

引用格式:过金超,吕晨生,李洪涛,等. 三极性静电吸附阵列的结构优化及分析[J]. 轻工学报,2017,32(4):66-72. 中图分类号:TP242 文献标识码:A DOI:10.3969/j.issn.2096-1553.2017.4.010 文章编号:2096-1553(2017)04-0066-07

三极性静电吸附阵列的结构优化及分析

Optimization and analysis of the structure of tripolar electrostatic adhesion array

过金超1,吕晨生1,李洪涛2,曹宏3

GUO Jin-chao¹, LYU Chen-sheng¹, LI Hong-tao², CAO Hong³

1. 郑州轻工业学院 电气信息工程学院, 河南 郑州 450002;

2. 东方电子集团有限公司,山东烟台 264000;

3. 河南森源电气股份有限公司,河南长葛 461500

 College of Electric and Information Engineering, Zhengzhou University of Light Industry, Zhengzhou 450002, China;

2. Dongfang Electronics Co. , Ltd. , Yantai 264000, China;

3. He'nan Senyuan Electric Co., Ltd., Changge 461500, China

摘要:针对现有静电吸附方式吸附力不足问题,根据静电吸附阵列电场的分布 特性构建了三极性静电吸附模型;然后基于有限元分析方法,以静电吸附阵列 吸附力输出最大化为目的,对影响静电吸附阵列吸附力的电极间隙、电极宽度 和绝缘层厚度等参数进行了优化设计.实验结果与有限元仿真具有很好的一致 性,验证了三极性结构设计的有效性.在实际设计过程中,在满足电极之间击穿 特性及绝缘层表面耐磨特性的前提下,应减小电极宽度和绝缘层厚度,增加电 极对数,从而增加电极阵列的总体边缘长度,从而提高静电吸附阵列的吸附力.

收稿日期:2016-08-24;修回日期:2016-12-05

基金项目:国家自然科学基金联合项目(U1304508);河南省科技攻关项目(152102210140)

作者简介:过金超(1978—),男,河南省开封市人,郑州轻工业学院副教授,博士,主要研究方向为机器人智能控制与信息 融合.

关键词:

静电吸附;三极性电极;绝缘层;有限元 分析

Key words:

electrostatic adhesion; tripolar electrode array; insulating layer; finite element analysis **Abstract**: The tripolar electrostatic adhesion model was proposed based on the characteristic of the electric field distribution of the electrostatic aohesion array for deficiency of existing electrostatic adhesion methods. The finite element analysis method was used to optimize the electrode gap, electrode width and the thickness of insulation layer of the electrostatic aohesion array for maximal adhesion force output. Experimental results and finite element simulation had good consistency, to verify the effectiveness of the tripolar structure design. In the actual design process, in meet the breakdown characteristics between the electrode and wear-resisting properties of insulation layer surface, it should reduce the electrode width and the thickness of insulating layer, increase the number of electrodes, so as to increase the overall length of the edge of the electrode array to improve the adsorption force of electrostatic adsorption array.

0 引言

基于静电吸附技术的攀爬机器人能够在垂 直壁面上带负载执行各种任务,如城市侦查、飞 机检查、清洁和维修等.攀爬机器人的运动模式 在一定程度上取决于其所采用的吸附方式.目 前使用较多的吸附技术有电磁吸附、负压吸附、 仿生吸附、夹持力吸附[1-8]等. 然而这些吸附方 式都有一定的缺点和局限性:电磁吸附只适用 于铁磁性壁面:负压吸附产生真空所需的附件 会增加机器人的自重和体积,并且会产生较大 的噪声;仿生吸附存在范德华力力程较短、刚毛 结构制备难度大且实现可靠吸附需要预先施加 一定外力等缺陷;夹持力吸附对攀爬面有粗糙 度高、硬度低、可探入壁面内部等特定要求.相 比以上吸附方式,静电吸附技术结构简单,能耗 低,适应性强,噪音低,有明显的优势,自提出以 来被广泛应用于半导体制造、远紫外平板印刷、 静电除尘等行业[9-11].

2007年, A. Yamamoto 等^[12]首次将静电吸 附技术应用于攀爬机器人,并研制了两台能够 在垂直壁面行走的柔性电极吸附攀爬机器人. 2013年, D. Ruffatto等^[13]采用梯度下降法, 对几 种不同形状的电极阵列进行研究, 得出"同心 圆阵列所产生的吸附力最大"的结果, 这说明 电极的排布方式对电场分布有着重要影响. 2014年, H. Wang等^[14]研制了交流无电机驱动 的履带式机器人, 在极板上施加带相位差的三 相交流电压驱动该机器人运动,将静电驱动和 静电吸附功能集成于履带上,实验分析显示,驱 动功能与吸附功能之间互不干扰,但该机器人 存在电极错位的问题,并且需要外接供电电缆, 限制了其使用场合.

