

DOI: 10.7652/xjtuxb201812003

一种新型柔性静电吸附变刚度结构

刘晨, 李卓远, 陈花玲

(西安交通大学机械结构强度与振动国家重点试验室, 710049, 西安)

摘要: 针对现有变刚度技术刚度控制结构复杂及刚度变化率低,且无法适应变形结构的难题,提出了一种新型柔性静电吸附变刚度结构,以实现柔性结构变刚度的目的。此结构由上、下两个静电吸附层及中间夹层组成,其中静电吸附层由基底、电极层、封膜 3 层结构组成。静电吸附层的电极材料采用碳膏-硅橡胶电极取代传统的金属电极,基底与封膜也由模量较小的硅橡胶材料制备,因此静电吸附层整体为柔性结构,可承受一定范围内的拉伸、压缩、弯曲、扭转等变形,适应不同形状结构的变刚度需求。通过试验研究了该静电吸附变刚度结构的刚度变化规律,并探究了各种因素对其变刚度的影响,研究结果表明:电压越高、封膜厚度越小,结构变刚度效果越明显;同样电压下,双层静电吸附层比单层变刚度效果好;中间夹层的厚度不会改变刚度变化效果。本设计仅需通过改变电压即可调节结构的刚度,操作方便,且刚度变化率最高可达 180%,刚度调节范围较大,是一种应用前景广阔的变刚度结构。

关键词: 变刚度;柔性电极;静电吸附

中图分类号: TH17 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2018)12-0018-07

A Novel Flexible Electrostatic Adsorption Variable Stiffness Structure

LIU Chen, LI Zhuoyuan, CHEN Hualing

(State Key Laboratory for Strength and Vibration of Mechanical Structures, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: Aiming at the difficulty of the existing variable stiffness technology that the stiffness control structure is complex and the stiffness change rate is low, and it cannot adapt to the deformation structure, a new type of flexible electrostatic adsorption variable stiffness structure is proposed to achieve flexible stiffness of the flexible structure. This structure consists of two upper and lower electrostatic adsorption layers and an interlayer. The electrostatic adsorption layer is composed of a three-layer structure of a substrate, an electrode layer and a sealing film. Instead of the conventional metal electrode, the novel electrode in the electrostatic adsorption layer is made by mixing the carbon grease and silicone rubber. The substrate and the sealing film are also made of soft material. Therefore, the entire electrostatic adsorption layer is a flexible structure, which can stand stretching, compression, bending, torsion and other deformation within certain limits. Thus, the stiffness of different shape structures can be changed. This study reveals the stiffness change effect of the electrostatic adsorption variable stiffness structure via experiments, and explores various factors affecting variable stiffness effect. The results show that the higher the voltage or the smaller the thickness of the film, the more obvious the effect of

收稿日期: 2018-04-12。 作者简介: 刘晨(1994—),男,硕士生;陈花玲(通信作者),女,教授,博士生导师。 基金项目: 国家自然科学基金重大研究计划培育项目(91648110)。

网络出版时间: 2018-08-03 网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1069.T.20180803.1025.002.html>

the structural stiffness. Under the same voltage, the double-layer electrostatic adsorption layer has better effect than the single layer. The thickness of the interlayer does not affect the stiffness change. This approach only needs to adjust the stiffness of the structure by changing the voltage, so it is convenient to operate. The stiffness adjustment range gets very wide and the stiffness change rate is up to 180%.

Keywords: variable stiffness; flexible electrode; electrostatic adsorption

变刚度材料和变刚度技术可应用于机械结构的主动吸振以及房屋、桥梁等建筑的抗震等,不论是在科学研究还是在工程应用中,都有着举足轻重的作用^[1-2]。

目前,可应用于变刚度的智能材料类型主要有形状记忆合金,压电陶瓷等^[3-4]。其中,形状记忆合金是通过相变达到变刚度的效果,因而其刚度变化不连续,且响应速度较慢^[5-6];压电陶瓷可实现刚度连续变化,响应速度快,但其刚度变化范围较小,且难以适应各种曲面结构刚度的变化^[7]。因此,单纯通过某一材料达到令人满意的变刚度效果比较困难。

