

# 浙江工业大学

## 本科毕业设计说明书（论文）

（2017 届）



论文题目 基于 Unity3D 的红外场景

仿真系统设计与开发

作者姓名 黄可蒙

指导教师 张繁

学科(专业) 软件工程

所在学院 健行学院

提交日期 2017 年 6 月

## 摘 要

随着计算机性能水平的提高以及 3D 仿真技术的发展，红外成像仿真技术在红外成像系统性能评估，军事模拟训练，灾害救援演习，游戏视觉体验以及其他军事和民用领域具有重要的应用价值。但是，由于计算机硬件和软件等多方面的条件限制，针对大场景的红外成像仿真系统在适用性和准确性等方面存在较多问题，而其在国防军事的红外制导模拟训练等方面具有重要的应用价值，故此针对大场景，即同时仿真海陆空以及多种地形地貌，针对不同季节时间条件下的仿真系统具有重大意义。

本文通过对红外物理基础理论和自然场景仿真实理论的研究，在前人红外成像仿真的研究基础上，整合了海洋陆地红外成像仿真场景，更正修改了部分数学计算模型，使得仿真结果更为精确，同时，利用当下流行的 GPU 编程语言，通过 GPU 编程，对仿真算法进行并行加速计算，在此基础上实现新的红外仿真计算架构：以基于红外特性的物理材质为仿真单位，借助 GPU 的并行计算能力，在 GPU 中，对不同场景对象多角度下的红外辐射灰度进行并行计算。通过该计算框架，可以构建包含多种目标对象的红外场景，包括植被，房屋建筑以及舰船，并且在不低于三十个目标对象的前提下保证仿真系统的实时性。

利用功能强大的 Unity3D 游戏引擎，完成仿真场景编辑和实现仿真系统的逻辑功能，并实现场景的实时渲染。通过对重建的三维场景的仿真效果图与实地拍摄的真实的红外场景图像进行比对分析，表明该仿真系统能够高效动态实现多种条件下的较为可信的红外仿真视景。

**关键词：**红外成像，实时仿真，大场景，计算架构，对比分析

## ABSTRACT

With the improvement of computer performance and the development of 3D simulation technology, infrared imaging simulation technology has important application value in infrared imaging system performance evaluation, military exercise, disaster rescue exercise, game visual experience and other military and civilian fields. However, due to the limitations of computer hardware and software, the infrared imaging simulation system for large scenes has many problems in applicability and accuracy, and it is important in the infrared guidance simulation training of national defense and military Application value, so for large scenes, that is, at the same time simulation of land, sea and air and a variety of topography, for different season time under the conditions of the simulation system is of great significance.

Based on the research of infrared physics basic theory and natural scene simulation theory, this paper integrates the simulation scene of marine terrestrial infrared imaging on the basis of previous research on infrared imaging simulation, and corrects some mathematical calculation models to make the simulation result more accurate. At the same time, using the popular Cg programming language, through the GPU programming, the simulation algorithm is optimized. Thus, a new infrared simulation computing architecture is realized, which can build infrared scenes that contain multiple audiences, including vegetation, housing, and ships, and ensure the real-time performance of the simulation system without less than thirty objects.

Utilize the powerful Unity3D game engine to complete the simulation scene editing and realize the logic function of the simulation system and realize the real-time rendering of the scene. By comparing the simulation results of the reconstructed 3D scene with the real infrared scene images recorded in the field, it shows that the simulation system can realize the more reliable infrared simulation scene under various conditions.

**Key words:** infrared imaging, real-time simulation, large scene, computational architecture, comparative analysis.

# 目录

摘 要 .....	I
ABSTRACT .....	II
目 录 .....	III
图目录 .....	V
表目录 .....	VI
<b>第一章 绪 论</b> .....	1
1.1 研究工作的背景与意义 .....	1
1.2 相关工作 .....	1
1.3 本文的主要贡献与创新 .....	3
1.4 论文组织结构 .....	4
<b>第二章 红外基础物理和数学模型的研究</b> .....	5
2.1 引言 .....	5
2.2 理论背景 .....	5
2.2.1 辐射的基本概念 .....	5
2.2.2 红外辐射规律 .....	5
2.2.3 黑体辐射 .....	6
2.2.4 傅立叶定律 .....	7
2.3 零视距离辐射计算模型 .....	7
2.3.1 自身辐射 .....	7
2.3.2 反射辐射 .....	12
2.3.3 热平衡方程 .....	12
2.4 大气传输模型 .....	14
2.5 设备仿真模型 .....	15
2.5.1 成像模糊模型 .....	15
2.5.2 成像噪声模型 .....	16
2.6 海洋仿真模型 .....	17
2.6.1 海面波形仿真 .....	17
2.6.2 海面折射和反射的仿真 .....	19
2.6.3 海面浪花仿真 .....	21
2.6.4 开尔文尾迹仿真 .....	22
2.7 热源仿真模型 .....	22
2.7.1 热源设置 .....	23

2.7.2 效果渲染 .....	23
2.8 本章总结 .....	25
<b>第三章 相关技术点概述分析</b> .....	<b>26</b>
3.1 系统逻辑架构 .....	26
3.1.1 数据逻辑 .....	26
3.1.2 系统功能概述 .....	28
3.2 场景组织 .....	29
3.2.1 Unity3D 功能概述 .....	29
3.2.2 场景编辑 .....	30
3.3 场景渲染 .....	31
3.3.1 渲染流水线 .....	31
3.3.2 顶点着色器 .....	33
3.3.3 像素着色器 .....	34
3.4 本章小结 .....	34
<b>第四章 仿真系统实现和结果分析</b> .....	<b>35</b>
4.1 仿真系统实现 .....	35
4.1.1 算法实现 .....	35
4.1.2 地形红外仿真 .....	36
4.1.3 目标对象红外仿真 .....	39
4.2 仿真结果分析 .....	39
4.3 真实结果对比 .....	43
4.4 本章小结 .....	45
<b>第五章 全文总结与展望</b> .....	<b>47</b>
5.1 全文总结 .....	47
5.2 后续工作展望 .....	48
<b>参考文献</b> .....	<b>49</b>
<b>致谢</b> .....	<b>52</b>

## 图目录

图 2-1 太阳运动轨迹示意图.....	9
图 2-2 光波频率大气透过率分布图.....	14
图 2-3 模糊效果总体流程图.....	15
图 2-4 模糊效果图 .....	16
图 2-5 噪声算法流程图.....	16
图 2-6 白噪声贴图 .....	17
图 2-7 噪声效果图 .....	17
图 2-8 海面波形图 .....	19
图 2-9 海面折射算法流程图.....	19
图 2-10 海面反射算法流程图.....	20
图 2-11 海面反射折射效果图.....	21
图 2-12 海面浪花效果图.....	22
图 2-13 立体相机结构示意图.....	23
图 2-14 仿真热源贴图 .....	24
图 2-15 热源仿真效果图.....	25
图 3-1 数据逻辑流程图.....	26
图 3-2 系统功能概述图.....	28
图 3-3 地形高度效果图.....	31
图 3-4 相机视锥体示意图.....	32
图 4-1 热平衡方程求解源码示例图.....	35
图 4-2 系统实现流程图.....	36
图 4-3 地形贴图编辑界面图.....	37
图 4-4 地形 splat 纹理贴图.....	37
图 4-5 多材质地形红外仿真效果图.....	38
图 4-6 放置热源对象模型效果图.....	39
图 4-7 轿车正午红外场景仿真侧视图.....	40
图 4-8 轿车午夜红外场景仿真侧视图.....	40
图 4-9 轿车午夜红外场景仿真正视图.....	41
图 4-10 舰船海面红外尾迹仿真效果图.....	41
图 4-11 长时间行驶坦克红外效果图.....	42
图 4-12 长时间静止状态坦克红外效果图.....	42
图 4-13 向阳面建筑表面红外效果图.....	42
图 4-14 深夜 0:00 时实拍（左）与仿真（右）红外图像对比图.....	43
图 4-15 凌晨 4:00 时实拍（左）与仿真（右）红外图像对比图.....	43
图 4-16 早上 8:00 时实拍（左）与仿真（右）红外图像对比图.....	43
图 4-17 正午 12:00 时实拍（左）与仿真（右）红外图像对比图.....	43
图 4-18 傍晚 16:00 时实拍（左）与仿真（右）红外图像对比图.....	44
图 4-19 夜晚 20:00 时实拍（左）与仿真（右）红外图像对比图.....	44
图 4-20 水泥地 24 小时温度变化仿真实测对比图.....	44
图 4-21 草地 24 小时温度变化仿真实测对比图.....	45
图 4-22 车门 24 小时温度变化仿真实测对比图.....	45

## 表目录

表 2 - 1 风速对照表 .....	11
表 2 - 1 风速对照表（续） .....	12
表 2 - 2 MODTRAN 不同条件下大气透过率计算值表 .....	14
表 3 - 1 红外特性参数表.....	26
表 3 - 1 红外特性参数表(续).....	27

# 第一章 绪论

## 1.1 研究工作的背景与意义

当物体温度大于绝对零度的时候，物体就会对外产生红外辐射，即向外发射红外电磁波，红外电磁波是电磁波中，波长范围介于可见光波和微波之间的电磁波，波长范围大约是  $0.76\sim 1000\ \mu m$ 。在夜间等光线较弱或者目标伪装隐蔽的条件下，由于目标对象自身辐射红外波，而且辐射的强度与温度成正相关，故此，可以利用红外波进行热成像，使得红外波提供许多可见光无法提供的信息，这在军事侦察等领域具有重要的作用。由于地球大气对红外波段的不同子波段的透过率不同，所以，通常将红外波段分为三个区域，短波红外，中波红外和长波红外。

红外仿真是对实际红外成像设备的成像图片进行模拟仿真，通过物理模型对物体表面温度场进行计算，求解出物体表面的零视距离红外辐射值，在此基础上，考虑多种外界条件对红外辐射值的影响，如大气条件和设备干扰，进一步计算出输入到接收设备的辐射值并将该辐射值转化为灰度值，作为仿真图像的颜色值，从而得到仿真图像。在利用实际的红外成像设备进行实地的拍摄实验时，常常受到多方面的因素制约，如不可控的环境因素，人力资源以及经济成本。而一个较为准确的红外仿真系统可以仿真出多种环境条件下的任意时段的红外场景图像，因而，借助红外仿真系统，可以大大节约人力资源以及经济成本，并且操作灵活度较高。

然而，由于我们国家在相关领域研究的时间起步较晚，国内目前还没有成型的具有较高实用性的红外仿真系统，而国外在相关领域已有成熟的系统，如 Vega Prime 仿真系统<sup>[1]</sup>。故此，本文通过对红外物理计算模型的深入研究，利用计算机图形学中的视景仿真技术，实现具有较高真实度的大场景的红外视景仿真系统，这对国内的红外仿真领域具有重大的意义。

## 1.2 相关工作

本文的工作主要包括红外物理成像模型的推导计算以及仿真系统的具体实现两个方面，故此，本节将重点介绍国内外在红外物理成像模型方面的相关研究工



作。

红外物理成像模型主要包括三个方面，温度场分布计算模型，大气传输计算模型以及成像过程仿真模型。

温度场分布计算模型主要分为经验模型和物理模型。经验模型在很大程度上忽略了红外物理的过程机制，通过对大量的统计数据归纳拟合出较为实用的物理模型（经验公式），通过经验公式预测温度场的分布，这在准确性上存在很大的欠缺，但在实际的仿真运行效率上却有很好的表现，故此，在对仿真精度要求不是很高的情况下，可以采用经验模型。而物理模型则是通过对辐射产生过程的分析，建立热平衡方程，进而对其进行求解，从而计算出物体表面温度场的分布，由此结合普朗克定律产生红外图像，图像的仿真精度相对较高和成像效果相对较好。如 Sheffer<sup>[2]</sup>和 Biesel 等<sup>[3]</sup>根据物体材质和外界环境条件，建立热平衡方程，进而求解物体表面温度场分布的计算模型。Owens 等<sup>[4]</sup>通过求解面元温度与外部环境因素关系的线性方程得到物体表面温度场分布的求解模型。Li 等<sup>[5]</sup>通过 CFD 有限元算法实时求解飞行器表面的温度场分布。Liao 等<sup>[6]</sup>基于物体表面的红外材质属性和热传递规律提出简化的热量传递平衡方程，通过有限差分法动态迭代计算热平衡方程，得到往后时刻的物体表面温度，从而计算出物体表面的温度场分布。任亮等<sup>[7]</sup>通过将目标模型导入 ANSYS 进行有限元热分析，利用热分析获得目标点云数据与节点拓扑结构，在仿真软件中重建目标的三维红外辐射场分布。杨尧等<sup>[8]</sup>从海面热平衡方程出发，将平衡方程的各项用温度函数表示，然后从平衡方程中求解出海面的温度场分布。陆艳青等<sup>[9]</sup>采用多层的有限差分法，综合外部气象等因素，对四季城市建筑物及其周围物体表面的温度场进行逐时求解。Wang 等<sup>[10]</sup>基于模型的红外材质进行温度场的求解计算。部分仿真算法采用半经验模型，即结合数理统计和物理规律推导的数学模型，如 Balfour 等<sup>[11]</sup>通过对地中海区域的数据采集，简化物理仿真模型，进而进行求解计算。

在大气传输计算模型上，国外起步较早，并且已经成功研发出了一系列具有较高使用价值的大气计算模型和软件，其中，最具代表性的是美军空军基地研制出的大气传输模型 LOWTRAN 和 MOTRAN<sup>[12]</sup>，孙毅义等<sup>[13]</sup>对二者的特点做了较为简明的概述，该类模型是以美国标准大气作为高度函数的参考模型大气，同时，还可以根据理论计算或实验数据，由用户自定义大气模式，适用于较宽的电磁波段以

及较为复杂的大气环境模型的辐射透过率的计算,如气溶胶,云雨模型。由于二者的局限性不同,LOWTRAN 适用于 30km 以下的大气环境,MODTRAN 则适用于 60km 以下的大气,当大气高度超过 60km 以后,则需要更为精准的 FASCODE 模型,该模型是完全逐线的 Beer-Lambert 算法,是以最精细的光谱分辨率“精确”计算孤立重叠的分子线谱,因而,其精度相对较高。但是,由于 FASCODE 需要花费大量时间求解积分,故此,在红外仿真中,常常使用耗时较少的 MODTRAN 模型,如 Li 等<sup>[5]</sup>在求解物体表面零视距离辐射到达相机的辐射值时,即利用 MODTRAN 作为系统的辅助模块,计算物体到达相机的辐射透过率。周国辉等<sup>[14]</sup>从分析红外辐射在大气中传播的影响因素出发,分别给出大气吸收、大气散射和气象衰减系数,并计算出倾斜海平面水平等效路程,最后给出一种计算红外大气透过率的数学模型。该模型的精确性比较前者存在较大不足,但在对精度要求不是很高的工程领域,实现简单,运行效率较高,基本上可以满足要求,具有较好的使用价值。

对于成像过程仿真模型, Li 等<sup>[5]</sup>假设到达成像设备的辐射满足普朗克定律,提出了考虑图像模糊效果,噪声效果和光晕效果的仿真模型。高伟等<sup>[15]</sup>通过对设备多种噪声因素的分析,提出白噪声贴图混合仿真模型,并从像素层面提出了卷积和图像模糊仿真模型。

在具体场景的仿真应用上, Pined 等<sup>[16]</sup>对海面以及海面上油层进行红外仿真; Salvaggio<sup>[17]</sup>对土壤进行红外仿真; Chen 等<sup>[18]</sup>和 Ma 等<sup>[19]</sup>分别对海面战舰进行红外仿真; Hinderer<sup>[20]</sup>和 Li 等<sup>[21]</sup>对战场交通工具进行红外仿真; Dai 等<sup>[22]</sup>对陆地场景进行红外仿真。

综上所述,国内外对红外成像仿真领域的研究具有多年的历史,研究方法较为成熟,但大多数的仿真成果仍旧停留在简单场景对象的仿真,对于集成式的,具有良好的交互效果的红外视景仿真系统涉及较少。

### 1.3 本文的主要贡献与创新

本文通过对前人提出的算法模型的总结分析,结合当下流行的 Unity3D 游戏引擎和 GPU 的并行开发语言 Cg,设计了一套在统一计算框架下可以实现多种目标对象转变为红外场景模型的红外场景渲染系统,主要的工作总结如下:

1. 通过对影响温度场的主要计算模型的分析,更正前人使用的经验模拟公式,

在不影响系统仿真帧率的基础上，换以更加精确的理论推导公式，如太阳赤纬角的计算公式。因为对于自然红外场景仿真而言，太阳辐射的计算起到决定性的作用，故此，在太阳高度等方面的计算精确性对结果的影响较大。

