

匿蹤與反匿蹤的理論基礎 — 戰機 RCS 量級估計

軍事專欄作家 楊政衛

提 要

本系列文章的第一篇「匿蹤與反匿蹤的理論基礎—匿蹤技術篇」提到匿蹤科技的基本原理，本文要進一步依據最基本觀念，估計各類匿蹤戰機的各種雷達反射截面積(RCS)的物理量級，以在無法取得機密的匿蹤技術數據情況下，粗估匿蹤戰機的性能量級，藉以探索匿蹤戰機適合的戰術以及反制方法。此外也有助於掌握不同的匿蹤措施對全機匿蹤性能的貢獻權重。

媒體公開的RCS值的陷阱與意義

表一是美國Global Security.org網站公布的若干物體與飛機的RCS值¹、美國空軍公布數據²，以及俄國公布若干數據³，供讀者參考。除了美國空軍2005年11月公布的數據有強調是正面RCS之外，這些數據多是典型的媒體數據，並沒有具體指出是什麼情況的RCS(特定角度？特定角度範圍的平均？還是全機平均？)，也沒有具體指出是針對什麼波段。此外，美俄資料來源的F-22的RCS值差距極大，沒有橫向比較意義，倒是從單一來源可以清楚看到不同飛機的匿蹤等級。例如

F-117與F-35的RCS比鳥還小，F-22與B-2甚至小於昆蟲！即使這些資料可能僅指特定狀況，但幾何面積上百平方米的戰機的RCS竟可小到與昆蟲比擬，無疑讓人更容易體會匿蹤技術的威力。

事實上，匿蹤技術是目前最尖端的軍事技術之一，是機密中的機密，因此除了研發者之外，根本不可能知道飛機真正的RCS值。例如鏡射RCS主要由外型決定，看起來似乎只要根據外形建立電腦模型就可以計算RCS值，而根據外型建模在模型界、航空界早就很常用。然而實際上，根據外形建模當然有誤差，幾毫米或是公分級的物差，外觀上不容易察覺，對氣動力的影響也有限⁴，但

1 Global Security.org. <http://www.globalsecurity.org/military/world/stealth-aircraft-rcs.htm>

2 D.Jenn, 《RCS reduction (chapter 7)》, Naval Postgraduate school, Department of Electrical & Computer Engineering, Fall 2011. <http://faculty.nps.edu/jenn/EC4630/RCSredux.pdf>

3 «От истребителя к ракетноносцу», Голос России, 01.MAR.2010

表一 若干物體的RCS值參考表

	Global Security.org 網站數據	美國空軍2005年11月數據		俄國參考數據
	RCS (m2)		RCS (dB)	RCS (m2)
汽車	100		20	
B-52	100			
B-1(A/B)	10			
F-15	25			12
Su-27	15			12
Su-30MKI	4			
Mig-21	3			
MiG-29		5		
F-16	5			
F-16C	1.2			
人	1		0	
F-18	1			
Rafale	1			
B-2	0.75 ?			
EF-2000	0.5			
戰斧巡弋飛彈	0.5			
B-2	0.1 ?			
A-12/SR-71	0.01 (22 in ²)			
鳥	0.01		-20	
F-35 / JSF	0.005	0.0015	-30	
F-117	0.003			
昆蟲	0.001		-30	
F-22	0.0001	0.0001~0.0002 (正面)	-40	0.3~0.4
B-2	0.0001		-40	

資料來源：Global Security.org 網站數據、美國空軍2005年11月數據、俄國參考數據

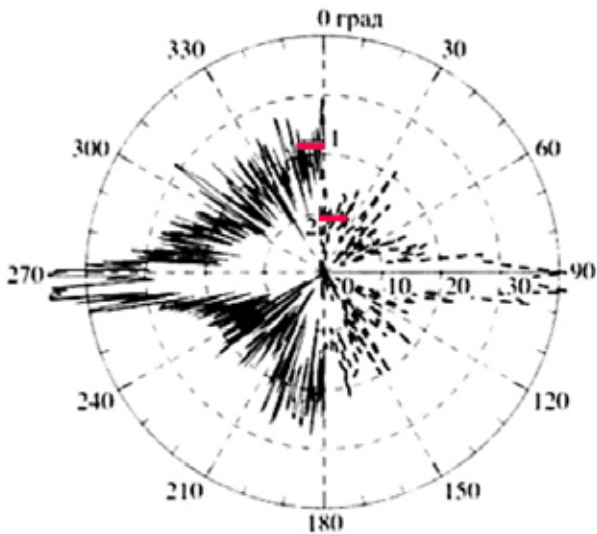
是對毫米波、X波段的RCS卻可能產生重大影響。因此不論用多精確的計算技術，只要沒有原廠精確的外型數據，就不可能算出精確的RCS。

其餘匿蹤技術牽涉到材料，這更是密中之密，就算有公布數據也只是大概。通常都只說降低一個量級或兩個量級。前文提到的奈米吸波塗料對0.8~10cm波段的吸收率為13~18dB，這已經是很細的數據了，但實際上，他只給了範圍，最佳吸收波段在哪裡卻

沒有說，也沒有說這是用多厚的塗層。

此外，RCS是有方向性的，在圓柱的RCS-方位關係圖就已經可以發現RCS隨方位忽大忽小的現象。真實飛機也是如此，如圖所示為Su-35在使用匿蹤技術前後的RCS分佈圖(圖一)。在未使用匿蹤技術時，其RCS分佈忽大忽小，幾乎都是在20~30平方米與0之間跳動。也就是說，就算是尚未做處理的Su-35這樣的非匿蹤戰機，也是有某些角度的RCS接近零的(嚴格說，是比最大值小好幾個量

4 原載於НПП Технология公司網站關於Su-47大面積複合材料之介紹。但資料隨網站更新而消失。



圖一 2003年時採用匿蹤技術前(左側黑線)與後(右側虛線)的Su-35的RCS分佈圖，其中1與2分別為處理前後在正面 $\pm 30^\circ$ 範圍內的RCS平均值。(資料來源：VRAN)

級)，只是這些角度範圍太窄，使得平均起來觀察到的都是不小的RCS。而匿蹤處理後，擁有小RCS的角度範圍增加了，因此從那些方位觀察就真的會觀察到比較小的RCS。

因此，當廠商公布自家飛機的RCS數值時，可能會有不同標準。這可能是

一、最低RCS值：這個值可以當做匿蹤技術等級的參考，但如前所述，就算是非匿蹤戰機也會有RCS比最大值小好幾個量級的方位，因此匿蹤戰機如果妥善設計，在加上吸波塗料的作用，這個值當然可以小得很誇張。

二、全機360度平均。如前所述，因為能量守恆，所以匿蹤外型只是把回波集中在少數方向，讓多數部位的RCS降低。然後再佐以吸波塗料，進一步降低整機的RCS，但仍然有峰值。理想的匿蹤戰機RCS峰值發生

在很窄的角度範圍，通常是在側面，以及正對著主翼前後緣的方位。敵機剛好落在這些方位的機率不高，就算有也是稍縱即逝，因此敵方大部分時候都觀察不到這些峰值。取平均值以後，平均值會被這些峰值拉高，因而顯現出遜於真實匿蹤表現的數據。因此非常好的匿蹤戰機如果只是公布全機平均RCS值，那其實有欺敵成分在。不過如果考慮大規模作戰，例如機群作戰，或是匿蹤戰機深入敵方防空縱深的情況，則匿蹤戰機實際上不是對付少數敵人，而是一口氣面對四面八方的探測設備，這樣一來，匿蹤戰機對敵方整個防空體系而言，RCS就應取平均值。

三、有限角度範圍的平均：如前所述，匿蹤戰機的RCS也會有峰值，但是卻可以集中在較窄的範圍。如果匿蹤戰機能搭配妥善的預警系統與控制系統，盡可能以較小的RCS的方位面對對手，那麼對手觀察到的RCS平均值其實就是匿蹤戰機暴露給對方看的方位的RCS平均值。例如最需要隱匿的階段就是攻擊階段，也就是對前半球隱形，因此前半球有限角度範圍的RCS平均，就是敵方最容易觀察到的RCS。這一平均值的實用意義很大，特別是在「少對少」戰況下。一般來說，如果取平均值的角度範圍很大，平均值又很低，就表示匿蹤性能越好。

但是，廠商通常不會具體的說所公布的RCS是基於哪一標準。因此，除非是單一來源一口氣講了若干飛機的RCS值，可以當做彼此高下的參考外，不同資料來源的RCS值實在難以比較。例如俄國T-50總設計師在闡述T-50的匿蹤成果時說「Su-27與F-15的RCS

約是12平方米，F-22是0.3~0.4平方米，T-50與F-22相當」，⁵就可以看做是同一標準下的數據。然而這個數據比一些媒體報導的F-22、F-35的RCS大了好幾個量級，例如美國Global Security.org網站的資料顯示，Su-27與F-15分別是15與25平方米，F-22與F-35分別是0.0001與0.005平方米。⁶又根據美國空軍2005年11月的數據，F-22的0.0001平方米應是正面RCS值⁷。很顯然，T-50總設計師說的數據跟美國空軍公布的數據差了近1,000倍，不可能是同一標準。

