

一种新型负压式爬壁机器人吸附特性分析

董伟光^{1*} 刘爱华² 宋屹峰²

1. 无锡学院交通与车辆工程学院, 无锡, 214105

2. 中国科学院沈阳自动化研究所机器人学国家重点实验室, 沈阳, 110016

摘要: 针对负压吸附式爬壁机器人内部流场复杂、精准建模困难导致的吸附性能优化难题, 提出一种基于流量守恒思维的流场建模方法。根据爬壁机器人负压吸附系统结构特点, 融合热力学定律和 N-S 方程, 以空气流量为关联要素, 构建了吸附系统流场数学模型。利用该模型提取了吸附性能的关键影响因素: 密封圈宽度、泄漏缝隙高度、离心泵功率, 通过改变吸附系统空气流量来改变有效吸附力。仿真与样机试验表明, 所构建的模型能够正确反映吸附性能的变化规律, 可以为负压吸附式爬壁机器人结构及吸附性能优化提供依据。根据爬壁机器人运动特点提出了吸附性能优化策略: 增大额定吸附力自重比的同时减小有效吸附力自重比。

关键词: 爬壁机器人; 负压吸附; 流场模型; 流量分析

中图分类号: TP242

DOI: 10.3969/j.issn.1004-132X.2025.06.007

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Analysis of Adhesion Characteristics of Novel Negative-pressure Adhesion Wall-climbing Robots

DONG Weiguang^{1*} LIU Aihua² SONG Yifeng²

1. School of Transportation and Vehicle Engineering, Wuxi University, Wuxi, Jiangsu, 214105

2. State Key Laboratory of Robotics, Shenyang Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences, Shenyang, 110016

Abstract: Addressing the challenge in optimizing the adhesion performance of wall-climbing robots based on negative pressure adhesion method due to the complexity of internal flow fields and difficulties in precise modeling, a flow field modeling method was proposed based on flow rate conservation. According to the structural characteristics of negative pressure adhesion systems of a wall-climbing robot, mathematical models of airflow field in negative pressure adhesion systems were built by combining the laws of thermodynamics and N-S equations using air flow rate as the related factor. Then, key influencing factors of adhesion performance were identified based on the model: sealing ring width, leakage gap height, and centrifugal pump power. The effective adhesion forces were changing with airflow of adhesion systems. Results of the simulation and prototype experiments show that the models constructed herein may accurately reflect the changing rules of adhesion performance, and may provide evidences for the optimization of adhesion performance of wall climbing robots with negative pressure adhesion method. Finally, according to the movement characteristics of the wall-climbing robots, adsorption performance optimization strategy was increasing the rated adsorption force to self gravity ratio while decreasing the effective adsorption force to self gravity ratio.

Key words: wall-climbing robot; negative-pressure adhesion; flow field model; flow analysis

0 引言

壁面爬行机器人(以下简称爬壁机器人)能够代替操作人员在各种不同倾角的壁面上工作, 达到提高工作效率、保护生命安全以及节约成本的目的^[1-2], 其应用场景包括船舶外表面除锈与喷涂、建筑物外表面清洗与检测、油罐表面探伤与喷涂以及风机叶片或水电大坝检修与维护等^[2]。根

据工作环境的不同, 爬壁机器人可以设计不同的吸附方式, 常见的有负压吸附、磁吸附、推力吸附等。由于负压吸附方式可以和多种类型的移动机构配合, 在可靠吸附壁面的同时达到较好的移动性能, 因此在爬壁机器人中应用比较广泛^[3-4]。负压吸附方式的缺陷在于, 当机器人附着的壁面存在裂缝、局部凸起或凹陷以及壁面弯曲等不利因素时会影响爬壁机器人的吸附效果, 甚至导致倾覆、掉落等严重后果^[5-6]。

为此, 通常有两类解决问题的思路: 一是从增大吸附力角度考虑, 通过增加吸盘数量或者优化

收稿日期: 2024-06-24

基金项目: 国家自然科学基金(52075529); 无锡学院引进人才科研启动专项经费(2024r034)

吸盘结构来提高吸附性能^[7-10]；二是从规避风险的角度考虑,通过改善机器人的运动控制策略来保障运动安全^[11-12]。文献[7-8]研制的负压式爬壁机器人将密封腔分成7个小的吸附腔,即使某个吸附腔严重漏气仍能够维持足够的总体吸附力。文献[9]利用流体网格理论对研制的负压吸附式爬壁机器人构建吸附系统流场模型,分析结构优化策略,保障吸附安全性。文献[10]研制了具有滚动密封结构的负压吸附式爬壁机器人,基于滚动密封机理构建爬壁机器人吸附失效模型,进而提出吸附可靠性优化原则并改进结构设计。文献[11]基于伯努利原理设计了负压吸附式水下船体爬壁机器人,用滑动网格理论进行流体动力学建模,研究螺旋桨速度、机器人底板与吸附物间隙等吸附力影响因素,探索最佳的吸附性能。文献[12-13]研制的小型爬壁机器人配备有智能吸盘足,能有效侦测吸附状态,从控制的角度对机器人运动路径进行有效规划,规避不良吸附环境。

以上研究大多偏向于通过机构、控制策略优化的方法,以增重或降低机动性为代价来提高吸附安全性,并没有达到整体性能优化的目的。部分研究人员以流场理论为指导,对吸附系统进行流场建模研究,从结构优化角度分析吸附性能影响因素,能获取吸附性能优化的综合策略,本文遵循这一思路展开研究。

