

外形包络面的尾焰红外图像仿真

张志波, 童中翔, 王超哲, 李建勋, 贾林通

(空军工程大学 航空航天工程学院, 陕西 西安 710038)

摘要: 基于粒子系统的尾焰红外图像仿真计算量大, 难以与红外辐射的计算模型相结合。为了解决这个问题, 首先提出了基于化学反应式的航空发动机尾焰气体组分计算模型, 改进现有的尾焰流场工程计算方法; 然后提出了基于外形包络面的尾焰红外图像仿真模型, 研究了包络面的建立、包络面模型与流场计算模型以及气体辐射计算模型的结合、包络面模型对尾焰红外图像影响三个相关问题; 最后通过数值仿真得到了尾焰的红外图像。结果表明: 尾焰的红外图像主要由其核心区的高温气体决定; 当包络范围增大到一定程度后, 尾焰图像与选用的包络面的外形无关; 选择一个易于划分面元的包络面模型, 并划定能全面反映尾焰辐射分布特征的小包络面范围, 可使尾焰图像的生成更加高效准确。

关键词: 红外辐射; 成像仿真; C-G 近似; 尾焰; 流场计算

中图分类号: TN215 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2014)06-1788-06

Simulation of plume IR image based on figure envelope

Zhang Zhibo, Tong Zhongxiang, Wang Chaozhe, Li Jianxun, Jia Lintong

(Aeronautics and Astronautics Engineering College, Air Force Engineering University, Xi'an 710038, China)

Abstract: The plume IR image simulation based on the particle system needed large computation and was difficult to be integrated with the IR calculation model. To solve the problem, firstly based on the chemical reaction formula, the gas fraction calculation model of the aero engine's plume was established, and the engineering plume flow field calculation method was improved. Then based on the figure envelope model, the simulation model of the plume IR image was established. And three relative problems were studied: how to establish the figure envelope, how to combine the figure envelope model with the flow field calculation model and gas IR lightness calculation model, and the relation between the figure envelope and plume IR image. Finally, the plume IR image was generated by numerical simulation. The results show that the plume IR image is defined by the high temperature gas of the core area; the plume IR image is unrelatable with the figure envelope when the envelope is enlarged to a certain extent; the plume IR image is generated more effective and accurate when the figure envelope is easy to be divided into meshes, is small but can reflect the plume radiation distribution characters.

Key words: infrared radiation; imaging simulation; C-G algorithm; plume; flow field calculation

收稿日期: 2013-10-12; 修订日期: 2013-11-15

基金项目: 国家自然科学基金(61172083, 61203134)

作者简介: 张志波(1988-), 男, 硕士生, 主要从事飞行器红外对抗技术方面的研究。Email: jjjiangzwb@163.com

导师简介: 童中翔(1958-), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事飞行器红外对抗技术方面的研究。Email: tzxkgy@163.com

0 引言

随着红外成像制导技术的不断发展,仿真与测试技术在红外成像导引头论证和研制过程中扮演着越来越重要的角色^[1]。在空中飞行器的红外仿真中,尾焰的图像仿真是其中的重要组成部分。由于尾焰的外形不规则,红外辐射特性受目标飞行器的飞行状态、发动机推进剂组成、尾焰气体成分构成、大气环境等多种因素的影响,因此尾焰红外图像仿真成为了红外视景仿真中的难点。目前,国内外专家学者在进行尾焰红外图像仿真时,多数都采用了粒子系统来模拟^[2-5]。这种方法能有效模拟尾焰的不规则外形与随机变化,但计算量大,仿真速度慢。尾焰的红外图像是红外辐射亮度分布的体现,其外形绘制模型并不起决定性作用,只是提供一定的几何模型方便计算机绘图语言使用。目前尾焰红外图像仿真的研究重点集中在尾焰不规则形状的描绘,追求视觉效果上的真实性,而对辐射能量大小及辐射分布规律的研究相对较少。红外成像系统是光学元件与电子元件的组合,由于这些器件的影响,红外成像系统会出现各种线性和非线性效应,视觉上最直观的就是图像模糊^[6]。这些影响会导致红外成像探测器忽略尾焰图像的边缘细节,而关注接收辐射能量的大小和分布情况。