2. 基于 Unity3D 提出了新的红外仿真算法，使得任意物体对象能够在系统中反映自身的特性，包括内在物理特性或外在关系等因素，如内在物理材质参数和外在相对位置关系等，并保证系统的仿真帧率保持在 30 帧以上。
3. 根据场景模型表面材质属性和内部热源属性，利用 GPU 并行加速能力快速求解受热源影响的表面温度场分布，并对求解结果进行保存，节约大量的计算资源，使得系统的运行效率更加高效。
4. 在海面红外仿真上，考虑船体的运动对海面的影响，通过求解开尔文尾迹积分模型，求解海面高度场的变化，并由此提出了船行尾迹的红外效果仿真模型，提升了海面红外仿真的真实感。

## 1.4 论文组织结构

本文内容的组织结构如下：

第一章 绪论：该章节对本文研究内容的背景知识进行阐述，从而说明本文研究内容的意义和重要性。并对国内外相关领域研究工作的进展和成果进行概述，从而点出本文的主要工作和贡献。

第二章 红外基础物理和数学模型的研究：该章节从红外辐射基础知识出发，从表面温度场热平衡方程的推导，零视距离辐射模型，大气传输模型和设备成像仿真模型等四个方面对系统的设计的背景理论进行归纳总结。

第三章 系统相关技术点概述分析：该章节从 Unity3D 游戏引擎的功能层面出发，从系统的功能模块和渲染模块概述系统的技术要点，并给出系统的性能分析。

第四章 仿真结果的对比验证：该章节通过实地的数据采集与系统的仿真结果进行真实感的对比分析，阐明系统的可信度。

第五章 总结和展望：该章节对本文的工作进行总结，对其中存在的不足和值得深入研究的地方进行了探讨分析。

## 第二章 红外基础物理和数学模型的研究

### 2.1 引言

在日常肉眼所见的物体，大多是通过反射外界可见光电磁波段，不受自身的物理性质，如密度和比热等因素的影响。但物体表面的红外电磁波不仅来自对周围电磁波的反射，同时，自身也在释放红外电磁波，而自身对外辐射的电磁波受到物体自身和周围环境多方面因素的影响。本章节对其中主要的影响因素进行较为详细的分析，从而阐明红外仿真过程中涉及到的物理计算模型以及相关的仿真算法和数学模型。

### 2.2 理论背景

该节简要概述红外仿真过程中涉及到的红外物理学知识。

#### 2.2.1 辐射的基本概念

辐射通常是指场源中的部分电磁能量以电磁波的形式离开场源向远处传播的现象。辐射方向包括辐射源外界的所有方向，在不受干扰的情况下沿直线传播，并且辐射的作用是相互的，即甲物体对乙物体辐射能量，同时乙物体也向甲物体辐射能量。热辐射是辐射的一种，是物体传递热能的一种方式，物体释放和接收的热辐射之差是物体传递到外界的净辐射，该大小与物体的温度成正相关，即温度越高辐射到外界的热能越大，反之越小。

#### 2.2.2 红外辐射规律

对于温度高于绝对零度的物体，都能够释放热辐射和吸收热辐射。理论上，物体热辐射的电磁波段可以包括整个电磁波段，但对于生活中普遍的物体温度范围，电磁辐射的能量大部分集中在红外电磁波段，而根据其在大气中的通透性的不同，又分为短波红外辐射，中波红外辐射和长波红外辐射。

和可见光类似，物体表面对红外辐射具有三种表现形式，分别为吸收、反射和透过，与此对应着物体对于辐射的三个属性系数：吸收系数  $\alpha$ 、反射系数  $\beta$  和透过系数  $\gamma$ ，根据能量守恒可以推出， $\alpha + \beta + \gamma = 1$ 。但大多数物体表面不具有

透过性, 即 $\gamma = 0$ , 所以对于不透明物体又可写成 $\alpha + \beta = 1$ 。当时 $\alpha = 1$ , 物体对外界辐射全部吸收, 这样的物体称为黑体; 当 $\beta = 1$ 时, 物体对外界的辐射全部反射, 这样的物体称为白体; 当 $\gamma = 1$ 时, 物体对外界的辐射全部透过, 这样的物体称为透明体, 但在自然界中, 这样绝对的物体是不存在的, 对于绝大多数不透明体而言, 其是介于白体和黑体之间的灰体。

### 2.2.3 黑体辐射

黑体能将外来的所有辐射全部吸收, 同时也能向外界辐射电磁波, 黑体辐射规律主要有斯蒂芬·波尔兹曼定律和普朗克定律

#### 2.2.3.1 斯蒂芬·波尔兹曼定律

黑体在单位时间内, 由单位表面积向半球空间辐射全波段的电磁波的能量称为黑体的全辐射力, 用符号 $E_b$ 表示, 单位是 $w/m^2$ 。斯蒂芬·波尔兹曼定律表明黑体的全辐射力和它的绝对温度的四次方成正比, 数学公式如式(2.1)<sup>[23]</sup>所示。

$$E_b = C_b \left( \frac{T_b}{100} \right)^4 \quad (2.1)$$

$E_b$ ——黑体全辐射力,  $w/m^2$

$C_b$ ——黑体的辐射系数, 为常数值 $5.68 w/(m^2 \cdot k^4)$

$T_b$ ——黑体表面的绝对温度,  $k$

#### 2.2.3.2 普朗克定律

普朗克定律表明黑体的单色辐射力的最大值随着黑体温度的升高向波长较短的方向偏移, 即黑体的温度越高, 最大辐射力的波长越短, 并揭示了黑体的单色辐射力与黑体绝对温度以及波长之间的关系, 具体数学表达式如式(2.2)<sup>[23]</sup>所示。

$$E_{b\lambda} = \frac{C_1 \lambda^{-5}}{e^{\frac{C_2}{\lambda T}} - 1} \quad (2.2)$$

$E_{b\lambda}$ ——黑体单色辐射力, 即黑体在波长为 $\lambda$ 的领域内所辐射的能量,  $w/m^2$

$C_1$ ——普朗克常数, 分别为 $3.743 \times 10^{-16} w/m^2$

$C_2$ ——普朗克常数, 分别为 $1.4387 \times 10^{-16} w/m^2$

$\lambda$ ——波长,  $m$

$T$ ——黑体绝对温度,  $k$

灰体的辐射规律和黑体近似,但是,在同温条件下,单色辐射力低于黑体。故此,在计算灰体辐射的时候,先计算出该条件下的黑体辐射力。在此基础上乘以灰体的黑度,又称为灰体的发射率,取值区间是0到1,白体为0黑体为1,用 $\varepsilon$ 表示。

## 2.2.4 傅立叶定律

傅立叶定律是热传导的基础,它不是由热力学第一定律推导得出的数学公式,而是基于实验结果的归纳总结得出的经验公式,适用于所有物质,不管它处于什么状态(固态、液态或气态),其主要内容为:在单位时间的导热过程中,通过给定截面的热量,和截面面积以及该截面法向上的温度变化率成正比,传递方向为温度升高的反方向。式(2.3)<sup>[24]</sup>为一维傅里叶定律的数学表达式。

$$J_T = -\kappa \frac{dT}{dx} \quad (2.3)$$

$J_T$ ——热流密度,  $w/m^2$

$T$ ——绝对温度,  $k$

$x$ ——距离,  $m$

$\kappa$ ——热导率,  $w \cdot m^{-1} \cdot k^{-1}$

一维傅里叶定律也可表示为导热速率的形式,如式(2.4)<sup>[24]</sup>所示。

$$\dot{Q} = -\kappa \frac{dT}{dx} A \quad (2.4)$$

$\dot{Q}$ ——导热速率,  $w$

$A$ ——传热面积,  $m^2$

三维傅里叶定律的热流密度形式,如式(2.5)<sup>[24]</sup>所示。

$$\vec{Q} = -\kappa \left( \vec{i} \frac{\partial T}{\partial x} + \vec{j} \frac{\partial T}{\partial y} + \vec{k} \frac{\partial T}{\partial z} \right) \quad (2.5)$$

## 2.3 零视距离辐射计算模型

物体表面的零视距离辐射主要包括两个方面:自身辐射和反射辐射。本节分别阐述这两个方面所涉及到的物理计算模型以及热平衡方程的求解。

### 2.3.1 自身辐射

物体表面的辐射主要以自身辐射为主,由2.2.3.2中对普朗克定律的描述可知,

普朗克定律揭示了辐射能量与电磁波长以及温度之间的关系，由此，通过在给定温度下，对普朗克公式关于给定的波段区间进行积分即可得到某波段的辐射强度，表述形式如式(2.6)所示。

$$[E_b]_{\lambda_1}^{\lambda_2} = \varepsilon \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \frac{c_1 \lambda^{-5}}{e^{\frac{c_2}{\lambda T}} - 1} d\lambda \quad (2.6)$$

$[E_b]_{\lambda_1}^{\lambda_2}$ 表示波波段为 $\lambda_1$ 到 $\lambda_2$ 的电磁波的辐射力

由于积分的计算比较消耗时间，故此，本文采用等效的近似公式，其形式如式(2.7)<sup>[25]</sup>所示。

$$[E_b]_{\lambda_1}^{\lambda_2} = \left[ \varepsilon \frac{c_1}{c_2} e^{-\frac{c_2 \lambda}{T}} \left( \lambda^3 + \frac{3}{c_2} \left( \lambda^2 + \frac{2}{c_2} \left( \lambda + \frac{1}{c_2} \right) \right) \right) \right]_{\lambda=\frac{1}{\lambda_1}}^{\lambda=\frac{1}{\lambda_2}} \quad (2.7)$$

由式即可通过物体表面的温度求解其表面的辐射力，所以，在求解自身辐射的时候，关键是准确求解模型的表面温度。影响物体表面温度主要有三个方面，辐射换热，对流换热和导热换热。

### 2.3.1.1 辐射换热

辐射换热即高温物体通过辐射作用，将能量传递给相对低温物体，自然界中，主要的辐射是太阳对地球的辐射，主要分为太阳直接辐射和大气造成的太阳散射辐射，由日地距离较远，所以通常将太阳垂直辐射大气表面的辐射力视为定值，称为太阳辐射常数，用 $I_0$ 表示，其数值为 $1353 \text{ w/m}^2$ ，地表平面所接收的太阳直接辐射力计算公式如式(2.8)<sup>[26]</sup>所示。

$$I_d = \left( 1 + 0.034 \left( \cos \frac{2\pi n}{365.2422} \right) \right) I_0 P^{\frac{1}{\sin h}} \quad (2.8)$$

$h$ ——太阳高度角

$n$ ——日期在一年天数中的序号

$P$ ——大气透过率

$\rho$ ——辐射吸收率

太阳高度角的计算公式如式(2.9)所示。

$$h = \sin^{-1}(\sin \varphi \sin \delta + \cos \varphi \csc \delta \cos \tau) \quad (2.9)$$

$\varphi$ ——地理纬度

$\delta$ ——赤纬角

$\tau$ ——时角

时角的计算公式如式(2.10)所示。

$$\tau = 15 \left( t_0 + \frac{\phi - \phi_0}{15} - 12 \right) \quad (2.10)$$

$\phi$ ——地理经度

$t_0$ ——北京时间, h

在多数文献资料中在计算赤纬角时均采用近似公式, 如式(2.11)<sup>[26]</sup>所示。

$$\delta = 23.45 \sin \left( 360 \frac{284+n}{360} \right) \quad (2.11)$$

由于该公式是简单的利用三角函数的周期性近似太阳直射点在南北回归线偏移的周期性, 误差较大。通过几何分析, 本文给出了更为准确的理论计算模型及其推导过程。

根据相对运动的规律, 地球绕太阳的圆周运动可以视为以地球为圆心, 太阳绕地球的圆周运动。赤道面和太阳运动轨迹的交点分别为春秋分点, 轨迹示意图如图 2-1 左图所示。太阳绕地的轨迹圆为圆弧AS所在的圆, 太阳绕地的公转周期与地球绕日的公转周期相同, 假设太阳绕地球做匀速圆周运动, 单位时间经过的圆周角为 $\theta$ , 以A为参考点, 太阳单位时间后运动到点S。

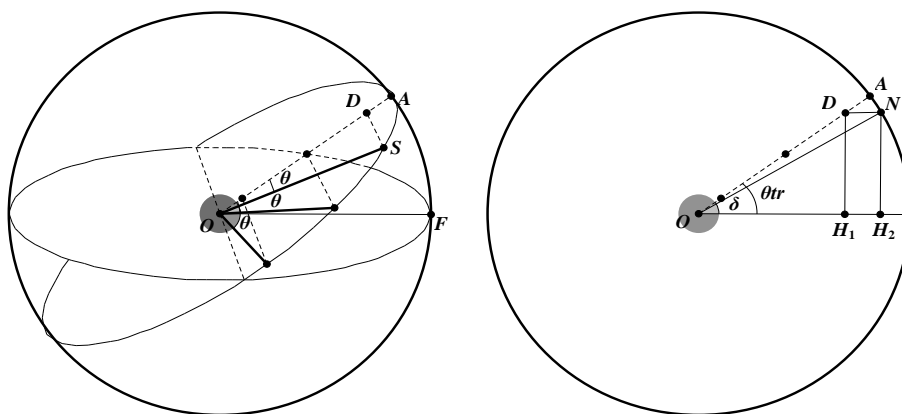


图 2-1 太阳运动轨迹示意图

图 2-1 右图是左图在平面DOF上的剖面图:  $\theta_{tr}$ 为黄赤交角, 大小为 $23^{\circ}26'$ , OA长为R。图 2-1 左图中SD垂直OA, 根据几何知识可知

$$OD = R \cos \theta \quad (2.12)$$



图 2-1 右图中四边形  $DNH_2H_1$  为矩形，可知太阳直射点的纬度高度为  $NH_2$ ，则  $\delta$  是赤纬角，由此知

$$OD = \frac{DH_1}{\sin \theta_{tr}} = \frac{R \sin \delta}{\sin \theta_{tr}} = R \cos \theta \quad (2.13)$$

根据式(2.13)可得

$$\sin \delta = \cos \theta \cdot \sin \theta_{tr} \quad (2.14)$$

假设累计日数零点是 2017 年 1 月 1 日，2017 年春分日是 3 月 20 日，该日的累计日数为 78 天。由图 2-1 可知春分时  $\delta = 0^\circ$ ，由此可推算出赤纬角的计算式为

$$\delta = \sin^{-1} \left( \sin \theta_{tr} \sin \left[ \frac{360}{365.2422} (N - 79) \right] \right) \quad (2.15)$$

地球表面受到太阳的散射辐射力计算公式如式(2.16)<sup>[26]</sup>所示。

$$I_{sc} = \frac{1}{2} I_0 \sin h \frac{1 - P \sin h}{1 - 1.4 \ln P} \quad (2.16)$$

同时，由于气球大气层的存在，自然环境中还存在大气辐射，正是因为大气辐射的存在，使得大气环境相对比较稳定，昼夜温差相对较小。大气辐射的计算公式，如式(2.17)<sup>[25]</sup>所示。

$$I_s = C_b \left( \frac{T_e}{100} \right)^4 (0.51 + 0.208 \sqrt{0.461 T_e f}) \quad (2.17)$$

$T_e$ ——外界环境温度， $k$

$f$ ——空气绝对湿度， $g/m^2$

对于场景中高温物体向相对低温物体辐射的净辐射力，在不考虑反射的情况下，计算公式如式(2.18)<sup>[27]</sup>所示。

$$E_{b1-2} = \left( \varepsilon_1 C_b \left( \frac{T_1}{100} \right)^4 - \varepsilon_2 C_b \left( \frac{T_2}{100} \right)^4 \right) \Psi \quad (2.18)$$

