

嶄新微型拍翅飛行器之研發 Development of a novel flapping-wing micro air vehicle

潘吉祥¹、張維峻²、黃培鏞³
Chi-Hsiang Pan¹, Wei-Chun Chang², Pei-Kai Huang³

¹ 國立勤益科技大學機械工程系
¹ Department of Mechanical Engineering,
National Chin-Yi University of Technology
E-mail: panes@ncut.edu.tw

² 國立勤益科技大學機械工程系
² Department of Mechanical Engineering,
National Chin-Yi University of Technology
E-mail: plumson15@gmail.com

摘要

針對微型拍翅飛行器之研究，本論文提出一嶄新拍翅機構之設計。拍翅機構是由偏心凸輪機構來帶動機翼之上下拍動，使兩機翼拍動之相位是一致的，減少飛行時左右搖擺的不平衡性，而且組裝時調整偏心凸輪之偏心率，可改變機翼之上下拍動之幅度。本論文利用 working model 及 ANSYS 軟體進行拍翅機構之運動及結構強度模擬分析，進而產生傳動機構之較佳尺寸設計，並以鋁合金加工製作成品。機翼之翼面部份使用 PET 膜，翅膀骨架則採用 0.8mm 碳纖維棒改良加工而成。至於機身、尾翼則採用拿普龍(Expanded Polypropylene)製作，控制器部分使用 2.4G 無線控制模組及 3.7V 鋰電池搭配而成，馬達驅動電壓為 DC2.4V，最大轉速 1200rpm 及扭矩為 2.55N·m。整台飛行器之翼展長為約 25cm，機身長約為 24cm，總重約 12g。

關鍵字詞：微型飛行器(MAV)、拍翅機構(flapping mechanism)、撲翼機(Ornithopter)、機翼(wings)。

Abstract

For the research of the flapping-wing micro air vehicle, the paper presents a new design of the flapping mechanism. The flapping mechanism is the wings flapping driven by the eccentric cam, and makes the phases of the wings flapping consistent, and then decreases the imbalance of vacillating in the process of flying. Furthermore, by adjusting the eccentricity of the eccentric cam in the process of assembling the flapping mechanism, can change the amplitude of the wings flapping, can change the flapping amplitude of the wings. This thesis the intensity of the structure and analyzes simulates of flapping mechanism, by Working Model and ANSYS software to get the better size of the transmission mechanism design, and use aluminum alloy to produce the finished product. We use PET film for making the surface of the wings, and the skeleton of wings forms from 0.8mm carbon fiber rods. The fuselage and empennage are produced by Expanded Polypropylene, and the controller is composed of 2.4G wireless control module and a 3.7V lithium battery. The motor drive voltage is DC2.4V, and the maximum speed is 1200rpm and the maximum torque is 2.55N·m. The micro air vehicle has a total wingspan about 25cm, and body length is about 24cm. The total weight is about 12g.

Keywords: micro air vehicle、flapping mechanism、Ornithopter、wings。

1. 前言(Introduction)

飛行器發展歷史中，最早嘗試以模仿鳥類的拍翅動作，但其飛行機制複雜到人類至今仍在做相關的研究。達文西在 1488 年至 1514 年間設計了拍翅機，但因為拍翅太重需要大的能量來產生升力或推力，所以沒有實現夢想。20 世紀 60 年代開始，有各種大小拍翅機展示如何飛行，譬如：哈里斯在 1991 年首次成功地在加拿大多倫多以發動機為動力成功遙控拍翅機[1]。研發者尋求模仿鳥類，蝙蝠和昆蟲的拍翅飛行，雖然機器的形式可能會有所不同，但通常建立在與這些飛行生物相同的尺度比例，因此微型飛行器(micro air vehicle, MAV)的研發因應而生。微型飛行器或曾被稱為“華盛頓郵報”Robobugs[2]是一種無人駕駛飛行器(unmanned air vehicle, UAV)，大小在數十厘米的範圍內。這些微型飛行器可於商業，科研、軍事等用途，譬如：進入人類及車輛無法進入的危險環境中，從事救援任務或軍事間諜，進行觀察、空中攝影等工作。

