

文章编号:1001-5078(2024)06-0958-06

· 光电技术与系统 ·

典型光电系统的数字孪生技术

张熙宁,温庆荣,贾文溥,张乾坤,崔升阳,李红
(华北光电技术研究所,北京 100015)

摘要:数字孪生技术将多学科多物理场的系统通过多维异构时序数据进行统一设计和管理,可构建高保真度的数字化镜像模型。本文基于此项技术,对典型光电系统的数字化模型提出了构建的思路和方法;同时结合场景要素本征物理特性分析,描述了高真实感红外场景数字孪生仿真的关键技术。数字模型和场景仿真的有机结合能够准确地实现光电系统的实时交互和迭代运行及优化,高效高质量地缩短产品的研制周期。

关键词:数字孪生;镜像模型;光电系统;场景仿真

中图分类号:TH74;TP202 **文献标识码:**A **DOI:**10.3969/j.issn.1001-5078.2024.06.018

Digital twinning technology of typical electro-optic systems

ZHANG Xi-ning, WEN Qing-rong, JIA Wen-pu, ZHANG Qian-kun, CUI Sheng-yang, LI Hong
(North China Research Institute of Electro-Optics, Beijing 100015, China)

Abstract: Digital twinning technology unifies the design and management of multi-disciplinary and multi-physical field systems through multi-dimensional heterogeneous time series data, which allows the construction of high-fidelity digital mirror model. Based on this technology, this paper puts forward ideas and methods for constructing a digital model of a typical photoelectric system. Meanwhile, combining with the analysis of the intrinsic physical characteristics of scene elements, the key technologies of digital twin simulation of high realistic infrared scenes are described. The organic combination of digital model and scene simulation can accurately achieve real-time interaction and iterative operation and optimization of photoelectric systems, and shorten the product development cycle with high efficiency and high quality.

Keywords: digital twinning; mirror model; electro-optic systems; scene simulation

1 引言

数字孪生以数字化方式建立物理实体的多维、多时空尺度、多学科和多物理量的动态虚拟模型来仿真和刻画物理实体在真实环境中的属性、行为和规则等。由于数字孪生具备虚实融合与实时交互、迭代运行与优化以及全要素/全流程/全业务数据驱动等特点,目前已应用于产品生命周期各个阶段。2019年,美国海军通过虚拟化“宙斯盾”系统的核心硬件,构建了“宙斯盾”系统的数字孪生系统,在托马斯·哈德纳导弹驱逐舰上利用虚拟“宙斯盾”系统发射了导弹并成功命中目标,实现了美国海军武器系统形态和升级模式的重大变革。^[1]

典型的光电系统广泛应用于各类武器平台,提

供火控引导、侦察监视、情报获取、预警探测和光电对抗等功能。随着目前作战需求的不断提升,光电系统面临着新领域、新能力、新平台、新模式、新形态和新功能的挑战,系统集成度和研制难度急剧增加,研制周期需要进一步压缩以满足快速迭代的产品开发要求。因此,以数字化为基础建立系统的物理镜像模型,在虚拟环境下结合光电系统的物理组成、作战对象及作战环境,实现对应的作战性能指标的仿真分析,通过调整模型的参数,达到指标的最优化,从而快速而又准确的完成光电系统的开发工作。

2 典型光电系统的组成

典型的光电系统主要由多种传感器以及精密伺服转台组成,其中常用的传感器包括红外热像仪、可

见光相机和激光测距机等。红外热像仪主要实现全天候的图像采集和处理功能,尤其针对能见度或者光照条件较差的环境下使用;可见光相机则在光照条件较好的环境下提供较高分辨率的图像信息,弥补红外热像仪图像分辨率较差的不足;激光测距机能够提供目标的精确距离信息,实现目标的精确定位。精密伺服转台则能提供方位和俯仰二维或者多维的转动,从而带动传感器快速而精确的发现并跟踪目标。大致的组成结构如图1所示。