1 爬壁机器人及其吸附系统

试验样机如图1所示^[14],是一种采用负压吸附方式的轮足复合型爬壁机器人。该机器人由负压模块、真空模块和一个行星轮系机构组成,共有4个自由度。移动装置安装在密封腔内部,由2个驱动轮和1个支撑轮组成。同时,行星轮系机构配合真空吸盘和密封腔的吸附作用组成双足移动机构。机器人具备轮式运动模式、双足运动模式和复合运动模式,能够实现不同倾角壁面上的移动、转向、跨越障碍以及交叉壁面间过渡等功能。机器人主要技术指标见表1。

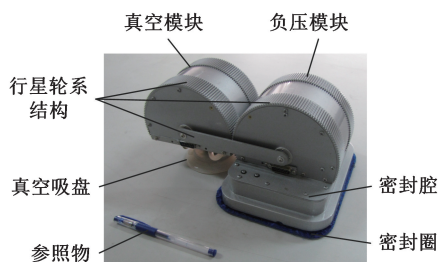


图1 负压吸附爬壁机器人样机

Fig.1 Prototype of negative-pressure adhesion wall-climbing robot

表1 机器人样机主要技术参数

Tab.1 Main technical parameters of the robot prototype

序号	技术指标	参数
1	外形尺寸/(mm×mm×mm)	298×212×140
2	密封腔尺寸/(mm×mm×mm)	180×136×44
3	密封圈宽度/mm	10
4	质量/kg	1.9
5	平均移动速度/(m·min ⁻¹)	4

该爬壁机器人以轮式运动模式为主,通过特殊设计的负压吸附系统与其配合,实现期望的运动功能。负压吸附系统结构如图2所示,主要由离心泵和带有密封圈的密封腔组成。离心泵包含马达和离心风扇,是形成密封腔内负压的动力来源。在离心泵作用下,密封腔内的空气被抽吸至外部,在密封腔内部形成负压区(压力低于大气压力)。密封腔和吸附壁面之间通过密封圈增强密封效果,保障密封腔内稳定的负压,进而在机器人外表面形成稳定的正压力 F_p ,使其吸附于壁面。密封圈主要由表面覆盖有特氟龙材料的气囊组成,可使爬壁机器人在轮式运动模式下既维持良好密封性又减小运动时密封单元的摩擦阻力,同时尽可能减小密封圈所分配的吸附力。在相同密封效果下,吸附力只有尽可能多地分配至驱动轮才能提供更好的驱动性能。

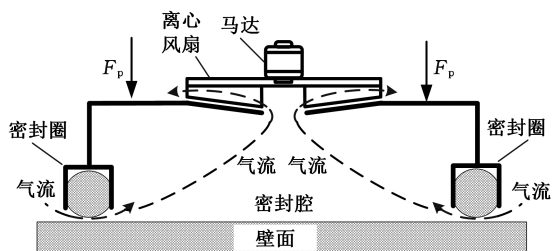


图2 负压吸附系统结构及壁面吸附原理

Fig.2 The structure and adhesion principle of negative-pressure adhesion system

2 吸附系统流场数学模型

为解决负压吸附系统复杂流场状态带来的建模难题,将爬壁机器人负压吸附系统看成由离心泵单元和密封单元两个相互联系的开口系统组成,如图3所示。分别对各单元进行建模,基于工作状态下两个单元的流量关系进行模型整合,形成负压吸附系统完整的流场模型。

工作状态下负压吸附系统的气流循环始终存在,因此流场状态有静参数和总参数之分。密封腔内的流场参数标记为静压 p_1 、总压 p_1^* 、总温 T_1^* 。该参数既是离心泵单元入口气流参数,又是经密封单元节流之后的气流参数。气流经离心泵做功后在离心风扇出口处的气流参数标记为静压

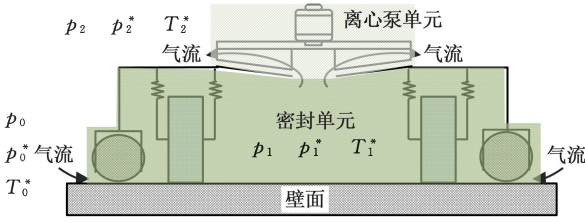


图 3 负压吸附系统流场状态

Fig.3 Flow field state of the negative-pressure adhesion system

p_2 、总压 p_2^* 、总温 T_2^* 。密封圈入口处气流参数（即外部大气参数）标记为静压 p_0 、总压 p_0^* 、总温 T_0^* 。由于外部大气受吸附系统气流流动影响较小，因此 $p_0^* \approx p_0$ 。离心风扇出口处气流影响区域相对较小，因此可以认为 $p_2^* \approx p_0^*$ 。

2.1 离心泵单元流场建模

对离心泵单元这一开口系应用热力学第一定律，可知其一般瞬态能量方程为

$$\delta Q = dE + \delta W = dE + \delta m_{out} (h + \frac{c_f^2}{2} + gz)_{out} - \delta m_{in} (h + \frac{c_f^2}{2} + gz)_{in} + \delta W_s \quad (1)$$

式中： δQ 为系统与外界交换的热量； dE 为系统总能量的变化； δW 为系统做的功； W_s 为系统做的轴功； m_{in} 、 m_{out} 为进出开口系的气体质量； h_{in} 、 h_{out} 为进出开口系气体的比焓； $(c_f)_{in}$ 、 $(c_f)_{out}$ 为进出开口系的空气流速； $(gz)_{in}$ 、 $(gz)_{out}$ 为进出开口系的单位质量气体所具有的势能； g 为重力加速度； z 为气体在离心泵中的移动高度。

