

滑动式爬壁机器人负压吸附机构低能耗设计*

吴善强, 黄佩佩, 武丽君, 毛悦生

(中国计量学院 机械电子研究所, 浙江 杭州 310018)

摘要:为解决目前滑动式爬壁机器人能耗效率低下的问题,将低能耗设计技术应用到负压吸附机构设计中。开展了机器人安全吸附、负压吸附机构流体力学分析,得到了机器人工作负压、流量与吸盘尺寸、密封裙尺寸的关系,建立了机器人总体能耗与机器人尺寸之间的关系,并提出了应用现代计算流体力学方法,在负压发生器即离心风机上进行了流场仿真,对其特性进行了评价,并进行了滑动式负压吸附爬壁机器人负压吸附机构试验。其结果表明爬壁机器人系统能耗控制在 298 W 以内,负压吸附机构可提供 2.5 kPa 的负压,机器人可以稳定吸附在壁面,为爬壁机器人的低功耗设计提供了理论和实践基础。

关键词:爬壁机器人;负压吸附机构;低能耗设计

中图分类号:TH122;TH123;TP242.2

文献标志码:A

文章编号:1001-4551(2011)03-0320-04

Design of low power consumption negative pressure generator of a sliding wall climbing robot

WU Shan-qiang, HUANG Pei-pei, WU Li-jun, MAO Tang-sheng
(Mechatronics Institute, China Jiliang University, Hangzhou 310018, China)

Abstract: In order to solve the problems of sliding wall climbing robot's great power consumption and low efficiency design, a negative pressure generator of the low power consumption and high efficiency was investigated. After the analysis of robot's pressure needed and flow leakage fluid dynamics, the relationship between negative working pressure, suction mechanism's leakage flow and size of suction cup, sealing mechanism was established. With the computational fluid dynamics (CFD) tool, a low noise and high efficiency centrifugal fan was designed and the performances of low pressure generator were evaluated. The robot's overall power consumption under variable conditions were tested. The experimental results show that the power consumption is below 298 W, while 2.5 kPa negative pressure can be stably generated so that robot can stick firmly on wall. The theoretical and experimental result of research on wall climbing robot contributes to further perfecting the performance of robot.

Key words: wall climbing robot; negative pressure generator; low power consumption design

0 引 言

壁面移动机器人又称爬壁机器人,它的突出特点是可以克服重力作用,在一定倾斜度、垂直或者倒立的壁面上具有静止及移动的能力。它主要应用于核工业、建筑业,消防系统和安检部门的检测、喷涂、清洗、侦查等任务。目前爬壁机器人的吸附方式主要包括负压吸附、磁吸附、真空吸附、螺旋桨推压、静电吸附以及

仿生粘液吸附、抓持方式等^[1-4]。比较不同吸附方式,负压吸附方式对不同材质壁面具有较良好的适应能力,因而得到了广泛的应用。对于滑动式负压吸附爬壁机器人而言,负压发生器对吸盘抽吸空气,与吸盘的空气泄漏动态平衡,则吸盘内产生一定程度的负压,内外负压差使机器人吸附在壁面上;负压发生技术是影响机器人综合性能及能耗的一个关键技术。目前国内国外研究的滑动式机器人通常采用文丘里器、吸尘器风

收稿日期:2010-09-27

基金项目:国家自然科学基金资助项目(50905170);浙江省教育厅资助项目(Y200909253);浙江省自然科学基金资助项目(Y1090042)

作者简介:吴善强(1977-),男,浙江义乌人,博士,硕士生导师,主要从事机器人技术、运动控制方面的研究。E-mail: wallrobot@gmail.com

机、基于空气动力学技术的风扇、龙卷风模拟技术等^[5-7]。滑动式吸盘技术是影响机器人综合性能及能耗的另一个关键技术,与一般的吸盘相比有本质的不同,滑动式爬壁机器人吸盘和壁面之间存在相对移动,空气泄漏不可避免。目前国内外研究的滑动式负压吸附爬壁机器人采用多种吸盘密封机构^[8-11],如组合弹簧气胎、柔性泡沫材料、猪鬃组合迷宫等。通常将负压发生器与滑动式吸盘作为设计的两个独立部分,缺乏从系统能耗整体角度出发进行的研究。