$\Psi$ ——角系数，表面正对为 1，表面垂直为 0

### 2.3.1.2 对流换热

对流换热主要分为自然对流和受迫对流，前者是因为温度不同导致密度差异，从而产生压力差导致，后者则是外力作用产生的对流，如风的作用。物体表面的热交换计算公式如式(2.19)<sup>[27]</sup>所示。

$$q_{cv} = a(T_p - T_a) \quad (2.19)$$

$T_p$ ——物体表面温度， $k$

$T_a$ ——气温恒定区空气温度， $k$

$a$ ——对流换热系数

$q_{cv}$ ——单为面积热交换功率 $w/m^2$

热交换系数受多种因素的影响，其计算公式是由数理统计的方法推导出来的，自然对流和受迫对流的计算公式各不相同，情况各异。主要有以下几种情况。

自然对流垂直表面热交换系数计算公式如式(2.20)<sup>[27]</sup>所示。

$$a = 1.98^4 \sqrt{T_p - T_a} \quad (2.20)$$

自然对流水平表面，当热流由下而上时的热交换系数计算公式如式(2.21)<sup>[27]</sup>所示。

$$a = 2.5^4 \sqrt{T_p - T_a} \quad (2.21)$$

自然对流水平表面，当热流由上而下时的热交换系数计算公式如式(2.22)<sup>[27]</sup>所示。

$$a = 1.31^4 \sqrt{T_p - T_a} \quad (2.22)$$

受迫对流内表面热交换系数计算公式如式(2.23)<sup>[27]</sup>所示。

$$a = 2.5 + 4.2V \quad (2.23)$$

受迫对流外表面热交换系数计算公式如式(2.24)<sup>[27]</sup>所示。

$$a = (2.5 \sim 6) + 4.2V \quad (2.24)$$

$V$ ——风速， $m/s$

自然环境中，对于风级和风速的对应关系表如表 2-1<sup>[27]</sup>所示：

表 2 - 1 风速对照表

风级	名称	风速 ( $m/s$ )
0	无风	0-0.2
1	软风	0.2-1.5
2	轻风	1.5-3.3
3	微风	3.4-5.4
4	和风	5.5-7.9
5	清风	8.0-10.7
6	强风	10.8-13.8
7	疾风	13.9-17.1

表 2 - 2 风速对照表（续）

风级	名称	风速 (m/s)
8	大风	17.2-20.7
9	烈风	20.8-24.4
10	狂风	24.5-28.4
11	暴风	28.5-32.6
12	飓风	>32.7

### 2.3.1.3 导热换热

对于某一时间间隔内，同一区域的物体表面，温度差异较小，可近似认为相等，所以对于物体表面，我们可以将其视为是一维稳态导热，即只有物体表面与物体内部存在温差，热流从物体表面流入物体内部，该一维稳态导热的计算公式如式(2.25)<sup>[27]</sup>所示。

$$q_{cd} = \epsilon \frac{T_p - T_i}{d} \quad (2.25)$$

$T_p$ ——物体表面温度， $k$

$T_i$ ——物体内部温度， $k$

$\epsilon$ ——导热系数， $w/m \cdot k$

$d$ ——物体材质厚度， $m$

$q_{cd}$ ——单为面积热交换功率 $w/m^2$

### 2.3.2 反射辐射

当周围环境的辐射到达物体表面的时候，部分辐射被吸收，另一部分被物体表面反射，而这反射的部分辐射同样对物体辐射成像造成影响。对于自然环境中，物体表面反射的辐射主要源自大气辐射和太阳辐射，由 2.2.2 节关于反射率和吸收率的概述可知，反射辐射数学表达式如下式(2.26)所示。

$$I_r = (1 - \epsilon)(I_d + I_{sc} + I_s) \quad (2.26)$$

### 2.3.3 热平衡方程

#### 2.3.3.1 平衡方程的推导

自然环境中，物体通过辐射作用从外界吸收热量，同时，也向外界释放热量，通过对流换热向空气中释放或吸收热量，并通过导热换热与物体自身其他部分或者直接接触的外界物体释放或吸收热量，当物体表面释放的热量和吸收的热量相等的时候，物体表面达到热平衡，温度不再上升或者下降，由此可得出物体表面的热平衡方程如式(2.27)所示。

$$\Delta q = \varepsilon(I_d + I_{sc} + I_s) - q_{cd} - q_{cv} - q_{air} \quad (2.27)$$

$q_{air}$ ——物体辐射到空气中的辐射力， $w/m^2$

$\Delta q$ ——物体表面接收的净辐射力

### 2.3.3.2 平衡方程的求解

物体通常是具有一定厚度的实体，求解表面温度场分布的过程中，其自身的厚度对其表面具有直接影响作用，所以，本文在求解表面温度场时，将物体视为多层分布的实体，在各层间，视为一维方向上的传热过程，由傅里叶定律可知，在一维方向上导入的热量为：

$$\Phi_1 = -\kappa \frac{\partial T(t,x)}{\partial x} A \quad (2.28)$$

导出的热量为：

$$\Phi_2 = -\kappa \frac{\partial}{\partial x} \left( T(t,x) + \frac{\partial T(t,x)}{\partial x} \Delta x \right) A \quad (2.29)$$

热量的增量为：

$$\Delta \Phi = C\rho \frac{\partial T(t,x)}{\partial t} \Delta x A = \Phi_2 - \Phi_1 \quad (2.30)$$

$C$ ——物体材质比热容， $J/(kg \cdot k)$

$\rho$ ——物体材质密度， $kg/m^3$

结合式可得一维方向传热的微分方程

$$\frac{\partial T(t,x)}{\partial t} = \frac{\kappa}{C\rho} \frac{\partial^2 T(t,x)}{\partial x^2} \quad (2.31)$$

通过有限差分法，式又可转变为利于计算机求解的离散形式，如式(2.32)所示。

$$\frac{T(t+\Delta t,x) - T(t,x)}{\Delta t} = \frac{\kappa}{C\rho} \frac{(T(t,x+\Delta x) + T(t,x-\Delta x) - 2T(t,x))}{\Delta x^2} \quad (2.32)$$

通过对一维传热微分方程的离散公式进行迭代计算，可以求解出物体表面以及内部的温度分布。

## 2.4 大气传输模型

红外仿真过程中，大气透过率是重要的影响因素，因为，需要较为准确的计算模型计算大气透过率，但由于大气的复杂环境，并没有准确的可套用的数学公式，因此，采用美国军方的 MODTRAN 大气传输模型。

通过 MODTRAN 软件计算出多种天气条件下的不同高度和角度下的大气透过率数值，在系统运行时，将这些数值读入到内存，利用线性插值模型进行插值求解不同条件下的大气透过率，从而实现系统的实时和精度需求。部分 MODTRAN 计算得到的大气透过率值如表 2-2 所示。

表 2-3 MODTRAN 不同条件下大气透过率计算值表

降雨量	海拔	角度	波长	大气透过率
<b>0mm/hr</b>	30m	135	2um	0.68
<b>2mm/hr</b>	30m	135	2um	0.32
<b>5mm/hr</b>	30m	135	2um	0.18
<b>5mm/hr</b>	30m	135	5um	0.08
<b>0mm/hr</b>	1000m	135	3um	0.75
<b>0mm/hr</b>	10000m	135	3um	0.99
<b>0mm/hr</b>	1000m	180	3um	0.82

本文考虑的是中波红外辐射，由表可知，对于不同的波长，MODTRAN 计算得到的透过率是不一样的，以晴朗天气条件下，视角 135 度，海拔高度为 50m 的条件下计算得到的电磁波的大气透过率分布图如图 2-2 所示。

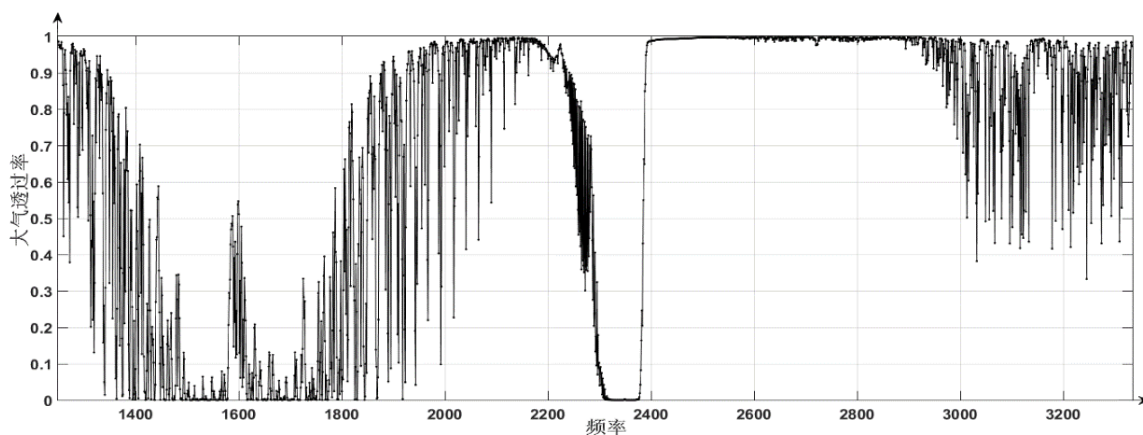


图 2-2 光波频率大气透过率分布图

## 2.5 设备仿真模型

红外成像除受表面材质属性和周围环境影响外，在最终成像的时候还受到成像设备的影响，导致成像结果存在噪点以及城乡模糊。所以在红外仿真过程中，对设备影响效果的仿真会对最终仿真结果的真实性和重要性有重要意义。本节将详细介绍红外仿真过程中的设备仿真模型。

### 2.5.1 成像模糊模型

红外成像由于受到设备多种因素的影响，导致最终成像结果的精度受到影响，使得最终成像图片具有模糊效果。为了实现红外仿真的模糊效果，系统采用邻近像素灰度值混合算法进行成像的模糊处理。总体流程如图 2-3 所示：

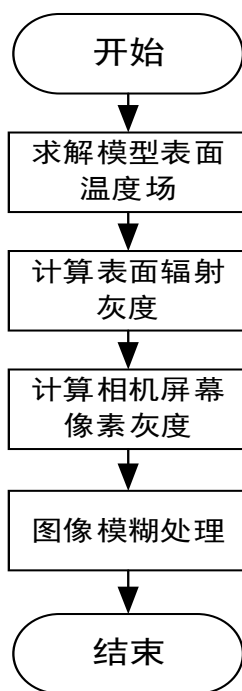


图 2-3 模糊效果总体流程图

通过求解热平衡方程得到模型表面温度场的分布，并求得最终辐射灰度图后，对所得的灰度图进行求卷积和操作，卷积因子为：

$$kernel = \begin{bmatrix} \frac{1}{9} & \frac{1}{9} & \frac{1}{9} \\ \frac{1}{9} & \frac{1}{9} & \frac{1}{9} \\ \frac{1}{9} & \frac{1}{9} & \frac{1}{9} \end{bmatrix} \quad (2.33)$$

经过求卷积和操作后的数据作为图片最终的颜色数据。通过该仿真模型得到的模糊效果如图 2-4 所示。



图 2 - 4 模糊效果图

### 2.5.2 成像噪声模型

红外成像图片常常存在噪点，高伟<sup>[15]</sup>通过对噪点产生原因的分析，得出主要的影响因素是白噪声的结论。本系统采用贴图采样混合的算法实现噪声的仿真，具体算法流程如图 2-5 所示。

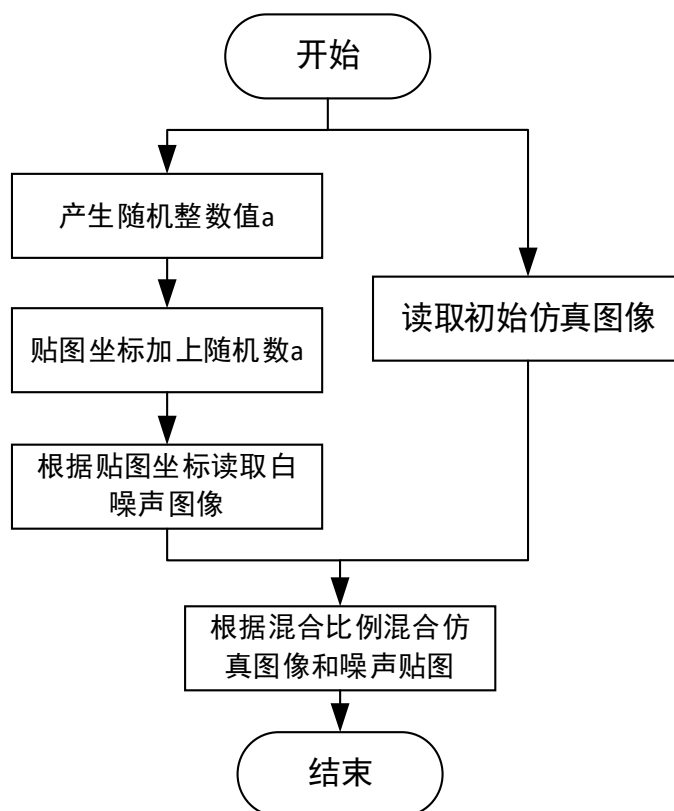


图 2 - 5 噪声算法流程图

系统采用的白噪声贴图如图 2-6 所示。

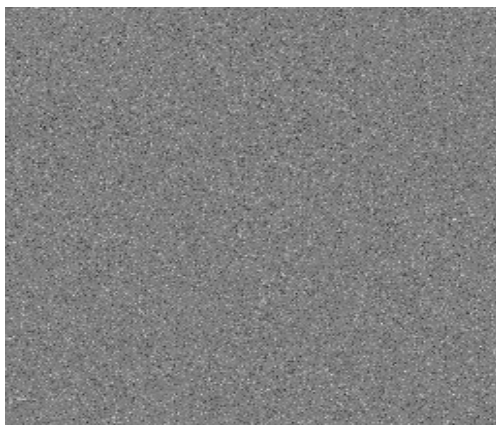


图 2 - 6 白噪声贴图

通过将模糊处理后的成像图片与该噪声贴图进行灰度混合，通过调节混合的比例控制噪声的剧烈程度，得到的噪声效果如图 2-7 所示。



图 2 - 7 噪声效果图

## 2.6 海洋仿真模型

海洋的仿真涉及到海洋表面运动以及海面运动造成的海面的浪花效果，同时为了增强海面的真实感，还需要考虑海面的反射和折射效果，以及海面目标运动对海面波形的影响，本节通过具体的数学模型和算法流程详细介绍海洋的仿真模型。

### 2.6.1 海面波形仿真

海面波形是海面最主要的特征，海面波形的仿真主要分为两个方面，几何波



和纹理波，几何波决定波的总体运动，而纹理波则决定波形的扰动，用于增强仿真的真实感，对于几何波，本文采用 Gerstner 波函数，如式(2.34)<sup>[28]</sup>所示。

$$\mathbf{P}(x, y, t) = \begin{cases} x + \sum(G_i A_i \times \mathbf{D}_i \cdot x \times \cos(\omega_i \mathbf{D}_i \cdot (x, y) + \zeta_i t)) \\ y + \sum(G_i A_i \times \mathbf{D}_i \cdot y \times \cos(\omega_i \mathbf{D}_i \cdot (x, y) + \zeta_i t)) \\ \sum(A_i \cos(\omega_i \mathbf{D}_i \cdot (x, y) + \zeta_i t)) \end{cases} \quad (2.34)$$

$\mathbf{P}(x, y, t)$ ——世界坐标为 $(x, y)$ 的网格点在 $t$ 时刻的三维世界坐标

$G_i$ ——第  $i$  个波函数陡峭系数， $G_i = 0$ ，普通正弦波， $G_i = \frac{1}{\omega_i A_i}$ ，波峰尖锐

$A_i$ ——第  $i$  个波函数振幅

$\omega_i$ ——第  $i$  个波函数角频率

$\mathbf{D}_i$ ——方向常量，决定波的运动方向

$\zeta_i$ —— $t = 1$ 时刻的位相

对于纹理波，我们不关心高度函数，只需要构建法向图即可，对于法向，我们需要计算出贴图坐标为 $(u, v)$ 的像素点切向和副法向，通过二者的叉乘得到法向，为了表示方便，以几何波的法向计算为例，本文将式中的第一项用 $X(x, y, t)$ 表示，第二项用 $Y(x, y, t)$ 表示，第三项用 $H(x, y, t)$ 表示，则切向的计算公式如式(2.35)<sup>[28]</sup>所示。

$$\mathbf{T}(x, y, t) = \begin{cases} \frac{\partial X(x, y, t)}{\partial y} \\ \frac{\partial Y(x, y, t)}{\partial y} \\ \frac{\partial H(x, y, t)}{\partial y} \end{cases} \quad (2.35)$$

副法向的计算公式如式(2.36)所示。

$$\mathbf{B}(x, y, t) = \begin{cases} \frac{\partial X(x, y, t)}{\partial x} \\ \frac{\partial Y(x, y, t)}{\partial x} \\ \frac{\partial H(x, y, t)}{\partial x} \end{cases} \quad (2.36)$$

由式可计算法向，如式(2.37)所示。

$$\mathbf{N}(x, y, t) = \mathbf{B}(x, y, t) \times \mathbf{T}(x, y, t) \quad (2.37)$$

在计算几何波的法向时，只需要将  $x$  替换为纹理坐标  $u$ ， $y$  替换为纹理坐标  $v$  即可，但是需要注意的是，当波长接近四个纹素时，波形会退化成锯齿状图案，故此，最小波长应大于四个纹素。由此仿真得到的海面波形如图 2-8 所示。

