

DOI: 10.3901/JME.2023.05.280

微小型飞行昆虫降落/起飞过程微牛级接触力测试系统设计*

闫征¹ 王立新¹ 董世运² 闫世兴²

(1. 河北科技大学机械工程学院 石家庄 050018;

2. 陆军装甲兵学院再制造技术国家重点实验室 北京 100072)

摘要: 现阶段微小型仿生飞行器降落/起飞过程的机动灵活性与仿生原型存在差异,降低了其作业过程的安全性与应用范围的普遍性,无干扰状态下仿生原型降落/起飞过程接触力的精确表征是解决该问题的必要前提。为此设计了微小型飞行昆虫降落/起飞过程微牛级接触力测试系统,以碳纤维弹簧 T300 为接触力的感知器件并对其标定获取接触力-挠度-接触点位置的数学方程(拟合优度 $R^2=0.979$),选用高帧数摄像机记录微小型飞行昆虫在碳纤维弹簧降落/起飞过程的图像信息。选用苍蝇(*Musca domestica*)进行了接触力测试系统的运行调试,采用基于 Matlab 编写的图像分析处理程序提取碳纤维弹簧挠度、接触点位置等信息,计算求解接触力并进行修正以消除碳纤维弹簧重力的影响,结果显示苍蝇降落/起飞过程的接触力介于 0.121~0.772 mN,为其体重(17.38 mg)的 0.71~4.53 倍。对于所设计的接触力测试系统,分辨力可达 0.001 mN,并从模拟/实际标定、挠度精准获取、接触力修正、降落/起飞过程无干扰等 4 方面来提升准确度。研究结果为微小型飞行器仿生原型运动行为的定量、准确表征提供了可借鉴的技术与方法。

关键词: 仿生原型; 仿生飞行器; 微牛级接触力; 挠度; 图像处理

中图分类号: TB17

Design of Micro-Newton Scale Contact Force Measurement System for Small Flying Insect during Landing/take-off Process

YAN Zheng¹ WANG Lixin¹ DONG Shiyun² YAN Shixing²

(1. School of Mechanical Engineering, Hebei University of Science and Technology, Shijiazhuang 050018;

2. National Key Laboratory for Remanufacturing, Academy of Armored Forces Engineering, Beijing 100072)

Abstract: At present, obvious difference in maneuverability exists between the micro biomimetic flying aircraft and its biomimetic prototype in the landing/take-off process, which reduces the safety of its operation process and the universality of its application scope. Accurate characterization of contact force of biomimetic prototype in the landing/take-off process without interference is a necessary prerequisite to solve this problem. A micro-Newton scale contact force measurement system for small flying insects during landing/take-off was designed. The carbon fiber spring T300 was selected as the sensing device of contact force and calibrated to obtain the mathematical equation involved contact force-deflection-contact point position (goodness of fit $R^2=0.979$). A high frame camera was selected to record the image information of small flying insects during landing on and take-off from the carbon fiber spring. Taking the fly (*Musca domestica*) as the small flying insect, the operation debugging of the contact force measurement system was conducted. The image analysis and processing program based on the Matlab software was used to accurately obtain the deflection of carbon fiber spring and the position of landing/take-off contact point. According to the mathematical equation, the contact force was calculated and corrected to eliminate the influence of carbon fiber spring's gravity. Result shows that the contact force of flies during landing/take-off process ranges from 0.121 mN to 0.772 mN, which is about 0.71 to 4.53 times of their body weight (17.38 mg). Four the designed contact force measurement system, its resolution is 0.001 mN and its accuracy is improved by four aspects: simulation/actual calibration, accurate acquisition of deflection, contact force correction and no interference in

* 河北省自然科学基金(E2019208306)、河北省高等学校科学技术研究重点(ZD2020115)和国家自然科学基金(51205107)资助项目。20220207 收到初稿, 20220910 收到修改稿

landing/take-off process. Our result provides a reference technology/method for the quantitative and accurate characterization of the biomimetic prototype's movement behavior for developing micro flying aircraft.

Key words: biomimetic prototype; biomimetic flying aircraft; micro-newton contact force; deflection; image processing

0 前言

基于苍蝇、甲虫、蜜蜂等仿生原型所具有的独特身体结构与灵活飞行方式, 微小型仿生飞行器已被研制^[1-7], 其能够有效应对复杂环境并具有隐蔽性好、飞行机动灵活、制造成本低等优势, 在军事情报搜集、反恐防暴、灾情勘察等军事/民用领域呈现巨大的应用潜力^[8-11]。现阶段, 微小型仿生飞行器在降落/起飞过程中的机动灵活性与仿生原型存在差异^[6, 8, 12], 一定程度上降低了其作业过程的安全性与应用范围的普遍性, 仿生原型降落/起飞行为的测试表征是解决该问题的必要前提。目前普遍使用的表征技术/方法需要将测力器件与仿生原型连接, 易对其生理活性、降落/起飞姿态等产生干扰, 从而导致表征结果的不准确。因此, 无干扰状态下仿生原型降落/起飞过程接触力的精确测试是定量表征其行为的关键, 这需要专门的测力系统。

仿生原型运动行为测试系统研制已被广泛开展, 主要采用测力传感器、离心运动原理、图像处理等 3 方面。为定量表征爬壁机器人仿生原型壁虎的运动行为, 以测力传感器为核心部件的测力系统已被研制, 能够测试壁虎脚掌在材料表面的黏附力, 用以揭示壁虎爬行姿态的调控机制与脚掌刚毛的黏附-脱黏附机制^[13-18]。以测力传感器为核心部件的毫牛级测力系统亦被用于测试甲虫、蝗虫等致灾农业昆虫在材料表面的附着力、摩擦力等, 用于定量表征材料表面特性对昆虫附着行为的影响规律^[19-21], 以及揭示致灾农业昆虫捕集滑板仿生原型对昆虫附着系统抑制功能的表现机制^[22-25]; 或用于测试昆虫足掌刚毛在猪笼草滑移区蜡质晶体表面的黏附力、摩擦力等, 以揭示滑移区的超滑特性与各向异性摩擦行为^[26-29]。体型较小仿生原型无法在不影响其生理活性的前提下与测力传感器连接, 故其运动行为的准确表征不能采用以测力传感器为核心部件的测力系统^[30]。在此背景下, 基于离心运动原理的毫微牛级附着力测试系统已被研制, 能够实现小型仿生原型在材料表面粘附力、摩擦力的测试, 用以定量表征材料特性对昆虫附着功能的影响机制, 利于小型仿生爬壁机器人研制^[31-35]。具有优异水面运动能力的水龟、水蜘蛛、水虱子等水生动物为微小型水面行走机器人研制提供了仿生原型, 运动过程中