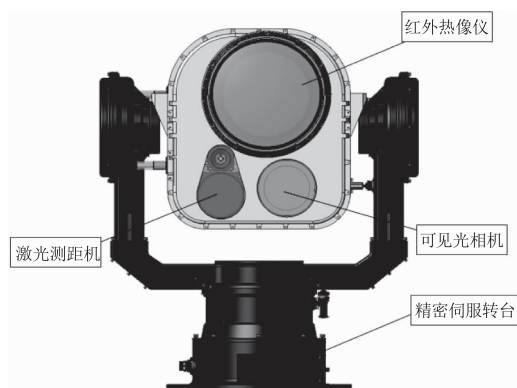


图1 典型光电系统组成图

Fig. 1 Typical optoelectronic system composition diagram

3 光电系统的数字孪生总体方案

光电系统的数字孪生总体方案包括两个大的方面,一是完成光电系统本身的数字镜像,创建出物理

实体的虚拟模型;二是构建符合辐射散射传输机制的虚拟战场环境,建立复杂环境下目标辐射散射特征精确预测模型、目标环境作用下成像信息链路模型、各专业分系统物理特性关联模型,从而形成高逼真度全链路信息感知/控制过程一体化光电系统作用模型。光电系统的数字镜像是对物理实体中光学、电路、控制、结构、材料、元器件、软件、工艺等物理规律进行分析,并在虚拟空间中建立数字化模型和数据映射关系,打通数字镜像与物理实体之间的数据同步能力,利用物理实体的数据驱动光电数字镜像真实度得到持续演进,利用数字镜像的数据驱动物理实体健康度得到有效保持。

同时,依据光电系统全寿命周期对仿真技术的需求,立足于系统端到端全链路建模仿真思想,按照“数据管理—建模与设计—图像生成—模型置信度验证”四层结构开展总体方案设计。在数据层面,收集全链路各环节物理特性描述参数、数据和模型;在场景设计与链路模型构建层,主要完成目标、背景、干扰、大气环境、光电传感器、伺服控制系统各环节物理特性模型构建、物理效应预处理,形成动态渲染所接受的数据格式;在动态图像生成层,主要通过一体化渲染引擎,按照光电系统的信息链路传递和耦合机理,形成量化红外图像动态生成平台,如图2所示。