因此,文中提出一种新的基于外形包络面的尾焰红外图像仿真模型。该模型的基本思想为:构造一个方便计算机绘图语言使用的、能全面反映尾焰辐射分布特征的较小包络面,依据吸收-发射性气体介质的辐射传输方程计算包络面上每个面元的辐射亮度,然后以包络面的几何坐标绘制几何面元,根据面元的辐射亮度映射一定的灰度值,从而生成尾焰红外灰度图像。

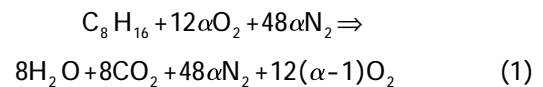
1 尾焰红外辐射计算模型

尾焰辐射属于气体辐射,涉及到非均匀介质的吸收与发射。气体辐射具有很强的选择性,不同的气体在不同的波长上具有不同的发射率。因此,尾焰的红外图像仿真,首先必须建立尾焰流场参数(气体组分、压强、温度)的计算模型和非均匀气体的红外辐射计算模型。

1.1 尾焰的流场计算模型

为了满足仿真的实时性要求,尾焰的流场参数常采用经验公式计算。对于这类计算模型,参考文献[7-8]已经有比较详细的描述,文中不再赘述。但是,这种尾焰流场参数计算模型需要已知燃烧产物的组分摩尔分数,参考文献中并没有给出。

文中根据燃油碳氢比和余气系数,利用航空煤油和空气的完全化学反应式来计算尾焰气体组分摩尔分数。航空煤油和空气的完全化学反应式如下:



根据上式,可得到主要组分的摩尔分数为:

$$\begin{aligned} F_{CO_2} &= F_{H_2O} = 2/(1 + 15\alpha) \\ F_{O_2} &= 3(\alpha - 1)/(1 + 15\alpha) \end{aligned} \quad (2)$$

$$F_{N_2} = 1 - F_{CO_2} - F_{H_2O} - F_{O_2}$$

式中: α 为余气系数。其定义式为:

$$\alpha = \frac{W_a}{W_f \cdot L_0} = \frac{1}{f \cdot L_0} \quad (3)$$

式中: W_a 为实际空气流量; W_f 为燃油流量; f 为油气比; L_0 为理论空气量,即完全燃烧1 kg燃料时理论上需要的空气量,常用航空煤油, $L_0 = 14.7$ kg/kg。

波音飞机使用JT8D发动机在设计点的油气比 $f = 0.0159$,根据公式(2)和(3)可以计算出 CO_2 和 H_2O 的摩尔分数为0.0307。参考文献[9]中指出,在同样状态下,JT8D发动机燃气组分试验测量的 CO_2 和 H_2O 的摩尔分数结果分别为0.0358和0.0343,可见该方法完全能满足工程计算的精度要求。

1.2 非均匀气体的红外辐射计算模型

对于非均匀气体的红外辐射,常采用的方法为将非均匀热气体中的传输路径划分为介质性质可近似均匀热气体的若干小段,然后利用单线组谱带模型和C-G近似法计算。

采用基于SLG窄谱带模型的C-G近似法来计算红外辐射,首先需要将非均匀混合气体沿视线方向分段,如图1所示。P点为视线进入尾焰的边界

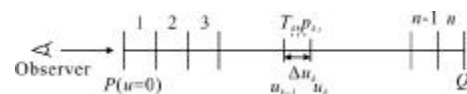


图1 非均匀气体的分层模型

Fig.1 Discrete model of non-uniform gas

点, Q 点为视线穿出尾焰的点, 或者为视线与尾喷管固壁的交点。PQ 按等温层分为 n 段, 第 k 段长 u_k , 温度为 T_k , 第 i 种气体的组分压强为 $p_{i,k}$ 。

