

DOI: 10.3901/JME.2021.15.045

基于脑电刺激的蜜蜂飞行控制系统设计*

赵杰亮¹ 赵真² 余丽¹ 丁浩嘉³ 杨运强² 阎绍泽³

- (1. 北京理工大学机械与车辆学院 北京 100081;
2. 中国地质大学(北京)工程技术学院 北京 100083;
3. 清华大学机械工程系 北京 100084)

摘要: 半生物昆虫机器人因其隐蔽性高、续航时间长等优势在未来军事作战及抢险救灾中具有重要应用价值。然而,目前蜜蜂等昆虫飞行行为的神经调控尚不清晰,且缺乏人工干预控制昆虫稳定和精准飞行的有效方法。在探索视觉引导下的蜜蜂飞行行为神经调控机制的基础上,采用可编程微型控制芯片,配合无线电接收模块,提出了兼顾无线通信距离与接近蜜蜂载荷的微控制背包设计,开发了嵌入式微型智能控制芯片,并以腹部背侧为昆虫结合位点,验证了背包对蜜蜂机器人的飞控效果。微控制背包的开发为蜜蜂机器人的飞控研究提供了硬件基础,同时也为生物控制背包的升级与优化提供了理论依据。

关键词: 蜜蜂; 昆虫机器人; 飞行行为; 虚拟视觉刺激; 人工干预控制

中图分类号: TH39

Design of Flight Control System for Honeybee Based on EEG Stimulation

ZHAO Jieliang¹ ZHAO Zhen² YU Li¹ DING Haojia³ YANG Yunqiang² YAN Shaoze³

- (1. School of Mechanical Engineering, Beijing Institute Technology, Beijing 100081;
2. School of Engineering and Technology, China University of Geosciences (Beijing), Beijing 100083;
3. Department of Mechanical Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084)

Abstract: Cyborg insect robots have important application value in future military operations and disaster relief due to their high concealment and long endurance. However, the current neural regulation of the flight behavior of insects remained to be elucidated. The effective methods for artificial intervention to control the stable and precise flight of insects were deficient. Based on exploring the neural regulation mechanism of flight behavior under visual guidance, a micro control backpack is designed by using programmable micro control chip and radio receiving module, which takes into account the wireless communication distance and load capacity of honeybee. Furthermore, the flight control effect on the bee robot is verified by embedded micro intelligence backpack to the back of the abdomen. The development of the micro-control backpack provides a hardware basis for the flight control research of the bee robot, which also provides a theoretical basis for the optimization of the biological control backpack.

Key words: honeybee; cyborg insect robot; flying behavior; virtual visual stimulation; manual intervention control

0 前言

昆虫拥有出色的飞行、跳跃、爬行、游泳等运动能力,通过MEMS背包电刺激昆虫的脑区、神经节、肌肉、器官等部位,强迫或诱导蜜蜂的

行为运动,进而将活体昆虫改造成半生物机器人系统的技术研究逐渐成为近年来的研究热点^[1]。相较于昆虫仿生扑翼飞行器而言^[2-5],半生物昆虫机器人整体结构设计简单,无需飞行机翼、机械机构等设计,同时控制模块及动力源大为简化,并且机动性能优越,继承了昆虫本身的优越运动性能及快速应变能力。半生物昆虫机器人因其独特的生物属性在学术研究、军事侦察、生活安保、农业生产、智能娱乐等领域有长远的应用前

* 国家自然科学基金(51805293, 52075038)、北京市自然科学基金(3212012)和北京理工大学青年教师学术启动计划资助项目。20200901收到初稿,20210204收到修改稿

景^[6-9]。半生物昆虫机器人又称昆虫-机器混合系统,最初源于 20 世纪 90 年代肌肉神经运动参数采集的无线电遥测技术^[10-11],随后众多研究者基于不同昆虫载体与刺激位点展开了电刺激行为观测研究,虽然已在刺激位点、参数选取、行为控制等方面取得长足进步,但其神经控制机理及控制背包设计仍面临较大难题。

以触角电刺激的蟑螂机器人因其制作简单而出现较早,但触角暴露于身体外部易受环境干扰且个体差异较大,因此控制效率相对较低。最初 HOLZER 和 SHIMOYAMA 用 1.9 g 的 8 位单片机微控制系统,使用 100 μm 的铂或不锈钢电极对蟑螂触角根部电刺激,实现了蟑螂较短距离的直线行走^[12]。随后 LATIF 和 BOZKURT 研究团队基于德州仪器 CC2530 设计了 500 mg 的轻型背包,实现了蟑螂机器人的初步制作及 S 型轨迹行走^[13]。张定国团队基于脑机接口技术^[14]开发出蟑螂机器人新控制模式,通过人脑直接控制电子蟑螂的运动^[15]。该系统采用基于稳态视觉诱发电位的脑-机接口实现对人体运动意图的识别。