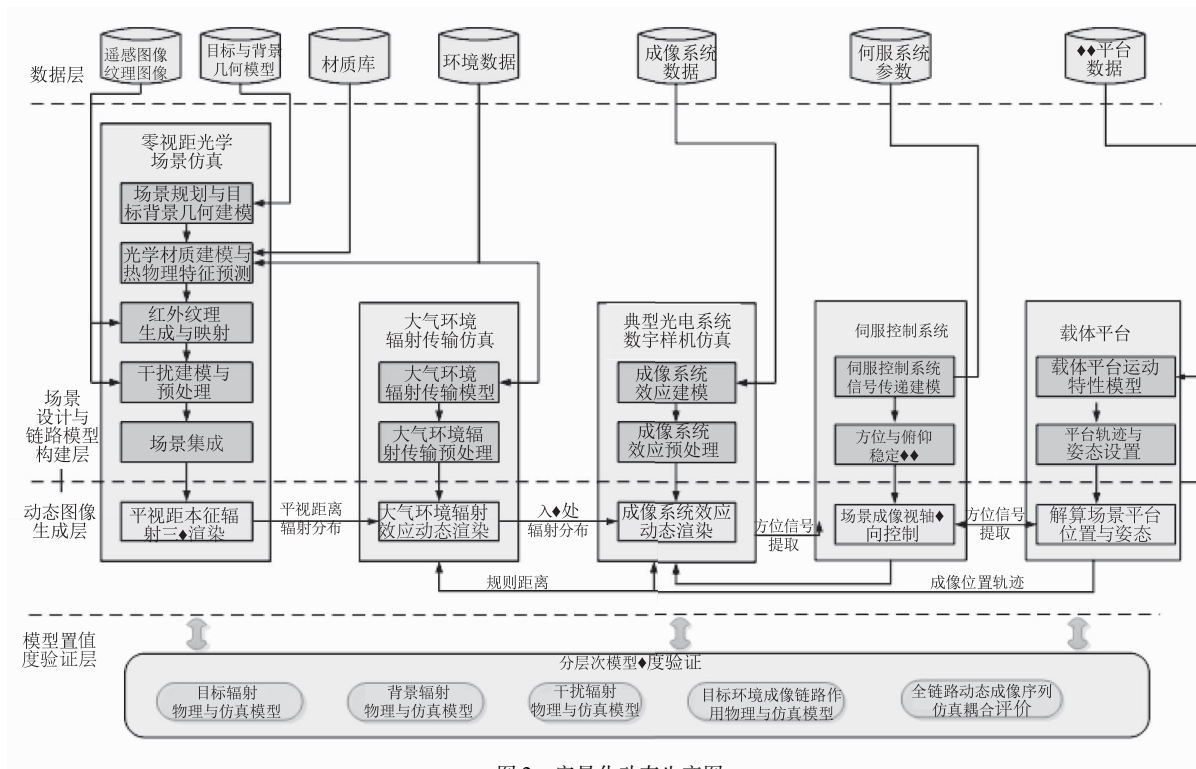


图2 量化动态生产图

Fig. 2 Quantitative dynamic generation of graphs

4 光电系统的数字孪生实施途径

4.1 光电系统的数字镜像构建技术

4.1.1 多学科外设的数字化建模及数字化镜像集成

光电系统的光机电外设隐含复杂的多学科物理规律,其集成的难点在于如何将多学科物理模型以统一的时序、统一的物理法则、统一的视景表现集成在一起,形成逼真度较高的综合化数字模型。同时,多学科外设模型还与外部环境之间存在较密切的信息交互和物理法则耦合关系,因此在技术实现策略上需要进行深入研究及合理设计。该光电系统的数字化主要包括外设组件的数字化,如红外热像仪、随动控制组件中电机及控制设备以及激光测距机,以及嵌入式计算机设备及其接口总线的数字化。

① 红外热像仪的数字化

红外热像仪的数字化成像模型需要重点研究和集成响应转换特性、空间传递特性、空时域噪声特性、空间成像几何转换特性等 4 个关键模型。

红外成像传感器的响应转换特性与光学系统的能量衰减、像面照度分布,探测器的采样尺寸、响应转换、光谱响应、非线性响应,信号处理电路的放大增益和动态范围密切相关,针对红外成像传感器的光谱响应特性,结合光学系统、探测器和信号处理电路对场景光谱辐射信号的作用机理,以探测器的非均匀响应作为噪声考虑,利用宽光谱响应累加等效模型替换光谱积分现有模型,建立从输入场景辐射阵列系统输出图像灰度转换的数字化模型。

空间传递特性取决于光学系统的衍射、像差、离焦,探测器的时间滤波、像移、抖动,信号处理电路的 CCD 转移、扩散、电子滤波、高频提举等^[2]。以光学系统的综合调制传递函数、探测器调制传递函数、电路设计硬件和软件的电路滤波函数为基础,通过级联相乘获得系统综合传递函数高置信度模型,建立后端处理的基础模型。

成像传感器时域噪声分成为时间噪声和空间噪声。时间噪声是一种随机噪声,光学系统内部和外部对时间噪声都用贡献;空间噪声是探测器进行非均匀性校正后残留的固定图样噪声^[3]。整体特性则受制于探测器的响应均匀性、随机噪声和后续信

号电路的放大增益及噪声抑制算法等。通过三维噪声模型来关联噪声等效温差和非均匀性的关系,实现噪声分量的简化处理;同时将探测器的噪声等效温差和非均匀性转换成噪声灰度图像或数据,实现噪声特性建模的高置信度。

成像几何转换数字孪生模型分为通用成像几何模型和严格成像模型,依据传感器的几何形态与物理构造特点,分析影响红外成像几何畸变的全链路各环节因素,通过建立地面点与其对应像点在传感器坐标系中的坐标关系,可准确分析其与实际成像几何位置的偏差,建立成像时的误差影响因素的时空传递几何成像模型。

② 随动控制组件中电机及控制设备的数字化

随动控制组件是光电系统中控制红外及激光传感器光轴运动并指向目标的核心组件吗,其电机及控制设备的数字化主要体现在对电机、码盘和陀螺的仿真模拟,因此数字化建模的要点包括:

(a) 电机的模型构建,阻力系数可配置,电机运转输出值包括转动角度和转动速度;

(b) PWM 控制模型构建,控制电机运转。

通过构建电机 PWM 调速控制系统仿真模型来实现电机数字化,包括:

(a) 基于 Simulink 构建电机、码盘、陀螺的物理模型;

(b) 构建带有 PID 调节器的 PWM 脉宽控制器模型。

对于电机模型、PWM 脉宽调制器模型和 PID 控制模块都可以采用 Simulink 构建相关数学模型方式来进行,通过调节相关参数,实现电机运动的模拟。

③ 激光测距机的数字化

激光测距机最大测距能力的因素主要包括设备本身性能参数、战场条件和自然条件,激光测距的测程与脉冲激光的功率、激光束的发散角、目标的反射特性、接收系统灵敏度以及大气透过率有关,具体的测距方程为:

激光测距机的目标测距方程为:

$$R^4 = \frac{P_t D^2 T_t T_r \rho A_c T_a^2}{\pi P_r \theta_t^2}$$

式中, P_t 为激光辐射器的发射峰值功率,单位为 W; P_r 为激光接收组件的接收峰值功率,单位为

W ; T_t 为发射光学系统的透过率; T_r 为接收光学系统的透过率; T_a 为大气的单程透过率; D 为接收光学系统有效直径, 单位为 m; ρ 为大气或其他介质的单程透过率; R 为目标距离, 单位为 m; AC 为目标的雷达散射截面, 单位为 m^2 ; θ_t 为激光发散角, 单位为 rad。

根据脉冲激光测距的实现过程, 选择合适的模型, 通过计算, 即可实现激光测距的仿真, 包括激光发射波形、随机噪声的生成、激光回波信号、噪声滤波、信号鉴别和脉冲计数及距离计算等环节, 仿真实现流程如下图 3 所示。

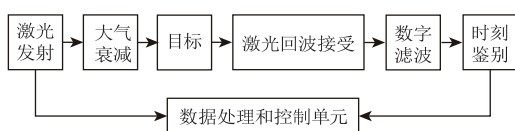


图 3 仿真实现流程图

Fig. 3 Simulation implementation flowchart

其中每个环节的主要功能是: (1) 根据激光的参数选择恰当的模型, 生成激光脉冲波形; (2) 根据模型建立恰当的衰减模型, 用以模拟实现大气的衰减效应; (3) 激光脉冲经过目标的漫发射以后, 同时结合目标物体的形状和被测距离生成激光回波信号; (4) 由于回波信号之中必然存在一定的噪声干扰信号, 结合相应的模型, 对其进行数值滤波, 模拟实现滤波电路的功能; (5) 对时刻鉴别电路进行仿真, 进而得到飞行时间; (6) 根据脉冲回波与激光发射脉冲之间的时间差, 计算目标距离的仿真值。

4.1.2 嵌入式计算机设备及其接口总线的数字化建模

计算机的数字化技术被普遍地表述为“虚拟化技术”, 通过采用虚拟化软件结合使用二进制翻译和超虚拟化的技术, 在元器件层次建立 CPU 等核心硬件的数字仿真模型, 形成的数字化计算机具有与真实计算机一致的 CPU 指令集及寄存器地址段, 可直接加载与真实组件一致的板级支持包 (BSP)、嵌入式操作系统及产品软件, 在结构上、行为上可以与真实嵌入式计算机保持高度一致^[4]。

4.2 场景要素本征物理特性精确数字孪生建模

高真实感红外场景数字孪生仿真生成是高置信度一体化红外感知光电信号数字孪生仿真的前提。红外场景仿真涉及到目标-背景-干扰-环

境大气辐射散射链路传输环节, 包括场景规划和目标背景几何建模、光学材质建模和光学辐射散射特征预测、红外纹理生成与映射、红外干扰建模与预处理、场景集成和动态渲染等处理步骤; 其中, 本征红外辐射散射综合反映了自辐射、散射、物体表面与所处环境的相互作用等特征, 预测结果准确度将直接影响场景的高真实感仿真, 其计算作为三维场景实时渲染的起始与主要阶段, 为后续的大气传输效应渲染、成像系统效应渲染等阶段提供了关键的基础数据, 是红外信号全链路仿真中最关键的一环。

