

文章编号:1000-8055(2010)01-0114-09

仿蝇飞行器性能分析及参数优化

胡明朗, 魏瑞轩, 宋 敏, 李 霞, 郭 庆, 刘 月
(空军工程大学 工程学院, 西安 710038)

摘 要: 采用改进的准定常气动力和能耗估算方法,对仿蝇布局微型飞行器的结构参数和运动学参数进行了优化,估算了不同尺度样例飞行器的气动力和能耗.结果表明:①仿蝇气动布局更加适合厘米级、毫米级的飞行器,翼展大于 3.75 cm 时,其性能相对于同尺度的常规布局飞行器不再有优势.②仿蝇布局飞行器的最优运动学参数为:对称转动模式的转动周期为 $0.2T \sim 0.25T$;扑动加减速周期为 $0.15T \sim 0.2T$;平动迎角取值范围 $25^\circ \sim 30^\circ$.增大扑动幅度可以降低扑动频率,但低扑动频率不能产生足够升力时,要减小扑动幅度,增大扑动频率.

关 键 词: 昆虫飞行;扑翼飞行器;气动力;惯性力;振翅运动参数

中图分类号: V212

文献标识码: A

Performance analysis and parameters optimization of fly-like aircraft

HU Ming-lang, WEI Rui-xuan, SONG Min, LI Xia, GUO Qing, LIU Yue
(The Engineering Institute, Air Force Engineering University, Xi'an 710038, China)

Abstract: With revised quasi-steady aerodynamic estimation and energy exhaustion methods, the fabric and kinematics parameters of fly-like aircraft were optimized. Firstly, the aerodynamic and energy exhaustion of several example fly-like aircrafts was computed with revised quasi-steady aerodynamic. And then, the minimal energy exhaustion of different flight states and longest flight time together with its optimal kinematics parameters was counted with number inserting approach. The result is as follows: 1) Fly-like aerodynamic structure is more preferable to aircraft with size of several centimeters and millimeters, but its capacity is not superior to routine structure when its wingspan is more than 3.75 centimeters. 2) The optimal kinematics parameters of fly-like aircraft are: the rotation is symmetric and its duration of flip is $0.2T \sim 0.25T$; acceleration and deceleration duration of stroke is $0.15T \sim 0.2T$; mid-stroke angle of attack is $25^\circ \sim 30^\circ$; the stroke amplitude should be greater when possible, and only when current frequency couldn't render adequate lifting force can the stroke amplitude be advisably reduced for augmenting the frequency.

Key words: insect flight; flapping wing air vehicle; aerodynamic force; inertia force; stroke kinematics parameter

自然界中苍蝇等双翅目飞行昆虫具有卓越的飞行能力,它通过翅膀的快速拍动和翻转产生大的气动力,克服低雷诺数飞行工况的影响并能承受大的翼载荷.因此,研究苍蝇等昆虫的飞行方

式,并将其移植到微型飞行器(MAV),设计出机动灵活、具有大载荷携带能力的仿蝇气动布局微型飞行器(FEMAV)是一件极具诱惑力的事情.为此,科研人员作了大量工作,一方面研究昆

收稿日期:2009-01-02; 修订日期:2009-08-21

基金项目:空军工程大学工程学院优秀博士学位论文创新基金(BC08003)

作者简介:胡明朗(1983-),男,四川苍溪人,博士生,主要从事微小型飞行器控制理论与应用研究.

虫的飞行,包括观测它们的运动参数^[1],揭示它们的力能特性和原理等^[2-3];另一方面试图将研究成果应用到微型飞行器的设计,包括研究昆虫最优的运动参数^[4],设计高性能的驱动机构^[5]等。

有研究表明,采用合理的扑动方式,可有效降低昆虫扑动时消耗的能耗^[4]。但自然界中飞行昆虫的平均尺度仅仅为 3~5 mm,基于目前的集成技术和任务载荷水平,研制如此尺度的飞行昆虫还难以实现,研制 10 cm 左右的 MAV 更具可行性和实用性。大尺度(相对于昆虫自身尺度而言)FFMAV 并不是昆虫在尺度上的简单放大,上述研究成果能否直接运用于微型飞行器的设计还有待商榷。

本文采用理论模化和仿真分析手段相结合,通过分析不同尺度、不同运动参数仿蝇气动布局微型飞行器的升力、推力以及所消耗的能量等力能特性,在此基础上分析不同尺寸飞行器的性能,给出优化的设计参数和运动参数,促进微型飞行器的实用化之路。

1 研究方案

仿蝇气动布局微型飞行器的翅膀既是动力面,又是控制面,集推、举、牵引和控制等功能于一体,由于翅膀为刚性,翅膀的结构和运动方式决定了飞行器的推进效率和整体性能。为了使飞行器的气动力大、消耗的能量小,需要优化的结构和运动学参数有:飞行器质量、翅膀质量、翅膀质量分布、翅膀转动惯量、翅膀平面形状、运动学参数等。对此多参数多目标的综合优化问题,本文拟采用分层分阶段的优化策略,其总体思路为:总体结构设计→运动参数确定→动态特性分析→参数优化。

首先,根据期望的翼展、质量或者性能指标,定义多架仿蝇式微型飞行器,并称之为“样例飞行器”。初步确定样例飞行器的参考参数,如参考质量、翅膀几何和结构参数等(由于未考虑配平和能耗,这些参数将根据后续飞行进行逐次修正)。

