

基于 ANSYS 的目标红外特性建模与仿真方法

任 亮, 陈 钱, 钱惟贤

(南京理工大学 江苏省光谱成像与智能感知重点实验室, 江苏 南京 210094)

摘 要: 目标红外仿真建模是实时红外场景仿真的关键部分。为了快速准确的建立目标红外仿真模型, 提出一种结合 CAD 技术和有限元热分析的目标红外特性通用仿真方法。首先对目标的红外特性进行理论分析。然后使用 Solidworks 对目标进行几何建模; 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的节点温度点云数据与节点拓扑结构, 在仿真软件系统中重建目标的三维红外辐射场分布, 并获得了目标的红外目标辐射特征结果。分析结果表明, 仿真模型能够很好地逼近实测数据, 有效地模拟仿真目标的红外辐射特征。

关键词: 红外成像建模; 红外辐射特性; 有限元分析

中图分类号: TP391.9 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2013)06-1426-06

Infrared target modeling and simulation based on ANSYS

Ren Liang, Chen Qian, Qian Weixian

(Jiangsu Key Laboratory of Spectral Imaging & Intelligent Sense, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China)

Abstract: Target infrared simulation model is the key part of the real-time infrared scene simulation system. In order to convenient and reliable build the infrared simulation model, a general simulation method of target infrared characteristics combined with CAD and the finite element analysis was proposed. Firstly, theoretical analysis was researched for the infrared properties of the target. Then, the target geometric model was built by SolidWorks. The model was imported to ANSYS for finite element thermal analysis. After thermal analysis the node temperature cloud data and the node topology structure of target were calculated by FEA thermal analysis. The three-dimensional distribution of infrared radiation field of target was reconstructed in the simulation platform system, and the typical infrared radiation characteristics of target simulation results were obtained. Finally, compared with measured data, the analysis results show that the simulation model can be a good approximation to the real measured data, which shows the infrared radiation characteristics of target can be effective emulated.

Key words: infrared imaging modeling; infrared radiation characteristic; finite element method

收稿日期: 2012-10-17; 修订日期: 2012-11-21

基金项目: 总装备部预研基金(40405050303)

作者简介: 任亮(1983-), 男, 博士生, 主要从事红外辐射特性及多光谱场景仿真等方面的研究。Email:hibeatles@gmail.com

导师简介: 陈钱(1964-), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事光电探测与成像技术等方面的研究。Email:developer_plus@163.com

0 引言

红外仿真技术能为红外搜索与跟踪算法的研究提供大量虚拟试验验证与测试,而目标的红外辐射特性仿真又是红外仿真技术的关键之一。目前红外仿真手段主要有两种方法^[1],一种方法是基于商用开发软件(如 MPI 公司的 Vega+Creator)进行建模仿真,国内进行了一些对其材料属性库的研究以及仿真方法的改进^[2],但是由于技术封锁要获得高可信度的动态目标红外特征还需要进行大量的分析与处理工作;另一种方法是根据热传导理论利用 3DMAX+OPENGL 对目标进行红外特征的建模与仿真^[3],这种方法目标建模比较繁琐,在进行红外辐射特性分析时要对每个不同的目标进行单独的分析与编程,计算量很大,程序的通用性很低。

针对以上两种情况,文中以坦克目标红外特性仿真为例,提出了一种通用的易于工业化的仿真方法。使用成熟的 CAD 工具建模,有限元分析工具 ANSYS 进行热分析,导入仿真平台中建立目标的红外辐射模型。这种方法能够既保证通用性,又保证对目标进行红外辐射特性的建模与仿真的可靠性,节省大量的编码时间。对于实现红外仿真工程化具有十分重要的意义。

1 坦克目标的红外辐射模型

1.1 坦克车体的温度场分布

坦克车体在环境中不断通过热传导、对流、辐射与外界进行热交换。由于坦克装甲较厚,热容量大,因此在环境变化不剧烈的情况,可以认为目标和环境的热交换处在一个相对稳定的状态,可以建立起一个热平衡方程:

$$q_i + q_{cdo} = q_{abs} + q_{rad} + q_{cdi} + q_{cv} \quad (1)$$

式中: q_i 为周围环境辐射的热量; q_{cdo} 为由发动机发出的热量; q_{abs} 为吸收的热量; q_{rad} 是辐射到环境中的热量; q_{cdi} 是传导到物体的热量; q_{cv} 是对流的热量。为了获得坦克车体表面的温度分布主要考虑内热源和外部对流情况。

