

文章编号: 0258-7025(2006)Supplement-0186-03

# 基于 Sinda/G 的红外成像仿真原理和应用

路大举, 万 敏, 杨 锐, 葛成良

(中国工程物理研究院应用电子学研究所, 四川 绵阳 621900)

**摘要** 对为实验室评估红外探测图像处理系统提供优质红外图像源而建立的实时红外仿真系统中目标表面辐射平衡温度场模拟计算手段进行了探讨。对基于有限差分理论建立的目标模型采用集总参量的热分析手段, 将目标与环境离散为多个具有热容属性的节点, 热容描述系统瞬态过程, 将热系统内存在的导热、对流、辐射三种传热方式抽象为连接于节点间的热阻, 热阻反映了各种传热方式的换热能力, 实现对整个目标红外辐射的传热学描述, 得到表面辐射平衡温度场。基于专业热分析软件 Sinda/G 的红外成像仿真系统除了采用集总参量的热分析手段的优点外, 还有配合有限元后处理器软件 femap 的图形演示功能, 以节点的色彩表示温度结果, 很方便地用云图和动画显示稳态和瞬态的温度分布, 实现目标红外成像仿真。

**关键词** 红外仿真; 平衡温度场; 集总参量; 有限元

**中图分类号** TP391.9 **文献标识码** A

## Principle and Application of Infrared Imaging Simulation Based on Sinda/G

LU Da-ju, WAN Min, YANG Rui, GE Cheng-liang

(Institute of Applied Electronics, China Academy of Engineering Physics, Mianyang, Sichuan 621900, China)

**Abstract** The simulation means of the target surface radiation equilibrium temperature field, in real-time infrared imaging simulation founded to supply high quality infrared image to evaluate IR detection image processing system in laboratory, is issued. For the target models based on the finite difference theory the lumped parameter thermal analysis means is adopted to make targets and environments dispersed to several nodes with thermal capacitance property, which describe thermal system transient processing. The three modes in the thermal system, heat flux, convection, radiation are abstracted to heat-resistance connected with every node, which reflects heat-exchange ability, so the heat flux description for the whole target infrared radiation and the equilibrium temperature field for the surface radiation are obtained. Infrared imaging simulation system based on professional thermal analysis software Sinda/G with the advantage of the thermal analysis means by adopting lumped parameter also works in the finite element post treatment after processor software femap's figure demonstration function. The color of nodes renders temperature results, and uses the nephogram and cartoon technology to display steady and transient temperature distribution conveniently to achieve the target infrared imaging simulation.

**Key words** infrared simulation; equilibrium temperature fields; lumped parameter; finite element

### 1 引 言

红外探测是目前国内外研究的热点<sup>[1~3]</sup>, 于此的红外图像处理系统进行评估, 广泛采用了各种仿真手段和设备, 利用目标与背景的理论计算模型和实验数据, 对系统的设计概念和设计方案进行验证、检验、优化、评估、测试及系统的验收。外场实验虽然能够提供真实的目标与背景环境, 但外场实验一是需要花费大量的人力、物力和时间, 二是目标与背景环境不能严格重复, 三是不能提供某些特定的目标与背景环境类别, 四是外场实验只能在系统研制完成后才能进行, 无法做到防患于未然, 因此,

实验室内必须建立一个同实际环境相似的实时图像仿真系统, 采用合理的建模方法提供优质的红外图像源, 能够弥补外场实验的缺陷。

完成热平衡温度场的模拟计算, 传统做法例如参考文献[4]中提到的是纯粹的公式计算, 再利用计算机图形学知识对其量化形成仿真, 这种方法的优点是易于理解, 但是缺点是对于不同的目标处于不同的环境分析需要建立不同的计算模型, 程序设计工程量大, 而且没有普适性, 实时性差。本文尝试了一种新方法, 对建立在有限元基础上的目标数学模型, 进行辐射源和传热分析, 模拟计算得到目标表面

**基金项目:** 国家 863 计划和中国工程物理研究院基金资助课题。

**作者简介:** 路大举(1981—), 男, 中国工程物理研究院应用电子学研究所硕士研究生, 主要从事红外场景仿真与目标识别的研究。E-mail: opihust@hotmail.com

平衡温度场是仿真系统的关键部分。

## 2 热阻法求解热传导网络的原理

实时红外热图像计算机仿真的计算原理主要基于传热学中平衡状态下的系统,三种基本的传热方式为导热、对流和辐射。

### 2.1 导热

均匀物质内存在温度梯度会导致其内部能量传递,能量传递的速率可由傅里叶定律计算

$$q = -kA(\partial T/\partial n), \quad (1)$$

式中  $\partial T/\partial n$  为在面积  $A$  的法线方向上的温度梯度。导热系数  $k$  是由实验得到的所论物质的常数,它与温度和压力等其他参量有关。 $k$  的单位是  $W/(m \cdot K)$ 。负号是基于热力学第二定律的要求:由温度梯度引起的热能传递的方向必须是从热区至冷区。

