

探討微飛行器(MAV)發展與運用

尚景賢¹，江明鋁²

¹ 空軍航空技術學院專精組組長

² 空軍航空技術學院專精組教官

摘要

微飛行器(MAV-Micro Aero Vehicle)看來就像坊間的遙控飛機或縮小版，似乎只要把尺寸等比縮小，再裝上任務需求所須使用的裝備即可，但因其所牽涉尺度、重量、動力、氣動力特性及系統與零附件裝備亦需微型化等複雜問題，使得 MAV 的發展研究不如吾們所想像的簡單。最近隨著電子技術與微機電系統技術(MEMS)的快速進展，各種元件尺寸能大幅縮減，才使得微飛行器的發展漸趨於實際。

此次選用 MAV 作為研討主題，是希望能引起大家對無人飛行載具的興趣，對其未來發展趨勢及對未來作戰型態的影響有所認識。

關鍵字：微飛行器、MAV、微機電系統、MEMS

壹、前言

飛機的發展已有百年歷史，科技的進步與人類智慧的發揮，使得有人駕駛之飛行載具(Human-Piloted Aircraft)使用技術成熟，各類飛行器的開發與應用亦愈來愈符合時代與環境的需求，實現了飛得更高、更遠、載客(貨)量更多、更省油、更舒適、更有效率等理想的設計理念。而當我們已習慣並使用這些科技進步的成果時，科學家們已開始進行更創新的階段，也就是無人飛行載具的設計與研發。

無人飛行載具(UAV-Unmanned Air Vehicle)是一種以無線電遙控或由自身程序控制為主的不載人飛機。屬於高科技技術的集中載體，目前主要應用於現代戰爭。它的研製和戰場運用的成功，揭開了以遠距離攻擊型之智能化武器、信息化武器為主導的「非接觸性戰爭」新頁。¹

無人飛機的造價低廉，相當於有人飛機的百分之一到千分之一，大約是幾萬至幾十萬美元之間，差距相當懸殊；無人飛機操縱人員僅需約半年的常規訓練，而一名有人飛機的飛行員，則需約 4 年以上的專門培訓，耗資甚大；當兩者執行相同的任務時，無人飛機所耗燃料也相對地少，通常只需有人飛機的百分之一。且無人飛機使用簡便，可短距離滾行起飛升空，可直接利用發射架發射升空，也可在公路、海灘及沙漠等地形上起飛；回收時也很方便，可使用降落傘或攔截網回收，也可以利用起落架、滑橈、機腹著陸。另外因其隱蔽性好，戰場生存能力強，空中動作敏捷自如，雷達及各種探測器很難發現其行蹤。甚至還可以像直升機一樣(如加拿大的 UAV「CL-227 哨兵」)，進行垂直起降。

因為這個有人操作與無人操作的重要分野，無人飛行載具在設計上除了可以將人類的生理與心理限制排除、保全飛行人員生命、節省飛行人員在載具上所占用的空間、節省訓練飛行人員所需的時間與經費，再加上上述所提造價低、使用方便、油耗低、對作

¹ 中國科普博覽

<http://www.kepu.net.cn/big5/technology/cybernetics/industry/idy403.html>

戰環境要求低、戰場生存能力較強等優點，且可視任務需求，進行不同的構型、動力、裝備等調整，使其應用領域大增，而備受世界各國軍方的重視。

目前無人飛機準確、高效率 and 靈活的偵察、干擾、欺騙、搜索等功能，以及在非正規條件下作戰等多種作戰能力，都發揮了顯著的作用，並引發軍事學術、裝備技術等相關問題的研究。一些專家預言：未來的空戰，將是具有隱形特性的無人駕駛飛行器與防空武器之間的作戰。它將與研發中的武庫艦、無人駕駛坦克、機器人士兵、電腦病毒武器、天基武器、雷射武器等一起成為 21 世紀陸戰、海戰、空戰、天戰舞台上的重要角色，對未來的軍事戰爭造成極為深遠的影響。²

貳、無人飛機發展的區分

依照不同的任務型態需求，當前無人飛行載具之發展大致分為下列三大方向：

一、極高速-無人空戰飛行載具(UCAV-Uninhibited Combat Air Vehicle)：UCAV 基本上為一極音速(Hypersonic)攻擊載具，可深入敵之內陸，快速打擊，完成攻擊破壞等任務。

二、極高空-高空耐航無人載具(HALE-High Altitude Long Endurance)：HALE 之設計為航行於 60000 ft 以上之極高空輕型載具，該處為無惡劣天象之平流層(Stratosphere)，又非戰機可達，無安全之虞，HALE 可從容從事監視、偵察、通訊中繼等任務，以其低成本具有取代衛星功能之潛力。

