

1.1 目标及干扰场景仿真软件设计

目标及干扰场景仿真软件是光学成像导引头半实物仿真试验系统的重要组成部分。在仿真试验中，该软件生成目标特征图像，通过可见光/红外目标特征模拟系统传输到出瞳处，完成下视景象匹配/前视图象识别跟踪实时仿真功能。

1.1.1 软件架构组成

目标及干扰场景仿真软件采用模块化架构设计，整体划分为场景构建想定模块、场景要素建模模块、干扰建模模块、传感器响应场景生成模块、支撑环境模块与管理运维模块六个功能单元。各模块均定义了明确的输入输出接口，以及与其他模块的交互规范。该软件采用MVC架构实现了数据模型、用户界面与控制逻辑的解耦分离，因此具备良好的可维护性、可靠性与可扩展性，能够支持二次开发与版本迭代升级。各模块的具体功能如下：

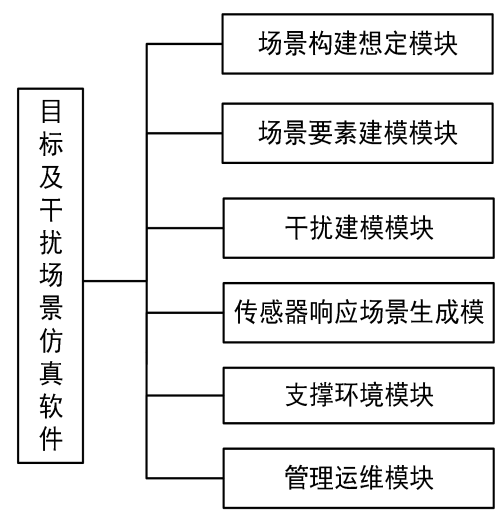


图 1 目标及干扰场景仿真软件模块组成

(1) 场景构建想定模块

场景构建想定模块集成场景编辑功能，可接收用户输入参数完成仿真场景的想定作业并生成想定配置文件，能够为场景要素建模模块

提供输入条件，用于制备用户单次试验所需的目标模型、背景模型与传感器模型（参数）。该模块同时具备配置预览功能，可加载已制备完成的模型数据，对仿真场景效果进行预览，便于用户对配置方案进行动态调整。

（2）场景要素建模模块

场景要素建模模块的功能为读取想定配置文件中的仿真参数，通过算法生成涵盖目标要素与背景要素的红外中波段、长波段光谱辐射特性数字模型，所生成的数字模型直接存储于数据库中，供传感器响应场景生成模块调用。

（3）干扰建模模块

模块构建了涵盖假目标、伪装网、火焰、背景云、三维云、诱饵、烟雾、水幕、雨、雪、雾、霾等典型干扰的综合模型库，采用三维建模、粒子系统与物理机理计算相结合的方式，实现各类干扰的辐射特性计算与运动扩散过程模拟。

（4）传感器响应场景生成模块

传感器响应场景生成模块调用底层仿真引擎，在仿真同步信号的控制下，依据预设想定配置文件加载已制备的模型数据，基于实时仿真数据驱动模型状态更新，对传感器视点、目标、背景等要素进行空间几何与辐射特性计算，完成当前仿真帧图像的渲染输出，最终实现涵盖目标、背景、传感器在内的完整成像全链路图像生成。

（5）支撑环境模块

支撑环境模块主要实现软件底层图像渲染、内/外信息交互，信息数据可视化、仿真数据管理、仿真数据逼真度评估等功能。

（6）管理运维模块

试验管理子模块主要实现对软件的运行进行控制和管理，对渲染图像和仿真条件进行存储，具体功能包括：

- a) 试验模式选择，包括：单机预演、联机仿真；
- b) 软件运行控制，包括：开始、结束、暂停、继续、复位；
- c) 软件运行状态监控，包括：运行状态记录、运行状态查看、故障诊断；
- d) 存储仿真图像和条件数据。

1.1.2 软件接口设计

试验过程中，目标及干扰场景仿真软件作为整个试验系统中的一个节点参与试验，为整个系统提供实时仿真光学场景，其涉及的外部接口如下表所示。

表 1 系统外部接口

序号	接口名称	接口实体	接口描述	备注
1	以太网接口	以太网卡	为节点提供以太网的数据传输功能	非实时数据传输，如外部模型数据
2	文件接口	磁盘文件	读取本地文件模型	目标模型文件 背景模型文件 传感器效应文件等
3	反射内存卡接口	(可扩展 5565 光纤卡)	更新实时数据	指令数据 状态数据
4	图像注入接口	图像注入卡	注入式仿真输出接口	CML (兼容 BLK2711)、CameraLink、LVDS 等

1.1.3 软件工作模式

本系统具备单机、开环注入式、开环辐射式、闭环注入式、闭环辐射式五种工作模式。各工作模式都能够接收实时或离线仿真网络数据，生成不同环境参数条件下的可见光/中波红外/长波红外实时视景图像；能够以数字信号形式输出,实时驱动可见光模拟器、红外模拟

器，将图像以光辐射信号耦合到系统中。

单机模式：具有离线静态、动态场景生成功能。能根据设置参数调节输出满足要求的静态图像，也可根据设定运动参数或仿真数据回放、实测图像读取等方式生成动态场景，完成仿真过程推演。

开环注入/辐射式模式：按照设定的视点轨迹、设定的帧频实现图像渲染和输出，能根据设置参数调节输出满足要求的静态图像，也可根据设定运动参数、仿真数据回放、实测图像读取等方式生成动态场景，发送图像到待测设备或输出给光学模拟器。

闭环注入/辐射式模式：需要实时读取网络数据，输出满足要求的动态图像并注入至待测设备或输出给投影设备。

表 2 模式要求

序号	模式名称	工作内容
1	单机模式	参数配置过程 建模及数据预处理 具有离线视景生成功能
2	开环注入模式	参数配置过程 建模及数据预处理 生成场景图像并注入待测设备
3	闭环注入模式	参数配置过程 建模及数据预处理 接收导引头框架角数据 生成场景图像并注入待测设备
4	开环辐射式模式	参数配置过程 建模及数据预处理 生成场景图像，发送给可见光模拟器、红外模拟器
5	闭环辐射式模式	参数配置过程 建模及数据预处理 接收总控系统数据 生成场景图像，发送给可见光模拟器、红外模拟器

1.1.4 软件工作流程

目标及干扰场景仿真软件在试验准备阶段的工作流程、单机预演工作方式的软件工作流程、联机仿真工作方式的工作流程分别如下图

删除[wyc]：（1）单机工作模式

单机工作模式主要用于本系统的检测维护、本机仿真推演和数据制备等，在单机仿真模式下，不进行图像的发送和注入过程，只按照设定的分辨率、帧频等完成图像的生成和发送过程。在单机工作模式下，与导引头没有连接，不存在信号同步和图像数据注入过程。

在单机工作模式下，主要完成以下工作：

- a)完成仿真时空环境参数，以及目标、背景、干扰、导弹及其发射平台等战场态势及战情参数想定，生成想定配置文件；
- b)基于想定配置文件，完成目标、背景特性、大气传输特性、成像传感器效应等建模及数据预处理，生成相关模型及数据；
- c)加载想定配置文件、相关模型及预处理数据以及想定或本地读取的导弹弹道数据，完成仿真过程推演，生成导弹模拟攻击过程中场景及干扰序列红外图像数据，并存储在本地；
- d)读取本地推演生成的序列图像，并对图像亮度特征进行统计与分析，为战情想定数据优化、场景产生器辐射亮度用以驱动灰度图像转换系数设置等提供依据。

在单机仿真过程中，不涉及与外部软硬件同步过程，不存在特殊的时序要求。

（2）开环注入工作模式

在开环注入模式下，图像实时仿真软件从本地读取导弹、目标及干扰运动数据、视线角度等图像仿真驱动数据，在本机指令控制下，完成包含目标、干扰、背景、大气传输等要素在内的场景及干扰红外图像实时仿真，并基于导引头成像产生器效应模拟数据，对图像进行传感器效应修正，生成包含导引头传感器效应的数字图像，并通过图像注入接口设备将数字图像注入成像导引头信息处理器中。

具体过程如下：

- a)完成仿真时空环境参数，以及目标、背景、干扰、导弹及其发射平台等战场态势及战情参数想定，生成想定配置文件；
- b)基于想定配置文件，完成目标、背景特性、大气传输特性、成像传感器效应等建模及数据预处理，生成相关模型及数据；
- c)试验开始后，图像实时仿真软件响应高精度的固定时间频率信号，在此信号的同步下进行场景图像的生成；
- d)利用图像发送卡完成图像数据的发送过程；
- e)利用图像注入卡完成图像的协议转换过程，注入数据到导引头。

在开环注入过程中，图像仿真帧频需要与导引头的图像处理频率一致。在实现过程中，可直接采用导引头框架角信号作为稳定的时间频率信号，图像实时仿真软件响应这个频率信号，每响应一次将对应帧的图像输出到图像注入卡中，注入数据到导引头。

所示。

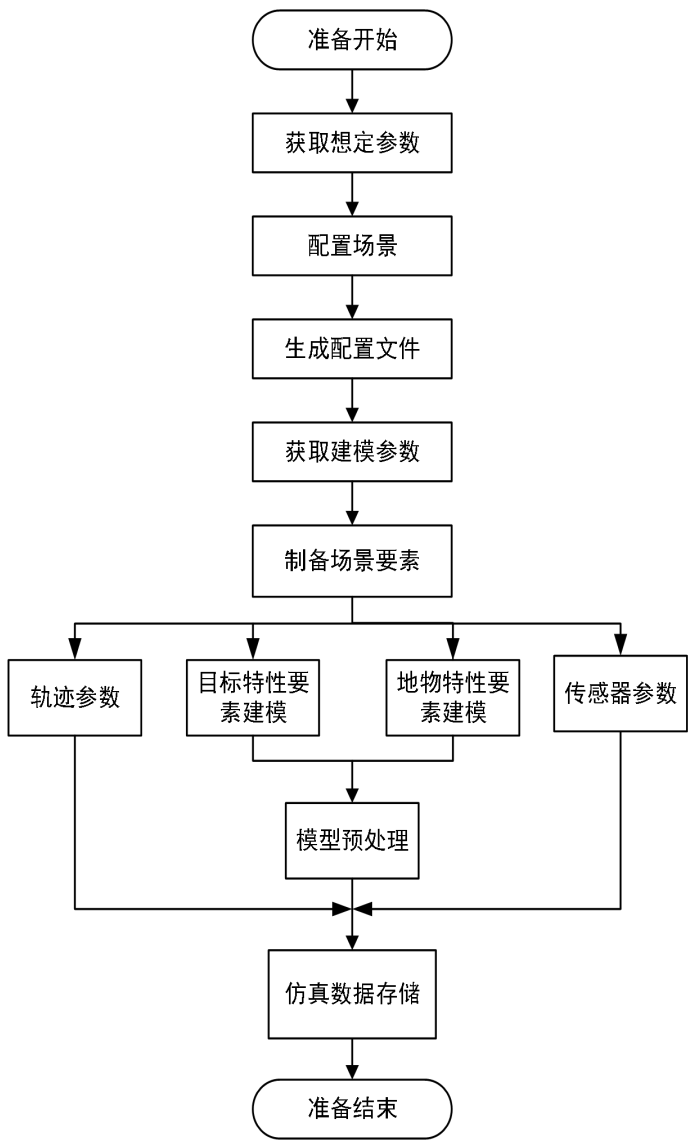


图 2 准备阶段工作流程图

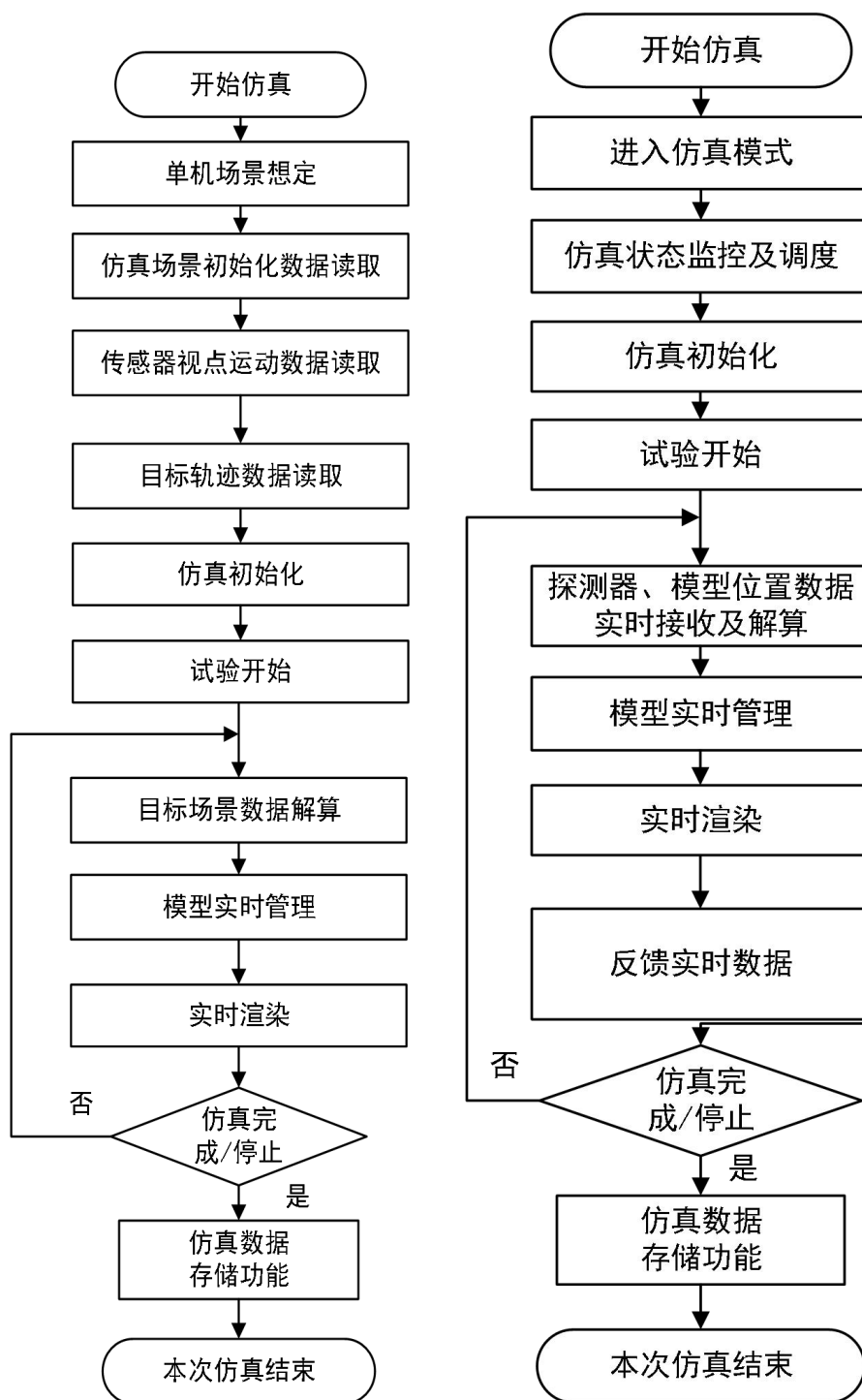


图 3 单机/联机预演仿真工作流程

1.1.5 界面设计

软件界面整体采用分区设计，如下图所示。界面上部用户可以切换工作模式，可以通过界面显示内容控制选项修改显示内容，可以通过快捷工具执行常用指令。左侧场景列表可以添加场景元素，右侧是

场景构建元素的详细参数设置区，可进行参数的设置。



图 4 仿真战情想定及模型配置界面



图 5 场景环境设置界面



图 6 配置管理



图 7 视场角、分辨率、刷新率、渲染窗口位置控制



图 8 运动轨迹设置和导入

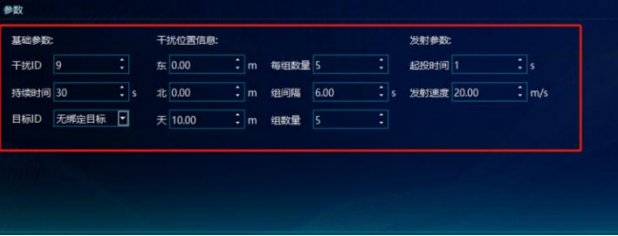
1.1.6 场景构建想定模块设计

1.1.6.1 模块组成

仿真场景构建模块由参数输入子模块、图像预览子模块和轨迹编辑子模块组成。



删除[wyc]:
仿真场景配置方案存储、导入、修改



干扰参数设置



视点、场景、运动控制



本地数据文件和接收网络通讯数据

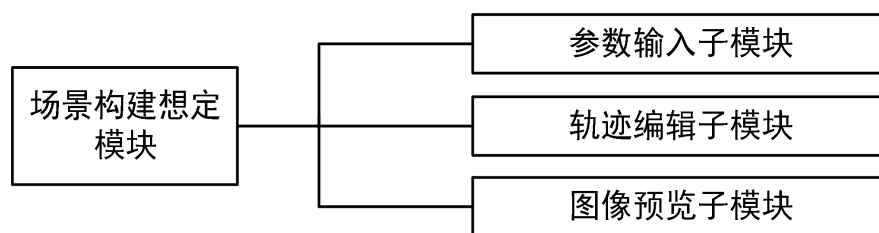


图9 仿真场景构建模块组成

场景构建想定模块集成了场景编辑功能，可接收用户输入参数完成仿真场景想定的构建，生成对应想定配置文件，为场景要素建模模块提供输入约束，用于制备单次试验所需可见光/红外仿真波段下的目标与背景模型，完成仿真场景的构建；同时可完成传感器参数定义，为传感器响应场景生成模块提供仿真波段、渲染分辨率、视场大小等输入数据。此外，该模块集成了配置预览功能，可加载已制备完成的模型数据，实现仿真场景的效果预览，便于用户对配置方案进行动态调整与修改。该模块还集成了目标轨迹制备交互功能，可基于用户通过鼠标绘制的贝塞尔曲线生成目标运动轨迹，为目标运动提供驱动输入。

（1）参数输入子模块

参数输入子模块主要接收用户输入参数，实现仿真场景想定配置，具体功能包括：

a) 添加、复制以及删除目标、背景、干扰、云、传感器等实体数量；

b) 定义目标实体参数，如：类型、名称、方向、、姿态、位置、大小、运动轨迹（正弦、直线、圆圈等）、目标模拟距离、相对目标的模拟逼近速度、目标机动速度、正弦模式（设定振幅、频率、相位）和匀速模式（设定航向/俯仰角速度常量）、亮度、对比度。

c) 定义背景实体参数，如：类型、位置、亮度、对比度；

d) 定义干扰实体参数，如：类型、起头时间、持续时间、间隔时间、发射位置、发射方向、辐射亮度及拉偏参数；

e) 定义传感器实体的相关参数，如：位置、姿态、分辨率（可设置 1920×1080，1024×768 和 800×600 等典型仿真图像分辨率）、视场范围(0-90°)、视点速度、位置、观察方位、波段范围(可选择 3~5μm、8~12μm、0.4~0.85μm 波段，并设置起始波长和截止波长)、运动状态、锁定方式等；

f) 定义时空参数，如：仿真时间、空间坐标设置（x、y、z 轴坐标值）；

g) 定义仿真频率；

（2）轨迹制备子模块

轨迹编辑子模块主要通过交互界面获取用户鼠标绘制的贝塞尔曲线，依据贝塞尔曲线生成实体目标运动轨迹路径；

（3）图像预览子模块

读取已制备的模型，生成预览场景。

1.1.6.2 工作流程

场景构建想定模块工作流程如下图所示：

删除[wyc]: h) 定义传入的外部输入数据：如外场试验数据（文本/二进制）、实拍数据、仿真图像等以视频或数据文件格式，可处理的图像格式包括：RGB、RGBA、INT、INTA、JPG、JPEG 和 BMP 等。
i) 试验模式选择，试验视角选择（下视、前视）；

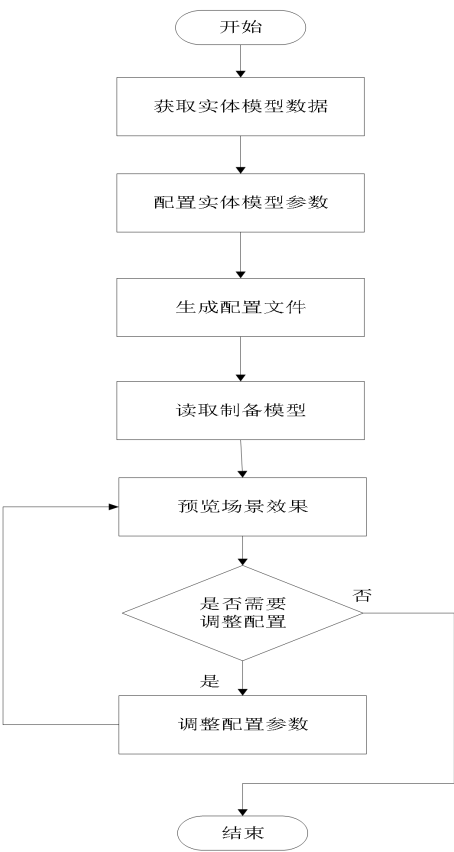


图 10 场景构建想定模块工作流程

1.1.6.3 模块输入

场景构建想定模块输入与输出一致，见场景构建想定模块输出配置文件。

1.1.6.4 模块输出

场景构建想定模块输出配置文件见下表。

表 3 场景构建想定文件

序号	名称	类型	描述
1	目标参数	Struct	i=1...n，为目标个数
2	背景参数	Struct	/
3	干扰参数	Struct	j=1...m，m 为干扰个数
4	环境名称	String	/
5	仿真时间	DateTime	/

序号	名称	类型	描述
6	经纬度	Double[2]	0=纬度 1=经度
7	环境参数	Struct	/
8	传感器波段	Double[2]	可选择可见光、中波红外、长波红外仿真波段，并设置起始波长和截止波长
9	传感器帧频	Int	10~60Hz
10	传感器分辨率	Int[2]	/
11	传感器视场范围	Double[2]	/
12	传感器位置	Double[3]	/
13	传感器姿态	Double[3]	/
14	传感器运动状态	Struct	包含运动方式，运动方向，运动速度，运动轨迹等。

1.1.7 场景要素建模模块

场景要素建模模块由模型转换子模块和模型预处理子模块组成。
场景要素建模模块主要用于为软件制备仿真过程需要的目标、背景等模型数据。

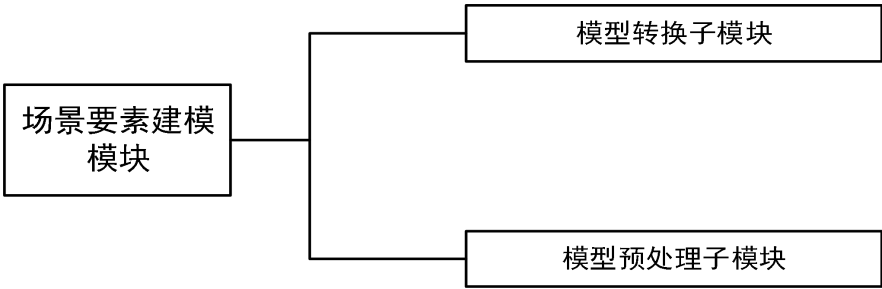


图 11 场景要素建模模块组成

- 场景要素建模模块的全部功能如下：
- a) 导入目标与背景模型，将其转换为渲染引擎可调度的数据格式；
 - b) 内置通用目标与背景材质库，支持对库中材质数据执行新增、