吾人不妨從最基本的物理量出發，估計匿蹤戰機RCS的量級。吾人無法查證機密的匿蹤材料資料，但可以確定的是，任何再先進的技術都不可能超過物理極限，這裡要估計的，就是假設用了非常完美的匿蹤技術，估算RCS的量級下限，並且估計每一個主要成分貢獻的RCS量級，以便掌握每一種匿蹤技術所能影響的程度有多少。

這裡算出來的RCS只是估計最小量級，他當然不是具體的RCS值，但是可以幫助吾人概略的判斷廠商所公布的數值是基於何種條件？是否過度誇張？等等。

各部位RCS最小量級估計

一般飛機最主要的RCS來源是鏡射RCS，但從圓柱的RCS-方位關係可以知道，妥善設計的外型可以讓RCS降低至少好幾個

量級。既然鏡射RCS的變化那麼大，精細的外型數據又不可得，那在估算RCS的物理極限時不妨乾脆先假設鏡射RCS為0，僅估算其他成分的影響。最後再考慮鏡射的量級以進一步逼近真實。

一、邊緣繞射

無論外形如何設計，在機翼等邊緣一定會出現尺寸與波長相當的部分(例如邊緣幾公分對應X波段，邊緣幾公分對應L波段)，這些部分的RCS就可以用曲率半徑與波長相當的圓柱體去估計(因為就算不是圓柱體，其尺寸與波長相同時，具體形狀影響已不大)，可以先估算這些邊緣部位的幾何截面積，然後根據其相對於雷達波的角度予以調整。這些邊緣包括主翼邊緣、平尾邊緣、垂尾邊緣、進氣口前緣、以及匿蹤飛機機身稜線邊緣等(圖二)。

以前半球為例(由機首指向算起0~+90度)，要考慮的是主翼前緣、垂尾前緣、進氣道前緣、平尾前緣、以及機首稜線。這裡要



圖二 邊緣無可避免的會有繞射，對來自正面的雷達波而言，又以翼前緣、進氣口影響為最。
(資料來源：www.sukhoi.org)

5 《От истребителя к ракетноносцу》, Голос России, 01.MAR.2010

6 Radar Cross Section (RCS), <http://www.globalsecurity.org/military/world/stealth-aircraft-rs.htm>

7 D.Jenn, 《RCS reduction (chapter 7)》, Naval Postgraduate school, Department of Electrical & Computer Engineering, Fall 2011. <http://faculty.nps.edu/jenn/EC4630/RCSredux.pdf>

估算的是RCS的下限，匿蹤飛機的平尾通常被主翼遮蔽，可以先不算，機首稜線通常幾乎平行於主軸，除非是從側面(+90度)否則其RCS遠小於主翼等部分，為了簡單也暫且忽略。這樣，就只需考慮主翼、進氣口與垂尾前緣。

估計繞射RCS量級的原則是：(1)找出對RCS有顯著「貢獻」的邊緣，將這些邊緣想像成曲率半徑與波長相當的圓柱，估計這些部分對所考慮波段的幾何截面積，(2)然後考慮雷達波約以45度角傾斜照射⁸(相當於來自正面的雷達波對主翼前緣等處的入射角)所以RCS平均較幾何截面積降一個量級，⁹(3)然後再考慮波長與尺寸相對關係可能造成的影響，將求出來的值分別降低與放大一個量級。換言之，估計出的RCS範圍在幾何截面積的0.01~1倍之間。由於估算時已經假設雷達波以45度角傾斜照射，相當於後掠角45度的飛機正面的情況，因此估計出來的數值大約是正面RCS值。然後以此數值為基礎可以再估計大角度範圍的RCS平均值範圍。

對波長3cm的X波段而言，上述部分可以視為口徑3cm的圓柱(圖三)，圓柱長度為上述線條的總長，以雙發重型戰鬥機而言總長度約是20~30m(主翼與垂尾)+10m(進氣口)，即共約30~40m，則其幾何截面積約為1平方米。從曲率半徑相當於波長的圓柱RCS-方位關係可知，RCS可能比幾何截面積大或小

一兩個量級，端視雷達入射方向而定。現代戰機主翼掠角約40~60度，如果雷達波由飛機正面入射(也就是與翼前緣法線夾40~60度)，RCS可能比幾何截面積小一個量級，那便是0.1平方米級。如果是正對著主翼前緣入射，那通常只會看到一邊的主翼與進氣口，以及2片垂尾，那幾何截面積就約為0.5平方米，RCS會比這大一兩個量級。如果從側面入射，則也是只看到的一半的前緣，又考慮傾斜入射，使得RCS約為0.05平方米。後半球狀況也類似於正面。因此整體來說，雖然邊緣的幾何截面積約1平方米，但考慮角度的影響，除極值方向(正對著前緣)外，RCS量級在0.1平方米上下。如果再考慮波長與尺寸、曲率半徑的相對關係使RCS與上述值有數量級的差距，那麼RCS會在0.01~1平方米之間。若採用吸波塗料，RCS範圍分別降至 10^{-3} ~ 10^{-1} 平方米(降低一個量級)或 10^{-4} ~ 10^{-2} 平方米(降低兩個量級)。

同理，如果是對波長20~30cm的L波段，邊緣的長度不變，但「等效圓柱」的口徑卻放大約10倍，因此RCS量級約是1平方米級，放寬考慮0.1~10平方米。

二、天線罩

目前最主要的探測波段是波長3cm~30cm的波段，因此戰機預警系統最主要也是針對這一波段，而為了有較高的預警精確度，天線會被分佈在四周，而天線的尺寸與

8 以翼前緣為例，與前緣平行的方向尺度遠大於波長，與前緣垂直的方向尺度相當於波長，因此邊緣回波行為會類似線波源，故必須考慮掠角的影響。

9 詳見本系列專文「匿蹤技術篇」，「圓柱的RCS-角度關係及其意義」段落的討論或參考本文圖8。

對應的波長必須相當，這就意味著戰鬥機身上會有許多尺寸在1~10cm級的「窗口」。這些窗口如果是完全電磁透明的，則僅僅是天線與電磁波的共振就會有很大的RCS，不論從前述的圓柱RCS-方位關係或是文獻資料¹⁰都可以知道，天線對相對應波段的RCS可能會比幾何截面積大一個量級以上。更何況天線罩內部的結構又會貢獻額外的RCS。

為了估算匿蹤性能的物理極限，這裡只考慮已經採用匿蹤天線罩的情況。理想的匿蹤天線罩的效果就是讓敵方雷達波在天線罩表面就反射(圖四)，但不能吸收之。因此，如果翼前緣有一個長度10cm左右的天線罩，其對3cm波長的RCS下限就是其前緣的繞射RCS下限，那麼比照邊緣繞射RCS的估算法，這個10cm長的天線罩的RCS的量級約是 3×10^{-4} 平方米級，放寬約 $3 \times 10^{-5} \sim 3 \times 10^{-3}$ 平方米級。實際上天線數量很多，而且大部分又會安裝在邊緣以獲得較好的視野，因此天線

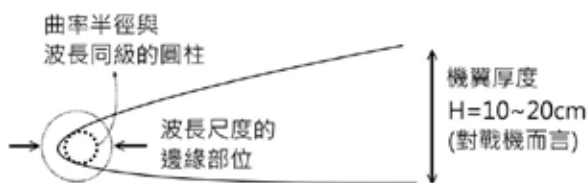
實際RCS至少要比上述數值大幾倍。

從這裡可以發現，天線罩的RCS本來遠小於邊緣繞射，但由於天線罩一般來說不可能用吸波塗料，因此其會構成全機RCS的下限。舉個非常誇張的例子，假設有非常完美的匿蹤外型，使鏡射RCS為0(實際上當然不可能)，然後再用吸收99%的塗料降低邊緣繞射的RCS，則「鏡射+繞射」的RCS下限約 10^{-4} 平方米，然後再多塗一層塗料，或是外面再用電漿系統，再降100倍變成 10^{-6} 平方米，看起來極為完美，然而此時為了實用，天線罩必須外露，則全機的RCS仍就是天線罩RCS的等級($3 \times 10^{-5} \sim 3 \times 10^{-3}$ 平方米)。

