

飞机红外辐射特性及其探测技术研究

王超哲,童中翔,芦艳龙,柴 栋
(空军工程大学工程学院,陕西 西安 710038)

摘要:根据红外辐射的基本原理,提出了基于温度场分布的飞机红外辐射计算方法。依据红外探测器的工作原理,得到经大气传输和目标与背景对比后探测器接收到的有效目标信息。通过探测器对某型飞机探测距离的计算和分析,总结出了影响探测效果的五个主要的飞机红外辐射特性:光谱特性、方位特性、高度特性、速度特性和发动机状态特性。在此基础上讨论了红外探测器的设计和使用上以及飞机红外隐身上应注意的问题。

关键词:红外探测器;红外辐射;尾焰;尾喷口;蒙皮

中图分类号:TN214 **文献标识码:**A **DOI:**10.3969/j.issn.1001-5078.2011.09.012

Study on the airplane's infrared radiation characteristics

WANG Chao-zhe, TONG Zhong-xiang, LU Yan-long, CHAI Dong
(Engineering College, Air Force Engineering University, Xi'an 710038, China)

Abstract: According to IR radiation's principle, the calculating method of airplane's IR radiation on the basis of temperature field distributing is proposed. The useful object information which the IR detector receives after atmosphere's transmission is gained. By calculating and analyzing the detected distance of a certain plane, five significant characteristics of airplane's infrared radiation that influence the detecting effect are pointed out, which include spectrum characteristic, direction characteristic, altitude characteristic, velocity characteristic and engine state characteristic. Based on the conclusions, problems about IR detector and plane's IR stealth are discussed.

Key words: infrared detector; infrared radiation; plume; propelling nozzle; skin of airplane

1 引言

随着雷达隐身技术的发展,作战飞机的雷达反射截面积越来越小,使得利用无线电手段探测目标越来越困难。而这类目标高速运动时与空气的摩擦和其发动机的尾焰均会产生强烈的红外辐射,有利于红外系统对目标的探测。红外探测是利用目标与背景之间的红外辐射差异,所形成的热点或图像来获取目标和背景信息的,以其被动工作隐蔽性好,探测精度高,不受无线电干扰的影响,可昼夜工作等优势,成为预警或制导探测的发展趋势^[1-2]。

飞机目标的红外辐射特性是红外探测的基础,基于探测器的飞机红外辐射特性,即研究飞机红外辐射的哪些特性影响红外探测器对飞机的探测效果——最大可探测距离,从而为探测器的设计和使用

提供指导,也为飞机的红外隐身提供依据。

目前在飞机红外辐射领域进行给定条件下飞机辐射计算与仿真的居多,分析飞机红外辐射特性影响因素和变化规律的较少,且计算方法多采用简便易行工程算法,计算精度和通用性不太理想^[3-5]。本文根据红外辐射的基本原理,通过温度场的计算确定飞机的红外辐射,具有较高的精度,在此基础上研究飞机辐射对探测器探测距离的影响。

2 飞机红外辐射计算模型

飞机作为辐射源其红外辐射主要来自三部分:

基金项目:国家自然科学基金项目(No. 60772162)资助。

作者简介:王超哲(1985-),女,博士研究生,研究方向为飞行器红外对抗仿真。E-mail: wcz667@sina.com

收稿日期:2011-03-20; **修订日期:**2011-04-25

尾焰、尾喷口和蒙皮。根据红外辐射的基本原理,应先确定飞机不同飞行条件下的温度场,然后计算其辐射场。下面建立三部分辐射各自的计算模型。

2.1 尾焰红外辐射模型

尾焰的辐射光谱主要取决于尾焰的成分与温度,尾焰是飞机发动机喷射的高温、高速气流,其主要成分是 $C_2O, N_m O_n, H_2O, CO$ 等,各种高温气体之间存在着放射与吸收红外能量的复杂关系^[6]。本文对尾焰辐射的计算采用求解辐射传输方程的方法。

首先需要计算尾焰的温度分布。国内外各大研究机构开发出了多种 CFD 软件,且能够达到工程计算的要求^[7]。本文以某型飞机的发动机为例,利用 FLUENT 软件求解尾焰流场全三维、可压缩流控制方程组,计算出尾焰的温度分布如图 1 所示。

