

文章编号: 1006-2467(2005)06-0873-04

具有双负压吸盘的爬壁机器人吸附特性

潘 雷, 赵言正, 钱志源, 付 庄, 曹其新

(上海交通大学 机器人研究所, 上海 200030)

摘 要: 介绍了一种双负压吸盘式爬壁机器人吸附机构, 分析了机器人可靠吸附于垂直壁面的基本吸附条件. 基于流体网络理论建立了吸盘模型并得到吸盘在风机突然启动、机器人遇障碍以及风机突然关闭三种情况下的等效电路. 通过对等效电路的分析得到吸盘内负压动态响应曲线, 进而得到了流阻、流容等吸盘结构参数对吸盘腔内负压的影响关系. 最后通过试验和仿真进行了验证.

关键词: 负压吸盘; 机器人; 密封机构; 流体网络理论; 流阻; 流容

中图分类号: TP 24

文献标识码: A

Study on Adhering Characteristic of Wall-Climbing Robots with Double Negative Suckers

PAN Lei, ZHAO Yan-zheng, QIAN Zhi-yuan, FU Zhuang, CAO Qi-xin

(Research Inst. of Robotics, Shanghai Jiaotong Univ., Shanghai 200030, China)

Abstract: This paper presented an adhering mechanism of wall-climbing robots with double negative suckers and analyzed the basic adhering requirements to ensure the robot to adhere to vertical surfaces. A simple model of the suction cup and three equivalent circuit models in the cases that the vacuum pump suddenly starts or the robot meets obstacles or the vacuum pump suddenly stops were established based on fluidic networks theory. Curves of the dynamic responses of the negative pressure and the flow resistance and flow capacitance's influence on the negative pressure and then the relations between the mechanism dimensions and the negative pressure of the suckers were obtained on the basis of the analysis of three equivalent circuit models. In the end, it was proved by the experiments and simulations.

Key words: negative sucker; robots; sealing structure; fluidic network theory; flow resistance; flow capacitance

爬壁机器人是一种可以进行壁面移动的特种机器人, 这种机器人要求能够在垂直壁面上作业, 因此它必须具备两大功能: 附壁和移动功能. 附壁是爬壁机器人的一个基本功能也是区别于其他种类机器人的一个基本特征. 爬壁机器人要实现在壁面上的吸附, 吸盘是必不可少的. 吸盘内负压特性直接决定了机器人的吸附稳定性和可靠性. 文献[1]中对一种爬壁机器人在弧形壁面爬行时的吸附稳定性进行了分

析. 文献[2]中研究了一种单吸盘爬壁机器人的壁面吸附特性. 本文介绍一种双负压吸盘爬壁机器人的吸附机构, 它既可以克服单吸盘爬壁机器人吸附机构无法跨越一定高度障碍物的缺点, 又有移动灵活的优点; 分析了爬壁机器人双负压吸盘的负压特性和吸附条件, 建立了 3 种情况下吸盘模型的等效电路. 通过仿真和试验, 验证了理论分析, 并取得了吸盘结构参数对负压的影响关系, 为吸盘结构设计提

收稿日期: 2004-08-02

作者简介: 潘 雷(1979-), 男, 江苏宿迁人, 硕士, 主要从事机器人智能控制研究. 赵言正(联系人), 男, 教授, 博士生导师,

电话(Tel.): 021-62932750; E-mail: yzh-zhao@sjtu.edu.cn

供了依据

1 吸附机构介绍及特性分析

1.1 吸附机构介绍

图1(a)为爬壁机器人的吸附机构原理图,由风机、吸盘腔体、双负压吸盘以及侧边调整滚轮和密封机构四部分组成

双负压吸盘爬壁机器人吸盘密封机构在机器人下滑移动过程中与壁面间有相对运动,这就要求密封机构能在运动中实现吸盘可靠密封,并能适应壁面一定程度的凹凸不平。而当机器人在遇到障碍时,双吸盘通过交替抬起和下滑移动实现越障。吸盘抬起时,吸盘内负压要迅速泄漏,这就要求密封机构有一定的迅速泄漏能力。为此,本文设计了一种密封结构(见图1(b))安装在矩形吸盘的四周,由铝片和橡胶片组成。同时,为减少橡胶片和壁面间摩擦力,在矩形吸盘上安装了4个侧边调整滚轮来调整橡胶片与壁面间的距离。吸附机构依靠风机的高速旋转将空气由吸盘腔内抽出,在吸盘腔内产生负压 p_c ,依靠吸盘内外压差将机器人压在工作壁面上。为了可靠地吸附,吸附力至少应该能够克服重力产生的扭矩。同时,机器人沿着壁面顺利下滑就要克服吸盘负压对壁面作用产生的摩擦力,即

