

文章编号:1000-8055(2012)01-0129-08

熊蜂机动飞行动稳定性

朱 丹^{1,2}, 胡明朗², 王 强²

(1. 陆军航空兵学院 指挥系, 北京 101123;

2. 空军工程大学 工程学院, 西安 710038)

摘 要: 针对目前飞行昆虫的动力学特性分析仅限于定常飞行, 采用分叉分析方法研究了熊蜂的机动稳定性. 分别以俯仰角速度和偏航角速度作为参变量, 计算急停过程和急旋变向过程中各平衡点的稳定性并判断其稳定范围, 分析熊蜂在不同前飞速度时的全局稳定性. 结果表明: 熊蜂在前飞速度为 0 时进行急旋变向是全局稳定的, 偏航角速度为 $14.23 \text{ rad/s} < |r| < 23.8 \text{ rad/s}$ 具有唯一的稳定焦点, 在前飞速度为 2.5 m/s 和 4.5 m/s 时进行急旋变向是不稳定的, 这解释了飞行昆虫为何在急旋变向前降低飞行速度. 熊蜂在不同速度处的急停都不是全局稳定的, 会进入不稳定的大幅振荡, 但发散之前具有一个约为 30 个扑动周期的过渡间隙, 因此熊蜂有足够的调整时间.

关 键 词: 飞行昆虫; 动稳定性; 分叉分析法; 平衡图; 机动飞行

中图分类号: V249.1

文献标志码: A

Dynamic stability for maneuver flight of bumblebee

ZHU Dan^{1,2}, HU Ming-lang², WANG Qiang²

(1. Department of Commanding, Army Aviation Institute, Beijing 101123, China;

2. The Engineering Institute, Air Force Engineering University, Xi'an 710038, China)

Abstract: In allusion to the fact that current flight dynamic analysis of insect is limited to steady flight, the maneuver flight stability of bumblebee is analyzed with bifurcation analysis. The coupling stability of saccade and turning in maneuver flight is studied by analyzing the stability and stability field of different equilibrium point. Then get the global stability of saccade and turning at different forward speed. As the results have put it, turning at hovering is global stability and existing only and one stable focus when $14.23 \text{ rad/s} < |r| < 23.8 \text{ rad/s}$; turning at flying velocity are 2.5 m/s and 4.5 m/s is unstable, which explains why the insects are to reduce speed before turning; the bumblebee saccade at different forward speed are unstable and enter sharply unstable oscillation. However, there exists a transition time of 30 flapping period, which is enough for bumblebee to adjust.

Key words: flight insect; dynamic stability; bifurcation analysis method; equilibrium diagram; maneuver flight

近几年由于研究微型机械飞行昆虫的需要, 人们开始关注飞行昆虫的稳定性问题^[1-3]. 现有研究仅限于飞行昆虫的定常飞行, 但飞行昆虫具有

定常飞行和机动飞行两种基本状态. 飞行昆虫机动过程中角速度高达 $3000^\circ/\text{s}$ ^[4], 由于旋转轴不在惯性主轴上, 不可避免存在气动耦合和惯性耦合,

收稿日期: 2011-03-05; 修订日期: 2011-10-18

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); 航空科学基金(20080896009)

作者简介: 朱丹(1981—), 男, 安徽桐城人, 讲师, 博士, 主要从事装备系统工程学方面的研究.

必然引发一些特殊的非线性运动现象;而飞行昆虫仅需用 2~3 个扑动周期就会倾覆,调节时间极其有限,其机动飞行控制更依赖于本体的动力学特性.因此,研究飞行昆虫机动过程中的动力学特性对机械飞行昆虫的控制问题十分重要.

飞行昆虫最基本的机动方式为急停变向:首先降低飞行速度(称为急停),再垂直速度矢量快速旋转改变飞行方向(称为急旋变向).本文采用分叉分析方法^[5-6],计算机动过程中状态参数变化时系统的所有平衡点及其局部稳定性,揭示飞行昆虫急停和急旋变向时由于气动与惯性耦合所造成的非线性动稳定性问题.

1 方法

1.1 形态学数据

本文选用熊蜂作为机动飞行动稳定性分析的研究对象,因为它具有比较完备的形态学数据、运动学数据和气动数据^[7-8].

熊蜂的形态学参数如下^[7-8]:质量 m 为 175 mg;翅长 R 为 13.2 mm; $r_2=0.55R$;单翅面积 S 为 53 mm²;身体倾角 χ_0 为 57.5°;身体长度 l_b 为 1.41R;翅根与质心之间的距离 $\hat{l}_1$ 为 0.21 l_b .部分形态学参数如图 1(a)所示.

