

文章编号:1008-1542(2020)02-0105-09

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



## 仿生原型毫-微牛级二维力测试系统研制

李云鹏<sup>1</sup>, 王立新<sup>1</sup>, 闫世兴<sup>2</sup>, 董世运<sup>2</sup>

(1. 河北科技大学机械工程学院, 河北石家庄 050018; 2. 陆军装甲兵学院装备再制造技术国防科技重点实验室, 北京 100072)

**摘要:**为满足机械仿生学研究对测试仿生原型产生的毫-微牛级力的需要, 构建了二维力测试系统。系统硬件部分主要包括自行研制的平行双簧片悬臂梁及其匹配的电涡流位移传感器、实现测试功能及测试样本简便更换的附属机构、测力传感器输出信号调理模块与能够完成 A/D 转换的数据采集卡, 基于虚拟仪器技术 LabVIEW 编写了数据处理与界面显示程序。为检验系统的功能, 进行了系统的运行调试并测试了仿生原型产生的摩擦力、法向力、刺穿阻力。结果表明, 系统能够准确采集仿生原型的毫-微牛级力, 并能在界面窗口实时、直观地显示, 实现了毫-微牛级力的数据信息保存, 测试精度可达  $50 \mu\text{N}$ , 量程可达  $800 \text{ mN}$ 。因此, 所设计系统能够精确测试仿生原型产生的毫-微牛级二维力, 为机械仿生学研究提供了所需的测力技术与方法。

**关键词:**传感器技术; 机械仿生; 仿生原型; 毫-微牛级力; LabVIEW

中图分类号: S433.2; TH823 文献标识码: A doi: 10.7535/hbkj.2020yx02001

## Design of bionic prototype milli-micro Newton level two-dimensional force test system

LI Yunpeng<sup>1</sup>, WANG Lixin<sup>1</sup>, YAN Shixing<sup>2</sup>, DONG Shiyun<sup>2</sup>

(1. School of Mechanical Engineering, Hebei University of Science and Technology, Shijiazhuang, Hebei 050018, China; 2. National Defense Key Laboratory for Remanufacturing Technology, Academy of Armored Force Engineer, Beijing 100072, China)

**Abstract:** In mechanical bionics field, it is necessary to measure the bionic prototypes generated milli-micro force. To satisfy the test requirement, a milli-micro Newton two-dimensional force measuring system was designed. Hardware of the system mainly includes self-developed parallel double spring cantilevers and its matched eddy current displacement sensors, milli-micro force measurement platforms which can realize the easy installation of samples, transducer output signal conditioning module and data sampling card, and data processing and displaying program based on LabVIEW. To test the system function, the system operation debugging was implemented. The friction force, the normal force, and the piercing resistance force provided by

收稿日期: 2019-10-22; 修回日期: 2020-01-13; 责任编辑: 冯 民

基金项目: 国家自然科学基金(51205107); 河北省高等学校青年拔尖人才资助项目(BJ2017011); 河北省自然科学基金(E2019208306)

第一作者简介: 李云鹏(1994—), 男, 河北石家庄人, 硕士研究生, 主要从事仿生原型测试技术方面的研究。

通讯作者: 王立新副教授。E-mail: wanglx@hebust.edu.cn

李云鹏, 王立新, 闫世兴, 等. 仿生原型毫-微牛级二维力测试系统研制[J]. 河北科技大学学报, 2020, 41(2): 105-113.

LI Yunpeng, WANG Lixin, YAN Shixing, et al. Design of bionic prototype milli-micro Newton level two-dimensional force test system[J]. Journal of Hebei University of Science and Technology, 2020, 41(2): 105-113.

the bionic prototypes were measured. The results confirm that the system can obtain these force values with milli-micro magnitude accurately, and display these force values in real time and intuitively in the interface window, as well as realize the storage of these force values in the form of force trajectory diagram and data group effectively. Accuracy and range of this milli-micro Newton two-dimensional force measuring system is respectively up to  $50 \mu\text{N}$  and  $800 \text{ mN}$ . Our designed system can accurately measure the milli-micro Newton two-dimensional force produced by bionic prototypes, and provide the technique and method of force measurement used in mechanical bionics.

**Keywords:** sensor technology; mechanical bionic; bionic prototype; milli-micro Newton force; LabVIEW

在机械仿生学领域,仿生原型产生的毫-微牛级力测试是不可缺少的环节,诸如以猪笼草叶笼滑移区为仿生原型研制致灾农业昆虫捕集滑板,需要测试飞蛾、蚂蚁、蝗虫等致灾农业昆虫在滑移区、捕集滑板等表面的附着力、摩擦力<sup>[1-2]</sup>。对于上述力的测试,需要研制专门的测试系统,以在精度、量程、样本简便更换等方面符合需求。文献已公开的二维力测试系统能够同时测量水平、竖直方向的力,但该传感器在2个方向的分辨力均为  $9.8 \text{ mN}$ ,比较适合测试壁虎等体型较大动物爬行过程中足底与表面的接触力,对于飞蛾、甲虫等体型较小仿生原型产生的附着力、剪切力,该测力系统在测试精度方面不能满足要求<sup>[3-4]</sup>。以测力传感器为核心部件构建的昆虫附着力测力系统能够实现毫牛级力测试,但不能精确测试体型较小仿生原型产生的微牛级力,且测试样本固定平台及附属机构过于简单,容易产生误差<sup>[5-11]</sup>。基于离心原理构建的离心式测微力系统,通过仿生原型在测试圆台的离心运动来实现对毫牛级附着力、摩擦力的测试<sup>[12-15]</sup>,该类型测力系统的量程、精度不受测力传感器限制,比较适合蚂蚁、飞蛾等体型较小的仿生原型,但离心运动半径信息的准确获取需要价格昂贵的高速成像系统。东南大学王玉娟团队采用手动悬臂移动法模拟单根刚毛与猪笼草叶笼滑移区蜡质区表面接触,测试其表面的黏附力、摩擦力,用以研究猪笼草叶笼滑移区的反黏附特性,为仿生反黏附表面设计和制备提供理论依据<sup>[16-18]</sup>。通过摄像机连续拍摄仿生原型与附着面的微小变形,再基于图像处理分析获取微小变形的具体值,从而间接测出微-纳牛级接触反力<sup>[19-21]</sup>,该类型测力系统的分辨率可高达纳牛级且不损坏仿生原型,比较适合水黾、水蜘蛛等水生动物的附着力测试。

