

基于高仿生形态布局的仿鸽扑翼飞行机器人系统设计

王久斌^{1,2,3} 贺威^{1,2,3} 孟亭亭^{1,2,3} 邹尧^{1,2,3} 付强^{1,2,3}

摘要 针对现有扑翼飞行机器人存在的飞行形态与实际鸟类相差较大,以及翅膀、尾翼布局和俯仰、转向控制方式仿生度较低的问题,提出一种形态布局与鸽子相仿的扑翼飞行机器人系统设计及实现方案.通过设计弧面-折翼-后掠翅膀、仿鸟扇形尾翼以及尾翼挨近翅膀后缘布置的布局方式,使扑翼机器人飞行形态更加接近真实鸟类,提高扑翼机器人的形态仿生度.在此基础上,设计结合下扑角调控无需尾翼大角度上翘的俯仰控制方式,以及不依赖于尾翼的翅膀收缩转向控制方式,在提高仿生度的同时保证飞行控制的有效性.在具体设计过程中,首先参考鸽子翅膀型式选择不同类型翅膀并进行风洞测试,确定出下扑角变化时仍能保持较优升推力性能的翅膀设计方案;其次,对各种尾翼型式进行分析和比较,结合鸽子尾翼特点进行仿鸽尾翼及俯仰、转向控制机构设计,并通过风洞测试验证;最后,设计飞控系统并装配整机,进行外场飞行测试,验证仿鸽扑翼飞行机器人平台的稳定性和可控性.

关键词 高仿生形态布局, 仿鸽扑翼飞行机器人, 折翼翅膀, 扇形尾翼, 风洞实验, 俯仰控制, 转向控制

引用格式 王久斌, 贺威, 孟亭亭, 邹尧, 付强. 基于高仿生形态布局的仿鸽扑翼飞行机器人系统设计. 自动化学报, 2024, 50(2): 308-319

DOI 10.16383/j.aas.c220836

System Design of Dove-like Flapping-wing Flying Robot Based on Highly Bionic Morphological Layout

WANG Jiu-Bin^{1,2,3} HE Wei^{1,2,3} MENG Ting-Ting^{1,2,3} ZOU Yao^{1,2,3} FU Qiang^{1,2,3}

Abstract Some existing flapping-wing flying robots show significantly different flight forms compared with actual birds, and exhibit less bionic features of their wing and tail layout and their control ways of pitching and steering. In this paper, we propose a system design and implementation scheme for a flapping-wing flying robot with a morphological layout similar to that of a pigeon. By designing curved-folded-swept wings and a bird-like fan-shaped tail near the trailing edge of the wings, the flight form of the flapping-wing robot is closer to that of a bird, which improves the bionic performance of the flying robot morphologically. Upon this basis, we propose a pitching control method via regulating the downstroke angle without need of a large upper declination angle of the tail. We also propose a wing retraction control method that is independent of the tail, ensuring the effectiveness of flight control while emphasising more bionic features. In the specific design process, different types of wings according to those of pigeons are selected firstly, and wind tunnel tests are then performed to determine the design scheme that can maintain better lift-thrust performance when the downstroke angle changes. Next, by analyzing and comparing various types of tails, we make a tail for the robot with reference to the characteristics of the pigeon. Besides, we design pitching and steering control mechanisms and verify their effectiveness via wind tunnel tests. Finally, we develop a flight control system and integrate it on the robot. The stability and controllability of the designed dove-like flapping-wing flying robot is confirmed by flight tests.

Key words Highly bionic morphological layout, dove-like flapping-wing flying robot, folded wings, fan-shaped tail, wind tunnel tests, pitching control, steering control

Citation Wang Jiu-Bin, He Wei, Meng Ting-Ting, Zou Yao, Fu Qiang. System design of dove-like flapping-wing flying robot based on highly bionic morphological layout. *Acta Automatica Sinica*, 2024, 50(2): 308-319

收稿日期 2022-10-26 录用日期 2023-03-21
Manuscript received October 26, 2022; accepted March 21, 2023

国家自然科学基金(62225304, 61933001, 62173031), 北京高校高精尖学科“北京科技大学-人工智能科学与工程”资助

Supported by National Natural Science Foundation of China (62225304, 61933001, 62173031) and Beijing Top Discipline for Artificial Intelligent Science and Engineering, University of Science and Technology Beijing

本文责任编辑 黄攀峰

Recommended by Associate Editor HUANG Pan-Feng

1. 北京科技大学智能科学与技术学院 北京 100083 2. 北京科

得益于独特的身体构造,自然界中的鸟类和昆虫等飞行生物具备高超的飞行本领.相比固定翼和

技术大学人工智能研究院 北京 100083 3. 北京科技大学智能仿生无人系统教育部重点实验室 北京 100083

1. School of Intelligence Science and Technology, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083 2. Institute of Artificial Intelligence, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083 3. Key Laboratory of Intelligent Bionic Unmanned Systems, Ministry of Education, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083

旋翼飞行器, 鸟类的扑翼飞行方式更加高效和灵活. 模仿飞行生物的飞行方式研制的扑翼飞行机器人成为了机器人和无人机 (Unmanned aerial vehicle, UAV) 领域的一大热点^[1-2]. 探究和利用鸟类的飞行机制能够提高仿鸟飞行平台的性能, 使其充分发挥扑翼飞行的高效性、灵活性和隐蔽性, 具有广泛的理论研究和工程应用价值^[3-4].

目前, 世界上有多家科研机构进行着扑翼飞行的相关研究, 并研发出了一些成熟的仿生扑翼飞行平台, 这些平台大小型式各异, 气动布局与飞行控制方式也各不相同^[5-7]. 美国 AeroVironment 飞行器制造公司设计了 NanoHummingBird^[8-9] 仿蜂鸟扑翼飞行平台, 翼展 17 cm, 扑频高达 30 Hz, 采用无尾控制方法, 通过偏转扭动翅膀来实现飞行控制. 与之类似的有韩国建国大学 Phan 等^[10-11] 模仿甲虫设计的小型无尾仿昆虫飞行机器人, 翼展 12 cm, 通过控制翅膀偏转可以实现灵活稳定的飞行控制. 尺寸稍大的还有荷兰 Delft 理工大学研制的无尾昆虫机器人 DelFlyNimble^[12], 其采用两对独立控制的翅膀来实现飞行控制, 翼展 33 cm, 可以模仿果蝇的快速逃跑动作. 与之相似的有新加坡南洋理工大学研制的 X 翼扑翼飞行平台, 翼展约 30 cm, 带有十字型式的垂尾, 通过尾翼的控制可以实现特技飞行, 具备超强的机动性^[13]. 此外, 大型的扑翼飞行机器人平台还有德国 Festo 公司模仿海鸥研制的 Smart-Bird^[14], 翼展 2 m, 翅膀采用折翼设计, 可以同时扑动和扭转, 机身和尾翼也可以通过扭动来控制飞行的方向, 尾翼为扇形倒 V 型并带有小垂尾, 飞行及控制方式与真实鸟类很接近. 还有 Zufferey 等^[15] 以鹰为仿生对象设计的大载荷扑翼飞行机器人 E-flap, 翼展 1.5 m, 具有单翼弧面翅膀与三角形垂尾. 在国内, 小型的扑翼飞行平台有西北工业大学研制的仿信鸽扑翼机 Dove^[16-17], 翼展 60 cm, 采用单翼弧面翅膀设计, 配置垂尾实现飞行控制, 具有良好的飞行稳定性. 西北工业大学还模仿猎隼研制了扑翼飞行器 RoboFalcon^[18], 翼展 1.2 m, 用可以耦合变形拍打及展向折叠的翅膀控制飞行, 具有很高的滚转敏捷性. 大型的仿鸟扑翼飞行平台有哈尔滨工业大学研制的翼展超过 2 m 的 HIT-Hawk 与 HIT-Phoenix^[19], 具备单翼弧面翅膀和平面扇形尾翼, 通过尾翼整体偏转来实现飞行控制. 北京科技大学研制了仿鹰扑翼机 USTB-Hawk^[20], 翼展 1.78 m, 配置单翼弧面翅膀和带垂尾的倒 V 型尾翼, 通过质量分配研究实现了带载长续航飞行.

上述可见, 扑翼飞行机器人平台研制目前已经取得了丰富的成果, 但是为了提高平台的负载、续航和机动性等飞行性能指标, 某些设计中平台的形

态布局与飞行控制方式相比真实鸟类存在较大差距. 一些翼展较大的飞行平台在这方面做得较好, 而中小型的飞行平台这一缺陷较为明显. 翼展在 1 ~ 2 m 左右的大型扑翼飞行平台中尾翼布局和控制方式与鸟类相近的有 SmartBird、HIT-Phoenix 和 RoboFalcon 等. SmartBird 具有多自由度的折翼弧面翅膀, 扇形尾翼和头部、机身联合动作控制飞行, 仿生度较高; HIT-Phoenix 采用简洁的单翼弧面翅膀设计, 仿鸟平面扇形尾翼在飞行过程中调节俯仰力矩并控制方向, 整体设计和飞行形态与鸟类相近; RoboFalcon 具有可以扭转并展向折叠的翅膀, 飞行控制方式与鸟类相近. 而采用垂尾设计的 E-flap 实现了大载荷飞行, 采用相似布局方式的 USTB-Hawk 实现了良好的带载续航能力, 这两款平台尾翼距离翅膀较远, 有利于提高其负载和续航能力, 但是这样的布局与真实鸟类相去甚远.