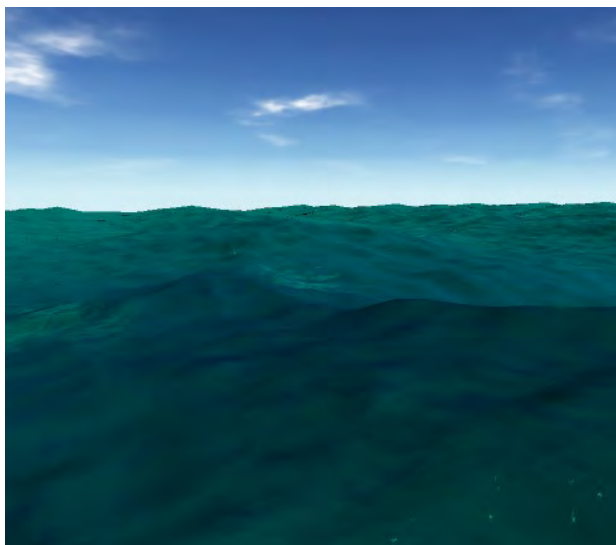


图 2 - 8 海面波形图

### 2.6.2 海面折射和反射的仿真

海面的折射和反射对海面的仿真效果影响较大，对于折射效果的仿真，算法流程如图 2-9 所示。

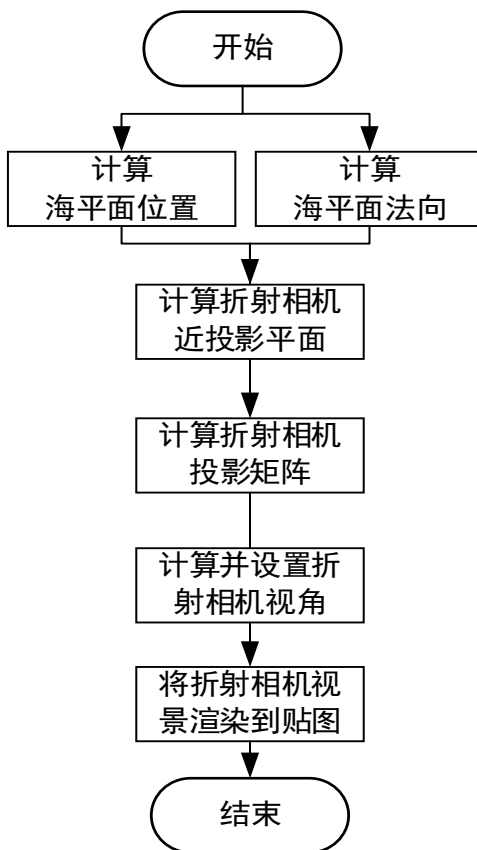


图 2 - 9 海面折射算法流程图

海水的折射率为 1.34，由此根据当前相机俯视角计算出光线的折射角，由此调整折射相机的俯视角，计算出海平面在折射相机空间的法向和偏移值，进而将该平面设置为相机的近投影面，并将相机的观察到的视图保存到贴图，在渲染海面的 shader 中，计算出海面顶点坐标的折射相机屏幕坐标，作为折射贴图的 uv 坐标进而读取贴图的颜色值，以实现海面的折射效果。

对于反射效果仿真的算法与折射仿真算法类似，但区别也比较明显，算法流程如图 2-10 所示。

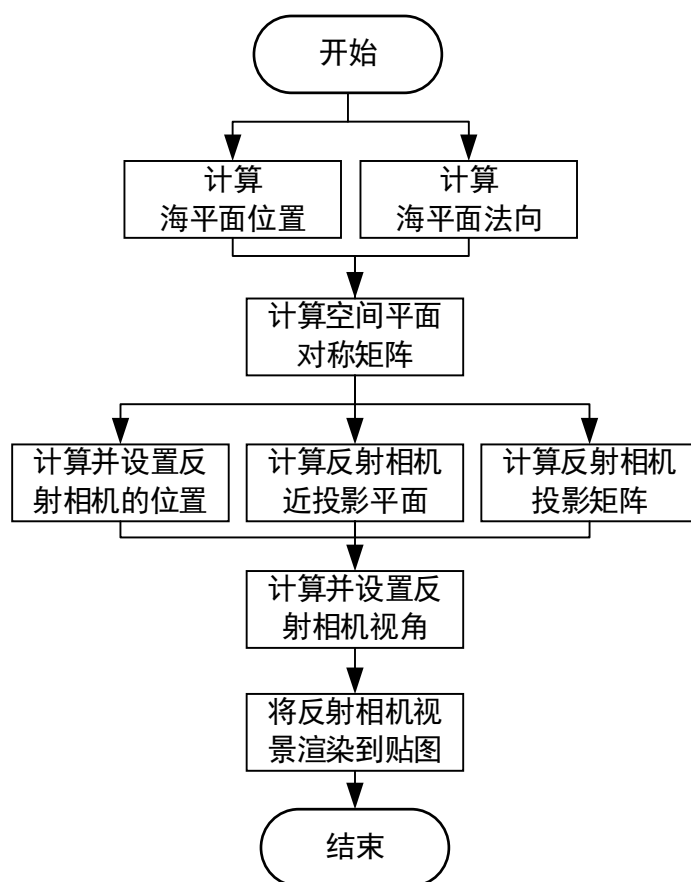


图 2 - 10 海面反射算法流程图

根据当前相机的位置，以及海平面的法向 $(x, y, z)$ 和偏移值 $d$ ，构建空间平面对称矩阵，如式(2.38)所示。

$$\text{RefMat} = \begin{bmatrix} 1 - 2x^2 & -2xy & -2zx & -2xd \\ -2xy & 1 - 2y^2 & -2zy & -2yd \\ -2xz & -2yz & 1 - 2z^2 & -2zd \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.38)$$

计算出相机关于海平面对称位置的反射相机位置，在得到反射相机的位置后，与折射相机类似，将海平面作为反射相机的近投影面，并生成反射贴图，通过读取

反射贴图的颜色值，计算出菲涅尔系数，作为反射贴图和折射贴图的插值系数，进而计算出插值后的颜色值，与海面颜色进行混合，从而得到海面的反射和折射效果，如图 2-11 所示。

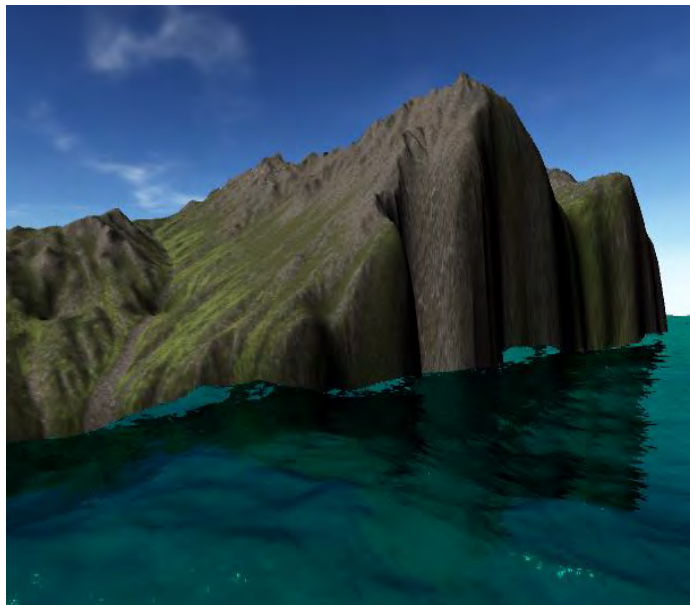


图 2 - 11 海面反射折射效果图

### 2.6.3 海面浪花仿真

海面的浪花效果仿真可以采用粒子仿真方法，但是该方法对系统的性能影响较大，为了不影响系统性能，尽量保证系统帧率，本文采用贴图的方法，通过将海浪贴图平铺在海面进而仿真浪花效果。

在海洋场景中，浪花通常是在波浪起伏的时候产生，而且大多出现在海浪顶部，平静的海面通常是不会有浪花的，在 2.6.1 节中介绍了海面几何波的法向计算方法，几何波斜率越大，法向与水平面的倾角越小，余弦值也就越大，因此，可以利用该余弦值来控制浪花贴图在海面出现的位置，具体流程如图所示：

在得到余弦值时进行判断，当余弦值超过确定的阈值的时候，将传入 GPU 中的位置向量的 w 通道值设置为 1，反之，设置为 0，并将该值作为浪花贴图的混合系数，由此，在海浪波的斜率超过一定范围的时候，海面就会出现浪花，而在其他较为平缓的区域则没有浪花效果，通常为了增强浪花仿真的效果，还会增加贴图做淡入淡出效果以及考虑海面的运动方向，仿真效果如图 2-12 所示。

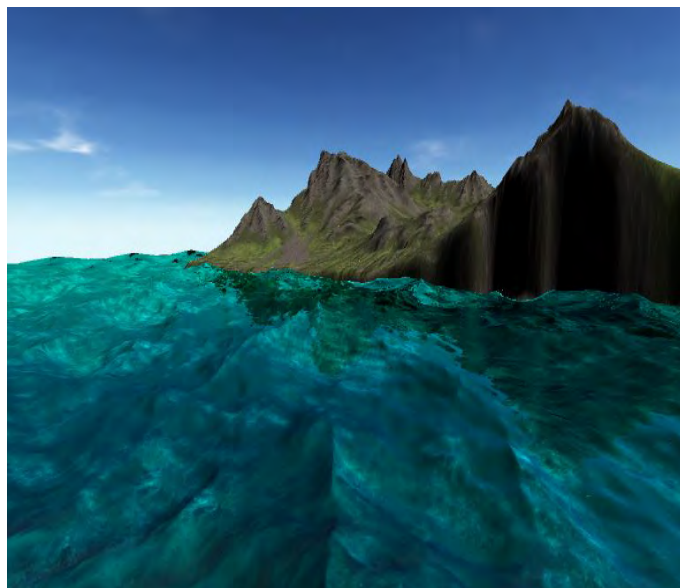


图 2 - 12 海面浪花效果图

#### 2.6.4 开尔文尾迹仿真

通过求解 Kelvin 尾迹积分方程, 计算船的运动造成的海面高度差的变化分布, 由此叠加上海面高度场的大小, 从而实现海面的开尔文尾迹效果, Kelvin 尾迹积分方程公式如式 (2.39)<sup>[29]</sup> 所示。

$$H(x, y) = \frac{4b}{\pi kl} \int_{-\frac{\pi}{2}}^{\frac{\pi}{2}} \left( (1 - e^{-kD(\sec \theta)^2}) \times \sin(k(\sec \theta)^2(x \cos \theta + y \sin \theta)) \right) d\theta \quad (2.39)$$

$H(x, y)$ ——顶点坐标为  $(x, y)$  的海面网格点高度场变化量,  $m$

$k$ ——值为  $\frac{g}{v^2}$ ,  $g$  为重力加速度,  $v$  为船的行驶速度,  $m/s$

$D$ ——船的吃水深度,  $m$

$b$ ——船体宽度的一半,  $m$

$l$ ——船体长度的一半,  $m$

#### 2.7 热源仿真模型

对于车辆、飞机和坦克等具有内部热源（引擎）的目标对象, 除受外界环境的辐射以外, 还受到内部热源的辐射, 从而导致离热源较近的表面在红外成像设备中相比较其他区域灰度更大, 为了模拟该特征, 通常需要遍历模型的网格点, 进而计算出热源对各个网格顶点的辐射值, 但是, 由于模型的网格顶点较多, 该方法的计算量较大, 因此, 本文通过参考实时阴影的绘制技术, 利用贴图的方式

进行热源效果仿真，该方法不仅可以进行实时仿真，同时，还能将热源贴图进行保存，因为引擎的温度通常与外界环境无关，所以，对于保存下来的热源贴图，通常可以直接使用，避免第二次的仿真计算，大大节省性能开销。

### 2.7.1 热源设置

利用贴图的方法进行热源效果仿真时，首先需要进行热源的设置，本文采用立体相机作为热源，即六个视方向互相垂直的相机组成的全景视角相机，如图 2-13 所示。

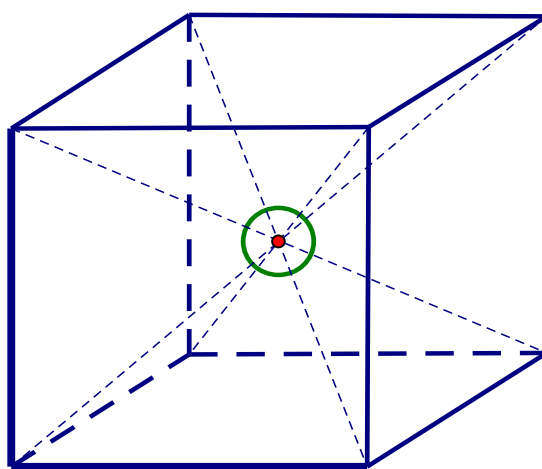


图 2 - 13 立体相机结构示意图

中心是相机的位置，中心与给各个面顶点的连线形成的锥体是该视方向相机的视锥体。通过移动该立体相机，可以任意设置热源在模型内部的位置，操作灵活度较高。

### 2.7.2 效果渲染

通过将该立体相机放入模型内部的适当位置，并将六个相机的视野中的图像渲染到一张纹理图上，根据视野中表面材质的信息计算单位距离处内表面受到的热源辐射，进而通过相机中的深度信息计算出每一个纹素的受到的辐射，最后计算出该材质在热源影响下的灰度增量，并保存到纹理中，利用 Unity3D 中的 ComputerShader 对纹理进行二次计算，计算出受到热源辐射区域对周边纹素的传热灰度，该方法利用了 GPU 的并行计算能力，计算速度较高，ComputerShader 中计算热传递的算法伪代码如算法 2.1 所示。

---

### 算法 2.1 Parallel Heat Transfer Calculation Algorithm

---

**Input:** basic heat source texture *basicTexture*

**Output:** final heat source texture *heatTexture*

- 1: **for** each pixel id *i*
  - 2:     read the left pixel gray degree *a* of current pixel
  - 3:     read the right pixel gray degree *b* of current pixel
  - 4:     read the up pixel gray degree *c* of current pixel
  - 5:     read the down pixel gray degree *d* of current pixel
  - 6:     read current pixel gray degree *k*
  - 7:     calculate the average gray degree *n* of adjacent pixels of current pixel
  - 8:     using *k* and *n* to calculate new gray degree *f* by heat transfer function
  - 9:     set *f* to the value of *heatTexture* in the pixel id *i*
- 

