

无人机红外辐射的数值计算

贾庆莲

中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033

摘要 针对非加力状态下的无人机(UAV),建立了其蒙皮、尾喷口及尾焰辐射的理论计算模型,利用有限元分析方法求解了不同方位角、不同观测仰角的红外辐射计算公式。利用Fluent流场计算软件分析了尾焰的温度场、压力场及其中CO₂及H₂O组分的浓度场,并在尾焰红外辐射计算中利用分析数据的方法,这种计算较精确。采用工程中实际使用的中波红外和长波红外探测器的探测波段,利用LOWTRAN分析了其在不同观测仰角下的波段透射率。对于某一特定型号的无人机,实验结果证明,相对于8~10 μm长波蒙皮辐射而言,中波3.7~4.8 μm的蒙皮辐射可以忽略不计。中波的尾喷口及尾焰辐射随观测角度的变化规律与长波类似,在相同观测角度下,中波的尾喷口及尾焰辐射都分别大于长波,其中尾喷口辐射在方位角大于90°的前提下,要大于相同角度下的尾焰辐射。在大气衰减影响下,蒙皮辐射和尾焰红外辐射的最大值均出现在观测仰角45°、方位角90°附近。

关键词 测量;无人机;红外辐射;流场分析;观测仰角;方位角

中图分类号 TN21 文献标识码 A doi: 10.3788/LOP51.071201

Numerical Calculation of IR Radiation for Unmanned Aerial Vehicle

Jia Qinglian

Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Science,
Changchun, Jilin 130033, China

Abstract A theoretical calculation model of scarfskin, the nozzle of the turbojet engine and exhaust plume for non-afterburning unmanned aerial vehicle (UAV) is built. The infrared radiation calculation formulas are deduced under different observation orientation and elevation by the finite element analytical method. Both the distribution of temperature and pressure and the CO₂, H₂O concentration field are numerical simulated by the software Fluent, which assure that the numerical value is precise. The atmospheric transmissivity under different observation elevation angles is analyzed by LOWTRAN. The experimental results for a given UAV indicate that for the scarfskin radiation, 3.7 ~ 4.8 μm spectrum band can be ignored, so the 8 ~ 10 μm spectrum band is the main spectrum band. The distributing rule of radiation for the nozzle of the turbojet engine and exhaust plume for the 3.7 ~ 4.8 μm spectrum band is the same as that of 8 ~ 10 μm spectrum band. At the same time, the numerical value of the 3.7 ~ 4.8 μm spectrum band is larger than that of 8 ~ 10 μm spectrum band. The max radiations of scarfskin and exhaust plume are showed at the orientation angle of 90° and elevation angle of 45°.

Key words measurement; unmanned aerial vehicle; infrared radiation; fluid analysis; elevation angle; orientation angle

OCIS codes 120.1880; 120.4640; 230.0040

1 引言

无人机因其结构简单、飞行时间长、成本低以及对红外辐射特性不明显等优点在战场侦察、灾情监控以及例行巡逻等军事及民用的多个方面都有着重要的作用^[1-3]。

无人机的红外辐射主要来自蒙皮辐射和反射、发动机热部件如尾喷口的辐射及尾喷焰辐射三个方面^[4-5]。目前对尾焰的计算主要分为两种方法:一种是将尾焰视为均匀热气体,取一些经验数据,这种方法计算结果精度不高,只适用于工程估算^[6-7];另一种是通过分析尾焰流场的特点并求解红外辐射在吸收介质中传输方程的方法,这种方法计算量大且繁琐,其中主要的流场分布特点、尾焰气体成分以及传输到探测点的路径衰

