



Su-35氣動力性能分析

軍事專欄作家 楊政衛

本文圖文參考空氣動力學教科書 John J. Bertin, "Aerodynamics for Engineers" 撰寫。並蒙成大航太系尤芳忞副教授審閱修改而成，特此向尤老師致謝。

前言

不論從理論估計或是取自飛行表演、模擬空戰的數據，幾乎沒有人會質疑 Su-27 系列在飛行性能上相對於傳統戰機的壓倒性優勢。然自 F-22、EF-2000、Rafale 等歐美新世代戰機問世後，其靈巧的身手與新穎的性能要求(長時間超音速飛行等)動搖了 Su-27 的地位。在人類常有的喜新厭舊的心理作用下，有時會有“Su-27 的氣動設計已經過時”的印象出現。事實上，不知是有意的還是偶然的，與上述歐美新機約在同時發展的 Su-27 大改型—Su-35—所具有的飛行性能竟足以面對這些新穎對手的挑戰，即使他不再穩坐飛行性能第一的寶座。

在此我們要比較 Su-35 與 EF-2000、Rafale 的飛行性能。由於他們都有前翼、且縱向穩定性相似，因此拉攻角的能力、前翼的增升能力較接近，使得透過主翼等氣動佈局比較其差異時較為“安全”(也就是說較接近實情)。與討論 Su-27S 的飛行性能一樣，仍考慮瞬間轉彎(過載)與持續轉彎能力，前者以升力特性為基準，後者考慮升阻比與推重比的淨作用。

1. 鴨式佈局的特性

EF-2000、Rafale 所用的鴨式佈局(前翼—三角翼佈局)是種對瞬間轉彎有利的氣動佈局，不少 1970 年代以後研製的高機動戰機都採此佈局。這是三角翼的氣動特性使然：(1)三角翼後掠角大(通常在 60 度左右)、展弦比小使得升力係數斜率較低後掠角機翼小(在失速攻角以下升力係數與攻角成正比，斜率較小表示相同攻角時升力係數較小)。(2)但大後掠角與低展弦比翼捲起的渦流能延緩失速，使得失速攻角較大(即當傳統機翼升力係數已開始隨攻角增加下降時，三角翼升力係數還在上升)。(3)此外，三角翼很容易做成大面積，因此雖然升力係數較小但總升力未必小。

總結以上三種特性，考慮兩架只有機翼不同的飛機，一般而言，當其他飛行條件(速度、空氣密度等)相同時，在傳統機翼失速攻角以下，三角翼升力係數較小，但因翼面積較大因此總升力未必較低，甚至有可能較高；而在傳統機翼失速攻角以上三角翼失速攻角以下，傳統機翼升力係數開始下降，而三角翼升力係數繼續上升，因此總升力可望超過傳統機翼。換言之，一般而言，三角翼可用攻角較大、指向性能較好、可用升力較大或

相當，這些都是瞬間機動中的致勝關鍵。只是在起降時因機高有限的關係，攻角無法太大因此無法用出最大升力，使得三角翼飛機有起降性能較差的缺陷，要靠其他技術彌補。

而前翼在鴨式佈局中主要的貢獻在於提供強大的控制能力，它降低穩定性使得容易拉出大攻角，並且增強低速性能，降低著陸速度而改善起降性能。除了增強控制能力外，前翼渦流也可增加總升力。

因此就瞬間轉彎能力來說，鴨式佈局相較於傳統佈局(注意現在比的是只有機翼不同的兩架飛機)有非常顯著的優勢，但就持續轉彎能力來說卻剛好相反，這也是三角翼的氣動特性使然。次音速時，飛機的阻力主要來自誘導阻力(升力衍生阻力)與摩擦力，1G 時(即飛機維持自身重量作直線飛行)在某個次音速速度時兩者約略各半(此時總阻力最小。對 F-16C 而言，此速度約為 0.5 馬赫)，在這速度以下主要為誘導阻力，以上則主要為摩擦力。三角翼展弦比通常很小、後掠角很大，因此誘導阻力就比較大，此外三角翼面積通常也較大，所以摩擦阻力也較大。而當過載>1G 時摩擦阻力幾乎不變，誘導阻力權重提高(因為誘導阻力來自升力，有過載時升力較大，衍生的阻力當然較大)，這也同樣不利於三角翼。因此一般而言在次音速時鴨式佈局阻力較傳統佈局大，也就是說當推重比相同時鴨式佈局的次音速持續機動能力較差。但另一方面，持續機動能力差與過載能力高兩相結

