动作，提高了机器人的越障能力和对曲面的适应能力。

在吸附力和相互约束力的作用下，自适应装置可自动调节驱动轮与机身的夹角，以适应不同曲率的壁面，最大化有效接触面积，如图2(a)~(c)所示。自适应装置相对于机身进行俯仰和翻转动作，如图2(d)所示。机身连接模块1连接于机身，中间连接模块3可绕轴承2进行俯仰，外部连接模块6通过变向装置连接于驱动模块，其可绕心轴4完成翻转动作。为避免各模块之间产生较大摩擦，在中间连接模块与机身连接模块和外部连接模块之间分别安装推力球轴承。机器人通过自适应连接模块可适应变曲率立面，增加机器人与壁面的有效接触面积，从而避免因吸附力不足导致的脱附问题。

驱动模块由轮壳1、法兰2、钕磁铁3、直流减速电机4、磁铁支架5、轴承6和心轴7组成，如图2(e)所示。轮壳通过法兰2和直流减速电机4连接，电机减速比为1:25，较大的减速比可防止机器人在断电时从壁面脱落。为保证轮壳内部的磁铁与壁面的气隙间距在4 mm以内，轮壳的厚度设计为2 mm，外径为90 mm。在轮壳外表面涂有一层防滑材料，可增加轮壳和壁面间的摩擦力。为防止驱动轮因越障导致吸附力不足的问题，在自适应连接模块上安装弹簧辅助装置，越障时可有效增加驱动轮的压力，从而提高轮壳与壁面之间的摩擦力。

1.2 永磁吸附装置结构设计

永磁吸附装置决定了机器人能否在壁面稳定工作。机器人的永磁吸附装置包括驱动轮内部永磁吸附装置和机身永磁吸附装置，驱动轮内部永磁吸附装置设计为Halbach永磁阵列结构，机身永磁吸附装置设计为U型磁桥。

带有钕磁铁的支架位于车轮内部，磁铁支架与轮壳的间隙为1 mm，可自动调节角度并为驱动模块提供向壁面的正压力，如图3(a)所示。机身的吸附力由位于机架下方的吸附装置提供，U型磁桥沿

机身纵向排列。配备有弹簧和滚轮的柔性支架在遇到障碍物时，可被动调节机架和壁面之间的高度，防止磁铁与障碍物摩擦，确保磁铁与壁面的有效距离，降低脱附风险，如图3(b)所示。

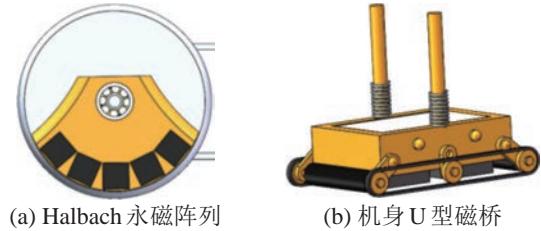


图3 永磁吸附装置结构

Fig.3 Structure of the permanent magnet adsorption device

1.3 变向装置结构设计

机器人在壁面灵活变向是体现其性能的重要方面。由于传统履带装置在转向时需要较大的转矩并消耗较多能量，因此设计了一种快速变向装置。该装置使得机器人只需小幅度调整姿态就能在横向与纵向移动间实现快速切换，提高了工作效率。

采用变向模式1时可实现纵向移动，采用变向模式2时可实现横向移动，变向原理如图4(a)(b)所示。变向装置通过大扭矩舵机改变驱动轮的移动方向，其结构如图4(c)所示。万向轮装置在变向时可承载机身实现高度灵活的转向，如图4(d)所示。该装置避免了在改变移动方向时大范围的机身转动和横向移动时有效接触面积降低导致的坠落风险，提高了作业的安全性，同时节省了作业时间和能量。

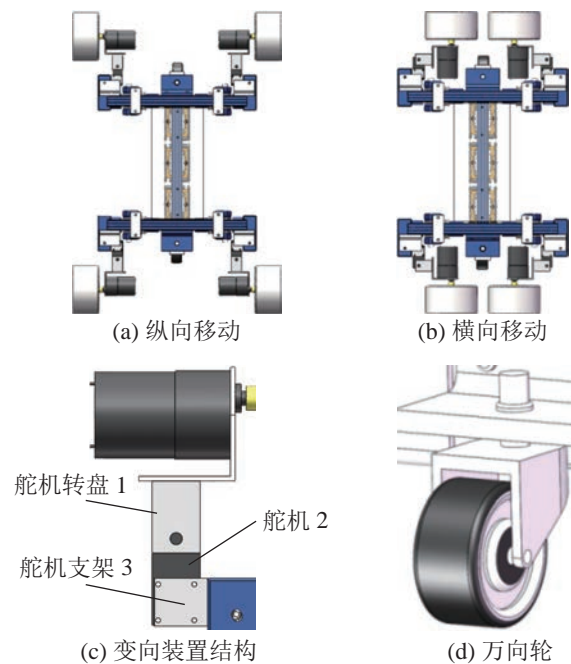


图4 变向装置

Fig.4 Steering device

1.4 控制系统设计

爬壁机器人采用分层式控制系统, 分为上位机控制和下位机控制, 上位机采用移动端 PC, 下位机采用 STM32 单片机。两者通过 ESP8266 模块通信, 可远程操控机器人进行纵向、横向和小范围转向移动。此外, 系统支持图像传输、在线检测、状态展示和命令发送等功能, 如图 5 所示。

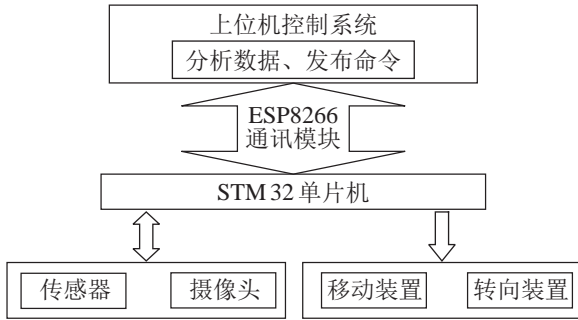


图 5 控制系统组成

Fig.5 Composition of the control system

2 运动分析 (Motion analysis)

机器人稳定作业需满足以下条件: 1) 实现稳定吸附、移动、转向和越障; 2) 确保机器人在不同角度的壁面作业时不发生滑移和倾覆。这要求机器人具备强大的吸附力和足够的驱动力矩。考虑到实际壁面可能具有不同的结构特性, 机器人需要适应壁面曲率的变化并确保通过障碍物区域, 这对其机动性提出了更高的要求。下文将分别建立力学模型和自适应模型, 对机器人在曲面下纵向和横向移动的过程建立力学模型, 并分析其在临界条件下所需的吸附力; 建立在不同曲率壁面纵向移动、横向移动和越障时的自适应模型, 并分析机器人在不同曲面以不同运动模式运动时的姿态变化。

2.1 壁面静态分析

由于机器人在壁面的移动速度较慢, 为简化分析, 将其在移动状态下的失效分析等效于静态条件下的分析。机器人在壁面的受力、力矩示意图如图 6 所示。

点 A、B 分别是前、后驱动轮与壁面接触的中心点, 点 A 到点 B 的距离 $L_1 = 490 \text{ mm}$, 点 O 是机器人的质心, 点 B 到质心 O 的距离 $L_2 = 245 \text{ mm}$ 。点 E、J、K 分别是 U 型磁桥的中心点, 点 E、J、K 到点 B 的距离分别为 $L_3 = 165 \text{ mm}$ 、 $L_4 = 245 \text{ mm}$ 、 $L_5 = 325 \text{ mm}$ 。前、后万向轮与壁面的接触中心点 C、D 到点 B 的距离分别为 $L_6 = 418 \text{ mm}$ 、 $L_7 = 72 \text{ mm}$ 。壁面到质心 O 的垂直距离为 $h_1 = 62 \text{ mm}$ 。 β 为壁面与竖直方向的夹角, 即倾斜角度。机器人

