

doi: 10.7690/bgzd.2016.08.015

飞机及尾焰的红外仿真

孙丹丹, 高教波, 孙科峰

(西安应用光学研究所仿真中心, 西安 710065)

摘要: 为了简单易行地实现飞机及尾焰的动态红外实时渲染输出, 设计并建立一种基于 Vega 平台的简化飞机尾焰粒子特效模型。介绍 Vega 仿真技术, 并详细说明目标建模、尾焰建模和温度变换 3 个关键技术, 经过合理地设计 Vega Lynx 界面 Special Effect 模块参数, 建立飞机尾焰粒子特效模型, 并通过对飞机几何模型进行区域划分和经验温度赋值来模拟飞机蒙皮温度场分布, 同时针对 Vega 红外能量量化范围的限制性, 对目标温度进行变换处理, 最终通过仿真应用程序给出飞机及尾焰的红外渲染结果。仿真结果表明: 该方法简单易行, 有较高的逼真度, 满足多数仿真的应用要求。

关键词: Vega; 粒子系统; 飞机尾焰; 红外仿真

中图分类号: TP391.9 **文献标志码:** A

Aircraft and Tail Flame IR Simulation

Sun Dandan, Gao Jiaobo, Sun Kefeng

(Simulation Center, Xi'an Institute of Applied Optics, Xi'an 710065, China)

Abstract: In order to realize the dynamic infrared real-time rendering output of aircraft and its tail flame simply, a simplified particle effect model of aircraft plume based on Vega is designed and built. In this paper Vega simulation technology is introduced, and the three key technologies of object modeling, tail flame modeling and temperature transformation are presented in detail. Through reasonable parameter design of Special Effect module in Vega's Lynx interface, the aircraft plume model is built. Then, aircraft temperature field is simulated by dividing the plane geometry model into regions and giving experiential temperature for each region. For the limitation of quantitative range of infrared radiation, a transformation is used to the target temperature. In the end, the infrared simulation result of aircraft and its tail flame is provided by application program. The result proves that the simulation method in this paper is simple and has high fidelity, and can meet the most requirements of simulation application.

Keywords: Vega; particle system; aircraft tail flame; IR simulation

0 引言

飞行器是空中视景仿真的主要目标, 其喷射的尾焰是重要的红外辐射源。若要精确计算二者的红外辐射分布, 物理过程比较复杂^[1-2], 且对于仿真精度要求不高的场景, 简化的结果同样可以满足应用需求; 因此, 笔者假设整个尾焰的红外辐射均匀分布, 并利用 Vega 特效模块模拟其动态特性, 通过将模型区域进行结点划分并分别赋予经验温度的方式, 对飞机由于内热源、气动加热等因素产生的蒙皮辐射分布进行模拟。Vega 输出的 8 位灰度图像只能正确量化显示一定范围的辐射亮度值, 简单的增益或偏移算法会很容易达到饱和而使图像产生失真; 因此, 笔者提出通过对目标温度进行线性变换来提高场景的对比度, 并在基于 Vega 平台的驱动程序中实现了飞机及尾焰的动态红外实时渲染输出。

1 Vega 仿真技术概述

1.1 视景仿真软件 Vega 介绍

Vega 是 Multigen-Paradigm 公司推出的, 用于

开发交互式、实时可视化仿真应用的软件平台。其建立在 OpenGL 标准图形库之上, 可以快速实现对虚拟场景的创建、驱动、控制等操作, 具有跨平台、易用、可扩展等优点, 在虚拟训练模拟, 三维游戏开发中有广泛的应用^[3]。

Vega 的 LynX 图形用户界面具有良好的交互性, 包括大量可加载模块, 可通过快速操作, 建立简单的仿真场景。Vega 同时拥有完善的 API 函数库, 支持灵活的 C 语言控制接口, 能够实现复杂功能系统的创建及驱动。

