

机翼掠角非对称变化的横航向效应

展京霞^{①②*}, 王晋军^①

① 北京航空航天大学流体力学研究所, 北京 100191;

② 成都飞机设计研究所, 成都 610041

* E-mail: jxzhan@ase.buaa.edu.cn

收稿日期: 2008-11-18; 接受日期: 2009-02-04

国家杰出青年科学基金资助项目(批准号: 10425207)

摘要 基于风洞测力实验结果, 本文讨论了机翼掠角非对称变化对仿雨燕翼气动特性的影响. 雨燕翼模型沿展向由臂翼、内手翼和外手翼 3 段组成, 分析了雨燕飞行中通过手翼局部翼段掠角非对称变化产生滚转力矩的效率.

关键词

机翼掠角

掠角不对称变化

滚转力矩

飞机一般采用副翼来产生左右不对称的升力, 从而获得所需的滚转力矩; 而鸟类往往通过翅膀的复杂变化和运动来控制飞行. Warrick 等人^[1,2]研究发现, 鸽子在速度为 3 m/s 的低速飞行中, 靠左右翅膀下拍速度的不对称来产生转弯所需的不对称气动力, 控制转弯的坡度和身体的方向, 这是一个非定常过程; 而在较高飞行速度或滑翔状态下转弯时, 鸽子通常依靠两种方式来产生转弯所需的不对称载荷: 一是翻转翅膀, 使左右翅膀的迎角不对称, 二是折叠翅膀使面积不对称. 高速转弯以一种定常方式进行, 和飞机利用副翼转弯的过程相似^[3]. 观察雨燕的转弯飞行, 可以看到它以较高速度进行转弯时翅膀并不拍动, 也不折叠, 只是翅膀的掠角发生变化. 这种变化可以快速调整转弯半径和转弯速率. 显然, 雨燕采用的产生不对称载荷的方式与鸽子不同, 正如 Müller 和 Lentink^[4]观察的结果, 通过改变翅膀的掠角, 雨燕可能控制转弯飞行.

本文基于风洞测力实验结果, 分析机翼掠角的不对称变化对仿雨燕翅膀平面形状的机翼的纵横向气动力的影响, 探讨通过这种方式进行滚转机动的可能.

1 实验简介

测力实验使用的机翼模型用硬铝(LY12 CZ)加工, 钝前缘, 在展向分为 3 段, 可实现左右两侧机翼局部翼段掠角的不对称变化, 其平面形状仿照雨燕翅膀^[5]设计. 如图 1 所示, 靠近翼根的一段相当于雨燕翅膀的臂翼(arm-wing); 位于翼尖的一段和居中的一段合起来相当于手翼(hand-wing), 其中翼尖的一段在文中称为手翼外段(hand-wing_{out}), 居中的一段称为手翼内段(hand-wing_{in}). 臂翼、手翼内段和外段均可绕各自位于 1/2 弦线上的轴心在机翼平面内转动, 从而实现不改变机翼面积、只改变机翼局部翼段前缘掠角的变化. 手翼外段相对于手翼内段的角度的变化用 $\chi_{h,out}$ 表示, $\chi_{h,out}=0^\circ$ 表示手翼内段和外段之间的相对角度不变, 保持二者在图 1 中所示的相对位置.

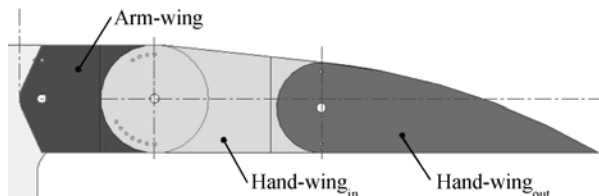


图 1 展向分段的雨燕翼模型示意图

测力实验在北京航空航天大学 D1 低速风洞中进行. 该风洞为三元回流开口风洞, 试验段全长 1.4 m, 截面形状为椭圆形, 进口尺寸为 1.02 m×0.76 m, 出口尺寸为 1.07 m×0.81 m. 在试验风速 25 m/s 下的湍流度 $\varepsilon < 0.3\%$. 测力通过一台六分量杆式应变天平完成, 升力和阻力测量的不确定度都小于 3%. 迎角通过 D1 风洞的迎角机构给定, 角度不确定度可控制在 0.5°. 整个测力实验中模型都采用侧装方式, 以满足测力实验的迎角需求.

实验中固定右侧机翼掠角, 转动左侧局部翼段使左右机翼掠角不对称. 左侧手翼外段的掠角($\Lambda_{h,out,left}$)在 $-21.75^\circ \sim 78.25^\circ$ 间取 7 个值($-21.75^\circ, -11.75^\circ, 8.25^\circ, 28.25^\circ, 38.25^\circ, 58.25^\circ, 78.25^\circ$), 左侧手翼的掠角($\Lambda_{h,left}$)在 $-13.88^\circ \sim 56.12^\circ$ 间也取了 7 个值($-13.88^\circ, -3.88^\circ, 16.12^\circ, 26.12^\circ, 36.12^\circ, 46.12^\circ, 56.12^\circ$). 这里, 掠角为负表示前缘前掠. 实验中, 模型无侧滑, 迎角 $\alpha = -4^\circ \sim 66^\circ$, 基于机翼根弦长的雷诺数 $Re = 6.16 \times 10^4$.