$$G \geq \mu p A$$

式中: G 为机器人自身重力; μ 为密封机构和壁面间摩擦系数; A 为吸盘有效密封面积

因此,吸盘腔内产生负压 p_c 应满足下列条件:

$$\frac{G}{\mu A} \geq p_c \geq \frac{Gh}{Al} \quad (1)$$

式中: h 为机器人重心到壁面距离; l 为等效负压吸附力到点 M 距离, M 是机器人与壁面最下方接触点(见图1(a))。

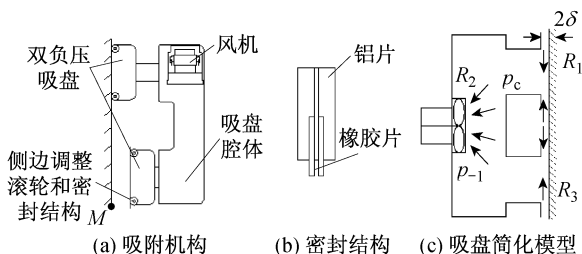


图1 吸附机构与吸盘简化模型

Fig 1 The adhering mechanism and simplified model of suckers

1.2 吸附特性分析

1.2.1 流体网络理论和吸盘模型的建立 假定密封结构是理想的,当机器人贴附在壁面上时,启动风

机,吸盘内压力将在一定时间内达到动平衡状态。如果壁面是理想壁面即没有凹凸不平等变化,只要不断电,这种动平衡状态将永远维持下去,即有一定量的气体从密封结构与壁面间的间隙中流入吸盘内而同时风机将等量的气体排出吸盘,这时吸盘内维持一定的负压并保证机器人可靠地吸附在壁面上。但机器人实际工作壁面不可能是理想壁面,难免有凹凸变化,将对吸盘内负压产生影响;另外,吸盘的体积,密封结构等对吸盘内负压都有一定影响。本文将采用流体网络理论对其关系进行分析,流体网络理论包括流阻、流容和流感3个基本参数,图1(c)所示为基于流体网络理论的吸盘简化模型。

(1) 流阻 对于矩形吸盘,密封橡胶片和壁面间形成了一个矩形管路,当矩形管路深宽比 $h/b \ll 1$ 时,此时压力差和流量之间的比值为^[3]

$$R_m = \frac{\Delta p}{Q_m} = \frac{3\mu l}{4bh^3\rho} \quad (2)$$

式中: l 为吸盘长度; h 为吸盘厚度; b 为吸盘宽度; μ 为流体粘性系数; ρ 为气体密度。另外,风机可以看成恒压源,等效流阻为

$$R_2 = \frac{\Delta p^2 R_g T}{\bar{p} W \zeta}$$

其中, R_g 为气体常数; T 为温度; W 为风机功率; ζ 为风机工作效率; $\bar{p}$ 为平均压强

(2) 流容 对于一个固定容积 V 的容器,在发生等温过程时,流容可表示为^[3]

$$C_m = \frac{V}{R_g T} \quad (3)$$

另外,由于负压变化频率较低,本文忽略流感的影响。

1.2.2 3种等效电路模型 当风机开启、关闭和遇到障碍时,吸盘内的负压都会发生明显的变化,本文将重点研究3种情况下的等效电路模型。

(1) 风机突然启动时。当吸盘贴附于壁面之上开启风机的瞬间,相当于对系统输入一个阶跃压力 p_{-1} ,即风机极限真空度,可等效于图2所示的电路。这时有

$$\frac{p_c(s) - p_{-1}/s}{R_2} = -\frac{p_c(s)}{1/(sC_m)} - \frac{p_c(s)}{R_1 + R_3}$$