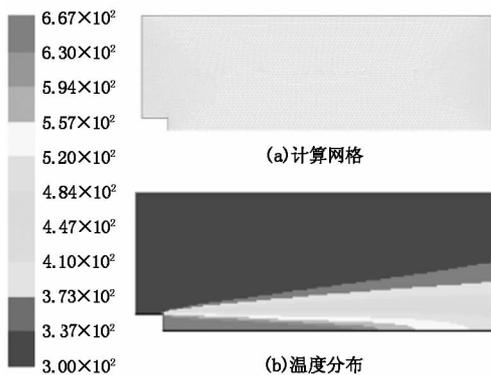


图 1 某涡喷发动机的尾焰流场计算网格及所得的温度分布

Fig. 1 the calculating grid of a turbo engine's plume and temperature distributing

根据普朗克定律可以求出尾焰温度场中各点处的光谱辐射度 $M_{\lambda,b}$,从而得到各点的光谱辐射亮度 $L_{\lambda,b}$ 。

对于空气喷气发动机尾焰辐射,利用传输方程可得到^[8]:

$$L_{\lambda}(\lambda, s) = - \int_0^s L_{\lambda,b}(\lambda, s') \frac{\partial}{\partial s'} \tau(\lambda; s', s) ds' \quad (1)$$

式中, L_{λ} 为尾焰外沿研究点处相对于观测方向的光谱辐射亮度; s 为观测方向的传输路径; $\tau(\lambda; s', s)$ 为沿 s 路径中某一点 $s' \sim s$ 的光谱透过率。

根据在气体介质中辐射亮度的定义,使公式(1)对波长 λ 、构成立体角的高低角 θ 、方位角 φ ,就可得到观测点处的辐照度:

$$H_s = \int_{\theta_i, \varphi, \lambda_i}^{\theta_f, \varphi, \lambda_f} L_{\lambda}(\lambda, s) d\lambda \cos\theta \sin\theta d\theta d\varphi \quad (2)$$

则尾焰在空中某一方向上在探测器工作波段的光谱辐射强度为:

$$I_p = \frac{H_{s,\lambda} R^2}{\tau_a} \quad (3)$$

式中, R 为尾焰至观测点的距离; τ_a 为尾焰至观测点的距离 R 形成的透过率。

2.2 尾喷口红外辐射模型

由涡轮盘后面的加力筒形成的热空腔是典型的灰色辐射体,辐射率 $\varepsilon \approx 0.8$,温度同发动机工作状态有很大关系,额定工作状态的温度要远远小于加力工作状态的温度。热空腔温度可认为是排气温度,其红外辐射在空中某一方向上在探测器工作波段的辐射强度 I_t 模型为:

$$I_t = \frac{n\varepsilon\sigma T^4}{\pi} A_t \eta_{\lambda_1-\lambda_2} \cos\theta \quad (W/sr) \quad (4)$$

式中, $\eta_{\lambda_1-\lambda_2} = \frac{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} M_b(\lambda, T) d\lambda}{\int_0^{\infty} M_b(\lambda, T) d\lambda}$; T 为热空腔平均温度;

A_t 为喷口壁在轴线上的投影面积; n 为发动机台数; θ 为喷口表面法线与探测器光轴之间的夹角,当 $\theta > 90^\circ$ 时, $I_t = 0$ 。

2.3 蒙皮红外辐射模型

蒙皮的红外辐射可分为自身辐射和反射环境辐射两部分。由于飞行环境的不确定性,本文的研究先不考虑飞机对太阳辐射的反射。

飞机高速飞行时,气动加热使飞机蒙皮温度升高,其温度分布可以用 FLUENT 软件计算,计算方法同上,只是边界条件和尾焰不同。在获取飞机蒙皮温度分布后,针对飞机外形进行简单的几何模拟,将其表面沿轴向和径向分成 $n \times m$ 个小面元,对温度变化明显的部分实施局部加密,以提高计算精度。根据普朗克定律求出各面元的光谱辐射度 $M_{\lambda,ij}(T_{ij})$,再利用积分可以求出该面元在任意波段内的辐射度。

