# 空中目标红外辐射特性计算与实时仿真

王明明[1,2,3],郝颖明[1,2],朱 枫[1,2],付双飞[1,2],石 坤[1,2,3]

(1. 中国科学院沈阳自动化研究所,辽宁 沈阳 110016;2. 中国科学院研究生院,北京 100049;
3. 中国科学院光电信息处理重点实验室,辽宁 沈阳 110016)

**摘 要**:飞机红外仿真图像是空中目标红外识别算法的重要数据源,为改进飞机红外仿真效果并提高仿真实时性,在细节部分修正了现有红外计算方法并搭建了仿真平台。首先,全面分析了影响飞机红外辐射特性的因素,基于黑体辐射理论建立了蒙皮、尾喷管、尾焰、蒙皮对环境辐射反射的红外计算模型,修正了蒙皮温度和飞行速度这两个影响因素的计算方法;其次,基于 VS2005 C++和三维渲染引擎 OpenSceneGraph(OSG)搭建了一套仿真平台,该系统能动态改变飞机红外效果,实时生成飞机红外图像。实验结果表明:红外计算结果更精确,可以为空中目标红外识别算法提供数据;单目标仿真速率在 100 帧/s 以上,满足实时仿真的要求。

**关键词**:红外辐射; 实时仿真; 空中目标; OSG

**中图分类号**:TN216 **文献标志码**:A **文章编号**:1007-2276(2012)08-1979-06

# IR radiation calculation and real time simulation of air targets

Wang Mingming[1,2,3], Hao Yingming[1,3], Zhu Feng[1,3], Fu Shuangfei[1,2], Shi Kun[1,2,3]

(1. Shenyang Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016, China;
2. Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;
3. Key Laboratory of Opto-Electronic Information Processing, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016, China)

**Abstract:** IR images of airplane generated by simulation are very important data source for IR based air target identification. To improve the simulation's validity and real time performance, amendments on the existing IR simulation algorithms were proposed in this paper, a simulation platform was also built. First, IR radiation characteristics of the whole aircraft was analyzed comprehensively. IR calculation models of aircraft components such as engine, plum, and skin were established based on the blackbody radiation theory. Amendment on the calculation methods of skin temperature and aircraft velocity on IR model were proposed. Then the simulation platform was built based on OpenSceneGraph(OSG) in VS2005 C++, this system can dynamically change the aircraft's IR performance and generate the IR images of the aircraft in real time. Simulation result demonstrates that the proposed IR model can provide more accurate

**收稿日期**:2011-12-12; **修订日期**:2012-01-20

**基金项目**:中国科学院国防科技创新基金(CXJJ-11-S100)

**作者简介**:王明明(1985-),女,博士生,主要从事空中目标实时红外仿真方面的研究。Email:mmwang@sia.cn

**导师简介**:郝颖明(1966-),女,研究员,硕士生导师,博士,主要从事图像处理与目标识别、三维位姿测量、视觉应用系统及红外视景仿真方面的研究。Email:ymhao@sia.cn

朱枫(1962-),男,研究员,博士生导师,博士,主要从事机器人视觉与图像处理、智能系统与人机交互方面的研究。Email:fzhu@sia.cn

(C)1994-2020 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

data sources for the IR based air target identification than existing models. Besides, the single target simulation can be updated up to 100 frames per-second which is sufficient for real-time simulation.

**Key words:** IR radiation; real time simulation; air target; OSG

## 0 引 言

红外传感器在夜间和恶劣气候下的工作能力和识别伪装目标的能力高于可见光传感器，而且被动接收信号不易被干扰，广泛应用于目标捕获、跟踪和识别。当新的红外目标识别算法被提出时，需要提供大量的红外目标图像来训练和验证其有效性，通常通过研究目标的红外辐射特性并进行计算机仿真获取红外目标图像。

目前，欧美国家在空中目标红外辐射特性的研究上已有了较完整的模拟软件，如：美国空军研究实验室提出的 SPIRITS，北约七国联合建立的空中目标红外辐射模型 NIRATAM，俄罗斯建立的基于实践经验的工程模型 IRSAM。国内在红外目标成像仿真方面也取得了一些进展，如：北京航空航天大学着重研究了长波波段飞机的红外辐射特性，中国飞行试验研究院着重研究了飞机尾向的红外辐射特性，西北工业大学、海军航空工程学院实现了飞机动态红外成像仿真[1]，飞机红外辐射理论已比较成熟。然而，经调查分析发现，在红外辐射特性计算的细节上，目前还存在一些问题需要改善；在系统实现上，有些研究没有划清动画和实时仿真的界限，事实上并没有完全实现实时仿真，有些研究采用较底层的工具(如：OpenGL)编写大量的代码实现实时仿真[2]，因此，急需一种简便易用的实时仿真平台。