其足掌在水面上产生支撑力的准确测试是必要前提, 但无法通过以测力传感器为核心或基于离心运动原理的“接触式”测力系统实现, 故基于图像处理的“非接触式”测力系统被研制。清华大学田焜团队基于阴影法重构了水龟腿部引发的水面凹陷, 分析指出支撑力受到凹陷形貌特征的影响, 结合水龟运动过程的图像实现了其腿部支撑力(0.3~1.0 μN)的准确测试^[36]。该团队后续研究将阴影法与阿基米德原理结合, 分析指出水生节肢动物腿部在水面上的支撑力正比于凹陷面积, 研制的测力系统的精度可高达皮牛每像素并具有测试过程无干扰等优点^[37]。获取水龟腿部在水面产生的椭圆形阴影图像的前提下, 分析了 6 条腿部的支撑力并据此揭示了水龟在水面的行走机理, 指出水龟首先依靠驱动腿支撑其体重以增加行进过程的推动力, 依靠后腿的轻微摆动可实现行进方向与速度的有效控制^[38]。基于图像处理的测力系统亦被用于揭示水蜘蛛与水虱子在水面的行进机理, 水蜘蛛行进过程的腿部支撑力测试结果表明其可通过驱动腿支撑大部分体重, 其他腿部的抬升可有效降低逆水阻力, 以此产生用于高效前行的运动策略^[39]; 体重仅为 0.3 mg 的水虱子在水面行进时 6 条腿部的支撑力介于 0.5~1.2 μN , 作用在中腿的支撑力基本等同于作用至前腿与后腿支撑力的均值, 支撑力的合理配置利于低耗能行进^[40]。上述文献公开的基于图像处理的测力系统, 能够实现水生动物与水面之间运动支撑力高精度、无干扰的测试表征, 利于行进机理揭示并促其成为仿生原型用于水面行走机器人研制。由于生存环境的显著差异, 该类测力系统不适用于微小型飞行器仿生原型降落/起飞过程接触力的测试表征。

为实现苍蝇、甲虫、蜜蜂等仿生原型无干扰状态下降落/起飞过程接触力的精确表征, 本文设计一种接触力测试系统。以碳纤维弹簧 T300 作为接触力的感知器件并通过标定获取其接触力-挠度-接触点位置的数学方程, 选用高帧数摄像机记录微小型飞行昆虫在碳纤维弹簧降落/起飞过程的图像信息; 以苍蝇为仿生原型进行系统的运行调试, 采用基于 Matlab 编写的图像分析处理程序提取碳纤维弹簧挠度、接触点位置等信息, 并将其代入数学方程求解接触力。所设计的接触力测试系统能够实现无干扰状态下微小型飞行昆虫降落/起飞过程微牛级接触

力的测试,为微型飞行器仿生原型运动行为的准确表征提供可借鉴的技术与方法。

1 测试系统运行原理与整体结构

1.1 运行原理

苍蝇、甲虫、蜜蜂等微型飞行昆虫在材料表面降落/起飞过程产生的接触力会使接触区域发生形变,形变程度能够反映接触力大小,故可通过形变程度实现接触力的定量表征。基于该原理,

如图 1 所示,以碳纤维弹簧为微型飞行昆虫降落/起飞过程接触力的感知器件并将其固定成“悬臂梁”,当微型飞行昆虫在其表面降落/起飞时,产生的接触力会引起其挠度的变化,挠度与接触力之间存在正相关关系。对碳纤维弹簧进行标定并拟合获取接触力-挠度-接触点位置的数学方程;采用高帧数摄像机获取微型飞行昆虫在碳纤维弹簧降落/起飞过程的图像信息,提取挠度、接触点位置等数据,将其代入数学方程便可求解接触力。

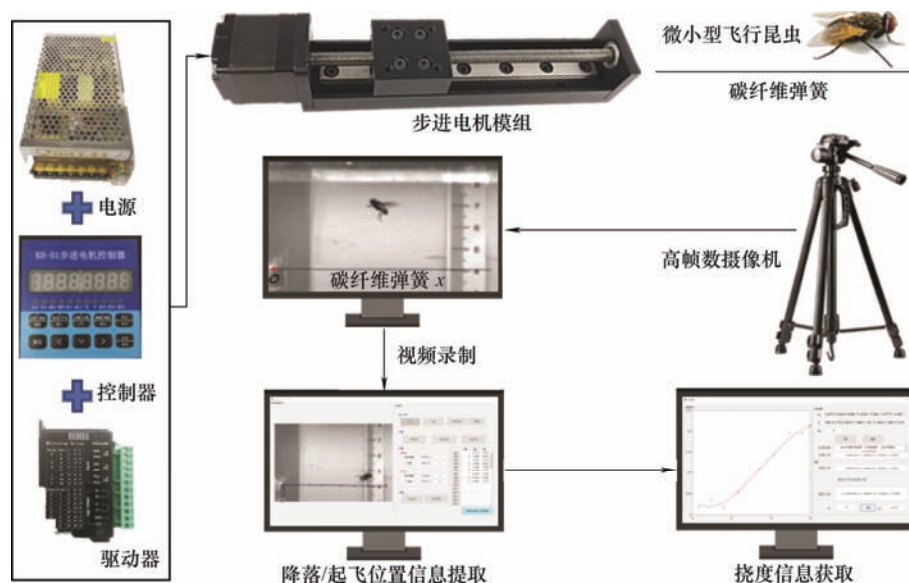


图 1 接触力测试系统运行原理

1.2 整体结构

接触力测试系统的整体结构如图 2 所示,设置碳纤维弹簧作为接触力测试系统的核心部件,其功能是感知微型飞行昆虫降落/起飞过程产生的接

触力,左侧固定至步进电机模组并将固定点定义为坐标原点 O ,以便获取微型飞行昆虫降落/起飞的接触点位置信息。设置步进电机模组,其目的是接触力测试时将碳纤维弹簧移至有机玻璃罩内部,以



图 2 接触力测试系统整体结构

提供微小型飞行昆虫降落/起飞的停靠点。设置高帧数摄像机, 其作用是获取微小型飞行昆虫在碳纤维弹簧降落/起飞的图像, 采用基于 Matlab 软件编写的图像分析处理程序提取挠度、接触点位置等数据, 代入接触力-挠度-接触点位置数学方程求解获取接触力。在有机玻璃罩内侧设置挠度/位置信息参考标尺, 用于精准提取挠度、接触位置等信息。

