

Su—35戰機匿蹤技術之研析

楊政衛

提 要

Su-35戰機繼承Su-27的外型，該外型曾被評論者諷刺為「最佳氣動力教材」與「最佳匿蹤反面教材」。由於「新一代戰機最重要的特性就是匿蹤」的概念已經深植人心到矯枉過正的程度，導致Su-35常被低估。事實上，除非匿蹤能力相對於探測等技術有代差（一如波斯灣戰爭時F-117A對上蘇聯防空雷達一般），否則匿蹤能力是必須與探測技術、武器性能、甚至敵我部署方式等混合考量的。

據Sukhoi前總經理Pogosyan在2003年計畫初期的說法，屬4++代的Su-35與Su-32之所以不同於4+代及其之前的機種，除航電的進步外，主要是隱形性能的考量¹。較新的資料(2007年)進一步指出，Su-35加強正面+60度內對X波段的匿蹤措施²。但Su-35外型與Su-27基本雷同，可說是完全無「形狀匿蹤」之考量。其最主要是透過表面工藝、吸波材料來降低機體、外掛之回波強度；靠塗層與材料技術降低座艙、天線、發動機噴嘴處之回波。其結果是正面雷達反射截面積(RCS)降到0.6~3平方米範圍，與MiG-21相當甚至更小。這雖然遠遠達不到「匿蹤」的標準，但自身電戰系統的有效性會大為增加，再加上Su-35的雷達探測距離是多數雷達的1.5~2倍，使得Su-35雖無法「隱形」，但在「先發現」與「自衛電戰效果」方面對絕大多數戰機具有優勢，對國軍現役戰機而言，其效果並不下於匿蹤戰機。

簡 史

在普遍認知裡，俄羅斯戰機的匿蹤技術比美國落後很多。最明顯的例子，是美國F-117、F-22都已用了稜稜角角的匿蹤外型時，與F-22對應的MFI與S-37在匿蹤技術上就

像改良型戰機，就匿蹤措施而言與美國存在代差。這是客觀事實，但這並不等於蘇聯人不知道匿蹤科技。事實上蘇聯在MFI計畫時就全面探索過匿蹤技術，衡量匿蹤技術的能與不能、以及蘇聯科技的能與不能、實際軍事需求、成本等因素後，規劃出了MFI的基

1 Andrei Formin, "Mikhail Pogosyan: consolidation efforts is our primary task", AirFleet 4.2003, p27 (Sukhoi公司總經理M. Pogosyan訪談)

2 Андрей Формин, «Су-35 в шаге от пятого поколения», Взлёт, №8-9, 2007, ст.44



對應美國ATF的蘇聯MFI(MiG 1.44)。其匿蹤設計顯然沒有F-22那麼徹底，技術因素固然是一回事，但也是各方面權衡的結果。至少相關研究院與廠商在這時起就已探索並分析各種匿蹤技術。(作者攝)

本設計。

從近年公開的資料來「事後諸葛亮」一番可以知道，發展MFI時蘇聯在匿蹤外型的計算能力、各項匿蹤細節的處理方面，都沒有美國那樣的基底，換言之對蘇聯而言要追上F-22的匿蹤科技有一定的時間與金錢成本，而且當時的匿蹤科技不只貴，通常也不好維護，不適合蘇聯國情。再加上蘇聯專家認為在現代防空體系下，把生存能力押寶在匿蹤是有風險的。因此MFI與S-37沒有採用F-22那樣的匿蹤設計，技術能力固然是一回事，但更多的原因在於整體衡量的結果，不然以當時軍備競賽的氛圍，專攻重點技術來獲得優勢並非不可。

蘇聯／俄羅斯第二中央研究院TsNII就長期為降低RCS進行論證並提出建議，也參與五代戰機MFI之隱形設計等。其建議的方案包括：S型進氣道、內彈艙等僅適用於新設計之隱形戰機之項目，以及機身表面工藝必須精美以減少接縫處之回波；表面儘可能大量



蘇霍伊公司在90年代初自費發展第五代戰機驗證機S-37(後稱Su-47)，其匿蹤措施包括固定形狀進氣口、大面積複合材料蒙皮、前掠翼等。從測試結果知道，如不在座艙蓋、天線罩等處下功夫，RCS無法低於0.3平方米。在這之後蘇霍伊公司出資與俄羅斯科學院合作，全面探索美式匿蹤技術。(Sukhoi)

應用吸波材料；天線、座艙處的遮蔽；進氣道內設置吸波網以遮蔽發動機；以及電漿隱形系統等³，這方案大致上是附加了電漿匿蹤系統的F-22，而其中除了S型進氣道、內彈艙等僅適用於新設計的飛機外，都適用於改良舊型戰機。

與現在Su-57與Su-35匿蹤技術最直接相關的，是蘇霍伊設計局約在1990年代末到2000年代初出資與俄羅斯科學院合作進行系統性的匿蹤技術開發。話說蘇霍設計局在1990年代初自費發展其第五代戰機方案，即S-37/Su-47前掠翼戰機。該機就引入匿蹤設計，包括固定幾何形狀進氣口、S型進氣道、內彈艙、複合材料蒙皮、前掠翼(就形狀而言前掠翼並非好的匿蹤外型，但他可以把機翼

3 Douglas Barrie, "Russian Low-Observable Technology Research Detailed", AW&ST(2003.8.10), 參考網址：
http://www.aviationnow.com/avnow/news/channel_awst_story.jsp?id=news/081103top.xml

回波反射到機身，用機身的吸波塗料再一次吸收之，因此曾被認為是好的匿蹤設計，例如美國AGM-129匿蹤巡弋飛彈就是用前掠翼)等，他於1997年9月25日首飛，在2000年前後就得到結論：只要座艙蓋、天線等細處不處理好，RCS不可能低於0.3平方米。約在這時俄國政府已在醞釀重新啟動第五戰機計畫，而蘇霍伊公司也就自費與俄羅斯科學院合作，系統性的開發美式匿蹤科技，這包括計算匿蹤外型的方法、天線等細微處的匿蹤措施等。這研究工作約從2000年開始，到2003年結案，除了理論研究外，也進行100小時地面試驗與30小時飛行試驗，並於2003年將成果發表在俄羅斯科學院期刊中⁴。值得注意的是，上述地面試驗與飛行試驗的改裝平台，正是Su-27M(老Su-35)的原型機。Su-27M的



T-10M-8於2001～2003年成為匿蹤技術地面試驗機，被停在戶外量測雷達反射信號，包括在發動機運轉狀態下。此一任務完成後於2006年成為第五代戰機控制系統的飛行試驗機。А.Н. Лагарьков, М.А. Погосян, «ФУНДАМЕНТАЛЬНЫЕ И ПРИКЛАДНЫЕ ПРОБЛЕМЫ СТЕЛС-ТЕХНОЛОГИЙ», ВЕСТНИК РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК, том 73, № 9, с. 848 (2003)

原型機T-10-8在2000年10月開始進行匿蹤改造，於2001～2003年進行100小時地面試驗。飛行試驗平台則是T-10-12，於2002～2003年進行30小時試驗。

目前對Su-35的匿蹤技術介紹得最基礎、最全面、也最權威、直接的資訊，就是前述由蘇霍伊公司出資進行的匿蹤技術研究成果。於2003年由蘇霍伊公司總經理Pogosyan與俄羅斯科學院所屬理論與應用電磁研究院(ITPE)科學家共同發表於俄羅斯科學院期刊。該文至今(2019年)已逾15年，實際使用的匿蹤措施與當年多少會有差異。以下以該文為基礎，搭配新資訊，一窺Su-35的匿蹤能力。

吸波材料

吸波材料是最直觀的匿蹤方式，也是各種匿蹤技術中進展最快的。吸波材料的性能、施工難易度、成本、耐久性等都與問世年份有顯著關係。

一、俄國至2003年的成果

2003年時俄國研究方向著眼於加入鐵磁性材料顆粒的吸波塗料，當時還提到要繼續研究鐵磁性顆粒的大小與吸波材料性能的關係，以及克服製造問題(如濃度較高時顆粒間的凝聚現象)等。在施工技術上，此時的塗料與80年代末90年代初的已大有不同，不僅可以視需要塗上不同厚度的塗層，塗層的電磁性質也具有顯著的非等向性：電磁性質