坦克启动时,由于内热源(主要是发动机)的热传导辐射,会改变热平衡方程,从而可以得出一个基于发动机的导热模型:

$$q_0 + q_i + A_k \varepsilon \sigma_0 (T_s^4 - T_{amd}^4) = A_k \frac{T_s - T_0}{R_N A_N} + A_k \bar{h} (T_s - T_{amd}) \quad (2)$$

由于考虑的是稳态过程,吸收热量 q_{abs} 为零,相比强烈的内热传导和辐射,表面热传导项 q_{cdi} 可忽略,由公式(2)即可确定发动机引起的坦克表面温度分布变化。

坦克的对流换热,其计算公式^[4]如下:

$$q_{cv} = A_k \bar{h} (T_s - T_{amd}) \quad (3)$$

因为坦克的外形复杂,表面形态各异,要获得准确的对流换热系数较为困难,因此采用 PRISM 模型^[5],计算公式为:

$$\bar{h} = 0.733 1 |T_s - T_{\infty}|^{1.9v + 1.8} \quad (4)$$

式中: T_{amb} 为坦克所处的环境温度; T_s 为坦克表面温度。 v 为坦克行驶速度和风速的矢量和。带入公式(2)就可以获得坦克的对流换热温度分布。

1.2 传动部分的温度场分布

坦克运动时,履带与车轮因磨擦生热而使这部分成为坦克的一个显著的红外辐射特征。对于匀速前进的坦克,其履带与车轮的稳态热平衡方程为:

$$q_i + q_{friction} = q_{rad} + q_{cdi} + q_{cv} \quad (5)$$

式中: $q_{friction}$ 因磨擦而产生的热量; q_{cdi} 为车轮外表面向轮轴心方向的导热。求解方程可得到车轮外层的温度;履带及轮轴的计算类似。

1.3 坦克整体辐射通量计算模型

坦克红外热图像理论建模最终需要的是坦克整体在红外波段范围内的辐射通量。对于坦克车体上任意面元表面,该辐射通量包括自发辐射和反射辐射两部分。

自发辐射在求得坦克整体温度分布以后,该部分辐射通量可以用普朗克公式对红外波段范围积分得到。根据参考文献[6],有:

$$E_{\lambda_1 - \lambda_2} = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \varepsilon(\lambda, T) \frac{C_1}{\lambda^5 [\exp(C_2/\lambda T) - 1]} d\lambda \quad (6)$$

对于反射辐射部分,包括单元表面对太阳、地面背景以及其他单元表面辐射的反射。计算表达式如下:

$$E = \rho_{sun} q_{sun} + \rho \left(q_{sky} + q_{grd} + \sum_{j=1}^N q_j \right) \quad (7)$$

式中: ρ_{sun} 为单元表面红外波段范围的太阳反射率; ρ 为单元表面红外波段范围的反射率; q_{sun} 为单元表面

接收的红外波段范围的太阳辐射能量; q_{sky} 为单元表面接收的红外波段范围内的天空背景辐射能量; q_{grd} 为单元表面接收的红外波段范围内的地面背景辐射能量; q_j 为单元表面接收的红外波段范围内的 j 单元表面辐射能量 N 为单元表面总数。

2 建模与仿真过程

坦克目标红外成像模型的一般流程如图 1 所示。首先采用 CAD 软件建立坦克的几何模型,然后将生成的模型导入 ANSYS 中进行有限元热分析,得到坦克的温度场分布,再根据节点温度数据和拓扑结构在自主设计的仿真软件平台中获得坦克的红外辐射场分布。

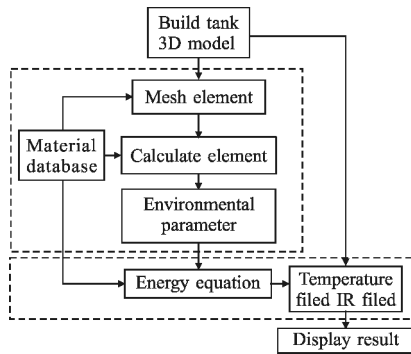


图 1 坦克红外成像建模与仿真流程图

Fig.1 Flowchart of IR modeling and simulation of tank

2.1 几何建模

典型的坦克由车体、火炮、履带、车轮等不同部分构成。各部分实际形状比较复杂,材料的传热性能也有所差异。为了保证红外特性仿真的效率和可靠性,需要对坦克目标进行简化。简化对红外特性影响不大的机枪,天线等部件,只保留红外辐射特征明显的部分。