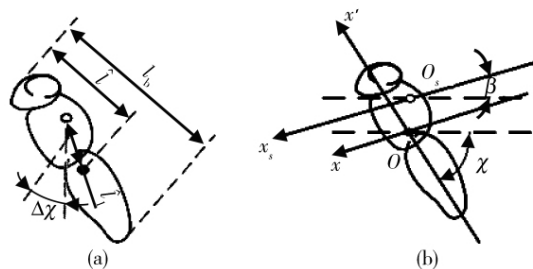


图 1 参数和坐标系定义

Fig. 1 Definition of parameters and coordinates

图 1(b)为文中所用坐标系.其中 $O_s x_s$ 位于平均扑动平面内; O 取昆虫的质心,轴 O_x 与 $O_s x_s$ 平行,而轴 O_x' 为身体的纵轴.在此基础上,可采用右手原则分别建立体轴系 S_b-Oxy_z 和 $S_b'-Ox'y'z'$.

目前尚未测得熊蜂的转动惯量.果蝇和熊蜂等昆虫具有相同的尺度律,基于尺度律,利用果蝇完备的转动惯量测算数据,就可估算熊蜂的转动惯量.结果如下^[9]:熊蜂在体轴系 S_b' 上熊蜂惯性矩为 $I_x=1.52 \times 10^{-9} \text{ kg} \cdot \text{m}^2$, $I_y=2.16 \times 10^{-9} \text{ kg} \cdot \text{m}^2$ 和 $I_z=1.07 \times 10^{-9} \text{ kg} \cdot \text{m}^2$;惯性积 $I_{xz}=$

$-8.0 \times 10^{-10} \text{ kg} \cdot \text{m}^2$.

1.2 运动方程

昆虫的高频扑动会减弱气动力的脉动效应,当频率增大到一定程度,翼翅气动力从宏观上近似是恒定的.拍动产生的气动力可用拍动周期内的平均力代替,称为平均近似^[3].同时,昆虫的翅膀质量 m_w 远远小于身体的质量 m ,例如熊蜂的 $m_w=0.005m$.翅膀的惯性力与身体的惯性力相比小两个数量级,可忽略^[9],从而将昆虫视为具有 6 个自由度的刚体,称为刚体近似.

熊蜂的运动模型可表示为刚体的 6 自由度 12 阶全量方程^[10].

1.3 气动导数

本文采用改进准定常气动估算方法进行配平和气动导数与控制导数的计算.改进准定常气动估算方法是一个经验修正模型,对飞行昆虫不同前飞速度的平均气动力具有极高的近似精度.将熊蜂在熊蜂的典型飞行状态(前飞速度 $v_0=0, 1, 2.5, 4.5 \text{ m/s}$ ^[9])处配平后,改变其中某一个状态变量,计算其变化时的气动力和力矩,进而计算出气动导数.

计算过程中所采用的状态量取值范围为 $-2 < \delta p, \delta q, \delta r < 2 \text{ (rad/s)}$, $-0.1 < \delta u, \delta v, \delta w < 0.1 \text{ (m/s)}$.结果表明高阶气动导数($\delta_{\dot{\chi}},^2$ 或者 $\delta_{\dot{\chi}},^3$ 等)比 $\delta_{\dot{\chi}},$ 小一到两个数量级,可忽略.因此气动力和力矩随扰动量 $\delta u, \delta v, \delta w, \delta p, \delta q, \delta r$ 近似线性变化,气动力和力矩可以表示为状态变量扰动量的线性函数.最终计算得悬停、低速(1 m/s)、中速(2.5 m/s)和高速(4.5 m/s)飞行气动导数如表 1 所示.

上述计算结果与数值模拟结果相比,具有相同的模态结构^[9].本文基于改进准定常气动估算方法所建立的运动模型具有一定的误差,但能反映其本质特征,基于该模型的分析结果是可信的.

1.4 分析方法

大机动情况下,飞行昆虫的数学模型是一个高维的、复杂的非线性系统,不能用解析的方法进行全面、系统的分析.本文借助分叉分析方法,预测和分析这些非线性现象,揭示飞行昆虫的全局飞行动力学特性.

飞行昆虫急停变向机动过程具有较大的偏转和俯仰角速度^[11-12],并且旋转轴不在飞行昆虫的惯性主轴上,惯性和气动耦合问题不可避免.本节以偏航角速度作为参变量,分析急旋变向中的惯

表 1 气动导数
Table 1 Aerodynamic derivatives

气动导数	速度/(m/s)			
	0	1	2.5	4.5
$X_u/10^{-4}$	-5.1	-4.8	-4.5	-5.8
$Z_u/10^{-4}$	-0.7	-1.9	-3.1	-3.63
$M_u/10^{-6}$	1.88	1.47	1.11	2.0
$Y_v/10^{-5}$	1.07	1.02	4.38	8.34
$L_v/10^{-6}$	-1.9	-3.1	-2.27	-0.56
$N_v/10^{-7}$	-1.4	-1.46	-1.49	-1.58
$X_w/10^{-5}$	-1.1	-2.7	-6.8	-14.8
$Z_w/10^{-4}$	-3.76	-4.84	-5.9	-6.5
$M_w/10^{-7}$	-0.97	-4.8	-8.2	-3.45
$Y_p/10^{-7}$	2.6	1.2	1.77	4.8
$L_p/10^{-8}$	-4.7	-4.9	-5.6	-6.1
$N_p/10^{-9}$	-4.2	-2.5	2.5	11.2
$X_q/10^{-7}$	7.2	5.75	4.8	6.88
$Z_q/10^{-7}$	-2.4	-8.5	-14	-9.4
$M_q/10^{-8}$	-1.79	-2.45	-3.67	-2.11
$Y_r/10^{-6}$	0.29	0.955	2.5	4.36
$L_r/10^{-8}$	0.495	1.1	2.48	3.94
$N_r/10^{-8}$	-3.7	-3.6	-3.8	-5.23

