

扑翼机的仿真研究

历雪 焦海洁 王健 田金斗 李贞香 聂文静
哈尔滨剑桥学院 黑龙江哈尔滨 150069

摘要: 通过对比国内外仿生仿真鸟扑翼机的发展现状确定仿真鸟扑翼机的结构形式以及基本参数,在此基础上制定了仿生扑翼机的总体方案,同时基于 Inventor 软件测试机器人的动力学特性,对仿生扑翼机三维建模并进行仿真分析,采用新型的扑翼机构。

关键词: 扑翼飞行; 三维建模; 仿真分析

Simulation of flapping-wing aircraft

Xue Li, Haijie Jiao, Jian Wang, Jindou Tian, Zhenxiang Li, Wenjing Nie
Harbin Cambridge University, Harbin 150069

Abstract: By comparing the development of the bionic ornithopter at home and abroad, the structure and basic parameters of the bionic ornithopter are determined, and the overall scheme of the bionic ornithopter is worked out, at the same time, based on Inventor software to test the dynamic characteristics of the robot, three-dimensional modeling and simulation analysis of the bionic flapping-wing machine, using a new flapping-wing mechanism.

Keywords: Flapping wings; Principles of bionics; 3D modeling; Simulation

前言

随着现代电子计算机、新型的复合材料、控制技术等高科技领域的迅速发展,在此基础上研发扑翼机就有了希望。目前已经可以制作出接近实用型的自主控制的扑翼飞行器。这些飞行器的原理基本分为两大类:仿鸟扑翼和仿昆虫扑翼。其中微小型的无人扑翼机占大多数,大型载人的扑翼机为少数并可以试飞。仿鸟的扑翼扑动频率低,这是由于鸟的翼面积大的原因,其飞行也和鸟类类似,制作相对来说容易;仿昆虫的扑翼扑动频率高,这是由于昆虫的翼面积小所以要增加扑动次数来提高升力,因而制作的难度较高,但仿昆虫的能够方便的实现悬停。但是总体来说中大型扑翼机的研究还停留在婴儿期阶段,整体属于蓝海水平。

一、整体结构设计

仿生扑翼机的机身是重要设计部分,机身作为连接双翅、尾翼和机头的构件,同时也是搭载航电设备和载荷设备的平台。由于仿生设计的蓝本为鸽子,所以在机身结构设计中需要模仿鸽子的外形。运用建模软件 Inventor 是设计一款仿生扑翼机外形数模,如图 1 示。整个机身和机头可以看出设计的机身和机头模仿了鸽子的体型,具有一定的流线型,在空中飞行途中起到减少一部分飞行阻力。由于机身是整个扑翼机最大的部分,其设计材料的选择也十分重要。蒙皮材料具有一定强度且重量轻的特点,查阅相关材料资料,高强度玻璃纤维或者碳纤维复合材料制成该仿生飞行器机身,采用阴模铺设加热固化方法一次成型,具有优越的结构强度和刚

度特性,特有的薄壁结构最大化的扩展了机身内部的空间,重量轻,耐冲击。



图 1 扑翼机三维图

二、扑翼、尾翼空气动力学设计

1. 扑翼空气动力学设计

在翅膀下扑过程中增大扑动面积,在翅膀上提过程中减小扑动面积,实现在一个扑动周期内升力为正。通过对现有扑翼飞行变形方式的总结和研究,结合本文设计的要求,本节主要设计了三种变形方式:如图 2 所示。

(1) 摆动机构 (2) 摆动折翼式 (3) 双向运动式复合机构

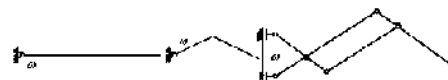


图 2 扑翼飞行变形方式图

方案一:在鸟类的扑动过程中,在上提阶段羽毛张开以减小空气阻力,在下扑阶段羽毛闭合增大扑动面积。根据该原理设计了变形方式,通过改变上下扑动时的面积方式实现在一个周期内升力为正。黑色部分为气孔,

下扑时气孔关闭, 上提时气孔打开。如图 2(1)。

方案二: 通常情况下大型鸟类都具有双段或多段翅膀, 在扑动过程中, 在下扑阶段翅膀完全展开, 在上提阶段形成一定折叠角。根据这种原理设计了图 2(2) 变形方式, 通过折叠改变上下扑动面积。

方案三: 采用这种变形方式飞行的鸟类如蝙蝠, 这种折叠变形方式飞行效率较高, 飞行过程较为灵活, 在蝙蝠的飞行过程中, 通过间歇拍动翅膀即可实现连续飞行, 在直飞时通过改变翅膀形状可以实现迅速折返。根据蝙蝠翅膀变形过程设计了图 2(3) 示变形方式, 通过横向折叠该变上下扑动面积。