2 碳纤维弹簧标定

2.1 模拟标定

基于 ANSYS 软件进行模拟标定, 首先构建数

$$\gamma = \frac{-2.479L^3 + (729.9F + 328.7)L^2 + (113\,800F - 14\,160)L - 1\,625\,000F + 393\,500}{10^6} \quad (1)$$

$$F = \frac{10^6\gamma + 2.479L^3 - 328.7L^2 + 14\,160L - 393\,500}{729.9L^2 + 113\,800L - 1\,625\,000} \quad (2)$$

式中, F 、 γ 和 L 为接触力、挠度和接触点位置, 取值范围: $F \geq 0.098\text{ mN}$ 、 $\gamma \geq 0.767\text{ mm}$ 和 $30\text{ mm} \leq$

值模型, 主要参数: 直径 0.30 mm 、长度 60 mm 、材料密度 1.60 g/cm^3 、弹性模量 230 GPa 、泊松比 0.31 。碳纤维弹簧上设置 7 个接触点, 距 o 点依次为 30 mm 、 35 mm 、 40 mm 、 45 mm 、 50 mm 、 55 mm 和 58 mm , 以确保微小型飞行昆虫在碳纤维弹簧不同位置降落/起飞时接触力的准确获取。对每个接触点从 0.098 mN 到 0.960 mN 分别进行 15 次的集中载荷(接触力)加载, 获取不同接触力、接触点对应的碳纤维弹簧挠度并拟合得到挠度-接触力-接触点位置的数学方程(式(1))与图像(图 3a), 由此获取接触力-挠度-接触点位置数学方程(式(2))。

$L \leq 60\text{ mm}$, 拟合优度 $R^2=1$ 。

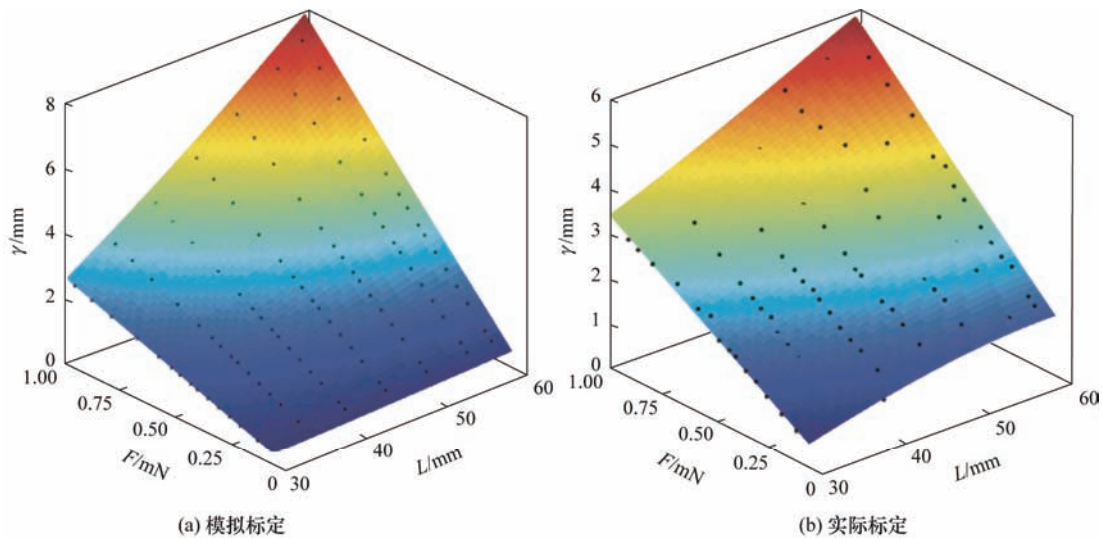


图 3 碳纤维弹簧 T300 标定获取的挠度-接触力-接触点位置图像

2.2 实际标定

接触力测试系统中, 感知接触力的碳纤维弹簧 (T300, Toray 公司) 主要参数: 直径 0.30 mm 、长度 60 mm 、密度 1.60 g/cm^3 、拉伸强度 3.53 GPa 、弹性模量 230 GPa 。标定过程中, 接触点选取、接触力加载与模拟标定相同, 拍摄碳纤维弹簧 T300 挠度图像并采用基于 Matlab 软件编写的图像分析处理程

序获取挠度。值得注意的是, 当接触力(砝码重力)与接触点位置超过一定值时, 实际标定的挠度开始小于模拟标定的挠度, 这取决于碳纤维弹簧 T300 的物理特性。采用 Matlab 软件对挠度拟合, 得到挠度-接触力-接触点位置的数学方程与图像, 分别如式(3)和图 3b 所示, 由此获取的接触力-挠度-接触点位置数学方程如式(4)所示。

$$\gamma = \frac{-11.95L^3 + (1\,289F + 650)L^2 + (-58\,810F + 43\,480)L + 363\,000F - 1\,188\,000}{10^6} \quad (3)$$

$$F = \frac{10^6\gamma + 11.95L^3 - 650L^2 - 43\,480L + 1\,188\,000}{1\,289L^2 - 58\,810L + 3\,630\,000} \quad (4)$$

式中, F 、 γ 和 L 为接触力、挠度和接触点位置, 取值范围: $F \geq 0.098 \text{ mN}$ 、 $\gamma \geq 0.767 \text{ mm}$ 和 $30 \text{ mm} \leq L \leq 60 \text{ mm}$, 拟合优度 $R^2=0.979$ 。实际标定获取的挠度-接触力-接触点位置图像高度相似于模拟标定

获取的, 并且接触力-挠度-接触点位置数学方程的拟合优度非常接近于 1, 表明碳纤维弹簧 T300 能够精确感知微小型飞行昆虫降落/起飞过程的接触力。

表 1 碳纤维弹簧 T300 的挠度/mm(模拟标定/实际标定)