性和气动耦合问题;以俯仰角速度作为参变量,分析急停过程中的气动耦合问题。

飞行昆虫快速改变航向时,问题的关键是考

虑飞行昆虫垂直速度矢量旋转时的力矩平衡,可忽略去飞行轨迹的弯曲对相对运动产生的影响。

所采用的 8 运动方程组为^[10]

$$\begin{aligned}\dot{u} &= -wq + vr + X/m - g\sin\theta \\ \dot{v} &= -ur + wp + Y/m + g\cos\theta\sin\phi \\ \dot{w} &= -vp + uq + Z/m + g\cos\theta\cos\phi \\ \dot{p} &= \frac{I_z[L + qr(I_y - I_z) + pqI_{xz}] + I_{xz}[N + pq(I_x - I_y) - qrI_{xz}]}{I_xI_z - I_{xz}^2} \\ \dot{q} &= \frac{M + pr(I_z - I_x) + (r^2 - p^2)I_{xz}}{I_y} \\ \dot{r} &= \frac{I_x[N + pq(I_x - I_y) - qrI_{xz}] - I_{xz}[L + qr(I_y - I_z) + pqI_{xz}]}{I_xI_z - I_{xz}^2} \\ \dot{\theta} &= q\cos\phi - r\sin\phi \\ \dot{\phi} &= p + (r\cos\phi + q\sin\phi)\operatorname{tg}\theta\end{aligned}\tag{1}$$

式中 m 为昆虫质量; u, v, w 为飞行昆虫在体轴系上速度分量; p, q, r 为飞行昆虫在体轴系上角速度分量; ϕ, θ 为横滚角和俯仰角; X, Y, Z 为作用在虫身上的外力; L, M, N 为作用在虫身上的外力矩。

2 机动飞行稳定性

2.1 急旋变向惯性及气动耦合

以偏航角速度 r 作为参变量,用连续算法求

解方程组(1),得到熊蜂在不同前飞速度的相图和平衡图.图 2、图 3 和图 4 分别为前飞速度为 0, 2.5 m/s 和 4.5 m/s 时的 r - p 和 r - q 平衡图,图 5 和图 6 分别为悬停时偏航角速度 r 为 18.63 rad/s 和 0.15 rad/s 的相图.图 2~图 4 中,粗实线为稳定的平衡解,细线为不稳定的平衡解; S , L 和 U 分别表示平衡点处于稳定、单调发散和振荡发散情况,分别对应平衡点的线性导算子矩阵之特征根为全实部根、正实根和正实部复根的情况;“ $\bullet$ ”表示稳定周期解的最大幅值,“ $\circ$ ”表示不稳定周期解的最大幅值.

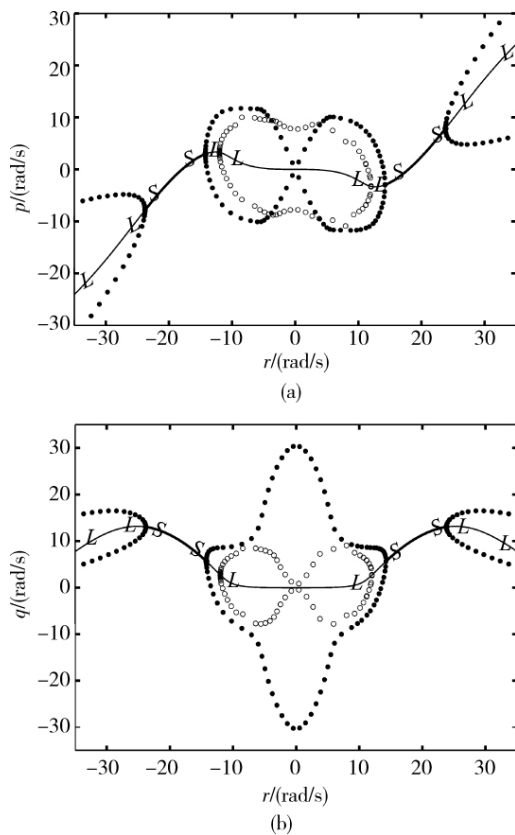


图 2 悬停时 r - p 和 r - q 平衡图

Fig. 2 Hovering r - p and r - q equilibrium diagram

图 2 为熊蜂悬停时急旋变向的 r - p 和 r - q 平衡图.从图 2 可以看出,在偏航角速度较小的区域,即区域 $|r| < 14.23 \text{ rad/s}$ 内不存在 r - p 耦合发散和 r - q 耦合发散,虽然系统的平衡点是不稳定的,但存在稳定的极限环.

