

〈制导与对抗〉

## 先进红外传感器对隐身飞机作用距离估算研究

何 苹<sup>1</sup>, 王莹莹<sup>2</sup>, 岳韶华<sup>2</sup>

(1. 西京学院 信息工程学院, 陕西 西安 710123; 2. 空军工程大学 防空反导学院, 陕西 西安 710046)

**摘要:** 为了有效地估算先进红外传感器对隐身飞机的作用距离, 以 F-22 与 F-35 进行对抗性仿真为想定, 计算了 F-22 在长波和中波波段的红外辐射强度, 拟合了典型条件下大气透过率的经验公式, 推测了 F-35 机载IRST和AIM-9X红外导引头的特征参数, 利用逐步逼近法, 计算了 F-35 机载IRST和AIM-9X 导弹导引头对 F-22 的作用距离。计算结果表明, F-22 具有较强的红外隐身能力, 可使 F-35 的IRST对其迎头作用距离不大于 62 km, 但是 F-22 在近距离作战中, 仍将受到红外格斗弹的较大威胁。鉴于 F-22 的红外辐射随红外传感器探测角度的变化而敏感性高的特点, 建议飞机编队进行红外反隐身探测时, 采用稀疏编队方式, 以提高探测概率。

**关键词:** 隐身飞机; 作用距离; IRST; 红外格斗弹; F-22; F-35

中图分类号: TN219 文献标识码: A 文章编号: 1001-8891(2020)06-0899-06

## Operating Range of the Advanced Infrared Detector for the Stealth Aircraft

HE Ping<sup>1</sup>, WANG Yingying<sup>2</sup>, YUE Shaohua<sup>2</sup>

(1. Information Engineering Academy, Xijing University, Xi'an 710123, China;

2. Air and Missile Defense College, Air Force Engineering University, Xi'an 710046, China)

**Abstract:** To compute the operating range of the advanced infrared detector for the stealth aircraft, the combat simulation scenario of F-22 and F-35 is given in the paper. In the scenario, the infrared radiation intensity of F-22 is computed in middle wave-band and long wave-band, the fitting formula of the atmospheric transmittance is given under typical conditions, the characteristic parameters of the F-35 airborne IRST and AIM-9X infrared seeker are inferred and the operating ranges of F-35 airborne IRST and AIM-9X infrared seeker for F-22 are computed with the gradually approaching method. The computation shows that F-22 has good stealth capability and the operating ranges of F-35 airborne IRST is less than 62 km from the nose of F-22 while the infrared dog-fight missiles threat F-22 in short range strikes. The infrared radiation of F-22 is sensitive to the detection angle of the infrared sensors, thus in the aircraft fleet anti-stealth infrared detection, sparse formation is adopted to increase the detection probability.

**Key words:** stealth aircraft, operating range, infrared search and tracking system(IRST), infrared dog-fight missile, F-22, F-35

### 0 引言

随着红外探测技术的发展, 世界上主要的第四代战机普遍采用红外隐身技术, 以提高战场生存力。比如 F-22 采用了涂敷红外吸收涂层、二元喷管发动机、尾翼侧向遮挡等技战术措施, 降低敌方红外传感器发现、跟踪、识别、攻击的距离和概率<sup>[1]</sup>。

正确估算先进红外传感器对隐身飞机的作用距离, 是研究隐身飞机红外性能 and 对其进行探测预警的基础。红外传感器对隐身飞机作用距离的研究主要涉及飞机红外辐射、大气红外衰减、红外传感器等方面。国外研究以美国为代表, 他们将数值仿真与试验测试手段相结合<sup>[2-5]</sup>, 并且装备了 F-22、F-117、B-2 等多种具有红外隐身能力的飞机, 取得了显著成就, 但对

收稿日期: 2019-07-23; 修订日期: 2019-08-19.

作者简介: 何苹(1982-), 男, 副教授, 博士, 主要研究武器装备军民融合发展。E-mail: 47619870@qq.com.