为此,本研究从整体能耗的角度出发,设计了满足要求的高效低能耗负压吸附机构。

1 爬壁机器人吸附负压计算

当爬壁机器人工作于竖直墙壁上时,对机器人进行竖直平面内任意姿态的安全受力分析。为了简化分析,只需对吸附力要求最高的直线向上运动状态的爬壁机器人受力状态进行分析。当爬壁机器人在竖直平面上以与竖直呈 θ 角姿态直线向上运动时,其受力如图1所示。

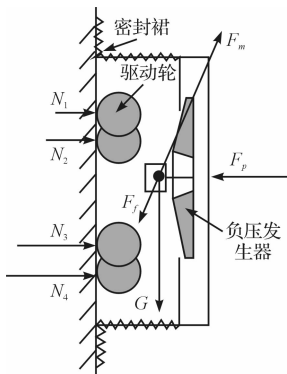


图1 任意姿态爬壁机器人受力简图

根据达朗贝尔虚功原理及受力平衡关系,竖直壁面任意姿态机器人直线运动的受力方程为:

$$\begin{cases} N_1 + N_2 + N_3 + N_4 - F_p = 0 \\ F_m - F_f - Ma - G \cos \theta = 0 \\ (N_1 + N_2) \cdot 2L + G \cos \theta \cdot H - F_p \cdot L = 0 \\ (N_1 + N_3) \cdot 2L + G \sin \theta \cdot H - F_p \cdot B = 0 \end{cases} \quad (1)$$

式中: G —机器人所受重力; F_m —爬壁机器人驱动轮摩擦力; F_f —墙壁对密封裙的摩擦力; N_i —墙壁作用在各行走轮上的压力; F_p —由内外压差引起吸附作用产生的在机器人本体的等效合力; L —轮子径向间距; B —轮子轴向间距,且令 $L > B$; H —机器人重心到墙壁的距离; μ_1 —轮子与墙壁之间的摩擦系数,运动轮摩擦力提供机器人驱动力, $F_f = \mu_1 F_{p1}$ 。

则满足机器人运动条件的机器人本体上最小负压

吸附力:

$$F_p = \frac{4G(\cos \theta + a)}{4\mu_1 - \mu_2} \quad (2)$$

式中: μ_2 —密封裙与壁面之间的摩擦系数。

机器人运动时,要求4个运动轮都与墙壁接触,即必须满足条件 $N_i > 0$,则最小负压吸附力至少为:

$$F_p = \frac{GH(\sin \theta + \cos \theta)}{B} \quad (3)$$

因此作用在机器人本体的负压吸附力须满足以上两式要求,爬壁机器人吸附系统工作负压要求至少为:

$$\Delta p = F_p / S_a \quad (4)$$

式中: S_a —有效吸附面积, $S_a = \pi(R^2 - Rb + b^2/2)$ 。

2 爬壁机器人吸附机构流量分析

密封裙与墙壁之间的空气流动简化为平行板间间隙流动,爬壁机器人吸盘密封裙设计成近似圆形的结构,密封裙外径为 R , h 为机器人密封裙到墙壁的气隙高度,泄漏空气平均速度为 v , b 为密封裙宽度,空气经密封裙与墙壁之间缝隙的流动情况的简化模型如图2所示。