稳定工作状态下，该开口系内空气流动可看作一维定常流动，因此

$$\left. \begin{aligned} dE &= 0 \\ \delta m &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

根据式(1) 可得单位质量气体的一维定常流动能量方程为

$$q = \Delta h + \frac{(\Delta c_f)^2}{2} + g \Delta z + w_s = \Delta h + w_t \quad (3)$$

式中： q 为单位质量气体的能量； Δh 为离心泵进出口气体比焓的变化； Δc_f 为离心泵进出口气体速度的变化； w_s 为轴功； w_t 为技术功。

离心泵单元进出口高度接近， $g \Delta z \approx 0$ 。

对于离心泵单元，与气体得到的功相比，流动过程向外界散热较少，可以忽略。工作状态可看作绝热等熵过程，技术功等于焓的减少。此时离心泵单元的功耗为

$$w_c^p = w_s = w_t - \frac{(\Delta c_f)^2}{2} = \frac{\kappa R_g T_1}{\kappa - 1} (1 - \pi_c^{\frac{\kappa-1}{\kappa}}) - \frac{(\Delta c_f)^2}{2} \quad (4)$$

$$\pi_c = p_2/p_1$$

式中： κ 为定熵指数； R_g 为气体常数； T_1 为密封腔内的流场静态温度。

利用总参数进行表达时，离心泵单元功耗为

$$w_c^p = (h_1 + \frac{c_{f1}^2}{2}) - (h_2 + \frac{c_{f2}^2}{2}) = h_1^* - h_2^* = \frac{\kappa R_g T_1^*}{\kappa - 1} (1 - \frac{T_2^*}{T_1^*}) = \frac{\kappa R_g T_1^*}{\kappa - 1} (1 - \pi_c^{\frac{\kappa-1}{\kappa}}) \quad (5)$$

$$\pi_c^* = p_2^*/p_1^*$$

式中： h_1 、 h_2 分别为离心泵进出口的气体静比焓； p_1^* 、 p_2^* 分别为离心泵进出口的气体总比焓； c_{f1} 、 c_{f2} 分别为离心泵进出口的气体速度。

离心泵单元流速大、摩擦大，工作中存在不可逆损失，用离心泵效率 η_c 来衡量此损失，则

$$\eta_c = w_c^p/w_c^N \quad (6)$$

式中： w_c^N 为实际不可逆过程所消耗的功。

离心泵效率与其设计和制造精度有关，通常 η_c 介于 0.8 ~ 0.9 之间。

离心泵单元消耗的功率为

$$\dot{W}_2 = q_{m2} w_c^N = \rho q_{v2} w_c^N \quad (7)$$

式中： q_{m2} 为质量流量； q_{v2} 为体积流量； ρ 为气体密度。

2.2 密封单元流场建模

密封单元的主要参数如图 4 所示。由于密封单元和吸附壁面间狭缝很小，可将狭缝视为平面，则狭缝高度 H 为常数。同时，由于 H 很小，雷诺数较小，可认为此处气流流动为层流。在图 4 中建立三维坐标系， X 、 Y 轴方向如图所示， Z 轴方向根据右手定则确定。气流沿 Y 、 Z 轴方向的流动分速度均可视为零。

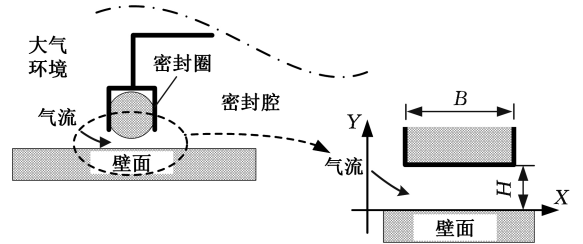


图 4 密封单元主要参数

Fig.4 The main parameters of sealing unit

通过密封圈的气流流动可看作黏性不可压缩流体的定常流动^[15]，黏度、密度为常数，由 N-S 方程简化得流动方程为

$$\left. \begin{aligned} u \frac{\partial u}{\partial x} &= -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \nu (\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2}) \\ -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} - g &= 0 \quad -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} = 0 \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

$$\nu = \mu/\rho$$

式中： ν 为气体运动黏度； μ 为气体的动力黏度； p 为密封圈缝隙处的压力； u 为气流沿 X 轴方向的流速。

根据质量守恒定律可推得流动过程的连续性方程：

$$\frac{\partial p}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w)}{\partial z} = 0 \quad (9)$$

式中： v 、 w 分别为气流沿 Y 、 Z 轴方向的流速。

由于密度为常数,且泄漏缝隙内的空气流动只沿 X 轴方向,则式(9)可简化为

$$\frac{\partial u}{\partial x} = 0 \quad (10)$$

在图 4 所示坐标系中,根据边界条件可知

$$\left. \begin{aligned} y = 0, u = 0 \\ y = H, u = u_0 \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

式中: u_0 为机器人相对于吸附壁面的移动速度。

对于机器人密封圈, Z 方向尺寸比 H 大得多,则 $\partial u / \partial z$ 为微小值,可忽略不计。由连续性方程(式(10))可知, u 与 x 无关,因此, u 仅为 y 的函数。

