



# 飞行器隐身技术

南京航空航天大学  
航空宇航学院



# 什么是隐身技术

- 广义

- 可以把各种反探测的技术均称之为隐身技术
- 英文: Stealth Technology

- 狭义

- 飞行器被发现概率的大小，主要决定于其信噪比  $S / N$  的值
  - 增大  $N$  值，即增强背景噪声信号的强度---干扰技术
  - 降低  $S$  值，即降低飞行器自身的目标特征信号强度---隐身技术
  - 低可见度技术，英文 Low Observable Technology



# 飞行器隐身设计

- 要求在飞行器设计中考虑到隐身性能要求，在设计各个阶段运用隐身技术来有效地控制和减小飞行器的目标特征。
  - 外形设计
  - 材料选择
  - 结构设计
  - 系统设计和设备的选择



# 飞行器隐身技术的主要内容

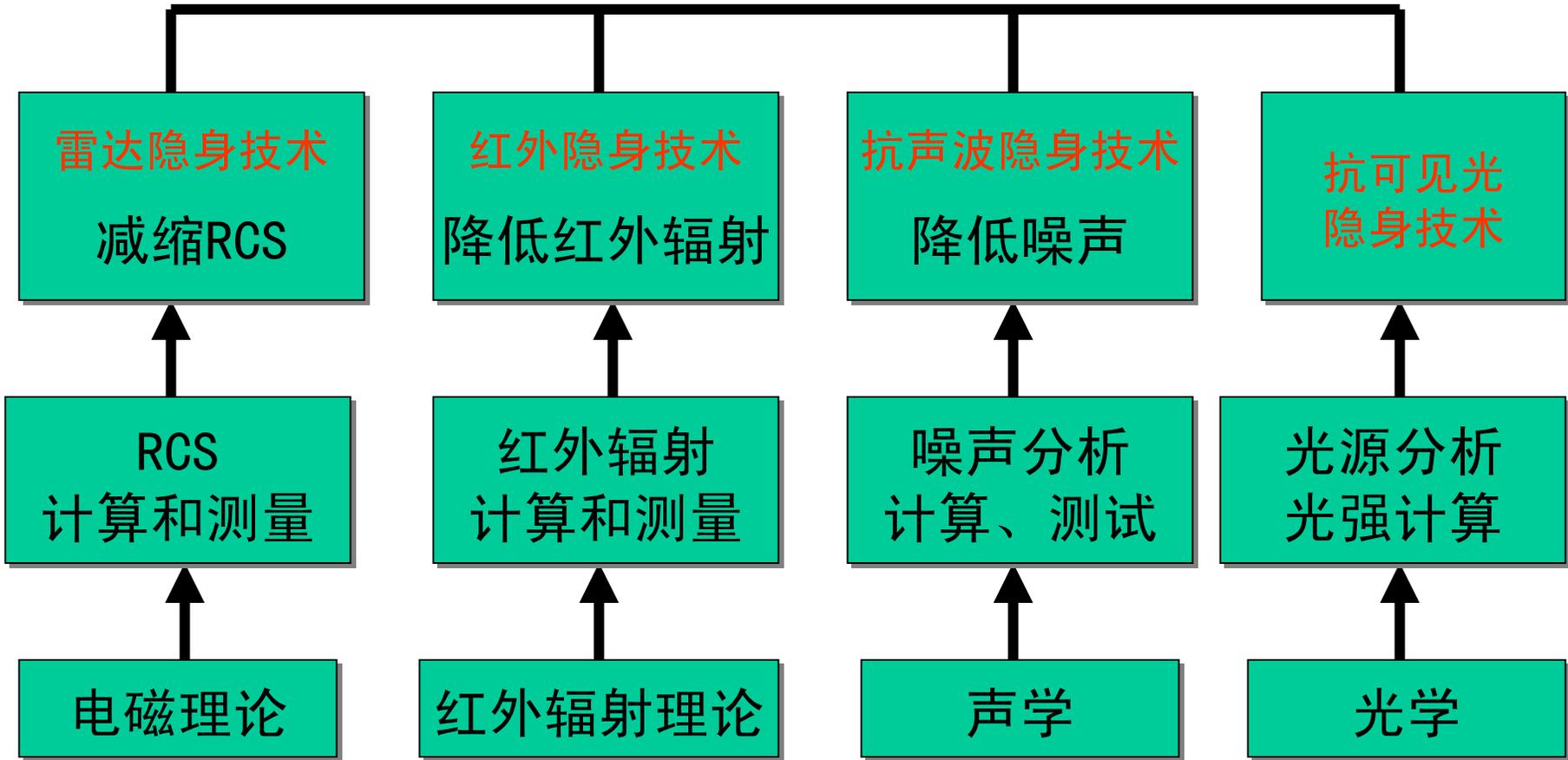
- 抗可见光探测
- 抗声波探测
- 抗雷达探测      -- 雷达隐身技术 ★
- 抗红外探测      -- 红外隐身技术 ★
- 抗激光探测



# 飞行器隐身技术



应用于飞行器设计





## 隐身技术在飞行器中应用的发展概况

- 早期：
  - H o 1 H X V 2 轻型轰炸机，飞翼布局，吸波材料
  - U - 2 高空侦察机，
  - S R - 7 1 高空高速侦察机
  - B - 1 B 战略轰炸机



# U-2 高空侦察机

- 巡航飞行高
  - 两万米以上
- 吸波涂料
- 能减弱红外辐射的尾喷





# SR-71 高空高速侦察机





# B-1 B 战略轰炸机





# 隐身技术在飞行器中应用的发展概况

## • 80年代

- F - 117 实用隐身战斗机
  - 1989年，在巴拿马的空降作战
  - 1991年，海湾战争
  - 1999年
- B - 2 隐身战略轰炸机
  - 1999年