在实现飞行稳定性和姿态控制方面, 仿鸟扑翼机器人多采用尾翼远离翅膀布局的方式, 这一点在翼展 1 m 以下的中小型扑翼飞行机器人中表现明显. 翼展在 10 cm 左右的 NanoHummingBird 扑翼机器人采用控制翅膀整体偏转的方式控制飞行, 没有利用尾翼进行飞行控制. 荷兰 Delft 理工大学的仿果蝇飞行机器人虽然实现了灵活的飞行, 可以独立控制的两对翅膀动力源为其灵活的飞行控制提供了很大便利, 但是这样的飞行控制方式与鸟类截然不同. 新加坡南洋理工大学研制的 X 翼型扑翼飞行平台配备了十字型式的垂尾, 其安装位置离翅膀较远, 起到了稳定飞行的作用, 同时产生充足的力矩便于控制扑翼机器人飞行, 虽然平台实现了敏捷机动的飞行动作, 但这很大程度上得益于远离翅膀布置的固定翼型式的垂尾, 尾翼位置和型式的仿生度低. 与之类似的有西北工业大学的仿鸽扑翼飞行平台 Dove, 单翼弧面翅膀和固定翼垂尾设计使其可以稳定飞行, 但是整体布局与固定翼飞行器接近, 与真实鸟类的形态布局及飞行控制方式也有较大差距.

综上, 现有的一些仿鸟扑翼飞行机器人采用了尾翼远离翅膀的布局方式或者多个翅膀的设计来实现飞行平台负载、续航、稳定性或者机动性的提升, 这使得扑翼平台由于缺失尾翼挨近翅膀后缘布置这一主要生物特征而降低了仿生度. 这样的设计虽然有利于提高其完成飞行任务的能力, 却使扑翼机器人的仿生优势下降, 使其在对肉眼可见的直观形象要求较高的场合出现外形和飞行形态达不到期望要求的情况, 如在进行低空隐蔽飞行或者观赏性的飞行任务时会丧失扑翼机器人独特的仿生优势.

真实的飞行生物仍然是我们借鉴学习的对象,

以中小型鸟类中的鸽子为例进行分析. 和大多数鸟类一样, 在形态布局上, 鸽子尾巴根部靠近翅膀后缘, 翅膀和尾翼之间并没有大的间隔. 此外, 早期相关研究表明鸽子起飞时翅膀扑动幅度可以达到约 150° , 正常平飞时约为 90° , 而尾翼除了在起飞、降落、急速转弯等过程中有较大动作外, 在平稳飞行过程中相对背部基本没有上翘角度. 研究人员通过对鸽子肌肉和拍翅的细致观察和研究得出结论, 可扭转变形的折翼翅膀及可开裂羽毛使翅膀上抬时受到的阻力约降低为下扑时受力的 $1/6$, 负升力很小, 因此鸽子飞行的动力主要是翅膀下扑产生的, 而不同飞行阶段扑动幅度的调整起到了对俯仰力矩的主要调节作用^[21-23]. 这也可以解释平稳飞行过程中鸽子尾巴基本没有上翘角度的现象. 这样的布局方式也使鸽子飞行时较好地保持了整体流线型的外形, 有利于减小空气阻力, 值得我们研究借鉴.

本文参考真实鸟类特征结合风洞测试进行改进设计. 具体而言, 本文摒弃了通过使尾翼远离翅膀或者大角度上翘来增强飞行所需控制力矩的办法, 使尾翼挨近翅膀布置, 并且尽可能减小尾翼与机身的安装角度以减小飞行阻力. 同时通过配置翅膀的下扑角度来平衡俯仰力矩, 使尾翼可通过微调上下翘角度配合翅膀下扑角来实现对整机俯仰角的调节. 对于方向控制, 则交由翅膀来实现. 通过调整作为扑翼飞行动力来源的翅膀的柔性与面积, 使左右翅膀产生升力差和推力差, 以此实现对于飞行方向的灵活控制. 本文最终设计了一款具备弧面-折翼-后掠翅膀和仿鸟扇形尾翼的仿鸽扑翼飞行器平台 USTB-Dove, 其下扑角和尾翼可以共同调节俯仰平衡, 外段翅膀收缩可控制转向, 气动布局和飞行控制方式与真实鸟类相近. 本文的主要贡献如下.

1) 模仿鸽子形态特征设计了弧面-折翼-后掠翅膀和平面扇形尾翼以及尾翼挨近翅膀后缘布置的布局方式, 提高了飞行平台形态布局的仿生度;

2) 参考鸽子飞行中翅膀和尾翼动作角度的特征, 提出了下扑角配合尾翼控制俯仰, 外段翅膀收缩控制转向的飞行控制方式, 翅膀下扑角可调且外段翅膀可收缩, 使飞行平台具备仿生布局的同时保证了有效的飞行控制;

3) 成功研发了一款翅膀尾翼形态、布局与真实鸽子接近的飞行平台, 翼展 60 cm, 最大起飞重量 245 g, 飞行平稳, 转向灵活, 为小翼展仿鸟扑翼飞行平台研制提供了实例参考.

本文结构如下: 在第 1 节中对飞行机器人 USTB-Dove 进行了整体介绍; 在第 2 节中参考信鸽翅膀结合风洞实验确定了较优的折翼弧面翅膀设计方案; 在第 3 节中分析设计了仿鸟型式的尾翼及整机俯仰、

转向控制方式; 在第 4 节中介绍了 USTB-Dove 的飞行控制系统; 在第 5 节中进行了整机飞行测试, 验证了飞行平台的稳定性及控制方式的可行性; 最后在第 6 节中做出了总结.

1 平台设计

USTB-Dove 仿鸽扑翼飞行器参照一般信鸽的形态参数设计, 包括样机平台与飞控系统两大部分. 如图 1 所示, 样机平台包括翅膀、尾翼、机体三部分. 翅膀由 3D 打印件、碳纤维杆和翼膜构成, 翅膀边缘设计了铁环和绳索来调整翅膀状态; 尾翼采用仿鸟扇形尾翼设计, 由碳纤维杆、塑料插接件和塑料薄膜构成; 机身用碳纤维板零件组成三维拼图结构, 用来安装翅膀和尾翼. 机体尾部安装了一枚舵机调整尾翼与机身在水平方向的夹角, 以控制飞行中的俯仰角; 另一枚舵机安装拉线控制机构, 通过连接至翅膀边缘的拉索来改变翅膀状态, 达到转向控制的目的; 驱动机构采用空间曲柄摇杆机构设计, 与机身装配在一起, 通过一个无刷直流电机驱动, 驱动机构连接至翅膀摆臂的球头拉杆配备了微型步进电机, 可以电动控制伸缩, 实现拉杆整体长度的调节, 从而方便地调节翅膀下扑的角度.

安装在机体中的控制器是集成气压计和 IMU (Inertial measurement unit) 的微型主控板, 其他外设包括电源模块、精密陀螺仪、遥控接收机、获取位置坐标的 GPS (Global positioning system) 模块以及可以传输飞行数据到电脑的 Xbee 无线数传模块. 利用这套控制系统, USTB-Dove 可以实时监测和记录飞行轨迹、飞行姿态等飞行状态数据.

USTB-Dove 翅膀、尾翼及外壳形状参照真实信鸽进行设计, 折翼翅膀扑动方式及尾翼动作方式也与信鸽相近, 整体具有仿生度高, 体型小, 飞行灵活等特点. 图 2 是 USTB-Dove 实物平台与真实信鸽的对比图. 由于飞行平台翼展较小, 负载能力有限, 我们对平台系统各个组成部分进行了轻量化设计, 最后将整机重量控制在 245 g, 表 1 给出了样机各个组成部分的质量参数.