三、極微小-微型飛行載具(MAV-Micro Air Vehicle)：MAV 基本上為長寬高均小於 15 公分之微小型飛行器 (目前尺寸

在 30 cm 以下者均稱之為 MAV)。因其型小質輕，便於攜帶，可單人操作，為戰場上單兵之偵蒐利器。而其具匿蹤隱密不易為敵偵察之特性，又適合執行低空偵查、跟監、電子干擾、通訊中繼、目標指示、戰場評估、核生化戰區偵測以及危險區域之任務，故亦有間諜飛機(Spy Plane)之稱謂。

上述三種 UAV 各有其不同之運用，其技術層面亦有不同；惟三者共通之處，即在於具有高度之軍事應用價值，其中又以 MAV 多元化功能為最。

微飛行器(MAV-Micro Aero Vehicle)外觀上就像遙控飛機或縮小版，似乎只要把尺寸等比縮小，再裝上任務需求所須使用的裝備即可，但其實不然，它所涉及尺度、重量、動力、氣動力特性等，以及系統與零附件需同步微型化與整合等複雜問題，使得 MAV 的發展研究並不如想像中的簡單，過去發展上經常遭遇諸多瓶頸。由於近代電子技術與微機電技術(MEMS)的快速發展，各種元件尺寸大幅縮小，使得微飛行器的發展漸趨於實際運用。³並對軍事範疇與未來作戰型態產生影響。

美國國防先進研究計畫局 DARPA (Defense Advanced Research Project Agency)自 1997 年起即極力推動 MAV 之研發。根據 DARPA 微飛行器尺寸的定義是：計畫之飛行器尺寸為小於或等於 15 公分以內；微飛行器總體設計理念則是：最大航程超過 10km，最大飛行速度為 40~50 km/hr，最大續航時間須達 2 小時。⁴

參、微飛行器的基本分類

由於微飛行器之尺寸小、速度慢、飛行雷諾數低、重量級數小，因此其氣動力性能、推進方式與能源需求、對外在干擾之響應、穩定與控制等均會與一般的飛行器大相逕庭。平時我們常常把感覺不到的東西說成是

² 中國科普博覽

<http://www.kepu.net.cn/big5/technology/cybernetics/industry/idy403.html>

³ 宋齊有，微飛行系統相關之力學問題，2003

⁴ DARPA, DOD, USA, <http://www.darpa.mil/>

「像空氣一樣」，但對低雷諾數的微飛行器而言，周遭的空氣恐怕就像「漿糊」一樣。所以必須研究在這種操作環境下，統合各系統，設計出最具效益、最符合任務需求的 MAV。

以力學的觀點，微飛行器由其升力產生與推進方式可區分為：(1)固定翼(Fixed-Wing)；(2)旋翼(Rotary-Wing)及(3)拍撲翼(Flapping-Wing)等三大類微飛行器。⁵

一、固定翼微飛行器

固定翼微飛行器與習見大型飛行器相同，有一推進系統專司推力之產生；由推力提供前進動力，建立速度，而由主翼產生升力。但由於翼展限制於 15 公分以內，因此為產生足夠的升力，翼面積需較大，故展弦比 (Aspect-Ratio, AR) 均較小，即 $AR \sim 1$ 。目前飛試成功之微飛行器設計大多屬此類。Florida 大學提出之彈性翼 (如圖 1)，有固定翼根，但翼表面為彈性材質之薄膜 (Membrane)，可依瞬時之局部翼面壓力而作有限度之扭曲變形。由於推力仍由推進系統提供，機翼無撲動與轉動，翼面之扭曲變形幅度也有限，故彈性翼基本上屬固定翼，為一種改良式的構型。

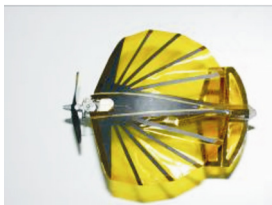


圖1 彈性翼(flexible wing)微飛行器

二、旋翼微飛行器

旋翼微飛行器或稱微直昇機 (Micro Helicopters)，目前出現者有雙螺旋槳與四螺旋槳者。雙螺旋槳 MAV (如德國 IMM 公司以機械加工製造的 19mm 長旋翼 MAV) 之基本構型設計與大型旋翼機相似；但具有四旋翼之微旋翼機 (如 Michigan 大學之 Hover Bot 以及 Stanford 大學之

Mesicopters(如圖 2)，其飛行動力特性與操控較為複雜。另外有一種源自昆蟲 (如蜻蜓) 之四翼交互運動轉化而成的兩平行同軸反轉推力翼 (Thrust Wing) 旋翼構型之構想，近年也再度被提出研究。但無論何種旋翼構型，其推力與升力均來自旋翼機構，此點與固定翼之推力與升力由不同分件負責產生是大不相同的。



