

文章编号:1005-0523(2007)01-0057-03

微型扑翼飞行器空气动力学研究进展

李峰,叶正寅,白存儒

(西北工业大学 翼型叶栅空气动力学国防科技重点实验室,陕西 西安 710072)

摘要:微型扑翼飞行器(FMAV)作为一种新概念的航空器,有着广泛的功能和用途,已经受到了各国的高度重视.综述了国内外对微型扑翼飞行器的低雷诺数空气动力学问题的研究现状及未来的发展趋势,讨论了目前研究中需要解决的一些关键技术.在此基础上,总结出今后研究的重点,并为微型扑翼飞行器的设计提供了参考依据.

关键词:微型扑翼飞行器;气动特性;低雷诺数;非定常流动

中图分类号:V211.41

文献标识码:A

1 引言

微型飞行器(Micro Air Vehicle,简称 MAV)是20世纪末开始发展起来的一种新型飞行器,它以尺寸小、重量轻以及良好的机动性等优点吸引了许多国家的研究者,受到了国内外的普遍重视. MAV具有便于携带、飞行灵活、隐蔽性好等特点,因此在民用和国防领域都具有十分重要而广泛的应用前景.

目前研制的微型飞行器大多是固定翼布局,但微型扑翼飞行器(Flapping-Wing Micro Air Vehicle,简称 FMAV)以其独有的特点受到了国内外的极大关注. FMAV是一种模仿鸟类和昆虫飞行,基于仿生学原理设计制造的新型飞行器.与固定翼和旋翼飞行器相比,它具有无需螺旋桨或喷气装置、原地或小场地起飞、极好的飞行机动性和空中悬停性能以及飞行能耗低等独特的优点. FMAV可以用很小的能量进行长距离飞行,因此更适合在长时间无能源补充及远距离条件下执行任务.可以预见,扑翼飞行比固定翼和旋翼飞行更具有优势,微型扑翼飞行器必将在该研究领域占据越来越重要的地位.

目前对 FMAV 空气动力学问题的研究还处于起步阶段,还没有具体的理论和经验公式可以遵循.因此我们必须在充分认识生物飞行空气动力学的基础上,提取精华并简化运用,达到实现仿生扑翼飞行的目的.本文通过综述近年来国内外对该问题的研究进展,并进行对比分析思考,提出了相应的见解,为进一步深入的研究提供参考.

2 低雷诺数飞行气动特性

常规飞行器的飞行雷诺数约在 10^7 左右,而 FMAV 由于尺寸小、速度低,其飞行雷诺数远小于普通的飞行器,范围一般为 $10^2 \sim 10^4$. 飞行雷诺数反映了施加在飞行器上的惯性作用力与粘滞作用力之比. FMAV 在低雷诺数飞行时,空气粘性的影响更加显著,其受到的粘滞力也相对增大.同时,附面层趋于层流特征,容易出现分离,从而失去升力、气动稳定性及其控制等等. FMAV 在低雷诺数下的空气动力学特性较大雷诺数飞行有明显的不同,传统的定常附着流理论难以解释其通过扑翼获得高升力的机理.然而自然界中飞行的鸟类和昆虫却能很好地克服由于低雷诺数带来的气动局限性,它们通过翅膀在拍动过程中快速且多样性的运动获得了与它们飞行雷诺数范围相适应的飞行技能.因此,对昆虫及鸟类扑翼飞行的空气动力学特性的研究对未来微型飞行器的发展具有深远的意义.

目前,微型扑翼飞行器在低雷诺数下的空气动力学问题还处在试验阶段,国内外学者对此进行了一些探索性的研究.昆虫和鸟类靠高频拍翼,利用往复挥拍加上急剧旋转,从而激发周围介质形成强非定常、低雷诺数流动. Wang^[14]和 Hamdani, Sun^[15]分别利用 N-S 方程的数值模拟证明了强非定常运动中,非定常气动力主要是翼表面的压强分布所致,粘性对气动力的影响很小.我们知道,对于强非定常、低雷诺数流动,两个主控相似性参数是 St 数和 Re 数.余永亮^[12]的研究表明,强非定常情况下,只有 St 数起主导作用($St \gg Re$), Re 数的影响是次要的,因此由低雷诺数带来的气动局限性得以克服.由此可见,鸟类扑翼飞行的低雷诺数空气动力学问题必将是未来微型飞行器研究的关键技术之一.