2 翅膀设计

USTB-Dove 模仿真实鸟类采用折翼翅膀设计. 鸟类的翅膀扑动可以高效地产生升力和推力, 在下扑行程中翅膀羽毛闭合, 外段翅膀大角度地下折充分地空气做功, 上抬时翅膀扭转变形减小迎风面积, 同时羽毛开缝, 极大地减小了负升力^[21]. 充分模仿鸟类翅膀的弯折和扭转方式可以极大地提高扑翼效率^[24-26], 但是考虑到小翼展扑翼机负载能力有限,

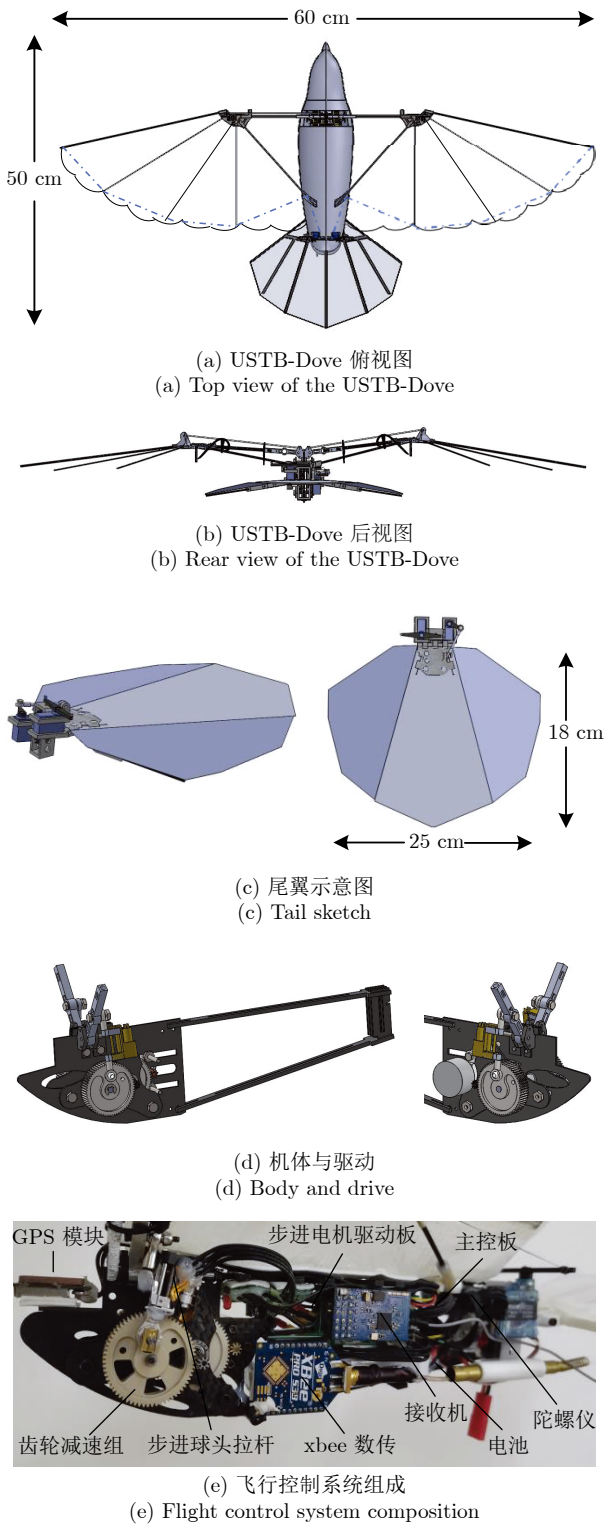


图 1 USTB-Dove 平台设计与系统组成
Fig.1 USTB-Dove platform design and system configuration

同时高频扑动的翅膀限制了机械复杂度。因此, 本文的折翼翅膀在设计中利用简单的拉杆机构来实现外段翼周期性的弯折, 这种方式对扑翼效率的提

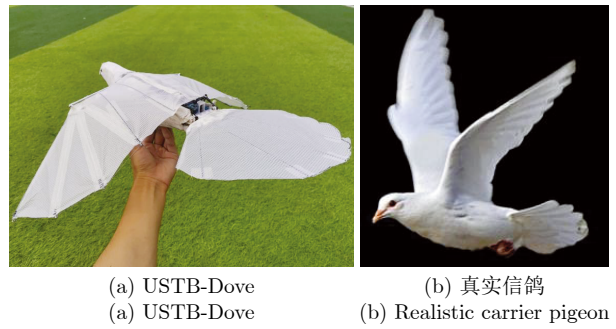


图 2 USTB-Dove 与真实信鸽
Fig.2 The USTB-Dove and the realistic carrier pigeon

表 1 USTB-Dove 质量分解
Table 1 Weight decomposition of USTB-Dove

组件	质量 (g)	比重 (%)
一对翅膀	32	13.1
驱动机构 (含电机)	65	26.5
尾翼 (含舵机)	35	14.3
机架	5	2.0
飞控系统	50	20.0
电池 (1 000 mah 2 s)	48	19.6
外壳	10	4.1
总计	245	100.0

升有限, 但是却可以使翅膀扑动形态更加接近真实鸟类。

为了在实现翅膀扑动形态的同时保证翅膀的升推力性能, 首先参考鸽子翅膀尺寸和相关设计方法^[27]制定了不同类型的翅膀方案, 并进行了风洞测试和评估。实验用的翅膀有 4 种类型, 分别为单翼平面、单翼弧面、斜折翼弧面、直折翼弧面。如图 3 所示, 4 种翅膀平展时形状、尺寸均一致。其中单翼弧面与单翼平面翅膀区别在于增加了弧面翼型特征。两种折翼翅膀均增加了弧面翼型特征, 区别在于内段翼和外段翼翅膀弯折轴线的方向。直折翼翅膀弯折轴线与机体中轴线平行, 斜折翼翅膀弯折轴线相对机体中轴线斜向外侧。

如图 4 所示, 翅膀的弯折由拉杆实现。细钢丝制成的拉杆一端连接到机身上翅膀连接件的机体勾连孔内, 另一端连接到外段翼翅膀 3D 打印件的勾连孔内。当翅膀在驱动机构带动下上下往复扑动时, 翅膀弯折轴心到机体勾连孔的距离发生变化, 而两个勾连孔的距离不变, 从而使得内外段翼翅膀弯折角度发生周期性变化, 达到使翅膀弯折的效果。

在对不同类型翅膀测试的过程中, 实验调节变量除了基本的攻角、风速、扑翼频率外, 还有翅膀相对水平位置下扑角的大小, 以及折翼翅膀的弯折模

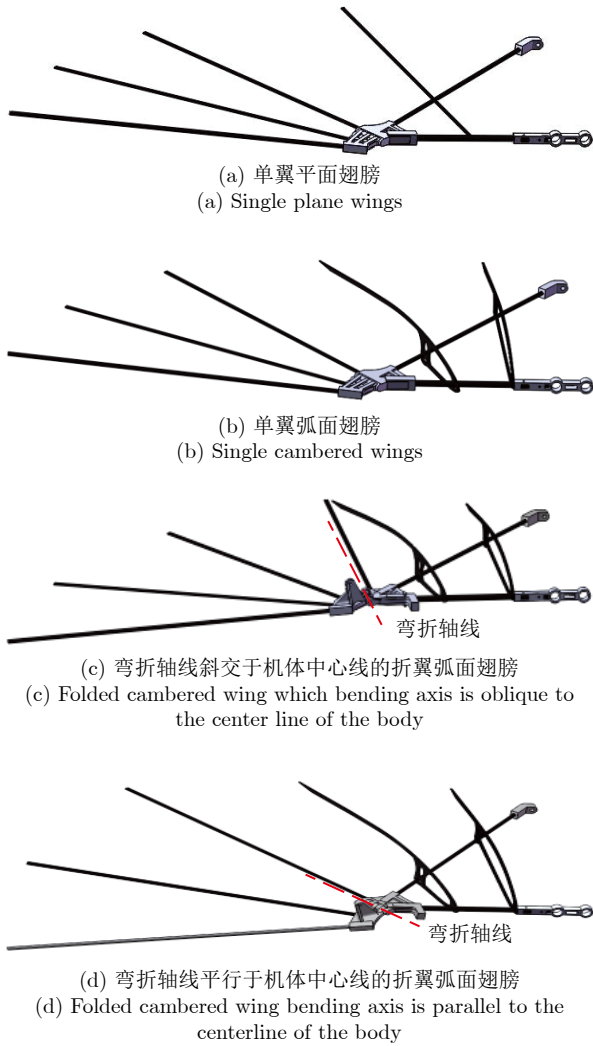


图 3 翅膀设计方案

Fig.3 Programs of wings' design

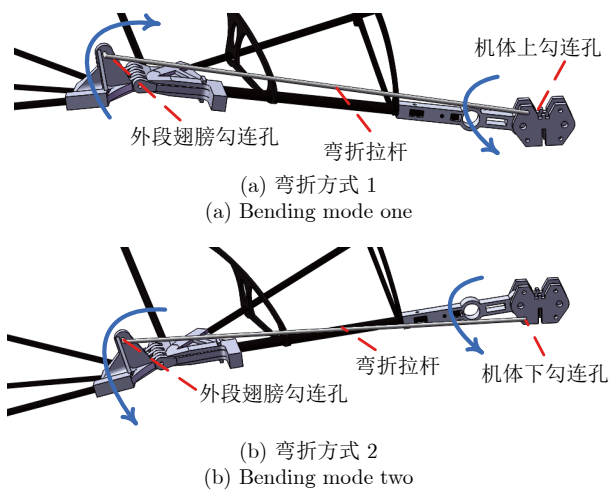


图 4 折翼翅膀的两种弯折方式

Fig.4 Two bending modes of folded wings

式. 其中翅膀下扑角通过调节驱动部分球头拉杆的长度来实现; 折翼翅膀弯折模式通过改变外段翼拉杆连接至机体的位置来实现. 如图 4 所示, 当拉杆勾连至上固定孔时, 在下扑过程中外段翼翅膀相对内段翅膀向上弯折, 当勾连至下固定孔时, 在下扑过程中外段翼翅膀会相对内段翅膀向下弯折. 图 5 所示为某次机构仿真调试过程中记录的翅膀扑动及弯折角度变化曲线. 第 1 段翅膀扑动幅度为 70° , 第 2 段翅膀与第 1 段翅膀的夹角变化幅度为 20° .

