无源振动吸附原理与应用

那顺布和 刘 荣 杨 浩

(北京航空航天大学 机械工程及自动化学院, 北京 100191)

摘 要: 无源振动吸附是最近提出的一种机器人的吸附方式,是爬壁机器人研究的关键技术之一.提出了一种新的无源振动吸附数学模型,设计了振幅和频率可调节的振动吸附实验平台.实验结果证明了无源振动吸附数学模型的正确性;分析了无源振动吸附原理实现稳定吸附的条件,以无源振动吸附原理为指导设计了振动吸附模块并对该模块进行了性能测试,对不同振动参数下吸附模块的抗失效能力进行了实验;实验结果证明这种吸附模块可以作为吸附足模块应用到爬壁机器人上.

关 键 词: 振动吸附原理; 振动吸附模块; 爬壁机器人

中图分类号: TP 206

文献标识码: A **文 章 编 号**: 1001-5965(2008)09-1007-05

Principle and application of vibration suction method

Nashun Buhe Liu Rong Yang Hao

(School of Mechanical Engineering and Automation, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100191, China)

Abstract: Vibration suction is a kind of suction method for robots which was newly introduced by researchers. A new mathematical model of vibration suction was brought forward and a testing device was designed to measure the air pressure of the inner chamber of the suction cup. Experiments under different vibration parameters including surface, amplitude and frequency were carried out and the results of the experiments confirm the accuracy of the new model. Stable suction condition was studied in order to achieve suction to wall. According to the theory of vibration suction, a new type of vibration suction module was designed. A performance test experiment was carried out for vibration suction module. The test was carried out to measure the failure pull, the failure flexural torque and the failure torque moment. The result of the test proves the reliability of the module to be used as a foot of a wall climbing robot.

Key words: vibration suction method; vibration suction module; wall climbing robot

振动是一种有规律的运动,是一种动态的平衡.前期研究证明了吸盘受力上拉时由于其腔内气体体积变大而产生负压,下压时由于其腔内气体体积变小而产生正压,振动幅度越大,频率越高,腔内负压越小,吸盘能承受的外力就越大等结论[1-2].但是,实验发现吸盘下压过程中腔内气压始终大于腔外的结论与实际不符,而且分析伯努力方程时没有引入机械能损失,实验数据通过目测法采集,很难满足高频变化信号的采集.针对以上问题,本文分析了单吸盘振动过程,建立了一种新的数学模型并对该模型进行了仿真;设计了实验平台,通过实验验证了该模型的正确性;在理论研究的指导下设计了一种振动吸附模块,对该模块进行了性能测试实验,通过实验证明了这种吸附模块可以方便的作为爬壁机器人的吸附足.

1 振动吸附机理

1.1 振动吸附过程分析

假设某种材料的吸盘,展开半径为 r,被压附在一定材质的壁面上,初始压在吸附面时吸盘的

收稿日期: 2007-08-03

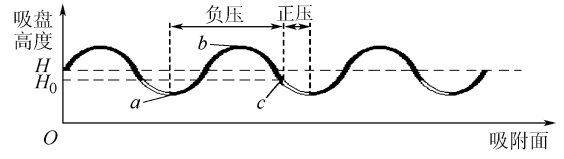
基金项目: 国家自然科学基金资助项目(2006AA04Z239)

作者简介: 那顺布和(1982—),男,蒙古族,内蒙通辽人,硕士生,nashjerry@126.com.

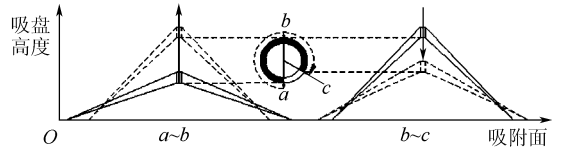
高度为 H. 对该吸盘施加以角频率 ω、振幅 h 的外加振源，研究吸盘振动时腔内气体正压和负压过程. 当对吸盘施加一段时间的激励后，吸盘将处于一个动态的平衡中，且存在一个动态的平衡高度 H_1. 当吸盘下压至此高度时，腔内气压与腔外气压相等. 所以吸盘在上拉过程以及下压至 H_1 前为负压，从 H_1 位置下压至吸盘的最低点为正压. 只有这样才有可能解释前言提到的问题.