在区域 $14.23 \text{ rad/s} < |r| < 23.8 \text{ rad/s}$ 内,存在 r - q 耦合发散和 r - p 耦合发散,但此时平衡点是稳定焦点,所有轨线都被其吸引,如图 5 所示.因此该区域为稳定发散.

在区域 $|r| > 23.8 \text{ rad/s}$ 内, r - q 耦合发散和 r -

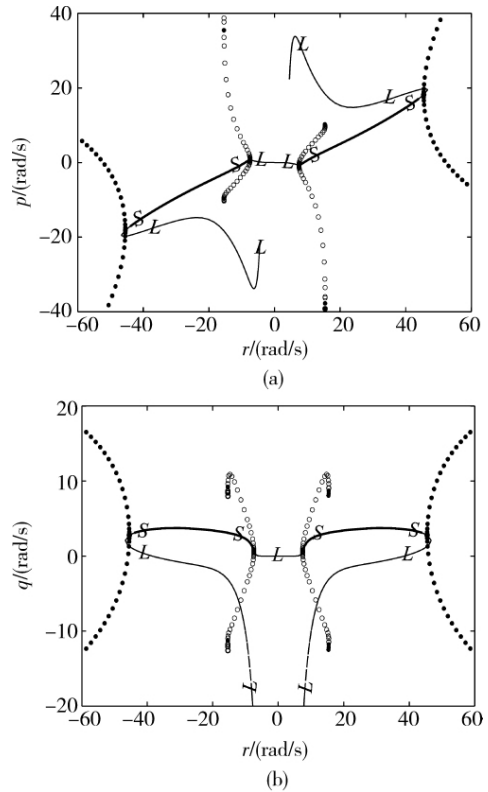


图 3 $v_0 = 2.5 \text{ m/s}$ 时 r - p 和 r - q 平衡图

Fig. 3 r - p and r - q equilibrium diagram of $v_0 = 2.5 \text{ m/s}$

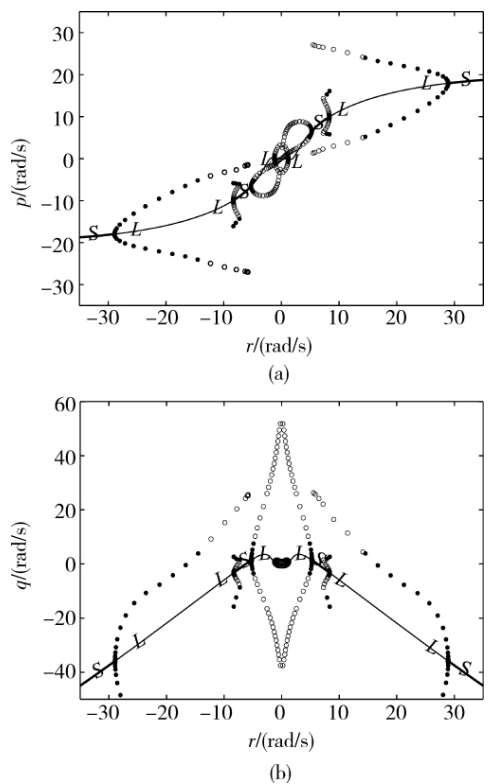
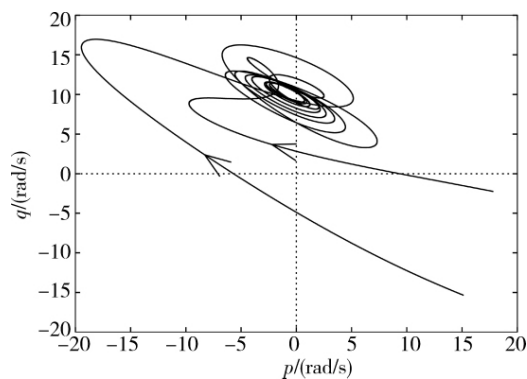


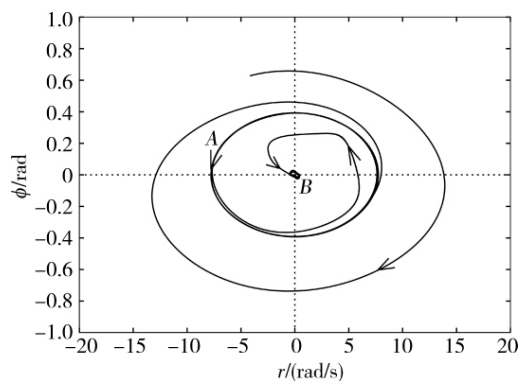
图 4 $v_0 = 4.5 \text{ m/s}$ 时 r - p 和 r - q 平衡图

Fig. 4 r - p and r - q equilibrium diagram of $v_0 = 4.5 \text{ m/s}$

图 5 偏航角速度为 -18.63 rad/s 时的相图Fig. 5 Phase plane map of $r = -18.63 \text{ rad/s}$

p 耦合发散进一步增强,平衡点为非稳定焦点,但存在一个吸引所有轨线的稳定极限环,因此该区域为稳定发散。

偏航角速度 $|r|$ 大于 23.8 rad/s 或者小于 14.23 rad/s 时,系统发生 hopf 分叉,原来稳定的平衡解失稳,并分叉出一个周期解来。例如偏航角速度 $|r| < 14.23 \text{ rad/s}$ 时,就存在一个稳定周期轨道和一个不稳定周期轨道。此时,熊蜂的运动要么进入稳定的极限环,要么发散至无穷,如图 6 所示。这意味着 $|r|$ 大于 23.8 rad/s 或者小于 14.23 rad/s 时熊蜂会产生滚转摇晃运动。

