

## 飞行器尾焰红外辐射及其被动测距

路 远<sup>1,2</sup>, 冯云松<sup>1,2</sup>, 凌永顺<sup>1,2</sup>, 乔 亚<sup>1,2</sup>

- (1. 脉冲功率激光技术国家重点实验室 合肥电子工程学院, 安徽 合肥 230037;
2. 安徽省红外与低温等离子体重点实验室 合肥电子工程学院, 安徽 合肥 230037)

**摘 要:** 旨在研究利用飞行器的尾焰辐射对飞行器进行被动测距。导弹和飞机发动机的排气系统是飞机在 3~5  $\mu\text{m}$  波段的主要红外辐射源。建模计算了矩形喷管尾焰红外辐射特性, 计算结果表明, 不管观察方向如何, 尾焰红外辐射强度色比是相同的。当辐射强度色比在大气中传输时, 因为吸收和散射而被衰减, 不同波长上红外辐射衰减幅度不同, 辐射强度色比随着传输距离的改变而发生变化, 色比包含了目标的距离信息。推导了目标尾焰色比与尾焰温度、辐射传输距离、大气消光系数之间的关系。计算了尾焰色比与尾焰温度的关系, 推导出了红外三色比距离方程组, 选取 4.5、4.6、4.7  $\mu\text{m}$  三个波长对三色被动测距进行了研究。利用测距方程组画出了测距图。结果表明, 利用该方法可对尾焰进行三色测距。

**关键词:** 被动测距; 尾焰; 红外辐射; 三色; 大气衰减

**中图分类号:** TN97      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1007-2276(2013)07-1660-05

## Infrared radiations of aerocraft exhaust plume and its passive ranging

Lu Yuan<sup>1,2</sup>, Feng Yunsong<sup>1,2</sup>, Ling Yongshun<sup>1,2</sup>, Qiao Ya<sup>1,2</sup>

- (1. State Key Laboratory of Pulsed Power Laser Technology, Electronic Engineering Institute of Hefei, Hefei 230037, China;
2. Key Lab of IR and Low Temperature Plasma of Anhui Province, Electronic Engineering Institute of Hefei, Hefei 230037, China)

**Abstract:** Passive ranging an aerocraft using its exhaust plume infrared radiation was studied. Exhaust system of an aircraft or a missile is the main infrared radiant point in 3-5  $\mu\text{m}$  wave-band. The infrared radiant characteristic of rectangular nozzle flame was calculated by modeling. The result shows that the infrared radiation intensity color ratio of an exhaust plume is same in different direction. When the infrared radiation transmitted in the atmosphere, it would be attenuated by the absorption and dispersion of the atmosphere. The attenuation was different according to different wavelength. The radiation intensity color ratio of different wavelength would change along with the change of transmission distance. The radiation intensity color ratio contains distance information. The relationship among the color ratio of exhaust plume and its temperature, its transmission distance, and atmosphere attenuation coefficient were deduced. The relationship between color ratio of an exhaust plume and its temperature was calculated. Infrared three color ratio ranging equations were deduced. The three wavelength of 4.5, 4.6, 4.7 mm was used to study passive ranging method. A ranging figure was drawn using the equations. The result shows that the method can be used to range an exhaust plume.

**Key words:** passive ranging; exhaust plume; infrared radiation; three-color; atmosphere attenuation

收稿日期: 2012-11-10; 修订日期: 2012-12-14

基金项目: 安徽省红外与低温等离子体重点实验室基金

作者简介: 路远(1971-), 男, 副教授, 博士, 主要从事红外技术、信号处理、光电材料等方面的研究。Email: luyuanmail@163.com

## 0 引言

利用尾焰的红外辐射对导弹等飞行器进行告警是常见的告警手段,对导弹的告警距离涉及到目标的生存,威胁物的距离是飞行器进行自卫时选择对抗手段的重要依据。红外被动测距中目前用的较多是三角测量方法,如何有效地通过角度值计算出目标距离一直是该方法的焦点<sup>[1]</sup>。在三角测距法的基础上,还发展出了计时法被动测距<sup>[2]</sup>。参考文献[3]基于大气衰减特性,研究了对地面目标的红外被动测距,参考文献[4-6]研究了基于红外图像的被动测距方法。M. R. Hawks 根据氧分子分布均匀性好的特点,提出利用氧分子吸收带(762 nm)的特征吸收进行被动测距的方法<sup>[7]</sup>,J. M. Douglas 对该方法进行了改进,选用 2 μm 附近的特征衰减进行测距<sup>[8]</sup>。在参考文献[9]中,在初始距离已知的前提下,通过计算目标成像光斑辐射通量与初始距离时成像光斑辐射通量的比值,得出了当前时刻目标的距离。