以飞蛾为载体的昆虫机器人主要以肌肉为刺激位点,基于蛹期植入电极可使生物损失达到最小且控制成功率较高。BOZKURT 团队设计了一种微电极系统,通过变态发育初期植入技术(Early metamorphosis insertion technology, EMIT)利用电刺激肌肉驱动飞蛾振翅,达到控制飞蛾飞行的目的^[16]。随后该团队设计了无线微控制系统,通过 650 mg 的控制背包电刺激飞蛾颈部肌肉,成功触发了飞行的启动与停止^[17]。在麻省理工学院的飞蛾机器人研究中,设计了可同时电刺激与采集神经信号的柔性电极阵列,整体控制背包重 460 mg,并与飞蛾腹部稳定结合,最终实现了飞蛾飞行转向,且重复性较高^[18]。

基于肌肉与神经的共同刺激可以实现运动行为的精确控制,在众多昆虫载体中以甲虫的研究最为成熟。SATO 团队以 CC2431 片上系统为基础研制出一款可植入式微型飞行控制系统,可引出 4 根银丝电极同时刺激神经与肌肉,成功实现飞行启动、停止、转向、升力等调控^[19]。同年该团队通过直接刺激视叶实现了甲虫飞行的启动、停止和仰角控制的控制方法^[20]。随后为解决甲虫飞行转向的精确控制问题,进一步发现了甲虫第三腋窝鞘翅目肌肉在转弯时的同侧激活现象^[21],并以

Mecynorhina torquata 为载体,通过植入 8 对带特氟隆绝缘层的细银丝电极实现了甲虫精确控制的突破^[22]。

半生物昆虫机器人载体选取随着背包质量的微型化,逐渐由爬行昆虫向飞行昆虫过渡,且呈现出小型化趋势。蜜蜂优异的视觉能力对蜜蜂的飞行调控起到关键作用^[23-26],基于视觉及嗅觉的神经与感官电刺激逐渐成了半生物蜜蜂机器人的主要研究方向。郑能干团队通过将 65 μm 镍铬合金电极植入蜜蜂视叶,通过干扰视觉神经实现了蜜蜂的起飞与停止^[27]。之后该团队比较了多参数刺激对蜜蜂多种脑区的控制效果,飞行成功率由高到低依次是 α -lobe 或 β -lobe、椭球体、视小叶、视髓质和触角叶^[28]。薛磊等选用熊蜂为载体将电极植入熊蜂前视神经节,借助红外光电传感器记录蜜蜂振翅频率^[29]。除视觉之外蜜蜂强大的嗅觉同样影响着飞行决策,赵杰亮等研究了蜜蜂触角电位与气味喜好程度的关联性研究,通过施加触角电位刺激造成虚拟嗅觉,从而诱导蜜蜂飞行^[30]。

在传统微控制背包设计中,背包质量远大于昆虫飞行载荷,不易背负飞行,同时较大的背包体积易造成昆虫痛苦情绪及排斥反应,干扰控制结果与生物活性。而蜜蜂载荷较小,对背包微型化设计难度更大,同时更不利于昆机系统的结合与电极植入。微控制背包的微型化加大了背包电源与无线传输模块的集成难度,严重阻碍了蜜蜂机器人的开发。针对上述问题,本文设计了一套可提供不同刺激参数和模式的无线自供电电刺激背包系统,选取蜜蜂(*Apis mellifera L.*)为昆虫机器人载体,制作了昆机结合系统,并展开了飞行控制验证。结果表明,该系统质量接近蜜蜂飞行负载,能通过无线电刺激输出,有效实现蜜蜂飞行控制。

1 蜜蜂飞行运动控制方案

半生物蜜蜂机器人分为活体蜜蜂、微控制系统、植入电极 3 部分。如图 1 所示,其中微控制系统包括无线控制端与刺激背包两部分。无线控制端用于设置脉冲参数与刺激模式,发送控制指令;执行背包接收无线传输指令,生成电刺激脉冲至植入电极,最终导入蜜蜂脑区调控蜜蜂飞行。

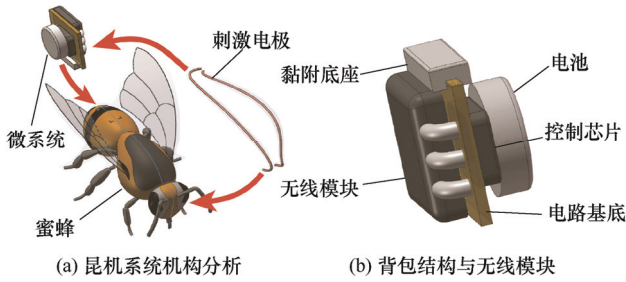


图 1 半生物蜜蜂机器人构成图

1.1 试验方法

蜜蜂的飞行控制系统主要包括单片机芯片、无线传输、电源供电等部分。以红外通信作为无线传输模式相比蓝牙与 wifi 具有更小的体积，同时兼顾较远的传输距离，背包系统的控制结构设计如图 2 所示。控制指令通过遥控按键发出，信号经电路调试与编码后，由红外发射管发送至内部封装有红外芯片与红外接收管的红外接收头，红外接收管基于光电感应输出电流，经红外芯片调制将信号以电压方波形式输出至控制芯片 MCU，最终控制芯片识别指令输出特定参数的电脉冲刺激，从而触发蜜蜂行为响应。