收稿日期: 2014-01-17; 收到修改稿日期: 2014-02-10; 网络出版日期: 2014-06-17

作者简介: 贾庆莲(1979—),女,博士,副研究员,主要从事空中目标探测方面的研究。E-mail: jqlian111@sina.cn

本文电子版彩色效果请详见中国光学期刊网 www.opticsjournal.net

减的模型都明显影响到计算结果的精确性及计算的复杂程度^[8-10]。

本文以实际工程使用的中波和长波探测器为接收元件^[11-12],精确计算了探测器所需波段内的考虑大气衰减作用下针对无人机的较精细模型的红外辐射值。针对蒙皮辐射和尾喷口辐射改进了前人的计算公式,通过将目标表面微小面元的数值计算进行叠加,保证了计算结果的准确性。对于尾焰辐射,以流场分析结果为基础数据,考虑了几种主要成分的红外辐射,保证了计算过程的简化。以无人机中轴线迎头方向为方位 0° ,计算了方位角在 $0^\circ \sim 180^\circ$,观测仰角在 $0^\circ \sim 90^\circ$ 范围内变化时,无人机蒙皮、尾喷口及尾焰的红外辐射值,为无人机探测追踪提供了直接的数据基础。

2 无人机红外辐射数值计算

取无人机中轴线迎头为方位 0° ,滚转角为 0 ,无人机表面法线与观测视线夹角为 θ_m ,无人机中轴线与观测视线夹角为 θ_p ,探测器视场法向与中轴线的夹角为 α 。当 α 变化时,进入探测器视场的无人机的辐射面积会随之变化。当无人机的观测仰角为 β 时,建立无人机的三维模型如图1所示。

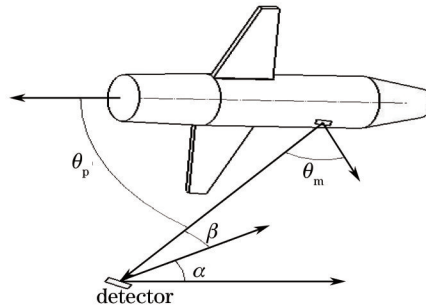


图1 无人机的三维计算模型

Fig.1 3D model of UAV

2.1 蒙皮辐射计算

当飞机在大气中高速飞行时,飞机蒙皮由于气动加热而温度升高,从而有相当的红外辐射。在无人机表面辐射到达到测量点的过程中,经过大气衰减, τ_R 时间后到达探测器的光谱辐射亮度和光谱辐射强度分别为:

$$L_{m,\lambda} = \frac{\rho_m \tau_R}{\pi} \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} M_\lambda d\lambda,$$

$$I_{m,\lambda} = L_\lambda \cdot \left(\sum_{i=1}^{N_1} \cos \alpha_i \cos \beta_i \Delta S_{i,1} + \sum_{j=1}^{N_2} \sin \alpha_j \cos \beta_j \Delta S_{j,2} \right) (0^\circ \leq \alpha_i, \alpha_j < 90^\circ), I_{m,\lambda} = L_\lambda \sum_{j=1}^{N_2} \sin \alpha_j \cos \beta_j \Delta S_{j,2} (90^\circ \leq \alpha_j < 180^\circ),$$

式中

$$M_\lambda = \frac{c_1}{\lambda^5} \cdot \frac{1}{\exp(c_2/\lambda T_s) - 1},$$

式中取蒙皮发射率 ρ_m 为0.6,第一辐射常数 $c_1 = 3.7417 \times 10^{-16} \text{ W} \cdot \text{m}^2$,第二辐射常数 $c_2 = 1.439 \times 10^{-2} \text{ mK}$, T_s 为驻点温度,其计算公式见文献[7]。

将无人机机头表面均匀分成 N_1 份,每份的表面积为 $\Delta S_{i,1}$,其对应的方位角和俯仰角分别为 α_i, β_i 。将无人机机身及机翼表面均匀分成 N_2 份,每份的表面积为 $\Delta S_{j,2}$,其对应的方位角和俯仰角分别为 α_j, β_j 。

2.2 尾喷口的辐射

尾喷管是由进、出口平面和喷管壁面组成的封闭腔,为了隐身的需要,一般位于无人机的尾部内部。只有喷口在无人机表面,从而可以只考虑喷口的红外辐射。其截面法向与探测器探测方向的夹角为 α_p ,尾喷口面积为 S_p 。