基金项目: 中国博士后科学基金面上资助项目(2013M532222)。

相关成果严密封锁。国内在飞机红外辐射、大气红外衰减、红外传感器等方面也做了大量工作<sup>[6-10]</sup>，有力地推动了飞机红外隐身问题的研究，存在的主要问题：一是对于飞机红外辐射的计算方法尚无统一规范，且采用不同计算方法计算所得的数据差异较大，导致计算结果互不采纳。二是飞机红外隐身性能并不能单纯地用红外辐射强度来衡量，它还与探测飞机所使用的红外传感器密切相关。F-35 机载的IRST (infrared search and tracking system) 和 AIM-9X 红外导引头等红外系统代表了世界红外传感器的领先水平，国内对 F-35 的IRST、AIM-9X 红外导引头等先进红外传感器基本战技性能研究较多，而对其传感器性能参数的深入研究稍显不足。

针对以上问题，以 F-22 为例，将 F-22 放在模拟的战场环境中，与 F-35 机载的先进红外传感器进行对抗性仿真研究，构建 F-22 在长波和中波波段的红外辐射模型，拟合典型条件下大气透过率的经验公式，并依据公开报道的资料和技术原理，推测 F-35 机载IRST 和 AIM-9X 红外导引头的关键参数，定量研究典型条件下 F-35 的IRST 和 AIM-9X 红外导引头对 F-22 的作用距离，并利用已掌握的数据，对研究结果进行初步校验。

### 1 红外传感器作用距离模型构建

将飞机视为点源目标。则红外传感器对飞机的作用距离  $R$  (单位 m) 为<sup>[11]</sup>：

$$R = \left[ \frac{\pi \tau_a \tau_0 D_0 D^* (I - I_b) \left( \frac{t_{int}}{\omega} \right)^{1/2}}{2\sqrt{2}F \cdot SNR} \right]^{1/2} \quad (1)$$

式中： $I$  为目标的红外辐射强度，W/sr； $I_b$  为背景的红外辐射强度，W/sr； $\tau_0$  为光学系统的透过率； $D_0$  为光学系统入射口径，m； $F$  为光学系统的 F 数， $F=f/D_0$ ， $f$  为光学系统焦距，m； $\omega$  为红外传感器瞬时视场角，sr； $D^*$  为在红外传感器响应波长范围内的平均探测率， $m \cdot W^{-1} \cdot Hz^{-0.5}$ ； $t_{int}$  为探测器积分时间，s；SNR 为系统可分辨的极限信噪比； $\tau_a$  为在红外传感器响应波长范围内的平均大气透过率。

$\tau_a$  可表示为：

$$\tau_a = ke^{-\gamma R} \quad (2)$$

式中： $k$ 、 $\gamma$  为拟合系数。

对于式(1)，等式两边取平方，得到：

$$R^2 = \frac{\pi \tau_0 D_0 D^* \left( \frac{t_{int}}{\omega} \right)^{1/2}}{2\sqrt{2}F \cdot SNR} ke^{-\gamma R} (I - I_b) \quad (3)$$

令  $C = \frac{k\pi \tau_0 D_0 D^* \left( \frac{t_{int}}{\omega} \right)^{1/2}}{2\sqrt{2}F \cdot SNR}$ ， $C$  为红外传感器综合

参数；令  $I - I_b = \Delta I$ ，则：

$$R = [\ln C + \ln(\Delta I) - 2 \ln R] / \gamma \quad (4)$$

由式(4)可知，红外传感器的作用距离主要与目标及背景的红外辐射特性、大气的红外辐射传输特性、红外传感器自身的性能有关。

采用逼近法求  $R$  值。计算流程如图 1 所示。首先给定作用距离的期望值  $R_{10}$ ，由  $R = [\ln C + \ln(\Delta I) - 2 \ln R_{10}] / \gamma$  计算得到的  $R$  值与  $R_{10}$  比较，如果在要求的误差范围内，就得到所需的解，否则修改  $R_{10}$  值，直至  $R$  值在要求的误差范围内为止。