实现变刚度的技术有电流变技术、磁流变技术、气压调节技术、变刚度弹簧等^[8-9]。其中,电流变技术是利用电流变液的流变性质在电场中会发生快速且可逆的调节作用而改变刚度的^[10-11],但在实际应用中,电流变液的沉降性及再分散性等问题制约了其广泛应用。磁流变技术包括了磁流变液及磁流变弹性体两种类型。磁流变液与电流变液变刚度机理相似,所不同的是利用磁场而不是电场调节其刚度。磁流变弹性体作为一种新型智能材料,应用于吸振器时刚度可通过外加磁场控制^[12-13],可克服磁流变液的沉降性,但磁流变弹性体的磁流变效应尚不够大^[14]。气压调节变刚度技术在仿生领域有着重要影响^[15-16],然而气压调节需要气泵、气路元件等较为笨重的设备,对一些要求设备轻便的场合不适用。变刚度弹簧属于传统变刚度技术,稳定可靠,但结构较为复杂,形状固定,适用对象有限。

如前所述,变刚度结构常应用于结构的减振器中。为了提高减振器的性能,我们既希望其具有结构简单、便于控制的变刚度特性,也希望具有一定柔性,从而可适应于不同结构或形状的减振器的刚度调节。显然,已有的刚度调节技术难以满足上述要求。

近年来,静电吸附技术以不破坏被吸物品、吸力可控等优势而发展迅速。目前的静电吸附技术主要用于吸附物品,如应用于机器人的抓手时可以吸附、抓取外形不规则的物体^[17],应用于爬墙机器人的足体时可攀爬不同角度的竖直表面^[18]。

鉴于现有变刚度技术存在的局限性,本文提出

了一种新型柔性静电吸附变刚度结构,由于静电吸附原理是利用电直接调节,因此结构简单、变刚度控制方便,且因为整个结构都为柔性材料所制,因此可以在任何形状下完成变刚度的要求。

1 柔性变刚度结构原理及设计

1.1 静电吸附原理

静电吸附基本原理是利用金属电极与被吸物件表面形成的电容系统实现的^[19]。如图 1 所示,金属电极正负交错排列构成静电吸附层,电极宽度为 a ,极间距离为 d_1 ,正极与负极之间形成电场,分为主电场和边缘电场。主电场线只穿过静电吸附层内部,而边缘电场将会穿过静电吸附层周围的空间,并会引起被吸物件表面的极化,使物件表面聚集与附近电极极性相反的电荷,这些电荷的聚集将使物件与静电吸附层的电极之间产生电场力,进而达到电极吸引物件的效果^[20]。

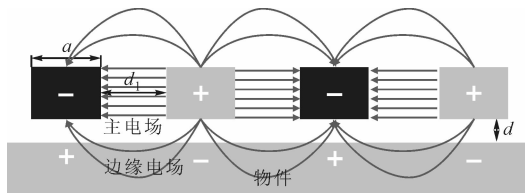


图 1 静电吸附原理图

电极与被吸物件表面的相对介电常数为

$$\epsilon_r = k_1 \epsilon_{r1} + k_2 \epsilon_{r2} + k_3 \epsilon_{r3} \quad (1)$$

式中: ϵ_{r1} 为电极封装层相对介电常数; ϵ_{r2} 为空气相对介电常数; ϵ_{r3} 为被吸物件表面相对介电常数。

静电吸附力计算公式为^[21]

$$F = \frac{\epsilon_r \epsilon_0 a l}{2 d^2} U^2 + \frac{0.265 \epsilon_r \epsilon_0 a^{0.5} l}{d_1^{1.5}} U^2 = \frac{\epsilon_r \epsilon_0 A U^2 (d_1^{1.5} + 0.53 a^{-0.5} d^2)}{2 d^2 d_1^{1.5}} \quad (2)$$