分层后, 红外辐射沿直线方向的传输方程可以离散成如下形式:

$$L_\lambda = L_{Q,\lambda}(T_Q)\tau_{n,\lambda} + \sum_{k=1}^n [L_{b,k,\lambda}(T_k)\tau_{k-1,\lambda} - \tau_{k,\lambda}] \quad (4)$$

式中: $L_{Q,\lambda}(T_Q)$ 为视线远端 Q 处的光谱辐射亮度。在高温气体中, 对辐射起主要作用的是水蒸气、二氧化碳分子, 因此通常只考虑这两种气体的分子吸收谱线。这样, 光谱光学深度的光谱透过率 $\tau_{k,\lambda}$ 为:

$$\tau_{k,\lambda} = \exp(-X_{CO_2} - X_{H_2O}) \quad (5)$$

式中: X_{CO_2} 、 X_{H_2O} 为 SLG 模型中计算的两种气体对应的光谱光学深度。其计算过程基本一致, 只是所取的数值不同。为了计算方便, 在计算中常将波长 λ 转化为波数 ω 进行考虑, 两者之间关系为 $\lambda=1/\omega$ 。对于 i 种气体, 其光谱光学厚度 $X_{i,\lambda,k}$ 可根据参考文献[10]中表 5-18 中的计算公式进行计算, 这里不再罗列其计算公式, 参考文献[11]也对其进行了比较详细的描述。

2 尾焰的红外辐射图像仿真模型

尾焰的红外图像仿真的主要步骤: 首先建立尾焰的包络面模型, 然后计算尾焰的红外辐射, 最后将尾焰的红外辐射与尾焰的包络面相映射, 得到尾焰红外图像。

2.1 尾焰的包络面模型

尾焰的包络面模型主要用于计算机绘制尾焰图像。对于包络面的几何形状, 选择如图 2 所示的梯形扩散图形作为基本轮廓, 其可以用如下的一组数学式表示。

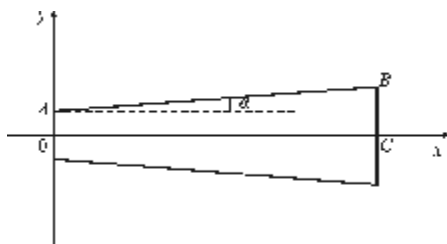


图 2 包络面基本轮廓示意图
Fig.2 Schematic diagram of envelope's basic figure

$$\begin{cases} f(x) = \pm(r + x \tan \alpha) & 0 < x < L \\ x = 0 & |y| \leq r \\ x = L & |y| \leq r + L \tan \alpha \end{cases} \quad (6)$$

式中: r 为梯形上底边的一半; L 为梯形长度; α 为梯形扩散角。其取值原则为: 在包含尾焰高温区域的前提下, 形成的包络面尽量小, 以减小计算量。

由包络面的二维轮廓很容易得到其三维轮廓, 只需将 x 轴上区间 [0, L] 平均分为 N 段, 得 N+1 个节点, 以每个节点 x_i 为圆心、 $f(x_i)$ 为半径作圆, 得到一组同心圆, 在圆周上以圆心角 θ 为步长将圆周划分为 H ($H=2\pi/\theta$) 个分点 (如图 3 所示), 连接相邻圆周上的对应分点 (如图 4 所示)。对于轮廓的底面, 构造方法类似, 构造后图像如图 5 所示。