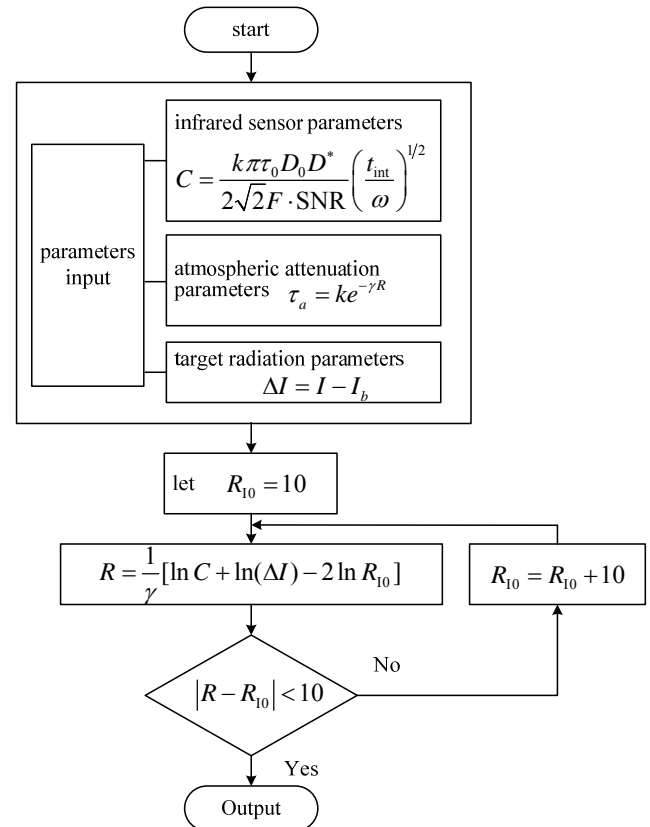


图 1 逼近法求  $R$  流程图

Fig.1 Flowchart of computing  $R$  with the gradually approaching method

### 2 F-22 红外辐射计算

对于涡喷发动机，综合涡轮叶片材料的热极限和强度极限，进入涡轮的气体温度最大值限制在 1173 K 左右。就目前的发动机而言，离开涡轮时的废气温度 EGT (exhaust gas temperature) 高达 973 K，只能短时间内存在，比如起飞时存在，在飞机长时间飞行中，能经受的 EGT 最大值为 773~883 K。

根据哈得逊经验公式，尾喷口外排出的废气温度，即发动机尾焰温度  $T_f$  为：

$$T_f \approx 0.85EGT \quad (5)$$

相比涡喷发动机，隐身飞机采用的涡扇发动机尾

喷管、尾焰的温度要低些。仿真计算中，假设 F-22 涡扇发动机尾喷管可能的温度范围为 508~828 K，则对应尾焰可能的温度范围为 432~704 K<sup>[12-13]</sup>。

已知 F-22 机长 18.92 m，机高 5.08 m，翼展 13.56 m，机翼展弦比 2.4<sup>[1]</sup>。估算得到飞机特征面积为 140.1 m<sup>2</sup>，侧视面积为 45.6 m<sup>2</sup>，前/后视面积为 23.3 m<sup>2</sup>。假定蒙皮光谱发射率可能的取值范围为 0.1~0.5。发动机尾喷管后视面积为 1.08 m<sup>2</sup>，尾喷管顶/仰视面积为 1.3 m<sup>2</sup>，尾喷管光谱发射率取 0.9。尾焰顶/仰/侧视面积为 1 m<sup>2</sup>，后视面积为 0.2 m<sup>2</sup>，尾焰光谱发射率取 0.5。假设 F-22 飞行马赫数为 0.9~2.0。