现有的测力系统在测试量程、测试精度、测试样本固定平台等方面并不能同时符合多种类仿生原型产生的毫-微牛级力测试需求,因此,本文给出了一种毫-微牛级二维力测试系统,硬件部分主要包括自行研制的平行双簧片悬臂梁及其匹配的电涡流位移传感器、实现测试功能及测试样本简便更换的附属机构、测力传感器输出信号调理模块与能够完成 A/D 转换的数据采集卡,软件部分主要为基于虚拟仪器技术 LabVIEW 编写的数据处理与界面显示程序。

## 1 毫-微牛级二维力测试系统原理

毫-微牛级二维力测试系统主要由水平、竖直测力传感器、微动平台及附属机构、完成 A/D 转换的数据采集卡、数据处理与实时显示界面程序等 5 部分组成(见图 1)。计算机通过串口与数据采集卡通信,数据采集卡接收信号后由数字输出端口发出脉冲到步进电机驱动器,通过控制步进电机实现微动平台水平、竖直方向的运动。当水平、竖直微动平台带动各自悬臂梁的测试样本平台相互接触时,悬臂梁与电涡流位移传感器的间距变小并产生电信号,传感器输出的电信号经信号调理模块的滤波、放大处理后输入到数据采集卡,数

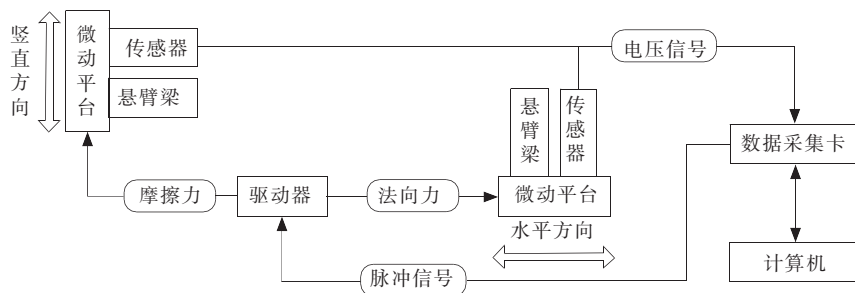


图 1 毫-微牛级二维力测试系统原理

Fig.1 Schematic of milli-micro Newton level 2D force measuring system

据处理与实时显示界面程序获取数据采集卡输出的数字信号并将其通过胡克定律转换成毫-微牛级力,在界面窗口实时显示。

## 2 毫-微牛级二维力测试系统硬件设计配置

### 2.1 测力传感器设计

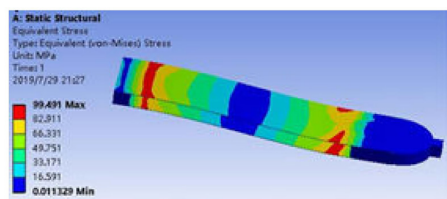
测力传感器由平行双簧片悬臂梁、电涡流位移传感器 2 部分组成。平行双簧片悬臂梁由平行双簧片与半圆弧连接块组成。选用强度高、抗弹减性能较好的 65Mn 弹簧钢作为平行簧片材料;选用 45# 钢作为半圆弧连接块材料,其表面作为电涡流位移传感器感应面。平行双簧片悬臂梁与电涡流位移传感器均固定于微动平台上,未受到作用力时,两者保持相对静止;平行双簧片悬臂梁受到垂直于感应面的力,电涡流位移传感器与感应面之间的距离(位移)发生变化并由电涡流位移传感器测出,根据胡克定律可计算出毫-微牛级力。

由于仿生原型多为动植物样本,其体表形貌结构多为微纳尺度,极易遭受破坏,加载的接触压力多在 0.01~2 N,因此所设计的测力传感器应具有较小的量程、较高的精度,还应具有良好的重复性、动态性,能够准确、实时测试仿生原型产生的毫-微牛级力。设计的 3 个不同弹性系数的平行双簧片悬臂梁尺寸如表 1 所示,根据表中尺寸利用 Solidworks 软件对平行双簧片悬臂梁进行建模,随后采用 ANSYS 软件的 Workbench 模块进行模拟标定与应力分析(见图 2 a)),最终获取的弹性系数分别为 220.62,160.74 和 50.37 mN/mm(见图 2 b))。为验证所设计的平行双簧片悬臂梁是否符合要求,选择弹性系数为 220.62 mN/mm 的平行双簧片悬臂梁进行加载标定,从 0~800 mN 每间隔 100 mN 连续加载,采用美国 Mastech 的万用表 MS8218 分别测得加载后电涡流位移传感器输出的电压值,标定过程中的室温和相对湿度分别为 28 ℃ 和 55%。采用最小二乘法进行拟合,获取平行双簧片悬臂梁特性曲线(见图 2 c)),拟合优度  $R^2=0.9999$ ,表明所研制的测力传感器具有较高的线性度。ANSYS 模拟分析结果显示,平行双簧片悬臂梁的最大应力为 99.5 MPa,显著小于 65Mn 弹簧钢的屈服强度 450 MPa,预示研制的平行双簧片悬臂梁不易发生塑性变形。