尽管静电吸附技术在工业领域已经有了一 定的研究与应用,但吸附力相对较弱的缺点仍然 限制了静电吸附技术的应用领域和范围,如何提 高吸附力输出,对于静电吸附的推广应用具有十 分重要的意义.鉴于此,根据静电吸附阵列电场 分布的特性,本文拟提出三极性静电吸附阵列模 型,并针对影响静电吸附阵列吸附力的几个重要 因素进行优化分析,以期提高其吸附力.

1 三极性静电吸附阵列的模型构建

静电吸附阵列目前采用的结构分单极性结构和双极性结构,本文将在此基础上构建三极性静电吸附阵列,其结构如图1所示.静电吸附阵列,其结构如图1所示.静电吸附阵列依次加载正、零、负3种电压.在相邻电极间距相等的情况下,三极性阵列正、负电极之间加载电压等于双极性阵列正、负电极之间加载电压的2倍.



图1 三极性静电吸附阵列结构图

Fig. 1 Structure of tripolar electrostatic adhesion array

1.1 仿真分析

为研究三极性阵列和双极性阵列电场分布 的情况,选择电极材料为铜材质,电极宽度为 2 mm,电极间隙为1 mm,相邻电极电压差为 5 kV,利用 Maxwell. v15 对静电吸附阵列进行 仿真分析(见图2).从图2可以看出,三极性静 电吸附阵列的最大电场强度为8.661 8e +006, 相比双极性静电吸附阵列的最大电场强度 (7.864 4e +006)有较大幅度的提高,并且在加 了零电极之后,电场趋势更加平缓,在垂直于电 极阵列方向上的电场强度减小更缓慢.



a) 双极性静电吸附阵列电场分布图



b) 三极性静电吸附阵列电场分布图

图2 静电吸附阵列有限元仿真电场分布图

Fig. 2 Electric field distribution of finite element simulation of electrostatic adhesion array

1.2 模型构建

从图2可以看出,静电吸附阵列的电场呈 周期性分布,文献[15]采用傅里叶级数表示静 电吸附阵列的电场分布,并得出双极性阵列的 电容表达式为

$$C = lq \frac{4\varepsilon}{\pi(w+s)} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{2n-1} J_0^2 \left(\frac{(2n-1)\pi s}{2(w+s)} \right)$$

式中,*l*为电极长度,*q*为静电吸附阵列的宽度,*e*为静电吸附阵列与壁面间相对介电常数,*w*为电极宽度,*s*为电极间隙,*J*₀为第一类零阶贝塞尔函数.

由电极的有效吸附面积 A 可得电极的对数 $N = A/(w + s)l, V_0$ 为电极的端电压,则电极的 吸附力模型可表示为

$$F = \frac{1}{2}C(2V_0)^2 = \frac{8V_0^2 \varepsilon l}{\pi} N \sum_{i=1}^{\infty} \frac{1}{2n-1} J_0^2 \left(\frac{(2n-1)\pi s}{2(w+s)}\right) \qquad (1)$$

在忽略零电极对电场影响的情况下,三极 性阵列的机理分析同样可以引用双极性阵列的 分析模型,加载电压 $V' = 2V_0$,电极间距 s' = 2s + w,电极对数 N' = A/2(w + s)l = N/2,则三 极性阵列的的电容模型可以表示为

$$C' = lq \frac{2\varepsilon}{\pi(w+s)} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{2n-1} J_0^2 \Big(\frac{(2n-1)(2s+w)\pi}{4(w+s)} \Big)$$

从而可得到三极性阵列的吸附力模型为

$$E' = -$$

$$\frac{16V_0^2 \varepsilon l}{\pi} N \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{2n-1} J_0^2 \Big(\frac{(2n-1)(2s+w)\pi}{4(w+s)} \Big) \quad (2)$$

通过公式 ①② 可以看出,静电吸附阵列的 吸附力与加载电压和电极对数成正比,而最终 由 *w* 和 *s* 决定.

2 三极性静电吸附阵列的优化

2.1 结构参数的优化

为了实现静电吸附阵列吸附力最大化,本 文在上述模型分析的基础上,对三极性静电吸 附阵列的结构进行优化,并与双极性静电吸附 阵列进行对比.研究证明^[16-17],电极阵列的电 场强度与电极间隙成反比,且当电极间隙 < 1 mm 时,电极间的击穿电压会急速下降.为保 证电极的可靠性,防止电极之间放电,需将电极 间隙控制在 1 mm 以上.基于有限元分析软件 Maxwell. v15,构建电极吸附力测试三维模型如 图 3 所示,模型底层为电极阵列,中间层为绝缘 覆盖面,顶部为吸附壁面.