式中: d 为电极与被吸物件表面的距离; a 为电极宽度; l 为电极长度; A 为电极的有效面积; ϵ_0 为真空介电常数; U 为所加电压。

由式(2)可知,静电吸附力 F 与所加电压 U 的二次方成正比关系,与被吸物件材料的相对介电常

数 ϵ_r 成正比。此外, a 、 A 、 d 以及 d_1 等几何参数均会影响静电吸附力大小,其影响关系由式(2)可获得。

1.2 柔性变刚度结构的设计

根据静电吸附原理,在本文设计中,为了通电后产生较大的静电吸力,电极采用密集排布的梳齿交叉电极以增大有效吸附面积。为了实现柔性变刚度结构,本文的静电吸附层的电极采用模量较小的硅橡胶混合材料制成,用以代替传统的金属电极。静电吸附层的其他组成部分亦采用硅橡胶混合材料制作而成,使其整体具有较小的模量,从而可以实现拉伸、扭转、弯曲等动作,使装置可以满足在不同形态下的静电吸附工作,这对于各种形态下的变刚度要求具有重要价值。为此,本文设计的柔性变刚度结构如图 2 所示,由静电吸附层和中间夹层构成。

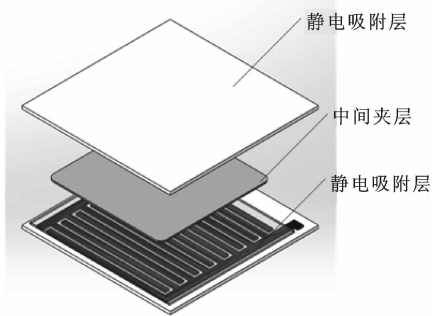
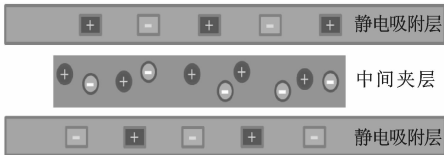
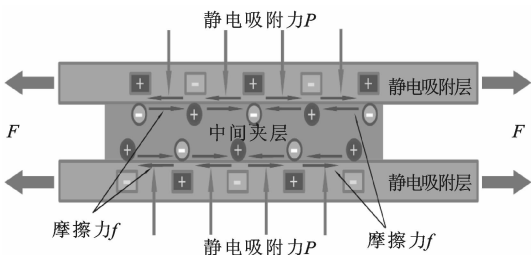


图 2 变刚度结构示意图

该结构工作原理如图 3 所示,即未施加电压时,静电吸附层与中间夹层并没有紧密贴合,中间夹层材料内部的正负电荷随机分散排布(如图 3a 所示)。若存在外界拉力 F 作用于静电吸附层的两端时,静电吸附层可以自由变形,此时该结构刚度较低;当对



(a) 结构通电前状态



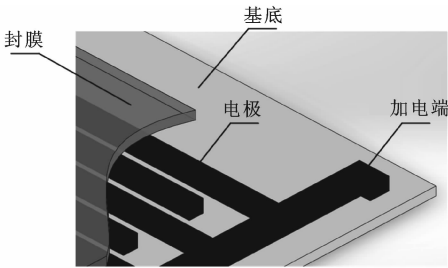
(b) 结构通电后状态

图 3 柔性变刚度结构原理示意图

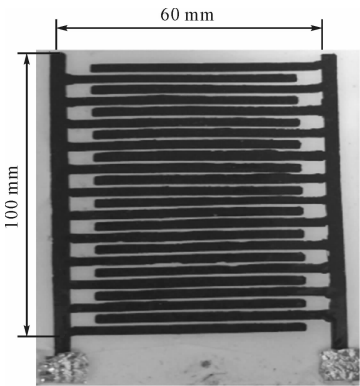
静电吸附层施加电压后,中间夹层被极化,正负电荷有序排列,静电吸附层吸附并压紧中间夹层,产生静电吸附力 P (如图 3b 所示)。当外界拉力 F 作用于静电吸附层的两端时,由于产生静电吸附力,增大了静电吸附层与中间夹层间的摩擦力 f ,静电吸附层的变形将受到较大的限制,相当于结构整体刚度得到了提高。