若包括表面在内的物体中每个点的温度不随时间变化,热能的传递就是稳态过程。如果温度随时间变化,能量或是在物体中储存,或是在物体中传走,能量储存的速率是

$$q_{\text{stored}} = V\rho c_p(\partial T/\partial t), \quad (2)$$

式中  $\partial T/\partial t$  为时间变化率, $V$  为体积, $\rho$  为密度, $c_p$  为物体的比热。

### 2.2 对流

当固体与和它温度不同的运动流体相接触时,流体将从物体带走能量或通过对流将能量传给物体。若流体的上游温度为  $T_\infty$ ,固体的表面温度为  $T_s$ ,单位时间的传热量由牛顿冷却定律计算

$$q = hA(T_s - T_\infty), \quad (3)$$

式中定义了对流换热系数  $h$ ,是单位时间单位面积的传热量与总温差之间关系的比例常数,单位为  $W/(m^2 \cdot K)$ 。

比较(1)式和(3)式,对  $y = n$  的情况可得

$$hA(T_s - T_\infty) = -kA(\partial T/\partial y)_s, \quad (4)$$

式中温度梯度的下标表示:要计算的是在固体表面的流体内的温度梯度。

### 2.3 辐射

第三种传热方式是基于电磁波的传播,这种传播能在真空中进行,也能在介质中进行。实验结果表明,辐射传热与绝对温度的四次方成正比,而导热和对流换热与线性温差成正比。重要的斯忒藩—玻耳兹曼定律的表达式为

$$q = \sigma AT^4, \quad (5)$$

式中  $T$  为绝对温度。常数  $\sigma$  与表面、介质及温度无关,其值为  $5.6697 \times 10^{-8} W/(m^2 \cdot K^4)$ 。理想的发

射体,或称黑体,所发出的辐射能按(5)式确定。所有其他表面的发射能都少于黑体的辐射能,许多表面发出的辐射能可计算为

$$q = \epsilon \sigma AT^4. \quad (6)$$

对目标表面温度场的计算比较好的方法是采用集总参量和有限差分理论的热分析手段<sup>[5]</sup>,将目标与环境整个热系统离散为多个节点(Node),每个节点代表单个设备或设备内局部微团,节点具有热容属性,是描述系统瞬态过程重要的特征量;将热系统内存在的导热、对流、辐射三种传热方式抽象为连接于节点间的热阻,热阻反映了各种传热方式的换热能力,是决定系统温度不均匀性和热流分布的重要特征量。通过这种方式,复杂的热系统就简化为类似于电路的“电容-电阻”网络,热系统的初始和边界条件(温度和热流值),就如同电路回路某一点处的突然引入的电压或电流,能造成系统偏离最初平衡态,然后在容量元件和阻力元件的作用下重新达到平衡的过程,这也就是辐射热平衡计算的瞬态和稳态过程。

集总参量法的优点主要表现在:可以根据不同设计阶段的要求,合理设定换热系统的总节点数目,这样避免了节点数目过于庞大,在可行性论证或方案初期,即要求输入比较详细的初、边界条件的缺点。集总参量法的节点数目可以逐级细分,既能突出重点,又能做全貌性的详细分析。

## 3 Sinda/G 特性

软件 Sinda/G 就是基于集总参量法,复杂的换热系统被划分为多个节点,系统内部存在着的三种基本换热过程(导热、对流、辐射)被抽象为节点之间三种不同类型的热阻,通过构建完整的热阻—热容网络,实现对整个目标红外辐射系统的传热学描述,与手算方法的区别是使用热导而不使用热阻。三种热导(导热、对流、辐射)分为线性热导,包括导热[用(7)式表示]、对流热导[用(8)式表示]和非线性热导,包括辐射热导[用(9)式表示]。

$$q_{\text{cond}} = \frac{\Delta T}{L/(kA)} = \frac{\Delta T}{R_t} = G_{\text{cond}} \Delta T, \quad (7)$$

$$q_{\text{conv}} = hA(T_w - T_\infty) = G_{\text{conv}} \Delta T, \quad (8)$$

$$Q_{\text{rad}} = \sigma A \epsilon F(T_w^4 - T_\infty^4) = G_{\text{rad}}(T_w^4 - T_\infty^4). \quad (9)$$

软件 Sinda/G 的突出优点就是其可以配合有限元后处理器软件 femap 的图形演示功能,通过每一个节点的色彩来表示相对应的温度高低,而且可以很方便地用云图和动画显示稳态和瞬态的温度分布,实现目标红外成像仿真。另外,还有一些特点比如是一种

通用求解器,具有很强的灵活性,能够模拟热问题中绝大多数问题;适用于求解由 diffusion-type equations 控制的、可用 lumped-parameter 描述的物理问题;整个换热系统被划分为 thermal capacitances 和 thermal conductors,构建成 G-C network.