# F-117 隐身战斗机





# B-2 隐身战略轰炸机

- 飞翼式布局
- 背部进气道
- 复合材料
- 吸波材料





# 隐身技术在飞行器中应用的发展概况

## • 90年代

### - F - 22 战斗机

- 低可探测性
- 高机动性和敏捷性
- 超音速巡航能力
- 能携带不少于 F - 1 5 的有效负载
- 航程大

### - 其它飞行器

- 隐身无人机
- 无人作战飞机
- 隐身直升机
- 隐身导弹



# Lockheed-Boeing-General Dynamics YF-22 "Raptor"

Lockheed-Boeing-General Dynamics YF-22 'Raptor'  
USAF Museum





# Northrop-McDonnell Douglas YF-23



# F-22





# Technology Developments Premised into F-22 Aircraft Configuration

- **External Aircraft Geometry**
  - Low observable
  - Low supersonic drag
  - Unrestricted maneuverability
- **Propulsion**
  - Low observable supersonic inlet
  - Low observable augments/thrust vectoring
- **Avionics**
  - Common modules – minimum type
  - Liquid cooling for reliability
  - Low observable apertures
    - Radar
    - Infrared
    - Communications/Navigation
    - Electronics warfare
  - Ada real time software
- **Other subsystems and equipment**
  - Low observable air data sensors
  - Low observable canopy



# Lockheed Martin-Boeing Tier III Minus Low-Observable UAV *DarkStar*



Dryden Flight Research Center EC95-43271-5 14Sep1997

Unveiling of the Tier 3 at Dryden.

NASA photo by Tony Landis



# Northrop Grumman Stealth UAV



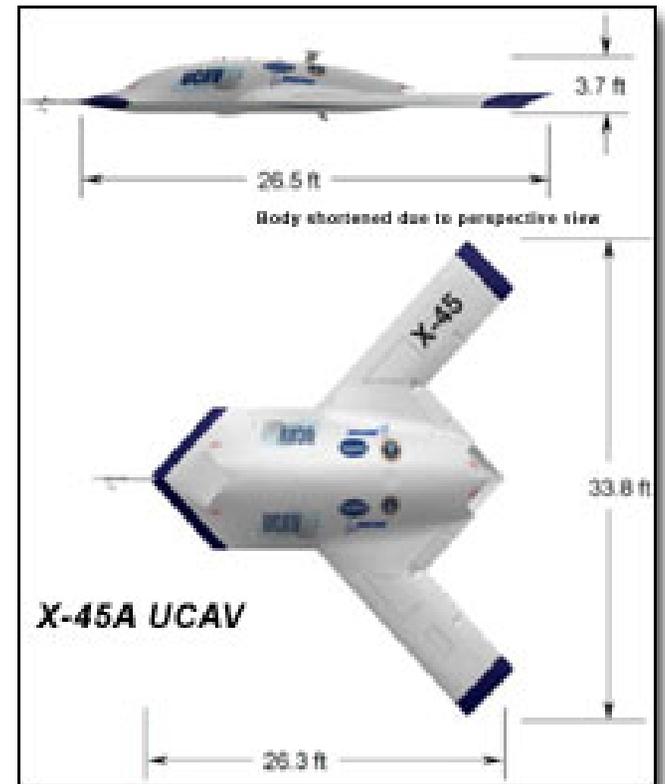


# Boeing X-45

## Unmanned Combat Aerial Vehicle (UCAV)



Operational USAF/Boeing UCAV



# X-36



- McDonnell Douglas and the National Aeronautics and Space Administration (NASA) have developed a tailless research aircraft that could dramatically change the design of future stealthy fighters.
- This innovative design promises to reduce weight, drag and radar signature and increase range, maneuverability and survivability of future fighter aircraft.



# BOEING-SIKORSKY RAH-66 COMANCHE STEALTH HELICOPTER





# Raytheon (General Dynamics) AGM-129 ACM

The **AGM-129 ACM** (Advanced Cruise Missile) is a stealthy, nuclear-armed cruise missile used exclusively by B-52H *Stratofortress* strategic bombers.

