

文章编号:1000-8055(2016)08-1838-07

doi:10.13224/j.cnki.jasp.2016.08.006

多段柔性变体扑翼飞行器设计

黄鸣阳, 肖天航, 昂海松

(南京航空航天大学 航空宇航学院

飞行器先进设计技术国防重点学科实验室, 南京 210016)

摘 要: 多段柔性变体扑翼模仿海鸥翅膀的复杂运动. 观察海鸥翅膀的运动周期, 设计了包含慢频率扑动、展向折弯、弦向扭转和结构柔性变形的扑翼模型, 并应用准定常方法计算气动力, 为该扑翼飞行器设计提供依据. 在 CATIA 和 3DMAX 中设计多段柔性变体扑翼机的三维模型和运动模拟, 制作样机进行飞行试验, 研究其平飞、爬升、偏航等飞行姿态, 结果表明升力和推力与数值计算结果吻合. 相较于原有扑翼飞行器, 多段柔性变体扑翼飞行器可以慢频率扑动飞行, 调整扑翼形状.

关 键 词: 多段柔性变体扑翼; 扑翼模型; 准定常计算方法; 运动模拟; 飞行试验

中图分类号: V276

文献标志码: A

Design of an ornithopter with multisection flexible morphing wings

HUANG Ming-yang, XIAO Tian-hang, ANG Hai-song

(Ministerial Key Discipline Laboratory of Advanced Design Technology of Aircraft,

College of Aerospace Engineering,

Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

Abstract: The multisection flexible morphing wings mimic the complex movement of seagull's flapping wings. By observing movement periods of seagull's flapping wings, a new flapping-wing model including fold, torsion, flexible morphing and slowly beating up and down was built. In order to provide the design of this ornithopter with a theoretical basis, the quasi-steady method was applied to calculate aerodynamic force. The three-dimensional model and motion simulation were built in CATIA and 3DMAX, and an ornithopter with multisection flexible morphing wing was built for flight test. Flying attitudes including level flight, climbing and yawing were studied, and test results including lift and thrust agree with the calculation. Compared with conventional ornithopters, the ornithopter with multisection flexible morphing wing can fly while flapping with a low frequency, and adjusting the shape of flapping wings.

Key words: multisection flexible morphing wing; flapping-wing model; quasi-steady method; motion simulation; flight test

扑翼飞行器是仅依靠柔性扑翼就能同时产生升力和推力的飞行器, 具有很强的仿生性^[1-3]. 当前, 国内外研制的扑翼飞行器多为单段扑翼结构, 依靠刚性前缘带动柔性机翼上下扑动和弦向扭转实现飞行, 例如: “Micro Bat”^[4]、南京航空航天大学

“翠雀”仿鸟扑翼飞行器^[5]、西北工业大学“信鸽”扑翼机^[6]等, 都属于模仿小型鸟类的高频率扑翼飞行器. 随着研究深入, MIT 等高校研制出依靠惯性力被动折弯的扑翼机^[7-8], 但依旧是高频率扑动飞行; 德国 FESTO 公司设计了翅膀主动折弯的 Smart-

收稿日期: 2014-11-26

基金项目: 国家级大学生创新训练计划项目(201310287001); 预研项目; 江苏高校优势学科建设工程基金资助

作者简介: 黄鸣阳(1993-), 男, 江苏南京人, 硕士生, 主要从事飞行器设计研究.

bird,但是需要混合动力(充氦气与电动)^[9-10];段文博等设计了用舵机控制翅膀折弯的主动变形扑翼^[11],但其结构复杂、质量太大而难以飞行.目前,鲜有表示大鸟翅膀多段结构扑动模型的公开论文.

海鸥飞行中,其翅膀具有“扑动-折弯-扭转”协同运动的特点.在分析海鸥飞行特点基础上,本文构建一种新的多段柔性变体扑翼模型,建立其准定常的多段柔性扑翼气动模型,设计研制多段柔性变体扑翼飞行器,并成功实现了包括平飞、爬升、偏航等复杂动作的飞行任务,飞行试验结果与气动力数值计算结果相符合.本文建立的新型可折弯变体、慢频扑动的扑翼飞行器设计方法,有望为更复杂扑翼机的设计提供技术支持.