圖2 史丹福大學的微直昇機(Mesicopters)

三、拍撲翼微飛行器

拍撲翼微飛行器為三類中較特殊者，不同於固定翼，其升力與推力為同一來源：翼之拍撲；但亦不同於旋翼，因拍撲翼之三維運動遠較旋翼更為複雜。此種飛行器(如圖 3)在自然界中可仿效之對象極多，如各類蟲、鳥等均利用其翼之拍撲運動同時產生推力與生力。

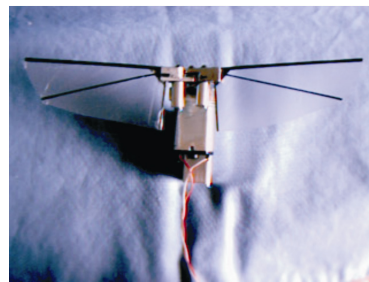


圖3 加州理工學院拍撲翼微飛行器 (Microbat)

肆、微飛行器技術相關之力學論題

考慮單人操作方便、隱匿特性以及任務需求，一般定義 MAV 之規格(以固定翼為例)為：翼展等於或小於 15 cm；起飛重量 100 g 或更輕；酬載 1~20 g

；飛行速度 5~20 m/s；飛行高度

⁵宋齊有，微飛行系統相關之力學問題，2003

50~150 m；航程 10 km；續航時間至少 20 min(仍以 DARPA 定義的規格作基礎)。以下以此規格為例來說明其相關之力學問題：⁶

一、尺度律與結構力學

以微飛行器之尺度率 (Scaling Law) 剖析 MAV 之結構特性，其重量(W)、面積(S)與長度(l)分別為三方與平方之關係，即

$$W \sim l^3, \quad S \sim l^2 \quad (1)$$

升力 (L) 為 $L = C_L \cdot (1/2) \rho V^2 \cdot S$ ，故得

$$L \sim V^2 S \sim V^2 l^2 \quad (2)$$

以飛行器平飛 (Level Flight) 時為例，此時

$$W \sim L \sim V^2 l^2 \quad (3)$$

$$\text{機翼負載為 } W/S \sim l \sim W^{1/3} \quad (4)$$

$$\text{或 } W/S \sim W/l^2 \sim V^2 \quad (5)$$

由現有人造飛行器與自然界飛行生物之重量、翼負荷與飛行速度之大飛行圖 (Great Flight Diagram)，將數據作曲線擬合 (Curve Fitting)，可得到翼負荷與重量及飛行速度之關係式 (Tennekes, 1996) 為：

$$W/S = 47 W^{1/3}; \quad W/S = 0.375 V^2 \quad (6)$$

若將此二式合併，則可導出一般飛行器速度與重量之關係式

$$V^2 = 125.33 W^{1/3} \quad (7)$$

式中重量 W 之單位為 N (Newton)，速度 V 之單位為 m/s。由此可知：若重量為 100 g (即約為 1 Newton)，則飛行速度約在 11 m/s 附近。再由結構的觀點來看，結構應力 (Stress) σ 為每單位面積之受力強度，故

$$\sigma \sim W/l^2 \sim l \sim V^2 \quad (8)$$

由於相較於一般大型飛行器長度之量階為

10m、速度之量階為 10^2 m/s，微飛行器長度與速度尺度分別為 10^{-1} m 與 10m/s，因此結構應力之大小量階與大型飛行器相較為 10^{-2} ，亦即低兩個量階。故機體結構強度在微飛行器之設計與製造上並非重要考量。但由輕重量設計考量，故仍應朝向強度強，但質輕之材料，如選擇碳纖維複合材料等。

二、空氣動力

飛行器之雷諾數 (Reynolds Number) 定義為 $Re \equiv Vc/\nu$ ，其中 V 為飛行速度、 c 為翼弦長 (Wing Chord)、 ν 為空氣之運動黏性 (Kinematic Viscosity)。相較於一般飛行器，微飛行器之速度低、尺度小、 Re 極低，若以 $V = 10$ m/s, $c = 15$ cm 估算，則 Re 約在 10^4 之譜，更小型之飛行器，其 Re 更低，以目前研究之各式微飛行器而言， Re 約在 10^2 至 10^5 之間，屬低雷諾數空氣動力學 (Low-Re Aerodynamics) 領域。此種情況與大型飛行器雷諾數介於 10^6 至 10^9 大不相同。平滑與粗糙之翼切形最大升阻比 $(L/D)_{\max}$ 隨雷諾數之變化迥異 (Lissaman, 1983)：在紊流區 ($Re > 10^5$)，一般平滑翼之 $(L/D)_{\max}$ 較粗糙翼者為高；但當 Re 低於 10^5 時，平滑翼 $(L/D)_{\max}$ 之量階降為 $O(1)$ ，反是粗糙翼者較佳。