为进一步获取飞机蒙皮的辐射强度,则必须确定观察点。在某时刻把观察点可观察到的所有面元的辐射强度进行求和,即可得到辐射强度:

$$I_s = \sum_{i,j} \frac{\Delta A_{ij} \cos\theta_{ij} \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} M_{\lambda,ij} d\lambda}{\pi} \quad (5)$$

式中, ΔA_{ij} 为面元面积; θ_{ij} 为视线与面元法线之间的夹角,当 $\theta_{ij} > 90^\circ$ 时, $I_{ij} = 0$ 。显然在某一时刻,飞机蒙皮在某一光谱波段内的辐射强度除与飞机蒙皮在该时刻表面温度有关外,还与观察点位置及飞机在

空中的姿态有关。

2.4 组合红外辐射模型

上面分别建立了飞机红外辐射三个主要组成部分的辐射计算模型,但飞机的总体红外辐射并不是三部分的简单加和,因为热空腔的辐射线穿过高温尾焰时会被强烈地吸收,而且飞机机身会对某方位的辐射形成遮挡。

尾焰的吸收对飞机后半球红外辐射影响很大,故对热空腔的辐射应加以修正:

$$I'_{t,\lambda} = I_{t,\lambda}(\lambda, a)\tau(\lambda, a, s) \quad (6)$$

式中, $I_{t,\lambda}(\lambda, a)$ 为热空腔向后半球的辐射通过喷口平面上某一小面元 a 的光谱辐射强度; $\tau(\lambda, a, s)$ 为通过尾焰的路径 $a-s$ 的透过率。则飞机总体红外辐射模型为:

$$I_{\lambda} = I'_{t,\lambda} + I_{p,\lambda} + I_{s,\lambda} \quad (7)$$

通过式(7)可算出任意飞行状态、任意视线方向上飞机在给定波段的红外辐射强度。

3 红外探测器接收的目标信息

飞机的红外辐射能被红外探测器接收,将其转换为便于测量的电能,最终形成目标的信息,用于预警、制导等。探测器接收到有效的目标信息,要经过大气传输和目标与背景的对比两个主要步骤。

3.1 红外辐射在大气中的传输

红外辐射在大气中的传输特性由大气透射率来描述^[9]。红外辐射在到达红外导引头之前受到大气中某些气体的选择性吸收、悬浮微粒的散射而衰减。因此大气透射率为:

$$\tau_a(\lambda) = \tau_a(\lambda)\tau_{\gamma}(\lambda) \quad (8)$$

式中, $\tau_a(\lambda)$ 为大气吸收所产生的透射率; $\tau_{\gamma}(\lambda)$ 为大气散射所产生的透射率。

(1) 大气吸收。大气中对红外辐射产生选择性吸收的主要是水蒸气和二氧化碳。目前已经根据理论分析结合实验测量得到了海平面水平路径上水蒸气及二氧化碳的光谱透射率。可以对海平面水平路径上水蒸气及二氧化碳的光谱透射率进行修正,求出其他路径上的透射率。具体方法为:对于水平路径,把高度 H 上的路程长度 x 折合成等效海平面上的路程 x_0 ,然后查找计算光谱透射率, x 和 x_0 的关系为:

$$x_0 = x \left(\frac{P}{P_0} \right)^{1/2} \left(\frac{T_0}{T} \right)^{1/4} \quad (9)$$

式中, P, P_0 分别为高度 H 处和海平面的大气压强;

T, T_0 分别为高度 H 处和海平面的大气温度,其值可通过前面的标准大气模型求得。对于不变组分二氧化碳,可以用传输路程直接从海平面水平路径上二氧化碳的光谱透射率表中查出大气透射率。对于大气中的可变组分水蒸气,根据可凝水量从海平面水平路径上水蒸气的光谱透射率表中查出透射率。

对于倾斜路程大气透射比的计算,把倾斜路程分成若干段,每段路程看成是水平的,以每段的中点处的压强作高度修正,然后把每段的透射率相乘,就得到整个倾斜路程的透射率。

(2) 大气散射^[10]。利用严格的散射理论来计算大气的散射是很麻烦的,本文利用可见距离,以经验公式来计算大气对给定辐射波长的散射系数和散射引起的透射率。任意波长 λ 的散射系数为:

$$\gamma(\lambda) = \frac{3.91}{R_{\gamma}} \left(\frac{\lambda_0}{\lambda} \right)^q \quad (10)$$