文中从空中目标几何建模、红外辐射计算、实时场景仿真 3 个方面分别介绍。在几何建模方面，采用 Multigen-Creator 建模工具，建立了适用于红外渲染的飞机几何模型。在飞机红外辐射计算方面，较全面地考虑了现有飞机红外辐射计算模型所关注的各种要素，如：飞行高度、飞行速度、蒙皮驻点温度、发动机对局部蒙皮温度的影响、尾喷管与尾焰温度的关系、高空大气温度等。其中，关于飞机飞行速度和高空大气温度的计算，考虑高度对这二者的影响，给出了更精确的计算方法。在实时仿真方面，基于 OpenSceneGraph(OSG)搭建了简便易用的仿真平台，可以根据软件实时提供的参数计算飞机红外辐射值，生成红外纹理并映射到几何模型上，进而生成当前帧场景中的飞机红外图像，真正实现实时仿真。

## 1 空中目标几何建模

几何模型是三维场景仿真的基础，采用三维几何建模工具 Multigen-Creator 建立飞机几何模型。该工具强调仿真实时性、交互性、真实感，利用其他技术(如：纹理)来提高逼真度，因此，使用他建立几何模型能够满足视景仿真系统实时性的要求，而且也能兼顾逼真性。此外，Multigen-Creator 树状的组织方式，便于以节点为单位对飞机模型添加红外效果。

考虑到飞机红外辐射的几大部件为蒙皮、尾喷管、尾焰等，且机头、水平机翼、尾翼、机身上下左右等各部件的辐射各不相同，在几何建模时，为每个部件分别构建一个或多个组节点，图 1 和图 2 分别为空客 A320 的 3D 几何模型和节点的树状结构图。对各组节点进行面片划分时，对辐射变化较明显的部位(如图 1 中 1、2)进行精细划分，以使红外效果更逼真，对辐射变化不明显的部位(如图 1 中 3、4)进行粗糙划分，以提高渲染效率。

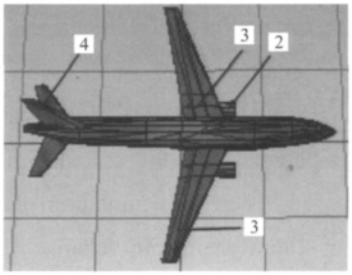


图 1 空客 A320 三维几何模型

Fig.1 3D geometry model of A320

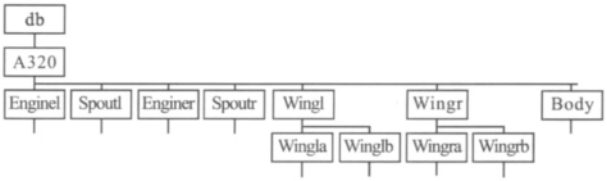


图 2 空客 A320 树状组织结构图

Fig.2 Tree structure of A320

(C)1994-2020 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

飞机尾焰在飞机发动机工作时才产生，将在场景仿真初始化时采用粒子系统技术构建尾焰几何模型，并根据飞机飞行状态的变化实时更新尾焰的长度、颜色等几何特征。图 3 为采用粒子系统技术生成的飞机尾焰。

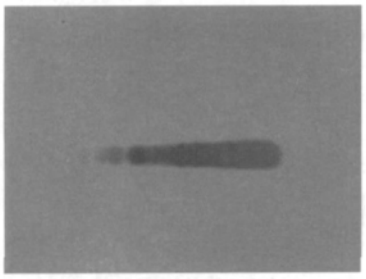

图 3 飞机尾焰的几何模型

Fig.3 Geometry model of an aircraft plum

## 2 空中目标红外辐射计算

红外辐射计算是红外场景仿真的关键。飞机的红外辐射源主要包括：发动机的辐射、尾焰辐射、蒙皮辐射、蒙皮对环境辐射的反射[3]。其中，发动机的红外辐射主要体现在发动机尾部可见部位尾喷管的红外辐射，以及发动机作为内热源所产生的热辐射，后者通过热传导在蒙皮上得以体现；尾焰辐射主要指燃料燃烧所产生的热燃气流的辐射；蒙皮辐射主要来自气动加热引起的蒙皮自身辐射，局部蒙皮还受到前述内热源传热的影响；在地空背景下，蒙皮对环境辐射的反射主要包括：蒙皮对太阳辐射的反射、蒙皮对天空辐射的反射、蒙皮对地面辐射的反射。

