

戰機增油設計研析

王立杰

國立交通大學機械系、中華民國空軍

摘要

戰機之燃油儲量直接影響其作戰半徑與滯空時間，傳統上多以攜掛機外油箱及空中加油兩種方式延長戰機飛行時間，惟前者將影響戰機運動性能與武器掛載能力，後者則因空中加油機於獲得及操作運用上有其限制而非完美的解決之道。分析近期戰機於延長航程之發展趨勢可歸納以放大機身、裝掛適形油箱與機內增油等三種工程研改方式增加戰機燃油容量，本文嘗試藉由 F-18 系列戰機放大機身，JAS-39 戰機增油計畫擇優過程，評估各式適形油箱可行性及其最後採用之機身增油工程研改之優劣為主軸，另參酌 F-15 與 F-16 兩型已裝置適形油箱之現役戰機使用情況與未來運用發展，俾作為未來相關工程研析之基礎。

前言

戰機發展完成進入服役階段後，或因作戰需求與設計想定有所改變，或因工藝科技水準精進而持續研改，考量研發新式戰機所需經費龐大與冗長時程，為將與時俱進的最新科技反應至戰場上，以現有戰機進行性能提升成為強化空中戰力的優先選項。隨著電子科技日新月異，航電系統得以於縮裝後仍保有相同或更為強悍的功能；新式武器的研發，賦予作為武器載台的戰機更多元的打擊能力，但在戰機功能朝制空、制海或密接支援等多元化任務發展，各式新增莖艙、武器酬載與空電系統掛載需求及相對應須執行之結構補強，造成機體重量增加後，直接影響戰機航程與滯空時間，囿於機體內部空間及酬載能力限制，此項問題往往僅能藉由空中加油與攜掛機外油箱解決。

盱衡國際情勢與國防經費，並非所有國家均能擁有空中加油機，戰場縱深不足或未完全掌握制空權時也影響其運用。為延伸戰機航程與滯空時間，可由加大機身油箱容量、增加機外油箱容量及攜掛數量與換裝具更佳燃油效率之發動機等三種選項中，擇一或組合運用達成目的，惟當前航空發動機發展已趨成熟，發動機燃油消耗率改善幅度有限，在未考量空中加油的前提下，以增加戰機燃油容量對延伸戰機航程及滯空時間較具效益，本文在此前提下，對現役戰機增油設計進行討論，俾建立相關設計考量與工程研改技術的初步概念。

戰機增油設計依儲放位置可分為機外油箱(external tank，或稱副油箱)、機身外裝置適形油箱(conformal fuel tank, CFT，大陸譯為「保形油箱」)及機身增油設計等 3 種方式，各式設計概述及其優缺點分述如后：

機外油箱

因對全機影響程度最小，在未考量匿蹤前提下，現役戰機依任務需求，多以攜掛機外油箱方式延長戰機航程與續航時間，通常機外油箱是指於機身中線、翼下或翼端派龍掛載內儲燃油的彈形油箱，增加戰機燃油容量，延伸戰機航程，極少數設計將機外油箱掛載於機翼上方。供油順序為優先使用機外油箱燃油，俟作戰時拋棄機外油箱，恢復戰機操控靈敏性，並可減少機外油箱戰損起火的機率。

增加機外油箱燃油籌載可經由加大機外油箱容積與增加油箱掛載數量兩種方式進行。加大機外油箱容量設計案例可見於 MIG-21/殲七之機外油箱容量由 480 公升增至 600 公升及 F-16 機外油箱容量由 370 加侖提高 600 加侖等，惟機外油箱體積加大後，除須考量是否超過機體結構限制、掛載後是否影響全機重心位置及其對機身流場影響，確認必要時仍可正常拋擲，不致與機身或外掛武器意外碰撞，但相關影響並非絕對，如 JAS-39 機外油箱容量增至 450 加侖仍保有超音速拋擲能力。另增加機外油箱掛載數量方式，雖可滿足延伸戰機航程需求，但會排擠戰機武器攜掛能力，除非僅為單純執行飛送(ferry)任務，否則將影響戰機作戰能力。如為不影響武器籌載能力而加長機翼長度以增加掛載，則機身亦須隨之放大，就工程層面而言，研改程度幾與全新發展新機無異。

