

# 基于电极阵列优化的类真空静电吸附技术

过金超, 楚东月, 崔光照

(郑州轻工业学院 电气信息工程学院, 河南 郑州 450002)

**摘要:**提出一种基于电极阵列优化的类真空静电吸附技术:基于库伦作用、J-R 效应和静电吸附机理,采用有限元分析方法,构建了三极性电极吸附力输出模型,用于指导电极阵列的优化设计;采用电流变胶技术,设计不同吸槽深度和占空比的多组类真空静电吸盘,以进一步提升吸附力.将该类真空静电吸附技术应用于手持无线控制电控吸附攀爬机器人的设计,机器人的运行效果验证了该技术的可行性.

**关键词:**攀爬机器人;类真空静电吸附;电极阵列

**中图分类号:**TP242 **文献标志码:**A **DOI:**10.3969/j.issn.2095-476X.2015.01.018

## Analogous vacuum electrostatic adsorption technology based on the electrode array optimization

GUO Jin-chao, CHU Dong-yue, CUI Guang-zhao

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

**Abstract:** Analogous vacuum electrostatic adsorption technology based on electrode array optimization was put forward. Based on the mechanism of role of Kulun, J-R effect and the electrostatic adsorption, The finite element analysis method was used to construct the triode adsorption force output model for guiding the optimized design of electrode array. Using electrorheological adhesive technology, several groups of different suction slot depth and duty ratio of analogous vacuum electrostatic chuck were designed to further improve the adsorption force. Analogous vacuum electrostatic adsorption technology was applied in the handheld wireless control electric adsorption climbing robot. The running results of the robot verified the feasibility of this method.

**Key words:** climbing robot; analogous vacuum electrostatic adsorption; electrode array

## 0 引言

静电吸附技术起源于18世纪初,自1973年静电吸盘首次被G. A. Wardly<sup>[1]</sup>提出以来,该技术就引起了学术界和工业界的广泛关注.在工业领域,该

技术已被普遍应用,但在其他领域,应用相对较少.与传统的负压吸附、磁力吸附、夹持力吸附<sup>[2-4]</sup>相比,静电吸附技术用于攀爬机器人设计具有以下显著优点:功耗低、噪声小、安全稳定、适用范围广,能够长时间独立工作且自身配置较轻,易于小型化.

收稿日期:2014-10-31

基金项目:国家自然科学基金联合基金项目(U1304508);郑州轻工业学院研究生科技创新基金项目(01004)

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及信息融合.

2006 年, J. Berengueres 等<sup>[5]</sup> 提出采用微型静电吸盘作为攀爬机器人的吸附机构. 2012 年, 西蒙弗雷泽大学 Jeffrey 研究组在静电吸附技术基础上引入了壁虎刚毛阵列结构<sup>[6]</sup>, 制作了复合吸附阵列, 明显提升了吸附力, 但该研究还处于试验阶段, 仍存在诸多问题. 在国内, 静电吸附技术应用比较成熟的是哈尔滨工业大学机器人技术与系统国家重点实验室和北京航空航天大学. 2012 年, 哈尔滨工业大学开发出了滚轮式静电吸附攀爬机器人<sup>[7]</sup>, 但其吸附力相对较小, 仅有  $4.17 \times 10^{-3} \text{ N/cm}^2$ , 经优化后, 电极阵列吸附力明显提升.

在已有研究基础上, 本文拟设计一种三极性电极阵列模型, 根据电极电场的分布特点及电流变胶柔性吸附特性提出类真空静电吸附; 再以真空吸槽深度为变量设计不同参数的吸盘, 并进行吸附力测试、分析, 从而得到吸附力更大的输出模型, 以期为后续研发攀爬机器人打下基础.

### 1 三极性电极吸附阵列模型的构建

常见的吸附阵列按结构可分为单极性和双极性, 现有文献对其他模型的研究比较少, 本文将针对三极性电极阵列进行仿真与分析研究. 三极性电极阵列指三组梳状电极阵列交叉排列, 并依次加载正、零、负高压静电. 为了研究电极阵列的电场分布情况, 首先采用有限元分析软件 Maxwell - 14, 在真

空环境下对不同电极宽度及对数的梳状共面电极阵列进行电场分布仿真分析. 其中, 电极材料采用铜材质, 电极组数分别为 2, 3, 4, 电极宽度分别为 10 mm, 15 mm, 25 mm, 电极占空比为 0.25, 加载电压为 4 kV, 三极性梳状电极有限元仿真电势分布如图 1 所示.

