

〈制导与对抗〉

## 飞行器红外隐身性能评估方法研究

赖德雄, 张云飞

(北京航空航天大学 航空科学与工程学院, 北京 100191)

**摘要:** 针对飞行器的红外隐身问题, 计算了红外辐射在大气中传输的透过率, 建立了考虑背景辐射的红外隐身性能评估模型, 提出了临界辐射强度的概念, 建立了由临界辐射强度和作用距离关系曲线求解红外系统作用距离的方法。在  $3\sim 5\ \mu\text{m}$  波段和  $8\sim 12\ \mu\text{m}$  波段, 计算并分析了温度、相对湿度、大气能见度和海拔高度等大气参数对作用距离的影响。以某型飞行器为例, 分析了红外隐身性能, 给出了红外辐射强度和作用距离的定量关系。

**关键词:** 飞行器; 红外隐身; 隐身性能; 隐身评估;

中图分类号: V218

文献标识码: A

文章编号: 1001-8891(2014)05-0398-06

## Evaluation Method Research for Aircraft Infrared Stealth Performance

LAI De-xiong, ZHANG Yun-fei

(School of Aeronautic Science and Engineering, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100191, China)

**Abstract:** Aiming at the issue of aircraft infrared stealth, transmittance of infrared radiation propagation in atmosphere was calculated, evaluation model of infrared stealth performance was established in consideration of background radiation, the concept of critical radiation intensity was proposed, and the method of solving operating range of infrared system was established through critical radiation intensity and operating range relation curve. In  $3\sim 5\ \mu\text{m}$  band and  $8\sim 12\ \mu\text{m}$  band, the influence of atmospheric parameters for operating range was calculated and analyzed, such as temperature, relative humidity, atmosphere visibility and altitude, etc. Infrared stealth performance was evaluated based on certain aircraft, and quantitative relation between infrared radiation intensity and operating range was given.

**Key words:** aircraft, infrared stealth, stealth performance, stealth evaluation

### 0 引言

红外探测技术的发展使武器装备的生存能力受到严重的挑战, 为对抗各种红外探测器(或系统)的探测、识别和跟踪, 世界上几个主要大国都在努力发展反红外探测技术——红外隐身技术。红外隐身技术是通过改变被探测目标的红外辐射特征, 降低目标被红外探测器发现的可能性的一种手段, 红外隐身技术已成为现代化战争中必不可少的重要组成部分<sup>[1]</sup>。

红外系统是一种全被动式的、不易被对方发现和干扰的探测系统。它不受昼夜时间的限制, 能快速探测、识别和辨认战场目标。红外系统的作用距离是指在一定的大气条件下, 系统对某一实际目标可能发

现、识别和认清的最远距离, 是描述武器装备隐身效果的一个重要指标。国外对红外系统获取目标的性能有多年研究, 已经取得了实质性的成果<sup>[2]</sup>。国内也积极开展这方面的研究。武振波等<sup>[3]</sup>利用作用距离与红外辐射强度的关系, 通过反复迭代求解了作用距离, 但求解过程比较繁琐。韦第升等<sup>[4]</sup>建立了红外辐射对比度与作用距离的理论关系, 采用大气透过率与作用距离的拟合关系式求解作用距离, 求解过程较为简单, 但是拟合关系式比较复杂。

本文通过建立临界辐射强度和作用距离的关系曲线, 提出了一种计算作用距离的简便方法, 并通过算例分析了大气参数对作用距离的影响, 进而以某型战斗机为例分析了红外隐身性能, 为飞行器的红外隐