2 静电吸附结构制作工艺

图 4a 是本文设计的静电吸附层结构示意图,图 4b 是实物图,由基底、电极、封膜 3 部分构成。其中,基底材料选用 Ecoflex 00-20 型硅橡胶与钛酸钡纳米颗粒的混合物,电极材料选用导电碳膏与硅橡胶的混合物,封膜材料选用 186 型硅橡胶。需要强调的是,由于静电吸附结构利用的是电场效应而非电流效应,因此尽管由导电碳膏和硅橡胶混合物制备而成的电极材料电阻率比传统的金属材料电极大,但并不影响静电吸附结构的正常工作。



(a) 静电吸附层结构示意图



(b) 静电吸附层实物图

图 4 静电吸附层结构与实物图

制备柔性静电吸附层的工艺为:首先使用脱泡搅拌机将基底原材料混合均匀,然后使用流延机在聚酯薄膜(PET)上流延一层基底;待其加热固化后,将事先用激光切割机切好的电极层掩膜版黏附在基底上,再使用流延机在基底上流延一层电极材料;流

延完成后立刻将掩膜版取下并对电极材料加热至其固化;接着在电极层上流延一层封膜,并加热使其固化;最后利用刀片或激光切割机将静电吸附层从 PET 薄膜上取下。

通过控制流延速度等参数,可对静电吸附层 3 个组成部分的厚度进行定量控制,本文将基底层厚度控制在 $200\sim 400\ \mu\text{m}$,电极层厚度控制在 $100\sim 200\ \mu\text{m}$,封膜层厚度控制在 $200\sim 400\ \mu\text{m}$ 。

将制作好的两个静电吸附层与夹层按图 2 方式排布,做成三明治结构,并将静电吸附层的四周用硅橡胶粘合形成一个整体。

3 测试装置及测试方法

3.1 刚度调节性能测试方法

图 5 所示为刚度调节测试原理示意图。将结构整体夹持在拉力仪上进行拉伸试验,对结构施加电压,观察其刚度变化。这里,将结构的等效刚度定义为拉伸刚度

$$k = P/\delta \tag{3}$$

式中: P 为拉力, N; δ 为变形量, m。

刚度变化率 β 定义为

$$\beta = \Delta k/k_0 \tag{4}$$

式中: k_0 为受载且不施加电压条件下的结构刚度; Δk 为施加电压后与未施加电压时刚度之差。

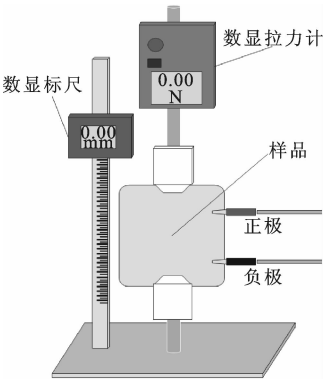


图 5 刚度调节测试原理示意图

3.2 静电吸附力测试方法

图 6 所示为静电吸附力测试原理示意图。将铜片固定在载物台 1 的下表面,静电吸附层固定在载物台 2 的上表面,调整载物台 1 的高度,使得铜片下表面与静电吸附层上表面恰好接触。对静电吸附层施加一直流电压,使其产生静电吸附力并吸附铜片,缓慢抬升载物台 1,直至静电吸附层与铜片彼此脱离,读出最大拉力,此拉力即为在该电压下静电吸附层对铜片产生的静电吸附力。

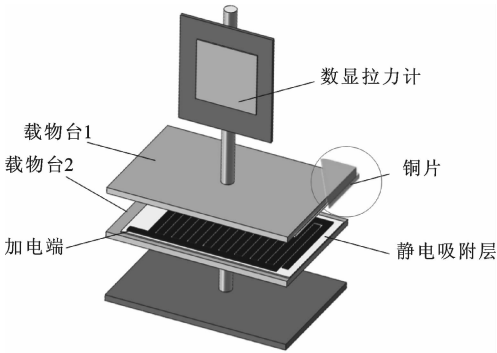


图 6 静电吸附力测试原理示意图

4 测试结果及分析

为了探索影响刚度调节效果的各种因素,本文做了 5 组不同的对比试验,探究了不同静电吸附层加电层数、不同夹层材料、不同夹层厚度、不同电压、不同封膜厚度等各种因素对结构工作效果的影响。另外,通过静电吸附力试验探究了电压、静电吸附力、刚度变化率 3 者之间的对应关系。