式中, $\lambda_0 = 0.55 \mu\text{m}$; R_{γ} 为可见距离,单位为 km ; q 按如下条件取值:当 $R_{\gamma} > 80 \text{ km}$ 时, $q = 1.6$; 中等可见距离的典型大气中 $q = 1.3$; $R_{\gamma} < 6 \text{ km}$ 的低能见度大气中 $q = 0.585 R_{\gamma}^{1/3}$ 。

所以,大气散射引起的透射率为:

$$\tau_{\gamma}(\lambda) = \exp[-\gamma(\lambda)x] \quad (11)$$

3.2 目标辐射与背景辐射的对比

在有背景辐射的情况下,红外系统响应的不是单独目标的辐射,而是响应目标与背景辐射之差。

红外系统面临的背景辐射主要有天空辐射、地面辐射和海洋辐射。其中,天空辐射包括阳光散射和大气辐射,散射亮度随探测器的仰角、太阳的高度角而变化,本文取测量的平均值;大气辐射则近似为一个温度等于环境温度的黑体辐射。地面辐射近似为一个温度为 280 K 的黑体辐射。海洋辐射也可考虑为水面对阳光散射和一个黑体辐射的叠加。

总之,背景对红外探测器接收的目标信息产生一定的影响,应根据背景辐射与目标辐射的对比对探测器接收的目标信息进行修正。影响探测距离的有效辐射亮度为:

$$\Delta L = L_t k_t - L_b k_b \quad (12)$$

式中, L_t, L_b 分别为目标和背景的辐射亮度; k 为红外系统对实际辐射体的辐射利用系数,即:

$$k = \frac{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} L(\lambda) d^* (\lambda) \tau_a \tau_0 d\lambda}{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} L(\lambda) d\lambda} \quad (13)$$

其中, τ_a 为大气透过率; τ_0 为光学系统透过率;

$d^*(\lambda)$ 为相对单色辐射探测率。

4 影响探测效果的飞机红外辐射特性

红外探测器的探测效果可用探测距离 R 来描述^[11]：

$$R = \sqrt{\frac{D_{\max}^* A_t A_0 \Delta L}{(A_d \Delta f)^{1/2} \frac{V_s}{V_N}}} \quad (14)$$

式中, A_d 为探测器面积; Δf 为测量电路带宽; V_s/V_N 为信噪比; D_{\max}^* 为单色探测率 $D^*(\lambda)$ 中的最大值; A_t 为辐射面积; A_0 为红外光学系统的入瞳面积。

由式(14)可见, 红外系统的探测距离与探测器、光学系统、工作波段、目标与背景辐射等有关。因此本文讨论影响探测效果的飞机红外辐射特性, 主要为光谱特性、方位特性、高度特性、速度特性和发动机状态特性。

以某型喷气式飞机为例, 给定大量不同的条件, 由第2节所给模型计算其红外辐射强度。并设某探测器的 $A_d = 25 \times 10^{-6} \text{ cm}^2$, $\Delta f = 714 \text{ Hz}$, $D_{\max}^* = 4 \times 10^{10} \text{ cm Hz}^{1/2}/\text{W}$, $V_s/V_N = 7$, $A_0 = 25 \text{ cm}^2$ 。由此计算光谱、方位、高度、速度、发动机状态对探测距离的影响。

4.1 光谱特性

由于大气窗口的存在和红外探测器的特性, 探测器的工作波段主要有 $3 \sim 5 \mu\text{m}$ 和 $8 \sim 14 \mu\text{m}$ 两类。因此应对飞机在这两个波段内的辐射分别计算。飞机的三种主要辐射源的辐射在两个波段内所占的比例如图2所示。