然后,根据仿蝇气动布局的翅膀运动学参数(扑动频率、扑动幅度、扑动加减速周期、转动周期、转动开始时刻、无因次转动轴等)的调整范围,确定样例飞行器运动学参数集合 C。

接着,采用修正的准定常计算模型估算样例飞行器采用 C 中扑动模式时产生的气动力、惯性和能耗;计算样例飞行器携带不同载荷、不同飞行模式时所消耗的能量;根据驱动机构的额定功

率计算最大气动力,能携带的最大载荷,以及飞行器所携带电池的容量和飞行时间。

最终,确定仿蝇式布局微型飞行器的最优结构设计参数和翅膀运动学参数。

1.1 样例飞行器结构设计

在几何相似性前提下,可以通过量纲分析把样例飞行器有关的不同物理量联系起来^[6]。例如样例飞行器的质量、翼面积、转动惯量和扑动频率。

蝇虽然可作为设计仿蝇扑翼飞行器的原始依据,但需要注意的是,微型飞行器的尺度律与飞行昆虫的尺度律并不完全吻合,需要参照现有的技术水平和期望指标设计样例飞行器的参数。

1.1.1 翅膀参数设计

从生物合理性出发,初步设定样例飞行器翅膀具有和果蝇翅膀相同的平面形状和质量分布。果蝇翅膀的无因次弦长为^[7]

$$\hat{c}(\hat{r}) = 3.2 k \hat{r}^{0.75} (1 - \hat{r})^{0.5} \tag{1}$$

式中 $\hat{c}(\hat{r}) = c(\hat{r})/\bar{c}$ 为翅膀在无因次展向位置 $\hat{r} = r/R$ 处的无因次弦长; k 为翅膀的宽度系数。根据上式计算得到翅膀的二次无因次表面惯性矩

$$\hat{I}_2^s = \int_0^1 \hat{c}(\hat{r}) \hat{r}^2 d\hat{r} \tag{2}$$

翅膀的平均空气动力学弦长

$$c_a = \bar{c} \int_0^1 \hat{c}^2(\hat{r}) d\hat{r} \tag{3}$$

翅膀的无因次转动弦长

$$\hat{c}_r = \frac{\bar{c} \int_0^1 \hat{c}^2(\hat{r}) \hat{r} d\hat{r}}{\hat{I}_2^{Cmax}} \tag{4}$$

一般昆虫 $\hat{r}_2 \in [0.6, 0.7]$, $\hat{c}_r \in [0.5, 0.75]$;果蝇 k 为 1,计算得 $\hat{r}_2 = 0.596$, $\hat{c}_r = 0.65$ 。

翅膀的密度 $\rho(c_i, r_i)$ (根据文献[8]中图 1 进行拟合所得)为^[8]

$$\rho(\hat{c}, \hat{r}) = 8.8 \frac{m_w}{S} e^{-2.63(\hat{r} + \hat{c})} \tag{5}$$

式中 S 为翅膀面积; $\hat{r} = r_i/R$ 和 $\hat{c} = c_i/\bar{c}$ 分别为翅膀无因次展向和弦向位置; m_w 为翅膀质量,根据现有的技术条件,翼展 R 翅膀的最小质量为

$$m_w = m_{w0} (R/R_0)^3 \tag{6}$$

式中 $R_0 = 15\text{ mm}$ 和 $m_{w0} = 0.3\text{ mg}$ 为 Harvard 大学微机械飞行昆虫(MFI)翅膀的翼展和质量^[5],它代表了现有技术条件下的最高水平。

进而计算仿蝇布局飞行器翅膀的转动惯量和转动积(目前仅考虑翅膀绕机体方位轴和翅膀展向轴的两个转动自由度).

1. 1. 2 机体参数设计

样例飞行器机体部分包含机身、动力、能源、电子元件和载荷等. 在考虑工艺、加工和技术的制约下,估算这些部件的质量,进而计算飞行器的最大功率、电池容量,最终得到飞行时间和载荷.

飞行器质量 m 是这些量的参考,根据尺度律假设,翼展 R 的样例飞行器的参考质量 m 为

$$m = m_0 (R / R_0)^3 \tag{7}$$

式中参考翼展 $R_0 = 3.75\text{ cm}$ 和参考质量 $m_0 = 8\text{ g}$ 分别是研究人员基于现有技术水平和应用需求所提出的技术指标^[9]. 现阶段所研究的 MAV 和 NAV(nano air vechicle)的最大尺度分别为 15 cm 和 7.6 cm ,但科学家经过论证,室内侦察微型飞行器的最佳尺度为 15 mm ,因此本文以尺度为 $1.5\sim 15\text{ cm}$ 的仿蝇布局微型飞行器为研究对象;每个尺度,样例飞行器的质量取为 $0.25\sim 2\text{ m}$ (m 是计算得到的样例飞行器尺度律参考质量). 综上所述,建立样例飞行器 $\text{YFi} \times j$,其中 $i = 1, 2, 3, 4, 5$ 分别表示翼展为 $1.5, 3, 5, 7.5, 15\text{ cm}$, $j = 0.25, 0.5, 0.75, 1, 1.25, 1.5, 1.75, 2$ 表示质量等于尺

度律参考质量 m 的 j 倍.