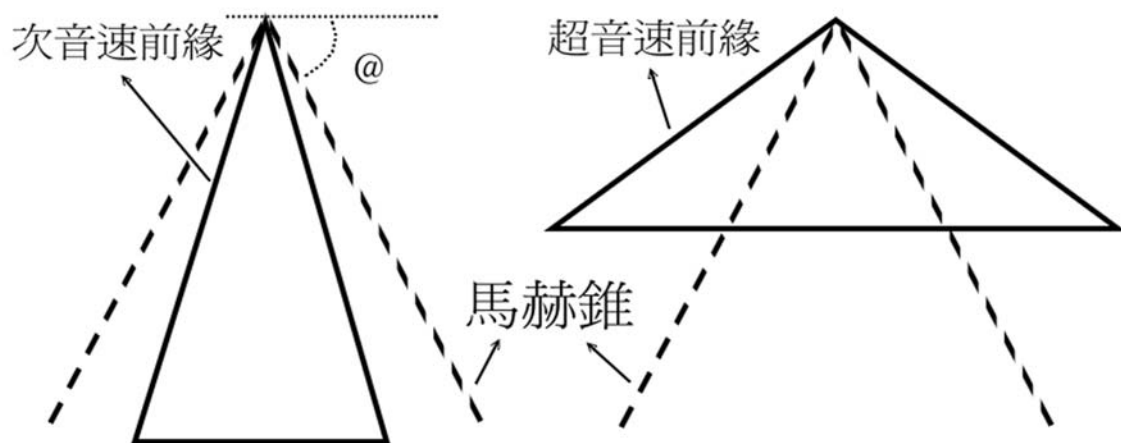
合，就讓三角翼飛機在高 G 盤旋時能越轉越慢減少迴轉半徑，這是一種頗厲害的纏鬥招數。

而自超音速開始越來越有利於三角翼，因為當前緣迎著超音速來流時，三角翼因為後掠角大的緣故震波阻力係數較小。但必須注意以上是成立於“前緣迎著超音速來流”時，事實上只要馬赫數不要太大，則主翼往往可“躲”在機首等產生的馬赫錐後方，使得垂直於前緣的氣流分量仍是次音速流；而即使機翼開始迎接超音速來流，只要機翼後掠得比馬赫錐還大，那麼垂直於前緣的方向仍相當於次音速來流。這些時候三角翼雖仍有阻力係數較小的優勢但影響比較不顯著^①。所以除非馬赫數很高(例如 3 馬赫以上，這種速度的飛機青一色都用三角翼)，否則三角翼或鴨式佈局的超音速阻力未必低於傳統佈局，就算阻力較低也不一定低得很明顯。

2.Su-35 與 EF-2000、Rafale 氣動特性比較

請注意上一段的比較是對於兩架“只有機翼不同”的飛機而言，目的在於探討機翼佈局的影響，並不是說所有鴨式佈局相對於傳統佈局都有那些優點或缺點。例如要比較 Su-35 與 EF-2000、Rafale 時就出現一些吊詭的局面：Su-35 有升力機身而 EF-2000 沒有，所以升力負荷不能以翼負荷直接比；計算 Su-35 的翼面積時少算的機身部分比例較 EF-2000 多，因此不能直接以翼負荷估計摩擦阻力大小……。

註① 從直覺看，機翼迎著來流，被來流向後推，此時掠角大的感覺起來阻力應該比較小。這種阻力的確存在，叫做“壓差阻力”。壓差阻力佔飛機阻力比重很小，在失速前定性討論時可忽略之。