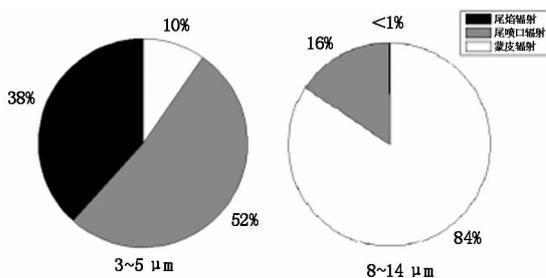


图2 飞机三种主要辐射源的辐射在两个波段内所占比例

Fig. 2 IR radiation proportion of jet plane's three major radiation sources in two wave bands

由图2可见, 在 $3 \sim 5 \mu\text{m}$ 波段, 尾焰和尾喷口辐射占很大比例, 蒙皮辐射较少; 在 $8 \sim 14 \mu\text{m}$ 波段, 蒙皮辐射占绝对优势, 而尾焰辐射几乎没有。原因在于: 尾喷管实际上是被排出的气体加热的圆柱形腔体, 其辐射峰值波长在 $3 \sim 5 \mu\text{m}$ 波段。尾焰辐

射的主要成分为峰值波长在 $2.7 \mu\text{m}$, $6.3 \mu\text{m}$ 处的水蒸气和 $4.3 \mu\text{m}$ 处的二氧化碳的分子辐射。飞机蒙皮辐射的峰值波长在 $8 \sim 14 \mu\text{m}$ 波段, 此波段较宽, 且飞机蒙皮的面积远大于喷口面积。

下面研究飞机方位、高度、速度、发动机状态对探测距离的影响将分别在 $3 \sim 5 \mu\text{m}$ 和 $8 \sim 14 \mu\text{m}$ 这两个波段中展开。

4.2 方位特性

飞机的红外辐射中发动机尾喷管的辐射强度最大, 但其辐射强度与探测角有很大关系, 尾后较强, 随探测角的增加辐射强度降低。尾焰与蒙皮的红外辐射是全方位的, 但它们的辐射强度相对于尾喷管较小。因此总体来说, 飞机的辐射强度带有明显的方向性。考虑三种辐射的共同作用, 飞机在铅垂面内不同方位上的探测距离如图3所示(高度 9 km , 速度 400 m/s , 部分加力, 平飞)。

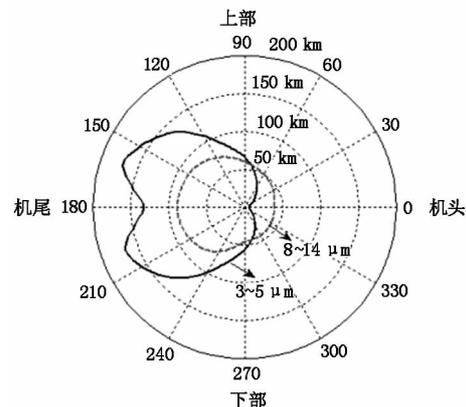


图3 某型飞机铅垂面内不同方位上的探测距离

Fig. 3 detected distance in plane's different directions

从图3可以看出, 在飞机后方的探测距离明显大于前方, 因为对飞机红外辐射贡献最大的尾喷管辐射集中在后半球。对于工作在 $3 \sim 5 \mu\text{m}$ 波段的探测器, 在飞机后方的探测距离远大于飞机前方, 且飞机正后方 (180°) 的探测距离不是最大, 稍小于 160° 或 200° 附近, 因为 $3 \sim 5 \mu\text{m}$ 波段主要是尾喷管和尾焰辐射, 在飞机的正前方, 尾喷管和尾焰的辐射都被遮挡, 在正后方尾喷管的辐射被尾焰气体强烈地吸收, 而在侧后方这种吸收作用减弱。对于工作在 $8 \sim 14 \mu\text{m}$ 波段的探测器, 飞机前后方的探测距离都较大, 因为蒙皮的辐射是全向的, 且其辐射集中在远红外波段。飞机上部的探测距离稍大于下部, 特别对于 $8 \sim 14 \mu\text{m}$ 波段探测器, 因为从上部和下部探测背景辐射不同, 且背景辐射多为远红外波。

