

·学科进展·

微型飞行器中的关键力学和智能材料问题

赵亚溥

(中国科学院力学研究所非线性力学国家重点实验室,北京 100080)

[摘要] 微型飞行器(MAV)涉及到低雷诺数飞行力学以及微自适应流动控制、微电子机械系统(MEMS)、智能材料(人造肌肉)、信息技术以及自动控制等学科分支。本文重点阐述 MAV 中所包含的若干关键性的力学和智能材料问题。

[关键词] 微型飞行器, MEMS, 低雷诺数, 微自适应流动控制, 人造肌肉

前言

微型飞行器(Micro Air Vehicles, MAV)是由美国国防部高级研究计划署(DARPA)先期投资3500万美元负责组织实施的重要项目^[1]。MAV并不是普通飞机或直升机的微型化,而是一种典型的集成化智能微系统,或称为空中机器人,可以做6个自由度运动。图1所示为一手掌大小的微型飞行器。美国军方之所以对发展MAV极为重视,究其原因是在军方作战的迫切需求以及在技术上具有可实现性的共同结果。

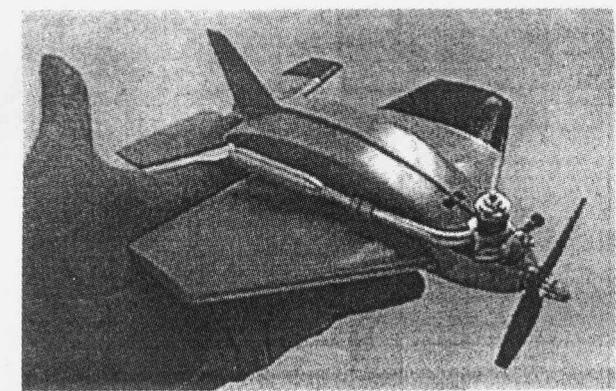


图1 手掌上的微型飞行器

美国五角大楼一直梦想制造出一种像鸟一样的飞行器,它能拍动翅膀飞到附近的山头上、丛林中,在巷战中飞到临近的街角,将所侦察到的一切情报用电视图像发回。军事规划人员说,如果现在就有

这种微型飞行器的话,在向科索沃的战争中,将更加主动^[2]。可以预期,MAV将成为未来战争的重要装备。

技术上的可行性来自于微技术的飞速发展,其中包括微电子机械系统(MEMS),如可进行惯性和姿态控制的微加速度计和微陀螺仪等。其他已经成熟的产品如微型CCD照相机、微型红外传感器和检测器等微系统也为MAV的研制提供了必要技术储备和基础。另外,利用已经成熟的制造计算机芯片的半导体材料批量制造这种微小的飞行器将大大降低成本。

之所以将MAV称作“集成化智能微系统”,是因为它集飞行控制、推进、轻重量能源和通讯等技术于一体。MAV和下列DARPA发展的高技术紧密相关:(1)先进通讯和信息系统;(2)高性能计算机技术;(3)MEMS;(4)轻重量、有效高密度能源;(5)先进电子封装技术,等。

“能看不能动,能动不能用”形象地形容了目前国际上绝大部分微系统所普遍存在的问题。作为集成微光机电系统中的主要科学问题之一,微系统力学的研究和发展将是克服上述障碍的关键^[3]。本文旨在讨论MAV中所涉及的几个关键的力学和智能材料问题,为下一步关于MAV的研究开发进行理论准备。

1 MAV中的尺度效应和表面效应

DARPA对MAV的尺寸有明确的界定,规定在

长宽高任何方向上的尺度都不超过 15 cm(约 6 英寸),其重量约为 50 g,有效载荷为 20 g 左右,飞行高度大约为 600 m,飞行距离大约 10 km,留空时间在 20 min 到 60 min。按上述要求的 MAV 比目前最小的美国无人驾驶飞行器(UAV)——“Sender”在尺寸上还要小一个数量级,在重量上至少也要小 2 个数量级。