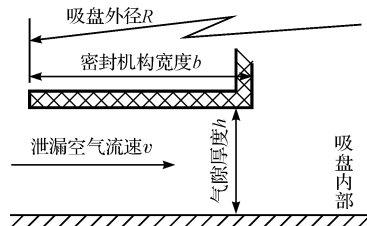


图2 密封裙与墙壁之间气隙简化模型

由于爬壁机器人内外负压差较小,在压差作用下泄漏气体在缝隙内流动的雷诺数实际大小为200左右,远小于最小临界紊流雷诺数 Re 值($Re = 1\ 200$),因此泄漏空气属于层流情况。均匀层流在流速方向上泄漏气膜压降差为常数,即泄漏缝隙内,从气体流入口到流出口的气膜压强 p 从标准大气压 P_0 到密封腔内线性分布。当密封吸盘内负压差建立后,密封裙与墙壁之间的空气泄漏缝隙两端,即气体流入口和气体流出口,分别承受标准大气压和密封腔内的负压。

按泄漏空气流动特点,可忽略运动惯性和质量力,同时由于泄漏空气的流体粘度不变,因此可把泄漏空气的流动近似看作一维流动,当爬壁机器人固定在墙壁上或当爬壁机器人运动时,运动轮前后密封机构部分相对于墙壁之间的剪切流动方向相反,剪切运动作用引起的间隙流动相互抵消,根据纳维斯托克斯方程,流过缝隙的泄流量体积 q_v 可表示为:

$$q_v = \frac{lh^3}{12\mu b} \Delta p \quad (5)$$

式中: μ —介质粘度, Δp —空气泄漏缝隙两端即气体流入口和气体流出口的压力差,密封裙圆周长度 $l = 2\pi(R - b/2)$ 。

此式说明了密封机构泄漏流量与爬壁机器人密封机构与墙壁之间缝隙的高度的三次方、负压腔内外负压差、密封圈周长成正比关系,而与介质粘度、密封圈宽度成反比关系。

3 基于系统能耗的负压吸附机构设计

滑动式负压吸附爬壁机器人的能量主要消耗在负压吸附机构,同时为了克服机器人重力作用及密封机构的摩擦力,机器人的运动机构也消耗部分的能量,爬壁机器人系统消耗总功率 P 为:

$$P = P_s + P_f \quad (6)$$

式中: P_s —负压吸附机构功率, P_f —运动机构功率。

机器人负压吸附机构理论功率为:

$$P_s = \Delta p \cdot q_v \cdot \rho \quad (7)$$

式中: ρ —空气密度。

于是:

$$P_s = \frac{h^3 F_p^2 \rho}{6\pi\mu} \cdot \frac{R - b/2}{(R - b)^4 b} \quad (8)$$

又机器人运动机构功率为:

$$P_f = F_m v \quad (9)$$

其中,运动系统驱动力至少应满足 $F_m = G + F_f$,驱动系统功率为:

$$P_f = (G + k \cdot \mu_2 F_p) v \quad (10)$$

式中: k —用作密封作用的力占总吸附力的比例系数, $k = (R - b/2)b / (R - b)^2$ 。

由此系统能耗为:

$$P = \frac{h^3 F_p^2 \rho (R - b/2)}{6\pi\mu (R - b)^4 b} + \left(G + \mu_2 F_p \frac{(R - b/2)b}{(R - b)^2} \right) v \quad (11)$$

由于密封裙宽度小于密封吸盘外径,则必有 $\partial P / \partial R < 0$ 。密封裙外径 R 越大,则机器人系统的能耗越小,因此爬壁机器人在满足工作要求条件下选用较大尺寸的吸盘外径,可有效减小系统的能耗。

吸盘密封裙的尺寸是影响爬壁机器人系统能耗的又一因素。当 $\partial P_s / \partial b = 0$ 时,即 $b \approx 0.22R$ 时负压吸附机构能量消耗最小,因此设计时应选取适当宽度尺寸的密封裙,可使滑动式爬壁机器人负压吸附机构能耗最小。即:

$$\frac{\partial P_f}{\partial b} = \mu_2 F_p v \cdot \frac{R^2}{(R - b)^3} > 0 \quad (12)$$