目前,研制的 MAV 样机的能源 + 动力系统占总质量的比重约 $50\% \sim 75\%$ ^[5,10] (见表 1).

表 1 飞行器机体的质量分布
Table 1 Mass distribution of the aircraft

飞行器	总质量/ g	动力源		驱动装置	
		质量/ g	质量比/ %	质量/ g	质量比/ %
Kolibri	216	132	61	37	17
Micro Star	85	44.5	52.4	13.5	16
Black Widow	60	26	43.3	11	18.3
MicroBat	12.5	4.8	38.4	2.8	22.4
Harvard MFI	0.12	0.05	41.7	0.034	28.3

根据表 1 中数据,基于统计学规律设定样例飞行器的能源 + 动力质量为总质量的 70% .

考虑到目前的实际情况^[5],样例飞行器的动力源为电力驱动,能量转换效率 $\eta = 0.5$,电池能量密度为 $450\text{ W} \cdot \text{h} / \text{kg}$,高效驱动装置的功率密度为 $450\text{ W} / \text{kg}$.

部分样例飞行器的参数如表 2 所示.

表 2 部分样例飞行器尺度律参考参数
Table 2 Scaling reference parameters of some example aircraft

样例飞行器	R / cm	n / Hz	S / cm^2	m / g	m_w / g	$J_x / (\text{g} \cdot \text{cm}^2)$	$J_y / (\text{g} \cdot \text{cm}^2)$	$J_z / (\text{g} \cdot \text{cm}^2)$	$J_{xy} / (\text{g} \cdot \text{cm}^2)$
YF1 $\times$ 1	0.75	100~250	0.181	0.064	3.8×10^{-5}	4.9×10^{-6}	3.6×10^{-7}	5.3×10^{-6}	2.4×10^{-7}
YF2 $\times$ 1	1.5	50~200	0.725	0.512	3.1×10^{-4}	1.6×10^{-4}	1.2×10^{-5}	1.7×10^{-4}	7.6×10^{-6}
YF3 $\times$ 1	2.5	30~150	2.014	2.37	1.4×10^{-3}	2.0×10^{-3}	1.5×10^{-2}	2.2×10^{-3}	9.7×10^{-5}
YF4 $\times$ 1	3.75	20~120	4.53	8	4.8×10^{-3}	1.5×10^{-2}	1.1×10^{-3}	1.7×10^{-2}	7.4×10^{-4}
YF5 $\times$ 1	7.5	10~90	18.13	64	3.8×10^{-2}	4.9×10^{-1}	3.6×10^{-2}	5.3×10^{-1}	2.4×10^{-2}

上述分析通过简便方法确定了样例飞行器的参数,但这种方法不是总能正确预测参数间的关系,这些数据将通过后续的理论分析和试验结果进行修正.

1. 2 运动学参数设定

本文研究的仿蝇布局扑翼飞行器,翅膀具有扑动和转动两个自由度,且不考虑翅膀驱动机构的限制. 飞行器的扑动幅度能达到 180° ,且扑动加速周期和扑动幅度可调;飞行器的平动迎角能到达 $\pm 90^\circ$,且转动时刻、转动周期和平动迎角

可调.

扑动幅度 Φ 在 $60^\circ \sim 180^\circ$ 之间每隔 15° 取值;扑动加减速周期 Δt_t 在 $0.1T \sim 0.5T$ 之间每隔 $0.05T$ 取值 (T 为扑动周期);翅膀平动迎角 α 在 $0^\circ \sim 90^\circ$ 之间每隔 11° 取值;转动周期 Δt_r 在 $0.1T \sim 0.5T$ 之间每隔 $0.05T$ 取值;转动时刻 t_r 在 $-0.5\Delta t_r \sim 0\Delta t_r$ 之间每隔 $0.06\Delta t_r$ 取值 (令翻转转动时刻 $t_t = t_r + 0.5\Delta t_r$, $t_t < 0$ 表示提前翻转, $t_t > 0$ 表示滞后翻转);扑动频率在每隔 10 Hz 取值.

根据上述设定,每个样例飞行器在给定频率,都有 8^5 组扑动模式,这些扑动模式组成飞行器的运动学参数集合 C ,用于飞行器的气动力和能耗计算。

1.3 能耗计算

悬停理想情况下,忽略飞行昆虫高度的变化,昆虫在飞行过程中的能耗主要用于产生气动力和克服翅膀高频扑动的惯性力,因此飞行过程中的能耗 P 可表示为

$$P = (P_a + P_i) / \eta \quad (8)$$

式中 η 为昆虫的机械转换效率; P_a 为产生气动力的能耗; P_i 为克服惯性力的能耗。

飞行器大部分时间是“推动”而不是“刹住”翅膀,但这种情况是可能的,例如超前翻转捕捉尾迹时的气动力做功和拍动减速阶段的翅膀惯性力做功。一般认为,肌肉作负功约为对应正功的 5%,本文保守估计,飞行器作负功消耗 10% 的等值正功的能量。本文采用的坐标系、惯性力及其能耗计算式的详细推导过程可以参见文献[11]。

算例如下:

果蝇 *Drosophila Virilis* 体积很小,但天生健壮,其相关数据如下^[12]:质量 $2 \times 10^{-3} \text{ g}$,翅膀质量(单) $2.4 \times 10^{-6} \text{ g}$,翼展 3 mm ,双翼面积 0.058 cm^2 ,平均弦长 0.97 mm ,最大弦长 1.5 mm ,拍动频率 195 Hz ,拍动幅度 150° ,单位质量的新陈代谢率为 $P^* = 501.6 \text{ J} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$ 。

采用 1.1 节中的计算方法,可计算得翅膀拍动转动惯量 $J_x = 4.93 \times 10^{-8} \text{ g} \cdot \text{cm}^2$, $J_y = 3.64 \times 10^{-9} \text{ g} \cdot \text{cm}^2$, $J_z = 5.29 \times 10^{-8} \text{ g} \cdot \text{cm}^2$, $J_{xy} = 2.36 \times 10^{-9} \text{ g} \cdot \text{cm}^2$ (Vogel 测量得^[12] $J_x = 5.0 \times 10^{-8} \text{ g} \cdot \text{cm}^2$)。

结果表明, *Drosophila Virilis* 采用对称转动模式、拍动周期 $\Delta t = 0.2 T$ 、转动周期 $\Delta t_r = 0.2 T$ 、拍动频率 195 Hz 、拍动幅度 $\Phi = 150^\circ$ 时,平衡重力所需的平动迎角为 36° ,与观测值相吻合(昆虫悬停的平动迎角的观测值为 35°)^[11]。

结果表明,悬停时昆虫的机械功为 $P = 7.571 \times 10^{-5} \text{ W}$, *Drosophila Virilis* 的机械转化效率为

$$\eta = \frac{\text{比功率}}{\text{单位质量新陈代谢率}} = \frac{P/m}{P^*} = 27.12\% \quad (9)$$

本文中 P^* 是系留飞行时昆虫的新陈代谢率,它小于自由飞行时昆虫的新陈代谢率,因此计

算的机械转化效率略大于测量值(测量值为 24% ^[13])和数值模拟值(数值模拟值为 $20.9\% \sim 26.6\%$ ^[11])。

以上计算结果验证了本文气动力和能耗计算方法的合理性。

1.4 动态特性分析

扑翼飞行器的动态特性过程包括:计算给定飞行状态的最小能耗—计算动力装置与电池的质量—计算电池容量—计算飞行时间。

1.4.1 飞行器的飞行状态

仿昆飞行器具有无载荷悬停与巡航,有载荷悬停与巡航等多种飞行状态。为了简化问题,本文进行如下考虑:

1) 昆虫前飞时,平均扑动平面前倾产生向前的气动力分量 f_x 抵消阻力,此时产生的扑动气动力合力为 $F = \sqrt{(mg)^2 + f_x^2}$ 。本文基于能耗消耗角度,将飞行器前飞考虑为负载悬停飞行,虚拟负载的质量为 $F - mg$ 。

2) 孙茂教授等人的研究表明,昆虫巡航前飞时的能耗是一个 J 形曲线:低速和中速前飞时,能耗等于或略小于悬停时的能耗;高速前飞时,能耗比悬停时能耗大。因此将飞行器的巡航划分为低/中速巡航和高速巡航,其中低速/中速飞行状态与悬停状态相同,高速巡航状态等价于携带 20% 自身质量的悬停飞行。

3) 飞行器的设计指标为能够携带相当于 20% 自身质量的载荷。

综上,将飞行器的飞行状态统筹为如下 3 种飞行状态:

1) 状态 1 无载荷悬停或低/中速无载荷巡航,飞行器产生维持自身的气动力,即 $F = mg$ 。

2) 状态 2 载荷悬停、低/中速载荷巡航或高速无载荷巡航,飞行器产生 1.2 倍自身质量的气动力,即 $F = 1.2 mg$ 。

3) 状态 3 高速载荷巡航,此时飞行器产生 1.4 倍自身质量的气动力,即 $F = 1.4 mg$ 。

1.4.2 给定飞行状态飞行器的最小能耗计算

只有扑翼飞行器的扑动频率等于共振频率时,才可显著提高飞行器的能耗特性。因此,计算飞行状态的最小能耗必须考虑到这个扑动频率约束,方法是计算样例飞行器在每个频率点时飞行器的最小能耗和最长飞行时间,最后选择能耗最小的扑动频率作为样例飞行器的共振频率。

样例飞行器在给定频率 n_i ,对应的运动学参

数集 C_{n_i} 中包含了 5 个可调的运动学参数 ($t_r, \Delta t_r, \Delta t_t, \Phi, \alpha$), 共 8^5 个不同的扑动模式. 由于运动学参数集是间隔取值的, 因此它不可能包含所有产生期望气动力 f_d 的所有扑动模式, 本文采用插值法解决这个问题.