1 原有扑翼模型及扑翼飞行器

1.1 原有单段式扑翼模型分析

目前运用较多的单段扑翼模型^[12]主要反映扑翼展向扑动和弦向扭转.

$$\begin{cases} \beta(t) = \beta_0 + \beta_{\max} \sin[\omega(t)t + \varphi_\beta] \\ \alpha(t) = \alpha_0 + \alpha_{\max} \sin[\omega(t)t + \varphi_\alpha] \end{cases} \quad (1)$$

式中 β 为展向扑动角, α 为弦向截面扭转角.该模型适用于单段翼、小翼展、高频率的扑翼飞行器.观察不同鸟类的飞行可发现单纯运用单段扑翼模型描述大型鸟类的翅膀扑动存在两个缺陷:①不能反映大型鸟类翅膀展向弯度的变化,即翅膀主动折弯的过程;②没有考虑大型鸟类内外段扑翼弦向扭转角的差别.

1.2 原有单段式扑翼飞行器

单段式扑翼飞行器大多采用一套曲柄摇杆机构,电动机经过齿轮减速组带动一段翅膀绕轴转动.这类扑翼飞行器尺寸小、结构简单、扑动频率高、仿生性较差,不能模仿大型鸟类,图1为常规仿鸟单段扑翼微型飞行器.



图1 常规仿鸟单段扑翼微型飞行器

Fig.1 Traditional bird-like micro air vehicle (MAV) with single section flapping wings

2 多段柔性变体扑翼模型的建立与分析

2.1 多段柔性变体扑翼模型

研究海鸥飞行,可发现其翅膀展长较大,且分为内外两段.海鸥向下扑翅时,翅膀完全张开展开平,增加升力面积,且翅膀整体低头扭转,向下扑动产生升力的同时有向前的推力分量产生;当海鸥向上抬翅时,翅膀在关节处折弯,减少面积以减小上扑阻力,翅膀整体上仰扭转,翼面压差形成的气动力也有向前的分量,从而上扑过程也有推力产生.图2为海鸥翅膀在一个扑动周期内的变化.



图2 海鸥翅膀一个扑动周期内的变化

Fig.2 Variation of seagull's wings during one flapping cycle

为了更好地描述此类大型鸟类翅膀的运动规律,文章综合展向柔性变形函数 $\phi_{\text{flex}}(x, y, t)$ 、弦向柔性变形函数 $\theta_{\text{flex}}(x, y, t)$,设置初始扑动角 β_0 、最大扑动角 $\beta_{\max}$ 、初始扭转角 α_0 、最大扭转角 $\alpha_{\max}$ 、所取扑翼截面展向位置 l 、内段翼长度 b_1 、内外段翼扑动偏差角函数 $\delta(t)$,得到多段柔性变体扑翼模型为

$$\begin{cases} \beta(t) = \beta_0 + \beta_{\max} \sin[\omega(t)t + \varphi_\beta] + \phi_{\text{flex}}(x, y, t) - \delta(t) \frac{\text{sgn}(l - b_1) + 1}{2} \\ \alpha(t) = \alpha_0 + \alpha_{\max} \sin[\omega(t)t + \varphi_\alpha] + \theta_{\text{flex}}(x, y, t) \end{cases} \quad (2)$$

其中,内外段翼扑动偏差角函数 $\delta(t)$ 随时间 t 变化

$$\delta(t) = \pi - \phi_4 \quad (3)$$

式中 ϕ_4 为扑翼某时刻的折弯角,即某时刻海鸥内外段翼所夹的角度,如图3所示.

最大扭转角 $\alpha_{\max}$ 即其中一段扑翼的最外端扭转角.令 α_1 和 α_2 分别为内外段扑翼的扭角最大



图3 海鸥扑翼折弯角示意图

Fig.3 Illustration of the folding angle in seagull wing

值,由于海鸥外段翅膀弦向扭转更加剧烈,因此 $\alpha_1 < \alpha_2$. 本文总结为一个表达式为

$$\alpha_{\max} = \alpha_1 \frac{1 - \operatorname{sgn}(l - b_1)}{2} + \alpha_2 \frac{1 + \operatorname{sgn}(l - b_1)}{2} \quad (4)$$

柔性变形 $\theta_{\text{flex}}(x, y, t)$ 和 $\phi_{\text{flex}}(x, y, t)$ 与扑翼弦长相关. 将海鸥内段翼看作矩形翼,外段翼看作在 $1/4$ 弦线处由两个 $1/4$ 椭圆拼接而成,见图 4.