⁴ А.Н. Лагарьков, М.А. Погосян, «ФУНДАМЕНТАЛЬНЫЕ И ПРИКЛАДНЫЕ ПРОБЛЕМЫ СТЕЛС-ТЕХНОЛОГИЙ», ВЕСТНИК РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК, том 73, № 9, с. 848 (2003)

不僅可以依位置也可依厚度而變。這個年代的吸波塗料可將被覆蓋物的RCS降到原來的 $1/30 \sim 1/10$ (10~15dB)。

2003年至今已過了15年，在這不算短的時期中，材料性能與施工技術又有進展。

二、奈米塗料

在含鐵磁性吸收體的吸波塗料中，鐵磁性吸收體的尺寸通常必須在50~100微米，若要進一步縮小其顆粒尺寸，吸收能力就會變差，而當顆粒小於1微米時便已不具備需要的電磁性能。此外這類塗料中鐵磁性材料的重量必須占總重的20~50%(如果塗料主體是聚合物)，很重。為解決鐵磁性吸收材料過重的問題，可使用「含金屬奈米碳結構」(MFNS)，其主要是用到碳在縮小到奈米尺寸後會出現的磁性現象。一種由聖彼得堡科技大學開發的MFNS吸收材料於2007年前問世，其吸收體顆粒尺寸3~5nm以及10~15nm，在含3%金屬的情況下就擁有磁性以及對超高頻波(VHF)的吸收能力。添加這種物質的吸收塗層對0.8~10cm波段的吸收率為13~18dB，即可將回波降低至1.5~5%⁵。

除了前述聖彼得堡科技大學開發的材料外，2012年10月23~26日的國際安全展覽(Interpolitex2012)期間，為MiG-29與Su-27研製新一代電戰莢艙的CNIRTI發言人表示，「CNIRTI新研製的產品已準備好讓MiG與Su

戰機變成隱形」⁶。他們研製的是新型電戰系統以及奈米吸波塗料，其吸波塗料是基於不同長度的奈米碳管的吸波塗料，能大幅吸收雷達波，據指出不只能對雷達波隱形，對光電系統也有效果⁷。這種吸波塗料具有絲狀構造，尺寸在微米級與奈米級之間(視用途而定)，能以噴霧方式做為吸波塗層，或是在受防護物體周圍形成吸波雲，用於降低空中、陸上、太空物體以及船艦的雷達特徵⁸。

在匿蹤飛機上，吸波塗料主要有幾個應用領域：

1.機身、飛彈表面：這是很直覺的運用，直接將機身、飛彈造成的RCS降低；

2.進氣道、發動機風扇、噴嘴：與前項類似，唯用於降低動力系統的RCS，在熱安定性、應力忍受能力、黏著可靠性有較嚴格的需求；

3.縫隙填充、天線艙：天線罩會透波，因此雷達可以「看見」天線罩內部的結構，也就是天線本身以及天線艙，這時就可以用吸波塗料來加以吸收，這也有助於減少不同天線之間的干擾。而表面縫隙也是造成迴波的原因，在這填充吸波材料也是一種匿蹤方法。

須注意的是，對於Su-27這樣的雙發傳統戰機而言，正面RCS有60%由進氣道與發動機前端結構所貢獻⁹，剩下的40%又有絕大

5 А.Г.Алексеев, Е.А.Штагер, С.В. Корырев, «Физические основы технологии Stealth», Санкт-Петербург, ВВМ, 2007, p.147

6 «"МиГи" и "Су" могут стать невидимками», Независимое военное обозрение, 12.NOV.2012

7 «"МиГи" и "Су" могут стать невидимками», Независимое военное обозрение, 12.NOV.2012

8 «РЭБ: вчера, сегодня, завтра», Военно-промышленный курьер №33(501), 28.AUG.2013

多數由雷達天線貢獻。這意味著，不管在機身、飛彈上用了多強大的塗料，只要不在動力系統與天線的隱匿上下功夫，匿蹤能力有提升就跟沒提升一樣。而Su-35就是由這兩者都下手來降低其被偵測率。

動力系統的匿蹤處理

Su-27的正面RCS中，進氣道與發動機風扇貢獻了60%以上¹⁰。這是因為其進氣道筆直，雷達波可以輕易地直達發動機風扇，造成反射，一部分直接沿著筆直進氣道返回入射方向，另一部分被反射到進氣道壁，輾轉反射後離開進氣道，也是往飛機前半球跑，因此RCS相當大。後半球也類似，雷達波直接照射到噴嘴、後燃器、渦輪，因此後半球過半的RCS也是由發動機所貢獻。

因此只要不對進氣道與發動機做匿蹤處理，其他的做再多也是枉然，反之，則雖不中亦不遠矣。

Su-35從2000年代初發展至今出現過多個動力系統匿蹤方案，這些方案自然會因時代推移而有取捨，以下先做個總覽。

一、2003年已實現的處理措施

最直覺的匿蹤處理方式，就是用吸波塗料。至2003年已開發出用於進氣道、風扇、噴嘴的吸波塗料並進行飛行試驗。用於這些

部位的塗料比起機身上的塗料，在性能與可靠性上要求更嚴格。例如用在風扇的塗料必須忍受較高的溫度與頻繁的機械震動，又必須夠薄才不會影響氣動效率，此外風扇與進氣道壁的吸波塗料必須牢固，因為若脫落就可能引發發動機事故。¹¹而用於噴嘴的塗料需要忍受的溫度與應力又更為極端。

前半球：進氣道與風扇的處理

風扇的吸波塗料直接減少迴波強度，而進氣道壁的塗料則將來自風扇的迴波進一步多次吸收(因為這一部分的波會在進氣道壁輾轉反射)。

至2003年，ITPE的方案是在進氣道壁及



2007年展出的AL-41F1-S發動機入口特寫。當雷達波由正面入射時，在轉子前端整流罩、第一級定子葉片前緣、第一級風扇前緣會直接反射回原方向，剩下的波有一部分進入發動機內，一部分經由進氣道壁輾轉反射，另有一部分打在轉子前端整流罩而直接返回原方向。(作者攝)

9 «Многофункциональный самолет с пониженной радиолокационной заметностью», RU patent, RU2502643 C2, 27.DEC.2013

10 «Многофункциональный самолет с пониженной радиолокационной заметностью», RU patent, RU2502643 C2, 27.DEC.2013

11 А.Н. Лагарьков, М.А. Погосян, «ФУНДАМЕНТАЛЬНЫЕ И ПРИКЛАДНЫЕ ПРОБЛЕМЫ СТЕЛС-ТЕХНОЛОГИЙ», ВЕСТНИК РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК, том 73, № 9, с. 848 (2003)

第一級風扇處使用吸波塗料，其塗料不能影響該處的氣動與機械性能，且必須忍受攝氏200度高溫。ITPE開發了新的材料，能以機器噴塗，在進氣道壁塗層厚0.7~1.4mm，在風扇塗層厚0.5mm。使用這種技術能使進氣道的RCS縮小至原來的約1/30~1/10(10~15dB)¹²。

後半球：噴嘴

全新飛機可以設計特殊噴嘴來匿蹤，但改良型飛機最簡單的匿蹤方法當然是吸波塗料。用於噴嘴的吸波塗料需忍受高達攝氏1,200度的高溫以及極端的應力，除此之外其電磁性能必須在攝氏600~1,200度的龐大溫度區間保持恆定。至2003年，ITPE採用電弧電漿熔出非導體、金屬、半導體的微粒後再鍍上噴嘴。這種方法製做的多層鍍膜至2003年已在T-10M試驗機上進行過數種模式下的

飛行試驗。

一般而言，匿蹤塗料是由「工作物質」與「黏著劑」構成。其中工作物質就是用來吸收或散射雷達波的物質，如半導體、磁性材料等，但工作物質並不總是能附著在表面，所以要將之溶在黏著劑內，以漆上表面。匿蹤塗料的性能通常由「工作物質本身的性質」、「工作物質的顆粒大小與波長的比例」(以下簡稱顆粒-波長比)、以及「工作物質顆粒間距與波長的比例」(以下簡稱間距-波長比)決定。當間距-波長比 $\gg 1$ 時，雷達波較不被影響；當間距-波長比 $\ll 1$ 時，對雷達波而言就相當於連續介質(而實際上是分散的顆粒)；而當間距與波長相當時，雷達在塗層內除了會被吸收外，還會經歷特殊的干涉過程。