受力、力矩示意图中的参数如表 1 所示。

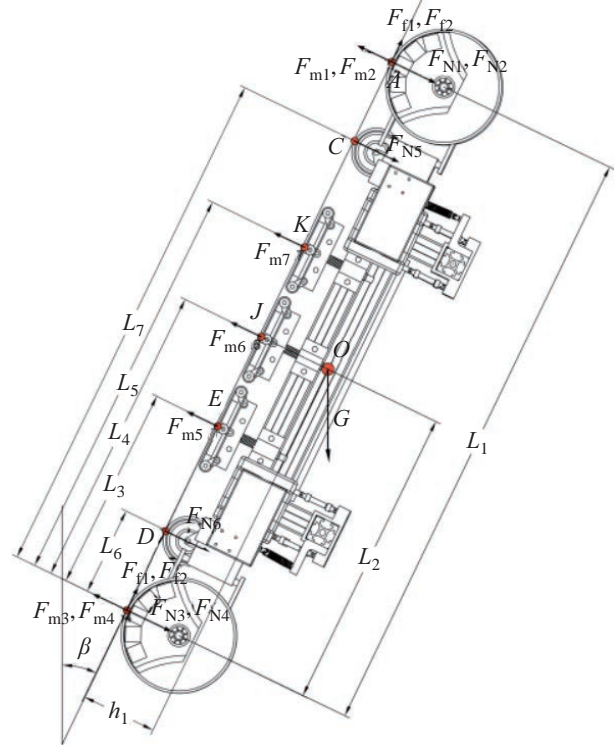


图 6 机器人受力、力矩示意图

Fig.6 Forces and torques on the robot

表 1 机器人受力、力矩示意图参数表

Tab.1 Parameters in the diagram of forces and torques on the robot

符号	名称
$F_{N1}, F_{N2}, F_{N3}, F_{N4}$	驱动轮支撑力
F_{N5}, F_{N6}	万向轮支撑力
$F_{m1}, F_{m2}, F_{m3}, F_{m4}$	Halbach 永磁阵列吸附力
F_{m5}, F_{m6}, F_{m7}	U 型磁桥吸附力
$F_{f1}, F_{f2}, F_{f3}, F_{f4}$	驱动轮摩擦力
G	机器人重力 = 50 N
μ_1	静摩擦系数 = 0.8
μ_2	动摩擦系数 = 0.5

机器人进行纵/横方向切换时需处于停车状态, 为保证其切换过程的稳定性, 先进行后驱动轮的换向, 然后再进行前驱动轮的换向。在机器人从纵向移动变为横向移动的过程中, 舵机转动 90° 带动驱动轮由纵向转为横向。如图 7 所示, 实线代表纵向移动状态, 虚线代表横向移动状态。 $\widehat{A_1A'_1}$ 和 $\widehat{B_1B'_1}$ 分别表示前驱动轮中心点 A_1 和后驱动轮中心点 B_1 的运动轨迹。

图 7(a) 中点 O_1 到点 A_1 的距离 $L_8 = 426 \text{ mm}$, 分析可得由点 A_1 运动到点 A'_1 有:

$$M'_1 = GL_8 \sin \alpha_1 + F_{f1}L_8 \quad (1)$$

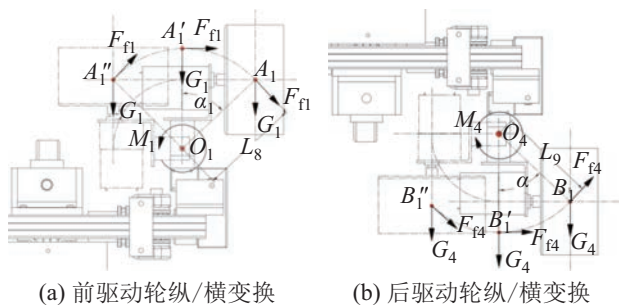


图7 纵/横变换中的受力、力矩示意图

Fig.7 Forces and torques in vertical-horizontal transformation

由点 A_1' 运动到点 A_1'' 有:

$$M_1'' = GL_8 \sin \alpha_1 - F_{f1} L_8 \quad (2)$$

点 O_4 到点 B_1 的距离 $L_9 = 426 \text{ mm}$, 由图 7(b) 分析点 B_1 运动到 B_1'' 点有:

$$M_4' = GL_9 \sin \alpha_4 - F_{f4} L_9 \quad (3)$$

由点 B_1' 运动到点 B_1'' 有:

$$M_4'' = GL_9 \sin \alpha_4 + F_{f1} L_9 \quad (4)$$

在变向过程中, 驱动轮紧贴于导磁壁面, 机器人的倾覆力矩受影响较小, 从而保证了机器人无倾覆风险。然而, 在这个过程中只有 2 个驱动轮静止, 另外 2 个驱动轮处于滑动变向状态, 可能会引起机器人滑移失效的风险。

机器人在壁面移动时所受总吸附力 F_m 、总支持力 F_N 、总摩擦力 F_f 分别为

$$F_m = F_{m1} + F_{m2} + F_{m3} + F_{m4} + F_{m5} + F_{m6} + F_{m7} \quad (5)$$

$$F_N = F_{N1} + F_{N2} + F_{N3} + F_{N4} + F_{N5} + F_{N6} \quad (6)$$

$$F_f = F_{f1} + F_{f2} + F_{f3} + F_{f4} \quad (7)$$

由分析可得:

$$F_N + G \sin \beta = F_m \quad (8)$$

$$F_f > G \cos \beta \quad (9)$$

$$F_f = \mu_1 F_N \quad (10)$$

为避免出现滑移失效的情况, 需满足:

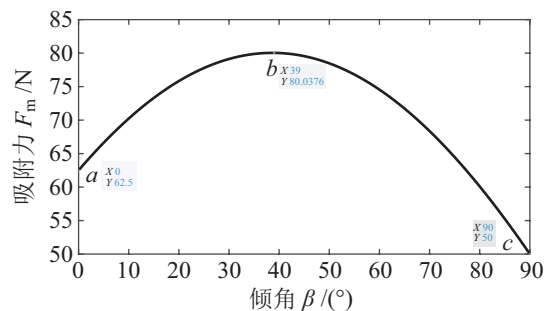
$$F_m > \frac{G \cos \beta}{\mu_1} + G \sin \beta \quad (11)$$

临界条件下, 机器人满足静平衡的临界条件:

$$F_m = \frac{G \cos \beta}{\mu_1} + G \sin \beta \quad (12)$$

由分析可得防止发生滑移现象时倾角对吸附力 F_m 的影响, 如图 8 所示。图中 a 点为倾角 $\beta = 0^\circ$

时对应的吸附力, 此时的吸附力 $F_m = 62.5 \text{ N}$, 随着壁面倾角 β 的增大, 所需的吸附力 F_m 先增大后减小, 在 c 点 $\beta = 90^\circ$ 处有最小吸附力 $F_m = 50 \text{ N}$ 。在 b 点处倾角 $\beta = 39^\circ$, 为避免机器人发生滑移, 需要最大的吸附力来维持稳定移动, 此时吸附力约为 80.04 N 。若在 b 点处机器人由纵向移动切换为横向移动, 由上述分析可知, 机器人在切换方向时只有 2 个驱动轮可提供防止滑移的摩擦力, 则单个吸附模块所需的吸附力为 $F_{m1} = 40.02 \text{ N}$ 。

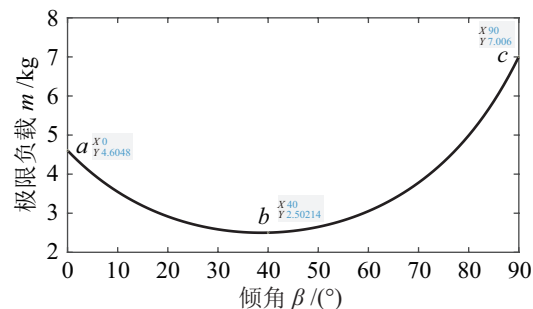
图8 防止滑移时倾角 β 对 F_m 的影响Fig.8 The influence of β on F_m in preventing slip

综上所述, 为保证机器人稳定运行, 单个永磁模块所需的最小吸附力 $F_{m1} = 40.02 \text{ N}$, 取移动的安全系数为 1.5, 则防止滑移时最小吸附力 $F_{m1} = 60.03 \text{ N}$ 。

根据以上信息, 机器人在保持 1.5 的安全系数时所需的最小吸附力为 $F_m = 120.06 \text{ N}$ 。增加的负载主要会影响滑移力而对倾覆力矩的影响较小, 因此机器人的极限负载 m 可以表示如下:

$$m = \left(\frac{F_m}{\cos \beta} - 50 \right) / 10 \quad (13)$$

极限负载 m 与倾角 β 的关系如图 9 所示, 当倾角 $\beta = 90^\circ$ 时有最大极限负载 $m = 7.006 \text{ kg}$ 。理论载重自重比为 1.4。

图9 负载 m 与倾角 β 变化关系图Fig.9 Relationship between load m and dip angle β

由于机器人为对称结构, 且横向移动时只改变驱动轮移动方向, 不改变机器人运动姿态, 所以机

机器人在壁面横向移动、自下而上移动和自上而下移动时与上述分析相同。

2.2 壁面纵向移动自适应分析

机器人在纵向移动过程中, 机架由万向轮支撑, 机身相对于曲面中心固定。自适应连接模块根据壁面曲率变化自动调整驱动模块与机身间的相对角度, 实现在周向曲面上的翻转角调整和在径向曲面上的俯仰角变化。由于驱动轮内部装有可调节磁块, 自适应连接模块由弹簧辅助装置支撑, 磁吸引力的方向总是指向曲率圆心。

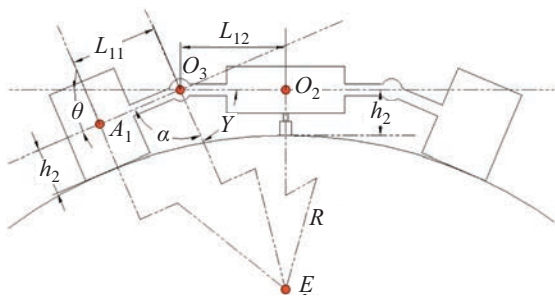


图 10 周向曲面纵向移动时的机身姿态示意图
Fig.10 Diagram of the body posture during longitudinal movement on circumferential curved surfaces