由图 1 可以看出, 三极性梳状电极的最高电势场可达  $3.50 \times 10^3 \text{ V/m}$ , 比双极性模型大了一个数量级. 且电极对数越多, 电极间的相互影响越小, 端效应的影响可以忽略, 三极性梳状电极可以近似成单电极电容单元的并联形式.

根据高斯定理可得电极上任一点电荷量的切比雪夫多项式为<sup>[8]</sup>

$$\sigma(x) = \frac{\sum_{n=0}^N A_n \cdot T_n(2x/w)}{\sqrt{1 - (2x/w)^2}}$$

其中,  $x$  为该点在电极上的位置,  $n$  为多项式系数,  $A_n$  为切比雪夫多项式  $T_n$  的振幅,  $w$  为电极宽度, 则一块电极长度为  $l$ , 电极最小间距为  $s$ , 吸盘宽度为  $q$  的梳状电极阵列的总电容<sup>[9]</sup> 为

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

其中,  $J_0$  为第一类零阶贝塞尔函数,  $\varepsilon$  为相对介电常数. 于是静电吸附力的大小为

$$F_1 = \frac{\varepsilon_r \varepsilon_0 s U^2}{2d_0^2} = \frac{CU^2}{2d_0} \quad (2)$$

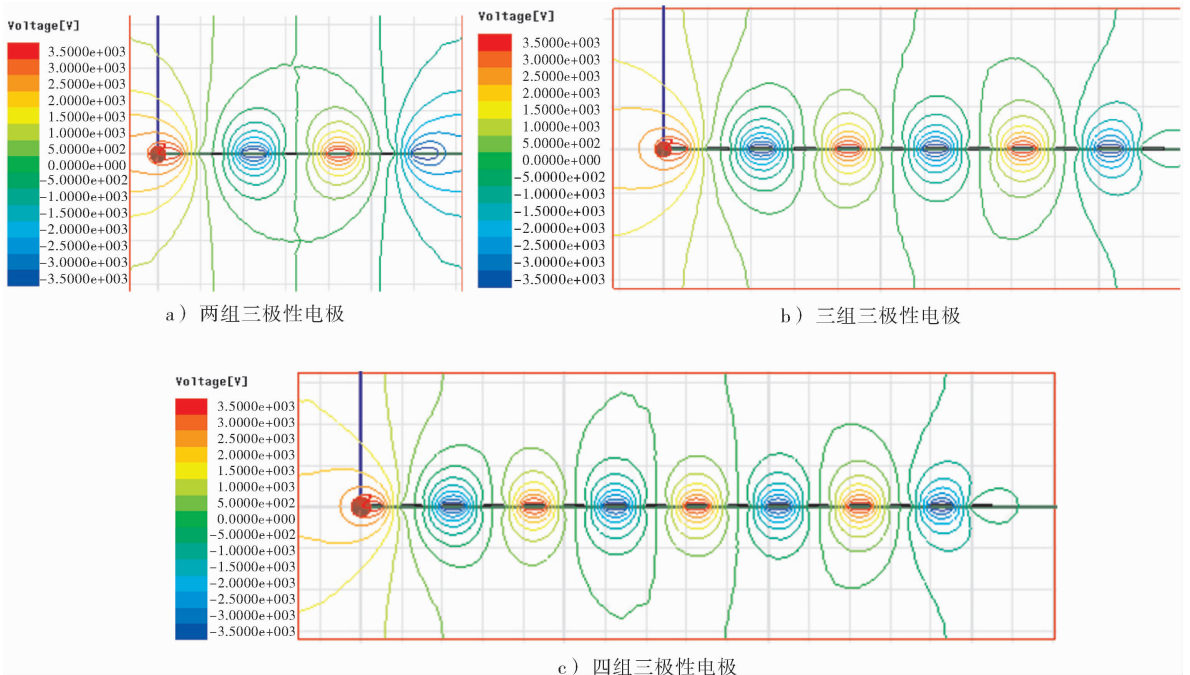


图 1 三极性梳状电极有限元仿真电势分布

由①和②式可知,静电吸附力主要由加载电压 $U$ ,离壁面距离 $d_0$ ,电极占空比 $s/(s+w)$ 决定。

## 2 电极阵列的优化与类真空吸盘设计

由式①②分析可知,影响电极阵列吸附力大小的各个因素之间存在着矛盾关系.比如,小的电极间距限制了高的加载电压,更容易发生极间放电,这必然限制了加载电压的大小.同时,电极阵列的电场分布特性、电击穿特性、功耗及电极阵列“吸附/脱附”开关特性等也是影响其吸附力的重要因素。

