

DOI:10.16356/j.1005-2615.2021.03.005

# 一种用于动物黏附运动机制研究的多参数同步 测量传感器

张步祥<sup>1</sup>, 沈鸿烈<sup>2</sup>, 肖博<sup>3</sup>, 曹铮铮<sup>3</sup>, 戴振东<sup>1</sup>

(1.南京航空航天大学机电学院,南京 210016; 2.南京航空航天大学材料科学与技术学院,南京 211106;

3.北京华测试验仪器有限公司,北京 100094)

**摘要:**在长期生存竞争中,包括壁虎在内的许多动物演化出了与其运动表面间形成黏附力的器官。已有研究发现:生物黏附力与接触面积密切相关,基于范德华力的干黏附可能受包括摩擦接触电荷导致的电场在内的外电场调控。壁虎运动过程接触/摩擦电的存在已得到证实,反力、实际接触面积两个参数的单独测量和表征工作也取得一定成果,但由于不同参数测试技术和设备之间存在功能和结构上的冲突,上述3个参数的同步测试及综合研究仍未能顺利展开。本文在综合考量了上述多参数测试技术之间的冲突后开发了一种新型的多参数测量复合传感器,实现了上述3个参数的同步测试,并以具有优异黏附能力的大壁虎为对象进行了初步验证实验。结果表明所研制的复合传感器能够满足黏附力、黏附实际接触面积以及黏附接触电荷的同步测量需求,为研究生物黏附机制和仿生黏附奠定了设备基础。

**关键词:**运动接触反力;实际接触面积;接触电荷;同步测量

**中图分类号:**TP212.3 **文献标志码:**A **文章编号:**1005-2615(2021)03-0359-07

## A Sensor for Synchronous Measurement of Multiple Parameters in Revealing Animal's Adhesive Mechanism

ZHANG Buxiang<sup>1</sup>, SHEN Honglie<sup>2</sup>, XIAO Bo<sup>3</sup>, CAO Zhengzheng<sup>3</sup>, DAI Zhendong<sup>1</sup>

(1. College of Mechanical and Electrical Engineering, Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, Nanjing 210016,

China; 2. College of Material Science and Engineering, Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, Nanjing 211106,

China; 3. Beijing Huace Test Instrument Company, Beijing 100094, China)

**Abstract:** Some animals like geckos have evolved attachment organs that allow them to generate attractive force while negotiating their surroundings. It has been found that biological adhesion is related to the contact area. The adhesion originated from van der Waals interactions may be affected by external electric fields, including the electric field caused by triboelectrification. The triboelectrification has been confirmed in geckos, and the measurement of reaction force and real contact area is also successfully carried out. Whereas, there is no simultaneous measurement and comprehensive studies of the above three parameters because there are conflicts among the requirements of their measurement technologies. After comprehensively considering the test requirements, we develop a new sensor to measure the above three parameters at the same time. An

**基金项目:**国家自然科学基金重点(51435008)资助项目。

**收稿日期:**2020-03-06;**修订日期:**2020-05-05

**通信作者:**戴振东,男,博士,教授,博士生导师,E-mail: zddai@nuaa.edu.cn。

**引用格式:**张步祥,沈鸿烈,肖博,等.一种用于动物黏附运动机制研究的多参数同步测量传感器[J].南京航空航天大学学报,2021,53(3):359-365. ZHANG Buxiang, SHEN Honglie, XIAO Bo, et al. A sensor for synchronous measurement of multiple parameters in revealing animal's adhesive mechanism[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2021, 53(3):359-365.

experiment with geckos is also conducted to verify the availability and reliability of the newly developed sensor, laying an equipment foundation for future studies on biological and bio-inspired adhesion.

**Key words:** contact force; actual contact area; contact charge; synchronous measurement

在长期自然选择压力下,不少动物(如壁虎、蜘蛛、苍蝇等)演化出了特殊的黏附运动能力,能够利用运动附着器官(如脚掌)与接触面间形成可调控的吸附力<sup>[1-3]</sup>。这些黏附力通常来源于动物运动附着器官与基底表面之间的毛细力(称为湿黏附)或范德华力(称为干黏附)。已有研究发现以壁虎为代表的干黏附力与接触面积有关<sup>[4-5]</sup>,并可能受到包括接触摩擦致电产生的电场在内的外电场的影响<sup>[6]</sup>。壁虎运动接触过程中的接触/摩擦致电已经得到了证实<sup>[7-8]</sup>,并且接触/摩擦电荷的电场强度也可能与接触区域面积相关。因此,可以认为黏附力、接触面积、接触/摩擦电荷三者之间存在耦合作用。测定壁虎运动过程的反力、实际接触面积和接触电荷并辅以行为学测试,是探究接触摩擦致电对黏附的影响、揭示壁虎黏附机制、建立仿生机器人设计准则的基础性工作。然而,受限于测试技术,迄今尚未有运动反力、接触面积、接触/摩擦电同步测量研究的报道。