身设计和研究提供了参考。

## 1 红外辐射在大气中的传输

红外辐射在大气中传输时，它与大气成分相互作用，会受到衰减，这种作用通常用大气透过率表示，它是指电磁波通过大气中某个给定路径长度后的辐射能与入射辐射能的比值。大气衰减作用有3个方面：1) 大气中某些气体分子（水蒸气、二氧化碳等）的吸收；2) 大气分子、气溶胶的散射；3) 气象条件（云、雾、雨、雪）造成的衰减。因此大气总的光谱透过率的计算式为<sup>[5]</sup>：

$$\tau(\lambda) = \tau_1(\lambda) \cdot \tau_2(\lambda) \cdot \tau_3(\lambda) \quad (1)$$

式中： $\tau_1(\lambda)$ 、 $\tau_2(\lambda)$ 、 $\tau_3(\lambda)$ 分别为被吸收、散射和气象条件制约的大气光谱透过率。这里主要考虑前两个影响因素。

### 1.1 大气的吸收

#### 1.1.1 海平面上的大气吸收

大气中对红外辐射吸收起主要作用的成分是水蒸气、二氧化碳和臭氧<sup>[6]</sup>。其中臭氧在高层空间含量较高。二氧化碳含量相对稳定，随着海拔高度的增大，变化并不是很明显，直到80km的高空，其体积比仍然保持常数。水蒸气含量随海拔高度和气象条件的变化比较明显，在低层大气中含量较高，是对红外辐射传输影响较大的一种成分。这里主要考虑水蒸气和二氧化碳的吸收<sup>[7]</sup>：

$$\tau_1(\lambda) = \tau_{\text{H}_2\text{O}}(\lambda) \cdot \tau_{\text{CO}_2}(\lambda) \quad (2)$$

对于一定路程长度内水蒸气对红外辐射的透过率，首先要计算该路程长度内水蒸气的含量，而水蒸气含量可用可凝水量来表示。可凝水量定义为：将测量路程上的水蒸气压缩成相同截面水层的厚度，单位为mm/km，可通过大气温度和相对湿度计算获得。利用计算出的水蒸气含量，通过查表可获得海平面水平路程上水蒸气对红外辐射的透过率<sup>[8]</sup>。

二氧化碳的吸收作用取决于二氧化碳分子在空气中的含量。试验研究表明，二氧化碳的密度在大气近表层中保持不变，因此二氧化碳的光谱透过率只与辐射通过的距离有关，通过查表可获得海平面水平路程上二氧化碳对红外辐射的透过率<sup>[8]</sup>。

#### 1.1.2 高度修正

由于大气中水蒸气和二氧化碳的含量随高度有所变化，所以要对一定高度上的大气透过率进行修正。设高度 $H$ 的水平路径长度为 $R$ ，大气压为 $P$ ，海平面大气压为 $P_0$ ，则等效路程长度为：

$$R_0 = R(P/P_0)^x \quad (3)$$

式中的指数 $x$ 对水蒸气为 $x=0.5$ ；对二氧化碳，为 $x=1.5$ 。式(3)表明，在海拔高度 $z$  (km)的水平路径 $R$ 上，大气透过率与长度为 $R_0$ 的海平面水平路径等效。实际上，对流层( $<20$ km)大气为多元模式， $(P/P_0)^x$ 有如下函数关系<sup>[9]</sup>：

$$\begin{cases} (P/P_0)^{0.5} \approx \exp(-0.05938z) \\ (P/P_0)^{1.5} \approx \exp(-0.178z) \end{cases} \quad (4)$$

### 1.2 大气的散射

大气对红外辐射的散射影响主要是大气中分子和悬浮微粒的散射作用造成的，主要有瑞利散射和米(Mie)散射两种。一般来说，散射作用比分子吸收作用弱，且随着波长增大而逐渐降低。在一定条件下，由散射导致的透过率可用经验公式来估算<sup>[9]</sup>：

$$\tau_2(\lambda) = \exp\left[-\frac{3.912}{V}\left(\frac{\lambda_0}{\lambda}\right)^q R\right] \quad (5)$$

