

· 魏楞傑 ·

# 對空飛彈導引系統

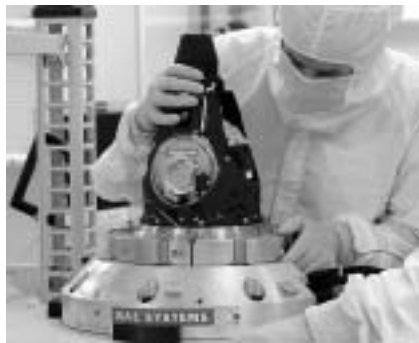
## 前言

現今的空戰中，飛彈已成為成敗勝負的關鍵，能夠儘快發現敵機並率先發射飛彈，幾乎就會是最後勝利的一方，而飛彈要在短促的時間內鎖定快速運動的敵機，進而疾速進襲並加以摧毀，就全靠導引系統的威力。第一代的響尾蛇飛彈以被動尋熱方式尋找目標，獵殺率不甚理想，如今最新式的飛彈在主動雷達歸向導引系統與雙向資料鏈搭配下，被鎖定的敵機很難有逃脫的機會。

## 飛彈系統

所謂的飛彈，是指由火箭及吸氣式(air-breathing)引擎，或兩者合力推動，並裝有某種導引裝置的武器系統。事實上，任何飛彈要遂行探測、攔截、摧毀目標，導引系統是不可或缺的一部分。

在接戰目標的過程中，飛彈系統必須完成偵獲目標、追蹤目標、經導引以攔截目標及摧毀目標等功能。



美國戰區高空防禦(THAAD)飛彈的紅外線尋標器，以先進材料製成濾光鏡。

飛彈在接戰目標時，導引系統會接收或計算所需的導航命令，導引飛彈循著某種軌跡攔截目標。在某些飛彈系統中，飛彈本身的尋標器(Seeker)和電腦自動駕駛(Autopilot)產生這些命令；而在另一些飛彈系統裡，則是由發射飛彈的載機藉由資料鏈(Data Link)發送訊息給進襲中的飛彈，提供修正航向的命令。

有些飛彈在不同的飛行階段會採取不同的導引方式。最典型的是在進襲飛行中，以慣性導航加資料鏈校正飛行路徑，它的導引系統主要是指終端(terminal phase)攻擊時的導航方式；而另外的一些飛彈，則可能因應不同的環境，在不同的導航方式中變換。譬如原本以主動雷達歸向(homing)導引向目標前進，一旦遭遇強烈的電子干擾，轉而把干擾源當做目標進行攻擊(Home-on-Jam)。

以前的載機發射飛彈後，仍持續發送導航命令以指揮飛彈，如今這種方式已屬過時的科技，不但空對空飛彈不再使用，其他的飛彈也對此種方式也都敬謝不敏。現今大多數飛彈採用的導引方式是所謂的歸向導引(Homing Guidance)，飛彈以本身的尋標器偵測目標可辨識的特徵，指引飛彈飛向目標。在此種導引方式下，導引系統關注的只有飛彈和目標這兩個點，因此歸向導引也被稱為二點導引(Two-Point Guidance)。

根據如何辨識目標，歸向導引分為三種：被動歸向、半主動歸向、主動歸向。

## 被動歸向導引

被動歸向導引中所謂的「被動」，是指飛彈本身沒有任何會發射能量的偵測器，發射飛彈的載機也未發射任何訊號去導引飛彈，純粹由飛彈尋標器搜尋目標放射的電磁輻射，導引飛彈攔截目標。最典型的被動歸向導引是紅外線導引。

使用紅外線尋標器的飛彈，通常被稱為「尋熱飛彈」。紅外線頻率位在可見光頻率之下，波長介於零點八到一千微米之間，較可見光長，但比微波短，具有可聚焦、發散、吸收、反射的特性，不論人工製造物或是人

體，只要會發熱或維持熱量，就會散發強烈的紅外線。而對飛彈而言，它的潛在目標通常都會反射或發射紅外線，飛彈尋標器偵測到後，就可得知目標的相對位置，進而對飛行控制面發出導引訊號。

現今的戰機雖經過精密的設計，仍然會發射大量的紅外線，最大的發射源是引擎尾管，典型渦輪噴射引擎的排氣溫度約為攝氏九百五十度，開啓後燃器時會飆升到約攝氏二千度。此外，飛機在高速飛行時，蒙皮因空氣摩擦也會發熱；而另一個紅外線的來源是陽光的反射。傳統的戰機面漆約會反射陽光中百分之六十的紅外線，美國海軍新式灰色漆約只會反射百分之五到十，最新的匿蹤戰機F-22面漆反射值為機密，但一定更低。