图 6 偏航角速度为 0.15 rad/s 时的相图Fig. 6 Phase plane map of $r = 0.15 \text{ rad/s}$

根据图 2、图 5 可知,悬停时急旋变向的动力学分叉是超临界 hopf 分叉。平衡点为不稳定焦点的区域,都有一个稳定极限环吸引所有的轨线,零解除外;其它区域内平衡点是稳定焦点,所有轨线都被其吸引。因此这是一种安全分叉。

图 3 为熊蜂前飞速度 $v_0 = 2.5 \text{ m/s}$ 时急旋变向的 $r-p$ 和 $r-q$ 平衡图。从图 3 可以看出,区域 $|r| < 7.43 \text{ rad/s}$ 内不存在 $r-q$ 耦合发散和 $r-p$ 耦合发散,系统的平衡点是不稳定的。在区域 $7.43 \text{ rad/s} < |r| < 45.49 \text{ rad/s}$ 内,存在较大的 $r-p$ 耦

合发散,但 $r-q$ 耦合发散较小;系统具有两个平衡点:一个稳定的焦点和一个不稳定的焦点,并且在区域 $7.43 \text{ rad/s} < |r| < 15.37 \text{ rad/s}$ 内存在一个不稳定的极限环,该区域是不稳定发散。在区域 $|r| > 45.49 \text{ rad/s}$ 内,系统没有平衡解,只存在一个振幅很大的稳定极限环,该区域是不稳定发散。因此,熊蜂以 $v_0 = 2.5 \text{ m/s}$ 急旋变向时,虽然在偏航角速度大于 45.49 rad/s 时存在稳定极限环,但振幅很大;在其他区域,要么没有稳定的平衡态,要么标称稳定焦点受稳定极限环与不稳定焦点的吸引,微小扰动都会迫使轨线偏离平衡点。

图 4 为熊蜂前飞速度 $v_0 = 4.5 \text{ m/s}$ 时急旋变向的 $r-p$ 和 $r-q$ 平衡图。

从图 4 可以看出熊蜂高速前飞($v_0 = 4.5 \text{ m/s}$)时,仅在很小的区域 $|r| < 1.2 \text{ rad/s}$ 内不存在 $r-q$ 耦合发散和 $r-p$ 耦合发散。在区域 $|r| < 5.26 \text{ rad/s}$ 内时,系统不存在稳定的平衡态,而是具有两个不稳定的极限环,该区域是不稳定发散。在区域 $5.26 \text{ rad/s} < |r| < 8.3 \text{ rad/s}$ 内时,系统存在一个稳定的焦点,同时存在一个不稳定的极,该区域是不稳定发散。在区域 $8.3 \text{ rad/s} < |r| < 28.9 \text{ rad/s}$ 内时,系统存在一个振幅很大的稳定极限环,但同时存在一个不稳定的焦点,该区域是不稳定发散。在区域 $|r| > 28.9 \text{ rad/s}$ 内时,系统存在一个稳定的焦点。

熊蜂 $v_0 = 4.5 \text{ m/s}$ 急旋变向时,只有在偏航角速度大于 28.9 rad/s 时具有稳定的焦点,在区域 $8.3 \text{ rad/s} < |r| < 28.9 \text{ rad/s}$ 内存在一个振幅很大的稳定极限环;在其他区域,要么没有稳定的平衡态,要么标称稳定焦点受稳定极限环与不稳定焦点的吸引,微小扰动都会迫使轨线偏离平衡点。

对悬停、中速飞行和高速飞行时急旋变向中惯性及气动耦合分析,得到如下结论:①熊蜂在偏航角速度较低时不存在 $r-q$ 耦合,同时 $r-p$ 耦合较小,但偏航角速度增加后,会引起横滚和俯仰角速度大幅度的变化,称之为急旋发散。随着前飞速度增加,更容易产生急旋发散(不同飞行速度下产生急停发散的触发偏航角速度值为:悬停时 14.23 rad/s ;中速时 7.43 rad/s ;高速时 1.1 rad/s)。②熊蜂仅仅悬停时在整个偏航角速度范围内都具有稳定的平衡态,中速前飞和高速前飞存在不稳定发散区域,在这种飞行速度下急旋变向是比较危险的。这解释了为什么飞行昆虫急停变向时,会首先降低飞行速度再急旋改变航向。③熊蜂在偏航角速度较低为动不稳定的,但不产生急旋发散,这实际

上属于定常飞行的范畴,此时熊蜂有足够的时间做出控制.④悬停时偏航角速度位于区域 $14.23 \text{ rad/s} < |r| < 23.8 \text{ rad/s}$ 内,具有唯一的稳定焦点,偏航角速度过高则会产生大幅振荡,因此 $14.23 \text{ rad/s} < |r| < 23.8 \text{ rad/s}$ 是急旋变向的最优角速度,这个数据与飞行昆虫的生理学数据相符(昆虫急旋变向过程中的平均偏航角速度约为 $20 \text{ rad/s}^{[4]}$).