掛載機外油箱直觀上可能產生之缺點包括阻力增加，以及因機外油箱的重量增加結構負荷，另因機外油箱裝掛位置遠離機身縱軸，影響滾轉運動性能，限制戰機操作 G 限，並會破壞戰機日趨重要的匿蹤特性。傳統戰機構型之正向與側方 90° 方向會產生最大 RCS 值，此時機外油箱反射訊號因被機身所反射的雷達訊跡所遮蔽，攜掛機外油箱與否對全機 RCS 並無明顯影響，但如雷達自斜側方照射時，掛載機外油箱的戰機將會較未攜掛機外油箱的戰機形成更大的反射源。對匿蹤戰機而言，此將嚴重破壞全機匿蹤特性，相較於適型油箱，因其雷達訊跡易與機身反射訊跡融合，不會因加裝適型油箱而明顯增加全機 RCS 值。

機腹適形油箱(conformal tank-ventral position)

本型設計概念為於機腹外掛可拆卸式，但不可於飛行時拋棄的適形油箱，相較傳統於翼下派龍掛載機外油箱的方式，可騰出機翼派龍站位，增加戰機武器攜行能力及運用彈性。本型油箱幾何尺寸長度上限制係界於鼻輪艙門至發動機裝置蓋板間，寬度則需考量是否影響起落架與輪艙門收放行程，高度不可超過油箱裝掛作業及戰機起降時與地面間距需求，因機腹之幾何外型與機身其他部位上較相對平滑，故設計上較其他適形油箱簡單，所增加的阻力與雷達反射截面積亦較於機腹下掛載機外油箱來得小，囿於空間限制，所能增加的油量也較低。依 JAS-39 增油計畫評估其缺點為相較於其所增加的燃油存量，阻力上增加更大；F-15 增油計畫亦因本系統會影響起落架及武器掛載而未採用，實務上僅見於中共自製強五攻擊機(如圖 1)、輸出巴基斯坦的殲六戰機與二戰期間德國 BF-110 等少數設計。



圖 1：強五攻擊機機腹適形油箱

機背適形油箱(conformal tank-dorsal position)

如機背未裝置減速板或需經常開啟的維修進手門，可選擇此處裝置適形油箱，F-16E/F/I 戰機與未來 F-18E/F 戰機、颯風戰機(Rafale)、歐洲戰機(EF2000)等增油計畫均為採用本類適形油箱設計案例，於機背外部兩側加裝囊狀燃油艙，艙底部與機身接合面模線契合，無須修改機身原始外型設計即可使兩者完全接合，外部模線則依氣動力與油箱容量需求進行設計。限制機背油箱外型尺寸主要因素為超音速時增加的波阻力(wave drag)是否於可接受範圍，依 JAS-39 戰機增油設計評估(如圖 2)，如僅預劃於次音速範圍操作，則機背適形油箱之容積可較於超音速範圍操作的機背適形油箱多出 1 倍，加掛機背適形油箱後雖因機身截面積加大，增加超音速阻力，但藉適當外型設計並依面積率調整機身截面積分布，仍可使阻力增加最小化。