降低飛機紅外線蹤跡的方法很多，例如：降低排氣溫度、以後機身或尾翼結構來掩蔽排氣、座艙罩予以特別塗裝……等，但飛機的紅外線蹤跡無法完全消除。由於飛彈尋標器不斷進步，紅外線導引飛彈的性能也不斷提升，早期的飛彈僅能追尋高熱的引擎尾管，限定由敵機的尾部進襲，如今所謂「全方位」的飛彈，可由兩側甚至迎頭攻擊目標。

## 紅外線導引單元

當目標會發射足供進行偵測及導引的能量時，要設計出「射後不理」(fire-and-forget)的飛彈就不再是件難事。紅外線導引系統的主要組件為位在飛彈鼻錐處，讓特定波長的紅外線通過的濾光鏡，以及濾光鏡後一接收此紅外線的光學模組系統。紅外線資訊經過光學模組系統的信號偵測電子元件，由背景雜訊中隔離出目標位置，再傳送給電腦產生導引命令。

濾光鏡可抑制不需要的背景紅外線，例如：陽光的反射、地表的熱輻射……等。飛彈中使用的濾光鏡有兩種：吸收式(Absorption)及干涉式(Interference)。吸收式允許寬頻段的紅外線通過，目的在抑制陽光的紅外線；干涉式允許通過的頻段很窄，目的在排除不需要的紅外線。

光學模組是導引系統中最複雜的一部分，它擔負兩項基本工作：提供目標的方位資訊、抑制背景紅外線雜訊。它的表面可讓紅外線通過，底層結構則為不透光的特殊型態，設計非常複雜且困難，相關設計資料都被各國列為機密。

以被動方式獲得目標位置還有另一種方法，就是使用陣列式(array)偵測元件，不過它用來排除背景雜訊的電子元件更複雜。陣列式偵測

元件為一種特殊裝置，可將紅外線轉換成電氣訊號，再由飛彈的電腦進行處理。偵測元件有兩種：光導電式(photoconductive)及光電伏特式(photovoltaic)，要明瞭這兩種方式的運作，需要對固態物理有深入的瞭解。簡單地說：前者受到光照射時，電阻值會隨之改變；後者則是受到光照射時，會產生電氣訊號。

偵測元件要使用何種材料，視它在特定波長的靈敏度而定，大部分用的是硒化物(Selenide)、碲化物(Antimonide)、碲化物(Telluride)。第一代響尾蛇飛彈用的舊型偵測器，使用硫化鉛(Lead Sulfide)。現代典型的紅外線感測材料為汞碲鎘(Mercury-Cadmium Telluride)或銻化銦(Indium Antimonide)，這些材料在冷卻的情況下性能較好，靈敏度較高，也能偵測較低溫的物體。典型的冷卻方式包括使用高壓氫氣、液態氮、或是分割式史特林(Stirling)引擎。

早期的紅外線尋標器，對噴射引擎排氣中波長四點二微米的二氧化碳紅外線最為敏感，這種對三到五微米波長的紅外線最敏感的尋標器，稱為單色(single-color)尋標器。現在的尋標器工作波長為大氣吸收性最小的八到十三微米，稱為雙色(two-color)尋

標器，傳統的火焰彈反制措施要瞞騙這種尋標器，並不容易。

最新世代的尋熱飛彈還使用影像紅外線(Imaging IR)尋標器，它是以紅外線輻射成像裝置，類似數位相機中以電荷耦合裝置(Charge Coupled Device)來探測可見光。它以一聚焦平面陣列(Focal plane array)成像裝置來探測紅外線光波，聚焦平面陣列的組成分成兩部分，在鏡頭焦距處有一列對光敏感的像素(pixel)，每個像素約二十微米大小，用鋼材料做成的凸出端(indium bumps)做為電氣接點，順便把讀取電子組件(Read Out Electronics)黏附於像素陣列上，讀取電子組件將大量的像素輸出訊號轉換成脈波串流(pulse train)，使得輸出訊號線的數目，由好幾萬條降到一百條以下。

聚焦平面陣列的訊號處理及科技複雜程度，遠超過傳統的光學尋標器，但它的優點是瞬時視野(instantaneous field-of-view)寬闊許多，排除背景雜訊的能力較強，不致失誤鎖定太陽，同時還能分辨多個目標和傳統的火炮彈、干擾絲：等紅外線反制措施。聚焦平面的大視野還有一個很大的好處：當由頭盔瞄準系統(Helmet Mounted Sight)進行目標瞄準

時，可讓飛彈具備大離軸角度(off-boresight)的接戰能力。

不過要製造高品質、高解析度的聚焦平面陣列，以現有的銻化銦、汞碲鎘、砷化鎵銦、氧化釩……等材料而言，不是件容易的事。

聚焦平面陣列的另一個優點是調頻調變(Frequency Modulation)。早期的尋標器使用調幅調變(Amplitude Modulation)來決定目標的位置，但當飛彈逼近目標，目標畫面變得較大時，這種方式會產生較多的雜訊，使得導引誤差增大。改為調頻後可以解決這個問題，尋標器不再受到影像雜訊干擾，可更清楚辨別目標的位置。