导弹和飞机发动机的排气系统是飞机在 3~5 μm 波段的主要红外辐射源,为了抑制尾焰的红外辐射,新式具有隐身功能的作战飞机多采用矩形喷管,矩形喷管具有较强的掺混特性,高温尾焰从喷口喷出后,通过与周围冷空气的摩擦与掺混,引起尾焰和周围冷空气之间的动量与热量的交换,卷吸并携带着周围的冷空气向前运动,从而导致尾焰温度不断下降。由于矩形喷管在实现隐身性能上的优势,轰炸机、战斗机以及无人机都广泛采用了矩形喷管<sup>[10]</sup>。

文中以矩形喷管为例研究尾焰的红外辐射特性,研究利用尾焰红外辐射的大气传输特性对飞行器进行被动测距。

## 1 尾焰的红外辐射特征

### 1.1 计算模型

矩形喷管的物理模型如图 1 所示,喷管入口取在 XOY 面上,Z 轴正向为射流方向。矩形喷管的宽为  $W=0.9$  m,高为  $H=0.45$  m,长度为  $L=0.45$  m,喷管出口的当量直径为  $D^*=\sqrt{4A/\pi}=0.718$  m。

流场计算域在 Z 方向的长度为 14D,在 X 和 Y 方向的长度均为 5D。图 2 给出了流场计算域的整体示意图,喷管进口位于 ABCD 平面上,出口位于平面

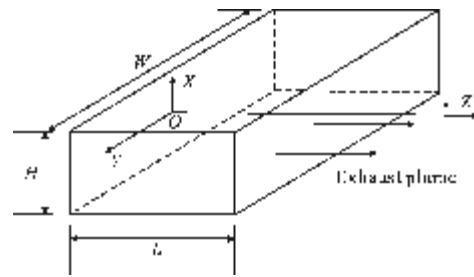


图 1 喷管模型

Fig.1 Nozzle model

上,区域 IJKLMNQP 为整个计算域边界。计算中采用六面体结构化网格,流场计算域网格数目均在 130 000 左右。

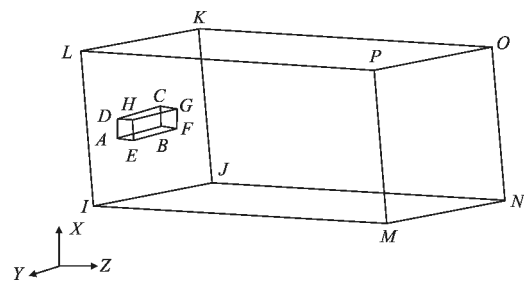


图 2 流场计算区域

Fig.2 Flow field computational area

假定喷管入口气体为完全燃烧的燃气,基于燃烧理论,确定主流进口处  $N_2$ 、 $CO_2$  和  $HO_2$  蒸气质量百分比分别为 0.706、0.209 和 0.085;外场边界和进口中引射的气体均为空气,成分为  $N_2$  和  $O_2$ ,其质量百分比为 0.756 和 0.244。

设置飞机的飞行高度为 3 000 m (大气温度为 280 K,压强为 71 000 Pa),飞行马赫数  $M=1.5$ ,发动机工作状态为非加力状态(巡航状态)<sup>[11]</sup>,则设置边界条件为:(1) 入口边界条件:喷管入口定为压力入口边界,给定的总温是 800 K,总压为 0.16 MPa,入口流动角  $\theta=0^\circ$ ;(2) 计算区域边界条件:定为压力出口边界,温度为 280 K,总压为 71 000 Pa。(3) 壁面边界条件:采用无滑移固壁边界条件,壁面设定为流、固耦合面,温度场计算时不考虑壁面之间的辐射传热。计算中,设外界气流静止,尾喷管壁面绝热,忽略尾喷管厚度。流场计算使用 Fluent6.3 软件进行,