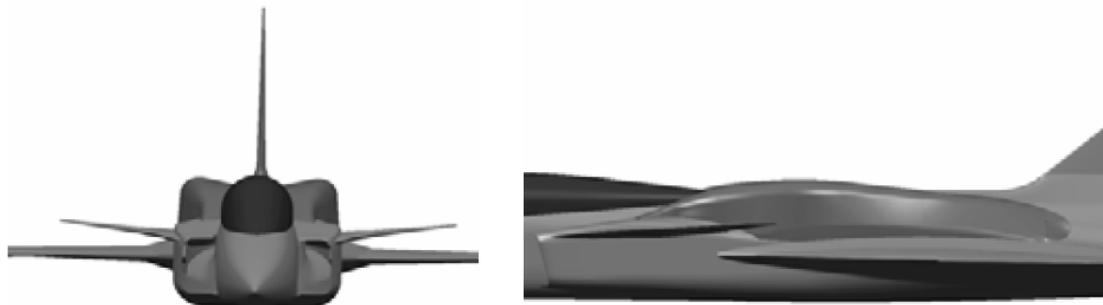


圖 2：JAS-39 戰機加裝機背適形油箱構型設計圖

以 F-16 戰機為例，適形油箱本體重量 900 磅，可容納 450 加侖(3,050 磅)JP-8 燃油，相較於 300 加侖機腹中線油箱而言，燃油容量較其增加 50%，阻力卻僅有後者的 12%。F-16 戰機於攜掛適形油箱後，視任務型態與武器掛載情況，增加的燃油量可延伸 20%至 40%的航程，基本上仍可維持原有的操控特性及包絡線，最大攻角限制、側滑及滾轉率與 9G 操作限制均無改變，飛行速度僅約降低小於 10 哩。整體而言，次音速時適形油箱對戰機靈敏性的影響幾可忽略，超音速時則隨速度提高，阻力隨之等比例增加。執行中距離空對面任務時，因適形油箱的掛載，可使戰機毋須裝掛翼下油箱即可滿足航程需求，顯而易見的優點為可騰出

原用以攜掛機外油箱的機腹及翼下內側派龍架，掛載更多武器，增加戰機武器打擊能力及運用彈性；執行長距離空對面任務時，因適形油箱的裝掛，燃油籌載增加，延長打擊範圍與滯空時間，提高持續作戰能力，並可減少對空中加油機的依賴，增加任務彈性。適形油箱可於 2 小時內於飛行線上完成拆除或裝掛作業，不致增加後勤維護方面過度負荷。

依同時操作 F-15 及 F-16 戰機且均加裝適形油箱的以色列空軍機隊使用經驗，F-16I 戰機裝掛適形油箱後最大航程可達 1,480 公里，僅略短於 F-15I 戰機裝掛適形油箱後最大航程 1,520 公里，但單發動機設計使其較發動機的 F-15I 戰機在購置及操作成本、備份件與支援裝備上僅需 60% 的經費，有利戰力維持與兵力運用彈性。

雖有諸多優點，裝置機背適形油箱前仍有相關工程問題須妥慎考量，除顯而易見地是否須換裝發動機以滿足改裝後重量增加之推力需求、全機氣動特性，如高攻角飛行時可能降低戰機穩定性、穿音速時施加於適形油箱的氣動力負載可能使機頭上仰趨勢惡化外，對其他次系統的影響，如緊急逃生時是否妨礙座艙罩拋擲與座椅彈射，機背原有環控、機砲及輔助動力系統之排氣管與流場是否受到影響，另對燃油傳輸而言，因機背適形油箱裝置於相對高點位置，可能造成燃油非預期傳輸，或於急速爬升或俯衝時造成燃油非預期洩放，亦應審慎規劃。

以 F-16 戰機適形油箱原型設計為例，其前緣延伸至座艙罩左側機砲口處並將其包覆，考量射擊時槍口爆震與子彈彈道，在不修改原機身模線、操作限制及任務包線的前提下，及不可因裝掛適形油箱而對機槍射擊條件有所限制，故對其前緣模線進行修改(如圖 3)。即使如此，修正後的適形油箱前緣仍相當接近機砲口。因 F-16 戰機裝用之 M61A1 火神機砲每秒鐘射速高達 100 發，意即射擊時將於機砲口將產生 100Hz 週期性壓力及溫度的衝擊波，故需考量槍口爆震是否會影響緊鄰的適形油箱蒙皮及結構；另如該衝擊波能量傳遞至適形油箱後，是否會反射至原機身蒙皮，產生不可預期的結構損傷與疲勞也成為關切重點。