为解决上述研究需求,本文设计研制了一种复合传感器,解决了接触面积和电荷同步测量、系统标定等困难,实现了运动反力、接触面积以及接触电荷的同步测量。通过将多个传感器组成运动通道的方式对自由运动的壁虎进行了测量。本文还验证了所研制传感器的可用性和可靠性,为进一步开展生物黏附和仿生黏附研究奠定重要的设备和方法基础。

## 1 测试系统设计

国内外已有关于动物运动反力<sup>[9]</sup>、接触面积<sup>[10]</sup>和接触/摩擦电<sup>[7]</sup>单独测试的研究,本文研究的重点在于解决多参数同步测试引入的约束和新问题。运动反力测试可通过应变、电容、压电和光学等多种力传感器实现。最常用的是电阻应变片式力传感器,其设计要点是平衡传感器的高灵敏度和高固有频率。实际设计中需要尽量降低传感单元的质量、保证传感单元的固有频率。实际接触面积测定可通过受抑全反射原理在接触区域形成光斑、通过光斑大小获得面积数据。该方法要求传感单元透明,所用材料具有较高的折射率<sup>[11]</sup>。接触/摩擦电测试通常基于静电感应原理开展,要求传感单

元有好的导电性以减少电荷耗散,保证测量结果的准确度。然而,要实现三者的同步测量还面临着巨大的挑战:为了实现接触面积和接触作用力的测量,必须将面积测量单元和力传感器连接,并且力传感器不能妨碍接触面积的观测,因此面积测量单元需要偏置,这会导致力传感器承受非对心载荷;为了实现接触电荷的测量,需要在接触区域的下方布置电极(板),通常电极的厚度越大,电学性能越好,但重量也就越大;将上述测试单元与力传感器结合后会显著增加力传感器系统的重量,导致系统的动态特性降低;此外,电极的光学性能又会限制接触面积的观测。

为平衡上述测试技术和方法上的冲突、实现三者的同步测试,本文设计了如下复合传感器:用1根透明的有机玻璃梁(175 mm×35 mm×2 mm,折射率1.49,透光率大于90%)作为动物附着器官的接触对象并在其两端添加光源形成内全反射;有机玻璃梁下表面镀有导电透明氧化铟锡(Indium tin oxide, ITO)薄膜(厚度约10 μm,折射率1.74,透光率大于66%);镀膜后的有机玻璃梁的两端与两个三维力传感器连接。有机玻璃梁与两个三维力传感器通过固定连接件连接,构成运动反力的传感单元;有机玻璃梁和光源构成对脚趾实际接触面积的传感单元;带导电ITO膜的有机玻璃梁同时也是接触/摩擦电荷的传感单元。传感器的力信号和透明电极的电信号通过自研的信号调理与数据采集模块进行前置调理、后续放大和A/D变换,经EtherCAT总线汇集后上传到计算机;接触光斑的图像信号由传感器下方、视轴与有机玻璃梁垂直的高速摄像机采集;多个传感器组成一个通道以容许动物自由运动,力、电信号的采集和高速摄像机的图像信号的采集通过触发信号同步触发(图1)。

### 1.1 测量原理

#### 1.1.1 运动接触反力测量

当壁虎在复合传感器组成的阵列上运动时,运动反力通过有机玻璃梁分别作用到两侧的三维电阻应变片式力传感器上。本文中使用的力传感为“T”形结构,单个力传感器的量程1 500 mN,固有频率大于450 Hz<sup>[12]</sup>。当动物的运动附着器官与有机玻璃梁发生相互作用时,有机玻璃梁的受力分析