2.2 急停气动耦合

以俯仰角速度 q 作为参变量,用连续算法求解方程组(1)的平衡解,得到熊蜂在飞行速度为 $0, 2.5 \text{ rad/s}$ 和 4.5 m/s 时的 $q-p$ 和 $q-r$ 平衡图,如

图 7 所示.图 7 中,粗实线为稳定的平衡解,细线为不稳定的平衡解; S, L 和 U 分别表示平衡点处于稳定、单调发散和振荡发散情况.

图 7(a),图 7(b)是悬停时的急停机动平衡图;图 7(c),图 7(d)是中速前飞($v_0 = 2.5 \text{ m/s}$)时急停机动平衡图;图 7(e),图 7(f)是高速前飞($v_0 = 4.5 \text{ m/s}$)时急停机动平衡图.

图 7 表明,不同前飞速度下的急停机动平衡图的曲线形状大致相同:俯仰角速度较小时具有 6 个平衡点,俯仰角速度较大时具有两个平衡点;都有一个叉形分叉点、两个 hopf 分叉点和两个鞍

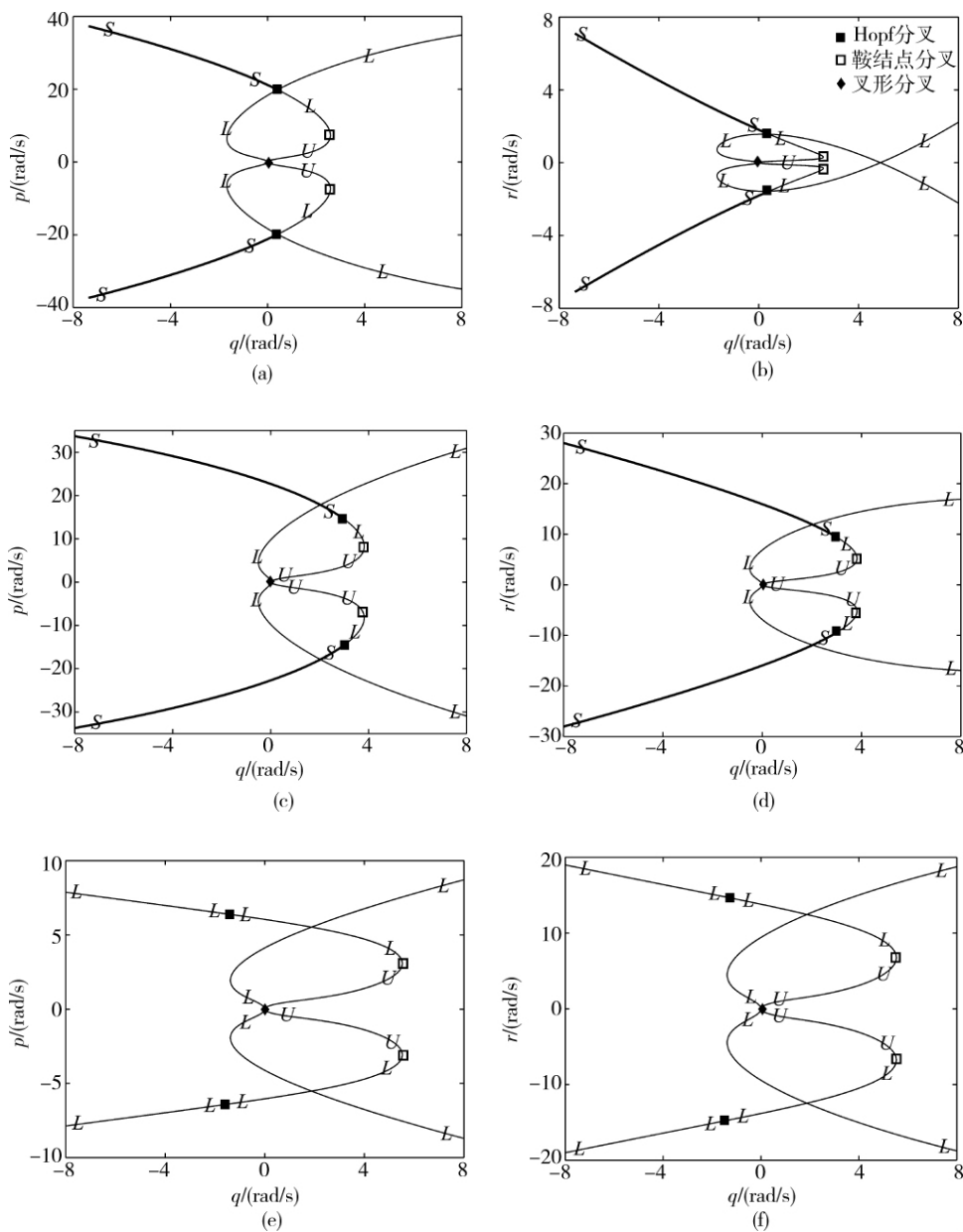


图 7 熊蜂急停过程中 $q-p$ 和 $q-r$ 平衡图

Fig. 7 The saccade $q-p$ and $q-r$ equilibrium diagram of bumblebee

结点分叉点. 因此不同前飞速度下的 q - p 耦合发散和 q - r 耦合发散现象很相似: ①由于气动耦合, 不同前飞速度下都存在 q - p 耦合发散和 q - r 耦合发散, 称之为急停发散; ②耦合发散都是左右对称的, 对应左俯旋、右俯旋、左上旋和右上旋. 不同之处在于: ①悬停与中速前飞 ($v_0 = 2.5 \text{ m/s}$) 时, 快速下俯时具有两个稳定的平衡解, 为稳定急停发散; ②高速前飞 ($v_0 = 4.5 \text{ m/s}$) 时, 俯仰过程中不存在稳定的平衡解, 为不稳定发散.

以悬停快速下俯过程为例. 熊蜂从静止开始下俯运动, 就会从 L - L 分支跳到 S - S 分支, 使状态发散大幅度的变化, 这就是所谓的突跃; 此时即使减小下俯运动的角速度, 它也不能回到原来的状态, 而是沿着较大滚转速度的 S - L - U 分支变化, 这就是突跃迟滞现象; 由于多个平衡点的存在, 受到扰动后, 会在这些不稳定周期吸引子的作用下飞行状态会变得不稳定, 发生突跃.