1.1.1 负压过程

负压过程包括了吸盘的上拉过程以及一部分下压过程. 图 1a 为振动过程中随着吸盘高度变化吸盘腔内气压变化的示意图，图 1b 为吸盘高度变化示意图，负压过程见图中粗黑线所示. $a\sim b$ 时吸盘处于上拉状态，体积增大且由于压差气体将通过间隙流入吸盘，但是体积增大对吸盘内气体密度影响比进入吸盘内气体对密度的影响大，所以吸盘内部压强 P_i 小于外部大气压强 P_o，气压将持续降低. 可知吸盘处于 a 点时，$P_i=P_o$. 吸盘处于 b 位置时，吸盘的气压为最小值. $b\sim c$ 吸盘处于下压状态，吸盘体积减少且气体持续进入吸盘，但是由于处于 b 位置时 $P_i<P_o$，故在 c 位置前虽然 P_i 逐渐增大，但仍然小于 P_o. 到达平衡点 c 时，$P_i=P_o$.



a 正负压分布图



b 吸盘高度变化示意图

a—吸盘上升的最低点；b—吸盘上升的最高点；
c—平衡点；粗黑线—负压过程；空心线—正压过程.

图 1 振动过程中负压及正压过程示意图

1.1.2 正压过程

根据质量守恒原理，肯定存在一个正压过程将吸入吸盘的气体排出. 正压过程见图 1 中空心线段所示. 其中，从平衡点到最低点时吸盘处于下压状态，吸盘内空间开始减小，P_i 增大，当 $P_i>P_o$ 时，空气开始从吸盘内部流出，随着吸盘下降，压强差增大，空气变得更容易流出，当空气流出对气压的影响大于体积变小对气压的影响时，吸盘内部正压强差又会减小（软吸盘的边缘被吸附的表面之间组成了一个“单向阀”从而具有将空气排出的能力）.

通过对负压以及正压过程的分析可以看出，新模型的本质是将吸盘单元的边界看成是一个“单向阀”，在压缩的时候吸盘空腔里的气体比较容易出去，而在拉起的时候，外面的气体很难进入. 这样就造成吸盘单元在一个振动周期内平均气压低于大气压的负压效果.

1.2 数学模型

对吸盘腔内气压建模，如式(1)～式(8).

1) 假设吸盘内气体满足理想气体状态方程：

$$P_iV=mRT \tag{1}$$

该方程主要建立了吸盘内部的压强 P_i 与吸盘空腔内气体的体积 V 以及摩尔数 m 之间的物理关系. 由于是初步仿真，故不考虑温度 T 的变化，气体常量 $R=8.31\ \mathrm{J/(mol\cdot K)}$，$T=300\ \mathrm{K}$.

2) 激励主要从 V 项中引入，吸盘的体积为

$$V=\frac{1}{3}\pi r^2(H+h\sin\omega t) \tag{2}$$

式中，r 为吸盘半径(mm)；H 为吸盘中间位置的高度(mm)；h 为振动的幅度(mm)；ω 为振动的角频率(rad/s).

3) 假设气体从缝隙里通过的时候，气体的压力作功转化为气流的动能，同时由于缝隙表面粗糙，有一部分能量 h_f 因为摩擦而损失掉. 根据质量守恒以及能量守恒原理可得：当处于负压过程时，即 $P_i<P_o$，有

$$\frac{P_o}{\rho}=\frac{u_i^2}{2}+\frac{P_i}{\rho}+h_{f_i} \tag{3}$$

$$\frac{\mathrm{d}m}{\mathrm{d}t}=-L_1\cdot u_o \tag{4}$$

当处于正压过程时，即 $P_i>P_o$，有

$$\frac{P_i}{\rho}=\frac{u_o^2}{2}+\frac{P_o}{\rho}+h_{f_o} \tag{5}$$

$$\frac{\mathrm{d}m}{\mathrm{d}t}=L_2\cdot u_i \tag{6}$$

式中，ρ 是气体密度($\mathrm{mol/m^3}$)；u 是气体在边界上的流动指数，为无量纲量，受压强差控制；u_i 是气体流入吸盘内的流动指数；u_o 是气体流出吸盘的流动指数；h_f 是摩擦损失能量(J)；h_{f_i} 是气体被吸入时损失的能量(J)；h_{f_o} 是气体被挤出时损失的能量(J)；L 是漏气系数(mol/s)，与缝隙的开放大小、吸盘半径等有关；L_1 是气体被挤出时的漏气系数；L_2 是气体被吸入时的漏气系数，由前面的气体通过缝隙时的区别可知 $L_1>L_2$.