式中： $V$ 是气象能见距离，km； $\lambda_0=0.55\mu\text{m}$ ，在此波长处吸收实际为零，因此衰减纯属散射造成； $R$ 为距离，km； $q$ 是波长修正因子，视气象能见距离 $V$ 的不同而取值。

## 2 飞行器红外隐身评估模型

### 2.1 背景辐射

在红外系统的应用中，背景的影响是不可忽视的。假定目标周围的背景是均匀的，仅当目标对背景有足够的对比度（亮度或温度对比度），尤其是光程中大气对红外辐射进行衰减后仍有足够的对比度，这是进行目标探测与识别的必要条件<sup>[10-11]</sup>。如果已知目标周围的背景温度，根据普朗克定律得到背景的辐射出射度<sup>[12]</sup>：

$$M_B = [F(\lambda_2 T_B) - F(\lambda_1 T_B)] \sigma T_B^4 \quad (6)$$

式中： $F(\lambda T)$ 为黑体辐射函数，可根据黑体辐射函数表<sup>[13]</sup>查出； $\sigma$ 为斯蒂芬-玻尔兹曼常数， $5.67 \times 10^{-12} \text{ W} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{K}^{-4}$ ； $T_B$ 为环境温度，K。背景的辐射强度为：

$$I_B = \frac{1}{\pi} \epsilon_B M_B A_p \quad (7)$$

式中： $\epsilon_B$ 为背景发射率； $A_p$ 为飞行器在观测方向上的有效辐射面积，其计算式为<sup>[14]</sup>：

$$A_p = |lh \cos \alpha \sin \beta| + |wh \cos \alpha \cos \beta| + |lw \sin \alpha \cos \beta| \quad (8)$$

式中： $l$ 、 $w$ 、 $h$ 分别为飞行器的实际长度、宽度和高度； $\alpha$ 为俯仰角， $\beta$ 为方位角，是相对于飞行器鼻锥方

向给定的。

## 2.2 作用距离

当红外探测系统探测飞行器时, 由于距离较远, 飞行器的红外辐射没有完全充满探测器视场, 可视为点源探测。对于点源目标, 有一部分背景辐射入射到探测器靶面上, 因此红外系统的作用距离方程为<sup>[15]</sup>:

$$R = \left[ (I_T - I_B) \cdot \frac{\pi \tau_a \tau_0 D_0 (NA) D^*}{2(\omega \Delta f)^{1/2} SNR} \right]^{1/2} \quad (9)$$

式中:  $R$  为探测系统的作用距离, m;  $I_T$  为目标的红外辐射强度, W/sr;  $\tau_a$  为大气对红外辐射的透过率, 与作用距离有关;  $\tau_0$  为光学系统透过率;  $D_0$  为系统的通光孔径, m;  $NA$  为数值孔径, 即  $D_0/2f$  ( $f$  为焦距, m);  $D^*$  为归一化探测率,  $\text{cm} \cdot \text{Hz}^{1/2} \cdot \text{W}^{-1}$ ;  $\omega$  为瞬时视场角, sr;  $\Delta f$  为等效噪声带宽, Hz;  $SNR$  为系统信噪比。

对于给定的系统, 在选定的信噪比条件下, 光学系统与探测器系统的技术参数是固定的, 可用系统特征常数  $C$  来表示<sup>[16]</sup>:

$$C = \left[ \frac{\pi \tau_0 D_0 (NA) D^*}{2(\omega \Delta f)^{1/2} SNR} \right]^{1/2} \quad (10)$$

因此, 红外系统的作用距离方程简化为:

$$R = C \cdot (I_T - I_B)^{1/2} \tau_a(R) \quad (11)$$

式中: 透过率  $\tau_a = \tau_a(R)$  与外界环境及距离  $R$  有关, 因此上式为超越方程, 在已知目标及背景辐射强度条件下, 求解红外系统的作用距离时一般采用迭代方法。