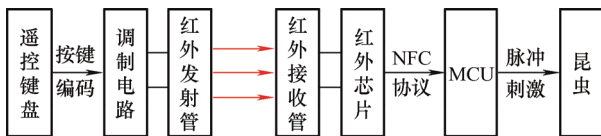


图 2 背包系统控制结构设计图

1.2 刺激背包电路原理

微控制系统选取 PIC12F615-E/MF 作为总控制 MCU，采用 DFN 封装，3 V 工作电压，体积仅为 3 mm×3 mm×0.9 mm。选取红外接收头为无线通信模块，最大通信距离为 8 m。电路原理如图 3 所示，通过将芯片内部配置的复位引脚外接 RC 电路，延长上电后电位上拉时长，进而达到外部上电复位功能，外部复位电路还可以在电压超过规范值时提供对系统的保护。芯片内部配置有外部输入中断引脚，仅需将其连接至红外模块的输出引脚，配合带有可编程预分频器的 8 位定时器，即可实现对红外信号的解码。

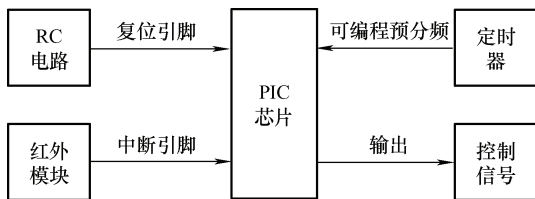


图 3 刺激背包电路原理图

1.3 红外指令解码

红外信号的传递需要发射模块与接收模块共同构成，通过将发送的数字信号加载到 37.9 Hz 的载波频率上，以红外光形式传递至红外接收模块，进而完成信号传递。红外信息的传递过程服从 NEC 协议，通过触发芯片的输入电位变化中断与定时中断来实现对红外指令解码。红外解码流程如图 4 所示，随着第一个红外信号的上升沿发生，电位变化中断被触发，进入中断程序，计时器开启，当下降沿触发的第二次中断发生时，记录两次中断之间的计时器时间，通过将计时时间与 NEC 协议进行对比，判断信号发送的时序与逻辑信息，实现指令解码。

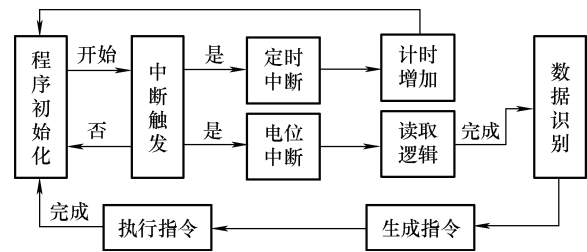


图 4 红外解码程序流程图

2 背包功能实现与电路集成

2.1 电脉冲刺激程序实现

在昆虫机器人的运动调控实验中，通常需要进行批量化实验验证电刺激参数对行为诱导的触发规律，传统昆虫控制背包输出模式单一，无法实时修改电刺激参数，严重阻碍了实验效率。围绕 HX1838 遥控器而展开的程序设计，以按键指令为基础，通过指令修改实现刺激参数的设置与输出。按键控制指令被划分为输出模式、参数类别、数字指令、控制指令等四部分。微控制背包程序流程图如图 5 所示，首先对输出模式与各输出参数赋初始值，当识别到无线传输指令为输出模式时，实现对蜜蜂脑区的双侧、左侧或右侧电刺激模式的修改。当识别到指令为参数类别时，程序会根据指令所代表的具体属性如频率、占空比、刺激时长等进入参数修改模式，直到参数赋值成功。当接收信号输出指令时，单片机将基于当前输出模式与参数设置情况对蜜蜂输出电刺激，而接收到初始化指令时，输出模式与参数将还原至初始值。