本文采用单维插值确定产生期望气动力的扑动模式. 首先, 将 C_{n_i} 按照如下方式进行排序

$$C_{n_i}^a: t_r \rightarrow \Delta t_r \rightarrow \Delta t_t \rightarrow \Phi \rightarrow \alpha \quad (10)$$

其中 $x \rightarrow y$ 表示 x 每取值, y 在区间取值, 这意味着 $C_{n_i}^a$ 表示 α 在 $0^\circ \sim 90^\circ$ 取值时, 其他运动学参数为常数. $C_{n_i}^a$ 产生的气动力为 f_{n_i} , 只要

$$[f(k-1) - f_d][f(k) - f_d] < 0, \quad k=2, \dots, 32768$$

那么 $C[k-1, k]$ 之间必存在一个气动力为 f_d 的扑动模式. 采用牛顿插值法, 可计算得样例飞行器在期望气动力时的能耗. 插值结果表明插值计算结果和准定常估算的结果之间的最大误差小于 10%.

1.4.3 飞行时间计算

考虑到飞行器在载荷高速巡航时, 需要一定的气动力余度作为机动, 为此飞行器要具有能产生 1.5 倍自身重力的能力. 对于一个给定质量的

飞行器, 首先计算产生 1.5 倍气动力所需要s的最小能耗 $P_{\min}|_{F=1.5mg}$ (W), 从而确定动力装置的质量

$$m_a = \frac{P_{\min}|_{F=1.5mg}}{0.45} \quad (\text{单位 g}) \quad (11)$$

则电池的容量为

$$C_c = 0.45(0.7m - m_a) \quad (\text{单位 W} \cdot \text{h}) \quad (12)$$

其中 m 为样例飞行器质量. 据此可计算得飞行器在不同状态下的飞行时间为

$$t_{\max}|_{F=Xmg} = \frac{C_c}{P_{\min}|_{F=Xmg}} \times \eta \quad (\text{单位 h}) \quad (13)$$

式中 $X=1, 1.2, 1.4$ 分别表示 3 种飞行状态, η 为机械转换效率.

2 设计计算结果与分析

2.1 参数变化时气动力和能耗变化

图 1(a)~(f) 是 YF1 ×1 典型扑动模式情况下 ($\Delta t_t = 0.2T, \Delta t_r = 0.2T, t_r = -0.1\Delta t_r, n = 195 \text{ Hz}, \Phi = 150^\circ, \alpha_m = 35^\circ$), 某一运动学参数变化时, 相应的气动力和能耗变化. 图 1(g)~(i) 是翅膀的几何参数变化时的气动力和能耗变化.

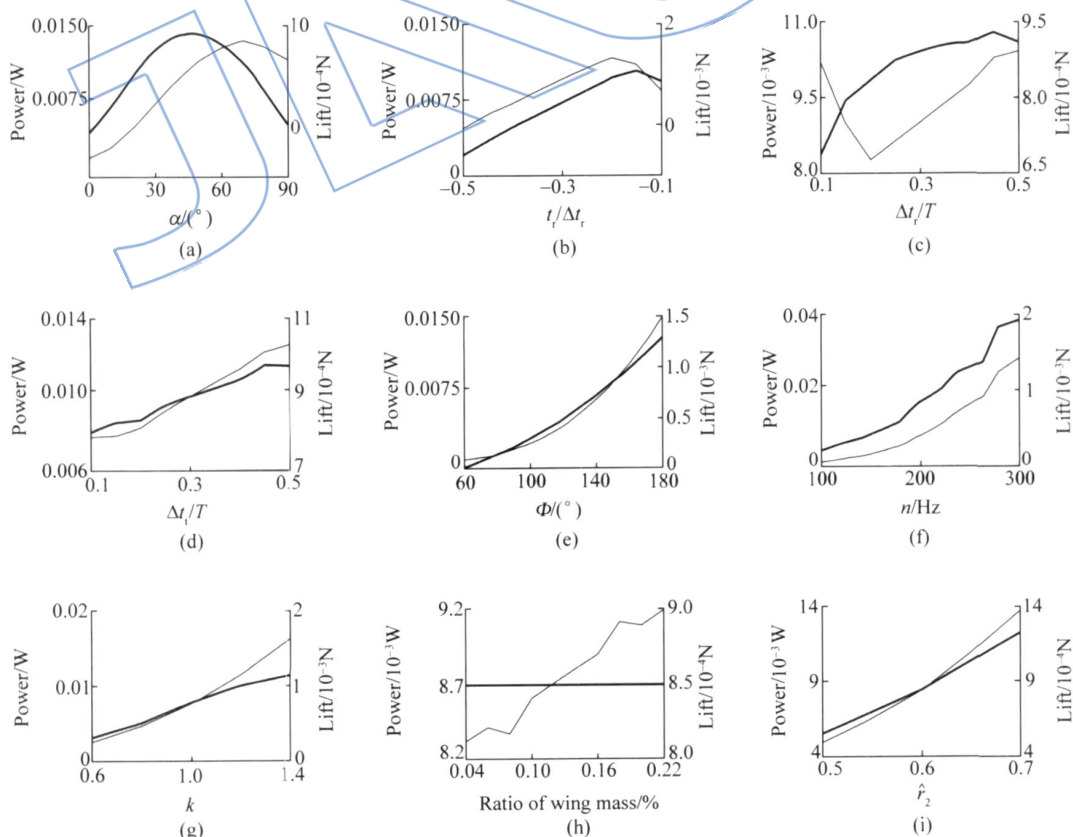


图 1 运动参数变化时力和能耗的变化

Fig.1 Lift and energy consumption change with the kinematic parameters

图 1 中,能耗和气动力随 $\Delta t_r, m_w$ 的变化较为特殊:

如图 1(c)所示,气动力随 Δt_r 的增大而增大,而 $\Delta t_r = 0.2T$ 时消耗的能量最小.这意味这快速转动机制作用的时间越长,产生的气动力越大,但气动力能耗也更大;对称转动模式时,消耗的能量最小(本扑动模式 $t_r = 0.1\Delta t_r$).

