

具有厚壳结构的海面目标红外热像模拟

沈国土 杨宝成 蔡继光 高兰香

(华东师范大学光谱学与波谱学教育部重点实验室, 华东师范大学物理系, 上海, 200062)

高景 朱文勇 夏樟根

(上海交通大学应用物理系, 上海, 200030)

摘要 在原有的一般海面目标几何模型基础上通过面元拉伸的方法, 实现了具有厚壳结构海面目标的几何构型建模, 建立了体结构的非稳态热传递物理模型, 并实现了数值计算和图像模拟, 获得了理论模拟的红外热像。

关键词 面元拉伸, 体结构, 非稳态温度场, 红外热像。

THE SIMULATION OF INFRARED IMAGING OF THE SEA TARGET WITH THICK HULL

SHEN Guo-Tu YANG Bao-Cheng CAI Ji-Guang GAO Lan-Xiang

(Key Laboratory for Optical and Magnetic Resonance Spectroscopy, East China Normal University,

Department of Physics, East China Normal University, Shanghai 200062, China)

GAO Jing ZHU Wen-Yong XIA Zhang-Gen

(Department of Applied Physics, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200030, China)

Abstract Based on the existing geometric model of infrared images of ships to realize the geometric model of ships characterized as parts of thick hull by means of facet expanding, the physical model for the unstable-state heat transfer of the ship with bulk structure has been obtained. The theoretically simulated infrared images have been calculated numerically.

Key words facet expanding, bulk structure, changing temperature fields, infrared image.

引言

数值计算方法理论建模作为一种有别于实验和解析理论分析的方法, 兼有成本低、研究内容全面等优点目前已在各个领域得到了广泛的应用, 尤其在红外热像的理论建模领域中获得了一系列的成果^[1-4]。其中对具有薄壁结构海面目标的红外热像理论模拟已经形成了一套成熟的理论方案^[2,5,6], 成功开发了包含结构显示和参数修改、面元分割、角系数计算、温度场计算以及红外热像显示等五大模块软件^[6], 这些模块之间相互独立但又有一定联系, 形成一个有机的整体完成一般海面目标的红外热像模拟。在建立海面目标的红外辐射场中, 结构显示和参数修改模块、分割模块、角系数计算模块是温度场计算的预处理部分。因此, 该预处理部分的合理与否对于目标的温度场计算具有重要的作用。经实

际校模, 由该套模拟软件计算得到的海面目标红外热像与实测的红外热像符合得很好。

但是, 对于一些特殊的海面目标如航空母舰的红外热像理论建模研究中, 出现了不同于薄壳结构的厚壳结构, 如航空母舰的飞行甲板, 厚度很大, 其纵向的温度梯度不可忽略。另外由于航空母舰飞行甲板的上层建筑很少而使得大部分的面积暴露在视场中, 决定其红外热像通常利用红外探测器从高空往下探测, 所获得的热像主要集中在飞行甲板部分。所以, 对这种结构就不再使用原来的面元处理方法, 而需用体元的方法处理, 同时应考虑其温度梯度和时间弛豫效应。因此, 正确建立航空母舰甲板层的物理模型是获得整个目标红外热像的关键。本文在原有的薄壳结构的海面目标几何模型和物理模型基础上建立了具有厚甲板的海面目标的几何模型和物理模型, 并在此基础上进行了计算机实现, 得到了符