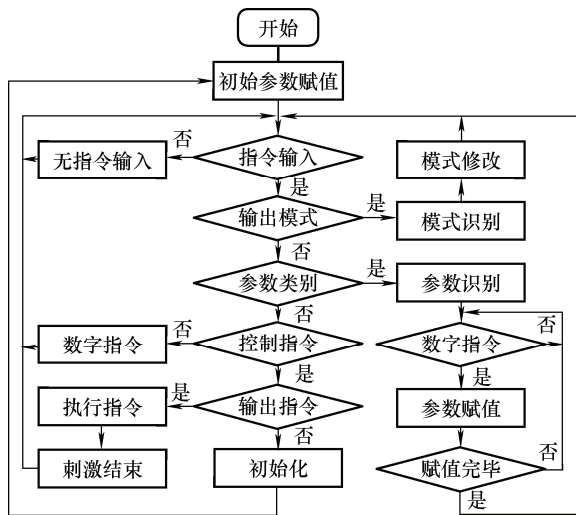


图 5 微控制背包程序流程图

2.2 集成电路硬件加工

电路板选取 FPC 软板，基底材料为聚酰亚胺，具有较高的热稳定性与耐热性，无毒，板厚为 0.1~0.15 mm 之间，铜厚 35 μm，表面黄膜白字，无补强处理，表面焊盘 OSP 抗氧化处理。FPC 加工工艺与一般 PCB 加工流程相似，包括开料、内层、层压、钻孔、沉铜、线路、图电、蚀刻、阻焊、字符、喷锡(或沉金)、锣边、v 割、飞测、真空包装等。成品采用双层电路布局，兼用表贴和直插器件，集成电路设计以最小电路面积为原则，避免复杂的线路布局。FPC 集成电路板的设计如图 6a 所示，ICSP 串形编程接口单独分布于右侧，程序写入后可以将其裁下，裁剪之后 FPC 板面积仅为 5.6 mm×4.6 mm。正面 FPC 电路用于贴装 PIC12F615 芯片，插装电池正负极引脚(图 6b)，背面用于贴装电阻电容器件，并插装红外接收头(图 6c)。FPC 板最上方设置导线连接孔，可用于连接电极输出电脉冲刺激至蜜蜂头部。

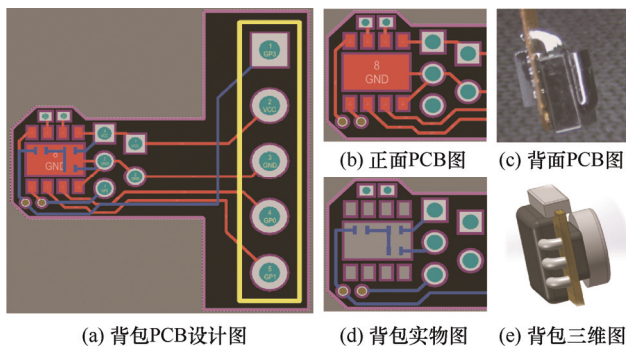


图 6 初始方案 FPC 电路集成设计

微控制背包系统实物及三维结构如图 6d,e 所示，控制芯片 PIC12F615 质量约 23 mg，红外模块 SL0038E 质量约 75 mg，电池质量约 70 mg，FPC

电路板的质量约为 20 mg，最终蜜蜂自供电飞行控制背包的总质量为 190 mg 左右，远低于同类昆虫控制背包，并接近蜜蜂 100 mg 飞行载荷，适用于蜜蜂半自由状态下的飞行调控实验。

3 半生物蜜蜂机器人飞控验证

3.1 蜜蜂机器结合实现

昆机结合系统由刺激电极、控制背包、活体蜜蜂三部分构成。为保证电极植入所需要的强度，电极最终选取表面 Polyimide 聚酰亚胺绝缘处理且直径为 50 μm 的钨丝电极为刺激电极，该电极兼有导电性强与硬度大等优点，通过将电极沿轴向 45° 角斜切而制成针尖状，可以直接刺入蜜蜂头部，并且切割后的截面具有导电性，可以作为刺激电极尖端。为保证蜜蜂的振翅与飞行姿态不受干扰，经蜜蜂负载实验发现，将背包固定于蜜蜂腹部背侧对飞行影响较小，并无蜜蜂排斥反应。

昆机结合过程中，首先将刺激电极通过导线连接至控制背包输出端，导线选取表面绝缘处理且直径为 50 μm 的铂铱合金丝。待背包至电极连接完成后，固定蜜蜂头部，使用双臂数显形脑立体定位仪(瑞沃德)将电极直接刺入头部双侧视叶(图 7a)，将蜂蜡涂抹至刺入破口处密封，并涂抹牙科胶加固连接。待电极固定后，将控制背包垂直黏贴至蜜蜂腹部背侧，将导线黏贴至蜜蜂胸部背侧中央，防止与翅膀缠绕。待电极、背包、蜜蜂连接后，蜜蜂机器人制作完成(图 7b)。