图 1(h)表明翅膀质量增加时,气动力不变,但消耗了更多的能量.这是因为翅膀质量增加时惯性能耗增加,因此要尽可能的降低翅膀的质量.

图 1 还表明其他参数变化时,能耗随升力的增加有明显的上升趋势,虽然变化的方式不完全相同:

图 1(a)表明平动迎角 $\alpha = 0$ 时产生的气动力和消耗的能量都小,这是由于平挥过程产生的气动力为 0,对称转动产生的气动力几乎为 0; $\alpha = 45^\circ$ 时,气动力达到最大; $\alpha = 60^\circ$ 时,消耗的能量达到最大,但产生升力已经减小; $\alpha = 90^\circ$ 时,平挥过程和转动机制产生的升力都为 0,能耗较大,但用来克服气动阻力.

图 1(b)表明 $t_r \leq -0.2\Delta t_r$ 时,气动力和能耗随 t_r 同步增加. $t_r \leq -0.2\Delta t_r$ 意味着转动全部在上一个平挥过程中完成($\Delta t_r = 0.2T$),转动过程中翅膀产生的力为负值,气动力作负功,因此力和力矩都很小;当 t_r 增大时,翅膀产生的负力和负功都减小,因此气动力和能耗逐渐增大,直至 $t_r = -0.2\Delta t_r$ 时能耗最大.当 $-0.2\Delta t_r < t_r \leq 0.1\Delta t_r$ 时,为超前转动模式,气动力在此区间取得最大值,而能耗则逐渐减小.

图 1(d)表明, Δt_r 增加时,能耗和气动力都同时增加.

图 1(e)中,扑动幅度 Φ 从 $60^\circ \sim 120^\circ$ 时,气动力随 Φ 增大的速度大于能耗增加的速度;而从 $120^\circ \sim 180^\circ$,能耗随 Φ 增大的速度大于气动力增加的速度.

图 1(f)中,扑动频率 n 增大时,气动力每增加一倍,相应的能耗约增大两倍,远远高于其他参数变化时能耗随气动力变化的速度.

图 1(g)表明 k 增大时,气动力和能耗同时增大. $k < 1$ 时气动力和能耗几乎都成线性增加; $k > 1$ 时能耗的增大速率加快,而气动力增加的速率放缓.

图 1(i)表明 $\hat{\alpha}_2$ 增大时,气动力和能耗同时增大.

根据图 1,可以得到如下几点推论:

- 1) 飞行过程中,采用对称扑动模式,可有效降低飞行器的能耗;
- 2) 尽可能的降低样例飞行器翅膀的质量;
- 3) 虽然 $\alpha, t_r, k, n, \Phi, \Delta t_r, \hat{\alpha}_2$ 等参数变化时,能耗随升力的增加有明显的上升趋势,但增加 n 和 $k(k > 1)$ 提高升力,会带来更大的能耗为代价.因此合理的运动学参数应取 $k = 1$,同时增大 $\Phi, \hat{\alpha}_2$ 等参数值以尽可能的降低扑动频率.

上述结论,也得到后续试验结果的验证.

2.2 飞行器的优化设计

上述分析表明,要尽可能增大翅膀几何形状参数 k 和 $\hat{\alpha}_2$,降低 m_w .受加工条件限制,取 $m_w = 0.0006\text{ m}$, $k = 1, \hat{\alpha}_2 = 0.6$.在此基础上,根据 1 节中的分析方案,计算得到所有样例飞行器的性能.部分结果如表 3 所示.

表 3 样例飞行器性能
Table 3 Performance of example aircraft

样例飞行器	状态 1		状态 2		状态 3		动力装置		电池容量/ (W·h)	最优扑动 频率/ Hz
	能耗/ W	飞行时间/ min	能耗/ W	飞行时间/ min	能耗/ W	飞行时间/ min	最大功率/ W	质量比/ %		
YF1 ×0.25	0.0006	193.7	0.0008	149.6	0.0010	120.9	0.0011	15.28	0.016	100
YF1 ×1	0.0047	74.3	0.0061	57.8	0.0076	46.2	0.0084	29.17	0.012	170
YF1 ×2	0.0134	36.9	0.0172	28.8	0.0215	23.1	0.0238	41.32	0.008	240
YF5 ×0.25	1.9350	24.1	2.5441	18.4	3.1452	14.8	3.4835	48.38	6.23	30
YF5 ×1	15.47	-	19.983	-	25.153	-	27.6159	95.89	-	65
YF5 ×2	43.187	-	55.72	-	69.635	-	77.568	134.67	-	80

表 3 中,“-”表示样例飞行器不能起飞,其原因或是给定频率太低,不能产生足够维持重力的气动力;或是要产生期望气动力所需要的驱动装置的质量大于自身质量的 70 %.