### 2.1 发动机尾喷管辐射计算

作为最主要的红外辐射源，发动机一般由燃烧室，从飞机后方观察可见的涡轮叶片、尾喷管、喷管内壁，以及从飞机前方观察可见的空气压缩机热浆片、进气管内壁构成[4]。目前，发动机红外辐射计算模型有空腔辐射模型[5]、统计模型[4]、灰体辐射模型[6]等。工程计算中，常采用灰体辐射模型，将由发动机构成的腔体看成发射率为 0.9 的灰体，假设其内腔各点的温度均匀，并且呈现漫反射的特性，其红外辐射在尾部可见部位尾喷管处体现。则辐射出射度 $M_\lambda$/W·m$^{-2}$ 和尾喷管的辐射亮度 $L_1$/W·m$^{-2}$·sr$^{-1}$ 分别如公式(1)和公式式(2)所示。

$$M_\lambda=\frac{c_1}{\lambda^5}\cdot\frac{1}{\exp(c_2/\lambda\cdot T_1)-1} \tag{1}$$

$$L_1=\frac{\varepsilon_1}{\pi}\cdot\int_{\lambda_1}^{\lambda_2}M_\lambda \mathrm{d}\lambda \tag{2}$$

式中：$\varepsilon_1$ 为蒙皮发射率；$\int_{\lambda_1}^{\lambda_2}M_\lambda \mathrm{d}\lambda=M_{\lambda_1-\lambda_2}$ 通过公式(3)近似求得。

$$M_{\lambda_1-\lambda_2}=\frac{c_1}{c_2/T}\cdot \mathrm{e}^{-\frac{c_2\cdot X}{T}}\cdot \left\{X^3+\frac{3}{c_2/T}\cdot\left[X^2+\frac{2}{c_2/T}\cdot\left(X+\frac{1}{c_2/T}\right)\right]\right\}_{X=\frac{1}{\lambda_1}}^{X=\frac{1}{\lambda_2}} \tag{3}$$

发动机的红外辐射，除了在尾部可见部位尾喷管处体现，还作为内热源与飞机蒙皮之间存在的热传导，热传导部分将在蒙皮辐射计算中予以考虑。

### 2.2 尾焰辐射计算

根据流体力学有关知识，燃气在尾喷管内的流动可以看作一维定常等熵流动[7]。假设气体通过涡轮后的静温为 $T_1$/K，静压为 $P_1$/Pa；喷口后气体的静温为 $T_2$/K，静压为 $P_2$/Pa；根据流体力学有关知识，有如下关系式[7]：

$$T_2=T_1\left(\frac{P_1}{P_2}\right)^{\frac{r-1}{r}} \tag{4}$$

式中：$r$ 为气体比热容，对于航空发动机一般取 1.3；工程计算中，涡轮喷气式航空发动机一般取 $P_2/P_1=0.5$，进而有 $T_2=0.85\ T_1$；对于涡轮风扇发动机，一般取 $P_2/P_1=0.4$，进而有 $T_2=0.81\ T_1$。

已得尾焰温度和尾焰发射率，采用和计算尾喷管辐射亮度相同的方法计算尾焰的辐射亮度。

### 2.3 蒙皮辐射计算

蒙皮因其辐射面积大，也成为影响飞机红外辐射特征的一个重要方面。由于气动加热，飞机的蒙皮温度将经受剧烈的变化，从而产生相当的红外辐射，可通过求驻点温度[7]的方法求得蒙皮的辐射。蒙皮驻点温度 $T_S$/K 计算公式为：

$$T_S=T_0\cdot\left[1+r\cdot\frac{\gamma-1}{2}\cdot M^2\right] \tag{5}$$

式中：$T_0$/K 为飞机周围高空大气的温度；$r$ 为温度恢复系数，层流为 0.82，紊流为 0.87；$\gamma$ 为空气定压定容热量之比，一般取 1.4；$M/M_a$ 为飞机的飞行马赫数，即飞机飞行速度与声速之比。对 $T_0$/K 和 $M/M_a$ 的计算方法修正如下。