收稿日期:2006-06-24

(作者简介)李峰(1981-)男,陕西清涧县人,博士研究生,研究方向:实验流体力学. <http://www.cnki.net>

3 非定常高升力机理分析

3.1 不失速机制

已有的计算和实验研究表明^[1~5],在低雷诺数范围定常来流条件下,昆虫所获得的升力远小于自身的重力,更不能提供机动飞行所需的附加气动力。显然,昆虫是利用非定常气流来产生高升力的。

早期有关的研究工作主要是用实验的方法,利用流动显示和气动测量技术来解释昆虫产生高升力的问题。C. P. Ellington^[6]采用飞蛾翅膀模型实验提出前缘涡(the leading-edge vortex)是昆虫产生高升力的关键,该气流漩涡沿着翅膀展向逐渐扩大,形成立体锥形。在气流漩涡中间的下方可以形成低压区,使翅膀获得升力。然而,要产生持续的高升力,必须保证动翅膀上的前缘涡在整个拍动过程中都不脱落,也即“不失速机制(the dynamic stall or the delayed stall)”。关于前缘涡在拍动过程中不脱落的原因目前有两种观点:一种观点认为因为下拍时间短,在发生失速以前这个前缘涡一直没有从翅上脱落,直到下拍结束;而 Ellington 等^[1,7]通过对鹰蛾及其自动拍动模型的流动显示实验发现前缘涡不脱落原因是翅膀上存在一展向流动,其对前缘涡起到很大的稳定作用。之后, Liu 等人^[8], Wang^[9], 兰世隆和孙茂^[10]通过计算流体力学(CFD)的方法得到了与实验相符的结果,进一步验证了昆虫的高升力应主要是由不失速机制产生的。

3.2 尾迹捕获机制

Dickinson 等^[11]对小型昆虫(果蝇)的悬停状态做了大尺寸的智能扑翼模型试验,发现非定常气动力的来源不仅依赖于翼前缘附着的动态失速涡,而且还有另外两个因素:拍动末期的快速旋转形成的速度环量升力,以及拍动初期受尾迹诱导的升力。前一种是与马格努斯效应(Magnus Effect)性质相同的机制,后一升力机制被称为“尾迹捕捉机制(wake capture)”。尾迹捕捉机制是指前一次拍动产生的卡门涡街的尾流使下一次(相反方向的)拍动的相对速度增加,从而增加升力。国内余永亮^[12]用理论模化方法来研究了昆虫拍翼方式的非定常流动物理,发现增大后缘涡的强度并加速其脱离后缘能够有效地提高升力。孙茂^[13]的研究结果也证实了尾迹捕捉机制确实有增加升力的作用。

目前关于昆虫是如何靠扑翼的方式获得高升力这一问题尚未完全解释,现有的研究表明:昆虫是利用非定常气流来产生高升力的,这一观点已得到国内外学者的一致认可;不失速机制可能是昆虫高升力主要来源,但其成因有待进一步的研究;尾迹捕捉机制对高升力的产生也有所贡献,其效应在二维情形较强,但对于三维翅膀,由于前缘失速涡不脱落(尾流不形成卡门涡街),这一效应相对较弱。

4 不同扑翼模型的气动特性

4.1 Weis-Fogh 机制

为了解释昆虫振翅飞行的升力之谜,Weis-Fogh 在仔细研究小黄蜂飞行的生物学资料的基础上,提出了 Weis-Fogh 机制^[16]。Weis-Fogh 机制指的是:昆虫的一对翅上抬至最高点,两翅面保持对应翅脉平行地和在一起(clap),然后从翅前缘(the leading-edge)绕翅后缘(the trailing-edge)快速的剥开(fling)。当两翅面张开到一定程度时,两翅面彻底分开,分别继续作平动,见图 1。Weis-Fogh 认为小黄蜂两翅合拢后的快速打开是产生大升力的主要机制。之后, Lighthill^[17]的理论分析和 Maxworthy^[18]的实验研究也得到了相同的结果。虽然大多数昆虫和鸟类虽不采用这种飞行方式,但 Weis-Fogh 机制的发现对于非定常流动的研究起到了先导性的作用。