在观测仰角为 β_p 时其辐射亮度 $L_{p,\lambda}$ 与辐射强度 I_p 为:

$$L_{p,\lambda} = \frac{\rho_p \tau_R}{\pi} \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} M_\lambda d\lambda,$$

$$I_{p,\lambda} = L_{p,\lambda} S_p \cos \alpha_p \cos \beta_p,$$

式中 ρ_p 为尾喷口的发射率,一般取为0.9。

2.3 尾焰的辐射

尾焰的红外辐射取决于燃气的温度、压力和 $\text{CO}_2, \text{H}_2\text{O}$ 等其他的组分浓度参数。尾焰可以看作是一个轴对称的非均匀辐射源,其计算区域如图2所示。

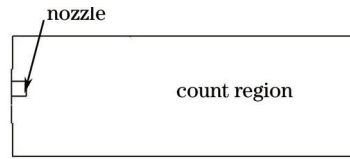


图2 尾焰计算域

Fig.2 Calculation field of exhaust plume

给定的入口边界条件为:尾焰入口即为喷管出口,总温为 880 K,总压为 2.86 个大气压,入口流动角为 0° ;出口边界条件为:标准大气,出口温度为 288 K,总压为 0.75 Pa,喷管壁面是绝热的,即温度梯度为 0。其压力流场和温度流场分别如图3、图4所示。从图中可以看出,在尾喷口出口一定距离 x_1 内,尾焰各组分的压强和温度参数基本恒定,其区域形状大致为锥形。在此锥形外围,尾焰与空气相互融合,形成一个层流与紊流的混合层,在一定距离 x_b 之外,则几乎全为紊流,即假设尾焰与空间完全混合。



图3 压力流场

Fig.3 Pressure field nephogram

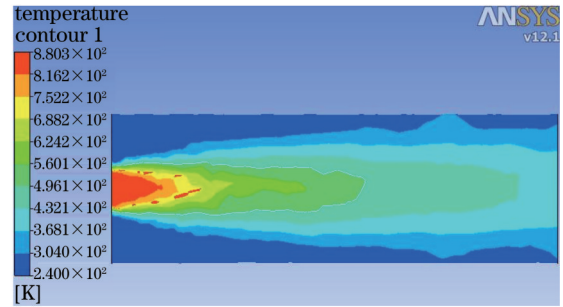


图4 温度流场

Fig.4 Temperature field nephogram

尾焰的主要红外辐射成分为 CO_2 和 H_2O ,其分布图如图5、图6所示。将尾焰从尾喷口到完全混合界面间分成 M 层,每一层的几何厚度为 Δt_m ,温度为 T_m ,组分压强为 $p_m (m = 1, 2, 3, \dots, M)$ 。从图4中可以得到尾焰场每层的温度分布,即 T_m 值。

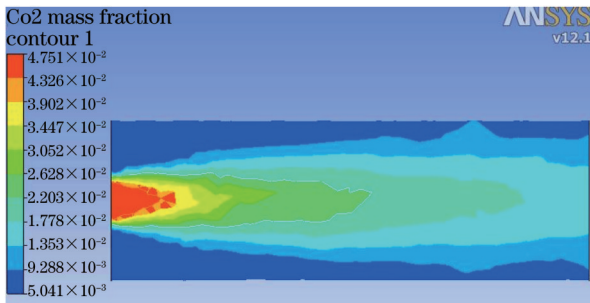


图5 CO_2 浓度分布图

Fig.5 CO_2 concentration distributing

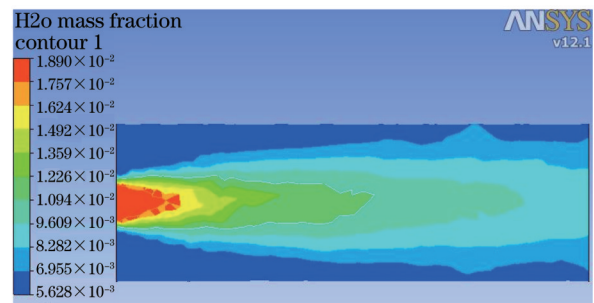


图6 H_2O 浓度分布图

Fig.6 H_2O concentration distributing

各组分在每层中的光学厚度为:

$$\Delta u_m = \frac{273}{T_m} p_m \Delta t_m .$$

对于某特定波长,可以查到其对应的光谱吸收系数 $K_{m,\lambda}$, ν 为波数 (cm^{-1}),则每层的光谱透射率 $\tau_{m,\nu}$ 为:

$$\tau_{m,\nu} = \exp[-K_{m,\nu} \Delta u_{m,\nu}],$$

则每层的光谱辐射亮度为:

$$\Delta L_{m,\nu} = -L_{b,\nu,T_m} [\tau_{m,\nu} - \tau_{m-1,\nu}],$$

式中 L_{b,v,T_m} 为 m 层对应的黑体的光谱辐射亮度:

$$L_{b,v,T_m} = \frac{2\pi c^2 v^3}{\exp(hcv/K_B T_m) - 1}$$

式中光速 $c = 2.99 \times 10^8$ m/s, 玻尔常数 $K_B = 1.38 \times 10^{-23}$ J/K, 普朗克常数 $h = 6.63 \times 10^{-34}$ J·s。

对层数和波数求和得任意方向(高低角 β 和方位角 α) 的辐射亮度的波段值为^[7]:

$$L_{s,\lambda} = \sum_{m=1}^M \sum_{v=1}^V \Delta L_{m,v} \cdot \Delta v,$$

则对于测量点而言,其获得的辐射强度值为:

$$I_{s,\lambda} = \sum_{i=1}^M \frac{\tau_R(v)}{\pi} L_{s,\lambda} S_i,$$

式中 S_i 为第 i 层尾焰的等效面积, $\tau_R(v)$ 为波数 v 对应波长处的传输路径上的大气透射率。

无人机的总红外辐射强度值为:

$$I = I_{m,\lambda} + I_{p,\lambda} + I_{s,\lambda}.$$

采用软件 LOWTRAN 计算仰角 β 变化时,针对中波探测器对应波段及长波探测器对应波段的 $\tau_R(\lambda)$ 曲线,如图 7 所示。

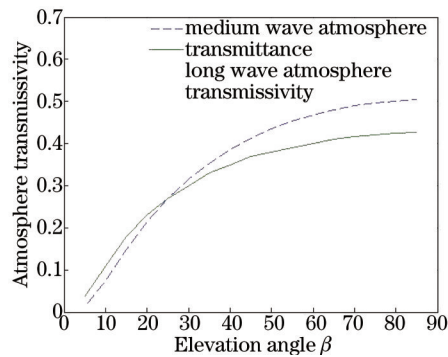


图 7 中波(3.7~4.8 μm)/长波透射率随观测仰角的变化(8~10 μm)

Fig.7 Atmosphere transmissivity under different observation elevation angles in 3.7~4.8 μm and 8~10 μm

2.4 试验结果及分析

无人机的特征尺寸为长 2.5 m, 翼展 1.56 m, 高 0.6 m。飞行高度为 3~12 km, 飞行马赫数为 0.8, 大气温度为 20 $^{\circ}\text{C}$, 发动机工作状态为非加力状态。取喷口温度为 880 K, 喷口面积为 0.2 m^2 , 发射率为 0.9。中波红外探测器波段范围为 3.7~4.8 μm , 长波红外探测器波段范围为 8~10 μm 。

观测仰角在 0° ~ 90° 范围内变化时, 无人机中波红外辐射随方位角、观测仰角的变化曲线如图 8 所示, 长波红外辐射随方位角、观测仰角的变化曲线如图 9 所示。