國內微型拍翅飛行器(flapping wings micro air vehicle, FWMAV)的發展，淡江大學扮演非常重要的角色。自 2007 年以來，在淡江大學的微機電系統實驗室及空間發展與飛行動力學實驗室已研發 10 克以下，20 厘米寬之拍翅微型飛行器，並結合立體視覺系統的飛行，這是實現自主控制飛行的第一個拍翅微型飛行器[3-5]。而在國外，荷蘭代爾夫特理工大學(TU Delft University)，在 2008 年研製裝有一個攝像頭之微型拍翅飛行器叫 Delfly Micro，是在 2005 年開始研發之 Delfly I 的第三代產品。DelFly I 大小有 50 厘米，DelFly II 28 厘米，而 DelFly Micro 翼尖到翼尖只有 10 厘米大小且重量只有 3 克，成為攜帶相機最小的拍翅機。在 2008 年初，美國霍尼韋爾公司取得美國聯邦航空局(FAA)批准開辦 g MAV 的實驗[6]。霍尼韋爾的 gMAV 升力使用涵道推力(ducted thrust)，採取垂直起降和懸停，擁有高速向前飛行的能力。本機輕量可以由一個人攜帶。它最初是作為 DARPA 的計劃的一部分，預計將初步應用於佛羅里達州邁阿密 - 戴德縣警察局(Miami-Dade County, Florida)。俄亥俄州 Dayton 的萊特州立大學(WSU)是發展微型飛行器的卓越研究中心(CMAVS)[7]，已開發出多個拍翅微型飛行器，其中最穩定的是類似荷蘭 DelFly 的 4 翼 clap-and-fling 型飛行器，其模仿蜂鳥的飛行特性。這飛行器是可遙控的降落和起飛，且攜帶著 1.5 克彩色攝像機。此外，此研究中心也模仿蜻蜓，創造了一個翼展七英寸半的微

型飛行器，重量為 10 克。有一些研究人員集中在研發完全自主的 MAV 飛行，其中羅伯特·C·邁克爾遜[8]在佐治亞技術研究所根據與 DARPA 的合同，開發了這樣的微型飛行器(Entomopter)，然而仍存在大量的測試和評估的問題需解決。

2. 概念設計(Conceptual Design)

依據鳥類飛行最基礎的概念，除了以滑翔方式在飛行時由翅膀造成壓力梯度，產生壓力差，成為鳥類飛行的升力來源外，另外一種較為特殊的飛行方式稱為拍翅飛行(Flapping Flight)，由翅膀上下拍動形成推動力(或阻力)，其中可分為 Flapping、Twisting、Folding，利用這三種方式可產生推進力與升力。翅膀拍動時，外部與內部翅膀的翼型所造成的攻角(攻角為機翼對於空氣流動之間的夾角)會影響升、阻力的大小。攻角愈大，升力愈大，阻力則愈小，反之則相反，而這情形亦可藉由 Twisting、Folding 來達到最佳飛行狀況。另外，鳥飛行時也會產生翼前緣渦流效應來提升升力而盤旋，而翅膀也因飛行狀況隨時變動拍打方式(前後或左右移動)。參考鳥類的飛行資料，仿生與模擬出牠們的飛行動作，是設計微拍翼飛行器的第一方向。如圖 2-1 所示，一般拍翅飛行器升力來源為機翼下拍行程時，機翼對空氣的下壓力而產生一相對於地面之上升力。然因在上舉行程時，除機翼與相對風速之間為一正攻角產生正升力，但機翼上舉之作用也會伴隨著負升力的生成。因此為使飛行拍撲姿態達到最大整體升力，飛行器設計需一傾斜尾翼與柔軟機翼，在上舉時使機翼的彎曲度逆轉，故其正向力(normal force)仍有充足推力，而使得負升力有限。如此，下拍、上舉行程一正一負的升力，其平均值仍可大於零[9-11]。