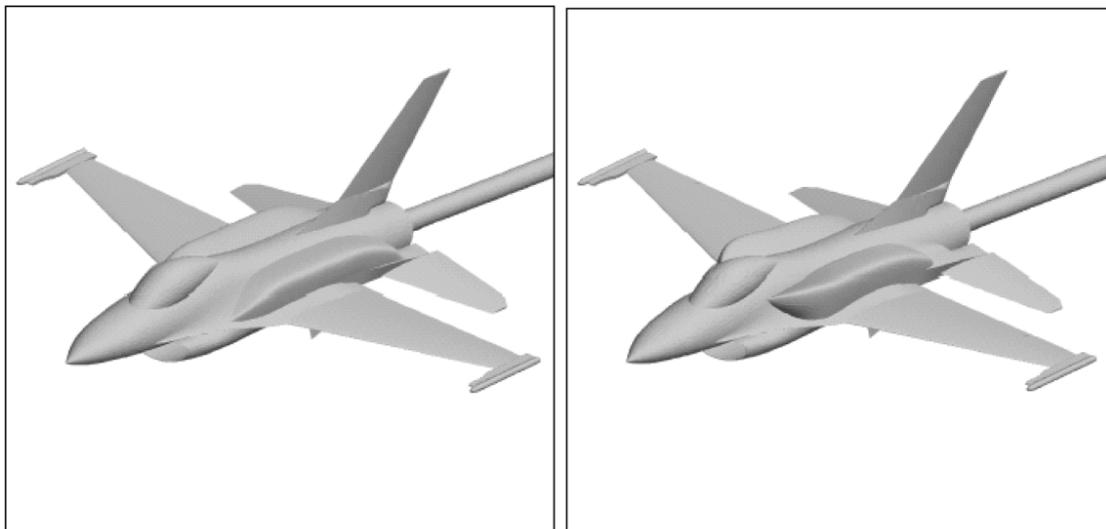


圖 3：F-16 戰機機背適形油箱設計(左)初步設計(右)修正設計。

機身側邊適形油箱

對於因減速板設計於機背而無法於此處裝置適形油箱的機種而言，可考量選擇機身側邊為安裝位置，F-15E 打擊鷹(strike eagle)於機身兩側面裝掛自進氣道延伸至水平尾翼前緣，外型符合氣動力設計的適形油箱，燃油存量共計增加 9,750 磅，相較於翼下攜掛兩具 610 加侖(4,130 磅 JP-8 燃油)的機外油箱構型，燃油存量增加 25%，阻力卻僅有後者的 60%，掛載後仍可維持 9G 操作限制。由於側邊適形油箱沿機身縱向分佈，為避免適形油箱內燃油消耗後影響重心位置，其內部區分隔為 3 個油槽，每個油槽有其獨立油泵可調整供油順序，減低燃油耗用對全機重心位置的改變。

適形油箱其他效益

攜掛適形油箱所獲之優點並非僅能將增加的機體空間單純用於提供額外燃油，透過適當的設計，亦可作為其他用途，發揮戰機作戰效能，相關設計分述如后：

1. 提供額外武器酬載空間

適形油箱除內部空間用於儲存燃油外，亦可於外部增設派能架後，增加彈藥攜行量，經由調整機體空間方式，滿足戰機多用途需求。以發展之初著重空優能力，強調「沒有 1 磅設計用在對地攻擊」的 F-15 戰機為例，龐大的機身滿足武器掛載彈性，雙發動機則提供充沛的動力，但原機身掛架僅可掛載 4 枚 AIM-7 麻雀飛彈，自 F-15E 裝掛適形油箱後，除增加燃油容量外，並於適形油箱外側加裝 6 具派能架(上排為 3 具 BRU-46/A 派能架，總掛載能力 1,100 磅；下排 3 具 BRU-47/A 派龍架，前後兩站位合計掛載 2,200 磅，中間站位掛載 3,300 磅)，可於執行空對面任務時，作為各式導引武器及傳統彈藥掛載點，大幅提升對地攻擊能力，執行空對空任務時則可改為 4 具 LAU-106 飛彈發射架攜掛 AIM-120 中程空對空飛彈，維持原有空戰能力，增加戰機運用彈性。