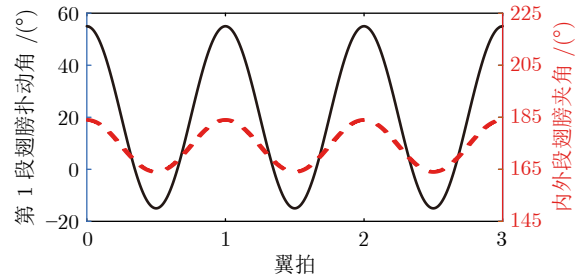


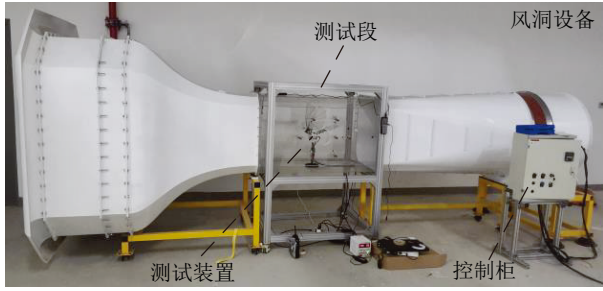
图 5 翅膀扑动及弯折角度

Fig.5 Flapping and bending angles of the wings

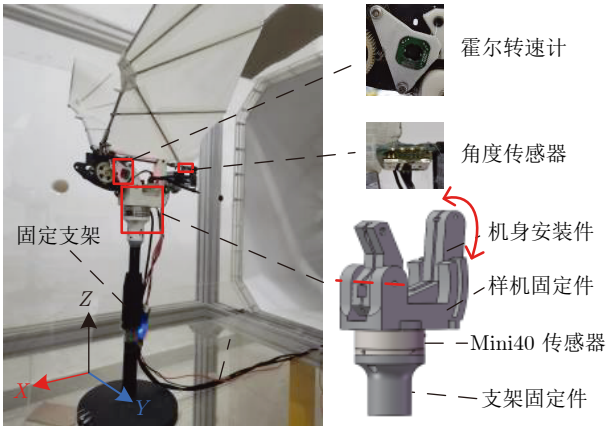
翅膀的升推力特性对比通过风洞测试来进行^[28-29]. 图 6 所示为本次使用的风洞设备及测试装置. 风洞设备为南京比贝公司的 CT-ND7070 直流风洞, 实验段尺寸为 $1.2\text{ m} \times 0.7\text{ m} \times 0.7\text{ m}$ (长 \times 宽 \times 高), 风速范围为 $0 \sim 15\text{ m/s}$, 风速控制精度为 0.1 m/s , 满足实验测试需求. 测试装置是利用美国 ATI 工业自动化公司生产的 Mini40 力/力矩传感器进行搭建的. Mini40 传感器是一种六轴力/力矩传感器, X, Y 轴测力量程为 $\pm 40\text{ N}$, 分辨率为 0.01 N , Z 轴测力量程为 $\pm 120\text{ N}$, 分辨率为 0.02 N ; X, Y, Z 轴扭矩量程为 $\pm 2\text{ N}\cdot\text{m}$, 分辨率均为 $0.00025\text{ N}\cdot\text{m}$, 满足对样机进行升推力和三轴力矩测试的需求.

为了尽可能减小翅膀扑动时机身抖动带来的测试误差, 本文设计了专用的 3D 打印件, 将机体与传感器固联在一起, 机身固定件与样机固定件之间的角度可调从而使得机身攻角方便调节. 此外, 在机体安装姿态传感器和霍尔转速计, 用于获得机身的攻角及翅膀扑动的频率. 实验时 Mini40 将测得的力/力矩转化为电信号通过线缆传输至数据采集板卡, 最终测试结果在电脑应用端显示和记录.

图 7 所示为单翼平面和单翼弧面翅膀的升推力测试结果. 当攻角、风速和下扑角一致时, 单翼弧面翅膀产生的升力要远大于平面翅膀, 而二者产生的推力相差不大. 图 8 所示为改变下扑角时, 两种单翼翅膀升推力及俯仰力矩的变化情况. 同样的攻角、风速和扑频, 平面翅膀的升力随着下扑角增大先增大后减小, 推力先减小后增大, 当下扑角约为整个



(a) 风洞设备
(a) The wind tunnel



(b) 测试装置
(b) The test equipment

图 6 风洞设备与测试装置

Fig.6 Wind tunnel and test equipment

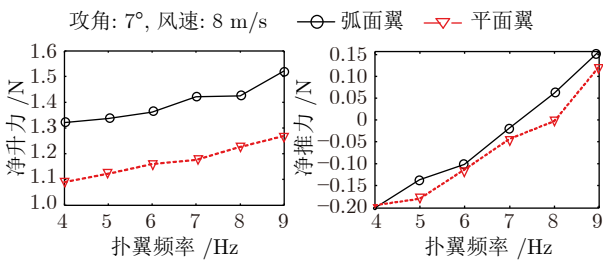


图 7 单翼平面翅膀与单翼弧面翅膀升推力性能比较
Fig.7 Lift and thrust of the single plane wings and cambered wings

扑动幅度的一半时, 升力达到最大; 弧面翅膀随着下扑角的增大升力会增大, 而推力变化不大; 而两种翅膀的低头力矩均随着下扑角的增大一致减小。

通过对两种单翼翅膀的测试可以发现, 弧面翅膀相比平面翅膀在产生升力上更有优势, 而恰当地增大下扑角可以增大扑翼产生的升力, 同时我们也可以选择增大下扑角来增大抬头力矩, 这有助于调整整机的俯仰平衡. 在此基础上, 进一步对图 3 中带弧面翼型的斜折翼和直折翼两种翅膀进行测试, 测试中同样对风速、频率、下扑角度进行了调节, 并

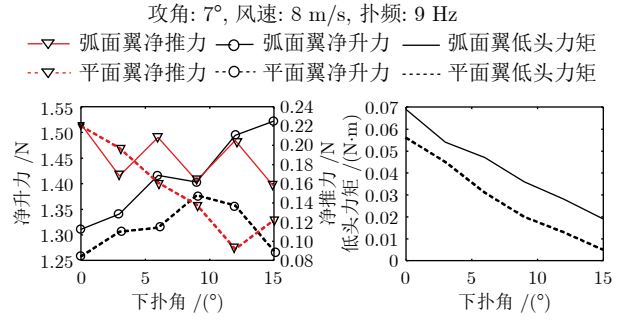


图 8 不同下扑角时单翼翅膀的升推力和俯仰力矩

Fig.8 The lift, thrust and pitch moment with different downstroke angles

对图 4 中两种弯折方式分别进行了测试。

图 9 所示为 7° 攻角、8 m/s 风速, 9 Hz 扑频下, 改变相对水平位置的下扑角大小时测得的两种翅膀在不同弯折方式下的升推力特性曲线. 由曲线可以看出, 两种折翼翅膀在上勾连模式下扑动时产生的阻力较大, 净推力较小, 而下勾连的折翼型式更有利于产生升力和推力. 同时, 相比斜折翼翅膀, 直折翼翅膀在下扑角变动时产生的升推力更加稳定, 这有利于通过调整下扑角来调节整机力矩平衡. 通过一系列风洞测试实验, 本文最终选定图 4(b) 中直折翼弧面翅膀及下勾连弯折方式作为 USTB-Dove 的翅膀设计方案。

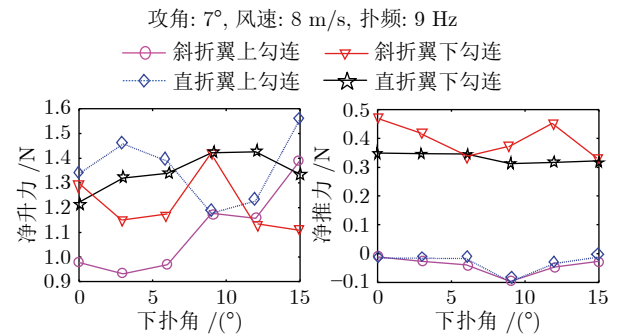


图 9 不同下扑角时折翼翅膀的升推力对比

Fig.9 The lift and thrust of folded cambered wings with different downstroke angles

3 尾翼与俯仰、转向控制设计

真实的鸟类在飞行过程中可以灵活地调节翅膀、尾翼及躯体来调节飞行姿态, 相关研究表明尾翼在鸟类飞行的机动性、稳定性、产生升力、减小阻力方面都有潜在气动作用^[30-31]. 而对于人造飞行器, 由于机构自由度减少, 需要特定的设计来实现对飞行器的飞行控制. 常规布局的固定翼飞行器通常依靠经典的副翼和垂尾来实现飞行控制. 垂尾远离机翼布

置,水平布置的升降舵主要实现俯仰控制,垂直布置的方向舵辅助调节航向.而位于翅膀的副翼主要通过改变翼型使左右翅膀产生升力差,从而实现滚转和方向控制.远离翅膀的尾翼为整机提供了足够的稳定和控制力矩,加在产生升力的翅膀上的副翼则直接有效地控制了飞行方向^[32].