$$\begin{cases} \theta_{\text{flex}}(x, y, t) = \begin{cases} \theta_{\max} \sin\left[\omega t + \phi_\beta - \frac{\pi}{2}\right] \left(\frac{x}{c}\right)^2 \left(\frac{y}{b_1}\right)^2 & (0 \leq l \leq b_1) \\ \theta_{\max} \sin\left[\omega t + \phi_\beta - \frac{\pi}{2}\right] \left(\frac{x}{c(l)}\right)^2 \left(\frac{y}{b_2}\right)^2 & (b_1 < l \leq b_2) \end{cases} \\ \phi_{\text{flex}}(x, y, t) = \begin{cases} \phi_{\max} \sin\left[\omega t + \phi_\beta - \frac{\pi}{2}\right] \left(\frac{x}{c}\right)^2 \left(\frac{y}{b_1}\right)^2 & (0 \leq l \leq b_1) \\ \phi_{\max} \sin\left[\omega t + \phi_\beta - \frac{\pi}{2}\right] \left(\frac{x}{c(l)}\right)^2 \left(\frac{y}{b_2}\right)^2 & (b_1 < l \leq b_2) \end{cases} \end{cases} \quad (5)$$

2.2 多段柔性变体扑翼机构

为了实现多段柔性变体扑翼的复杂运动,本文以双曲柄双摇杆机构为基础,设计了一套如图 5 所示的新的扑动机构.

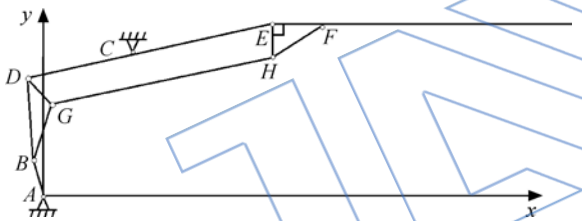


图 5 多段柔性变体扑翼机构简图

Fig. 5 Diagram of the mechanical kinematics of the multisection flexible morphing wing

在图 5 中, A 点与 C 点为扑翼与固定结构的铰链点. 该机构包含两组四连杆机构 ABCD 和 DEGH. 其中, ABCD 四连杆控制内段机翼的扑动, AC 为支撑, AB 曲柄绕 A 点定轴转动, 通过 BD 连杆带动 CD 摇杆运动; DEGH 四连杆控制外段机翼的运动, 以实现运动过程中扑翼的主动折弯变体. 为了方便计算, 规定 $l_0 = |DE|$, $l_1 = |AB|$, $l_2 = |BD|$, $l_3 = |CD|$, $l_4 = |AC|$, $l_5 = |DG|$, $l_6 = |EH|$, $\phi_1 = \angle BAC$, $\phi_2 = \angle BDC$, $\phi_3 = \angle DCA$, $\phi_4 = \angle DEF$, $\phi_4 - (\pi/2) = \angle DEH$.

这套扑动机构中, 确定各连杆长度, 即可得到机翼主桁条在扑动周期里各时刻所处的平面位置和扑动速度. 在 MATLAB 中建立该扑动机构的仿真程序, 取时间步长 Δt 进行仿真, 令 AB 绕 A 点转动, B 点在平面内运动轨迹形成一个半径为

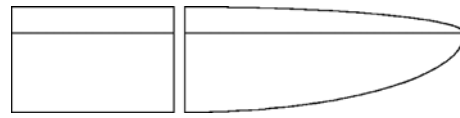


图 4 海鸥扑翼形状

Fig. 4 Platform of seagull wing

令 b_2 为内外段翼总长度, 对内段矩形翼和外段椭圆翼, 其扑动角和扭转角分别为

|AB| 的圆, 再由其余各根连杆的长度, 即可以得到 D、E、F 点的所在位置, 进而可仿真出扑翼主桁条的运动轨迹.

参照海鸥体型及骨骼尺寸, 取 $l_0 = 390$ mm, $l_1 = 30$ mm, $l_2 = 68$ mm, $l_3 = 90$ mm, $l_4 = 95$ mm, $l_5 = 20$ mm, $l_6 = 20$ mm, 以时间步长 $\Delta t = 0.012$ s 模拟仿真, 得到多段柔性扑翼在一个扑动周期内的位置如图 6 所示, 其结果表明该扑动机构实现了本文设计的两段折叠变体的扑动形态.