砝码重力/mN	接触点位置/mm						
	30	35	40	45	50	55	58
0.098	—	—	0.594/0.767	0.686/1.264	0.774/1.443	0.867/1.582	0.924/1.650
0.127	0.508/0.669	0.614/0.638	0.713/1.359	0.833/1.590	0.947/1.699	1.068/1.660	1.143/1.792
0.206	0.699/0.825	0.870/0.934	1.031/1.597	1.225/1.844	1.408/2.060	1.605/1.945	1.725/2.269
0.255	0.819/1.126	1.031/1.295	1.230/1.719	1.470/2.060	1.697/2.181	1.941/2.260	2.089/2.369
0.304	0.939/1.346	1.191/1.533	1.429/1.875	1.715/2.128	1.985/2.278	2.276/2.420	2.453/2.562
0.353	1.059/1.467	1.352/1.707	1.627/2.096	1.960/2.208	2.274/2.321	2.611/2.650	2.817/2.795
0.402	1.178/1.667	1.512/1.856	1.826/2.272	2.205/2.474	2.562/2.539	2.947/2.770	3.181/2.865
0.431	1.250/1.738	1.609/2.142	1.945/2.417	2.352/2.532	2.736/2.658	3.148/3.035	3.400/3.219
0.480	1.370/1.840	1.769/2.220	2.144/2.492	2.597/2.775	3.024/2.839	3.483/3.141	3.764/3.405
0.519	1.466/2.297	1.897/2.357	2.303/2.651	2.793/2.803	3.255/3.155	3.752/3.327	4.055/3.759
0.578	1.609/2.309	2.090/2.548	2.542/2.807	3.087/3.143	3.601/3.624	4.154/3.447	4.492/3.826
0.676	1.849/2.635	2.411/2.951	2.939/3.168	3.577/3.396	4.178/4.385	4.825/4.091	5.220/4.515
0.794	2.136/2.792	2.796/3.382	3.416/3.302	4.165/3.537	4.871/4.506	5.630/4.224	6.093/4.920
0.882	2.352/2.898	3.085/3.167	3.774/3.664	4.606/4.128	5.390/4.653	6.234/4.829	6.749/5.314
0.960	2.543/2.911	3.342/3.545	4.092/3.825	4.998/4.384	5.852/4.932	6.770/5.274	7.331/5.406

3 运行调试

3.1 材料选取与参数设置

为进行接触力测试系统的运行调试, 以网购于广州神农昆虫培育基地的苍蝇(家蝇, *Musca domestica*)为微小型飞行昆虫进行接触力测试, 其体长 $7.09 \text{ mm} \pm 0.06 \text{ mm}$ 、体重 $17.38 \text{ mg} \pm 2.05 \text{ mg}$, $n=16$ 。截取长度 60 mm 的碳纤维弹簧 T300(重量 4 mg), 左端固定于步进电机模组滑块右端并在步进电机作用下移动至有机玻璃罩内部。采用高帧数摄像机(帧数高达 325、像素高达 230 万, Mv-A5201mu 150, 浙江华睿科技有限公司, 中国)记录苍蝇在碳纤维弹簧 T300 降落/起飞过程的视频信息, 其帧数与像素匹配设置为 180、182 万, 以实现降落/起飞过程的连贯记录与图像信息的清晰获取。

3.2 降落/起飞过程图像获取

开启光源以提升有机玻璃罩内部的光亮度, 确保苍蝇在碳纤维弹簧 T300 降落/起飞视频的清晰度; 将 2~3 只苍蝇投放至有机玻璃罩内部并打开高帧数摄像机以捕捉其在碳纤维弹簧 T300 降落/起飞过程的视频信息。共进行 6 批次总计 16 只苍蝇的投放, 共记录 62 次苍蝇降落/起飞过程的视频信息, 存储容量 $2\,044.7 \text{ GB}$ 。

典型降落/起飞过程如图 4 所示, 苍蝇被投放至有机玻璃罩内部后将会无干扰飞行(图 4a), 若干时间后开始在碳纤维弹簧 T300 上停靠并产生临界接触(图 4b、4c), 约 32 ms 后完成在碳纤维弹簧 T300 接触点的降落(图 4d、4e)并将保持停靠状态(图 4f、4g); 此后苍蝇将启动起飞过程, 先从接触点临界脱离(图 4h、4i、4j、4k), 然后飞离接触点完成起飞(图 4l)。在苍蝇的临界接触、降落、停靠、起飞、脱离等过程中, 碳纤维弹簧 T300 均会产生挠度, 挠度的变化将会反映接触力的大小。

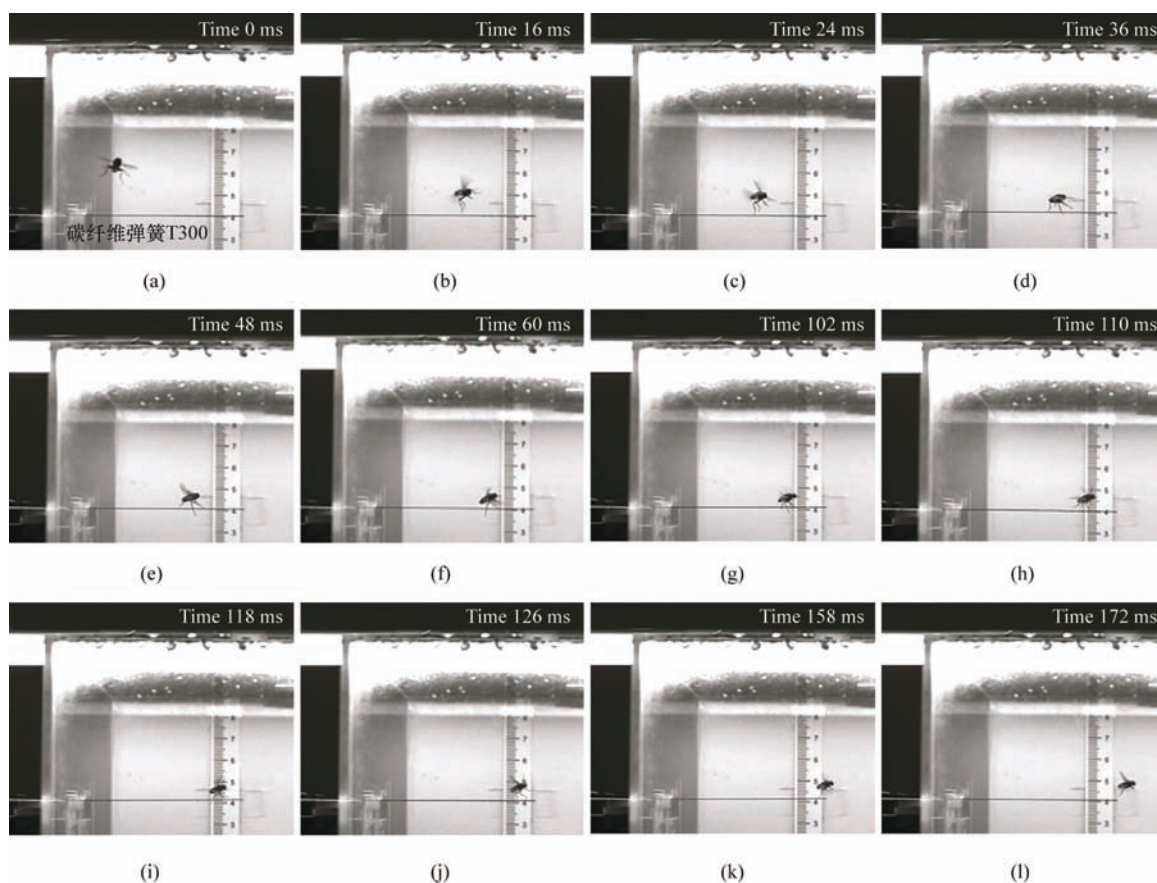


图 4 苍蝇在碳纤维弹簧 T300 的降落/起飞过程

3.3 挠度提取与接触力计算

苍蝇降落/起飞过程接触力引发的碳纤维弹簧 T300 挠度变动范围多为毫-微米级, 其精准提取是准确获取接触力的关键。将由高帧数摄像机记录的降落/起飞图像导入基于 Matlab 软件编写的图像分析处理程序, 如图 5a 所示, 以苍蝇脊背翅膀交汇处(重心位置)为起点作碳纤维弹簧 T300 的垂线得到 p 点(接触点位置), Op 为苍蝇降落/起飞的接触点位置