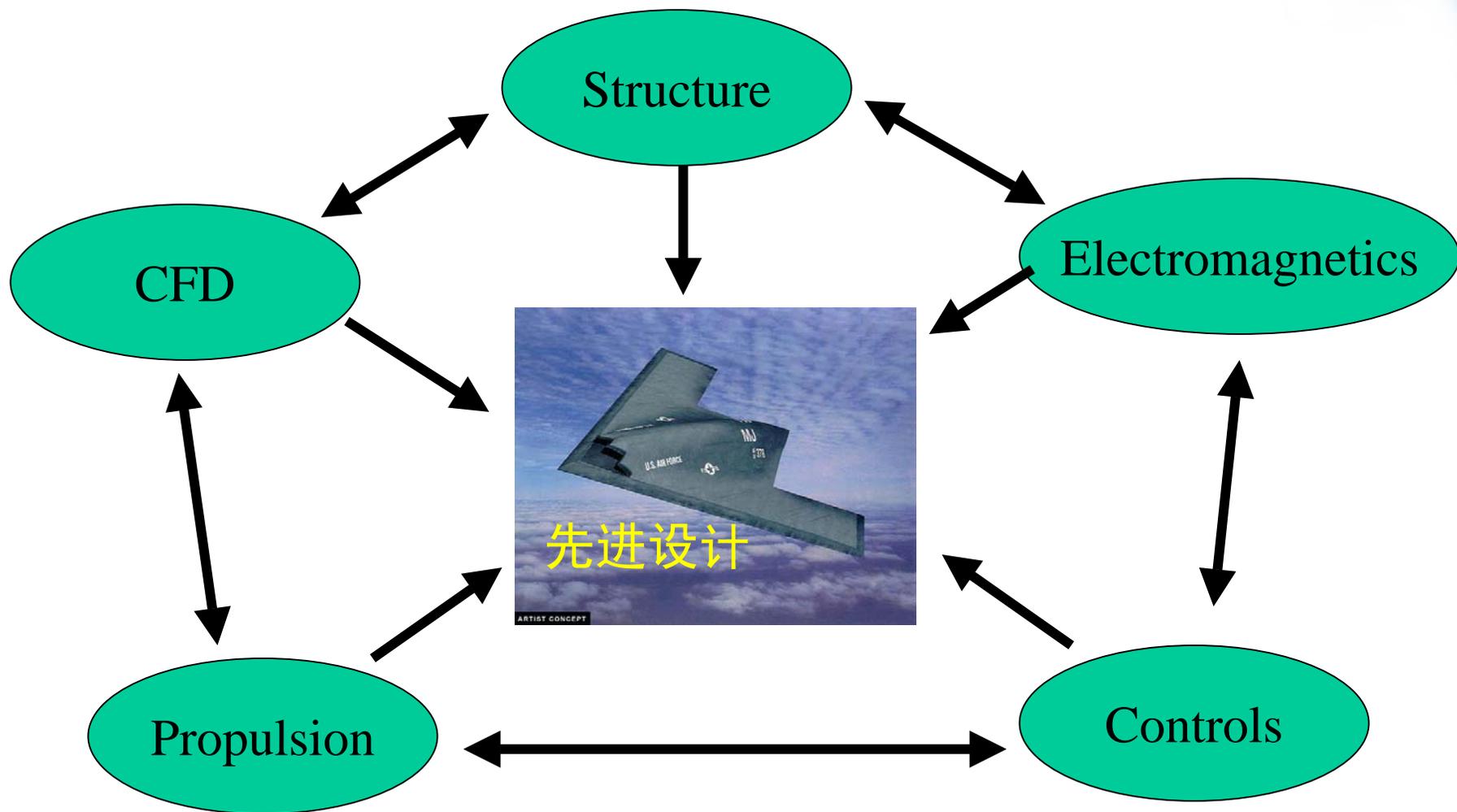




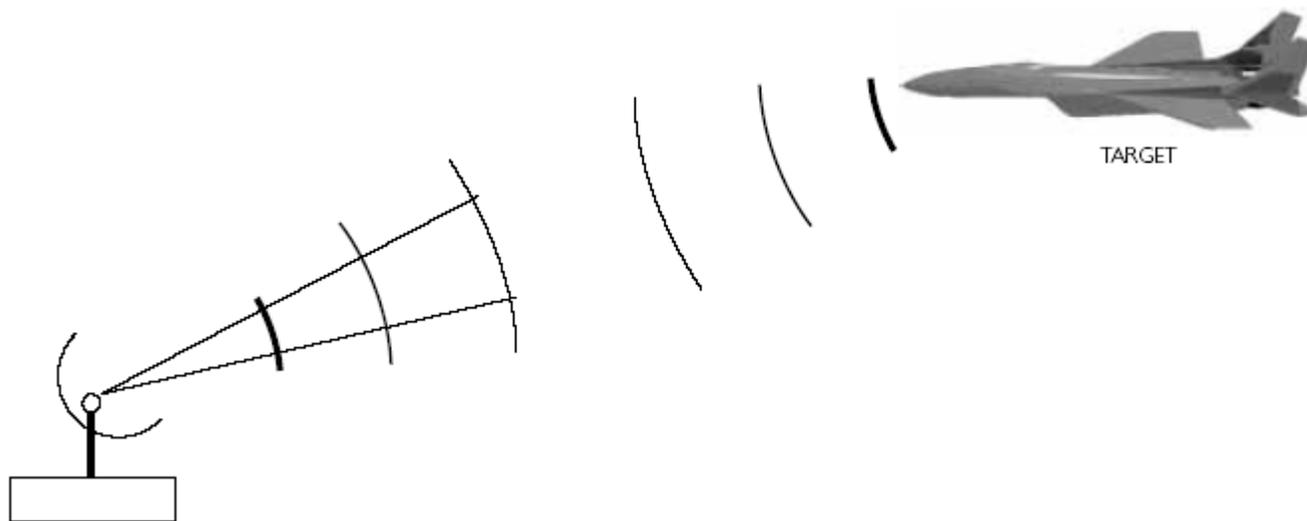
# 其它隐身设计概念



# 多学科一体化设计

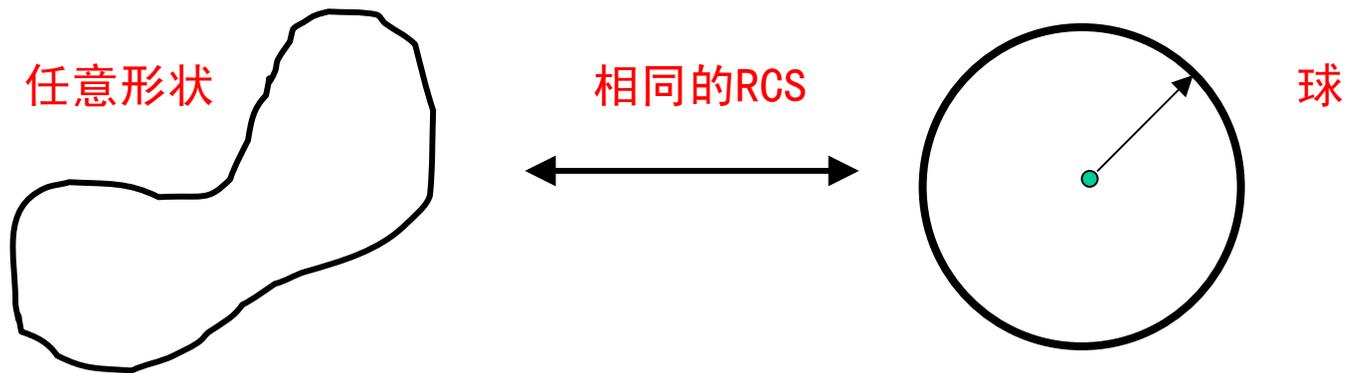


# 雷达散射截面

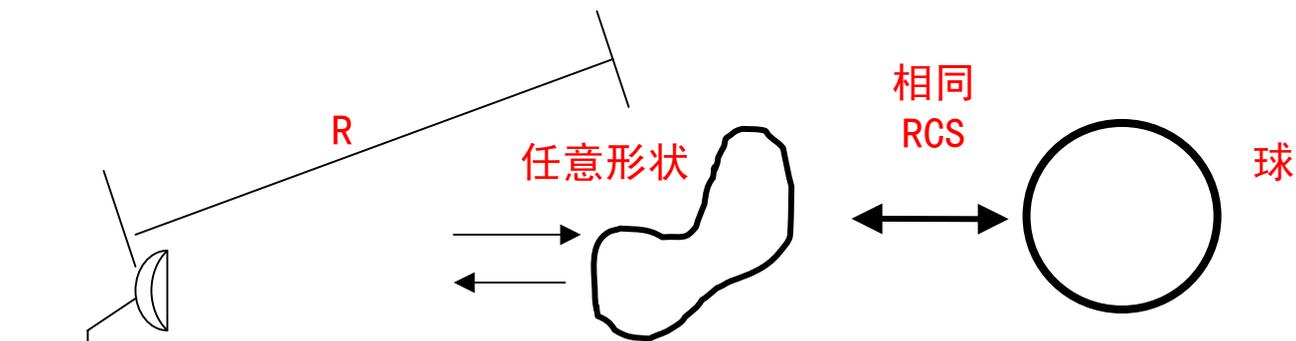


# 雷达散射截面概念

- 雷达散射截面 (Radar Cross section, 缩写RCS) 是雷达隐身技术中最关键的概念, 它表征了目标在雷达波照射下所产生回波强度的一种物理量。
- 任一目标的RCS可用一个各向均匀辐射的等效反射器的投影面积 (横截面积) 来定义, 这个等效反射器与被定义的目标在接收方向单位立体角内具有相同的回波功率。



# RCS的数学表达式



## 符号定义:

$I_i$ : 目标处入射波的功率流密度

$I_r$ : 在接收机处散射波的功率流密度

$A$ : 接收天线的等效面积

$R$ : 表示目标到接收天线的距离

$\Omega$ : 表示空间立体