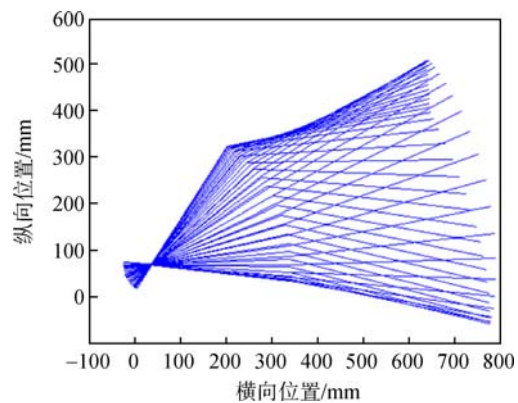


图 6 一个扑动周期内的扑翼位置

Fig. 6 Wing position in a flapping cycle

2.3 气动建模分析

2.3.1 准定常气动模型

运用准定常气动理论建立多段柔性变体扑翼的气动计算模型. 该扑翼飞行器的设计平飞速度为 v_∞ , 扑翼安装角为 α_0 . 计算扑翼展向某处微段 $c(Ddl)$ (如图 7 所示) 气动力, 并对展长和周期时间积分, 即可得到扑翼一个周期的平均气动力. 扑

翼展向微段的实际气流迎角可表示为

$$\alpha(t) = \alpha_0 + \alpha'(t) - \arctan\left[\frac{v_t}{v_\infty}\right] \quad (6)$$

式中 $\alpha'(t)$ 为扑翼在该微段的扭转角, v_t 为微段的

扑动速度, $\arctan\left[\frac{v_t}{v_\infty}\right]$ 则为扑翼扑动引起的气流攻角, 对微段积分即可得到扑翼周期平均的气动力为

$$\begin{cases} L = \frac{2}{T} \int_0^T \int_0^{b_2} q \{ C_l \cos[\alpha(t) - \alpha_0] + C_d \sin[\alpha(t) - \alpha_0] \} \cos[\beta(t)] c dl dt \\ T = \frac{2}{T} \int_0^T \int_0^{b_2} q \{ C_l \sin[\alpha(t) - \alpha_0] - C_d \sin[\alpha(t) - \alpha_0] \} c dl dt \end{cases} \quad (7)$$

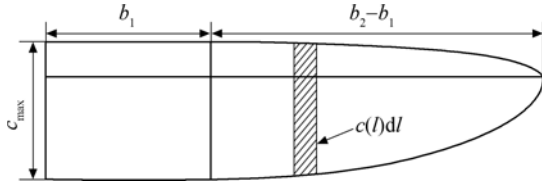


图 7 多段柔性变体扑翼形状

Fig. 7 Shape of the multisection flexible morphing wing

式中 q 为扑翼微段某时刻的实际动压 $q = q(v_\infty, \beta(t), l)$; C_l, C_d 为微段跟实际迎角有关的升力系数和阻力系数, 分别为 $C_l = C_l(\alpha), C_d = C_d(\alpha)$, 其值将在后文中运用 xfoil 软件进行计算; $\beta(t)$ 为扑动角度; 微段弦长 $c = c(l)$ 为

$$c(l) = \begin{cases} c_{\max} & (0 \leq l \leq b_1) \\ c_{\max} \sqrt{1 - \left(\frac{l - b_1}{b_2 - b_1}\right)^2} & (b_1 < l \leq b_2) \end{cases} \quad (8)$$

该微段某时刻的实际动压 $q[v_\infty, \beta(t), l]$ 与前飞速度、扑动速度及其所在展向位置有关, 即

$$q[v_\infty, \beta(t), l] = \frac{1}{2} \rho |v|^2 = \frac{1}{2} \rho |v_\infty + v_t|^2 \quad (9)$$