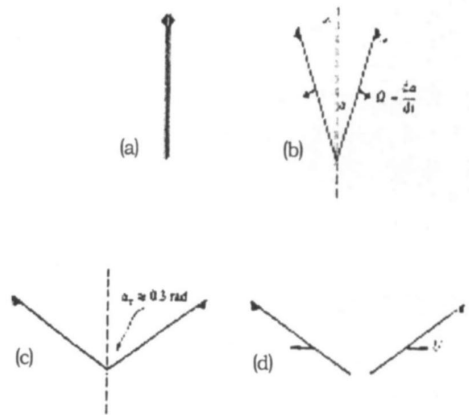


图 1 Weis-Fogh 机制示意图

4.2 简单扑翼模型

为了便于模型的制造和机理分析,目前的相关研究大都是建立在简单的扑翼模型上。虽然简化模型不能完全反应出扑翼飞行物的运动特性,但却能抓住运动的主要特征,对扑翼机气动特性的研究具有重要的意义。通过对大量昆虫飞行的生物学观察发现,大多数昆虫翅膀运动可以简化为平动和转动的复合运动,也就是翅上下扑动,同时翅沿扭转轴扭转,使迎角迅速地改变,在翅下拍至最低点时,翅快速地向内扭转(supinated),而在翅上抬至最高点时,翅快速地向内扭转(pronated)。见图 2。蜻蜓,黄蜂等昆虫都具有这类扑翼模式。

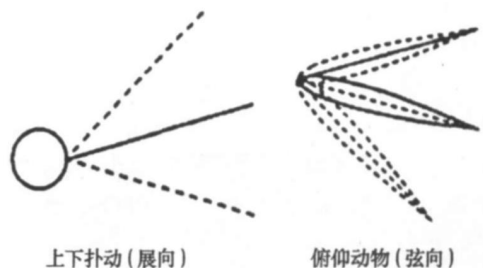


图 2 扑翼模型示意图

Sun and Du^[19]计算结果表明,大多数昆虫在自由悬停飞行时超过 80% 的平均升力是由翅膀的平动产生的。平动时攻角较大且保持不变,这表明高升力是由不失速机制产生的。当昆虫在作机动飞行时,上仰和下俯运动可能会起到提

高升力的作用^[20]. Wang^[21]对蜻蜓的研究发现,当翅膀下拍时会产生了一个包含前缘涡和后缘涡的涡对,这个涡对能产生一个向下的射流,其反作用力便是向上的气动力.孙茂^[13]对蜻蜓翼的研究也得到了类似的结论,显然,高升力是由于非定常效应产生的.

4.3 折叠扑翼模型

这是一类在研究鸟翼扑动规律的基础上,提出的一种仿鸟复合振动的扑翼模型,如图3所示.翅膀扑动的一个周期大致可以分成4个阶段:(1)下扑阶段:翅膀从最高点开始下扑至最低点,翅膀基本保持平直(有一小弯度).(2)弯曲阶段:在最低点翅膀有一个小停顿,翅膀外端向下折叠成一拱形(弯度较大).(3)上提阶段:翅膀从最低点开始上提至最高点,翅膀保持折叠成拱形.(4)展平阶段:在最高点,翅膀迅速展平,持续时间很短,然后重复开始第一阶段.

从上述的运动规律我们可以发现,鸟翼在下扑时,完全伸展可获得较大的下扑面积,使得在下扑时遇到的空气阻力变大,也即可以获得比较大的升力.其鸟翼上扑时,翼根抬起可使得翼展变短,上扑面积也变少,上扑遇到的阻力变小,这样在一个扑动周期内就获得了较大的净升力.曾锐^[22]通过非定常涡格法的计算发现,折叠型扑翼模型在一个周期内的平均升力系数较上述的简单扑翼模型有了显著增加.但这种扑翼方式必然要带来附加的传动装置,导致模型总重量的增加,这是一个不利的因素.