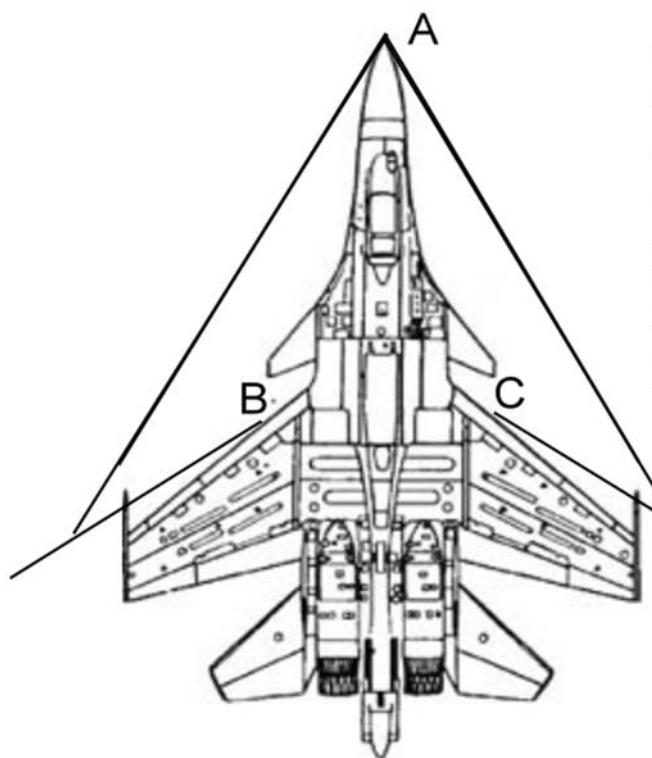


(左)掠角大，整個躲在馬赫錐後，除了最尖端外相當於迎次音速流。

(右)掠角較小，穿透馬赫錐，整個前緣都迎超音速流。

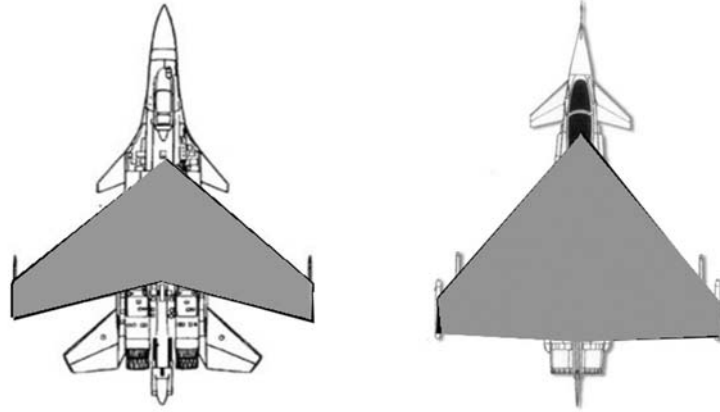
$$\textcircled{*} @ = \cos^{-1}(1/M)$$

M為馬赫數



實際上，機首會先產生震波為氣流減速，使得機翼所受來流速度小於飛行速度。

如圖，雖然馬赫錐後掠角大於主翼掠角，但因機首震波先將來流減速，使得主翼仍為次音速前緣。



陰影部分面積即一般所謂的“翼面積”(Extended Area)
很顯然，Su-35少算的機身面積比例較大

2.1.瞬間轉彎能力(機首指向性)

Su-35 與 EF-2000 穩定裕度(static margin)均為-20%平均氣動力弦長(指升力中心在重心前 20%平均氣動力弦長)，故可假設其縱向靈巧性一樣、拉攻角拉得一樣快，因此其瞬間轉彎能力(過載能力)可“安全的”透過升力能力比較。必須注意的是，由於 Su-35 與 EF-2000 等的升力特性不同，所以考慮升力負荷時不能只用翼負荷，還要考慮升力係數(用翼負荷除以升力係數)。

雖然就一般而言三角翼戰機翼負荷較低使得小攻角時升力係數雖然較低但升力負荷未必較大，但考慮 Su-35 有舉升體機身而 EF-2000、Rafale 沒有的情況，Su-35 等效翼負荷與 EF-2000 相當[46]、低於 Rafale，再考慮 Su-35 升力係數較高之情況後，可知在 Su-35 的失速攻角以下時 Su-35 在同攻角時單位質量分到的總升力應較 EF-2000、Rafale 者為大(升力負荷較低)，即過載能力較好。

Su-35 增設前翼，失速攻角較 Su-27S 來

得大，但應仍小於 EF-2000、Rafale 的鴨式佈局。在 Su-35 失速攻角以上 EF-2000、Rafale 失速攻角以下的領域，Su-35 升力係數開始隨攻角增加而下降而 EF-2000、Rafale 的繼續增加，此時比較一般化的結果是鴨式佈局升力係數最終超過 Su-35，在此狀況下大約到使得兩者升力係數相同的攻角(取用這個攻角是因為兩者等效翼負荷相當)以上 EF-2000、Rafale 的單位總升力開始超過 Su-35(即升力負荷開始小於 Su-35)。但倘若 Su-35 的失速攻角夠高，最大升力係數又夠大，那麼便有可能一直保持較高的升力係數。由於目前沒有詳細數據，因此本文假設前一種比一般化的狀況，也就是 EF-2000、Rafale 的單位升力最終將超過 Su-35。

但這就是說 EF-2000、Rafale 單位質量可用到的最大升力超過 Su-35 嗎？也不盡然，必須考慮飛機是否能操到那個大攻角。雖然就機翼佈局而言，鴨式佈局的高攻角性能優於 Su-35 的三翼面佈局，但 EF-2000 等採用單垂