删除与修改操作；

c) 提供数据导入接口，可读取辐射特性原始数据或其他特性生成软件输出的标准辐射特性数据，并以此构建材质；

d) 支持卫星遥感数据的材质分割功能；

e) 具备目标与背景辐射特性计算能力，可基于计算结果生成红外纹理。

1.1.7.1 工作流程

首先加载目标三维模型，同时加载设定条件下的目标辐射亮度分布数据；建立辐射亮度分布数据与三维几何模型表面面元之间的对应关系，通过插值对目标几何模型的面元逐一赋值，得到含红外辐射亮度数据的三维几何模型。设定红外辐射亮度与灰度之间的对应关系，将含有红外辐射亮度数据的三维几何模型每个面元的红外辐射亮度转换为灰度值，得到目标三维几何模型的灰度模型，将灰度模型保存至本地硬盘，过程如下图所示。

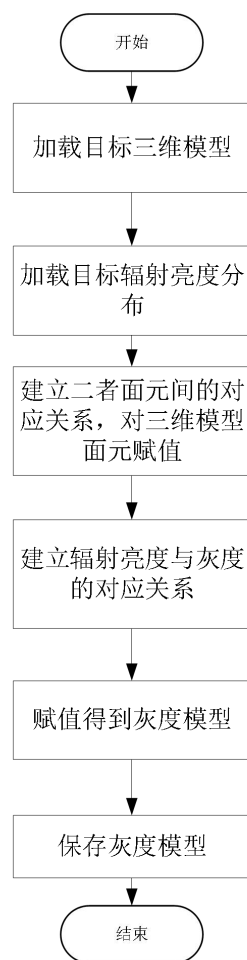


图 12 目标灰度模型建立流程

地面灰度模型的生成过程与目标灰度模型的生成过程类似，如下图所示。从本机加载地面几何模型，同时加载材质库中的地面反射率模型；根据纹理参数和计算条件，从地面背景实测温度库中插值计算地面温度；根据理论公式，计算地面本身的红外辐射亮度；根据辐射亮度与灰度的对应关系，将红外辐射亮度转化为灰度；最后将灰度模型保存至本地模型库。

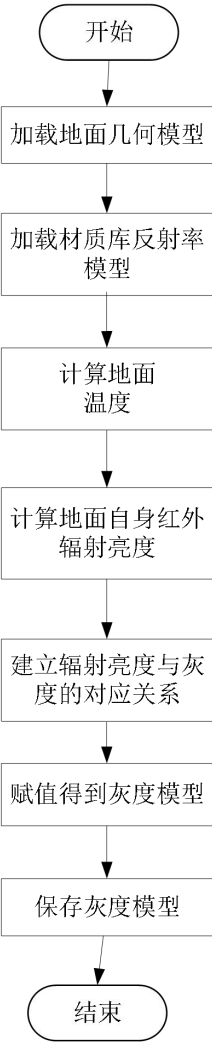


图 13 地面灰度模型建立流程

1.1.7.2 模块输入

模型预处理子模块输入参数见下表。

表 4 模型预处理子模块输入参数

序号	名称	类型	量纲	描述
1	时间	QString	/	年月日时
2	环境温度	double	℃	/
3	环境湿度	double	%	/
4	压强	double	hpa	/
5	能见度	double	km	/

序号	名称	类型	量纲	描述
6	风速	double	m/s	/
7	经纬度	QString	/	北纬为正，南纬为负；东经为正，西经为负
8	辐射对应关系	Bool	/	/
9	起始波段	double	um	/
10	终止波段	double	um	/
11	最低灰度	int	/	0
12	最高灰度	int	/	8 位为：255；16 位为：65535；
13	最低温度	double	°C	/
14	最高温度	double	°C	/
15	场景最低辐射亮度	double	W/(sr·m²)	/
16	场景最高辐射亮度	double	W/(sr·m²)	/
17	场景最低温度	double	°C	/
18	场景最高温度	double	°C	/
19	材质特性数据	QString	/	/
20	材质名称	QString	/	/
21	材质温度	Struct	°C	/
22	材质反射率	double	/	/
23	材质导热系数	double	W/m.k	/
24	材质密度	double	g/cm³	/
25	材质比热	double	Kcal/Kg°C	/
26	材质标志色	QString	/	/
27	材质辐射	Struct	W/(sr·m²)	/
28	场景灰度等级	int	/	/
29	高位灰度	int	/	/
30	图像颜色	int 结构	/	RGB 值
31	带有辐射特性的二维数据结构	Struct	/	/

序号	名称	类型	量纲	描述
32	带有辐射特性的三维 网格模型	Struct	/	/

1.1.7.3 模块输出

表 5 模型预处理子模块输出参数表

序号	名称	类型	量纲	描述
1	材质贴图	Bmp 文件	/	/
2	材质发射率	double	/	/
3	材质温度	double	k	/
4	材质条件数据	Struct	/	/

1.1.7.4 实现原理

1.1.7.4.1 目标/背景几何建模

目标/背景几何建模可划分为目标几何建模与背景几何建模两类。其中，地物背景建模通常依托真实地形的遥感测量数据，通过适配的坐标转换方法构建得到三维网格模型；目标建模则依据目标的实际物理尺寸完成三维模型的构建。纹理制作阶段，为同一目标制作两套独立的模型 + 纹理资产，按相机到模型包围球的真实物理距离自动切换档位。

1) 目标建模

据目标的结构和外形几何参数，使用 3DS Max、MultiGen Creator 等三维建模软件完成三维目标模型的建立。为建立的目标模型创建 UV 坐标，目的是建立模型表面与纹理映射坐标关系，方便后续工作将目标纹理映射于目标表面。下图为目标建模流程和多种目标的几何设计网格图。

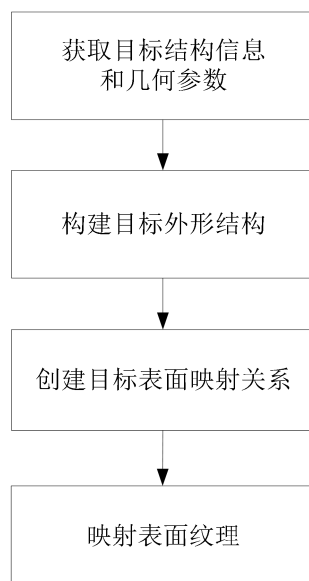


图 14 目标建模流程

2) 地物背景建模

在地物背景建模构建流程主要有：地面三维几何信息获取、地面三维几何模型构建、地形优化。

a) 地面三维信息获取

获取卫星遥感影像，通过地理信息系统软件（如 ArcGIS）对影像精度进行矫正从而得到每张航测图片的精确位置，为构建模型提供真实有效的数据和信息，在本项目中，可通过购买等方式获取地面三维信息。

b) 地面三维几何模型构建

数字高程数据是描述地表空间坐标和地貌特征分布的信息集合，它以获取的地面三维信息作为数据基础，将某真实地理区域内的地貌以三维空间的方式表示在二维平面上。

在地形几何模型构建中，利用地理信息系统软件对数字高程数据进行处理，导出数据信息，包括经度数据、纬度数据、海拔、地形范

围等；然后，对数字高程数据进行数据转换，生成 DEM 或 DET 格式，此格式通过灰度图像，反应地形高度变化；最后，将生成 DEM 或 DET 数据导入三维建模工具（如 3DS MAX），根据场景大小、地形精细度、地形经纬度、最大最小海拔等需求在地形生成插件的编辑器面板修改调节各种参数，采样生成面精度为 10 万的几何地形网格。对几何地形三维网格进行细节修改，清除褶皱、缝隙等瑕疵。下图展示了数字高程数据到几何地形三维网格转换的简例。

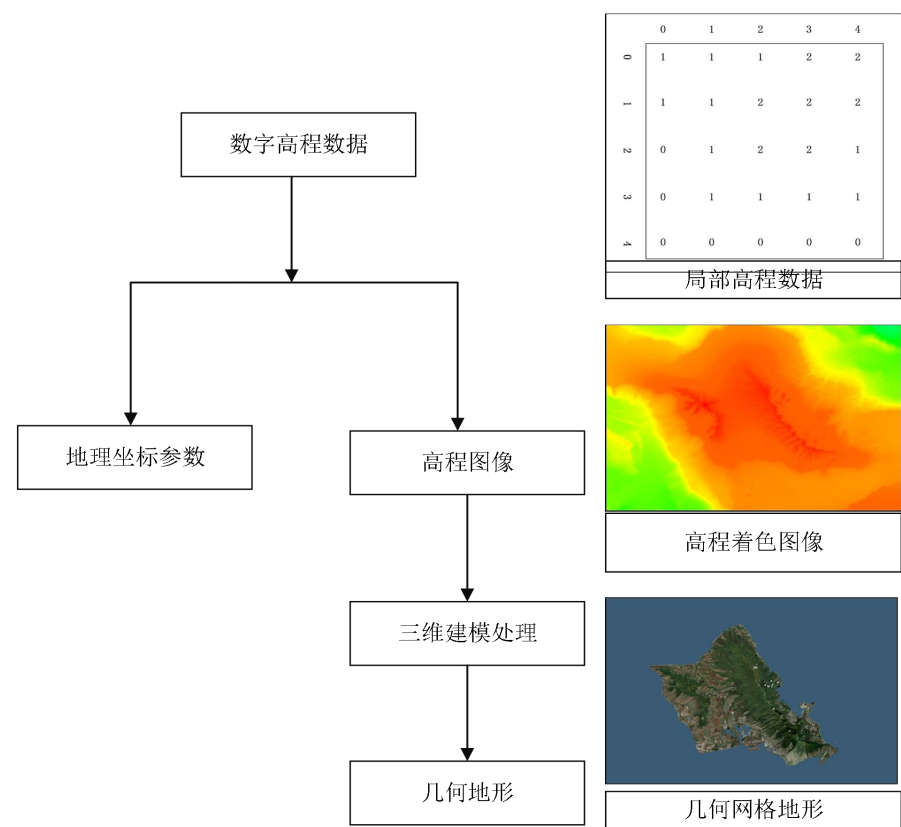


图 15 地形几何网格生成

1.1.7.4.2 目标红外辐射建模

算法流程如下图所示，调用模型网格数据，考虑外界与目标自身的各种影响因素，建立温度平衡方程，解算生成模型的温度分布函数。工程算法使用的算法包括有限元法、窄谱带 K 分布法、视在光线法

(LOS) 和反蒙特卡洛法 (RMCM)。其中空中目标、海面目标和地面目标的蒙皮表面温度分布求解都使用有限元法。对于空中目标的尾焰辐射特性：采用窄谱带 K 分布法求解尾焰气体的辐射物性；若尾焰为纯吸收气体，采用 LOS 求解尾焰的光谱辐射强度；若尾焰为散射型介质，采用 RMCM 求解尾焰的光谱辐射强度。

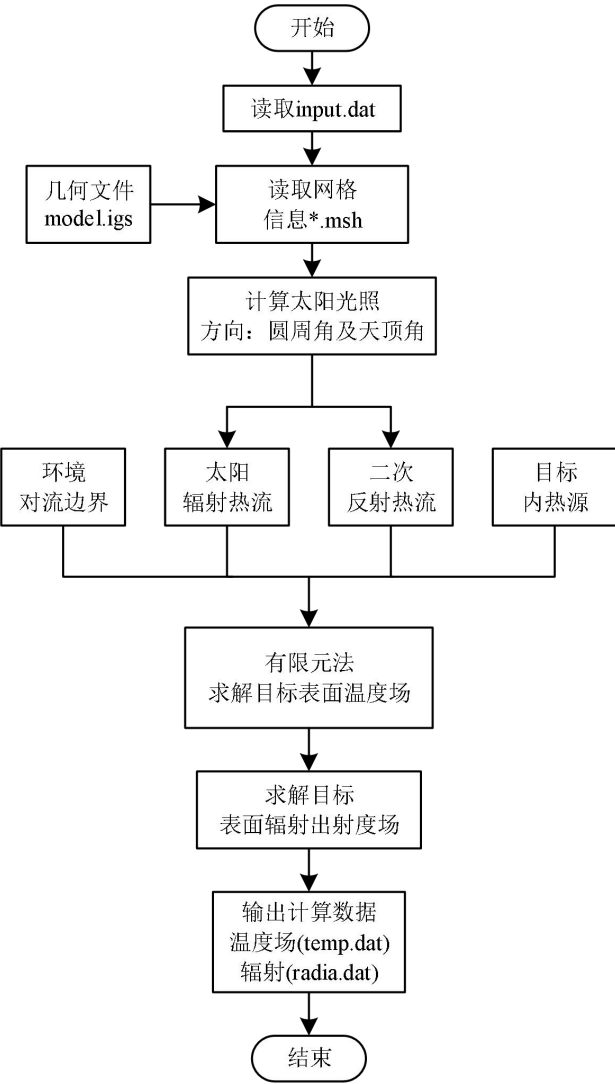


图 16 目标蒙皮辐射场解算流程

②空中目标表面温度求解

首先根据用户输入纬度、飞行高度、计算月份和日期计算太阳入射方向，需要建立三个坐标系：地日坐标系 $i-j-k$ 、地球表面坐标

系 w—s—u 和车辆坐标系 x—y—z。

地球中心和太阳之间的连线与地球的赤道平面之间的夹角 γ 可由下式计算：

$$\gamma = 23.5^\circ \frac{\pi}{180} \sin \alpha$$

式中， α —某一年中的第 n 天（从 1 月 1 日开始）地球中心和太阳的连线扫过的角度（设 3 月 21 日（春分），即第 80 天的角度为零）。

$$\alpha = (n - 80) \cdot \frac{2\pi}{365}$$

经过两次坐标转化过程，将 $i—j—k$ 坐标系内太阳光方向的方向数转换为车辆 $x—y—z$ 坐标系中的方向数。进一步求得 $x—y—z$ 坐标系中太阳光方向的周向角 φ_{sun} 和天顶角 θ_{sun} ：

$$\theta_{sun} = \cos^{-1} \left(z / \sqrt{x^2 + y^2 + z^2} \right)$$

$$\varphi_{sun} = \cos^{-1} \left(x / \sqrt{x^2 + y^2} \right)$$

接下来计算太阳对目标表面任意面元 i 的一次辐射热流率：

$$Q_i^{sun} = H_{sun} \sum_{mp=1}^{M_{b,sun}} \alpha_i^{mp} B_{T_{sun}}^{mp} \left(A_{i,pro}^{sun} P_{irr} + A_i P_{sca} \right)$$

式中， H_{sun} ——太阳入射方向上的辐射照度(W/m²)；

A_i ——面元 i 的几何面积(m²)；

P_{irr}, P_{sca} ——太阳辐射中的直射和散射份额；

α_i^{mp} ——太阳辐射源下面元 i 的第 mp 谱带的表面吸收率；

$B_{T_{sun}}^{mp}$ ——太阳表面温度 T_{sun} 下， mp 谱带范围内黑体辐射能的份额；

$A_{i,pro}^{sun}$ ——考虑其他面元遮挡的前提下面元 i 被太阳照射到的部分在太阳入射方向上的投影面积(m²)。

面元 i 的太阳入射投影面积 $A_{i,pro}^{sun}$ 可由下式计算：

$$A_{i,pro}^{sun} = RD_areai \cdot A_{i,pro}$$

式中，RD_areai——面元 i 的太阳一次投射辐射份额；

Ai,pro——面元 i 未考虑遮挡时的总投影面积(m2)。

若该面元被其他面元遮挡，未被太阳照射到，则令面元*i*的太阳一次投射辐射份额 RD_areai 的值为 0，否则为 1。

然后进行二次辐射热流计算，太阳对目标表面任意面元*i*的间接辐射热流率为：

$$Q_{i,refle,j}^{sun} = H_{sun} \sum_{mp=1}^{M_{b,sun}} \sum_{j=1}^{M_s} X_{j,i}^{mp} \alpha_i^{mp} (1 - \alpha_j^{mp}) B_{T_{sun}}^{mp} (A_{j,pro}^{sun} P_{irr} + A_j P_{sca})$$

式中， $X_{j,i}^{mp}$ ——在 *mp* 谱带微元面 *j* 对微元面 *i* 的角系数。

微元面 *j* 对微元面 *i* 的角系数可由下式求出：

$$X_{j,i}^{mp} = \frac{A_i \cos \theta_i \cos \theta_j}{\pi d^2}$$

式中：Ai——微元面 i 的面积(m²)；

d——两微元面间的距离(m)；

cosθ_i,cosθ_j——面元 *i* 和 *j* 的法向与两微元面中心连线间夹角的余弦值。

计算完成太阳的一次辐射、二次辐射热流，结合用户输入的内热源参数、环境温度参数。将上述参数作为边界条件求解导热微分方程，求解采用有限元法。首先给出导热微分方程：

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(k_x \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k_y \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k_z \frac{\partial T}{\partial z} \right) + Q = 0$$

将求解域划分为大量不相互重叠的有限单元Ω_e。在每一个单元上，导热微分方程的逼近解都是由规定函数的线性组合组成：

设置格式[wyc]: 上标

$$\bar{T}(x, y) = \sum_{\Omega_1}^{i=1, P} C_i^{(1)} N_i^{(1)}(x, y) + \sum_{\Omega_2}^{i=1, P} C_i^{(2)} N_i^{(2)}(x, y) + \lambda + \sum_{\Omega_M}^{i=1, P} C_i^{(M)} N_i^{(M)}(x, y)$$

对每个单元内各点的温度分布由单元节点的温度插值，并计算积分贡献：

$$\begin{aligned} & \sum_{e=1}^M \int_{\Omega_e} \left[\frac{\partial N_i^e}{\partial x} k_x \frac{\partial \bar{T}^e}{\partial x} + \frac{\partial N_i^e}{\partial y} k_y \frac{\partial \bar{T}^e}{\partial y} + \frac{\partial N_i^e}{\partial z} k_z \frac{\partial \bar{T}^e}{\partial z} \right] d\Omega \\ & - \sum_{e=1}^M \int_{\Omega_e} N_i^e Q d\Omega + \sum_{e=1}^M \int_{\Gamma_{qe}} N_i^e \bar{q} d\Gamma = 0 \end{aligned}$$

进一步得到单元逼近方程为：

$$K_{ij}^e T_j^e = f_i^e \quad i, j = 1, P$$

单元热传导矩阵 K_{ij}^e 和单元载荷矩阵为 f_i^e 分别由下式表示：

$$\begin{aligned} K_{ij}^e &= \int_{\Omega_e} \left[\frac{\partial N_i^e}{\partial x} k_x \frac{\partial N_j^e}{\partial x} + \frac{\partial N_i^e}{\partial y} k_y \frac{\partial N_j^e}{\partial y} + \frac{\partial N_i^e}{\partial z} k_z \frac{\partial N_j^e}{\partial z} \right] d\Omega + \int_{\Gamma_{qe}} h N_i^e N_j^e d\Gamma \\ f_i^e &= \int_{\Omega_e} N_i^e Q d\Omega + \int_{\Gamma_{qe}} h T_f N_i^e d\Gamma \end{aligned}$$

K_{ij}^e 根据有限元形函数给出。

1.1.7.4.3 背景（地物）红外辐射建模

a) 地物红外纹理总体建模流程

地物背景红外纹理的生成是基于卫星遥感影像数据（简称卫片数据）构建的，卫星遥感影像是现实世界的直接反映，能真实直观、自然生动地表现各种自然地貌、景物的分布与细节变化，所以基于可见光遥感图像生成大规模地物红外纹理能有效地提高红外纹理的真实感，红外地物纹理生成流程如下：

- 1) 获取卫星遥感影像，通过动态算法对地物区域进行特性分析，依据 HSL 模型对影像区域进行分割；
- 2) 依据分割范围创建材质分布，并设置材质属性；

- 3) 获取材质属性，利用地物热特征模型计算材质的宏观温度；
- 4) 输出材质宏观温度特征，结合材质相应波段的发射率、反射率等光学物理属性，基于材质区域分布图对全场景进行红外特征映射与合成，生成特定环境及大气条件下的基本红外纹理。
- 5) 生成高真实感的地物红外纹理。

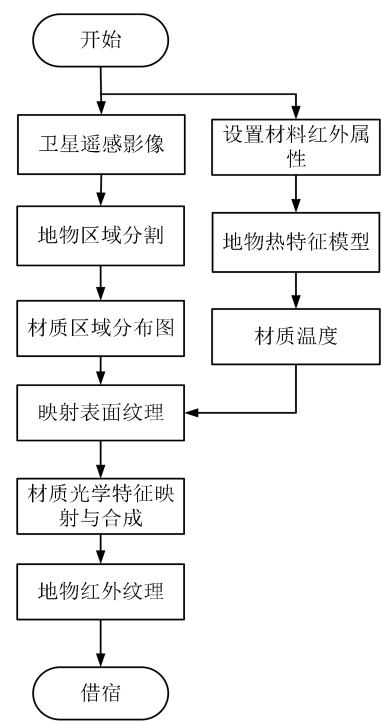


图 17 红外地物纹理生成流程

b) 地物材质分割

为了将卫星遥感影像中所反映的各种地物分布、纹理特征等信息独立出来，需要进行图像分割。

可见光遥感影像中不同材质在可见光范围中呈现的颜色或由颜色组成的纹理不同，且差异明显。然而以色相的方式进行呈现，不同材质的地面背景表现出良好的典型值聚集特征，同时有效克服了反光高亮、阴影深暗对识别带来的干扰。因此基于 HSL/HSV/HSI/HSB 模型，以色相值为基础进行图像分割和识别成为本项目研究的主要方向。

下图中是以色相值、饱和度、亮度值为依据对不同层级不同地面背景分割和识别效果。其中红色、紫色代表植被，蓝色代表植被和土壤混合体。

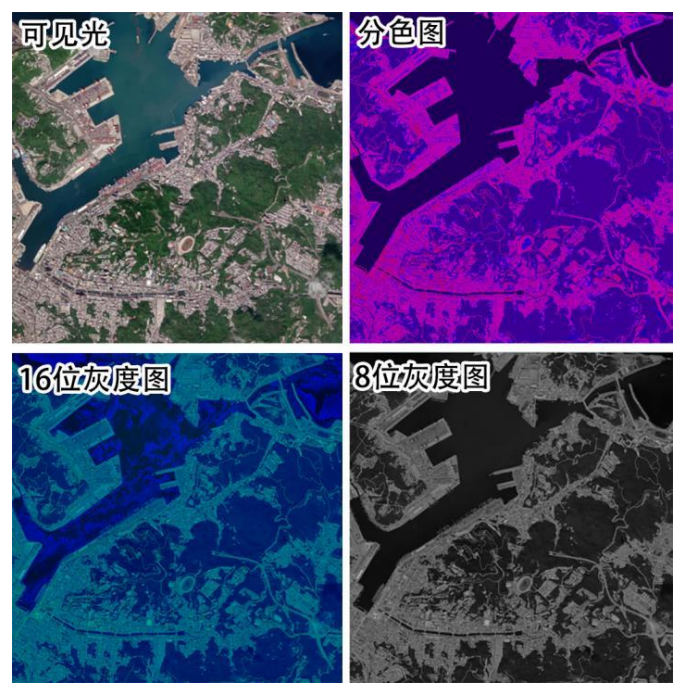


图 18 黑色代表水域或冰雪

一般的卫星遥感影像采用 RGB 颜色模型，需要转换成 HSL 颜色进行进一步分割和识别处理。使用色相图主要目的是以比较直观的方式观察通过色相对不同地面背景区分和分割效果，实际在图像的分割和识别中将以最短路径原则计算颜色差值，避免颜色区域导致的差值跳变问题。