由流动方程(式(8))可知,压力与 z 无关,则 p 的表达式可写为

$$p = -\rho g y + f(x) \quad (12)$$

式中: $f(x)$ 为以 x 为自变量的函数。

由于 H 很小, p 沿 y 方向变化不大,由此可知, p 仅为 x 的函数。

根据以上分析,由式(8)可得

$$\frac{dp}{dx} = \mu \frac{d^2 u}{dy^2} \quad (13)$$

式(13)等号左边仅与 x 有关,右边仅与 y 有关,能满足此方程的条件只能是左右两边都等于同一个常数。当压力梯度为常数时,对式(13)两次积分,可得

$$u = \frac{1}{2\mu} \frac{dp}{dx} y^2 + A_1 y + A_2 \quad (14)$$

式中: A_1, A_2 为积分常数。

将边界条件式(11)代入式(14),可得

$$u = \frac{1}{2\mu} \frac{dp}{dx} y^2 + \left(\frac{A_2}{H} - \frac{1}{2\mu} \frac{dp}{dx} H \right) y \quad (15)$$

当机器人静止时, $u_0 = 0$, 则

$$u = -\frac{1}{2\mu} \frac{dp}{dx} (H - y) y \quad (16)$$

对于爬壁机器人密封圈的泄漏入口,在计算时可将其展开,看成高 H 、长 l 的长方形。 $l = 2(l_a + l_b)$, l_a, l_b 为密封圈长边、短边的长度。

密封圈气体泄漏量 q_{v1} 为

$$q_{v1} = \int_0^h |u| l dy = \frac{lH^3}{12\mu} \frac{dp}{dx} \quad (17)$$

所以

$$dp = q_{v1} \frac{12\mu}{lH^3} dx \quad (18)$$

对式(18)积分可得密封圈上压力分布规律:

$$p = q_{v1} \frac{12\mu}{lH^3} x + C \quad (19)$$

式中: C 为积分常数。

密封圈内外压力已知,令

$$\left. \begin{aligned} x = x_0, p = p_0 \\ x = x_1, p = p_1 \end{aligned} \right\} \quad (20)$$

式中: x_0, p_0 为密封圈外侧在 X 轴方向的坐标及压力; x_1, p_1 为密封圈内侧在 X 轴方向的坐标及压力。

将式(20)代入式(19),可求得积分常数

$$C = p_0 - \frac{12\mu q_{v1}}{lH^3} x_0 = p_1 - \frac{12\mu q_{v1}}{lH^3} x_1 \quad (21)$$

可知

$$\Delta p = p_0 - p_1 = \frac{12\mu q_{v1}}{lH^3} (x_0 - x_1) = \frac{12\mu q_{v1}}{lH^3} B \quad (22)$$

式中: B 为密封圈宽度。

因此

$$q_{v1} = \frac{lH^3}{12\mu} \frac{p_0 - p_1}{x_0 - x_1} = \frac{lH^3}{12\mu} \frac{\Delta p}{B} \quad (23)$$

2.3 负压系统整体流场模型

吸附系统在稳定工作状态下密封单元的气体泄漏量 q_{v1} 等于离心泵单元的气体排出量 q_{v2} , 因此能够维持密封腔内外稳定的压差,即

$$q_{v1} = q_{v2} \quad (24)$$

结合式(7),可得负压吸附系统的功率为

$$\begin{aligned} \dot{W} = \dot{W}_2 = q_{m2} \omega'_c = \rho q_{v2} \frac{\kappa R_g T_1^*}{\kappa - 1} (1 - \pi_c^{\frac{\kappa-1}{\kappa}}) &= \\ \rho \frac{lH^3}{12\mu} \frac{\Delta p}{B} \frac{\kappa R_g T_1^*}{\kappa - 1} (1 - \pi_c^{\frac{\kappa-1}{\kappa}}) &= \end{aligned} \quad (25)$$

3 吸附性能影响因素分析

3.1 密封单元

由式(23)可知,密封单元气体泄漏量(功耗损失)与缝隙高度的三次方、密封圈周长以及压差(形成的吸附力)成正比,与密封圈宽度成反比。根据式(23)可以获得密封单元相关尺寸和空气泄漏量之间的变化关系,如图 5 所示。样机相关参数取值如表 2 所示。为进一步分析缝隙高度、密封圈宽度对气体泄漏量的影响,分别取密封单元泄漏缝隙高度为 0.4 mm 和 1 mm,可获得气体泄漏量与密封圈宽度之间的变化关系,如图 6 所示。其中, F 代表不同压差对应的有效吸附力,即密封腔内外部压差与爬壁机器人有效吸附面积

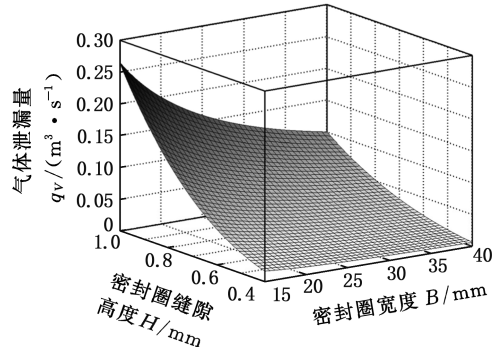


图 5 密封单元尺寸与空气泄漏量的关系

Fig.5 Relationship between sealing unit size and air leakage amount

表 2 仿真分析中的相关参数

Tab.2 Relevant parameters used in simulation analysis

参数	数值
密封单元周长 l/mm	704
密封单元有效吸附面积 S/m^2	0.024
环境温度 T_0/K	293
环境大气密度 $\rho/(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	1.2
环境大气动力黏度 $\mu/(\text{N} \cdot \text{s} \cdot \text{m}^{-2})$	1.81×10^{-5}
环境大气运动黏度 $\nu/(\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1})$	1.5×10^{-5}
气体常数 $R_g/(\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1})$	287.6
离心泵单元效率 η_c	0.8