尾，氣動力偏航穩定性遜於雙垂尾的 Su-35。因此 EF-2000 等的單位質量分到的最大升力是否能超越 Su-35 得視其是否能操作至該臨界攻角而定。較早的資料顯示 EF-2000 與 Rafale 攻角限制與 Su-35 都同在 35 度左右，因此當時前兩者過載性能應該不如 Su-35，但近年因飛控系統的進步，包括 EF-2000 在內的先進飛機均號稱無攻角限制，因此目前的 EF-2000、Rafale 可用的單位質量最大升力應可超過 Su-35。以下討論以第二種案例 (EF-2000 等無攻角限制) 為準。

因此在某個臨界攻角 (這個臨界攻角大於 Su-35 的失速攻角而小於 EF-2000、Rafale 者) 以下 Su-35 過載性能較優，此攻角以上則剛好相反。

看起來好像 Su-35 在多數狀況擁有較佳的過載性能，但必須注意即便如此也不能直接用以下“當飛彈性能相當時 Su-35 在大 G 機動空戰時勝算較高”的結論。這是因為此時被用來與 Su-35 比較的是鴨式佈局飛機之故。佈局相同的戰機之間 (例如 Su-27S 對 F-16)，大家可用攻角差不多，因此纏鬥時的機首指向性能與過載性能有很大的關係，特別是由於 Su-27 家族的高攻角性能又優於其他傳統佈局戰機，因此在 Su-27S 與 F-15、F-16 等飛機的比較中，以過載性能估計指向性能優劣就比較安全。然而，當過載相同時，EF-2000、Rafale 的攻角可能大於 Su-35，而且在推重比相同時，三角翼戰機減速性能還比 Su-35 好，這樣就能縮小迴轉半徑。

因此就傳統空戰飛行方式而言，雖然 Su-35 的過載性能可能比較好，但是指向性能

就可能遜於鴨式佈局的 EF-2000 與 Rafale。近距空戰時，高指向性是最致命的飛行性能，因此在近戰武器性能相當的前提下 (例如 Rafale+MICA 對上 Su-35+R-73 或是大家都只用機砲)，EF-2000 與 Rafale 有勝過 Su-35 的可能。

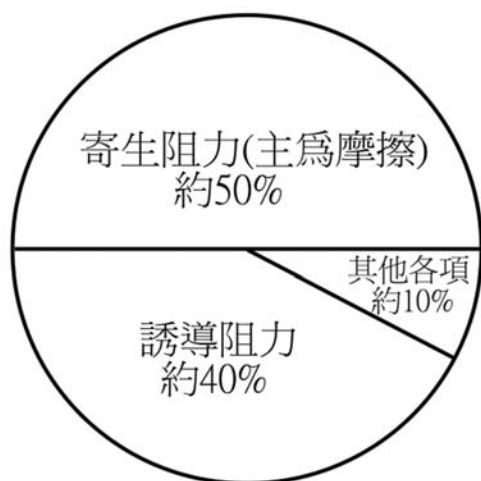
2.2. 持續機動能力

持續機動能力由升阻比與推重比共同決定。Su-27S 的最大升阻比達 11.8，幾乎達超音速飛機的極至 (通常超音速飛機的次音速飛行最大升阻比在 4~12 之間，性能優良的西規三代超音速戰機最大升阻比在 11.6~12 之間)。雖然沒有確切數據，但相信鴨式佈局飛機的最大升阻比不會比傳統佈局戰機高。但由於 Su-35 與 EF-2000、Rafale 等的佈局差異較大，因此僅用最大升阻比衡量持續機動能力風險較高。本文分高低速、高低過載等區間討論 Su-35 與 EF-2000、Rafale 的升阻比。

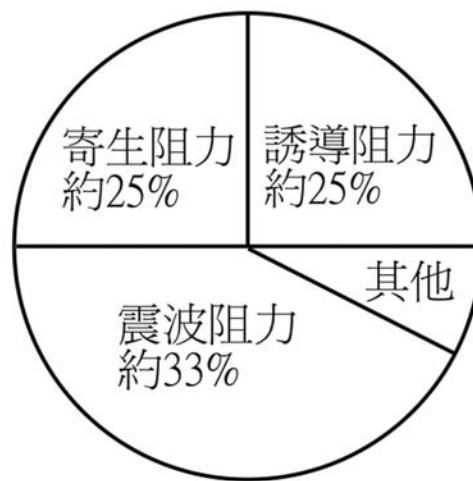
飛機的阻力有很多種，但是權重最高的只有三種：寄生阻力 (其中絕大多數為摩擦)、誘導阻力 (由升力產生，又稱升力衍生阻力)、震波阻力 (穿音速以上開始出現)。次音速時，沒有震波阻力，若為巡航狀態，則摩擦阻力約佔 50%，誘導阻力約佔 40%，若為機動狀態，則誘導阻力權重提高，甚至到某個過載以上時誘導阻力幾乎決定一切；超音速時，出現震波阻力，此時摩擦、誘導約各佔 1/4、震波約佔 1/3。其餘 10% 左右由其他數種阻力共享。本文只考慮三種主要的阻力。