信息; 以 O 为起始点沿水平方向设置参考线并命名为水平参考线。提取接触点位置信息时, 将图像放大至仍可辨别苍蝇脊背翅膀交汇处, 以准确获取 p 点, 以挠度/位置信息参考标尺为基准, 提取接触点位置信息。为准确提取挠度信息, 将碳纤维弹簧 T300 的右端区域放大至仍可辨别其边缘, 然后进行放大、二值化、轮廓识别等处理(图 5b), 以挠度/位置信息参考标尺为基准, 分析提取碳纤维弹簧 T300

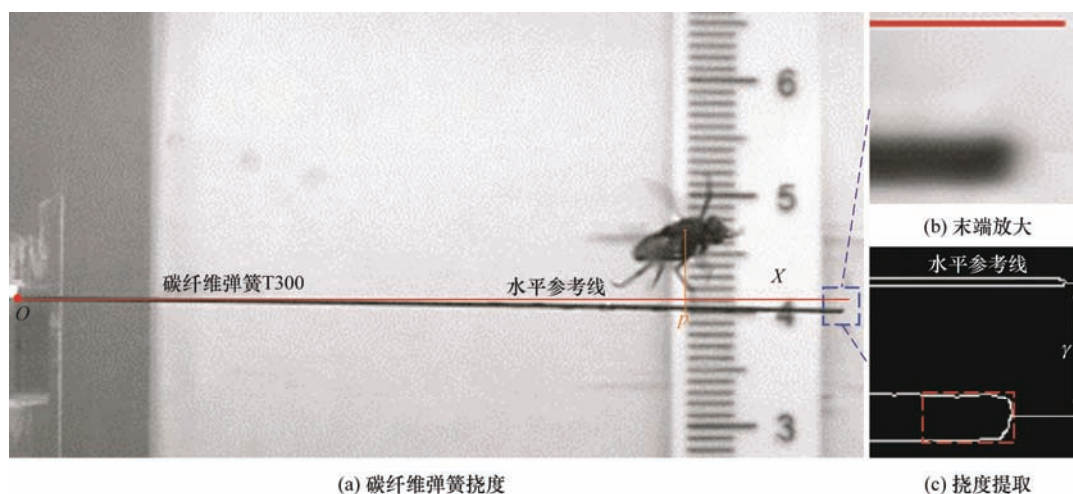


图 5 碳纤维弹簧 T300 挠度提取

右端轮廓在竖直方向的中点到水平参考线右端轮廓中点的垂直距离(挠度, 图 5c), 设定水平参考线下方为正挠度、上方为负挠度。苍蝇降落/起飞过程中引发的挠度如图 6 所示, 苍蝇临界接触碳纤维弹簧 T300 时刻便开始引发挠度, 降落过程的接触力使碳纤维弹簧 T300 下压并引发挠度上升至峰值 1.891 mm; 随即碳纤维弹簧 T300 朝向

水平参考线上方弹回并引发挠度下降至谷值 -1.312 mm。苍蝇从接触点起飞时下压碳纤维弹簧 T300 使其穿越水平参考线至最下端以获取用于起飞的弹跳力(接触力), 这引发挠度急剧上升并呈现峰值 2.360 mm; 随着苍蝇从接触点飞离, 碳纤维弹簧 T300 逐渐弹回至水平参考线位置并导致挠度最终归零。