2. 改善戰機匿蹤特性

匿蹤戰機雖具主宰空中戰場能力，但昂貴的造價及複雜的維修需求也影響機隊規模與打擊能力。現役第三代戰機(如 F-15、F-16 及 F-18 等)於發展階段並未將戰機匿蹤需求列為設計考量，服役期間歷經多批次性能提升後，整機作戰效能雖尚可滿足戰場環境需求，但於匿蹤方面卻不易提升。戰機雷達反射源可分為機身本體及外掛武器兩部份，藉由吸波材料的塗佈可部份降低原機身本體雷達反射能量，而適形油箱安裝後，因無須攜掛機外油箱，消除是項反射源外，亦可運用適形油箱填補或遮蓋機身上易造成雷達波散射的角反射區，修飾原易產生反射及散射區域的外型模線，減少特定角度的 RCS 值，如此修改後雖尚無法與真正匿蹤戰機相比擬，但已可於特定角度下對雷達產生低可視度效果，提昇作戰效益。

另空用飛彈、炸彈及火箭為控制及穩定方向，需於彈體上裝置相關氣動力控制翼面，使其外型顯得相當複雜，如以外掛方式裝掛於戰機上，飛彈本體及派龍架與戰機機體間對雷達波的反射及散射效應，在一定程度上抵消降低戰機本體 RCS 的努力。如將適形油箱的部分空間調整為武器掛載用途，使相關彈藥由外掛改為內載方式，不可避免地雖減少燃油增量，卻可有效降低現役戰機的本體 RCS，改善其匿蹤特性，有限的載彈量則藉由提高彈藥的命中率彌補，故於提高戰機生存性外，尚可獲得更高的戰力。

在強調改善匿蹤特性的 F-15SE 靜寂鷹(silence eagle)設計上，將適形油箱前段側面及腹部部分空間修改為兩內置武器艙(如圖 4)，每一艙區於執行制空任務可攜掛 1 枚 AIM-9 短程響尾蛇飛彈或 1 枚 AIM-120C 中程空對空飛彈，對地任務時則改為攜掛 500-1,000 磅聯合直攻彈藥(joint direct attack munition, JDAM) 2 枚或小直徑炸彈(small diameter bomb, SDB) 2 枚，雖使適形油箱燃油容量減少至 750 加侖，作戰半徑依廠家估算，理想狀況下將由原先空對面任務 1,000 哩及戰鬥巡邏 900 哩分別縮短至 800 哩及 720 哩，但配合外傾雙垂直尾翼、吸波材質塗佈及相關匿蹤設計後，可使其正向對 X-band 雷達 RCS 值預估由原為 10 米平方等級降至 0.05 米平方，提升對空對空雷達的低可偵測能力。如無匿蹤需求時，仍可同 F-15E 採武器外掛方式，適形油箱空間全部做為燃油容器，達到航程延伸的目的。



圖 4：F-15SE 適形油箱內置武器艙設計

3. 裝置空中加油組件

當前空中加油設計主要可分為浮錨式及飛桁式兩種設計，就受油端的戰機而言，使用浮錨式空中加油需於機體上加裝加油管，俾與空中加油機放出的浮錨配接傳油，加油管有固定與活動兩種設計，固定式加油管設計簡便，但不免增加飛行阻力；活動式加油管可收納於機身內，不會增加飛行阻力，需空中加油時方伸出受油，缺點則為增加機械複雜度。就因其他因素而選擇採用飛桁式加油設計戰機，卻僅擁有浮錨式空中加油機的國家而言，如何修改加油方式，使其得以發揮空中加油的優勢就需工程方面的研改。F-16IN 戰機即以挪用右側機背適形油箱前端的空間，加裝活動式空中加油管(如圖

5)，使其得以進行浮錨式空中加油方式解決是項問題，燃油自加油管進入機體後並非直接進入適形油箱，而是經由管路調整為與飛桁式受油方式相同流路後傳油至機身各部油箱，以減少對原燃油系統設計影響，加油過程中重心位置隨燃油容量改變由線傳飛控調整，確保加油過程飛行穩定。