### 2.1 电极阵列的电场分布特性与优化

由有限元分析可知,三极性电极阵列实际上是若干对电极的并联,把一对电极扩充到整个吸附阵列,并利用柯西黎曼方程进行 Shwattes-Christiffle 逆变换,可得到共面双面电极的解析式为<sup>[7]</sup>

$$\begin{cases} |E| = \frac{U_a}{2k} \frac{1}{\sqrt{\delta_1^2 + \delta_2^2}} \\ \delta_1 = (x^4 + y^4 - 6x^2y^2)k^2 - \\ (1 + k^2)(x^2 - y^2) + 1 \\ \delta_2 = 4k^2xy(x^2 - y^2) - 2xy(1 + k^2) \end{cases} \quad (3)$$

其中, $E$ 是任意一点 $a$ 处的电场强度, $U_a$ 是对应 $a$ 点处的电压, $x$ 是该点的位置, $y$ 是该点偏离电极的距离.因为吸附力大小和电场大小的平方成正比,所以由式③得

$$|E|^2 = \left(\frac{U_a}{2k}\right)^2 \cdot \frac{1}{\sqrt{\delta_1^2 + \delta_2^2}} \quad (4)$$

由式④可知,电极电场的分布情况与电极吸附力的大小分布情况相同.有限元分析可得不同电极的电场分布,如图2所示。

由图2可以看出,电场强度并非均匀分布,而是在电极的边缘存在极大值,电极及电极间隙处则是沿各自边缘到中心方向呈递减趋势.这就意味着在电极阵列上加载一定电压的情况下,电极阵列的电极边缘总长度越大,并联后的总吸附力就会越大.因此,在电极吸盘大小一定的情况下,优化电极的尺寸、形状、边缘长度等参数,能增大电极阵列的吸附力.例如,根据攀爬机器人的特点设计非直线、非均匀分布的电极阵列,可以提高电极阵列性能。

### 2.2 电流变胶与类真空吸盘设计

电场的非均匀分布,导致类真空静电吸盘静电吸附力的分布也不均匀.利用此特性设计吸盘时,使电场的最大点处在真空吸槽的边缘,可提供较大静电吸附力作为真空吸槽的预应力,使得吸槽边缘

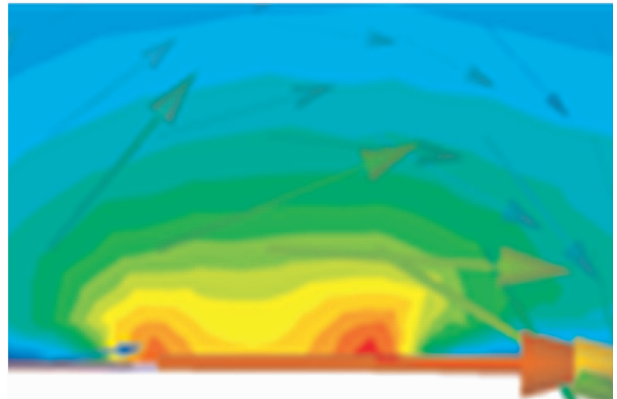
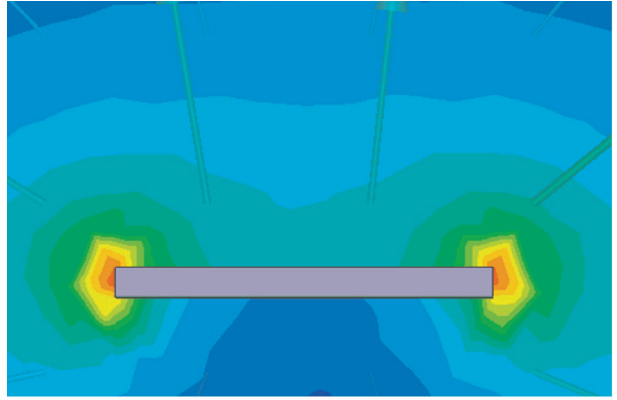