对于 $T_0$/K，它以海平面温度为基准，随海拔高度 $H$/m 以一定的趋势变化。目前普遍以国际标准大气

(C)1994-2020 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

中纬度地区海平面平均温度(288.2 K)为基准推算[7]，事实上，在不同地区、不同季节及不同天气条件下，海平面温度是不同的，因此，提出一种更精确的计算方法，如下：

对流层($0\ \mathrm{m} \leqslant H \leqslant 11\,000\ \mathrm{m}$)

$$T_0=(T_-0.006\,5H)\mathrm{K} \tag{6}$$

平流层($11\,000\ \mathrm{m} \leqslant H \leqslant 20\,000\ \mathrm{m}$)

$$T_0=(T_-71.5)\mathrm{K} \tag{7}$$

($20\,000\ \mathrm{m} \leqslant H \leqslant 32\,000\ \mathrm{m}$)

$$T_0=[(T_-71.5)+0.001\cdot(H-20\,000)]\mathrm{K} \tag{8}$$

式中：$T_/\mathrm{K}$ 为当地海平面温度。

在工程应用上，关于 $M/M_a$，有时需要由速度 $v/\mathrm{m\cdot s^{-1}}$ 转化而来。目前普遍认为飞机的马赫数是飞机速度 $v/\mathrm{m\cdot s^{-1}}$ 与音速($340\ \mathrm{m\cdot s^{-1}}$)之比，实际上，$340\ \mathrm{m\cdot s^{-1}}$ 是声音在空气中 1 个标准大气压和 15 ℃条件下的传播速度，采用该值所计算的马赫数并不精确，因为音速 $u/\mathrm{m\cdot s^{-1}}$ 是温度 $T_0$ 的函数，如公式(9)所示。

$$u=(331.3+(0.606\cdot T_0))\mathrm{m/s} \tag{9}$$

高空大气温度 $T_0/\mathrm{K}$ 随海拔高度而变化，这将引起音速的变化，进而引起飞机马赫数的变化和飞机蒙皮驻点温度的变化。因此，精确的飞机马赫数的计算公式如下：

$$M=\frac{v}{u}=\frac{v}{331.3+(0.606\cdot T_0)} \tag{10}$$

通过以上对高空周围大气温度和飞机飞行马赫数进行修正，若已知当地海平面温度 $T_/\mathrm{K}$ 和飞机飞行速度 $v/\mathrm{m\cdot s^{-1}}$，蒙皮驻点温度计算更精确。

此外，由于靠近发动机的蒙皮与发动机之间存在热传导，这部分蒙皮还将有一定的温升 $\Delta T/$℃，采用如下经验表达式[4]计算。

$$\Delta T=\Delta T_0\cdot(v_0/v)^{0.8} \tag{11}$$

式中：$v/\mathrm{m\cdot s^{-1}}$ 为飞机速度；$\Delta T_0/$℃为飞机速度 $v_0/\mathrm{m\cdot s^{-1}}$ 时由于发动机的热传导而引起的温度升高值。

精确计算了蒙皮驻点温度，并考虑内热源传热影响，进一步计算所得蒙皮辐射亮度也更合理。

### 2.4 蒙皮对环境辐射的反射

在地空背景下，飞机蒙皮对环境辐射的反射主要包括：蒙皮对太阳辐射的反射、蒙皮对天空辐射的反射、蒙皮对地面辐射的反射。

太阳是 5 900 K 的黑体，它的辐射能量经大气吸收而衰减 35%左右，投影到地球表面的有效辐照度为 $9.136\times10^2\ \mathrm{W\cdot m^{-2}}$，由参考文献[8]中关于蒙皮反射太阳光形成的辐射强度的计算公式，推得辐射亮度 $L_{\mathrm{sun}}/\mathrm{W\cdot m^{-2}\cdot sr^{-1}}$ 公式如下：

$$L_{\mathrm{sun}}=\frac{E(1+0.35)}{\pi}\cdot\alpha\cdot\eta_{\lambda_1-\lambda_2} \tag{12}$$