现有的扑翼飞行机器人主要通过翅膀或尾翼增加控制来实现对飞行方向的控制.由于翅膀需要不断扑动来产生升力和推力,所以在翅膀上增加可变量变得困难,这通常意味着翅膀更复杂的结构和更大的重量.尽管如此,对于一些翼展 1 m 以上的较大的扑翼平台来说这种方案仍有一定的可行性,如 Festo 公司的 SmartBird^[14] 和西北工业大学的 RoboFalcon^[18] 通过对翅膀施加扭转、变形和收合等控制实现了更灵活的飞行控制和更仿生的飞行.此外,大多扑翼飞行平台通过不同型式的尾翼实现飞行控制,如哈尔滨工业大学 HIT-Phoenix^[19] 采用的扇形尾翼,西班牙塞维利亚大学 E-Flap^[15] 采用的倒 V 型尾翼差动尾翼,以及西北工业大学翼展更小的仿鸽扑翼机 Dove^[17] 采用的固定翼型式的垂尾.

图 10 所示为 USTB-Dove 设计过程中参考以往设计案例和相关研究^[33-35] 尝试过的 4 种尾翼方案.方案 1 (图 10(a)) 采用平面扇形设计,两枚舵机分别控制舵面上上和左右偏转,从而控制俯仰和方向.此种尾翼在方向控制上存在控制力矩不足的问题,只有当尾翼上翘角度较大时进行左右偏转才可以产生较大的转向控制力矩,但这时也会增大飞行阻力.方案 2 (图 10(b)) 采用倒 V 型尾翼设计,有利于增强航向稳定性,差动控制的迎风舵面也提供

了充足的转向力矩.但是此种尾翼靠两侧舵面的风阻进行转向,阻力较大,且分离开叉的舵面与真实鸟类尾翼形状相差较大,仿生性较差.方案 3 (图 10(c)) 将平面扇形尾翼分为两侧差动舵面和中部安定面,当两侧舵面朝同一侧偏转时可以控制转向,向相反方向偏转时可以控制俯仰.此种尾翼相比方案 2 较好地保持了完整的扇形外形,但是存在类似方案 1 中的转向控制不足的问题,同时俯仰力矩的调节作用减弱.方案 4 (图 10(d)) 在方案 3 的基础上将俯仰和转向用两枚舵机独立控制,增强了俯仰调节作用,安定面的存在使其在转向控制上相比方案 1 更平稳,但尾翼上翘角度较小时仍然存在转向力矩不足的问题.

综合现有扑翼平台的尾翼设计方案及 USTB-Dove 尝试过的尾翼型式,结合其对于飞行控制的需求,有必要进一步对尾翼型式进行改进设计.扑翼飞行机器人尾翼设计需要增强平台的航向稳定性,且对俯仰力矩有一定的调节作用,最重要的要产生足够的转向力矩.通过对各种型式尾翼的分析我们发现尾翼舵面需要较大迎风面积和角度才可以产生足够的转向力矩,但这对于仿生性较高的扇形尾翼来说比较困难,且会产生较大阻力,而差动控制的倒 V 型尾翼又降低了仿生性.因此,本文放弃用尾翼来控制转向,仅通过尾翼实现航向稳定和俯仰调节,而将转向控制设计在直接产生动力的翅膀上.

如图 11 所示为鸽子平稳飞行时的形态,尾翼广泛展开为宽大的扇形平面,且相对躯体基本没有上翘角度,同时翅膀大角度地下扑提供升力和推力.由于翅膀下扑角较大,且上抬阻力很小,平稳飞行中鸽子的尾翼基本不需要通过上翘来维持俯仰力矩平衡.此外,从侧面来看,飞行中的鸽子躯体、翅膀和尾翼成为一体呈流线型,这极大减小了飞行中遇到的空气阻力,相关研究认为鸟类的尾翼甚至起到了类似固定翼飞机襟翼的作用,提高了整体升力^[36].

鉴于鸟类尾翼布局的优势,我们参考鸽子真实

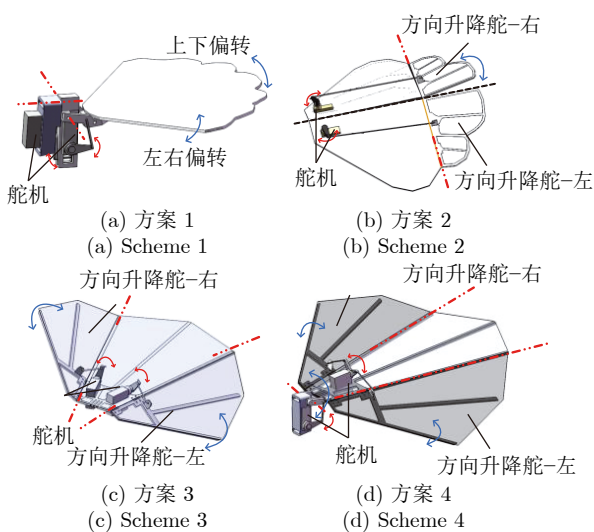


图 10 USTB-Dove 不同的尾翼设计方案

Fig. 10 Tail's different designs of the USTB-Dove

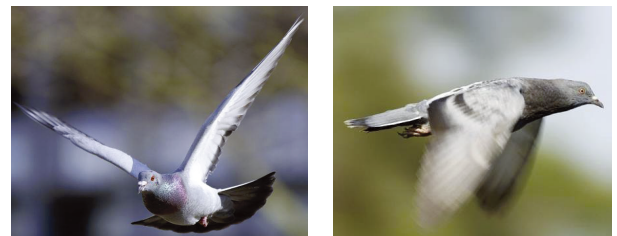


图 11 鸽子平稳飞行时的翅膀和尾翼形态

Fig. 11 The form of a pigeon's wing and tail in smooth flight

的飞行状态, 将 USTB-Dove 尾翼贴近翅膀后缘布局, 设计为扇形, 并且采用下凹设计使其偏航稳定性相比平面扇形尾翼有所增强. 为了减小空气阻力, 将尾翼与机体轴线平行布置, 减小飞行过程中的迎风面, 由于尾翼上翘角度较小, 且要保持整机的俯仰稳定, 参考翅膀风洞测试数据, 配置翅膀初始上下扑动角度使不安装尾翼扑动时整机纵向俯仰力矩处于平衡状态附近. 在此基础上, 利用微型步进电机使带动翅膀扑动的球头拉杆实现可控电动伸缩, 从而实现对上下扑动角度和俯仰力矩的可控调节, 使 USTB-Dove 可以通过调节上下扑动角度与尾翼小角度翘动配合来调整整机的俯仰力矩^[37].

图 12 所示为 USTB-Dove 最终的尾翼设计, 通过一枚俯仰舵机控制尾翼上下翘动, 另一枚方向舵机通过舵机臂两端的系绳牵引左右翅膀杆件实现转向控制.

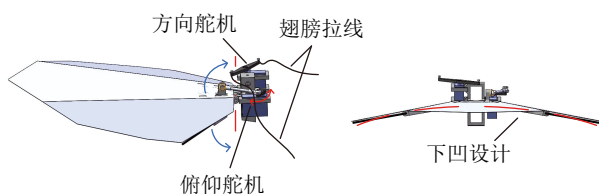


图 12 USTB-Dove 尾翼设计

Fig. 12 Tail's design of the USTB-Dove

图 13 所示为 USTB-Dove 上下扑角电动调节机构, 通过微型步进电机滑动端和固定端焊接金属球头来实现. 步进电机行程为 5 mm, 球头拉杆总长度变化范围为 34.5 ~ 39.5 mm, 翅膀下扑角调节范围 (相对水平位置) 为 $-6^{\circ} \sim 13^{\circ}$, 由此产生的俯仰力矩调节量约为 0.05 N·m.

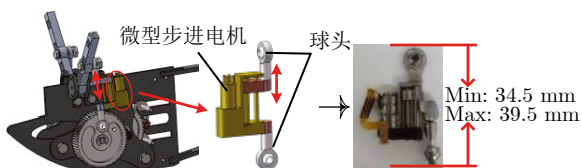


图 13 下扑角电动调节机构

Fig. 13 Electric adjustment mechanism of the downstroke angle

图 14 所示为 USTB-Dove 翅膀部位的转向控制机构. 考虑到飞行平台翼展较小负载有限, 且翅膀需要不断扑动提供飞行的动力, 所以采用简单轻质的拉线机构设计. 从尾部方向舵机臂牵引出来的细绳依次穿过固定在外段翅膀碳杆边缘的圆环连接至前缘碳杆一端, 舵机臂转动时牵引细绳拉动边缘碳杆向后弯曲, 使对应一侧的外段翅膀收缩. 图 15(a) 所示为处于正常状态的右翅, 图 15(b) 所示为舵机

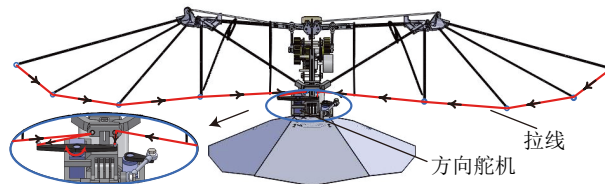


图 14 USTB-Dove 转向机构

Fig. 14 Steering mechanism of the USTB-Dove

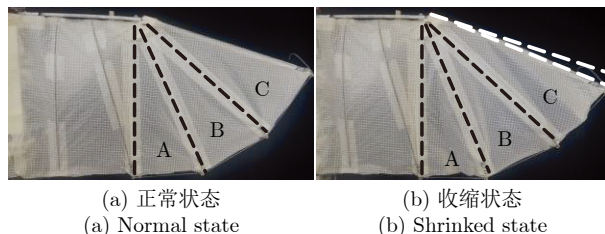


图 15 翅膀收缩前后的不同状态

Fig. 15 The wing's different states before and after it shrinks

臂转动到极限位置时处于收缩状态的右翅. 可以看出, 细绳牵引主要导致了外段翅膀 A、C 部分面积稍有减小, 而 B 部分面积基本不变.