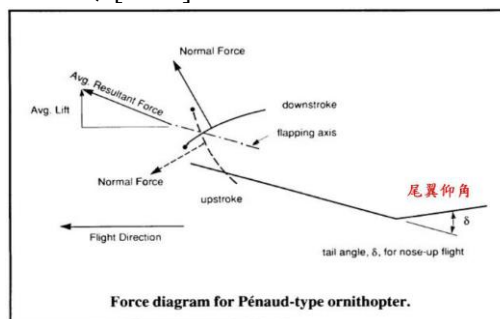


圖 2-1 拍翅力學分析

拍翅飛行器乃藉由拍翅傳動機構將動力源(例如：馬達，橡皮筋)輸出轉換成拍翅之動作，而拍翅機構的形式有多樣化，譬如：如圖 2-2 肯

氏拍拍翅飛機(Kinkade)的拍拍翅機構[12]。如圖 2-3 麥氏拍拍翅飛機(Michelson)的拍拍翅機構[13]。如圖 2-4 史氏玩具飛機(Spencer)的拍拍翅機構[14]。如圖 2-5 電動昆蟲的活動翅膀的拍拍翅機構[15]。如圖 2-6 洪氏拍翅飛機的拍拍翅機構[16]。如圖 2-7 HX-218 遙控拍拍翅飛機的拍拍翅機構[17]。如圖 2-8 八桿十一接頭拍拍翅機構層排列設計示意圖[18]。如圖 2-9 “金探子”傳動機構[19]。如圖 2-10 “i-bird”的傳動機構設計[20]等。

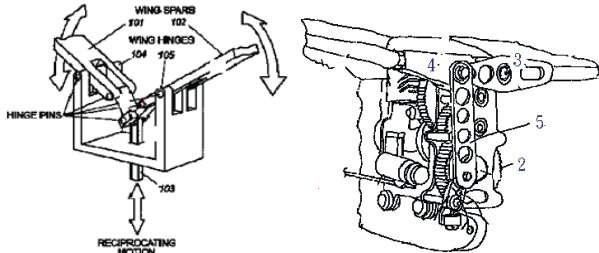


圖 2-2 肯氏拍翅機構 圖 2-3 麥氏拍翅機構

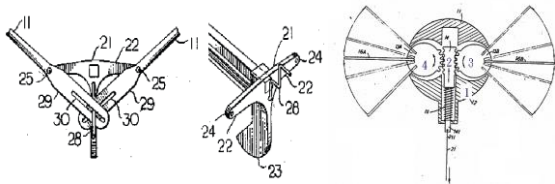


圖 2-4 史氏拍翅機構 圖 2-5 電動昆蟲機構

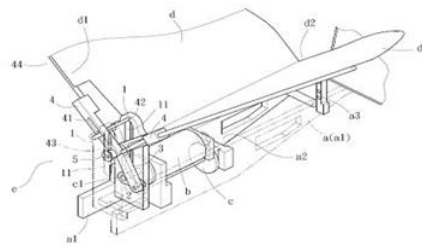


圖 2-6 洪氏拍翅機構

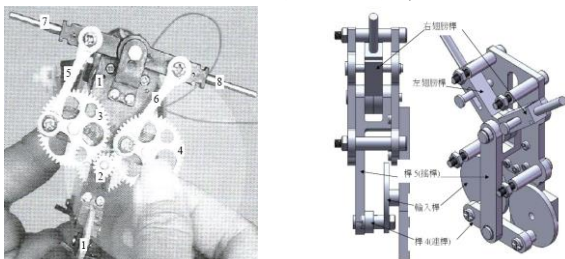


圖 2-7 HX-218 拍翅機構 圖 2-8 八桿十一接頭拍翅機構

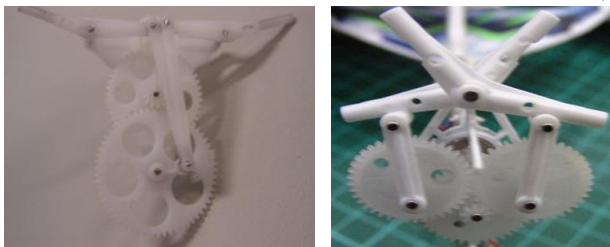


圖 2-9 金探子拍翅機構 圖 2-10 i-bird 機構

2.1 本論文的设计規範：

- 續航力目標為3分鐘以上。
- 翼展範圍約20-30公分。主翼部份連接凸輪確動桿機構採用0.8mm 碳纖維棒，並採PET膜，翼前緣貼上一層透明膠帶，強化PET膜前端設計。
- 飛機重量：由於本機各部機件分別使用不同材質製作，減輕全機重量為首要重點。目前採用拿普龍(Expanded Polypropylene)製作機身、尾翼為主。