上式说明减小密封裙宽度 b 对减小运动机构能耗有益。密封裙宽度可根据机器人参数的不同进行

具体选取。

由于爬壁机器人的能耗主要消耗在负压吸附机构,因此设计高效率的负压发生器即离心风扇是十分有意义的。无线滑动式爬壁机器人功率限定,在确定机器人工作负压、空气流量等参数后,对离心风机应用经验公式进行主要几何尺寸的计算和叶轮的三维造型设计及仿真优化。为了得到更好的风扇流动性以提高效率,采用流动状况更好的加载式叶型。在气动参数一定的情况下,以附面层最小为目标对叶片型线进行优化,得到最佳叶片型线。叶轮的叶片厚度分布规律用 B 样条曲线控制,保证成型后叶片型面高阶导数连续,使叶轮具有优良的气动性能。对单流道的粘性流场进行数值模拟,工作状态下离心风扇进出口的气动参数不随时间变化,离心风扇内的流动则为定常的,因而仅进行定常流计算即可。离心风扇进口气流均匀,进口气流总温度 293 K 。在进行等转速特性计算时,考虑离心风扇工作状态下风扇输出口的实际大气环境参数,叶轮出口静压不变,通过改变离心风扇进口的总压,获得离心风扇特性曲线。在设计离心风扇的方案时,选择电机直接带动离心风扇以转速 $6\ 500\text{ r/min}$ 工作的方案,同时保持离心风扇的扬程 310 m 不变,流量设定为 0.03 kg/s ,进行几何设计和性能分析。叶轮叶片型线及三维机构及速度流场如图3所示。

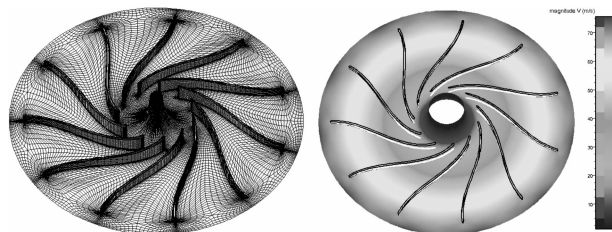


图3 离心风扇三维机构及速度流场

仿真结果显示,在离心风扇的进口区域和出口区域速度梯度较小,流动损失较小,周向的速度分布也是均匀的,有利于提高效率。

4 爬壁机器人实验

遵循重量轻、小型化、无线化的思想,本研究研制了一种具有低能耗负压吸附机构的无线单吸盘滑动式四轮驱动的爬壁机器人如图4所示。

为减轻爬壁机器人重量,机器人材料普遍采用轻质高强度ABS塑料,为减小机器人的倾覆力矩,将风扇电机内置于机器人吸盘内,使质量较大的电机重心靠近墙壁从而提高机器人的安全性能。爬壁机器人负压吸附机构由负压发生装置和吸盘组成,其中负压发



图4 滑动式负压吸附爬壁机器人

生装置由电机、离心风扇组成;吸盘由机器人本体和密封机构组成,密封机构在爬壁机器人四周形成柔性密封裙,对机器人吸盘进行密封,减小空气泄漏,维持吸盘内的负压。嵌入式控制系统主板如图5所示,主要由无线通讯、移动机构驱动、风机驱动、电源管理模块组成,作为机器人本体的一部分,与密封机构一起组成机器人吸盘。