$\Omega = A/R^2$ : 从目标看接收天线所张的立体角, 单位是球面度

目标截获的功率



单位立体角的散射功率



接收机接收到的功率



单位立体角接收到的功率

相等





# RCS的数学表达式

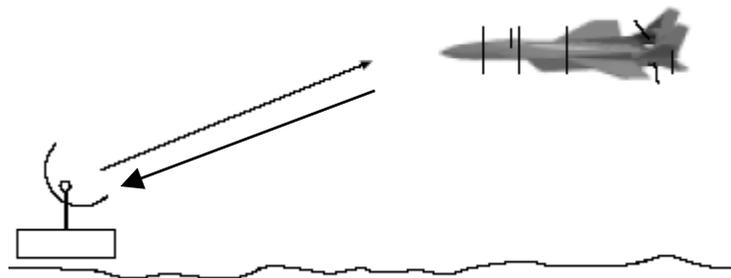
- 根据电磁场理论, 功率流密度正比于电场强度E的平方 (或磁场强度H的平方)。
- RCS可定义为: 目标在单位立体角内向接收机处散射功率密度与入射波在目标上的功率密度之比的4π倍。

$$\sigma = \lim_{R \rightarrow \infty} 4\pi R^2 \left| \frac{E^s}{E^i} \right|^2$$

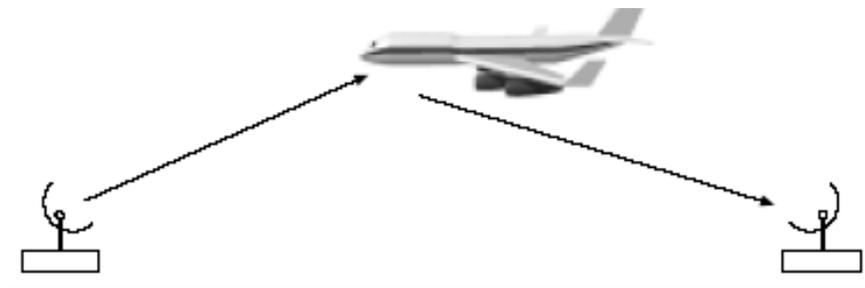
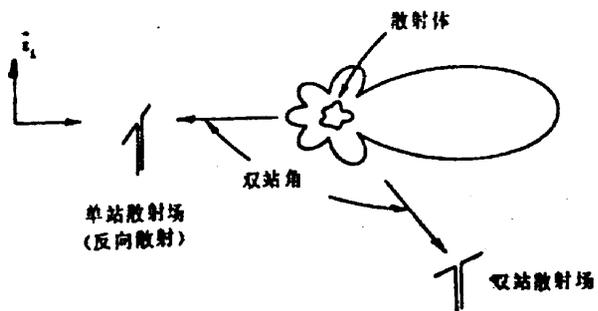
$$\sigma = \lim_{R \rightarrow \infty} 4\pi R^2 \left| \frac{H^s}{H^i} \right|^2$$