正由於工作物質實際上是分散的顆粒，



發動機的構造相當精密，為了提高氣動效率，高性能發動機的轉子葉片與機殼邊緣的間隙必須盡可能小。因此風扇葉片使用的吸波塗料就不能太厚，此外塗料也必須忍受高溫與劇烈震動，並不簡單。圖為AL-31FP的低壓壓縮機結構剖視。(作者攝)



Su-35的發動機內部噴嘴特寫。後燃器、渦輪葉片等結構直接暴露，是很強的雷達反射源與熱源。用在這裡的吸波塗料必須忍受極端的溫度與應力。(作者攝)

¹²"Stealth design SU-35 aircraft Hostile radar range cut on Su-35s", INTERNATIONAL DEFENSE REVIEW,2004.1.1,參考網址：<http://www.fighter-planes.com/stealth2.htm>

因此理論上如果能在黏著劑中混合不同功能的顆粒，那麼一種塗料就可以同時針對多個波段隱形，然而實際上這一點都不容易。溶在黏著劑中的工作物質不一定會乖乖的均勻分布，他們會有同類凝結的趨勢，這可能導致有的地方顆粒小，有的地方顆粒大的現象，而顆粒大小偏偏又會影響與電磁波的交互作用。此外，要讓不同性質的工作物質溶解在相同的黏著劑裡也未必簡單。

電漿製程是解決上述問題的有效方法之一。其一般是用電弧把工作物質氣化並解離，然後在電場加速下轟擊物體表面，將那些工作物質沉積在物體表面甚至植入內部。這種製造過程的顆粒大小與分佈都是很均勻的，而且也可以更容易的把多種工作物質鍍在表面上(因為這等於是把工作物質直接打在表面上，不需要考慮工作物質與黏著劑的溶解問題)，甚至可以輕易的控制鍍層的厚度。此外這種鍍層相對牢固不易脫落，也由於工作物質本身就經歷了電弧電漿的高溫而仍很安定，因此能以這種方式製作的鍍層性能較不會被高溫所破壞，故能用於發動機噴嘴。

不過在電弧的作用下被氣化的工作物質大都會被分解成小顆粒，小到幾乎都是原子的型態，因此對於需要大顆粒(原子團、分子、分子團)的鍍層，就不一定可以用電漿製程來製造。此外，電漿製程通常要在高度真空下進行，也就是要在真空腔室內製造，因

此無法為太大的物體鍍膜。例如為戰機座艙蓋鍍膜的真空腔室已經算是相當大了，但其大小卻無法為大塊蒙皮鍍膜。因此至少就現階段而言，電漿製程只能為急需的局部進行鍍膜。例如發動機噴嘴零件就屬於小物件，故能運用電漿製程。

二、一度傳出的措施：遮罩

2003年到Su-35首飛(2008)有5年時間差，到開始生產(2011)則有7年，實際運用的匿蹤措施不可能一成不變。還可以如何改進？一種可以進一步提升匿蹤能力的設計，是一度盛傳在進氣道與噴嘴內要用遮罩。遮罩的好處，是可以讓雷達只「看到」遮罩，遮罩的RCS可以輕易設計得比發動機結構小很多，由此降低可視度。此外用了遮罩後，發動機本身就不必改造，當然也不必在風扇處使用吸波塗料，因此可靠度很高。

參考雅克列夫設局的相關專利，在噴嘴使用雷達遮罩時，可將RCS降為原來的1/100，且僅損失1%推力¹³。然而在實際展出的以及服役的Su-35照片中，從後方都可以直接看到後燃器結構，並沒有用遮罩。

此外由蘇霍伊公司與留里卡設計局的多種匿蹤相關專利來看，雙方的設計師都認為傳統的遮罩方案會破壞氣動效率，故都加以改進。蘇霍伊公司有為Su-57設計遮罩，但該遮罩與Su-57的進氣道搭配，能兼顧筆直進氣道的氣動特性，又有S型進氣道的匿蹤效果，

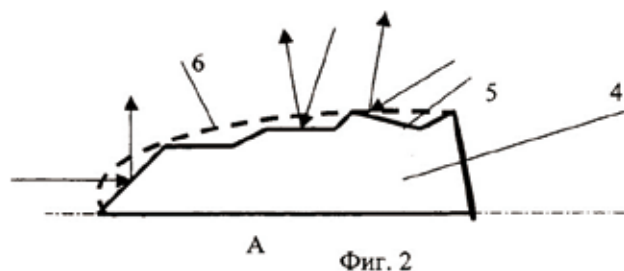
13 «ЛЕТАТЕЛЬНЫЙ АППАРАТ С УМЕНЬШЕНИЕМ ЗАМЕТНОСТИ СИЛОВОЙ УСТАНОВКИ В РАДИОЛОКАЦИОННОМ, ИНФРАКРАСНОМ, АКУСТИЧЕСКОМ ДИАПАЗОНАХ ДЛИН ВОЛН И ИЗМЕНЕНИЕМ ВЕКТОРА ТЯГИ», RU patent 2003, RU2215670C1

但如果用在Su-35的筆直進氣道上，就沒有效果。留里卡設計局甚至專門針對筆直進氣道提出對應的匿蹤設計，而時間點正是發展Su-35的期間。

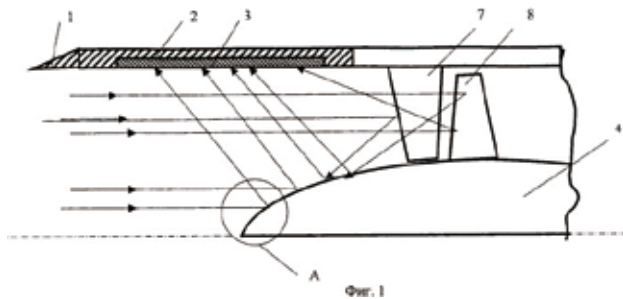
可見俄國設計師的設計哲學，是在保有筆直進氣道的效率的前提下，提升匿蹤性，而不像美式匿蹤技術一樣匿蹤優先。

三、留里卡設計局的匿蹤設計

前面提到的在進氣道壁與風扇運用吸波塗料，是蘇霍伊公司與ITPE至2003年的研究成果。但另一方面，為Su-35提供發動機的留里卡設計局也有自己的相關技術，其在蘇



留里卡設計局的匿蹤設計：發動機軸承前端的整流罩為透波(虛線部分)，內部結構(實線部分)則有特殊角度設計，能將雷達波往特定方向反射。RU2479819



留里卡匿蹤設計的效果：除了風扇葉片前緣無可避免有正向回波外，雷達波會輾轉彈到吸收區而被吸收。RU2479819

聯時代為MFI研製AL-41F發動機時，就已介入MFI的匿蹤探索。在Su-57的「產品30」發動機的分工規畫中，留里卡設計局負責的除了核心機的研製與全機整合外，就是匿蹤處理。而且從實際展出的樣品看來，留里卡的方案應該才是最終方案。因此有必要看一下其做到什麼程度。

在進氣道壁、發動機入口等靜態部件下手的匿蹤設計

留里卡設計局提出一種專門用來提升筆直進氣道的匿蹤性的巧妙設計¹⁴。從專利內容來看，其發動機軸承前端的整流罩用透波材料製造，整流罩內所包覆的結構則有特殊設計的幾何形狀，可以將來自正面的雷達波、以及從葉片多次反射出來的波集中反射到進氣道壁的特定區域，在那有吸波塗料將之吸收。這樣一來，除了發動機入口導向葉片、第一級風扇葉片前緣、以及整流罩頂端無可避免有正向回波外，雷達波會輾轉彈到進氣道壁的吸收區而被吸收。用這種作法，吸波材料可以只用在進氣道壁的局部(因為波會被集中反射到特定局部而非整個進氣道壁)，這裡的塗料不須負擔應力，也不用顧慮發動機葉片間隙，因此可以用厚一點，這樣不論吸收能力還是可靠性都會很好，而且絲毫不損氣動效率。

實際觀察佐證

從歷年航展展出的AL-41F1-S發動機的細節便可看出發動機入口處的結構與材料確實

14 "Защитная маскирующая система для летательного аппарата, подвергающегося радиолокационному облучению", RU patent, 2479819