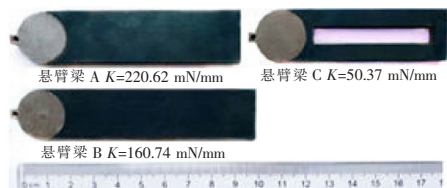
表 1 平行双簧片悬臂梁工作部分尺寸

Tab. 1 Structure parameters of parallel double spring cantilevers

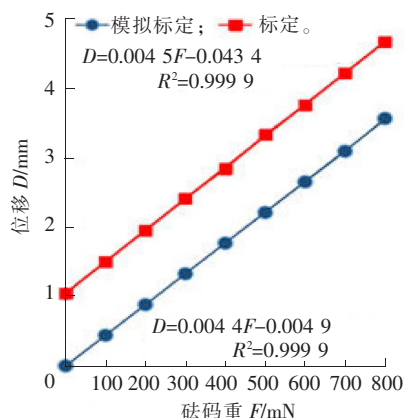
悬臂	有效工作长度 $l$ /mm	宽度 $b$ /mm	厚度 $t$ /mm	簧片之间距 $a$ /mm	簧片挖空宽度 $e$ /mm
A	68	21	0.2	5	0
B	76	21	0.2	5	0
C	49	21	0.1	5	7



a) 平行双簧片悬臂梁应力分析图



b) 平行双簧片悬臂梁实物图



c) 平行双簧片悬臂梁特性标定曲线

图 2 平行双簧片悬臂梁实物与分析

Fig. 2 Parallel double reed cantilever beam physical and analytical diagram

电涡流位移传感器感应其与平行双簧片悬臂梁之间的距离变化并将之转换为线性电压,应具有测试精度高、线性度好,可实现微动测量等特点。选用上海振迪检测技术有限公司生产的电涡流式位移传感器 ZD-260,其探头直径 4 mm,线性范围 0.50~4.5 mm,分辨率 1  $\mu\text{m}$ ,能够确保系统测试精度。电涡流位移传感器位移-电压曲线方程为

$$D = [U - 0.50], \quad (1)$$

式中: $D$  为电涡流位移传感器探头与被测金属表面之间的距离,mm; $U$  为加载时电涡流位移传感器的输出电压,V。

基于平行双簧片悬臂梁特性曲线与电涡流位移传感器位移-电压曲线,可得式(2):

$$F_A = \frac{[U - 0.50]}{0.004533}, \quad (2)$$

式中  $F_A$  为施加在平行双簧片悬臂梁上的作用力,mN。由此可得:

$$F_A = 220.62[U - 0.50]. \quad (3)$$

由式(3)可获取仿生原型产生的毫-微牛级力。同理,按上述标定过程,对弹性系数为 160.74 和 50.37 mN/mm 的平行双簧片悬臂梁进行加载标定,最终获得电压-摩擦力转换公式,见式(4)、式(5)。

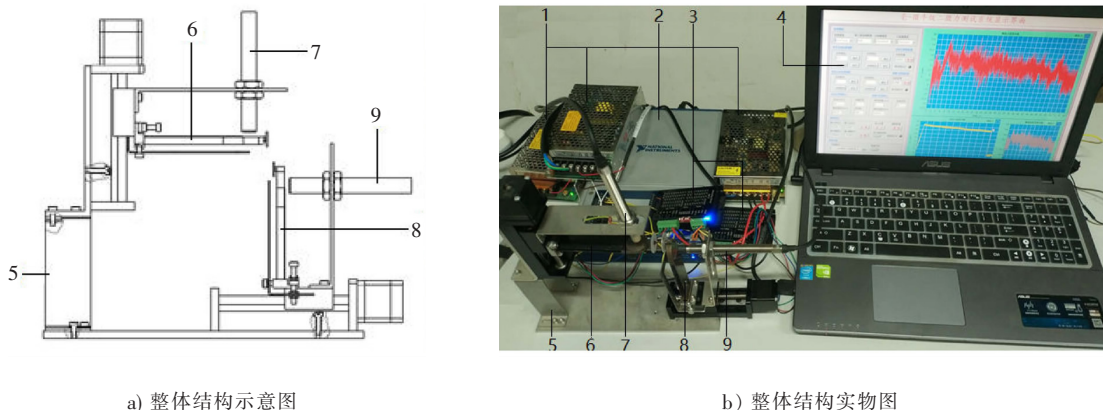
$$F_B = 160.74[U - 0.50], \quad (4)$$

$$F_C = 50.37[U - 0.50]. \quad (5)$$

制备的 3 个平行双簧片悬臂梁,由标定结果(见图 2 b))获知,弹性系数分别为 220.62,160.74 和 50.37 mN/mm;选用的电涡流位移传感器 ZD-260 分辨率为 1  $\mu\text{m}$ ,由此可得,测力传感器的分辨率分别为 220,160 和 50  $\mu\text{N}$ ,对应的量程分别为 800,640 和 200 mN。采用上述平行双簧片悬臂梁及对应的特性方程,可完成仿生原型产生的附着力、摩擦力、法向力、刺穿阻力等毫-微牛级力测试,平行双簧片悬臂梁的选取根据所要测试微力的量程范围而定。

## 2.2 测试平台及附属机构

如图 3 所示,测试平台及附属机构配合测力传感器,实现对仿生原型产生的附着力、法向力、摩擦力、刺穿阻力等毫-微牛级二维力的测试,并能实现测试样本(1 cm×1 cm)的简便置换。该毫-微牛级二维力测试系统硬件部分主要包括测力传感器(平行双簧片悬臂梁、电涡流位移传感器)及过载保护机构、测试平台、电源模块、数据采集卡、步进电机及驱动器,软件部分为基于虚拟仪器技术 LabVIEW 编写的数据处理与界面显示程序。水平丝杠滑块移动带动安装在水平测试样本固定平台的测试样本移动,使其接触安装在竖直测试样本固定平台的测试样本,以此使水平平行双簧片悬臂梁 A 产生弹性形变,与之配合的水平电涡流位移传感器采集该位移(弹性形变)信息并输出电压,代入式(3)获取加载在水平测试样本与竖直测试样本间的法向力。随后,安装在竖直测试样本固定平台的测试样本在竖直丝杠滑块移动作用下向上移动,竖直平行双簧片悬臂梁 B 或 C 产生弹性形变,与之配合的竖直电涡流位移传感器采集该位移(弹性形变)信息并输出电压,代入式(4)或式(5)获取加载在水平测试样本与竖直测试样本间产生的摩擦力。



a) 整体结构示意图  
b) 整体结构实物图  
1—电源模块;2—数据采集卡;3—步进电机驱动器;4—系统显示界面;5—测试平台;6—竖直平行双簧片悬臂梁;  
7—竖直电涡流位移传感器;8—水平平行双簧片悬臂梁;9—水平电涡流位移传感器。