# 单站RCS与双站RCS

单站雷达

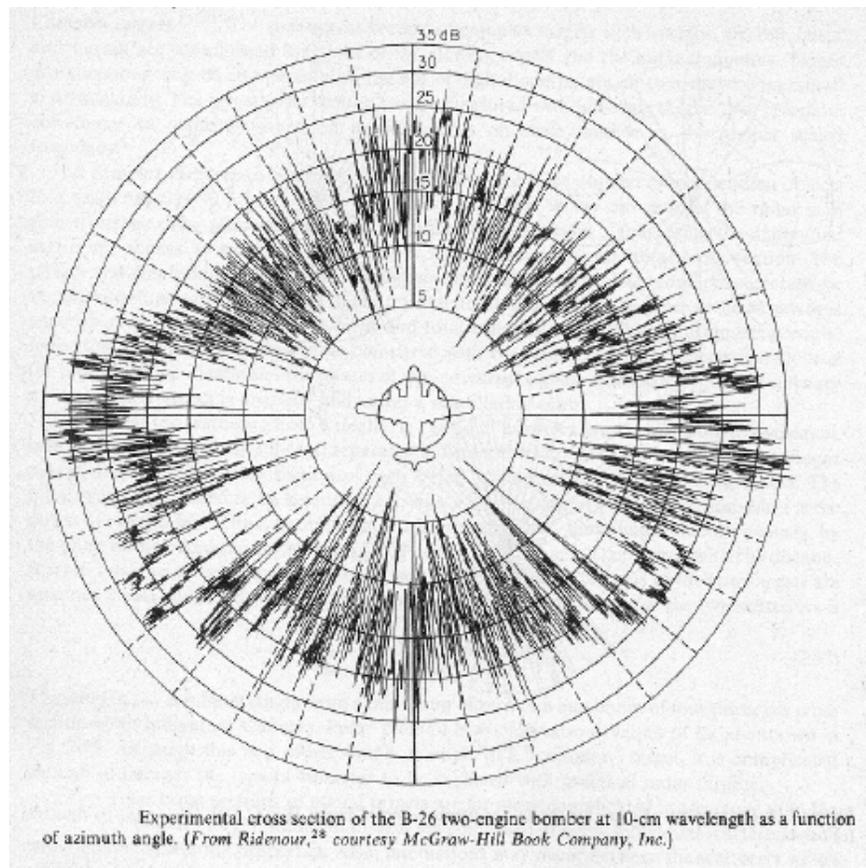


双站雷达



# 影响RCS的因素

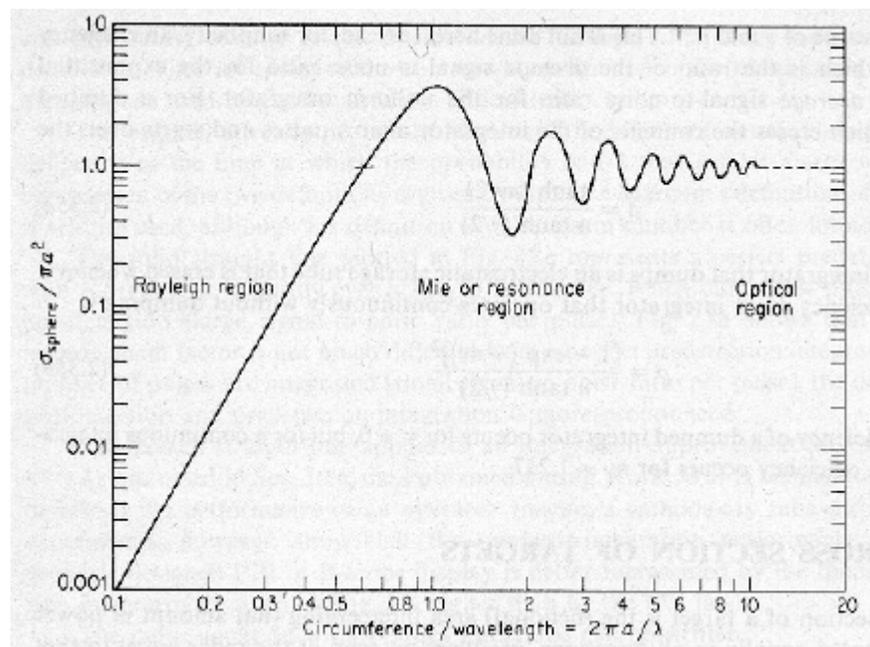
- 目标材料的电性能
- 目标的几何外形
- 目标被雷达波照射的方位
- 入射波的波长
- 入射场极化形式和接收天线的极化形式



# 入射波波长与RCS的关系

- 低频区
- 谐振区
- 高频区（光学区）
  - 目标上某一点对该目标其它点的散射场贡献与入射场相比是很小的，可以将这个目标的散射场看作由各独立的散射中心的散射场组成的。
  - 绝大多数飞机都处于高频区，对于高频区目标的散射机理和RCS的研究，具有重要的实用意义。

导体圆球  $\sigma \sim ka$  的关系曲线



$ka$



# RCS的单位

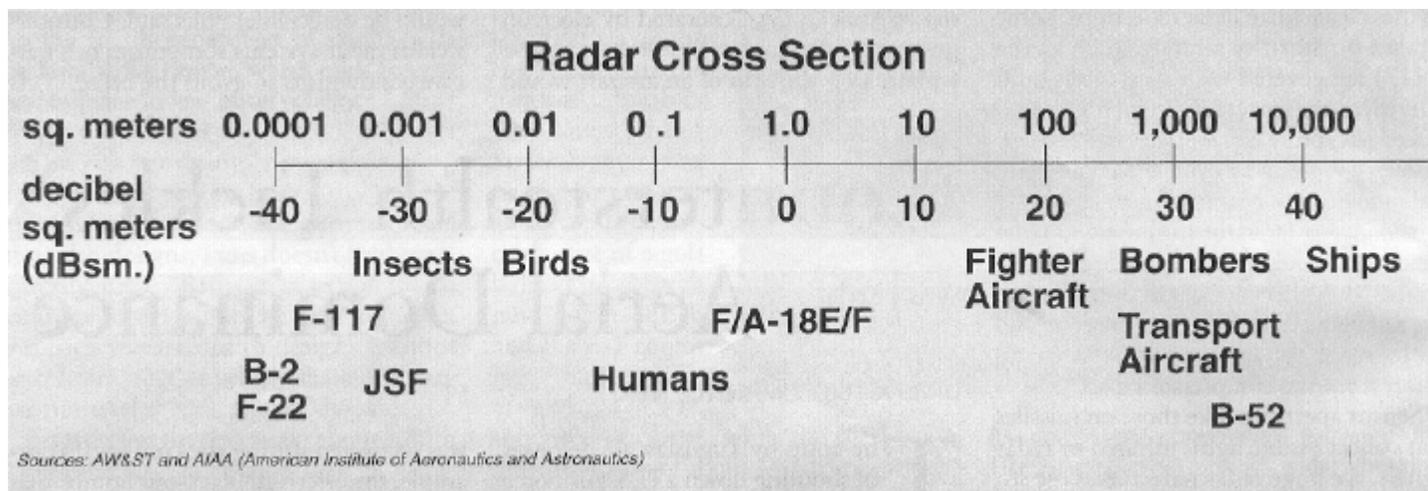
- RCS的单位是一个面积： $m^2$
- 由于目标RCS随方位变化剧烈，故也常用平方米的分贝数（dBsm）来表示。