2 结果分析

图 2 和 3 分别给出了改变左侧手翼外段掠角时, 不对称雨燕翼与对称雨燕翼升力系数和阻力系数. 实验结果表明, 手翼外段或整个手翼掠角不对称变化对雨燕翼的升力和阻力的影响都较小.

图 4 给出了手翼外段掠角变化时, 不对称雨燕翼的滚转力矩随迎角的变化曲线. 如图 4 所示, 中高迎角($\alpha > 15^\circ$)下, 左侧手翼外段前掠产生的滚转力矩与其后掠产生的滚转力矩方向相反, 说明手翼外段前掠和后掠时, 翼面升力的变化方向不同; 且左侧手翼外段后掠越大, 滚转力矩绝对值越大. 滚转力矩的方向

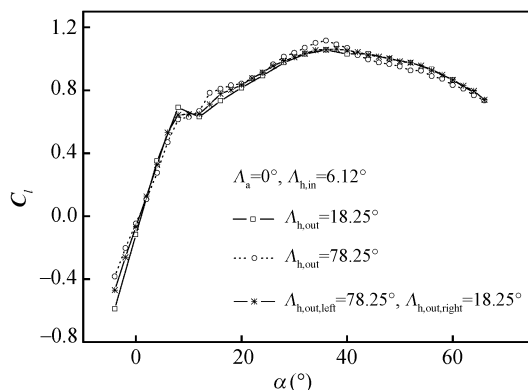


图 2 机翼掠角不对称对升力系数的影响

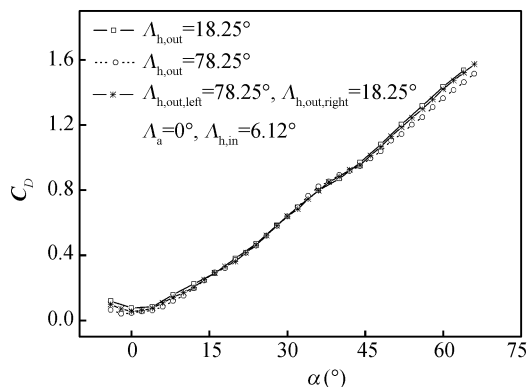


图 3 机翼掠角不对称对阻力系数的影响

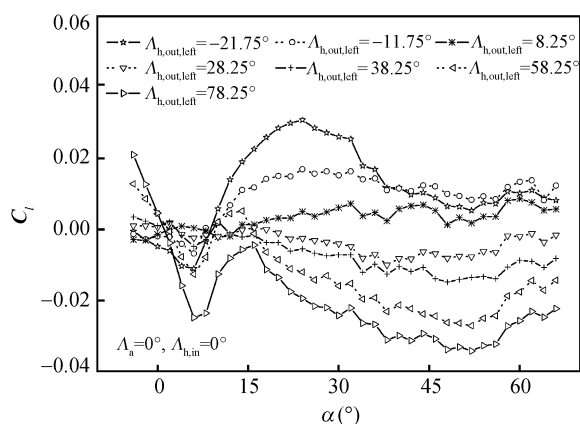


图 4 $\Lambda_a=0^\circ, \Lambda_{h,in}=0^\circ, \Lambda_{h,out,left}$ 变化的不对称雨燕翼的滚转力矩

及其变化规律说明手翼外段后掠, 左侧外翼升力增大产生滚转力矩; 手翼外段前掠, 左侧外翼升力减小, 从而产生滚转力矩. $\alpha < 15^\circ$, 滚转力矩在迎角发生下降的迎角区域也发生转折, 滚转力矩随迎角变化斜率变为正值, 说明由于机翼的局部分离造成的升力损失使掠角不对称产生的滚转力矩有所减小.

手翼掠角变化时, 不对称雨燕翼的滚转力矩随迎角的变化在图 5 中给出, 可见滚转力矩随迎角的变化与手翼外段掠角非对称变化时的规律和趋势相似, 说明手翼外段的变化在雨燕机动飞行中起重要作用.

测力结果显示, 机翼局部翼段掠角不对称变化产生的侧向力和偏航力矩很小, 与掠角对称雨燕翼相当. 因此, 通过前缘不对称掠动来产生滚转力矩的方式在不显著影响升阻力特性的前提下, 可以弱化横向和航向之间的相互影响, 从而增强滚转机动性, 有利于飞行操纵.