当机器人沿周向曲面移动时, 机身姿态如图 10 所示, 机身的中心点 O_2 与曲面中心点 E 相对不变, h_1 是壁面到机身中心点 O_2 的距离, O_3 是连接模块的翻转中心点, E 为曲率中心点, R 为曲率半径, L_{11} 为点 O_3 与点 A_1 之间的距离, L_{12} 为点 O_3 与点 O_2 之间的距离, 翻转角 θ 随壁面曲率变化而改变。翻转角 θ 计算如下:

$$\theta = \pi - \alpha - \gamma \quad (14)$$

其中, α 为 O_3A_1 与 O_3E 之间的夹角, γ 为 O_3E 与 O_3O_2 之间的夹角。根据机构各部分的长度几何关系, α 和 γ 可以表示为曲率半径的三角函数, 关系式为

$$\tan \alpha = \frac{R + h_2}{L_{11}} \quad (15)$$

$$\tan \gamma = \frac{R + h_2}{L_{12}} \quad (16)$$

可得翻转角 θ 与曲率半径 R 的关系式为

$$\theta = \pi - \arctan \frac{R + h_2}{L_{11}} - \arctan \frac{R + h_2}{L_{12}} \quad (17)$$

翻转角 θ 与曲率半径 R 的变化关系如图 11 所示, 机器人的翻转角 θ 最大为 14° 。由图 11 可知机器人在周向曲面纵向移动时, 能适应的最小曲率半径约为 0.65 m , 如图中 a 点所示。随着曲率半径的

增大, 翻转角逐渐减小, 且变化趋势逐渐减慢。在图中 b 点处曲率半径 $R = 8 \text{ m}$, 此时翻转角 θ 约为 1.25° 。

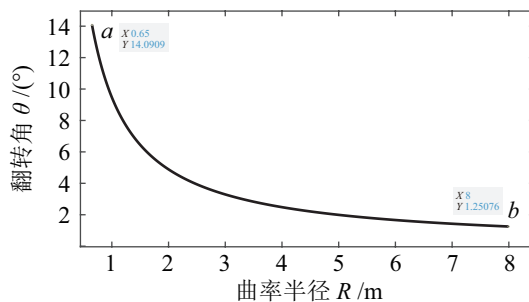


图 11 周向曲面纵向移动时翻转角 θ 与曲率半径 R 变化关系图

Fig.11 Graph of the relationship between the flip angle θ and curvature radius R during longitudinal movement on circumferential curved surfaces

当机器人在径向曲面移动时, 机身姿态如图 12 所示。 L_{14} 是机身中心点 O_5 与点 O_6 之间的距离, L_{15} 是点 O_6 与驱动轮中心点 A_1 之间的距离。

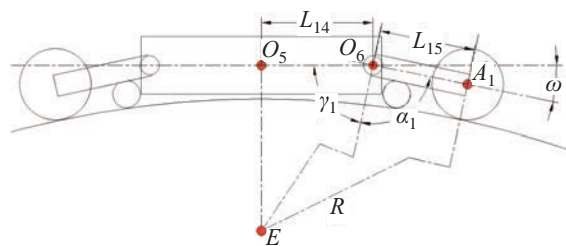


图 12 径向曲面纵向移动时的机身姿态示意图
Fig.12 Diagram of the body posture during longitudinal movement on radial curved surfaces

俯仰角 ω 计算如下:

$$\omega = \pi - \alpha_1 - \gamma_1 \quad (18)$$

式中 α_1 为 O_6A_1 与 O_6E 之间的夹角, γ_1 为 O_6E 与 O_6O_5 之间的夹角。 α_1 和 γ_1 关系式为

$$\tan \alpha_1 = \frac{R + h_2}{L_{15}} \quad (19)$$

$$\tan \gamma_1 = \frac{R + h_2}{L_{14}} \quad (20)$$

可得俯仰角 ω 与曲率半径 R 的关系式为

$$\omega = \pi - \arctan \frac{R + h_2}{L_{15}} - \arctan \frac{R + h_2}{L_{14}} \quad (21)$$

俯仰角 ω 与曲率半径 R 的变化关系如图 13 所示。机器人的最大俯仰角 $\omega = 15^\circ$ 。机器人在径向曲面纵向移动时, 能适应的最小曲率半径约为 0.87 m , 如图 13 中 a 点所示。在 $0.87 \sim 4 \text{ m}$ 区间,

俯仰角 ω 变化较大, 随着曲率半径 R 的增大, 变化趋势逐渐减缓。当曲率半径 $R = 8 \text{ m}$ 时, 俯仰角 ω 约为 1.74° , 如图 13 中 b 点所示。

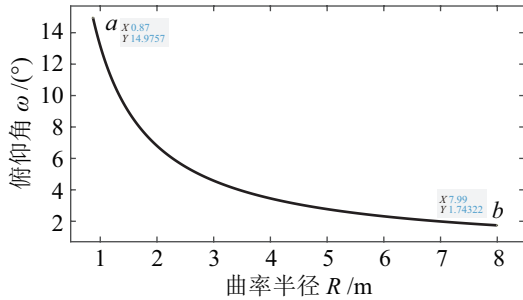


图 13 径向曲面纵向移动时俯仰角 ω 与曲率半径 R 变化关系图

Fig.13 Graph of the relationship between the pitch angle ω and curvature radius R during longitudinal movement on radial curved surfaces

综上所述, 机器人在周向曲面纵向移动时, 最小可适应的曲面曲率半径为 0.65 m ; 在径向曲面纵向移动时, 最小可适应的曲面曲率半径为 0.87 m 。

2.3 壁面横向移动自适应分析

机器人横向移动时的机身姿态与纵向移动时相似。横向移动可分为在周向曲面上移动和在径向曲面上移动两种情况, 下面将分别分析在两种曲面上机身的运动姿态, 并计算翻转角 θ 和俯仰角 ω 的适应范围。

当机器人处于周向曲面时, 其横向移动时机身的姿态如图 14 所示。

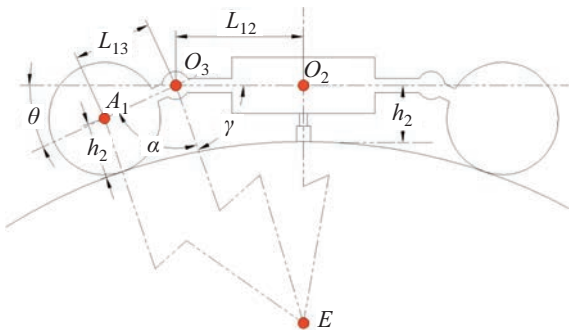


图 14 周向曲面横向移动时的机身姿态图

Fig.14 Diagram of the body posture during lateral movement on circumferential curved surfaces

L_{13} 为旋转中心点 O_3 到驱动轮中心点 A_1 的距离, 翻转角 θ 计算如下:

$$\theta = \pi - \alpha - \gamma \quad (22)$$

$$\tan \alpha = \frac{R + h_2}{L_{13}} \quad (23)$$

$$\tan \gamma = \frac{R + h_2}{L_{12}} \quad (24)$$

可得翻转角 θ 与曲率半径 R 的关系式为

$$\theta = \pi - \arctan \frac{R + h_2}{L_{13}} - \arctan \frac{R + h_2}{L_{12}} \quad (25)$$

翻转角 θ 与曲率半径 R 的关系如图 15 所示。当曲率半径 $R = 0.46 \text{ m}$ 时, 有最大的翻转角 $\theta = 14^\circ$, 如图 15 中点 a 所示。在图 15 中点 b 处翻转角 $\theta = 0.92^\circ$, 与之对应的曲率半径 $R = 8 \text{ m}$ 。

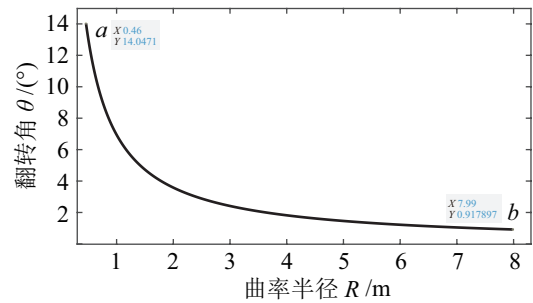


图 15 周向曲面横向移动时翻转角 θ 与曲率半径 R 的关系图

Fig.15 Graph of the relationship between the flip angle θ and curvature radius R during lateral movement on circumferential curved surfaces

当机器人处于径向曲面时, 其横向移动时机身的姿态如图 16 所示。

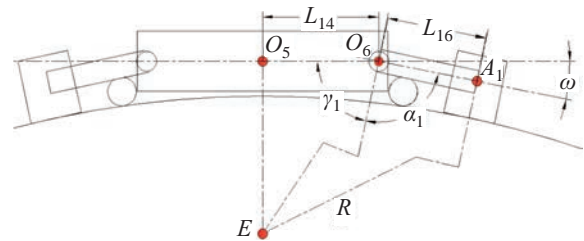


图 16 径向曲面横向移动时的机身姿态图

Fig.16 Diagram of the body posture during lateral movement on radial curved surfaces