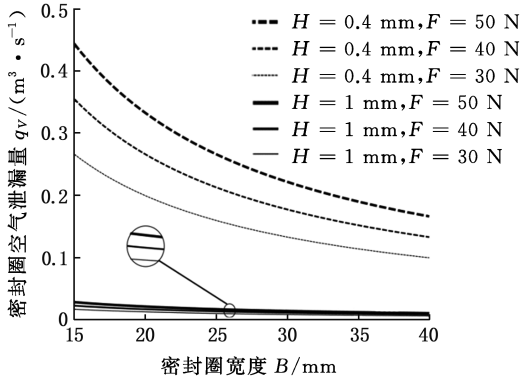


图 6 密封圈宽度与空气泄漏量的关系

Fig.6 Relationship between sealing ring width and air leakage amount

的乘积。由图 6 可知,缝隙高度增加对气体泄漏量的影响更大。在泄漏缝隙高度很小(0.4 mm)的情况下,密封圈的宽度、压差对气体泄漏量并无多大影响。此外,密封圈的宽度受到机器人整体尺寸的限制,不能任意增大以降低气体泄漏量。且增大宽度后会增大机器人质量,不一定能提高吸附安全性。因此,在密封单元设计时,要尽可能减小泄漏缝隙高度。

在密封单元设计一定的前提下,提高吸附力意味着增加密封单元的空气泄漏量。此时要提高离心泵单元的性能才能在单位时间内排出更多的气体,从而维持更低的负压。

3.2 离心泵单元

由式(5)、式(7)可知,流量和压差是离心泵单元性能的重要体现。对于离心泵单元的设计,其流量-压差特性决定了能否与所设计的密封单元相配合满足整体的吸附力需求。根据式(7)可获得吸附力(压差)、气体流量以及离心泵功率的变化关系,如图 7 所示。其中,有效吸附力为离心泵进出口压差与爬壁机器人有效吸附面积的乘积。要维持更大的吸附力,单位时间内排除相同的气体量所需要提供的功率也更大。这对离心泵单元尤其是离心风扇的设计提出了更高的要求。

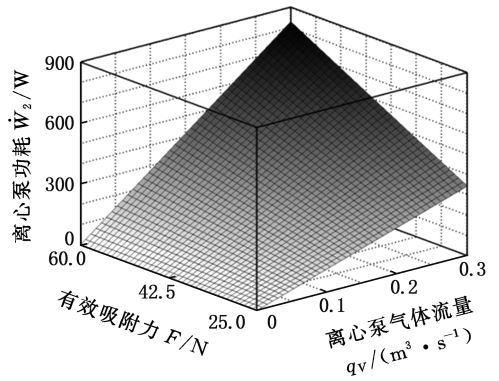


图 7 离心泵单元功耗影响因素分析

Fig.7 Influence factors analysis of power consumption of centrifugal pump unit

确定了流量和压差即可对离心泵单元具体尺寸进行设计,本文不再赘述。

4 试验验证分析

4.1 简化模型仿真验证

在 FLUENT 仿真环境下构建爬壁机器人简化模型,如图 8 所示,不考虑密封腔内部布局结构及离心泵单元泄漏对流场的影响,然后进行仿真。

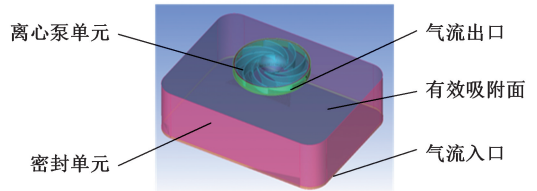


图 8 爬壁机器人仿真简化模型

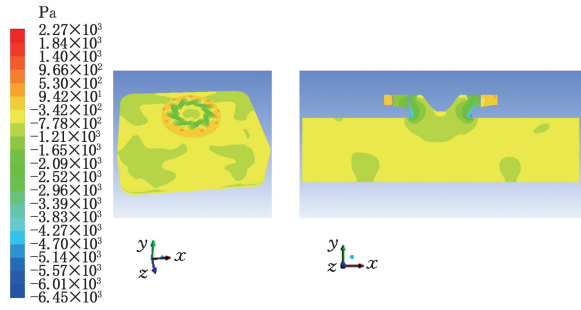
Fig.8 Simplified simulation model of the wall-climbing robot

仿真 I、仿真 II 分别在密封圈泄漏缝隙高度为 2 mm 和 1 mm 时测试离心泵功率(此处用离心风扇转速代替)对吸附性能的影响;仿真 III 增加了一定宽度的密封圈。仿真试验参数设置及吸附力仿真结果见表 3。仿真试验 I、II、III 的负压吸附系统内部压力分布见图 9、图 10、图 11。