朝著匿蹤在演進。而且最終的「吸收區」不只是在進氣道壁，而是包括整個發動機入口結構。

2007年莫斯科航展展出的AL-41F1-S轉子前端整流罩的形狀是典型的，像是圓柱頂端蓋上半球面狀的蓋子，其前緣為球面，側面則為圓柱面(即與轉軸平行)，且整個入口構造(含轉子整流罩、第一級導向葉片、入口外殼)都是金屬製。對於這樣的整流罩構型，當雷達波由正面入射時，在整流罩頂端會發生正向反射，其餘的則會往進氣道壁散開，這些波本來會經由進氣道壁輾轉反射出去，但在進氣道壁有吸波塗料的情況下，這部分波會被吸收殆盡，只剩下頂點的正向反射回波。而當雷達波由整流罩後方的葉片反射到這個整流罩側面時，便有機會被反射到進氣道外。因此這個2007年版的117S發動機的入口設計搭配進氣道壁的吸波塗料時，如上所述的整流罩頂點回波以及部分葉片回波無法被吸收。

2009年莫斯科航展展出的117S便已有

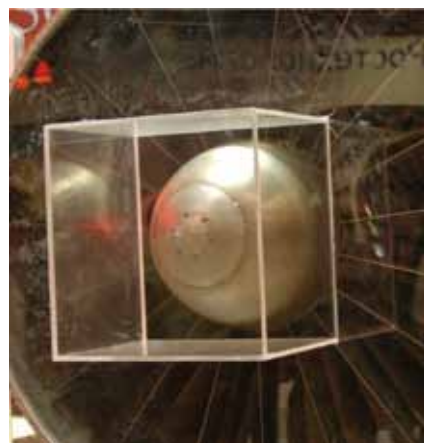


MAKS2007展出的117S的入口結構特寫。轉子整流罩側壁為圓柱狀，頂面為球面，且整個入口結構都是金屬。(作者攝)



MAKS2009展出的117S的入口結構特寫。轉子整流罩頂面仍為球面，但側壁分為前後兩段，分別朝不同方向傾斜，能將來自前方與後方的雷達波往進氣道方向反射。(作者攝)

不同，轉子整流罩外型約是兩個底座相連的圓錐，其中一個圓錐頂端改成球面。就雷達匿蹤的眼光看，當雷達波由正面入射時，其頂端仍是球面，會發生正向反射，但大部分側壁為圓錐面，可以將雷達波更集中反射到特定區域(即吸收區可以更小，節省吸波材料)。而當葉片回波由後方打在整流罩時，



MAKS2011展出的117S的入口結構特寫。轉子整流罩回到半球型的典型設計，但後段色澤與前段不同，無金屬光澤，可能是用了透波材料或吸波塗料。(作者攝)

會打在整流罩的後段，那是另一面圓錐面，可將波反射回發動機內或進氣道壁，不會離開進氣道。這樣的設計可以直接用金屬整流罩，構造簡單，但仍無法避免整流罩頂端的正向回波。此外，這樣的整流罩較不流線，多少會影響氣動效率。

2011年展出的117S的轉子整流罩的構型又回到2007年的樣貌，但其圓柱狀側壁無金屬色澤，應該是透波材料或是金屬材料附上吸波塗料。這樣就能避免或減少葉片回波被轉子整流罩反射出進氣道外，但仍無法避免整流罩頂端正向回波。

2013年展出的117S的入口結構則有全新樣貌。其轉子整流罩整體而言是傳統的半球面，但頂端則為尖錐狀，這樣就能減少頂端的正向反射。此外，包含轉子整流罩、入口導向葉片、入口外殼在內的入口結構，全都是藍灰色的，應該是用了複合材料或吸波塗



MAKS2013展出的117S的入口結構已有顯著變化。轉子整流罩頂端為尖錐型，且整流罩、導向葉片、入口外殼都是藍灰色，應是用了複合材料或吸波塗料。(Patti Ho)

料。事實上老早有傳聞指出俄國發動機廠商要用複合材料製造入口結構，甚至風扇。

2015年展出的117S入口結構與2013年已無變化，可見應已定型。這次進一步展出剖視結構。從中可見轉子整流罩內確實有雙層結構，其內層也確實是較利於匿蹤的圓錐面。此外也可看出這些藍灰色的構造的斷面有些有金屬光澤，故可能並非全是非金屬，而可能是金屬附上塗料所致。

在2013與2015年版的設計下，不只是進氣道壁，連發動機入口外殼、第一級導向葉片、轉子整流罩都納入「吸收區」，對多次反射的波吸收的更徹底，雖無可避免整流罩頂點與導向葉片前緣會有正向回波，但可由複合材料或吸波塗料吸收之。

此外要注意的是，即使到了2013與2015的展出版本中，風扇仍有閃亮的金屬光澤，看不出有運用塗料的跡象。

從上述展出品的演進可看出，Su-35確實有採用藉由進氣道壁、發動機入口靜態結構(入口外殼與導向葉片)、以及轉子整流罩之特殊處理來提升匿蹤性的設計。這種設計的巧妙之處在於塗料不必用在風扇葉片這種高度動態、有嚴格間隙要求、又須承受劇烈震動與應力的部件，可靠性較高。

詳細原理與效果評估

說到這，一定有人還是用看圖比一比的方式，認為進氣道還是直的，匿蹤效果就一定不好。要知道這種措施的效果如何，就要先進一步了解進氣道的RCS是來自哪裡。

介紹匿蹤技術的文獻一般都簡單的說筆直的進氣道會直接反射回波，所以RCS很



MAKS2015展出的剖視結構。從中可見轉子整流罩內有雙層結構。且斷面有部分有金屬光澤，故未必全是複合材料，也可能是金屬附上吸波塗料所致。
(<http://trainsimpack.ucoz.ru/photo/aviacija/7>)

大。雖然結果是這樣，但真實機制遠沒那麼簡單。當雷達波從進氣道直直地打進去時，回波產生機制如下：

1.轉子頂端以及導向葉片前緣會發生正向反射。

2.第一級風扇葉片也會直接被照射到，但葉片是有角度的，這會讓雷達波在風扇結構反射來反射去，有一些往裡面鑽，就不會構成回波，有一些則往回彈，但很難剛好跟進氣道平行，他們通常打到進氣道壁與風扇轉子整流罩，大部分輾轉反射後離開進氣道，小部分反射一次就直接離開進氣道。

3.承上，第一級風扇葉片雖有角度，但前緣會發生繞射。繞射波並不遵守反射定律，而是以葉片前緣為線波源擴散出去。這擴散出去的波有一小部分直接離開進氣道，相當於正向回波，而大部分則與前項所述般，在發動機、進氣道壁輾轉反射。

4.類似地，轉子前緣整流罩的回波有些也會往進氣道壁彈，在進氣道壁輾轉反射。

如果進氣道壁與入口結構是全金屬的，

沒有吸波能力，那麼上述各種回波最終離開進氣道，也就是回到敵方雷達方向。這時風扇葉片、導向葉片、進氣道壁、轉子前緣都會「貢獻RCS」。這種複雜腔體的RCS有時還比幾何截面積更大。因此說「雷達可以直接看到葉片」大致上是對的。但那主要是複雜腔體多次反射結果，並非由雷達波「直進直出」而成。

用了上述留里卡設計局的設計，就可以將那些「無法一次反射就離開進氣道的回波」吸收殆盡，這樣一來筆直進氣道與發動機在正面的RCS就會侷限在風扇葉片前緣繞射、導向葉片前緣正反射、轉子整流罩頂端正反射這三個一次性的回波。

其中，117S發動機的尖錐狀整流罩頂端正向回波可以忽略；風扇葉片前緣繞射波少部分會直接離開進氣道而相當於正向回波，大部分會四處擴散而進入「吸收區」被吸收，因此整體效果還是相當於用了吸波塗料；導向葉片前緣會正反射，但117S發動機用了複合材料或吸波塗料，就可以減少回波強度。因此整體而言，採用這種匿蹤設計的正面RCS，會類似在導向葉片與第一級葉片運用吸波塗料的成果。

導向葉片與風扇葉片前緣幾乎沒有掠角，故不考慮吸波的情況下這部分的RCS的量級約是「前緣總長度*雷達波長」。117S發動機的導向葉片與風扇葉片前緣總長約20m，所以乘以3cm的波長，則「先天RCS」的量級約是0.6平方米。兩個進氣道就是1.2平方米。假設吸波塗料使RCS減少90%，則進氣道RCS就能進一步降低至0.1平方米級。