表 1 变形方案表

类别	方案一	方案二	方案三
变形方式	下扑气孔关闭 上扑气孔打开	通过机构设计在 亦动时折叠与展开	下扑时翅膀展开 上提时翅膀收拢
有效扑动面积	适中	较小	较大
所需驱动数量	①翅膀上下扑动 ②气孔的开闭	翅膀上下扑动	①翅膀上下扑动 ②平面内的展开与折 叠
升力/重量	适中	较大	较小
结构复杂度	结构简单 制造工艺复杂	结构简单通过机构设 计即可完成	结构复杂制造 加工难度大
控制难度程度	控制简单但总体 实现难度大	控制简单通过控制扑 动频率即可	控制系统复杂翅膀展 开与收拢时处于不同 状态
研制难易程度	原理简单但受制于 材料、工艺等, 实 现困难	较为简单有类 似案例应用	难以实现, 总体过重 主要处于试验阶段

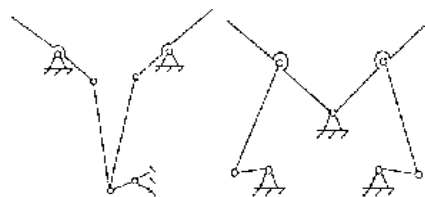
2. 尾翼空气动力学设计

目前仿生扑翼机驱动机构主要有两类: 单自由度扑翼驱动机构和多自由度扑翼驱动机构。单自由度的扑翼驱动机构只能实现翅膀的上下扑动, 而后者则能够在扑动的基础上实现翅膀的转动以及折叠运动。

多自由度的扑翼驱动机构能够更真实的模仿鸟类翅膀的运动, 但是缺点也比较明显, 由于结构比较复杂, 部件之间的损耗摩擦会比较大, 传动效率较低, 同时重量也比较大。相比之下, 单自由度的扑翼机构能够以简单的形式实现扑翼运动, 是目前应用最为广泛的扑动形式。

如下图 3 (1) 是单曲柄双摇杆扑翼驱动机构, 左右摇杆在连杆的连接。在曲柄的带动下进行扑动。此种扑动机构结构简单、效率高, 并且能够较为准确地实现预定的扑动规律, 如扑动频率和扑动角度。然而, 由于这种连杆机构为非对称型结构, 在运动过程中两翼会存在扑翼角度的相位差, 从而导致扑翼机机身两侧不平衡, 这种不稳定性会影响到飞行品质和飞行安全。这一缺点虽然可以在一定程度上通过结构的优化设计进行弥补, 使左右两翼扑动的相位差减小, 但是这一问题仍然局限了这一结构的进一步发展。

双曲柄双摇杆机构的出现解决了上述单曲柄双摇杆机构的缺点, 如图 3 (2) 所示, 这一结构由两个模数和尺寸相同且相互啮合的齿轮作为左右曲柄, 驱动各自连杆和摇杆实现翅膀对称扑动, 与单曲柄双摇杆机构相比, 双曲柄双摇杆机构具有结构和运动上的对称性, 因而采用这一驱动机构的 仿生扑翼机飞行更加稳定、安全, 飞行品质相对较好。



(1) 单曲柄双摇杆机构 (2) 双曲柄双摇杆机构

图 3 双摇杆机构图

除了这两种驱动机构以外, 还有曲柄滑块机构、凸轮弹簧机构等机构, 从基本原理上来讲, 这些驱动机构也是通过转动副和移动副之间的相互作用最终转化为翅膀的扑动, 但都需要解决摩擦磨损大、传动效率低等问题。

随着机械和电子技术的发展, 也有越来越多的研究使用平面机械连杆机构。这种平面连杆机构结构构造简单、重量轻, 易于保证扑动频率和扑动角度, 因此可以采用平面连杆扑翼驱动机构, 实现仿生扑翼机机翼的复杂运动。

三、轨迹仿真

路径规划是扑翼机自主飞行系统中非常重要的一个部分, 它使扑翼机在躲避障碍物的同时以最短的路径或者最短的时间从出发点到达目标位置。针对扑翼机数据采集问题, 使用深度强化学习 (Deep Reinforcement Learning, DRL) 方法对扑翼机路径规划策略进行研究, 以减少扑翼机能耗并提高其数据采集效率。基于半马尔科夫过程 (Semi-Markov Process) 完成对扑翼机数据采集问题的离散空间建模。结合 Semi-Markov-Option 分层强化学习方法与 rainbow 深度强化学习算法, 做扑翼机路径规划策略。

无线传感器网络中传感器节点采用随机分布的方式部署在区域内, 使用 SR 表示需要检测的传感器节点, 设区域内有 N 个需要采集的传感器节点 SR, $i \in [1, N]$ 。扑翼机在无线传感器网络中的采集过程。