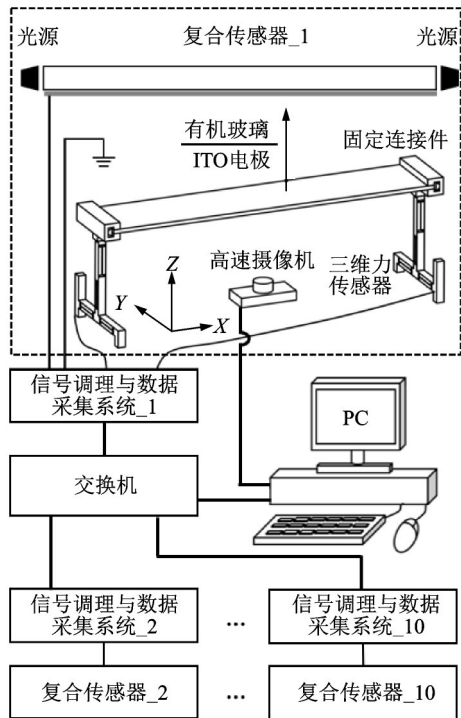


图1 基于复合传感器的多参数运动试验系统

Fig.1 Multi-parameter measurement system for locomotion experiment based on new composite sensors

如图 2 所示。在支撑点 A 和 B 测到的反力  $(F_x^A, F_y^A, F_z^A)$  和  $(F_x^B, F_y^B, F_z^B)$ , 与作用在 O 点的运动反力  $(F_x, F_y, F_z)$  间的关系如下

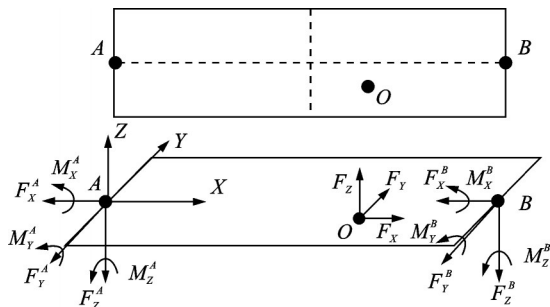


图2 有机玻璃梁的受力分析

Fig.2 Force analysis of PMMA beam

$$\begin{cases} F_x = F_x^A + F_x^B \\ F_y = F_y^A + F_y^B \\ F_z = F_z^A + F_z^B \end{cases} \quad (1)$$

显然,动物运动附着器官与有机玻璃梁之间的相互作用力可以由两个力传感器测得的力来表示。实际测量中,运动反力可能作用于  $AXY$  平面的任意一点。为降低这种偏心载荷对整个系统测量结果的影响,并避免对两个传感单元分别进行数据处理,实际操作时将两个传感单元同一方向的测量电桥进行了并联处理<sup>[13]</sup>。为确定复合传感器的动态特性,对复合传感器整体进行有限元模态分

析,各组成部分的相关参数如表 1 所示。

表 1 复合传感器各部件材料的物理参数

Table 1 Physical parameters of parts in the composite sensor

材料	杨氏模量/ GPa	泊松比	密度/(g· cm <sup>-3</sup> )
铝合金	72	0.33	2.78
有机玻璃	3.09	0.33	1.2
光敏树脂	2.51	0.41	1.2

模态分析利用 Abaqus 完成,固定连接件(光敏树脂)与三维力传感器(铝合金 LY12CZ)、有机玻璃梁的接触面均设为固结绑定,使用 C3D8R 单元类型进行网格划分,并在三维力传感器的薄壁处进一步细分网格,将三维力传感器下方支脚的  $XY$  底面和  $YZ$  侧面固定座位边界条件,得出复合传感器的前六阶固有频率,如表 2 所示。

表 2 复合传感器的固有频率和振型特征

Table 2 Intrinsic frequencies and vibration characteristics of the composite sensor

阶数	组合传感器	
	固有频率/Hz	振型特征
一	103.22	沿 Z 向平动
二	110.30	沿 X 向平动
三	159.64	沿 Y 向平动
四	229.15	绕 Z 轴转动
五	272.88	绕 Y 轴转动
六	338.31	绕 X 轴转动

根据上述分析,复合传感器的一阶固有频率 103.22 Hz,满足壁虎脚掌低频力信号的测量需求。

### 1.1.2 运动接触面积测量

图 3 示意了利用受抑全反射原理测量接触面积的过程。光线从光密介质(透明有机玻璃)传播到光疏介质(空气)时,入射角大于临界角的光线将在有机玻璃-空气界面上发生全反射。当一个物体靠近有机玻璃并且与有机玻璃表面的距离较小时,有机玻璃内部的全反射将会受到影响,有一部分光线将从有机玻璃中透射出来。当物体与有机玻璃接触时,接触区域超过 80% 的光线会透射出来,照射在物体上形成亮斑。通过对亮斑的观察和测量可获得接触区域的面积<sup>[14]</sup>。