由于 ANSYS 自身的三维建模能力较弱,不适合建立复杂的坦克三维模型。因此采用工业化 CAD 建模软件 SolidWorks 进行快速建模。在使用 SolidWorks 建模时,采用了多实体建模法,这样模型导入 ANSYS 中能够形成独立的实体。建立好的模型导出为 Parasolid 格式,这样模型导入 ANSYS 中能直接生成实体,不用进行手工的拼合和布尔运算,提高了目标几何建模的效率。图 2 为 Solidworks 环境中建立的简化坦克几何实体模型。

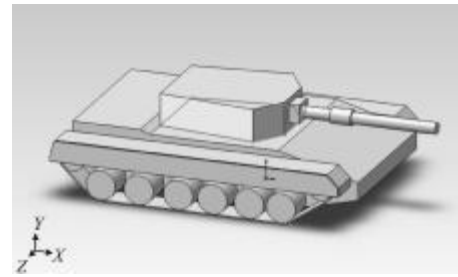


图 2 SolidWorks 环境中的坦克几何模型

Fig.2 Geometry model of tank in SolidWorks

2.2 目标的有限元温度场分析

获得坦克表面温度场分布是仿真坦克红外辐射场仿真的关键。为了保证计算的可靠性,文中采用 ANSYS 有限元方法对目标进行瞬态热分析,其分析流程如图 3 所示。

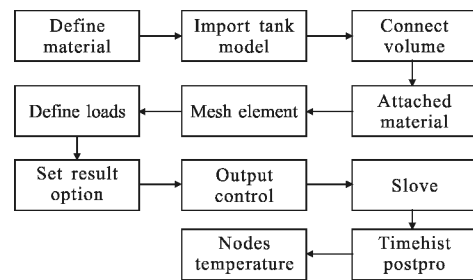


图 3 目标热分析流程图

Fig.3 Flowchart of thermal analysis of target

在进行有限元热分析时,首先要对坦克的材料进行定义,包括材料的导热系数、比热、密度、发射率、对流系数^[6]。导入建立的几何模型,由于导入的模型并不包含装配关系,需将物理上相接触的部分进行布尔 GLU 运算粘合相接触的面,这样才能实现不同实体间的热仿真。

在修复完模型后,对模型进行网格划分操作。网格划分直接关系到温度场分布计算的准确性和效率,因此采用如图 4 的划分方式,对发动机上装甲和

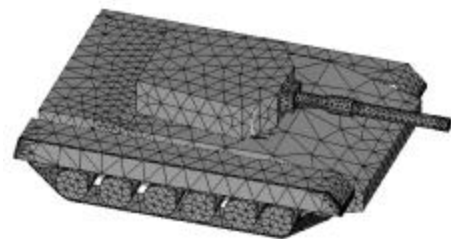


图 4 坦克的网格划分

Fig.4 Meshing of tank

3 仿真实验结果分析

硬件实验环境为 CPU×4: Intel® Core™ i7 920 2.66 GHz; 内存为 8.0 G; 显卡为 NVIDIA Quadro 5 000。软件通过 VC2010 结合 OpenGL 编程仿真平台实现,大气窗口选择波段为 3~5 μm。最终结果如图 9 所示。

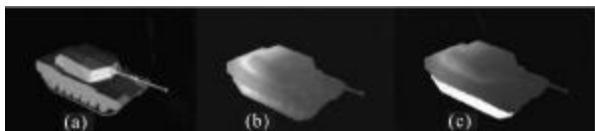


图 9 不同时刻坦克的红外图像

Fig.9 Infrared images of tank in various time

其中,图 9(a)为在仿真环境中重建的几何模型;图 9(b)为坦克以 36 km/h 行驶 3 000 s 后红外辐射分布;图 9(c)为坦克以 36 km/h 行驶 9 000 s 后红外辐射分布。可以看出坦克的整体红外分布很不均匀,动力舱周围的装甲红外辐射强度较大,炮塔、前装甲的温度相对动力舱周围的装甲较低。动力舱产生的热是影响温度分布的主要因素。随着坦克的运动时间变长,车轮与履带摩擦产生的热量逐渐积累,使车轮升温效果非常明显。这与实际情况非常吻合。