基于 HSL 颜色模式边缘检测有探测延展方式、探测头选取、检测起点、探测灵敏度方面等具体做法，可以分析道路与建筑物顶部、港口路面与水域、冰雪与岩石等一般或特殊场景。识别中需要地面背景的红外材质库对识别结果进行相应的映射。

(1) 地物背景建模

在地物背景建模构建流程主要有：地面三维几何信息获取、地面

三维几何模型构建。

a) 地面三维信息获取

获取卫星遥感影像，通过地理信息系统软件（如 ArcGIS）对影像精度进行矫正从而得到每张航测图片的精确位置，为构建模型提供真实有效的数据和信息，在本项目中，可通过购买等方式获取地面三维信息。

b) 地面三维几何模型构建

数字高程数据是描述地表空间坐标和地貌特征分布的信息集合，它以获取的地面三维信息作为数据基础，将某真实地理区域内的地貌以三维空间的方式表示在二维平面上。

在地形几何模型构建中，利用地理信息系统软件对数字高程数据进行处理，导出数据信息，包括经度数据、纬度数据、海拔高度、地形范围等；然后，对数字高程数据进行数据转换，生成 DEM 或 DET 格式，此格式通过灰度图像，反应地形高度变化；最后，将生成 DEM 或 DET 数据导入三维建模工具（如 3DS MAX），根据场景大小、地形精细度、地形经纬度、最大最小海拔高度等需求在地形生成插件的编辑器面板修改调节各种参数，采样生成几何地形网格。对几何地形三维网格进行细节修改，清除褶皱、缝隙等瑕疵。下图展示了数字高程数据到几何地形三维网格转换的简例。

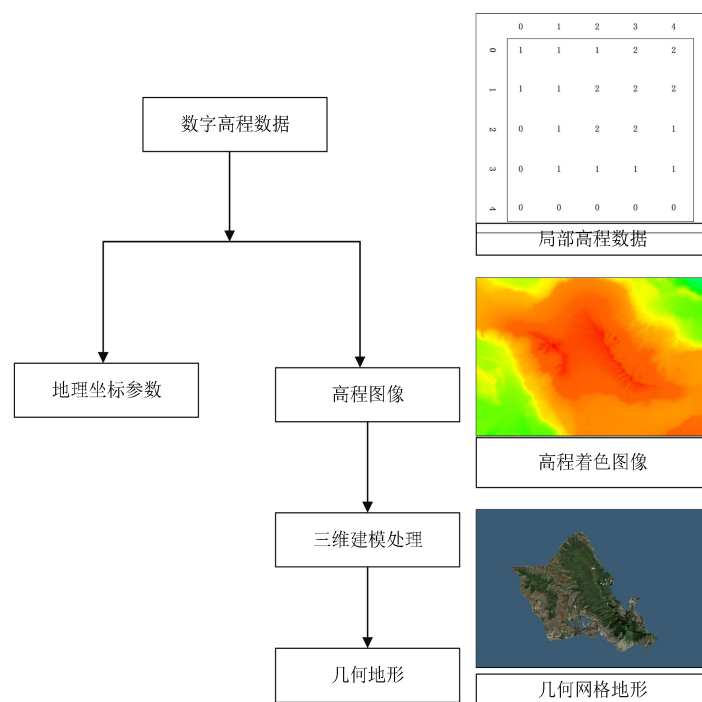


图 19 地形几何网格生成

(2) 地物红外纹理生成

地物红外纹理生成主要指的是对陆地区域的红外特性的计算，具体实现原理：通过热物理特性模型，利用可见光纹理上的相关信息，在可见光图像上对材质进行物理材质分类，不同材质具有不同的热物理特性。对于一定环境下的物体来说可通过物理特性模型建立该物体的均值温度。通过红外材质映射工具，由可见光纹理对材质进行分类并结合相关参数生成红外纹理。红外纹理与可见光纹理的每个像素是一一对应的关系，因此，可在实时仿真过程中，通过材质响应工具计算，实时生成相关模型纹理的红外灰度纹理信息。

a) 地物宏观温度计算

材质的辐射亮度在很大程度上由温度决定，温度场的分布可以大致反映地物表面的红外辐射特性分布。场景中不同材质的温度不仅与自身材料、结构、热属性有关，还与大气以及周围的环境参数有关。

因此要获得真实的温度场分布需要针对不同材质建立相应的热特征预测模型，计算在特定条件下的辐射特性。通过联立求解地表热传导方程和热平衡方程便可求得地表的宏观温度场分布。地物材质的长度、宽度远远大于其厚度。为减少计算的复杂度，可将这种地物视为一维导热材质，忽略热量在水平方向的传导。热传导仅在材质厚度方向上进行，并满足一维热传导方程：

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\lambda_g}{\rho C} \cdot \frac{\partial^2 T}{\partial Z^2}$$

其中： T 为绝对温度， t 为时间， λ_g 为介质导热率， ρ 为材料密度， C 为深度坐标上述方程的求解需要确定其边界条件。通常地下温度的变化率随着深度增加而减小。到一定深度后，温度不再变化，热通量趋于零。而其上边界条件主要是由通过分析地表的热量传递关系建立的地表热平衡方程决定，如下图所示，地物表面进行的热交换主要有：地物自发辐射、地物吸收的太阳辐射以及大气辐射、地表与周围空气之间进行的显热交换和潜热交换、地物向下传导的热量。

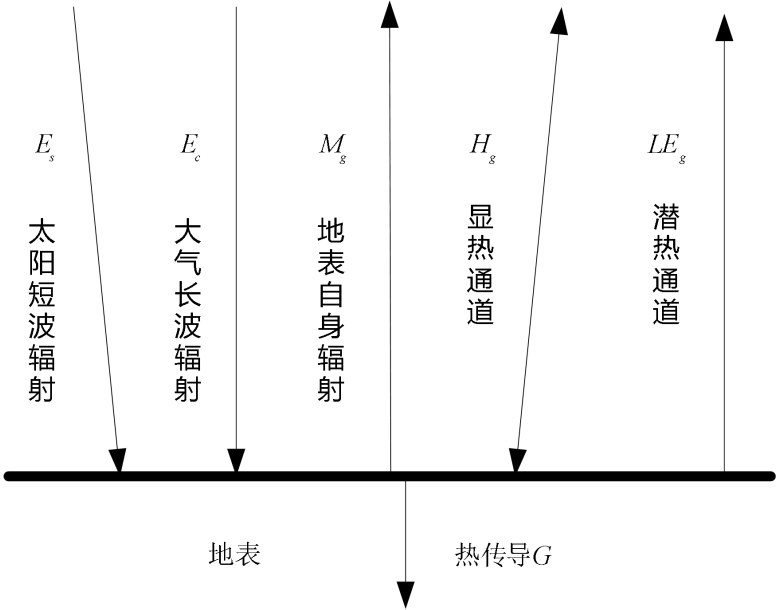


图 20 地表热交换

上述可表示为如下热平衡方程：

$$\alpha_s E_{sun} + \varepsilon_l E_{sky} - M_g - H_g - LE_g - G = 0$$

其中： $\alpha_s E_{sun}$ 是吸收的太阳短波辐射； $\varepsilon_l E_{sky}$ 是吸收的大气长波辐射； M_g 是地表热辐射； H_g 是地表与大气的显热交换通量； LE_g 是地表与大气的潜热交换通量； G 是地表对下层的热传导项。

b) 温度场调制模型

在热特征预测模型中，研究发现地表的短波吸收率 a_s 对材质温度影响较大， a_s 与温度近似满足线性关系。可见光波段的辐射总能量约占太阳辐射总能量的 46%，因此可将可见光波段的吸收率来作为评估地表吸收太阳辐射能量的参考，利用可见光波段的吸收率与温度的关系，建立基于可见光纹理的温度场调制模板。调制公式如下：

$$T(\alpha_s, t) = T(\bar{\alpha}_s, t) + K_2(t) K_3 \cdot (\alpha_v - \bar{\alpha}_v)$$

$$K_3 = \frac{\alpha_s}{\alpha_v}$$

其中： $T(\bar{\alpha}_s, t)$ 表示在 t 时刻，当地物材质的平均短波吸收率为 $\bar{\alpha}_s$ 时温度预测值； $K_2(t)$ 是 t 时刻、材质温度随短波吸收率变化的梯度参数； K_3 是材质短波波段吸收率与可见光波段吸收率的比例因子； a_s 材质短波吸收率，为材质可见光波段吸收率， $\bar{\alpha}_v$ 为可见光波段平均吸收率。

根据基尔霍夫定律可得：

$$\alpha_v = 1 - \rho_v = \frac{\rho_v E_{sun_r} + \rho_g E_{sun_g} + \rho_b E_{sun_b}}{E_{sun}} = c_r \rho_r + c_g \rho_g + c_b \rho_b$$

其中， c_r, c_g, c_b 分别表示红、绿、蓝三个波段内太阳辐射能量占可见光波段太阳辐射总能量的比例，与具体探测器波段范围有关。若设

红、绿、蓝探测器波段范围分别为 0.6~0.7、0.5~0.6、0.4~0.5， c_r, c_g, c_b 分别取为 0.34、0.36、0.3； p_i 是相应波段的可见光反射率。假设反射率为 1 时图像传感器能达到最高灰度（灰度为 8 位精度时最高值是 255），则

$$\rho_i = \frac{Gray_i}{255}$$

实际计算时，首先根据可见光纹理提取的相关信息，并计算所有像素点的可见光波段吸收率，然后根据地物材质区域分布图，分别计算每种材质的可见光平均吸收率；最后将材质可见光波段吸收率 α_v 、可见光波段平均吸收率 $\bar{\alpha}_v$ 和材质宏观温度代入温度细节调制模板，即可完成对温度场的微观调制，增加红外纹理的细节。

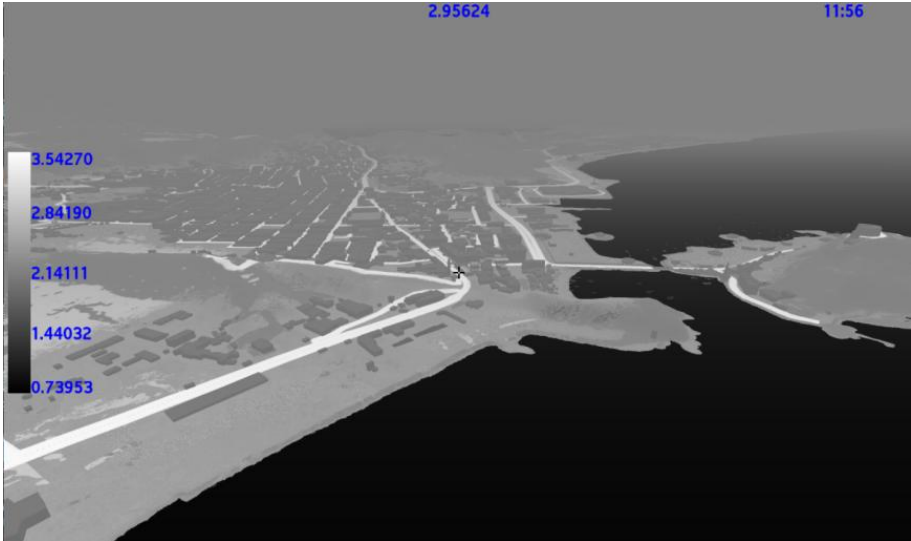


图 21 海港中波仿真效果图

1.1.8 干扰建模模块

1.1.8.1 功能设计

干扰建模模块实现假目标、伪装网、火焰、背景云、三维云、诱饵、烟雾、水幕、雨、雪、雾、霾等典型干扰的建模。

上述干扰按实现方式分为三类：假目标、伪装网以三维模型实现；三维云、背景云采用广告牌技术与粒子系统实现；烟雾、诱饵、火焰、

删除[wyc]: 大气传输特性建模子模块

模块功能

大气传输特性建模子模块为用于计算特定条件下，大气透过率、大气路径辐射、天空背景辐射、临边大气透过率等参数，模块基于 Modtran 软件进行开发，模块功能包括：

- a)大气水平光谱透过率计算；
- b)大气斜程光谱透过率计算；
- c)大气光谱散射辐射计算；
- d)大气热辐射光谱计算；
- e)大气太阳直接光谱辐照度计算；
- f)临边大气透过率计算；
- g)临边热辐射计算；
- h)折返路径太阳辐照度；
- i)不同高度、不同仰角下的天空背景辐射计算；
- j)设定条件下的太阳辐射计算；
- k)生成大气传输特性模型数据库，供图像实时渲染调用。

大气特性建模子响应精度如下：

- a)波段范围：可见光、中波红外、长波红外、激光，波段范围内可任意设置起始波长和截止波长。
- b)大气透过率：1-25000cm-1 或 0.4—10000μm
- c)大气散射辐射：2000-25000cm-1 或 0.4-5μm
- d)大气热辐射：1-20000cm-1 或 0.5-10000μm
- e)单次计算速度<2s。
- f)光谱分辨率

- 1)1 cm-1（可见光到微波波段 0.4-10000μm）
- 2)0.1 cm-1（红外到微波波段 1-10000μm）
- g)计算精度

和精确地逐线积分法（LBLRTM）计算软件的均方根差小于 3%，同实际测量比较偏差小于 10%

h)大气模式

包括我国三个典型地区逐月平均的大气模式和 6 种(美国)标准大气模式，我国内陆沿海、沙漠、戈壁、高山、城乡等地的大气参数模式。

模块输入

大气传输特性建模子模块输入如下表所示。

大气传输特性建模子模块输入参数表

序号	名称	类型	量纲	描述
1	地理位置	Struct	度	北纬为正，南纬为负；东经为正，西经为负
2	北京时间	Struct	/	年月日小时

水幕、雨、雪、雾、霾等采用粒子系统结合物理机理模型实现。

1.1.8.2 输入参数

表 6 干扰建模功能输入参数表

序号	类别	名称	类型
1	诱饵参数	发射源数量及 ID	Struct
2		发射源位置	Struct
3		诱饵弹投放参数	Struct
4		诱饵弹类型	Struct
5		发射参数	Struct
6		光学特征参数	Struct
7	烟雾	烟雾发射批数及 ID	Struct
8		烟雾发射源位置	Struct
9		烟雾发射参数	Struct
10		烟雾运动参数	Struct
11		烟雾几何参数	Struct
12		烟雾光学特征参数	Struct
13		烟雾透过参数	Struct
14		扩散倍数	Int
15	水幕干扰	开始时间	int
16		弹目距离	double
17		持续时间	unsigned int
18		干扰运动状态	unsigned char
19		干扰位置 X	double
20		干扰位置 Y	double
21		干扰位置 Z	double
22		干扰运动文件名称	char[512]
23	火焰	火源位置	struct
24		火焰温度	Double
25		火焰持续时间	Double

序号	类别	名称	类型
26		火焰几何尺寸	struct
27	云层	云类型	Enum
28		云高	double
29		云厚	double
30		覆盖面积	struct

1.1.8.3 输出参数

表 7 干扰建模功能输出参数表

序号	名称	类型	量纲	描述
1	诱饵模型数据	二进制粒子	/	/
2	烟雾模型数据	二进制粒子	/	/
3	烟雾喷射模型数据	二进制粒子	/	/
4	雨雪干扰	序列图	/	/
5	假目标、伪装网	模型	/	/
6	火焰	序列图/二进制粒子	/	/
7	水幕	二进制粒子	/	/
8	云层	二进制粒子	/	/

1.1.8.4 实现原理

1.1.8.4.1 雨、雪、雾、霾干扰模型

恶劣天气如雨雪雾会影响红外/可见光探测设备的图像质量和准确性，降低探测系统性能。由于探测器和成像原理不同，模拟的雨雪雾图像结果也会有所不同。其中，对于雨雪效果的实现，软件提供通过添加雨滴、雪花的实拍图作为效果层放置在入瞳处，或使用粒子系统模拟雨滴、雪花的落下效果两种方式，最终实现雨雪效果的模拟。

1) 雨、雪、雾、霾对红外探测成像的影响

雨雪雾等恶劣天气下，水分子和悬浮颗粒物增多，加剧红外辐射的吸收和散射，导致红外图像亮度和对比度受影响。

2) 雨、雪、雾、霾对红外图像分辨率的影响

在雨雪雾等恶劣天气条件下，红外图像的分辨率受到大气湍流效应和光学系统杂散光干扰的影响。大气湍流效应会导致图像质量下降，出现模糊和斑点噪声。杂散光的干扰则会使图像边缘出现光晕现象，对目标检测和识别造成影响。针对这些问题，我们制备了相应数据模拟大气湍流效应引起的杂散光干扰，生成图像模糊、带有噪点的传递函数，并在渲染过程中加载该模型（函数）对图像进行修正，以提高图像质量。

3) 雨、雪、雾、霾对红外图像目标特征的影响

在恶劣天气条件下，由于相对温差减小，目标特征变得不明显。此外，雨雪雾会在目标表面形成水膜，使目标表面温度分布更加均匀，进一步降低目标与背景的温差。这导致红外图像中的目标特征减弱，容易造成目标检测和识别的误判。对于目标/背景数据的制备，我们在要素建模中进行考虑，通过目标/背景表面温度修正生成不同天气下的数据模型。



(a) 晴天地物红外模型 (b) 雨天地物红外模型 (c) 雪天地物红外模型

图 22 不同天气地物模型效果

4) 雨、雪、雾、霾对可见光图像的影响

与红外波段不同，雨、雪、雾、霾对可见光探测器的影响主要是大气中的水分子和悬浮颗粒物增多，导致可见光散射能量传播过程中的散射现象加剧（光线传播受到阻碍），造成的可见光获取图像失真、不清晰等现象。

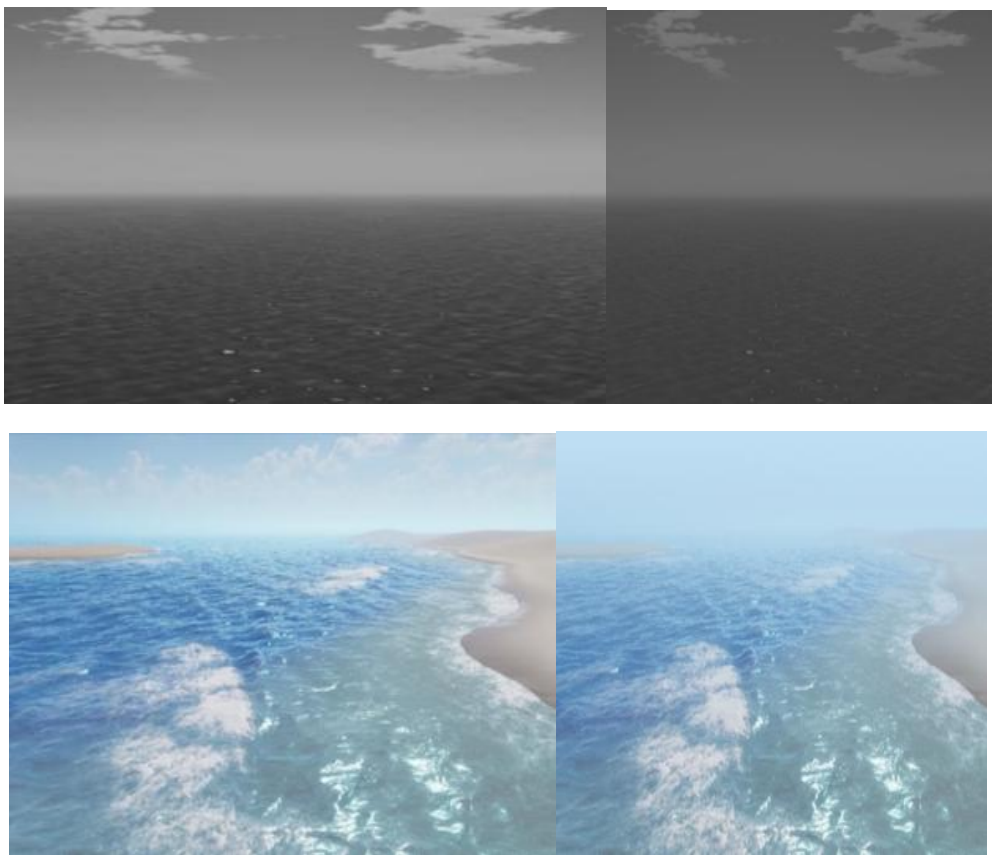


图 23 可见光、红外未开启（左侧）/开启（右侧）雨、雾效果对比

1.1.8.4.2 三维云模型

三维云层模型的实现基于广告牌技术，通过精心设计的序列纹理来模拟云层的动态变化。在此模型中，云的类型、几何参数、位置与透过率等参数可进行灵活设置，从而呈现出逼真的三维特征。

系统可模拟出影响探测的各类干扰现象，如目标穿云效果、云遮挡、背景辐射干扰、太阳辐射干扰等效果；增加了极限条件模拟功能，针对探测设备的观测特性，将典型干扰效果封装为干扰模块，用户可以通过输入干扰类型和参数设置干扰极限条件，极大方便了用户操作。方案初步设计干扰功能内容如下图所示。

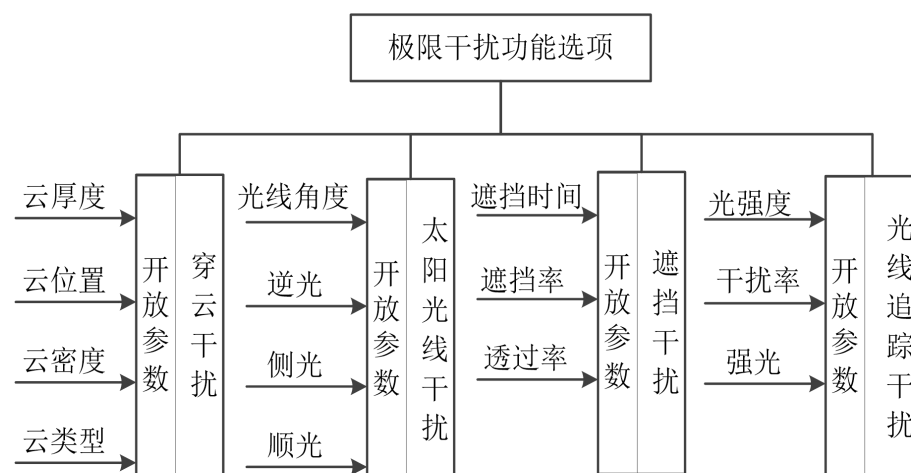


图 24 干扰功能组成



图 25 空对地的云遮挡干扰

1.1.8.4.3 背景云模型

背景云能够精准模拟层云、卷积云、层积云、积雨云等多种云层形态，以满足不同应用场景的需求。如下图所示，展示了层云的模拟效果图及呈现了积雨云在可见光与红外光谱下的模拟效果。