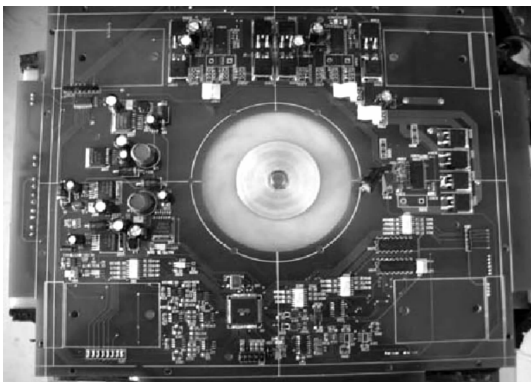


图5 机器人嵌入式控制系统实物图

运动机构必须具有转向灵活、结构紧凑的特点以提高机器人的运动灵活性。由于负压吸附机构的密封裙与机器人密封腔本体之间采用柔性连接,所以设计的运动机构必须能够爬壁机器人本体,因此运动机构采用了四轮驱动的构型对机器人本体进行支撑。运动机构主动轮由对角分布的两个直流减速电机驱动,通过皮带把运动传动给被动轮。机器人可实现前进、后退、左转、右转等运动功能,且在一定范围内移动速度可调。

搭建爬壁机器人实验系统,主要测试机器人可在壁面上自由运动的情况下,机器人系统能耗与负压吸附机构的工作性能。把吸附系统置于城市建筑的壁面进行测试,通过调节吸盘内外负压差,分别测试密封机构在光滑粉刷壁面和粗糙砖墙壁面的系统消耗功率,功率数据如图6所示。

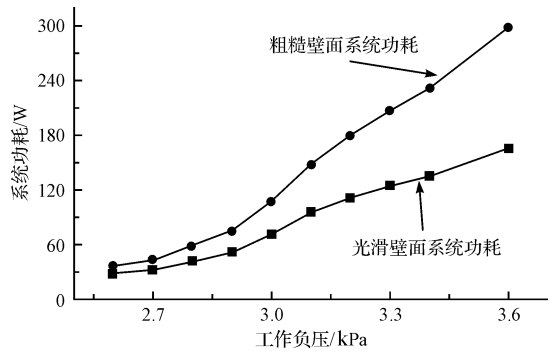


图6 系统功耗测试数据

实验表明负压吸附机构对不同状况的壁面具有良好的壁面适应能力,机器人总重为4 kg,系统消耗功率控制在298 W以内。爬壁机器人负压吸附机构可以提供2.5 kPa左右的稳定负压,能够在一般城市楼宇壁面实现稳定吸附;机器人在瓷砖壁面平均上行速度为10.5 m/min,平均下行速度为15.5 m/min,续航时间平均为45 min。

5 结束语

负压吸附机构是滑动式负压吸附爬壁机器人的重要组成部分及功率消耗的主要部分。本研究从机器人最小能量消耗的角度出发,分析了影响功耗的主要因素,设计了滑动式爬壁机器人的负压吸附机构,实验表明无线爬壁机器人墙壁适应能力好。能量消耗被控制在较小的范围内。

参考文献 (References):

- [1] HARSHA P, RON P, SCOTT S. Electro-adhesive Robots-Wall Climbing Robots Enabled by a Novel, Robust, and Electrically Controllable Adhesion Technology [C]//IEEE ICRA07. [s. n.], 2008:3028-3033.
- [2] MURPHY M, SITTI M. An Agile Small-Scale Wall Climbing Robot Utilizing Pressure Sensitive Adhesives [C]. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, [s. n.], 2007.
- [3] 管兴伟,张昊,吉爱红,等.爬壁机器人尖爪型仿生脚掌设计[J].机电工程,2009,26(2):1-3.
- [4] KIM S, SPENKO M, TRUJILLO S, et al. Whole body adhesion: hierarchical, directional and distributed control of adhesive forces for a climbing robot[C]. IEEE ICRA07. [s. n.], 2007.
- [5] 刘荣,田林.影响负压爬壁机器人性能的关键因素分析[J].北京航空航天大学学报,2009,35(5):91-94.
- [6] ZHAO Y Z, FU Z, CAO Q X, et al. Development and applications of wall-climbing robots with a single suction cup [J]. Robotica, 2004, 22(6):643-648.