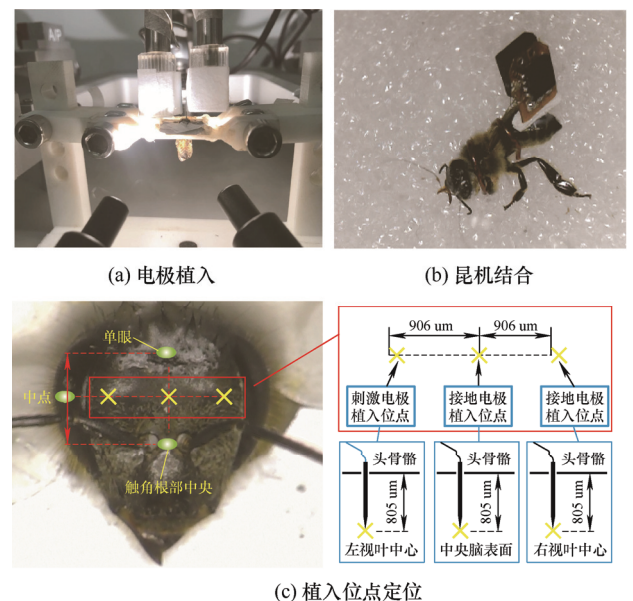
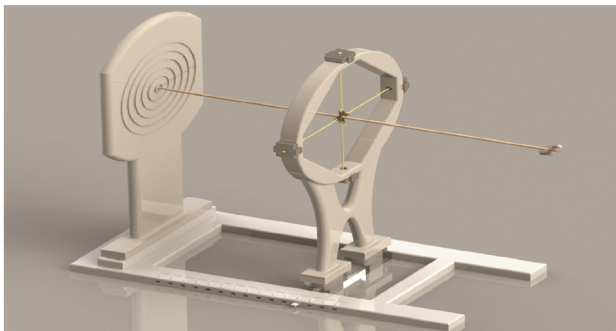


图 7 蜜蜂机器系统结合

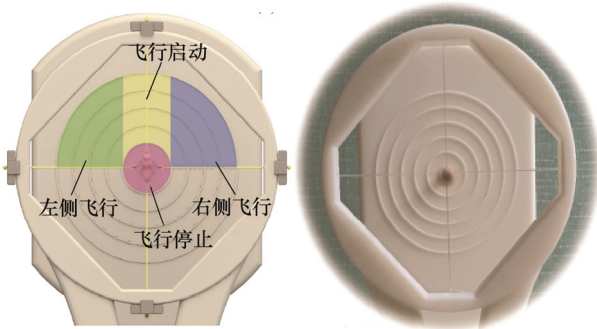
植入电极由双侧刺激电极与中部接地电极构成，植入位点图如图 7c 所示。通过单眼与触角根部中央确定脑区对称中心线，中心线中点即为接地电极植入位点，距离中点两侧(906±135)μm 分别是双侧刺激电极植入位点，定位数据参照脑区染色切片所得。双侧刺激电极刺入深度为(805±105)μm，刺入位点至视叶髓质中央高度，中央接地电极刺入为(400±75)μm，刺入位点至脑表面高度，深度数据由蜜蜂头部解剖实验获得。

3.2 飞控试验设计

蜜蜂随机而自由的飞行对运动数据的分析与获取造成极大的困扰，为了简化试验难度，半约束蜜蜂机器人飞控实验台的设计如图 8a 所示，实验台由图中底部的底板、中部的支架、左侧端部的挡板组装构成。实验台通过调节中部支架的插装位置可以实现运动放大倍率的调节。蜜蜂被细绳缠绕于胸部与腹部之间，其飞行运动可以通过细绳传递至飞控杆(木质)，飞控杆通过 4 根不同方向的弹性细绳约束于中部支架，可做灵活摆动。通过高速摄像机 (Phantom, M110, Vision Research, Wayne, NJ)观测蜜蜂在左侧挡板的投影，分析蜜蜂对控制指令的响应模式。试验的最终结果将以蜜蜂投影至挡板的区域进行行为判定，包括飞行启动、左侧飞行、右侧飞行三种，如图 8b 所示。



(a) 飞控实验台



(b) 飞行区域判定

图 8 蜜蜂机器系统结合

试验前期将蜜蜂机器人置于飞控实验台，校准蜜蜂至投影视野中央。整体实验包括飞行启停与转向两部分，在飞行启停试验中，设置刺激参数为 A、B、C 三种，频率参数 A 为频率 200 Hz、B 为频率 100 Hz、C 为频率 50 Hz，占空比为 40%，刺激时长为 1 s。

飞行转向试验的刺激参数将基于飞行启停试验的最优控制效果而选取。由于蜜蜂转向刺激需在振翅中观测，因此需要首先触发蜜蜂自由飞行，在飞行中施加单侧刺激。经试验发现蜜蜂在足部脱离支撑物时具有极大的振翅概率，因此将作为转向实验中的飞行触发方式。整体飞控试验设计结构如图 9 所示。