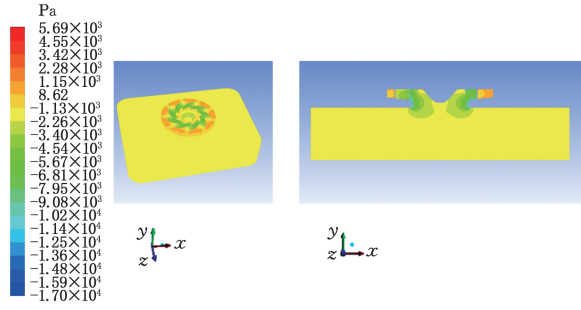
表 3 仿真分析中的参数设置及结果

Tab.3 Parameter settings in simulation analysis and the results

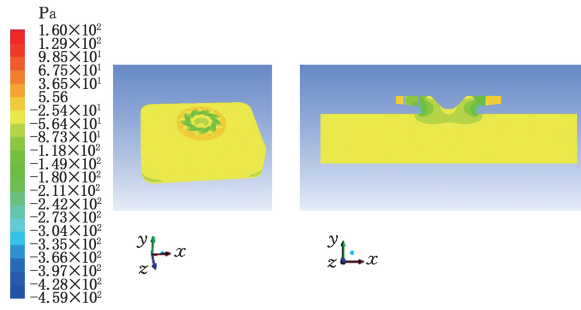
仿真	泄漏缝隙高度 H/mm	密封圈宽度 B/mm	离心风扇转速/ $(\text{rad} \cdot \text{s}^{-1})$	吸附力/ N
I-1	2	0	3000	15.4
I-2	2	0	5000	41.7
I-3	2	0	8000	108
II-1	1	0	1047	5.8
II-2	1	0	3000	48.3
II-3	1	0	5000	137
III-1	2	10	5000	44
IV-1	1	0	1885	43.8



(a) 侧视图(仿真 I-1) (b) 剖视图(仿真 I-1)



(c) 侧视图(仿真 I-2) (d) 剖视图(仿真 I-2)



(e) 侧视图(仿真 I-3) (f) 剖视图(仿真 I-3)

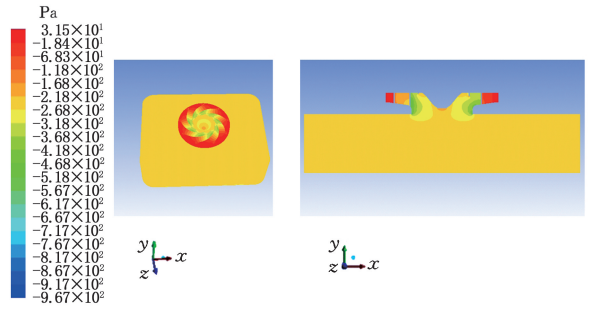
图 9 负压吸附系统内部压力分布(仿真 I)

Fig.9 Internal pressure distribution of negative-pressure adhesion system(simulation I)

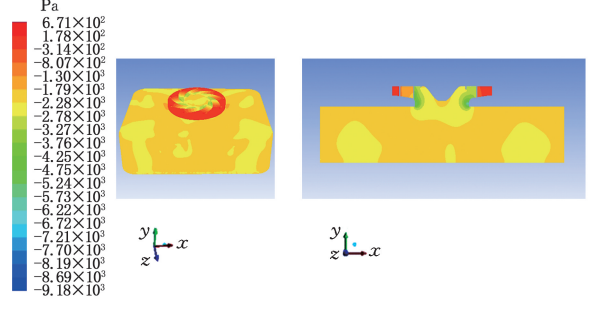
在泄漏缝隙高度一定的前提下,对比仿真 I、II 可知:随叶轮转速的增大,有效吸附面上的平均压力更低,意味着负压吸附系统能够提供更大的吸附力。因此,当密封单元气体泄漏严重(如遇到不规则壁面或缝隙)导致内部压力升高、壁面吸附压力降低时,可以通过快速提高离心风扇转速进行补救,但更高的转速对离心泵单元驱动电机的性能要求也更高,转速不可能无限提高。

在转速一定的前提下,对比仿真 I、II、III 可知,当减小密封圈泄漏缝隙高度时,气体泄漏量减小,同时负压吸附系统能够提供的吸附力显著增大,能更好地保证爬壁机器人工作安全性。

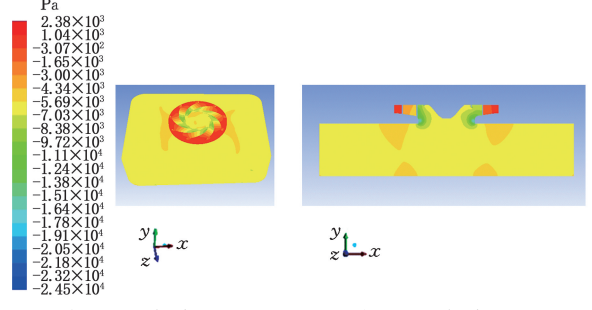
综合仿真结果可知,离心风扇转速(功率)、密封圈高度以及密封圈宽度都会对吸附力产生影响。当吸附壁面粗糙或不规则导致气体泄漏量增加时,提高离心风扇转速是有效的补救措施。但是转速的增大无疑会增大功耗、提高噪声、降低效



(a) 侧视图(仿真 II-1) (b) 剖视图(仿真 II-1)



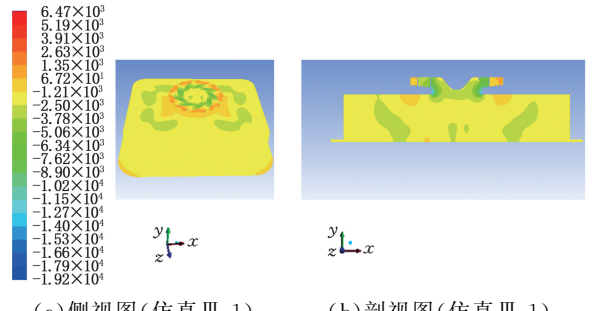
(c) 侧视图(仿真 II-2) (d) 剖视图(仿真 II-2)