此一結果之產生與低雷諾數機翼表面一些複雜的流動現象，如：表面渦度 (Surface Vorticity) 發展、層性邊界層發展、層性分離泡 (Laminar Separation Bubble)、層紊流轉換 (Laminar-to-turbulence Transition) 等等有關。適宜的紊流促進器 (Turbulators) 設計係改善低 Re 機翼流方案之一，因此粗糙表面之翼切形其 L/D 反倒仍能維持在 $O(10)$ 。最近之研究 (吳章傑等, 2001) 亦發現：類蜻蜓之局部鋸齒狀翼切形在低 Re 時亦有饒富趣味之流場特性。以上所論尚侷限於二維翼切形 (Airfoil)，微飛行器機翼為低展弦

⁶宋齊有，微飛行系統相關之力學問題，2003

比 (Low Aspect-Ratio) 翼，翼尖渦(Tip vortices)之三維效應則會導致誘導阻力(Induced Drag)之產生，更降低其 L/D 之值，但失速(Stall)卻因翼尖渦之上翻(Roll-Up)後壓向翼面作用而延後(吳章傑等，2001)。

以機翼而言，低雷諾數之升阻比 (Lift-to-Drag Ratio) L/D (或 C_L/C_D) 及續航參數 (Endurance Parameter)，亦稱為性能參數 (Performance Parameter) $C_L^{3/2}/C_D$ 均低。Jenkins *et al.*(1998)之數值模擬揭示續航參數 $C_L^{3/2}/C_D$ 隨 Re 之變化，顯示出續航力隨 Re 之降低而減弱。一般大型飛行器升阻比之量階約為 $O(10^2)$ ，而 Re 在約 10^4 或 10^5 時，升阻比少二量階，即 $O(1)$ 。如何結合已知氣動力流動特性，提昇機翼之氣動力性能是固定翼氣動力技術之研究課題。

至於旋翼微飛行器，其升力源自旋轉翼片，亦會遭遇低 Re 時之低氣動力效率，氣動力技術上之挑戰與固定翼相似。提高轉速固可提高旋翼之 Re ，然轉速提高將產生高熱問題、能源供給以及引擎或馬達尺寸等問題。

拍撲翼通常為小面積、多片，高頻振動，增高氣流與翼之相對速度，可達到較高之 Re ；此外，多翼拍撲之組合運動導致具非定常渦流(Unsteady Vortices)之複雜流場。蟲鳥拍撲翼產生升力與推力之三維轉動：拍撲(Flapping)、滯後(Lagging)及扭轉(Torsion)，其複雜之運動模式及非定常渦流控制係蟲鳥飛行能力之秘訣，可成功的克服低雷諾數造成的升力係數驟降及阻力係數上升的影響，例如蜻蜓矯健敏捷之操控性能與其拍撲週期參數(頻率、振幅)有關，而每一時刻每片翼均有拍撲、滯後以及扭轉三個角位置與三個角速度，就此一複雜之三維轉動機構，四片翼共有 24 個自由度，24 個參數如何配當成為最佳組合，是專家們極力探

究的方向。

三、推進與能源系統

目前使用或研究中之推進系統有：螺旋槳配微馬達、螺旋槳配小型內燃機、微燃氣渦輪、脈衝噴流式推進、推力翼及拍撲翼。質輕效率高是適用 MAV 發動機的必備條件，而微馬達的推力不足、電池減重及蓄電量的增加仍為待克服的問題。小型內燃機目前尺寸與噪音過大，至於微燃氣渦輪、脈衝噴流式推進及推力翼之設計目前仍在開發中。

一般昆蟲輕易可達量階 10^2 Hz 之拍撲翼振盪頻率，但拍撲機構設計需開發使用耐操先進材料(例如可製作人工肌腱之高分子材料)與有效減低轉動件的摩擦耗損等才能達到此效益，故亦是重要的研究課題。

在能源部份，微飛行器初步設計之功率需求估算，可由下列例子說明之。假設有一微飛行器：起飛重量： $W_{to} = 100$ g；飛行速度： $V = 10$ m/s；升阻比 $L/D = 5$ ；螺旋槳推進效率 $\eta_p = 0.5$ ；引擎(馬達)效率 $\eta = 0.6$ ；引擎重量 $W_{eng} = 0.3 W_{to}$ ；續航時間 $t_d = 20$ min。飛機巡航平飛時所需推力 $T = W_{to} D/L = 0.2$ N (Newton)，需要之推進功率 $P_t = TV = 2$ W (Watts)，軸功率 (Shaft Power) $P_{sh} = P_t / 0.5 = 4$ W，計入引擎效率之影響，則可知需要約 6.67 W 之輸入功率方能產生足夠推力。考慮飛行器需有過功率(Excess Power)以作為執行操控動作(Maneuverability)之裕度，因此備有近 10W 之功率較為適當。再依據引擎重量及續航時間，可估算所需之功率密度為 $D_p = 0.333$ W/g，能量密度為 $D_w = 400$ J/g。微飛行器能源系統之要求為高能量密度與高功率密度，鋰電池為廣泛應用之能源儲存系統，其能量密度雖可達要求，然其功率密度卻不及。礦物性燃料(Fossil Fuel)有較高之能量密度，但須配合微引擎使用。如何發展符合所需之微型引擎及微型能源轉換或儲存系統均是挑戰。