4.3 高度特性

某型飞机在不同高度上以 400 m/s 的速度部分加力飞行,侧后方(与机头方向呈 160°)的探测距离如图 4 所示。

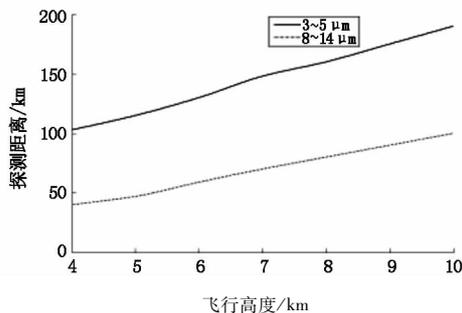


图 4 某型飞机在不同高度上的探测距离
Fig. 4 detected distance on different altitudes

由图 4 可以看出:探测距离随飞机高度的增加明显增加,3~5 μm 波段的探测距离增加尤其迅速。因为随高度的增加大气透过率增加,而飞机的红外辐射在 3~5 μm 波段和 8~14 μm 波段有不同的变化规律。若飞行高度增大,空气密度减小,使尾焰气体的扩散增大,尾焰的长度变长,从而使尾焰辐射加强,同时空气密度的减小也使相同速度下飞机蒙皮的温度降低,引起蒙皮辐射的减弱。则表现在总辐射上,3~5 μm 波段内尾焰辐射的变化是主导,高度越高,辐射强度越大;8~14 μm 波段内蒙皮辐射的变化是主导,高度越高,辐射强度小。

4.4 速度特性

当其他飞行条件不变的情况下,速度的变化主要影响蒙皮的红外辐射。由于速度与油门大小有一定的关系,为单独说明飞机辐射的速度特性,考虑飞机迎头方向的探测距离。某型飞机在 9 km 高度、不同速度下,与机头方向呈 20° 的方向上的探测距离如图 5 所示。

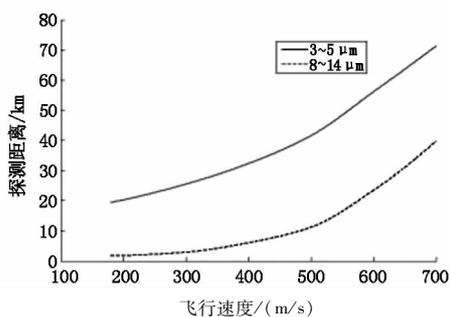


图 5 某型飞机在不同速度下的探测距离
Fig. 5 detected distance in different velocities

由图 5 可以看出:随着飞行速度的增加,探测距离增大。这是由于速度增加使蒙皮的气动加热作用

增强,机体温度升高,蒙皮的红外辐射增大。特别是速度超过 500 m/s 之后,3~5 μm 上的探测距离增大迅速,因为温度升高使此波段的红外辐射占总辐射的百分比增大。

4.5 发动机状态特性

某型飞机在高度 9 km,速度 400 m/s,不同发动机工作状态下,侧后方(与机头方向呈 160°)的探测距离如图 6 所示($\delta = 13^\circ$ 对应慢车, $\delta = 70^\circ$ 对应满油门, $\delta = 100^\circ$ 对应部分加力, $\delta = 120^\circ$ 对应全加力)。

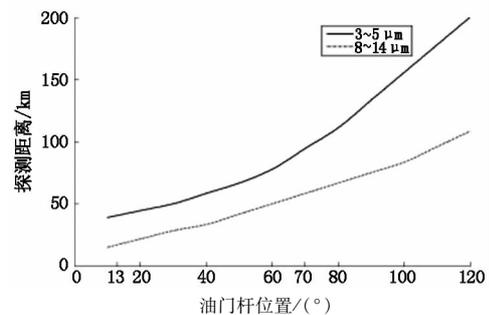


图 6 某型飞机不同发动机工作状态下的探测距离
Fig. 6 detected distance on different engine states

从图 6 中可以看出,探测距离随发动机状态有较大的变化。因为发动机状态直接影响到尾喷口的温度,从而影响到尾喷口的辐射强度,而尾喷口的辐射在 3~5 μm 有主要贡献,在 8~14 μm 波段也有较大贡献。

5 结论

应当指出,上节计算的条件是为找出光谱、方位、高度、速度、发动机状态分别对探测距离的影响而设定的,由于飞机性能的局限,飞行高度、速度和发动机状态有一定的耦合关系,部分计算状态并不是飞机的稳定飞行状态,但却是飞机在机动的瞬间能达到的状态。