假设在一定的环境条件和给定发现概率的信噪比条件下, 有一种特殊的目标, 当这一目标以等高度的航迹从远处逐渐逼近红外系统时, 也就是当两者之间的距离逐渐减小时, 其辐射强度也逐渐降低, 称这种目标为临界目标, 这种目标的红外辐射强度始终使探测它的红外系统的作用距离处在最大作用距离上, 其变化的辐射强度为临界辐射强度。其计算式由(11)变换得到:

$$I_{cr} = I_T - I_B = \frac{R^2}{C^2 \tau_a(R)} \quad (12)$$

对于给定的环境条件和红外系统, 由(12)式可计算得到临界辐射强度和作用距离的关系曲线(图1), 在一定的作用距离范围内(80 km 以内), 可以近似用3次曲线拟合该曲线, 如图1中虚线所示。如果已知飞行器的实际辐射强度, 通过该曲线可得到在给定发

现概率下红外系统的作用距离, 该距离也可称为飞行器对红外系统的暴露距离。

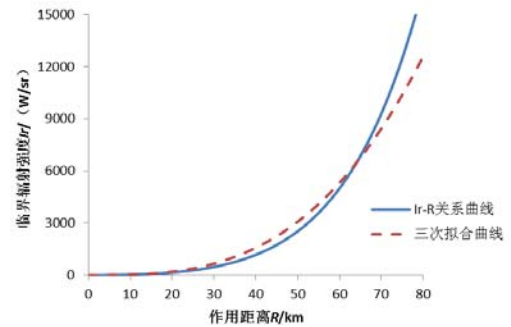


图1 临界辐射强度-作用距离关系曲线

Fig.1 Critical radiation-operating range relation curve

## 3 分析计算

### 3.1 大气参数对作用距离的影响

红外辐射在  $3 \sim 5 \mu\text{m}$  和  $8 \sim 12 \mu\text{m}$  两个“大气窗口”上的透过率最大, 目前红外探测器也主要在这两个“大气窗口”进行探测。文献[9]中以我国西南地区11月典型气候(温度  $15^\circ\text{C}$ , 海拔为  $1.8914 \text{ km}$ , 相对湿度  $50\%$ , 大气能见度  $18 \text{ km}$ )为条件, 利用 LOWTRAN6 软件计算得到  $8 \sim 12 \mu\text{m}$  波段的大气透过率。将本文计算结果和文献[9]中的数据对比(图2), 误差不超过  $5\%$ , 因此本文的算法是有效的。

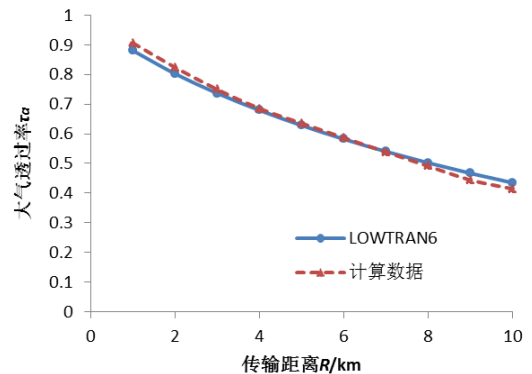


图2 大气透过率计算数据的验证

Fig.2 Test of calculating data for atmospheric transmittance

由式(11)可以看出, 大气透过率对作用距离有影响, 而温度  $T$ 、相对湿度  $H_r$ 、大气能见度  $V$ 、高度  $H$  等大气参数又与大气透过率有关<sup>[17]</sup>。分析大气参数对作用距离的影响时, 采用的方法是: 使4个大气参数中1个参数变化, 其余3个参数固定, 绘制作用距离随目标辐射强度的变化曲线(图3~图6)。假设系统特征常数  $C = 3 \text{ km} \cdot \text{W}^{-1/2} \cdot \text{sr}^{1/2}$ , 飞行器的有效辐射面积为  $10 \text{ m}^2$ 。