三、光電窗口

光電系統幾乎是現代戰機不可或缺的部分，例如用於探測與射控的光電探測儀，以及光電預警系統。

在沒有特殊處理的情況下，雷達波穿透光電系統的窗口，打到內部結構然後反射。

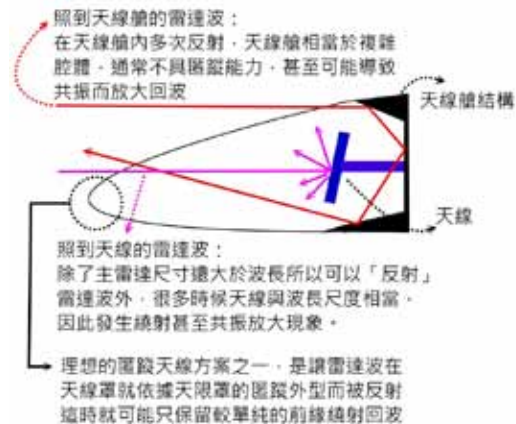


如圖所示為戰機翼剖面的前端。對戰機而言機翼厚度約10~20cm。總是在前緣找到：

- 1.線性尺寸相當於波長的區塊
- 2.曲率半徑相當於波長的曲面

以上兩者都會造成與幾何外型無關的繞射回波。為了簡單的估計量級，把造成繞射的區塊以近似圓柱表示。

圖三 邊緣可視為曲率半徑與波長相當的圓柱
(資料來源：作者自製。)



圖四 理想天線罩示意圖
(資料來源：作者自製。)

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

以前視光電探測儀而言，口徑數十公分，幾何截面積就是0.01~0.1平方米級。如果光電探測儀採用球狀整流罩，那麼其RCS就大約是幾何截面積，但這個部分可以用吸波塗料來降低。

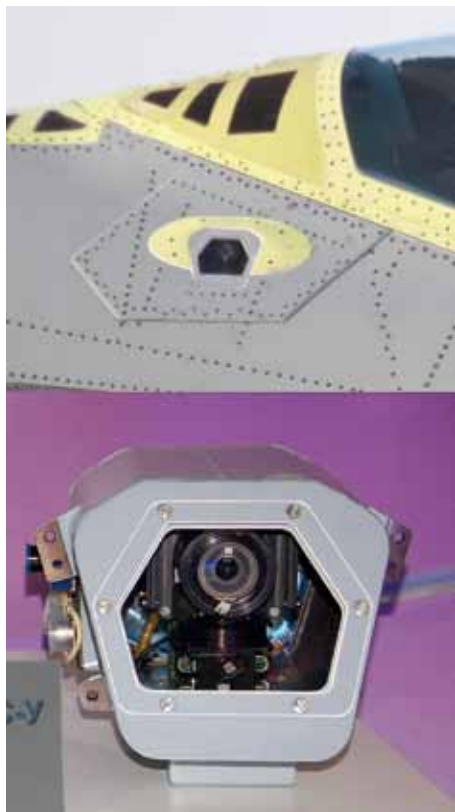
如果是預警器，口徑通常小於10cm，幾何截面積約0.01平方米級。但光電窗口有機會採用特殊材料，隔絕雷達波，而且預警器可以像F-35或T-50採用埋入式設計(圖五~六)，這種情況下，雷達波未必可以照射到感測器內部，RCS可望大幅降低。但即使在最理想的情況下，光電窗口的透光部分與外

框的交界、或是外框與飛機表皮不完全平滑的融合，例如F-35的DAS或T-50的101KS-U那樣，對X波段或是毫米波段而言就可能出現邊緣繞射。光學窗口的周長一般在幾十公分，因此RCS難免與匿蹤天線罩相當。而對L波段而言，光學預警器通常可以視為與表皮平滑的融合，但射控用的光電探測儀通常一定會凸起，不論是一般的球狀整流罩，或是F-35上稜稜角角的造型，其尺寸都是數十公分，相當於L波段波長，這時其就會發生繞射，匿蹤外型幫助有限。因此像T-50、F-35這樣有外露光電探測儀的飛機，RCS的下限可能會被前視光電探測儀制約。

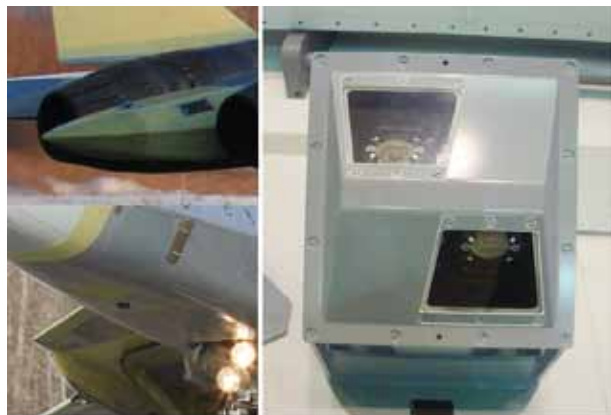
只是光電探測儀可以用吸波塗料，必要時也可以採用可收納設計，因此其RCS有機會降得比天線罩還低，端視具體設計。

四、其他感測器

如果飛機有外露的感測器，如大氣數感測器，這些感測器的尺寸與曲率半徑剛好都是幾公分範圍，其幾何截面積約0.0001~0.001平方米級，但由於尺寸與波長太接近，



圖五 T-50-4座艙邊的101KS-U-01。下為MAKS2011展出的101KS-U特寫，當時還沒整合雷射接收器。
(資料來源：www.sukhoi.org作者整理)



圖六 機首下方與尾刺上方各有一組101KS-U-02，分別負責下半球與上半球。
(資料來源：www.sukhoi.org作者整理)

可能出現共振放大效應，使得RCS可能是幾何截面積的10~100倍，這樣一來，幾根大氣數據感測器的RCS有可能達到0.01~0.1平方米級，對理想匿蹤飛機來說這已經相當於全機總和。因此如果有外露的大氣數據感測器，則其RCS會制約全機RCS的下限。

例如Su-35S雷達罩兩側就有露出幾根大氣數據感測器(圖七)，尺寸就是若干公分，僅僅這幾根外凸物的RCS就在0.01~0.1平方米級。對Su-35S這種非匿蹤戰機而言這可以忽略不計，但如果一樣的感測器用在T-50上，就會限制T-50的RCS怎麼樣都無法低於0.01平方米。

不過就如同光電感測器，大氣數據感測器也是有機會隱藏的，例如F-22的外觀就看不到大氣數據感測器。此外理論上也可以用吸波塗料降低此處的RCS。

五、表面縫隙

飛機表面縫隙的尺度為毫米級，較常用的探測波段小1個量級以上，影響很小。然而新一代戰機以及空對空飛彈開始引入毫米波段，這時縫隙就落在共振散射區，RCS會在幾何截面積附近，甚至有可能比幾何截面積還大。縫隙的寬度為毫米級(0.001m)，機身表面總縫隙長度很容易就超過100m，這樣一來縫隙對毫米波的RCS就在0.1平方米級。真實情況下縫隙超過1mm，總長度超過100m，加上共振散射區的RCS可能比幾何截面積大一個量級以上，因此表面縫隙對毫米波的RCS甚至可能在1平方米級。這也是為什麼毫米波被視為可以反匿蹤的波段之一。

要減少這一部分的RCS，只好靠吸波塗



圖七 Su-35卸除雷達罩後正面特寫，機首周圍有若干短金屬柱狀物就是其大氣數據感測器。
(資料來源：作者提供)

料。然而由於毫米波段在戰鬥機的運用仍不普遍，因此現代吸波塗料主要是針對X波段，頂多兼顧到L波段，要最新的奈米塗料才勉強放寬到8mm的毫米波段，因此現階段毫米波段的RCS不容易降低。

全機RCS量級下限估計

現在考慮全機RCS下限的量級。表為匿蹤雙發重型戰機對X、L、毫米波段的RCS下限的估計值。由於估算時已經假設雷達波以幾乎45度傾斜照射，因此估計出來的數值約是正面值，平均值量級則可依據正面值加以修正(下詳述)。

表中的估算邏輯是

(一)列出各主要回波來源的RCS範圍，取其最小值，例如無塗料情況下邊緣繞射RCS



範圍 $10^{-2} \sim 1$ 平方米，就取 10^{-2} 平方米計。

(二)將各項的最小值加以比較，只取量級最大的，剩下忽略。例如邊緣繞射下限 10^{-2} 平方米，光電球RCS量級0.1平方米，就忽略前者。

(三)承上，如果此一最大量級的項目只有一個，此量級就是全機RCS下限量級，例如在沒有塗料的情況下，光電球的RCS量級最大，為0.1平方米，而且沒有他項與之相當，那全機RCS下限就是0.1平方米。

(四)承(2)，如果有此最大量級的項目有若干個，則全機的RCS量級下限可能要加一個量級，例如在最理想的情況下，假設全機RCS只由天線罩「貢獻」，那麼單個天線罩的RCS下限是 3×10^{-5} 平方米，但實際上天線罩至少有若干個，因此全機RCS下限至少會大一個量級，在 10^{-4} 平方米以上。

每一張表算出的RCS又分三個等級：

(一)只考慮天線罩：天線罩極難使用吸波塗料，因此天線罩貢獻的RCS可視為絕對無法避免的。這裡估計出來的值可視為RCS的最低極限。

(二)考慮天線罩與邊緣繞射：假設沒有光電感測器或是隱藏很好，也假設匿蹤外型很理想，那麼全機RCS無可避免由邊緣繞射與天線罩貢獻。這裡估計出的值可以視為F-22這樣沒有光電系統、對匿蹤技術很苛求的匿蹤戰機的RCS下限。