以汽车为例，得到的最终的热源纹理如图 2-14 所示。

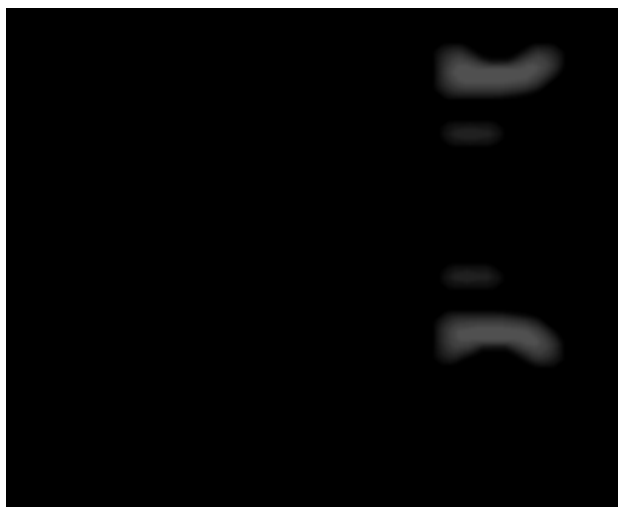


图 2 - 14 仿真热源贴图

通过在片段程序中读取纹理颜色值进行加和，即得到热源的效果，图 2-14 对应的热源仿真效果如图 2-15 所示。



图 2 - 15 热源仿真效果图

## 2.8 本章总结

本章详细介绍了红外仿真成像过程中涉及到的红外物理基础知识，并给出了系统实现过程中相关的数学计算模型和算法流程。



## 第三章 相关技术点概述分析

### 3.1 系统逻辑架构

系统相关的算法逻辑以 Unity3D 游戏引擎作为开发工具进行实现完成，本节通过对系统逻辑架构的概述阐述系统具体实现过程中的设计逻辑和使用的技术以及开发工具。

#### 3.1.1 数据逻辑

本系统的核心模块是对红外灰度数据的求解，存储传输以及绘制，具体的数据逻辑如图 3-1 所示。

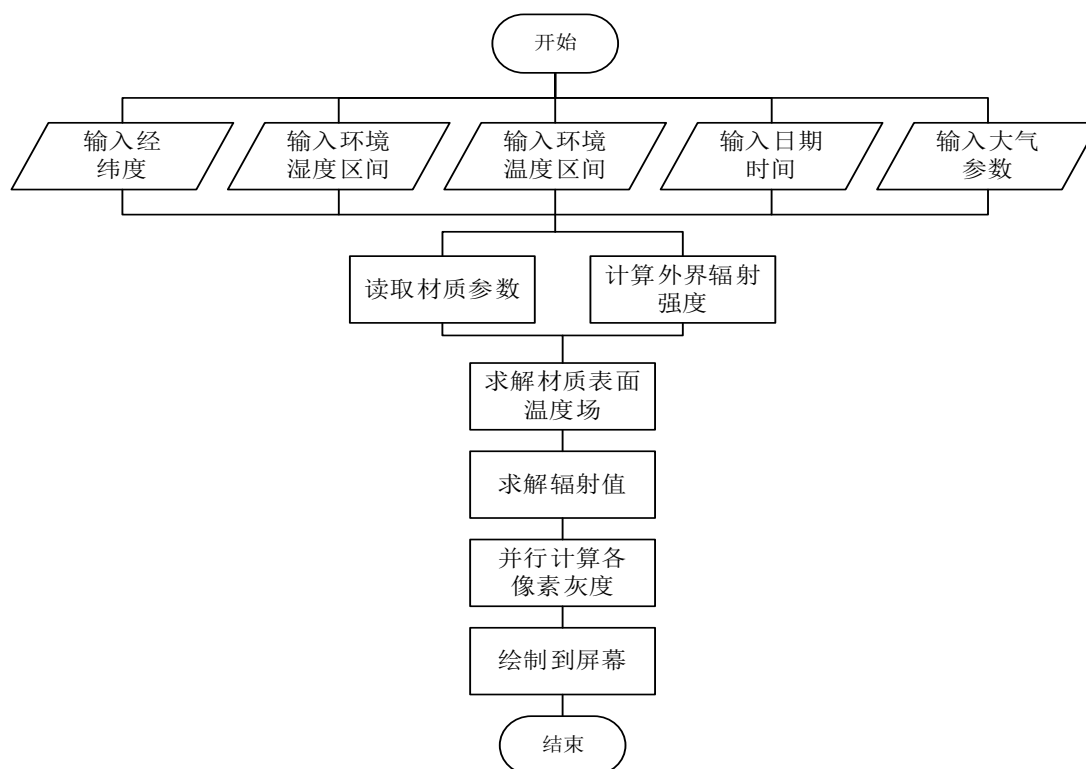


图 3-1 数据逻辑流程图

本系统中计算了常见的多种材质的热辐射属性，如表 3-1<sup>[26]</sup>所示。

表 3-1 红外特性参数表

名称	导热系数 $w/m \cdot k$	比热 $J/(kg \cdot k)$	密度 $kg/m^3$	灰度
纯铁	81.1	455	7870	0.61
纯铝	236	902	2710	0.05

表 3 - 2 红外特性参数表(续)

名称	导热系数 $w/m \cdot k$	比热 $J/(kg \cdot k)$	密度 $kg/m^3$	灰度
钢	49.2	465	7840	0.14
锻铁	73.2	455	7897	0.35
铸铁	39.2	470	7570	0.21
黄金	315	127	19300	0.02
黄铜	111	385	8522	0.03
铬镍钢	15.2	460	7820	0.55
银	427	234	10500	0.01
铅	35.3	128	11340	0.05
镁	156	1020	1730	0.07
铂	71.7	133	21450	0.05
镍	91.4	444	8900	0.05
钨	183	255	9590	0.06
木材	0.17	239	609	0.9
粘土	1.279	880	1457.7	0.91
水	0.599	4200	1000	0.95
雪	0.15	21	200	0.82
冰	2.22	193	913	0.97
混凝土	0.81	880	1930	0.94
大理石	2.7	808	2603	0.93
石棉	0.151	816	469.3	0.96
干砖	0.84	840	1762	0.93

根据时间的变化计算环境温度和湿度，由此结合材质的热辐射属性，求解材质表面的温度场分布。通过对高度和角度的线性插值计算出物体表面辐射与相机之间的大气透过率，由此计算出各材质到达相机位置的理想辐射数据值（不考虑物体表面的倾斜度以及物体表面法相与相机视线方向的夹角，因为场景中不同物体的表面的朝向不一致，甚至相同物体不同表面法向都存在差异，例如曲面，由于 CPU 计算性能的限制以及考虑系统的实时性，无法对场景中所有物体的表面

倾斜角度都进行辐射计算，故此在逻辑功能部分仅计算水平表面的辐射)，通过灰度转化公式将辐射值转化为理想状态灰度，灰度转化公式如式(3.1)所示。

$$gray = \frac{E - E_{min}}{E_{max} - E_{min}} \quad (3.1)$$

$gray$ ——辐射灰度

$E$ ——到达相机的辐射值

$E_{max}$ ——到达相机的最大辐射值

$E_{min}$ ——到达相机的最小辐射值

将各材质的理想状态灰度值传入 GPU，在 GPU 中通过各材质的理想状态灰度，利用 GPU 的并行能力，计算每一个像素位置处模型表面的法相与视线方向的夹角以及模型表面与太阳之间的夹角，计算出模型表面朝向对表面辐射的影响下的辐射灰度，将此灰度作为每一个像素的颜色值输出，并在系统每帧条件下更新计算像素颜色值，从而实现系统的实时性。

### 3.1.2 系统功能概述

系统除提供仿真功能外，同时提供了自然场景的仿真功能，模拟自然环境的日升日落，云层背景的运动。同时提供了用户的交互功能，如图 3-2 所示。

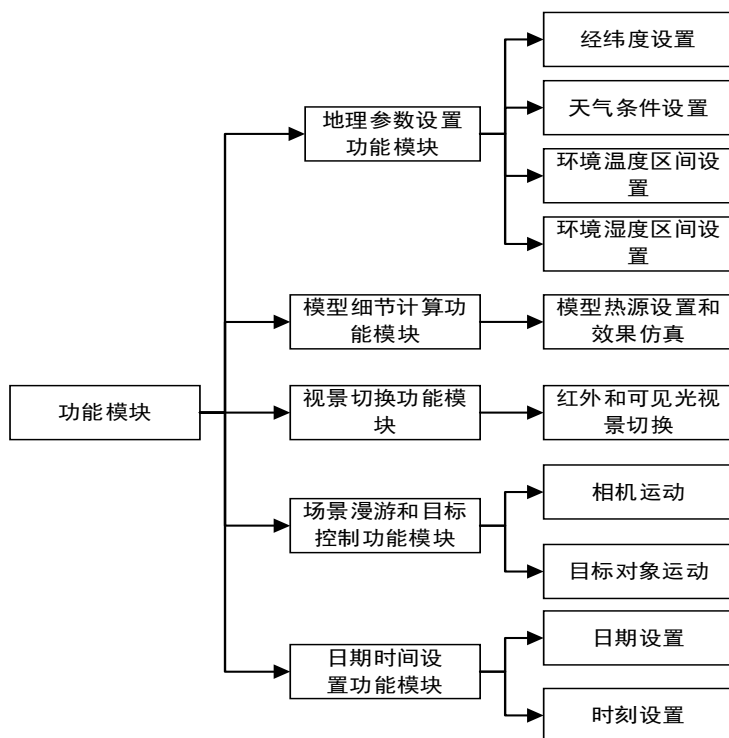


图 3-2 系统功能概述图

地理环境参数设置功能模块提供了经纬度设置，环境参数设置，包括日最低最高气温，云层类型设置，天气条件设置等，用户可以通过该功能模块仿真多种地理位置和天气条件下的红外场景。时间设置功能模块包括日期设置和时刻设置，用户可以通过该功能模块设定系统仿真任意某天的某时刻的红外场景。场景漫游以及目标对象控制功能模块提供用户在场景中的漫游并可控制场景中的模型对象运动，例如船体的航行。场景切换功能模块提供用户在自然场景和红外场景的切换功能，丰富系统的实用性。

## 3.2 场景组织

本系统通过 Unity3D 游戏引擎开发实现，本节通过对 Unity3D 的介绍来说明系统的实现细节。

### 3.2.1 Unity3D 功能概述

Unity3D 是一款功能强大的游戏开发引擎，并为用户提供了较为方便的交互界面，支持多种 3D 模型格式的导入，包括 Maya 的 mb, ma1 格式以及 3D Max 的 max1 格式。可以直接将模型文件拖入引擎界面完成导入，十分方便。Unity3D 的脚本语言有 C# 和 JavaScript 等，本系统采用 C# 作为脚本开发语言，对于新建的脚本类，默认继承父类 MonoBehaviour，通过覆盖父类的 Awake, Start, Update, FixedUpdate, LateUpdate 等方法实现场景逻辑编辑。

对于 Awake 方法，在脚本实例被加载的时候执行，且只执行一次，Start 方法在 Update 方法第一次被调用时执行并且只执行一次，Update 方法在每次渲染新的一帧的时候被调用，所以该方法的调用频率与系统性能相关，更新次数不固定，FixedUpdate 是基于真实时间间隔固定频率更新，不受游戏帧率的影响，LateUpdate 则是在所有脚本的 Update 方法执行完毕后执行。通过在这些方法中编辑系统逻辑，实现系统的功能。

Unity3D 提供了多种可编辑的 shader，并支持多种 GPU 编程语言，如 GLSL，HLSL 以及 Cg 语言。本系统采用 Cg 语言，顾名思义，Cg 语言全称是 C for Graphic，因此，Cg 语言的语法和 C 语言十分相近，但是又存在明显区别，例如 C 语言是独立于硬件的，而 GPU 编程语言都是依附硬件编程的，也就是在不同的硬件设备条

件下,相同的 Cg 语言程序适用性可能是不同的。在 Unity3D 开发中,需要在 CGPROGRAM 和 ENDCG 之间用 Cg 语言编写着色器程序,Unity3D 提供了自带的 Shader 模板,又称为表面着色 shader,编写该类型的 shader 的时候可以忽略顶点着色器程序,通过在 Input 结构体中定义特殊命名的变量,来获取所需要的数据信息,包括像素着色器中需要用到的世界坐标,世界法相,世界视角向量以及世界光照方向等信息,而不需要考虑如何计算这些数据,Unity 会在编译表面着色程序的时候对这些特殊名称的变量自动计算赋值,并根据设置的方式补充计算光照因素的影响,因此,在编写表面着色程序时,需要考虑的因素较少,甚至只要简单的读取贴图信息即可,开发效率较高,但是,由于 Unity 自动补充了大量计算程序,例如光照模型,以及阴影贴图读取,其中存在大量不必要的渲染开销,故此,相比较自身编写的有针对性的顶点像素 shader,表面 shader 的效率较低,并且灵活性也较低。所以系统开发过程中全部采用顶点像素着色器,具体的流程在 3.3 中会有详细介绍。

### 3.2.2 场景编辑

通过 3D Max, Maya 等建模软件生成好所需的场景对象的模型文件,将模型文件导入 Unity3D,Unity3D 提供了场景模型的拖动功能,可以通过鼠标调整模型的大体位置,并在 Unity3D 的 inspector 界面通过给定模型的三维坐标使得模型设置在准确的位置,从而实现初始场景的设置。

对于地形,Unity3D 提供了地形创建和编辑功能,可以直接通过 Unity3D 创建地形对象,但该地形对象初始状态是平面网格,没有高度信息,Unity3D 提供了多地形高度场的编辑功能,可以手动生成多种地形地貌,但是操作较为繁琐,效果较为粗糙,本文采用 World Machine 软件生成地形高度场文件,并导入到 Unity3D 中,作为地形对象的高度场信息文件,通过该方法得到的高度场效果较为精细准确,效果如图 3-3 所示。

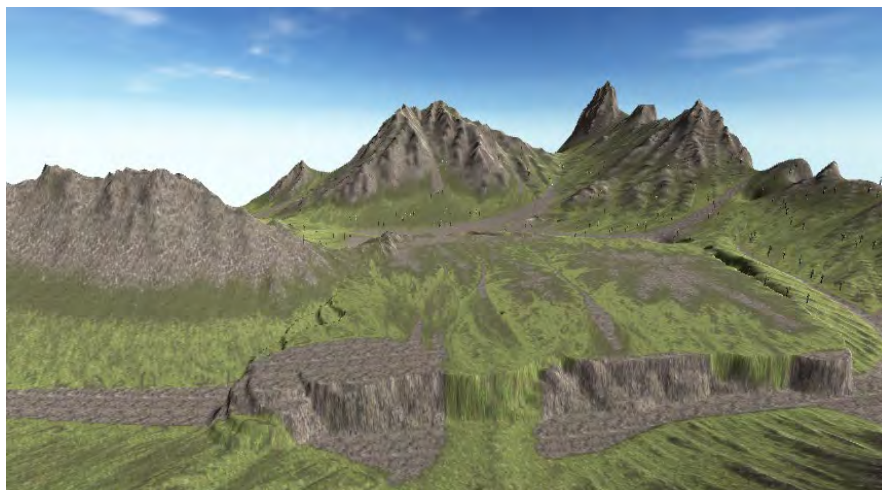


图 3 - 3 地形高度效果图

在得到具有高度场的地形对象后，需要设置地标类型，通过指定地形对象的地表纹理贴图，选择地形对象相应的区域，通过 Unity3D 中，地形纹理笔刷，将贴图数据赋予地形表面，从而生成地表类型，如草地，水泥地。

由此则完成场景设置后，通过 C#脚本编程实现系统的数据逻辑和功能逻辑，并将脚本绑定到场景对象上，则在系统运行的时候，脚本程序会被运行，从而得到系统所需的场景对象的红外数据信息，接下来只需要将红外数据渲染到屏幕即可完成红外场景的仿真。在 3.3 节中将详细介绍 GPU 的渲染流程，从而说明仿真的渲染流程。

### 3.3 场景渲染

本节通过介绍 GPU 的渲染流程，说明红外场景的绘制过程以及每一个过程中涉及到的仿真算法。

#### 3.3.1 渲染流水线

渲染流水线主要分为三个过程，分别是逻辑编码，几何变化以及光栅化。

逻辑编码阶段，使用高级程序语言如 C++，JAVA，C#等编程语言，完成 CPU 部分的功能逻辑，并将最终的几何数据，如网格顶点坐标，顶点方向，纹理坐标等数据，通过数据总线传给计算机的图形硬件，从而绘制到屏幕。

几何变化阶段，通过矩阵变化完成网格顶点坐标的空间转化，同时完成顶点的相关量的计算，因为逻辑阶段传入的顶点坐标是空间三维坐标，而屏幕最终显

示的是二维的屏幕坐标，在二者之间需要进行一系列的坐标变化。根据变化顺序，有以下几个空间坐标系：模型空间坐标系，世界空间坐标系，视空间坐标系，屏幕空间坐标系和屏幕坐标系。在逻辑编码阶段传进来的网格顶点坐标通常是模型空间坐标系下的坐标，该坐标是相对模型自身而言的，也就是说，不同的模型可以有相同的模型空间坐标，因此，为了区分开不同模型，需要将模型坐标转化为世界空间坐标，即相对与统一的一个原点的坐标，这样才能进行场景的光照计算。在完成模型坐标到世界空间坐标的转化后，需要将世界坐标转化成视空间坐标，即相对于视空间而言的坐标，也可理解为相机空间坐标，即相对与世界空间中相机坐标的模型坐标，完成这一坐标的转化后，方便进行空间裁剪，即将不在相机视线空间中的坐标点剔除，相机的视空间是一个四棱台，四条棱的交点是相机的位置，如图 3-4 所示。

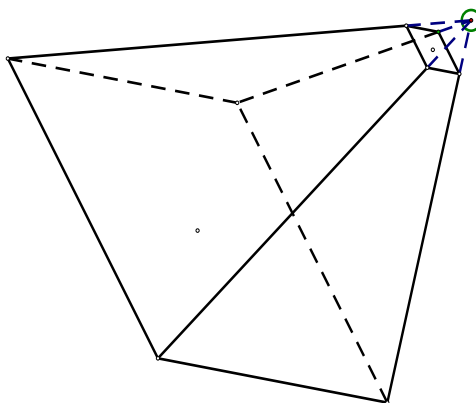


图 3 - 4 相机视锥体示意图

由于不规则体不易于进行裁剪，所以，裁剪通常是在一个单位立方体中进行，该立方体又称为规范立方体，因此需要将视空间坐标变化到裁剪空间坐标，即该立方体中，从而完成空间裁剪，最后将裁剪空间坐标转化成屏幕坐标，即完成裁剪空间坐标到屏幕坐标的映射。由于空间裁剪的时候会导致部分面元的顶点被剔除，这时候需要重新构造新的面元。