式中：$E/\mathrm{W\cdot m^{-2}}$ 为太阳的有效辐射照度；$\alpha$ 为机体表面的反射率；$\eta_{\lambda_1-\lambda_2}$ 为太阳辐射能量在波段区间 $\lambda_1\sim\lambda_2$ 内的比例，如：当大气可降水量为 13.7 mm 时，太阳的辐射能量在中波段占 1.27%，在长波段占 0.11%[8]。

周晓东[9]给出了蒙皮反射天空辐射和反射地面辐射形成的辐射亮度的计算方法。

## 3 空中目标实时红外仿真

基于前述飞机几何模型和红外辐射计算模型，此节将介绍实时红外仿真方法。在 VS2005 C++开发平台上采用三维渲染引擎 OSG 进行实时仿真，因为 OSG 是一个高性能的开源三维图形引擎，它封装了几乎全部的 OpenGL 底层接口，支持粒子系统、纹理映射、更新回调、场景动态调度、坐标系统等各种机制，能够很好地为飞机实时红外计算与仿真服务。

### 3.1 实时红外仿真

基于前述理论计算飞机当前状态下的红外辐射亮度，采用线性量化方法[10]将辐射值 $L$ 转化成灰度值 $G$。根据由尾焰的辐射亮度量化得到的灰度值更新尾焰的颜色值，由飞机某部件的辐射亮度得到的灰度值生成红外纹理图像，并采用 OSG 的纹理映射技术把该图像贴到飞机几何模型相应部件的节点上。其中，在纹理映射时，需要指定飞机几何模型的纹理坐标，创建纹理属性对象，以及为飞机节点的状态设置纹理属性。

在场景仿真中，为了使上述红外计算实时进行、红外效果动态更新，需要为场景树中的飞机节点添加更新回调。把飞机位置姿态信息更新、红外辐射计算、红外纹理生成与映射、尾焰粒子系统更新的操作放在回调函数中，则程序运行的每一帧都会对节点执行回调函数中的操作，如果数据有更新，则实时更新场景。

图 4 为实时红外仿真平台，它从后台实时接收数据，进行红外辐射计算与渲染，然后把红外场景实时显示在左侧画面上，同时在右侧列表中实时显示目标相关信息。画面中显示的是海空背景下目标的

(C)1994-2020 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

远距离红外图像。

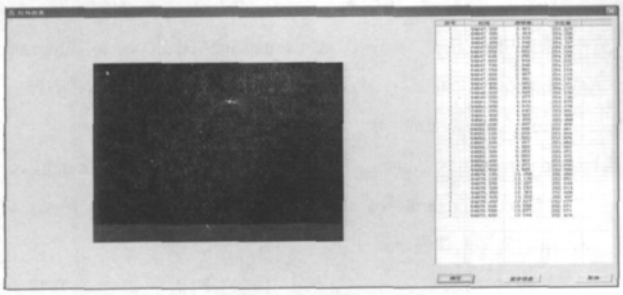

图 4 实时红外仿真平台

Fig.4 Platform of real time IR simulation

### 3.2 仿真结果

采用文中的红外辐射计算方法，在仿真平台上实时生成飞机红外图像序列，与实际拍摄图像比较。图 5 和图 7 分别为使用长波段摄像机拍摄的空客 A320 起飞阶段和下降阶段的红外图像序列，拍摄地点为沈阳桃仙机场，拍摄日期为 2010-04-23，当时天气晴朗，近地面气温约 10 ℃，距离在 3 km 以内，时间分别是下午 18:11 和 16:12。图 6 和图 8 分别为仿真得到的空客 A320 起飞和下降阶段的长波红外图像，仿真条件为近地面气温10 ℃，距离相机在 3 km 以内，飞机飞行速度分别为：在 70~200 m/s 范围内逐渐增大(图 6)和在 90~70 m/s 范围内逐渐减小(图 8)。