图像处理程序中根据亮度阈值提取出真实接触区域,处理效果如图 4 所示。通过程序提取接触光斑的像素点数目,通过标尺换算即可得出实际接触区域的面积。

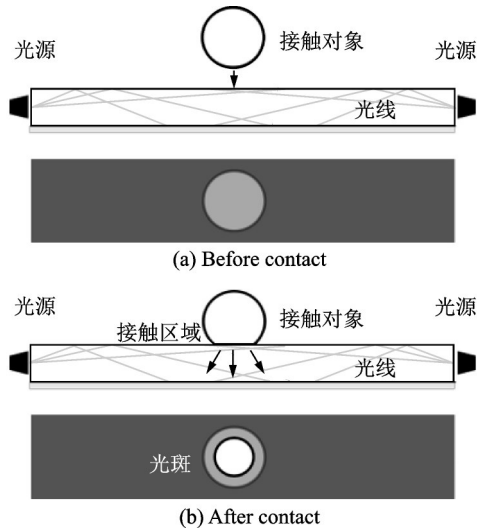


图3 受抑全反射原理接触光斑形成过程

Fig.3 Highlight contact region through frustrated total internal reflection

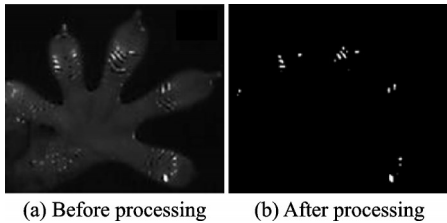


图4 接触图像处理

Fig.4 Image processing of contact regions

1.1.3 接触电荷测量

接触/摩擦电荷的测量利用了静电感应原理。前期研究没有接触/摩擦电荷与接触面积同步测试的要求或不要求电极具有透明特性,因此采用金属(铜)作为电荷采集的电极。本文中为同时实现接触面积测试和接触/摩擦电荷测试,采用透明导电的ITO材料作为电极,具体实现方式是在有机玻璃下表面溅射ITO材料<sup>[15]</sup>。

根据静电感应原理,接触对象与有机玻璃上表面发生接触后产生电荷Q的同时,有机玻璃下表面的ITO电极上表面产生与有机玻璃表面等量异号的电荷、下表面产生与有机玻璃表面等量同号的电荷。因此,测量ITO电极下表面电荷即可得到有机玻璃表面的电荷。电荷通常通过对ITO电极与地面之间的电压差和电容测量后换算。考虑到ITO电极与地面之间的电容 $C_1$ 通常很小,本文在信号处理端内置了一个大电容 $C_2$ ,并将 $C_1$ 与 $C_2$ 并联后形成电容 $C_e$ (图5)。因此,测量电容 $C_e$ 的电压 $U_s$ 后可以换算得到待测电荷量 $Q=U_s C_e$ 。

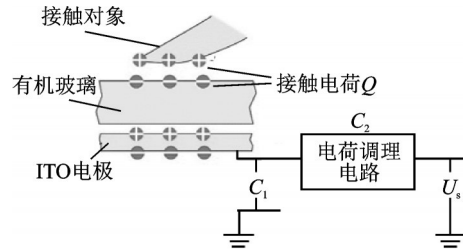


图5 接触电荷测量原理

Fig.5 Measurement of tribocharge

1.2 传感器标定

1.2.1 力测量模块标定

在复合传感器的接触面上施加外力载荷 $F$ ,信号经调理、放大、A/D转换,得到输出电压 $U_i$ ,两者之间存在以下关系

$$U_i = C_i \cdot F \quad (2)$$

依次在X、Y和Z方向施加载荷,可确定输出电压与负载力之间的关系。以Y方向为例,在Y方向上施加载荷 $F(F_x=0, F_y, F_z=0)$ ,信号调理与数据采集系统力信号端的输出电压为 $U_i(U_x, U_y, U_z)$ ,关系如图6所示。

