第17卷第2期
1998年4月

红外与毫米波学报
J. Infrared Millim. Waves

Vol. 17, No. 2
April, 1998

舰船红外成像模拟

朱文勇 高 景 周刚慧 陈英礼
(上海交通大学应用物理系,上海,200030)

杨宝成 沈国土
(华东师范大学物理系,上海,200062)

摘要 研究并建立了海面舰船的红外理论模型,较为完整地考虑了周围环境对物体及物体各部分之间的相互作用,包括太阳辐射、海/天背景辐射、海/空气的对流,以及船体各部分的传导和相互辐射(考虑多次反射);同时考虑了舰船内舱对船壁的辐射和对流作用;采用蒙特卡洛方法,引入准随机数解决了复杂几何结构表面非漫反射灰体的辐射计算,研究计算了烟囱内的流动、温度场和红外辐射.针对某舰船,利用计算机技术实现了船体的三维构型、温度场、红外辐射场的计算,得到了舰船红外模拟热像.

关键词 红外,模拟热像,温度场分布,蒙特卡洛方法,准随机数.

引言

有关物体的红外信号特征,尤其是红外成像特征的研究,以其强烈的需求和应用背景,特别是在军事上,目前已成为国外有关研究机构的重要研究领域之一.而通过理论研究方法,建立物体的红外物理模型,得到物体的模拟热像,将为红外系统的研制、仿真设计以及人员培训等大量应用提供极为经济和有效的手段.从七、八十年代至今,针对不同的物体,如地物、海面、飞行物、车辆等,已研究建立了一系列红外理论模型[1,2,3],目前已逐步进入实用阶段;对于海面舰船,采用不同的方法,也已完成了大量不同精度要求的红外成像模型[4,5,6].

为了得到舰船的红外模拟热像,首先要完成物体的三维构型,并进行三维网格划分;然后,分别考虑目标与环境之间的各种相互作用,主要包括太阳的辐射、海面和天空的背景辐射、海水和空气的对流等,以及目标本身各部分的传导和相互辐射(考虑多次反射).同时考虑舰船的内部作用,建立物体较为完整的红外物理学模型.在此基础上,采用有限差分等方法,计算目标各部分的温度场和红外辐射场;在辐射计算中,本文采用了不同的计算方法,利用蒙特卡洛方法,引入准随机数计算热辐射交换因子,可以很方便地处理复杂几何结构中表面非漫射灰体的辐射问题.有关舰船的排气系统较为复杂,本文利用 κ-ε 两方程模式,求解湍流雷诺方程组,得到其流场和温度场,并计算其红外辐射.在得到各部分红外辐射场后,再利用计算机图形技术得到目标的三维红外模拟热像.

稿件收到日期 1997-04-11,修改稿收到日期 1997-12-03

1 热模型

首先，针对特定的物体，需要完成目标的几何建模，并明确各部分的材料特性，包括传导率、表面太阳吸收率、红外发射率等. 考虑舰船构型极为繁杂，包含有大量不同层次的复杂结构，需要根据不同的需求，经过一定的简化，采用专门的 CAD 技术，完成舰船完整的三维构型；然后，根据要求和经验，对目标进行三维网格划分，考虑到一般情况下舰船为薄壳结构，故本文采用面元划分.

在建立最为关键的目标热模型时，一般需要综合考虑物体与环境及物体各部分之间的各种传热过程. 任取第 k 个面元，其热交换示意图如图 1 所示，分别考虑了辐射、对流和传导等三种热交换；其中辐射部分主要考虑太阳的短波辐射和来自常温源的红外辐射.

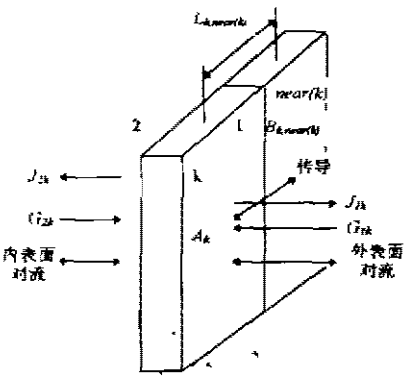


图 1 面元 k 的热交换示意图

Fig. 1 The heat exchange of element k

图 1 中，面元面积为 A_k，温度为 T_k，外表面的红外平均发射率为 ε_{1k}，内表面为 ε_{2k}，J 为入射到面元的能流密度，G 为由面元出射的能流密度.

同时考虑内(2)外(1)两个表面的辐射换热，内表面的净辐射能流为

$$J_{2k} - G_{2k} = A_k(\varepsilon_{2k}\sigma T_k^4 - \varepsilon_{2k}\varepsilon_{in}\sigma T_{in}^4), \quad (1)$$

式(1)中，ε_{in}是内舱发射率，T_{in}为内舱的温度，σ 为斯蒂芬-波尔兹曼常数. 面元外表面的净辐射为

$$J_{1k} - G_{1k} = A_k(\varepsilon_{1k}\sigma T_k^4 - \sum_j \varepsilon_{1j}\sigma T_j^4 F_{k-j}) - q_{environ}, \quad (2)$$

式(2)中，F_{k-j}为面元 k 与面元 j 的红外辐射交换因子[7]，$q_{environ}$为面元所接受到的环境辐射，包括太阳、天空和海面辐射三部分.