合该物理模型的理论模拟红外热像。

1 厚壳结构的几何建模

在红外热像的理论建模中,建立目标的几何模型是后续研究的基础,同时合适的几何模型将大大提高后续研究的效率。原来的几何模型针对一般海面目标的特点,考虑的是准三维的结构,采用面元作为处理单元,这对该类目标的红外热像理论建模已经足够。但是对厚壳结构,原有的薄壳结构的面元处理方法已不再适用,必须用新的处理方法。当然可以考虑完全的三维结构,以体元作为处理单元,不过这样做会带来两个难点:第一是需要建立一套方法来表述完全的三维结构,第二需要解决完全三维结构的自动分割。鉴于这两个难点,同时兼顾到带有厚壳结构的海面目标的特点,我们考虑采用在原有几何模型基础上进行扩展和修正的几何建模方案,既解决了厚壳结构中体元模型的几何建模,又避免了需要解决对任意体元进行自动分割的困难,极其有效的解决了问题。具体方案如下:我们在原来的几何模型中把体的概念进行扩展,在原来的几何模型中,体的作用仅仅是为了快速显示结构,而在新的模型中,体则需要划分成体元,并同面元一样,需要考虑它们的热平衡方程;考虑到厚壳结构一般情况下厚度基本相同,这样可以先把厚壳在厚度方向进行压缩,退化为面元,然后对面元进行自动划分,划分结束后把面元在厚度方向进行拉伸形成体元,这样就解决了体元的分割问题。这里应该强调的是这一套几何建模方法的实施尽可能使新的物理模型在原来的物理模型上作最少的修改,以使后续的计算机实现也能做到最少的修改。

新的几何建模方法与原来的方法相比主要有以下几点修正:

(1)在分割后的数据文件(即需建立热平衡方程的微元数据文件)中,在原来的点表,面表基础上增加了体表,这样就能对体元建立热平衡方程。体表的格式类似于点表和面表,即体表中包含有组成这个体的面元序号,这里的面元称为虚面元(不需要建立热平衡方程,相对于需要建立热平衡方程的实面元而言)。

(2)考虑到厚甲板的特点,利用原来的面元分割程序进行自动分割,分割结束后,将属于厚甲板的面元在甲板厚度方向上进行拉伸从而使面元变成体元,而且可以根据人工给定条件在厚度方向上进行体元分割。

(3)在整个厚甲板的外表面再增加一层面元,该层面元同样需要建立热平衡方程。这样,就可以利用原来的显示软件模块,同时又不影响热辐射场的求解。

(4)在组表中增加了新的组类。主要有两个类型的新组,一个是体元组,另一类是与体元相邻的面元组。

该元拉伸的方法既可适用于厚度一致的航母甲板体结构,又可适用于不同厚度的体结构。当处理的目标是具有多种不同厚度壳层的船体时,可以这样来具体实现面元拉伸:先把厚度不同的部分划分成不同的组,然后在拉伸的时候根据不同的组拉伸不同的步数。如果某两个组是相邻的,那么它们在拉伸时的步长也是相同的。由于该拉伸方法既适用于相同厚度的甲板,也适用于不同厚度的体结构,因而具有一定的普适性。

2 体结构的热传递物理模型

根据所建立的几何模型,体元的热传递物理模型比面元的物理模型^[6]简单,只要考虑与它接触的体元或面元传导,如式(1),其中符号说明见下文。

$$Conduction = - \sum_{near(k)} \frac{\lambda S_{k,near(k)}}{L_{k,near(k)}} (T_k - T_{near(k)}), \quad (1)$$

由于存在体结构,还应该考虑非稳态效应。我们采用隐式格式的公式如下

$$\begin{aligned} & \sum_j A_k \varepsilon_{1k}^{infra(1)} F_{kj} \sigma T_{lj}^{app4} + A_k \varepsilon_{in}^{infra(1)} \sigma T_{in}^4 \alpha_{2k}^{infra(1)} \\ & - A_k \varepsilon_{1k}^{infra(1)} \sigma T_k^4 - A_k \varepsilon_{2k}^{infra(1)} \sigma T_k^4 - \sum_{near(k)} \frac{\lambda B_{k,near(k)}}{L_{k,near(k)}} \\ & \cdot (T_k - T_{near(k)}) - \sum_{near(k)} \frac{\lambda S_{k,near(k)}}{L_{k,near(k)}} (T_k - T_{near(k)}) \\ & - A_k h_{kout} (T_k - T_{air}) - A_k h_{kin} (T_k - T_{in}) \\ & + (F_{k-sky} E^{inf rasky(1)} + F_{k-sea} E^{inf rasea(1)}) \varepsilon_{1k}^{infra(1)} A_k \\ & + \varepsilon_{1k}^{sun(1)} G_{1k}^{sun(1)} = \rho v c \frac{T_k - T_{k1}}{\tau - \tau_1}, \quad (2) \\ & (\sum_j F_{kj} \sigma T_{lj}^{app4} + F_{k-sky} E^{inf rasky(1)} + F_{k-sea} E^{inf rasea(1)}) A_k \\ & \cdot (1 - \varepsilon_{1k}^{infra(1)}) + (1 - \varepsilon_{1k}^{sun(1)}) G_{1k}^{sun(1)} + A_k \varepsilon_{1k}^{infra(1)} \sigma T_k^4 \\ & = \sigma T_{1k}^{app4} A_k. \quad (3) \end{aligned}$$