### 1.2 计算结果与分析

利用上述模型,计算了尾焰在各个方向上的总红外辐射强度,计算方位点分布如图 3 所示,以喷管

出口平面的中心点为原点,正后向(Z轴)为喷管轴线方向。在宽边对称面  $OXZ$ 、窄边对称面  $YOZ$  面内的方向角范围均为  $-13\pi/28 \sim 13\pi/28$ 。

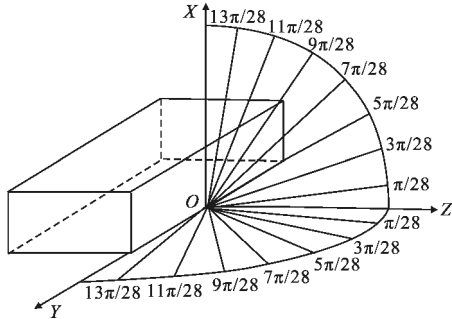


图 3 探测位置分布示意图

Fig.3 Sketch map of detecting points

图 4 给出了在  $XOZ$  平面上位于方位角  $\pi/28$ 、 $3\pi/28$ 、 $5\pi/28$ 、 $7\pi/28$  四个方向上的红外光谱辐射强度,分别对应于图中的(a)-(d)。在这四个方向上,均存在着比较明显的辐射峰,但是在不同方向的辐射强度差异较大,对比这四个方向图的形状,可以看出,各方向图形的形状基本相同。这意味着各方向上的光谱辐射强度色比基本相同。

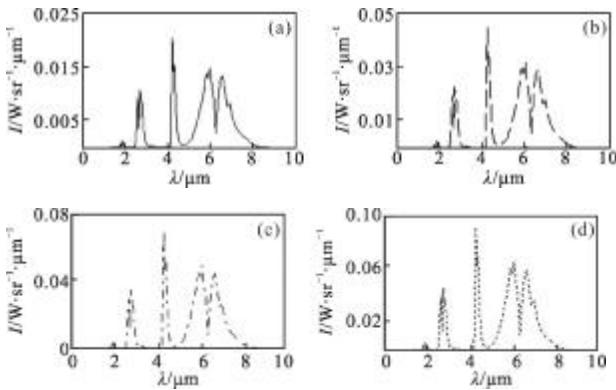


图 4  $XOZ$  平面上四个方向红外光谱辐射强度

Fig.4 Infrared spectral radiation intensity in four direction on  $XOZ$  plane

为了进一步研究在各方向的光谱辐射强度色比,对各方向的光谱辐射强度按照各方向的最大光谱辐射强度进行归一化,绘制在一张图上,得到的结果如图 5 所示,图中的 1、2、3、4 线形分别从图 4 中的图(a)-(d)得来。从图 5 可以看出,在不同方向得到的归一化光谱辐射强度曲线基本上重合,即不管观察方向如何,尾焰的红外辐射强度色比是相同的。现有研究资料表明:如果飞行器的马赫数不是很高,则在对飞行

器进行前向观察时,在  $3 \sim 5 \mu\text{m}$  波段所能观察到的红外辐射主要是尾焰的红外辐射。可以考虑利用尾焰在  $3 \sim 5 \mu\text{m}$  波段的红外辐射对目标进行被动测距。

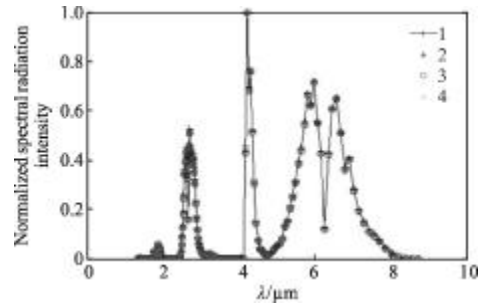


图 5 归一化光谱辐射强度

Fig.5 Normalized spectral radiation intensity

## 2 尾焰红外辐射比的大气传输

### 2.1 大气的衰减

当目标红外辐射在地球大气中传输时,它与大气成分相互作用,会受到衰减。在多数情况下,衰减是由散射和吸收共同造成的,衰减与红外辐射波长  $\lambda$  有很大关系,此时可定义消光系数:

$$\mu(\lambda) = \mu_a(\lambda) + \mu_s(\lambda) \tag{1}$$

式中:  $\mu_a$  是吸收系数;  $\mu_s$  是散射系数,由吸收和散射造成的大气的透射比为:

$$\tau = e^{-\mu(\lambda)R} \tag{2}$$

式中:  $R$  为目标的距离。大气的消光系数与大气的气象条件密切相关,天气的变化如阴、晴、雾、雨、雪、霾等都对消光系数有很大的影响。

为了便于研究,作以下假设:大气气象条件在短时间内恒定不变,即大气的消光系数不变,后面的研究以此假设为基础进行研究。

### 2.2 红外辐射双色比值的传输

设探测系统工作在三个波长上  $\lambda_1$ 、 $\lambda_2$  和  $\lambda_3$ ,对应的大气消光系数为  $\mu_1$ 、 $\mu_2$  和  $\mu_3$ ,目标的红外辐射强度分别为  $I_{\lambda_1}$ 、 $I_{\lambda_2}$  和  $I_{\lambda_3}$ ,则探测系统在距目标  $R$  处在三个波长上接收到的空中目标的红外辐射通量分别为:

$$\Phi_{\lambda_1} = \frac{A_d I_{\lambda_1}}{R^2} e^{-\mu_1 R} \tag{3}$$

$$\Phi_{\lambda_2} = \frac{A_d I_{\lambda_2}}{R^2} e^{-\mu_2 R} \tag{4}$$

$$\Phi_{\lambda_3} = \frac{A_d I_{\lambda_3}}{R^2} e^{-\mu_3 R} \tag{5}$$

式中:  $A_d$  为探测系统的光学接收面积。公式(3)除以公式(4), 得:

$$\frac{\Phi_{\lambda_1}}{\Phi_{\lambda_2}} = \frac{I_{\lambda_1}}{I_{\lambda_2}} e^{-(\mu_1 - \mu_2)R} \quad (6)$$

由公式(6)看出, 如果知道目标在两个波段上的辐射强度色比, 则在天气一定的情况下, 通过测量目标在两个波段上的辐射通量色比可获得目标的距离信息。

### 3 基于尾焰辐射的红外三色测距

对于非合作目标来说, 目标的温度和原始辐射强度无法获得, 原始双色比值也无法获取, 双色系统无法通过一次性测量获取目标距离信息。为此, 把系统从两色扩展到三色, 公式(3)除以公式(5), 得:

$$\frac{\Phi_{\lambda_1}}{\Phi_{\lambda_3}} = \frac{I_{\lambda_1}}{I_{\lambda_3}} e^{-(\mu_1 - \mu_3)R} \quad (7)$$

综合公式(6)和公式(7), 可以得到目标红外辐射的三色比信息, 目标温度和光谱发射率决定了目标的三色比信息。

虽然影响尾焰红外辐射特性的因素多种多样, 但最重要的影响源仍然是尾焰的温度, 在飞行器所使用的燃料及外部环境一定的情况下, 尾焰的温度确定了, 尾焰的红外辐射特性基本也就确定了。尾焰温度随位置也有不同的变化, 不管尾焰的每一部分的具体温度如何, 把尾焰作为一个整体来考虑, 以尾焰中心某一点的温度作为尾焰的温度。公式(6)~(7)中的光谱辐射强度色比可以看作是温度的函数, 把这个比值写成尾焰温度的函数:

$$\frac{I_{\lambda_1}}{I_{\lambda_2}} = f_1(T) \quad (8)$$

$$\frac{I_{\lambda_1}}{I_{\lambda_3}} = f_2(T) \quad (9)$$

通过计算或者测量, 可以得到公式(8)~(9)中辐射强度比值随温度变化的数值。图 6 给出了通过模拟计算得到的数值。在图中, 曲线 line1 是尾焰在  $4.5 \mu\text{m}$  和  $4.6 \mu\text{m}$  波长上光谱辐射强度色比值, 曲线 line2 是尾焰在  $4.5 \mu\text{m}$  和  $4.7 \mu\text{m}$  波长上光谱辐射强度色比值, 光谱辐射强度色比随尾焰温度的变化而变化。公式(8)、(9)代入公式(6)、(7), 可以得到:

$$\frac{\Phi_{\lambda_1}}{\Phi_{\lambda_2}} = f_1(T) e^{-(\mu_1 - \mu_2)R} \quad (10)$$