(三)將光電探測儀、大氣數據感測器等也算入：現代戰機幾乎都會裝上光電系統以增加資訊來源與多用途能力，美國F-35、俄國T-50、中共殲-20皆如是，因此這裡算出來

的可視為符合現代需求的務實型匿蹤戰機的RCS下限。

另有若干注意事項：

(一)這裡算的都是物理下限，真實情況很容易比這大一個量級以上。例如在沒有塗料的情況下，光電球RCS量級最大，為 $0.01 \sim 0.1$ 平方米，其餘有多項量級是0.01平方米的，其總合就可能達到0.1平方米級，兩個0.1平方米級相加就可能接近1平方米級(例如 $0.3+0.4=0.7$ 便接近1)。

(二)在每個表中都分別計算沒有塗料、用塗料降低10倍、用塗料降低100倍的情況。實際上就算是前文所提的奈米塗料，吸收率 $13 \sim 18\text{dB}$ ，也未必總能降低100倍的RCS。通常最佳吸收率只會在特定波段，而且應該是針對目前最主要的X波段，而不是對L、毫米波。因此除非有確切的塗料數據，否則考慮L與毫米波段時，可假設吸波塗料最多降低10倍的RCS。

(三)承上，在考慮X波段時，可以假設有降低100倍RCS的塗料。另一方面可依據飛機問世年代判定塗料種類，例如90年代或以前問世的，可假設只降低10倍，剛問世的可假設降低100倍。

一、裸機正面RCS下限量級估計

表2~4是依據本文計算原則算出的雙發重型戰機對X、L、毫米波段的正面RCS量級。由表可見，對X波段而言，最放寬的情況下RCS的物理下限是 10^{-4} 平方米，但更可能在 10^{-3} 平方米。F-22沒有光電探測儀與光電預警系統，故 10^{-3} 平方米可視為F-22這類設計的RCS下限(不論用那一種吸波塗料)。T-50雖

然有光電探測儀等增加RCS的項目，但問世時已是2010年，塗料應該更為精進，因此其RCS下限也有可能在 10^{-3} 平方米級，與F-22相當。但如前所述，這裡有多個同量級項目相加，因此T-50的RCS下限還是可能比F-22大一個量級，在0.01平方米級。實際上的RCS因為一定會有鏡射部分的貢獻，因此極可能比下限大一個量級以上，這樣F-22約是0.01平方米級，T-50可能是0.1平方米級。

如果是單發戰機如F-35，尺寸略小，但量級相同，天線數量也不會比較少，因此RCS與重型匿蹤戰機也會相當。還應注意的是，像F-35這樣的單發戰機，曲面會比較多，例如發動機附近、DSI進氣道鼓包等，這些部位如果沒處理好可能會是明顯的L波段反射源，不過精確估計已超出本文範圍，故不

進一步討論，只要知道單發戰機匿蹤能力不一定比雙發戰機好即可。

比對表一中的F-22的正面RCS值為 $10^{-4} \sim 2 \times 10^{-4}$ 平方米，與本文僅考慮天線罩貢獻時求出的範圍相當，已是物理極限。由於是物理極限，所以不能排除可能性，但極難達到，就算能達到應該僅成立於很窄的範圍。當F-22對上傳統戰機的場合，理論上總能先發現對手，這時就能以最低RCS方向逼近對手，這時對該對手而言， 10^{-4} 平方米或許有意義。然而在多機戰場、F-22深入敵方防空縱深、以及遇上探測能力很強的對手時，F-22就可能無保證以最低RCS面對對手，這時 10^{-4} 平方米幾乎失去意義。

二、RCS極大值的量級與意義

須注意的是，以上估計是指正面，是相

表二 雙發重戰機對X波段雷達的RCS物理下限估計表

		先天量級 (無吸波材料)	吸波塗料 (降低10倍)	吸波塗料 (降低100倍)	可否排除	
1	天線罩(每個)	$3 \times 10^{-5} \sim 3 \times 10^{-3}$	塗料會吸收自己的工作波段，故不考慮		否	
	總合物理下限 (考慮多個天線罩)	$> 10^{-4}$				
2	邊緣繞射(全機)	$10^{-2} \sim 1$	$10^{-3} \sim 10^{-1}$	$10^{-4} \sim 10^{-2}$	否	
	1~2加總之物理下限	10^{-2}	10^{-3}	10^{-4} (更可能 10^{-3})		
3	光電預警器(每個)	$3 \times 10^{-5} \sim 3 \times 10^{-3}$	$3 \times 10^{-6} \sim 3 \times 10^{-4}$	$3 \times 10^{-7} \sim 3 \times 10^{-5}$	可	
4	光電球(每個)	$10^{-2} \sim 10^{-1}$	$10^{-3} \sim 10^{-2}$	$10^{-4} \sim 10^{-3}$	可	
5	大氣數據感測器(每個)	$10^{-2} \sim 10^{-1}$	$10^{-3} \sim 10^{-2}$	$10^{-4} \sim 10^{-3}$	可	
	1~5加總後的物理下限	10^{-1}	10^{-2}	10^{-3} (更可能 10^{-2})		

(資料來源：作者自製)

表三 雙發重戰機對L波段雷達的RCS物理下限估計表

		先天量級 (無吸波材料)	吸波塗料 (降低10倍)	吸波塗料 (降低100倍)	可否 排除
1	天線罩(每個)	$3 \times 10^{-4} \sim 3 \times 10^{-4}$	塗料會吸收自己的工作波段，故不考慮		否
	總合物理下限 (考慮多個天線罩)	$>10^{-3}$			
2	邊緣繞射(全機)	$10^{-3} \sim 10$	$10^{-2} \sim 1$	$10^{-3} \sim 10^{-1}$	否
	1~2加總 之物理下限	10^{-1}	10^{-2}	10^{-3}	
有機會排除項(估計更真實的極限值)					
3	光電預警器(每個)	略			可
4	光電球(每個)	$10^{-2} \sim 10^{-1}$	$10^{-3} \sim 10^{-2}$	$10^{-4} \sim 10^{-3}$	可
5	大氣數據感測器(每個)	略			可
	1~5加總後的物理下限	1	10^{-1}	10^{-2}	

(資料來源：作者自製)

表四 雙發重戰機對毫米波段雷達的RCS物理下限估計表

		先天量級 (無吸波材料)	吸波塗料 (降低10倍)	吸波塗料 (降低100倍)	可否 排除	
1	天線罩(每個)	$3 \times 10^{-6} \sim 3 \times 10^{-4}$	塗料會吸收自己的工作波段，故不考慮		否	
	總合物理下限 (考慮多個天線罩)	$>10^{-5}$				
2	邊緣繞射(全機)	$10^{-3} \sim 10^{-1}$	$10^{-3} \sim 10^{-1}$	$10^{-4} \sim 10^{-2}$	否	
3	縫隙繞射(全機)	1	10^{-1}	10^{-2}		
	1~3加總之物理下限	1	10^{-1}	10^{-2}		
有機會排除項(估計更真實的極限值)						
4	光電預警器(每個)	$3 \times 10^{-6} \sim 3 \times 10^{-4}$	$3 \times 10^{-7} \sim 3 \times 10^{-5}$	$3 \times 10^{-8} \sim 3 \times 10^{-6}$	可	
5	光電球(每個)	$10^{-2} \sim 10^{-1}$	$10^{-3} \sim 10^{-2}$	$10^{-4} \sim 10^{-3}$	可	
6	大氣數據感測器(每個)	$10^{-2} \sim 10^{-1}$	$10^{-3} \sim 10^{-2}$	$10^{-4} \sim 10^{-3}$	可	
	1~6加總後的物理下限	1	10^{-1}	10^{-2}		

(資料來源：作者自製)

當有利於匿蹤戰機的假設。如果是正對著特定邊緣方向，例如主翼前緣方向，匿蹤戰機的RCS會出現極大值，在這些方向上匿蹤戰機與傳統戰機互有優劣：

(一)匿蹤外型之所以有效，就是因為回波不像傳統戰機那樣四散，而是集中在特定方向。例如如果所有的面都與後掠角45度的主翼前緣平行，那麼就會將來自正前方的雷達波反射到90度角的方向，有效反射信號非常小，但如果雷達正對著主翼前緣，那剛好所有主要部分的回波都直接回到雷達的方向，連前面假設可以不計的鏡射RCS此時勢必會很顯著。越理想的匿蹤外型在極值方向的RCS通常會越顯著。因此RCS極值有可能非常大。所以若不考慮吸波塗料與材料，則匿蹤戰機的RCS極值有可能超越傳統戰機。

(二)匿蹤戰機的天線、座艙等處的隱匿措施與外型無直接關係，所以在RCS極值方向仍有作用，這是「消」的部分。不過因為極值RCS多是由鏡射所貢獻，因此在極值方向匿蹤戰機類似傳統戰機，天線等處所貢獻的RCS仍算少部分，因此如不考慮吸波塗料，而僅考慮匿蹤座艙蓋與天線，則RCS量級與沒有特殊處理時相當。例如Su-27的各方向RCS約15平方米，主雷達天線最多貢獻若干平方米，因此就算用匿蹤技術使天線的RCS降到0，RCS仍有10平方米左右，量級與15平方米一樣。

