

百年來的飛機結構演進(上)

· 魏楞傑 ·

摘要

近代人類在航空器上驚人的發展，起源於一百年前萊特兄弟完成的人類首次動力飛行。人類歷史上首先問世的飛機是架全木製、橋梁衍架式雙機翼、不成機身的簡陋結構。隨著兩次世界大戰的軍需，以及一九三〇年代開始萌芽的民航事業強烈的需求下，飛機也逐步演進成結合金屬、單懸臂翼、龐大機身的精密結構，與百年前天差地別。晚近由於匿蹤以及降低油耗的需求，複合材料成為飛機結構材料的新寵，惟它雖有助於滿足這兩項需求，但對結構設計的本質卻影響甚微。

一九〇三年十二月十七日，在美國北卡羅來納州東北部的小鷹鎮(Kitty Hawk, North Carolina)，一架人造、裝著螺旋槳，比空氣重的航空器「飛行家」(Flyer)飛離地面，在操控的飛行下，漂浮三十七公尺遠，完好無損地降落在不比起飛位置低的地面上，完成人類歷史上首次的動力飛行。操控此簡短但深具歷史意義飛行的是三十二歲的奧維爾·萊特(Orville Wright)。他和長他四歲的哥哥韋伯·萊特(Wilbur Wright)以擲銅板的方式決定由奧維爾來飛，而韋伯則在一旁觀看。在俄亥俄州德頓市(Dayton)以製造腳踏車為業的萊特兄弟，又輪流飛行了三次時間更久、距離更遠的飛行，韋伯在最後一次飛行中持續了五十九秒，距離兩百六十公尺。在接著的第五次飛行中，飛機遭遇到強勁的陣風而向前翻覆，由於損傷嚴重再也無法飛行，但全新的航空年代就由當天正式開始。

「飛行家」的設計基礎來自之前萊特兄弟試過的一系列滑翔機，其中萊特兄弟的忘年好友錢特(Otave Chanute)貢獻最鉅。錢特比萊特兄弟年長三十五歲，年屆四十三歲才對航空發生興趣，此後的餘生就埋首於航空資訊中，因此他對全世界的航空

器發展瞭若指掌。錢特是個優秀的土木工程師，他捨棄當時試飛成功的鳥或蝙蝠的翅膀造形，在一八九六年以橋梁的衍架設計方式，成功製造出雙翼滑翔機。萊特兄弟會選擇錢特的衍架式雙翼構型，除了它夠強之外，也因為升力面最大，而且藉著改變對角線上拉力繩的張力來捲起翼尖，還能適度地控制飛機，這是萊特兄弟的飛機和當時其他飛機最大的不同，其他的飛機固然也能飛行，但只有「飛行家」可以操控。

「飛行家」結構

「飛行家」的結構很簡單：兩片外形完全相同的上、下機翼，由垂直支撐柱和對角線拉力鋼繩連接，翼展十二點三公呎，翼弦兩公呎，萊特兄弟根

據在腳踏車店裡自製的風洞，決定翼剖面形狀和展弦比。機翼前、後梁和垂直支撐柱是杉木製連續梁；上、下機翼的前梁、垂直支撐柱、對角線拉力鋼繩三者構成衍架結構，飛行員俯臥在下機翼的中央偏左位置。萊特兄弟設計製造了機上的四缸、水冷式、重八十二公斤、十二匹馬力的汽油引擎，安裝在下機翼正中央，引擎動力由鏈條及齒輪傳送到兩具旋轉方向相反、直徑八英呎、安置於機翼後方的推進式螺旋槳，使「飛行家」能以每小時五十六公里的速度巡航。螺旋槳樞軸夾在上、下翼間，由一座獨立鋼管焊接而成的衍架固定在兩翼的後梁上。螺旋槳葉的材料為杉木夾板，由萊特兄弟以手工自行彎製而成，外形也是根據自己的風洞測試計算結果。