其中方程式(2)等式的左面为某一时刻 τ 微元的导入净能量^[6],在原来的物理模型基础上增加了一项体元导热项,等式的右面为前一个时刻 τ_1 到该时刻 τ 体元内能的增量,方程式(3)为表观温度的定义式。这些方程中,下标1为面元的外表面,下标2为面元的内表面; F_{kj} 为面元 j,k 之间角系数, A_k 为

面元 k 的面积; λ 为材料的导热率, T_k 、 $T_{near(k)}$ 分别为面元 k 和相邻面元 (或体元) $near(k)$ 的绝对温度; $B_{k,near(k)}$ 为面元 k 与相邻面元 $near(k)$ 的传导截面积, $S_{k,near(k)}$ 为面元 k 与相邻体元的传导面积, $L_{k,near(k)}$ 为面元 k 与相邻面元或体元的导热距离; h_{kout} 、 h_{kin} 分别为外、内表面空气换热系数, T^{app} 为面元表观温度, $G_{ik}^{sun(1)}$ 为太阳全波段入射能流, $\epsilon_{in}^{infra(1)}$ 为内舱平均发射率, T_{in} 为内舱空气平均温度. ρ 为密度, 碳钢 ($C \approx 0.5\%$) 为 7840kg/m^3 , v 为体积, c 为比热容, 碳钢 ($C \approx 0.5\%$) 为 $465\text{J}/(\text{kg}\cdot^\circ\text{C})$. T_{k1} 为前一个时刻 τ_1 面元 k 的绝对温度.

3 计算机软件实现

根据上述几何模型和物理模型,我们在原来五大模块的基础上进行了计算机实现.

已有的软件模块实现了对面结构的自动划分,物理参数的修改,以及温度场的解算和目标温度场、辐射场的演示.现在要在原有的模块基础上进行扩展,使整套模块能够实现体结构、面结构的划分,温度场的解算以及演示功能.根据我们所建立的厚壳结构几何模型,需要编写分割前拉伸程序(为了计算机实现方便,把体元压缩程序改成面元拉伸的程序,但最后效果是等价的)和分割后体元生成程序,面元自动分割可以采用原来的模块,如图 1 所示.

从图 1 中可以看出,当把左上图形中右面一个四边形进行面元分割后见右上图,再进行拉伸,就相当于对体元进行了分割;由于在体元外面包了一层面元,因此结构显示和参数修改模块,角系数计算模块以及热像显示模块都可以使用原来的模块,但温度场解算需要重新编写程序.下面就分割前拉伸程序和分割后体元生成程序以及温度场解算模块分别加以说明.