滚转力矩随机翼前缘掠角的变化如图 6 所示,可见中高迎角下,滚转力矩随 $\Lambda_{h,out,left}$ 呈线性变化趋势,相应的斜率在表 1 中给出.迎角越大,滚转力矩随

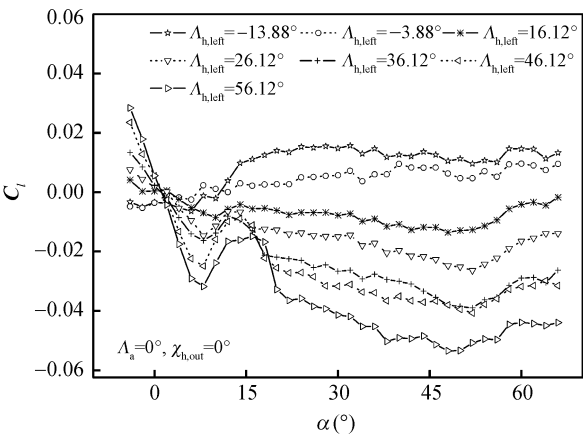


图 5 $\Lambda_a=0^\circ, \chi_{h,out}=0^\circ, \Lambda_{h,left}$ 变化的不对称雨燕翼的滚转力矩

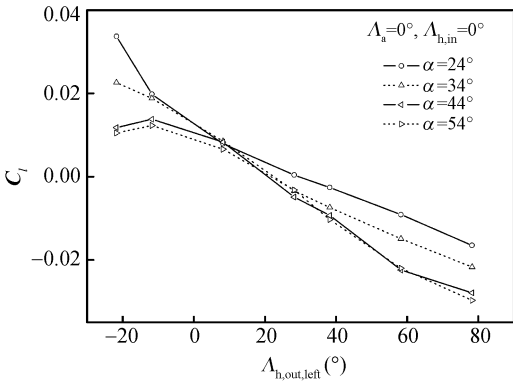


图 6 不同迎角下滚转力矩系数随 $\Lambda_{h,out,left}$ 的变化

表 1 滚转力矩系数对 Λ_h 和 $\Lambda_{h,out}$ 的导数

	$\alpha=-4^\circ$	$\alpha=4^\circ$	$\alpha=14^\circ$	$\alpha=24^\circ$	$\alpha=34^\circ$	$\alpha=44^\circ$	$\alpha=54^\circ$
$C_l^{\Lambda_{h,left}}$	0.0324	-0.0218	-0.0187	-0.0405	-0.0465	-0.052	-0.0514
$C_l^{\Lambda_{h,out,left}}$				-0.0197	-0.0264	-0.0286	-0.0283

$\Lambda_{h,out, left}$ 下降得越快,也就是说,大迎角下,局部翼段掠角不对称变化产生的滚转力矩更显著.

滚转力矩随手翼掠角的变化在图 7 中给出,正迎角下手翼掠角不对称变化对滚转力矩的影响与手翼外段在中高迎角下的影响相似,滚转力矩随 $\Lambda_{h,left}$ 的增大线性减小,迎角越大,减小得越快,斜率见表 1.从表 1 中数据可以看到,滚转力矩随 $\Lambda_{h,left}$ 变化的速率更快,说明通过整个手翼掠角非对称变化产生滚转力矩的效率比手翼外段掠角变化的效率高.掠角非对称变化将引起雨燕翼两侧升力的不对称,这是产生滚转力矩的主要原因,升力系数随掠角的变化规律详见展京霞的博士学位论文^[6].

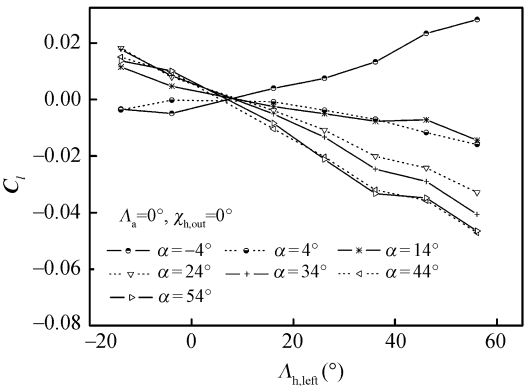


图 7 不同迎角下滚转力矩系数随 $\Lambda_{h,left}$ 的变化

3 总结

本文基于测力实验结果,分析了仿雨燕机翼局部翼段掠角不对称变化对其气动特性的影响和这种方式产生滚转力矩的效率.实验结果表明,雨燕翼的手翼和手翼外段掠角不对称变化时对机翼的阻力和升力特性影响不大,但能够在横航向交互影响较小的情况下产生显著的滚转力矩,通过这种方式能够实现快速且易于控制的滚转机动.

参考文献

1 Warrick D R, Dial K P. Kinematic, aerodynamic and anatomical mechanism in the slow, maneuvering flight of pigeons. J Exp Biol, 1998, 201(5): 655—672

2 Warrick D R, Dial K P, Biewener A A. Asymmetrical force production in the maneuvering flight of pigeons. Auk, 1998, 115(4): 916—928

3 李振国. 略谈飞机的转弯. 航空知识, 1977, 7(1): 44—45

4 Müller U K, Lentink D. Turning on a Dime. Science, 2004, 306(5703): 1899[doi]

5 Videler J J. Avian Flight. New York: Oxford Univ Pr, 2006. 25—33

6 展京霞. 仿雨燕 MAV 布局气动特性与流动机理的实验研究. 博士学位论文. 北京: 北京航空航天大学, 2007