2.2 拍翅機構的设计及動作：

拍翅機構是由偏心凸輪機構來帶動機翼之上下拍動，使兩機翼拍動之相位是一致的，減少飛行時左右搖擺的不平衡性，而且組裝時調整偏心凸輪之偏心率，可改變機翼之上下拍動之幅度。馬達與控制晶片採用現成商規產品，放置位置以考量重心配置，固定於機身適當位置。圖2-11為拍翅機構的結構示意圖。圖2-12~14顯示拍翅上舉及下拍行程中的示意圖。

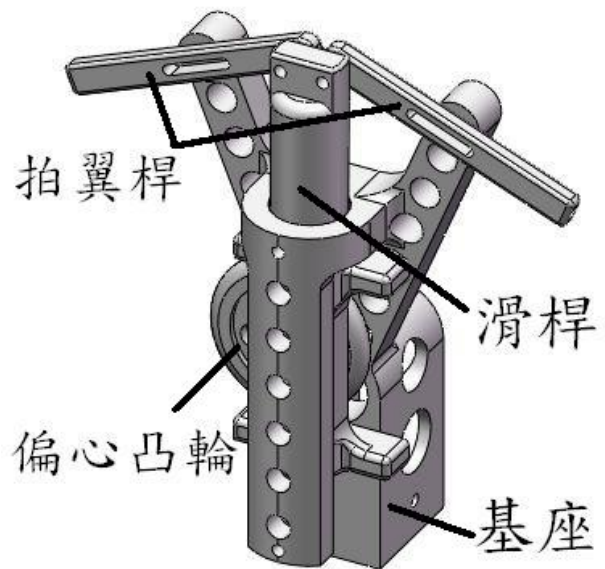


圖 2-11 結構示意圖

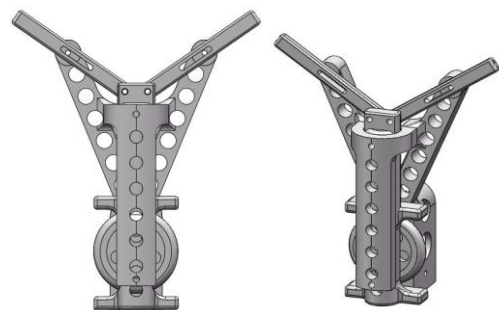


圖 2-12 拍翅上舉(凸輪下死點)示意圖

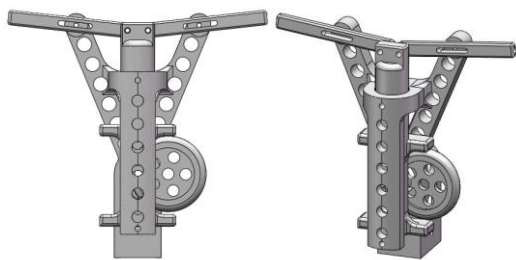


圖 2-13 拍翅中途行程示意圖

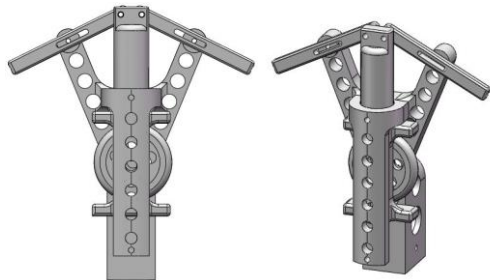


圖 2-14 拍翅下拍(凸輪上死點)示意圖

2.3 機翼設計：

機翼之設計乃呈現雙折疊機翼之構造，當機翼在下拍之行程時，整個機翼展開下拍，增加翼面積，進而產生較大的升力，而在上拍之行程時，機翼外桿件向內縮，縮減翼面積，進而減少向上拍舉時所產生向下的空氣壓力(阻力)，進而提升整體飛行器向上飛升的效率。

並依據Wei Shyy [21]提出鳥類飛行參數，包含翼展、翼面積等飛行公式，求得以下參數值，依照這些參數值，來設計機翼之外型與面積，如圖2-15 機翼實體所示。

(1) 翼展

翼展是指翼尖到翼尖的距離，翼展 b 為重量 m 之函數關係。

$$\begin{aligned} b &= 1.17 \times m^{0.39} \\ &= 1.17 \times 0.012^{0.39} \\ &= 0.20848 \text{ m} \\ &= 208.48 \text{ mm} \end{aligned}$$