因應各式微系統之能源需求，美國已著

手從事微引擎(Micro Engine)與微燃燒(Micro Combustion)、微燃料電池(Micro Fuel Cell)、微熱電發電器(Micro Thermoelectric Power Generator)等微型推進與能源系統之研究。⁷

四、飛行力學特性

微飛行器低速、質輕，加上尺寸限制、低展弦比、低慣性力矩及低氣動力阻尼(Aerodynamic Damping)等因素影響，對外在干擾極敏感。以大氣擾動為例，一般近地表大氣擾流之量階為 $O(1 \text{ m/s})$ ，對飛行速度 10 m/s 之 MAV 而言，即會產生嚴重之影響；可能造成動態不穩定現象，嚴重者會導致失速，甚至於進入螺旋(Spin)。在穩定與控制性能方面，須考量靜態穩定性、動態穩定性及、控制面效能以及縱向與側向運動模態之自然振頻與阻尼，這些因素支配著飛行器之穩定性與操縱性；此外，自然振頻與阻尼則影響飛行品質，不良之穩定性對於從事偵察工作之微飛行器而言，將降低偵察所攝影像之解析度，進而影響任務成效。

由微飛行器之縱向動態穩定(Longitudinal Dynamical Stability)分析可知：微飛行器之縱向低頻模態之長週期運動(Long-Period Motion)或稱為起伏模態(Phugoid Mode)穩定性較高頻模態之短週期運動(Short-Period Motion)佳，分析結果可提供一些改進方案，例如採用升力導數較大之主翼與尾翼有助於短週期模態之穩定(郭智賢等, 2002)。相較於縱向穩定性而言，分析發現：微飛行器之橫向穩定性(Lateral Stability)較縱向差(張運生, 2001)，飛試結果也證實同樣現象，故設計時需加以考量。

微飛行器之飛行力學特性需深入研究，低 Re 數之六自由度氣動力係數(Aerodynamic Coefficients)與穩定性導數(Stability Derivatives)對 MAV 之飛行力學

分析以及穩定增益系統(Stability Augmentation System, SAS)以及自動駕駛系統(Auto-Pilot System)之設計均有影響。必須有效建立氣動力與飛力之數據庫，理論分析、數值模擬、風洞實驗或系統參數鑑別(王慶桐, 2002)為設計基礎。

微型感測、致動元件以及微陀螺儀之設計與應用為增進微飛行器穩定與控制特性乃目前可為之方案。由於微飛行器對重量與體積之最高準則是要輕而小，微型感測與致動元件之應用使微飛行器之自律控制系統得以實現。使用微感測致動元件，控制面之設計可採用類神經網路(Neural Network)系統進行微流場控制，改進空氣動力與飛行力學特性，飛行軌跡則曾有研究者建議以模糊邏輯(Fuzzy Logic)或基因演算法則(Generic Algorithm)設計控制器，如此應可達到強化微飛行器之飛控性能。

伍、各國現階段發展與運用現況

一、臺灣

我國微飛行器的研究肇始於 1998 年 7 月，由中正大學理工學院旋轉流與渦流動力研究室(RFVD Lab)成立微飛行器研究團隊，國科會國防應用科技小組及中科院資助，與中科院三所十五組合作研究，以微飛行器氣動力、飛行穩定與控制等項目之理論與實驗研究、以及試驗機之製造與飛試為主要工作。已分別於 2000 年 5 月、9 月、12 月成功飛試翼展 25、20、15cm 之固定翼微飛行器，2001 年飛試翼展 13cm 彈性翼微飛行器。目前以建立低雷諾數空氣動力設計與微機電自動飛行控制系統等核心技術，藉由風洞實驗測試、電腦輔助流場計算分析、微飛行器模態與控制邏輯分析設計、微機電系統整合等研究，完成微型載具雛型設計與試飛，並驗證微型自動飛行控制技術，推動掌上型環境監測微型平台技術。

淡江大學微奈米機電團隊於 2003 年初期以美國加州理工學院(Caltech)的仿生拍翼式微飛行器微型蝙蝠(microbat)(如圖 4)