式(4)和式(6)是根据质量守恒原理，即气体的流出速度等于单位时间吸盘空腔内气体的改变量 $\frac{\mathrm{d}m}{\mathrm{d}t}$ 而建立的. 用 L 和 u 来描述气体流出的速度

主要是为了将压强差对泄漏的影响与其他因素对泄漏的影响解耦. L 是一个非常关键的参数，它的取值不仅与吸盘边界缝隙的几何大小有关，还与振动的速度、幅度、被吸附表面的粗糙程度有关. 本模型中，将 L 考虑成与振动频率成线性关系，这种描述是非常粗糙的，其仿真结果只在小范围内有效. 若想作出更加精确的仿真，需要明确两者关系.

4）当气体被挤出，$P_i - P_o$ 增大时，气体更易流出了，所以 h_{f_o} 随着 P_i 的增大而减小，设

$$h_{f_o} = h_{f_{o0}} - k_1(P_i - P_o) \tag{7}$$

当腔内气压为负压，气体被吸入时，随着 $P_i - P_o$ 的增大，密闭性会更好，气体会更难被吸入，所以 h_{f_i} 随着 P_i 减小而增大，设

$$h_{f_i} = h_{f_{i0}} + k_2(P_o - P_i) \tag{8}$$

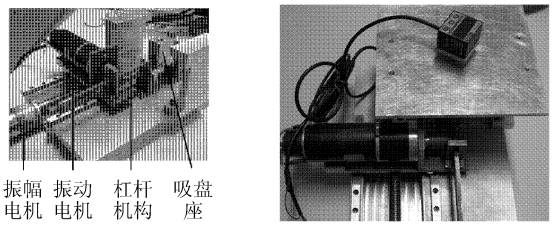
式中，k 是能量损失系数，无量纲，与缝隙的大小和表面的粗糙程度有关；k_1 是挤出时能量损失系数；k_2 是吸入时能量损失系数；$h_{f_{o0}}$ 和 $h_{f_{i0}}$ 是腔内外气压相同时气体被挤出和吸入时损失的能量.

2　实验验证

为了得到吸盘内压强 P_i 在振动过程中的变化情况，以及 P_i 分别与振幅 h 和频率 f 的关系，设计了如图 2a 所示测试装置，其原理是将电机的转动转化为振动，然后通过杠杆机构将振动传递到被测试的吸盘上. 电机的转速 n 与振动的角频率 ω 成线性关系，电机轴距支点的距离 D 与振幅 h 成反比关系. 通过调整电机转速 n 和电机轴距支点的距离 D 可以调整振动吸盘的振动参数. 振幅电机用来调节控制振幅大小；振动电机控制振动频率；杠杆机构实现吸盘的上下振动；吸盘座用来固定吸盘. 另外，不同的吸附表面对吸附的效果也有很大影响. 因此，实验中使用的吸附表面分别有铝表面以及砂纸表面，当完成一个表面的实验后，则可更换另一种表面.

压强信号的采集主要靠安装在被吸附表面上的压力传感器，将压强信号转化为 1～5 V 的电压信号；通过数据采集卡上传到 PC 机上，最后利用 Labview 软件进行数据采集和储存，Labview 将采集的数据以 txt 格式储存在 PC 机中. SUNX 气压传感器额定压强范围：0～100 kPa，精度：0.1 V，电源电压：12～24 V，重复精度：±0.2%，反应时间：2.5 ms 以下. 数据采集卡使用的是 NI 公司的 DAQpad-6105 数据采集卡. 每一次采集周期为5 s，采集频率为 2 000，故一个文本文件中包含有10 000个数据点.