在电极间隙为固定值的条件下,以静电吸 附阵列吸附力输出最大化为目的对电极结构进 行优化:将吸附壁面垂直方向受到的吸附力设 置为参数化处理的因变量,利用 Maxwell 的参 数化、优化计算功能对双极性和三极性阵列作 优化处理.将双极性和三极性阵列吸附力测试 模型的参数设置如下:相邻电极间电压差为 8 kV;*l*为150 mm;*q*为150 mm;*s*分别为1 mm, 2 mm;*w*取值范围为[0.1 mm,5 mm];电极厚 度为0.1 mm;吸附面高度为2 mm;相对介电常





数为8;绝缘层厚度为0.1 mm;相对介电常数为 4. 双极性和三极性静电吸附阵列电极吸附力与 电极宽度 w 和电极间隙 s 的关系如图4 所示.

从图4可以看出,静电吸附阵列的吸附力 随着电极宽度 w 和电极间隙 s 的变化而变化, 当电极间隙为1 mm 时,双极性阵列在电极宽 度为0.4 mm 时输出吸附力最大值 19.86 N,三 极性阵列在电极宽度为0.3 mm 时输出吸附力 最大值 24.17 N;当电极间隙为 2 mm 时,双极 性阵列在电极宽度为0.3 mm 时输出吸附力最 大值 8.08 N, 三极性电极宽度为 0.3 mm 时输 出吸附力最大值 9.48 N. 此外,随着电极宽度 的增加,静电吸附阵列的吸附力呈先增大后减 小的趋势,这是由于单层电极阵列的电场峰值 主要集中在电极边缘处,电极宽度太小时电极 两侧的边缘接近重叠状态,减少了峰值电场的 有效长度;随着电极宽度的增大,有效面积内电 极边缘的总长度会先增大随后减小,电极阵列 的吸附力也就随之变化,并且三极性阵列的最 大吸附力在电极宽度为1 mm 和2 mm 时均大 于双极性阵列的最大吸附力,随着电极宽度的 增加,三极性阵列的吸附力逐渐小于双极性阵 列的吸附力.但这不否认在优化设计状态下三 极性结构的优越性.





· 69 ·



2.2 绝缘层参数的优化

为了分析电极同壁面之间的绝缘层厚度与静电吸附阵列吸附力的关系,利用有限元分析软件构建三维模型,将吸附面受到的垂直吸附力作为因变量,绝缘层厚度作为待优化的参数,设电极间隙为1 mm,电极宽度为0.5 mm,考虑绝缘击穿特性,绝缘层厚度参照文献[18]得出的最小厚度为0.1 mm,取值范围为[0.1 mm,0.5 mm],其余参数设置与2.1 一致,仿真结果如图5 所示.

从图5可以看出,绝缘层越厚,吸附面离电 极越远,静电吸附阵列吸附力就越小.因此在实 际设计中,在满足电极击穿及绝缘层耐磨特性 的前提下,尽可能地减小绝缘层厚度,以有效提 高吸附力.

3 吸附实验与分析

为了对上述三极性静电吸附阵列结构优化 与仿真分析进行验证,笔者搭建了一个数据采 集平台,制作了电极间距分别为1 mm 和2 mm 的双极性和三极性静电吸附阵列.静电吸附阵 列的大小统一为150 mm×150 mm,相邻电极间 施加电压的差值为6 kV.为了验证绝缘层厚度



阵列吸附力的影响



对静电吸附阵列吸附力的影响,设计了绝缘层 厚度分别为0.10 mm 和0.25 mm 的两个系列, 部分静电吸附阵列板如图6 所示.

本次实验采用美国 EMCO 公司的 E80CT 高压电源模块作为供电电源,采集了静电吸附 阵列在瓷砖上的法向吸附力(为保证数据的可 靠性,每块吸附板加载电压后进行 20 次重复测 量,去除最大值和最小值后求取平均值).采集 的法向吸附力数据结果如图 7 所示.

由图 7 可以看出,双极性和三极性静电吸 附阵列的吸附力均随着电极宽度和电极间隙的 增大而减小:当绝缘层厚度为 0.10 mm 时,在 同样电极间隙和电极宽度的条件下,三极性静 电吸附阵列的吸附力大于双极性阵列;当绝缘 层厚度为 0.25 mm 时,随着电极宽度的增加, 三极性阵列的吸附力逐渐小于双极性阵列,原 因是电极对数与静电吸附阵列的吸附力成正 比,而在有效吸附面积下电极宽度越小,电极对 数就越大,在这种情况下,相比双极性阵列,三 极性阵列结构单位面积能够产生更大的吸附 力.从图 7 还可以得出,绝缘层厚度对电极阵列 的吸附力也有影响,绝缘层越厚吸附力就越小.



a)绝缘层厚度为0.10 mm



b) 绝缘层厚度为0.25 mm

图6 静电吸附阵列实物图

Fig. 6 Electrostatic adhesion array



图7 静电吸附阵列吸附实验数据



此结论验证了之前的仿真结果.