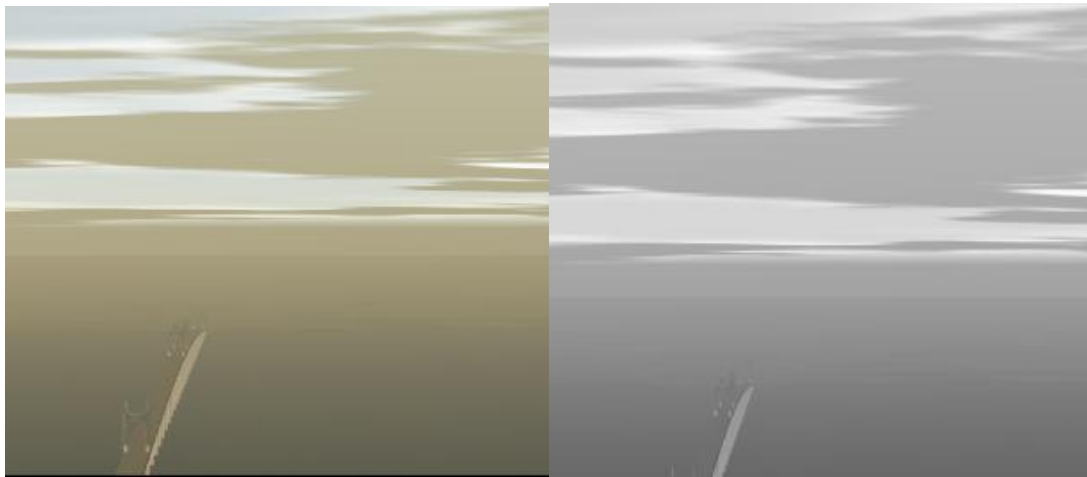


图 26 层云仿真效果

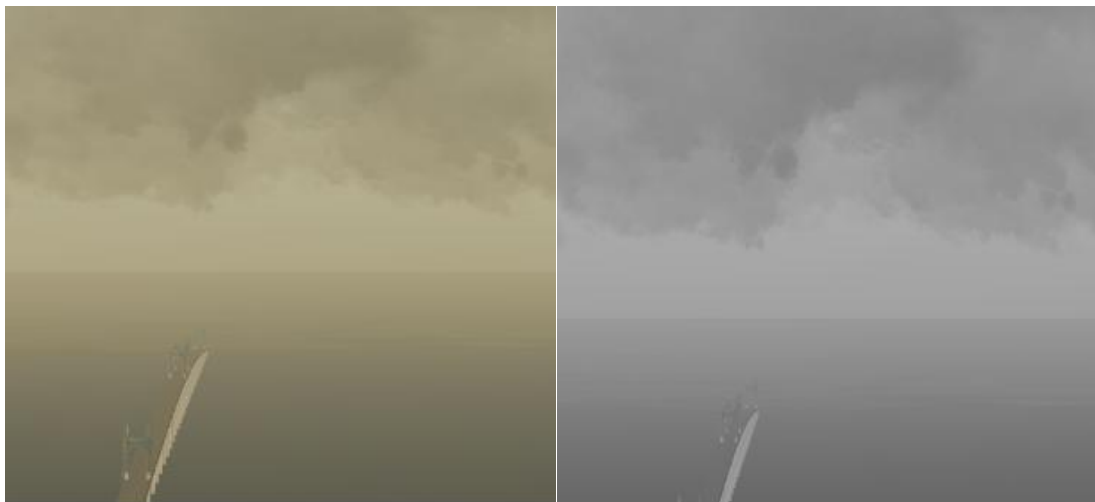


图 27 积雨云仿真效果

1.1.8.4.4 诱饵模型

下图展示了诱饵建模方法。首先基于质点动力学模拟弹道、依据药剂燃烧模型计算不同高度下的红外辐射强度，并生成起燃、峰值、衰减的时域拉偏曲线以模拟批次差异。渲染层面，利用粒子系统构建火焰与拖尾，通过着色器将预计算的辐射亮度映射为红外灰度值，并叠加星芒光晕，最终通过浮点纹理渲染管线输出，实现诱饵弹在可见、中、长波视场中的动态干扰效果。

对点源而言，基于固体火焰模型的概念将高温燃烧的点源火焰近

似为发热球体，利用三维建模工具进行燃烧核心的球体几何建模与外围烟团的 **Billboard** 建模。根据点源辐射强度随时间、速度、质量等参数变化的规律建立点源辐射特征计算模型，进行辐射强度到燃烧球体表面辐亮度的转换与映射。在点源弹攻防对抗的当次仿真历程中，点源弹的类型、工作参数等条件是可以预先确定的，即在给定的波段范围内，点源弹辐射强度是燃烧时间的一元函数；以燃烧时间为索引参数，完成点源弹辐射强度预计算，生成点源三维红外模型。

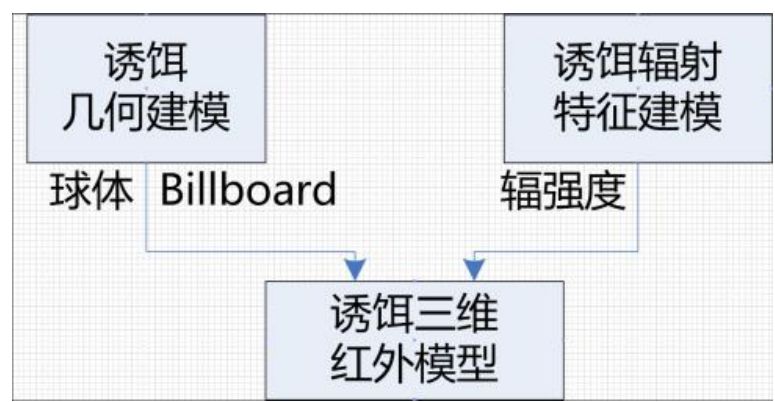


图 28 诱饵三维红外模型生成流程

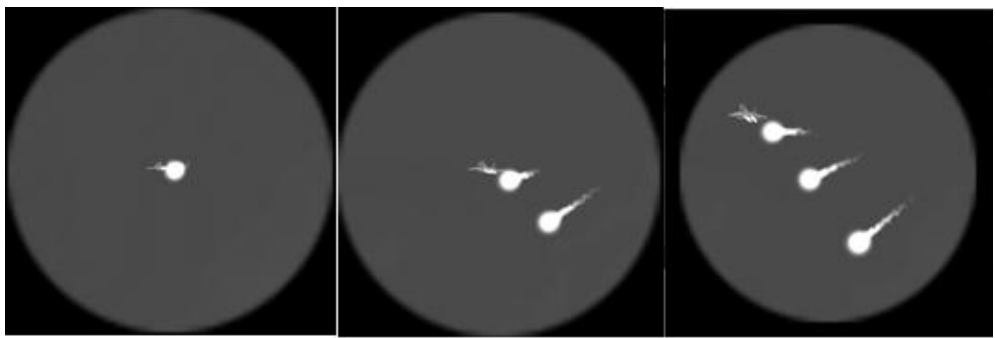


图 29 点源红外干扰仿真效果

红外面源诱饵模型包括面源诱饵运动模型和面源诱饵辐射模型。其建模思路如下图所示：

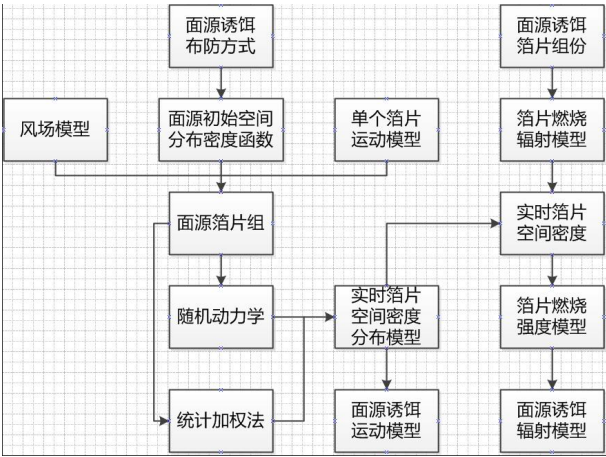


图 30 面源诱饵建模思路

面源诱饵运动模型建立密度函数表达分布，考虑高空风场影响，建立箔片运动模型，基于初始分布密度函数划分箔片组。利用随机动力学加权统计方法，研究箔片团运动扩散规律，简化条件下给出分布密度函数变化模型，形成面源诱饵运动模型。

面源诱饵辐射模型从箔片配方出发开展起燃时间、持续时间和多光谱辐射强度建模，建立单个箔片的燃烧辐射模型，以此为基点利用箔片团分布密度函数获得箔片散布密度，获得空间箔片燃烧强度，进而获得箔片团多光谱辐射强度模型。面源诱饵模型仿真效果如下图所示。

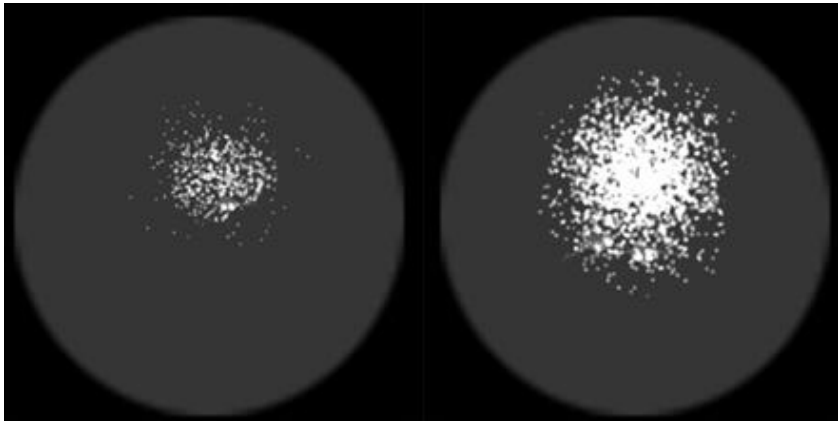


图 31 面源干扰模型细节效果图



图 32 面源干扰模型仿真效果图

1.1.8.4.5 烟雾模型

1) 烟雾特征建模与预处理

烟雾特征建模与预处理功能旨在构建烟雾的干扰辐射特征模型和扩散运动模型。输入参数包括烟雾的物理特性（如形态、位置、持续时间和辐射亮度）以及气象条件（如风速和风向）。

在风的影响下，基于二维扩散方程，对干扰的扩散运动效果模拟的实现方式可表示为：

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D \left(\frac{\partial^2 C}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 C}{\partial y^2} \right) - \vec{v} \cdot \nabla C$$

式中， C 为烟雾物质浓度， t 为时间， D 为扩散系数， $\vec{v}$ 为风速矢量， ∇C 为浓度梯度，将其离散化用于计算机数值计算。风速数据可从外部气象数据或内部定义风速模型获取，外部可读取气象站实测数据，内部可设常量或梯度风速模型，获取后将其转换为与地理坐标系匹配的矢量格式，可表示为：

$$v_x = v \cos \theta$$

$$v_y = v \sin \theta$$

式中， v 为风速大小， θ 为风向角度。

同时，在确定烟雾干扰源位置与强度后，粒子系统在干扰源生成粒子并设初始速度，纹理在对应像素设初始浓度值，粒子系统位置更新方程可表示为：

$$\vec{x}_{new} = \vec{x}_{old} + \vec{v}_{particle}\Delta t$$

式中， Δt 表示时间步长， $\vec{v}_{particle}$ 表示粒子速度。

最后通过粒子系统用点渲染，添加透明度渐变、光照效果，并依风速调整扩散速度与形状，纹理映射到几何图形渲染完成烟雾的红外模型生成。

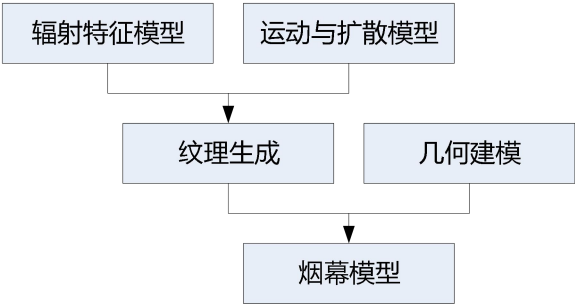


图 33 烟雾建模与预处理流程图

2) 烟雾辐射特征建模

a) 消光模型

理论研究和实验结果显示，烟雾对红外的消光作用源于其对红外的吸收和散射。根据振子理论，热辐射是物质中原子和分子热运动产生的电磁辐射。原子和分子可视为振子，当振子共振时，会吸收辐射能量，增加振动能量，这是烟雾的红外吸收作用。这种作用导致烟雾本身的红外辐射强度增强。

辐射在烟雾中传输时，受到粒子的散射和吸收作用，产生了衰减。烟雾对成像系统产生的干扰反映在光谱透过率上，按照朗伯—比尔定律，透过率可表示为：

$$\tau_{IR} = \frac{I}{I_0} = \exp[-\alpha_e(\lambda)NL]$$

式中， I_0 、 I 分别表示入射光强和透射光强； $\alpha_e(\lambda)$ 为烟雾的质量消光系数； λ 为辐射波长； N 为烟雾的颗粒浓度； L 为烟雾的厚度。本项目取烟雾粒子质量密度 $\rho = 400 \text{ kg/m}^3$ ， $\alpha_e(\lambda) \approx 0.04$ 。为简化计算上式变为：

$$\tau_{IR} = \frac{I(\lambda)}{I_0(\lambda)} = \exp[-0.04cL] \times n(i)$$

式中 $n(i)$ 为烟团图元中第 i 个像素点的像素值。

烟雾图元中每一个像素应包含温度辐射信息、发射率信息、透过率信息等。为了能够保持红外特性数据，在图像格式上采样 32 位四通道 DDS 图像格式以保证数据的精度，并且对图像的通道信息进行重新编码，本项目定义纹理图中每个像素点的 G 通道记录红外辐射值信息；B 通道记录发射率信息；剩余 A 通道记录烟雾透过率信息。DDS 纹理各通道信息如下图所示：

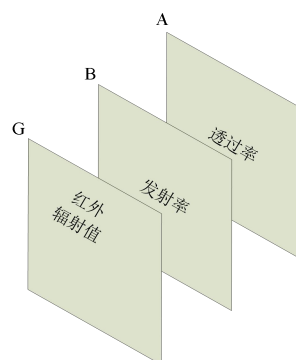


图 34 烟雾 DDS 红外纹理像素编码格式

设置烟雾的初始温度 40 度，查表得到普通烟尘的发射率为 0.90，利用 GPU 强大的并行处理数据的能力，通过设置烟团的初始温度，计算烟团图元中各点的红外波段下的辐射亮度值和烟团图元各点的透过率值。



图 35 烟雾纹理

由于烟雾属于可变流体，没有具体的外形，不能利用普通的几何建模的方法来模拟烟雾的形状。因此本项目采用了粒子系统与 Billboard 相结合的技术来建立烟雾的三维模型。



图 36 烟雾干扰

1.1.8.4.6 水幕模型

水幕对红外辐射就是一道屏障，不易穿透。海水对蓝绿光有较好的透过系数，对其他波段则有较大衰减。实验显示， $20\mu\text{m}$ 厚海水薄膜在 $3\mu\text{m}$ - $5\mu\text{m}$ 波段上平均透过率小于 40%。控制水膜厚度在 $5\mu\text{m}$ - $100\mu\text{m}$ 范围内，可使 $3\mu\text{m}$ - $5\mu\text{m}$ 波段的红外辐射透过率降低至百分之几到千分之几。地面固定目标和水面舰艇易被红外侦察和攻击。用水浇湿表面，不仅阻止红外辐射，还改变物体表面特性，使红外成

像制导导弹无法识别原特征，实现隐身。现简要描述水雾粒子对不同波段的隐身效应。

（1）可见光隐身效应

从直观的观察上看，蒙上一层水幕会影响我们的视线，这其实是水幕对可见光的不规则折射和散射所致，降低了被观测物体与周围环境之间色度和亮度的对比，使得观察者观测目标的距离大大缩减。

如果用视觉对比度来评价水幕的干扰效果，则：

$$C = \frac{L_T - L_B}{L_B}$$

式中，LB 和 LT 分别为目标和背景的亮度。

探测系统要想准确识别目标，就要求 $C > \xi$ (ξ 是视觉对比阈值)。而当 $C < \xi$ 时，目标无法准确识别目标，此时的距离称之为能见距离 L，即

$$L = \frac{1}{k} \ln \frac{C}{\xi}$$

式中，k 为水雾的消光系数， $k = \pi N r^2$ ；r 为水雾粒子的平均半径；N 为雾的浓度；视觉对比阈值 ξ 一般取 0.02，将上式整理变形为

$$L = \frac{\bar{r}}{w}$$

式中，w 表示雾中的含水量。由此可以看出，雾中能见度受到粒子截面积和粒子浓度的影响，即与雾中含水粒子量成反比，与水粒子半径成正比。所以，水粒子的半径越小、浓度越高，观测距离就越小，使得水幕对目标的掩盖作用就越好。

对水雾生成及隐身机理的研究表明，当水雾粒子直径在 5 μm -15 μm 区间时，水雾可以保持最长的时间，此时对可见光、近红外、中红外、远红外都有较好的隐蔽作用。除此之外，大气环境的温度、湿度，以及大气溶胶等因子对有水雾时的能见度也有很大影响。

（2）红外隐身效应

对于红外隐身，温度干扰显得十分重要，由于水雾的比热容较大，可以吸收目标散发的部分热量，从而降低目标表面温度，使得目标的红外辐射发射变化，并接近背景温度，从而使目标与背景能够达到更好的融合。

水雾的吸收作用是由水分子被入射光辐射激发，由低能级跃迁到高能级，在此情形下，其吸收的辐射能量等于两能级之间的能量差。每一个跃迁产生一条吸收线，许多连在一起的吸收线就成了一个较宽的吸收带，所有的跃迁组成水雾的吸收光谱。由于水分子的能级是确定的，因而水雾的吸收具有明显的选择性。

其吸收带主要有：0.941 μm ，1.1 μm ，1.38 μm ，1.87 μm ，2.66 μm ，2.7 μm ，3.2 μm ，6.27 μm 。因此在水雾的作用下，近红外与中红外波段的目标辐射信号受到很强的衰减。

水雾粒子对红外光的散射也是造成目标红外信号降低的重要原因之一。水雾粒子的散射，使得来自目标的红外辐射改变了原来的传输方向。所以虽然目标在空间总的辐射能量没有减少，但到达对方探测设备所观察方向上的能量有所降低，由此减少了目标被发现和识别的概率。

通常，水雾粒子的直径一般在 0.5 μm -80 μm 之间，粒子尺度参数为

$$\alpha = 2\pi r/\lambda > 0.1 \sim 0.3$$

根据迈克尔逊散射理论，计算水雾对红外线的散射作用。散射效率因子设为， $Q_s(a, m)$ 吸收效率因子设为 $Q_a(a, m)$ ，衰减效率因子 $Q_e(a, m)$ ，其相应的水雾截面与效率因子之间的关系为

$$\sigma_i(r, \lambda, m) = \pi r^2 Q(a, m) (i = s, a, e)$$

下图给出了小水滴的 $Q_s(a, m)$ 曲线。由图可见，在 $a=6.2$ 处， $Q_s \rightarrow \max$ ，即当 $r \approx \lambda$ 时产生最大散射，在 $a > 25$ 以后， $Q_s \rightarrow 2$ ，即散射与波长几乎无关。

每一个水雾粒子的尺寸是容易控制的，可以根据需求进行设计，同一水幕中遍布着尺寸范围很广的粒子，因而它对多种波段的红外辐射都具有强烈的散射作用。

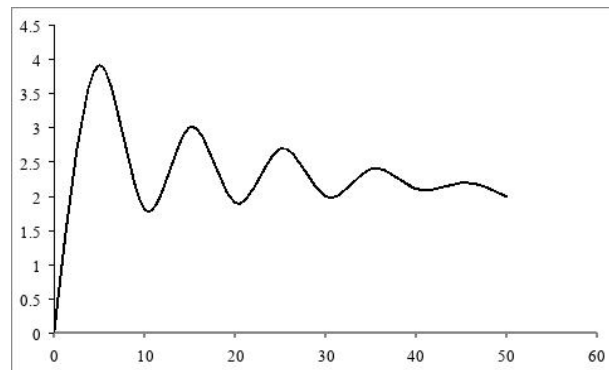


图 37 水滴的 $Q_s(a, m)$ 曲线

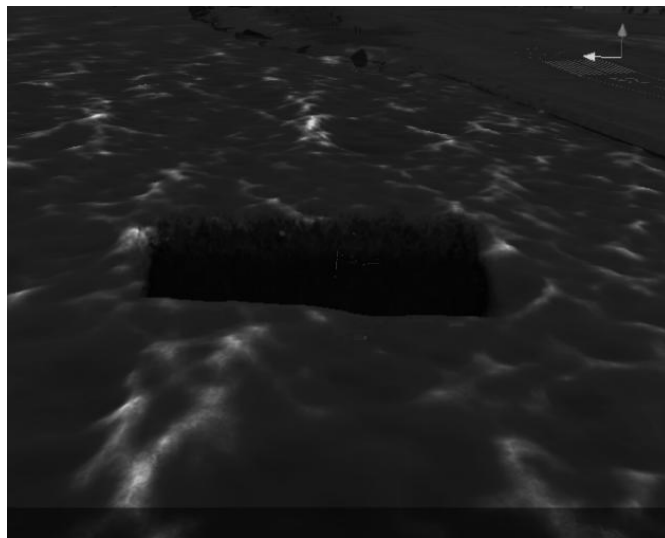


图 38 水幕干扰效果

1.1.8.4.7 假目标模型

假目标建模依据目标的结构和外形几何参数，使用 3DS Max、MultiGen Creator 等三维建模软件完成飞机、导弹等三维目标模型的

建立。为建立的飞机、导弹等目标模型创建 UV 坐标，目的是建立模型表面与红外纹理映射坐标关系，方便后续工作将目标纹理映射于目标表面。下图为目标建模流程和多种目标的几何设计网格图。

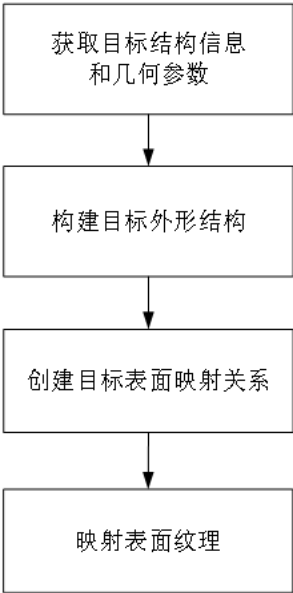


图 39 目标建模流程

对于假目标，其红外辐射特性将根据真目标的材质进行热特性解算，主要完成目标的温度计算、本体真实红外辐射计算、辐射数据修正等计算内容，计算输出目标、温度分布、本体真实辐射亮度分布等数据。