整个实验平台的总装图见图 2b.



a　机构图　　b　总体装配图

图 2　实验平台图

在前期的研究中，曾对腔内气压与振动频率以及振幅的关系进行了实验验证[3]. 图 3 为新实验平台下的吸盘铝板吸附图. 图中可见，“振动幅度越大，振动频率越高，腔内气压越小”的结论是正确的.

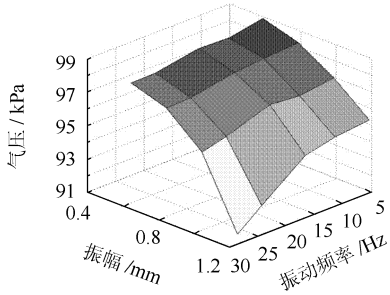
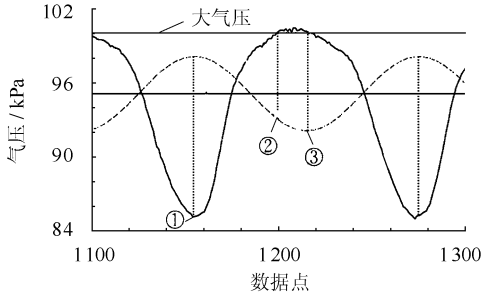


图 3　ϕ70 mm 的吸盘铝板吸附图

图 3 是负压变化总体趋势图，为了验证分析的正确性，还需要对每次采集的数据点进行分析.

取 ϕ70 的吸盘在铝板上稳定振动的 10 000 个数据点中的 1 100 点～1 300 点进行分析，如图 4 所示，可见，整个过程平均气压小于大气压，下压过程中存在负压过程，对前言中提到的振动吸附理论不足之处进行了补充. 模型中的正负压过程分析与振动过程假设分析完全吻合.

在新的单吸盘模型中不仅仅讨论了负压以及正压过程，还建立了数学模型. 对实验数据的处理



虚线—外部激励；①—吸盘上升的最高点，此时负压值最大；②—平衡点，此时内外气压相等，且气压开始变为正压；③—吸盘下压的最低点，此时吸盘准备上拉，且内外气压再次相等.

图 4　某部分周期分析图

证明了对正负压过程的分析是正确的.而要想知道数学模型是否正确,则需要用仿真结果与实验结果进行比较.利用之前的数学模型可以进行两步仿真,首先将单个吸盘在各种激励下的响应进行单独仿真,然后将响应的平均值记录下来,即可看出吸盘在不同激励下的变化趋势.为实现上述仿真,首先需要对方程(1)~(8)进行求解得到压强 P_i 的响应曲线.本文仿真是在 Matlab 7.01 中实现的,算法采用欧拉差分外推法.

图5和图6分别为振幅以及振动频率变化时气压变化的仿真图和实验图.可以看出两种方法所得到的结果是非常接近的,实验数据与理论公式基本吻合,这说明了仿真模型的正确性.但是由于很多参数具有不确定性,本仿真是通过假定一个值得到的,在小范围内有效.