⁷DARPA, DOD, USA, <http://www.darpa.mil/>

為模仿對象，開始其拍翼式 MAV 的研究，發展至今，已於 2008 年以創新整合的聚對二甲苯(parylene)薄膜為機翼蒙皮與彈性(flexible)低碳纖維機翼骨架再配合該團隊自行研製的輕量化鋁製傳動系統，使其第三代拍翼式微飛行器 Golden Snitch(金探子如圖 5)的重量(含遙控模組與電池)之總重低於 6 公克，且成功飛試達 10 公尺高，滯空長達 107 秒。該團隊也經由風洞實驗及試飛成果發現，在此單一自由度拍翼下(simple flapping)，拍撲角度再 50~52 度時具有最佳的推進效率並發現三維的八字形拍翼軌跡。目前執行第四代微飛行器之開發，並將結合國內精密塑膠射出模具與馬達、電池、遙控零件等生產技術以達到尺寸精確、磨損減少與降低成本的要求，朝向國內自製及使用後拋棄的方向發展。⁸

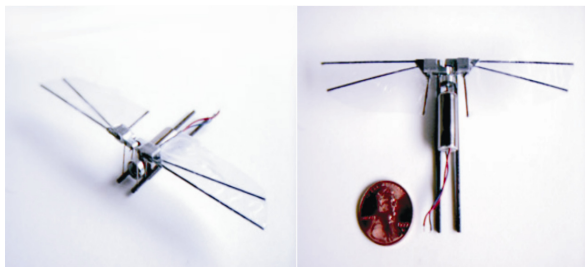


圖4 加州理工第二代拍撲翼微飛行器(Microbat)

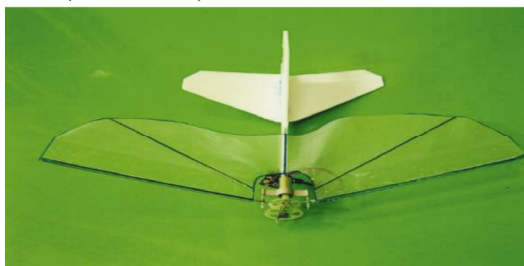


圖5 淡江大學第三代拍翼式微飛行器(金探子)

二、美國

美國：多家科技公司與民間大學合作，參與美國國防部先進研究計劃局(DARPA)所提出之 MAV 計畫。其中由

Aerovironment 公司研制的固定翼機黑寡婦(Black Widow)(如圖 6)，翼展為 15 公分，重量 80 公克，航程 1.8 公里，高度可達 800 呎，可連續飛行 30 分鐘並攜帶彩色攝影機、資料傳輸設備及微型 GPS 定位器，是固定翼微飛行器發展較完備的；另外洛克希德桑德斯公司研制的固定翼機微星(Microstar)翼展也是 15 厘米，裝有軍用攝像機，航程 5 到 10 公里；旋翼型則有 Michigan 大學 HoverBot 以及 Stanford 大學的 Mesicopters(如圖 2)；拍撲翼型機則由 Aerovironment 與加州工學院合作研製的 Microbat(如圖 4)受到廣泛的注意。

此外，2003 年由 Honeywell 所研製的 ducted fan MAV T-Hawk(如圖 7)直徑 14 英吋，重 17 磅，可裝入背包攜帶並配置有攝影機或紅外線感應器可傳遞資訊到士兵手上的終端機。美國陸軍已於 2005 年底接收 5 台此款採用汽油發動機的 MAV 並配給第 25 步兵師評估測試，2006 年再接收 25 台採用 D-STAR 柴油發動機 MAV，因為各項評估情況良好，2008 年 11 月 4 日 Honeywell 宣佈取得 6 千 5 百萬美元的合約提供 90 套 T-Hawk™ 系統(每套包含 2 架 T-Hawk 及地面控制裝備、備份零件、操作及維修人員訓練等，90 套硬體於 2009 年第 2 季開始提交並於 12 月完成。並列入陸軍未來作戰系統(Army Future Combat Systems-FCS)中 UAV 運用的第一類排級(最小尺寸)無人飛行載具。⁹另外由 AeroVironment 公司研製的黃蜂(Wasp 如圖 8)則是固定翼 MAV，翼展 35.56 公分，重 230 公克，飛行時速最大約 56 公里並可在低空不引人注意的情況下提供即時訊息。Wasp 配備 2 台彩色攝影機、高度表、羅盤、GPS 感應器及一套精密的自動駕駛系統，其原型機已在伊拉克戰爭時由陸軍完成評估。目前有長程、配備紅外線感應器及配備

⁸楊龍杰，尖端科技 2008 年 8 月

⁹www.honeywell.com

避撞系統等型別。最新的第 3 代 Wasp 翼展為 72cm，長 38cm，重量 430g，航程為 5km 視線距離，速度 40-65 km/h，可滯空達 45 分鐘。¹⁰