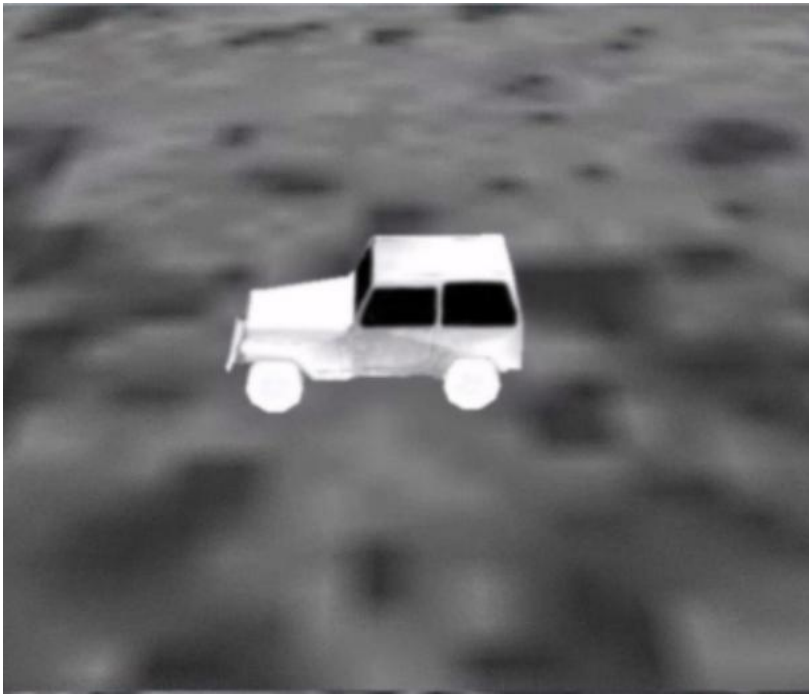


图 40 假目标-Jeep 车

1.1.8.4.8 伪装网模型

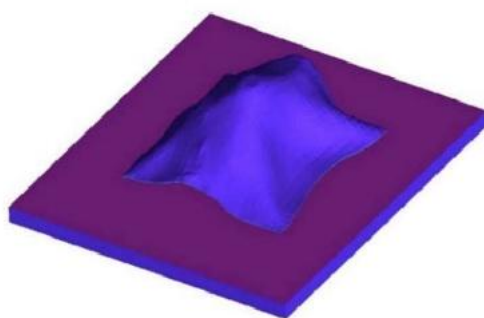
目标建模时进行伪装网制作，通过设置波段透过率和波段辐射亮度上下限实现其红外属性。

a) 伪装网几何模型的简化

伪装网表面的装饰材料，源自伪装布，经由特定尺寸的刀具进行精准切割，再经过拉伸工艺处理而成。因此伪装网的表面具有孔洞，太阳辐射可以经过孔洞到达伪装网下方的目标表面，风也可以经过网表面的孔洞到达伪装网里面。考虑伪装网复杂的几何结构，直接建模难度极大，对伪装网具有切花和孔洞的装饰材料进行简化和等效。本文对伪装网简化等效的思路是，考虑伪装网装饰材料表面复杂的对流换热，将伪装网表面的装饰材料简化成是进行切花和拉伸之前的伪装布面，此时对于传热模型需要考虑到太阳辐射可以通过原本具有的孔洞到达目标表面、风经过伪装网装饰材料时复杂的流动换热以及风经过伪装网表面孔洞到达目标表面风速的变化，因此，也需要对伪装网

简化后几何模型的传热模型进行简化和等效。最终再对简化的模型进行验证。

简化后的几何模型为厚度与实际伪装网几何模型一致的平板，相当于伪装网进行切花拉伸前的一张平整的布面，厚度在 0.2-0.3mm 范围内；由于伪装网的厚度非常薄，且长度和宽度数值相对厚度很大，因此，在进行数值计算前的划分网格步骤中，划分网格的数量会非常多且网格质量比较差，后续计算难以收敛。



b) 伪装网光学特征分析

伪装网是隐蔽兵器的重要伪装遮障器材。图 52 对比了浸水前后迷彩伪装网和 6 种植被的反射光谱。浸水前后伪装网的光谱曲线形态相似，可见光部分反射率低，蓝、红光反射低谷，530nm 处有反射峰，680~760nm 波段反射率急剧增大后保持稳定。进入近红外波段，反射率下降，存在水分子吸收带。浸水前后伪装网仅在 1900nm 附近有差异性，浸水时间增加，反射率降低，光谱曲线整体呈下降趋势。

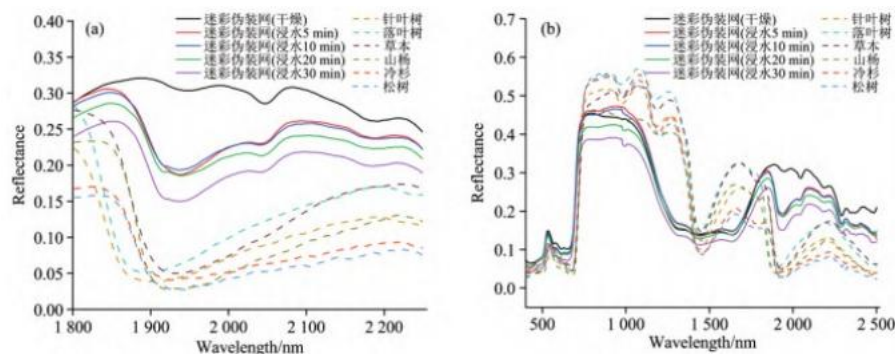


图 41 (a)干燥/浸水状态迷彩伪装网与 6 种植被的平均光谱曲线和(b)1800~2250 nm 处干燥/浸水状态迷彩伪装网与 6 种植被的光谱曲线

迷彩伪装网的光谱特性对伪装效果至关重要。在可见光波段，伪装网与植被光谱相似，有助于其在自然环境中的隐蔽性。但在近红外波段，尤其在 1300~2500nm 的“水分吸收带”，伪装网与植被光谱差异明显。浸水处理后，伪装网在 1800~2250nm 波段的光谱特征得到改善，与植被更为相似。光谱角余弦值也显示，浸水处理提高了伪装网与植被的相似度。不过，伪装网在特定波段如 1250~1650nm 仍有差异，可能源于材料特性。因此，要进一步提高伪装效果，需研究改进伪装网材料和结构，以更好地模拟自然植被光谱。

	迷彩伪装网(干燥)			
	绿色反射峰 550 nm	红边 680~ 780 nm	近红外高原 780~ 1 300 nm	水分吸收带 1 300~ 3 500 nm
针叶树	0.997 8	0.966 2	0.987 9	0.745 6
落叶树	0.996 1	0.966 0	0.984 7	0.767 6
草本	0.983 4	0.963 0	0.981 5	0.777 4
山杨	0.985 5	0.956 6	0.986 9	0.724 9
冷杉	0.988 9	0.968 2	0.990 3	0.717 4
松树	0.991 3	0.956 6	0.992 6	0.681 3
平均值	0.990 5	0.962 8	0.987 2	0.735 7

图 42 典型特征参量波段处植被与伪装网（干燥）的光谱角余弦值

c) 迷彩伪装网的光谱特征识别

经过反射光谱的包络线去除处理，得到了伪装网的光谱曲线（如

下图)。伪装网在 970 和 1190nm 处无显著吸收特征，但在 1440nm 处有较宽吸收谷，与植被区分明显。在 900~1300nm 波段，伪装网光谱曲线急剧下降；而在 1300~1600nm 波段，其光谱曲线平稳，斜率较小。与此相反，植被的光谱曲线在此波段内波动较大，斜率较大。

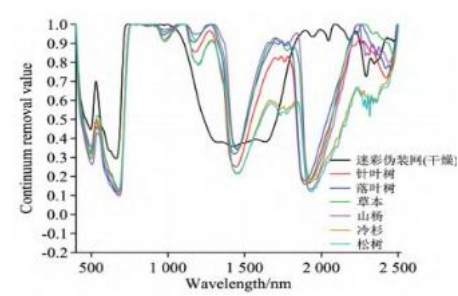


图 43 迷彩伪装网和各植被的包络线去除结果

伪装网（干燥）与植被在可见光波段的反射光谱相似，难以区分。但在近红外波段的 970~1190 和 1440nm 附近，迷彩伪装网（干燥）与植被的反射光谱存在显著差异，可用于绿色植被环境中迷彩伪装网的识别。

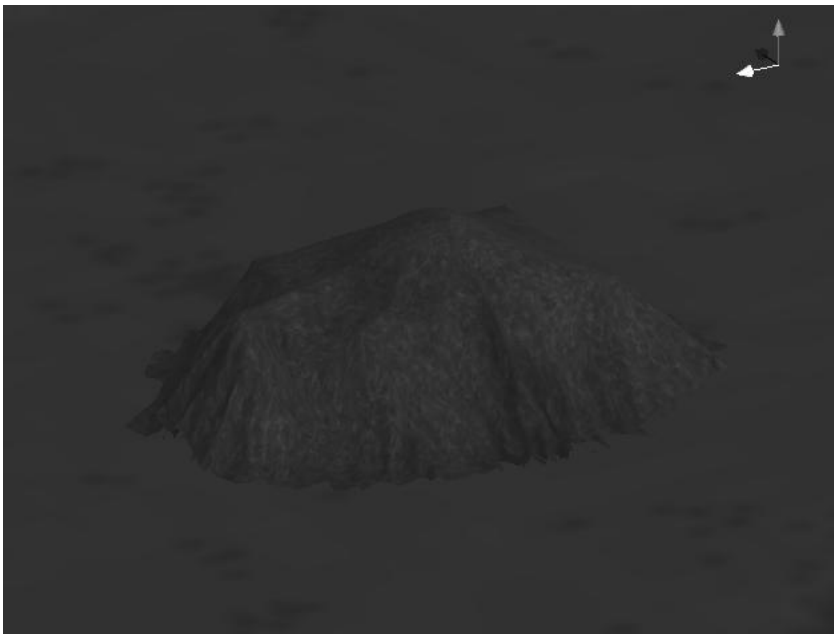


图 44 伪装网效果

1.1.8.4.9 火焰模型

战场环境中的火焰一般为爆炸后残骸的燃烧、导弹尾部喷射的火焰，大多数 战场火焰具有以下共同特征：火苗在一定区域内产生，这里看作以火焰中心为球心的半球形区域；火苗产生后向上运动，运动过程中受横向风的作用发生水平方向的位移；火苗产生时最亮，向上运动时，亮度随高度的增加而降低，一直暗淡至与背景相融。根据战场火焰的上述特点，定义一个实数域上的 n 维向量，表示为： $R^n = \{Position, Speed, Accelerate_speed, Size, Color, Bright, Lifetime, Shape\}$

它即是构成火焰的基本粒子， R^n 表示一个粒子的特征，分别表示该粒子的空间位置、运动速度及加速度、大小、颜色、亮度、生命周期以及形状。定义上述火焰粒子的有限集合为火焰粒子集，其中每一个粒子都需要一个索引，定义为 I 到 R^n 的映射：

$$P: I \rightarrow R^n (n \geq 3, n \in I)$$

例如，对于索引为 i 的火焰粒子， $P(i) = R^n$ 为该粒子的特征状态。定义火焰粒子集的有限集合为战场火焰粒子系统，表示为：

$$Q = \{P_t: I \rightarrow R^n | n \geq 3, n \in I, t \in \{t_0, t_1, K, t_m\}, I \in J\}$$

其中， $P_k := P_{t_k}$ 表示战场火焰粒子集在时刻 t_k 的状态， P_{t_0} 是初始时刻粒子系统的特征， Q 是所有战场火焰粒子的状态集合，在仿真过程中通过不断更新状态来表现战场火焰特效。

燃烧过程中的火焰粒子从产生到消失，都不断受到风力、温度等环境因素的影响，因此每个火焰粒子的状态都在个断地更新，需要对其影响因子进行建模，给出其干预函数。当粒子消亡时，它的颜色将逐渐与背景交融。

a) 粒子运动

火焰在不同时刻的状态是由火焰粒子的动力学性质所决定，如果没有其他外力作用，火焰粒子会始终保持初始速度向上运动，即匀速上升。受到外力的作用后，粒子将产生加速度，使得其运动复杂化，本系统仅考虑风力和重力对粒子的影响，由此引入风力加速度 $w(t) = \{wx(t), wy(t), wz(t)\}$ 和重力加速度 $g = \{0, 9.8, 0\}$ 。通过 $w(t), g(t)$ 和其他人为干预，此处我们应该考虑粒子不同方向的受力和加速度，在竖直方向上仅考虑重力对粒子的影响，所以其加速度等于重力加速度。在水半方向上，考虑风力和其他人为干预，情况较竖直方向更复杂，由于风力加速度是随时间变化的，所以水平方向上火焰粒子做变加速运动。在实现过程中，考虑特效效果的美观性，我们将加速度考虑为调节因子，根据效果的好差取值。设火焰粒子的速度和加速度分别为 $v(t), a(t)$ ，则 Δt 时间内位移和速度的变化量分别为：

$$\Delta v = a(t) \times \Delta t$$

$$\Delta s = v(t) \times \Delta t$$

b) 粒子消亡

火焰粒子的消亡分两种情况：一是火焰粒子从生成开始计算存在的帧数，当帧数超过粒子的生命周期时，表示该粒子寿命已尽，通过调节该粒子颜色 RGBA 模型中的 Alpha 通道，使其透明度增加，最后与背景相融合。二是火焰粒子仍处于生命周期内，但其运动出了有效范围，系统自动将该粒子删除，重新生成新的火焰粒子。



图 45 火焰仿真可见光、红外效果图

1.1.9 传感器响应场景生成模块

如下图所示，传感器响应场景生成模块由复杂场景渲染生成子模块、图像后处理子模块和数据输出子模块组成。

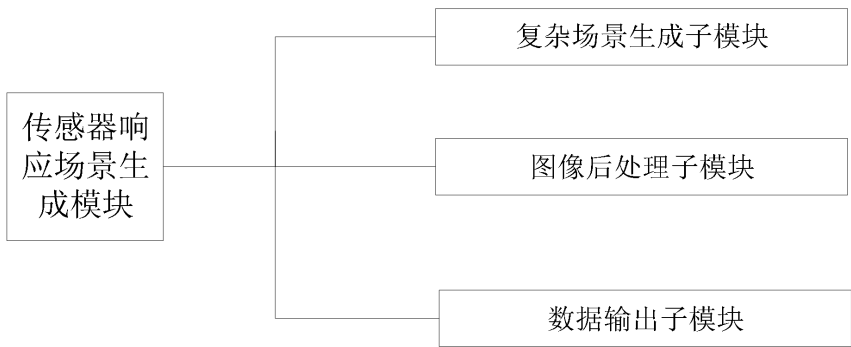


图 46 传感器响应场景生成模块结构

1.1.9.1 模块功能

传感器响应场景生成模块具有静态图像生成功能，能根据设置参数调节输出满足要求的静态图像。将根据场景配置参数与仿真驱动数据，实时动态生成并输出传感器视角场景画面。模块支持渲染图、实测图、仿真图同步输出，搭载可见光/红外仿真场景实时动态生成能力。支持实时高程查询，对应点位的精确地形高度并实时输出。

（1）复杂场景渲染生成子模块

用于调用底层渲染平台实时生成仿真场景图像和实测场景图像，主要功能如下：

a) 复杂场景渲染生成功能：调用仿真引擎，驱动目标和背景模型数据，实现生成复杂场景图像功能。

b) 模块可以调用底层仿真引擎，在仿真同步信号的控制下，驱动场景模型，完成本帧图渲染，实现目标—背景—传感器等链路图像生成；

c) 调用图像分析工具，加载*.raw、*.bmp 等图像序列；

d) 根据实时数据播放图像。

(2) 图像后处理子模块

图像后处理模块用于实现设备、场景产生器、实测干扰在图像上的叠加功能。主要完成设备效应图像处理、红外场景产生器效应修正、干扰图像叠加等功能。其中，在注入式试验模式下，模块对复杂场景生成模块生成图像进行红外传感器效应修正，并根据构建想定叠加干扰效应图像。在辐射式试验模式下，模块对复杂场景生成模块生成的图像进行红外场景产生器效应修正，并根据想定叠加干扰效应图像，最后，模块将处理后的图像输出给显卡调用。

(3) 数据输出子模块

1) 图像输出

a) 通过 DP 接口/HDMI 接口实时输出生产的图像给目标特征模拟系统；

b) 样本生成，用于调用弹道轨迹和目标运动数据实时生成序列图像，具有批量图像样本输出功能。

2) 数据输出

支持毫秒级实时高程查询，可根据输入仿真位置的经纬度/世界空间坐标，系统在通过双线性插值算法计算对应点位的精确地形高度并实时输出。高程查询坐标系、高程基准与 DEM 数据源严格一致，支持 WGS84/CGCS2000 等常用坐标系，无转换系统误差；高程计算始终基于原始分辨率 DEM，不随地形渲染 LOD 层级变化，输出结果稳定无跳变；

1.1.9.2 输入输出

输入界面、网络、硬盘的各类数据。

输出探测器观察到的仿真图像。

1.1.9.3 工作流程

传感器响应场景生成模块首先读取场景参数，调用仿真引擎生成最终输出图像。针对生成的输出图像主要存在两类处理路径：一类经由图像输出子模块传输至外部接收设备；另一类存储至本地作为测试图像，供研究人员开展算法验证工作使用。

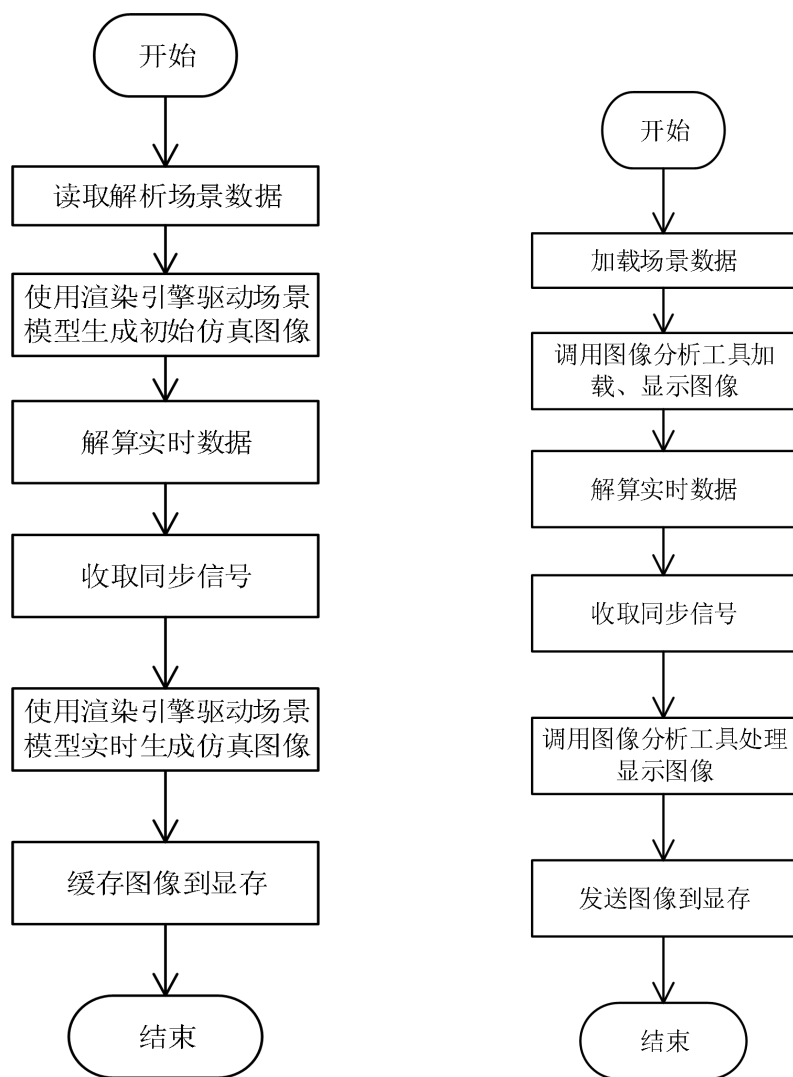


图 47 渲染生成场景图像流程（左）/使用实测图片生成仿真图像流程（右）

1.1.9.4 实现原理

动态仿真部分主要是使用三维图形渲染引擎，加载各种场景资源以及对三维场景进行动态渲染。动态渲染基于 OSG 平台，采用基于 GPU 可编程渲染管线来加速不同像素的辐射方程的并行计算。

红外场景实时渲染是通过 CPU 与 GPU 合作实现的，其中 CPU 端主要负责数据的 I/O 与加载/释放，以及需要较高的交互性或灵活性的运动计算，而 GPU 端则利用 Cg 编写的顶点着色程序与片段着色程序，高并行地完成坐标与几何计算、辐射方程计算、大气与成像系统效应计算等工作。图中粗虚线框所包括的即为基于 GPU 可编程渲

染管线来加速的计算与处理模块，而其余模块则是在 CPU 端进行。
根据上述渲染流程，为完成场景的本征红外辐射实时渲染，主要进行的工作是：

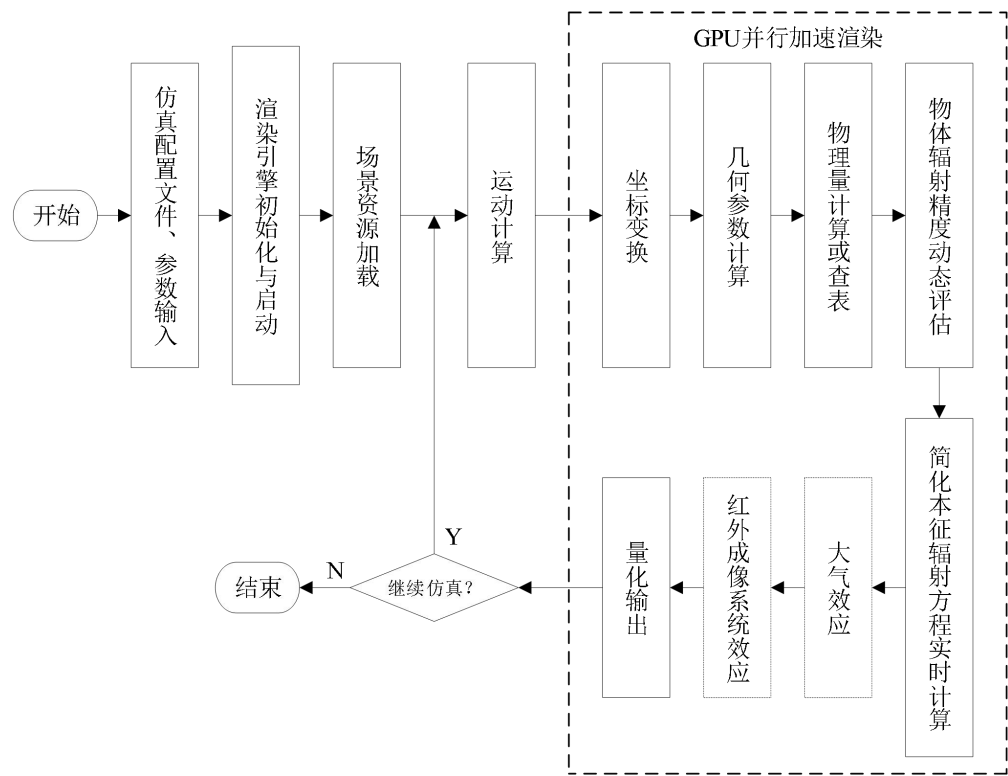


图 48 大规模红外场景实时渲染流程

OSG 渲染引擎启动后，载入包括几何网格、红外纹理以及预计算生成查找表纹理等资源。

然后进行运动计算，即基于运动方程、自动伺服或人工控制等方式更新相机（观察者）或物体的位置、姿态等数据。

相机与其视口内所观察到的所有景象的位置与姿态信息被传入 GPU 的顶点着色器，顶点着色器遍历整个视场，以顶点为单位进行目标顶点坐标、法线方向等数据从物体自身坐标系到世界坐标系的变换。