整理后做拉氏反变换得

$$p_c(t) = \frac{R_1 + R_3}{R_1 + R_3 + R_2} p_{-1} (1 - e^{-t/\tau}) \quad (4)$$

式中: τ 为时间常数, $\tau = RC_m$, R 为综合流阻, $R = \frac{R_1 R_3}{R_1 + R_3 + R_2}$, $R_{13} = R_1 + R_3$ 。由式(4)可得:

$$C_m = \frac{V}{R_g T} = \frac{A h}{R_g T} \quad \text{因此,为减少 } \tau, \text{在满足一}$$

定吸附力的前提下,应尽量减少吸盘的体积 V 即降低吸盘高度 h .

$$R = \frac{R_{13}R_2}{R_{13} + R_2} = \frac{R_{13}}{1 + R_{13}/R_2}, \text{ 当 } R_{13} \text{ 一定时, 为}$$

减少 τ 应减少 R_2 . 因此, 当由风机产生吸盘内负压时, 应将风机直接安装在吸盘上

$$R = \frac{R_2}{1 + R_2/R_{13}}, \text{ 当 } R_2 \text{ 一定时, 为了减少 } \tau \text{ 应}$$

增大 R_{13} , 而 $R_1 = R_3 = \frac{\Delta p}{Q_m} = \frac{3\mu l}{4bh^3\rho} = R_m$, 为增大 R_1

或 R_3 需增大密封圈的厚度或减少密封圈与壁面间的间隙 δ

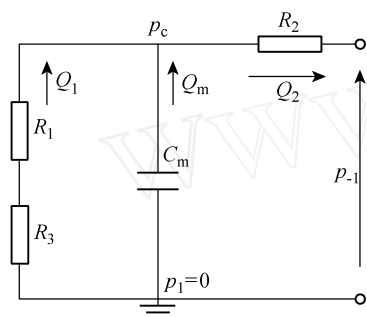


图2 风机突然起动时等效电路图

Fig 2 The equivalent circuit when the pump starts

(2) 遇障碍时. 机器人在壁面上爬行时, 不可避免地要遇上各种各样的障碍物, 如沟槽、焊缝等. 这就势必会打破吸盘内的平衡状态, 造成吸盘内压力变化. 假设壁面上有一个直径为 D 的小孔, 则其流阻为^[4]

$$R_4 = \frac{\bar{p}}{1.57D^2\bar{\rho}} \quad (5)$$

式中: $\bar{\rho}$ 为平均密度 (kg/m^3).

系统等效图如图3所示

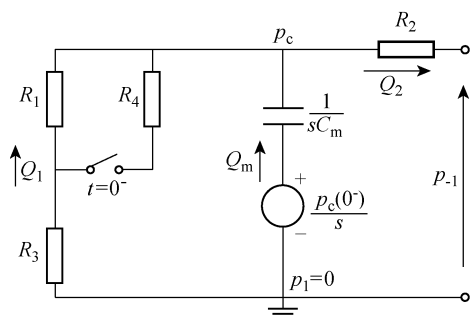


图3 系统遇障时的等效电路图

Fig 3 The equivalent circuit when robot meets obstacles

假设吸盘在遇障碍以前已达到动平衡, 这时吸盘内的各流体参数为

$$p_c(0^-) = \frac{R_1 + R_3}{R_1 + R_3 + R_2} p_{-1}$$

$$Q_{R_2}(s) = \frac{p_{-1}/s - p_c(s)}{R_2} = \left[p_c(s) - \frac{p_c(0^-)}{s} \right] sC_m + \frac{p_c(s)}{R_{134}}$$

整理后做拉氏反变换:

$$p_c(t) = \frac{R_{134}p_{-1}}{R_2 + R_{134}} + \left[\frac{R_{13}}{R_{13} + R_2} - \frac{R_{134}}{R_{134} + R_2} \right] e^{-t/\tau'} p_{-1} \quad (6)$$

式中: $R_{134} = R_3 + \frac{R_1R_4}{R_1 + R_4}$; $R = \frac{R_2R_{134}}{R_2 + R_{134}}$; $\tau = R C_m$.