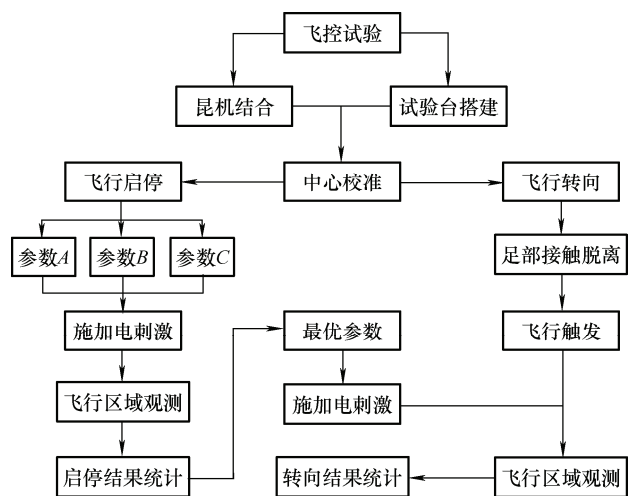


图 9 蜜蜂机器人飞控试验设计

3.3 飞控试验结果

在飞行启停试验中设置刺激模式为双侧刺激，每只蜜蜂进行三种参数刺激试验，同一种参数做三组刺激试验，每组试验施加三次刺激，刺激间隔为 30 s，若在 3 次电刺激内蜜蜂振翅，则停止当前参数组试验并记录数据。蜜蜂发生振翅后间隔 30 s 进行下一组刺激，每只蜜蜂在同一组试验的三次刺激下，发生一次振翅且带动飞控杆到达指导区域即判断为振翅。

飞行启停试验共选取 9 只活性较好的蜜蜂参与 81 组试验。如图 10a 所示，蜜蜂在三种参数的振翅成功率差异较为显著，参数 A、B、C 在蜜蜂单组刺激的成功率依此为 18%、33%、7%，同时图 10b 中展示了 9 只蜜蜂分别在三种刺激参数下的触发成功个数，其中参数 B 的蜜蜂触发数量为 7 只，远高于参数 A 与参数 C。上述结果显示频率为 100 Hz 的刺激参数更易诱发蜜蜂机器系统的飞行响应。尽管脉冲刺激的总成功率较低仅为 20%(图 10c)，但蜜蜂在

振翅诱发失败的刺激中, 刺激之后仍然伴随着翅膀微颤及张翅行为, 由于其不符合蜜蜂正常的飞行振翅频率, 所以暂不判定为触发成功。并且由图 10d 可知, 脉冲刺激对蜜蜂具有普遍的诱导作用, 在飞行启停的总诱发成功数量占比为 89%。

飞行转向的试验设计与飞行启停试验相同, 调节刺激背包输出模式为单侧刺激。由于参数 B 在飞行启停试验的控制效果最佳, 因此设置电刺激参数为频率 100 Hz、占空比 40%、刺激时长 1 s。飞行转向试验共选取 3 只活性较好的蜜蜂, 每只蜜蜂做三组重复性刺激试验, 每组试验分别做两次左右不同的单项刺激, 两次实验间隔不得低于 30s。施加单侧刺激后, 蜜蜂带动飞控杆到达判断区域时, 分别以“L”“R”表示蜜蜂向左侧与右侧偏转。

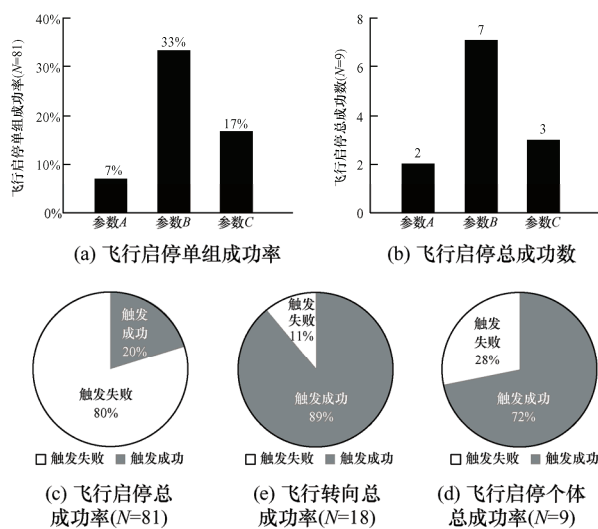


图 10 蜜蜂机器人飞行启停成功率

飞行转向试验结果如表 1 所示, 3 只蜜蜂均出现飞行转向行为, 其中第一只蜜蜂的刺激成功率为 100%, 其余两只均超过了 50%, 相较飞行启停试验更具有控制效率。由图 10e 可知转向试验的蜜蜂总诱导成功率为 72%, 远高于飞行启停时单组试验的成功率。此外刺激方向总是与蜜蜂转向方向呈现出相反趋势, 具有明显的规律性, 表现出驱离躲避单侧电脉冲行为, 可作为转向控制的有效方式。

表 1 蜜蜂机器人飞控转向统计表

编号	组别	刺激 1 组		刺激 2 组		刺激 3 组	
		刺激	左	右	左	右	左
Bee01		R	L	R	L	R	L
Bee02		R	L	R			
Bee03			L	R		R	L