2.2.1. 平飛狀態 (維持自身重量直線飛行)

如果考慮兩架只有機翼不同的飛機，鴨



次音速直線飛行時阻力分布示意圖



超音速直線飛行阻力分布示意圖

式佈局者單位質量分到的誘導阻力與摩擦阻力均較大，但 Su-35 與 EF-2000、Rafale 氣動佈局差異較大，最好能詳細考慮些。Su-35 展弦比較高（3.48，EF-2000 與 Rafale 分別為 2.2 與 2.6），等效翼負荷與 EF-2000 相當，故同過載時單位質量誘導阻力應仍較小^②。但單位摩擦阻力則未必，如下論。

摩擦阻力與表面積有關，對於氣動佈局相似的飛機而言（例如同為鴨式佈局，或是同為傳統佈局等），各部分所佔表面積比率在各機大致相當（傳統佈局飛機摩擦力中，機翼約 50%，機身約 40%，尾翼約 10%）所以可用按定義計算的翼負荷（重量／翼面積，注

意這不是我們比較瞬間轉彎力時校正出的等效翼負荷）概略比較摩擦阻力大小：通常翼負荷越大單位摩擦阻力越小。但機身對摩擦阻力的貢獻也佔相當比重因此這種估計法在比較 Su-35 與 EF-2000、Rafale 時有點陷阱——計算 Su-35 的翼面積時露算的機身部分比較多，而 EF-2000、Rafale 的翼面積則與投影面積相當——因此並不能僅從翼負荷評估，還要考慮機身的影響，即考慮表面積負荷。EF-2000、Rafale 的定義翼負荷雖低於 Su-35，但表面積負荷則與 Su-35 相當或大於。因此在高次音速時，Su-35 的單位阻力可能與鴨式佈局相當或較大。

註② 通常展弦比越高，表示在同升力係數時誘導阻力係數較小，經一些簡短的整理可得到以下有用的資訊：
 “當外界流場一樣，且升力係數曲線一樣時，飛機單位質量受的誘導阻力與展弦比及翼負荷有關，高展弦比與低翼負荷有助於減少同過載時的單位誘導阻力。”與單單以翼負荷評估升力負荷時必須以升力係數曲線一樣為前提一般，如果我們要單單以展弦比跟翼負荷評估兩架升力特性差距大的飛機的單位誘導阻力時，所用到的“翼負荷”就要用“升力負荷”。Su-35 升力負荷與 EF-2000 相當或較低，展弦比較大，據此估計單位阻力較小。

	Su-35	EF-2000	Rafale	F-15C	F-16C	幻象 2000-5
空戰重(kg)	23,600	13,000	13,000	17,200	10,800	10,000
翼面積(平方米)	62.04	50	46	56.5	27.9	41
翼負荷(kg/平方米)	380	260	283	304	387	244
總表面積(平方米)	約 304 (Su-27S 的數據)	168	158	276	139	135
表面積負荷(kg/平方米)	77.6	77.38	82.23	62.32	77.70	74.07

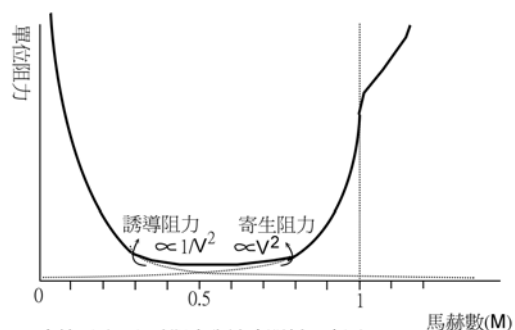
至此我們能知道，1G 直線平飛時，Su-35 的低次音速單位阻力應較 EF-2000、Rafale 小，高次音速單位阻力不明(可能相當，或是比較大)。由於 1G 時升阻比恰好是 1G 時單位阻力的倒數(因為此時升力等於重量)，所以 Su-35 在 1G 時的低次音速升阻比應高於 EF-2000 與 Rafale 等，高次音速升阻比有可能與後兩者相當或較小。

而超音速時，鴨式佈局飛機的震波阻力係數極可能小於 Su-35，因此到某個馬赫數以上時 EF-2000、Rafale 的升阻比會比 Su-35 大，至於這個臨界馬赫數有多大呢？能以“讓 Su-35 主翼前緣開始整個迎超音速來流”的臨界速度估計，因為在此臨界速度以下時，翼前緣均為次音速前緣(指垂直於翼前緣的氣流分量都為次音速流)。Su-35 主翼前緣後掠 42 度，因此當主翼前緣來流速度約 1.34 馬赫($1/\cos 42^\circ$)以下時，主翼均為次音速前緣，反之當主翼前緣來流速度大於 1.34 馬赫時，主翼都成為超音速前緣。但必須注意，由於機首也會產生震波，可減少機翼前緣迎接的來流