(三)匿蹤戰機的塗料在極值方向當然有效，所以又可以降低10~100倍的RCS，這也是「消」的部分。

因此在消長之下，匿蹤戰機極值RCS不

無可能比傳統戰機小，但就算是，量級也相當，此時不管是匿蹤戰機還是傳統戰機，匿蹤能力主要都是由吸波塗料所貢獻。前面估計的RCS其實是前緣、天線罩等對來自正面的雷達波的RCS值，在極值方向，這些部位的RCS值至少必須放大至少1個量級(10倍)，甚至有可能因為共振的關係而放大2~3個量級，例如曲率半徑與波長相當的圓柱的RCS-方位關係圖可以看出，正對著圓柱側面(相當於正對翼前緣)的RCS高達幾何截面積的50倍，為45度角入射時的RCS的500倍！經過這樣修正之後，就算正面RCS為0.001~0.0001平方米，在極值方向也可能放大到0.5~0.05平方米。加上此時必然會有鏡射RCS，其量級大約要以飛機的幾何截面積為基礎加以修正。重型戰機的幾何截面積約有100平方米，考慮塗料的影響，可降1~2個量級，為1~10平方米，如果再考慮實際上不會所有部分都貢獻顯著的RCS，也許可以再降低幾倍，那也有0.1~1平方米級。由此可以得到粗略的結論：匿蹤戰機的RCS極值非常可能放大到0.1~1平方米以上，與傳統戰機使用吸波塗料後量級相當。

匿蹤戰機的RCS極值就算會跟傳統戰機相當，也集中在很窄的範圍，再加上作戰時交戰雙方不斷運動，使得極值方向就算曝露也只是短時間，其實不易捕獲，更難追蹤。因此在考慮戰機對抗或是防空系統的防禦能力時，匿蹤戰機的RCS極值不太具參考價值。

然而倒是有機會善用RCS有極值這一特點，進行反匿蹤防空網的部署。只要兩個防

空雷達相隔適當的距離而可以彼此掩護，那麼就可能讓匿蹤戰機為了不曝露RCS極值，而以平均RCS面對這兩個雷達，這等於用部署方式強制讓匿蹤戰機無法發揮最佳匿蹤性能。關於反匿蹤部署方式，會另以專文討論。

三、極值以外的RCS平均值

而如果不考慮極值方向，則為了估計下限，還是先僅考慮鏡射以外的RCS值在大約0~90度的平均，那麼大約是數十甚至上百倍的正面RCS值。由於實際上多少仍有鏡射RCS值，因此「不考慮極值方向的RCS平均」可考慮為正面RCS的數十倍，以量級論是10~100倍。

簡單的說，對理想匿蹤戰機而言，較可能的正面RCS值約是正面RCS下限值的10倍，有參考價值的平均RCS(不考慮極值的平均值)約是下限值的數十倍，RCS極值則是正面下限值的100倍以上甚至與傳統戰機相當。據本文分析，各種常用的RCS與正面下限值的概略換算關係整理如表五。

需注意的是，這裡提到的換算關係都是考慮到「方向」對RCS的影響，也就是只適用於RCS對方向很敏感的情況，也就是理想

的匿蹤戰機。對於外型設計上沒有那麼嚴格的匿蹤戰機，RCS的下限被某些沒有匿蹤外形的物體所制約，那表五的換算關係就不適用。例如由表二可見，當飛機上有光電球或外露的大氣數據感測器時，飛機的RCS下限量級就與這些部位相同，而這些部件的RCS與方向幾乎無關，這樣一來，隨著角度變化，RCS增加幅度就不會像理想匿蹤戰機那麼明顯。如果說理想匿蹤戰機的RCS可以修正成正面最小值的100倍，那麼有有光電球等設備的匿蹤戰機的修正幅度大約只有10倍，詳見下文討論。

四、考慮外掛物

以上討論的都是無外掛的情況，適用於有內彈艙設計的匿蹤戰機。但除了一開始就有匿蹤設計的新型飛機外，許多4+代戰機也引入匿蹤設計，例如EF-2000、Rafale均號稱也有匿蹤能力，而美國在2010年以後陸續推出的F-15SE與F/A-18E/F International方案甚至進一步引入外掛彈艙設計。這些改良型戰機真的可以達到號稱的匿蹤能力嗎？F-15SE與「國際大黃蜂」會因為出自匿蹤老手美國而有什麼不得了的匿蹤能力嗎？

戰機想要有戰鬥力，就必須攜帶武器。

表五 理想匿蹤戰機各種常用的RCS與正面下限值的概略換算關係

	正面		不考慮極值的平均值	極值方向
	下限(無鏡射)	較可能(考慮鏡射)	不考慮鏡射	
RCS值	取表1~4數據設為A	10A	10~100A	>100A 更可能在0.1~1平方米以上
X波段計算例(平方米)				
F-22	0.0001~0.001	0.001~0.01	0.01~0.1	0.1~1以上

(資料來源：作者自製)

空對空飛彈是空用武器中尺寸較小的。以俄製R-77中程空對空飛彈來看，其彈身是口徑0.2m，長3.6m的圓柱，其側面的幾何截面積約是0.7平方米，實際上還有彈翼，因此幾何截面積級數可考慮為1平方米。考慮敵方以45度傾斜角度偵測，RCS可能降低10倍以上，變成0.1平方米或更低，如果噴上吸波塗料，可望再降低1~2個量級，也就是最低可以到0.01甚至0.001平方米。如果以更大的傾斜角照射，彈身與彈翼造成的RCS當然會更低，但就像圓柱RCS-方位關係圖一樣，這時導引頭的貢獻出現。雷達罩必須透波，導引頭當然也是良好反射體，其幾何截面積大約是0.01平方米，但天線的RCS通常比幾何截面積更大。換言之，不論從哪個角度看、不論飛彈本身有沒有匿蹤設計，空對空飛彈的RCS量級一定在0.01平方米以上，相當於理想匿蹤戰機的全機RCS。而且為了掛載武器，需要掛架，掛架本身也相當於外掛物，而且掛架與機翼、機身之間幾乎必然會有90度交角，這都會帶來其他的RCS。

因此，只要戰機要外掛武器作戰，則不論其機身設計多好，其RCS下限就是0.01平方米的倍數，若干枚武器加在一起再加上掛架的貢獻，RCS就會超過0.1平方米，這對傳統戰機來說也算是匿蹤，但在若干新型雷達面前這只能算低可視度。有資料指出EF-2000的RCS在0.05~0.25平方米¹¹，那種小於0.1平方米的數值只可能是無外掛的情況，實戰意義不大。

由此也可以發現一個經驗規律：需要外掛武器作戰的飛機，RCS就不可能低於0.1平方米，就算能，也是不具實戰意義的狀態。

為了解決外掛武器破壞匿蹤的問題，可以採用外掛彈艙。外掛彈艙是一個大型的外掛物，本身考慮匿蹤設計，然後將武器安置於其內。例如美國F-15SE就是將F-15E的適形油箱改成彈艙，而「國際版F/A-18E/F」則是在機腹中線掛一個有匿蹤外型、看似副油箱或大型莢艙的外掛彈艙。外掛彈艙可以採用匿蹤設計，而且不需要透波，因此有機會突破空對空飛彈導引頭構成的RCS下限，使得採用外掛彈艙設計的飛機的RCS有機會降到0.1平方米以下。

至於外掛彈艙能降低多少RCS，還是要看具體設計。例如F-15SE的彈艙就是F-15E適形油箱改來的，他是安裝在機翼與進氣道交角處，安裝之後本身與機翼也有近90交角，因此其RCS或許比直接外掛的武器小，但本身的RCS也不會太小。「國際F/A-18E/F」的彈艙則有稜角設計，雖然體型不小，RCS卻有可能比飛彈還小。其透過掛架安裝在機腹中線，使得在機腹、掛架、莢艙之間有縫隙以及若干正交角，若該處沒處理好可能會破壞匿蹤效果，但由於彈艙與機腹非常貼近，因此問題不一定會太大。F/A-18E/F外型上比F-15更符合匿蹤原則，加上外掛彈艙又有明顯匿蹤外型，因此「國際大黃蜂」的匿蹤能力應該會優於F-15SE。關於這類傳統戰機匿蹤大改方案的RCS下限，詳見稍後討論。

11 <http://typhoon.starstreak.net/forum/viewtopic.php?f=1&t=1171>



五、不同國情不同標準？

以上由物理基礎出發，雖然不能精確的算出飛機的RCS值，但已可界定出物理極限的範圍。從中也可以知道，不論是T-50總設計師所說的F-22的RCS為0.3~0.4平方米，還是美國空軍公布的0.0001~0.0002平方米，都是可能的數據，只是條件不同罷了。