采用 Sinda/G 进行比较复杂的目标表面辐射平衡温度场的模拟计算可以由以下步骤(图 1~图 3)实现。

1) 目标有限元建模

Sinda/G 针对有限元模型,可以采用软件 femap 或者 Sinda/3D 建立目标模型;

2) 建立热导、热容网络;

3) 划分节点,计算温度场。

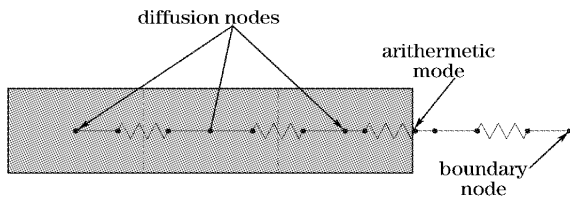


图 1 建立热导热容网络示意图  
Fig. 1 G-C network modeling

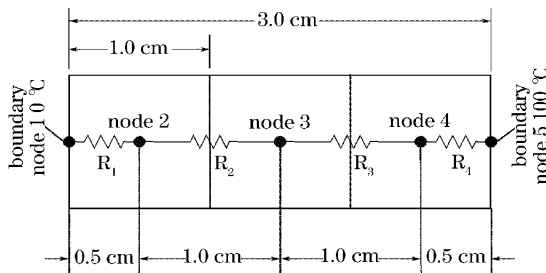


图 2 平板划分节点  
Fig. 2 Plate nodes construction

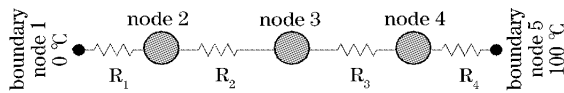


图 3 平板热阻网络  
Fig. 3 Plate thermal resistance network

### 4 结 论

软件 Sinda/G 可与有限元后处理器软件 femap 和轨道热流分析软件 nevada 等一起配合使用,用于目标在空间环境热载荷分析,于 1996 年进入中国,已成功地应用于我国载人航天工程和多颗卫星、载荷的热设计。辐射热阻是三种热阻中最特别的一种,不仅在于它与温度的 4 次方成比例(非线性),而且由于它的大小强烈依赖于空间几何关系、物表热

光学属性以及光线的多次折反射过程,必须有专门的热辐射分析软件完成复杂空间结构间辐射热阻的计算,nevada 软件就是为满足此功能设计的。nevada 将辐射热阻和辐射外热流提供给 Sinda/G,以完备传热网络,整个计算流程可以用图 4 来描述。卫星表面瞬时温度场如图 5 所示。

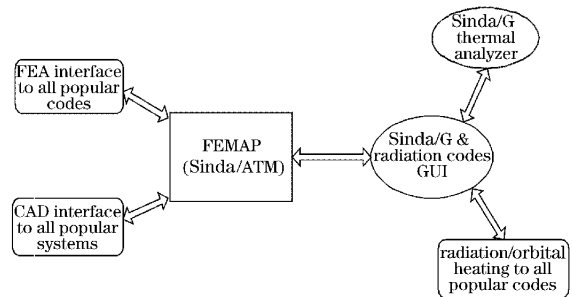


图 4 Sinda/G 求解空间目标热载荷流程  
Fig. 4 Spatial target heat loads flow-chart using Sinda/G

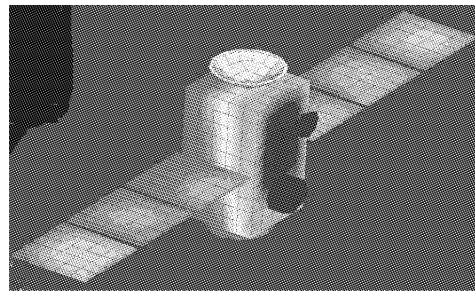


图 5 卫星在空间瞬时表面平衡温度场  
Fig. 5 Satellite surface instantaneous equilibrium temperature field in space

### 参 考 文 献

- Xu Hui, Sun Zhongkang. Temperature fields of the surfaces of Satellite and its decoy [J]. *J. National University of Defense Technology*, 1994, 16(3): 12~18  
徐 晖, 孙仲康. 卫星及其诱饵的表面瞬态温度场 [J]. *国防科技大学学报*, 1994, 16(3): 12~18
- He Wenzhong, Peng Huanliang. Imitation system of IR thermal image static target property [J]. *Laser and Infrared*, 2005, 35(8): 573~576  
何文忠, 彭焕良. 红外热成像静态目标特性仿真系统 [J]. *激光与红外*, 2005, 35(8): 573~576
- Kong Xiangqian. The Application of Finite Element Method in Calorifics [M]. Beijing: Science Press, 1998  
孔祥谦. 有限单元法在传热学中的应用 [M]. 北京: 科学出版社, 1998
- Yao Tao, Li Yifan. Principle and application of infrared imaging simulation for scene [J]. *Computer Simulation*, 2004, 21(1): 96~98  
姚 涛, 李一凡. 场景红外成像仿真原理和应用 [J]. *计算机仿真*, 2004, 21(1): 96~98
- Han Yuge, Xuan Yimin. The study and application of the IR feature of target and background [J]. *Infrared Technology*, 2002, 24(7): 16~19  
韩玉阁, 宣益民. 目标与背景的红外辐射特性研究及应用 [J]. *红外技术*, 2002, 24(7): 16~19