图 3 毫-微牛级二维力测试系统总体结构

Fig. 3 Overall structure of milli-micro Newton level 2D force measuring system

### 2.3 信号调理模块与数据采集卡选择

电涡流位移传感器感应微小位移变化并将其转换成夹杂干扰噪声的毫伏级电压信号,信号调理模块可对其进行去噪、滤波、放大等处理,转换成数据采集卡能够识别的电压信号。经过比较分析,选择美国 NI 公司的信号调理模块 SCXI-1520 调理传感器输出信号,其具有 8 路同步采样模拟通道,激励电压为 0~10 V,增益高达 1 000。

将经信号调理模块处理的电涡流位移传感器输出信号输送至数据采集卡,用以转换成数字信号,便于毫-微牛级二维力信息采集系统的分析处理。为使毫-微牛级二维力测试系统的精度达到要求,选择美国 NI 公司的数据采集卡 USB-6351,其具有 16 路模拟输入通道,24 条数字 I/O 线,输入/输出电压范围为±10 V,输出/入分辨率为 16 bit,采样频率可达 1.25 MHz,能够确保系统测试精度不受数据采集卡分辨率的影响。

## 3 毫-微牛级二维力测试系统数据处理与界面显示程序编写

### 3.1 LabVIEW 软件简介

基于虚拟仪器技术及其开发语言 LabVIEW 编写了毫-微牛级二维力信息采集系统的数据处理程序及实时显示界面。LabVIEW 是虚拟仪器领域应用最广泛、功能最强大的图形化软件开发平台,采用强大的图形化 G 语言编程,可创建 32 位的编译程序,编程简便,人机交互界面直观友好,具有强大的数据可视化分析功能,成为仪器开发领域备受欢迎的软件平台,广泛应用于采集、测量、控制等领域<sup>[22-26]</sup>。

### 3.2 数据处理与界面显示程序设计与功能

利用 LabVIEW 编写的数据处理与界面显示程序应以直观、简便、有效地显现仿生原型产生的附着力、摩擦力、法向力、刺穿阻力等毫-微牛级力的实时变化为准则。该程序由参数输入与控制界面、信息采集界面 2 部分组成(见图 4)。参数输入与控制界面的主要功能为选择通道、调整测力传感器初始位置、参数输入、数据采集及数据存储等。信息采集界面主要由摩擦力信息采集窗口、法向力信息采集窗口与摩擦系数信息显示窗口 3 部分组成。信息采集显示界面的横坐标是采样时间,纵坐标是仿生原型产生的毫-微牛级力。参数输入与控制界面中的按钮都被赋予特定功能;移动指示灯和采集指示灯在信息采集过程中会由暗绿色变为鲜绿色,可判断测试样本是否正常移动与信息是否正常采集。

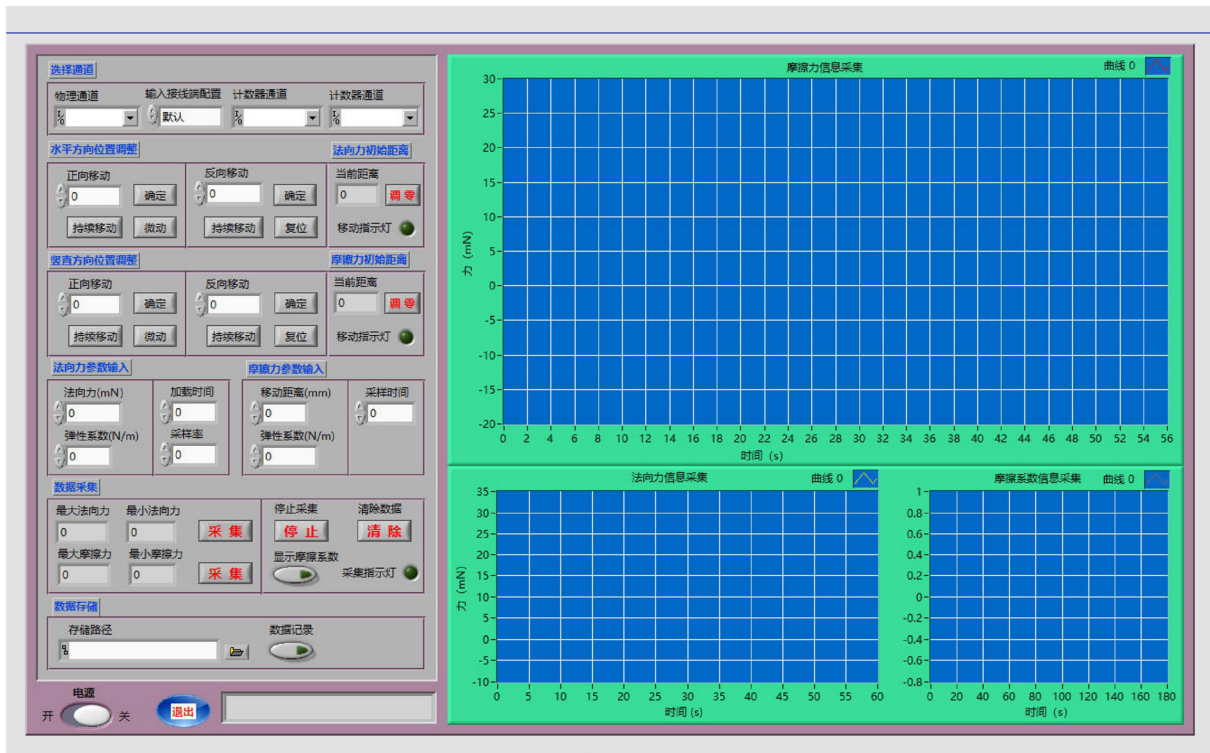


图 4 毫-微牛级二维力测试系统数据处理与显示程序界

Fig. 4 Interface of data processing and displaying program in milli-micro Newton level 2D force measuring system