Ajanic 等^[38]研制的变构型飞行器 LisHawk 采用了相似设计, 虽然翅膀无法像扑翼机器人一样扇动, 但其翅膀和尾翼均可以改变构型达到调节姿态的目的, 飞行时很像一只滑翔的苍鹰. 不同的是, LisHawk 主要是依靠机械结构改变了翅膀形状与面积, 而 USTB-Dove 主要靠细绳牵引改变了扑动翅膀的柔性. 从图 15 可以看出, 对于 USTB-Dove 来说, 虽然面积的改变量相对整个右翅的比例很小, 约为 5%, 但是收缩导致了 A、C 部分两边碳杆间距减小, 使杆间薄膜由张紧平展状态变为了松弛卷曲状态, 从而减小了翅膀扑动产生的升推力, 使扑翼机器人产生向右的滚转和偏航力矩, 风洞测试统计结果表明整体升推力最大衰减超过了 10%, 这样的设计方案对于小翼展扑翼机器人来说更适用.

图 16 所示为球头拉杆伸缩及尾翼上下极限动作时 USTB-Dove 在风洞中测得的俯仰力矩变化情况, 可以看出通过调节翅膀相对水平位置的下扑角大小及尾翼上下翘动角度可以明显地调节整机俯仰力矩. 这使得 USTB-Dove 可以独立调节下扑角或尾翼来调整整机俯仰平衡, 而通过下扑角可以平衡整机的俯仰力矩时, 尾翼便只需要小角度的动作来实现俯仰调节, 这样的方式有利于减小飞行阻力, 也更接近鸽子的飞行形态和方式.

图 17 所示为方向舵机牵引翅膀收缩时整机的滚转和偏航力矩变化情况. 当左右拉动翅膀改变翅

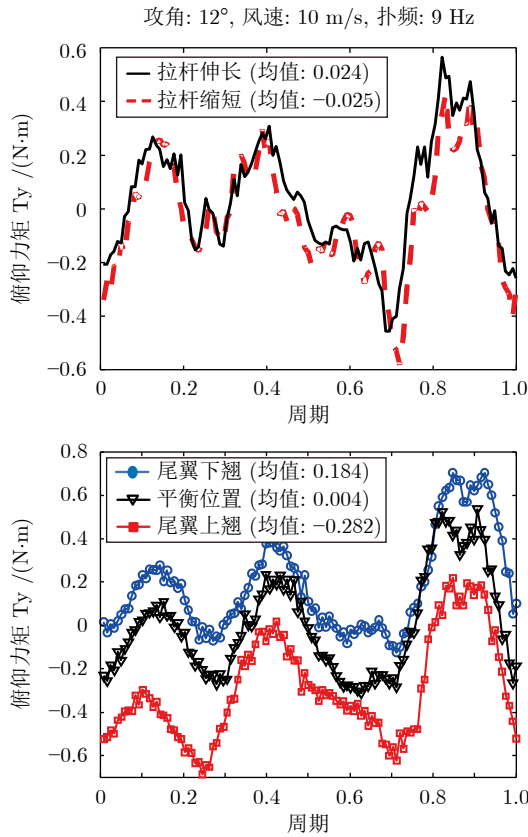


图 16 USTB-Dove 球头拉杆及尾翼极限动作时的俯仰力矩

Fig. 16 Pitch moment when USTB-Dove ball head lever and tail are in extreme action

膀柔性时, USTB-Dove 会产生向左或向右的滚转和偏航力矩, 从而改变飞行姿态与方向. 这使得飞行平台即使采用尾翼挨近翅膀布置的方式也可以灵活地控制转向.

4 飞控系统设计

完成 USTB-Dove 飞行平台设计与搭建后, 本文为其加装了自主设计的飞控系统, 并通过地面站采集、显示、记录飞行数据. 图 18 所示为 USTB-Dove 飞控系统完整示意图. 机载部分主控板以 STM32F407VGT6 处理器为核心, 集成了姿态传感器 (IMU) 和气压计, 并通过外接 GPS 和精密陀螺仪实现姿态、位置、速度等飞行状态的感知, 并将飞行数据通过 Xbee 无线通信模块发送至地面站. 主控板通过遥控接收机接收来自遥控器的控制指令, 并通过板载控制程序输出脉冲宽度调制 (Pulse width modulation, PWM) 信号, 实现对无刷直流电机、尾翼舵机及微型步进电机的控制, 从而实现对 USTB-Dove 的飞行控制.

通过 Xbee 无线通信模块, 地面站可以接收、处

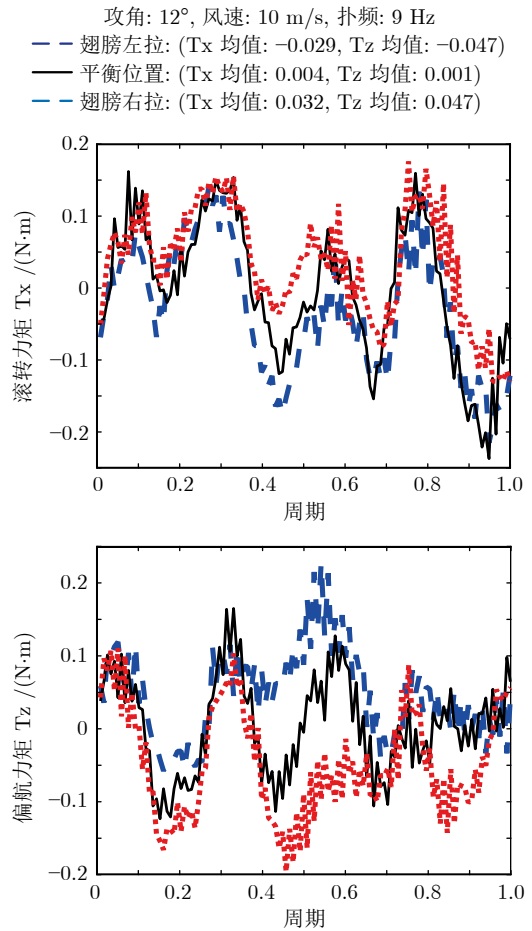


图 17 USTB-Dove 转向机构动作时的滚转和偏航力矩

Fig. 17 Roll and yaw moment when USTB-Dove steering mechanism is in action

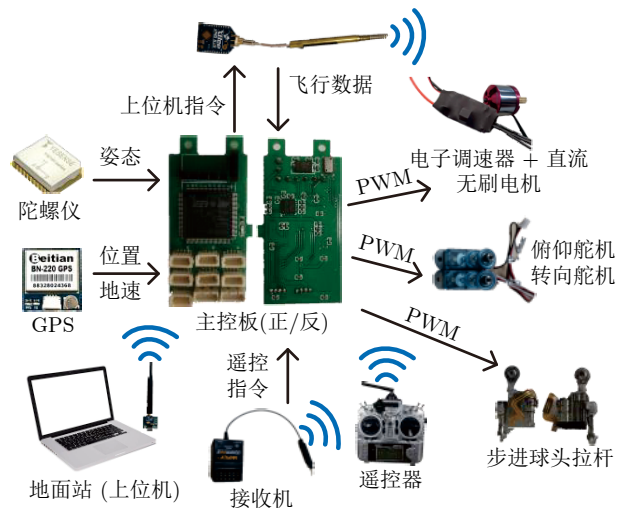


图 18 USTB-Dove 飞控系统

Fig. 18 Flight control system of USTB-Dove

理、显示和记录 USTB-Dove 的飞行数据. 如图 19 所示为地面站系统上位机界面, 包括: 1) 姿态角、

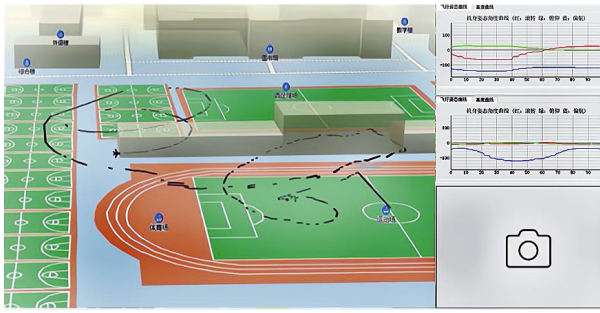


图 19 地面站信息采集显示界面

Fig.19 Interface for the collection and display of information at the ground station

高度曲线显示窗口; 2) 图像采集窗口 (预留); 3) 调用高德 3D 地图的 USTB-Dove 实时 3D 飞行轨迹显示窗口, 可以直观地把握飞行平台的飞行状态.