速度。比方說當飛機航速為 1.34 馬赫時，機首震波會將之減速，這時主翼所迎的來流速度就未必如此之快。因此這個臨界馬赫數估計會在 1.34 馬赫以上，這裡先取 1.34 馬赫為下限。

2.2.2.機動狀態(過載>1)

接著考慮有過載(>1G)的情況，此時摩擦阻力的影響幾乎不變，但由於產生過載需要較大的升力因此誘導阻力增加，使得誘導阻力擁有阻力決定權的臨界速度會因過載值而提高，以 F-16C 為例，1G 時此臨界約落在 0.5



直線平飛(1G)時阻力與速度關係示意圖

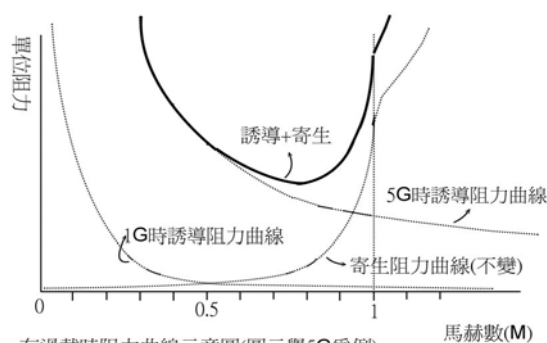
低次音速阻力由誘導阻力決定，高次音速由摩擦阻力決定
中間出現阻力最小值(對F-16C而言此值約0.5馬赫)

馬赫，5G 時該臨界約落在 0.7~0.8 馬赫，且此時誘導阻力在次音速均佔一半以上，而 9G 時次音速阻力幾乎都是誘導阻力。同樣的，一般戰機在高 G 時阻力也主要來自誘導阻力。這當然不利於 EF-2000、Rafale 等鴨式佈局飛機，因為三角翼在升力係數比傳統機翼小時誘導阻力係數就可能比較大，更何況 EF-2000 與 Su-35 等效翼負荷相當因此升力係數要與 Su-35 差不多才能有一樣的過載值。因此考慮有過載時，Su-35 的升阻比優勢臨界速度會提高。(注意到了嗎？其實這就是三角翼飛機在高機動時可以迅速減速，而縮減迴轉半徑的原因！)

因此總的說來，Su-35 在空戰機動的大部分時候擁有升阻比優勢；而飛行時升阻比得視飛行速度而定，低次音速升阻比較高而高次音速升阻比則未必。

2.2.3.考慮推重比

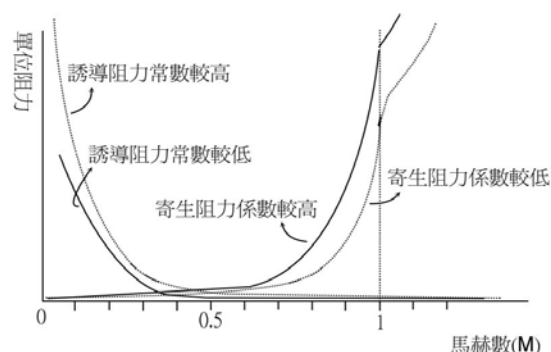
但能量維持能力還與推重比有關，Su-35 的低空低速空戰推重比 1.17~1.2，Rafale(裝備 M-88-2 引擎)與之相當，而 EF-2000 則達 1.4



有過載時阻力曲線示意圖(圖示舉5G為例)

有過載時：

1. 寄生阻力曲線不變。
2. 誘導阻力因過載增加而“上移”，過載越高增幅越大。
3. 於是誘導阻力佔決定權的速度提高，最低阻力速度也提高。



- 表面積負荷低，寄生阻力係數較高，阻力曲線“上移”。
- 展弦比高，誘導阻力常數下降，阻力曲線“下移”。

※注意：以上只是“假設其他條件一樣時”才成立，也就是只考慮該兩個因素的影響。例如如果升力負荷比別人大大，則就算展弦比較大，誘導阻力曲線也未必下移。

※承上，在比較年代、功能、佈局相近的飛機時，這種估計法準確性較高。

左右，而到超音速開始，Su-35 效率較高的進氣道對推力的貢獻比重越來越高，特別是大約在 1.5 馬赫以上時，與 EF-2000、Rafale 等的固定幾何形狀進氣道相比優勢更為顯著。