很有趣的是，從美俄公布的RCS數據，可以看出雙方態度上的差異：俄國所公布的大都是0.1平方米以上，所以看起來匿蹤戰機倒不難反制，而美國公布的是小1000倍的數據，則顯得匿蹤戰機無可擊敗。

為何差異那麼大？也許有人會認為，俄國是匿蹤科技不如美國，所以故意挑平均值來看，這樣雙方差距就沒那麼大。如果用軍火商想打廣告的角度來看，這或許有道理，但這些裝備也是俄軍自己在裝備的，俄軍也不是笨蛋，不可能無道理的直接買軍火商的單，反而俄系裝備通常都是參考軍方的使用需求，以及各研究院針對戰爭形態所做的量化研究，而制定規格的，不可能由軍火商片面的發展然後直接投入使用。

如果從國情出發，就會發現美俄對匿蹤戰機RCS值的態度其實各有道理。美國本土相對安全，加上已做了全球佈局，所以空軍會以境外部署、境外作戰的攻勢模式，來維護美國利益與安全，所以針對特定範圍有極低的RCS以大幅增加作戰成功率，就很有價值。例如F-22也許無法對每一個防空系統都隱形，但也許可以針對少數幾個實施「點穴式」攻擊，打出防空缺口，以利後續攻勢行動。

而俄羅斯地體條件相對較差，所以其防空部隊與航空兵發展成以守勢為主。俄羅斯有不小的領土難以部署防空飛彈與雷達，僅能依靠MiG-31一型飛機來防守，由此便可窺見俄羅斯空防的吃緊程度。以守勢來說，只要平均起來能發現F-22，那麼F-22就算能點穴式的打開防空缺口，他還是可能被擊毀。此外，匿蹤戰機如果要有極佳的隱匿性，火力會有所限制、通信也會有限制，結果就是也許有奇襲能力，但是破壞規模不會太大，所以「平均起來」匿蹤戰機的威脅是可以被抵消的。這裡已經有點「同歸於盡」的味道，也就是「可能被打傷，但是贏的機率高」。俄國因為地理條件的關係，自古以來都難以維持絕對安全的國土，而是「先被打傷，最後打贏」，因此「會受傷，但平均起來會贏」對俄國甚至其它地理條件不優渥的國家來說已經算有效。

進一步考慮鏡射RCS的量級

前面為了估算匿蹤戰機RCS的下限，我們先把最難掌握的鏡射部分剔除，假設為0，僅計算繞射等與形狀無關的回波，估計出來的可視為物理下限，據此已經掌握不同類型匿蹤戰機的匿蹤能力量級。如果要更逼近真實，當然要考慮鏡射RCS，在前面的計算我們很概略的說「如果要進一步考慮鏡射，可以再放大一個量級」。事實上各種回波現象造成的RCS大約是相加成關係，而非乘積關係，之所以概略的說考慮鏡射要放大一個量級，是基於以下假設：

(一)假設鏡射RCS實際上不可能遠小於其

他部分的RCS和，畢竟鏡射RCS來自物體表面的反射，物體越大，反射源當然越多；

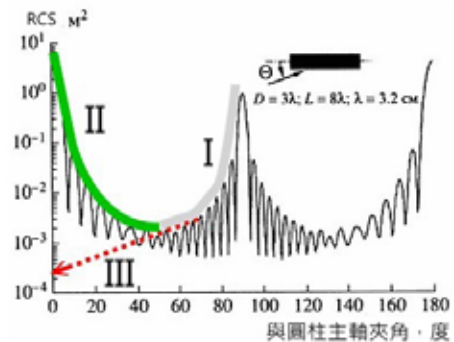
(二)假設鏡射RCS可以降低到與其他RCS總合相當；

(三)如前文所述，兩個量級相當的數字相加可以考慮為放大一個量級，例如0.3與0.4量級分別是0.1，但加起來是0.7也可視為1。

如果鏡射RCS實際上量級比其他部分的RCS和還要小，以上說的不成立，反之，如果鏡射RCS實際量級較大，那麼總RCS仍舊約是鏡射RCS。在這種情況下把鏡射RCS視為其他部分的總合的10倍也已經算很低了，因此在粗略的估計上，將考慮鏡射以後的總RCS視為鏡射以外RCS總和的10倍有其合理性。以下要進一步界定鏡射RCS的量級，以便更精確的找出匿蹤戰機的RCS量級。

一、正面鏡射RCS量級下限估計

不妨對鏡射RCS作個物理量分析。在圖示的曲率半徑與波長相當的圓柱RCS-方位圖中(圖八)，圓柱側面的RCS約為幾何截面積的50倍，45度角入射時RCS為幾何截面積的1/10倍，為側面RCS的1/500倍。該實驗所用的圓柱的曲率半徑與尺寸均與波長相當，因此會出現RCS比幾何截面積大很多的共振現象，在估算邊緣繞射RCS時必須考慮此一因素，因此45度入射時的RCS便以幾何截面積的1/10計算。然而現在要考慮的是繞射以外的部位的RCS，所以不需要考慮共振放大現象，那麼該RCS-方位圖的意義在於「45度入射時RCS會是正面入射時的1/500」，而在沒有共振效應的情況下，圓柱側面的RCS量級



I：RCS隨傾斜角增大而減小

II：因有限長度圓柱頂面影響使RCS增大

III：依據I區的趨勢外推，可推估角度(形狀)的影響最多可使RCS降低4個量級

從有限長度圓柱的 RCS-方位 關係
實驗結果推估匿蹤外型的極限性能

圖八 匿蹤外型極限性能推估
(資料來源：VRAN)

應與幾何截面積相當。

因此飛機的鏡射RCS大約可由幾何截面積為基礎加以修正。例如雙發重型戰機的幾何截面積約為100平方米，在沒有匿蹤措施時，Su-35在80~100度方向，RCS超過40平方米，與幾何截面積快要同量級(圖一)，這是因為側面時，Su-35的垂直尾翼、進氣道壁等處會正向反射，因此RCS幾乎是幾何截面積，而在0~80度的RCS在20~30平方米以及10平方米之間跳動，平均約15平方米，較幾何截面積小一個量級，這是因為這些時候雷達波大都是傾斜照射飛機表面，因此有了「形狀匿蹤」的效果，因此RCS較幾何截面積小一個量級。由此可見由幾何截面積為基礎，加以修正以估計鏡射RCS的量級是可行的。

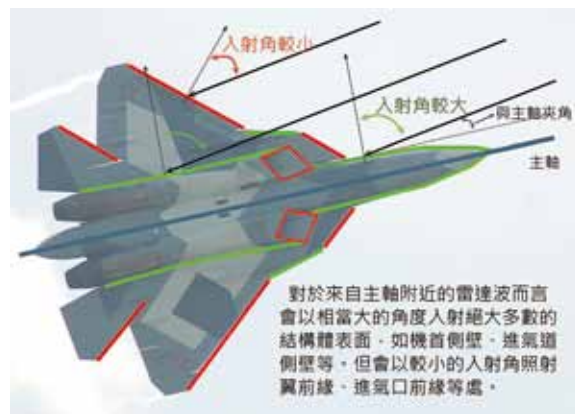
在圓柱的RCS-方位關係途中，以正對

著圓柱側面的方向為0度，則在45度方向時RCS是0度的約1/1000倍(1/500)。超過45度時RCS會增大是因為圖示為有限長度圓柱，因此大角度時出現圓柱頂面正反射等效應的影響。如果是無限長圓柱，那麼理論上角度越大RCS會越小。如果由圖中的曲線外推，則接近90度時，RCS約會降到0度的1/10,000倍(圖八)，也就是降低約4個量級。由此大約可推估，匿蹤外型的物理極限約是降低4個量級的RCS，如果使用吸波塗料降低10或100倍的回波，則鏡射RCS極限是降低5~6個量級，如果幾何截面積是100平方米，那麼鏡射RCS的下限就是 $10^{-4} \sim 10^{-3}$ 平方米。這的確是比光電球、前翼等部位的RCS小得多，但卻與繞射、匿蹤天線等無可避免的部分的總和相當。

因此在最放寬的條件下，當其他部分的RCS總和量級大於 $10^{-4} \sim 10^{-3}$ 平方米時，不考慮鏡射RCS倒無妨，但當其他部分的總和相當於甚至低於上述範圍時，就必須考慮之。由於前面估計中，最理想情況下鏡射以外的部分的正面RCS總和下限就是 $10^{-4} \sim 10^{-3}$ 平方米，因此將之乘以若干倍來當做更逼真的RCS下限較為合理。因此更逼真的正面的RCS物理極限應是0.001平方米。

二、非極值方向鏡射RCS平均量級

戰機正面最主要的幾乎正向的反射源是動力系統、雷達天線、座艙。在匿蹤戰機中，如果能妥善隱藏這些部位，那麼除了與主翼前緣平行的邊緣會以大約40~50度對著來自正面的雷達外，絕大多數表面，如主翼上下表面、進氣道壁、機身側壁等，幾乎



圖九 絕大多數表面，如主翼上下表面、進氣道壁、機身側壁等，幾乎都是與雷達波夾超大角度。

(資料來源：www.sukhoi.org)