具体的仿真流程和输入输出如图 4 所示。包括静态处理和动态处理两个部分, 静态仿真部分的主要任务为场景资源要素物理特性的建模和预处理, 包括三维场景的几何建模、红外辐射纹理预处理、大气效应模型、特效建模等环节; 动态仿真部分的主要作用是使用三维图形渲染引擎, 加载各种场景资源要素特性以及对三维场景进行动态渲染。

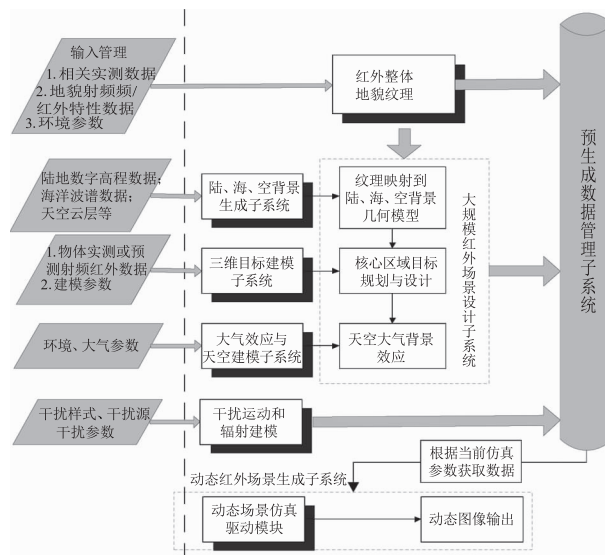


图 4 流程输入和输出图

Fig. 4 Process input and output diagram

4.2.1 飞机、舰船、车辆目标三维红外辐射数字孪生建模

针对作战目标以三维建模软件建立几何模型, 通过红外热物理计算、经验指定等多种方式, 生成包含温度场分布与表面光学属性的机身红外物理纹理, 及辐亮度等物理特征的尾焰红外纹理; 基于三维建模工具, 通过 UVW 贴图等三维贴图手段映射红外纹理; 根据复杂环境仿真中对目标特性的调整需

求,对目标区域进行合理分块,结合实际测量数据对目标区域的温度特征进行调整,完成目标红外三维模型的构建,如图 5 所示。

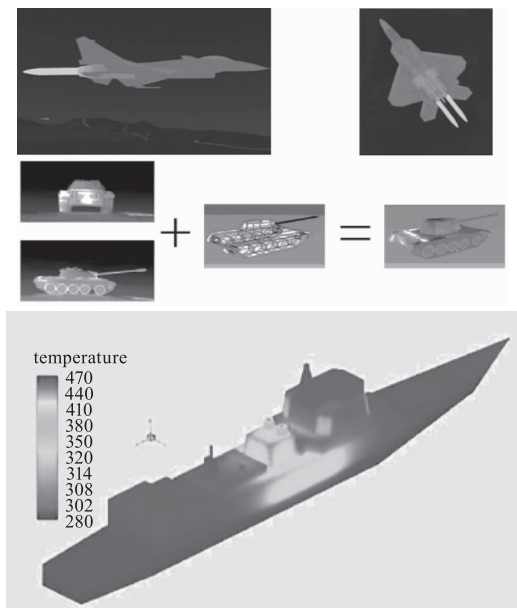
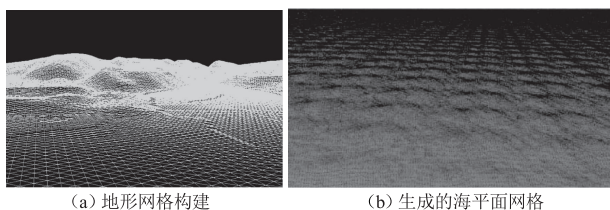