变换后的顶点流在 GPU 内自动进行图元装配、光栅化和插值等处理，连同纹理坐标等传入片段着色器。片段着色器同时还接收了相

机与光源的相关信息。利用所传入的数据，在片段着色器中进行观察距离、光源距离、反射方向、各种夹角余弦等几何参数的计算。

以所计算的余弦或传入片段着色器的有关参数为索引参数，对辐射方程物理量查找表纹理进行查找；部分运算简单的物理量则直接计算。最终获得如黑体辐亮度、太阳辐照度等物理量。以黑体辐亮度为例，片段程序首先根据红外纹理采样坐标对表面的红外物理纹理进行采样，从温度通道读取该片段对应的温度 T_x ；再以 T_x 为索引变量，对黑体辐亮度查找表纹理进行采样，即可获得辐射项 $L_{bb}(T_x)$ 。

根据观察距离、时间等相关参数，对该片段的辐射精度进行动态评估，决定实时计算时在保障辐射精度的前提下计算最简单的本征辐射方程；根据该辐射方程进行片段的辐亮度计算。

根据完整的红外成像全链路仿真需求，本征辐射亮度还会继续参与大气效应仿真、红外成像系统效应仿真模块的计算，生成该片段最终的辐亮度。

最后利用量化标尺，将辐亮度量化为 8~24 位的灰度值后赋值给 R、G、B 通道，即可完成当前帧的灰度图像的输出。若需继续仿真，则可返回第②步，循环渲染每帧图像，直至仿真结束。

上述渲染流程适用于各类典型目标，如坦克、卡车、舰船等，以及各种典型地物，如天空、地面、建筑、高大植被等，并已成功地应用于大规模的复杂战场环境的生成。

1.1.9.4.1 可见光散射特性计算

空间目标的可见光散射特性是仿真的关键基础，目标在可见光波段（0.4~0.8 μm ）的散射亮度分布由表面材质、粗糙度、入射/观测几何及背景辐射共同决定，采用双向反射分布函数（BRDF）中的 Davies

模型描述目标表面的非朗伯散射行为，并区分点目标（全向散射强度）与体目标（面元散射亮度分布）两类计算模式，结合 Modtran 预计算的大气透过率与天地背景光谱数据，建立物理精确的可见光散射模型。

基于 osgEarth 三维地理空间仿真引擎，在原有空间目标可见光散射算法、红外仿真体系基础上，完成工程化落地改造。依托 osgEarth 原生地球地形加载、地理坐标变换、空间目标动态挂载、大气环境仿真、大规模场景渲染能力，实现真实地球地理场景+空间目标轨道推演+可见光散射计算+红外/可见光多波段融合成像的一体化仿真系统，解决传统仿真无真实地理基底、空间姿态匹配偏差大、场景扩展性弱的问题，适配航天空间目标探测、光电特性仿真、多波段视景推演等工程场景。

基于 osgEarth 引擎制定标准化逐帧运行流程，实现场景加载、参数解算、散射计算、纹理渲染、动态推演全闭环，完全适配工程落地运行逻辑。

步骤 1：场景初始化：启动程序，加载 osgEarth 地球地形、大气、天空光照，初始化 Modtran 接口与材质参数库；

步骤 2：目标挂载与参数初始化：读取目标轨道、姿态、材质参数，通过 GeoTransform 完成三维模型地理挂载；

步骤 3：前置预计算：求解地理坐标系下太阳入射角、方位角、天地背景辐照度、大气双向透过率；根据用户选择的仿真模式（离线实时模式查表调用预计算的大气光谱与透过率数据；

步骤 4：遮挡与角度解算：基于 osgEarth 空间碰撞检测，完成目标自遮挡、地球阴影遮挡判定，更新各微面元角度参数；

步骤 5：散射核心计算：根据朗伯体计算模式，逐面元计算散射

删除[wyc]: （1）物理量预计算

项目将定义仿真全过程核心光学物理量定义、单位及物理含义，为 osgEarth 场景渲染、算法编程、参数配置提供标准化依据。具体核心物理量参数如下表所示：

物理量参数表

物理量	符号	单位	物理含义
-----	----	----	------

光谱辐照度
Φ_{λ}
Φ_{λ}
太阳/地球背景入射到目标表面的光谱辐射通量密度

光谱辐亮度（散射亮度）
L_{λ}
L_{λ}
目标微面元向观测方向的散射亮度（体目标核心输出）

光谱辐射强度（散射强度）
I_{λ}
I_{λ}
目标整体向某方向的散射总功率（点目标核心输出）

双向反射分布函数
ρ_{λ}
ρ_{λ}
描述目标表面散射特性的核心函数

大气透过率
τ_{λ}
无量纲
光辐射在大气中传输的衰减比例

结合论文实测结论，osgEarth 场景通用可见光波段工程简化规则如下：定义可见光标准仿真波段为 0.4~0.8μm，结合实测光谱特性完成工程简化，有效平衡仿真精度与计算效率，具体分段规则如下：

1. 0.4~0.6μm：采用 65°天顶角背景辐射近似太阳光谱；
2. 0.6~0.8μm：采用 70°天顶角背景辐射近似太阳光谱。

结合仿真场景、算法模型及软件架构，将所有输入参数模块化分类，全部参数支持软件可视化配置，分为环境参数、太阳角度参数、目标几何与材质参数、观测与探测器参数、光谱参数五大类，适配不同仿真场景自定义需求。

- （1）输入参数
- 1）环境参数
- 时空信息：仿真日期、北京时间、目标经纬度、轨道高度；
- 大气模型：1976 美国标准大气、气溶胶类型；
- 固定常量：地球/大气平均反照率 α_p ,太阳可见光总辐照度 E_0
- 2）太阳角度参数
- 核心动态角度参数包含太阳入射角 θ_i (入射光线与目

亮度/强度，积分合成目标整体光学特性；

步骤 6：纹理映射与渲染：将光学计算结果转为纹理数据，实时更新 osgEarth 场景中目标模型表面亮度，融合红外图像完成渲染；

步骤 7：数据存储与动态迭代：保存仿真数据与场景画面，更新目标轨道姿态，循环逐帧推演，实现连续动态仿真。

1.1.9.4.2 大气传输计算

大气传输特性建模模块基于 Modtran 动态链接库研发，其计算的大气模型精度可以满足工程需求，但是计算时间较长，无法在实时仿真中直接使用。因此，应事先计算大气模型数据并保存，目的是通过预处理来完成耗时的计算。再在实时图像生成阶段，根据目标与探测器之间的几何关系插入相应角度、距离的大气传输模型。

要素建模阶段，依据大气透过率和路径辐射对位置信息依赖关系，计算关注范围内所有传输几何路径对应的大气透过率、光谱程辐射，结果组织为动态渲染需要的纹理。

为满足高分辨率、高帧频的实时仿真中每个片段程序对这些物理量的高效获取，需根据气象条件、观察几何等参数的变化进行大气辐射数据预计算，根据目标与探测器之间的几何关系插入应角度、距离的大气传输模型。要素建模阶段，依据大气透过率和路径辐射对位置信息依赖关系，计算关注范围内所有传输几何路径对应的大气透过率、光谱程辐射，结果组织为动态渲染需要的纹理。

这里选取分解为探测器海拔 h_0 、视线天顶角 θ_0 与路径长度 L 这三个分量等这三个分量组合作为预计算结果的索引参数，如下图所示。

设置格式[wyc]: 标题 5, 缩进: 首行缩进: 0 毫米

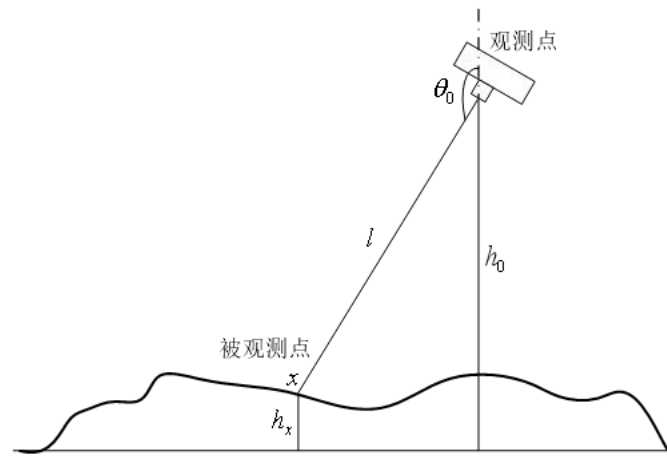


图 49 观察几何路径示意

设置格式[wyc]: A2 图编号, 缩进: 首行缩进: 0 毫米

1.1.10 支撑环境模块

支撑环境模块由仿真引擎、内/外部信息交互模块、信息/数据可视化子模块和数据库子模块组成。

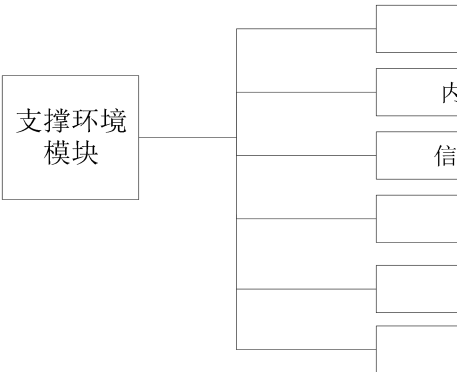
(1) 仿真引擎

仿真引擎是封装了图形算法、时间推进、模型调度、运行控制、图像存储等功能的三维图形开发环境，本次使用 C++ 开发，要面向对象可跨平台且使用灵活，对底层图像语言进行抽象，提供基于现实世界对象的接口，让开发者使用少量代码就能构建一个完整的三维场景，让开发更方便、更直接。

(2) 内/外信息交互模块

内/外信息交互模块实现软件模块间、软件与本地硬盘、软件与外部系统的信息交互，包含与内部、其他系统交互的所有数据内容，如 HLA 接口、C/S 接口、上位机实时仿真数据等。模块主要功能有：

- a) 外部信息交互模块提供外部数据交互 API，提供分布式 RTI 的体系结构模型，用于实现外部数据接收、反馈；
- b) 数据解算模块实现外部数据的解算；



删除[wyc]:
支撑环境模块结构

c) 内部信息交互模块实现内部模块间数据的转换和分发。

(3) 信息/数据可视化

信息/数据可视化模块主要负责数据、文字、图像、或曲线的方式显示信息、数据。功能如下：

a) 数据显示功能:提供 API 函数，对软件运行的信息、软件产生的部分数据以数据、文字、图像或曲线的方式显示。

b) 信息/数据显示控制功能:提供 API 函数用于控制信息/数据显示的内容和方式。

(4) 数据库子模块

数据库子模块主要实现对制备的目标、背景数据的管理，包括：

a) 对库中进行目标、背景模型的添加或删除；

b) 预览目标、背景模型效果；

c) 储存目标、背景模型。

1.1.10.1 仿真引擎

(1) 天空背景渲染

在进行大规模光学场景仿真时，需要对天空背景辐射数据进行特殊的预处理，即使用 MODTRAN 预先对大气散射进行计算，生成红外波段可以使用天空背景辐射纹理。

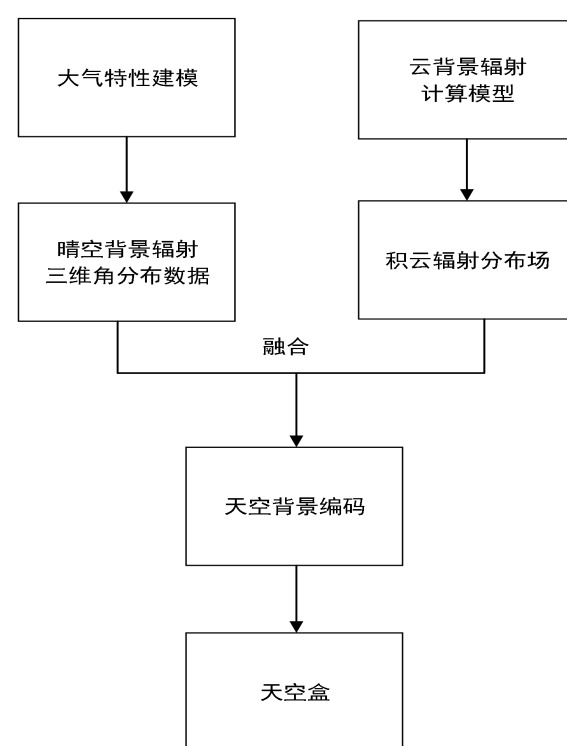


图 50 天空背景生成流程图

（2）云层辐射计算理论

在可见光波段，云是散射体——它把太阳光几乎无吸收地散射掉，图像上呈现为高亮、高反照率的团块。但在红外波段，云的角色发生根本反转：它变成一个强吸收、强发射体，同时仍保留一定的散射能力。这种“发射 + 散射 + 透射”三者并存的混合机制，使得云层既是辐射源（自身发热），又是衰减介质（遮挡背景），还是反射体（中波白天反射阳光）。

在平面平行大气假定下，沿观测方向 $\mu = \cos \theta$ 的红外辐射传输方程为：

$$\mu \frac{dL(\tau, \Omega)}{d\tau} = L(\tau, \Omega) - S(\tau, \Omega)$$

其中源函数 S 在热红外（局地热平衡 LTE 成立）下由两部分构成：

$$S = (1 - \omega)B(T) + \frac{\omega}{4\pi} \int_{4\pi} P(\Omega' \rightarrow \Omega)L(\Omega')d\Omega'$$

B(T): 普朗克黑体辐射亮度, 由云层温度决定; $\omega = \sigma_s/(\sigma_s + \sigma_a)$: 单次散射反照率; P: 相函数。红外波段的关键简化: 与水云在可见光 ($\omega \approx 1$) 不同, 云粒子在热红外吸收显著, ω 明显小于 1 (水云 LWIR 约 0.5 量级, 冰云更低)。因此热红外中热发射项 $(1 - \omega)B(T)$ 占主导, 散射项可视为修正项。极限情况下 ($\omega \rightarrow 0$) 退化为纯吸收-发射的 Schwarzschild 方程:

$$L_{\uparrow}(0) = L_{\uparrow}(\tau_s)e^{-\tau_s} + \int_0^{\tau_s} B(T(\tau))e^{-\tau}d\tau$$

设置格式[wyc]: 行距: 单倍行距

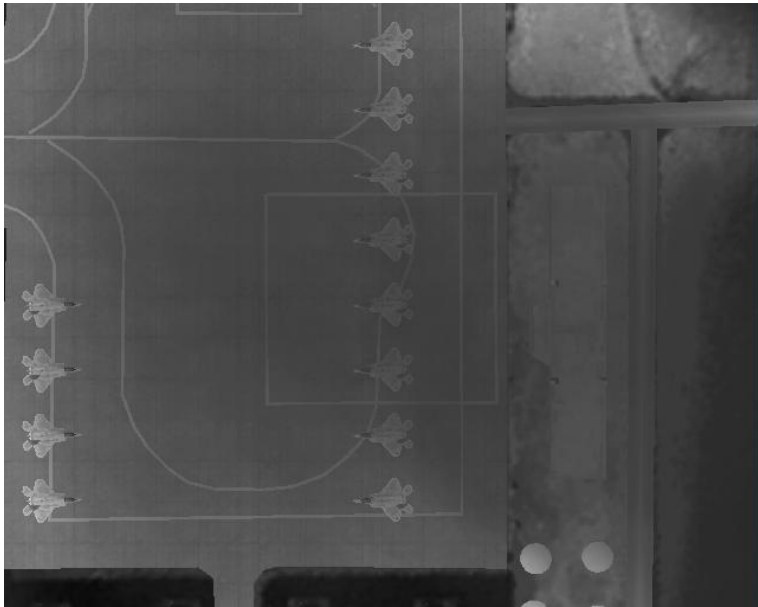


图 51 基于粒子系统的云层干扰效果

(2) 海面背景渲染

a)海面网格构建

从波浪几何形状出发, 采用多个三角函数与随机参数叠加来描述海面曲面, 效率高、实时性强, 是目前计算量适中, 适合在顶点着色器中并行执行。

综合精度与效率, 我们采用的做法是分层叠加:用 FFT 波生成大

尺度波浪骨架，再叠加法线贴图或高频噪声扰动细节，最后在特定区域(如船体周围)用 SPH 等粒子法补充小尺度破碎效果。

在 OSGEarth 仿真中，网格的作用不仅是几何显示，更是辐射计算的采样载体；顶点法线决定局部发射率与反射方向，是连接几何与物理模型的关键量。法线扰动(通过噪声或法线贴图)模拟海面微观粗糙度，直接影响 Cox-Munk 反射模型的坡度分布。面元尺寸决定辐射采样的空间分辨率，过大的面元会平滑掉白浪、破碎波等局部辐射特征，而过小的面元则会显著增加片元着色器负担。

b)海面可见光建模

在辐射传输理论中， R 是一个反射矩阵，在辐射传输方程中， R 是一个反射率，它主要包括白帽反射、海水的镜面反射、离水辐射反射率。光线经由水面射入水体，经过水体以及水体各组分的吸收和散射作用后射出水面的比例是离水辐射反射率。

$$\begin{aligned} R(+u, \phi'; -u', \phi'; x) \\ = R_{wc}(W, \lambda) + (1 - W)R_{g1}(+u, \phi; -u', \phi'; \lambda) + (1 \\ - R_{wc}(W, \lambda))R_{sw}(+u, \phi; -u', \phi'; \lambda) \end{aligned}$$

上式中， W 是一个与风速有关的量，表示白帽覆盖海洋表面的比例。

$W=2.956 \times 10^{-6} \times ws^{3.52}$ ， ws 是风速， R_{wc} 是白帽反射率， R_{g1} 是海水的镜面反射率， R_{sw} 是离水反射率。

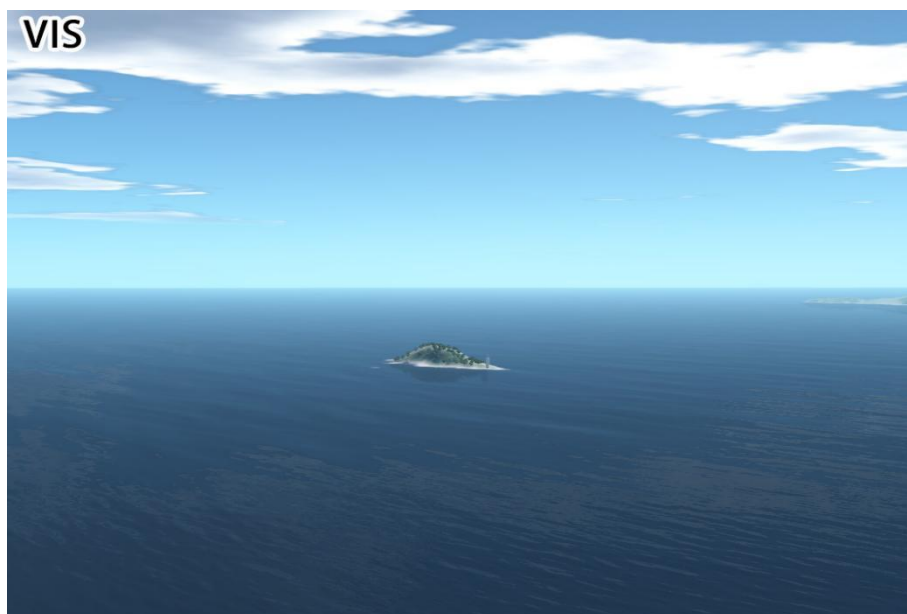


图 52 海面可见光波段效果

c)海洋红外特性模型

红外探测器接收到的海洋背景辐射，主要由海面自身发射、对太阳/天空环境辐射的反射、以及大气路径辐射三部分构成。在探测器入瞳处，海面某面元的光谱辐射亮度 L 可表示为：

$$L = \tau \cdot \epsilon \cdot L_{bb}(T_{sea}) + \tau \cdot \rho_s \cdot L_{sun} + \tau \cdot \rho_d \cdot L_{sky} + L_{path}$$

其中：

τ 为大气透过率；

ϵ 为海面发射率；

$L_{bb}(T_{sea})$ 为基于海表温度 T_{sea} 的普朗克黑体辐射亮度；

L_{sun} 为入射至海面的太阳直射辐射亮度；

L_{sky} 为入射至海面的天空背景辐射亮度；

ρ_s 为海面对太阳直射辐射的镜面反射率（与 BRDF 相关）；

ρ_d 为海面对天空漫射辐射的反射率；

L_{path} 为海面与探测器之间的大气路程辐射。

在红外 $3\sim 5\mu m$ 波段中，反射太阳直射辐射（尤其是太阳耀眼）

占主导；而在 8~12 μm 波段，海面自身发射辐射为主，反射贡献相对较小但不可忽略。

1) 天空背景反射

天空背景辐射来自全空间立体角，若精确计算需对所有入射方向进行积分。为简化计算，工程上常用 45° 入射角的天空等效辐射代替全天空积分，或采用蒙特卡洛采样近似。



图 53 尾流可见光仿真图像



图 54 尾流红外仿真图像

(2) 干扰效应仿真渲染

干扰效应的仿真渲染过程主要采用两种实现手段：基于二维实测

图像和基于三维的粒子系统。

基于二维实测图像的方式将实测干扰效应图像作为模型模板，即利用实际亮度图像作为仿真资源来表现出模型的形状或者细节并对其进行纹理生成后，与场景图像进行合成时可以进一步增强仿真的真实感。用实拍的亮度图作为纹理可以缩小真实场景与仿真结果的感官上的差异，且实拍图避免了纹理在手工制作或数学建模上繁冗的工作量，可以提高仿真渲染的效率，缓解由于复杂计算带来的内存压力。其合成的具体流程图如下图所示：