(2) 翼面積

翼面積影響升力大小之因素，翼面積越大者，表示拍撲升力越多，翼面積越小者，則反之。

$$\begin{aligned} S &= 0.16 \times m^{0.72} \\ &= 0.16 \times 0.012^{0.72} \\ &= 0.00662415 \text{ m}^2 \\ &= 662.415 \text{ mm}^2 \end{aligned}$$



圖2-15 機翼實體

2.4 機身設計：

機身設計，鑑於重量尺度律限制，體積不能太大，但是，也不能太小，因為如果機身太小的話會因為重量不足，容易產生振動，使得重心無法穩定，機身全長25cm。



圖2-16 機身實體

2.5 尾翼設計：

尾翼設計樣式有水平垂直尾翼、V行尾翼、單片尾翼等等。此次設計採用水平尾翼，容易控制及穩定性高。尾翼的翼面部份採用飛機的曲線設計，藉此可提升尾翼上曲面空氣流速降低壓力已達到增加升力之目的，尾翼寬15cm。



圖2-17 尾翼實體

2.6 重心調整：

重心位置可以兩邊翼面呈水平，觀察平衡時的機體姿態來判斷重心位置。飛行測試時，飛行器立即下墜，這種情形為重心偏前，需要將重心往後移動；飛行器往上角度過大，此為重心偏後，需往前移動；拍翼飛行器前後機身平穩且高度慢慢往下墜，這表示重心位於適當位置。

3. 模擬分析與製造

(Simulation analysis and manufacturing)

此次設計使用了 SolidWorks 和 Working Model 分析軟體繪出偏心凸輪確動傳動組設計圖和進行動態模擬圖。圖 3-1 為利用 Working Model 模擬機構之動作情形，並且分析相關機件之運動行為，如圖 3-2 所示。

至於製造部分，拍翅機構乃委外代工，其零件成品、拍翅機構的組裝，以及最後的微型拍翅飛行器機體的成品，如圖 3-3~5 所示。

微型拍翅飛行器機體做傾角風洞實驗設備，如圖 3-6~7 所示。

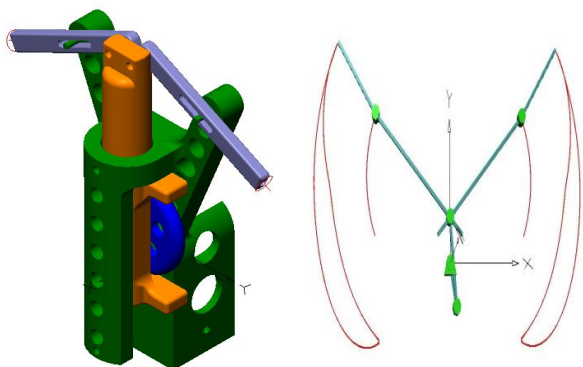


圖 3-1 利用 Working Model 模擬機構之動作

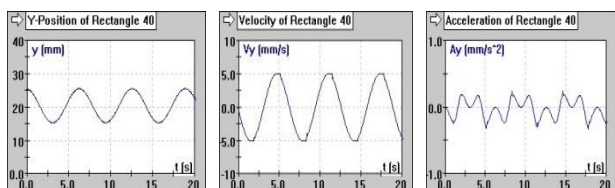


圖 3-2 拍翅機構滑桿之位移、速度及加速度分析



基座成品圖



滑桿成品圖



凸輪成品圖



拍翼桿成品圖

圖 3-3 拍翅機構零件成品相片



圖 3-4 拍翅機構的組裝相片



圖 3-5 微型拍翅飛行器機體的成品



圖 3-6 淡江大學風洞實驗設備

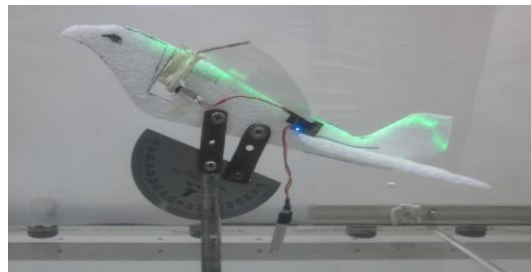


圖 3-7 微型拍翅飛行器機體風洞實驗

4. 結論(Conclusion)