L_{16} 为旋转中心点 O_6 到驱动轮中心点 A_1 的距离, 俯仰角 ω 计算如下:

$$\omega = \pi - \alpha_1 - \gamma_1 \quad (26)$$

$$\tan \alpha_1 = \frac{R + h_2}{L_{16}} \quad (27)$$

$$\tan \gamma_1 = \frac{R + h_2}{L_{14}} \quad (28)$$

所以, 俯仰角 ω 与曲率半径 R 的关系式为

$$\omega = \pi - \arctan \frac{R + h_2}{L_{16}} - \arctan \frac{R + h_2}{L_{14}} \quad (29)$$

俯仰角 ω 随曲率半径 R 的增大而减小, 如图 17 所示。在图 17 中 a 点处有最大俯仰角 $\omega = 15^\circ$, 此时曲率半径 $R = 0.9 \text{ m}$ 。在图 17 中点 b 处俯仰角 $\omega = 1.78^\circ$, 此时曲率半径 $R = 8 \text{ m}$ 。

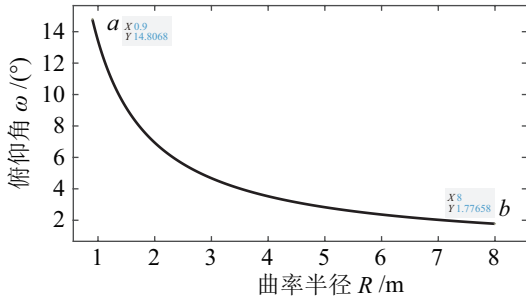


图 17 径向曲面横向移动时俯仰角 ω 与曲率半径 R 的关系图

Fig.17 Graph of the relationship between the pitch angle ω and curvature radius R during lateral movement on radial curved surfaces

综上所述, 机器人横向移动时, 在周向曲面上最小可适应的曲率半径为 0.46 m, 在径向曲面上最小可适应的曲率半径为 0.9 m。

2.4 壁面转向自适应分析

机器人在壁面移动时, 各个驱动轮与壁面的摩擦力和驱动力矩略有差异, 随着移动距离的增加, 可能会出现偏离原有轨迹的情况。因此, 需要进行微调, 使其重新回到原本的轨迹状态。机器人的各个驱动轮可以独立控制, 所以通过控制各个驱动轮顺时针或逆时针旋转可以实现快速转向。万向轮的转向轴中心点和轮子转轴中心点不在一条直线上, 当轮受到一个力时, 会产生一个与该力相等的反作用力, 推动转轴旋转。在机器人需要改变方向时, 操作手柄控制驱动轮旋转, 使其对万向轮产生一个斜向的力, 从而改变机器人的移动方向。当机器人纵向移动并向左偏离时, 通过控制使其向右旋转。此时, 1 号和 3 号驱动轮逆时针旋转, 而 2 号和 4 号驱动轮顺时针旋转, 如图 18(a) 所示。当机器人横向移动并向下偏离时, 通过操作手柄使其向上偏移回到原轨道。此时, 1 号和 2 号驱动轮逆时针旋转, 同时 3 号和 4 号驱动轮顺时针旋转, 如图 18(b) 所示。

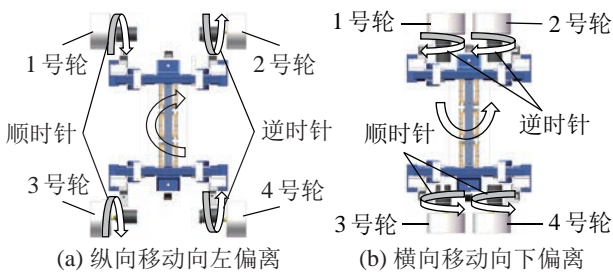


图 18 壁面转向分析

Fig.18 Analysis on the steering motion on a wall

万向轮可以自由旋转, 使其在机器人运动中能够迅速适应不同的方向和运动需求, 并减小转向阻

力, 从而实现机器人在复杂环境中的平稳、高效移动。

2.5 壁面越障自适应分析

机器人不仅要在光滑壁面稳定工作, 还要能够跨越壁面上的障碍物。这要求机器人在保持吸附安全的基础上, 能通过自适应吸附模块实现姿态调整, 以越过障碍。图 19 为机器人驱动轮越障过程, 在吸附力 F_{m1} 、 F_{m2} 和驱动力 F_{f1} 、 F_{f2} 的共同作用下, 驱动轮紧贴壁面向上移动, 如图 19(a) 所示; 越障过程中, 由于障碍物对驱动轮的作用, 自适应连接模块的俯仰角 ω 发生变化, 如图 19(b) 所示; 最后, 前驱动轮完成姿态调整并越过障碍, 机身姿态保持不变, 如图 19(c) 所示。随后, 后驱动轮按相同方式越过障碍, 从而实现整体越障。

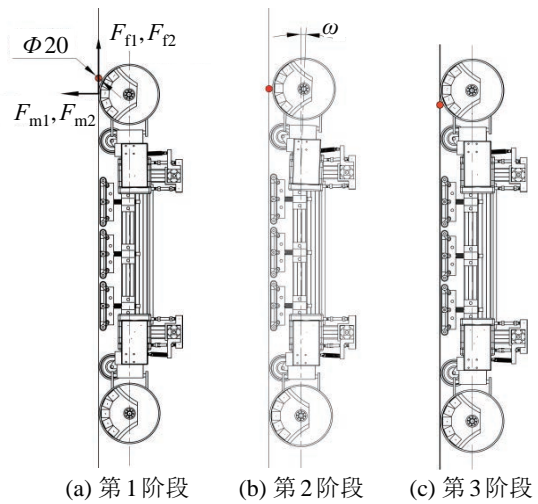


图 19 驱动轮越障示意图

Fig.19 The driving wheel crossing the obstacle

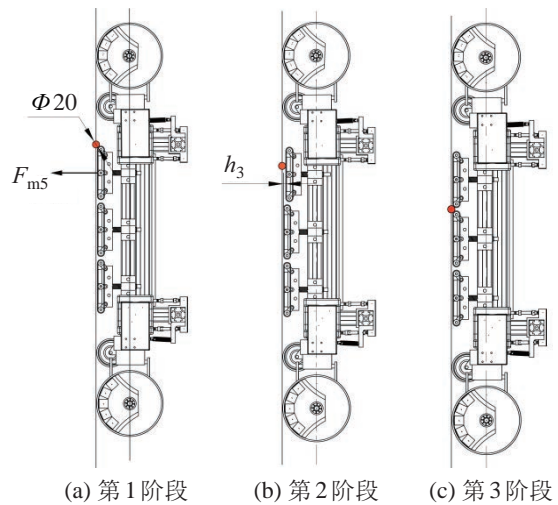


图 20 吸附装置越障示意图

Fig.20 The adsorption device crossing an obstacle

前驱动轮越过障碍后, 在驱动轮牵引力 F_f 作用下, 吸附装置也跟随越过障碍物, 如图 20 所示。

吸附模块接触到障碍物后,在吸附力 F_{m5} 的作用下,吸附模块的弹簧结构被压缩,如图 20(a) 所示;接着,吸附模块的离地高度增大,即吸附模块磁铁支架的收缩高度 h_3 增大,如图 20(b) 所示;最后,吸附模块整体越过障碍物,如图 20(c) 所示。这一过程中,虽然某个吸附模块的吸附力有所减小,但对整体吸附力的影响微小,确保了越障安全。

在机器人跨越障碍物的过程中,万向轮可确保机器人具有足够的灵活性和稳定性,以便顺利跨越障碍物。驱动轮和万向轮不是同时跨越障碍物,当驱动轮先越过障碍物时,万向轮在牵引力作用下也跟随越障。越障过程中障碍物的阻力会使万向轮与壁面之间的距离增加,造成机身的离地距离增加,但在自适应装置的作用下,驱动轮受其影响较小。因此,利用万向轮的自由旋转特性,通过其与其他驱动系统的协同工作,可分散障碍物带来的影响,确保整体的机动性,从而顺畅地完成越障任务。

机器人在壁面上遇到的障碍物可分为导磁障碍物和非导磁障碍物。机器人在跨越导磁障碍物的过程中,驱动轮受永磁铁的吸附力和辅助装置的压力作用而紧贴于障碍物表面;跨越非导磁障碍物的过程中,驱动轮受到辅助装置的压力而紧贴于障碍物表面。所以,无论是导磁障碍物还是非导磁障碍物,只要其处于机器人越障范围内,机器人的驱动轮都会受到朝向壁面的压力,保证了越障的安全。

通过调节自适应连接模块,机器人可以改变驱动轮的姿态来越过障碍,选取其中一组模块进行分析。障碍物高度 h 与翻转角 θ 的变化简图如图 21(a) 所示,障碍物高度与俯仰角 ω 之间的变化简图如