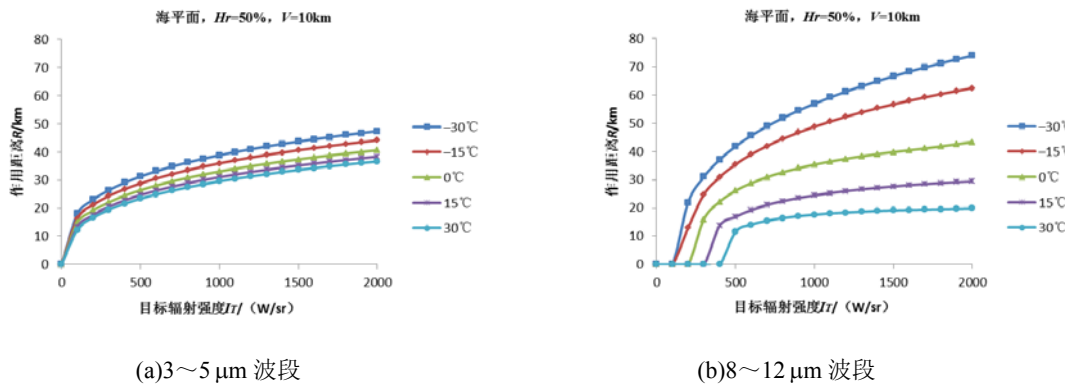


图3 温度对作用距离的影响

Fig.3 The influence of temperature for operating range

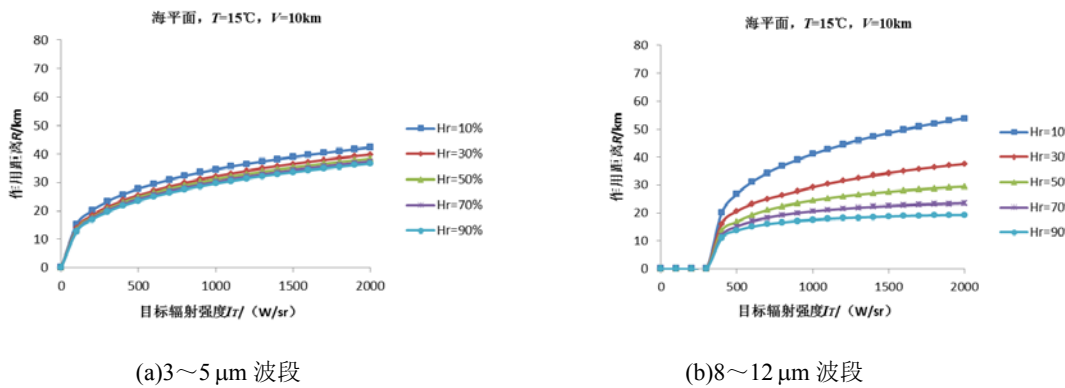


图4 相对湿度对作用距离的影响

Fig.4 The influence of relative humidity for operating range

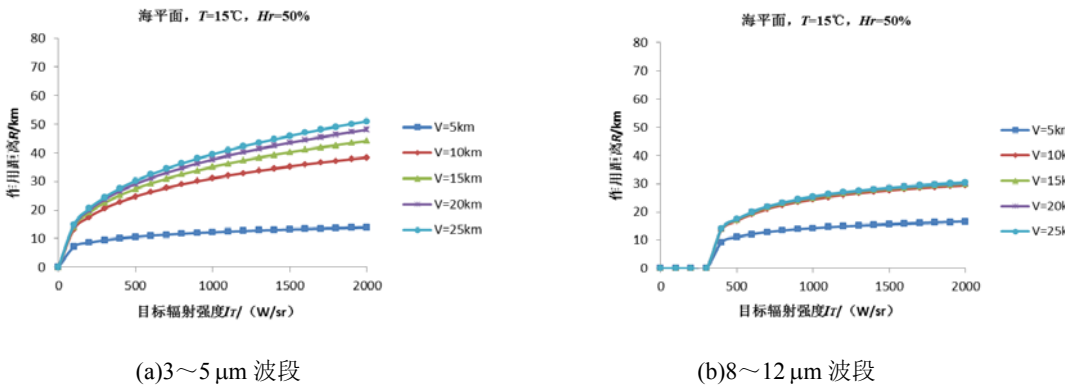


图5 大气能见度对作用距离的影响

Fig.5 The influence of relative atmosphere visibility for operating range

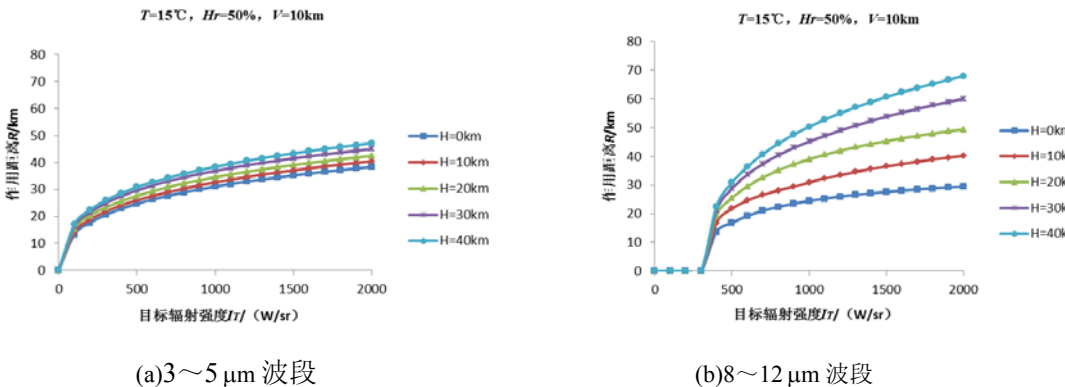


图6 海拔高度对作用距离的影响

Fig.6 The influence of altitude for operating range

总体看来,作用距离随着目标辐射强度的增大而增大,而各种大气参数对作用距离具有不同程度的影响。对于相同的目标辐射强度,由图 3、图 4 可见,温度越高,相对湿度越大,作用距离越小;由图 5、图 6 可见,大气能见度越大,高度越高,作用距离越大。