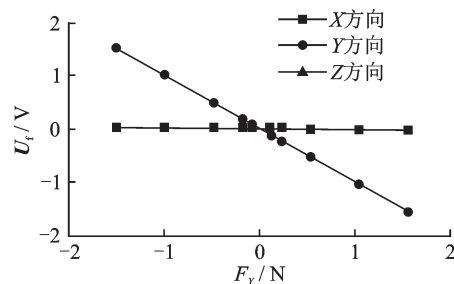


图6 复合传感器Y方向力标定曲线

Fig.6 Calibration of force measuring in Y direction of the composite sensor

由图6表明,标定载荷 $F_y$ 与输出电压 $U_x, U_y, U_z$ 之间有良好的线性关系。将得到的数据用最小二乘法拟合成直线,斜率分别为 $k_{xy} = -1.01E-4, R^2 = 0.766$ ;  $k_{yy} = -5.16E-3, R^2 = 1$ ;  $k_{zy} = -6.10E-5, R^2 = 0.701$ 。通过同样的方法对X和Z方向进行标定后得到

$$C_i = \begin{bmatrix} 4.8E-3 & -2.1E-5 & 3.0E-6 \\ -1.0E-4 & -5.2E-3 & -6.1E-5 \\ 2.1E-5 & 8.0E-6 & 3.0E-3 \end{bmatrix} \quad (3)$$

在实际测量中,将上述矩阵 $C_i$ 求逆后与信号端的输出电压 $U_i$ 进行运算可得到动物脚掌与有机玻璃梁之间相互作用力的大小

$$F = C_i^{-1} \cdot U_i \quad (4)$$

1.2.2 接触面积测量模块标定

接触光斑首先由高速摄像机(iSpeed, OLYMPUS, JAPAN)采集,而后经过图像处理程序获得实际接触区域的面积。

标定的目的一方面是确定所拍摄图片的真实标尺尺度(即每个像素点对应的真实尺寸),另一方面是确保观测区域内环境光线亮度相同。为实现第一个目的,在有机玻璃梁上粘贴了固定尺寸的参照物;为实现第二个目的,通过测光板对观测区域内的不同点环境光亮度进行测试,然后根据测试结果对环境光源进行调整,直至所有测量点的光亮度差异小于5%。

1.2.3 接触摩擦电荷测量模块标定

电荷测量模块标定时采用对信号输入端施加电压的办法来代替电荷源。本文中采用源表(KEITHLEY-2400C)对电荷传感器单元信号输入端施加电压。电路系统稳定后,源表输出电压与 ITO 电极对地电压  $U_s$  相等,则施加电压产生的等效电荷  $Q$  为

$$Q=U_s C_c \tag{5}$$

式中  $C_c=98.6 \text{ nF}$ 。此时测量该模块的输出端电压为  $U_c$ 。

图 7 的结果表明  $U_c$  和  $Q$  之间存在显著的线性关系,即  $U_s=k_c \frac{Q}{C_c}$ 。其中,  $k_c=0.928 2$ 。反过来,测量得到输出电压后,可以得到待测电荷量

$$Q=\frac{U_c C_c}{k_c} \tag{6}$$

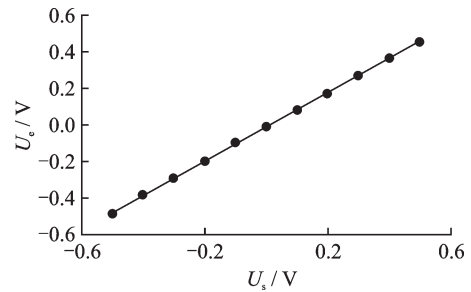


图 7 接触电荷测量模块标定曲线

Fig.7 Calibration of contact charge measuring

1.2.4 传感器的综合指标

复合传感器标定后的综合指标如表 3 所示。

表 3 组合传感器标定结果

Table 3 Calibration results of the composite sensor

内容	量程(FS)	耦合/%	非线性度/%	滞后/%	分辨率
$F_x$	1 500 mN	2.11	2.53	0.19	0.16 mN
$F_y$	1 500 mN	0.39	2.33	0.23	0.14 mN
$F_z$	1 500 mN	0.17	5.37	0.21	0.21 mN
$Q$	100 nC	—	0.81	<0.01	0.16 pC

1.3 复合传感器阵列

由于动物自由运动时脚掌与基底接触点是随机的,为实现高效测量,本文将 10 个复合传感器并排放置组成测量阵列,阵列尺寸为 175 mm × 364 mm。阵列的前端和末端分别用不锈钢进行扩展,使整个通道的长度达到 600 mm。当动物在通道中运动时,笔者能够在 一组实验中同时测量多只脚的黏附接触。