5 飞行实验

为验证 USTB-Dove 的飞行稳定性和可控性, 本文进行了外场实际飞行实验. 图 20 所示为试飞视频截图, 展示了 USTB-Dove 手抛起飞的过程, 可以看出 USTB-Dove 起飞平稳, 尾翼展平, 形态很像一只白色的鸽子. 图 21 所示为在空中飞行时的 USTB-Dove (白色), 有真实飞鸟 (黑色) 伴飞, 证明了飞行平台的高仿生度, 飞行视频已上传至 Youku 视频网站, 网址为: https://v.youku.com/v_show/id_XNTkwODUzNTAyMA==.html.

图 22 所示为对 USTB-Dove 进行转向控制性能测试时记录的飞行轨迹, 图 23 所示为相应的姿态变化曲线. 从飞行轨迹和姿态数据可以看出, USTB-Dove 飞行平稳, 转向灵活, 可以从连续小半径右盘旋飞行状态切换至左盘旋飞行状态, 最小转弯半径约为 5 m, 具有良好的飞行稳定性和可控性.

6 结束语

本文以信鸽为仿生对象, 针对现有扑翼平台气

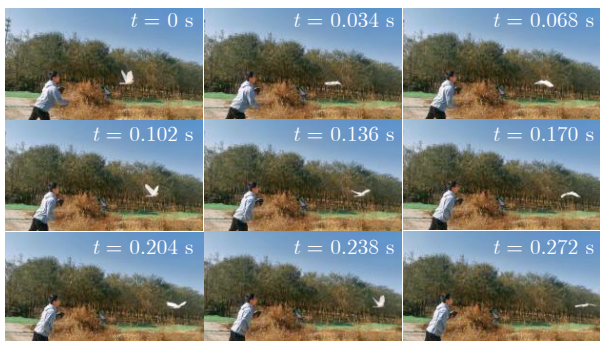


图 20 起飞阶段的 USTB-Dove

Fig.20 USTB-Dove during takeoff phase

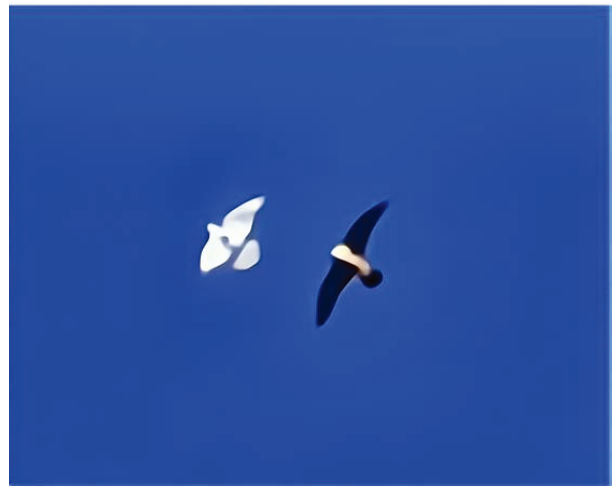


图 21 飞行中的 USTB-Dove (白色)

Fig.21 USTB-Dove (white) in flight

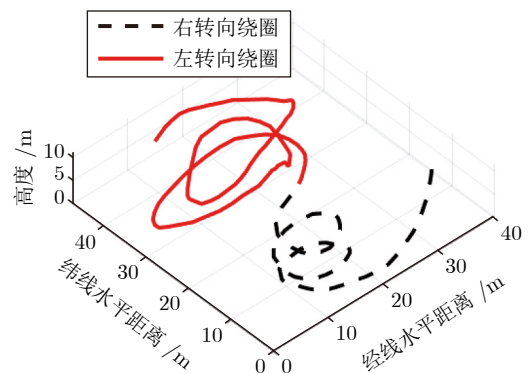


图 22 室外测试飞行轨迹

Fig.22 Flight trajectory in outdoor test

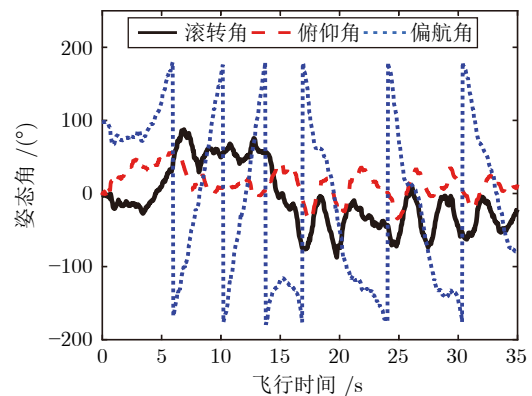


图 23 室外飞行测试姿态曲线

Fig.23 Attitude curves in outdoor flight test

动布局、飞行控制方式与实际鸟类之间差别较大的不足, 设计了仿生折翼翅膀及尾翼挨近翅膀后缘布置的布局方式, 并提出了一种通过下扑角和尾翼联动来调节俯仰力矩的方法. 在此基础上设计了拉线

控制机构通过对翅膀柔性及面积的调节实现了灵活的转向控制,最后进行的飞行实验验证了 USTB-Dove 的稳定性、可控性及飞行控制方案的有效性.对于未来的工作,我们将进一步提高机械机构的稳定性和可靠性,使 USTB-Dove 成为一款具有实用价值的飞行平台.