在海平面高度,温度为 15℃时,相对湿度为 50%,大气能见度为 10 km,在 0~2000 W/sr 的目标辐射强度范围内,对于相同的目标辐射强度,3~5 μm 波段的作用距离始终大于 8~12 μm 波段的作用距离,当目标辐射强度为 2000 W/sr 时,3~5 μm 波段的作用距离为 37.8 km;8~12 μm 波段的作用距离为 29.5 km。

3.2 红外隐身效果分析

假设红外系统的性能参数:探测波段为 3~5 μm;瞬时视场角为 1.5°×1.0°;焦距 300 mm;通光孔径 100 mm;探测器归一化探测率波段平均值为  $2.0\times10^{11}$  cm·Hz<sup>1/2</sup>·W<sup>-1</sup>;光学系统透过率为 0.7;噪声等效带宽为 250 Hz;信噪比 SNR 为 5,可以满足目标探测概率的要求。假设红外系统工作在与飞行器同样的高度。

以国外某型战斗机为算例<sup>[12]</sup>,机长  $l=15.4$  m,翼展  $w=7.15$  m,机高  $h=4.13$  m。其在水平面上 0°~180°方位角上的辐射强度如图 7 所示(包括非加力状态和加力状态)。背景环境假设为中纬度夏季 10 km 高空,环境温度  $T_B=235$  K,水气密度为 0.064 g/m<sup>3</sup>。取背景发射率  $\epsilon_B$  为 1,根据前面方法计算战斗机背景辐射强度。计算大气透过率时大气能见度取 10 km。