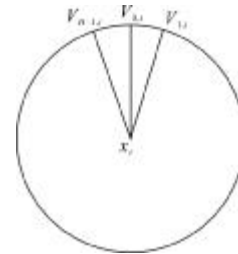


图 3 圆周分点示意图

Fig.3 Schematic diagram of discrete circle

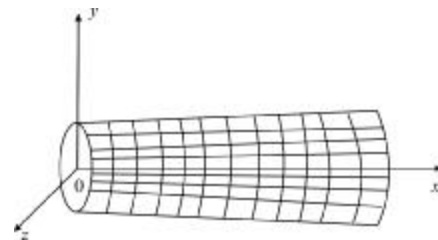


图 4 包络面侧面网格示意图

Fig.4 Schematic diagram of envelope's side view

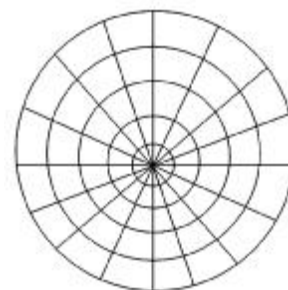


图 5 包络面底面网格示意图

Fig.5 Schematic diagram of envelope's bottom view

2.2 尾焰包络面的红外辐射计算

尾焰的红外图像是其红外辐射亮度分布的反

映,因此绘制准确的红外图像必须计算包络面上面元的红外辐射亮度,进而确定其灰度值。

如图 6 所示,定义包络面上面元四边形中点 A 的坐标为 (x_0, y_0, z_0) , 视线方向的单位矢量为 (v_x, v_y, v_z) 。那么视线方向过 A 点的直线可以表示为如下的参数方程:

$$\begin{cases} x = x_0 + v_x t \\ y = y_0 + v_y t \\ z = z_0 + v_z t \end{cases} \quad (7)$$

式中: t 为直线方程的参数。

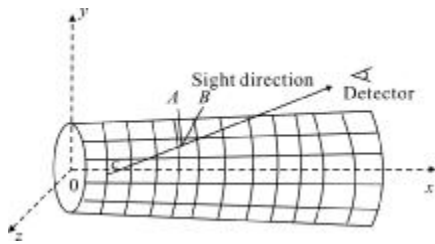


图 6 包络面面元灰度计算模型

Fig.6 Calculation model of envelope's surface element's gray value

由包络面的二维轮廓方程可以得到轮廓曲面方程为:

$$\begin{cases} y^2 + z^2 = (r + x \tan \alpha)^2 & 0 < x < L \\ y^2 + z^2 \leq r^2 & x = 0 \\ y^2 + z^2 \leq (r + L \tan \alpha)^2 & x = L \end{cases} \quad (8)$$

联立方程(7)、(8)可以求得参数 t , 进而求得探测直线与包络面轮廓的两个交点 B、C。根据交点与面元四边形中心点的距离远近可以判断视线直线的入点和出点。设入点 B 坐标为 (x_1, y_1, z_1) , 出点 C 坐标为 (x_2, y_2, z_2) 。根据这两点坐标得到矢量 \overrightarrow{BC} , 其坐标为 $(x_2 - x_1, y_2 - y_1, z_2 - z_1)$ 。如果矢量 \overrightarrow{BC} 与视线方向的单位矢量 (v_x, v_y, v_z) 的方向相同, 那么此面元四边形可见; 反之, 如果矢量 \overrightarrow{BC} 与视线方向的单位矢量 (v_x, v_y, v_z) 的方向相反, 那么此面元四边形不可见, 也就不必计算此四边形的红外辐射亮度和绘制此四边形。

对于需要计算红外辐射亮度的面元四边形, 根据 B、C 两点的坐标, 可以按照非均匀气体的红外辐射计算模型计算其红外辐射亮度。将视线通过包络面的区域分为 n 层, 然后根据 B、C 两点坐

标得到第 i 层的中点坐标:

$$\begin{cases} x_i = x_1 + \frac{i-0.5}{L}(x_2 - x_1) \\ y_i = y_1 + \frac{i-0.5}{L}(y_2 - y_1) \\ z_i = z_1 + \frac{i-0.5}{L}(z_2 - z_1) \end{cases} \quad (9)$$