1.3.1 数据采集

本文采用自研的、多通道的信号调理与数据采集模块采集力传感器的力信号和 ITO 电极的电信号,采样率为 1 kHz,高速摄像机采集接触光斑的图像信号,拍摄帧数为 500 f/s。

信号调理与数据采集模块内部采用 AD7606-4 的 16 位 4 通道同步采样模数数据采集芯片,模块之间通过同一时钟线启动采集,数据同步性差异小于  $10^{-4} \text{ s}$ ,信号采集滞后小于  $10^{-4} \text{ s}$ ,时钟线同时对高速摄像机进行同步触发,以保证应变信号、电信号、

图像信号的同步性。

1.3.2 静电屏蔽

由于涉及接触电荷的采集,需要做好静电屏蔽工作,如测量系统的有效接地、操作人员全程穿着静电服等,以减少外界对电荷信号的影响。

2 实验验证

为了验证所设计复合传感器的可用性,本文利用上述阵列对竖直上爬的壁虎进行了测试研究。测量阵列前端的不锈钢接地处理,当壁虎接触这一部分不锈钢时,它们脚掌上可能携带的电荷将被消除。本文还在通道的末端放置黑色盒子,以引诱壁虎顺利爬行。壁虎实验在温度 25~30 °C、相对湿度 60%~70% 条件下进行。壁虎在自由运动时,容易出现单个脚掌接触到两个复合传感器接触面或两个脚掌先后接触单个复合传感器接触面的情况,该情况下无法同时分离出单个脚掌的运动反力和接触电荷数据。因此,选取全脚掌接触单个接触

而且该接触面只发生此次接触的实验样本,进行数据处理<sup>[9]</sup>,得到运动反力、实际接触面积和接触电荷的实验结果。图8展示了一个传感器阵列中一

个传感器从实验开始到实验结束整个过程中的典型测量结果。

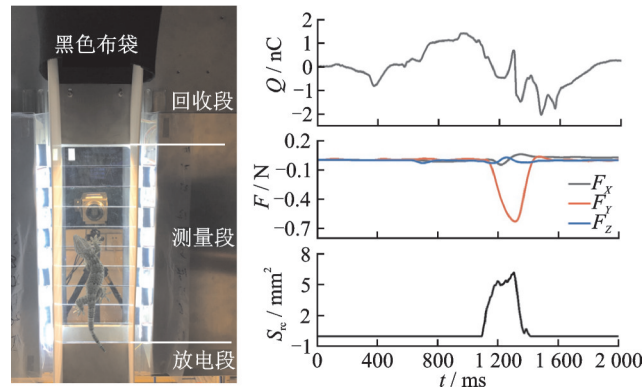


图8 壁虎实验过程及典型实验结果

Fig.8 Verification experiment with geckos and a typical result

壁虎在垂直表面上爬行、脚掌与复合传感器接触后,运动反力中的侧向力 $F_x$ 和法向力 $F_z$ 的变化较小,前后方向力 $F_y$ 先增大后减小。实际接触面积 $S_{ec}$ 先增大后减小,变化趋势与驱动力 $F_y$ 相同。实验开始之前,电荷数据稳定为0 nC;实验开始后但壁虎脚掌与图8所展示传感器接触之前,电荷测量模块的信号发生波动,说明壁虎在与该测量单元的有机玻璃梁接触之前已经产生了接触摩擦电荷,并对该测量单元产生了一定的影响;脚掌与图8所展示的传感器有机玻璃梁接触过程中,电荷测量模块的信号虽然有波动,但总体表现为下降趋势,表明接触过程中接触电荷持续产生;接触分离后脚掌与其他传感器接触产生的电荷对该传感器的信号产生了影响;实验结束后壁虎完全脱离传感器区域并与接地的金属板接触,其所携带电荷不再对图8所展示的传感器信号产生影响,此时电荷数据为0.25 nC,表明脚掌在与有机玻璃接触过程中产生了0.25 nC电荷。本复合传感器测得的运动反力和实际接触面积与以往实验数据具有较高的一致性,电荷数据与以往实验处于同一数量级,证明了所研制传感器的可用性和可靠性。然而,实验结果同样证明接触/摩擦电荷的测量可能受到多种因素的影响,为进一步揭示黏附接触过程中的摩擦致电,还需要设计更精细的实验进行验证。以往壁虎黏附爬行的电荷测量实验中,接触电荷数值的大小与接触材料之间具有较大的关联,且都是在脚掌去除静电后发生接触所得。本实验中的结果反映了黏附过程接触摩擦电荷可能的时效性影响,可能更能反