对于法向力、摩擦力的测试,水平测试样本固定平台放置猪笼草叶笼滑移区,竖直测试样本固定平台放置蝗虫爪尖。通过调节水平、竖直测试样本固定平台位置,使其处于同一水平面并达到适合测试法向力、摩擦力的最佳距离。测试过程中,水平丝杠滑块移动施加法向力,竖直丝杠滑块竖直移动产生摩擦力,分别通过电涡流位移传感器获取因法向力、摩擦力导致的位移变化而产生的电压信号,经信号调理模块和数据采集卡 A/D 转换,输送至数据处理与实时显示程序的电压-法向力转换式(3)与电压-摩擦力转换式(4)或式(5)后,还原成能够在界面窗口实时显示的法向力、摩擦力(见图 5)。

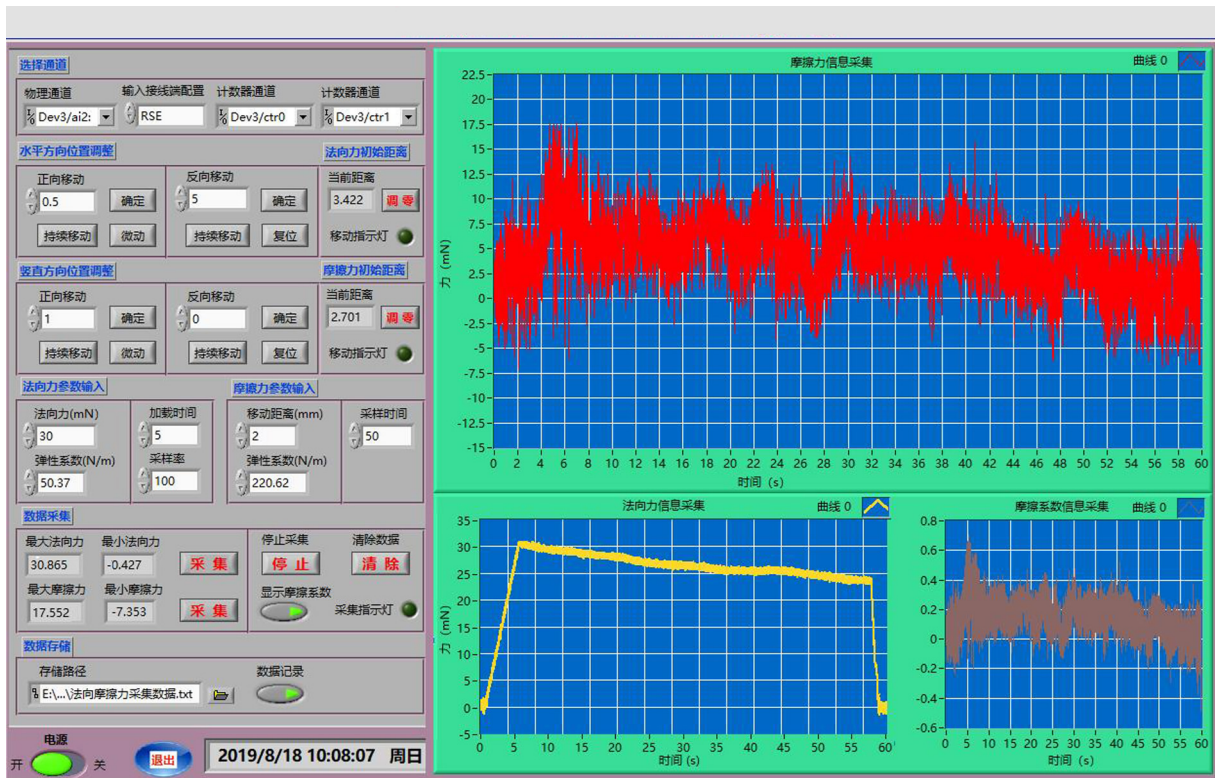


图 5 猪笼草叶笼滑移区法向力、摩擦力实时变化曲线

Fig.5 Normal force and friction force trace diagram generated by nepenthes slip zone

对于刺穿阻力的测试,水平测试样本固定平台放置钩刺,竖直测试样本固定平台放置被刺穿样本。水平丝杠滑块水平移动使钩刺与被刺穿样本接触,从而使平行双簧片悬臂梁产生弹性形变,与之配合的水平电涡流位移传感器采集该位移(弹性形变)信息并输出电压,经毫-微牛级二维力信息采集系统,将采集的数据绘制成刺穿阻力曲线。测试结束后,需将采集的数据组、微力曲线保存至文件夹。基于上述分析,制定了毫-微牛级二维力测试系统数据处理与界面显示程序功能流程(见图 6)。

由图 6 可知,开始微力测试时,点击显示界面电源开关,数据采集卡与参数输入界面完成初始化并新建任务;调整测力传感器初始位置,使测试样本固定平台处于同一水平面上并达到适合测试微力的最佳距离。在参数输入框中输入所需参数,而后对电涡流位移传感器电压信号模拟量按照既定的输入参数采集,数据处理程序将采到的数字量按式(3)、式(4)或式(5)转换成实时变化的法向力、摩