4.1 单层与双层静电吸附层加电对比试验及结果

变刚度结构静电吸附层 1 和 2 同时加电的变刚度效果如图 7a 所示,只有静电吸附层 1 加电的变刚度效果见图 7b。



(a) 双层加电原理



(b) 单层加电原理

图 7 单层、双层加电试验结构图

单层与双层静电吸附层加电对比试验结果如图 8 所示。由图 8 可见:电压加至 4.0 kV 时,单层加电的刚度几乎没有明显变化,而同样电压下双层加电的刚度变化率 β 已经超过 40%;电压加至 5 kV 时,单层加电的刚度变化率 β 在 10% 左右,双层加电的刚度变化率 β 达到 65%。试验数据表明双层加电的工作效果优于单层加电。

分析上述试验结果的原因可知:单层加电仅有静电吸附层 1 吸附中间夹层,此时的静电吸附层 2

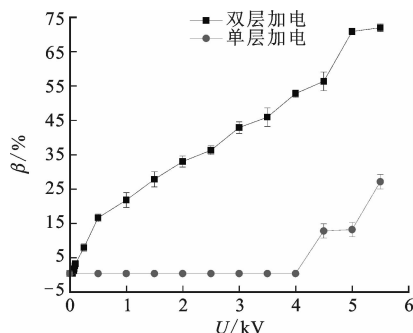


图8 单层、双层静电吸附层加电试验结果

与中间夹层之间没有吸附力，二者彼此分离，因此摩擦力只存在于静电吸附层1和中间夹层之间；双层加电时，静电吸附层1与静电吸附层2同时吸附中间夹层，3者紧密贴合，因此静电吸附层1、2与中间夹层之间都存在摩擦力。

所以，施加同样的电压时，双吸附层结构的刚度变化会比单吸附层结构明显。另外，图8显示电压加至4.5 kV之前，单吸附层结构刚度几乎无变化，原因是由于电压较低，且仅有一层吸附层吸附中间夹层，摩擦力相对较小，此时施加拉力时，容易导致静电吸附层与中间夹层脱离，所以结构刚度变化不明显。

4.2 夹层材料对比试验及结果

为了探究夹层材料对结构变刚度的影响，我们分别针对厚度近似为 $50\text{ }\mu\text{m}$ 的铜片和A4纸的夹层材料做了对比试验，变刚度结构采用图7b所示结构，试验结果如图9所示。由图9可见，同样厚度条件下，结构夹层使用铜片比使用A4纸刚度变化明显，电压在5 kV时，夹层为A4纸的结构刚度变化率约为40%，而夹层为铜片的结构刚度变化率达到67%左右。

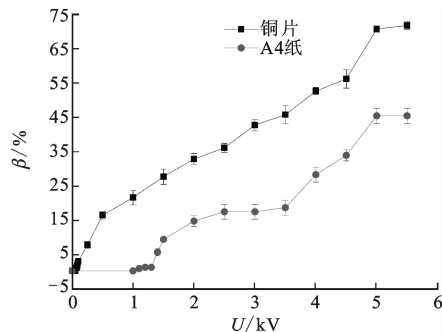


图9 不同夹层材料试验结果

当外部施加电压条件相同时，材料越易被极化，内部因极化的正负电荷分布就越集中，产生的静电吸附力越大，静电吸附层与中间夹层之间的摩擦力

就越大，结构变刚度效果越明显。

4.3 夹层厚度对比试验及结果

为了观察不同厚度的夹层对结构变刚度效果的影响，对不同厚度的铜片做了对比试验，结果如图10所示。可以发现，同样的电压条件下，夹层为 $110\text{ }\mu\text{m}$ 铜片的结构与夹层为 $50\text{ }\mu\text{m}$ 铜片的结构刚度变化效果基本一致。