當然實際上像發動機風扇那麼複雜的構造的RCS不可能那麼簡單，例如來自正面的雷達實際上還有機會照到其他級葉片，因此上述「前緣總長」應不只20m，因此進氣道與發動機正面RCS應修正成0.x~1平方米級，比原來小1~2個量級，這結果應與2003年時ITPE在風扇與進氣道用吸波塗料的成果同級。

事實上，留里卡這種設計的原理與美國的匿蹤遮罩有部分類似。美國F/A-18E/F所用的遮罩的構型類似風扇，只是考慮了匿蹤外型又具有吸波能力。當雷達波通過筆直進氣道打在遮罩上時，大部分的波會被反射進遮罩內部通道內，而在前緣一樣會有繞射，這與打到風扇葉片的機制相同。此外每次照射到遮罩就會被吸收一次，這與在靜態部件建立吸收區相似。差別在於遮罩有考慮匿蹤設計，因此雷達波無法照射到遮罩後端的構造(而沒有遮罩時，卻可以照射到不只一級風扇)，且一旦進入遮罩通道就不會跑出來，而邊緣也可以用形狀設計減少繞射強度。而且用遮罩以後，發動機本身也不需做任何修改，不會有葉片吸波塗料衍生的可靠性疑慮。

可見留里卡的匿蹤設計與美式遮罩有類似的效果，只是在匿蹤能力上美式遮罩更好，動力效率上留里卡的更好。畢竟美俄的設計哲學並沒有完全相同。

留里卡設計局的吸波塗料

留里卡設計局自己也開發吸波塗料與

施工方法。在提出前述進氣道匿蹤方案的同時，留里卡設計局也開發新的吸波塗料^{15,16}。塗料的工作溫度範圍攝氏-40~+65度，厚度1.5mm(與之對比，2003年時蘇霍伊與ITPE發表的方案中，進氣道壁的塗層厚0.7~1.4mm)，從設計厚度與溫度範圍來看，顯然不是用於風扇葉片等動態部件的，而應是用在進氣道壁等靜態部件。

這些材料的工作物質為尺寸若干到數十微米的陶瓷、鐵磁、碳基鐵顆粒、以及10~200nm的碳管之混合物，在很廣的頻率範圍保有很大的吸收能力，1.5mm厚度時對8~20GHz的吸收能力都在10dB以上(即RCS降至原來的1/10以下)。有的配方對8.5~18GHz的吸收能力甚至在15dB以上，最大達30dB(即RCS降至1/30~1/1000)。須注意的是這一頻率範圍涵蓋了所有X波段探測雷達(包括主動陣列雷達)以及雷達導引空對空飛彈的工作頻率。

通常打到進氣道壁的雷達波不會直接離開進氣道，而會多次反射，用上這種強大的吸波塗料，可望排除直接(進氣道壁自己的回波)或間接(發動機結構回波經由進氣道壁反射)由進氣道壁所造成的RCS。

四、進氣道匿蹤結論

至此，至今出現過的Su-35會用到的進氣道匿蹤方案有2003年時蘇霍伊公司與ITPE發表的成果，以及留里卡設計局的方案。兩種方案並不完全相同但又不衝突，因此最終方

15 "антирадарный материал", RU patent 2470425, 20.DEC.2012

16 "радиопоглощающий материал", RU patent 2482149, 20.MAY.2013

案可能是兩者的混合或折衷。以下列舉若干可能性並淺析其優劣性：

1.維持2003年的方案：僅靠塗料，在2003年時進氣道的RCS降低至原來的1/30～1/10。但由歷年展出的117S樣品看來，風扇都還沒有用塗料的跡象。

2.用留里卡設計局的筆直進氣道匿蹤方案與在靜態部件(進氣道壁、導向葉片等)用吸波塗料，風扇則用ITPE於2003年發表的塗料。同樣的，由歷年展出的117S樣品看來，風扇都還沒有用塗料的跡象。

3.用留里卡設計局的筆直進氣道匿蹤方案與塗料，風扇葉片不用塗料。這一方案風扇處可以不必使用吸波塗料，氣動特性最好，可靠性也最高。由實際展出品看來這一方案應是最終方案。

如前所述，留里卡的匿蹤方案與美國F/A-18E/F的遮罩方案的原理基本上相同，只是由於具體做法不同，使兩者分別向動力效率與匿蹤靠攏，這是設計思想不同，不能說誰對誰錯。共通的優點是，可以讓具有筆直進氣道的傳統戰機的正面RCS大幅降低，並且都不須在風扇等動態部件運用吸波塗料，可靠性都很高。

座艙罩

座艙內的構造是相當大的反射源，而座艙本身結構也像進氣道一樣屬於不利於匿蹤的複雜腔體，因此為了匿蹤，座艙蓋要能阻擋雷達波進入，方法是在座艙蓋材料內添加

金屬使得以反射雷達波。至2003年，ITPE已採用電漿製程製造出由金屬薄膜與聚合物層交替構成的座艙蓋：以電漿化學沉積法製作聚合物艙蓋主體，以電漿磁控濺鍍上金屬薄膜，重複此一步驟而造出多層結構。較新的俄式戰機如Su-35、MiG-35、MiG-29K的座艙蓋便顯得「五彩繽紛」而非過去的全透明，應是應用了這種加工技術的結果。

不妨參考T-50的數據來一窺這種新型座艙蓋的匿蹤效果。2012年3月23日，俄媒刊登匿蹤座艙蓋製造商NPP Technology總設計師V. Vikulin對T-50座艙蓋匿蹤鍍膜的介紹。他指出T-50座艙蓋的金屬鍍膜將是黃金、銦、錫的混合物。每層膜厚約20nm，總膜厚約90nm，可將座艙電子設備的輻射外洩降低250倍¹⁷。4月12日，NPP Technology旗下負責生產玻璃材料的Steklo公司經理V. Temnuh進一步指出，金屬鍍層是鍍在座艙蓋的內面，總膜厚約80奈米(之前總設計師說是90奈米)，能減少40%的日照熱量，30%輻射，至



MiG-35的風擋與艙蓋的色澤不同，就是用了特殊鍍層所致。在Su-35、MiG-35、MiG-29K上都可以看到類似的非透明無色的艙蓋與風擋。(作者攝)

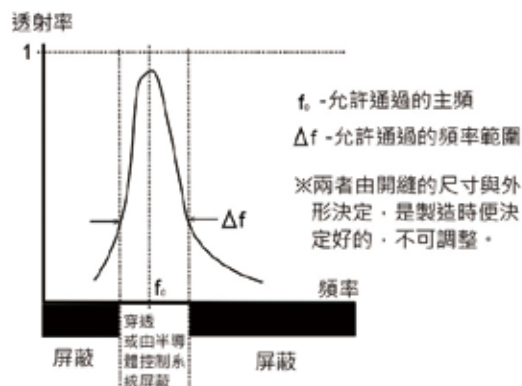
17 «Для самолета пятого поколения сделали позолоченное стекло», Известия, 23.MAR.2012

於座艙內電子設備的無線電外洩則減少250倍，雷達反射信號減少30%，透光率不小於70%¹⁸。總設計師表示，這種複合鍍膜除了可以降低雷達訊號之外，也能阻止紅外線與紫外線，其中紫外線會導致塑膠材料的劣化而有潛在危險，他舉例說2010年印度就曾因為座椅安全帶劣化而失去固定能力，導致飛行員彈射後喪生。¹⁹

2019年1月Rostex又發布了座艙蓋塗層的相關消息，在雷達匿蹤方面與舊數據大致相同，包括金屬氧化層膜厚70~90奈米(以前有80與90奈米之說)，雷達特徵減少30%。而在抗熱輻射與紫外線方面成長頗大，新數據中太陽熱輻射減少3倍(變為1/3)，紫外線減少4~6倍，透光率不小於65%則比舊數據(70%)略少，可能是強化抗紅外線與紫外線的緣故。報導並指出，這種鍍層已經用在Su-57、Su-30、Su-34、Su-35、MiG-29K以及Tu-160²⁰。

天線罩

天線是很理想的反射面，再加上共振、增益等效果，其RCS往往會比幾何截面積大得多。特別是主雷達天線幾何截面積有1平方米級，RCS就會是若干平方米。若像傳統戰機般使用透波天線罩，則單單天線的反射就會讓其他的匿蹤處理變得毫無意義。為了匿蹤，必須要有具備選頻能力的天線罩，只能