图 5 红外三维模型

Fig. 5 Infrared 3D model

4.2.2 陆地、海洋、天空背景几何数字孪生建模

针对需要建立数字孪生仿真模型的背景地区,以该地区的地形数据、地表遥感影像等资源,制作出高程灰度数据纹理。综合考虑场景实际大小、比例尺,以及地面分辨率等实际需求,生成地形三维网格模型。生成的地形网格和海面网格如图 6(a)、(b) 所示。



(a) 地形网格构建

(b) 生成的海面平面网格

图 6 地形和海面网格图

Fig. 6 Terrain and sea surface grid map

4.2.3 高真实感辐射场景数字孪生建模仿真关键技术

为保证红外场景仿真高真实感,可采用基于可见光遥感图像的地物背景红外纹理生成方法、基于实测图像的目标与干扰纹理生成方法、环境光照与车辆、飞机舰船目标背景作用双向反射精确建模、场景辐射散射与大气传输光谱耦合特性建模、远距离弱小目标信号重采样等几个方面对场景各要素进行高置信度建模仿真。如图 7 所示。

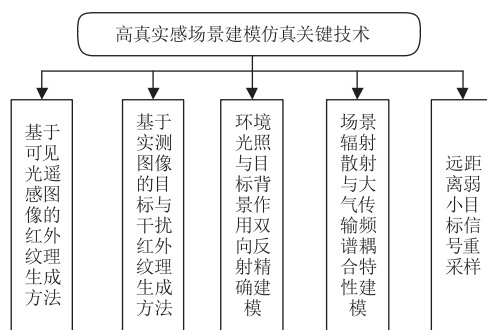


图 7 关键技术组成图

Fig. 7 Key technical composition diagram

① 基于可见光遥感图像的地物红外高真实感纹理设计方法

基于可见光遥感图像生成大规模地物红外纹理的改进方法,分别从材质的地物海拔变化、可见光属性变化、相邻区域热传递等方面对红外纹理细节进行了基于物理模型的调制,生成了高真实感地物红外纹理,并将大规模的红外纹理应用于三维数字仿真,验证其有效性^[5]。

② 基于实测图像和反演模型的目标与干扰高真实感纹理生成方法

通过实际测量的辐射特征、温度特征以及电磁参量分布,建立数学反演模型,并进行校正和补偿,并将目标自身特征与其他混合辐射、成像波段、观察距离等因素进行解耦^[6],从而生成高真实感红外纹理。获取的目标红外特征自然、准确,纹理细节丰富,实用性强。

③ 环境光照与天空辐射散射数字孪生模型

该模型分成天空背景的红外辐射和传输特性以及地、海背景红外辐射特性。天空背景的辐射和传输模块,包括大气和云层的红外辐射与传输特性。对于大气的辐射与传输,采用分层辐射传输理论结合实验测量的大气廓线建立大气辐射传输数字孪生模型,与 Modtran 软件相互验证。云层的辐射与传输特性,取决于卷云的辐射传输特性,根据卫星云图反演云的覆盖率、光学厚度等参数,进而理论计算云层的辐射和传输特性,并与大气的辐射与传输特性进行耦合。

对于天空背景红外辐射和传输特性,采用嵌入 Modtran 5.0 的方式解决,通过调用 Modtran 源代码,输入输出与 Modtran 软件模块相同。同时可以根据中尺度 WRF 大气气象预测软件结合卫星气象数据,获得大区域大气环境参数对应的红外辐射传输

特性,并建立数据库。

大气环境对场景的作用主要体现为两大类。一是大气热辐射与大气中的太阳散射等组成物体表面散射的红外环境光源,其自身被探测器直接观察时则构成了背景辐射;太阳辐射被军事目标蒙皮直接反射至探测器视场,此时太阳影响了物体的反射辐射亮度。二是观察物与成像系统间的大气路径对飞机、辐射的散射与吸收。该模型根据给定参数预先计算天空背景辐射亮度、太阳辐照度、大气路径透过率、路径辐射,并编码存储为纹理图像,满足仿真时在物体自身辐射基础上实时叠加大气效应的需求。