图 21(b) 所示。图中参数 L_{11} 表示中心点 O_3 至驱动轮中心 A_1 的距离, L_{15} 为中心点 O_6 至驱动轮中心 A_1 的距离。 M 和 M' 分别代表驱动轮与地面及障碍物的横向接触点,而 N 和 N' 则是纵向接触点。

分析可得:

$$\theta' = \theta \quad (30)$$

$$\theta = \theta_1 + \theta_2 \quad (31)$$

$$\theta_1 = \arctan \frac{h-h_2}{l_1} \quad (32)$$

$$\theta_2 = \arctan \frac{h_2}{l_1} \quad (33)$$

$$\omega' = \omega \quad (34)$$

$$\omega = \omega_1 + \omega_2 \quad (35)$$

$$\omega_1 = \arctan \frac{h-h_2}{l_4} \quad (36)$$

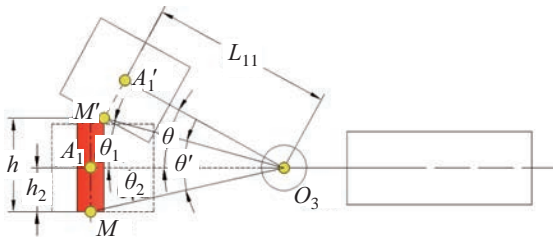
$$\omega_2 = \arctan \frac{h_2}{l_4} \quad (37)$$

翻转角 θ 、俯仰角 ω 与障碍物高度 h 满足

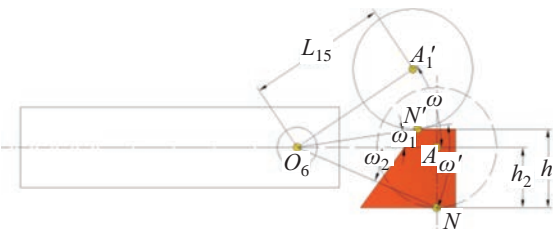
$$\theta = \arctan \frac{h-h_2}{l_1} + \arctan \frac{h_2}{l_1} \quad (38)$$

$$\omega = \arctan \frac{h-h_2}{l_4} + \arctan \frac{h_2}{l_4} \quad (39)$$

障碍物高度 h 与自适应连接模块俯仰角 ω 、翻转角 θ 的变化情况如图 22 所示,在图 22 中 a 点处障碍物高度 $h = 0.01$ m,翻转角 $\theta = 4.28^\circ$,俯仰角 $\omega = 3.69^\circ$ 。随着障碍物高度 h 的增加,翻转角 θ 、俯仰角 ω 增大。当障碍物高度 $h = 0.03$ m 时,翻转角 $\theta = 14.41^\circ$,俯仰角 $\omega = 11.82^\circ$,如图 22 中 b 点所示。



(a) 障碍物高度与翻转角 θ 的变化示意简图



(b) 障碍物高度与俯仰角 ω 的变化示意简图

图 21 障碍物高度与自适应连接模块变化的示意简图

Fig.21 Schematic diagram of the changes of obstacle height and adaptive connection module

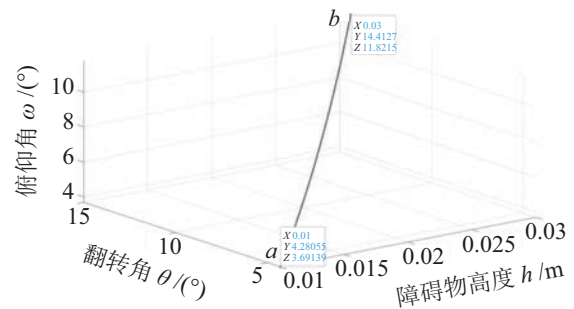


图 22 障碍物大小与俯仰角 ω 、翻转角 θ 变化关系图

Fig.22 The relationship between the obstacle size and the change of the pitch angle ω and the flip angle θ

3 仿真分析 (Simulation analysis)

吸附系统提供充足的吸附力是保证机器人稳定工作的前提,吸附力不足会导致滑移或倾覆。然而,盲目增大吸附力会增加设备重量、降低灵活性并可能损伤墙面。机器人移动、越障会导致磁铁与

壁面的间隙发生变化, 进而影响吸附力的大小。因此, 需结合实际工作情况对吸附力进行分析。

3.1 永磁吸附装置磁路设计

磁性吸附可分为永磁吸附和电磁吸附, 这些方法能产生强大的吸附力, 且受壁面凹凸或裂缝的影响较小。为增强磁铁的吸附能力, 可采用多种设计方案, 包括非接触变磁隙式、变磁化方向式、变密度拓扑优化式、Halbach 阵列式、U 型磁桥结构等。

机器人的各驱动轮都有一组永磁吸附结构, 共有 4 个驱动轮, 机身上有 3 个吸附装置, 每个吸附装置都有一组永磁吸附结构。为保证机器人有较高的载重自重比, 永磁材料特性与磁路设计应满足以下原则:

- 1) 永磁材料的最大磁能积足够大, 以保证自身体积更小且磁力更大。
- 2) 机器人与壁面是单侧吸附, 在设计时应实现磁感线的单侧汇聚, 以减少漏磁现象。
- 3) 永磁材料退磁温度高, 应保证其材料的稳定性。

根据上述条件, 可选用牌号为 N45 的钕铁硼材料, 该材料有磁能积大、物理结构稳定、重量轻、强度高特点, 现被广泛使用在各行业, 其参数如表 2 所示。

表 2 NdFeB-N45 主要参数
Tab.2 NdFeB-N45 major parameters

参数	数值
剩磁感应强度 B_r / T	1.33~1.37
矫顽力 $H_{cb} / (kA/m)$	≥ 876
磁能积 $B_h / (kJ/m^3)$	366~382
工作温度 $T_w / (^\circ C)$	≤ 80

驱动轮的磁铁吸附装置采用 Halbach 阵列结构, 由钕磁块和磁铁支架组成, 磁铁安装方向如图 23(a) 所示。

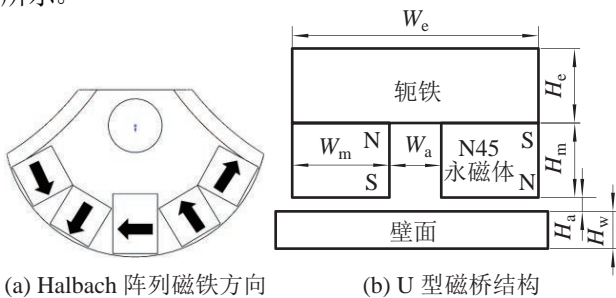


图 23 永磁吸附装置
Fig.23 Permanent magnetic adsorption device

机身的吸附装置采用 U 型磁桥结构, 每个吸附装置由 2 块磁铁和 1 块轭铁组成, 安装方式如图

23(b) 所示。U 型磁桥结构的参数如表 3 所示。

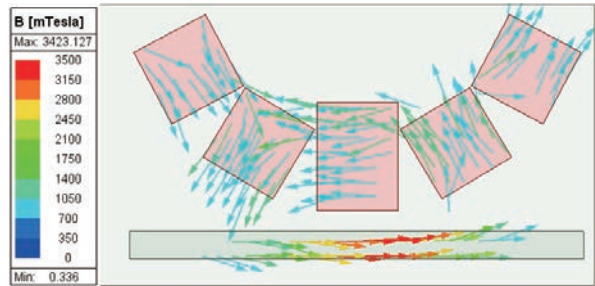
表 3 U 型磁桥结构参数
Tab.3 Structural parameters of U-shaped magnetic bridge

结构参数	数值 /mm
轭铁宽度 W_e	38
轭铁厚度 H_e	10
永磁体长度 L_m	30
永磁体宽度 W_m	20
永磁体厚度 H_m	10
两磁体间距 W_a	8

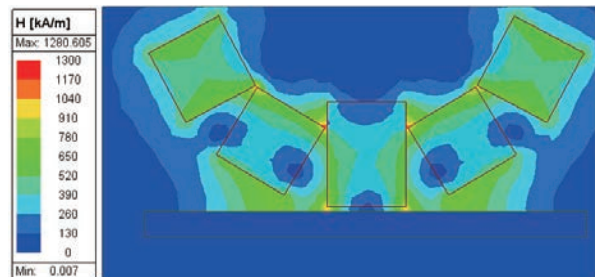
3.2 ANSYS Maxwell+Workbench 永磁仿真分析

采用 ANSYS Maxwell+Workbench 对 Halbach 永磁阵列结构和 U 型磁桥结构进行磁场有限元分析。

1) 当壁面厚度为 5 mm 时, 为保证磁铁吸附力损失较小, 将气隙间距设置为 4 mm, 分别对改进型 Halbach 永磁阵列结构和传统排列结构进行分析。传统永磁阵列由一组永磁体按照规则的方式排列组成, 每个永磁体的磁场方向相同。Halbach 永磁阵列则是各永磁体的磁场方向有特定的排列方式, 并根据设计尺寸调整排列的角度和中间磁铁的尺寸。