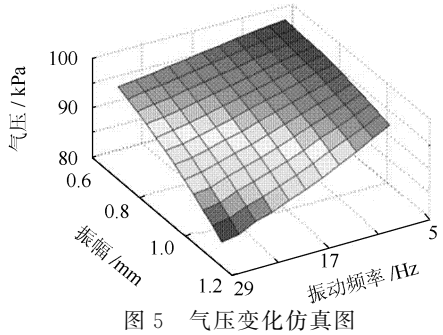


图5 气压变化仿真图

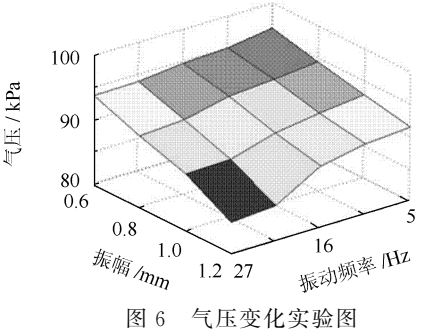


图6 气压变化实验图

3 振动吸附模块设计

3.1 稳定吸附条件分析

通过分析知道,在给单个吸盘施加外部激励时,虽然平均气压为负压,但是在某段时间内,腔内气压为正压.而当吸盘吸附在壁面上时,如果腔内气压为正压,则会失效脱落.所以对单个吸盘施加外部激励以达到稳定吸附的目的是不可能实现的,但是腔内气压变化曲线的形式在设计上具有启发意义.腔内气压变化曲线是一个类似正弦波的曲线,而当2个振幅相同、周期相同、相位差为 π 的正弦波叠加时,波动部分会相互抵消,即

$$A\sin 2\pi t + A\sin(2\pi t + \pi) = 0 \qquad (9)$$

由公式(9)可以看出,如果设计机构使得2组吸盘之间以相位差 π 交替振动,就可得到相对稳定的负压值.

另外,根据3点确定一个平面,所以每组吸盘的个数最好大于3个,2组最少需要6个吸盘.本文选择了2组各带3个吸盘的结构.

3.2 振动机构设计

图7所示为模块中用到的凸轮机构的示意图,振动电机、振动电机座以及上吸盘座连接在一起,偏心轮框和下吸盘座连接在一起,二者做上下相对振动.电机带动的偏心轮在曲柄滑块机构上作旋转运动[4].

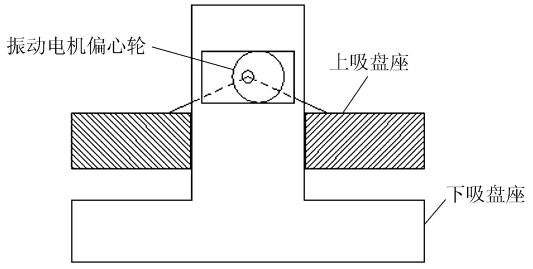


图7 凸轮机构图

3.3 导向机构设计

图8为导向装置设计图,通过嵌入下吸盘座的直线轴承与钢柱进行导向,其中钢柱是与上吸盘座固接在一起的.这种方案重量较轻,摩擦力小,磨损很小,使用一段时间后仍然有很好的导向性;导向杆分布在吸盘座的最外环,分布合理.另外对加工的要求不高,易于安装.

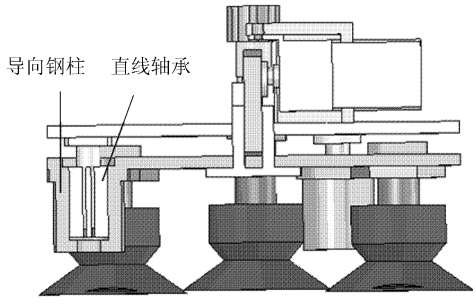


图8 导向机构示意图

所设计的振动机构的实体图如图9所示.振动吸附模块的参数:质量 250 g;具体外形尺寸:直径 114 mm,高度 30 mm.

3.4 模块性能测试实验

模块的抗失效能力与其振幅以及振动频率是密切相关的,因此要对在不同振动参数下吸附模块的抗失效能力进行实验.其中,振幅与振动电机偏心轮的偏心距离有关,振动频率与电机电压相关.通过使用不同偏心距的偏心轮以及控制电机驱动部分脉宽调制(PWM, Pulse Width Modula-

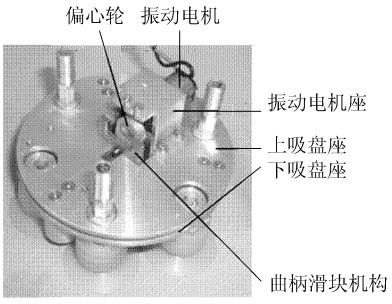
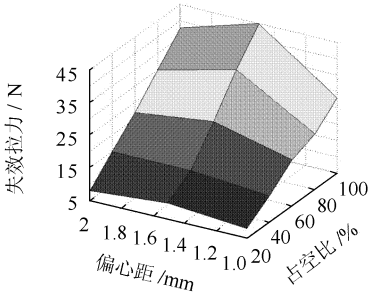