图 5 和图 6 中飞机由近及远继而转弯侧飞，经分析发现，在起飞阶段，飞机发动机及其附近部位较亮故辐射较强，机翼部位较暗故辐射相对较弱，随着

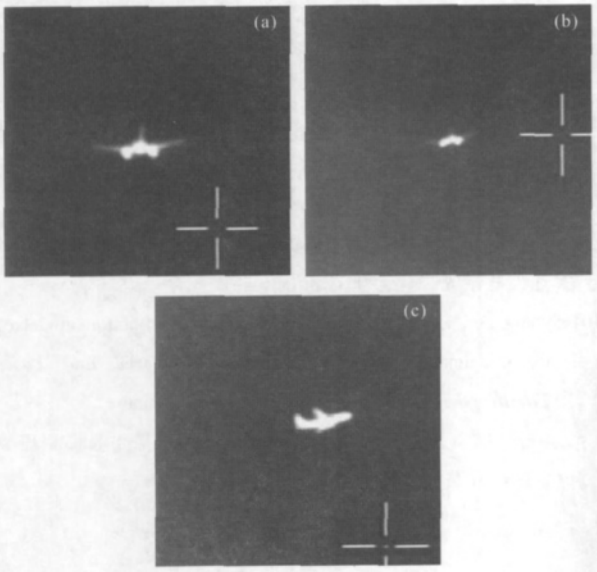


图 5 A320 起飞阶段实拍红外图像

Fig.5 IR images of A320 taking off captured by a camera

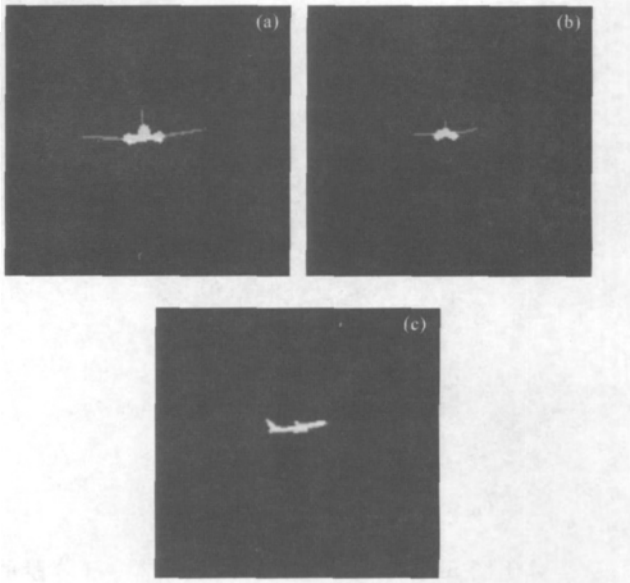


图 6 A320 起飞阶段仿真红外图像

Fig.6 IR images of A320 taking off generated by simulation

飞行速度的增大、尾喷管温度的升高和热传导的影响，飞机由局部部位较亮逐渐过渡到全局较亮，辐射也在逐渐增强。图 7 和图 8 中飞机由远及近而飞，经分析发现，在降落阶段，飞机亮度相对起飞完成后较暗，故辐射较弱，随着距相机距离的缩短，飞机的辐射能量更多地被红外相机接收，所以逐渐变亮。