光栅化阶段的主要工作是决定几何图元具体覆盖哪些像素。经过几何阶段的坐标变化，已经得到了每个顶点的屏幕坐标值和所需要绘制的图元，但是，几何阶段计算所得的屏幕坐标值是浮点数，而屏幕的像素坐标是整数，通常采用就近原则或四舍五入原则，如  $(2.49, 5.51)$ ，对应的像素坐标是  $(2, 6)$ ，再根据像素坐标绘制线段和三角面片，常见的方法有 DDA 算法和边界填充算法等。这样，

图元和像素便对应了起来，接下来只需要给像素赋予相应的颜色值即完成二维屏幕的绘制。

### 3.3.2 顶点着色器

顶点着色器是 GPU 的两大组件之一，是 GPU 的硬件单元，负责运行顶点程序，具有强大的并行计算能力。而顶点程序即负责顶点坐标变化以及光照计算等过程，对于 Cg 语言，其顶点程序通过语义关联 GPU 中存储着模型顶点坐标等信息的存储器，从中读取逻辑编码阶段传入 GPU 中的数据信息，从而根据这些信息进行相关计算，如计算出模型顶点的世界坐标，世界法向，光照方向，视线方向等信息，在 Unity3D 游戏引擎中，Unity3D 提供了较多的函数用于计算相关矢量信息，计算过程的算法伪代码如算法 3.1 所示。

---

#### 算法 3.1 Vertex Geometric Changes Algorithm Based On Unity

---

**Input:** model coordinates *vertex*, model coordinates *normal*, model texture coordinates *texcoord*, model coordinates *tangent*

**Output:** world coordinates *worldPos*, world coordinates *worldNormal*, world coordinates *worldTangent*, world *lightDir*, world *viewDir*, texture coordinates *tex\_uv*

```

1:  get worldPos ← mul(unity_ObjectToWorld, vertex)
2:  get worldNormal ← mul(UnityObjectToWorldNormal, normal)
3:  get worldTangent ← mul(UnityObjectToWorldDir, tangent)
4:  get lightDir ← UnityWorldSpaceLightDir(worldPos)
5:  get viewDir ← UnityWorldSpaceViewDir(worldPos)
6:  get tex_uv ← texcoord
7:  return above calculation result by defined struct O

```

---

在顶点程序中，可以实现海面开尔文尾迹的仿真，只要根据开尔文尾迹的积分公式计算出每个顶点的高度场变化量，让顶点坐标的 y 分量加上该高度差即可实现尾迹的仿真。

在计算得到相应的数据后，可以将其存储在 GPU 中相应的存储器上，作为像素程序的输入，本系统在进行红外仿真的过程中需要用到贴图信息，故此，在顶



点程序阶段不进行光照计算，只进行几何变化和像素程序实现红外仿真中细节计算所需的矢量的计算。

### 3.3.3 像素着色器

像素着色器也是 GPU 的两大组件之一，负责运行片段着色程序，可以高速查询纹理信息，和顶点着色器一样擅长矩阵计算，同样具有强大的并行能力。片段程序通过读入顶点程序的计算结果，进而进行相关信息的计算，在 Unity3D 提供的表面着色 shader 在编译补充代码的时候，在片段程序中进行光照计算，同时读取场景中的阴影贴图，用于绘制场景中的阴影效果，使得画面真实感更强。本系统为每一类的材质分别编写一个 shader，并在 shader 的片段程序中读取各材质的理想红外辐射灰度值，结合模型表面贴图以及顶点程序的计算结果实现场景中各个模型的红外仿真细节。算法实现的伪代码如算法 3.2 所示。

---

#### 算法 3.2 Fragment Infrared Simulation Algorithm Based On Unity

---

**Input:** world coordinates *worldPos*, world coordinates *worldNormal*, world *lightDir*, world *viewDir*, texture coordinates *tex\_uv*// element of struct **O**

**Output:** final gray degree *E*

```

1:   get texture RGBA S ← tex2D(MainTex, tex_uv)
2:   get texture gray Sg ← dot(S, float3(0.5, 0.3, 0.1))
3:   get material corresponding gray G by including infraredParam.cginc file
4:   get cosine cs1 ← dot(viewDir, worldNormal)
5:   get cosine cs2 ← dot(lightDir, worldNormal)
6:   get gray E ←  $(a \cdot G \cdot Sg + (1 - a) \cdot G)(b + (1 - b) \cdot cs2)(cs1 \cdot e + 1 - e)$ 
7:   get shadow factor sd ← UNITY_LIGHT_ATTENUATION(sd, O, worldPos)
8:   get gray E ←  $E((1-w)sd+w)$ 
9:   return final gray degree E

```

---

## 3.4 本章小结

本章通过结合系统的数据逻辑和对 Unity3D 游戏引擎的功能以及 GPU 渲染流程的介绍，阐述了系统实现涉及到的相关技术，并给出部分系统算法的伪代码。

## 第四章 仿真系统实现和结果分析

### 4.1 仿真系统实现

本节从算法实现，地形和热源目标对象等较为特殊的目标对象的仿真等方面阐述系统的实现过程。

#### 4.1.1 算法实现

利用第二章的数学模型，可以求解出多种环境条件下的环境参数值，如环境湿度，环境温度，太阳高度，大气辐射以及太阳辐射等。进而通过迭代计算求解出材质表面的温度场，由于该部分涉及到的计算量较大，在实现过程中，采用运行效率较高的 C++ 语言进行编写，并编译成动态链接库，通过提供调用接口，再在 Unity3D 的脚本中调用，从而实现求解多种材质的理想温度场，材质表面热平衡方程的具体求解的算法流程如图 4-1 所示。

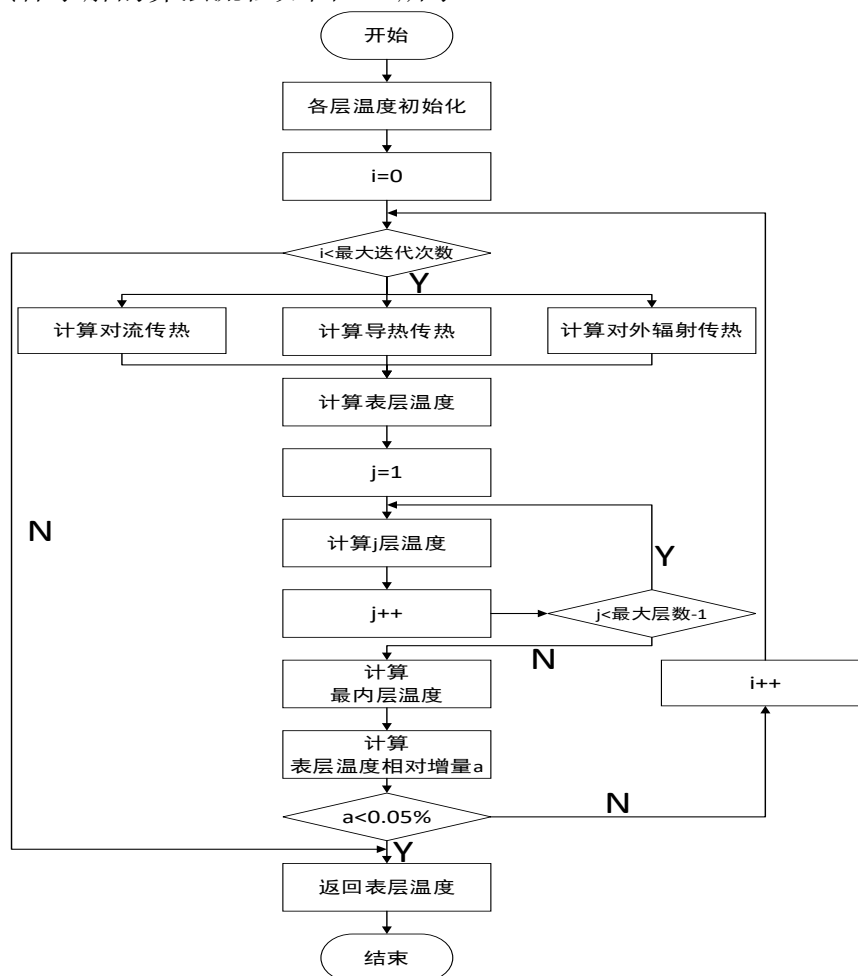


图 4 - 1 热平衡方程求解源码示例图

在具体求解热平衡方程的时候，考虑到系统的效率和实时性，对求解过程设置了迭代次数的上限以及求解结果的容许误差，当迭代次数达到上限或者求解结果在误差允许范围内，则停止迭代，从而提高了系统的帧率，因为在真实的求解过程中，例如，迭代 100 次时的计算结果为 24.9k，而最终的平衡温度为 25k，从 24.9 迭代至 25 虽然只有 0.1，但是，迭代次数或许还需要 300 次，因而在很大程度上降低系统的性能，为了避免这种情况的出现，故此在求解过程中设置了容差值以及迭代上限次数。通过提供不同材质的参数属性值，可以求解出不同材质表面在不同环境条件下的理想温度场分布，进而通过式(3.1)计算出理想状态红外灰度值。通过 Unity3D 提供的 CPU 与 GPU 数据交互的逻辑，将计算得到的灰度数据保存在 Shader 的包含文件中，不同材质的 Shader 通过包含该文件，从而通过变量名获取相应的材质理想红外灰度值。具体的实现的流程如图 4-2 所示。

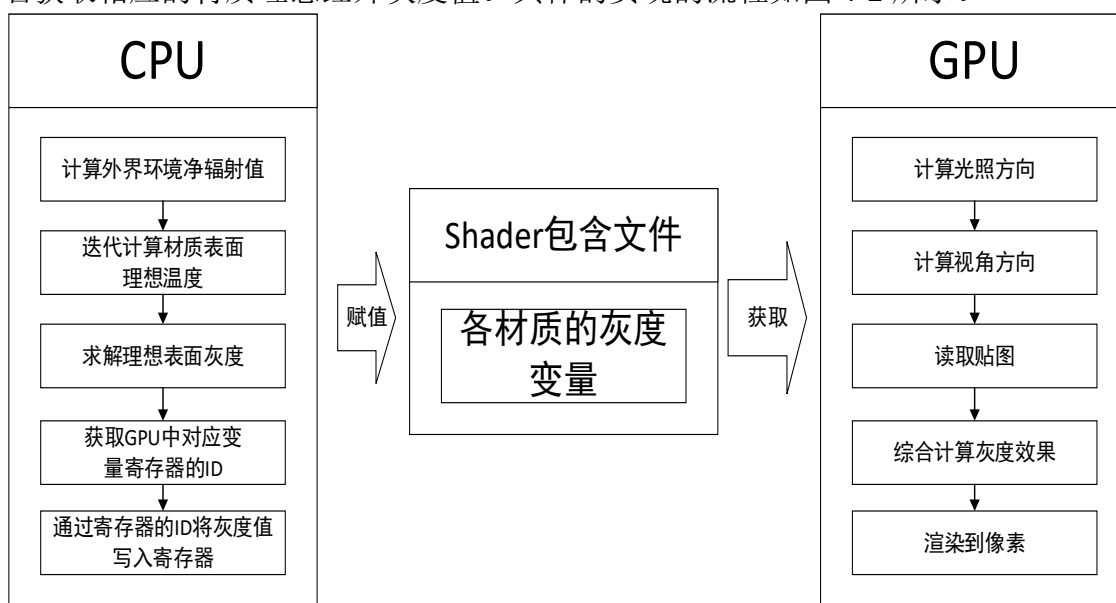


图 4 - 2 系统实现流程图

#### 4.1.2 地形红外仿真

在 Unity3D 中，提供了创建地形的功能，如 3.2.2 节所述，可以改变地形的高度场，生成各种形态的地形，如平原，丘陵，盆地，通过设置贴图，可以实现地形的地表结构，地形表面的贴图的设置界面如图 4-3 所示。

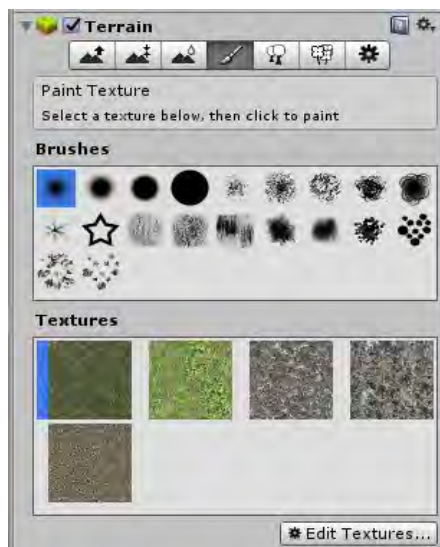


图 4 - 3 地形贴图编辑界面图

通过点击 **Edit Texture** 按钮，可以增加地形的贴图或者删除已添加的贴图，通过指定地形的指定区域，可以将贴图的贴在相应的指定区域，作为地形表面的材质，Unity3D 会生成一张名为 **splat** 的纹理贴图，通过贴图的 **RGBA** 四个通道分别记录地形编辑界面中前四张贴图的绘制区域，从而将相应的贴图准确的绘制到地形上，**splat** 纹理贴图如图 4-4 所示。

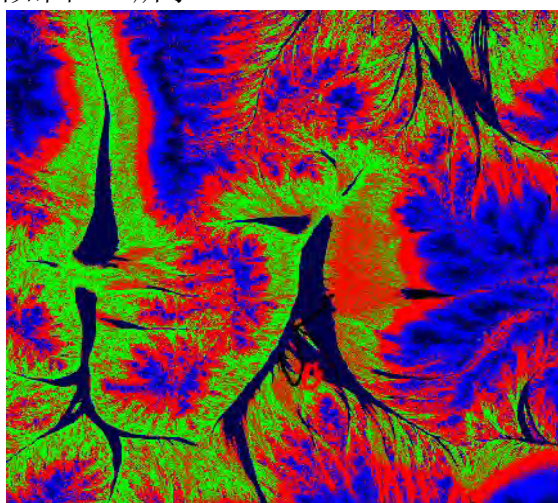


图 4 - 4 地形 splat 纹理贴图

由图所示，贴图的 **RGBA** 仅有四个通道，意味着只能通过该贴图定位四种材质的地形纹理，从而仿真其红外特性，对于第五张及其以外的地形贴图，则无法从中获取到其地形坐标，因此难以实现其红外仿真。通过对 Unity3D 的研究，发现对于多余的地形贴图，Unity3D 通过默认的 **Shader** 进行绘制渲染，因此通过覆盖默认的 **Shader** 可以实现第五种到第八种地形材质的红外仿真，从而实现系统地

形表面材质的多样性。地形红外仿真涉及到的材质定位及红外特征计算的 shader 中的算法伪代码如算法 4.1 所示。

---

**算法 4.1** Terrain Shader Infrared Simulation Algorithm Based On Unity

---

**Input:** world coordinates *worldPos*, world coordinates *worldNormal*, world *lightDir*, world *viewDir*, texture coordinates *tex\_uv*

**Output:** final gray degree *E*

```

1:   get _Control texture RGBA splat_control  $\leftarrow tex2D(_Control, tex\_uv)$ 
2:   get four terrain texture RGBA and multiply splat_control RGBA seperately
3:   calculate sum S of step2 as the RGBA of terrain textures
3:   get texture gray Sg  $\leftarrow dot(S, float3(0.5, 0.3, 0.1))$ 
4:   get pixel corresponding gray G  $\leftarrow dot(splat\_control, float4(grayTerrain))$ 
5:   get cosine cs1  $\leftarrow dot(viewDir, worldNormal)$ 
6:   get cosine cs2  $\leftarrow dot(lightDir, worldNormal)$ 
7:   get gray E  $\leftarrow (a \cdot G \cdot Sg + (1 - a) \cdot G)(b + (1 - b) \cdot cs2)(cs1 \cdot e + 1 - e)$ 
8:   return final gray degree E

```

---

通过获取逻辑编码阶段计算得到的理想红外灰度值，对于地形 Shader，该变量是一个四维向量，表示地形四种不同贴图的材质的红外灰度值，通过 splat 纹理贴图确定当前像素对应点的材质的灰度进而计算出该材质的红外细节特征。最终得到的多材质地形表面的红外仿真效果图如图 4-5 所示。