$$\sigma(\text{dBm}^2) = 10 \log_{10} [\sigma(m^2)]$$

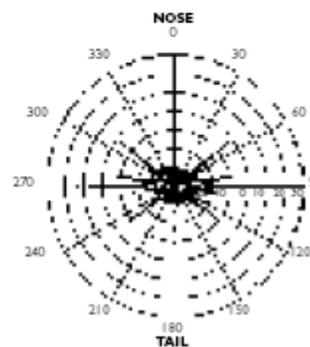
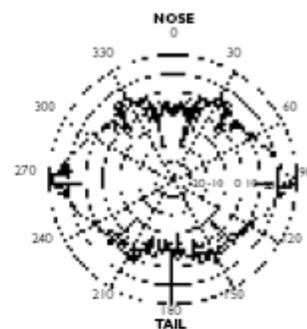
- 减少10dBsm意味回波功率只剩下1/10
- 减少20dBsm意味回波功率只剩下1/100
- 减少30dBsm意味回波功率只剩下1/1000



# 典型目标的RCS量值



# 雷达隐身技术





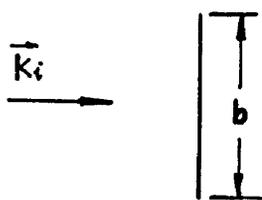
# RCS缩减的三种方法

- 雷达隐身技术= RCS缩减技术
- RCS缩减的常用三种方法
  - 外形
  - 材料
  - 阻抗加载

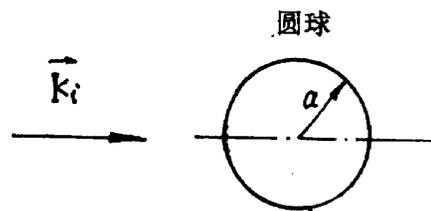
# 外形隐身技术

- 外形隐身技术是最有效的措施之一

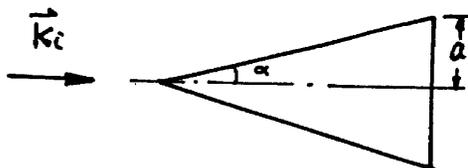
几何横截面积相同的物体RCS的比较，波长3cm



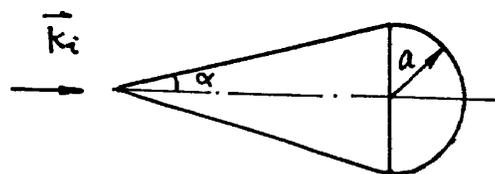
正方形平板:  $b=0.18\text{ (m)}$ ,  $\sigma=14.66\text{ (m}^2\text{)}$



圆球:  $a=0.1\text{ (m)}$ ,  $\sigma=0.031\text{ (m}^2\text{)}$



圆锥:  $a=0.1\text{ (m)}$ ,  $\alpha=15^\circ$ ,  $\sigma=0.013\text{ (m}^2\text{)}$



锥球:  $a=0.1\text{ (m)}$ ,  $\alpha=15^\circ$ ,  $\sigma=0.00018\text{ (m}^2\text{)}$



# 外形隐身技术

- 减少散射源
- 将强散射源转化为弱散射源
- 遮挡技术
- 控制散射方向，使散射能量集中在雷达威胁区域之外
- 消除二面角效应
- 将飞行器的雷达回波的主要能量控制在少数很窄的方位内，使两个波峰之间的回波信号非常弱。