采用普朗克公式可求出 F-22 在给定波段内各辐射源的红外辐射亮度，根据各辐射源在不同方向上的辐射面积，可计算出各辐射源的红外辐射强度。为了得到飞机红外辐射强度方向图，设在机翼平面上，探测点和机体的连线与机体纵轴间的夹角为  $\alpha$ 。则飞机在  $0^\circ\sim 360^\circ$  方位上红外辐射强度  $I_1$  为：

$$I_1 = \begin{cases} I_{\text{后视}} \cdot \cos \alpha + I_{\text{侧视}} \cdot \sin \alpha & 0 \leq \alpha \leq 0.5\pi \\ I_{\text{前视}} \cdot \cos(\pi - \alpha) + I_{\text{侧视}} \cdot \sin \alpha & 0.5\pi < \alpha \leq \pi \\ I_{\text{前视}} \cdot \cos(\alpha - \pi) + I_{\text{侧视}} \cdot \sin(\alpha - \pi) & \pi < \alpha \leq 1.5\pi \\ I_{\text{后视}} \cdot \cos \alpha + I_{\text{侧视}} \cdot \sin(\alpha - \pi) & 1.5\pi < \alpha \leq 2\pi \end{cases} \quad (6)$$

通过仿真计算比较，当 F-22 飞行马赫数为 1.6，蒙皮发射率为 0.1，发动机尾喷管温度为 588 K，尾焰温度为 500 K 时，在采用红外吸波涂料技术、二元喷管技术、遮挡技术等综合隐身措施后，可使前半球 8~12  $\mu\text{m}$  波段红外特征降低约 90%，下降比例如图 2 所示，与文献[14-15]报道的 F-22 的红外隐身能力基本吻合。

因此，在下面计算中，F-22 蒙皮发射率取 0.1，涡扇发动机尾喷管温度取 588 K，尾焰温度取 500 K。

长波探测时，当 F-22 马赫数为 0.9~2.0 时计算得到  $0^\circ\sim 360^\circ$  方位上的红外辐射强度如图 3 所示。中波探测时，当 F-22 飞行马赫数为 0.9 和 2.0，计算得到  $0^\circ\sim 360^\circ$  方位上的红外辐射强度如图 4 所示。

由图 3、图 4 可知：

1) 长波探测时，F-22 飞行马赫数越大，飞机的红外辐射强度越大；不同的探测角度下飞机的红外辐射差异较大；由于发动机的贡献，F-22 后半球红外辐射强度大于前半球。

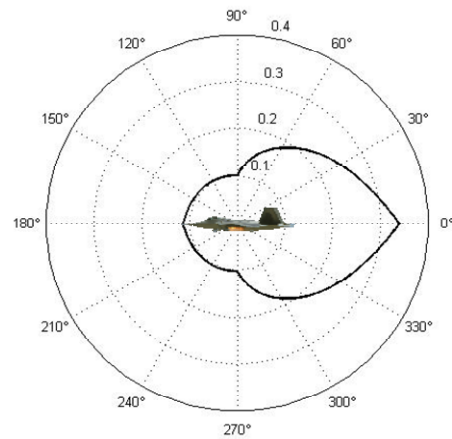


图 2 F-22 在 8~12  $\mu\text{m}$  波段红外辐射下降比例图

Fig.2 Infrared radiation reduction ratio in 8-12  $\mu\text{m}$  wave-band  
2) 中波探测时，由于发动机尾喷管、尾焰为主要的中波红外辐射源，蒙皮辐射与之相比、较为微弱，因此 F-22 后半球红外辐射强度远大于前半球。