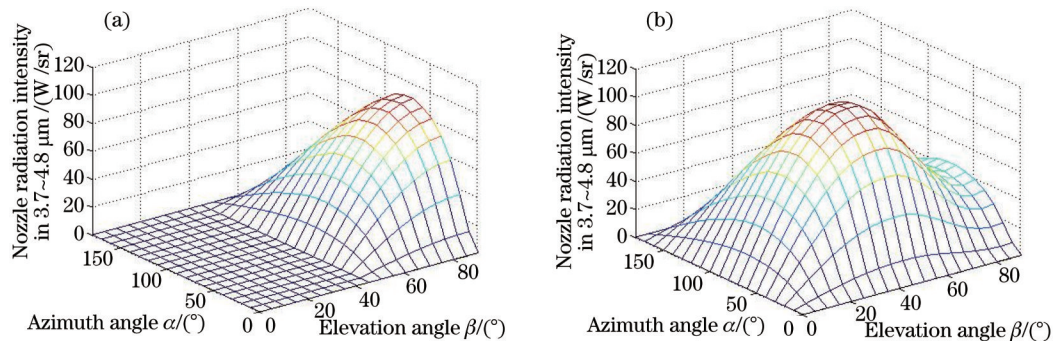


图 8 中波红外辐射强度随方位角、观测仰角的变化。(a) 中波尾喷口红外辐射强度值;

(b) 中波尾焰红外辐射强度值

Fig.8 Infrared radiation intensity scarfskin under different observation orientation angles and elevation in 3.7~4.8 μm .
(a) Infrared radiation intensity of the nozzle of the turbojet engine in 3.7~4.8 μm ; (b) infrared radiation intensity of exhaust plume in 3.7~4.8 μm

从图8可以看出,对中波辐射而言,尾喷口的辐射略大于尾焰的辐射。当观测仰角为 45° 左右,方位角为 90° 左右时,尾焰的辐射达到最大值。而尾喷口的辐射却在方位角为 90° 左右,观测仰角为 0° 或 90° 左右时达到最大,其中 90° 附近的值大于 0° 附近的值。分析原因可以看出,观测仰角较低时,大气透射率很低,但参与辐射的面积较大,而 90° 时其大气透射率较大,且参与辐射的面积也较大。数值分析也计算了蒙皮辐射的辐射强度值,对中波红外辐射,其蒙皮最大辐射强度在 0.5 W/sr 左右,蒙皮辐射在数值上远小于尾喷口和尾焰的辐射,几乎可以忽略不计。

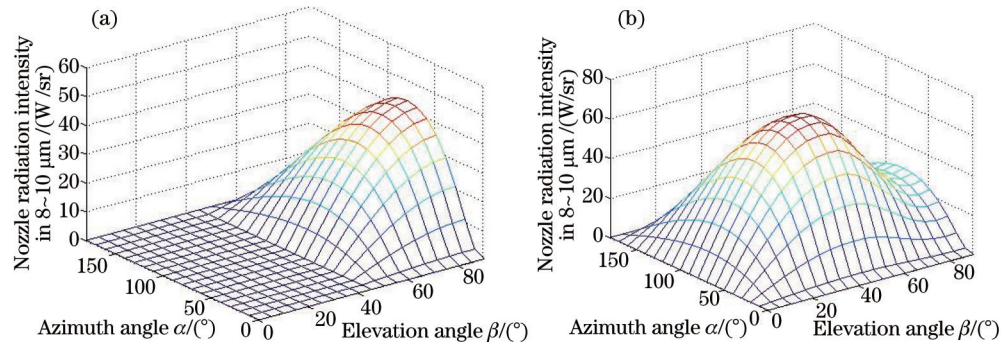


图9 长波红外辐射强度随方位角、观测仰角的变化。(a)长波尾喷口红外辐射强度值; (b)长波尾焰红外辐射强度值
Fig.9 Infrared radiation intensity scarfskin under different observation orientation and elevation angles in $8 \sim 10 \mu\text{m}$.