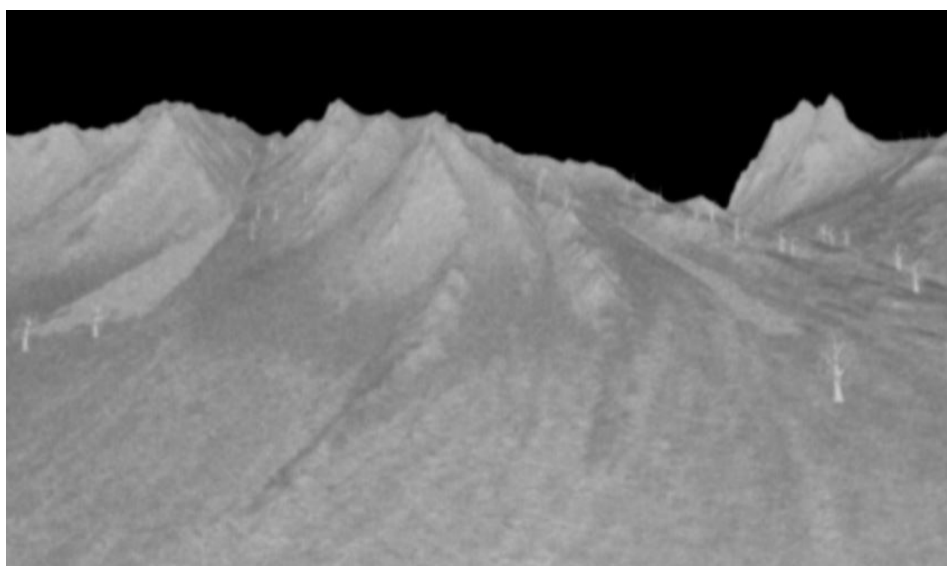


图 4 - 5 多材质地形红外仿真效果图

### 4.1.3 目标对象红外仿真

在对具体目标对象进行红外仿真的时候，除了考虑模型的基本红外特性外，还需要考虑其内在的温度特性，如机车的引擎对内表面的辐射导致局部的升温，从而产生局部高亮的效果，然而，对于不同的模型，引擎的隔热效果不同，同时所处的位置也各不相同，因此，如 2.7 节所述，本文采用立体相机的方式进行热源效果仿真，效果如图 4-6 所示。

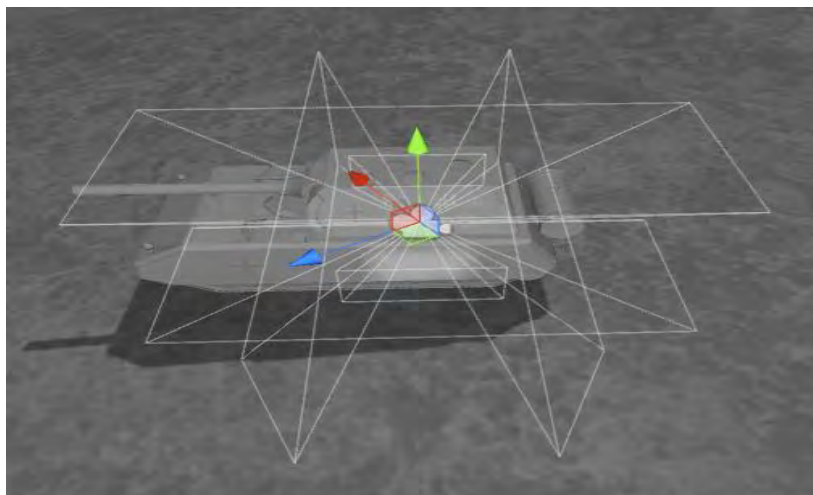


图 4 - 6 放置热源对象模型效果图

通过在 Unity3D 的编辑界面中拖动相机，可以实现热源位置的任意移动，在设置好热源的位置后，对于需要有热源效果的模型组件，对其添加 Unity3D 的网格碰撞器，利用 Unity3D 的物理引擎，使用光线投射原理，即从相机出发，对相机视野里的每一个像素投射一条视线，返回与该视线产生碰撞效果的对象的信息类，从该信息类中获取碰撞点的模型贴图坐标以及立体相机的深度距离，进而利用辐射传热模型计算出该像素处的热源温差灰度值并存入贴图，如 2.7 节所述，在完成物体的基本红外效果仿真后，通过读取热源贴图即可完成目标对象红外仿真。

## 4.2 仿真结果分析

通过环境参数的采集，并在 Unity3D 中编辑场景，得到的仿真场景效果图如图 4-7 所示。



图 4 - 7 轿车正午红外场景仿真侧视图

仿真图像同时展现了多种对象的红外效果，并表现出相同模型对象不同表面之间的辐射差异，如车的顶部与车门的差异，二者均属于同一种物理材质，但是二者的相对空间位置不同，朝向不同，故此，到达相机的辐射灰度也就不同；被阳光照射到的草坪的灰度较高，背影处的草坪灰度较小，并且被阳面的树木灰度也很低。同时，图像中表现出红外图像的模糊以及噪声效果。通过日期功能模块调整场景中的时间，得到新的仿真图像如图 4-8 所示。



图 4 - 8 轿车午夜红外场景仿真侧视图

与白天的仿真图像相比，夜晚的仿真图像差异比较明显，并且车表面的灰度差异尤其明显，顶部的灰度较低，而车门处的灰度相对较高，夜晚树木树干和枝叶比较接近灰度较高，和白天差异明显，这是因为夜晚不受太阳辐射的影响，材质表面的温度比较均匀。

通过操作相机在场景中漫游可以得到场景对象各个角度和距离处的仿真图像，如图 4-9 所示。



图 4 - 9 轿车午夜红外场景仿真正视图

在不同视角下玻璃表面的灰度差异十分明显，这是因为玻璃对外界红外辐射的反射作用比较强，而且表面平整，故此，玻璃辐射的方向比较统一，类似镜面反射，在反射方向上看到的灰度较高，偏离该方向的灰度较低。

系统中海洋场景，海洋场景中舰船模型以及舰船运动产生的开尔文尾迹的仿真效果如图 4-10 所示。

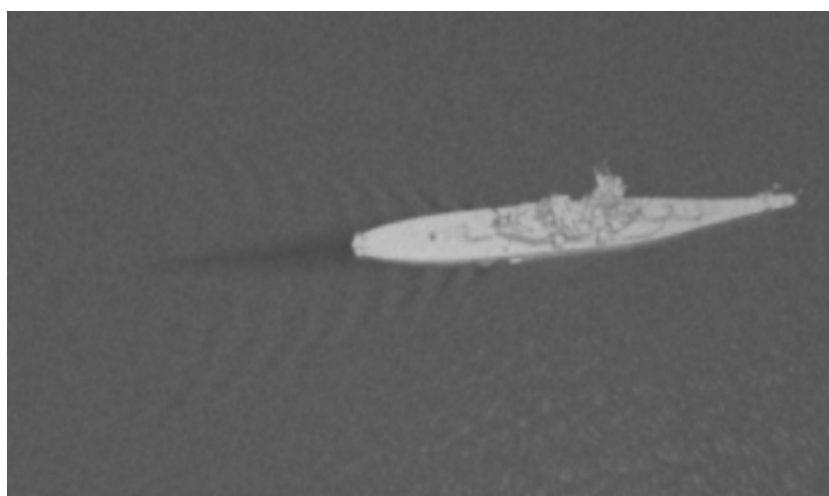


图 4 - 10 舰船海面红外尾迹仿真效果图

由于船体的表面多位金属材质，在太阳照射下温度较高，因而红外灰度值较大，其运动使得海面高度场发生变化，同时由于船体的运动，导致水面下方较低温度的水替换到表面，使得船体尾部水域的红外灰度值变低。

对于陆地场景中的车辆与坦克，在其运动状态下，由于车轮履带与地面的摩擦使得温度升高，从而导致红外灰度较高，在长时间静止状态下，则其红外灰度与车体比较接近。如图 4-11 和图 4-12 所示。



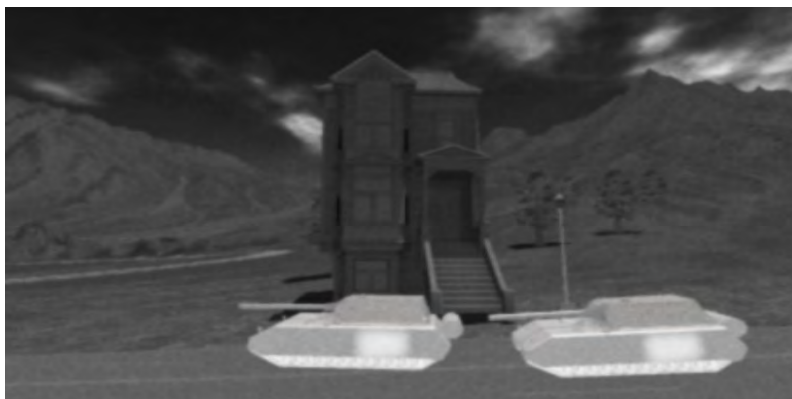


图 4 - 11 长时间行驶坦克红外效果图

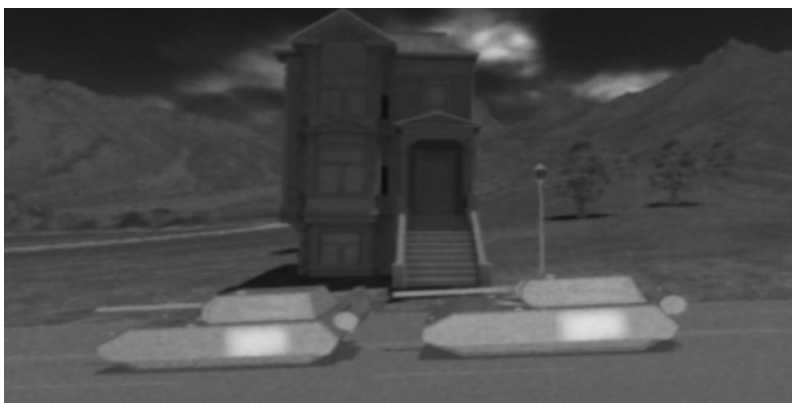


图 4 - 12 长时间静止状态坦克红外效果图

在上图中，建筑物的灰度整体相对较低，这是因为该视角下的建筑物没有受到太阳的直接照射作用，通过改变相机的位置和视角，得到建筑物向阳面的红外仿真效果如图 4-13 所示。



图 4 - 13 向阳面建筑表面红外效果图

图中展示了建筑物在太阳照射下的红外效果以及自身的遮挡效果，对于自身传热能力较弱的材质，背阴处和太阳照射处的温差较大，成像灰度会形成明显的差异。

### 4.3 真实结果对比

为了验证系统仿真的真实性，通过利用红外热像仪连续拍摄真实场景的红外图像，并记录下拍摄时间，同时利用系统仿真相应时间的红外图像，分别对一天中多个时间段的图片进行对比，对比图如图 4-14 到图 4-19 所示。

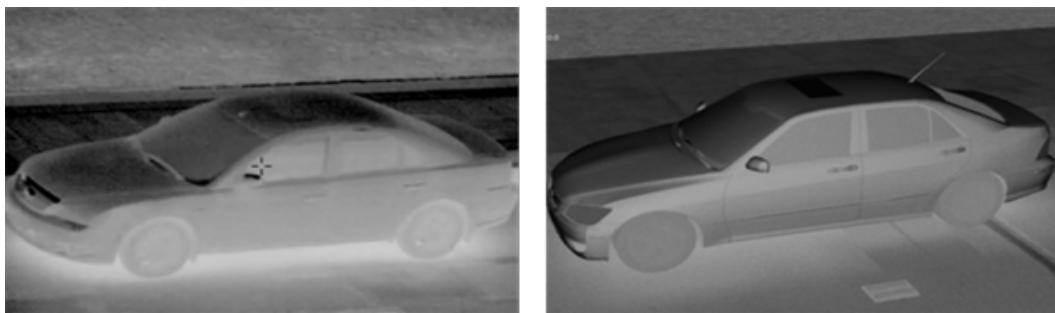


图 4 - 14 深夜 0:00 时实拍（左）与仿真（右）红外图像对比图

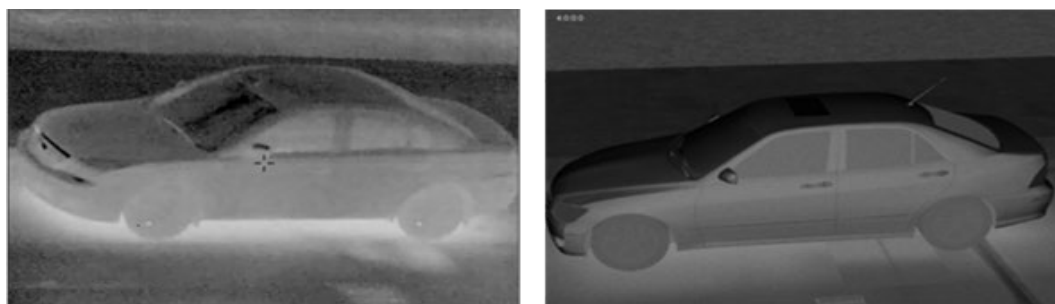


图 4 - 15 凌晨 4:00 时实拍（左）与仿真（右）红外图像对比图

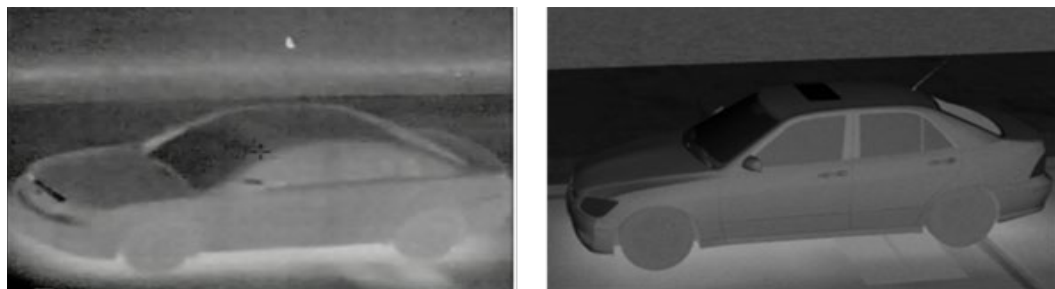


图 4 - 16 早上 8:00 时实拍（左）与仿真（右）红外图像对比图

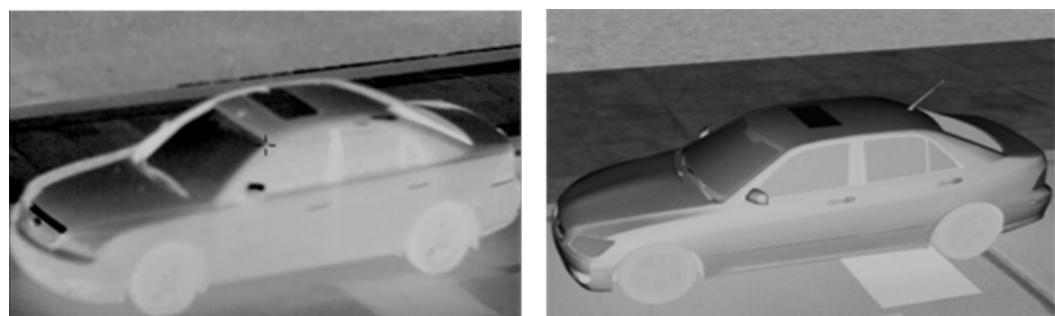


图 4 - 17 正午 12:00 时实拍（左）与仿真（右）红外图像对比图

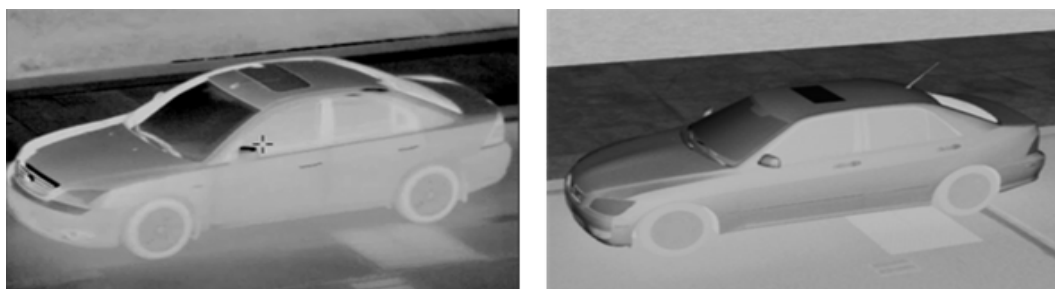


图 4 - 18 傍晚 16:00 时实拍（左）与仿真（右）红外图像对比图



图 4 - 19 夜晚 20:00 时实拍（左）与仿真（右）红外图像对比图

可见，在人眼的视觉层面，系统的仿真图像与真实场景的红外图像基本一致。为了进一步确定系统仿真的真实性，通过一天 24 小时统计真实环境中几个基本对象的温度数据，如水泥地，车门，草地。记录下在相同环境温度区间中，系统对该几个目标对象表面温度场的求解数据，得到温度变化图像如图 4-20 到图 4-22 所示。