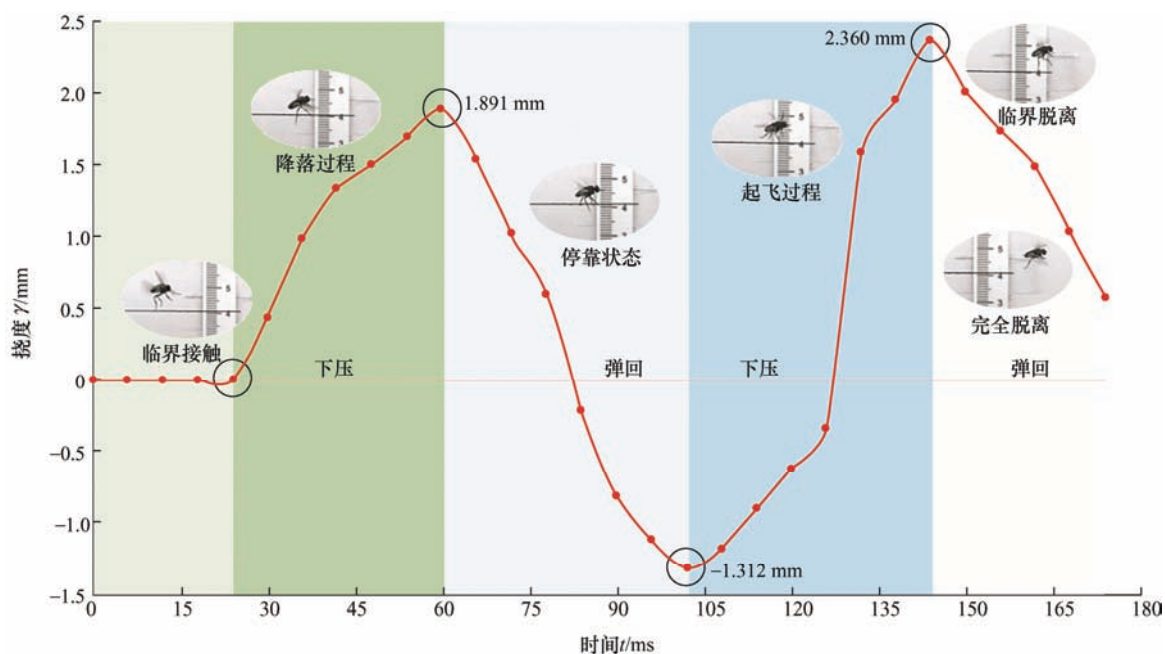


图 6 苍蝇降落/起飞过程的碳纤维弹簧 T300 挠度

将获取的挠度, 连同苍蝇降落/起飞的接触点位置代入接触力-挠度-接触点位置数学方程(式(4)), 求

解苍蝇降落/起飞的作用力(图 7), 并将作用力的最大值定义为接触力。碳纤维弹簧 T300 的重力

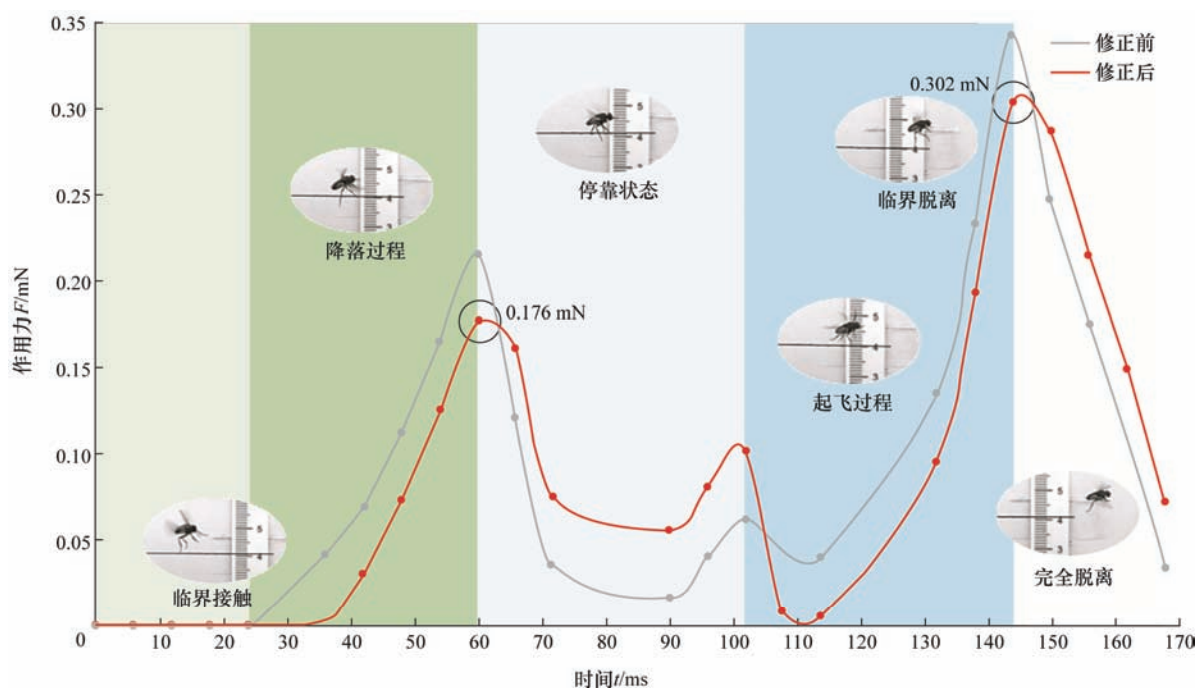


图 7 苍蝇在碳纤维弹簧 T300 降落/起飞过程的作用力

(0.039 mN)亦会引发向下的挠度,这将影响苍蝇在临界接触、降落、停靠、起飞、脱离等过程产生的作用力,故需要对其修正。苍蝇在降落/起飞过程使碳纤维弹簧 T300 产生向下的挠度,作用力应减掉重力;碳纤维弹簧 T300 向上弹回过程引发向上的挠度,作用力应加上重力。修正后的作用力如图 7 所示,苍蝇临界接触碳纤维弹簧 T300 便产生作用力,降落过程的挠度急剧上升导致作用力亦急剧增大并呈现峰值 0.176 mN,故苍蝇降落过程的接触力为 0.176 mN;苍蝇从接触点起飞时刻,碳纤维弹簧 T300 下压并穿越水平参考线至最下端致使挠度急剧增大,导致作用力亦急剧增大并呈现峰值 0.302 mN,故苍蝇起飞过程的接触力为 0.302 mN。

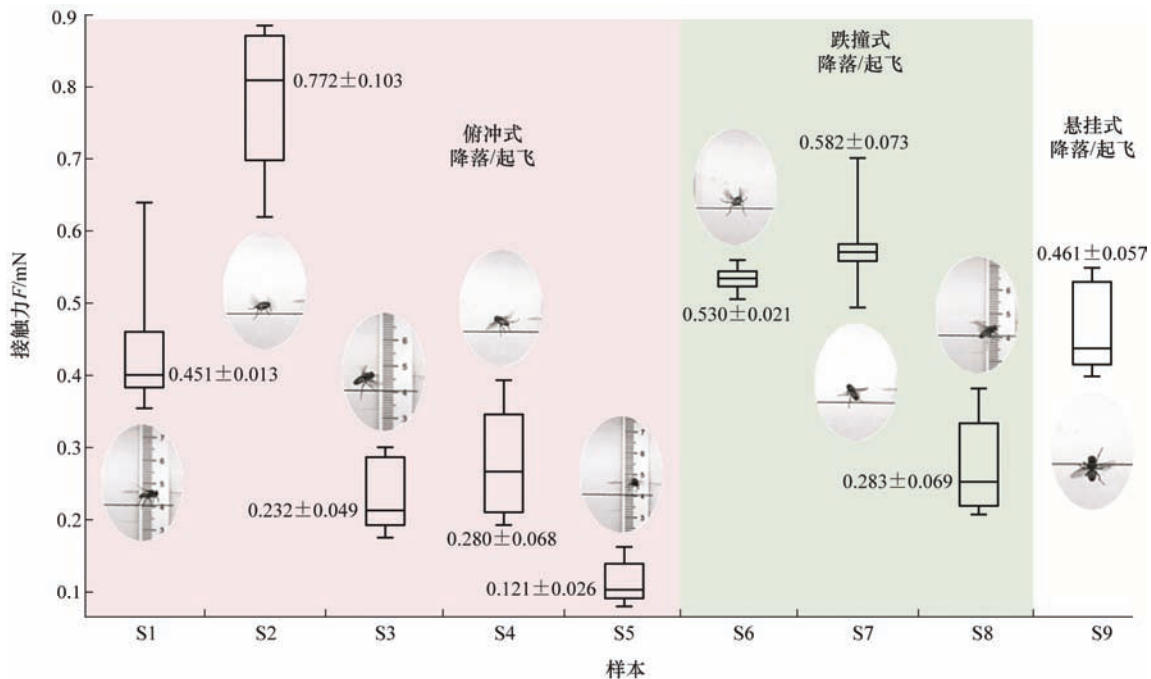


图 8 苍蝇在碳纤维弹簧 T300 降落/起飞过程的接触力

3.4 接触力测试系统准确度提升措施

为实现苍蝇、甲虫、蜜蜂等微小型飞行昆虫无干扰状态下降落/起飞过程接触力的准确表征,设计了接触力测试系统,分辨力可达 0.001 mN,并通过以下四个方面来提升测试准确度。