(a) Halbach 永磁阵列结构磁感线走向图



(b) Halbach 永磁阵列结构磁场强度分布图

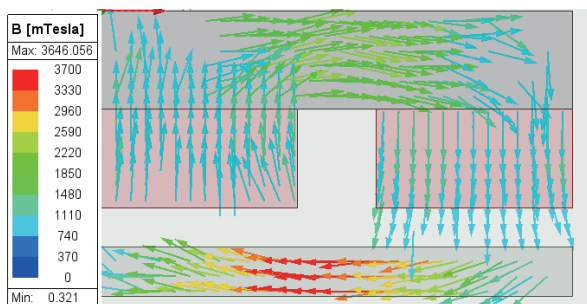
图 24 Halbach 永磁阵列仿真

Fig.24 Simulation of the Halbach permanent magnet array

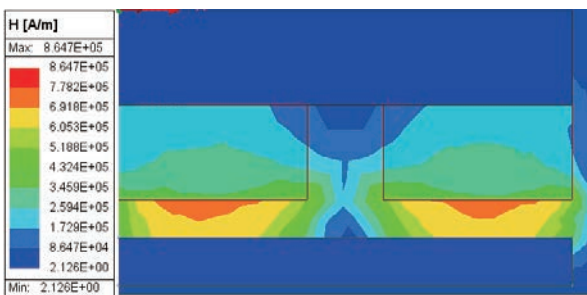
通过调整磁铁结构提高了磁场的利用率, 减少磁场的漏磁, 从而增加磁场强度和磁感线的密度。结果如图 24 所示, 图 24(a) 为改进型 Halbach 永磁阵列结构的磁感线走向, 图中磁感线聚集, 且穿过壁面的磁感线较多而密集, 对壁面产生的吸附力

较大。图 24(b) 为改进型 Halbach 永磁阵列结构的磁场强度分布图，图中永磁结构上侧区域的磁场强度接近为 0，且多数磁场汇聚于永磁体与壁面之间，吸附力也是在该部分达到最大。模拟吸附力为 74.6628 N，大于静态理论计算所需的 60.03 N，满足运动条件下爬壁机器人对吸附力的要求。

壁面厚度为 5 mm，气隙间距为 4 mm，对 U 型磁桥结构进行仿真，如图 25 所示。图 25(a) 中磁感线从 U 型永磁铁一极出发，穿过壁面后回到 U 型磁铁的另一端，穿过墙体的磁感线聚集且红色磁感线较多，对墙体表面的吸附力较大。图 25(b) 为磁场强度分布图，图中所示红色部分汇聚在永磁体和壁面之间，永磁体结构上侧大部分为淡蓝色，空气中磁场强度接近为 0，即大部分磁场汇聚于永磁体和壁面之间，吸附力也在该部分达到最大。模拟吸附力为 119.0285 N，大于静态理论计算所需的 60.03 N，满足运动条件下对吸附力的要求。



(a) 磁感线走向图



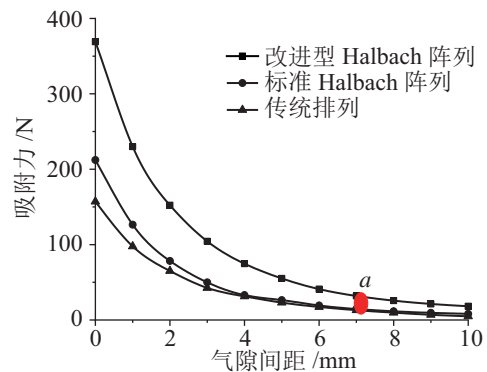
(b) 磁场强度分布图

图 25 U 型磁桥仿真

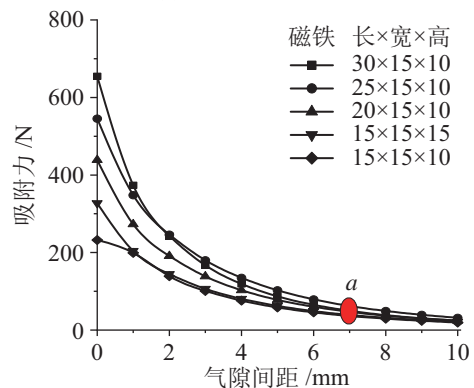
Fig.25 Simulation of the U-shaped magnetic bridge

2) 机器人在运行过程中磁体与壁面之间的间隙会因壁面曲率变化以及转向、越障等运动而发生变化，间隙间距的变化将影响到永磁铁对壁面吸附力的大小。当导磁壁面厚度为 5 mm 时，将磁铁和壁面之间的间隙间距从 0 调节到 10 mm，进行仿真计算，如图 26 所示。图 26(a) 分析了 3 种永磁排列方式下随着间隙间距的增加吸附力的变化情况，在间隙间距为 6 mm 之前，改进型 Halbach 永磁阵列比其他 2 种方式的吸附力大得多，但随着间隙间

距的增大，两者之间的吸附力差距逐渐减小。



(a) Halbach 永磁阵列结构



(b) U 型磁桥结构

图 26 间隙间距—吸附力曲线

Fig.26 Curves of gap distance and adsorption force

改变磁铁的尺寸会影响其磁导率和磁场的强度，从而影响磁吸附力的大小。选取不同长 L_m 、宽 W_m 、高 H_m 的永磁铁组成 U 型磁桥，通过改变永磁铁与壁面之间的气隙间距 H_a ，观察吸附力的变化情况。由图 26(b) 可得，单独增大永磁铁的长 L_m 、宽 W_m 或高 H_m 时，永磁铁的吸附力都会增大，但同时改变磁铁的 2 个尺寸时，对磁场的影响更加复杂，能产生更大的磁吸附力增量。

分析可得，吸附力随着间隙间距的增加急剧下降，当间隙间距为 7 mm 时，如图 26 中的点 a 所示，吸附力下降速度变慢，但此时吸附力也无法保证机器人稳定在壁面运行。

3) 壁面厚度变化会改变磁通量的饱和程度，从而对磁吸附力的大小产生影响。在仿真模型中，间隙间距设置为 4 mm，壁面厚度从 1 mm 增大到 16 mm，吸附力变化曲线如图 27 所示。由图 27(a)(b) 可得增加壁面厚度会导致吸附力增加，当壁面厚度达到 10 mm 时，由于永磁体的磁能、磁路达到饱和状态，2 种结构的吸附力分别稳定在 74.8 N 和 119.1 N 左右，即使壁面厚度增加，吸附力也只是随之上下波动。

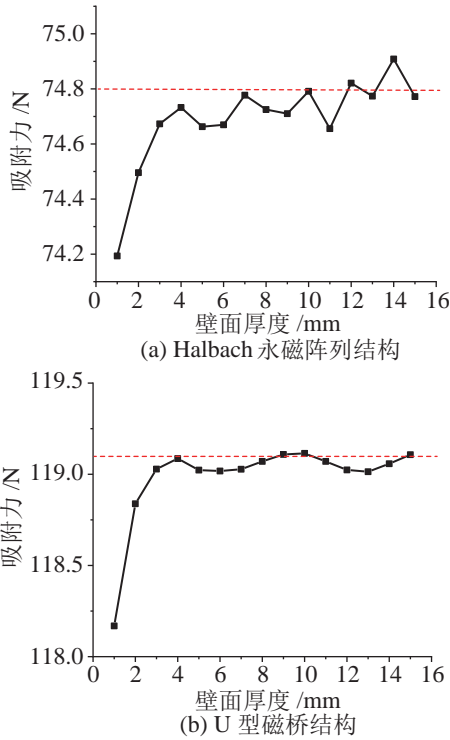


图 27 壁面厚度—吸附力曲线

Fig.27 Curve of wall thickness and adsorption force

根据分析所得结果, 合理设计永磁吸附装置, 控制永磁体与墙壁之间的间隙, 可避免因吸附力不足导致的脱附。

4) 机器人以不同姿态在壁面上运动时, 其表现出不同的吸附特性。设定曲率半径为 1.5 m、厚度为 5 mm, 对机器人在径向曲面和周向曲面上的纵向移动和横向移动进行仿真分析, 为了方便观察仿真结果, 只显示磁铁装置和壁面, 其余零件设为隐藏, 如图 28 所示。

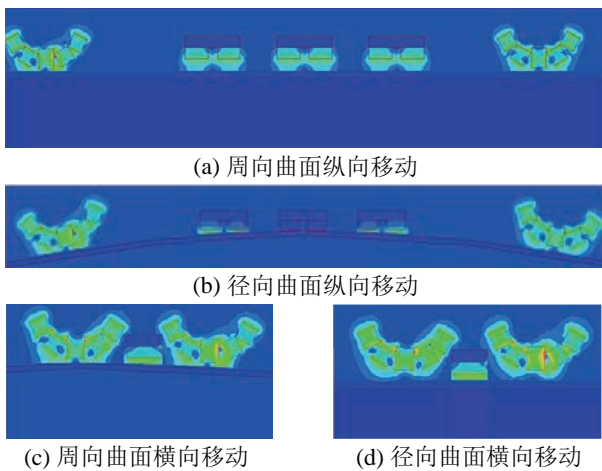


图 28 不同姿态下的吸附情况

Fig.28 Adsorption under different postures

在周向曲面和径向曲面上, 纵向移动时的仿真结果如图 28(a)(b) 所示, 横向移动时的仿真结果如

图 28(c)(d) 所示。4 组 Halbach 吸附装置经过自适应装置的调节, 以一定角度吸附于导磁壁面, 为驱动轮提供垂直于壁面的压力。3 组 U 型磁桥吸附装置为机器人提供防止倾覆的吸附力。综合使用 4 个 Halbach 吸附装置与 3 个 U 型磁桥, 使得机器人可以在各种曲面上稳定地移动, 吸附系统提供的力量不仅仅限于吸附, 还能使机器人在执行特定任务时保持在所需的位置和姿态。