通过计算与分析,可以得到以下结论:

(1) 影响红外系统探测效果的飞机红外辐射特性,主要有光谱特性、方位特性、高度特性、速度特性和发动机状态特性。

(2) 探测器处于目标的后上方时探测效果最佳。工作在远红外波段的探测器更有利于全向探测。

(3) 随着高度的增加和飞行速度的增加,探测距离均增大,飞机红外隐身的难度增大。

(4) 对于后半圆探测,飞机红外隐身最重要的是将到达探测器的尾喷口辐射和尾焰辐射减小,可采用遮蔽、二元喷管等设计,同时飞行时少开加力。

对于前半球探测,飞机红外隐身应着重减小机体的辐射,可采用机体冷却技术等。

参考文献:

- [1] Lin Wuwen, Xu Jin, Xu Shilu. Development trend of IR detection technology[J]. *Laser & Infrared*, 2006, 36(9): 840 - 843. (in Chinese)
林武文, 徐锦, 徐世录. 红外探测技术的发展[J]. *激光与红外*, 2006, 36(9): 840 - 843.
- [2] A. R. Jha. Infrared technology[M]. Zhang Xiaolin, et al transl. Beijing: Chemical Industry Press, 2004: 276 - 282. (in Chinese)
A. R. Jha. 红外技术应用[M]. 张孝霖, 等译. 北京: 化学工业出版社, 2004: 276 - 282.
- [3] Wang Zhongxian, Fan Xiang, Ma Donghui. Study on the characteristics of the omnidirectional IR radiation of airplane[J]. *Electronic Warfare*, 2009, (3): 42 - 46. (in Chinese)
汪中贤, 樊祥, 马东辉. 飞机全向红外辐射特征研究[J]. *电子对抗*, 2009, (3): 42 - 46.
- [4] Wu Xiaozhong, Teng Peng, Lu Yi, et al. Calculation and simulation of infrared radiation about some jet aircraft[J]. *Infrared Technology*, 2008, 30(12): 727 - 731. (in Chinese)
吴晓中, 滕鹏, 鲁艺, 等. 喷气式飞机红外辐射仿真计算[J]. *红外技术*, 2008, 30(12): 727 - 731.
- [5] Li Yanzhi, Sun Bo, Wang Dahui. Building model of aeroplane infrared radiant and simulation[J]. *Infrared Technology*, 2008, 30(5): 252 - 255. (in Chinese)
李彦志, 孙波, 王大辉. 飞机红外辐射建模与仿真[J]. *红外技术*, 2008, 30(5): 252 - 255.
- [6] Michael Wright J, Ram Rao M, Graham Candler V, et al. Modeling issues in the computation of plume radiation signature[J]. AIAA - 9823622, 1998: 308 - 313.
- [7] Wang Fujun. Principle and application of CFD software[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2006: 18 - 22. (in Chinese)
王福军. 计算流体力学分析——CFD 软件原理与应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 2006: 18 - 22.
- [8] Xu Nanrong, Qu Rongzhen. Infrared signature of flight vehicles[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 1999, 28(1): 8 - 14. (in Chinese)
徐南荣, 瞿荣贞. 飞行器的红外特性[J]. *红外与激光工程*, 1999, 28(1): 8 - 14.
- [9] Wu Hanping. Research in to theoretical calculation method on engineering of transmittance of infrared radiation through atmosphere[J]. *Optics and Precision Engineering*, 1998, 6(4): 120 - 125. (in Chinese)
吴晗平. 红外辐射大气透过率的工程理论计算方法研究[J]. *光学精密工程*, 1998, 6(4): 120 - 125.
- [10] Daoyong Li, Hongjie Yang, Lili zhu. Light scattering and infrared radiation of spatial bjects [J]. *Int. J. Infrared and Mill. Waves*, 2006, 27: 1609 - 1617.
- [11] Xu Nanrong, Bian Nanhua. Infrared radiation and guidance[M]. Beijing: National Defence Industrial Press, 1997: 33 - 35. (in Chinese)
徐南荣, 卞南华. 红外辐射与制导[M]. 北京: 国防工业出版社, 1997: 33 - 35.