由于尾焰的流场工程计算模型为二维模型, 因此公式(9)中坐标需要映射到二维空间, 映射后的坐标 (x_i', y_i') 为:

$$\begin{cases} x_i' = x_i \\ y_i' = \sqrt{y_i^2 + z_i^2} \end{cases} \quad (10)$$

根据映射后的坐标, 带入流场计算模型中即可得到该点处的流场参数: 温度 T_i 、水蒸气分压强 P_{iH_2O} 、二氧化碳分压强 P_{iCO_2} 、氧气分压强 P_{iO_2} 、氮气分压强 P_{iN_2} 。得到每层的流场参数后, 利用非均匀气体的辐射计算方法即可计算得到该面元四边形处的红外辐射亮度。

2.3 尾焰的红外辐射图像绘制

尾焰红外图像的灰度值代表了辐射亮度, 因此需要将计算的辐射亮度量化为灰度值。由于探测器存在非线性效应, 即探测器的暗电流限制了最小探测入射辐射通量, 而饱和度决定了最大可探测入射辐射通量。在最小和最大入射辐射通量之间, 探测器的响应呈线性。当小于最小辐射能量时响应为零, 当大于最大辐射能量时响应也不会增加, 成 S 型曲线^[12]。因此, 文中采用了有条件的均匀量化方法来计算面元的灰度。设选取辐射亮度的上限为 L_{max} , 下限为 L_{min} 。当辐射亮度大于 L_{max} 时, 灰度取最大值 G_{max} , 而在辐射亮度小于 L_{min} 时, 灰度取最小值 G_{min} 。辐射亮度在两者之间时线性量化, 即:

$$G = \frac{L - L_{min}}{L_{max} - L_{min}}(G_{max} - G_{min}) + G_{min} \quad (11)$$

将计算得到的灰度赋给目标对应的面元即可获得目标的红外辐射图像。

3 尾焰的红外辐射图像仿真算例

根据飞行器机体的模型, 设置的包络面模型参数如下: $r=0.38 \text{ m}$, $L=15 \text{ m}$, $\alpha=0.3745$, 形成的包络面如图 7 所示。流场计算时, 尾焰的流速为 $300 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 机体的速度为 $240 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 尾喷口半径为 0.38 m 。利用尾焰的红外辐射仿真模型仿真得到的 $3 \sim 5 \mu\text{m}$ 波段的

红外辐射仿真图像如图 8 所示。缩小包围面的区域,设置 $L=10\text{ m}$, $\alpha=0.2745$,形成的包围面如图 9 所示,仿真得到的 $3\sim 5\ \mu\text{m}$ 波段的红外辐射仿真图像如图 10 所示。缩小包围面的区域,设置 $L=5\text{ m}$, $\alpha=$