(1) 对碳纤维弹簧进行模拟标定并获取挠度-接触力-接触点位置图像与接触力-挠度-接触点位置数学方程,用作实际标定的参考,进行实际标定并获取拟合优度 $R^2=0.979$ 的接触力-挠度-接触点位置数学方程,表明碳纤维弹簧 T300 能够准确感知接触力。

(2) 选取较为完善的苍蝇降落/起飞过程视频作为样本来提取挠度,采用基于 Matlab 软件编写的图

选取苍蝇在碳纤维弹簧 T300 降落/起飞过程完整的视频信息作为样本($n=9$),获取降落/起飞过程的挠度峰值并求解得到接触力,其统计值如图 8 所示。苍蝇以多种姿态在碳纤维弹簧 T300 降落/起飞, S1-S5 为俯冲式降落/起飞,接触力介于 0.121~0.772 mN; S6-S8 为跌撞式降落/起飞,接触力介于 0.280~0.581 mN; S9 为悬挂式降落/起飞,接触力为 0.462 mN。总体而言,无干扰状态下苍蝇降落/起飞过程产生的接触力为毫-微牛级(0.121~0.772 mN),为其体重(17.38 mg)的 0.71~4.53 倍,较高的比值有利于苍蝇的稳固降落与灵活起飞,这为微小型仿生飞行器设计提供了比较适合的仿生原型。

像分析处理程序对碳纤维弹簧 T300 末端区域进行放大、二值化、轮廓识别等处理,确保挠度的精准提取。

(3) 碳纤维弹簧 T300 因重力(0.039 mN)而引发挠度,影响接触力提取的准确度,故对其修正,即在碳纤维弹簧 T300 下压/弹回过程中减掉/加上重力。

(4) 苍蝇、甲虫、蜜蜂等仿生原型较为弱小(体重~10 mg),接触力多为毫-微牛级且易受到外界干扰,所设计的接触力测试系统能够使仿生原型在无干扰状态(不因与测力器件连接而影响生理活性、降落/起飞姿态)下完成降落/起飞,确保接触力的准确获取。

4 结论

(1) 选用碳纤维弹簧 T300 作为微小型飞行昆虫降落/起飞过程接触力的感知器件并对其标定, 获取拟合优度 $R^2=0.979$ 的接触力-挠度-接触点位置数学方程, 确保接触力的准确求解。

(2) 以苍蝇为微小型飞行昆虫进行了接触力测试系统的运行调试, 对碳纤维弹簧 T300 末端区域图像进行放大、二值化、轮廓识别等处理, 确保挠度、接触点位置等信息的精确提取; 代入接触力-挠度-接触点位置数学方程求解接触力并进行修正以消除碳纤维弹簧 T300 重力的影响, 苍蝇降落/起飞过程的接触力介于 0.121~0.772 mN, 为其体重的 0.71~4.53 倍。

(3) 接触力测试系统的分辨力可达 0.001 mN, 通过模拟/实际标定、挠度精准获取、接触力修正、降落/起飞过程无干扰等 4 方面来提升测试准确度, 以确保仿生原型降落/起飞过程接触力的精准获取。

研究结果为微小型飞行器仿生原型运动行为的定量表征提供了可借鉴的技术与方法, 并能为微小型仿生飞行器功能表征提供相应的技术/方法参考。

参 考 文 献

- [1] ZOU Y, ZHANG W, ZHANG Z. Liftoff of an electromagnetically driven insect-inspired flapping-wing robot[J]. IEEE Transactions on Robotics, 2016, 32(5): 1285-1289.
- [2] JAFFERIS N, HELBLING E, KARPELSON M, et al. Untethered flight of an insect-sized flapping-wing microscale aerial vehicle[J]. Nature, 2019, 570(7762): 491-495.
- [3] PHAN H, PARK H. Mechanisms of collision recovery in flying beetles and flapping-wing robots[J]. Science, 2020, 370(6521): 1214-1219.
- [4] 梁友鉴, 赵杰亮, 阎绍泽. 基于蜜蜂腹部变体机制的空中飞行器仿生变体头锥设计[J]. 机械工程学报, 2020, 56(5): 47-54.
LIANG Youjian, ZHAO Jieliang, YAN Shaoze. Bionic design of morphing nose cone for aerospace vehicle based on the deformable mechanism of honeybee abdomen[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2020, 56(5): 47-54.
- [5] WANG C, ZHANG W, ZHAO J, et al. Design, takeoff and steering torques modulation of an 80-mg insect-scale flapping-wing robot[J]. Micro & Nano Letters, 2020, 15(15): 1079-1083.
- [6] PHAN H, AURECIANUS S, AU T, et al. Towards long-endurance flight of an insect-inspired, tailless, two-winged, flapping-wing flying robot[J]. IEEE Robotics and Automation Letters, 2020, 5(4): 5059-5066.
- [7] 赵杰亮, 赵真, 余丽, 等. 基于脑电刺激的蜜蜂飞行控制系统设计[J]. 机械工程学报, 2021, 57(15): 45-52.
ZHAO Jieliang, ZHAO Zhen, YU Li, et al. Design of flight control system for honeybee based on EEG stimulation[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2021, 57(15): 45-52.
- [8] 王国彪, 陈殿生, 陈科位, 等. 仿生机器人研究现状与发展趋势[J]. 机械工程学报, 2015, 51(13): 27-44.
WANG Guobiao, CHEN Diansheng, CHEN Kewei, et al. The current research status and development strategy on biomimetic robot[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2015, 51(13): 27-44.
- [9] HAWKES E, LENTINK D. Fruit fly scale robots can hover longer with flapping wings than with spinning wings[J]. Journal of the Royal Society Interface, 2016, 13(123): 20160730.
- [10] CROON G, WAGTER C, SEIDL T. Enhancing optical-flow-based control by learning visual appearance cues for flying robots[J]. Nature Machine Intelligence, 2021, 3(1): 33-41.
- [11] 张弘志, 宋笔锋, 孙中超, 等. 扑翼飞行器驱动机构回顾与展望[J]. 航空学报, 2021, 42(2): 80-101.
ZHANG Hongzhi, SONG Bifeng, SUN Zhongchao, et al. Driving mechanism of flapping wing aircraft: Review and prospect[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2021, 42(2): 80-101.
- [12] WANG J, CHEN W, XIAO X, et al. A survey of the development of biomimetic intelligence and robotics[J]. Biomimetic Intelligence and Robotics, 2021, 1: 100001.
- [13] TIAN Y, PESIKA N, ZENG H, et al. Adhesion and friction in gecko toe attachment and detachment[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences, 2007, 103(51): 19320-19325.
- [14] 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): 1271-1274.
ZHANG Zhengjie, JI Aihong, WANG Zhouyi, et al. 3-Dimensional sensor for measuring geckos' ground reaction force[J]. Chinese Journal of Sensors and Actuators, 2007, 20(6): 1271-1274.
- [15] WANG Z, WANG J, JI A. Behavior and dynamics of