从表 3 中可以得到如下结论:

- 1) 仿蝇布局飞行器并不满足微型飞行器尺度律,根据尺度律设计 YF1 ×1 能飞行 73 min,而 YF5 ×1 却不能飞行;
- 2) 仿蝇气动布局更适合厘米级、毫米级的飞行器:能耗方面,翼展 0.75 mm 的飞行器,单位质量的能耗为 73 W,不到固定翼飞机的一半;而翼

展 7.5cm 的飞行器,单位质量的能耗为 242 W,比常规固定翼飞机的能耗高;飞行性能方面,翼展 7.5cm 的样例飞行器 YF5 ×0.25 的飞行时间和载荷远远小于同尺度的固定翼微型飞行器“黑寡妇”.

根据所提出的微型飞行器和超微型飞行器的性能指标,我们在携带尽可能多载荷的前提下,最低飞行时间指标为 15,30,45,60 min (可浮动 ±5 %),从计算结果中选择如下几款满足设计要求的样例飞行器,其性能和最优载荷巡航运动参数分别如表 4 所示.

表 4 优化的样例飞行器结构参数和运动学参数

Table 4 Optimized structural and kinematic parameters of example aircraft

期望飞行 时间/ min	样例飞行器	实际飞行 时间/ min	翼展/ cm	载荷/ g	最优载荷巡航运动学参数						
					状态	n/ Hz	$\alpha (^\circ)$	t_r/ T	$\Delta t_r/ T$	$\Delta t_t/ T$	$\Phi (^\circ)$
60	YF1 ×0.75	58.1	0.75	0.0096	状态 1		29.35	- 0.145	0.25	0.15	146
					状态 2	150	26.42	- 0.145	0.25	0.15	163
					状态 3		23.88	- 0.145	0.25	0.15	180
	YF2 ×0.25	74.1	1.5	0.0256	状态 1		23.78	- 0.145	0.25	0.2	163
					状态 2	60	22.7	- 0.145	0.25	0.2	180
					状态 3		29.8	- 0.145	0.25	0.2	180
	YF1 ×1	46.2	0.75	0.0128	状态 1		30.43	- 0.145	0.25	0.2	146
					状态 2	170	28.12	- 0.145	0.25	0.15	163
					状态 3		24.86	- 0.145	0.25	0.2	180
45	YF2 ×0.5	43.3	1.5	0.0512	状态 1		29.63	- 0.145	0.25	0.15	146
					状态 2	90	26.72	- 0.145	0.25	0.15	163
					状态 3		23.82	- 0.145	0.25	0.2	180
	YF3 ×0.25	50.4	2.5	0.1185	状态 1		28.1	- 0.145	0.25	0.15	146
					状态 2	50	25.46	- 0.145	0.25	0.15	163
					状态 3		23.11	- 0.145	0.25	0.15	180
	YF1 ×1.5	31.8	0.75	0.0192	状态 1		30.8	- 0.145	0.25	0.15	146
					状态 2	210	27.59	- 0.145	0.25	0.15	163
					状态 3		24.47	- 0.145	0.25	0.2	180
30	YF2 ×0.75	29.3	1.5	0.0768	状态 1		30.14	- 0.145	0.25	0.15	146
					状态 2	110	26.51	- 0.145	0.25	0.2	163
					状态 3		24.13	- 0.145	0.25	0.2	180
	YF3 ×0.5	26	2.5	0.237	状态 1		28.53	- 0.145	0.25	0.2	146
					状态 2	70	25.84	- 0.145	0.25	0.2	163
					状态 3		23.5	- 0.145	0.25	0.2	180
	YF4 ×0.25	33.7	3.75	0.4	状态 1		30.51	- 0.145	0.25	0.15	146
					状态 2	40	26.77	- 0.145	0.25	0.2	163
					状态 3		24.34	- 0.145	0.25	0.2	180

						续表					
期望飞行 时间/ min	样例飞行器	实际飞行 时间/ min	翼展/ cm	载荷/ g	最优载荷巡航运动学参数						
					状态	n/ Hz	$\alpha (^\circ)$	t_r/ T	$\Delta t_r/ T$	$\Delta t_t/ T$	$\Phi (^\circ)$
15	YF1 $\times 2$	23. 1	0. 75	0. 025 6	状态 1		31. 16	- 0. 145	0. 25	0. 2	146
					状态 2	240	28. 74	- 0. 145	0. 25	0. 15	163
					状态 3		25. 8	- 0. 145	0. 25	0. 15	180
	YF2 $\times 1. 25$	15. 2	1. 5	0. 128	状态 1		30. 05	- 0. 145	0. 25	0. 2	146
					状态 2	140	27. 19	- 0. 145	0. 25	0. 2	163
					状态 3		24. 71	- 0. 145	0. 25	0. 15	180
	YF3 $\times 0. 75$	14. 9	2. 5	0. 355 5	状态 1		24. 69	- 0. 145	0. 25	0. 15	146
					状态 2	90	22. 54	- 0. 145	0. 25	0. 15	163
					状态 3		28. 64	- 0. 145	0. 25	0. 2	163
	YF4 $\times 0. 5$	14. 8	3. 75	0. 8	状态 1		24. 84	- 0. 145	0. 25	0. 15	146
					状态 2	60	22. 49	- 0. 145	0. 25	0. 2	163
					状态 3		28. 95	- 0. 145	0. 25	0. 2	163
	YF5 $\times 0. 25$	14. 8	7. 5	3. 2	状态 1		24. 56	- 0. 145	0. 25	0. 15	146
					状态 2	30	22. 19	- 0. 145	0. 25	0. 2	163
					状态 3		28. 77	- 0. 145	0. 25	0. 2	163

表 4 表明:

1) 对于一个时间限制的样例飞行器,当翼展增加时,能携带的载荷增加,其质量相对参考质量的比率下降.例如,飞行时间约 15 min 的样例飞行器分别为:YF1 $\times 2$, YF2 $\times 1. 25$, YF3 $\times 0. 75$, YF4 $\times 0. 5$, YF5 $\times 0. 25$.