圖6 Aerovironment's Black Widow(黑寡婦)



圖7 Honeywell 研製的 MAV(T-Hawk)



圖8 Aerovironment 第 1-3 代 Wasp 微飛行器

三、其他國家

中國：北京清華大學、西北工業大學、南京航天航空大學與中北大學等均在此領域積極開發。南航研發拍撲翼 MAV 較有心得，2004 年便已試飛成功，據信目前已有連續飛行 6 分鐘以上的能力；而北京清華大學最近利用印刷電路軟板(材質為 polyimide)技術，直接將定翼機機翼與印刷電路進行整合，兼具單晶化(monolithic)與彈性翼(flexible wing)的優點。

日本：於 2004 年開發微型無人機『 μ FR-II』採用二重反轉式螺旋槳，可以按照程序設計路線自主飛行，攜帶微型攝影機並可以將拍攝到的影像情報迅速傳送回基地。該機該機直徑 13.6 公分、高 8.5 公分、重約 13 克，可持續飛行 3 分鐘。將主要擔負室內恐怖活動發生時或核災害場所的情報收集任務。¹¹最新研究發展資料未能探之，但據信已有相當的進展。

荷蘭：2008 年 5 月荷蘭 TUDelft 大學研發的代夫爾(Delfly)微型攝影飛機(如圖 9)試飛成功。這款蜻蜓攝影飛機是他們研究的第三代拍撲翼微飛行器，翼展長只有 10 公分，重量僅 3 克，是目前世界上最小的微型攝影飛機。其飛行時速可達 18 公里，還可配備無線攝影機。不僅可空中拍照，同時還可攜載微型攝影儀，隨時可將觀測到的視頻傳輸出來。¹²

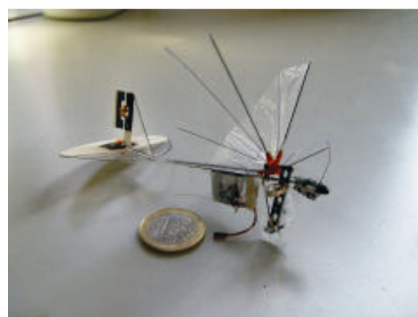


圖9 荷蘭 TUDelft 研發的 Delfly 微型攝影機

¹⁰www.avinc.com

¹¹人民網 <http://www.people.com.cn/BIG5/>

¹²<http://www.delfly.nl/>

德國：2005 年 10 月 microdrones GmbH 高科技公司成立，並致力於垂直起降旋翼自主式微飛行載具(VTOL AUMAV)的開發，2006 年 4 月該公司研製的 md4-200d(如圖 10)開始供貨，前 16 個月即售出 250 架，重量約 900 公克，直徑 70 公分，滯空時間 20 分鐘。應用於空中攝影、考古學、監視、植物保護、火警及救援服務、邊界管制、警察、特種部隊及軍方。¹³



圖 10 德商 Microdrones GmbH 研製的 md4-200

陸、未來發展方向

微飛行器之技術發展帶來一些新的力學問題與思考。從實用之角度，現今技術已可利用 15-25cm 之微飛行器從事偵察、空照等任務。但為達到更高的功能效益，體積的微形化、重量的輕量化、動力來源的連續與強化等技術仍在持續進展中，要在愈來愈小的機體內裝置動力推進系統、導航與控制系統、通訊及探測系統等，又需滿足小尺度低雷諾數飛行的氣動力特性，實在是極大的挑戰。

拜微元件設計與微機電系統技術(MEMS, Micro-electromechanical System)的成熟，已可用於微流控制，以提昇氣動力性能，亦可用於動力與能源系統、飛行穩定與控制系統等研發。再拜奈米科技迅速發展

之賜，促使 MAV 飛行系統相關組件之尺度持續微形與輕量化，朝向蚊蠅昆蟲大小之尺寸發展。但相對的因尺度小及低雷諾數流場，需使用拍撲翼、旋翼與空氣之快速週期運動方可能提供足夠升力。然而拍撲翼其拍撲機構之三維轉動技術仍有瓶頸，需對非定常渦之生成與控制加以深入研析；其次耐高頻振盪疲勞之材料或結構亦待開發，以減低機件磨損，提高其使用度。

各研究團隊除繼續 MAV 計畫的研發外，DARPA 也已開始奈米飛行載具(Nano Air Vehicle-NAV)計畫，預劃發展極小尺寸(小於 7.5 cm)，重量超輕(小於 10 g)，擁有城鎮作戰執行室內及室外任務潛力的載具系統。