- gecko's locomotion: The effects of moving directions on a vertical surface[J]. Chinese Science Bulletin, 2011, 56(6): 573-583.
- [16] DAI Z, WANG Z, JI A. Dynamics of gecko locomotion: A force-measuring array to measure 3D reaction forces[J]. The Journal of Experimental Biology, 2011, 214(5): 703-708.
- [17] NAYLOR E, HIGHAM T. Attachment beyond the adhesive system: The contribution of claws to gecko clinging and locomotion[J]. Integrative and Comparative Biology, 2019, 59(1): 168-181.
- [18] SONG Y, YUAN J, ZHANG L, et al. Size, shape and orientation of macro-sized substrate protrusions affect the toe and foot adhesion of geckos[J]. Journal of Experimental Biology, 2021, 224(8): jeb223438.
- [19] WANG L, ZHOU Q, XU S. Role of claws and pads in locust *Locusta migratoria manilensis* attaching to substrates[J]. Chinese Science Bulletin, 2011, 56(8): 789-795.
- [20] HAN L, WANG Z, JI A, et al. Grip and detachment of locusts on inverted sandpaper substrates[J]. Bioinspiration & Biomimetics, 2011, 6(4): 046005.
- [21] WANG L, JOHANNESSON C, ZHOU Q. Effect of surface roughness on attachment ability of locust *Locusta migratoria manilensis*[J]. Wear, 2015, 332-333: 694-701.
- [22] WANG L, ZHOU Q. Friction force of locust *Locusta migratoria manilensis* (orthoptera, locustidae) on slippery zones surface of pitchers from four *Nepenthes* species[J]. Tribology Letters, 2011, 44(3): 345-353.
- [23] ZHANG P, CHEN H, ZHANG D. Investigation of the anisotropic morphology-induced effects of the slippery zone in pitchers of *Nepenthes alata*[J]. Journal of Bionic Engineering, 2015, 12(1): 79-87.
- [24] WANG L, DONG S, ZHOU Q. Slippery surface of *Nepenthes alata* pitcher: The role of lunate cell and wax crystal in restricting attachment ability of ant *camponotus japonicus* mayr[J]. Journal of Bionic Engineering, 2016, 13(3): 373-387.
- [25] 王立新, 黄凤山, 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.
- [26] 毕可东, 宋小闯, 王玉娟, 等. 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, et al. Anti-adhesion mechanisms of *Nepenthes* waxy slippery zone surface[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2015, 51(23): 103-109.
- [27] 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, 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, 2017, 47(2): 259-264.
- [28] 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, 53(21): 86-94.
- 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, 53(21): 86-94.
- [29] WANG L, TAO D, DONG S, et al. Contributions of lunate cells and wax crystals to the surface anisotropy of *Nepenthes* slippery zone[J]. Royal Society Open Science, 2018, 5(9): 180766.
- [30] 闫征, 王立新, 潘盼. 仿生原型毫-微牛级力测试技术研究进展[J]. 河北科技大学学报, 2021, 42(3): 205-213.
- YAN Zheng, WANG Lixin, PAN Pan. Research progress on milli-micro Newton level force measurement technology of bionic prototype[J]. Journal of Hebei University of Science and Technology, 2021, 42(3): 205-213.
- [31] FEDERLE W, ROHRSEITZ K, HOLDOBLER B. Attachment forces of ants measured with a centrifuge: Better 'wax-runners' have a poorer attachment to a smooth surface[J]. Journal of Experimental Biology, 2000, 203(3): 505-512.
- [32] 周群, 于鹏, 何斌, 等. 蚂蚁附着力的测试及 ANSYS 分析[J]. 同济大学学报, 2008, 36(5): 670-673.
- ZHOU Qun, YU Peng, HE Bin, et al. Testing of wet adhesive forces of ants and ansys analysis[J]. Journal of Tongji University, 2008, 36(5): 670-673.
- [33] 周群, 何斌, 钱明刚, 等. 昆虫足垫吸附系统的摩擦力和吸附力实验分析[J]. 上海理工大学学报, 2008, 30(2):

- 143-146.
- ZHOU Qun, HE Bin, QIAN Minggang, et al. Analysis on friction and adhesive force of insects pads[J]. Journal of University of Shanghai for Science and Technology, 2008, 30(2): 143-146.
- [34] 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.
- [35] LABONTE D, FEDERLE W. Scaling and biomechanics of surface attachment in climbing animals[J]. Philosophical Transactions of the Royal Society of London, 2015, 370(1661): 20140027.
- [36] YIN W, ZHENG Y, LU H, et al. Three-dimensional topographies of water surface dimples formed by superhydrophobic water strider legs[J]. Applied Physics Letters, 2016, 109(16): 663-2310.
- [37] ZHENG Y, LU H, YIN W, et al. Elegant shadow making tiny force visible for water-walking arthropods and updated archimedes' principle[J]. Langmuir, 2016, 32(41): 10522-10528.
- [38] LU H, ZHENG Y, YIN W, et al. Propulsion principles of water striders in sculling forward through shadow method[J]. Journal of Bionic Engineering, 2018, 15(3): 516-525.
- [39] ZHENG Y, LU H, JIANG J, et al. Walking of spider on water surface studied from its leg shadows[J]. Chinese Physics B, 2018, 27(8): 084702.
- [40] ZHENG Y, YIN W, LU H, et al. Revealing stepping forces in sub-mg tiny insect walking[J]. Chinese Physics B, 2020, 29(12): 124703.

作者简介: 闫征, 男, 1996 年出生。主要从事仿生原型测试技术与方法研究。

E-mail: yanzheng169@163.com

王立新(通信作者), 男, 1981 年出生, 博士, 副教授, 硕士研究生导师。主要从事功能表面仿生原理与制备技术方面研究。

Email: wanglx@hebust.edu.cn

闫世兴, 男, 1983 年出生, 博士, 副研究员, 硕士研究生导师。主要从事激光熔覆制备方面研究。

Email: ysxneu@163.com