開縫選頻罩運作機制示意：只允許很窄的頻率範圍通過，其他都被屏蔽。(作者製)

讓特定頻率的波通過。

俄國在開發雷達天線遮蔽技術時，也考慮到給改良型戰機使用，故其並非開發全新的天線罩科技，而是在傳統的全透波天線罩內動手腳。至2003年，ITPE探索了三種主要的方案：能用紫外光控制透波與否的光控半導體薄膜、開縫選頻罩、以及電漿選頻罩，最後確立的是電漿選頻罩。

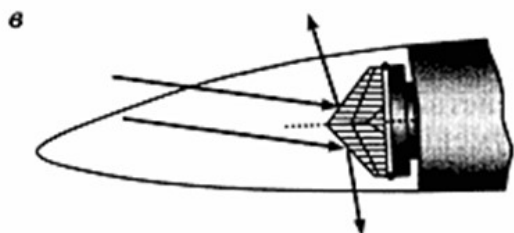
一、開縫選頻罩

開縫選頻罩是最「傳統」的選頻技術。他是在遮罩上依固定間隔佈置特定尺寸與形狀的縫隙，這些縫隙相當於共振腔，使得只有特定頻率附近很窄範圍內的波可以穿透，其餘的則被反射。必要時這種遮罩可以搭配可控的半導體系統，以達到完全的遮蔽。在俄國的方案中，由於考慮舊戰機改良方案，因此這種遮罩並不是做成雷達罩，而是額外做在雷達天線與雷達罩之間，並且設計成匿

18 «В России создано защищающее от радиации покрытие стекла», Lenta.ru, 12.APR.2012

19 «Для самолета пятого поколения сделали позолоченное стекло», Известия, 23.MAR.2012

20 " Новое стелс-покрытие для кабин самолётов разработано "Ростехом" ", Военное обозрение, 11.JAN.2019, https://vpk.name/news/240550_novoe_stelspokryitie_dlya_kabin_samoltov_razrabotano_rostehom.html



俄國發展選頻遮罩時，考慮要相容於舊戰機改良，因此並不是做「選頻天線罩」，而是在天線罩與天線之間安置遮罩。圖為反射式遮罩示意圖，其運作原理是有匿蹤外型(例如圓錐形)的遮罩將被屏蔽的波反射掉，遮罩的RCS設計得比天線小，據此達到隱匿效果。這種遮罩可以是開縫遮罩，或是反射型電漿遮罩。另一種電漿遮罩是吸收型，讓電磁波進入遮罩後，由遮罩內的電漿吸收之。А.Н. Лагарьков, М.А. Погосян, «ФУНДАМЕНТАЛЬНЫЕ И ПРИКЛАДНЫЕ ПРОБЛЕМЫ СТЕЛС-ТЕХНОЛОГИЙ», ВЕСТНИК РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК, том 73, № 9, с. 848 (2003)

蹤外型，將被隔絕的波反射到遠離接收機的方向。

這種遮罩的優點是構造簡單，但顯而易見的缺點是透過的頻率範圍很窄，不適用於工作頻率範圍很大的天線。例如電戰天線、主動陣列天線的特點就是頻率範圍很廣，用這種窄頻遮罩當然會限制性能。

二、電漿選頻罩

俄國選頻罩的最終方案是電漿遮罩。他是一個密封的透波容器，容器內部有特定成分的氣體，可用電子束激發形成低溫電漿。這個遮罩可以位在天線與天線罩之間，或是乾脆包覆天線。當電漿遮罩不啟動時，電磁波不受任何影響，而當電漿遮罩啟動後，可以讓雷達波在遮罩表面就反射，或是進入遮

罩，在電漿內部吸收掉。遮罩的啟動時間在數十奈秒到1毫秒，關閉時間數十微秒到1秒，反應速度由氣體成分決定²¹。這種技術由於是在封閉環境產生電漿，所以電漿性質可控性較高，能依據性能需求選擇適當的氣體成分與反應速度，而且耗電少、沒有使用高度的問題。

電漿遮罩在啟動時，依設計思想不同而有「反射」與「吸收」兩種機制。第一種是「反射」機制，也就是頻率低於電漿頻率的雷達波會被反射，高於電漿頻率的波則不受影響。使用這種方案時，低於電漿頻率的雷達波檢測到的就不是天線而是遮罩。這種機制的遮罩要採用匿蹤外型，例如圓錐形，這樣RCS就比天線小很多。例如雷達自己工作在10GHz，則可以讓電漿頻率略小於10GHz，這樣10GHz以下的波看到的就不是天線而是錐形遮罩，RCS較小；而10GHz以上的波則不受影響。

另一種是「吸收」機制，與反射機制類似的是，頻率低於電漿頻率的電磁波會被反射，高於電漿頻率的電磁波則進入電漿，不同的是，吸收型電漿可以吸收進入電漿的電磁波。

反射型與吸收型遮罩都是用電漿頻率來決定是否允許電磁波通過，但對於進入電漿的電磁波，前者不吸收，後者吸收。這一差異是由電漿內的碰撞頻率所致，這與開關反應時間一樣由氣體成分所決定，也就是在遮

21 "Способ снижения радиолокационной заметности объекта, оборудованного, по меньшей мере, одной антенной", RU patent 2469447, 10.DEC.2012

罩製造時就決定好(換言之是反射型還是吸收型，是製造時決定好，不能改變的)。至於所針對的頻率則由激發電漿的電子束參數所決定，能自由控制。

反射型電漿遮罩至2003年已搭配Bars雷達進行飛行試驗^{22,23}，相當有效。然而在電漿遮罩的專利說明中便提到，雖然可視需要設計成反射型與吸收型遮罩，但考慮到未來空戰環境會有多基雷達，因此建議使用吸收型遮罩²⁴。另外在蘇霍伊公司一份戰機系統整合的專利說明書上，也提到「介於天線與雷達罩之間，可受控制變成具有吸波能力的頻率選擇遮罩」²⁵。上述提到吸收型遮罩的專利，都是2010年代出現的，可見實際使用的遮罩已非2003年測試的反射型，而是吸收型。

三、開縫選頻與電漿選頻的主要差異

在此簡單比較一下電漿選頻罩與開縫選頻罩。開縫選頻罩僅允許自己的工作頻率附近的雷達波通過，而且允許通過的頻寬可以做得很窄，因此除非敵方雷達波工作頻率剛好與我方相同，否則就會被隔絕。允許通過的主頻與頻寬由縫隙的尺寸與形狀決定，且是雷達罩製造時便決定的。允許通過的頻寬做得越窄，遮罩效果當然越好，但另一方面也表示我方的雷達也只能工作在很窄的頻率區間，這等於限制自己雷達的性能，對於具

備充當電戰系統的主動相位陣列雷達而言這更是不理想。

電漿遮罩則可以根據開關與否決定要完全透明還是要選頻，且所針對的頻率是自由調控的。在選用部分遮蔽型電漿遮罩時，若敵方雷達操作頻率大於我方，電漿遮罩效果有限或無效，而相較之下，開縫遮罩此時仍有效。選用完全遮蔽型電漿遮罩時，敵我雷達都被遮蔽。上述問題看似缺點，但實際上是不是缺點有待商確，因為在開啟雷達時，本來就要有曝露行蹤的打算，因為此時就算敵方主動雷達無法發現我方，其也可能以被動探測在更遠的距離發現我方。因此電漿選頻罩的使用思維可能是「不開雷達時全力隱蔽，開啟雷達時允許雷達發揮所有性能」。

其 他

2003年ITPE與Sukhoi的研究文也強調大塊蒙皮的應用。採用大塊蒙皮便可以減少表面接縫與鉚釘，這樣便能減少在鉚釘以及表面不連續面(接縫處)的反射與繞射。Su-47的表面便採用許多大尺寸蒙皮，最大的長達8m，而Su-33UB也用了許多大塊蒙皮因此表面相當簡潔。