(1)與 Rafale 相比，次音速持續盤旋或瞬間高機動過程中(5G 以上)維持能量的能力 Su-35 應較優。低過載時 Rafale 可能在高次音速領域勝過 Su-35。(2)與 EF-2000 相比，空戰機動時 EF-2000 阻力應該較大，雖然其推重比也大，但由於其攻角通常較高(在同樣條件同樣過載)，因此在飛行方向上的推重比分量是否較高也難說，因此難以判定 EF-2000 與 Su-35 的持續機動能力高下。低過載時，EF-2000 在高次音速領域應該較優，低次音速領域則不明。(3)而在超音速時，雖然 Su-35 升阻比在某個馬赫數(可能在 1.34 馬赫以上)以上可能遜於 EF-2000 與 Rafale，但此時 Su-35 推重比較大，所以 Su-35 能否藉超音速推重比彌補可能的升阻比劣勢也未知。

2.2.4.考慮過失速機動



當飛機的攻角限制超過失速攻角，甚至沒有攻角限制時，過載性能對機首指向性的影響權重就減小了。因此雖然就傳統飛行方式論，Su-35 的指向性能很可能遜於 EF-2000 與 Rafale，但他卻有過失速機動能力可補此不足：Su-35 攻角能拉到 90 度以上！而且以拉攻角方式指向的速率通常大於以迴轉方式指向，因此考慮過失速機動後，Su-35 在指向性能方面應該較優。

近年來 EF-2000 與 Rafale 也紛紛號稱具有無攻角限制能力，這樣一來，大家的瞬間指向性能又差不多處於同一水平，然而俄國已將向量推力用於提升過失速機動性能使過失速飛機能更輕易改出且更足以應付後續威脅，在這方面歐洲的向量推力引擎尚未服役，且其向量推力以提升起降性能、飛行效率為主，尚無提升過失速機動能力的打算。

所以考慮過失速機動以後，Su-35 的指向性能應大於或等於歐洲戰機，直到歐洲也將 TVC 用於空戰為止。

過失速機動不見得只能實現於低速，例如 Su-35 的“過失速筋斗”就是在比“眼鏡蛇”還要高的速度下不使用向量推力的極小半徑筋斗動作。目前過失速機動還只是開端，俄國正在探索過失速機動在未來空戰應用，例如過去被認為是用來“煞車，讓敵機衝過頭”的眼鏡蛇動作，已發現可用於大攻角迴轉。另外 Su-35 著名的“勾拳(Hook)”動作便是眼鏡蛇在水平面上的發揮。．．．雖然過失速機動在超視距時代的價值仍有待研究，但毋庸置疑的，他至少將成為戰機最後的保命手段，波灣戰爭時一個膾炙人口的空戰事

件就可做最好的旁證：當時一架 MiG-25 如常山趙子龍般穿梭於千軍萬馬之中，從超視距一路鑽至近程，閃掉了 F-15 的幾枚飛彈，但終因機動性不夠而被擊殺，倘若這架飛機有過失速機動能力，遭毒手的可能就是 F-15。

2.3. 超音速性能

2.3.1. 過載性能

現代戰機，特別是具備長時間超音速飛行能力的戰機，已開始注意超音速靈巧性(而不只是速度大小)，戰機若具有良好超音速靈巧性，則其長時間超音速飛行性能就更具實用性。F-22 與 EF-2000 均號稱除了現代戰機必備的次音速最大 G 限達 9G 外，在某高度某超音速速度時可達 5G 左右過載。這種性能足以支援 F-22 以及 EF-2000 改型(裝備 EJ-230 引擎)在超音速巡航狀態的空戰機動需求。這方面雖然 Su-35 只有“超音速性能令人滿意”等描述，但可估計其超音速過載性能與 EF-2000 在伯仲之間。

這項估計的依據是 Su-35 與 EF-2000 的縱向穩定性與升力負荷相當之故。

飛機的超音速過載性能通常不如次音速。這有兩個主因：(1)同一機翼在超音速的升力係數較次音速小(這是超音速時翼面上下氣流流速差較小而導致壓差較小之故)。(2)超音速時升力中心後退，使縱向穩定性增加，較不易拉攻角。據此可以推論，縱向穩定性較低(容易拉攻角)且升力負荷較小的飛機的超音速過載性能應當優於較穩定且翼負荷較高者，例如 F-22 相對於當代飛機便滿足此條件。