所有前飞速度下的急速上仰都是不稳定的, 图 8 为悬停时以 $q=6 \text{ rad/s}$ 上仰的相图和时间历程. 图 8(a) 中, 系统从初始点 $(p, q, r) = (2, 6, 0) \text{ rad/s}$ 进入以 3 个点交替轮流为中心的不稳定周期性振荡, 振幅逐渐增大, 除了原点外, 其他两个中心点就是图 7(a) 中 $q=6 \text{ rad/s}$ 时的两个 L 型奇点, 系统最终发散. 这表明不稳定急停发散过程中系统会从一个平衡分支突跃到另一个平衡分支, 振荡幅度达到 35 rad/s ; 但图 8(b) 则显示, 系统从初始点 $(p, q, r) = (2, 6, 0) \text{ rad/s}$ 开始, 存在一个长达 0.2 s 的过渡阶段才进入不稳定大幅度振荡, 这个过渡阶段大约为 30 个扑动周期; 进入不稳定大幅度振荡后, 以 L 型奇点为中心的振荡周期约为 0.35 s , 大约 50 个扑动周期.

急停耦合分析表明:

- 1) 悬停时仅快速下俯运动 ($q < -1.7 \text{ rad/s}$) 是稳定的;
- 2) 中速飞行时下俯运动 ($q < -0.5 \text{ rad/s}$) 是稳定的;
- 3) 高速飞行时, 俯仰运动不存在稳定的急停发散;
- 4) 熊蜂进入不稳定大幅度周期振荡前, 有一个大约 30 个扑动周期的过渡阶段; 同时, 不稳定振荡的周期很长, 大约 50 个扑动周期;
- 5) 急停发散是左右对称的.

分析 1) 和 2) 体现了前飞速度很低时, 飞行昆虫能通过稳定的快速下俯产生向前的气动力分量,

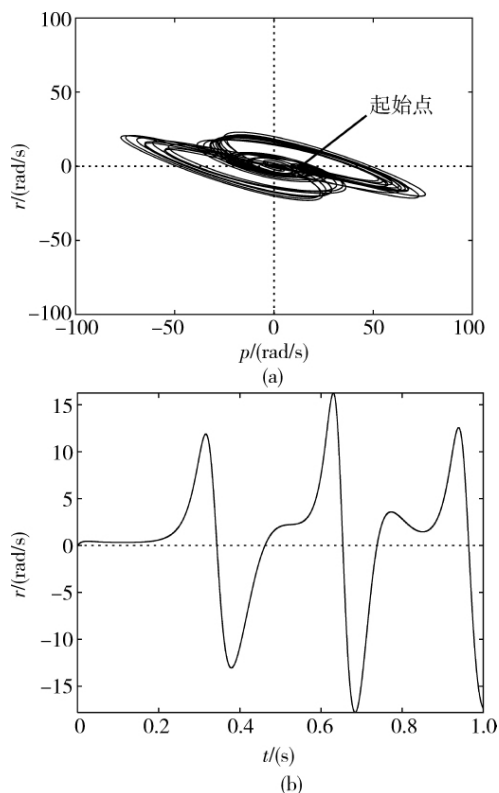


图 8 上仰角速度为 $q=6 \text{ rad/s}$ 的相图和时间历程

Fig. 8 Phase plane map and time course of $q=6 \text{ rad/s}$

从而快速加速.