德國最新設計的IRIS-T飛彈(Intra-Red Improved Sidewinder with TVC，向量推力控制紅外線改良型響尾蛇飛彈)，它的導引系統就是使用銻化銦紅外線感測器，搭配一部一二八乘一二八像素的聚焦平面陣列影像尋標器，提供正負九十度的大離軸角度接戰能力，還有超高解析度、目標辨識、錯誤警訊抑制、極高的追蹤速率、

智慧型影像處理，可抗衡新式的紅外線反制裝置。

#### 雷達歸向導引

雷達導引系統藉由偵測目標表面反射的雷達回波來導引方向，偵測到的回波經過放大、調變、分析後，可判定目標的方位角及距離。這些數據送到飛彈電腦，由它據以對飛行控制面發出飛行命令。

至於向目標發射雷達波的發射機，可以安置在發射飛彈的載機上(稱為半主動雷達歸向導引)；也可以安置在飛彈上(稱為主動雷達歸向導引)。不論採那一種導引方式，現今的先進飛彈都能分辨地表、海面反射的背景雜波，或是目標反射波，對干擾及電子反制也有很高的排斥能力。

#### 半主動雷達歸向導引



IRIS-T飛彈上有最新科技的尋標器。



雲母飛彈尋標器的脈波都卜勒雷達，具有把干擾源當做目標進行攻擊的能力。



俄羅斯R-27飛彈  
的半主動雷達歸  
向導引尋標器。

在半主動雷達歸向導引系統裡，發射飛彈的載機藉由機上的火控雷達探知目標位置後，將飛彈通電，並將機上發射窄波束雷達連續波(continuous wave)的小型照明器(illuminator)對準目標方向。若此時飛彈可鎖定由目標反射回來的雷達波，就可逕行發射飛彈，這個過程稱為發射前鎖定(Lock-on Before Launch)。

若採取發射前鎖定的方式，在飛彈奔襲的飛行過程中，載機必須全程以照明器籠罩目標，這會大幅度限制載機的行動自由，讓它容易遭到反制性攻擊，在而且載機一次也只能攻擊一個目標。

有些防空飛彈使用類似發射前鎖定的導引方式，但稍有變化，稱為終端半主動雷達導引(Terminal Semi-Active Radar Homing)。這種飛彈以發射後鎖定(Lock-On After Launch)的模式飛向目標的大概位置，飛行途中大部分時間以飛彈本身的慣性進行導航，在最後攻擊階段再啟動半主動

雷達導引。這種方式除了不需照明器持續籠罩目標外，還能在短時間內發射多枚飛彈，由照明器輪流籠罩各目標，可進行近乎同時時間的多目標攻擊。

早期的半主動雷達導引飛彈使用圓錐掃描式尋標器，現在的飛彈多改用單脈波(mono-pulse)尋標器，它的精確度較好，對付電子反制措施能力較佳，下視／下射(look-down/shoot-down)能力及低高度性能都有所改良，不過構造也較複雜。單脈波尋標器中通常有三個尋標頻道(channel)，三頻道訊號相綜合，以獲得持續追蹤目標所需的資訊。第一個頻道負責回波訊號的振幅，另兩個頻道則負責與回波訊號特性有關、但較複雜的物理性功能。接收單元對三個頻道的輸入訊號相位及振幅個別處理後，導引單元完成最後的目標方位角及距離量測。

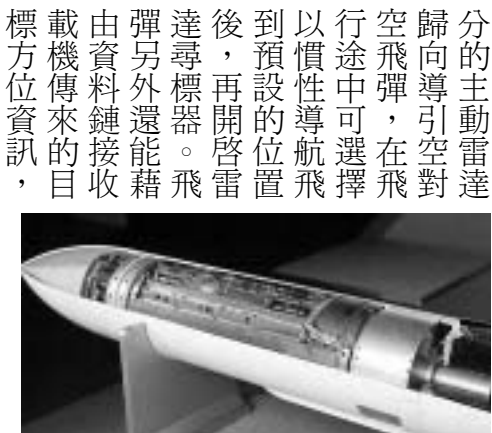
為評估尋標器角度量測的準確性，必須控制三頻道的訊號起伏。在這個過程中，來自地面或雨水的雷達雜波以及其他多餘的反射訊號，會相互干涉，削弱目標方向量測的準確度，得由另一個電子裝備以適當的都卜勒(Doppler)頻道及三頻道間的相關性，對各訊號做更進一步的控制。