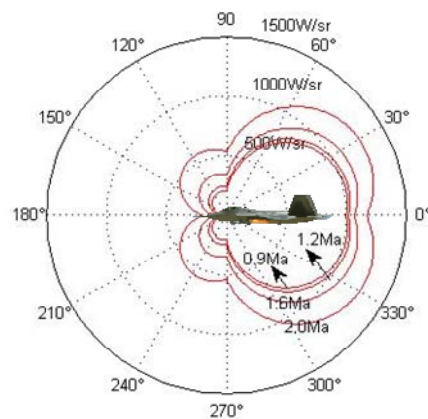


图 3 F-22 在 8~12  $\mu\text{m}$  波段红外辐射方向图

Fig.3 Infrared radiation pattern of F-22 in 8-12  $\mu\text{m}$  wave-band

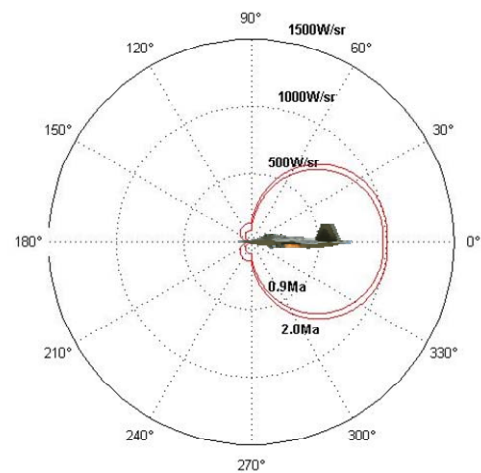


图 4 F-22 在 3~5  $\mu\text{m}$  波段红外辐射方向图

Fig.4 Infrared radiation pattern of F-22 in 3-5  $\mu\text{m}$  wave-band

### 3 大气透过率计算

依据作战想定研究,利用 F-35 机载 IRST 来探测 F-22,可假定 F-22 飞行高度为 12 km;利用 F-35 机载 AIM-9X 与 F-22 进行对抗时,可假定 F-22 飞行高度为 5 km.由于 F-35 机载 IRST 工作波段为 8~12 μm, AIM-9X 工作波段为 3~5 μm,因此,对飞机飞行高度为 5 km 时中波段、12 km 时长波段的大气透过率曲线进行拟合。

#### 3.1 高度 12 km 的大气透过率曲线拟合

大气条件:中纬度春夏季,气溶胶模型为乡村消光系数,缺省气象视距为 23 km.利用红外大气传输软件的原始数据,飞机飞行高度为 12 km,8~12 μm 波段平均大气透过率拟合公式为:

$$\tau_a = 0.9534e^{-0.0019R} \quad (7)$$

拟合曲线如图 5 所示,拟合精度较高,最大相对误差为 2.2%。

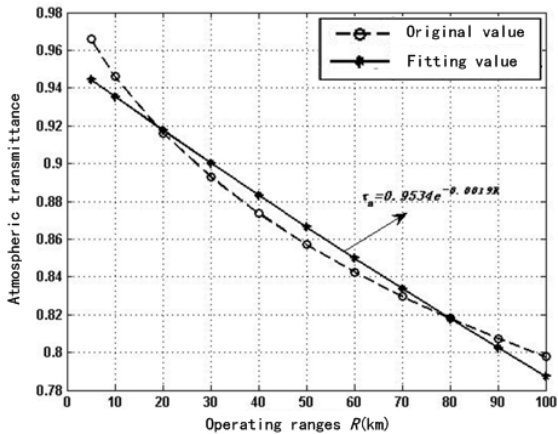


图 5 大气透过率拟合曲线

Fig.5 Atmospheric transmittance fitting curves

#### 3.2 高度 5 km 的大气透过率曲线拟合

大气条件:中纬度春夏季,气溶胶模型为乡村消光系数、缺省气象视距为 23 km.利用红外大气传输软件的原始数据,飞机飞行高度为 5 km,3~5 μm 波段平均大气透过率拟合公式为:

$$\tau_a = 0.6954e^{-0.0134R} \quad (8)$$

拟合曲线如图 6 所示.除个别样本点需剔除之外,拟合精度较高,最大相对误差为 2.28%。

### 4 红外传感器作用距离计算

#### 4.1 先进红外传感器参数推测

##### 4.1.1 F-35 机载 IRST 参数推测

采用 8~12 μm 波段碲镉汞探测器,像元数为

1k×1k 元,探测器辐射探测率波段平均值为  $7 \times 10^8 \text{ m} \cdot \text{W}^{-1} \cdot \text{Hz}^{-1/2}$ ;取瞬时视场角  $1^\circ \times 1^\circ$ ;光学系统焦距为 1.173 m,取系统 F 数为 3,则系统入射口径为 0.391 m;设光学玻璃数为 3,则光学系统透过率为 0.86;为了保证 IRST 系统 95%的探测概率,信噪比取 5;积分时间取 0.5 ms<sup>[11,16-17]</sup>。