通过综合分析机器人在不同壁面和不同运动状态下的磁吸附力可以得到机器人吸附力的变化规律, 以及这种变化对机器人运动稳定性和效率的影响。机器人在周向曲面和径向曲面上纵向移动时, 吸附模块对壁面的吸附力分别为 598 和 602 N, 在周向曲面和径向曲面上横向移动时, 吸附模块对壁面的吸附力分别为 782 和 826 N。机器人横向移动时, 无论是在周向曲面上还是在径向曲面上, 吸附力都比纵向移动时高, 这可能是因为横向移动增加了吸附面积或是动态吸附效应提高了吸附力。在纵向移动和横向移动时, 周向曲面和径向曲面上的吸附力非常接近, 即曲面类型对吸附力的影响较小。

综上所述可以看出, 机器人的移动方向和曲面类型都会对其吸附模块的性能造成一定的影响, 需选择合适的吸附装置, 以确保机器人在不同条件下都能保持良好的稳定性和吸附性能。

4 实验验证 (Experimental verification)

为验证方案的可行性和理论分析的正确性, 搭建样机对机器人的吸附性能和运动性能进行测试。机身部分选用铝合金材质, 不仅减轻了自身重量还能保证结构的强度, 其余部分多为 3D 打印件或标准件。机器人采用 4 个扭矩为 2 N·m 的减速电机和 4 个扭矩为 4 N·m 的舵机。其质量参数见表 4。

表 4 机器人质量参数

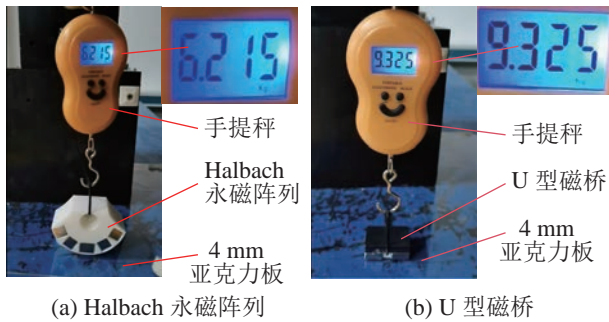
Tab.4 Mass parameters of the robot

名称	质量 /kg
机身 + 控制模块	4×1
驱动模块 + 变向装置	0.03×4
U 型磁桥吸附装置	0.01×4
Halbach 吸附装置	0.02×4

4.1 永磁吸附实验

搭建永磁吸附试验台, 导磁壁面的材料为钢, 厚度为 5 mm, 分别对 Halbach 永磁阵列和 U 型磁桥进行吸附力实验, 以验证模拟数据的准确性, 如图 29(a)(b) 所示。在实验中, 用手提称测量永磁吸附机构的最大可拉重量, 为较好控制气隙间距和减

小实验误差, 使用 1 mm 和 4 mm 的亚克力板模拟气隙间距, 通过增减亚克力板的数量来控制永磁体和壁面之间的气隙。

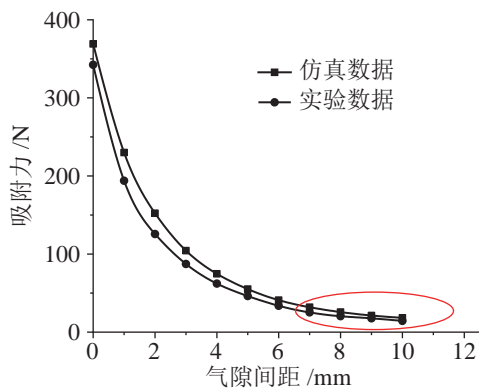


(a) Halbach 永磁阵列 (b) U 型磁桥

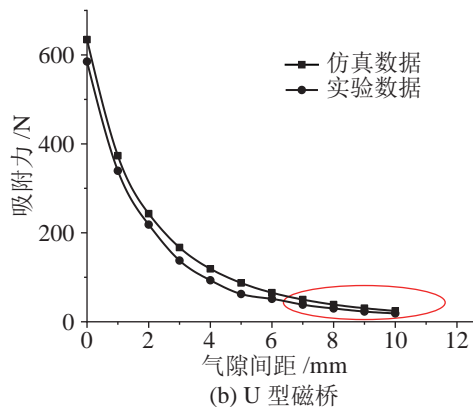
图 29 永磁吸附装置测试

Fig.29 Test of the permanent magnet adsorption device

通过对比实验数据与模拟数据, 可得实验吸附力与模拟吸附力的下降趋势一致, 当气隙间距大于 7 mm 时吸附力下降趋势变缓, 对比可得同一气隙间距下仿真值略高于实验值, 如图 30(a)(b) 所示。分析其原因可能是加工误差导致磁铁未满足模型尺寸, 造成吸附力减小, 或是实际模型漏磁量大于模拟模型的漏磁量, 还可能是亚克力板的加工误差导致实际气隙间距大于模拟值。



(a) Halbach 永磁阵列



(b) U 型磁桥

图 30 实验和仿真中气隙间距与吸附力大小曲线

Fig.30 Absorption force versus air-gap size in the experiment and simulation

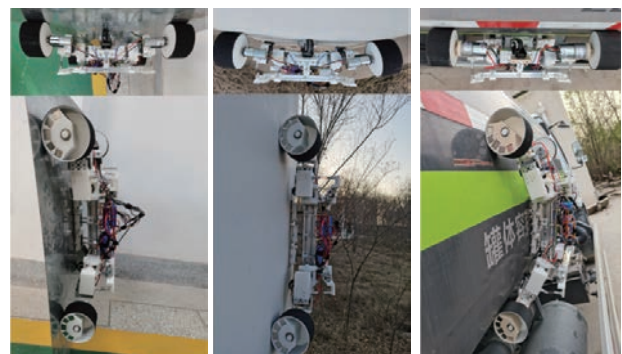
4.2 变曲率自适应爬行实验

将样机置于曲面上, 分别测试机器人的曲面自适应能力、越障能力以及最大负载。

4.2.1 壁面自适应测试

将机器人置于变曲率壁面, 对其自适应吸附、纵向运动、横向运动和转向运动能力进行测试。

机器人在不同曲面的机身姿态如图 31(a)~(c) 所示。当机器人位于曲率半径为 1.5 m 的周向曲面时, 自适应装置根据曲率调节翻转角, 当位于曲率半径为 1 m 的径向曲面时调节俯仰角。



(a) 平面 (b) 周向曲面 (c) 径向曲面

图 31 自适应吸附测试

Fig.31 Adaptive adsorption test



(a) 周向曲面上纵向运动



(b) 径向曲面上纵向运动

图 32 纵向运动测试

Fig.32 Vertical movement test

机器人在周向曲面或径向曲面纵向运动时, 自适应装置在弹簧辅助装置的参与下调整翻转角, 保证 4 个驱动轮贴紧壁面, 实现自适应变曲率纵向移动, 如图 32 所示。当机器人在周向曲面纵向移动时, 曲率半径从下到上逐渐减小, 所以翻转角 θ 逐渐增大, 而俯仰角 ω 约为 0° , 如图 32(a) 所示。当

机器人在径向曲面纵向移动时, 曲率半径从下到上先增大再减小, 则俯仰角 ω 先减小再增大, 翻转角 θ 约为 0° , 如图 32(b) 所示。

机器人在周向曲面和径向曲面上横向移动时, 舵机旋转 90° , 带动驱动轮横向旋转 90° , 在自适应装置和弹簧辅助装置的联合作用下, 驱动轮紧贴壁面, 实现自适应变曲率横向移动, 如图 33 所示。当机器人在周向曲面横向移动时, 移动方向上的曲率半径接近不变, 则翻转角 θ 保持在一定角度不变, 俯仰角 ω 约为 0° , 如图 33(a) 所示。当机器人在径向曲面上横向移动时, 曲率半径从右到左接近不变, 所以俯仰角 ω 保持在一定角度, 翻转角 θ 约为 0° , 如图 33(b) 所示。