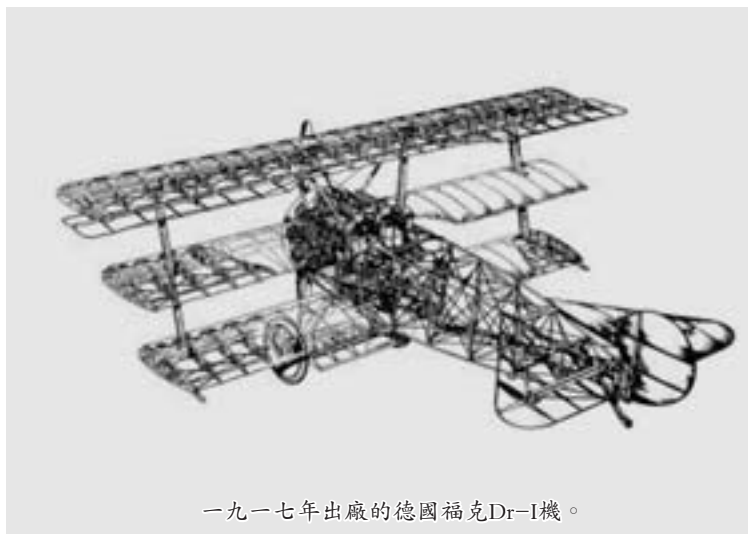
「飛行家」的機翼很薄，每片機翼上大約有四十根松木翼肋，都由蒸氣加熱整型，以配合翼剖面的形狀，並和前、後梁搭接。翼肋前緣為一個平面，以釘子和膠與前梁的後表面搭接，翼肋後緣則以輪胎線與後梁捆紮，機翼外表面以粗棉布包覆，再



錢特的衍架式滑翔機。



一九〇三年萊特兄弟的「飛行家」。



一九一七年出廠的德國福克Dr-I機。



人類首度橫越英倫海峽的法國貝樂特十一型飛機。

以釘地毯的扁頭釘把布固定在翼肋上。粗棉布不但承受飛行負載，也承受結構的阻力和慣性力。

「飛行家」的機頭有兩片小的船型翼來控制升降，機尾有個方向舵，配合機翼翼尖後緣向上或向下的扭轉，可以控制飛機的偏航和滾轉。韋伯觀察到大型飛鳥遇到陣風干擾飛行時，會稍微扭轉翼尖來重新獲得側向穩定性，「飛行家」就是利用這種技巧。

在「飛行家」飛行成功後，萊特兄弟回到家中開始進行一系列的改良，以改善性能、操控和穩定性。一九〇四年製造出來的「飛行家二號」，外觀大小和「飛行家」大致相同，但換裝十五匹馬力的新引擎。萊特兄弟以這架飛機進行了大約八十次的短時間飛行，來練習動力飛行的控制及飛行動作。

一九〇五年製造出來的「飛行家三號」時速六十五公里，是第一架真正的全動力飛機，基本外形和前兩架相同，也沿用「飛行家二號」的引擎，但機身較長、控制面也較大，和前兩架完全不同的，這是一架可完全操控的飛機，可輕易側傾、轉彎、或做「8」字型的飛行動作。一九一一年萊特兄弟製造軍用「飛行家B型」飛機，將升降舵移到後機身，以鉸鏈式的副翼取代扭轉機翼，並增設輪子以供飛機起降，飛行員及一名乘客可坐在機翼的前端，不需再俯臥了。

當時由美洲到歐洲已有許多人成功地做出飛行器，雖然外形千奇百怪，但雙機翼構型已被公認是世界設計的標準，杉木成為標準的結構材料，杉木夾板螺旋槳也隨處可見。優質的杉木在早期供應充足，加工及修理都很容易，單位重量的強度比鋁好，因此沒人考慮用鋁。大家都以粗棉布覆蓋在飛機外表，由於當時飛機的速度很慢，粗棉布承受氣動力負載的情況良好，即使破裂也很容易修理。

萊特兄弟後的飛機結構

一九〇三年之後十年內所出現的飛機，大都是模仿萊特兄弟的「飛行家」：衍架式雙機翼、前置式升降舵；飛行員、引擎、油料、酬載……全部都擺在下機翼上的開放空間。這時的法國有了新的結構設計概念，走向單機翼(monoplane)設計的趨勢，由貝樂特(Louis Blériot)和索尼(Raymond Saulnier)所

設計的貝樂特十一型(Blériot Model XI)，就是其中一個著名的例子。這架飛機首飛於一九〇九年一月，最高速度每小時八十七公里，安裝一具二十五匹馬力、三汽缸、氣冷式星型引擎，衍架式木質機身的左、右兩側局部覆蓋著粗棉布。