NAV 計畫主要包括多功能的結構硬體、輕及強的空氣動力升力表面/槳葉，高升阻比翼型、輕重量、更有效率的推進及動力次系統以在低雷諾數流場下(Reynolds numbers <15000)有效率的飛行。此計畫將採用大量先進科技將使得避撞系統(collision avoidance)以及導航通訊系統被使用在室內或室外環境的 GPS 死角地帶並將發展有效的懸停飛行及相關感應器的置放與使用。目前 AeroVironment 公司已研發出一款翼展僅 3 英吋，總重少於 10 公克的 NAV (含酬載 2 公克)(如圖 11)，相信後續會有更多的發展成果。¹⁴

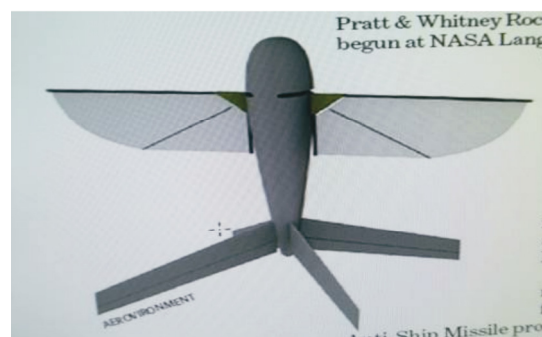


圖 11 AeroVironment 研製的 NAV

¹³http://www.microdrones.com/index.html#home_top

¹⁴ www.avinc.com

屆時如電影情節般的蒼蠅、蜜蜂、蚊子、蜻蜓等類型的微飛行器(如圖 12)將攜帶各式偵測器、感應器、化學戰劑及高爆炸藥等，執行竊聽、監視、癱瘓甚至暗殺等各項任務，或許在沒有人員傷亡的情況下，敵方的領導人或重要裝備就已被這些微飛行器終結掉了，作戰效益無可限量，真是所謂的『小丘立大功』。

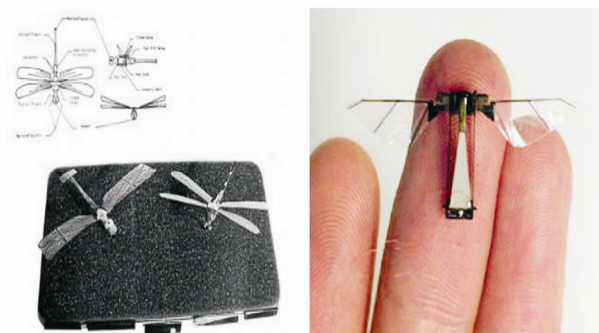


圖12 間諜微飛行器圖例

許多國家的微飛行器研發已進入評估、試用與生產使用階段，我國國科會與相關大專院校目前亦持續在積極研發，由於微飛行器的軍事與民生用途極具潛力，其軍事發展亦將改變未來的作戰型態，所以在推動全民國防的現在，我們應注意其發展走向與進度，研擬未來相關使用及反制之道，以掌握關鍵，制敵機先。

柒、結論

在高科技的戰場上，如何減少人員的傷亡及裝備武器的損毀一直是各國努力的方針，除了增進自身的防護能力之外，取得先機

，先發制人亦是其中的重要因素，因此除一般載人的偵察機及無人飛行載具外，可單兵操作、快速部署的微飛行器便是提供小規模部隊用作探測前方敵情及取得即時資料的利器。

微飛行器具有體積小、噪音低、成本低、雷達反射截面積小、隱密性高、易操作等特性，配合自動穩定、GPS 導航定位甚至避(防)撞系統與各類微型感測應用模組(如化學物質、微生物等)、微型攝影機與微型通訊等系統後，能在多種地形(如鄉村、樹林、沙漠、海岸、山區、寒地等)及不同環境天候(如降雨、風剪、及陣風等)下飛行。

¹⁵ 在軍事上可用作低空或近距離偵察與監視，區域性戰術情報蒐集，前線敵情勘查等任務，並在衛星或偵察機無法接觸的死角及人員無法涉足的地區，傳送即時資訊。且因其後勤維修成本低廉，耗費時間少，所以作戰反應時間可加以縮短，使制敵先機大幅提升；且 MAV 可在城市建築物中盤旋慢飛勘查情況，甚至進入建築物內探測及找尋目標或受困人員，是進行城鎮戰、反恐作戰及災難救援時之有力裝備；另外 MAV 視距外飛行，可進行商業或一般用途如環保監測、生態調查、農漁畜牧資源調查、交通監測、蒐證、保全等任務，必要時並可進行通訊轉接，建立緊急通訊網路，應用潛力無窮。¹⁶

¹⁵ 郭智賢，微飛行器氣動力最佳化之研究，2004

¹⁶ 宋齊有，微飛行系統相關之力學問題，2003