其中实际速度 v 是平飞速度 v_∞ 和扑翼相对空气运动速度 v_t 的矢量叠加, 扑翼运动速度 v_t 为

$$v_t[\beta(t), l] = \omega[\beta(t), l] l \quad (10)$$

其中扑动角度 $\beta(t)$ 需根据多段变体扑翼机构模型分成内外两段计算。若曲柄输出角速度为 ω_0 , 根据图 5 和图 6 所示的扑翼机构, 内外段扑翼的扑动角速度 $\omega[\beta(t), l]$ 为

$$\omega[\beta(t), l] = \begin{cases} \omega_0 \left[\frac{l_4 \sin \phi_1 - l_3 \sin(\phi_3 - \phi_1)}{l_4 \sin \phi_3 - l_1 \sin(\phi_3 - \phi_1)} \right] \left[\frac{l_1}{l_3} \right] & (0 < l \leq b_1) \\ -\frac{\partial \omega_0}{\partial t} l \left[\frac{l_6 \cos(\phi_2 + \phi_4) - l_0 \cos \phi_4}{l_5 \cos(\phi_2 + \phi_4) + l_0 \sin \phi_2} \right] \left[\frac{l_5}{l_6} \right] & (b_1 < l \leq b_2) \end{cases} \quad (11)$$

扑翼微段的气动特性与其翼型密切相关。为提高扑翼气动性能^[13], 本文依据风洞试验结果^[14], 为多段柔性变体扑翼选取如图 8 所示的大弯度凹凸翼型, 该翼型前部较厚、弯度较大, 在扑翼上性能优良。



图 8 多段柔性变体扑翼翼型

Fig. 8 Airfoil of the multisection flexible morphing wing

运用 xfoil 软件计算该翼型在不同迎角下的升力系数和阻力系数, 拟合为关于迎角的函数, 其升力系数和阻力系数曲线如图 9 所示。

2.3.2 升力计算

将各参数代入前文建立的气动模型, 即可计

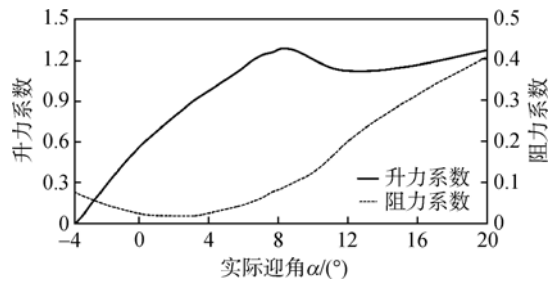


图 9 翼型的气动力系数曲线

Fig. 9 Aerodynamic coefficient curves of the airfoil

算得到多段变体柔性扑翼的升力和推力。

空气密度 $\rho = 1.29 \text{ g/m}^3$, 设计平飞速度 $|v_\infty| = 5 \text{ m/s}$, 扑翼安装角 $\alpha_0 = 5^\circ$, 以及其他几何和扑动运动参数, 如 $\omega_0 = 4\pi \text{ rad/s}$ (即扑动频率为 2 Hz, 扑动周期为 0.5 s)。输出一个扑动周期内的扑动角度 $\beta(t)$ 变化曲线 (图 10) 和升力变化曲线 (图 11)。

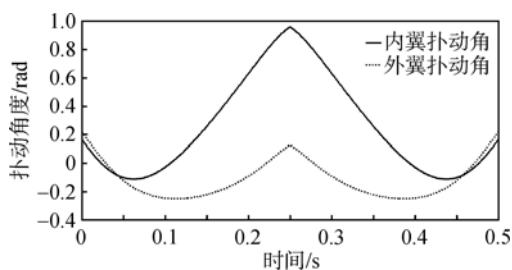


图10 一个扑动周期内的扑动角度变化

Fig. 10 Time history of flapping angle during one flapping cycle

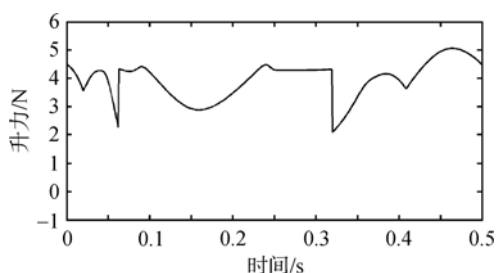


图11 一个扑动周期内的升力变化

Fig. 11 Time history of lift during one flapping cycle

在一个扑动周期内,升力在 2~5 N 变化,平均升力 $L=3.85$ N. 自然界中海鸥体重为 300~500 g,设计扑翼的平均升力大于一部分成年海鸥的重力,依据计算所得确定扑翼飞行器设计质量为 385 g,当扑动频率为 2 Hz 时可在静空维持高度.