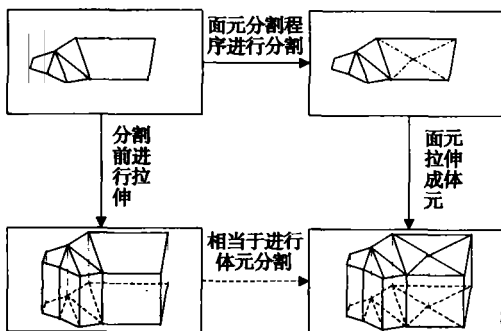


图 1 面元拉伸示意图

Fig. 1 The schematic diagram of the means of facet expanding

3.1 几何模型的计算机程序原理

前面已经提到根据甲板厚壳结构的特点,先把厚甲板压缩成一个面结构,然后用原来的分割程序对该结构进行自动分割,分割结束后再把压缩的这个面中所分割得到的面元在竖直方向上进行拉伸.由于甲板压缩方法在计算机上较难实现,因而在分割前就不压缩体结构而采用拉伸面元的方法.在原来面元自动分割模块的基础上新增两个程序来实现体结构的自动分割,这两个程序分别为分割前拉伸程序和分割后体元生成程序.现在具体介绍两个程序的原理以及计算机实现方法.

分割前拉伸程序的功能是完成甲板层体结构的自动生成.该程序需要输入原始的几何数据文件,最后得到该目标真实的几何结构.程序处理的原理为:由用户输入甲板下底面的 Z 坐标值,将所有点的 Z 坐标值大于等于该值的点的 Z 坐标值增加甲板层的高度.即将目标以甲板的下表面为分界,以下部分坐标保持不变,而以上部分的 Z 坐标都往上提升一定的高度.这样,厚壳结构中甲板的下表面提升到实际的位置,同时复制甲板的下表面产生上表面.其中要将构成下表面面元的点的顺序进行更改,使它同样要满足右手定则.同时,在拉伸的过程中要生成甲板体结构的侧面面元.

分割后体元生成程序的思想与分割前拉伸程序的思想大体相近,最大差异在于前者会生成一定数目的实体元.分割后体元生成程序中要求输入分割前目标拉伸后的数据文件、分割后未拉伸的数据文件,最后得到整个目标完整的分割数据文件.程序中的体元由各个面构成,在存储最后结果文件的时候,应该增加一个实体元组成表,将各个体元存入文件,以供温度场求解所需.

需要指出的是,分割前拉伸程序得到的数据文件可用于相应海面目标的结构显示和参数修改,并且在目标进行分割的时候,可以方便地找到分割后微元的所属大面元的序号.

3.2 温度场的计算机数值计算

在原来的热传递物理模型中为了实现的方便,借鉴了一些商用热分析软件中的分组方法.在新的物理模型中,我们增加了以下几个组:

第二组:甲板侧面划分出来的表面元.其热平衡方程中应含有与环境的辐射和对流项,以及相邻面元及内表面与相邻体元间的传导项.

第三组:甲板上表面裸露部分划分出来的面元.其热平衡方程中除含有与第二组微元相同的热传递

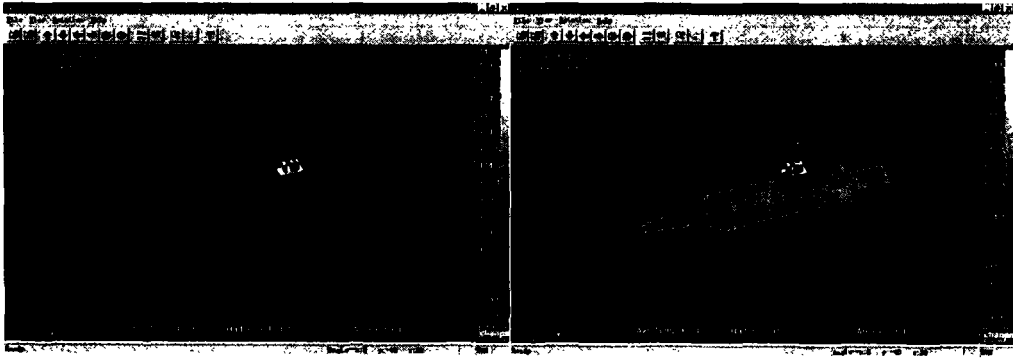


图2 厚壳结构船目标中午12点和下午14点的8~12 μm 波段模拟红外热像

Fig. 2 Simulated infrared images of the ship with bulk structure at 12 o'clock and 14 o'clock in 8~12 μm wavelength region