(下转第342页)

- haviour in storm winds[J]. **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics**,2004, 92(7-8):687-697.
- [12] AL-HUSSEIN M, NIAZ M A, YU Hai-tao, et al. Integrating 3D visualization and simulation for tower crane operations on construction sites[J]. **Automation in Construction**, 2006,15(5):554-562.
- [13] YEHIEL R, AVIAD S. Automation of existing tower cranes; economic and technological feasibility[J]. **Automation in Construction**,1998,7(4):285-298.
- [14] AVIAD S, LUCKO G. Cranes for building construction projects[J]. **Journal of Construction Engineering and Management**,2007,133(9):690-700.
- [15] THORSTENSEN B, SYVERSEN T, BJORNVOLD T. Electronic Shepherd-a Low-cost, Low-bandwidth, Wireless Network System[C]//Proceedings of the 2nd International Conference on Mobile Systems, Applications, and Services. New York, NY, USA: ACM,2004:245-255.
- [16] LIU Hui, MENG Zhi-jun, CUI Shuang-hu. A Wireless Sensor Network Prototype for Environmental Monitoring in Greenhouses[C]//2007 International Conference on Wireless Communications, Networking and Mobile Computing, WiCOM 2007. Piscataway, United States: Inst. of Elec. and Elec. Eng. Computer Society,2007:2344-2347.
- [17] DALTON A F, SCANAILL C. A Clinical Evaluation of a Remote Mobility Monitoring System based on SMS Messaging[C]//29th Annual International Conference of IEEE-EMBS, Engineering in Medicine and Biology Society, EMBC'07. Piscataway, United States: Inst. of Elec. and Elec. Eng. Computer Society,2007:2327-2330.

[编辑:柴福莉]

(上接第 323 页)

- [7] SCHRAFT R D, SIMONS F. Concept of a low-cost, window-cleaning robot[C]//Proceedings of the 6th ICCWR. [s. n.],2003:785-792.
- [8] LONGO D, MUSCATO G. Adhesion Control for the Alicia3 Climbing Robot[M]. IEEE Robotics and Automation Magazine,2006:42-50.
- [9] JIZHONG X, SADEGH A. Design of Mobile Robots with Wall Climbing Capability [C]//Proceedings of the 2005 IEEE/ASME ICAIM, [s. n.],2005:438-443.
- [10] HILLENBRAND C, BERNS K. A Climbing Robot based on under Pressure Adhesion for the Inspection of Concrete Walls [C]. 35th International Symposium on Robotics (ISR), [s. n.],2004.
- [11] WANG Y, LIU S L, XU D G. Development and application of wall-climbing robots[C]//Proceedings of ICRA99, [s. n.],1999:1207-1212.

[编辑:柴福莉]

(上接第 332 页)

- [4] 颜晓河,董玲娇,苏绍兴. 光电传感器的发展及其应用[J]. 电子工业专用设备,2006,35(1):59-62.
- [5] 萧泽新. 现代光电仪器共性技术与系统集成[M]. 北京:电子工业出版社,2008.
- [6] 曲光阳,吴晓波. 高精度高边电流检测放大器的研究与设计[J]. 机电工程,2008,25(1):1-4.
- [7] 郭振民. 自动增益控制在光电检测系统中的应用[J]. 河北省科学院学报,2009,26(2):38-41.
- [8] CHEN Jin-xiang, CHANG Ben-kang. A study on intelligent measuring equipment for the width of fibers[C]//Proceeding of SPIE,1998:591-594.
- [9] GUSAROVA N F. Optical monitoring of yarn during its processing [J]. **Journal of Optical Technology**, 2001, 68(8):613-616.
- [10] [美]KUO S M, [美]LEE B H. 实时数字信号处理[M]. 卢伯英,译. 北京:中国铁道出版社,2005.
- [11] CHIAPPALONE M, VATO A, TEDESCO M B, et al. Networks of neurons coupled to microelectrode arrays: a neuronal sensory system for pharmacological applications [J]. **Biosensors and Bioelectronics**,2003(18):627-634.

[编辑:柴福莉]