“尺度效应”和“表面效应”是微系统中 2 大主要科学问题。随着飞行器尺寸的变小,雷诺数(Re)也变小,也就是惯性和粘性之比变小,因此,空气的粘滞性就变得越来越重要。图 2 给出的是各类飞行器、鸟类和飞行昆虫的飞行速度和雷诺数的大致范围^[4]。对于最小的昆虫,他们在空气中的飞行就好像在蜂蜜里面游泳。低 Re 情况下,边界层呈层流状态,很容易发生分离。低 Re 给推进带来的影响主要有 2 个^[1]:(1)升力和阻力之比低,势必增加了对能源的需求;(2)螺旋桨推进效率低。

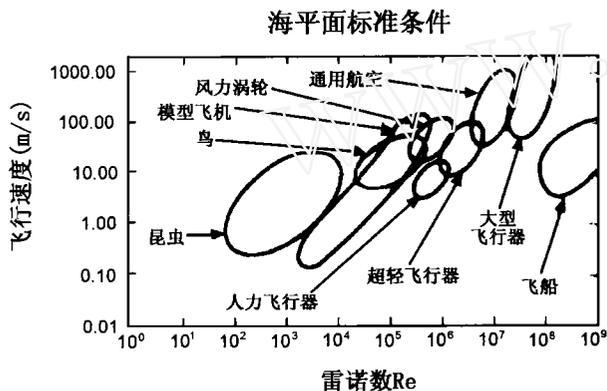


图 2 各类飞行器、鸟类和昆虫飞行速度及雷诺数的大致范围

由于特征尺寸小,MAV 的表面积和体积的比值很高,重量特别轻,惯性也很小。因此使 MAV 对阵风响应的问题变得突出,所以 MAV 必须具备良好的机动性。基于上述原因,可知传统的飞行器设计理论和方法将不再适用。未来的 MAV 的外型将可能完全不同于我们所熟悉的飞机或直升机。因此需要在提高表面利用率上做文章,要求 MAV 构件尽可能做到多功能化。

2 来自仿生学的启示

按照飞行原理的不同,MAV 可能有 3 种不同的翼型:(1)固定翼(fixed wings):从现有的固定翼飞机演变发展;(2)旋翼(rotary wings):从现有的直升机演变发展;(3)扑翼(flapping wings):模拟鸟类或昆虫的飞行。自然界中的鸟类和昆虫的飞行经过几千年的

进化,几乎达到了完美的程度。也许 MAV 模拟鸟类或昆虫的飞行将是最佳的选择。事实上,美国佐治亚理工学院 R. Michelson 领导的 MAV”Entomopter”计划研究组已经提出了扑翼 MAV 方案(如图 3 所示)。