1.2 特效模块介绍

粒子系统是迄今为止计算机图形学中用于描述不规则对象最成熟的理论之一, 也是视景仿真领域模拟自然现象和特殊效果的方法中视觉效果最好的一种。粒子系统的基本思想是: 采用大量的具有生命和各种属性的微小粒子图元, 作为基本元素来描述不规则对象。粒子系统中的每一个粒子都具有形状、大小、颜色、透明度、运动速度、运动方向、生命周期等相关的属性。

收稿日期: 2016-05-07; 修回日期: 2016-06-25

作者简介: 孙丹丹(1985—), 男, 黑龙江人, 硕士, 工程师, 从事目标特性与建模仿真技术研究。

Vega 特效模拟模块用面向视点的多边形来表示粒子，可方便地在视景仿真应用中模拟出各种很难用多边形建模表现出来的特殊效果，包括常见的火焰、烟雾、爆炸等固定效果模块，还提供自定义粒子系统设置，用户可通过 Lynx 图形界面操作方便灵活地制作出能满足仿真要求的各种效果。

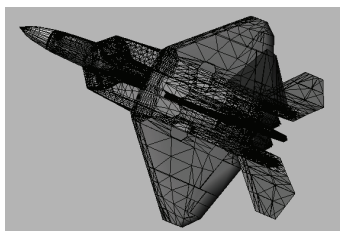
1.3 Sensor Vision 模块介绍

Sensor Vision 模块可根据目标及场景的材质、颜色和光照等条件，调用大气模型参数文件，实现对红外传感器的模拟。Vega 利用 Texture Material Matter (TMM) 工具将几何模型的纹理进行材质划分，获得 TMM 格式的材质纹理映射关系，使目标能够被传感器识别；在 MAT (mosart atmospheric tool) 工具输入地理位置、大气状态、光谱波段等参数，计算输出大气传输特性、太阳或月亮的直接辐射以及所选材质的温度结果，生成预编译 MAT 文件。在仿真过程中根据观察者高度和视物夹角变化通过线性插值获得辐射数据，最终量化生成红外图像。

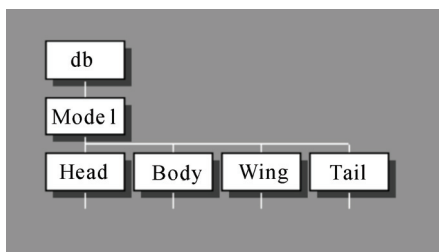
2 关键技术

2.1 目标建模

模型实体是构成场景的基本元素，基于 Vega 平台的目标模型制作一般选择 Creator 软件。这是一款逼真度高、交互性强的目标建模和场景编辑软件。它采用树状模型数据库结构，通过组、体、面、点等结点将场景模型逻辑化有层次的组织起来，最终生成 Open Flight 格式文件^[4-5]。笔者使用 Creator 工具建立某型飞机实体/网格模型如图 1(a)所示。



(a) 飞机实体/网格模型



(b) 飞机模型数据结构

图 1 Creator 中的飞机模型

由于 Vega 没有考虑内热源和气动加热等因素对模型温度的影响，因此，整个飞机蒙皮灰度变化

主要由材料类型决定，往往区别不大。为了解决这一问题，笔者对照实拍飞机红外图像，按辐射分布特征对模型进行结点划分，并为每个个体结点内的全部顶点赋予一个经验温度。为简单起见，这里只将飞机模型划分成 4 个体结点，分别对应机头 (Head)、机身 (Body)、全部机翼 (Wing) 和 2 个尾喷管 (Tail)，数据结构如图 1(b)所示。

2.2 尾焰建模

发动机排出的高温热气体和粒子形成的尾焰，其形状具有随机不规则性；因此，可用粒子系统对其进行模拟。Vega 粒子特效模块，包含“爆炸”“烟雾”等 12 种定义好的特殊效果，但像飞机尾焰这种复杂的效果，并不能用这几种模型简单的表示；因此，笔者在自定义特殊效果中对粒子的属性进行设置，考虑真实的物理模型和相应的动力学规律，对飞机尾焰的动态效果进行模拟。