由式(6)可得:

当 $t \rightarrow \infty$ 时, 亦即吸盘内负压趋于稳定时,

$p_c(\infty) = \frac{R_{134}p_{-1}}{R_2 + R_{134}}$. 由于 $R_{134} < R_{13}$, 故 $p_c(\infty) < p_c(0^-)$. 也就是说, 由于 R_4 即泄漏的影响, 吸盘内的负压值将下降

如果小到一定程度, 即泄漏达到一定程度, 吸盘内负压将会降低到足以使机器人从壁面上脱落的程度. 为使壁面机器人可靠地吸附于壁面上, 应使 $\frac{p_c(\infty)}{p_{-1}} > K_c$ 即 $\frac{R_{134}}{R_2 + R_{134}} > K_c$ (K_c 为机器人吸附于壁面的安全系数). 据此可以估算出泄漏孔最大直径 D .

(3) 风机关闭时. 当风机断电时, 系统等效电路如图4所示. 假设断电前, 吸盘内负压已达到动平衡, 则 $t = 0^-$ 时,

$$\left[\frac{p_c(0^-)}{s} - p_c(s) \right] sC_m = \frac{p_c(s)}{R_1 + R_3}$$

整理后做拉氏反变换:

$$p_c(t) = \frac{R_1 + R_3}{R_1 + R_3 + R_2} p_{-1} e^{-t/\tau_1} \quad (7)$$

式中: τ_1 为时间常数, $\tau_1 = R_{13}C_m$. 由于 $\tau = RC_m$, $\tau = R C_m$, $\tau_1 = R_{13}C_m$ 而 $R_1 > R > R'$, 故有 $\tau_1 > \tau > \tau'$.

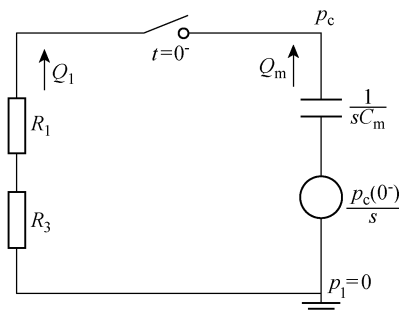


图4 风机关闭时的等效电路

Fig 4 The equivalent circuit when the pump stops

2 试验和仿真

为了验证前文的理论分析,找到影响吸盘腔内负压 $p_c(t)$ 动态响应过程的各种因素,合理地设计吸盘结构,本文设计了一套吸盘动态特性测试装置(见图5),主要包括风机、吸盘、负压传感器、调压器和示波器。影响吸盘腔内负压值的因素很多,主要有风机工作电压、障碍物引起的泄漏等。

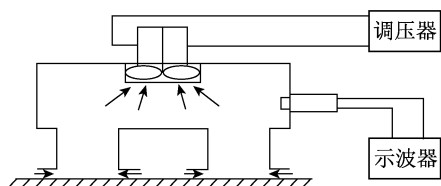


图5 吸盘动态特性测试装置

Fig 5 The testing equipment for dynamic responses of the sucker

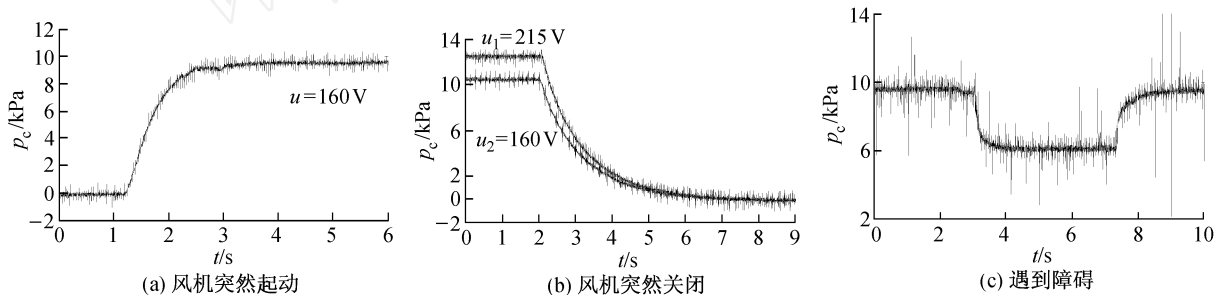


图6 风机在突然开启、关闭以及遇到障碍时的负压响应曲线

Fig 6 Curves of dynamic responses when the pump is turned on, turned off and when robot meets obstacles