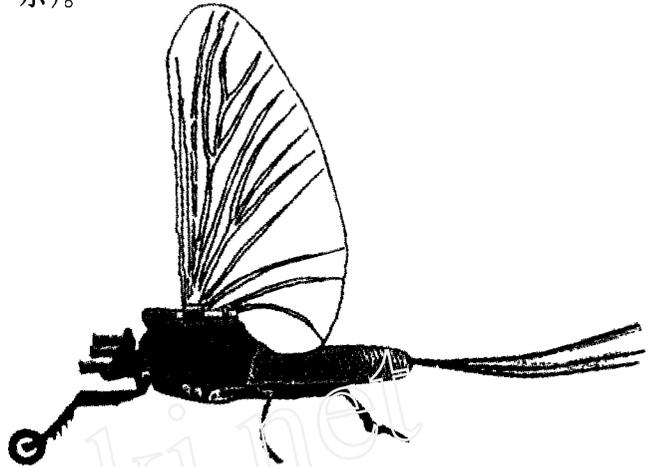


图 3 佐治亚理工学院研究组设计的扑翼微型飞行器

鸟类和昆虫的飞行呈现出多种多样的机制,但就其基本特征而言,可归结为 2 种主要类型:翱翔和扑翼飞行。2 种类型飞行的机理迥然不同。翱翔是大型鸟类善用的一种飞行方式,鸟展翅翱翔时,翅膀基本不动,其作用像固定的机翼,在相对气流作用下产生举力,克服自身重量。从能量角度看,翱翔所需的能量,源于鸟的势能;扑翼飞行是鸟和昆虫靠自身体力和特殊生理构造实现的一种较复杂的动力飞行。所需空气动力主要来自于往复扑动的翅膀与周围空气的相互作用。从能量角度看,这种飞行是靠消耗鸟或昆虫自身的能量来维持的。昆虫作扑翼飞行时,翅膀的动作与鸟翼颇不相同。昆虫翅膀无羽毛,其形状和翼面大小一般不能改变,只可作向上、向下或旋转运动。

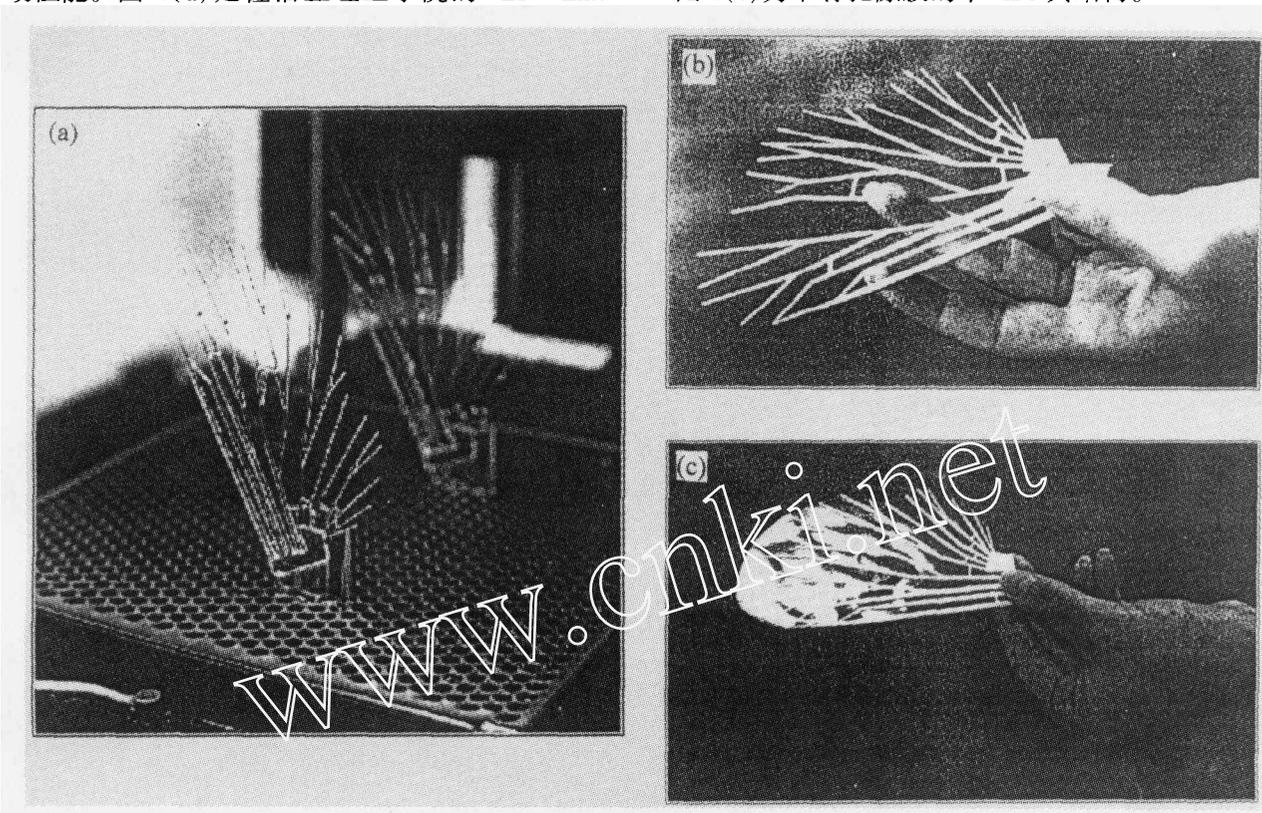
可以将昆虫的运动方式划分为 3 种:行走、跳跃和飞行。跳跃和飞翔在尺寸小于 1 mm 的昆虫中占主导地位,而飞翔所消耗的能量最少。