文中尾焰仿真的核心思想是将圆形尾喷口微分成若干个离散且分布均匀的小型子喷口，如图 2(a)。从每个子喷口喷出一束由粒子系统模拟的尾焰，通过粒子系统各种属性的控制，使子尾焰的长度分布如图 2(b)所示，当子喷口达到一定的数目，就形成一个柱体，可以很好地模拟飞机尾焰的形态特征。

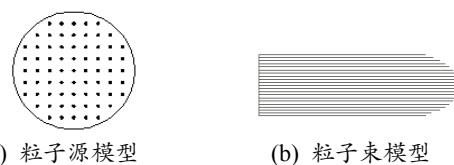


图 2 尾焰模型原理示意

在 Lynx 图形界面 Special Effect 特效面板中，具体的参数设置方法如下：

- 1) 特效类型：用户自定义 (Custom)。
- 2) 粒子源：选择粒子源形状为圆形 (Circle) 或球形 (Sphere)。尾焰由尾喷管喷出，因此将模拟的粒子源置于尾喷管内部，为了保证尾焰与飞机的相对位置关系在动态仿真中保持不变，将粒子特效通过效果掩码与飞机角色对象进行绑定。
- 3) 粒子速度：由于尾喷方向始终朝向飞机飞行相反方向，由粒子源连续发射 (Stream) 运动速度与飞机飞行方向 (即机头朝向) 相反的粒子。
- 4) 粒子大小：将粒子大小在其运动方向进行拉伸 (scale along v -vector)，并通过粒子流长度来控制粒子大小。为了使尾焰末端出现参差不齐的效果，选择合适的值进行粒子尺寸变更 (size variation)。
- 5) 粒子纹理：为了增加尾焰的动态性，选择一

组纹理序列,用于在粒子生命周期内进行动态更新,基于形态及红外特性考虑,笔者将 Vega 自带的 flameinta 文件夹中透明灰度图片作为尾焰纹理。

6) 粒子个数:粒子个数越多,尾焰的真实性和立体感越强,但同时会影响仿真的速度;因此,要选择合适的粒子个数。

7) 粒子生命:是指粒子从产生到消亡所经历的时间。为了保持尾焰的持续性,选择特效结束控制方式(when done)为重新启动特效(Restart)。同时在运动速度一定的情况下,生命周期的长短与尾焰的长度相关联;因此,为了保持合适的尾焰长度,要选择适当的粒子生命周期。

8) 粒子温度:在特效模块的 Sensor Vision 页面,设置粒子温度以及温度更新方式。尾焰粒子在其整个生命周期的各阶段应具有不同的温度及红外辐射特性。为方便起见,假设其温度始终保持不变。

9) 粒子材质:尾焰流的主要成分是燃烧后生成的 H₂O 和 CO₂,这 2 种气体是典型的选择性辐射体。但实际中尾焰辐射主要来自 CO₂ 4.3~4.55 μm 的辐射带,在这个波段内尾焰可以近似为发射率 ε=0.5 的灰体^[6]。笔者通过定义一种黑体和白体混合的灰体材质,来模拟尾焰的光谱特性。

以上参数可以根据具体的飞机机型、发动机类型、飞行高度和视点角度等,做出相应的调整,来更好地模拟尾焰效果。同时也可以根据仿真状态变化,调用相应的 API 函数,进行动态修改。

2.3 温度变换

Vega 软件根据不同区域材质属性、温度、大气环境、太阳辐射等因素,计算在相应条件下的平均辐亮度,并以平均灰度的形式表现出来。某种物体(此处为金属,发射率为 0.97)在 8~12 μm 波长下温度、辐亮度及平均灰度的关系如表 1^[7]所示。

表 1 温度、辐亮度与灰度的对应关系

温度/K	辐射值/(W·r ⁻¹ ·m ⁻²)	仿真结果(灰度值)
282	32.71	137
298	43.89	176
310	53.72	210

由表 1 可以看出:Vega 的量化方式是辐射亮度越高,灰度值越大,当金属温度达到 310 K 时(与飞机蒙皮的表面温度接近),灰度值就达到 210,接近 255 这个阈值,而飞机尾喷管及尾焰目标都是高温物体,可以达到 500、600 °C,甚至 700 °C^[8]。其灰度值必然发生饱和。简单的增益和平移算法,并不能很好地解决这一问题,同样会造成某些细节的丢