這架飛機和「飛行家」有相同的薄機翼設計，機翼外表覆蓋粗棉布，上、下翼面彎曲弧度很大，機翼前、後梁的上、下緣都被削薄，使翼肋的上、下蓋帽能跨於翼梁上。由於翼梁的強度不足以支撐飛行和降落時的負載，故需要外露式拉力鋼繩輔助。飛行時，升力使翼梁向上彎，上半部的拉力繩不受力，下半部的拉力繩受張力；降落時，機翼的慣性力使機翼向下彎，上半部的拉力繩受張力，下半部的拉力繩不受力。拉力繩受張力時，垂直於翼梁的分力會承擔翼梁上的部分剪力負載，這和雙翼機的垂直支柱作用一樣，不過，拉力繩上的張力有個沿著翼梁指向機身方向的分量，會對翼梁產生壓迫的作用，當時頗受大家的關注，因為木頭並不耐壓，機翼兩端被向內壓擠下，可能會使機翼銹屈(buckling)破壞。

「貝樂特十一型」原本有著樞紐副翼，但飛機的側向穩定性並不好，一九〇八年八月在法國立蒙(Les Mureaux)附近的賽馬場，貝樂特目擊韋伯駕駛「飛行家A型」在促銷展示飛行中，重複表演令人激賞的操控側彎，留下深刻的印象，繼而將「飛行家」的機翼扭轉方式用在他的飛機上，才使「貝樂特十一型」有了真正側向控制的能力。由於貝樂特對他的飛機操控性深具信心，因此在一九〇九年六月二十五日一個大雨的早上，完成人類首次動力飛行橫越英倫海峽的壯舉。「貝樂特十一型」後來進入生產線，到一次大戰爆發時已生產多架，成為世界知名的飛機之一。

同時期法國還有多架外形類似的單翼機，德國在一九一五年也有形狀差不多的霍克III單翼機(Hohe III)，大戰末期並發展出更先進的內置拉力繩的單翼機。英國因為顧慮強度和耐用性，對單翼的構型並不熱衷，所以整個一次大戰期間，英國只在一九一七年出現一型單翼機——布里斯脫M.1C(Bristol M.1C)。

一次大戰期間飛機結構

一次大戰期間最重要的兩大結構革新是懸臂翼和硬殼式機身。不需要任何拉力鋼繩的機翼稱為懸臂翼，它的基本架構仍是翼梁與翼肋，但單憑主要翼梁的強度，就足以支撐機翼上的飛行負載。一次大戰時第一架實際生產的懸臂翼飛機，是當時由荷蘭飛機製造家霍克(Anthony Fokker)為德國空軍所製造，時速兩百一十三公里的霍克D.III翼機，這架飛機由一九一二年進入霍克公司擔任首席設計師的卜茲(Reinhold Platz)所設計。一九一七年出廠的霍克D.IV木製機翼上沒有會產生阻力的拉力鋼繩，三翼的翼尖由一根薄而流線、非結構的垂直支撐條貫穿，用來控制某些飛行狀況下的飛機顫振，機翼的強度來自一根強壯的方型翼梁。由於卜茲精通焊接，因此D.IV的衍架式盒狀機身就以焊接鋼管取代木條，但仍然保留交叉鋼繩。

由卜茲設計，並於一九一八年服役的霍克D.V雙翼機，把D.IV的無拉力鋼繩、盒狀翼梁、高升力機翼、交叉鋼繩金屬焊接機身更為發揚光大，這兩架飛機的特徵都是外覆帆布，有著盒狀翼梁的懸臂翼；而同年現身身材苗條的D.III單翼機，則是有著後來成為標準設計的厚翼根、外覆三夾板的機翼。

早在霍克的飛機之前，就已經有人設計厚壯的懸臂翼和金屬飛機。一九一〇年一位德國熱動力學教授容克斯(Hugo Junkers)對航空產生狂熱，首先設計了內置拉力鋼繩的金屬懸臂翼飛機，雖然沒有真正生產，但容克斯把這個機翼應用到他在一九一五年所設計製造的單翼機「J」，比霍克的设计要早。「J」是第一架成功的全金屬製飛機，相當笨重，飛行時速一百九十四公里，只能容納一名飛行員，機身鋼管結構外圍覆蓋薄鐵片，因此被暱稱為「錫驢子」，機翼安裝在機身的中央高度(中置式)，翼根很厚，逐漸推拔到薄且平直的翼尖。