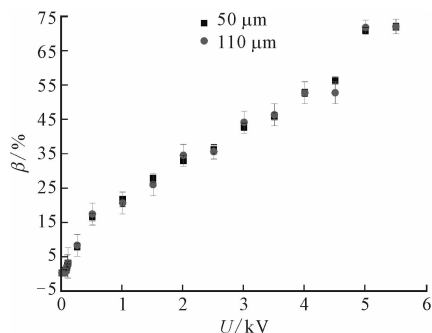


图10 不同厚度铜片试验结果的比较

由式(2)可知，同样的夹层材料，极化效果相同，所以同样电压条件下，产生的静电吸附力相同，夹层与吸附层之间摩擦力一样，因此厚度并不会改变吸附效果，也就不会引起结构刚度变化的不同。

4.4 电压对比试验及结果

通过对结构夹层的探究与试验，发现夹层材料、厚度等因素都会影响结构的变刚度效果，除此之外，由式(2)可以看出，在影响静电吸附力的因素中，电压与静电吸附力成正相关。因此，本小节在结构负载不变的情况下，研究结构刚度与施加电压之间的关系，结果如图11所示（图中为5次试验的结果）。由试验结果可以看出，在电压从0增大到5.5 kV的过程中，该结构的刚度逐渐增大，且刚度变化率随电压的增加近似线性增大。

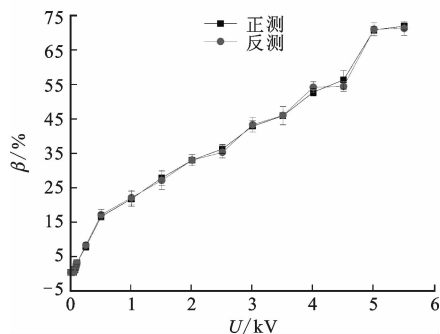


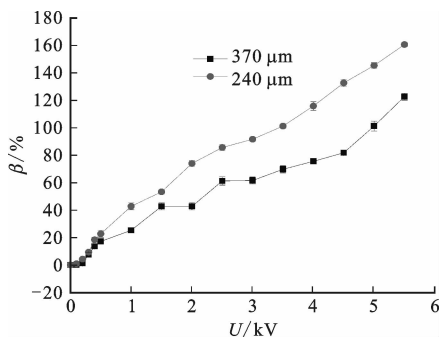
图11 电压升高及降低过程中刚度变化的试验结果

图11还给出了电压降低过程（从5.5 kV减小到0）中结构刚度的变化情况。从图11可以看出，电压升高与降低过程中刚度变化曲线基本吻合，说

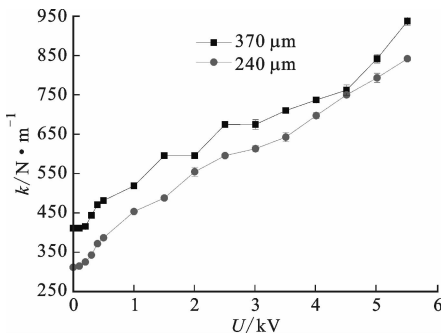
明该结构不存在迟滞现象。

4.5 封膜对比试验及结果

由式(2)可知,静电吸附力除了受电压的影响外,也受电极与被吸物件表面的距离 d 的影响,在本文的结构设计中,它就是静电吸附层封膜的厚度。理论上 d (封膜厚度)越小,静电吸附力越大,变刚度效果会更好。为了验证这一推论,本文对不同厚度的封膜结构,做了两组对比试验,一组结构的封膜厚度为 $370\ \mu\text{m}$,另外一组为 $240\ \mu\text{m}$,试验结果如图12所示。由图12a可知,随着电压的逐渐增加,封膜厚度为 $240\ \mu\text{m}$ 的结构的变刚度效果较 $370\ \mu\text{m}$ 的结构明显;由图12b可知,因封膜厚度会影响结构本身的刚度,所以封膜厚度为 $240\ \mu\text{m}$ 的结构与封膜厚度为 $370\ \mu\text{m}$ 的结构相比,前者的整体刚度小于后者。由此可得到结论:当施加相同电压时,封膜厚度越小,静电吸附力越大,变刚度效果越明显;此外,封膜厚度越小,结构整体的刚度越小。所以,寻求一种自身刚度受厚度影响小的封膜材料对后期结构优化有重要意义。