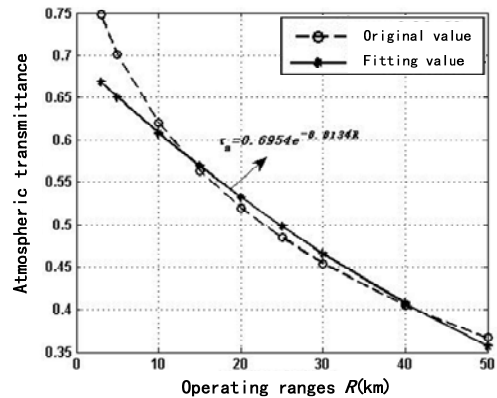


图 6 大气透过率拟合曲线

Fig.6 Atmospheric transmittance fitting curves

#### 4.1.2 AIM-9X 导引头参数推测

采用 3~5 μm 波段碲镉汞探测器,像元数为 128×128 元;探测器辐射探测率波段平均值取为  $3 \times 10^9 \text{ m} \cdot \text{W}^{-1} \cdot \text{Hz}^{-1/2}$ ;导引头瞬时视场角为  $3^\circ \times 3^\circ$ ;光学系统焦距为 0.132 m,取系统 F 数为 3,则系统入射口径为 0.044 m;光学系统透过率为 0.73;信噪比取 5;积分时间取 1 ms<sup>[10-11,18]</sup>。

#### 4.2 F-35 机载 IRST 对 F-22 作用距离计算

当 F-22 飞行马赫数为 0.9~2.0 时,F-35 的 IRST 对 F-22 的作用距离如图 7 所示。

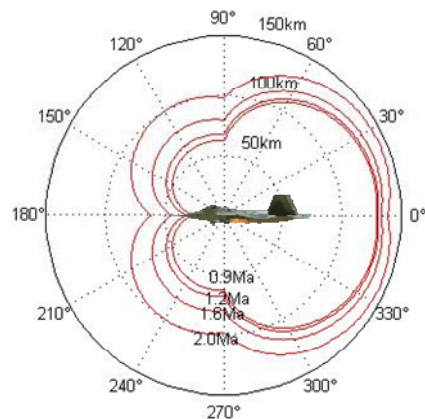


图 7 F-35 机载 IRST 对 F-22 作用距离

Fig.7 Operating ranges of F-35 airborne IRST for F-22

根据图 7 可得到,随着 F-22 飞行的马赫数不同,在迎头和尾后两个探测方向上,F-35 的 IRST 对 F-22 的作用距离如表 1 所示。

表1 F-35机载IRST对F22的作用距离

F-22 speed /Ma	2.0	1.6	1.2	0.9	
Operating ranges/km	nose direction	61.62	44.30	31.34	24.81
	tail direction	138.34	132.95	130.07	129.01

由图7和表1可知：

1)当F-22飞行马赫数为0.9~2.0时,F-35的IRST对F-22迎头的作用距离 $\leq 62$  km,据报道,先进IRST对三代机迎头探测距离为185 km<sup>[12,14]</sup>。IRST探测时,由于迎头探测为主要作战方向,因此,F-22的红外隐身效果显著。

2)F-22飞行马赫数为0.9~2.0时,F-35的IRST对F-22尾后的作用距离 $\geq 129$  km。尾后探测时,虽然飞机主要红外辐射源的红外辐射面积比侧视和仰视时要小,但由于发动机的贡献,飞机的红外辐射仍很大,因此F-35的IRST对F-22尾后作用距离较大。