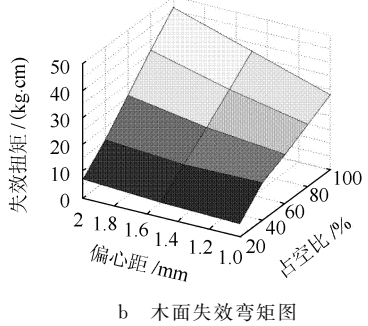
图 9　吸附模块实物图

tion)占空比就可以知道吸附模块的抗失效性能.实验在木质壁面上进行,分别测量了模块在不同振幅和频率时的极限拉力、极限弯矩和极限扭矩.利用 Matlab 7.01 对实验测得的数据进行分析可得出木面上的失效拉力、失效弯矩与失效扭矩随着偏心距以及占空比的变化趋势图,见图 10.

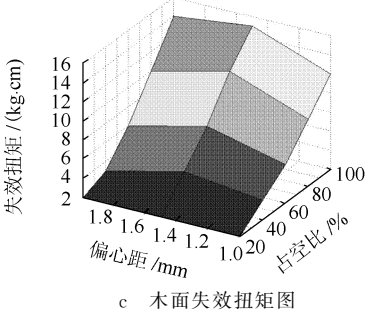
从图 10 中可以看出,失效弯矩随着偏心距的增大而增大,这与振动吸附理论中的振幅越大而



a　木面失效拉力图



b　木面失效弯矩图



c　木面失效扭矩图

图 10　木面上性能测试图

负压越大是符合的.失效拉力以及失效扭矩除了与负压值有关外,还与吸盘的裙边面积有关,当偏心轮过大时,对于自由高度只有 5 mm 的吸盘来说,裙边面积较小,所以尽管腔内负压值增大了,但是失效拉力以及失效扭矩反而减小了.

综上所述,参数选择合理的情况下这个吸附模块最大吸附力达到 30 N,吸附模块可以方便的作为吸附足模块应用到爬壁机器人上[5-6].

4　结 束 语

本文对振动吸附理论作了进一步深入的研究,首先从对振动过程中吸盘腔内正压和负压过程进行了分析,然后基于这些分析,建立了数学模型,最后通过实验与仿真验证了数学模型的正确性,在理论研究的指导下设计了一种振动吸附模块,对该模块进行了性能测试实验,通过受力实验证明了这种吸附模块可以方便的作为足部模块应用于爬壁机器人.

参考文献(References)

[1] Zhu Tao, Liu Rong, Wang Xu D, et al. Principle and application of vibrating suction method[C]//Robotics and Biomimetics. Piscataway, NJ: IEEE, 2006: 491-495

[2] 于占泉. 基于振动吸附原理的爬壁机器人研制[D]. 北京:北京航空航天大学机械工程及自动化学院, 2006
Yu Zhanquan. Development of wall climbing robot based on theory of vibration suction[D]. Beijing: School of Mechanical Engineering and Automation, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2006(in Chinese)

[3] 汪旭东. 基于振动吸附的多关节小型爬壁机器人[D]. 北京:北京航空航天大学机械工程及自动化学院, 2007
Wang Xudong. Multi-joint mini wall climbing robot based on the vibration adsorption[D]. Beijing: School of Mechanical Engineering and Automation, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2007(in Chinese)

[4] 吴瑞祥, 王之栎, 郭卫东, 等. 机械设计基础[M]. 北京:北京航空航天大学出版社, 2002:16
Wu Ruixiang, Wang Zhili, Guo Weidong, et al. Foundation of mechanical design[M]. Beijing: Beijing University of Aeronautics and Astronautics Press, 2002:16(in Chinese)

[5] Minor M, Dulimarta H, Danghi G, et al. Design, implementation, and evaluation of an under-actuated miniature biped climbing robot[C]//IEEE International Conference on Intelligent Robots and Systems. Piscataway, NJ: IEEE, 2000, 3: 1999-2005

[6] Minor Mark A, Mukherjee Ranjan. Under-actuated kinematic structures for miniature climbing robots[J]. Journal of Mechanical Design, 2003, 125(2): 281-291

(责任编辑:文丽芳)