项外,还可能含有它与甲板上层建筑表面间的辐射交换项。

第五组:甲板下表面划分出来的面元。这类面元的热平衡方程中含有与相邻面元间及相邻体元间的导热热交换项,还含有与内舱气体的热交换项。

第六组:甲板上表面位于上层建筑下的面元。这部分面元的外表面可以采用绝热近似。因此它们的热平衡方程中只含有与相邻面元及相邻体元间的热传导项。

第七组:甲板中划分出来的体元。它们的热平衡方程中只需要考虑与周围体元或面元间的热传导项。

根据软件开发中向下兼容的思想,我们用软件实现厚壳结构模型时,采用了在薄壳结构模型的实现软件上进行模块扩展的技术路线。在文献[6]的基础上根据相应的分组分别编写相应的程序段实现温度场的解算。与薄壳结构模型实现的主要不同点如下:

为了研究体结构的非稳态效应,我们在实现温度场的解算时,考虑了稳态求解和非稳态求解的统一。具体实现时对稳态的情况只要对式(2)等号右面的值置零即可。而对非稳态的情况由于式(2)等号左右面都有温度未知数,因而采用迭代法求解,具体步骤如下:在某一 τ_1 时刻,通过迭代法求解稳态 T_{k1} ,再根据隐式格式公式^[8]计算下一个时刻的 T_k , T^{app} 。求出 T_k , T^{app} 后,继续下一步求解。为了去除初始时刻温度场的误差,我们采用了初始时刻温度与相隔24h后温度间自治的判据。

4 计算结果和模拟热像

应用分割前拉伸程序、原来的面元分割程序和

分割后体元生成程序获得甲板层的体结构以后,利用角系数计算程序获得各个面元之间的看视角系数,并获得目标的物性参数后,可以求解目标的温度场分布。

在文献[7]中我们分别用稳态和非稳态的求解方法对具有厚壳结构的模型和薄壳结构的模型进行了计算,并对结果进行了分析。从该文献中可以得出这样的结论:对于薄壳结构其稳态和非稳态的结果非常接近,而对厚壳结构稳态与非稳态结果相差较大,有一个时刻最大温差接近20K。进一步的计算表明,在厚壳结构中当体元的厚度为1cm时,稳态与非稳态的计算结果已经非常接近,每个时刻两种情况最大温差小于4K。因而我们认为厚度1cm以下的可以作为面元处理而使用薄壳结构模型,而对于具有厚甲板的(甲板厚度10cm左右)的船目标需要采用厚壳模型和非稳态的方法计算。

我们采用了背景计算模块首先计算,得到了昼夜24h的环境参数,然后利用根据上述非稳态热模型建立的计算机模拟软件进行了计算。图2分别为根据对某舰在某季节中午12h和下午14h的计算结果用热像演示软件模块获得的8~12 μm 的模拟红外图像。从图中可以明显的看出体结构对于外界环境的滞后效应,中午12h太阳照射最强烈,模拟热像中该时刻最高温度(在上层建筑)为341.8K,到了下午14h,太阳照射开始减弱,这时最高温度(在上层建筑)这336.8K;但是从平均温度来看,中午12h为316.6K,下午14h为317.8K,反而14h要比12h高,这是由于从这个视角观测,平均温度主要是甲板部分的贡献,而甲板由于体结构造成了它的温度变化滞后于环境参数的变化。为了进一步研究,把环

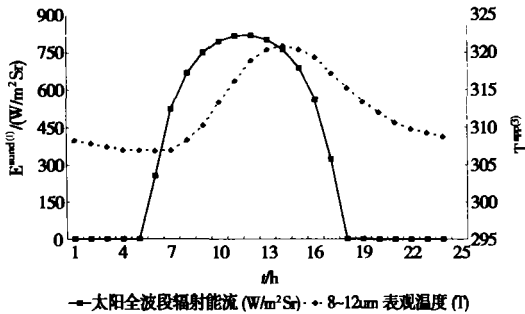


图3 一天24小时太阳全波段辐射能流和厚甲板上某面元的8~12 μm 表观温度的变化

Fig. 3 Energy flux of sun and apparent temperature in 8~12 μm wavelength region of the facet on the bulk structure varied by time in one day