(a) 周向曲面上横向运动



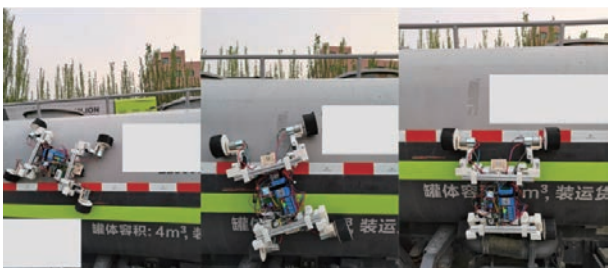
(b) 径向曲面上横向运动

图 33 横向运动测试

Fig.33 Lateral movement test



(a) 周向曲面上转向运动



(b) 径向曲面上转向运动

图 34 转向运动测试

Fig.34 Steering motion test

机器人转向运动时, 一侧驱动轮顺时针旋转, 另一侧驱动轮逆时针旋转, 完成转向动作, 如图 34(a)(b) 所示。当机器人在周向曲面或径向曲面上转向运动时, 由于曲率半径发生变化, 所以翻转角 θ 和俯仰角 ω 都发生一定的变化。

4.2.2 越障测试

为验证机器人在作业过程中通过壁面凸起障碍物的性能, 使用直径 10 mm 的绳索模拟障碍物。机器人越障时, 自适应模块的俯仰角发生变化, 在吸附力的作用下驱动轮越过障碍物。机身永磁装置在滚子的作用下向上收缩, 避免了磁铁和障碍物发生碰撞或阻碍机器人前进, 实现了自适应越障, 测试过程如图 35 所示。

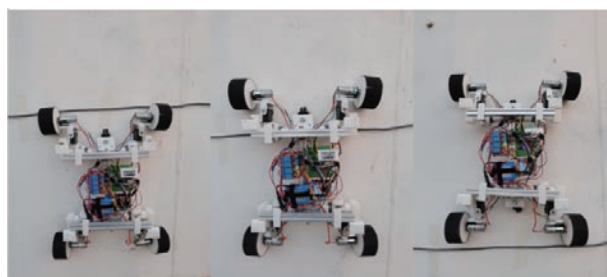


图 35 越障测试

Fig.35 Obstacle crossing test

4.2.3 负载测试

设定负载为 7.2 kg, 开展机器人纵向移动和横向移动实验, 结果表明, 机器人可在曲面上正常运行, 无滑移和倾覆现象, 可满足检测设备的承载要求, 如图 36 所示。

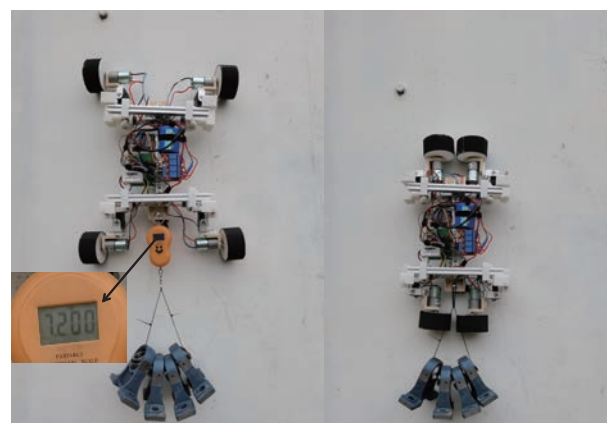


图 36 负载测试

Fig.36 Motion test in loaded conditions

实验证明, 该机器人能够在变曲率壁面上以 0.12 m/s 的速度进行纵向移动、横向移动、越障, 并能搭载 7.2 kg 以内的检测设备对壁面进行检测, 是一种可在变曲率壁面上稳定工作的机器人。

5 结论 (Conclusion)

1) 针对机器人在变曲率金属立面上稳定性弱和自适应能力不足而引起工作失效的问题, 提出一种可以自适应不同曲率金属立面的分离式爬壁机器人。机器人采用间隙式永磁吸附方式与轮式移动方式, 其中 4 个驱动轮相对独立, 可根据壁面曲率大小进行俯仰和翻转运动, 以实现对立立面曲率变化的自适应。

2) 建立了爬壁机器人在壁面上移动的力学模型, 分析了移动方向发生纵/横变换时防止机器人出现滑移和倾覆失效所需要的吸附力, 确定单个永磁模块在安全系数为 1.5 的条件下最小吸附力为 60.03 N。采用数值分析法, 分析了机器人在周向曲面和径向曲面上纵向移动和横向移动时机身姿态在不同曲率壁面上的变化情况, 得到纵向移动时最小可适应的周向曲面和径向曲面的曲率分别为 0.65 和 0.87 m, 横向移动时最小可适应的周向曲面和径向曲面的曲率分别为 0.46 和 0.9 m。最后分析了越障时机身姿态的变化情况。

3) 通过仿真和实验验证了所设计的爬壁机器人在壁面移动、吸附和越障时的稳定性, 分析了气隙间距、立面厚度和不同曲面、不同运动模式对吸附力大小的影响。可知曲面类型和立面厚度对磁吸附力的影响较小, 移动方式和气隙间距对磁吸附力的影响较大, 应合理控制永磁吸附装置与壁面之间的气隙间距, 以保证设备安全运行。

4) 结果表明, 该机器人具有移动灵活、吸附稳定、自适应能力强和具有一定负载能力的特点, 同时通过自身机构之间相互的约束力, 解决了曲率变化所导致的机身姿态变化较大的问题, 为爬壁机器人在变曲率金属立面上的应用提供了理论依据和设计方案。

参考文献 (References)

- [1] 汪潼, 朱世强, 宋伟, 等. 立式罐容量计量中爬壁机器人的路径规划[J]. 机器人, 2024, 46(1): 36-44.
WANG T, ZHU S Q, SONG W, et al. Path planning for wall-climbing robot in volume measurement of vertical tank[J]. Robot, 2024, 46(1): 36-44.
- [2] 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.
- [3] 马吉良, 彭军, 郭艳婕, 等. 爬壁机器人研究现状及发展趋势[J]. 机械工程学报, 2023, 59(5): 11-28.
MA J L, PENG J, GUO Y J, et al. Research status and development trend of wall climbing robot[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2023, 59(5): 11-28.
- [4] LI J, JING S S, WANG C J, et al. Weld line recognition and path planning with spherical tank inspection robots[J]. Journal of Field Robotics, 2022, 39(2): 131-152.
- [5] YANG P, ZHANG M L, SUN L Y, et al. Design and control of a crawler-type wall-climbing robot system for measuring paint film thickness of offshore wind turbine tower[J]. Journal of Intelligent & Robotic Systems, 2022, 106(2): 1-7.
- [6] 李杰超, 曹力科, 肖晓晖. 轮式磁吸附超声检测爬壁机器人的设计与吸附稳定性分析[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2019, 50(12): 2989-2997.
LI J C, CAO L K, XIAO X H, et al. Design and adsorption stability analysis of wall climbing robot based on wheeled magnetic adsorption for ultrasonic detection[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2019, 50(12): 2989-2997.
- [7] JIAO S L, ZHANG X J, ZHANG X, et al. Magnetic circuit analysis of Halbach array and improvement of permanent magnetic adsorption device for wall-climbing robot[J]. Symmetry, 2022, 14(2). DOI: 10.3390/sym14020429.
- [8] JIANG Z, MA Z, JU Z J, et al. Design and analysis of a wall-climbing robot for passive adaptive movement on variable-curvature metal facades[J]. Journal of Field Robotics, 2023, 40(1): 94-109.
- [9] JIANG Z, ZHAO Z, CHEN B, et al. Design and analysis of a passive adaptive wall-climbing robot based on five-bar mechanisms[J]. Ocean Engineering, 2024, 298. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2024.117140.
- [10] WANG Y, ZHANG X J, ZHANG M L, et al. Self-compliant track-type wall-climbing robot for variable curvature facade[J]. IEEE Access, 2021, 10: 51951-51963.
- [11] Zhang D, Li Z H, Jia P, et al. Optimization design and trajectory error compensation of a facade-adaptive wall-climbing robot[J]. Symmetry, 2023, 15(2). DOI: 10.3390/sym15020255.
- [12] LIN S, SONG Y F, WANG H G, et al. Variable curvature adaptation and transformation flow of a passive-compliant magnetic wheeled wall-climbing robot[J]. Mechanism and Machine Theory, 2023, 189. DOI: 10.1016/j.mechmachtheory.2023.105440.
- [13] HU J Y, HAN X, TAO Y R, et al. A magnetic crawler wall-climbing robot with capacity of high payload on the convex surface[J]. Robotics and Autonomous Systems, 2022, 148. DOI: 10.1016/j.robot.2021.103907.
- [14] ZHANG Y L, GUAN E G, LI P X, et al. A novel magnetic circuit design method for a permanent magnetic chuck of a wall-climbing robot[J]. Energies, 2022, 15(18). DOI: 10.3390/en15186653.
- [15] 黄华, 王虎林, 王庆粉, 等. 一种基于行星履带轮越障与混合双吸附补偿的爬壁机器人的设计与研究[J]. 机器人, 2022, 44(4): 471-483.
HUANG H, WANG H L, WANG Q F, et al. Design and study on a wall-climbing robot based on planetary gear track obstacle-surmounting and hybrid double adsorption compensation[J]. Robot, 2022, 44(4): 471-483.

作者简介:

胡晓林 (1998-), 男, 硕士生。研究领域: 机器人结构设计, 机电一体化技术。

黄华 (1978-), 男, 博士, 教授, 博士生导师。研究领域: 特种机器人。