圖 5：F-16IN 戰機機背適形油箱加裝空中加油管

機身油箱增油

自 F-15 及 F-16 戰機以適形油箱方式增加燃油酬載，F-18E/F、歐洲戰機及颯風戰機等亦將適形油箱列為增油選項，使其似乎成為戰機增油設計的最佳選項。事實上，除於裝掛機外油箱或於機身外部附加適形油箱以增加燃油流量外，尋找機內可用空間儲存燃油亦為另一途徑，但如以延長機身方式增設油箱以增加燃油籌載(如圖 6 左)，則可能導致全機重心前移而影響戰機穩定性，通常後機身也需適度延長(如圖 6 右)，以配平重心前移的方式解決，且可再增加燃油容量。此類設計因機身向前延伸，可能影響環控系統衝壓空氣進入流道、機砲位置因機身延長而相對後移，於機砲射擊時是否會使子彈彈道與前機身交錯，產生潛在危安因素；另因機身延長而增加機身彎矩(bending moment)，可能影響機身結構壽命。上述相關機身增油作為對增加戰機航程效益並不顯著。另一常見增加機身燃油量的方式是放大機脊體積(如 MIG-21 及 MIG-29 戰機)作為新增油箱的空間，缺點則為影響飛行員六點

鐘視界，且其增量有限；另有改變任務需求，如 F-104G 戰機修改為 RF-104G 偵查機時，藉由移除機砲，騰出機砲艙空間裝置油箱，或如 B-57 轟炸機將原雙座設計改為單座 RB-57 偵察機，調整後座空間為油箱，近期則有 Su-35 修改垂直尾翼、水平尾翼尾桁及尾錐作為結構油箱，均為實務案例。



圖 6：JAS-39 戰機延長前機身(左)及後機身(右)設計研析

放大現役戰機尺寸，運用已成熟的氣動力外型為基礎，除可縮短發展時程外，藉由與現役戰機零組件的共通性也可降低武器開發經費與時程及後續後勤支援需求，目前成功案例為 F-18C/D 大黃蜂(hornet)戰機藉由放大機身的方式，升級為 F-18E/F 超級大黃蜂(superhornet)戰機，雖同為 F/A-18 戰機家族，F/A-18E/F 戰機僅有少部分結構如前機身係自 F-18C 戰機衍生而來，其餘中/後機身、主翼、尾翼及動力系統均為全新發展。除雷達、電戰及核心航電系統提升外，就設計觀點而言，F/A-18E/F 最大的改變為放大機體，使機身燃油存量增加為 14,700 磅，較原始 F/A-18C/D 增加 36%，主翼面積也隨之增加為 500 平方呎(原為 400 平方呎)，全機重量較 F/A-18C 增加 30% 達 30,855 磅，發動機也以推力為 20,700 磅的 F414 渦扇發動機取代原本使用的 F404 渦扇發動機，故機體放大後全機阻力及重量雖也隨之增加，仍不影響操縱性。其較大翼展且經結構強化的機翼，除增加乙具武器掛點外，原有武器掛點亦隨之強化，增加武器掛載能力，亦可攜掛 480 加侖機外油箱，增加作戰半徑及滯空時間，有效增加屏衛航母艦隊之能力。

JAS-39NG(next generation)則為機身增油方式最具突破性的設計，在評估過各式機外適形油箱設計與該型機之匹配性後，選擇主輪艙區作為新增機內油箱安裝位置(如圖 7)。主輪艙區原為主起落架收至機身時之儲放空間，除起落架與主輪本體外，相關收放制動器及連動機構作動的空間需求，使其成為機身內相當大的空艙，增加 900 公斤燃油容量，且因其位置接近全機重心，燃油消耗後不致造成全機重心大幅移動，相當適合用於安裝新增油箱。原主輪艙空間改為油箱後，主起落架裝置處由機腹外移至翼根，加大後的主輪收起後收納於機身及翼根間新增艙區內(如圖 8)。原機腹下方也因起落架外移後，毋需考量起落架收放行程所需空間，使其機腹中線掛載站位由原先單一派龍，新增 2 處可攜掛重型空對面武器裝置點，提升打擊能力。新增機內油箱配合增大 450 加侖機外油箱，共可為 JAS-39NG 增加 1,400 公斤燃油