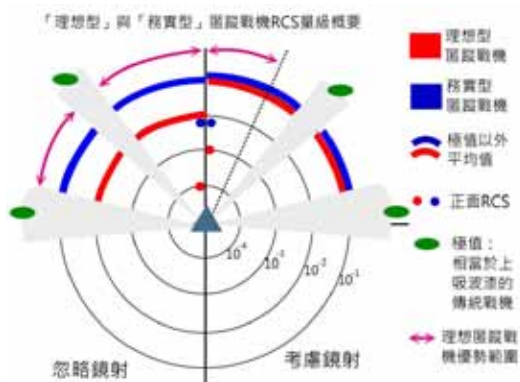
都是與雷達波夾超大角度(圖九)，因此正面的鏡射RCS或許真能降到下限值。但在0~40度，尚未出現極值的鏡射RCS平均約是最小值的若干倍，因此平均而言，形狀能降低的RCS幅度不是4個量級而是3個量級，考慮塗料則是4~5個量級。這樣一來不考慮極值方向的鏡射RCS平均大約是0.01~0.001平方米。

三、總RCS量級修正

參考表二估計出的不考慮鏡射時的正面RCS下限，可發現考慮鏡射RCS後，理想的匿蹤戰機與功能更複雜的匿蹤戰機的RCS下限分別要修正為(圖十)：

(一)理想匿蹤戰機(不考慮光電探測器、大氣數據感測器)的正面RCS本來主要來自天線與邊緣繞射，其量級下限都是 10^{-4} 平方米，若考慮正面鏡射RCS下限量級為 $10^{-4} \sim 10^{-3}$ 平方米，則總RCS正面下限幾乎確定是 10^{-3} 平方米級。

(二)對於有光電感測器等設備的「務實



圖十 「理想型」與「務實型」匿蹤戰機RCS量級概要
(資料來源：作者自製)

型」匿蹤戰機，在不考慮鏡射時的正面RCS下限量級是 $10^{-3} \sim 10^{-2}$ 平方米，而且更可能是 10^{-2} 平方米，因此考慮 $10^{-4} \sim 10^{-3}$ 平方米的鏡射部分後，正面量級仍是 10^{-2} 平方米。

(三)理想匿蹤戰機的鏡射、繞射、天線等部位的RCS都與方向有關，因此極值以外方向的平均值、極值可比照表五，分別修正為正面值的10~100倍與100倍。

(四)承上，以0~40度內的RCS平均值為例，鏡射RCS會是正面值的若干倍(<10倍)，繞射RCS則會修正成正面的數十倍，因此RCS總和平均值會由鏡射以外的部分所決定，也就是正面值的數十倍(10~100倍)。

(五)「務實型」匿蹤戰機的RCS可能受到光電球、大氣感測器等部位的制約，這些部位的RCS幾乎無方向性，因此極值以外的平均值會與正面值相當，差距應在1個量級以內。例如在0~40度的平均，光電球等處的RCS與正面差不多，而鏡射RCS則是正面的若干倍，因此如果正面鏡射RCS量級比光電球等處還小，RCS就會被光電球制約，而幾

乎沒有方向性，反之若正面鏡射RCS量級大於或等於光電球等部位，則平均RCS會是正面值的1~10倍。因此前面才說對於非理想匿蹤戰機而言，極值方向以外的RCS平均大約是正面值的10倍。

依據這裡的修正，則F-22的正面RCS下限應為0.001平方米，是美國空軍公布的0.0001~0.0002平方米的5~10倍。就量級而言這並沒有衝突，因為本文考慮的其實是小角度範圍內的平均，而不管從圓柱的RCS-方位圖還是真實飛機的RCS-方位圖可看出，RCS在小角度內其實會有很劇烈的跳動。因此也不能排除美軍公開的是最小值。此外，本文考慮的塗料最佳的是吸收99%的塗料，如果實務上想加強正面的匿蹤能力，將正面的局部表面塗上更厚的塗料，就可能讓鏡射RCS量級進一步降低，那就可能只保留不可避免的天線罩部分，使得RCS降到物理下限。

如果F-22這類「理想型」匿蹤戰機的正面RCS下限是0.001平方米，那麼極值以外的RCS平均應在0.01~0.1平方米。而T-50這類有光電球等設備的「務實型」匿蹤戰機的正面RCS下限是0.01平方米，極值以外的RCS平均約是0.1平方米。也就是T-50的最小RCS難以與F-22相比，但RCS與方向的分佈會較為「均勻」，使得在考慮較大範圍的平均RCS時，兩者的RCS反而可能相當，這可能就是為什麼俄國設計師會指出「F-22是0.3~0.4平方米，T-50與之相當」。

至此，本文首先剔除對形狀最敏感的鏡射RCS，計算其他部位的RCS總和以估計匿

蹤戰機正面RCS量級下限，並以此下限值為基礎修正出極值以外的RCS平均量級、極值量級等，並考慮裸機與有外掛的狀況。之後再進一步估計鏡射RCS的量級以進一步逼近真實量級。為了方便讀者理解，這裡進一步將本文的計算流程圖整理如(圖十一)以供參考。此外，不同方向的雷達波對表面的概略入射角的取用依據簡要如(圖十二)。

若干具體型號試算

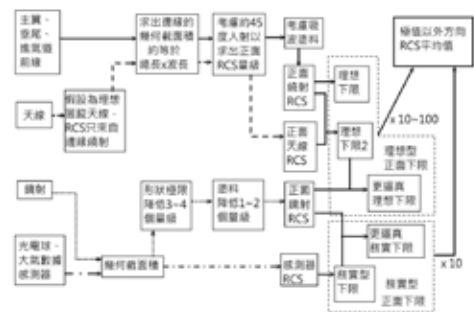
以上考慮的是「理想匿蹤外型」、「理想匿蹤外型+大量感測器+光電感測器」、以及「普通飛機+外掛匿蹤莢艙」的RCS物理下限(正面、極值以外平均)。現在進一步考慮若干具體型號。

一、F-22

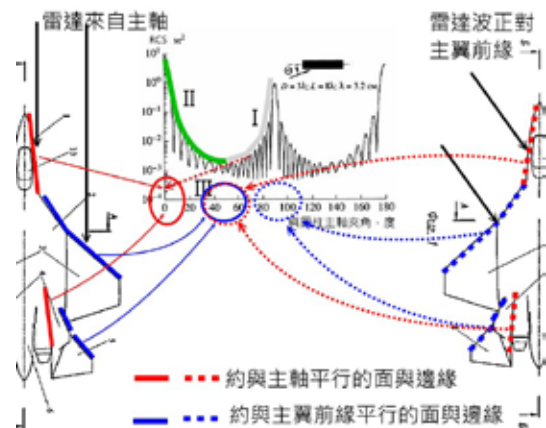
F-22沒有光電球、光電感測器、也幾乎見不到外露的感測器，是目前的第五代戰機中匿蹤設計最嚴格者，本文的「理想匿蹤戰機」就是以F-22為參考，在此不贅述。

二、T-50

T-50大約就是本文所說的「務實型匿蹤戰機」，RCS量級可參考內文，現進一步考慮其他特徵。現有的T-50(T-50-1~T-50-5)的發動機艙外觀呈圓桶狀(圖十三)，而且露出金屬原色，有略小於1/2外露於飛機的下半球，並有極小部分露在上半球，其中上半球的外露部分很小，加上有垂尾屏蔽，為了簡單暫且忽略。露在下半球的發動機艙在側面90度造成的RCS約是其幾何截面積，約2平方



圖十一 本文估計RCS量級流程圖
(資料來源：作者自製)



圖十二 量級分析時，不同方向的雷達波對表面的概略入射角取用依據
(資料來源：作者自製)

米(口徑約1m，長度約4m，假設一半外露)，在正對著主翼前緣的方向，大約降500倍，在0.004平方米，量級小於其他部分，因此不構成影響。唯在90度附近會有至少2平方米的RCS，相當於傳統戰機。由此可見雖然T-50的發動機艙可能導致側面的匿蹤設計形同虛設，但至少對著前半球高威脅區域會有0.01~0.1平方米級的RCS。

印度在2010年報導表示T-50的RCS是0.5平方米，為Su-30MKI的1/40¹²；而蘇霍伊公

12 《India, Russia close to PACT on next generation fighter》, Business Standard, New Delhi?January 05, 2010.