对于地背景采取建立数字地球数据库的方式。数字地球数据库中,针对不同经纬度,给出高程数据;利用卫星观测数据,可以获得不同季节和时间的典型地表的红外发射率、反射率、辐射亮度以及 BRDF 数据库,建立区域地物地表的红外辐射特性。同时项目组利用测量的典型地表红外辐射特性进行校验。

④ 环境光照和强辐射源与目标背景作用双向反射特性数字孪生建模仿真

红外场景各要素的辐射综合不仅包括自身辐射,还包含了物体表面与所处环境的相互作用,这些相互作用主要表现为目标/背景对环境全局光照、单一角度局部辐射源光照和多角度局部辐射源光照的反射特性。因此,在动态红外场景仿真中,通过双向反射率可解决目标/背景表面在反射方向产生的辐射亮度与环境光在入射方向产生的辐射照度之比。

⑤ 场景辐射散射与大气光谱耦合作用特性数字孪生建模与仿真

在实时红外场景生成过程中准确并高速地计算目标、背景、大气相互作用下的波段辐射,正确地表现大气这一重要的辐射传输介质对物体辐射能量的衰减与对比度的改变,在很大程度上决定了仿真图像的真实感与实时性。

在实时仿真中通常可将经大气衰减后到达传感器入瞳处的辐射称为表观辐射,并用红外辐射衰减方程来描述其物理过程。

5 结 论

本文通过分析光电系统中红外热像仪、激光测距机、随动控制组件中电机及控制设备、嵌入式计算

机设备及其接口总线等各功能模块的设计参数及其健康演变的规律,并结合高真实感红外场景的数字建模技术,实现关联各环节分系统专业设计物理输出特性,从而建立全链路多处理场耦合的统一成像系统数字模型。该数字模型还可以模拟光电系统经过不同环境、不同时间周期使用后的图像质量、性能和作战效能退化效果,真正实现了产品的全生命周期的数字孪生仿真设计。

参考文献:

- [1] Xue Junjie, Li Heyu, Ji Hang, et al. Thinking on digital twin for weapon system[J]. Journal of System Simulation, 2020, (4): 539 - 552. (in Chinese)
周军华, 薛俊杰, 李鹤宇, 等. 关于武器系统数字孪生的若干思考[J]. 系统仿真学报, 2020, (4): 539 - 552.
- [2] Zhang Fudi, Zhang Jianqi, Xu Yin. Quantization simulation and fidelity validation of infrared staring imaging sensors[J]. Acta Photonica Sinica, 2011, 40(4): 597 - 601. (in Chinese)
张福娣, 张建奇, 徐茵. 红外凝视传感器定量仿真及模型验证[J]. 光子学报, 2011, 40(4): 597 - 601.
- [3] Fu Qiang, Shi Guangwei, Zhang Xin. Modeling and evaluation of infrared point-target operating range[J]. Infrared and Laser Engineering, 2013, 42(8): 1992 - 1996. (in Chinese)
付强, 史广维, 张新. 红外点目标作用距离数学建模与评估[J]. 红外与激光工程, 2013, 42(8): 1992 - 1996.
- [4] Han Ling, Cai Wandong. Remote detection method oriented Microsoft Virtual PC[J]. Computer Technology and Development, 2013, 23(12): 135 - 138. (in Chinese)
韩玲, 蔡皖东. 面向 Microsoft Virtual PC 的虚拟机远程检测方法[J]. 计算机技术与发展, 2013, 23(12): 135 - 138.
- [5] Gao Hui, Zhao Songqing, Wu Genshui, et al. Infrared radiation scene generation technology based on resistor array[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2015, 36(9): 2815 - 2827. (in Chinese)
高辉, 赵松庆, 吴根水, 等. 基于电阻阵列的红外场景生成技术[J]. 航空学报, 2015, 36(9): 2815 - 2827.
- [6] Huang Xi, Zhang Jianqi, Zhang Shaoze, et al. Realistic infrared image generation method of target[J]. Infrared and Laser Engineering, 2013, 42(4): 1085 - 1088. (in Chinese)
黄曦, 张建奇, 张绍泽, 等. 目标高真实感红外图像生成方法[J]. 红外与激光工程, 2013, 42(4): 1085 - 1088.