3)从IRST的角度看,以F-22飞行马赫数为1.6为例,在方位平面上迎头方向 $\pm 30^\circ$ 范围内,F-35机载IRST对F-22的作用距离为44.3~69.3 km,IRST探测角度的变化对传感器作用距离的影响敏感度较高。因此,在飞机编队进行红外反隐身作战中,编队之间应保持一定的距离差和高度差,采用稀疏编队方式,从而有利于提高编队利用红外传感器发现敌隐身飞机的概率。

### 4.3 AIM-9X对F-22作用距离计算

AIM-9X导引头在3~5  $\mu\text{m}$ 波段探测F-22时,假设F-22飞行马赫数为0.9和2.0,计算得到导引头的作用距离如图8所示。

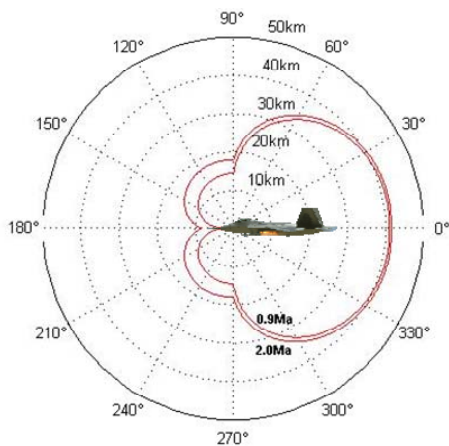


图8 AIM-9X导引头的作用距离

Fig.8 Operating ranges of AIM-9X infrared seeker for F-22

由图8可知,当F-22的飞行马赫数为0.9~2.0时,AIM-9X的导引头对F-22前半圆作用距离均小于20 km,而后半球的作用距离在18~42 km范围内。由于红外格斗弹攻击时,尾后攻击为主要作战方向,因此,F-22在近距离作战中,相比三代机并不具备明显优势,进入近距离作战的AIM-9X红外导弹对F-22的威胁较大。

## 5 结束语

依据公开资料和技术原理,研究了F-22的红外辐射特性,依据大气红外传输软件,拟合了典型条件下的大气透过率经验公式,外推了F-35的IRST和AIM-9X红外导引头的特性参数,计算了F-35的IRST和AIM-9X红外导引头对F-22的作用距离。研究结果对于飞机红外隐身设计与效能评估,以及红外隐身反隐身作战方案制订具有一定理论参考。为提升研究结果的合理性和有效性,可结合高精度飞行器红外特征软件、大气红外传输软件、红外传感器数据库,以及外场它机飞行试验,对本文研究方法和计算模型进行校验和修改完善。

### 参考文献:

- [1] 杨伟. 美国第四代战斗机 F-22“猛禽”[M]. 北京: 航空工业出版社, 2009.  
YANG Wei. *American Fourth-generation Fighter F-22 Raptor*[M]. Beijing: Aviation Industry Press, 2009.
- [2] 王海晏. 红外辐射及应用[M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2014.  
WANG Haiyan. *Infrared Radiation and Application*[M]. Xi'an: Xi'an University of Electronic Science and Technology Press, 2014.
- [3] Gonda T G, Curran A R. Applications of the MuSES infrared signature code[R]. AD-A457152, 2005.
- [4] 朱宝鑫. 漫谈飞机红外隐身技术[J]. 兵器知识, 2011(5): 46-47.  
ZHU Baoli. Ramble on infrared stealth technology of aircraft[J]. *Ordnance Knowledge*, 2011(5): 46-47.
- [5] 黄臻, 姜伟, 张杨. 飞机红外隐身及探测技术简介[J]. 红外, 2017, 38(8): 1-7.  
HUANG Zhen, JIANG Wei, ZHANG Yang. Brief introduction to infrared stealth and detection technology of aircraft[J]. *Infrared*, 2017, 38(8): 1-7.
- [6] 刘娟, 龚光红, 韩亮. 飞机红外辐射特性建模与仿真[J]. 红外与激光工程, 2011, 40(7): 1209-1213.  
LIU Juan, GONG Guanghong, HAN Liang. Modeling and simulation of airplane infrared characteristic[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2011, 40(7): 1209-1213.
- [7] 李飞. 大气传输对中长波红外辐射衰减分析[J]. 红外技术, 2019, 41(4):