由于飞行昆虫具有一定的前飞速度时, 机动过程中的俯仰角速度是受限的, 否则会承受巨大的过载. 如果飞行昆虫最大能承受 9 个 g 的过载, 则前飞速度为 2.5 m/s 和 4.5 m/s 时, 机动过程中所能承受的俯仰角速度分别为 $\pm 3.5 \text{ rad/s}$ 和 $\pm 2 \text{ rad/s}$. 虽然此时飞行昆虫是不稳定的, 但 q - p 耦合发散和 q - r 耦合发散并不严重, 近似属于定常飞行范畴, 此时不稳定模态的倍幅时间约为扑动周期的一个数量级, 飞行昆虫有足够的时间进行调整.

飞行昆虫快速上仰, 进入不稳定急停发散后, 会产生不稳定的大幅度振荡, 振荡幅度达到 $\pm 35 \text{ rad/s}$, 不一定能够顺利改出. 但结论 4) 表明进入大幅度振荡前, 有一个约 30 个扑动周期的过渡阶段. 这对飞行昆虫而言是缓慢的, 有足够的时间进行调整使自己不进入大幅度振荡.

急停发散产生一定的横滚角速度和偏航角速度, 有利于随后的急旋变向机动; 结论 5) 则说明飞行昆虫具有方向选择权, 因此无威胁情况下, 飞行昆虫向左或向右逃逸的概率是一样的^[4].

3 结 论

本文研究熊蜂的定常飞行状态的动稳定性问题,得到如下结论:

1) 飞行昆虫角速度 p, r 较小时是动不稳定的,不存在耦合发散,这属于定常飞行范畴,此时为弱不稳定,有足够的时间做出控制;

2) 中速前飞($v_0 = 2.5 \text{ m/s}$)和高速前飞($v_0 = 4.5 \text{ m/s}$)时进行急旋变向是危险的,只有前飞速度近似为零的急旋变向是安全的,最优的偏航角速度为 $14.23 \text{ rad/s} < |r| < 23.8 \text{ rad/s}$;

3) 快速上仰产生不稳定急停发散,从而进入不稳定的大幅度振荡,振荡幅度达到 (35 rad/s) . 但进入大幅度振荡前,有一个约 30 个扑动周期的过渡阶段,飞行昆虫有足够长的调整时间.

由于对尾流的影响进行了忽略,用近似方法分析取得的成果要打折扣. 后续工作包括:更精确的气动导数计算和操纵输入空间内的临界稳定问题.

参考文献:

- [1] Taylor G K, Thomas A L R. Dynamic flight stability in the desert locust *schistocerca gregaria*[J]. Journal of Experiment Biology, 2003, 206(16): 2803-2829.
- [2] 孙茂,熊燕. 微型飞行器的仿生力学:蜜蜂悬停飞行的动稳定性研究[J]. 航空学报, 2005, 26(4): 385-391.
SUN Mao, XIONG Yan. Biomimetic mechanics of micro-air vehicles dynamic flight stability of hovering honeybee[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2005, 20(3): 429-433. (in Chinese)
- [3] 吴江浩,王济康,孙茂. 蜜蜂悬停飞行控制的仿生力学研究

[J]. 航空学报, 2007, 28(4): 776-782.

WU Jianghao, WANG Jikang, SUN Mao. Study on biomimatics of honeybee in hovering flight control[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2007, 28(4): 776-782. (in Chinese)

- [4] Tammero L F, Dickinson M H. The influence of visual landscape on the free flight behaviour of the fruit fly, *drosophila melanogaster*[J]. Journal of Experiment Biology, 2002, 205(3): 327-343.
- [5] 胡海岩. 应用非线性动力学[M]. 北京: 航空工业出版社, 2000.
- [6] Abed E H. Nonlinear stabilizing control of high angle of attack flight dynamics[J]. Advances in Computing and Control, 1989, 130(1989): 140-149.
- [7] Dudley R, Ellington C P. Mechanics of forward flight in bumblebees I: kinematics and morphology[J]. Journal of Experiment Biology, 1990, 148(1): 19-52.
- [8] Dudley R, Ellington C P. Mechanics of forward flight in bumblebees II: quasi-steady lift and power requirements[J]. Journal of Experiment Biology, 1990, 148(1): 53-88.
- [9] 胡明朗,魏瑞轩. 仿昆虫扑翼飞行器翅膀惯性力分析[J]. 航空动力学报, 2008, 23(7): 1279-1286.
HU Minglang, WEI Ruixuan. Inertia force of flapping wing in entomopter micro air vehicle[J]. Journal of Aerospace Power, 2008, 23(7): 1279-1286. (in Chinese)
- [10] Nelson R C. 飞行稳定性和自动控制[M]. 顾均晓,译. 北京: 国防工业出版社, 2008.
- [11] Fry S N, Sayaman R, Dickinson M H. The aerodynamic of free-flight maneuvers in *drosophila*[J]. Science, 2003, 300(5618): 495-498.
- [12] Ristrophe L, Bergoua A J, Ristrophe G, et al. Discovering the flight autostabilizer of fruit flies by inducing aerial stumbles[J]. Proceedings of National Academy of Science, 2010, 107(11): 4820-4824.