应自然界中壁虎自由爬行的情况,为后续研究指明了方向。

### 3 结 论

本文组合应用三维力传感器、下表镀有ITO透明电极的有机玻璃以及带有条状光源的中间件制成的复合传感器,可以满足壁虎自由爬行时的运动反力、真实接触面积和接触电荷的同步测量需求,为壁虎黏附机制的揭示、相关仿生黏附材料的制备及其应用奠定了重要的设备基础。

#### 参考文献:

- [1] 孙久荣,戴振东. 动物行为仿生学[M]. 北京: 科学出版社, 2013.
- [2] LABONTE D, CLEMENTE C J, DITTRICH A, et al. Extreme positive allometry of animal adhesive pads and the size limits of adhesion-based climbing[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences, 2016, 113(5): 1297-1302.
- [3] PELAGALLI A, BELISARIO M A, TAFURI S, et al. Adhesive properties of platelets from different animal species[J]. Journal of Comparative Pathology, 2003, 128(2/3): 127-131.
- [4] JI Aihong, HAN Longbao, DAI Zhendong. Adhesive contact in animal: Morphology, mechanism and bio-inspired application[J]. Journal of Bionic Engineering, 2011, 8(4): 345-356.
- [5] FEDERLE W, ENDLEIN T. Locomotion and adhesion: Dynamic control of adhesive surface contact in ants[J]. Arthropod Structure & Development, 2004,

- 33(1): 67-75.
- [6] AUTUMN K, LIANG Y A, HSIEH S T, et al. Adhesive force of a single gecko foot-hair[J]. Nature, 2000, 405(6787): 681-685.
- [7] SONG Yi, WANG Zhouyi, ZHOU Jun, et al. Synchronous measurement of tribocharge and force at the footpads of freely moving animals[J]. Friction, 2018, 6(1): 75-83.
- [8] IZADI H, STEWART K, PENLIDIS A. Role of contact electrification and electrostatic interactions in gecko adhesion[J]. Journal of the Royal Society Interface, 2014, 11(98): 20140371.
- [9] DAI Zhendong, WANG Zhouyi, JI Aihong. Dynamics of gecko locomotion: A force-measuring array to measure 3D reaction forces[J]. Journal of Experimental Biology, 2011, 214(5): 703-708.
- [10] EASON E, HAWKES E, WINDHEIM M, et al. Stress distribution and contact area measurements of a gecko toe using a high-resolution tactile sensor[J]. Bioinspiration & Biomimetics, 2015. DOI: 10.1088/1748-3190/10/1/016013.
- [11] CHEN Jieyi, SHEN Honglie, ZHAI Zihao, et al. Cd-free Cu (InGa) Se<sub>2</sub> solar cells with eco-friendly a-Si buffer layers[J]. Applied Surface Science, 2020, 512: 145729.
- [12] 张正杰, 吉爱红, 王周义, 等. 用于壁虎脚掌接触力测试的3维传感器[J]. 传感技术学报, 2007, 20(6): 73-76.
- ZHANG Zhengjie, JI Aihong, WANG Zhouyi, et al. 3 dimensional sensor for measuring gecko's ground reaction force[J]. Chinese Journal of Sensors and Actuators, 2007, 20(6): 73-76.
- [13] 张明, 苏小光, 王妮. 力学测试技术基础[M]. 北京: 国防工业出版社, 2008.
- [14] 洗亮, 秦力, 郑林庆. 应用光全反射法及图像处理技术研究真实接触面积[J]. 摩擦学学报, 1992, 12(2): 110-115.
- XIAN Liang, QIN Li, ZHENG Linqing. Investigation of real contact area through the application of total reflection method and image process technique[J]. Tribology, 1992, 12(2): 110-115.
- [15] 王保松. 有机玻璃表面透明导电薄膜制备方法研究[J]. 现代涂料与涂装, 2016, 19(7): 1-2, 34.
- WANG Baosong. Study on preparation of transparent conductive thin film on the Plexiglas's surface[J]. Modern Paint & Finishing, 2016, 19(7): 1-2, 34.

(编辑: 胥橙庭)