图2 三极性电极和双极性电极电场分布情况

与壁面实现更可靠的吸附,获得更好的吸附性能。

首先引入电流变胶特性,电流变胶是将ER微粒混入绝缘胶体中形成的,它和电流变液一样都会发生电流变效应<sup>[10]</sup>.将电流变胶涂在平行板电极中间,没有直流强电场时,电流变微粒突出于胶体表面(见图3),电极板与电流变胶的接触面积较小.当在电极板上施加强电场(kV级)时,电流变微粒在强电场作用下被极化并相互吸引,电流变微粒由胶体表面沉入了胶体内部,电极板和电流变胶的接触面积增大,不仅减小了电极电荷与壁面电荷之间的距离,也使彼此间的接触更加紧密,提升了吸附阵列的吸附力.但绝缘层的性能与厚度在很大程度上决定了漏电流的大小,也决定了J-R效应的强弱,对吸附力的输出起着至关重要的调节作用。

本设计提出的类真空静电吸盘,其横切面如图4所示,红褐色部分为铜电极,灰色部分为电流胶体沉积物.电流胶体包围每一条铜电极,四周形成一个类似壁虎刚毛末端的长形真空吸槽。

此类真空静电吸盘要实现可靠吸附,要求施加一定的初始应力,而静电吸附力刚好可以满足此要求,同时又能增大吸盘与壁面的接触面积,有利于提升静电吸附性能.因此,静电吸附力和类真空吸

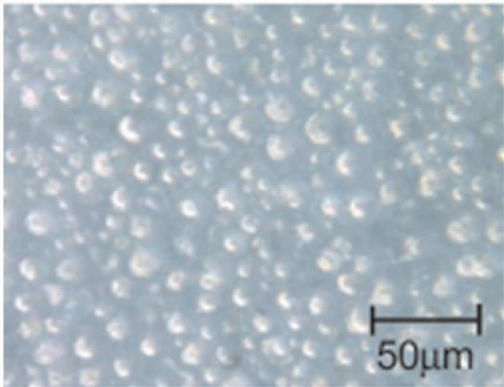
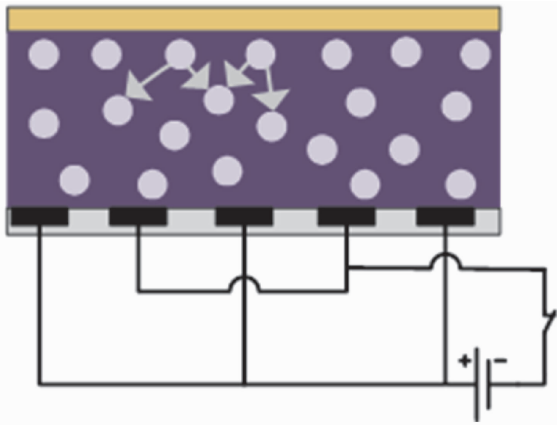


图3 电流变效应示意图

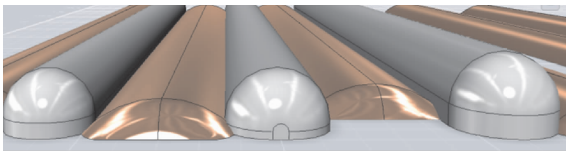


图4 类真空静电吸盘横切面示意图

附力间形成正激励作用,能够有效提高电极阵列的吸附性能.此外,在电流变的作用下,可以把吸盘表面的灰尘吸入胶体中,使吸盘具有一定的自清洁能力.但真空吸槽的厚度不仅影响静电吸附力的大小,也决定了能否形成有效的真空吸附效应,同时还影响 J-R 效应的强弱.因此真空吸槽的厚度就成了吸附力的关键指标.