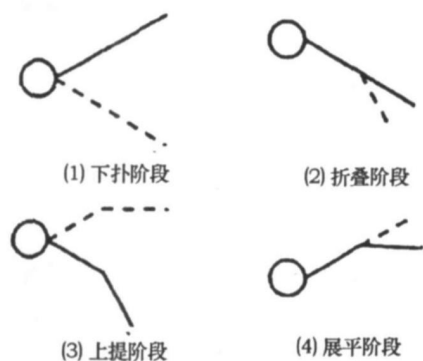


图3 折叠扑翼模型示意图

5 柔性扑翼的气动特性

实际上昆虫和鸟类的翅很少是刚性的,往往具有一定的柔性和弹性,在扑动过程中受力的作用必然会发生变形,因此,对更能反映鸟类和昆虫真实情况的柔性扑翼的研究同样具有重要意义.目前已有部分学者对此问题展开研究,并取得了一些有价值的成果.

与刚性翼相比,柔性扑翼可以导致以下几个运动参数的变化:首先是扑动角 β (代表上下扑动幅度)的增大,从而增大升力和推力.鸟儿在起飞和着陆时需要较大的升力和推力,所以,此时鸟翼扑动幅度要远远大于平时的扑动幅度.其次是迎角的变化,Tobalske^[23]的研究表明,柔性翼在速度较

低时,迎角较大;随着速度的增大,迎角反而开始减小.这对扑翼机的增升减阻大有裨益.曾锐^[24]的研究发现,柔性扑翼还可以改变倾斜角(扑动平面与垂直面的夹角)的大小.当增大时升力增大,推力减小;反之,则升力减小,推力增大.王姝歆^[25]的研究也得到类似的结论,柔性翼有利于高频扑动,产生的升力较大,而且气动力变化比较稳定.

由此看来,柔性翼具有良好的运动性能和气动性能,应该是未来微型扑翼飞行器研究的重点之一.

6 结束语

FMAV 一个包含多种交叉学科的高、精、尖技术的项目,特别低雷诺数下空气动力学问题是其发展面临的关键技术和难点之一.只有在上述问题的研究上获得突破,FMAV 才能迈上一个新台阶,才能真正走向实用化.本文从多个角度介绍了目前国内外对 FMAV 空气动力学问题的研究动态,提出了未来 FMAV 的发展趋势,为进一步的研究给出了参考和依据.

参考文献:

- [1]Weis-Fogh and M. Jensen. Proc. R. Soc. London B, 239, 415(1956).
- [2]G. R. Spedding, Contemp. Math, 141, 401(1993).
- [3]R. Dudley, The Biomechanics of Insect Flight, Princeton University Press, Princeton, 2000.
- [4]C. P. Ellington, Philos. Trans. R. Soc. London B, 305, 1(1984).
- [5]孙茂. 昆虫飞行的高升力机理[J]. 力学进展, 2002, 32(3): 425—434.
- [6]Ellington C P, Van den Berg C, Willmott A P, et al. Leading Edge Vortices in Insect Flight[J]. Nature, 1996, 384, 626~630.
- [7]Van den Berg C, Ellington C P. The three-dimensional leading-edge vortex of a 'hovering' model hawkmoth[J]. Phil Trans R Soc Lond B, 1997, 352, 329~340.
- [8]Liu H, Ellington C P, Kawachi K, et al. A computational fluid dynamic study of hawkmoth hovering[J]. J Exp Biol, 1998, 201, 461~477.
- [9]Wang Z J. Vortex shedding and frequency selection in flapping flight[J]. J Fluid Mech, 2000a, 410, 323~341.
- [10]Lan S L, Sun M. Aerodynamic properties of a wing performing unsteady rotational motions at low Reynolds number[J]. Acta Mech, 2001, 149, 135~147.
- [11]Dickinson M H. et al. Wing rotation and the aerodynamic basis of insect flight. Science, 1999, 284, 954~960.
- [12]余永亮. 昆虫拍翼方式的非定常流物理再探讨[J]. 力学学报, 2005, 37(3): 257~265.
- [13]孙茂. 昆虫飞行的高升力机理和能耗[J]. 北京航空航天大学学报, 2003, 29(11): 970~977.
- [14]Wang Z J. Two dimensional mechanism for insect hovering. Physical Review Letters, 2000, 85, 2216~2219.