(a) 刚度变化率随电压变化



(b) 刚度随电压变化

图12 不同封膜厚度的试验结果

4.6 静电吸附力试验及结果

为了探究电压 U 、静电吸附力 F 、刚度变化率 β 三者之间的对应关系,试验中将电压由0增大至 $5.5\ \text{kV}$,测得对应电压下的静电吸附力,并对照刚度变化率,结果如图13所示。由图可见:静电吸附力与

电压大致呈二次方关系,符合式(2)的描述,当电压达到 $5.5\ \text{kV}$ 时,对应的静电吸附力为 $100\ \text{mN}$;结构的刚度变化率与电压基本为正相关关系,但并非二次方关系,在电压较小或较大时,结构的刚度变化率随电压增大而变化很快,当电压在 $2\sim 4.5\ \text{kV}$ 之间时变化缓慢。

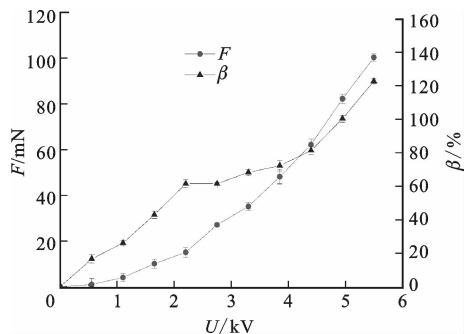


图13 静电吸附力试验结果

5 结 论

本文针对现有变刚度技术中刚度控制结构复杂或刚度变化率低,且无法适应复杂结构的难题,提出了一种新型柔性静电吸附变刚度结构。研究了影响结构变刚度效果的各种因素发现,采取双层静电吸附层、易被极化夹层材料以及较小封膜厚度等措施可以增加结构的刚度变化效果。这些试验结果对于实际变刚度结构的设计具有指导意义。

该设计可以满足较大的刚度变化范围,且刚度变化由电压调节,结构简单,操作简便,工作稳定性好,应用前景广阔。

参考文献:

- [1] 殷永康, 陈光治. 半主动动力吸振器的变刚度技术[J]. 机械科学与技术, 2014, 33(7): 1000-1007.
YIN Yongkang, CHEN Guangzhi. The varied stiffness technologies in semi-active dynamic vibration absorber [J]. Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering, 2014, 33(7): 1000-1007.
- [2] 林阿斌. 服务机器人关节变刚度柔顺驱动器研究[D]. 杭州: 杭州电子科技大学, 2012: 1-2.
- [3] 陈花玲, 罗斌, 朱子才, 等. 4D打印: 智能材料与结构增材制造技术的研究进展[J]. 西安交通大学学报, 2018, 52(2): 1-12.
CHEN Hualing, LUO Bin, ZHU Zicai, et al. 4D printing: progress in additive manufacturing technology of smart materials and structure [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2018, 52(2): 1-12.
- [4] 张建军, 高峰, 陈玉龙, 等. 基于压电陶瓷驱动的并