### 3 电极性能测试与分析

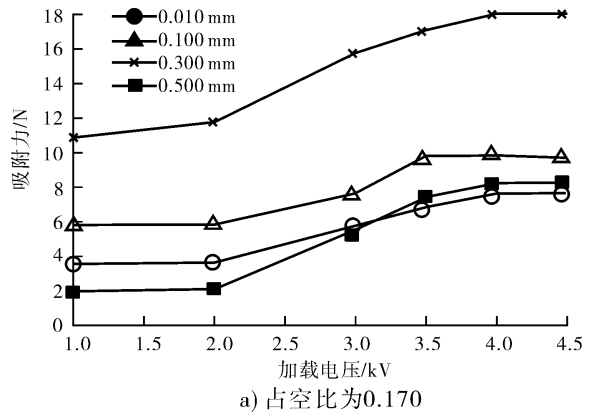
根据上面分析可知,绝缘吸槽越厚,静电吸附力就越小,但绝缘吸槽厚度太薄,吸槽深度就会太小,不易形成真空吸附效应,反而会降低吸盘的整体性能.为了得到较大的整体吸附力输出模型,研究小组设计制作了电极间距 4 mm,边长 150 mm,占空比不同、吸槽厚度不同的 4 组 8 个类真空静电吸

盘,然后在玻璃上进行吸附力测试与分析,吸盘参数见表 1.

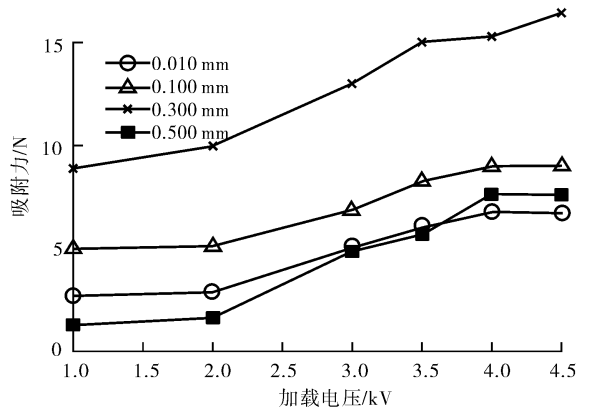
表 1 吸盘参数表

编号	吸槽厚度/mm	电极宽度/mm	占空比	电极长/mm
1	0.010	10	0.170	150
2		14	0.125	150
3	0.100	10	0.170	150
4		14	0.125	150
5	0.300	10	0.170	150
6		14	0.125	150
7	0.500	10	0.170	150
8		14	0.125	150

为了保证试验数据的可靠性,吸附力测试试验须满足以下条件:给每块吸盘分别加载 1 kV, 2 kV, 3 kV, 3.5 kV, 4 kV, 4.5 kV 电压;每块吸盘加载不同电压时都重复进行 8 次测量、记录、提取最大值、再取平均值的方式,然后利用 Matlab 对测得的数据进行分析处理,结果如图 5 所示.



a) 占空比为0.170



b) 占空比为0.125

图5 类真空静电吸盘吸附力与加载电压曲线图

由图 5 可以看出:吸盘的吸附力随着加载电压的升高而增大,这与前面的分析相吻合;随着绝缘吸槽的加厚,吸附力呈先增大后减小的趋势,这是由于当吸槽厚度太薄时不能形成有效的真空吸槽,

只有库仑力和 J-R 效应起作用,随着吸槽的增厚,虽然库仑力和 J-R 效应有所减弱,但到一定程度时形成了有效的真空吸槽,在负压吸附作用下,对外表现的整体吸附力增加了.但是,当吸槽太厚时,由于库仑力和 J-R 效应太弱,不能提供真空吸槽所需的初始应力,无法实现可靠吸附,因此整体吸附力又会减小.