(a) Infrared radiation intensity of the nozzle of the turbojet engine in $8 \sim 10 \mu\text{m}$; (b) infrared radiation intensity of exhaust plume in $8 \sim 10 \mu\text{m}$

从图9可以看出,其尾喷口辐射及尾焰的辐射规律与中波类似。对比图8(a)和图9(a)可以看出,中波段的尾喷辐射大约是长波段的尾喷辐射的几倍,其随观测仰角和方位角的变化规律类似,尾喷口的辐射都是在方位角为 90° 左右,观测仰角为 0° 或 90° 左右时达到最大,其中 90° 附近的值大于 0° 附近的值。尾焰的辐射在长波段数值较小,大约为中波段的一半以上。数值分析表明对蒙皮辐射而言,长波段的蒙皮辐射远大于中波段,其随观测仰角和方位角的变化规律类似,最大蒙皮辐射强度为 10 W/sr ,蒙皮辐射在数值上远小于尾喷口和尾焰的辐射,几乎可以忽略不计。

同样观测角度时,且尾喷口辐射在方位角大于 90° 的前提下,其值要大于相同角度下的尾焰辐射,而在大气衰减影响下,蒙皮辐射和尾焰红外辐射的最大值均出现在观测仰角 45° 、方位角 90° 附近。

当方位角为 90° 时,改变尾喷口的温度,中波红外辐射强度以及长波红外辐射强度随观测仰角的变化规律分别如图10、图11所示。

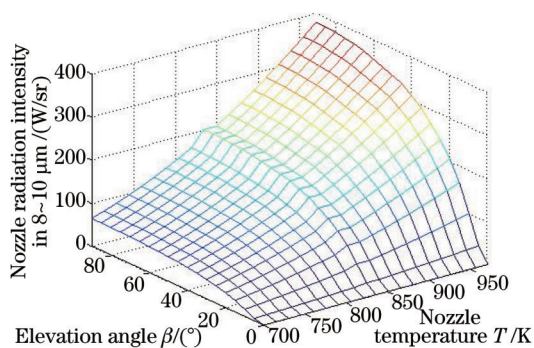


图10 中波尾焰红外辐射强度值

Fig.10 Infrared radiation intensity of exhaust plume in $3.7 \sim 4.8 \mu\text{m}$

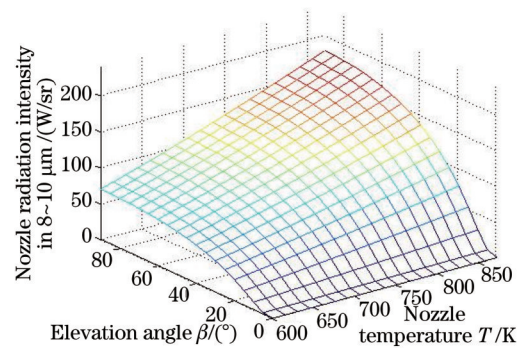


图11 长波尾焰红外辐射强度值

Fig.11 Infrared radiation intensity of exhaust plume in $8 \sim 10 \mu\text{m}$

从图10及图11可以看出,随着尾喷口温度的提高,无论是中波还是长波其尾焰红外辐射值都呈近似线性增加的趋势。并且随着观测仰角的增加,红外辐射值也在增加,只是在观测仰角较低时,红外辐射值较低,当观测仰角大于 15° 后,其随仰角的变化渐趋变缓。

3 结 论

通过对无人机蒙皮、尾喷口以及尾焰的红外辐射强度的理论计算,修正了前人粗略的纯工程计算以及完全基于流场分析带来的极大数据量的计算方式。以实际工程实践中应用的红外探测器为接收元件,针对目前巡航状态的无人机计算了其全向辐射,利用大气透射率软件详细计算了针对接收器波段的大气透射率值,并对不同观察方位角以及观察仰角分析了无人机整体的红外辐射强度值。试验曲线可清楚的分辨无人机不同部位对探测器的红外辐射值,其中单纯从辐射值大小可发现在一定的观察方位角时,尾喷口的红外辐射值最大,而尾焰的辐射值在较大方位角范围内都是影响探测器接收辐射值的主要因素。对于长波红外探测器,蒙皮辐射值不可忽略,而尾焰辐射和尾喷口辐射要分别小于中波红外探测器能接收的值。试验所得结果可直接用于无人机的监控测量,从而可为地面测控提供理论依据。