References

- Wang Guo-Biao, Chen Dian-Sheng, Chen Ke-Wei, Zhang Zi-Qiang. The current research status and development strategy on biomimetic robot. *Journal of Mechanical Engineering*, 2015, **51**(13): 27-44
(王国彪, 陈殿生, 陈科位, 张自强. 仿生机器人研究现状与发展趋势. 机械工程学报, 2015, **51**(13): 27-44)
- Ji Ai-Hong, Dai Zhen-Dong, Zhou Lai-Shui. Research development of bio-inspired robotics. *Robot*, 2005, **27**(3): 284-288
(吉爱红, 戴振东, 周来水. 仿生机器人的研究进展. 机器人, 2005, **27**(3): 284-288)
- He W, Huang H F, Chen Y N, Xie W Z, Feng F S, Kang Y M, et al. Development of an autonomous flapping-wing aerial vehicle. *Science China Information Sciences*, 2017, **60**(6): Article No. 063201
- He Wei, Ding Shi-Qiang, Sun Chang-Yin. Research progress on modeling and control of flapping-wing air vehicles. *Acta Automatica Sinica*, 2017, **43**(5): 685-696
(贺威, 丁施强, 孙长银. 扑翼飞行器的建模与控制研究进展. 自动化学报, 2017, **43**(5): 685-696)
- Floreano D, Wood R J. Science, technology and the future of small autonomous drones. *Nature*, 2015, **521**(7553): 460-466
- Hou Yu, Fang Zong-De, Kong Jian-Yi, Li Gong-Fa. Current research status and key technology of bionic flapping wing flying mini-robots. *Journal of Machine Design*, 2008, **25**(7): 1-4
(侯宇, 方宗德, 孔建益, 李公法. 仿生扑翼飞行微机器人研究现状与关键技术. 机械设计, 2008, **25**(7): 1-4)
- Wang L, Song B F, Sun Z C, Yang X J. Review on ultra-light-weight flapping-wing nano air vehicles: Artificial muscles, flight control mechanism, and biomimetic wings. *Chinese Journal of Aeronautics*, 2023, **36**(6): 63-91
- Feliz E. Hummingbird Nano UAV. *Avionics Magazine*, 2011, **35**(10): 10-11
- Keennon M, Klingebiel K, Won H, Andriukov A. Development of the Nano hummingbird: A tailless flapping wing micro air vehicle. In: Proceedings of the 50th AIAA Aerospace Sciences Meeting Including the New Horizons Forum and Aerospace Exposition. Nashville, Tennessee: AIAA, 2012.
- Phan H V, Truong Q T, Park H C. Implementation of initial passive stability in insect-mimicking flapping-wing micro air vehicle. *International Journal of Intelligent Unmanned Systems*, 2015, **3**(1): 18-38
- Phan H V, Park H C. Mechanisms of collision recovery in flying beetles and flapping-wing robots. *Science*, 2020, **370**(6521): 1214-1219
- Karásek M, Muijres F T, De Wagter C, Remes B D W, de Croon G C H E. A tailless aerial robotic flapper reveals that flies use torque coupling in rapid banked turns. *Science*, 2018, **361**(6407): 1089-1094
- Chin Y W, Kok J M, Zhu Y Q, Chan W L, Chahl J S, Khoo B C, et al. Efficient flapping wing drone arrests high-speed flight using post-stall soaring. *Science Robotics*, 2020, **5**(44): Article No. eaba2386
- Send W, Fischer M, Jebens K, Mugrauer R, Nagarathinam A, Scharstein F. Artificial hinged-wing bird with active torsion and partially linear kinematics. In: Proceedings of 28th Congress of the International Council of the Aeronautical Sciences. Brisbane, Australia: Optimage Ltd., 2012. 1148-1157
- Zufferey R, Tormo-Barbero J, Guzmán M M, Maldonado F J, Sanchez-Laulhe E, Grau P, et al. Design of the high-payload flapping wing robot E-flap. *IEEE Robotics and Automation Letters*, 2021, **6**(2): 3097-3104
- Yang W Q, Wang L G, Song B F. Dove: A biomimetic flapping-wing micro air vehicle. *International Journal of Micro Air Vehicles*, 2018, **10**(1): 70-84
- Xue D, Song B F. Tuning the deformation of flapping wing to improve the flight efficiency of dove FWMAV. *Journal of Aerospace Engineering*, 2021, **34**(6): Article No. 04021069
- Chen A, Song B F, Wang Z H, Xue D, Liu K. A novel actuation strategy for an agile bioinspired FWAV performing a morphing-coupled wingbeat pattern. *IEEE Transactions on Robotics*, 2023, **39**(1): 452-469
- Pan E Z, Xu H, Yuan H, Peng J Q, Xu W F. HIT-Hawk and HIT-Phoenix: Two kinds of flapping-wing flying robotic birds with wingspans beyond 2 meters. *Biomimetic Intelligence and Robotics*, 2021, **1**: Article No. 100002
- Wu X Y, He W, Wang Q, Meng T T, He X Y, Fu Q. A long-endurance flapping-wing robot based on mass distribution and energy consumption method. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2023, **70**(8): 8215-8224
- Dvořák R. Aerodynamics of bird flight. *EPJ Web of Conferences*, 2016, **114**: Article No. 01001
- Berg A M, Biewener A A. Wing and body kinematics of takeoff and landing flight in the pigeon (*Columba livia*). *Journal of Experimental Biology*, 2010, **213**(10): 1651-1658
- Guidi G. A study of the wing-beats of pigeons in flight. *The Aeronautical Journal*, 1938, **42**(336): 1104-1115
- Ajanic E, Paolini A, Coster C, Floreano D, Johansson C. Robotic avian wing explains aerodynamic advantages of wing folding and stroke tilting in flapping flight. *Advanced Intelligent Systems*, 2023, **5**(2): Article No. 2200148
- Ruiz C, Acosta J Á, Ollero A. Optimal elastic wing for flapping-wing robots through passive morphing. *IEEE Robotics and Automation Letters*, 2023, **8**(2): 608-615
- Yang H H, Lee S G, Addo-Akoto R, Han J H. Parameter optimization of foldable flapping-wing mechanism for maximum lift. *Journal of Mechanisms and Robotics*, 2024, **16**(3): Article No. 031002
- Hassanalain M, Abdelkefi A, Wei M J, Ziaei-Rad S. A novel methodology for wing sizing of bio-inspired flapping wing micro air vehicles: Theory and prototype. *Acta Mechanica*, 2017, **228**(3): 1097-1113
- Nian P, Song B F, Xuan J L, Yang W Q, Dong Y B. A wind tunnel experimental study on the flexible flapping wing with an attached airfoil to the root. *IEEE Access*, 2019, **7**: 47891-47903
- Ang Hai-Song, Zeng Rui, Duan Wen-Bo, Shi Zhi-Wei. Aerodynamic experimental investigation for mechanism of lift and thrust of flexible flapping-wing MAV. *Journal of Aerospace Power*, 2007, **22**(11): 1838-1845
(昂海松, 曾锐, 段文博, 史志伟. 柔性扑翼微型飞行器升力和推力机理的风洞试验和飞行试验. 航空动力学报, 2007, **22**(11): 1838-1845)
- Maybury W J, Rayner J M V. The avian tail reduces body parasite drag by controlling flow separation and vortex shedding. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, 2001, **268**(1474): 1405-1410
- Thomas A L R. Why do birds have tails? The tail as a drag reducing flap, and trim control. *Journal of Theoretical Biology*, 1996, **183**(3): 247-253
- Sadraey M H. *Aircraft Design: A Systems Engineering Approach*. Hoboken: Wiley, 2012.
- Guzmán M M, Páez C R, Maldonado F J, Zufferey R, Tormo-Barbero J, Acosta J Á, et al. Design and comparison of tails for

bird-scale flapping-wing robots. In: Proceedings of the IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. Prague, Czech Republic: IEEE, 2021. 6358–6365

- 34 Thomas A L R. On the aerodynamics of birds' tails. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 1993, **340**(1294): 361–380
- 35 Huang H F, He W, Wang J B, Zhang L, Fu Q. An all servo-driven bird-like flapping-wing aerial robot capable of autonomous flight. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 2022, **27**(6): 5484–5494
- 36 Usherwood J R, Cheney J A, Song J L, Windsor S P, Stevenson J P J, Dierksheide U, et al. High aerodynamic lift from the tail reduces drag in gliding raptors. *Journal of Experimental Biology*, 2020, **223**(3): Article No. jeb214809
- 37 Xiong Chao, Song Bi-Feng, Yuan Chang-Sheng, Shao Li-Min, Zhang Ya-Feng. Investigating longitudinal moment characteristics of flapping-wing MAV in wind tunnel. *Journal of Northwestern Polytechnical University*, 2007, **25**(5): 733–736
(熊超, 宋笔锋, 袁昌盛, 邵立民, 张亚锋. 微型扑翼飞行器翼纵向力矩特性风洞试验研究. 西北工业大学学报, 2007, **25**(5): 733–736)
- 38 Ajanic E, Feroskhan M, Mintchev S, Noca F, Floreano D. Bio-inspired wing and tail morphing extends drone flight capabilities. *Science Robotics*, 2020, **5**(47): Article No. eabc2897



王久斌 北京科技大学智能科学与技术学院博士研究生。主要研究方向为扑翼机器人系统设计, 智能控制, 扑翼机器人集群控制。

E-mail: b20200306@xs.ustb.edu.cn

(**WANG Jiu-Bin** Ph.D. candidate at the School of Intelligence Science and Technology, University of Science and Technology Beijing. His research interest covers system design of flapping-wing robots, intelligent control, and swarm control of flapping-wing robots.)



贺威 北京科技大学智能科学与技术学院教授。2006 年获得华南理工大学自动化学院学士学位, 2011 年获得新加坡国立大学电气工程与计算机科学系博士学位。主要研究方向为机器人学, 分布参数系统控制, 振动控制和智能控制系统。本文通信作者。

E-mail: weihe@ieee.org

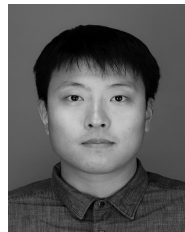
(**HE Wei** Professor at the School of Intelligence Science and Technology, University of Science and Technology Beijing. He received his bachelor degree from the College of Automation Science and Engineering, South China University of Technology in 2006, and his Ph.D. degree from the Department of Electrical and Computer Engineering, National University of Singapore (NUS), Singapore in 2011. His research interest covers robotics, control of distributed parameter systems, vibration control, and intelligent control systems. Corresponding author of this paper.)



孟亭亭 北京科技大学智能科学与技术学院副教授。2017 年获得电子科技大学控制工程系硕士学位, 2020 年获得中国科学院数学与系统科学研究院博士学位。主要研究方向为扑翼飞行机器人, 智能控制, 分布参数系统控制。

E-mail: mengting0715@163.com

(**MENG Ting-Ting** Associate professor at the School of Intelligence Science and Technology, University of Science and Technology Beijing. She received her master degree in control engineering from University of Electronic Science and Technology of China (UESTC) in 2017, and her Ph.D. degree at Academy of Mathematics and Systems Science, Chinese Academy of Sciences in 2020. Her research interest covers flapping-wing robots, intelligent control, and distributed parameter system control.)



邹尧 北京科技大学智能科学与技术学院教授。2010 年获得大连理工大学自动化专业学士学位, 2016 年获得北京航空航天大学控制科学与工程专业博士学位。主要研究方向为非线性控制, 无人机控制, 多智能体控制。

E-mail: zouyao@ustb.edu.cn

(**ZOU Yao** Professor at the School of Intelligence Science and Technology, University of Science and Technology Beijing. He received his bachelor degree in automation from Dalian University of Technology (DUT) in 2010, and his Ph.D. degree in control science and engineering from Beihang University in 2016. His research interest covers nonlinear control, unmanned aerial vehicle control, and multi-agent control.)



付强 北京科技大学智能科学与技术学院副教授。2009 年获北京交通大学热能与动力工程专业学士学位。2016 年获北京航空航天大学控制科学与工程专业博士学位。主要研究方向为视觉导航, 视觉伺服和扑翼飞行器。

E-mail: fuqiang@ustb.edu.cn

(**FU Qiang** Associate professor at the School of Intelligence Science and Technology, University of Science and Technology Beijing. He received his bachelor degree in thermal energy and power engineering from Beijing Jiaotong University in 2009, and his Ph.D. degree in control science and engineering from Beihang University in 2016. His research interest covers vision-based navigation, visual servoing, and flapping-wing aerial vehicles.)