失和对比度的损失。为此,笔者提出一种近似方法对温度值进行变换处理,即模拟热像仪工作方式,设定几个工作温档,只有在该温档内的温度才能正确地量化显示,否则为 0 或 255。并且为了增加对比度,假设每个档位内的温度与 Vega 可正确显示温度值存在线性的映射关系。

具体实现过程为:首先找到在文中环境条件下,Vega 量化后灰度最小、最大值对应的温度 MinT、MaxT,假设某温档的范围 Ltem~Htem(例如 300~500 K),某种材质表面的预设温度为 T,变换后的温度为 X,则根据线性假设有:

$$\frac{X - \text{Min}T}{\text{Max}T - \text{Min}T} = \frac{T - \text{Ltem}}{\text{Htem} - \text{Ltem}} \quad (1)$$

由上式获得变换后的温度值 X,作为 Sensor Vision 模块新的温度输入,再由 Vega 进行辐射计算后,量化显示得到新的红外灰度图像。

3 实现过程

由 Vega 平台仿真输出飞机及尾焰的具体操作流程如图 3。首先将仿真中用到的数据进行预处理,包括:由模型数据在 Creator 软件中进行飞机目标三维建模,并将 RGB 格式的模型纹理映射到飞机模型之上;利用 TMM 对模型及尾焰纹理进行表面材质类型的划分和赋值;在 MAT 中根据仿真的环境,生成大气预编译文件,以及模型和尾焰材质在特定环境下的温度计算结果。然后将这 3 类文件导入到 Lynx 图形界面,对场景及目标进行基本初始设置,在特效及 Sensor Vision 模块分别建立粒子特效及红外传感器的模型,生成 ADF 文件。最后利用 Vega API 及 MFC 框架创建仿真应用程序,读取预先定义好的 ADF 文件,实现渲染输出红外场景。

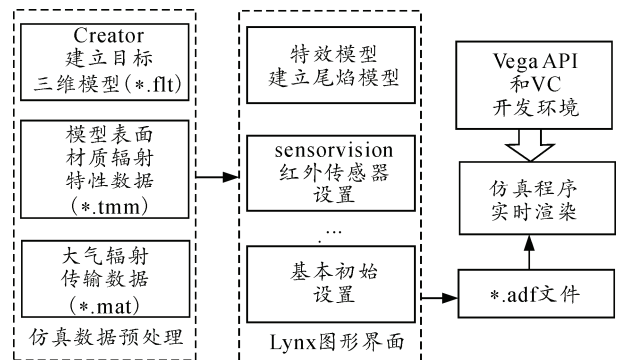


图 3 仿真操作流程

笔者采用 C++语言实现程序开发,首先开启一个线程作为 Vega 仿真模型的驱动,并通过调用 postConfig()配置函数,读取 ADF 文件中相关资源

数据，实现飞机模型及尾焰的温度变换。代码为：

```
UINT runVegaApp( LPVOID pParam )
{
    vgInitWinSys( AfxGetInstanceHandle(),
    pOwner->GetSafeHwnd());
    vgInitFx(); //初始化场景中使用的特效
    vgInitLADBM(); //初始化大型数据库，载入大气预编译文件
    vgInitSV(); //初始化红外传感器仿真模块
    vgDefineSys("vegashow.adf");//载入 ADF 文件
    vgConfigSys(); //完成系统配置
    pOwner->postConfig();//完成温度变换
    while (1)
    {
        vgSyncFrame(); //帧同步处理
        vgFrame (); //当前帧处理
    }
}
//postConfig()函数实现飞机模型及尾焰的温度变换：
```

```
void CVegaShow::postConfig()
{
    //获得飞机目标
    m_target = vgFindObj("Model");
    //获得尾焰模型
    m_Trail = vgFindFx("Trail");
    //获得目标模型 Head、Body、Wing 和 Tail 4 个体结点
    part[0] = vgFindPart(m_target, "Head", NULL);
    .....
    part[3] = vgFindPart(m_target, "Tail", NULL);
    //实现温度变换算法，变换后温度保存在 Temp 数组
    SetTemp(*Temp);
    //对模型全部体结点及尾焰进行温度赋值
    vgSVTemp((vgCommon*)part[0], Temp[0]);
    .....
    vgSVTemp((vgCommon*)m_Trail, Temp[4]);
}
```