- 联微动机器人静力学及其微动平台的静刚度分析[J]. 机械工程学报, 2004, 40(11): 82-87.
- ZHANG Jianjun, GAO Feng, CHEN Yulong, et al. Static stiffness analysis of static microcomputer and its micro-motion platform based on piezoelectric ceramic drive [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2004, 40(11): 82-87.
- [5] NAKAI H, KUNIYOSHI Y, INABA M, et al. Metamorphic robot made of low melting point alloy [C]// IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2002: 2025-2030.
- [6] SCHUBERT B E, FLOREANO D. Variable stiffness material based on rigid low-melting-point-alloy-microstructures embedded in soft poly (dimethylsiloxane) (PDMS) [J]. RSC Advances, 2013, 3(46): 24671-24679.
- [7] 张涛, 孙立宇, 蔡鹤皋. 压电陶瓷基本特性研究 [J]. 光学精密工程, 1998, 6(5): 28-34.
- ZHANG Tao, SUN Liyu, CAI Hegao. Research on basic characteristics of piezoelectric ceramics [J]. Optics and Precision Engineering, 1998, 6(5): 28-34.
- [8] KUDER I K, ARRIETA A F, RAITHER W E, et al. Variable stiffness material and structural concepts for morphing applications [J]. Progress in Aerospace Sciences, 2013, 63(6): 33-55.
- [9] KORNBLUH R, PRAHLAD H, PELRINE R. Rubber to rigid, clamped to undamped: Toward composite materials with wide-range controllable stiffness and damping [C]// Proceedings of SPIE: The International Society for Optical Engineering. San Diego, CA, USA: SPIE, 2004: 372-386.
- [10] ZHAO X P, ZHAO Q, GAO X M. Optical activity of electrorheological fluids under external electric field [J]. Journal of Application Physics, 2003, 93(7): 4309-4314.
- [11] OH S Y, KANG T J. Electrorheological response of inorganic-coated multi-wall carbon nanotubes with core-shell nanostructure [J]. Soft Matter, 2014(10): 3726-3737.
- [12] GINDER J M, SCHLOTTER W F, NICHOLS M E. Magnetorheological elastomers in tunable vibration absorbers [C]// Proceedings of SPIE: The International Society for Optical Engineering. San Diego, CA, USA: SPIE, 2001: 103-110.
- [13] 宋伟志, 周辉, 赵艳青, 等. 基于磁流变弹性体变刚度动力吸振器的研究 [J]. 舰船科学技术, 2015, 37(11): 64-68.
- SONG Weizhi, ZHOU Hui, ZHAO Yanqing, et al. Study of variable stiffness dynamic vibration absorber based on magnetorheological elastomer [J]. Ship Science and Technology, 2015, 37(11): 64-68.
- [14] 涂福泉, 刘小双, 毛阳, 等. 电流变液的研究现状及其应用进展 [J]. 材料导报, 2014, 28(11): 66-68.
- TU Fuquan, LIU Xiaoshuang, MAO Yang, et al. Recent progress and application of electrorheological fluids [J]. Materials Review, 2014, 28(11): 66-68.
- [15] 顾兴士. 气压调节变刚度柔性仿生机器鱼机理及实验研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2015: 1-4.
- [16] 王田苗, 郝雨飞, 杨兴帮, 等. 软体机器人: 结构、驱动、传感与控制 [J]. 机械工程学报, 2017, 53(13): 1-13.
- WANG Tianmiao, HAO Yufei, YANG Xingbang, et al. Soft robotics: structure, actuation, sensing and control [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2017, 53(13): 1-13.
- [17] SHINTAKE J, ROSSET S, SCHUBERT B, et al. Versatile soft grippers with intrinsic electroadhesion based on multifunctional polymer actuators [J]. Advanced Materials, 2016, 28(2): 231-238.
- [18] 王黎明, 胡青春. 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): 22-25.
- WANG Liming, HU Qingchun. Design of a double track wall-climbing robot based on electrostatic adsorption structure [J]. Journal of Machine Design, 2012, 29(4): 22-25.
- [19] ASANO K, HATAKEYAMA F, YATSUZUKA K. Fundamental study of an electrostatic chuck for silicon wafer handling [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2002, 38(3): 840-845.
- [20] KOH K H, KUPPAN CHETTY R M, PONNAM-BALAM S G. Modeling and simulation of electrostatic adhesion for wall climbing robot [C]// IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2011: 2031-2036.
- [21] 杜姗姗, 孙国辛, 黄呈伟. 飞行吸附机器人的静电吸附单元优化设计研究 [J]. 机械制造与自动化, 2015, 44(6): 156-159.
- DU Shanshan, SUN Guoxin, HUANG Chengwei. Optimal design of electrostatic adhesion for flying and adhesive robot [J]. Machine Building & Automation, 2015, 44(6): 156-159.

(编辑 杜秀杰)