# 减少散射源

- 布局
  - 飞翼
  - 无尾三角翼
  - 双垂尾
- 减少外挂
- 较少开口，缝隙，台阶

# 几种低RCS布局

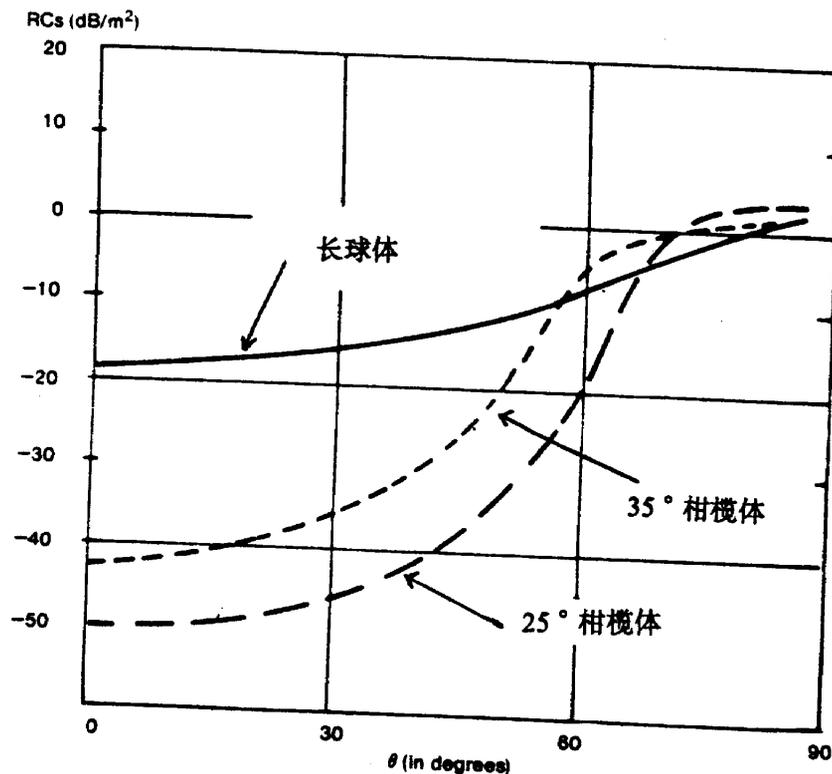
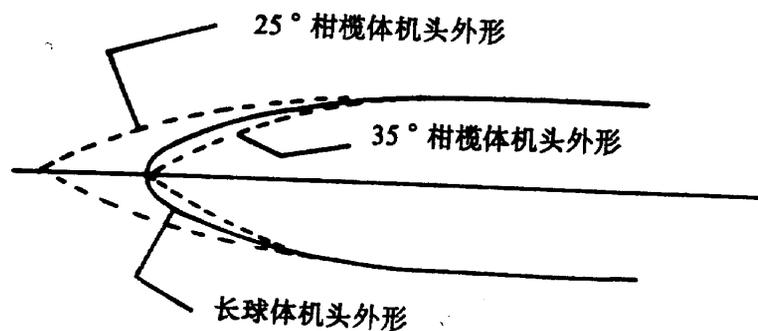


# 减少外挂



# 将强散射源转化为若散射源

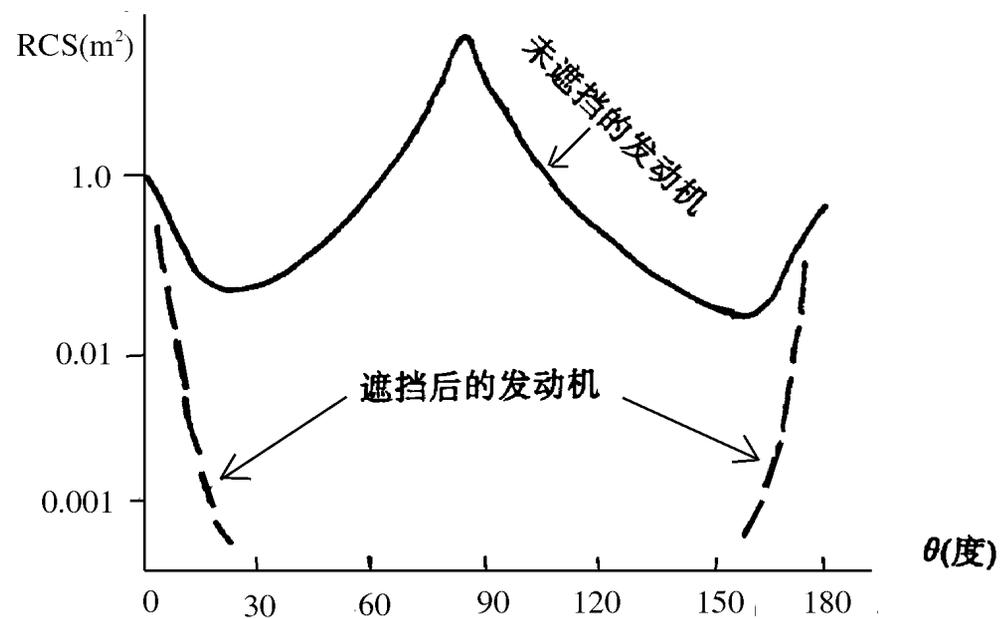
- 将镜面反射转化为边缘绕射
- 机头的修形



# 对强散射源进行遮挡



有遮挡和无遮挡时发动机短舱的RCS曲线



# 对强散射源进行遮挡

- 采用S形弯管进气道遮挡压气机，使电磁波不能直接照射到压气机。
  - F-22
- 利用金属栅网遮盖进气道
  - 网孔尺寸远小于雷达波长
  - 电磁波将从栅网上散射而不进入进气道
  - F-117



# 对强散射源进行遮挡

- 座舱是不可避免的散射源，其中有飞行员和各种仪表及设备，座舱结构比较复杂，形成一个空腔体。
- 入射波经座舱盖后，必然构成强反射。
- 在座舱盖表面蒸镀上一层不透波的金属膜，遮挡住雷达波，使其不能进入座舱内。
- 镀膜不影响舱盖的透明度，既保证了飞行员的视野又可以降低RCS值。



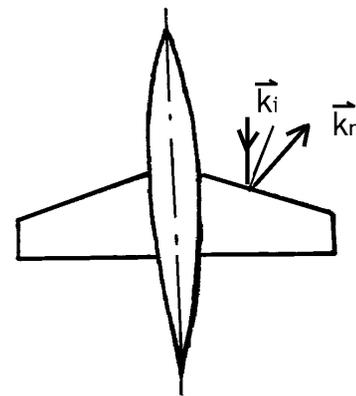
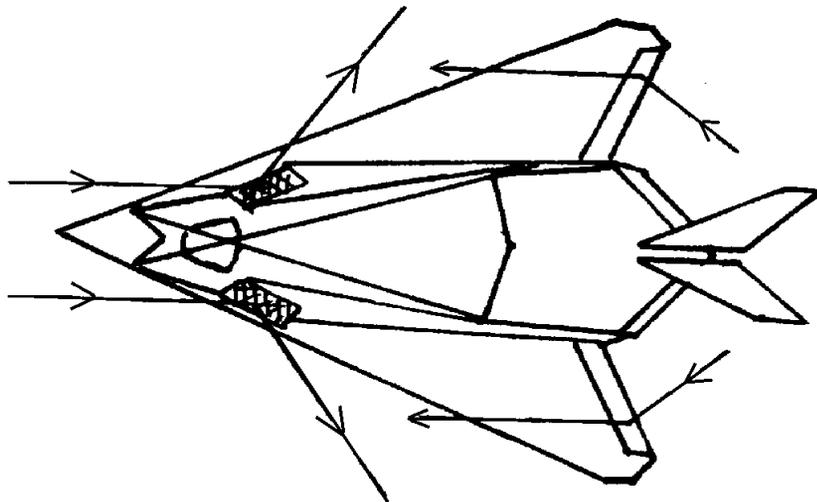
F-117座舱盖