4 仿真结果

图 4 为使用文中方法，在 $3\sim 5\ \mu\text{m}$ 波长下，飞机及尾焰的仿真结果。图 4(a)是假设模型几何体温度为 340 K，尾焰温度为 500 K 时的结果，由于 Vega 没有考虑飞机蒙皮温度分布特征及饱和现象的发生使模型细节几乎全部丢失；采用结构划分及温度变化后从不同角度观察的结果如图 4(b)~(d)所示，可

以看出模型对比度更明显，信息更丰富；加力状态下尾焰是主要的辐射源，通过调用 Vega API 函数改变飞机温度及尾焰形态模拟的飞机加力状态如图 4(e)；加入烟雾后其对飞机模型的遮挡效果如图 4(f)所示。从仿真结果可以看出，文中模拟的飞机及尾焰目标有较高的逼真度。

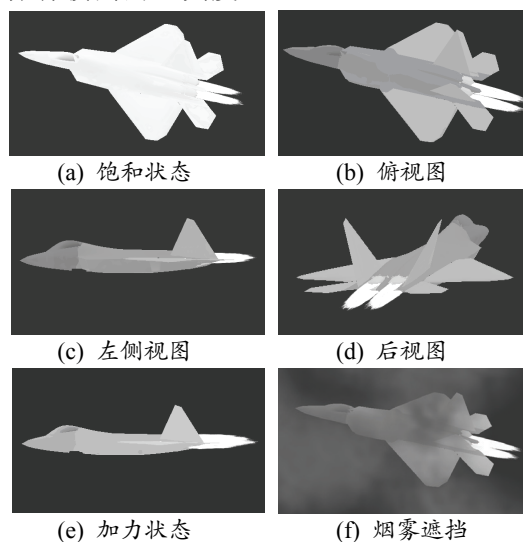


图 4 仿真结果

5 结束语

笔者基于三维视景仿真平台 Vega 对飞机目标及尾焰进行红外仿真。重点介绍尾焰建模、模型结点划分及温度变换算法 3 个关键技术，分析仿真流程，编写在 VC 开发环境下利用 Vega API 和 C++ 语言的仿真应用程序，并给出最终的红外仿真结果。结果证明：笔者提出的方法具有简单、实时性强、逼真度高等优点，满足多数仿真的应用要求。

参考文献：

- [1] 夏新林, 艾青, 任德鹏. 飞机蒙皮红外辐射的瞬态温度场分析[J]. 红外与毫米波学报, 2007, 26(3): 174-177.
- [2] 张术坤, 蔡静. 尾焰红外辐射特性计算研究综述[J]. 激光与红外, 2010, 40(12): 1277-1282.
- [3] 陈新庚, 马长生, 孙文涛. 基于 Vega 的导弹防御仿真系统研究[J]. 计算机仿真, 2011, 28(1): 59-62.
- [4] 王世学, 胡云翔, 陈玉飞. 基于 Vega/Creator 的装甲部队战场视景仿真[J]. 兵工自动化, 2010, 29(6): 92-94.
- [5] 赵征凡, 杨作宾, 车建国. 基于三维视景的虚拟武器装备系统[J]. 兵工自动化, 2006, 25(10): 13-18.
- [6] 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, 2006, 7(6): 26-28.
- [7] 邹士迁, 郝利锋, 徐军华, 等. 基于红外图像仿真的光电模拟器研究[J]. 应用光学, 2012, 33(6): 1142-1146.
- [8] 张建奇, 方小平. 红外物理[M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2004.