另外,由试验结果和前述公式推导,可得到如下一些重要参数:吸盘体积 $V = 0.0976 \text{ m}^3$, 气体绝对温度 $T = 293 \text{ K}$, 风机最大负压 $p_{-1} = 14.9 \text{ kPa}$, 吸盘流阻 $C_m = 1.16 \mu\text{s}^2$, 流阻: $R_1 = R_3 = 5.17 \times 10^5 \text{ m s}^{-1}$, $R_2 = 5.57 \times 10^5 \text{ m s}^{-1}$, $R_4 = 1.94 \times 10^5 \text{ m s}^{-1}$, 时间常数 $\tau_1 = 1.2 \text{ s}$, $\tau_2 = 0.42 \text{ s}$, $\tau_3 = 0.35 \text{ s}$ 。

根据式(4)、(6)和(7),结合上面的参数,仿真结果如图7所示。由图可见,基于流体网络理论的分析结果与试验结果基本一致。

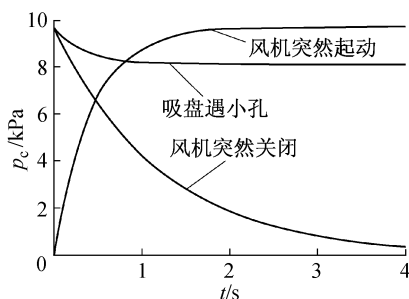


图7 负压响应仿真曲线

Fig 7 The simulation curves of dynamic responses

(1) 风机突然启动时的负压响应曲线(见图6(a))。由图6(a)可见,吸盘内负压在风机启动后随着时间的增加而逐渐达到平衡。

(2) 风机两端电压值与负压响应的关系。图6(b)所示为在风机两端分别施加215 V和160 V电压,风机突然关闭时吸盘内负压响应曲线。由图6(b)可见,风机两端电压可以改变负压初值大小,但不会改变动态响应时间。

(3) 遇到障碍时的负压响应曲线。试验中采用在吸盘上人为开孔的方法来代替实际工作中遇到的沟槽、焊缝等障碍物。图6(c)所示为吸盘遭遇直径为10 mm小孔发生泄漏时的负压响应曲线。机器人适应障碍物的能力较强,即使吸盘上有一个10 mm直径的小孔,吸盘腔内负压仍可保持在5 kPa以上,足以保证机器人在壁面上的可靠吸附。

3 结论

吸盘的容抗和阻抗对吸盘内负压特性有很大影响;希望机器人在吸附时能够很快地贴附于壁面上,当吸盘遇到障碍物即处于泄漏状态时,又希望吸盘内负压下降时间长一些,这样可使机器人更可靠更安全,同时有更多时间采取保护措施。因此,具体设计壁面机器人吸盘时需要着重考虑下列问题:

(1) 设计时将风机与吸盘直接连接,这样可减少流阻 R_2 而缩短压力上升时间 τ 。

(2) 流容 C_m 对压力动态响应时间 τ_1 和 τ_2 均有影响,在设计时要综合考虑。一般来讲,在吸盘有效面积一定的情况下,尽量减少吸盘高度,这样可使吸盘结构紧凑重量轻。

(3) 尽可能增大密封结构流阻 R_1 和 R_3 , 这样可降低压力的衰减时间。有3种办法: 增加橡胶片的宽度; 增大作用在橡胶片上的压力,减少橡胶片与壁面间的间隙; 调整侧面滚轮大小进而调整密封橡胶片与壁面间的接触面积。(下转第883页)

据)与对称起步姿态相比大为减小,可稳定步行的周期大大延长(由15个周期变为大于19个周期),在整个稳定步行过程中的姿态变化也大为减小(见图6),机体重心在高度方向上因地面冲击导致的变动范围也由32 mm减小为19 mm。由此可见,用三分法来规划四足机器人的起步姿态确实可以有效减小机器人在步行过程中的姿态变化及地面冲击,提高机器人的姿态稳定性,从而提高步行稳定性