图 10(a)是红外仿真目标的整体温度分布图;图 10(b)是某型号实测坦克目标的整体温度分布

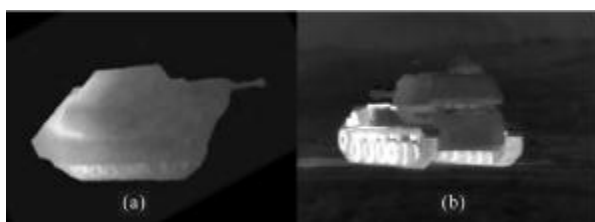


图 10 仿真图像与实测真实红外图像的对比

Fig.10 Simulation result and real infrared image

图^[7-8]。为了检验仿真模型的真实性和真实性,采用亮度的直方图定量分析法^[9]对仿真图像和实测图像进行比较。图 11 给出了仿真图像和实测图像亮度分布的对比,图 11(a)为仿真目标亮度分布,图 11(b)为实测目标亮度分布。从亮度分区趋势可以看出仿真模型和实测目标的亮度趋势基本一致,亮度高的区域主要集中在发动机外装甲和车轮部分。造成仿真模型和实测目标亮度分布差异的主要原因是红外仿真的坦克

目标是零视距仿真,实测数据经过大气传输和探测器效应,但两者总体趋势相同。通过主观评价和直方图定量分析结果比较表明,目标的红外仿真辐射特性基本与实测的坦克红外特性相符,表明了红外仿真方法的有效性。

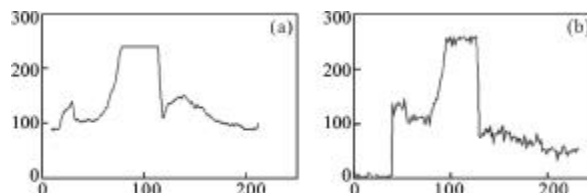


图 11 仿真图像与实测红外图像的亮度对比

Fig.11 Brightness of simulation and real infrared image

4 结论

文中以坦克目标仿真为例,提出了一种 CAD 建模结合 ANSYS 有限元热分析,导入仿真平台仿真目标红外辐射特性的通用方法。充分发挥了 CAD 和 ANSYS 两种工具的长处,避开了各自的缺陷,大大缩短了分析周期。通过与实际目标红外特性进行对比,该方法能反映目标的红外辐射特性,取得了预期效果。通过导入不同的模型以及在 ANSYS 中对目标施加相应的热载荷,就能够高效的对不同目标进行红外特性仿真。但由于红外仿真包含的内容繁多,涉及多个领域,此方法的仿真的细节精度还需要进一步的加强。另外在下一步的研究中将目标置入虚拟环境中,实现目标在虚拟环境中的漫游也是必须进行的工作。

参考文献:

- [1] Wang Jiankun. Analysis on infrared characteristics of military vehicle [D]. Nanjing: Nanjing University of Science & Technology, 2008. (in Chinese)
王建坤. 军用车辆的红外辐射特性分析[D]. 南京: 南京理工大学, 2008.
- [2] Sun Siliang, Chen Ren, Sun Li, et al. Contrast research on infrared tank target simulation based on three thinking with VP engine [J]. Journal of System Simulation, 2011, 23(5): 1032-1038. (in Chinese)
孙嗣良, 陈韧, 孙力, 等. 基于 VP 的三种思想下实现红外坦克目标的仿真对比研究 [J]. 系统仿真学报, 2011, 23 (5): 1032-1038.

- [3] Liu Juan, Gong Guanghong, Han Liang, et al. Modeling and simulation of airplane infrared characteristic[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2011, 40(7): 1209-1213. (in Chinese)
刘娟, 龚光红, 韩亮, 等. 飞机红外辐射特性建模与仿真[J]. *红外与激光工程*, 2011, 40(7): 1209-1213.
- [4] Wang Mingming, Hao Yingming, Zhu Feng, et al. IR radiation calculation and real time simulation of air targets [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41 (8): 1979-1984. (in Chinese)
王明明, 郝颖明, 朱枫, 等. 空中目标红外辐射特性计算与实时仿真[J]. *红外与激光工程*, 2012, 41(8): 1979-1984.
- [5] Gonda T, Gerhart R. A comprehensive methodology for thermal signature simulation of targets and backgrounds[C]// *Proceedings of SPIE, Aerospace Pattern Recognition*, 1989, 1098: 23-27.
- [6] Tao Wenquan. *Numerical Heat Transfer* [M]. Xi'an: Xi'an Jiaotong University Press, 2001. (in Chinese)
陶文铨. *数值传热学*[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 2001.
- [7] Scaredy Cat Films. Florida/NASA Trip Reports [EB/OL]. <http://www.scaredycatfilms.com/archives/jan2009.html>.
- [8] Military Systems. ULIS' thermal imaging technology [EB/OL]. 2009.<http://www.militarysystems-tech.com/suppliers/thermal-vision-specialists/ulis>.
- [9] Smith Moira I, Mark Bernhardt, Angell Christopher R. Validation and acceptance of synthetic Infrared Imager [C]// *SPIE*, 2004, 5408: 9-21.