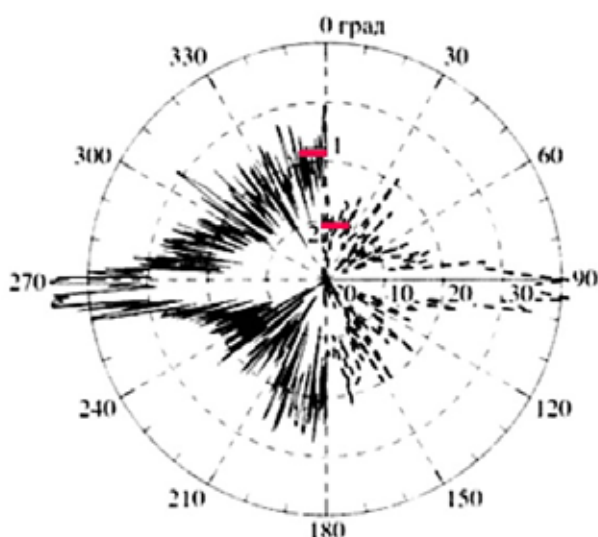
Su-27的表面工藝便已相當精美，接縫、鉚釘皆不明顯。Su-35採用整合式航電架構，

22 «Су-35 – четыре с двумя плюсами», Аэрокосмическое обозрение, №2, 2005, ст. 34-36

23 楊政衛，「玄武雙尊-俄羅斯第五代戰機」，菁典有限公司，2012，p.459

24 "Способ снижения радиолокационной заметности объекта, оборудованного, по меньшей мере, одной антенной", RU Patent, 2469447, 10.DEC.2012

25 «Интегрированный комплекс бортового оборудования многофункционального самолета», RU patent, RU2488775



2003年時採用匿蹤技術前(左側黑線)與後(右側虛線)的Su-27M的RCS分佈圖，其中1與2分別為處理前後在正面+30度範圍內的RCS平均值。須注意這是2003年的成果，且Su-27M為三翼面設計，RCS較基本構型的Su-27大。А.Н. Лагарьков, М.А. Погосян, «ФУНДАМЕНТАЛЬНЫЕ И ПРИКЛАДНЫЕ ПРОБЛЕМЫ СТЕЛС-ТЕХНОЛОГИЙ», ВЕСТНИК РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК, том 73, № 9, с. 848 (2003)

可以減少檢修艙門數量，此外外露的感測器數量也減少，這都有助減少RCS。

Su-35雷達匿蹤技術的具體成果

一、至2003年的成果

至2003年，ITPE與蘇霍伊公司已相繼在T-10M-8與T-10M-12進行100小時地面試驗與30小時飛行試驗，驗證吸波塗料、進氣道與風扇吸波塗料、噴嘴吸波塗料、多層膜座艙蓋、反射型電漿選頻天線罩的匿蹤效果。由雙方發表的論文中的RCS與方位關係圖

可知，Su-27M在改良後，前半球與後半球的RCS大幅減少，特別是前半球0~80度範圍中，RCS的最大值甚至小於改良前的最小值：改良前各方向的RCS在10~30平方米間跳動，改良後的最大值則多在10平方米，唯在40度左右出現約15平方米之極值。圖中還可見正面+30度範圍內的平均RCS由略超過20平方米降至略低於10平方米。

須注意上述數據的基礎樣本是Su-27M，其有三翼面設計，RCS先天比基本構型的Su-27、Su-35S大。例如由圖中可知其側面極值以外的平均RCS是20平方米，與印度所宣稱的Su-30MKI的RCS相同²⁶。而無前翼的Su-27的RCS則約在12~15平方米，因此上述匿蹤成果套用在Su-35上，正面+30度RCS平均值應下修至6~7.5平方米。此外，這是2003年的成果，不是最終的。

二、至2009年的成果

2009年莫斯科航展的看板上指出，「Su-35的一系列匿蹤技術使其RCS減少5~6倍」，以Su-27這世代的雙發重戰機RCS約10~15平方米計，Su-35的RCS約在1.6~3平方米左右，約是MiG-21的等級。

此一數據比起2003年的成果已大有進步，但與歐洲新世代戰機以及美製F/A-18E/F宣稱的小於1平方米相比遜色不少，但事實上，這些飛機在作戰狀態必有外掛武器，必然會多出不小的RCS。以空對空飛彈為例，即使彈身採用吸波塗料而大幅降低RCS，其導引頭本身就有0.01平方米級的RCS，這樣

26 «India, Russia close to PACT on next generation fighter», Business Standard, New Delhi January 05, 2010

一來，10枚空對空飛彈將至少增加0.1平方米的RCS，這還未考慮到AAM彈體與掛架所貢獻的RCS以及體型更大的對面攻擊武器。因此實際上這些外掛武器的戰機的RCS再怎麼理想也很難低於0.1平方米，務實點看，很難低於1平方米。這些飛機的匿蹤設計其實僅能增加其電戰措施的有效性，在面對先進的防空與機載雷達時，並不算是「匿蹤」。換個角度看，在真實作戰環境下只要有外掛武器，飛機就不可能匿蹤，以Su-35的雷達性能而言就算是RCS只有0.1平方米的低可視度戰機，匿蹤能力意義其實不大。例如EF-2000與Rafale公開的RCS比1.6~3平方米小得多，但就算小到0.1平方米，Su-35也能在170km發現，而反過來看EF-2000與Rafale卻不能在這距離抓到RCS=3平方米的Su-35。因此先發現優勢反而在Su-35這邊。

三、2009年至今是否還有進步空間？

前面提到Su-35的RCS比Su-27小5~6倍，或是換算成1.6~3平方米，是依據2009年莫斯科航展的看板數據。2009年還是原型機在測試的時候，真正服役的Su-35S要到2011年5月才首飛。因此2009年的數據也未必能完全套用於服役的Su-35S。

如前所述，Su-27這樣的進氣道佈局使得正面RCS的60%以上由進氣道貢獻，這意味著進氣道的匿蹤程度會顯著影響全機的匿蹤程度。前文提及的留里卡設計局的匿蹤設計，是在2011年申請專利，而由實際展出的117S發動機來看，雖然2009年展出的版本已看出匿蹤設計，但要到2013年展出的才算發展完整。例如在2007與2009年的版本中，

發動機轉子整流罩的頂端為球面，會發生較多正向反射，而整流罩、導向葉片等都是金屬，這樣一來，僅僅這些前緣正向反射造成的RCS就有1平方米級。而在2013年版的117S發動機上，上述前緣回波可被吸收，那麼全機RCS就可能比2009年的成果再減少1平方米級，也就是0.6~2平方米。俄文維基百科不確定來源之數據便提到是0.7~2平方米，或許就是新成果也說不定。

四、「Su-35縮小成MiG-21」的意義

由以上可知，根據2009年公開的數據，Su-35的裸機RCS可降到1.6~3平方米，如果考慮之後的新技術，可能降到0.6~2平方米。3平方米約是MiG-21的RCS值，也就是Su-35被「縮小」到MiG-21的大小甚至更小。這個意義何在？

匿蹤技術在作戰上帶來的優勢有二：一是讓自己隱匿到完成發現、攻擊程序時，敵方仍無法反應，也就是要獲得「先發現、先發射、先脫離」的優勢。另一個是提升反制措施的成功率。

前者只有完美的匿蹤戰機遇上相對落後的雷達時有機會辦到。傳統戰機不論怎麼改，只要帶著外掛武器作戰，在現代雷達眼前就不可能隱藏。而事實上，隨著雷達技術、其他探測技術、網路中心戰的進展，完美的匿蹤戰機想維持「先發現、先發射、先脫離」優勢會越來越難。

在面對威脅時，匿蹤戰機與傳統戰機一樣要藉由各種反制措施來生存，包括反制機動、電戰設備、誘餌等等。顯然，戰機的隱匿性越好，誘餌與電戰措施就會顯得越明

顯，成功率自然更高。也因此匿蹤戰機的電戰設備功率可以更小，不必像傳統戰機一樣攜帶額外的電戰莢艙，就能充分保護自己。

例如在蘇霍伊公司與ITPE在2003年發表的文獻中提到，在不考慮電戰措施時，RCS=1平方米的損失機率比RCS=5平方米時少約20%，而如果RCS能小於0.3平方米，損失機率會迅速減小，例如0.3平方米與0.1平方米時損失機率分別比5平方米時小40%與80%。而在考慮電戰措施的情況下，若以RCS=15平方米的戰機的損失機率為基準，則在使用電戰系統後，損失機率比基準值少35%，如果RCS降到1平方米，則損失機率比基準值小70%²⁷。注意這是至2003年的成果，自然是依據當時的雷達技術與電戰技術而計算的。2015年「無線電科技」集團(KRET)官方介紹指出，其用於Su-30SM、Su-34、Su-35的「希比內山」電戰系統讓生存性提升30倍²⁸。