4 结 语

用三分法来规划机器人的起步姿态可以有效地减小机器人在步行过程中的姿态变化及地面冲击,提高机器人的姿态稳定性,从而提高步行稳定性,同时也大大降低了机器人姿态控制及运动控制的难度。在此基础上引入缓冲和消振机构,并在步行过程中进行适当的姿态调整及控制,可以更好地保证机器人的连续高速动态稳定步行。

需要指出的是,文中结论是在机器人匀速步行等假设条件下得出的。若运动规划时存在加速度,可将速度对时间的函数关系式代入相应公式即可。

参考文献:

- [1] Inagaki K, Kobayashi H. Dynamical motion control for quadruped walking with autonomous distributed System [A]. *Proc of the IEEE/RSJ/GI International Conference* [C]. Munich: IEEE, 1994 (2): 1004- 1010
 - [2] Kurazume R, Yoneda K, Hirose S. Feedforward and feedback dynamic trot gait control for quadruped walking vehicle [J]. *Autonomous Robots*, 2002, 12(2): 157- 172
 - [3] Hawker G, Buehler M. Quadruped trotting with passive knees—design, control, and experiments [A]. *Proc of the 2000 IEEE International Conf on Robotics & Automation* [C]. San Francisco: IEEE, 2000 3046- 3051
 - [4] 郑建荣. ADAMS—虚拟样机技术入门与提高[M]. 北京: 机械工业出版社, 2003
 - [5] 陈佳品, 程君实, 冯 萍, 等. 四足步行机器人对角小跑步态的研究[J]. *上海交通大学学报*, 1997, 31(6): 18- 23
- CHEN Jia-pin, CHENG Jun-shi, FENG Ping, *et al*. Research on trotting gait of quadruped robot [J]. *Journal of Shanghai Jiaotong University*, 1997, 31(6): 18- 23

(上接第 876 页)

参考文献:

- [1] 邵 浩, 赵言正, 王 炎. 爬壁机器人在弧面上爬行时吸附稳定性的分析[J]. *机器人*, 2000, 22: 60- 63
- SHAO Hao, ZHAO Yan-zheng, WANG Yan. Analysis of sucking stability of wall-climbing robot climbing on arc surface [J]. *Robot*, 2000, 22: 60- 63
- [2] Zhao Y Z, Shao H, Wang Y. Study of the suction cup

- of wall-climbing robot [A]. *Proceedings of the 3rd International Symposium on Fluid Power Transmission and Control* [C]. Beijing: International Academic Publishers, 1999 610- 613
- [3] 罗志昌. 流体网络理论[M]. 北京: 机械工业出版社, 1988 10- 58
 - [4] 郭鸿震. 真空系统设计与计算[M]. 北京: 冶金工业出版社, 1986 18- 24

(上接第 879 页)

参考文献:

- [1] Yoshida E. Distributed self-reconfiguration of 3-D homogeneous modular structure [EB/OL]. <http://staff.aist.go.jp/e.yoshida/3dunit/3dunit-e-1.htm>
- [2] Rus D, Vona M. Crystalline robots: self-reconfiguration with unit compressible modules [J]. *Autonomous Robots*, 2001, 10(1): 107- 124
- [3] Unsal C, Khosla P K. Mechatronic design of a modular self-reconfigurable robotics system [A]. *Proc IEEE Int Conf on Intelligent Robots and Systems* [C]. Takamatsu, Japan: IEEE Press, 2000 1742- 1747
- [4] Yin M, Zhang Y, Lamping J, *et al*. Distributed control for 3-D metamorphosis [J]. *Autonomous Robots*, 2001, 10: 41- 56
- [5] Fukuda T, Kawaguchi Y. Cellular robotic system as one of the realization of self-organizing intelligent universal manipulator [A]. *Proc IEEE Int Conf on Robotics and Automation* [C]. Cincinnati, OH, USA: IEEE Press, 1990 662- 667
- [6] Yin M, Zhang Y, Roufas K, *et al*. Connecting and disconnecting for chain self-reconfiguration with PolyBot [J]. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 2002, 7: 442-451
- [7] Castano A, Will P. Mechanical design of a module for reconfigurable robots [A]. *IEEE Int Conf on Intelligent Robots and Systems* [C]. Takamatsu, Japan: IEEE Press, 2000 2203- 2209