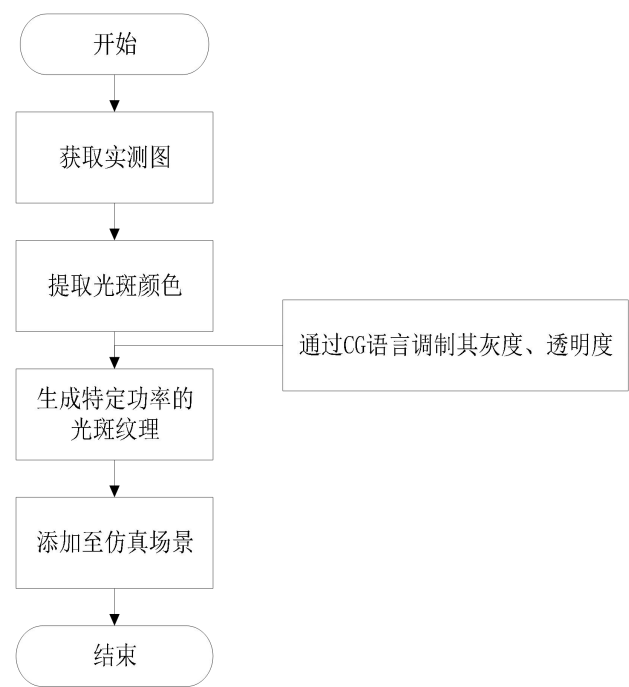


图 55 实测干扰效应图像与场景图像合成流程图

从上图中可以看出在整个合成流程中，主要包括以下几个步骤：

- a)获取实测图：通过真实干扰入射探测器产生激光光斑作为实测图。
- b)提取光斑颜色值：由于激光光斑在实拍图中属于高亮度（高灰度值）的点的集合，故可根据阈值分割技术，通过设定适当的阈值，提取出实拍图中的激光光斑的成分。由激光干扰在感光元件 CCD 上

的成像原理，两类串扰都以均匀的亮线穿过光斑，并且贯穿整个探测器视口，产生的亮纹灰度值与宽度保持在一个很小的范围，基本不变。故可以根据已知的串扰灰度值均值加入小范围随机扰动更新串扰的范围。

c)调制灰度、透明度：由于激光干扰的光斑在实际情况中，一直对准的是探测器即我们的仿真视口，且需要在 4π 空间中对探测器可见并且实时追踪探测器，故采用公告板技术对激光光斑进行仿真渲染。根据得到的基础模型，并基于 Billboard 技术制作该光斑的渲染资源；光斑在边缘一定是有过渡的，根据原始图像的亮度，中间区域是全饱和的状态，即能量在激光光斑中间区域时饱和，而边缘处有一些能量溢出导致在这部分区域有一部分是光斑能量，有一部分是背景能量，故需要利用 CG 语言对其通过对透明度调制。

d)添加至仿真软件：结合仿真软件，实现最终实测干扰效应图像与场景图像合成的渲染结果。



图 56 实测图像与场景合成效果

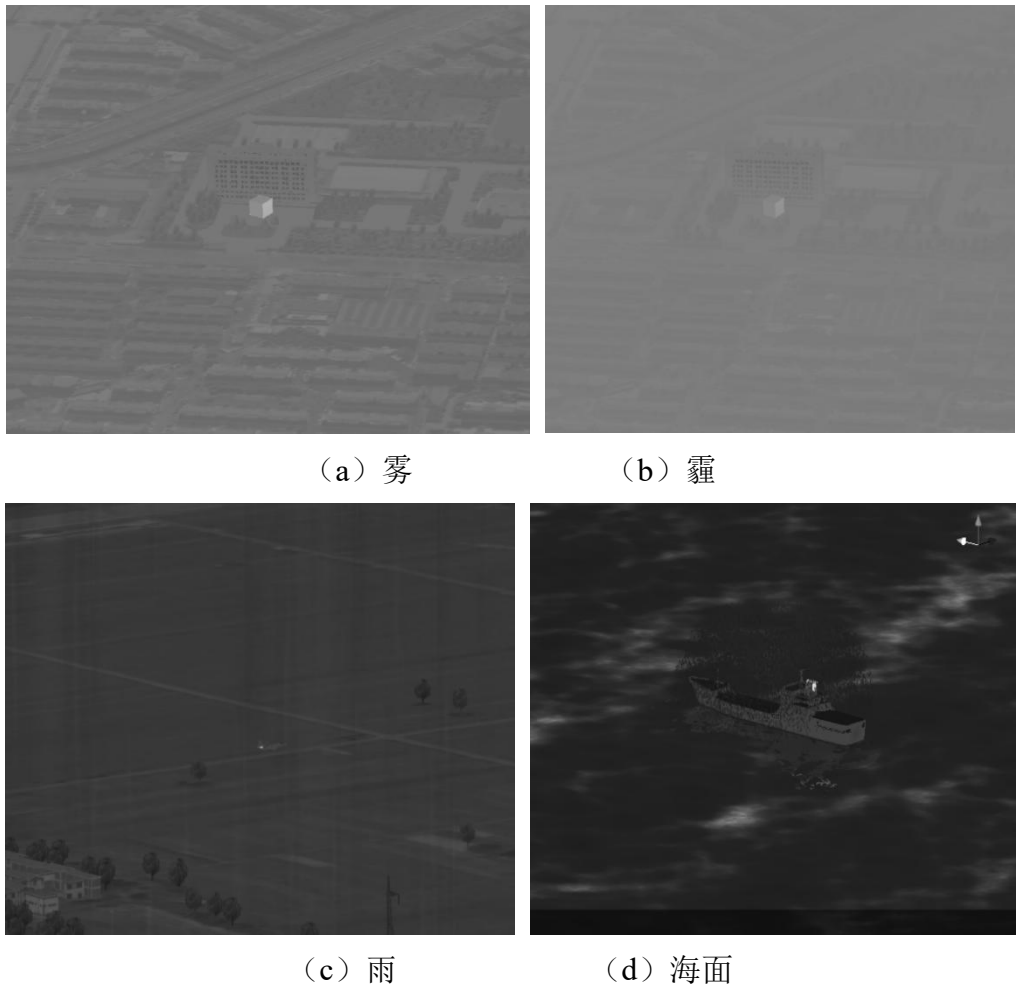


图 57 雨/雪/霾/海面效果

1.1.10.2 内/外信息交互子模块

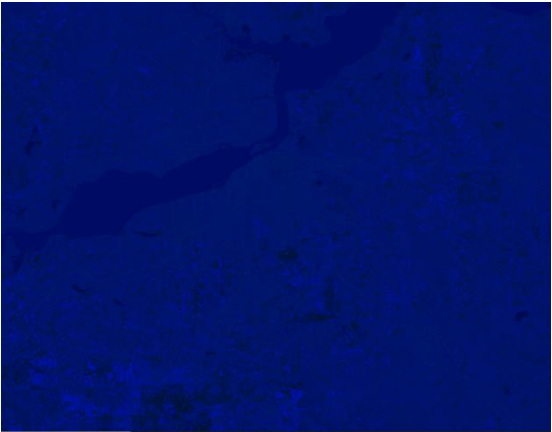
(1) 工作流程

内/外信息交互子模块负责内/外部信息的交互，其中，内部信息交互功能实现内部模块间数据的转换和分发，外部信息交互包括处理与外部其他系统交互的所有数据内容，如通过串口接收框架角信息；渲染生成的每一帧数据通过 DP 接口发送至红外目标特征模拟系统，并实时反馈运行状态（软件是否处于通讯状态），流程图如下图所示。

删除[wyc]: (4) 14/16 位颜色渲染

在图像实时仿真中，一般采用 RGB 三通道图像格式（每个通道为 8 位数据）生成图像。由于红外场景图像为灰度图像，所以 RGB 三通道数值相同，所以普通的 8 位深度三通图像无法显示 14/16 位深度的渲染过程。

为了实现 14/16 位的颜色深度，采用 RGB 三通道中的 GB 通道组合方法，将 G 通道存放高位数据，将 B 通道存放低位数据，在渲染和计算过程中，采用双通道组合的方法，将两通道组合成为 14/16 位深度数值，得到最后的 14/16 位数据，利用此 14/16 位数据进行计算和渲染的过程，保证图像的精度。因为图像数据集中在 G 通道和 B 通道，G 为 Green 通道，B 为 Blue 通道，并且 G 通道为能量的高位，B 通道为能量的低位，在渲染图像的显示端，显示出的图像呈现以低位能量为主的蓝色。



gb 通道渲染图像

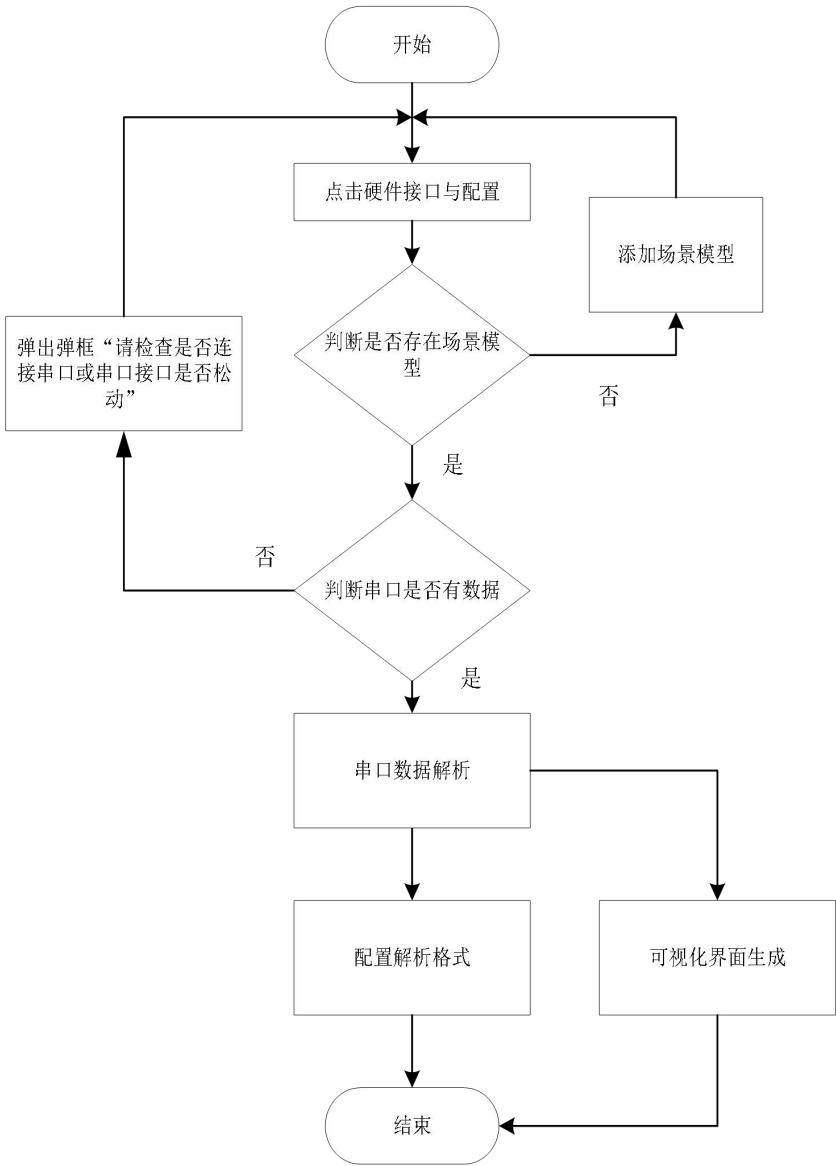


图 58 内/外信息交互子模块流程图

(2) 接口设计

内/外信息交互子模块接口见下表。

表 8 内外部信息交互子模块接口表

序号	名称	类型	备注
1	实拍数据	图片	图像格式包括：RGB、RGBA、INT、INTA、JPG、JPEG 和 BMP 等。
2	外场试验数据	文件	/
3	仿真图像	图片	/

1.1.10.3 信息数据可视化子模块

（1）模块功能

信息数据可视化子模块进行仿真过程中重要数据的展示。

（2）接口设计

信息数据可视化子模块接口见下表。

表 9 信息数据可视化子模块接口表

序号	名称	类型	备注
1	模型位置 X	浮点型	三维位置东
2	模型位置 Y	浮点型	三维位置北
3	模型位置 Z	浮点型	三维位置天
4	模型位置 H	浮点型	三维姿态偏航
5	模型位置 P	浮点型	三维姿态俯仰
6	模型位置 R	浮点型	三维姿态滚转
7	运动轨迹	字符串	/
8	视点位置 X	浮点型	三维位置东
9	视点位置 Y	浮点型	三维位置北
10	视点位置 Z	浮点型	三维位置天
11	视点位置 H	浮点型	三维姿态偏航
12	视点位置 P	浮点型	三维姿态俯仰
13	视点位置 R	浮点型	三维姿态滚转
14	弹体位置 X	浮点型	三维位置东
15	弹体位置 Y	浮点型	三维位置北
16	弹体位置 Z	浮点型	三维位置天
17	弹体位置 H	浮点型	三维姿态偏航
18	弹体位置 P	浮点型	三维姿态俯仰
19	弹体位置 R	浮点型	三维姿态滚转
20	坐标位置地形高度信息	整数型	高程
21	仿真操作指令	整数型	程序操作指令

序号	名称	类型	备注
22	反射内存卡地址	整数型	/
23	反射内存卡接收数据	浮点型	/

1.1.10.4 数据库子模块

（1）模块组成

数字库子模块由数据管理单元、数据预览单元、目标/背景/干扰存储单元组成。



图 59 数字库子模块结构

（2）数据内容

数据库包含可见光/红外目标模型、可见光/红外背景模型、材质数据，对于背景模型下视时采用瓦片地图，前视时使用.flt 地形，对于目标模型，可直接加载.flt、.osg 格式模型。

可见光/红外目标建模数据库，配备国外典型军事目标的可见光、红外模型，典型军事目标见下表所示，效果图图见下图所示。

表 10 目标数据表

序号	类型	模型名称	波段	精度
1	空中目标	飞机	可见光、红外 中波、长波	精度 0.5m
		导弹		
		直升机		
2	地面目标	坦克	可见光、红外 中波、长波	精度 0.5m
		装甲车		
		导弹发射车		

序号	类型	模型名称	波段	精度
		雷达阵地		
		重要通信节点		
		导弹发射阵地		
		指挥所		
		机场		
		港口		
		桥梁		
		塔台		
		掩体		
3	海面目标	舰船	可见光、红外 中波、长波	精度 0.5m