扑翼机从初始停靠点出发, 对无线传感器网络中的传感器节点进行数据采集。在无线传感器网络中, 扑翼机以匀速 v 在固定高度 h 下进行飞行。扑翼机到达节点的通信范围后将会向节点发送激发信号, 唤醒节点。节点被唤醒后将与扑翼机进行数据传输, 将缓存的所有将缓存的所有数据发送至扑翼机表示该点以检测完成并清空自身的缓存空间。当至少访问过一次所有节点后, 扑翼机将返回停靠点结束本次任务 并等待下一次检测任务。在检测过程中, 若扑翼机最大可用能量 W_{max} 全部消耗, 则返回停靠点更换电池也视作本次检测任务结束。扑翼机在一次检测任务中检测的总数据量为 L_{total} , 消耗能量为 W_{total} , 对于访问策略的优化目标可表示为式 (1-1) 所示, 使得一次检测任务中扑翼机的检测数据量与消耗能量之比最大。

$$\max = \frac{L_{total}}{W_{total}}, = W_{total} \leq W_{max}$$

扑翼机与传感器节点的通信示意图如下图 4 所示, 节点的最大通信距离为 r , 扑翼机的通信距离为 r_u ($0 < r < r_u$), 在传感器网络区域内以固定高度 h , 匀速 v 进行飞行, dx 为扑翼机与传感器节点之间的水平距离。当扑翼机与节点之间的距离 d 小于 r 时双方可以进行通信。 θ 为地面水平线与扑翼机和节点 SR_i 的连接线之间的夹角, 即地面节点与扑翼机通信的仰角。 df 为扑翼机在节点通信范围水平面投影的飞行距离。

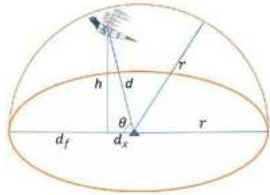


图 4 扑翼机与传感器节点通信模型

图 4 中的 d 、 h 、 dx 与 df 满足式 (1)。

$$\begin{aligned} d^2 &= h^2 + dx^2 < r^2 \\ dx &= \sqrt{d^2 - h^2} \\ df &= r - dx = r - \sqrt{d^2 - h^2} \end{aligned} \quad (1)$$

显而易见, 当 h 较大时, dx 较小, df 较大即扑翼机在水平方向上需要的飞行距离较大。当 h 较小时, dx 较大, df 较小即扑翼机在水平方向的飞行距离较小。但是在现实环境中要重点考虑地面障碍物的高度, 避免碰撞等问题。因为 h 的取值很大程度上取决扑翼机与传感器节点的具体通信环境, 在不同通信环境下有着不同的最佳取值。

扑翼机的飞行能量消耗 W_{fly} 与飞行距离和飞行速度有关, W_{fly} 表示如式 (2)

$$W_{fly} = W_v \frac{D_f}{v} \quad (2)$$

式中: W_v ——扑翼机在以速度 v 飞行单位时间时所消耗能量

D_f ——扑翼机在一次检测任务中的总飞行距离。

扑翼机上传数据消耗能量 W_{upload} 可表示如式 (3) 所示。

$$W_{upload} = \sum_{i=1}^N L_{SR_i} W_{ub} \quad (3)$$

式中: W_{ub} ——扑翼机发送单位大小的数据所消耗的能量。

扑翼机在空中工作所消耗的能量 W_{stay} 表示如式 (4)

所示。

$$W_{stay} = T_{stay} W_{st} = \frac{\sum_{i=1}^N L_{SR_i}}{P_{rec}} W_{st} \quad (4)$$

式中: T_{stay} ——扑翼机在空中工作的时间

W_{st} ——扑翼机在空中工作时单位时间所消耗的能量

P_{rec} ——扑翼机检测的速率

扑翼机在一次数据采集任务中的数据总消耗 W_{total} 表示, 可以得到 W_{total} 主要取决于扑翼机的飞行距离与采集的数据量。

$$W_{total} = W_B + W_{fly} + W_{upload} + W_{stay}$$

综上所述: 装上航迹规划相关的设备载重虽然增加但设备的重量远小于扑翼机的载重重量 0.5kg 所以说加装航迹规划相关设备并不影响扑翼机飞行。

经过仿真模拟可知扑翼机按照航迹规划分析得到的最短路径飞行检测所用的时间要小于未进行航迹规划所用的时间。

经过航迹规划后扑翼机空气单次检测全过程的耗电为 60%。而未进行航迹规划的扑翼机单次空气检测全程所耗电为 80%。相比较而言航迹规划后扑翼机用电量要节省 20%。

四、结语

基于 Inventor 软件的仿真分析, 采用仿生技术, 模仿鸟类扑翼的原理对扑翼机结构设计, 轨迹规划等进行具体细化。在综合分析仿生扑翼机驱动机构的基础上, 提出一种新型仿生扑翼驱动机构。通过 Inventor 软件建模和运动学仿真验证了这一机构的可行性。

参考文献:

- [1] 孟繁磊. 科技越发达, 武器越“落后”[J]. 科学 24 小时, 2022(Z1):55-57.
- [2] 王岐朋, 周宝玉, 杜坤. “燕雀”战斗——仿生无人机在未来战争中放飞 [J]. 轻兵器, 2022(06):10-14.
- [3] 罗婷. 仿生扑翼机单关节扑动机构设计与仿真 [D]. 西南科技大学, 2019.

基金项目:

- (1) 2022 年省级大学生创新创业训练计划项目《仿生鸟扑翼机》(项目编号: S202 213303017) 阶段性研究成果

- (2) 黑龙江省高等教育教学改革项目《新工科背景下基于“SPCI”四位一体人才培养模式的研究与实践》阶段性研究成果