在進行本次拍翼飛行器的研發過程中，從外表看起來似乎沒多困難，但實際做起來才發現其中包含各種系統化技術層級，像是馬達及偏心凸輪確動桿件傳動組設計尺寸大小和材料選用對於傳動結構強度是否可承載？環境空氣密度，翅膀的拍翼頻率、翅膀面積、翅膀展長、重量及機體重心分配校調等等重要參數關係為何？都需經過多次的試飛測試，才能得到接近理想的尺度律。就材料方面，因材料不同選材其加工方式也大不相同。在製作上讓我學習到許多，試從造物主所造出的飛行動物中，尋找更高效能的飛行設計方法。

5. 誌謝(Acknowledgements)

本論文研究得以順利製作，感謝潘吉祥教授之指導，感謝楊龍杰教授租借風洞實驗機台設備，感謝鄭宏吏先生協助 2.4G 無線控制模組、機身、尾翼製作，感謝黃益隆、李長旺先生協助 RP 快速成型機製作拍翅機構。

6. 參考文獻(References)

1. <http://uwmav.uwaterloo.ca/Aeroelastic%20Design%20and%20Manufacture%20of%20an%20Efficient%20Ornithopter%20Wing.pdf>.
2. Weiss, Rick (2007-10-11). "Dragonfly or Insect Spy? Scientists at Work on Robobugs." Washington Post. (http://www.washingtonpost.com/wp-dyn/content/article/2007/10/08/AR2007100801434_pf.html).
3. 黃奕澄，微飛行器拍翼軌跡即時測定之研究 (Research on the Real Time Wingtip Trajectory Determination of A Flapping MAV)，碩士論文，淡江大學機械與機電工程學系。
4. 何仁揚，拍撲式微飛行器之製作及其現地升力之量測研究 (The Fabrication of the Flapping Micro Aerial Vehicle and Its On-site Measurement of Unsteady Lift)，碩士論文，淡江大學機械機電工程學系。
5. 馮國華，拍撲式微飛行器之製作改良及其飛行訊息傳輸之整合 (Improvement on the Flapping MAV and the Integration of Air Data Transmission)，碩士論文，淡江大學機械與機電工程學系。
6. Honeywell Wins FAA Approval for MAV, Flying Magazine, Vol. 135., No. 5, May 2008, p. 24 .
7. WSU CMAVS: Wright State University Center of Excellence .
8. Michelson, R.C., "Test and Evaluation for Fully Autonomous Micro Air Vehicles," The ITEA Journal, December 2008, Volume 29, Number 4, ISSN 1054-0229 International Test and Evaluation Association, pp. 367-374 .
9. DeLaurier, James D. "An Ornithopter Wing Design." (1994), 10-18, <http://ornithopter.net/Publications/AnOrnithopterWingDesign.pdf> .
10. 多爾頓 (Stephen Dalton) 編著，蔡承製翻譯，書名『飛行的奧秘』，圖龍文化事業公司出版。
11. 夏樹仁 編著，書名『飛行工程概論』，全華科技圖書股份有限公司。
12. Kinkade, A. S., "Ornithopter," U.S. Patent 0173217A1 (2002).
13. Michelson, R. C., "Entomopter and Method for Using Same," U.S. Patent 6,082,671 (2000).
14. Spencer, P. H., Calif, S.M., "Toy Airplane," U.S. Patent 2,859,553 (1958).
15. 鄭光智，1993，玩具飛禽之裝置構造，中華民國專利申請案號 82202362。
16. 洪承德，拍撲翼機構設計與分析，崑山科技大學機械工程系，碩士論文，2007。
17. HX-218 遙控飛鳥，http://www.y-fa.com.tw/ugC_ShowroomItem_Detail.asp?hidShowID=392&hidPage1=6&hidHot=&txtSrhData=2008/8/28。
18. 徐孟輝、林聖偉、洪承德，八桿十一接頭拍撲翼機構設計，碩士論文，崑山科技大學機械工程系。
19. 楊龍杰、陳羿韶、徐湘坤，拍翼式微飛行器產品化及產學合作，淡江大學機電工程學系。
20. 程士洲、胡潛濱，拍撲機之製作與升力量測，碩士論文，國立成功大學航空太空工程研究所。
21. Wei Shyy, Mats Berg and Daniel Ljungqvist, "Flapping and flexible wings for biological and micro air vehicles," Progress in Aerospace Sciences, Vol.35, Issue 5, July, pp.455-505, 1999 .