2.3.3 推力计算

输出一个扑动周期内的平均推力变化曲线如图 12 所示.

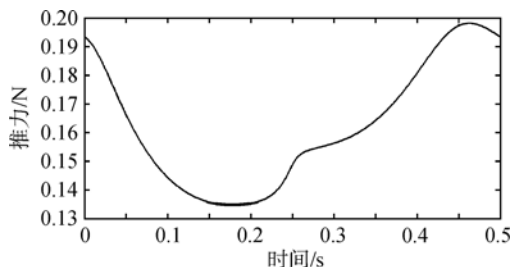


图12 一个扑动周期内的推力变化

Fig. 12 Time history of thrust during one flapping cycle

在一个扑动周期内,推力在 0.13~0.20 N 变化,平均推力 $T=0.16$ N;由于扑翼推力计算已经包含扑翼阻力的部分,故此处得到的推力实际为扑翼的净推力.再额外考虑机身部分的阻力为

$$D_{\text{body}} = \frac{1}{2} \rho |v|^2 C_d S \quad (12)$$

设计机身迎风面积 $S=0.09 \text{ m}^2$,机身阻力系数 $C_d=0.11^{[15]}$,在平飞速度 $|v_\infty|=5 \text{ m/s}$ 的情况下,机身阻力为 $D_{\text{body}}=0.16 \text{ N}$,和扑翼产生的平均推力大小相当,因此扑动频率 2 Hz 时可在静空匀速平飞.

2.4 机构参数优化

优化扑翼机构中各连杆长度使得升力最大.分析图 5,ABCD 曲柄摇杆机构控制内段扑翼的幅度和角度,DEGH 四连杆机构控制外段扑翼的幅度和角度.近年来对单段扑翼幅度和角度的研究较为成熟,依此确定内段扑翼机构 ABCD 中各连杆长度.对外段扑翼优化,即对 DEGH 四连杆机构分析,DE 与 GH 均为较长的主桁条,EH 起支撑作用,均对外段扑动角影响不大,DG 较短,对外端扑翼起主要影响,根据前一节的气动模型,可计算出 DG 的长度变化对升力 L 的影响如图 13 所示.

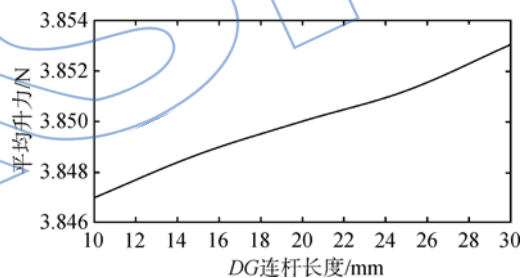


图13 扑翼平均升力随 DG 连杆长度变化

Fig. 13 Time averaged lift of flapping wings vs. the length of DG

随着 DG 连杆变长,平均升力略微增大.分析图 5 可知,随着 DG 连杆长度变大,扑翼折弯角变大,即多段扑翼相较于单段扑翼可以增加升力.至此可确定多段柔性变体扑翼飞行器参数如表 1 所示,其中 f 为扑动频率, G 为设计重力, L 为平均升力, D 为平均阻力, T 为平均推力.

表1 扑翼飞行器参数

Table 1 Parameter of this ornithopter

f/Hz	G/N	L/N	D/N	T/N
2	3.85	3.85	0.16	0.16

3 多段柔性变体扑翼飞行器设计

运用几何建模软件建立多段柔性变体扑翼飞

行器的三维结构模型如图 14 所示。

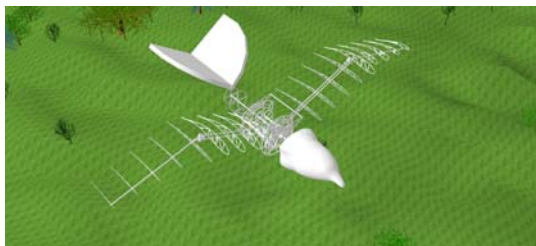


图 14 电子样机

Fig. 14 Virtual prototype

运用仿真软件对该扑翼机建立运动仿真模型,仿真过程显示,如图 15 所示,电动机经过减速齿轮组,由两组曲柄摇杆机构带动扑翼整体扑动、折弯变体、弦向扭转。运动仿真表明“扑动-折弯-扭转”协调工作的机构可以很好地模仿出海鸥翅膀的复杂运动。