半生物蜜蜂机器人飞行控制试验结果论证了昆虫结合方案设计的合理性, 以及通过单双侧刺激实现蜜蜂机器人轨迹控制的可行性, 对蜜蜂具有普遍控制效果。且控制背包背负轻便, 对蜜蜂活性及飞行影响较小, 为飞行试验带来了极大的便捷。

4 结论

(1) 针对半生物蜜蜂机器人而设计的微型控制背包, 采用红外通信传递遥控指令, 通过控制芯片提供频率、占空比、刺激时长等多种模式的刺激参数, 控制芯片输出电压决定于电源供电电压, 可实现双通道单向输出, 输出信号通过钨丝电极刺激蜜蜂双侧视叶, 依据刺激的参数及方向实现了蜜蜂的启停与转向控制。背包结构简单、使用灵巧、重量轻, 不仅适用于多种昆虫的行为控制试验, 同时还可基于不同昆虫的负载能力做功能及模块的拓展与丰富。

(2) 本文设计的半生物蜜蜂机器人控制背包可以完全满足基于电刺激调控的蜜蜂行为控制试验, 包括神经刺激调控、惩罚机制反馈、神经活动干扰等研究。在昆虫机器人的最终应用方面, 蜜蜂控制背包的设计兼顾了微型化与远程化特点, 为控制系统的进一步升级优化提供了理论依据和技术支持。

参 考 文 献

- [1] ANDO N, KANZAKI R. Insect-machine hybrid robot: Closing loops with mobile robots[J]. Current Opinion in Insect Science, 2020, 42: 61-69.
- [2] KUROTSUCHI K, TAI M, TAKAHASHI H. Vision-based autonomous micro-air-vehicle control for odor source localization[C]// Proceedings of 2016 23rd International Conference on Mechatronics and Machine Vision In Practice (M2VIP). Nanjing: IEEE, 2016: 89-94.
- [3] 宗光华, 贾明, 毕树生, 等. 扑翼式微型飞行器的升力测量与分析[J]. 机械工程学报, 2005, 41(8): 120-124. ZONG Guanghua, JIA Ming, BI Shusheng, et al. Measurement and analysis of lift of micro air robot with flapping wings[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2005, 41(8): 120-124.
- [4] BI S, CAI Y. Effect of spanwise flexibility on propulsion performance of a flapping hydrofoil at low Reynolds number[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2012, 25(1): 12-19.
- [5] XIN Z, FANG Y. Control system design for an unmanned