容克斯曾想使用木材，但經過詳細考慮之後，認為只有金屬材料才能完成他的設計理念。容克斯認為在大自然中成長的樹幹和樹枝，只能提供大小、形狀固定的木料；而金屬所能提供的特性與尺寸

，幾乎毫無限制，它容易加工成形、可靠、強度值可以正確掌握，又不受天候及大氣的影響。

雖然德國軍方對容克斯的設計懷疑且排斥，但容克斯深信飛機本來就應該以金屬製造，並繼續改進他的設計。他將機體外蒙皮由鐵片改為當時德國剛發明的輕質鋁合金，用在一九一七年全金屬的「J-4」又二分之一機翼飛機上，鋁質外蒙皮呈皺褶形來增加強度，皺紋方向由前往後以減少風阻，它被德軍選定為主要的對地攻擊武器，同盟國對它幾乎束手無策。到大戰結束的一九一八年十一月，全金屬、鋁質皺褶外蒙皮、懸臂式單翼構型的「J-10」和「J-10」相繼服役，這兩型飛機的機翼都擺在機身的底部(低置式)，和以往把機翼擺在機身頂部(高置式)或中間有所不同，容克斯考量一旦飛機失事墜毀，由於機翼可以吸收撞擊的能量，對飛行員的安全不無裨益。可收式起落架出現後，低置式機翼可使用較短、較輕的起落架，顯示出此種設計的另一個優點。容克斯對飛機結構演進的影響是全面性的，他是第一架懸臂翼飛機、第一架全金屬飛機、第

一架低單翼飛機的設計者與製造者。

一次大戰期間另一個重要的設計革新是硬殼式機身，mono來自希臘文，是「單一」的意思；coque來自法文，是「外殼」的意思，因此monocoque的意思是「一片式外殼(如蛋殼)」。硬殼式結構有著薄而呈弧狀的外殼，不需內嵌式加強條就能支撐外負載，如果外殼和可分擔負載的隔板或加強條搭接，則就稱為半硬殼式(semi-monocoque)結構，這兩種結構的主要承載件都是那層應力蒙皮。因此若依照嚴格的定義，現代的飛機很難說是半硬殼式結構，因為機體蒙皮上有許多開口提供維修工具的進出，所以絕大部分的氣動力負載都由保形條和隔板承受，而不是蒙皮。

硬殼式機身實際上在一次大戰爆發的前夕就已經出現了，當時已有人嘗試在圓形的木製隔框上，鋪上幾層很薄的三夾板，但因為很費工，以這種施工方式做出來的飛機沒幾架，其中最著名之一的是法國的競賽者號(Race)，這架快速且流線的單翼機殼狀機身，是由上、下兩片靠模成形的木質三夾板接合而成，它在一九一二年創下時速超過一百八十五公里的紀錄。硬殼式施工技術的突破是在一九一八年，當時在洛克希德飛機製造公司(Loughead Aircraft Manufacturing Company)任職的諾斯洛普(John K. Northrop)和公司創辦者洛氏兄弟亞倫(Alan Loughead)和莫肯(Malcolm Loughead)，以及公司的製造領班史特曼(T. Sadtman)共同獲得硬殼式機身製程的專利，將施工的時間大幅度縮短。專利編號為1,425,113，以諾斯洛普為主要設計者。

一次大戰末期的一九一八年，一些飛機結構的設計方式和趨勢儼然已經標準化，譬如為了增加升力，機翼做得較厚，且下翼面的弦線方向曲率較小，因此能使用較寬的翼梁，增加機翼的強度和剛性。還有清爽、無拉力鋼繩的機翼，和主結構以金屬取代木材的時代趨勢。不過一直到一九二〇年代初，當時在天空翱翔的飛機，絕大多數還是有著外露式拉力鋼繩、裝有副翼的強壯機翼，獨立的衍架式交叉鋼繩機身，以粗棉布覆蓋外表面的木製雙翼機。(待續)



第一架全金屬製飛機Junkers J-1。