参 考 文 献

- 1 Li Jinling, Wang Weihua. Review of infrared radiation characteristics numerical simulation study on unmanned aerial vehicle[J]. Ship Electronic Engineering, 2010, 30(8): 21-24.
李晋岭,汪卫华. 无人机红外辐射特性数值模拟研究综述[J]. 舰船电子工程, 2010, 30(8): 21-24.
- 2 Zhang Lei. Developing trend and key techniques of unmanned aircraft vehicles (UAVs) in foreign countries[J]. Telecommunication Engineering, 2009, 49(7): 88-92.
张 蕾. 国外无人机发展趋势及关键技术[J]. 电视技术, 2009, 49(7): 88-92.
- 3 Zhang Jian, Qu Enshi, Cao Jianzhong, *et al.*. Study on a multi-spectral-band infrared sea surface temperature radiometer system[J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(4): 0401003.
张 健,屈恩世,曹剑中,等. 自动多波段红外海洋表面温度辐射系统研究[J]. 光学学报, 2012, 32(4): 0401003.
- 4 Michael Teutsch, Wolfgang Kruger, Norbert Heinze. Detection and classification of moving objects from UAVs with optical sensors[C]. SPIE, 2011, 8050: 80501.
- 5 Shuqun Zhang, Mohammad A Karim. Automatic target tracking for unmanned aerial vehicle video annotation[J]. Opt Eng, 43(8): 1867-1873.
- 6 Chen Bingfeng, Fang Yihao, Xu Xiaogang. Study on the IR radiation of aeroplane[J]. Aero Weaponry, 2006, 5: 30-32.
陈炳峰,方亦浩,徐晓刚. 飞机的红外辐射特征研究[J]. 航空兵器, 2006, 5: 30-32.
- 7 R W Osborne, Y Bar-Shalom, P Willett, *et al.*. Design of an adaptive passive collision warning system for UAVs[C]. SPIE, 2011, 7445: 74450T.
- 8 Zhang Haixing, Zhang Jianqi, Yang Wei. Theoretical calculation of the IR radiation of an aeroplane[J]. Journal of Xidian University, 1997, 24(1): 78-81.
张海兴,张建奇,杨 威. 飞机红外辐射的理论计算[J]. 西安电子科技大学学报, 1997, 24(1): 78-81.
- 9 Wu Jianfeng, He Guangjun, Zhao Yuqin. The calculation for strength of infrared radiation in the opposite direction of the airplane[J]. Journal of Air Force Engineering University (Natural Science Edition), 2006, 7(6): 26-28.
吴剑锋,何广军,赵玉芹. 飞机尾向的红外辐射特性计算[J]. 空军工程大学学报(自然科学版), 2006, 7(6): 26-28.
- 10 Xu Aihua, Wang Zhongxian, Yu Jian, *et al.*. Numerical simulation of infrared radiation characteristics for plume of the high-altitude and high-speed UAV[J]. Infrared and Laser Engineering, 2012, 41(7): 1700-1707.
许爱华,汪中贤,于 坚,等. 高空高速无人机尾焰红外辐射特性计算研究[J]. 红外与激光工程, 2012, 41(7): 1700-1707.
- 11 Li Yan, Zhang Bao, Hong Yongfeng. Design of large zoom ratio middle wavelength infrared zoom optical system [J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(4): 0422005.
李 岩,张 葆,洪永丰. 大变倍比中波红外变焦光学系统设计[J]. 光学学报, 2013, 33(4): 0422005.
- 12 Wang Helong, Chen Jianfa. Athermalization design of dual-band and dual-field-of-view catadioptric infrared optical system[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2013, 50(11): 112201.
王合龙,陈建发. 双波段双视场折反式光学系统无热化设计[J]. 激光与光电子学进展, 2013, 50(11): 112201.