为了从飞行昆虫的飞行中得到有益的启示,研究 MAV 的美国科学家们利用高速摄影机、计算机和其他高技术装备,对自然界的鸟类和昆虫的飞行状态进行研究并获得了确切的了解。MAV 的 Re 和鸟类中的最小者以及大的飞行昆虫相当,属于低 Re 飞行。因此用于设计普通飞机的传统方法(高 Re)对 MAV 的研制将完全不适用。

现代飞机的“固定翼”早已是一项成熟的技术,为何还要花费时间和经费研究拍动的飞行翼呢?根

据空气动力学原理,对于体积只有小鸟那么大的飞行器来说,采用活动翼优于固定翼。带有活动翼的机器可以悬停,而且比固定翼飞行器具有更好的机动性能。图 4(a)是佐治亚理工学院的 MAV“Ento-

mopter”计划研究组开发研制的扑翼骨架在“立体印刷液(stereolithography bath)”中的生长过程;图 4(b)为应用熔融沉积成型(FDM)制成的单 ABS 翼结构;图 4(c)为带有孔隙膜的单 ABS 翼结构。



(a)扑翼骨架; (b)ABS 翼; (c)单 ABS 翼

图 4 几种活动翼结构示意图

通过大量研究发现,在所有的飞行昆虫当中,苍蝇的结构是最先进的^[2]。因此可以设想,几年后,成群的、体积只有苍蝇大的 MAV 不仅可以投入战场侦察使用,还可以应用于环境、森林监测,科学考察等。

3 MAV 中的微自适应流动控制(MAFC)

飞行控制是 MAV 中最为关键的因素之一,而对飞行的控制最终要通过流动控制来实现。近年来,应用 MEMS 进行流动控制已经取得了重要突破。利用 MEMS 技术,可以使机翼表面根据流过其上的流体的湍流波动情况而发生轻微的运动。机翼的表面用合成材料制成,其中有数以百万计的埋置传感器和执行装置,它们根据流体压力和速度的变化而动作,以控制引起湍流阻力的小涡旋。就在 90 年代初,将 MEMS 应用于飞行器流动控制似乎还是异想天开,然而,在美国空军的牵头下,MEMS 的进展已使这样一项方案发展到接近实现的地步^[3]。运用 MEMS 技术可制造出机翼上所必需的微传感器、控

制逻辑和执行装置的集成电路。

和 MAV 直接相关的 DARPA 另外一个研究项目是“微自适应流动控制(MAFC)”。MAFC 技术将自适应控制方法和先进致动器概念(如微尺度协同射流、基于 MEMS 的微致动器)、脉冲式吹气以及智能结构结合在一起,来防止或延缓流动的分层。MAFC 将为 MAV 在实现自适应飞行控制方面带来革命性的进展。

4 微型动力推进和人造肌肉的研究

MAV 的微型动力推进系统可能有 3 种不同的形式:(1)螺旋桨推进,该方案由于效率太低,所以将不被采用;(2)喷气推进,其难点在于研制微型喷管;(3)人造肌肉动力推进,主要用于扑翼 MAV。