2) 同一翼展的样例飞行器,质量越小,飞行时间越长,但能携带的载荷降低.

3) 飞行器的优化扑动幅度较大,状态 3 的优化扑动幅度一般为 180° ;当飞行器的质量增加时,扑动频率增大,扑动幅度减小.如 YF4 $\times 0. 25$ 的优化扑动频率 40 Hz,状态 3 的优化扑动幅度 180° ; YF4 $\times 0. 5$ 的优化扑动频率 60 Hz,状态 3 的优化扑动幅度 163° .

4) 样例飞行器在同一扑动频率下,需要较小的气动力时,优化扑动幅度减小,如 YF2 $\times 1. 25$ 状态 1 的优化扑动幅度为 146° ,状态 2 的优化扑动幅度 163° ,状态 3 的优化扑动幅度 180° .

5) 优化的转动参数为 $t_r = 0. 145\Delta t_r$, $\Delta t_r = 0. 25 T$,这是一种近似对称的扑动模式,不严格对称是由于运动学参数的取值间隔所致.

6) 优化的平动迎角取值范围为 $\alpha = 24^\circ \sim 30^\circ$.

这些结论不但证实了 2. 3 节的推论结果,同自然界中昆虫的典型运动学参数也相似,具有一

定的生物合理性.

3 结 论

本文采用了理论分析和理论模化的方法,设计多款满足不同飞行时间的仿蝇布局样例飞行器,并给出了在不同飞行状态下相应的优化结构参数和运动学参数.这些样例飞行器的尺寸,载荷各不相同,可以根据用途不同,从生存性、可靠性和经济性等综合指标,从中选择满足需求的飞行器完成设计制造.

本文研究的后续工作包括:采用更精准的模型估算悬停时的气动力和能耗;采用试验手段对本文中采用准定常气动和能耗估算计算的结果进行验证;采用多维插值算法计算产生期望气动力的扑动模式;采用多目标综合优化方法代替现有的单目标优化方法,并在参数优化过程中,考虑驱动机构在扑动幅度、转动幅度等方面的限制.

参考文献:

[1] Ellington C P. The aerodynamics of hovering insect flight III. kinematics[J]. Philosophical Transactions of the Royal Society B,1984,305 (1122) :41-78.

[2] Ellington C P,Berg C V D,Willmott A P,et al. Leading edge vortices in insect flight [J]. Nature, 1996, 384 (6610) :626-630.

- [3] Wu J H, Sun M. Unsteady aerodynamics forces of a flapping wing[J]. The Journal of Experimental Biology, 2004, 207(8) :1137-1150.
- [4] Cordon J B, Wang Z J. Energ minimizing kinematics in hovering insect flight[J]. The Journal of Fluid Mechanics, 2007, 582 :153-168.
- [5] Wood R J. Design, fabrication and analysis of a 3D of 3cm flapping wing MAV[C]// Proceeding of IEEE Conference on Intelligent Robots and System. [S.l.]: [s.n.], 2007: 1576-1581.
- [6] Shyy W, Berg M, Ljungqvist D. Flapping and flexible wings for biological and micro air vehicles[J]. Progress in Aerospace Sciences, 1999, 35 :455-506.
- [7] Sane S P. Induced airflow in flying insect I: A theoretical model of the induced flow[J]. The Journal of Experimental Biology, 2006, 209 :32-42.
- [8] Ennos A R. The inertial cause of the wing rotation in diptera[J]. The Journal of Experimental Biology, 1988, 140 (1) : 161-169.
- [9] 朱自强. 小型和微型无人机的气动特点和设计[J]. 航空学报, 2006, 27(3) :353-364.
- ZHU Ziqiang. Aerodynamic characteristics of small/ micro unmanned aerial vehicles and their shape design[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2006, 27(3) :353-364. (in Chinese)
- [10] 曲东才. 微型飞行器研制的关键技术及军事应用[J]. 飞机设计, 2007, 27(3) :46-51.
- QU Dongcai. Key technologies and military application of MAV[J]. Aircraft Design, 2007, 27(3) :46-51. (in Chinese)
- [11] Sun M, Wu J H. Aerodynamic force generation and power requirements in forward flight in a fruit fly with modeled wing motion[J]. The Journal of Experimental Biology, 2003, 206(17) :3065-3083.
- [12] Vogel S. Flight in drosophila I: Flight performance of tethered flies[J]. The Journal of Experimental Biology, 1966, 44 :567-578.
- [13] Ellington C P. The aerodynamics of hovering insect flight VI: Lift and power requirements[J]. Philosophical Transactions of the Royal Society B, 1984, 305 (1122) : 145-181.