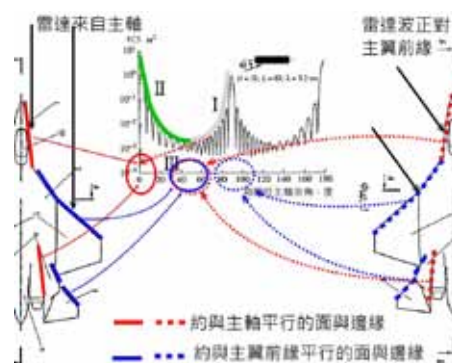
司一份關於T-50匿蹤設計的專利說明書也提到，在某些考慮的角度範圍內，Su-27的平均RCS是10~15平方米，而透過這一系列匿蹤措施後，T-50的RCS降至0.1~1平方米¹³。由此可見印度所表示的應該也是平均值。整合這些資料以及物理極限的估計可知，T-50扣除RCS極值方位的平均RCS是0.1~1平方米級，這應該無太大疑義。而正面小範圍應可低於0.1平方米，下限約0.01平方米。

三、F-35

與T-50比對，F-35也有不少光電窗口與大量感測器，因此RCS應該與T-50同級，只是因為F-35體型小所以會略小。F-35尾部僅上表面與下表面稍微露出圓桶狀的發動機艙外圍，發動機艙對匿蹤性能的破壞程度比較小，因此F-35的RCS應會介於F-22與T-50之間。美國空軍公布的0.0015平方米應該是窄範圍特例。甚至有部分資料指出，F-35最小RCS甚至低於F-22，只是取平均會比較大¹⁴。

四、F-15SE、國際版F/A-18E/F、Rafale、EF-2000

至於其他改良型戰機，基本上不可能優於全新設計的T-50，所以如果考慮更多真實因素後T-50的平均RCS是0.1平方米級，EF-2000、Rafale、F-15SE、F/A-18E/F



圖十三 表演後降落的T-50-2，可清楚見到期發動機艙的圓桶狀外觀。

(資料來源：作者自製)

International應不可能低於此。或是說只有在更窄的角度範圍的平均才可能低於此。

若干公開的資訊有助於吾人估計這類「傳統戰機匿蹤改良」後的RCS量級。首先Su-27、F-15這類雙發戰機的RCS約是12~20平方米基本上已無爭議。而根據俄國資料，發動機正面結構與進氣道的RCS占正面RCS的約60%¹⁵，雷達天線的RCS是幾何截面積的若干倍¹⁶，也就是若干平方米。可見如果正面RCS是12~20平方米，則發動機葉片RCS約7~12平方米，雷達天線若干平方米，其餘部位總和約5平方米。

誇張的假設雷達天線加以隱蔽至0，則動力系統以外的正面RCS約5平方米，使用塗料降低10或100倍後可到0.5或0.05平方米。動力

13 《Многофункциональный самолет с пониженной радиолокационной заметностью》，RU patent, RU2502643 C2, 27.DEC.2013

14 D.Jenn, «RCS reduction (chapter 7)», Naval Postgraduate school, Department of Electrical & Computer Engineering, Fall 2011. <http://faculty.nps.edu/jenn/EC4630/RCSredux.pdf>

15 《Многофункциональный самолет с пониженной радиолокационной заметностью》，RU patent, RU2502643 C2, 27.DEC.2013

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



系統的部分，Su-35並沒有使用遮罩，僅在進氣道壁與葉片使用吸波塗料的情況下，約可使動力系統的RCS降低10倍¹⁷，即約0.7~1.2平方米。這樣一來，在機身使用吸收率90%塗料的情況下Su-35的正面RCS可降到1.2~1.7平方米，如果機身吸波塗料吸收率99%，則正面RCS降到0.7~1.2平方米。根據航展公布的數據，Su-35的一系列匿蹤措施使RCS降低5~6倍，換算約2~4平方米，與這裡估計的量級接近。

F-15SE與國際F/A-18E/F應有使用發動機遮罩，遮罩本身的RCS比發動機葉片小很多，加上用於遮罩的塗料可不考慮高應力，故可用更好的塗料，不難讓正面RCS降低2個量級以上，這樣一來其動力系統貢獻的RCS可降到0.07~0.12平方米以下。在機身使用吸收率90%與99%塗料的情況下，全機正面RCS約為0.5平方米或0.1~0.2平方米。

五、殲20、殲31

殲20、殲31大量吸收了F-22、F-35的外型設計。殲20的機身橫截面幾乎就是單調的梯形，線條甚至比F-22更單調，這相對容易設計出很低的RCS。而其採用緊靠的發動機與兩側進氣道外加DSI鼓包，讓正面幾乎無法看見發動機。發動機噴嘴雖然是圓形的，但卻被碩大的後機身包覆，使得發動機艙的外圍仍可修飾成有稜角的構型，這點不只優於T-50，甚至優於F-35。

殲20外型上明顯有可能破壞匿蹤的只

有兩點：首先是尾部的圓形噴嘴以及腹鰭，再來是前翼。其中對作戰比較直接相關的是影響前半球RCS的前翼。前翼要不斷的活動來配平，而且與同噸位傳統佈局戰機相比，前翼面積與力臂通常比平尾小，所以偏轉角度通常比平尾大，再加上又是大喇喇暴露在前方，所以被認為是匿蹤大忌，加上前翼的尺寸與外型通常造成許多尖銳邊緣，有可能落在共振散射區，而破壞全機的匿蹤效果。然而這是就嚴格的匿蹤設計而言，實際上前翼的平面面積不會超過個位數平方米，就算前翼誇張的偏轉超過45度，RCS的量級還是比幾何面積小2~3個量級，如果用上吸波塗料，可以再降1~2個量級，這樣一來前翼貢獻的鏡射RCS量級非常小，只是邊緣相對較尖銳，繞射可能更顯著，可以視為在主翼前面多了一對繞射源，對於想要追求更低的RCS的F-22來說，這或許破壞匿蹤，但如果只追求0.01~0.1平方米的RCS，這一點RCS就不構成威脅，但仍屬於匿蹤戰機，並不會誇張到「有了前翼飛機就無法匿蹤」。

殲20的機體外型更加簡單又有稜角，更容易對匿蹤優化，因此殲20有機會做到比T-50更小的RCS，甚至因為曲線比F-35單調，所以匿蹤外型甚至有可能勝過F-35。也就是說，除非有充分的證據，否則萬不能只因為殲20是「新手作品」就片面認定其匿蹤設計一定比美製F-35還差。需要追蹤的是其相關的材料技術，如吸波塗料的性能如何？是否

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

有擋波吸波座艙蓋技術？天線罩是否有選頻或可控透波能力？如果有，那麼殲20的匿蹤能力當能與F-35競爭，如果沒有，那依據俄國至2001年的研究(當時俄國沒有開發選頻天線罩)，考慮天線等的影響，有人戰機RCS下限不會低於0.3平方米¹⁸。

至此可以整理出，就不考慮極值的RCS平均值而論，幾種匿蹤戰機的RCS由大而小可以分為「F-15SE、國際F/A-18E/F」、「T-50、F-35」、F-22等三級，相鄰級數之間RCS差距應不超過1個量級(10倍)。

六、B-2戰略轟炸機

前面主要討論戰術戰機，現在稍微討論一下B-2轟炸機。根據表1，B-2的RCS與F-22同為0.0001平方米。就算這是基於不同標準，但幾合尺寸大好幾倍的戰略轟炸機卻與戰術戰機有同級的RCS，的確相當驚人。這種可能性並非沒有，B-2雖然體型更大，但也因為體型大，所以有機會減少會發生繞射的部位，使得匿蹤外型更完美，此外轟炸機更大更重且不講求高機動，也更不需考慮密集出勤的前線環境，故可以用更好、更多、甚至更重的匿蹤塗料，所以體型的放大其實被更精進的匿蹤技術補償了。

具體的說，B-2翼展52.4m，約為雙發重型戰機的3~4倍，因此暴露於正面的前緣尺寸大約也是重戰機的3~4倍，但由於飛機本身很大，可以用更多的大曲率半徑表面來構成前緣，減少繞射，因此繞射RCS應不超過

重戰機的3~4倍，如果再考慮較複雜的匿蹤措施如更多塗料等，繞射RCS也許只與重戰機相當。此外B-2的長度21m，與戰機相當，因此幾合面積其實只大約與翼展成正比，為戰機的5倍以內。但B-2單調的飛翼造型相當容易降低RCS，使得鏡射RCS不難降得比戰術戰機還低。所以從這簡單的數量關係就可以知道，B-2的RCS的確是可能與戰術戰機相當甚至更低。

結 論

由於探測距離與RCS的四次方根成正比，因此RCS的少量誤差對探距影響不大，重要的是量級。本文基於圓球與圓柱的RCS-尺寸-波長關係的物理原理，將複雜的飛機簡化成局部的球面或圓柱面，以估算RCS量級，基於量級分析，吾人雖然無法精確判定具體型號的RCS值，但可以大致掌握各主要成分的RCS量級，掌握了量級，就不會盲目的追逐不必要的技術，或是盲目的相信宣傳數據。也有助於理解匿蹤科技該著重在哪裡？並有助於研究反匿蹤技術與措施。本系列專文第三篇將詳細討論反匿蹤技術、戰術、甚至反匿蹤部署。

作者簡介

楊政衛先生，國立成功大學物理系學士，俄羅斯聖彼得堡大學物理系博士生，筆名楊可夫斯基，為尖端科技專欄作家。

18 Yefim Gordon, "Sukhoi S-37 and Mikoyan MFI – Russian Fifth-Generation Fighter Technology Demonstrators", Midland Publishing, 2001, p.97