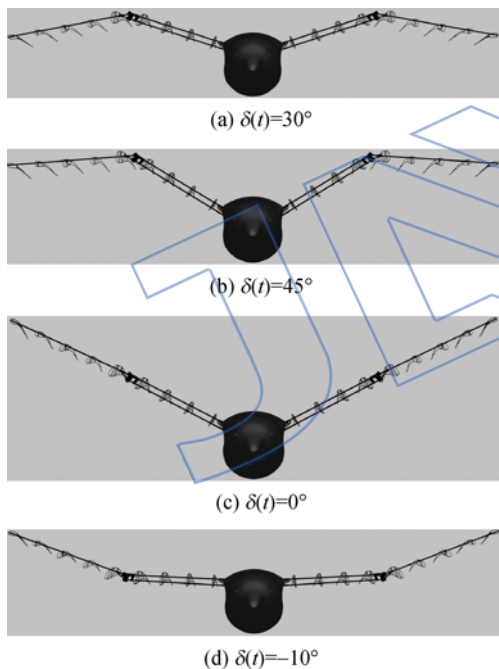


图 15 不同折弯角的运动模拟

Fig. 15 Motion simulation at different fold degrees

4 飞行试验

依据表 1 参数制作试验机,进行飞行试验。多段柔性变体扑翼飞行器的骨架由碳纤维材料和 POM(聚甲醛树脂)塑料加工而成,调整碳纤维骨架的结构即可改变扑翼的柔性,在扑翼骨架上的安装一层盘鹰风筝无纺布。动力装置采用外转子无刷直流电动机,电动机经过齿轮组减速,由曲柄

摇杆机构分别带动两侧扑翼扑动和折弯变体。柔性扑翼上下扑动的过程中,依靠惯性力扭转特定的角度。其扑动频率由电动机调速器控制,变化范围是 0~3 Hz。扑翼飞行器尾翼采用 V 型尾翼构型,呈上反角,夹角为 110°。每个尾翼上装有一个舵面,分别由一个伺服器驱动偏转,协同工作实现升降舵和方向舵功能。多段柔性变体扑翼飞行器由手抛掷出完成起飞(图 16)。

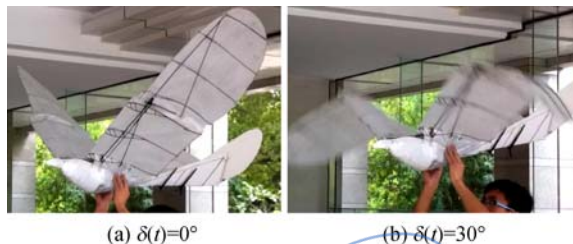


图 16 多段柔性变体扑翼飞行器

Fig. 16 Ornithopter with multisection flexible morphing wing

飞行试验中,该多段柔性变体扑翼飞行器总质量为 385 g(包含电池),可以以 2 Hz 的扑动频率在室内定直平飞(图 17)。



图 17 扑翼飞行器在室内维持水平飞行

Fig. 17 Ornithopter sustains level flight in the indoor flight test

飞行视频中,室内平飞距离为 12 m,多段柔性变体扑翼飞行器所用飞行时间为 2.5 s,与设计静空飞行速度吻合。飞行过程中,机身没有出现明显晃动,基本保持同一攻角。多段柔性变体扑翼飞行器(翼展为 2.2 m,质量为 385 g)选用 X2206 外转子无刷电动机,平飞功率为 35 W;在售的“翼龙”常规单段扑翼飞行器(翼展为 1.3 m,质量为 400 g)平飞功率为 45 W。可知多段柔性变体扑翼飞行器能耗较低。

随后进行室外飞行、爬升、偏航试验(图 18),可以操纵控制飞行轨迹。



图 18 扑翼飞行器在室外爬升,向右偏航

Fig. 18 Ornithopter climbs and turns right during the outdoor flight test

5 结 论

本文用新的扑动模型反映海鸥翅膀“扑动-折弯-扭转”复杂运动,并建立准定常方法计算多段柔性变体扑翼的气动力,在此基础上设计研制多段柔性变体扑翼飞行器试验机。

所设计的扑动机构可以实现扑翼柔性变体,在慢频率扑动同时折弯扭转。飞行试验验证了气动力计算结果的合理性,多段柔性变体扑翼飞行器完成平飞、爬升、偏航等动作,扑动频率慢,仿生性强,能耗更低。