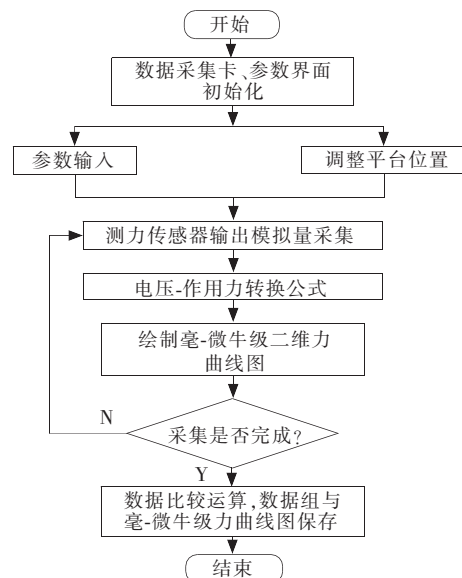


图 6 毫-微牛级二维力测试系统数据处理与显示程序界面功能流程

Fig.6 Flow chart of data processing and displaying program in milli-micro Newton level 2D force measuring system

擦力和刺穿阻力等微力并以曲线形式实时显示于界面窗口。测试过程中,点击停止按钮可暂停图像采集,此时会显示当前法向力、摩擦力的最大/最小值;点击采集按钮继续采集微力信息;点击清除按钮,所采集的图像、数据便会清空。测试结束时,点击数据记录按钮,可将所绘制的微力轨迹图及所采集的微力数据组保存至指定路径,最后关闭显示界面并结束数据采集任务。

#### 4 毫-微牛级二维力测试系统的调试运行

针对设计的毫-微牛级二维力测试系统,进行了法向力、摩擦力、刺穿阻力的测试以检验系统功能。首先进行法向力、摩擦力测试,分别测试蝗虫爪尖在猪笼草叶笼滑移区、砂纸(1 200 目,即  $3.5\sim 5\ \mu\text{m}$ )表面的摩擦力。将电涡流位移传感器紧固到距离平行双簧片悬臂梁表面  $3\sim 4\ \text{mm}$  的位置,采用双面胶将蝗虫爪尖粘贴到竖直平行双簧片悬臂梁右侧的样本固定平台上,将猪笼草叶笼滑移区(砂纸)粘贴到水平平行双簧片悬臂梁左侧的样本固定平台上。随后调整测试样本固定平台,使其处于同一水平面并达到适合测试法向力、摩擦力的最佳距离。设定数据采集卡的采样频率为  $100\ \text{Hz}$ ,设定整个测试过程的采样时间为  $60\ \text{s}$ ,运动速度为  $0.04\ \text{mm/s}$ ,测试距离为  $2\ \text{mm}$ 。准备就绪后,接通电涡流位移传感器、信号调理模块 SCXI-1520、数据采集卡 USB-6351 等部件的工作电源,开启毫-微牛级二维力信息采集系统界面,开始蝗虫爪尖在猪笼草叶笼滑移区(砂纸)表面的摩擦力测试。测试过程中,电涡流位移传感器将采集到的电压信号经数据采集卡完成 A/D 转换后输送至毫-微牛级二维力信息采集系统,经式(3)、式(5)转换成曲线并在显示界面实时显示(见图 7 a)–b))。测试结束后,毫-微牛级二维力信息采集系统对所采集的数据进行运算比较,获取测试过程中猪笼草叶笼滑移区最大摩擦力为  $17.41\ \text{mN}$ ,砂纸最大摩擦力为  $10.36\ \text{mN}$ ,并将数据分别以 .jpeg 和 .txt 格式保存到指定文件夹。

仿生低阻力注射器、伤口缝针研究过程中需要测试仿生原型穿刺软组织时的阻力,通过与现有医用针头刺穿阻力对比,分析其模型机理,为具有减阻、减痛功能的仿生缝针研制提供理论依据<sup>[27-30]</sup>。对于刺穿阻力的测试,以酸枣树钩刺、动物肝脏为测试原型,采用双面胶将酸枣树钩刺粘贴到水平平行双簧片悬臂梁左侧的样本固定平台上,将动物肝脏粘贴到竖直平行双簧片悬臂梁右侧的样本固定平台上。调整 2 个平行双簧片悬臂梁的相对位置,使其处于同水平面并达到适合测试刺穿阻力的最佳距离。设定数据采集卡采样频率为  $100\ \text{Hz}$ ,采样时间为  $60\ \text{s}$ ,运动速度为  $0.05\ \text{mm/s}$ ,测试距离为  $3\ \text{mm}$ 。准备就绪后,接通工作电源,开启毫-微牛级二维力信息采集系统界面,开始酸枣树钩刺刺破动物肝脏表皮过程的刺穿阻力测试。测试过程中,电涡流位移传感器将采集到的电压信号经数据采集卡完成 A/D 转换后输送至毫-微牛级二维力信息采集系统,经式(4)转换绘制成曲线并在显示界面实时显示(见图 7 c))。测试结束后,毫-微牛级二维力信息采集系统对所采集的数据进行运算比较,获取测试过程中最大刺穿阻力为  $329.76\ \text{mN}$ ,并将数据分别以 .jpeg 和 .txt 的格式保存到指定文件夹。