因此,扑翼 MAV 对智能材料的研究也提出了挑战,主要是用于扑翼微型飞行器驱动的“人造肌肉”,它利用化学或电流和一种类似橡胶的物质发挥机械传动、齿轮和滑轮的作用。美国 Stanford 研究所研制

的扑翼飞行器就是由人造肌肉驱动,看上去像一条橡胶软管,两端带有电针;佐治亚理工学院的 MAV “Entomopter”计划研究组所使用的是一种被称作“往复式化学肌肉(RCM)”,它在化学能的驱动下,可以使扑翼产生扑动,通过直接转换,RCM 还可以为机上微系统提供少量的电能。

“人造肌肉”在智能材料学科中又被称为“聚合胶体”,它可以在电激励或化学激励下反复收缩和膨胀。根据工程需要,要求聚合胶体驱动器具有下列特性^[5]:(1)能够制成并联的纤维束,而且运动是线性的;(2)要求稳定性好和坚固,使用寿命长;(3)可以主动调节柔度;(4)结构紧凑,单位体积的激励能量大($> 10^8 \text{ W/m}^3$);(5)力集度高,能够发出 0.1—0.5 Mpa 的力的集度(一般光滑肌肉可以发出的力的集度为 0.1 MPa);(6)响应速度快。要求机械拉力在受激后 30 ms 之内达到最大,卸载时平均缩短速度为 $5 \mu\text{m/s}$;(7)具有高的动力与重量比值,在很大程度上取决于训练,瞬时峰值能发出高达 1 kW/kg (人体肌肉的典型输出动力与重量比为 0.1 kW/kg);(8)使用方便,期望最好用电激励;(9)高效率的能量转换,即输出机械能与输入电、化学能量的比值要大,目前采用电激励方法由电能转换为机械能的效率很低,主要应用化学激励,由化学能转变为机械能。生物肌肉中的比值高达 45%—70%。

由化学能转变为机械能的聚合胶体类型很多,在生物和工程技术上有应用前景的是聚合电解质胶体。近年来,因驱动器需要,通过改变化学成分、交链程度、键的平均分子量等因素,已经研究出多种强度高、响应快的聚合物胶体。在电化能转变为机械能的聚合胶体的研究方面也已经取得了一定进展,但离实际要求还相差较远。

将聚合物胶体制成驱动器结构,还需要解决动作的控制方案。

5 小结

微型飞行器前景十分诱人,但要将其变成现实却面临诸多难题。其中关于微系统力学和智能材料的深入研究可以为解决上述难题发挥重要作用。

参 考 文 献

- [1] McMichel J M, Francis M S. Micro Air Vehicles-Toward a New Dimension in Flight, US DARPA/TTO report, 1997.
- [2] 李·戈梅斯. 是飞鸟? 是间谍飞机. 华尔街日报, 1999年4月6日.
- [3] 赵亚溥. 智能微系统力学中的若干问题. 石家庄铁道学院学报, 1999, 12(2): 13—18.
- [4] Gandhi M V, Thompson B S. Smart Materials and Structures. Chapman & Hall, 1992.
- [5] 陶宝祺等. 智能材料结构. 北京:国防工业出版社, 1997.

KEY PROBLEMS OF MECHANICS AND SMART MATERIALS IN MICRO AIR VEHICLES

Zhao Yapu

(Institute of Mechanics, CAS, Beijing 100080)

Abstract Micro air vehicle (MAV) is a kind of model integrated intelligent microsystem, and is expected to play key role in future war and civil applications. MAVs involve some subjects such as low Reynolds flight mechanics, micro adaptive fluid control, micro-electro-mechanical systems (MEMS), smart materials (artificial muscle), information technology and automatic control, etc. The emphasis of this paper is to discuss the key problems of mechanics and smart materials in MAVs.

Key words micro air vehicle, MEMS, low Reynolds number, micro adaptive fluid control, artificial muscle