参考文献:

- [1] 昂海松. 微型飞行器设计导论[M]. 西安:西北工业大学出版社,2012.
- [2] Jones K D. A collaborative numerical and experimental investigation of flapping-wing propulsion [R]. AIAA 2002-0706,2002.
- [3] Ho S,Nassef H,Pornsinsirak N,et al. Unsteady aerodynamics and flow control for flapping wing flyers[J]. Progress in Aerospace Sciences,2003,39(8):635-681.
- [4] Pornsin-Sirirak T N,Tai Y C,Ho C M,et al. Microbat: a palm-sized electrically powered ornithopter[C]//Proceedings of NASA/JPL Workshop on Biomimetic Robotics. Pasadena,CA:[s. n.],2001:14-17.
- [5] 曾锐. 仿鸟微型扑翼飞行器的气动特性研究[D]. 南京:南京航空航天大学,2004.
ZENG Rui. Aerodynamic of flapping-wing MAV simulating bird flight [D]. Nanjing:Nanjing University of Aeronautics and Astronautics,2004. (in Chinese)
- [6] 张亚锋,宋笔锋,袁昌盛,等. 微型扑翼飞行器推力特性试验[J]. 航空动力学报,2007,22(12):2078-2082.
ZHANG Yafeng, SONG Bifeng, YUAN Changsheng, et al. Experimental investigation of propulsion characteristic of flapping-wing MAV[J]. Journal of Aerospace Power, 2007,22(12):2078-2082. (in Chinese)
- [7] Tummala Y,Frecker M,Wissa A,et al. Design of a passively morphing ornithopter wing using a novel compliant spine[C]//Proceedings of the ASME Conference on Smart Materials, Adaptive Structures and Intelligent Systems (SMASIS2010). Philadelphia,Pennsylvania,USA:[s. n.], 2010:703-713.
- [8] Wissa A A,Tummala Y,Hubbard J E,Jr,et al. Passively morphing ornithopter wings constructed using a novel compliant spine: design and testing [J]. Smart Materials and Structures,2012,21(9):094028. 1-094028. 10.
- [9] Wong B. New robot designs are for the birds[J]. Electronic Design,2011,59(6):14.
- [10] David Greenfield. Seagulls and systems design innovation [J]. Design News,2011,66(5):13.
- [11] 段文博,昂海松,肖天航,等. 主动变形扑翼飞行器的设计和风洞测力试验研究[J]. 航空学报,2013,34(3):474-486.
DUAN Wenbo, ANG Haisong, XIAO Tianhang. Design and wind tunnel testing of an active morphing wing ornithopter [J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2013,34(3):474-486. (in Chinese)
- [12] 昂海松,曾锐,段文博,等. 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[J]. 航空动力学报,2007,22(11):1938-1845.
ANG Haisong, ZENG Rui, DUAN Wenbo, et al. Aerodynamic experimental investigation for mechanism of lift and thrust of flexible flapping-wing MAV [J]. Journal of Aerospace Power,2007,22(11):1938-1845. (in Chinese)
- [13] 谢辉,宋文萍,宋笔锋. 基于 CFD 方法对微型扑翼翼型设计的研究[J]. 空气动力学学报,2009,27(2):227-233.
XIE Hui, SONG Wenping, SONG Bifeng. Airfoil design of a micro-flapping wing based on CFD [J]. Acta Aerodynamica Sinica,2009,27(2):227-233. (in Chinese)
- [14] Lee J S,Han J H. Experimental study on the flight dynamics of a bioinspired ornithopter: free flight testing and wind tunnel testing [J]. Smart Materials and Structures,2012,21(9):094023. 1-094023. 12.
- [15] 叶军科,宋笔锋,宋文萍,等. 扑动翼型的低雷诺数气动特性分析[J]. 空气动力学学报,2007,25(1):104-109.
YE Junke, SONG Bifeng, SONG Wenping, et al. Aerodynamic characteristics of flapping airfoils at low Reynolds number [J]. Acta Aerodynamica Sinica,2007,25(1):104-109. (in Chinese)

(编辑:秦理曼)