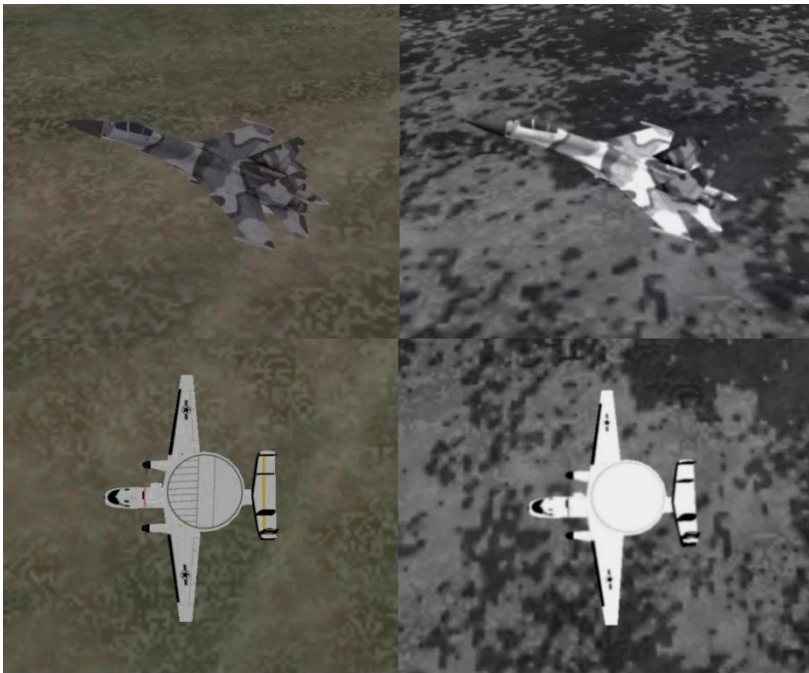


图 60 SU27-E-2C 预警机 可见光与红外

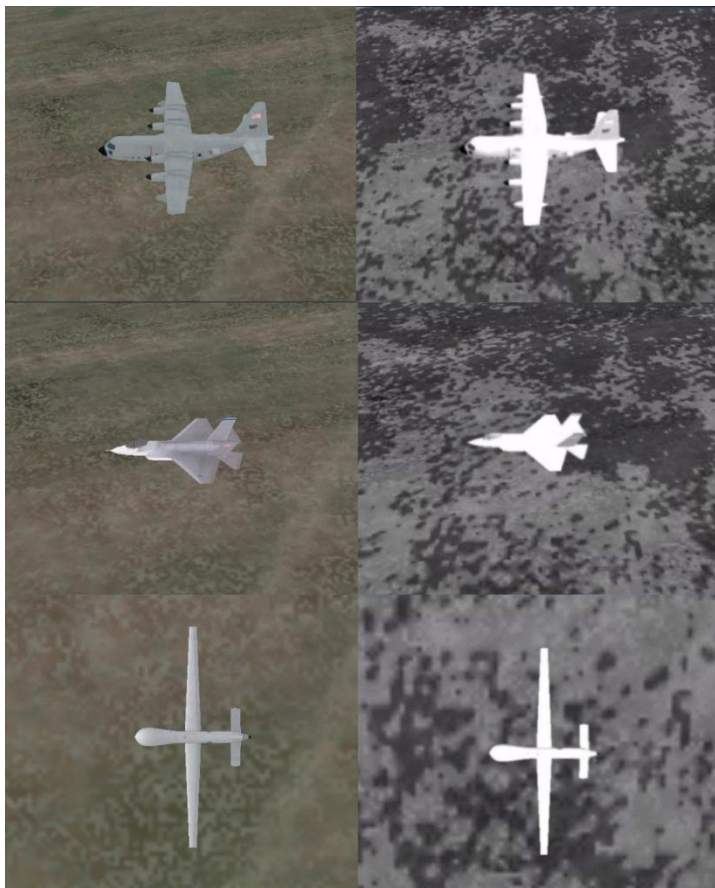


图 61 电子战飞机-F35C-无人作战飞机 可见光与红外

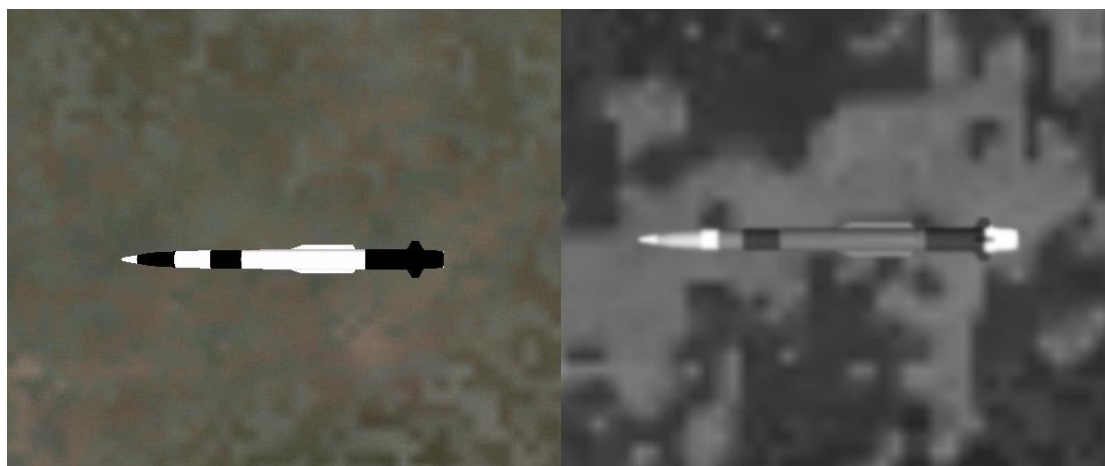


图 62 导弹 rct3 可见光与红外

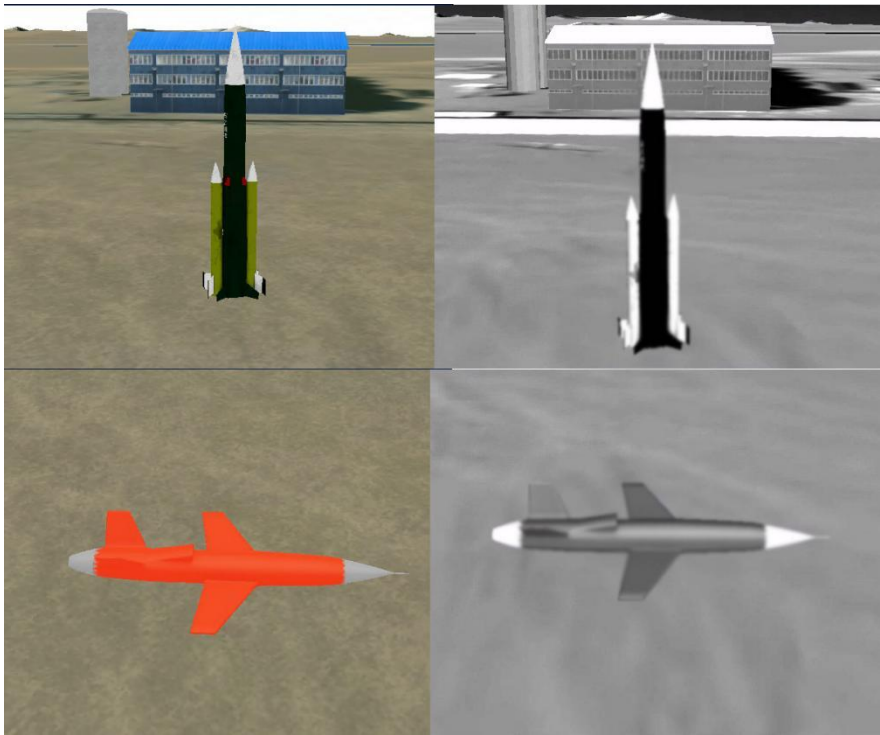


图 63 Xf3 导弹-sz250 导弹 可见光与红外



图 64 AH64D 可见光与红外



图 65 M1A1-M1A2 可见光与红外



图 66 M2A3-ZBL09 可见光与红外



图 67 B-2-Stryker 可见光与红外

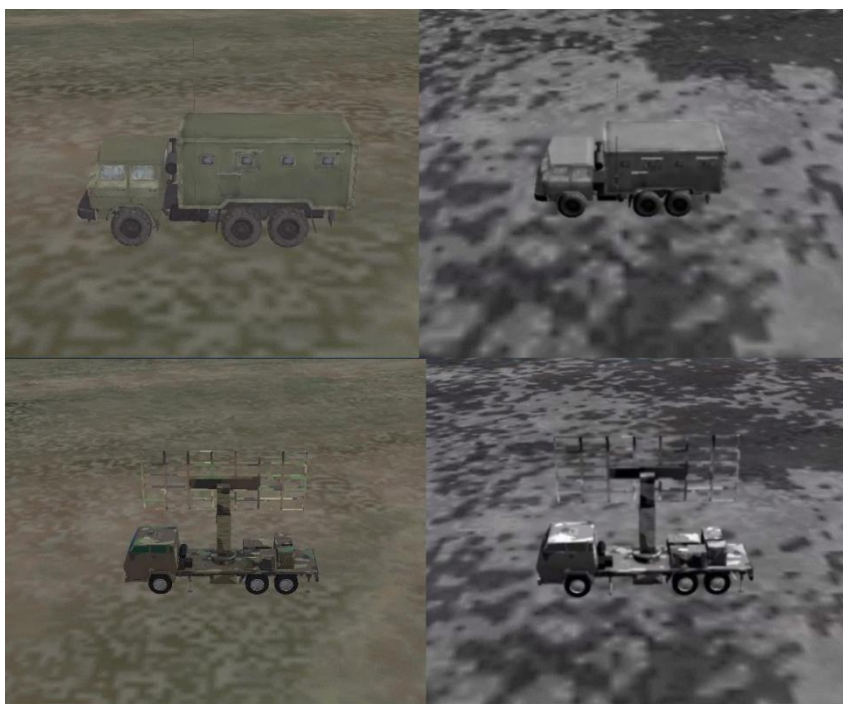


图 68 指挥车-雷达车 可见光与红外

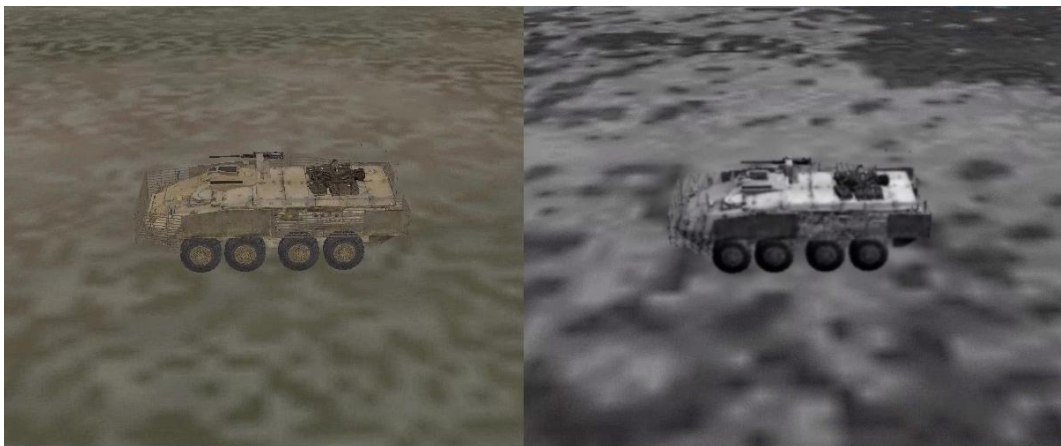


图 69 B-2-Stryker 装甲车 可见光与红外

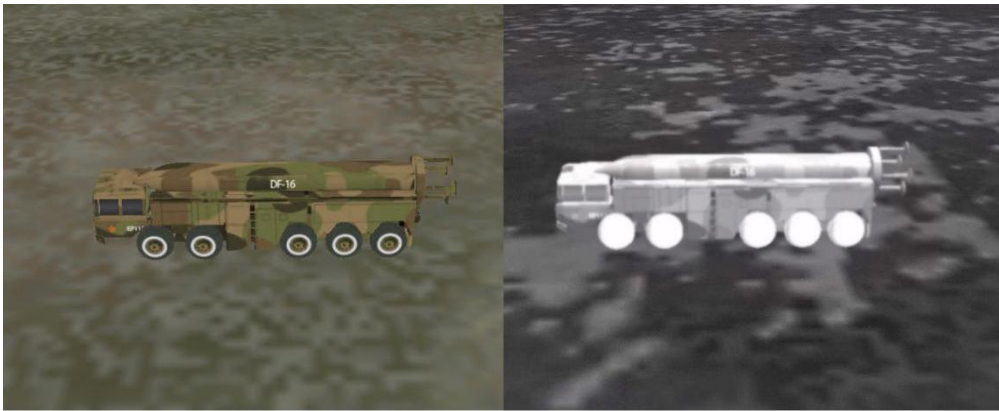


图 70 DF 导弹发射车 可见光与红外

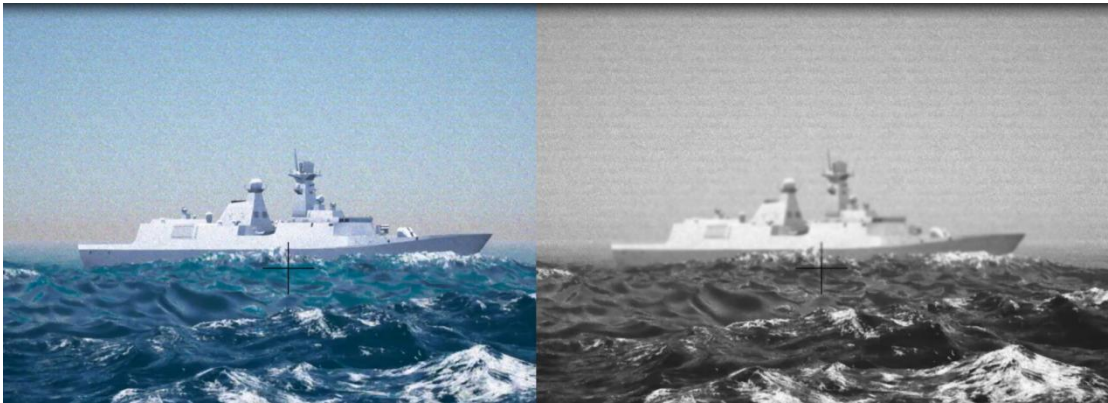


图 71 船 可见光与红外

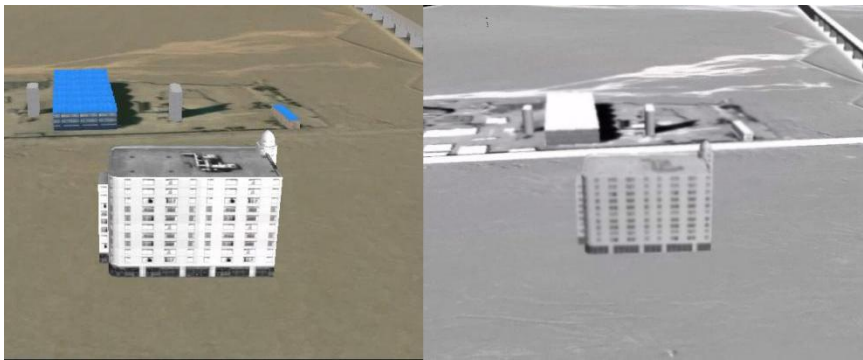


图 72 指挥所 可见光与红外



图 73 机场 可见光与红外



图 74 重要通信节点 可见光与红外



图 75 桥梁 可见光与红外

背景材质数据库包括不同背景材质数据库，如草地、泥地、沙漠、

沥青、戈壁背景，海洋、天空、港口、城市背景等。基于 DEM 数字高程模型全域地形高程数据构建三维空间几何模型；通过离散网格高程值还原真实地表起伏、山地沟壑、建筑高地等高低落差，消除平面大地模型带来的视野计算偏差，实现带地形遮挡的真实可视域仿真。

表 11 背景材质数据表

序号	模型类型	模型尺寸	备注
1	城市背景模型	30Km×30Km	-
2	乡村背景模型	30Km×30Km	-
3	沙漠背景模型	30Km×30Km	-
4	丘陵背景（含沥青道路）模型	30Km×30Km	-
5	戈壁背景模型	30Km×30Km	-
6	海岸港口背景模型	30Km×30Km	-
7	海洋（海天）	/	天空、海洋等大尺度连续背景不依托分块高程纹理建模，通过内置标准化天空、海洋材质资源库程序化生成
8	天空（晴天、多云、阴天）	/	

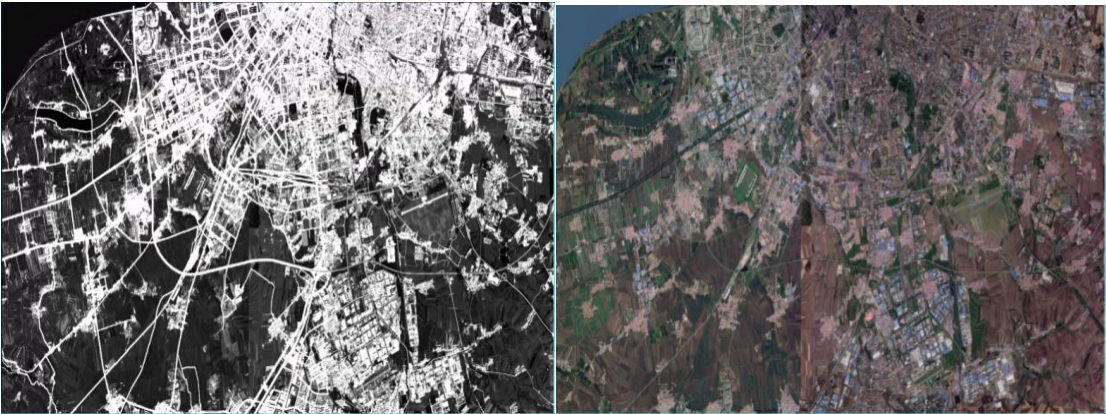


图 76 城市红外、可见光效果图

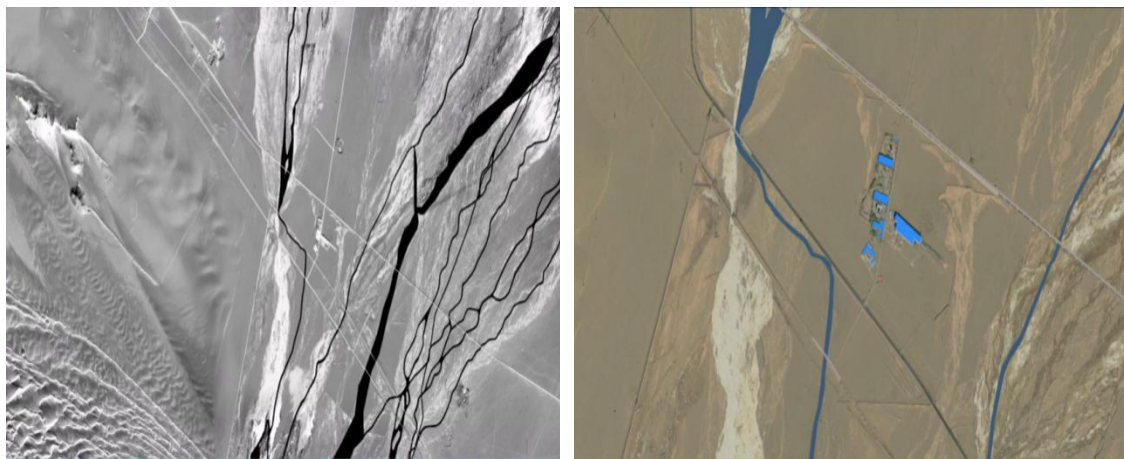


图 77 沙漠红外、可见光效果图

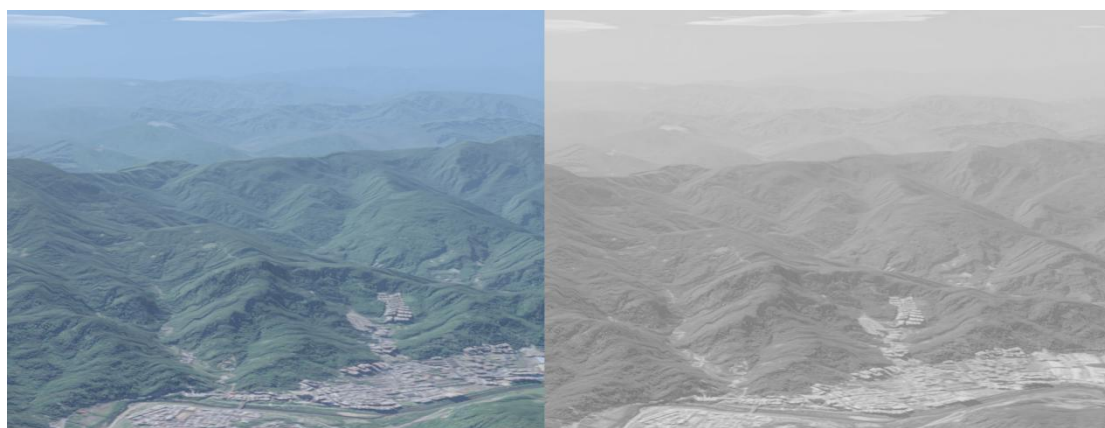


图 78 丘陵 可见光与红外效果

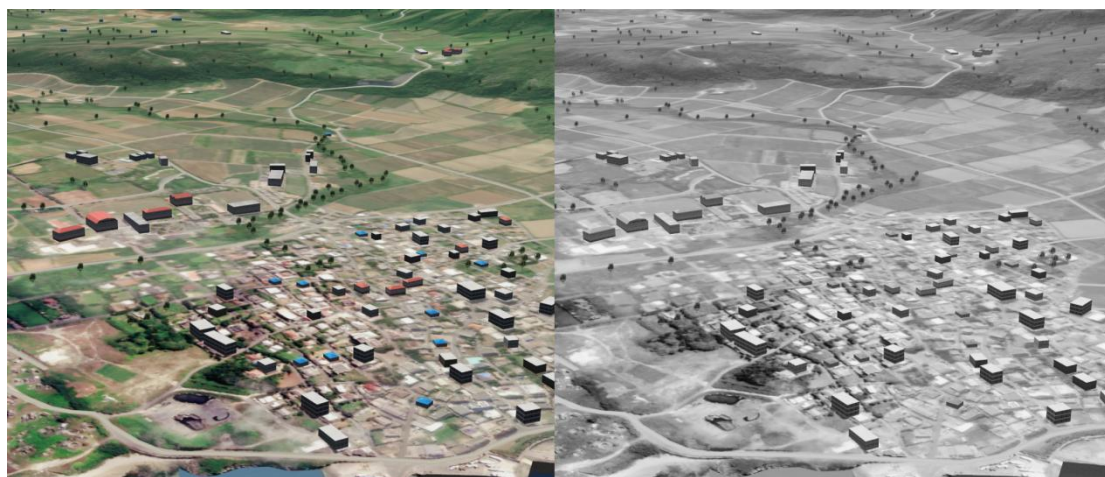


图 79 乡村 可见光与红外效果

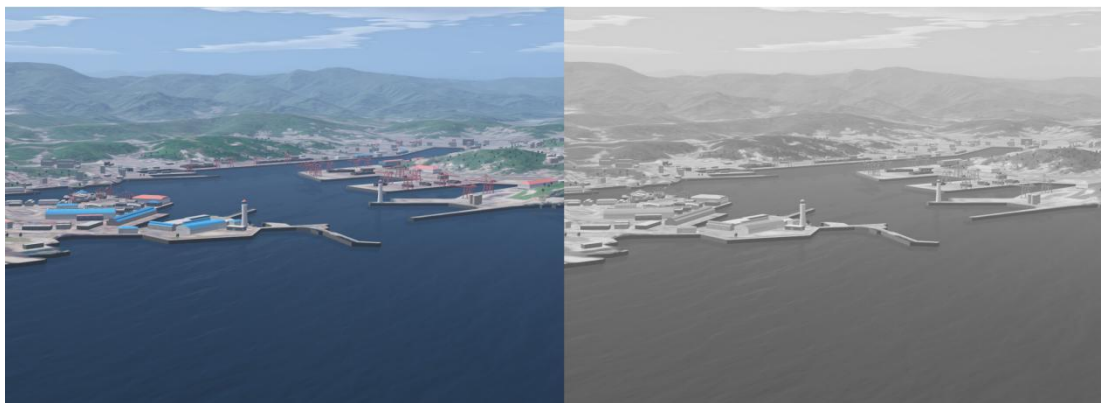


图 80 港口/海洋/天空 可见光与红外

材质库预制基础材质，含可见光~红外全波段数据，涵盖草地、泥地、沙漠、沥青、戈壁背景，海洋、天空、港口、城市背景等多类场景核心材质。如建筑物玻璃、大草地、半干草皮、森林、灌木、树干（太阳直射）、树叶（太阳直射）、沥青道路、混凝土道路、烟囱、沙子、水泥、钢塔、江河、复合板材墙壁等。

材质库支持用户自定义材质导入、属性编辑（如发射率、温度范围、反射率等）与版本控制，通过材质标签体系、属性模板映射及增量更新机制，确保材质资源的灵活扩展与高效管理，适配不同场景的纹理生成需求。

每种材质均包含发射率、导热系数、密度、比热、温度范围、辐射亮度等关键参数，可用于可见光~红外纹理转换及三维场景渲染，为高真实感纹理生成提供数据支撑。

数学模型专用转换及生成系统

mathematical model transformation and generation system

数据源管理

三维模型转换

热特性转换

光学特性库

材料条件数据

序号	名称	时间	源距类型	环境温度(℃)	起始源距(μm)	终止源距(μm)	最低温度(℃)	最高温度(℃)	最低辐亮度(W/(sr.m²))	最高辐亮度(W/(sr.m²))	最高亮度等级
1	长波	2021-01-01 10	红外波段	20.000	8.000	12.000	0.000	60.000	2.382433E+1	6.290503E+1	65535
2	中波	2021-01-01 10	红外波段	20.000	3.700	4.800	0.000	60.000	4.291779E-1	3.763490E+0	65535
3	目标干扰-100~60	2021-01-01 10	红外波段	20.000	8.000	12.000	-100.000	60.000	1.169981E+0	6.290503E+1	65535
4	目标中波-100~60	2021-01-01 10	红外波段	20.000	3.700	4.800	-100.000	60.000	4.643629E-4	3.763490E+0	65535

材料基础数据

序号	材质名称	材质类型	材质分色标准	材质发射率	低位温度(℃)	高位温度(℃)	低位辐亮度(W/(sr.m²))	高位辐亮度(W/(sr.m²))	低位亮度等级	高位亮度等级
113	建筑陶瓷墙	陶瓷	090,000,210	0.920	22.000	28.000	3.268232E+1	3.609443E+1	33451	37074
114	大草地	陶瓷	030,000,180	0.900	25.400	28.300	3.383828E+1	3.548201E+1	34679	36424
115	半干燥皮	陶瓷	060,000,060	0.880	27.300	31.200	3.413396E+1	3.634751E+1	34992	37342
116	森林	陶瓷	060,000,150	0.900	15.000	22.000	2.833321E+1	3.197183E+1	28835	32697
117	灌木	陶瓷	060,000,090	0.900	23.700	25.400	3.299682E+1	3.383828E+1	33679	34679
118	树干(太阳直射)	陶瓷	090,000,120	0.950	27.100	32.500	3.672814E+1	4.005573E+1	37747	41279
119	树叶(太阳直射)	陶瓷	060,000,240	0.850	21.300	25.500	2.984023E+1	3.201117E+1	30434	32739
120	沥青道路	陶瓷	180,000,150	0.950	40.000	50.000	4.496923E+1	5.205606E+1	46495	54018
121	混凝土道路	陶瓷	180,000,060	0.920	28.000	42.000	3.609443E+1	4.487426E+1	37074	46394
122	地面	陶瓷	120,000,210	0.900	22.400	25.800	3.218792E+1	3.406216E+1	32927	34916
123	沙子	陶瓷	180,000,090	0.850	28.300	35.500	3.351079E+1	3.758116E+1	34331	38631

欢迎使用：数学模型专用转换及生成系统 V1.0 版权所有：哈尔滨新光光电科技股份有限公司 已运行：0天0时2分10秒 当前时间：2024年03月14日 15:14:33

图 81 材质库表

（3）数据配置

数据管理模块提供高易用性的人机交互界面，可实现背景模型、目标模型、干扰模型等各类模型的分类管理功能。该模块能够自动生成通用 XML 格式数据文件，可为跨模块的数据共享提供支撑，同时具备良好的可扩展性。

1.1.11 管理运维模块

1.1.11.1 模块组成

管理运维模块由试验管理子模块、运行状态监控子模块、仿真数据存储子模块组成。

```
graph LR; A[管理运维模块] --- B[试验管理子模块]; A --- C[运行状态监控子模块]; A --- D[仿真数据存储子模块];
```

图 82 管理运维模块结构图

（1）试验管理子模块

实现试验模式选择，包括：单机、开环注入式、开环辐射式、闭环注入式、闭环辐射式；

(2) 运行状态监控子模块

实现对软件运行控制，包括：开始、结束、暂停、继续、复位；

(3) 仿真数据存储子模块

实现对仿真图像和试验条件数据的存储，存储的数据可用于试验数据的回放。

1.1.11.2 试验管理子模块

a) 输入输出

表 12 试验管理子模块输入输出表

序号	名称	类型	默认值	输入\输出	描述
1	试验模式	Int	0	Out	0 = 单机预演仿真 1 = 联机仿真仿真
2	开始指令	Bool	False	Out	/
3	结束指令	Bool	False	Out	/
4	暂停指令	Bool	False	Out	/
5	继续指令	Bool	False	Out	/
6	复位指令	Bool	False	Out	/

b) 工作流程

试验开始前，选择试验模式：单机预演仿真、联机仿真仿真，不同的仿真模式有着不同的仿真数据来源。开始、结束指令控制仿真的开始和结束；为便于观察仿真过程，单机预演仿真模式下可以对仿真进行暂停、继续的操作；复位指令应用在仿真中有复杂动作的情况，例如弹体分离，此时发送复位指令可以让目标重新组合，从而进行重复试验。

1.1.11.3 运行状态监控子模块

a) 输入输出

表 13 输入输出表

序号	名称	类型	默认值	输入\输出	描述
1	操作记录	String[]	Null	Out	操作记录以文本的形式逐条显示于界面并保存至日志文件
2	故障记录	String[]	Null	Out	故障记录以文本的形式逐条显示于界面并保存至日志文件
3	运行状态	Int	0	Out	已开始 暂停 已停止等
4	帧频	Int	20	Out	/
5	目标 i 位置姿态	Float[]	0	Out	可多目标同时查看
6	视点 i 位置姿态	Float[]	0	Out	可多视点同时查看
7	目标视点距离	Double	0	Out	/
8	锁定目标名称	String	“”	Out	/

b) 工作流程

运行状态监控子模块将用户的操作过程和仿真过程中的重要节点信息显示到界面上，同时将这些信息存储到日志文件中供仿真结束后回看，进行仿真分析和故障判断；子模块实时监控仿真数据，如仿真频率、目标视点位置姿态、弹目距离等信息；当仿真过程出现故障时，子模块显示故障位置、故障原因及建议的解决方法。

1.1.11.4 仿真数据存储子模块

a) 输入输出

表 14 仿真数据存储子模块输入输出表

序号	名称	类型	默认值	输入\输出	描述
1	条件数据	Struct	/	Out	/

序号	名称	类型	默认值	输入\输出	描述
2	图像数据	Mat	/	Out	/
3	视频数据	Mat	/	Out	/

软件基于 OpenCV 完成图像帧读写、视频编码，搭配 FFmpeg 封装 H.265 编码，统一以 cv::Mat 作为仿真图像中间载体，对外封装统一导出接口，区分静态图片（JPG/PNG）、动态视频（MP4/H.265）两类输出逻辑。

针对数据回放功能，仿真数据存储模块对仿真过程各时刻的域参数进行存储，生成仿真条件参数文件，当仿真软件再次启动时可读取该条件数据，实现对既往仿真试验过程的复现。

b) 工作流程

仿真数据存储模块从显存抓取图像，以图像/视频格式存储于设置好的本地目录下，同时将该帧图像对应的条件数据以文本形式存于同一目录下。