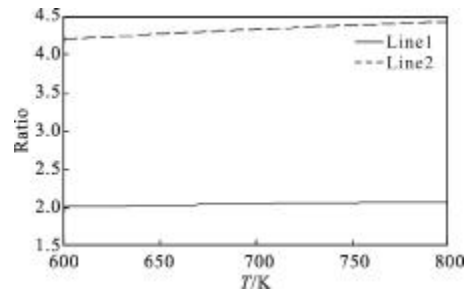


图 6 尾焰色与尾焰温度的关系

Fig.6 Relationship between color ratio and exhaust plume temperature

$$\frac{\Phi_{\lambda_1}}{\Phi_{\lambda_3}} = f_2(T) e^{-(\mu_1 - \mu_3)R} \quad (11)$$

在公式(10)和公式(11)组成的方程组中,  $f_1(T)$  和  $f_2(T)$  没有相应的解析解, 但是  $f_1(T)$  和  $f_2(T)$  可以通过数值计算方法得到或者通过测量得到其数值解。将公式(10)和公式(11)进行改写, 把其中的  $R$  写作是  $T$  的函数, 由此公式(10)和公式(11)变为:

$$R = \frac{\ln \left[ \frac{\Phi_{\lambda_1}}{\Phi_{\lambda_2}} \cdot \frac{1}{f_1(T)} \right]}{\mu_2 - \mu_1} \quad (12)$$

$$R = \frac{\ln \left[ \frac{\Phi_{\lambda_1}}{\Phi_{\lambda_3}} \cdot \frac{1}{f_2(T)} \right]}{\mu_3 - \mu_1} \quad (13)$$

对于空中目标来说, 应该能同时满足公式(12)和公式(13)。利用这两个式子, 根据实测数据就可计算出空中目标的距离和尾焰温度。

## 4 基于尾焰辐射特性传输的目标被动测距

### 4.1 测距原理

分别用公式(12)和公式(13)作一条距离  $R$  关于温度  $T$  的曲线, 则两条曲线的交点能同时满足公式(12)和公式(13), 曲线交点所对应的距离就是目标的实际距离, 对应的温度就是尾焰的温度。

考虑到对飞机、导弹等飞行器进行前向观察时,  $3\sim 5 \mu\text{m}$  波段的红外辐射主要是尾焰的红外辐射, 而在  $4.3 \mu\text{m}$  等强辐射带上, 红外辐射基本上被大气全部吸收。取红外辐射相对较弱但透过率较好的波长进行研究, 文中取  $4.5 \mu\text{m}$ 、 $4.6 \mu\text{m}$ 、 $4.75 \mu\text{m}$  三个波长进行三色被动测距研究。

### 4.2 大气衰减模型

红外辐射在地球大气中传输时, 多数情况下,  $\text{H}_2\text{O}$  和  $\text{CO}_2$  是造成红外辐射传输衰减的主要因素, 由  $\text{H}_2\text{O}$  造成的吸收衰减主要与传输路程中含可凝结

水的毫米数有关,二氧化碳在空中的含量相对固定,因而其光谱吸收系数的值也相对固定,在此,使用简单的辐射传输衰减计算模型<sup>[12]</sup>,设大气温度为 5℃,相对湿度为 80%,根据参考文献[12]则可以得到 H<sub>2</sub>O 在 4.5 μm、4.6 μm、4.7 μm 三个波长上的吸收系数分别为:0.187 5 km<sup>-1</sup>、0.261 1 km<sup>-1</sup>、0.342 3 km<sup>-1</sup>,CO<sub>2</sub> 在这三个波长上的吸收系数分别为:0.054 5 km<sup>-1</sup>、0.005 0 km<sup>-1</sup>、0.005 0 km<sup>-1</sup>,设气象视程为 5 km,则在这三个波长上的散射衰减系数分别为:0.050 6 km<sup>-1</sup>、0.049 4 km<sup>-1</sup>、0.048 1 km<sup>-1</sup>,各波段对应的衰减系数值相加,得到在这三个波长上的消光系数分别为:0.292 9 km<sup>-1</sup>、0.315 5 km<sup>-1</sup>、0.395 4 km<sup>-1</sup>。