面元 k 与周围相邻的面元之间的热传导可表示为

$$\text{Conduction} = -\sum_{near(k)} \frac{\lambda B_{k,near(k)}}{L_{k,near(k)}}(T_k - T_{near(k)}), \quad (3)$$

式(3)中，λ 是导热率，T_k、$T_{near(k)}$分别是面元 k 和相邻面元 near(k)的温度，$B_{k,near(k)}$是传导截面积，$L_{k,near(k)}$为有效导热距离.

对流项包括两部分，分别是面元外表面与外界空气、内表面与内舱空气的对流换热，由牛顿定律可表示为：

$$\text{Convection} = A_k h(T_k - T_{air}), \quad (4)$$

式(4)中 T_{air}为壁面接触气体的温度，对流换热系数 h 情况比较复杂，如果为自然对流，一般取一常数，如为受迫对流，一般和气流速度有关，分别有一些理论公式和经验公式可以给出 h 的取值[8].

与海水接触的部分面元，考虑到海水对流换热较为强烈，故可近似认为水线以下部分的面元与海水同温.

综上所述，可得面元 k 的能流平衡方程，如考虑平衡态，可表示为：

$$A_k(\varepsilon_{1k}\sigma T_k^4 - \sum\varepsilon_{1j}\sigma T_j^4 F_{k-j}) - q_{\text{environ}} + A_k(\varepsilon_{2k}\sigma T_k^4 - \varepsilon_{2k}\varepsilon_{\text{in}}\sigma T_{\text{in}}^4) + \sum_{\text{near}\,k} \frac{-\lambda B_{k,\text{near}\,k)}}{L_{k,\text{near}\,k)}}(T_{\text{near}(k)} - T_k) + A_k h_{\text{air-out}}(T_k - T_{\text{air-out}}) + A_k h_{\text{air-in}}(T_k - T_{\text{air-in}}) = 0. \tag{5}$$

联立所有面元的能流方程，即为求解舰船温度场分布的稳态热平衡方程组.

值得注意的是舰船内舱的情况较为复杂，部分面元内壁的边界条件可能包括绝热、通风、恒温等各种不同的情况，相应的式(5)也就随之有所变化.

2　背景模型

在目标的热模型中，有关环境辐射较为复杂，实际包括太阳、天空和海面辐射三部分，即 $q_{\text{environ}}=q_{\text{sun}}+q_{\text{sky}}+q_{\text{sea}}$.

2.1　太阳辐射

太阳辐射对面元的作用可大致分为直流辐射、漫射和间接辐射三部分、主要是短波辐射. 直接辐射为面元接受到的、太阳直接照射的能流密度，可表示为：

$$q_{\text{sun-d}} = E_{\text{sun-d}} A_k \cos\Psi_k \alpha_k S_k, \tag{6}$$

式(6)中，Ψ_k 是面元法向与太阳光线方向的夹角，α_k 为太阳光吸收率，S_k 是该面元被太阳直接照射到的面积因子，由太阳的方位和船体结构之间的遮挡、阴影所决定，其值介于[0,1]之间；$E_{\text{sun-d}}$ 为全波段太阳直接辐射的能流密度，一般与日期、时间、地理位置和天气等情况有关，其值即可由实测给出，也可由 LOWTRAN[9] 等计算给出.

漫射能流 $q_{\text{sun-s}}$ 为太阳光能量经天空大气等散射后形成的上半球空间的辐射能量，取值除了和日期、时间、地理位置等有关外，主要由当时的天气情况所决定，一般可由实测给出，也可由 LOWTRAN 等计算给出. 具体可表示为：

$$q_{\text{sun-s}} = E_{\text{sun-s}} A_k \alpha_k.$$

间接辐射是太阳光经其它面元反射(包括多次反射)后到达该面元并被吸收的能流密度，可表示为

$$q_{\text{snn-r}} = \sum_j (E_{\text{sun-d}}\cos\Psi_j S_j + E_{\text{sun-s}}) A_j (1-\alpha_j) F_{j-k}^{\text{snn}}, \tag{7}$$

式(7)中 F_{j-k}^{snn} 为面元 k 与面元 j 的太阳光波段辐射交换因子.

面元所吸收的总的太阳辐射能流密度 $q_{\text{sun}}=q_{\text{sun-d}}+q_{\text{sun-s}}+q_{\text{sun-r}}$.

2.2　天空辐射和海面辐射

天空辐射主要是指上半球空间(包括环境大气)的长波辐射. 辐射强度 E_{sky} 一般由气象条件如云层、太阳等所决定，可以通过 LOWTRAN 计算给出，也可以由实验或一些经验公式得到. 面元所吸收的天空辐射为 $q_{\text{sky}(k)}=F_{\text{k-sky}}E_{\text{sky}}$，其中，$F_{\text{k-sky}}$ 为面元相对天空的红外辐

射交换因子.