(下转第84页)

供应链系统是典型的复杂系统,脆性亦为供应链的特征属性,应用蚁群算法同时考虑到供应链脆性因子的重要性和脆性事件的发生概率,可以有效的选择导致供应链脆性事件发生的脆性因子。

参考文献:

[1] 韦琦,金鸿章,姚绪梁,郭健.基于脆性的复杂系统崩溃的初探,哈尔滨工程大学学报,2003,24(2):161-165.

[2] 蒋白桦,王丹力,王宏安,戴国忠.从复杂性的角度分析供应链管理问题,计算机工程与应用,2002,(15)53-54.

[3] 李琦,金鸿章,林德明.复杂系统德脆性模型机构[J].系统工程,2005,(1):3-4.

[4] 钟波,谢挺.供应链系统的脆性模型研究[J].中国管理科学,2005,(5).

[5] 覃方君,田蔚风,李安,卞鸿巍.基于蚁群算法的复杂系统多故障状态的决策[J].中国惯性技术学报,2004,(4):12-15.

Analyses in Supply Chain System's Brittleness Based on Ant Colony Algorithm

DIAO Li, LIU Xi-lin

(Management College, West-North Industry Univ., Xian 710072, China)

Abstract: The growing dimensions, multilevel structures and turbulence environments make a high level of complexity in supply chain system. Applying ant colony algorithm to analyzing system's brittleness can find the optimal way to gene of the system's brittleness.

Key words: system's brittleness; supply chain; ant colony algorithm

(上接第 59 页)

[15] Hamdani H, Sun M. Aerodynamic forces and flow structures of an airfoil in some unsteady motions at small Reynolds number. *Acta Mechanica*, Springer-Verlag, 2000, 145: 173~187.

[16] T. Weis-Fogh, J. exp. Biol. 59, 169-230(1973).

[17] Lighthill MJ. On the Weis-Fogh mechanism of lift generation [J]. *J Fluid Mech*, 1973, 60: 1~17.

[18] Maxworthy T. Experiments on the Weis-Fogh mechanism of lift generation by insects in hovering flight. Part I. Dynamics of the fling[J]. *J Fluid Mech*, 1979, 93: 47~63.

[19] Sun M, Du G. Lift and power requirements of hovering insects flight[J]. *Acta Mech Sinica*, 2003, 19(5): 458~469.

[20] Dickinson M H, Lehman F O, Sane S P. Wing rotation and the aerodynamic basis of insect flight [J]. *Science*, 1999, 284:

1954~1960.

[21] Wang Z J. Two dimensional mechanism for insect hovering[J]. *Physical Rev Lett*, 2000b, 85: 2216~2219.

[22] 曾锐, 昂海松. 仿鸟复合振动的扑翼气动分析[J]. 南京航空航天大学学报, 2003, 35 (1): 7~12.

[23] Tobalske B. W, Dial K. P. Flight kinematics of black-billed magpies and pigeons over a wide range of speeds[J]. *The Journal of Experimental Biology*, 1999, Vol. 199: PP263~280.

[24] 曾锐, 昂海松, 梅源. 柔性扑翼的气动特性研究[J]. 应用力学学报, 2005, 22 (1): 1~7.

[25] 王姝歆, 陈国平, 周建华, 颜景平. 仿生扑翼飞行器机器人翅型的研制与实验研究[J]. 实验力学, 2006, 21 (3): 315~321.

Advances in Aerodynamics Research on Flapping-Wing Micro Air Vehicles

LI Feng, YE Zheng-yin, BAI Cun-ru

(National Key Laboratory of Aerodynamic Design and Research, NWPU, Xi'an 710072, China)

Abstract: Flapping-Wing Micro Air Vehicle (FMAV), as a new conceptual vehicle, provides a variety of functions and uses and has attracted much research attention in industrial nations. The present research situation and future development trend of the low Reynolds number aerodynamics of flapping-wing micro air vehicle (FMAV) are surveyed and several key technologies of FMAV are discussed. On this basis, the emphasis of future work of FMAV is summarized and the reference data for future design of FMAV is provided in the end.

Key words: flapping-wing micro air vehicle (FMAV); aerodynamic characteristics; vlow Reynolds number; non-steady flow