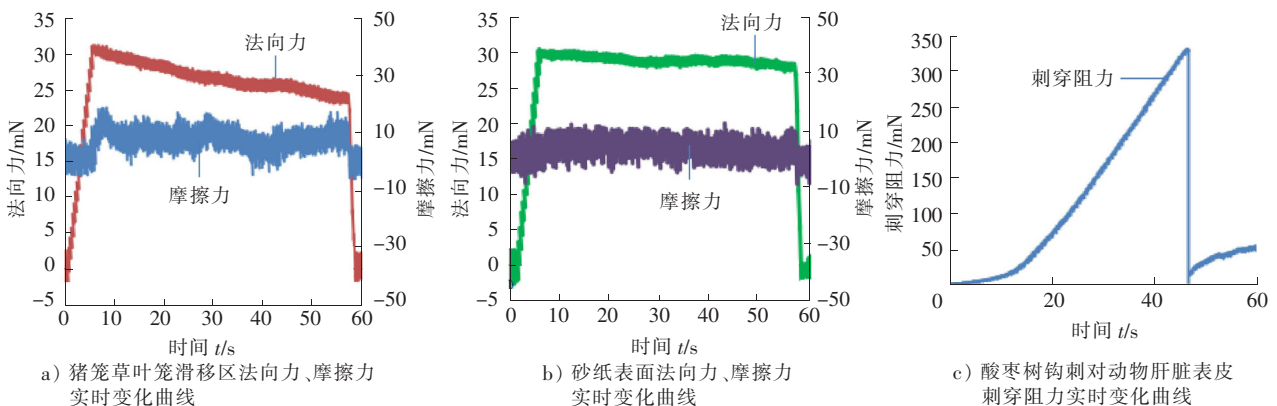


图 7 仿生原型产生的毫-微牛级力曲线图

Fig.7 Milli-micro Newton level 2D force trace diagram generated by bionic prototype

## 5 结 语

基于机械仿生学领域对仿生原型产生的毫-微牛级力精准测试的需求,研制了毫-微牛级二维力测试系统。硬件部分主要包括自行研制的平行双簧片悬臂梁及其匹配的电涡流传感器、信号调理模块与数据采集卡,软件部分为基于虚拟仪器技术 LabVIEW 编写的数据处理与界面显示程序。运行结果表明,该系统能够准确采集仿生原型产生的毫-微牛摩擦力、法向力、刺穿阻力,并能实时、直观地显示在界面窗口,实现曲线、数据等信息的保存,测试精度可达  $50\ \mu\text{N}$ ,量程可达  $800\ \text{mN}$ ,可为机械仿生学研究提供所需的测力技术与方法。本研究的不足在于所设计的平行双簧片悬臂梁,因其微牛级测试精度而导致双簧片厚度仅为  $100\sim 200\ \mu\text{m}$ ,极易遭受温度、振动等外界因素的干扰,在一定程度上影响测试的准确度,因此后续研究需要关注该测力系统的测试准确度与稳定性的提升方法。

## 参考文献/References:

- [1] 王立新,黄风山,周强. 致灾农业昆虫捕集滑板表面结构仿生构建与性能验证[J]. 农业工程学报,2015,31(20): 34-40.  
WANG Lixin,HUANG Fengshan,ZHOU Qiang. Surface structure biomimetic design and performance testing of slippery trapping plate used for controlling agricultural insect[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering,2015,31(20): 34-40.
- [2] WANG Lixin,ZHOU Qiang. Slippery surface of *Nepenthes alata* pitcher: The role of lunate cell and wax crystal in restricting attachment ability of ant *Camponotus japonicus* Mayr[J]. The Journal of Bionic Engineering,2016,13(3): 373-387.
- [3] 吉爱红,葛承滨,王寰,等. 壁虎在不同粗糙度的竖直表面的黏附[J]. 科学通报,2016,61(23): 2578-2586.  
JI Aihong,GE Chengbin,WANG Huan,et al. Adhesion of geckos on vertical surfaces of different roughness[J].Chinese Science Bulletin, 2016,61(23): 2578-2586.
- [4] 王周义. 大壁虎斜面运动力学、脚趾外翻脱附力学及其仿生研究[D]. 南京:南京航空航天大学,2017.  
WANG Zhouyi. Research on Kinematical Reaction Force of *Gekko gekko* on Inclines and Abducting Detachment of Toe[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics,2017.
- [5] 王立新,周强,罗瑞龙,等. 蝗虫在滑移捕集滑板上的附着力测试[J]. 农业机械学报,2010,41(12): 195-198.  
WANG Lixin,ZHOU Qiang,LUO Ruilong,et al. Attachment force test of locust on slippery trapping plates[J].Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2010,41(12): 195-198.
- [6] GORB E,VOIGT D,EIGENBRODE S, et al. Attachment force of the beetle *Cryptolaemusmontrouzieri* (Coleoptera,Coccinellidae) on leaflet surfaces of mutants of the pea *Pisumsativum* (Fabaceae) with regular and reduced wax overage[J]. Arthropod-Plant Interactions, 2008,2(4): 247-259.
- [7] GORB E,GORB S. Attachment ability of the beetle *Chrysolinafastuosa* on various plant surfaces[J]. Entomologia Experimentalis Et Applicata,2010,105(1): 13-28.
- [8] WANG Lixin,ZHOU Qiang. Friction force of locust *Locusta migratoria manilensis* (Orthoptera,Locustidae) on slippery zones of pitchers from four *Nepenthes* species[J]. Tribology Letters,2011,44(3): 345-353.
- [9] WANG Lixin,ZHOU Qiang,XU Shuyan. Role of locust *Locusta migratoria manilensis* claws and pads in attaching to substrates[J]. Science Bulletin,2011,56(8): 789-795.
- [10] 王立新,周强. 基于猪笼草叶笭滑移区仿生的蝗虫捕集滑板功效测试[J]. 农业机械学报,2011,42(5): 222-225.  
WANG Lixin,ZHOU Qiang. Function testing of locust slippery plate manufactured based on waxy zone of *Nepenthes* pitchers[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2011,42(5): 222-225.
- [11] 王立新,李荣廷. 基于虚拟仪器 Labwindows/CVI 的拉压式微力测试系统设计[J]. 河北科技大学学报,2013,34(6): 487-493.  
WANG Lixin,LI Rongting. Design of tension & compression microforce measuring system based on virtual instrument Labwindows/CVI [J]. Journal of Hebei University of Science and Technology,2013,34(6): 487-493.
- [12] 王立新,刘恩福,黄风山,等. 一种离心式测微力系统[P]. 中国专利: 201210577820.8,2012-12-27.
- [13] WOLFF J,GORB S. Surface roughness effects on attachment ability of the spider *philodromusdispar* (Araneae,Philodromidae)[J]. Journal of Experimental Biology,2012,215(1): 179-184.
- [14] 王立新,翟利刚. 离心式昆虫微力测试系统设计[J]. 河北科技大学学报,2014,35(1): 1-5.  
WANG Lixin,ZHAI Ligang. Design of centrifugal insect micro-force measuring system[J]. Journal of Hebei University of Science and Technology,2014,35(1): 1-5.
- [15] 王立新. 一种离心式微牛级昆虫摩擦力在线实时测试系统[P].中国专利: 201710798282.8,2017-11-10.
- [16] 王玉娟,宋小闯,陈云飞. 猪笼草捕虫笼超滑表面黏附特性测量和抗黏稳定性分析[J]. 东南大学学报(自然科学版),2017,47(2): 259-264.  
WANG Yujuan,SONG Xiaochuang,CHEN Yunfei. Measurement of adhesion properties and analysis of anti-adhesion stability on super-slippery surfaces of *Nepenthes* pitchers[J]. Journal of Southeast University(Natural Science Edition),2017,47(2): 259-264.