(e) 侧视图(仿真 II-3) (f) 剖视图(仿真 II-3)

图 10 负压吸附系统内部压力分布(仿真 II)

Fig.10 Internal pressure distribution of negative-pressure adhesion system(simulation II)



(a) 侧视图(仿真 III-1) (b) 剖视图(仿真 III-1)

图 11 负压吸附系统内部压力分布(仿真 III)

Fig.11 Internal pressure distribution of negative-pressure adhesion system(simulation III)

率,甚至会导致振动过大,影响正常工作,因此转速的选择应视具体情况而定。通过改进密封圈设计,减小相同壁面状况下密封单元的泄漏量也能明显提高吸附性能。

4.2 近似模型仿真验证

上述简化模型未考虑负压腔内部零部件对流

场的影响,因此本节建立一个实际物理样机的近似模型进行流场仿真分析,如图 12 所示。基于此模型进行仿真Ⅳ,参数设置及吸附力结果见表 3,负压系统内部压力分布如图 13 所示。

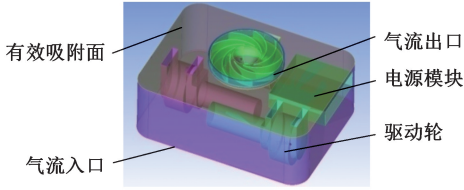
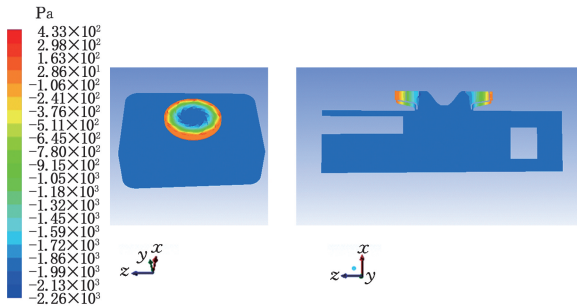


图 12 爬壁机器人仿真近似模型

Fig.12 Approximate model of the wall-climbing robot



(a) 侧视图(仿真Ⅳ-1) (b) 剖视图(仿真Ⅳ-1)

图 13 负压吸附系统内部压力分布(仿真Ⅳ)

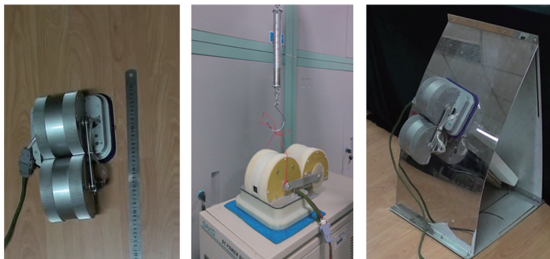
Fig.13 Internal pressure distribution of negative-pressure adhesion system(simulation IV)

通过仿真分析可知:近似模型与简化模型相比,在相同风扇转速下所提供的气压差变小,可知密封腔内部设备会对流场运转效率产生一定影响,因此,在进行机构设计时,应考虑简化密封腔内部设备布置。

基于简化模型和近似模型仿真,仿真数据所体现出的各因素对吸附性能变化趋势的影响与第 3 节理论模型是一致的,印证了理论模型的有效性。

4.3 样机试验验证

在仿真验证的基础上,结合物理样机对流场数学模型进行测试验证,如图 14 所示。



样机测试 V-1 样机测试 V-2 样机测试 V-3

图 14 吸附性能影响因素样机测试 V

Fig.14 Prototype testing V of adhesion performance influence factors

样机测试 V-1、V-2 的密封圈宽度不同,测试环境均为无缝隙平面,代表相同的泄漏缝隙高度。

拉力计的值减机器人自身重力得到吸附系统所能提供的有效吸附力的值。由表 4 测试结果可知,密封圈宽度增大后,吸附力明显增大。

样机测试 V-1、V-3 的密封圈宽度相同,测试环境分别为平面和曲面,代表不同的泄漏缝隙高度。在样机测试 V-3 中,机器人制动,采用拉力计沿曲面切向拉动机器人,进而将拉力计的值减去机器人重力后,通过摩擦因数转换成有效吸附力的值。由表 4 测试结果可知,泄漏缝隙增大后,吸附力明显减小,影响壁面吸附安全性。

表 4 样机测试参数设置及结果

Tab.4 Parameter settings of prototype testing and the results

测试类型	测试编号	密封圈宽度/mm	泄漏缝隙高度/mm	有效吸附力/N
样机试验	V-1	10		≈30
	V-2	30		≈36
	V-3	10		≈21
理论计算	T-1	10	0.5	≈48
	T-1	30	0.5	≈82
	T-1	10	1	≈17

通过样机测试,验证了密封圈宽度、泄漏缝隙高度等参数对吸附性能的影响,且与理论计算结果所体现的趋势是一致的,进一步说明所推导流场理论模型的可靠性。

5 吸附性能优化策略

对于爬壁机器人,吸附力并非越大越好。从负载、功耗等方面综合考虑,在提高吸附力的同时应不过分增大机器人质量。同时,爬壁机器人维持正常运动所需要的吸附力应越小越好。因此,本文提出额定吸附力自重比和有效吸附力自重比的概念作为爬壁机器人吸附特性的评价指标。此处设定:额定吸附力为爬壁机器人所能提供的最大吸附力;有效吸附力为爬壁机器人维持正常运动作业所需最小吸附力。对于负压吸附式爬壁机器人,吸附性能优化策略是在增大额定吸附力自重比的同时减小有效吸附力自重比。