酬載，除部分機身結構配合隨之調整外，另在武器掛載需求不變或增加的情況下，尚需提高最大起飛重量(maximum take-off weight, MTOW)，此時除於直觀上需提升發動機推力外，尚須考量煞車能量是否超過起落架及輪煞系統操作限制，因起落架除能滿足正常起降需求外，並需在緊急狀況如放棄起飛時，可使戰機及時停止，故需加大煞車盤及主輪輪轂直徑，以吸收因重量增加的額外動能。

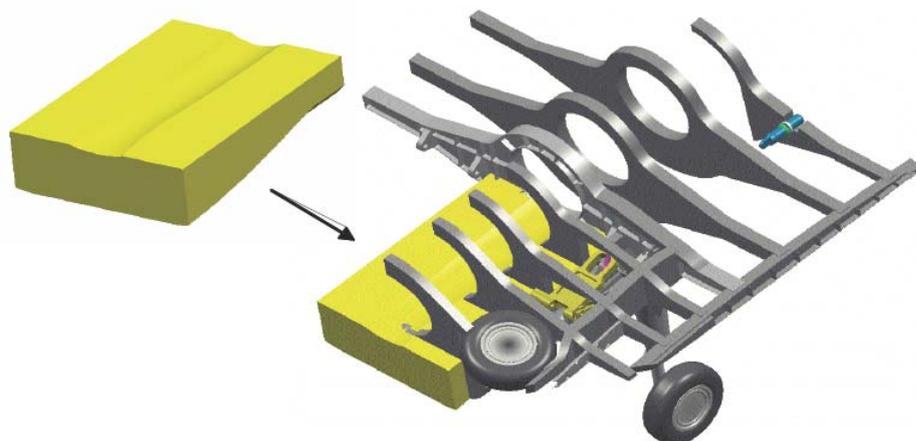


圖 7：JAS-39 戰機輪艙增油研改



圖 8：JAS-39(左)與 JAS-39NG(右)主輪輪距比較

結語

藉由當前成功研改案例分析，解決戰機航程增加並非僅有單一解決途徑，依不同機種特性、研改工藝技術及武器操作需求，運用成熟技術藉由系統工程擇優進行研改，可縮短裝備研發期程並降低經費需求，使現役戰機得以因應戰場環境改變性能提升，延長系統操作壽命，滿足作戰需求。

參考文獻

1. 車海林、陳迎春，保形油箱氣動力設計初探，飛機設計第二期，2004 年 6 月，10-22 頁。
2. 黃敏杰、黃俊，保形油箱的隱身與氣動設計，北京航空航天大學學報，2006 年 9 月，1019-1022 頁。

3. 沈海軍，腹部油箱對飛機雷達隱身特性的影響，飛機設計，27 卷 5 期，2007 年 10 月，40-42 頁。
4. 鳴海裕，空中加油技術發展，全球防衛雜誌 275 期，2007 年 7 月，30-37 頁。
5. 王曉，寶葫蘆的秘密—F-16IN 戰鬥機上的保形油箱，航空世界，2012 年 1 月，64-67 頁。
6. Ra'nan Weiss.F-16I Sufa in IAF Service, IsraDecal Publications,Israel,2005, P.4, P.11.
7. Hampus Gavel, On Aircraft Fuel Systems Conceptual Design and Modeling, Department of Machine Design, ISBN 978-91-85643-04-2
8. http://defense-update.com/products/f-15se_180309.html
9. Carlo Kopp, F-15E-Anatomy of Strike Fighter, Australia's Independent Defence Think Tank, <http://www.ousairpower.net/TE-F-15E-Strike-Eagle.html>