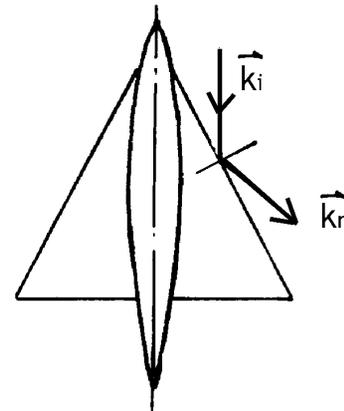
## 控制散射方向，使散射能量集中在雷达威胁区域之外

- 将飞机的主要散射能量偏离雷达的威胁区域，从而来降低飞机的后向散射能量，降低雷达发现飞机的概率。

平板式外形结构F-117A隐身战斗机  
使回波偏离雷达威胁区



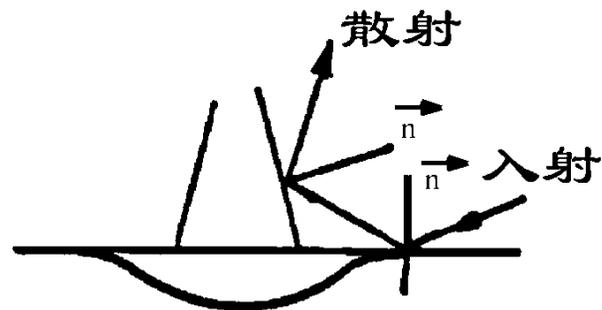
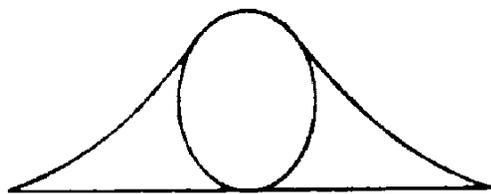
回波在雷  
达威胁区



回波偏离雷  
达威胁区

# 消除角反射器效应

- 角反射器是强散射源
  - 垂尾与平尾相互垂直构成一个角反射器效应
  - 机身和机翼之间也可能存在角反射器效应
- 机身机翼融合体
- 斜置尾翼



# 机身机翼融合体与斜置尾翼





## 将飞机的雷达回波的主要能量控制在少数很窄的方位内

- 在某些方位飞机上总存在一些构成主要散射源的边缘或表面。
- 将飞机的雷达回波的主要能量控制在少数很窄的方位内，使波峰之间的回波信号非常弱。
- 通过仔细设计飞机的外形，使飞机的RCS在雷达波照射的整个方位内，只有在少数很窄的方位内才出现峰值，并使两个峰值之间的RCS非常小。
- 由于回波峰值之间的RCS很小，与背景噪声难于区别，从而使敌方雷达接收不到连续的信号，难以确定飞机是一个实在的目标还仅是一个瞬变噪声，降低了雷达发现飞机的概率。

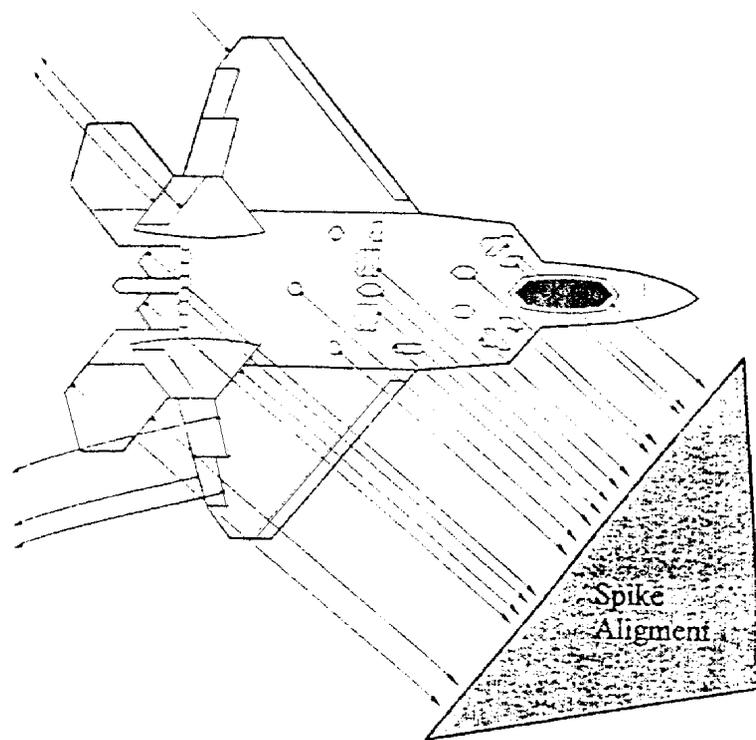


# 将飞机的雷达回波的主要能量控制在少数很窄的方位内

B-2隐身轰炸机外形的所有边缘  
只有两个方向



F-22战斗机外形轮廓的方向尽可能一致





## 结论

- 隐身性能已成为衡量未来军用机先进性的一个重要判据。
- 隐身设计已成为军用飞机的一个重要方面。