- helicopter to track a ground target[J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2011, 24(3): 420-427.
- [6] 郑能干, 陈卫东, 胡福良, 等. 昆虫机器混合系统研究进展[J]. *中国科学: 生命科学*, 2011, 41(4): 259-272. ZHENG Nenggan, CHEN Weidong, HU Fuliang, et al. Research progress and challenges on cyborg insect[J]. *SCIENTIA SINICA Vitae*, 2011, 41(4): 259-272.
- [7] 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.
- [8] BOZKURT A, LOBATON E, SICHITIU M, et al. Biobotic insect swarm based sensor networks for search and rescue[C]// *Proceedings of Signal Processing, Sensor/Information Fusion, and Target Recognition XXIII*. Baltimore, MA: SPIE, 2014, 9091: 90911L.
- [9] DODD A. The trouble with insect cyborgs[J]. *Society Animals*, 2014, 22(2): 153-173.
- [10] KUTSCH W, SCHWARZ G, FISCHER H, et al. Wireless transmission of muscle potentials during free flight of a locust[J]. *Journal of Experimental Biology*, 1993, 185(1): 367-373.
- [11] KUTSCH W, BERGER S, KAUTZ H. Turning manoeuvres in free-flying locusts: Two-channel radio telemetric transmission of muscle activity[J]. *Journal of Experimental Zoology*, 2003, 299A (2): 139-150.
- [12] HOLZER R, SHIMOYAMA I. Locomotion control of a bio-robotic system via electric stimulation[C]// *Proceedings of the 1997 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robot and Systems. Innovative Robotics for Real-World Applications. IROS '97*. Grenoble, France: IEEE, 1997: 1514-1519.
- [13] LATIF T, BOZKURT A. Line following terrestrial insect biobots[C]// *34th Annual International Conference of the IEEE Engineering-in-Medicine-and-Biology-Society (EMBS)*. San Diego, CA: IEEE, 2012: 972-975.
- [14] 尧俊瑜, 邬长杰. 脑机接口技术研究综述[J]. *现代计算机(专业版)*, 2017(27): 80-84. YAO Junyu, WU Changjie. Review of brain-computer interface technology research[J]. *Modern Computer*, 2017(27): 80-84.
- [15] LI G, ZHANG D. Brain-computer interface controlled cyborg: establishing a functional information transfer pathway from human brain to cockroach brain[J]. *Plos One*, 2016, 11(3): e0150667.
- [16] BOZKURT A, PAUL A, PULLA S, et al. Microprobe microsystem platform inserted during early metamorphosis to actuate insect flight muscle[C]// *2007 IEEE 20th International Conference on Micro Electro Mechanical Systems (MEMS)*. Hyogo, Japan: IEEE, 2007: 405-408.
- [17] BOZKURT A, GILMOUR R F, SINHA A, et al. Insect-machine interface based neurocybernetics[J]. *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, 2009, 56(6): 1727-1733.
- [18] TSANG W M, STONE A L, OTTEN D, et al. Insect-machine interface: A carbon nanotube-enhanced flexible neural probe[J]. *Journal of Neuroscience Methods*, 2012, 204(2): 355-365.
- [19] SATO H, BERRY C W, CASEY B E, et al. A cyborg beetle: Insect flight control through an implantable, tetherless microsystem[C]// *21st IEEE International Conference on Micro Electro Mechanical Systems (MEMS 2008)*. Tucson, AZ: IEEE, 2008: 164-167.
- [20] SATO H, BERRY C W, MAHARBIZ M M. Flight control of 10 gram insects by implanted neural stimulators[C]// *2008 Solid-State Sensors, Actuators, and Microsystems Workshop*. Hilton Head Island, South Carolina, 2008: 90-91.
- [21] SATO H, DOAN T T V, KOLEV S, et al. Deciphering the role of a coleopteran steering muscle via free flight stimulation[J]. *Current Biology*, 2015, 25(6): 798-803.
- [21] CAO F, ZHANG C, CHOO H Y, et al. Insect-computer hybrid legged robot with user-adjustable speed, step length and walking gait[J]. *Journal of The Royal Society Interface*, 2016, 13(116): 20160060.
- [23] ZHENG N, MA Q, JIN M, et al. Abdominal-waving control of tethered bumblebees based on sarsa with transformed reward[J]. *IEEE Transactions on Cybernetics*, 2019, 49(8): 3064 - 3073.
- [24] IBBOTSON M R, HUNG Y S, MEFFIN H, et al. Neural basis of forward flight control and landing in honeybees[J]. *Scientific Reports*, 2017, 7 (1): 14591.
- [25] HOWARD S R, AVARGUES-WEBER A, GARCIA J E, et al. Numerical ordering of zero in honey bees[J]. *Science*, 2018, 360 (6393): 1124-1126.
- [26] ZELLER M, HELD M, BENDER J, et al. Transmedulla neurons in the sky compass network of the honeybee

- (Apis mellifera) are a possible site of circadian input[J]. PLoS One, 2015, 10(12): e0143244.
- [27] BAO L, ZHENG N, ZHAO H, et al. Flight control of tethered honeybees using neural electrical stimulation[C]// 2011 5th International IEEE/EMBS Conference on Neural Engineering (NER). Cancun, MEXICO: IEEE, 2011: 558-561.
- [28] ZHAO H, ZHENG N, RIBI W A, et al. Neuromechanism study of insect-machine interface: Flight control by neural electrical stimulation[J]. Plos One, 2014, 9 (11): e113012.
- [29] 薛磊. 前视结节电刺激对熊蜂飞行控制的研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2015.
- XUE Lei. Flight behavior control of bumblebees by electrical stimulation on anterior optic tubercles[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2015.
- [30] ZHAO J, LI Z, ZHAO Z, et al. Electroantennogram reveals a strong correlation between the passion of honeybee and the properties of the volatile[J]. Brain and Behavior, 2020, 10(6): e01603.
-
- 作者简介: 赵杰亮(通信作者), 男, 1989 年出生, 博士, 副教授, 博士研究生导师。主要研究方向为机械设计理论及方法、动物行为学与仿生机械。
E-mail: jielzhao@bit.edu.cn
- 赵真, 男, 1992 年出生, 硕士研究生。主要研究方向为动物行为学与仿生机械。
E-mail: dodo550@qq.com
- 余丽, 女, 1996 年出生, 硕士研究生。主要研究方向为动物行为学与仿生机械。
E-mail: 13997850193@139.com
- 丁浩嘉, 女, 1997 年出生, 博士研究生。主要研究方向为动物行为学与仿生机械。
E-mail: avilette0729@outlook.com
- 杨运强, 男, 1965 年出生, 博士, 教授, 博士研究生导师。主要研究方向为机电一体化技术、智能机械、测试技术与仪器。
E-mail: meyyq@cugb.edu.cn
- 阎绍泽, 男, 1964 年出生, 博士, 教授, 博士研究生导师。主要研究方向为机械系统动力学、航天动力学与可靠性、智能结构设计与昆虫仿生。
E-mail: yansz@tsinghua.edu.cn