当加载电压较低时,吸槽厚度 0.010 mm 的吸附力比吸槽厚度 0.500 mm 时大.而随着加载电压的增加,吸槽厚度为 0.500 mm 的吸附力又大于吸槽厚度 0.010 mm 时.这是由于随着加载电压的增大,库仑力和 J-R 效应增强,满足了真空吸槽所需的初始应力,实现了可靠吸附.从图 5 可以看出,当占空比为 0.170 时,吸盘的整体吸附力要比占空比为 0.125 时大,这也为后期进一步研究提供了依据.

最后,为了验证类真空静电吸盘的吸附效果,课题组设计了一款基于类真空吸盘的小型单履带静电吸附攀爬机器人,以机器人实际攀爬效果来验证.机器人整机重 450 g,履带有效吸附面积为 170 mm × 200 mm,单位面积承重 1.32 g/cm<sup>2</sup>,明显大于王黎明课题组<sup>[11]</sup>开发的静电吸附机器人.对机器人在水泥墙上的运行过程进行抓拍,如图 6 所示.在手持无线控制器的控制下,该机器人能够在水泥、木板、玻璃等多种壁面上可靠吸附,并进行向上、向下攀爬,吸附性能明显提高.



图 6 攀爬机器人运行抓拍图

## 4 结论

本文对电极阵列的结构设计进行优化,利用有限元分析软件对三极性电极吸附模型进行仿真、分析,填补了国内研究大多基于双极性静电吸附阵列,缺失针对其他极性静电吸附阵列研究的空白.根

据攀爬机器人的特点与电极电场分布特性,结合电流变胶特性,提出将静电吸附与真空吸附相结合的新型类真空静电吸盘,设计不同吸盘参数,进行吸附力测试实验与分析,并得出有指导意义的结论.基于此类真空静电吸附技术设计的一款静电吸附攀爬机器人,能够在水泥、木板、玻璃等多种壁面上可靠攀爬,为后期静电吸附攀爬机器人的功能完善及深入研究打下了良好基础.

## 参考文献:

- [1] Wardly G A. Electrostatic wafer chuck for electron beam microfabrication[J]. Review of Scientific Instruments, 1973, 44:1506.
- [2] Wang Z H, Bao G J, Zhang L B, et al. Development and control of flexible pneumatic wall-climbing robot [J]. Journal of Central South University of Technology, 2009, 16(6):961.
- [3] Tosun O, Akin H L, Tokhi M O, et al. TRIPILLAR: Miniature magnetic caterpillar climbing robot with plane transition ability[C]//12th International Conference on Climbing and Walking Robots and the Support Technologies for Mobile Machines, Istanbul:CLAWAR, 2009:343-350.
- [4] Yasong L, Ausama A, Dan S, et al. Abigail II: toward the development of a spider inspired climbing robot [J]. Robotics, 2012(30):79.
- [5] Berengueres J, Tadakuma K, Kamoi T, et al. Compliant distributed magnetic adhesion device for wall climbing [C]//2007 IEEE International Conference on Robotics and Automation, Roma:IEEE, 2007:1256.
- [6] Ruffatto D, Shah J, Spenko M. Optimization and experimental validation of electrostatic adhesive geometry [J]. Aerospace UK, 2013(1):130.
- [7] 黄之峰,王鹏飞,李满天,等.基于柔性静电吸附技术的爬壁机器人研究[J].机械设计与制造, 2011(6):166.
- [8] Stefan S, Bernhard J. A numerically efficient method of modeling interdigitated electrodes for capacitive film sensing [J]. Procedia Engineering, 2011(25):431.
- [9] Matthijs W. den Otter. Approximate expressions for the capacitance and electrostatic potential of interdigitated electrodes [J]. Sensors and Actuators, 2002, 96:140.
- [10] Kazuhiro Y, Kazuhito K, Joon-wan K. An intelligent microactuator robust against disturbance using electro-rheological fluid [J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2012, 175:101.
- [11] 王黎明,胡长春.基于静电吸附原理的双履带爬壁机器人设计[J].机械设计, 2012, 29(4):22.