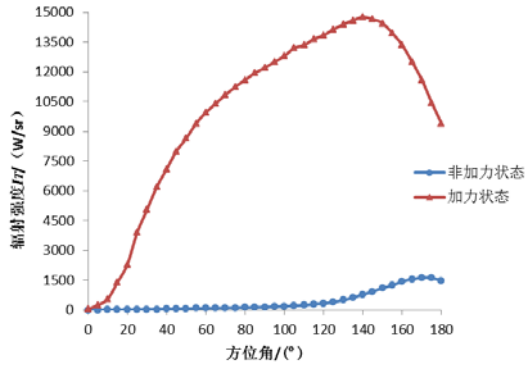


图 7 某型战斗机静态红外辐射特性(3~5 μm)  
Fig.7 Static infrared radiation feature of certain aircraft (3-5 μm)

根据该战斗机 3~5 μm 波段的红外辐射强度,通过计算出的临界辐射强度和作用距离的关系曲线得到红外系统的作用距离(图 8)。对比这两个图可以看出,红外系统的作用距离随着红外辐射强度的增大而增大,但变化趋势越来越平缓。对于非加力状态,辐射强度的变化范围为 5~1626 W/sr,作用距离的变化范围为 5~59 km,变化趋势基本一致;对于加力状态,当辐射强度在 50~6200 W/sr 时,作用距离为 19~81

km,变化趋势较为吻合,当辐射强度在 6200~14750 W/sr 时,作用距离为 81~98 km,变化趋势有较为显著的差别。

降低目标的红外辐射强度是红外隐身的一项重要措施。对此战斗机在加力状态和非加力状态下分别在相对机头的 4 个方位(45°、90°、135°、180°)上降低其红外辐射强度,研究其作用距离的降低程度,以此分析红外隐身效果(表 1、表 2)。

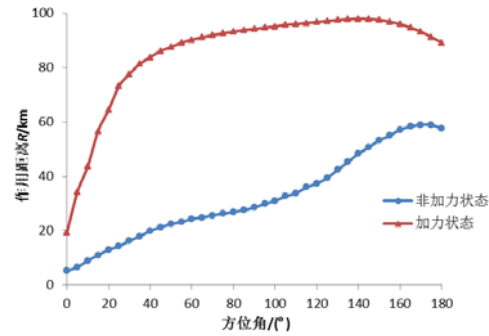


图 8 红外系统对战斗机的作用距离(3~5 μm)  
Fig.8 Operating range of infrared system for aircraft (3-5 μm)

表 1 非加力状态下红外系统作用距离降低量  
Table 1 Operating range reduction of infrared system in Afterburner (%)

方位/°	红外辐射强度降低幅度/%				
	10	30	50	70	90
45	4.2	14.0	26.4	44.1	93.1
90	3.7	12.1	22.7	37.7	66.1
135	3.1	10.2	19.2	31.8	54.7
180	2.7	9.1	17.2	28.8	50.1

表 2 加力状态下红外系统作用距离降低量  
Table 2 Operating range reduction of infrared system in no-afterburner (%)

方位/°	红外辐射强度降低幅度/%				
	10	30	50	70	90
45	2.3	7.7	14.5	24.4	43.5
90	2.2	7.3	14.0	23.5	42.0
135	2.1	7.2	13.7	23.1	41.4
180	2.3	7.5	14.3	24.1	42.9

由表 1、表 2 的数据可以看出,在不同方位上,红外辐射强度降低幅度越大,红外系统的作用距离降低得也越多。在 90°方位上,辐射强度降低 50%,非加力状态下作用距离可降低 22.7%,约 6.5 km,加力状态下作用距离可降低 14.0%,约 13.2 km;辐射强度降低 70%,非加力状态下作用距离可降低 37.7%,约