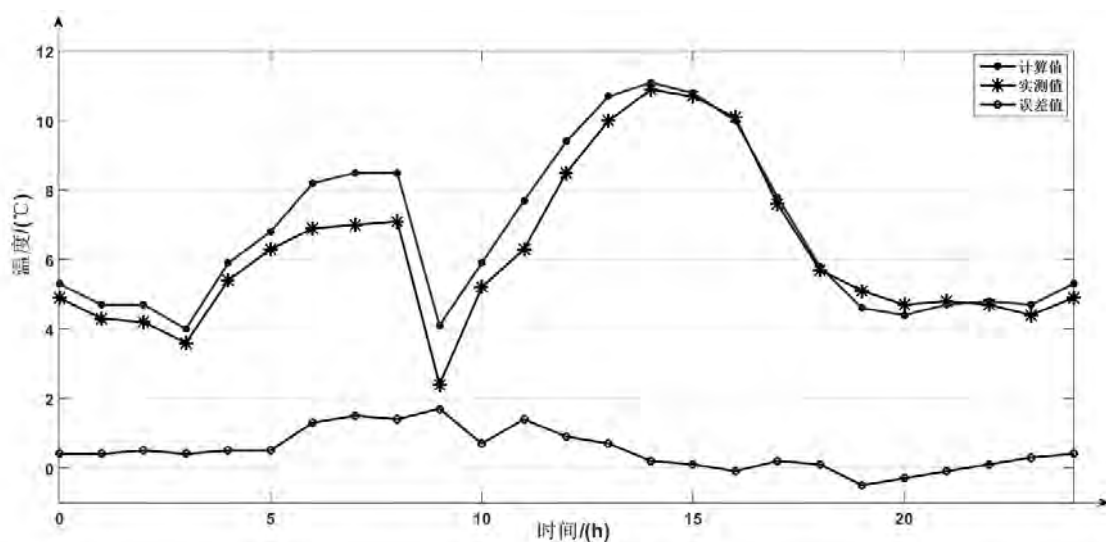


图 4 - 20 水泥地 24 小时温度变化仿真实测对比图

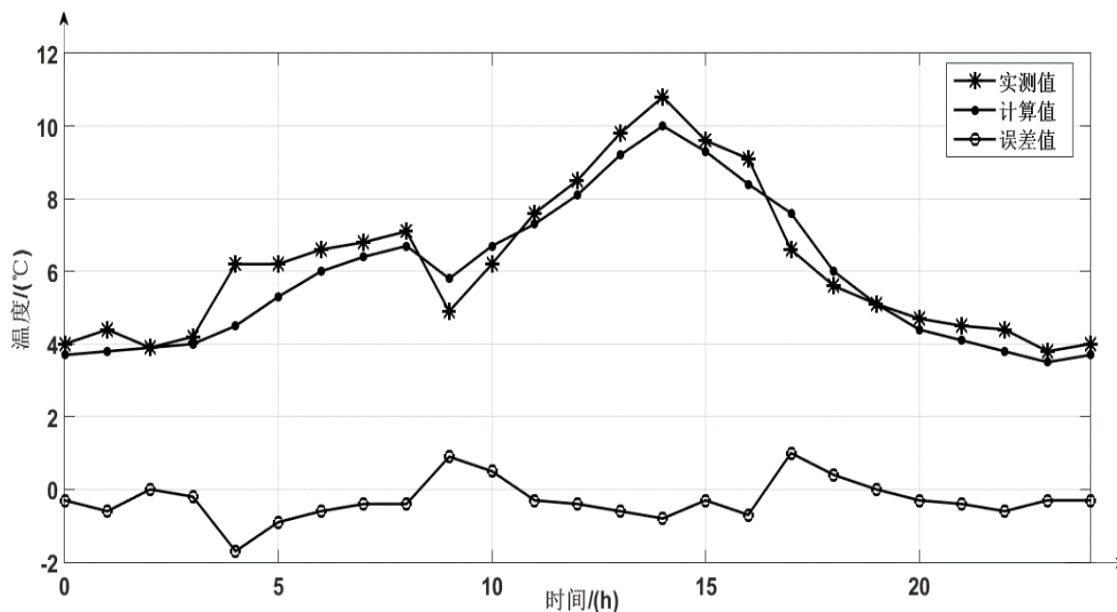


图 4 - 21 草地 24 小时温度变化仿真实测对比图

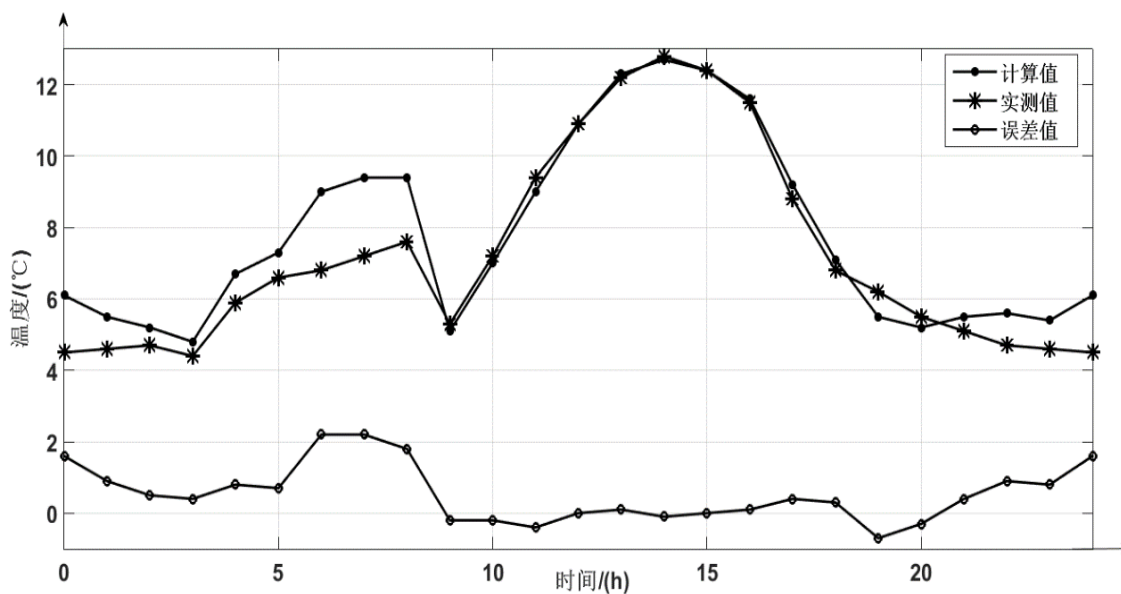


图 4 - 22 车门 24 小时温度变化仿真实测对比图

可见，在具体的材质温度上，仿真数据和真实数据还是存在误差的，这是因为，真实的自然环境中，影响温度的因素较多，而系统仿真过程仅考虑主要的影响因素，而且，对于温度的测量仪器本身就存在误差，由此可见，仿真结果较为理想，系统的仿真可信度较高。故此，本系统具有较高的应用价值。

#### 4.4 本章小结

本章从系统的算法实现和对特殊对象的红外仿真细节的阐述，介绍了系统的

实现过程。通过对系统仿真结果的分析，表明系统能够进行仿真功能的完整性，同时，通过与真实红外图像的对比分析，表明仿真结果的可靠性。

## 第五章 全文总结与展望

### 5.1 全文总结

通过对红外背景理论的分析以及相关数学模型的归纳总结,本文综合了多种场景对象的仿真方法,实现了基于 Unity3D 游戏引擎的复杂场景的红外仿真系统,可以实现导入模型到红外模型的转变,并完成多种目标对象的红外视景仿真,对我国在相关领域的研究具有重要意义,本文的主要贡献如下:

1. 在完成影响温度场的主要计算模型的分析后,通过理论推导,更正前人使用的误差较大的经验模拟公式,在保证系统运行帧率的前提下,用经过正确的理论推导得到的更加精确计算公式,如太阳赤纬角的计算公式。对于自然红外场景仿真而言,太阳辐射计算的准确性,对系统结果的影响加大,故此,保证太阳辐射一定的准确性较为重要。
2. 通过对 Unity3D 功能以及开发流程的分析,提出了新的红外仿真计算框架,使得任意物体对象能够在系统中反映自身的特性,包括内在物理特性或外在关系等因素,如内在物理材质参数和外在相对位置关系等,并保证系统的运行帧率保持在 30 帧以上。
3. 根据场景模型表面材质属性和内部热源属性,通过构建立体相机生成热源贴图,并利用 GPU 并行加速能力快速求解受热源影响的表面温度场分布,并对贴图进行保存,由此避免重复计算,节约大量的计算资源,使得系统的运行效率更加高效,达到实时的效果。
4. 在进行海面仿真时,增加考虑船体的运动对海面的影响,通过求解开尔文尾迹积分模型,求解海面高度场的变化,由此实现海面的开尔文尾迹效果,在此基础上,进行了船体运动对海洋表面的红外效果的影响的仿真,并实现海洋表面开尔文尾迹的红外效果的仿真,提高了海面红外仿真的真实感。
5. 在对仿真结果分析的过程中,进行了大量实地的拍摄和数据采集,从仿真图像与真实拍摄图片的对比以及仿真数据与真实采集数据之间的分析等方面,给出了系统仿真场景和实地场景的对比分析结果,由此说明

了本系统的仿真结果的可信度较高。

## 5.2 后续工作展望

虽然本文的研究工作取得了一定的成果，但是仍然存在一些不足有待今后改进。具体的不足有以下几个方面：

1. 系统考虑的天气效果较少，当前仅支持晴天，阴天和雨天的仿真效果，而且在雨天的场景仿真时，没有实现雨水与物体碰撞的效果，如雨水打到水面的波纹效果。
2. 系统目前仅考虑单一材质的物体的红外仿真，对于混合材质的仿真尚未实现，如雨水和泥土的混合所形成的材质效果的仿真。
3. 系统目前仅考虑内热源、太阳和大气的辐射，对于环境不同物体之间的相互辐射效果尚未实现。
4. 在对天空背景的仿真上，目前只是对其进行一个灰度的转化，尚未基于红外物理。
5. 本文涉及到的仿真对象不涉及活体动物。

## 参考文献

- [1] MultiGen Vega Prime User's Guide[M]. MultiGen-Paradigm Inc, 2001.
- [2] Sheffer A D, Cathcart J M. Computer Generated IR Imagery: A First Principles Modeling Approach[C]. 1988 Orlando Technical Symposium. International Society for Optics and Photonics, 1988:199-206.
- [3] Biesel H, Rohlfing T. Real-time simulated forward looking infrared (FLIR) imagery for training[J]. Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering, 1986, 781:71-80.
- [4] Owens A W R. Data-based methodology for infrared signature projection[C]. Thermal imaging. Thermal imaging, 1986:96-99.
- [5] Li N, Wang S, Lv Z, et al. A real-time infrared radiation imaging simulation method of aircraft skin with aerodynamic heating effect[J]. Infrared Physics & Technology, 2015, 71:533-541.
- [6] Liao B, Wang Z, Ke X, et al. IR scene image generation from visual image based on thermal database[J]. Proc Spie, 2007.
- [7] 任亮, 陈钱, 钱惟贤. 基于ANSYS的目标红外特性建模与仿真方法[J]. 红外与激光工程, 2013, 42(6):1426-1431.
- [8] 杨尧, 吴振森, 姚连兴. 从红外辐照热平衡方程求解海面温度[J]. 红外与毫米波学报, 2003, 22(5):357-360.
- [9] 陆艳青, 王章野, 董雁冰, 等. 城市建筑物红外特性四季变化及其成像研究[J]. 红外与毫米波学报, 2002, 21(5):59-63.
- [10] Wang H, Wang X, Liu L, et al. Natural scene temperature field calculation and infrared radiation simulation based on OptiX[J]. Optical Engineering, 2015, 54.
- [11] Balfour L S, Bushlin Y. Semiempirical model-based approach for IR scene simulation[J]. Proc SPIE, 1997.
- [12] Berk A, Bernstein L S, Robertson D C. MODTRAN: A moderate resolution model for LOWTRAN7[J]. Tech. Rep. F19628-86-C-0079. Air Force Geophys. Lab., Hanscom Air Force, 1987.



- [13] 孙毅义, 董浩, 毕朝辉, 等. 大气辐射传输模型的比较研究[J]. 强激光与粒子束, 2004, 16(2):149-153.
- [14] 周国辉, 刘湘伟, 徐记伟. 一种计算红外辐射大气透过率的数学模型[J]. 红外技术, 2008, 30(6):331-334.
- [15] 高伟. 红外成像制导图像仿真[D]. 哈尔滨工程大学, 2008.
- [16] Pinel N, Monnier G, Sergievskaya I, et al. Simulation of infrared emissivity and reflectivity of oil films on sea surfaces[C]. SPIE Remote Sensing. International Society for Optics and Photonics, 2015.
- [17] Salvaggio C. Soil signature simulation in the thermal infrared[J]. Optical Engineering, 2015, 54(10).
- [18] Chen B, Dai Y, Ming D, et al. Infrared Simulation Research Based on Warships and Ocean Wake Background[J]. Computer & Digital Engineering, 2014.
- [19] Ma Y, Tian Y. Modeling Method of Warship Radiation Model for Infrared Simulation[J]. Tactical Missile Technology, 2013.
- [20] Hinderer J. Model For Generating Synthetic Three-Dimensional (3D) Images Of Small Vehicles[C]. 25th Annual Technical Symposium. International Society for Optics and Photonics, 1982:8-13.
- [21] Li N, Liu Q H. Research on Infrared Imaging Modeling and Simulation of Armored Vehicles[J]. Applied Mechanics & Materials, 2014, 651-653:2372-2376.
- [22] Dai Y, Chen B, Ming D. Research on real-time infrared simulation of ground scene[J]. Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering, 2013.
- [23] 陈衡. 红外物理学[M]. 国防工业出版社, 1985.
- [24] 英克鲁佩勒. 传热和传质基本原理[M]. 化学工业出版社, 2007.
- [25] 王章野. 地面目标的红外成像仿真及多光谱成像真实感融合研究[D]. 浙江大学, 2002.
- [26] 石川凌. 海陆场景的红外实时仿真研究[D]. 浙江大学, 2016.
- [27] 刘念雄, 秦佑国. 建筑热环境[M]. 清华大学出版社, 2016.
- [28] Randima Fernando编. GPU精粹[M]. 人民邮电出版社, 2006.

- [29] 王彦杰, 汪增福. 复杂环境下的舰船航迹仿真[J]. 系统仿真学报, 2006, 18(11):3247-3249.
- [30] Mark W R, Glanville R S, Akeley K, et al. Cg: a system for programming graphics hardware in a C-like language[C]// ACM SIGGRAPH. ACM, 2003:896-907.
- [31] 宣雨松. Unity 3D游戏开发[M]. 人民邮电出版社, 2012.

## 致谢

转眼之间，大学的四年时光已经接近尾声，回顾这四年的校园学习经历，收获过成功，也经历过失败，对未来充满期待，同时又带着迷茫，庆幸的是，在这四年中，我受到过许多人的教诲、鼓励和支持，让我在成功的时候能够保持谦卑，不至于忘乎所以，在失败的时候不至于轻言放弃，越挫越勇。

首先，我要感谢我的导师张繁。张老师是个对学生认真负责的老师，学习上，逐步引我阅读科研论文，并积极和我探讨论文中的问题和难点，从而提高了我独立思考和交流沟通的能力，让我在今后的学术道路上受益匪浅。同时，张老师给我提供了去浙江大学交流学习机会，这对我在计算机图形学领域的学习有很大的帮助。

其次，我要感谢浙江大学 CAD&CG 国家重点实验室的王章野老师。王老师为人热情，在红外仿真领域具有深厚的理论基础，对我在红外仿真方向的研究给予了很大的帮助，同时也在生活上也给予了我帮助和支持，对此，我深表感谢！

接下来，我要感谢我的母亲，在生活中给予我无私的照顾和支持，让我能够健康地成长并接受良好的教育。母亲是个平凡的人，但赋予了我乐观，善良，勇敢和坚强的品质，让我能够积极地面对人生的困难挫折。

另外，我要感谢实验室的廖惟博硕士，石川凌硕士以及吴亦汗硕士在技术上给予我的协助，使得本文的仿真系统能够顺利完成，希望他们在未来的工作学习能够取得较大的收获。

最后，再次对所有帮助过我的老师同学表示最真挚的感谢！