### 4.3 实例计算

设红外系统在这三个波长上得到的光谱辐射通量的比值为  $\phi_{\lambda_1}/\phi_{\lambda_2}=2.1101$  和  $\phi_{\lambda_1}/\phi_{\lambda_3}=0.1789$ ,利用公式(12)和公式(13)在同一张图上分别作出距离 R 随目标温度 T 变化的曲线,得到结果如图 7 所示。图中,Line1 曲线根据公式(12)作出,Line2 曲线根据公式(13)作出。两条曲线在图中相交,交点所对应的距离即是目标距离,所对应的温度则是尾焰的温度。从图中可以看出,目标距离约为 1.8km,尾焰温度约为 298.5 K。

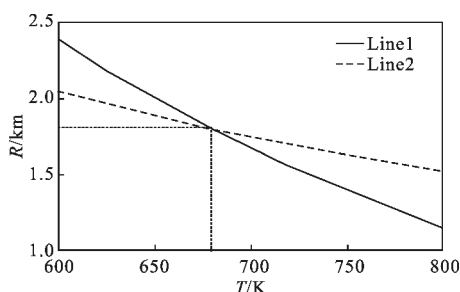


图7 三色测距图

Fig.7 Three-color ranging figure

## 5 结论

综合文中,可以得出如下结论:对于尾焰的红外辐射来说,不管观察方向如何,尾焰的红外光谱辐射强度色比是相同的,尾焰的温度决定了尾焰的色比,利用这一点,可以拟合出尾焰光谱辐射色比随尾焰温度的变化函数。在大气透过率保持不变的情况下,通过测量尾焰在三个波长上的辐射光谱辐射通量,就可以获得尾焰的距离信息和温度信息。该方法使用的是比色测量法,使用的是相对值,因而光学系统效率、大气传输效率等因素的变化对测量精度影响

可以在很大的程度上被降低。对于确定的燃料来说,其辐射强度色比可以通过理论来进行拟合。该系统测距精度的主要影响因素是尾焰光谱辐射强度色比与温度关系的拟合。红外系统对目标辐射的测量精度和大气消光系数的选择也对精度有所影响,具体各参数对测量精度的影响,有待于进一步的理论和实验研究。

### 参考文献:

- [1] Schwing Piet B W, Johannes F de Groot, Emile A Hendriks. Passive ranging using an infrared search and track sensor[J]. *Optical Engineering*, 2006, 45(2): 1-14.
- [2] Zhao Xunjie. Review of passive range sensing techniques[J]. *Optical Techniques*, 2003(6): 652-656. (in Chinese)
- [3] Lu Yuan, Ling Yongshun, Wu Hanping, et al. Study on passive distance measurement of ground objects by infrared radiation[J]. *J Infrared Millim Waves*, 2004, 23(1): 77-80. (in Chinese)
- [4] Huang Shike, Xia Tao, Zhang Tianxu. Passive ranging method based on infrared images [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2007, 36(1): 110-112, 126. (in Chinese)
- [5] Yang Degui, Xiao Shunping. Single-band IR passive ranging based on IR radiation characteristics [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2009, 38(6): 946-950. (in Chinese)
- [6] Yang Degui, Li Xiang, Xiao Shunping. Research of the surface target ranging on single-tation dualband IR image[J]. *Signal Processing*, 2010, 26(5): 714-718. (in Chinese)
- [7] Vincent R A, Hawks M R. Passive ranging of dynamic rocket plumes using infrared and visible oxygen attenuation [C]//SPIE, 2010, 8052: 80520D-1.
- [8] Douglas J M. Passive ranging using infrared atmospheric attenuation[C]//SPIE, 2010, 7660: 766041-1.
- [9] Yan Shihua, He Yongqiang, Zhao Zhining. Passive ranging method on MW IR fish-eye system [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2011, 40(6): 1011-1016. (in Chinese)
- [10] Wei Gang. F-22 "Accipiter" Fighter Plane [M]. Beijing: Publishing House of Aeronautic Industry, 2008, 5(8): 80-81. (in Chinese)
- [11] Fan Renyu, Zhang Jingzhou, Shan Yong. Effects of sheltering baffles on the infrared radiation characteristics of two-dimensional nozzles [J]. *Journal of Aerospace Power*, 2011, 26(2): 333-348.
- [12] Lu Yuan, Ling Yongshun, Fan Xiang. Transmission of two wave bands infrared radiation of aerial object in the atmosphere[J]. *Infrared Technology*, 2003, 25(1): 40-43. (in Chinese)