4 结语

本文提出了三极性阵列吸附力模型,通过 有限元分析软件对模型中影响静电吸附阵列吸 附力的主要参数进行了优化分析;针对静电吸 附阵列绝缘层厚度对电极阵列吸附力的影响进 行仿真分析;制作不同电极宽度和绝缘层厚度 的静电吸附阵列在瓷砖上进行法向吸附力测 试.结果表明,在满足电极之间击穿特性及绝缘 层表面耐磨特性的前提下,应减小电极宽度和 绝缘层厚度,增加电极对数,从而增加电极阵列 的总体边缘长度以提高静电吸附阵列的吸附 力.实验结果与有限元仿真具有很好的一致性, 验证了三极性结构设计的有效性,对进一步研 究静电吸附式攀爬机器人的应用具有指导 意义.

参考文献:

- [1] 熊雕,刘玉良.履带式爬壁机器人受力分析与
 稳定性仿真研究[J].机电工程,2015,32(7):
 929.
- [2] SCHOENEICH P, ROCHAT F, NGUYEN O T D, et al. Tripillar: a miniature magnetic caterpillar climbing robot with plane transition ability

[J]. Robotica, 2011, 29(7): 1075.

- [3] HU B, WANG L, ZHAO Y, et al. A miniature wall climbing robot with biomechanical suction cups[J]. Industrial Robot: an International Journal, 2009, 36(6): 551.
- [4] 董伟光,王洪光,姜勇.一种轮足复合式爬壁 机器人动力学建模与分析[J].机器人,2015, 37(3):264.
- [5] HENREY M, AHMED A, BOSCARIOL P, et al. Abigaille-III: a versatile, bioinspired hexapod for scaling smooth vertical surfaces [J]. Journal of Bionic Engineering, 2014, 11(1): 1.
- [6] 王周义,王金童,吉爱红,等.壁虎的运动行为
 与动力学研究:竖直面内运动方向的影响
 [J].科学通报,2010(23):2339.
- [7] RESINO J C, JARDóN A, GIMéNEZ A, et al. Analysis of the direct and inverse kinematics of roma II robot[C] // Proceedings of the 8th International Conference on Climbing and Walking Robots and the Support Technologies for Mobile Machines (CLAWAR 2005). Berlin: Springer, 2006: 869.
- [8] 胡杰,管贻生,吴品弘,等.双手爪爬杆机器人 对杆件的位姿检测与自主抓夹[J].机器人, 2014,36(5):569.

- [9] WANG X K, CHEN J, WANG K S, et al. Finite element analysis on factors influencing the clamping force in an electrostatic chuck [J]. Journal of Semiconductors, 2014, 35(9): 094011.
- [10] SOGARD M R, MIKKELSON A R, NATARAJU M, et al. Analysis of Coulomb and Johnsen-Rahbek electrostatic chuck performance for extreme ultraviolet lithography [J]. Journal of Vacuum Science & Technology B, 2007, 25(6): 2155.
- [11] CHEN J Y, HUANG Y, LI G Y, et al. VOCs elimination and health risk reduction in e-waste dismantling workshop using integrated techniques of electrostatic precipitation with advanced oxidation technologies [J]. Journal of Hazardous Materials, 2016, 302: 395.
- YAMAMOTO A, NAKASHIMA T, HIGUCHI T.
 Wall climbing mechanisms using electrostatic attraction generated by flexible electrodes [C] // 2007 International Symposium on Micro-Nano-Mechatronics and Human Science. Nagoya: IEEE, 2007: 389.
- [13] RUFFATTO D, SHAH J, SPENKO M. Optimization and experimental validation of electrostatic

adhesive geometry [C] // 2013 IEEE Aerospace Conference. Montana: IEEE,2013: 1.

- [14] WANG H, YAMAMOTO A, HIGUCHI T. A crawler climbing robot integrating electroadhesion and electrostatic actuation [J]. International Journal of Advanced Robotic Systems, 2014, 11: 191.
- [15] Den OTTER M W. Approximate expressions for the capacitance and electrostatic potential of interdigitated electrodes [J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2002, 96(2): 140.
- [16] 过金超,崔光照,陈旭,等.面向爬壁机器人的 电极吸附阵列模型构建及优化[J].机械工程 学报,2015,51(9):51.
- [17] RUFFATTO D, SHAH J, SPENKO M. Optimization of electrostatic adhesives for robotic climbing and manipulation [C] // ASME 2012 International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference. Chicago: American Society of Mechanical Engineers, 2012: 1143.
- [18] 黄之峰. 面向壁面移动机器人的静电吸附机 理研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2010.