6 结论

1)基于热力学定律和 N-S 方程,以空气流量为关联要素,构建了负压吸附式爬壁机器人吸附系统的流场数学模型,为吸附性能影响因素的精细化分析提供了理论依据。

2)在 FLUENT 仿真环境中对吸附性能的变化规律进行仿真分析,并配合物理样机进行验证测试。仿真与样机试验结果表明所构建的流场模型能够正确反映负压吸附系统吸附性能的变化规

律,可以为负压吸附式爬壁机器人的吸附特性优化提供依据。

3)提出额定吸附力自重比和有效吸附力自重比的概念,为基于本文构建的流场数学模型探索负压吸附式爬壁机器人吸附性能最佳优化方向提供指引。

参考文献:

[1] ZHANG Mingliang, SUN Guoxiang, LIU Pengfei, et al. Research on Force Characteristics and Running Performance of Novel Type High-temperature Superconductor Magnetic Levitation Vehicle [J]. Journal of Superconductivity and Novel Magnetism, 2022, 35(3):635-646.

[2] 聂佩晗, 张雅婷, 陈勇. 爬壁机器人发展与关键技术综述[J]. 机床与液压, 2022, 50(4):155-161.

NIE Peihan, ZHANG Yating, CHEN Yong. Review on the Development and Key Technology of the Wall-climbing Robot[J]. Machine Tool & Hydraulics, 2022, 50(4):155-161.

[3] YANG Liang, LI Bing, FENG Jinglun, et al. Automated Wall-climbing Robot for Concrete Construction Inspection[J]. Journal of Field Robotics, 2023, 40(1):110-129.

[4] NAVAPRAKASH N, UPPU R, MUTHUKUMARAN G, et al. Modeling and Experimental Analysis of Suction Pressure Generated by Active Suction Chamber Based Wall Climbing Robot with a Novel Bottom Restrictor[J]. Procedia Computer Science, 2018, 133:847-854.

[5] LONGO D, MUSCATO G. The Alicia/Sup 3/ Climbing Robot; a Three-module Robot for Automatic Wall Inspection[J]. IEEE Robotics & Automation Magazine, 2006, 13(1):42-50.

[6] ZHU Haifei, GUAN Yisheng, WU Wenqiang, et al. Autonomous Pose Detection and Alignment of Suction Modules of a Biped Wall-climbing Robot [J]. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 2015, 20(2):653-662.

[7] WETTACH J, HILLENBRAND C, BERNS K. Thermodynamical Modelling and Control of an Adhesion System for a Climbing Robot[C]//Proceedings of the 2005 IEEE International Conference on Robotics and Automation. Barcelona, 2005: 2727-2732.

[8] HILLENBRAND C, SCHMIDT D, BERNS K. CROMSCI:Development of a Climbing Robot with Negative Pressure Adhesion for Inspections[J]. Industrial Robot, 2008, 35(3):228-237.

[9] QIAN Zhiyuan, ZHAO Yanzheng, FU Zhuang, et

al. Fluid Model of Sliding Suction Cup of Wall-climbing Robots[J]. International Journal of Advanced Robotic Systems, 2006, 3(3):39.

[10] 刘志辉, 蔡伟, 付兴伟, 等. 一种滚动密封爬壁机器人失效分析[J]. 中国机械工程, 2022, 33(22): 2755-2763.

LIU Zhihui, CAI Wei, FU Xingwei, et al. Failure Analysis of a Rolling Sealed Wall Climbing Robots [J]. China Mechanical Engineering, 2022, 33(22):2755-2763.

[11] GUO T T, DENG Z D, LIU X Y, et al. Development of a New Hull Adsorptive Underwater Climbing Robot Using the Bernoulli Negative Pressure Effect[J]. Ocean Engineering, 2022, 243: 110306.

[12] LAL TUMMALA R, MUKHERJEE R, XI Ning, et al. Climbing the Walls[Robots][J]. IEEE Robotics & Automation Magazine, 2002, 9(4):10-19.

[13] 姜勇, 王洪光, 房立金. 基于主动试探的微型爬壁机器人步态控制[J]. 机械工程学报, 2009, 45(7):56-62.

JIANG Yong, WANG Hongguang, FANG Lijin. Gait Control of Micro Wall-climbing Robot Based on Initiative Exploration[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2009, 45(7):56-62.

[14] DONG Weiguang, WANG Hongguang, LI Zhenhui, et al. Development of a Wall-climbing Robot with Biped-wheel Hybrid Locomotion Mechanism [C]//2013 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. Tokyo, 2013: 2333-2338.

[15] 陈匡民, 董宗玉, 陈文梅. 流体动密封[M]. 成都: 成都科技大学出版社, 1990:15-41.

CHEN Kuangmin, DONG Zongyu, CHEN Wenmei. Fluid Dynamic Seal [M]. Chengdu: Chengdu University of Science and Technology Press, 1990: 15-41.

(编辑 王旻玥)

作者简介:董伟光* (通信作者),男,1984年生,博士、助理研究员。主要研究方向为机器人机构学、道路交通安全与事故预防技术。E-mail:860357@cwuxu.edu.cn。

本文引用格式:

董伟光,刘爱华,宋屹峰.一种新型负压式爬壁机器人吸附特性分析[J]. 中国机械工程,2025,36(6):1198-1205.

DONG Weiguang, LIU Aihua, SONG Yifeng. Analysis of Adhesion Characteristics of Novel Negative-pressure Adhesion Wall-climbing Robots[J]. China Mechanical Engineering, 2025, 36(6):1198-1205.