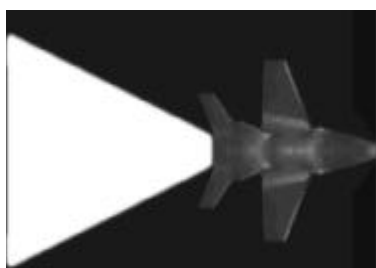


图 7 条件 1 的包围面图形

Fig.7 Envelope image in first condition

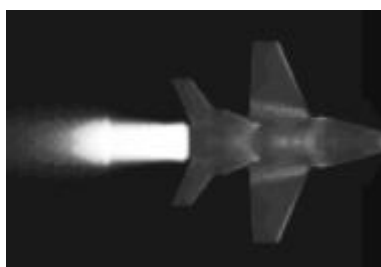


图 8 条件 1 得到的 $3\sim 5\ \mu\text{m}$ 波段的红外仿真图像

Fig.8 Infrared simulation image in $3\sim 5\ \mu\text{m}$ in first condition

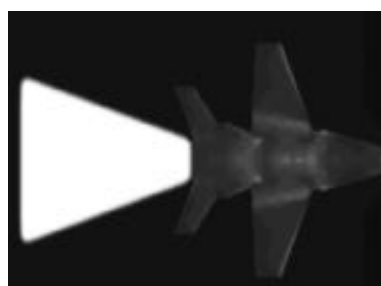


图 9 条件 2 的包围面图形

Fig.9 Envelope image in second condition

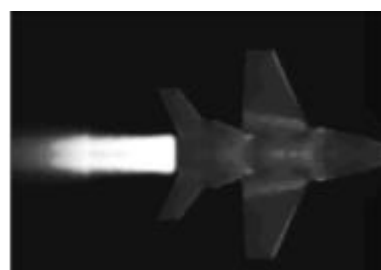


图 10 条件 2 得到的 $3\sim 5\ \mu\text{m}$ 波段的红外仿真图像

Fig.10 Infrared simulation image in $3\sim 5\ \mu\text{m}$ in second condition

0.0745 ,形成的包围面如图 11 所示。仿真得到的 $3\sim 5\ \mu\text{m}$ 波段的红外辐射仿真图像如图 12 所示。

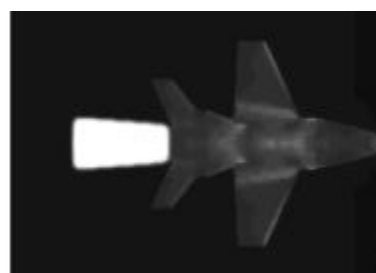


图 11 条件 3 的包围面图形

Fig.11 Envelope image in third condition



图 12 条件 3 得到的 $3\sim 5\ \mu\text{m}$ 波段的红外仿真图像

Fig.12 Infrared simulation image in $3\sim 5\ \mu\text{m}$ in third condition

仿真图像分析:

从仿真得到的图像可见,尾焰的红外图像主要集中在尾焰流场的核心区,边缘区域由于其红外辐射亮度较小,已经完全与环境融合。比较图 8、图 10 和图 12 可知,包围面是绘制尾焰图像时考虑的尾焰范围,包围面太小则不能反映尾焰的全部特征,包围面太大又增大了计算量,当包围范围大到一定程度后,再增大包围范围或改变包围面的形状对尾焰的红外图像已没有影响。因此,仿真中应该选择一个易于划分面元的包围面形状,并划定能全面反映尾焰辐射分布特征的较小包围面范围,使得尾焰图像的生成更加高效、准确。

仿真速度分析:

尾焰的红外辐射计算涉及到多个环节,计算量较大。使用粒子系统仿真,常使用数以千计的粒子来填充尾焰区域。对于红外图像仿真而言,每一个粒子处的纹理都需要根据其所在位置的辐射值来确定。因此,每一个粒子处的红外辐射值都需要计算,但是这些粒子中很多是被遮挡的,这无形中增加了计算量。而文中所用的方法由于只是计算了包围面某一侧面,也就是视线可见面上的面元的红外辐射亮度,进而确定其灰度值,能够有效地排除多余的计算。仿真表明,在仿真图像质量相同的条件下,视线方向在

尾焰侧向时,文中所用的方法能够使仿真速度提高约36%;视线方向在尾焰尾后时,文中所用的方法能够使仿真速度提高约92%。为了进一步提高仿真速度,仿真图像的质量应该随着探测距离的改变而改变。当探测距离增大时,应该减少划分的面元数量。

4 结论

从尾焰的红外辐射亮度分布决定尾焰红外图像这一思想出发,提出了一种基于包络面的尾焰红外图像仿真方法。该方法能有效地减少计算量,很好地与非均匀气体的辐射计算模型相结合。从仿真结果可以得到以下结论:

(1) 尾焰的红外图像主要由其核心区的高温气体决定,尾焰边缘部分淹没于大气中;

(2) 尾焰的红外图像由其红外辐射亮度分布决定,当包络范围增大到一定程度后,尾焰图像与选用的包络面的外形无关;