10.7 km, 加力状态下作用距离可降低 23.5%, 约 22.2 km。由此数据可以看出, 非加力状态下隐身效果比加力状态下更明显, 这是因为非加力状态下, 飞机各向的红外辐射强度较小, 相对加力状态来说, 受背景辐射的影响较大。对于加力状态下, 如果飞行器在尾向 180°方位处的红外辐射强度降低 50%, 则可将红外系统的作用距离减小 14.3 km, 若飞行速度为 1.5 Ma, 则这段距离可为飞行器提供约 28 s 的突防时间。

## 4 结论

1) 提出了临界辐射强度概念, 建立了临界辐射强度与作用距离关系曲线计算方法。应用该方法可以通过飞行器红外辐射强度计算红外系统的作用距离。这种方法相比迭代法, 既简单又方便。

2) 温度、相对湿度、大气能见度、和高度等大气参数会通过影响大气透过率和背景辐射来间接影响红外系统的作用距离。大气参数对 3~5  $\mu\text{m}$  和 8~12  $\mu\text{m}$  波段的红外系统作用距离的影响有一定的差别。

3) 当辐射强度很小时, 辐射强度和作用距离的关系近似抛物线曲线; 当辐射强度逐渐增大时, 辐射强度和作用距离的关系跟抛物线曲线的偏差越来越大。由于大气透过率的影响, 在一定的作用距离范围内 (80 km 以内), 作用距离近似与辐射强度的 1/3 次方成正比关系。与雷达方程中作用距离与 RCS 的 1/4 次方成正比的关系相比, 降低飞行器的红外辐射强度, 能更有效地提高其红外隐身性能。

## 参考文献:

- [1] 陈彪, 张春元. 红外隐身技术在军事上的应用[J]. 光学技术, 2006, 32: 577-580.
- [2] Ratches J A, Vollmerhausen R H, Driggers R G. Target acquisition performance modeling of infrared imaging systems: past, present, and future[J]. *IEEE Sensor Journal*, 2001, 1(1): 31-40.
- [3] 武振波, 武哲. 武装直升机红外隐身系统研究[J]. 北京航空航天大学学报, 2003, 29(7): 588-592.
- [4] 韦第升, 王小群, 杜善义. 飞行器红外隐身效能工程评价方法[J]. 航空学报, 2008, 29(6): 1593-1597.
- [5] 王娟. 红外成像系统的作用距离估算[D]. 成都: 电子科技大学, 2004.
- [6] Rao G A, Mahulikar S P. Effect of atmospheric transmission and radiance on aircraft infrared signatures[J]. *Journal of Aircraft*, 2005, 42(4): 1046-1054.
- [7] 周立伟, 刘玉岩. 目标探测与识别[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2002.
- [8] 周国辉, 刘湘伟, 徐记伟. 一种计算红外辐射大气透过率的数学模型[J]. 红外技术, 2008, 30(6): 331-334.
- [9] 张敬贤, 李玉丹, 金伟其. 微光与红外成像技术[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 1995.
- [10] Jacobs P A. Thermal infrared characterization of ground targets and background[M]. *Bellingham: The international Society for Optical Engineering*, 2006.
- [11] 梅遂生, 杨家德. 光电子技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 2004.
- [12] 张建奇, 方小平. 红外物理[M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2004.
- [13] 陶文铨. 传热学[M]. 西安: 西北工业大学出版社, 2006.
- [14] 牟达, 王建立, 陈涛. 凝视型红外搜索跟踪系统对武装直升机作用距离的分析[J]. 兵工学报, 2008, 29(3): 313-317.
- [15] Hudson R E, Jr. *Infrared System Engineering* [M]. Hoboken: John Wiley & Sons, Inc., 2006.
- [16] 李世祥. 光电对抗技术[M]. 长沙: 国防科技大学出版社, 2000.
- [17] 樊宏杰, 陈前荣, 杨淼淼, 等. 不同气象条件下飞机红外辐射等效折算[J]. 红外技术, 2012, 34(11): 672-676.