半主動雷達導引起源於一九五〇年代末期，一直主宰著導引科技直到一九九〇年代，後來由於尋標器的空間有限，無法容納功能更強大的雷達發射機及接收機，而逐漸被人們所遺忘，但隨著固態電子及積體電路的出現，如今情況已迥然不同。高功率微波積體電路促成小型先進發射機的發展，先進的微處理機讓飛彈應付電子反制更得心應手，先進的數位訊號處理器能辨認雜訊及多餘的訊號。最新式的雷達導引空對空飛彈，都是採用主動雷達歸向導引，不過目前在許多國家的空軍手中，仍有大量的半主動雷達歸向導引飛彈。

### 主動雷達歸向導引

主動雷達歸向導引工作方式與半主動雷達歸向導引很類似，只是雷達波的發射及接收全由飛彈一手包辦。由於不需要其它的雷達支援，載機發射飛彈後，不需持續以照明器對準目標，因此主動雷達歸向導引飛彈也被稱為射後不理飛彈，能同時攻擊多個目標。

純粹使用主動雷達歸向導引及發射前鎖定模式的飛彈，會比半主動雷達歸向導引飛彈的接戰距離要短，理由很簡單：飛彈雷達的性能一定不如載機雷達的性能。也因為如此，大部



我國天劍二型空對空飛彈的  
主動雷達歸向導引尋標器。

分的主動雷達歸向導引空對空飛彈，在飛行途中可選擇以慣性導航飛到預設的位置後，再開啓雷達尋標器。飛彈另外還能藉由資料鏈接收載機傳來的目標方位資訊，讓飛彈得以改變航向，或是改變開啓雷達的位置。同樣的道理，這種飛彈的尋標器在遭到敵方強力電子干擾時，會將追蹤模式轉換為干擾源歸向，把干擾源當做攻擊目標。

主動雷達歸向導引的中、長程空對空飛彈，是現今最先進、最具威力的飛彈，但要將強力發射機及適當口徑天線塞進狹窄的圓柱空間內，仍然有許多問題，偵測距離及反制精密干擾的能力尚有改善的空間。另外，如何在遠距離外正確判定目標，目前還沒有適當的方法，因此現在正在發展雙向(two-way)資料鏈，由飛彈回傳雷達資料給載機做進一步的確認。

主動式歸向導引空對空飛彈的價格與性能亦需取得平衡，即便是全球

規模最大、經費最充裕的美國空軍，也無力把舊有的半主動式雷達導引飛彈，以一對一的方式完全更換為主動式雷達導引飛彈。AIM-120C先進中程空對空飛彈每枚價格約為四十萬美元，其中與導引有關的尋標器、伺服馬達、發射機、接收機、數位單元、慣性參考單元(Inertial Reference Unit)、目標偵測裝置(Target Detection Device)……等，就佔了總價格的百分之七十。最新的AIM-120D每枚價格為七十萬美元，增加的三十萬美元絕大部份是用在改良導引系統，讓它在強力的電子干擾環境中，仍有良好的導引及性能表現。

#### 強化性能

飛彈要順利獵殺目標，並不像一般人所想的那麼簡單，所取決的因素不但包含飛彈本身的特性及性能，也包括各接戰階段的飛彈動能、目標的電子反制能力。越戰時期使用的AIM-7麻雀飛彈(Sparrow)獵殺率(kill ratio)不到百分之十，而AIM-120宣稱經實戰驗證，獵殺率達百分之八十五，但由於它過去所面對的敵人欠缺強大的電子反制能力，因此這個數據不具代表性。基於此種考慮，雖然最新世代的空對空飛彈在科技上已有很大的進步，但如何強化飛彈性能及其

致命性，相關研究仍然持續不斷地在進行。

美國飛彈防禦局(Missile Defense Agency)啓動的飛彈先進科技革新(Missile Advanced Technology Innovation)專案，就是要界定並開發全面改進飛彈零組件性能的觀念及科技，研究範圍包括七大領域：雷達系統、雷射暨光電系統、整合式主動／被動紅外線感測器系統、電腦訊號暨資料處理、物理及材料、工程、指揮及控制，全力為下世代的飛彈科技奠定堅實的基礎。

## 本刊公告

一、因應近年物價逐年調漲，本刊為撙節國防經費支出，將於今(一〇三)年六月起調整訂閱金，零售價為每本新臺幣貳拾伍元，訂閱全年一般民眾為八折優惠價新臺幣貳佰肆拾元，學生及軍警則為七折優惠價新臺幣貳佰壹拾元，以符編印成本。

二、為維護讀者權益，於今(一〇三)年六月前已繳納訂閱金者，可享有原單價新臺幣壹拾伍元至期滿為止。

空軍司令部文宣心戰組敬上