境中的变化因素太阳全波段的辐射能流(用 $E^{\text{sunnd}(1)}$ 表示)与厚甲板上某个面元的8~12 μm 表观温度(用 $T^{\text{app}(3)}$ 表示)在一天中随时间的变化绘于图3,从图中明显的可以看出,太阳辐射能流在12h最大,但是体结构上面元的表观温度则要到14h达到最高,而到了18h以后,太阳辐射能流已经下降为零,但是该面元的表观温度则下降得慢得多,一直要到凌晨4.5h才下降到最低,这非常明显的体现了体结构的特点.

5 结论

在原来薄壳结构的海面目标红外热像理论建模基础上通过对厚壳结构进行压缩和拉伸的方法实现了具有厚壳结构特征的海面目标的红外热像理论建模,并进行了计算机实现,得到了目标的理论模拟红外热像.在此基础上,可以把船目标的模拟热像与海天背景的模拟热像进行合成,获得完整的有厚壳结构的船目标在海天背景中的理论模拟热像.

REFERENCES

- [1] TAN He-Ping, CUI Guo-Min, RUAN Li-Ming, *et al.* The monte carlo method and parallel algorithm in infrared mapping model of terrain object. *J. Infrared Millm Waves* (谈和平,崔国民,阮立明,等. 地物目标红外热像理论建模中的蒙特卡罗法与并行计算. *红外与毫米波学报*), 1998, 17(6): 417—423
- [2] ZHU Wen-Yong, GAO Jing, ZHOU Gang-Hui, *et al.* The simulation of infrared imaging of the ship. *J. Infrared Millim. Waves* (朱文勇,高景,周刚慧,等. 舰船红外成像模拟. *红外与毫米波学报*), 1998, 17(2): 129—133
- [3] XUAN Yi-Ming, LIU Jun-Cai, HAN Yu-Ge. Analysis of the thermal features and simulation of the infrared signatures of vehicles. *J. Infrared Millim. Waves* (宣益民,刘俊才,韩玉阁,车辆热特征分析及红外热像模拟. *红外与毫米波学报*), 1999, 17(6): 441—446
- [4] HAN Yu-Ge, XUAN Yi-Ming. Thermal feature of the tank power cabin. *Infrared Technology* (韩玉阁,宣益民. 坦克动力舱内的热特性. *红外技术*), 2000, 22(3): 23—26
- [5] YANG Bao-Cheng, SHEN Guo-Tu, HONG Zhen-Qing, *et al.* Geometric modeling in infrared image simulation of targets on the sea. *Journal of East China Normal University (Natural Science)* (杨宝成,沈国土,洪镇青,等. 海面目标热像理论模拟中的几何构型问题. *华东师范大学学报(自然科学版)*), 2001, 1: 61—66
- [6] YANG Bao-Cheng, SHENG Guo-Tu, MAO Hong-Xia, *et al.* The theoretical simulation and computer software of infrared radiation fields of targets on the sea. *Chinese Journal of Computational Physics* (杨宝成,沈国土,毛宏霞,等. 海面目标红外辐射场的理论模拟方法和计算机软件. *计算物理*), 2001, 18(2): 133—138
- [7] GAO Lan-Xiang, SHEN Guo-Tu, YANG Bao-Cheng, *et al.* Research of thick hull in thermal image theoretical simulation of ships. *Journal of East China Normal University (Natural Science)* (高兰香,沈国土,杨宝成,等. 热像理论建模中的厚壳船体效应研究. *华东师范大学学报(自然科学版)*), 2003, 1: 55—61
- [8] MA Wen-Gan, ZHANG Zhi-Ping. *Computational Physics*. Hefei: China Sci. &Tech. Univ. Press (马文淦,张子平. *计算物理学*. 合肥:中国科学技术出版社), 1992, 125