- 311-316.
- LI Fei. Analysis of atmospheric transmission impact on mid-wave and long-wave infrared radiation[J]. *Infrared Technology*, 2019, **41**(4): 311-316.
- [8] 何建伟, 曹晨, 张昭. 红外系统对隐身飞机的探测距离分析[J]. *激光与红外*, 2013, **43**(11): 1243-1247.
- HE Jianwei, CAO Chen, ZHANG Zhao. Analysis on operating range of a IR system for stealth aircraft[J]. *Laser & Infrared*, 2013, **43**(11): 1243-1247.
- [9] 王芳, 罗寰, 王海晏, 等. 机载红外搜索跟踪系统有效探测区域研究[J]. *激光与红外*, 2018, **48**(5): 585-590.
- WANG Fang, LUO Huan, WANG Haiyan, et al. Research on effective detection area of airborne infrared search and tracking system[J]. *Laser & Infrared*, 2018, **48**(5): 585-590.
- [10] 马晓平, 赵良玉. 红外导引头关键技术国内外研究现状综述[J]. *航空兵器*, 2018(3): 3-10.
- MA Xiaoping, ZHAO Liangyu. An overview of infrared seeker key technologies at home and abroad[J]. *Aero Weaponry*, 2018(3): 3-10.
- [11] RD 小哈得逊. 红外系统原理[M]. 北京: 国防工业出版社, 1975.
- Richard D Hudson J R. *Infrared System Engineering*[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 1975.
- [12] 牟达, 王建立, 陈涛. 凝视型红外搜索跟踪系统对高速飞机作用距离的分析[J]. *光学技术*, 2007, **32**(3): 420-423.
- MU Da, WANG Jianli, CHEN Tao. Analysis on operating range of a staring infrared search and track system for high-speed aircraft[J]. *Optical Technique*, 2007, **32**(3): 420-423.
- [13] 何苹, 左文博, 杨建军. 预警机红外辐射特性研究[J]. *装备指挥技术学院学报*, 2009, **36**(5): 114-116.
- HE Ping, ZUO Wenbo, YANG Jianjun. Study on infrared radiation feature of early-warning aircraft[J]. *Journal of the Academy of Equipment Command & Technology*, 2009, **36**(5): 114-116.
- [14] 刘剑. 飞行器红外隐身性能评估系统研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2017.
- LIU Jian. Infrared Stealth Performance Evaluation System of Aircraft[D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2017.
- [15] 罗明东, 李悦霖. F-22 战斗机红外特征预测模型及飞行测试验证[J]. *国际航空杂志*, 2010(11): 60-61.
- LUO Mingdong, LI Yuelin. F-22 IR signature flight test model validation[J]. *International Aviation*, 2010(11): 60-61.
- [16] 杨百剑, 万欣. 新一代机载红外搜索跟踪系统技术发展分析[J]. *激光与红外*, 2011, **41**(9): 961-964.
- YANG Baijian, WAN Xin. New generation ofIRST technology in plane development[J]. *Laser & Infrared*, 2011, **41**(9): 961-964.
- [17] 申洋, 唐明文. 机载红外搜索跟踪系统(IRST)综述[J]. *红外技术*, 2003, **25**(1): 13-18.
- SHEN Yang, TANG Mingwen. An overview of infrared search and track (IRST) system[J]. *Infrared Technology*, 2003, **25**(1): 13-18.
- [18] 贾林通, 童中翔, 王超哲, 等. AIM-9X 红外成像制导导弹的发展综述与启示[J]. *飞航导弹*, 2015(12): 20-24.
- JIA Lintong, TONG Zhongxiang, WANG Chaozhe, et al. Development overview and revelations of AIM-9X infra-guided missile[J]. *Aerodynamic Missile Journal*, 2015(12): 20-24.