Su-35的雷達反射特徵已經縮到比MiG-21還小，所攜帶的電戰莢艙功率卻比Su-27、Su-27M所用的略大。也就是用保護Su-27M、Su-30SM、Su-34的電戰莢艙去守護比MiG-21還小的飛機，生存性會更高。同家族的電戰莢艙也用於Su-34與Su-30SM，並投入實戰，吾人可藉由觀察這兩者的生存性來知道Su-35生存性的下限。

但這也帶來一些額外的改良空間：

「希比內山」電戰系統功能強大，但莢艙重410kg(應該是2個的重量)，而且會占用武器掛點。既然Su-35的雷達反射特徵降到MiG-21的等級，那麼理論上不需要用那麼大的電戰莢艙也可以。例如ELT公司為幻象2000-5與MiG-35研製的主動電戰系統都可以內建在機身內，因此Su-35理論上也能用內建式的電戰系統。事實上在原來的計畫中，Su-35的自衛用電戰系統就是內建的，後來維持翼端莢艙，或許是研製進度與成熟度上的考量。

就算沒有「原廠」的內建電戰系統，MiG-29可用的電戰系統也是不錯的現成品。MiG-29能用的電戰莢艙較輕巧，運用彈性更大，例如白俄羅斯的Satellit-M與後繼的Talisman電戰莢艙能用於MiG-29與Su-27，其體型、重量比武器掛架大不了多少，本身又可充當武器掛架因此不會犧牲武器數量，也相當於不太增加重量(本來就要帶掛架，現在只是這個掛架多了電戰功能)。其中最新一代的Talisman於2012年研發完成，也採用數位射頻記憶體(DRFM)技術，工作頻率範圍與L-265M一樣是4~18GHz，除了有假目標模式、提前引爆武器模式外，還有「電子匿蹤」模式，讓自己消失在雷達幕上(這一模式在俄羅斯電戰系統廣告上尚未出現)。白俄的Yak-130就配備Talisman莢艙，而且掛於翼端，可見他相當輕巧。因此也不能排除Su-35的外銷客戶選用Talisman等輕型戰機電戰莢艙

27 А.Н. Лагарьков, М.А. Погосян, «ФУНДАМЕНТАЛЬНЫЕ И ПРИКЛАДНЫЕ ПРОБЛЕМЫ СТЕЛС-ТЕХНОЛОГИЙ», ВЕСТНИК РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК, том 73, № 9, с. 848 (2003)

28 "Радиоэлектронный щит на борту ", КРЭТ, 01.Oct.2015, <http://kret.com/ru/news/4007/>

的可能。這樣一來Su-35可以在維持類似的電戰能力時，更為輕巧且多掛2枚武器。

紅外線匿蹤

重要性僅次於雷達匿蹤的，是紅外線匿蹤。短程飛彈就是用紅外線導引，新一代短程飛彈射程其實也不短，達30km以上，而先進戰機普遍裝備的光電系統也能偵測紅外線。

戰機最大的熱源就是噴嘴，特別是後燃器與低壓渦輪。其匿蹤方法是降溫，或是遮蔽。F-22藉由扁平噴嘴來部分遮蔽渦輪，並採用降溫措施，據稱能減少90%紅外線輻射。參考雅克列夫設計局的設計，其在噴嘴用遮罩後，也能減少90%紅外輻射，而其具體效果是，在面對威脅時，只需要原來的1/3~1/2的誘餌數量就能干擾成功²⁹。

Su-35用了什麼紅外線匿蹤措施尚不清楚。但有趣的是，留里卡設計局前總設計師V. Chepkin在2011年被問及T-50最被抨擊的尾部紅外線匿蹤問題時指出「…我們非常積極的降低發動機的雷達與紅外線特徵，得到了較F-22好過2倍的成果(至少是就公開資料以及我所推測的)…³⁰」而當時T-50所用的還是第一階段發動機AL-41F1，在硬體上與Su-35的AL-41F1-S幾乎相同。

結語



至2009年，Su-35的雷達反射截面積(RCS)已能降到MiG-21的等級。這一等級的RCS與「匿蹤」仍有天壤之別，但搭配Su-35強大的雷達系統，在遇到其他先進的低可視戰機如EF-2000、Rafale時，先發現優勢通常仍在Su-35這邊。而在搭配電戰系統時，生存性可以比Su-34、Su-30SM還高，甚至允許使用更輕巧的電戰系統，進一步節省重量。(作者攝)

從公開資訊以及技術可行性分析來看，基本上可確定Su-35的正面RCS可降至0.6~3平方米，比MiG-21輕型戰機還小，並且實際使用上Su-35是搭配輕型戰機所無法搭載的重型戰機用高功率電戰系統(L-265M)，可以確定他的生存性會因此高過絕大多數戰機。那麼，「跟F-35相比呢？」，這個問題不只國人很感興趣，他可說是近年軍事航空的重要議題，這是因為Su-35的銷售期間與F-35相仿，兩者很容易在世界的各個角落相遇。例如俄軍的Su-35S在敘利亞就會遇上F-22、F-35；未來東亞地區可能出現Su-35對上日本或國軍的F-35；而在東南亞地區，則有印尼Su-35對上新加坡F-35的可能。甚至，擁有大

29 «ЛЕТАТЕЛЬНЫЙ АППАРАТ С УМЕНЬШЕНИЕМ ЗАМЕТНОСТИ СИЛОВОЙ УСТАНОВКИ В РАДИОЛОКАЦИОННОМ, ИНФРАКРАСНОМ, АКУСТИЧЕСКОМ ДИАПАЗОНАХ ДЛИН ВОЛН И ИЗМЕНЕНИЕМ ВЕКТОРА ТЯГИ», RU patent 2003, RU2215670C1

30 Александр КУЗНЕЦОВ, «Виктор Чепкин. Наш ответ... бразильцам?», РФ сегодня, №10, МАУ, 2011

量F-35設計特徵的殲-20對上東南亞的Su-35也可視為「廣義的Su-35對F-35」。

這種牽涉到不同設計思路的產品的比較，很難簡單論斷，甚至也很容易出錯，因此放在末尾當「課後討論」。在現代雷達技術下，F-35幾乎無法像模擬動畫顯示的一般一直不被發現。在一樣會被發現的情況下，戰機都要靠反制機動與電戰措施來自衛。這時匿蹤戰機的優勢在於雷達反射特徵小，用較小的功率就可以有很好的效果。但是，Su-35這種「比MiG-21還小的反射信號搭配重型戰機的干擾機」效果不見得較差，這就好像普通飛機在專業電戰機掩護下一樣會有很好的生存性一樣。誰好誰壞實在無法單純以匿蹤外型有無來論斷。

當然F-35如果一樣搭配大功率干擾機效果也會很好，但這種大功率干擾機如果無法完全內藏，就會大幅增加RCS，而高功率干擾源也容易被敵方電子偵察系統發現，結果就是昂貴的匿蹤技術有許多變成浪費。因此對匿蹤戰機而言，攜帶的干擾機功率超過一

定程度時，就會出現 $1+1<2$ 的現象。Su-35搭配高功率干擾機當然也有類似的問題，但他不只干擾機功率大，連雷達功率也大，可見在設計上擺明了就是「不怕被你看，反正我看更遠打更遠」，這種「他自狠來他自惡，我自一口真氣足」的硬碰硬哲學，與F-35的「忍者」哲學大異其趣，硬要從片面資料分個高下，就像評論少林跟武當功夫誰比較厲害一樣，非常容易誤判。

作者簡介

楊政衛，國立成功大學物理系學士，俄羅斯聖彼得堡大學物理系碩士。自2003年起於期刊上發表俄系戰機研究與展覽報導等文章。所發表期刊(依發表時間排序)包括「尖端科技」、「全球防衛雜誌」、「軍事連線」等民間軍事雜誌；「空軍學術雙月刊」、「航太工業通訊」等官方學術期刊，以及俄羅斯“National Defense”雜誌。著有「玄武雙尊-俄羅斯第五代戰機」(2012)、「Su-35第二冊：機體・動力・控制・飛行」(2019)等書。



日本航空自衛隊C-130H運輸機，隸屬第一運輸航空隊第401飛行隊，駐地為小牧基地(照片提供：張詠翔)