Su-35 與 EF-2000 縱向穩定性相當，可假

設其拉攻角能力相當。因此兩者的超音速過載性能高下可由升力負荷估計。考慮機身升力影響後，Su-35 與 EF-2000 等效翼負荷相當，也就是單位翼面積負擔的重量相當，然而由於 Su-35 的機翼升力係數應高於 EF-2000 者(掠角較小升力係數較高)，這就是說當兩者等效翼負荷一樣時 Su-35 的升力負荷其實較小，或是說即使 Su-35 的等效翼負荷大於 EF-2000，升力負荷也未必較大。由於目前數據不足，因此無法精確判定兩者優劣，只能大約估計兩者在伯仲之間。

2.3.2. 持續機動性能

超音速時，一般而言三角翼的零升波阻(不管怎樣飛都會有的波阻，與寄生阻力類似)、機動時升力衍生波阻(但只佔升力衍生阻力的小部分)均較低，是其優勢。然而此時摩擦阻力與非波誘導阻力仍佔相當比重，因此很難憑幾個簡單的參數就比出 Su-35 與 EF-2000 等的超音速阻力大小。只能大概知道：(1)馬赫數很高的平飛狀態，三角翼阻力應該較小。(2)馬赫數很低的高過載狀態，傳統機翼阻力可能比較小。至於“很高的馬赫數”是多少，不知；而“很低的馬赫數”的下限則是剛超過音速時，也就是約 1.3 馬赫。

雖然 Su-35 在超音速以後氣動效率可能難免要遜於 EF-2000 等，但其推進性能此時卻開始超越對手。優秀的進氣道在超音速時能讓推力較起飛時提高數十個百分比，燃油效率也比搭配設計不良的進氣道的動力系統高。

Su-35 的進氣道可調節、筆直，其氣動性能會比彎曲、不可調進氣道優秀^③。在 1.5 馬赫以上 Su-35 的推進系統優勢越來越明顯。

因此在一消(氣動力外型)一長(動力)的結果下，Su-35 的超音速持續運動性能與 EF-2000 等相比究竟如何至此實難以估計。

2.4. 結論

(1) 比起 Rafale：採傳統飛行方式時，Su-35 指向性應遜於 Rafale，而持續機動能力與過載性能應優於 Rafale。Su-35 可由過失速機動改善前者。即考慮過失速機動後，Su-35 的整體空戰機動能力應優於 Rafale。

(2) 比起 EF-2000：採傳統方式飛行時，Su-35 指向性應遜於 EF-2000，過載性能應該相當，而持續機動能力則難以判定。Su-35 可由過失速機動改善前者。

以上兩個簡結論雖然是狹義的比較特定飛機，但其實可推廣為 Su-35 的氣動佈局與鴨式佈局在不同推重比情況下的比較。第一項可用於推重比相當的 Su-35 與鴨式佈局飛機，例如 2006 年以後問世的 Su-37 低速空戰推重比便可能超過 1.4，與 EF-2000 相當，此時與 EF-2000 的比較便適用於此種狀況；而第二項可用於鴨式佈局飛機推重比較高的情況。

根據這樣簡單的比較，似乎可以說，歐美戰機中，僅有 F-22 與 EF-2000 能在飛行性能上壓制 Su-35，Rafale 與之則互有優劣，其他飛機則幾乎不是對手。有機動性還不夠，如果射控系統追不上那仍將喪失很多射擊機

註③ 這裡所謂可不可調指的是調整震波的發生來改變對來流的壓縮作用，EF-2000 下唇可動，但主要是用來增加進氣量，不是用來產生震波。



會，可能也就喪失生命，Su-35 的射控系統與自動飛行系統能容許他在各種機動條件下發射武器，因而定能發揮其纏鬥能力之極至。

結語

不知是必然亦或是偶然，就大方向看，歐陸新戰採用的鴨式佈局的確較傳統佈局更能吻合高速效率與纏鬥性能之要求，但採用傳統佈局的 Su-35 卻仗其舉升體機身、高升阻比、優異的進氣道等特性及過失速機動而抵銷差距。其氣動設計概念過時了嗎？也許。但至少其氣動性能並不過時。

如果真要找出 Su-35 在飛行性能上有什麼趕不上潮流的話，可能當推超音速巡航性能。

現階段 Su-35 採用的引擎不論從推力還是旁通比看，似乎都不滿足像 F-22 那樣的超音速巡航之需，因此即使擁有良好的進氣道，也無法衡量其是否具有不開後燃器長時間超音速飛行之能力，即使有，也難以衡量其優劣。但能知道的是，Su-35 的氣動設計賦予其超音速經濟巡航之潛力，加之以固有的優良超音速機動能力，使其增推改型在飛行性能上仍具有與 F-22、EF-2000 問鼎天下之可能。

作者簡介

楊政衛先生，筆名楊可夫斯基，為尖端科技專欄作家。



F-16 戰鬥機（照片提供：郭元宏）