(3) 尾焰红外图像显示的尾焰长度明显小于尾焰流场计算模型中尾焰的长度,因此为了提高计算机的绘制速度,可以减小外形包络面的长度,只要包络面能包含尾焰的高温区域即可;

文中提出的基于包络面的尾焰红外图像仿真模型能有效用于尾焰的红外图像仿真。当包络面增大到一定程度后,包络面不再影响尾焰的红外图像。因此该模型对于二元喷管尾焰依然适用,只需要将尾焰的流场计算模型替换为二元喷管射流计算模型即可。

参考文献:

- [1] Luo Haibo, Shi Zelin. Status and prospect of infrared imaging guidance technology [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2009, 38(4): 565-573. (in Chinese)
罗海波, 史泽林. 红外成像制导技术发展现状与展望[J]. *红外与激光工程*, 2009, 38(4): 565-573.
- [2] Yu Yang, Tang Xinyi, Liu Peng, et al. A new way of real-time 3D simulation of infrared plume [J]. *Infrared Technology*, 2009, 31(10): 577-580. (in Chinese)
于洋, 汤心溢, 刘鹏, 等. 一种新的三维实时红外尾焰仿真方法[J]. *红外技术*, 2009, 31(10): 577-580.
- [3] Li Huiping, Zhou Qibo, Kuang Dingbo. Simulation of infrared radiance of aircraft plume based on particle system and C-G algorithm [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2008, 37(S2): 601-603. (in Chinese)
李惠萍, 周起勃, 匡定波. 基于粒子系统和C-G法的尾焰红外模拟[J]. *红外与激光工程*, 2008, 37(S2): 601-603.
- [4] Tourtellott J, Coker C F, Crow D R. Real-time particle graphics for infrared (IR) scene generation [C]//SPIE, 1999, 3697: 332-339.
- [5] Sills T G, Williams O M. Dynamic sprite-based real-time particle graphics[C]//SPIE, 2003, 5092: 307-320.
- [6] Zhang Jianqi, Wang Xiaorui. The Modeling and Performance Evaluating Theory of Optical Imaging System [M]. Xi'an: Xi'an Electronic Science & Technology University Press, 2010. (in Chinese)
张建奇, 王晓蕊. 光电成像系统建模及性能评估理论[M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2010.
- [7] Wang Zhongxian, Shi Jianjun, Zhang Zhengwu, et al. Theoretical calculation and simulation of infrared radiation of jet a aircraft plume [J]. *Fire Control & Command Control*, 2011, 36(11): 83-86. (in Chinese)
汪中贤, 史建军, 张正武, 等. 喷气式飞机尾焰红外辐射的理论计算与仿真[J]. *火力与指挥控制*, 2011, 36(11): 83-86.
- [8] Wang Mingdong, Shi Yanmei. The calculation for strength of infrared radiance in the opposite direction of flying aircraft [J]. *Journal of Institute of Command and Technology*, 1996, 7(1): 39-43. (in Chinese)
王明东, 施燕妹. 飞机尾向的红外辐射强度计算 [J]. *指挥技术学院学报*, 1996, 7(1): 39-43.
- [9] Segalman I, Semerjian H. Turbine engine infrared signature program[R]. AD-A028659, 1976.
- [10] Ludwig C B, Malkmus W, Reardon J E, et al. Handbook of Infrared Radiation From Combustion Gases [M]. Washington DC: NASA Special Publication, 1973: sp3080.
- [11] Chen Wei, Wang Zhongxian, Ma Donghui, et al. Calculation and simulation of infrared radiation characteristics of nonuniform hot gas [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2010, 39(1): 17-21. (in Chinese)
陈卫, 汪中贤, 马东辉, 等. 非均匀热气体红外辐射特性计算与仿真[J]. *红外与激光工程*, 2010, 39(1): 17-21.
- [12] Christelle Gamier, Rene Colloree, Jihed Flifla, et al. Physically-based infrared sensor efforts modeling [C]//SPIE, 1999, 3701: 81-94.