- [17] 王玉娟,宋小闯,杨决宽,等. 典型构筑植物表面不同湿度条件下黏附和摩擦特性研究[J]. 机械工程学报,2017,52(21): 97-105.  
WANG Yujuan, SONG Xiaochuang, YANG Juekuan, et al. Adhesion and friction properties of plant surfaces with typical architectures in different humidity conditions[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2017, 52(21): 97-105.
- [18] 毕可东,宋小闯,王玉娟. 猪笼草蜡质滑移区表面反粘附特性的研究[J]. 机械工程学报,2015,51(23): 103-109.  
BI Kedong, SONG Xiaochuang, WANG Yujuan. Anti-adhesion mechanisms of *Nepenthes waxy* slippery zone surface[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2015, 51(23): 103-109.
- [19] ZHENG Yelong, LU Hongyu, JIANG Jile, et al. Walking of spider on water surface studied from its leg shadows[J]. Chinese Physics B, 2018, 27(8): 345-349.
- [20] ZHENG Yelong, LU Hongyu, YIN Wei, et al. Elegant shadow making tiny force visible for water-walking arthropods and updated archimedes' principle[J]. Langmuir, 2016, 32: 10522-10528.
- [21] YIN Wei, ZHENG Yelong, LU Hongyu, et al. Three-dimensional topographies of water surface dimples formed by superhydrophobic water strider legs[J]. Applied Physics Letters, 2016, 109(16): 663-710.
- [22] 杨藤. 虚拟仪器在计量测试中的应用[J]. 电子测试, 2017, 44(7): 88-89.  
YANG Teng. The application of virtual instrument in the measurement test[J]. Electronic Test, 2017, 44(7): 88-89.
- [23] 王玉刚,赵兴堂,董绪华,等. 基于 LabVIEW 的多功能显示模拟器设计[J]. 现代电子技术, 2015, 38(18): 116-118.  
WANG Yugang, ZHAO Xingtang, DONG Xuhua. Design of LabVIEW-based simulator with multi-function display[J]. Modern Electronics Technique, 2015, 38(18): 116-118.
- [24] 马平,梁薇,李珍. 基于 LABVIEW 的实验室过程控制系统设计[J]. 计算机测量与控制, 2017, 25(4): 44-46.  
MA Ping, LIANG Wei, LI Zhen. Design of laboratory process control system based on LabVIEW[J]. Computer Measurement & Control, 2017, 25(4): 44-46.
- [25] 王昆. 基于 LABVIEW 的数据采集与信号处理系统设计与实现[J]. 电子设计工程, 2018, 26(15): 100-103.  
WANG Kun. Design and realization of data acquisition and signal processing system based on LabVIEW[J]. Electronic Design Engineering, 2018, 26(15): 100-103.
- [26] 王硕,王兵,邹光南. 基于声卡和 LabVIEW 的虚拟仪器设计与实现[J]. 电子设计工程, 2014, 22(10): 147-150.  
WANG Shuo, WANG Bing, ZOU Guangnan. Design and implementation of virtual instrument based on sound card and LabVIEW[J]. Electronic Design Engineering, 2014, 22(10): 147-150.
- [27] 王骥月,丛茜,齐欣,等. 基于蝉口针形态的仿生针头结构优化设计及减阻机理分析[J]. 吉林大学学报(工学版), 2014, 44(3): 696-700.  
WANG Jiyue, CONG Qian, QI Xin, et al. Optimum structural design and analysis of drag reduction mechanism of bionic needles inspired by cicada stylet[J]. Journal of Jilin University(Engineering and Technology Edition), 2014, 44(3): 696-700.
- [28] 齐迎春,丛茜,齐欣,等. 仿生减阻针头穿刺过程中力学行为分析[J]. 医用生物力学, 2012, 27(4): 427-431.  
QI Yingchun, CONG Qian, QI Xin, et al. Mechanical behavior of bionic drag reduction needle during puncturing process[J]. Journal of Medical Biomechanics, 2012, 27(4): 427-431.
- [29] 弯艳玲,丛茜,齐迎春,等. 凹槽形仿生针头减阻试验及机理分析[J]. 中国机械工程, 2013, 24(7): 922-925.  
WAN Yanling, CONG Qian, QI Yingchun et al. Drag reduction experiment and mechanism analysis of concave groove needle[J]. China Mechanical Engineering, 2013, 24(7): 922-925.
- [30] 王京春,陈禹,李因武. 仿生针刺作用下的高粘弹性材料减阻性能分析[J]. 科技通报, 2017, 33(11): 44-46.  
WANG Jingchun, CHEN Yu, LI Yinwu. Resistance reduction analysis for high viscoelastic material pierced by bionic-pinhead[J]. Bulletin of Science and Technology, 2017, 33(11): 44-46.