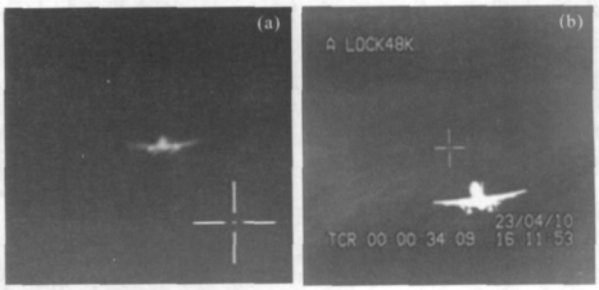


图 7 A320 降落阶段实拍红外图像

Fig.7 IR images of A320 landing captured by a camera

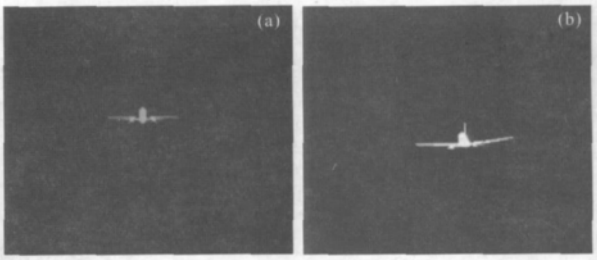


图 8 A320 降落阶段仿真红外图像

Fig.8 IR images of A320 landing generated by simulation

(C)1994-2020 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

图 9 为一定条件下，某飞机在中红外波段起飞时的红外仿真图像。

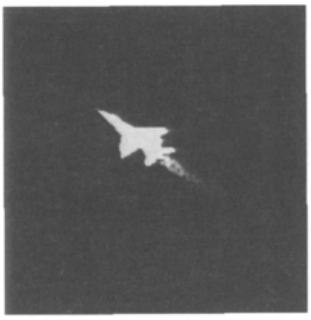

图 9 飞机中波段红外图像

Fig.9 IR image of an aircraft at mid-wave

对比图 5~图 8 中同种飞机在相同飞行阶段的实拍红外图像和仿真红外图像，发现二者在亮度上极为相似，而且飞机实际飞行的各种姿态能都被模拟，因此，文中的红外辐射计算方法是合理的，该仿真平台也是有效的。

## 4 结 论

上述过程验证了红外辐射计算方法的合理性，对实拍和仿真数据分析发现：在长波波段，飞机尾焰辐射较弱，尾喷管和蒙皮辐射占据重要地位；在中波波段，飞机尾焰辐射较强。仿真平台仅加载飞机目标时，仿真速率达 100 帧/s 以上，能够满足实时性的要求，因此，该仿真平台可以为红外目标识别算法提供数据输入。

## 参考文献：


[1] Du Shiming, Chen Shanjing, Wang Fei. Study of infrared signatures of aircraft[J]. ***Infrared***, 2010, 31(6): 19-22. (in Chinese)
杜石明, 陈善静, 王飞. 飞机红外特征研究[J]. 红外, 2010, 31(6): 19-22.

[2] Wang Xuewei, Zhang Weiguo, Shen Tongsheng, et al. Computer generation of dynamic infrared images of a plane [J]. ***Infrared and Laser Engineering***, 1999, 28(2): 21-24. (in Chinese)
王学伟, 张卫国, 沈同圣, 等. 飞机目标动态红外图像的计算机生成[J]. 红外与激光工程, 1999, 28(2): 21-24.

[3] Mahulikar S P, Rao G A, Sonawane H R, et al. Infrared signature studies of aircraft and helicopters [C]//Piers Proceedings, 2009, 8: 18-21.

[4] Chang Xinjie, Zhang Ke, Li Yanjun, et al. Research on infrared signatures of aircraft [J]. ***Aero Weaponry***, 1998, 4: 13-17. (in Chinese)
常新杰, 张科, 李言俊, 等. 飞机红外辐射特性计算研究[J]. 航空兵器, 1998, 4: 13-17.

[5] Zhao Qiang, Liu Longhe, Tang Zhikai. The research of infrared imaging signature while targets in clutter backgrounds[J]. ***Guidance and Fuze***, 2005, 26(3): 15-18. (in Chinese)
赵强, 刘隆和, 唐志凯. 目标在复杂背景中的红外成像特性研究[J]. 制导与引信, 2005, 26(3): 15-18.

[6] Wu Xiaozhong, Teng Peng, Lu Yi. Calculation and simulation of infrared radiation about some jet aircraft [J]. ***Infrared Technology***, 2008, 30(12): 727-731. (in Chinese)
吴晓中, 腾鹏, 鲁艺. 喷气式飞机红外辐射仿真计算[J]. 红外技术, 2008, 30(12): 727-731.

[7] 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.

[8] Hao Zhiguo. Research on real time simulation technology of infrared images [D]. Xi′an: Northwestern Polytechnical University, 2006. (in Chinese)
郝志国. 红外动态图像实时生成技术研究[D]. 西安: 西北工业大学, 2006.

[9] Zhou Xiaodong, Guo Ming. Generation of space target′s dynamic IR images [J]. ***Infrared and Laser Engineering***, 2007, 36(1): 5-8. (in Chinese)
周晓东, 郭明. 空间目标动态红外图像的计算机生成[J]. 红外与激光工程, 2007, 36(1): 5-8.

[10] Wang Fei, He Jing, Wang Xinsai, et al. Simulation model of IR imaging for the aeroplane [J]. ***Infrared and Laser Engineering***, 2007, 36(3): 352-356. (in Chinese)
王飞, 贺菁, 王新赛, 等. 空中飞机红外成像仿真模型研究[J]. 红外与激光工程, 2007, 36(3): 352-356.


(C)1994-2020 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net