有关海面的红外辐射即要考虑海水表面直接的热辐射,也要考虑海面对天空等环境辐射的反射,显然不仅同海况有关,还同气象参数有关.同样,海面的辐射强度可以由实测或一些经验公式给出,也可通过一些理论模型进行计算得到,如比较常用的 Cox 和 Munk 的海面模型[10],结合 LOWTRAN 等给出的海平面辐射,最终给出同时包含直接热辐射和环境辐射的反射两部分总的海面红外辐射.在具体计算面元所接收到的海面辐射时,同样需要考虑面元相对海面的红外辐射交换因子.

3 辐射计算

有关热辐射交换计算的问题,有多种处理方法.对于面元空间遮挡关系较简单且表面为漫射灰体的情况,可采用 Stokes 定理将面积分化为线积分等方法计算[7].考虑到舰船结构繁杂,面元众多,空间遮挡关系极为复杂,存在多次反射,且表面光学特性可能为非漫射-灰体,故本文主要采用蒙特卡洛方法,利用辐射交换因子的概念,来计算各部分的辐射交换[7].

具体而言,蒙特卡洛方法就是利用随机线来模拟能量离散量(能束),并通过跟踪射线,确定能束的最终归属来模拟热辐射交换.每条射线(能束)从某一确定的面元出发,跟踪其行走的路径,如果被其它面元所截获并吸收,则跟踪结束;如果该能束被反射,则继续跟踪直至被吸收.蒙特卡洛方法在具体模拟的过程中,每跟踪一条能束,需要产生五个随机数,前四个构成一组四维随机数以完全确定一条随机能束(两个确定能束的出发点,两个确定空间方向);最后一个随机数用来判断能束是否被其它面元所吸收.若反射,则继续跟踪(此时仅需两个随机数确定方向).

采用蒙特卡洛思想,在具体计算时,十分关键的就是随机数的选取,整个计算的速度和质量主要就是由此决定的.一般在计算机实现中,常采用"伪"随机数.从辐射模拟的基本特性出发,本文采用了"准"随机数[11],即认为在此过程中,其均匀性更为重要,而独立性可忽略.引入"准"随机数后,针对若干种已有精确解的典型情况,如两块平行或垂直平板等,我们分别进行了数值计算进行比较,发现两者符合情况相当好.此外,在一般精度要求下(如1%),本文分别采用"准"随机数和"伪"随机数进行了计算比较,结果表明,前者的计算量一般仅为后者的 1/2.

4 烟囱模型

考虑舰船整体的红外辐射特性,特征最明显的部分可能就是舰船的烟囱及烟羽部分.为了减少烟囱部分的红外辐射,目前有些舰船的烟囱已采用了各种装置如扩压环等来抑制红外辐射,因此,有关的理论计算相当复杂;在目前我们所采用的整体理论模型中,有关烟囱部分是独立计算的,在完成烟囱温度场计算后,再与整舰合成.为此,本文根据烟囱的具体结构,建立了烟囱的理论模型,采用流体力学、数值计算传热学方法[12],根据 κ-ε 二方程模式,求解烟囱内湍流雷诺方程组;考虑到烟囱内部的换热远大于烟囱外壁的换热,故烟囱壁近似采用绝热边界条件.在数值计算中,根据不同的工况,由烟囱入口处烟气的温度、流速、流量等,采用 SIMPLE 算法,计算烟囱内流场和温度场分布,进而求得烟囱壁的温度场分布,同时计算所排烟气的红外辐射.有关烟囱部分详细的理论模型和计算结果,拟另文讨论.完成

烟囱部分的计算后，再置入整舰模型，考虑其对其它部分的换热作用，计算整舰温度场的红外辐射场分布.

5 结果

根据上述思路和方法，本文首先利用计算机图形工作站和大型 CAD/CAE 软件完成了某舰船的三维造型，同时输入各部分的物理参数，并进行面元划分（约 10^4 个单元）；然后，根据建立的理论模型和相应的边界条件，选取某种自然环境条件和工况，完成对整船温度场和红外辐射场的计算，并在计算机中完成了目标模拟热像的三维显示. 图 2 即为某船的模拟热像.

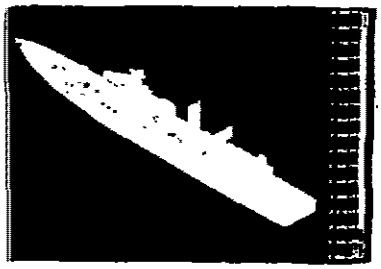


图 2　某舰红外模拟热像
Fig. 2 The simulated infrared image of a ship

REFERENCES

1 Morey B, Bolom P, Schanerberger W. *SPIE*, 1989, **1098**: 28～41
2 Manolopoulos A. AD-A163567, 1985
3 Jacobs P. *SPIE*, 1994, **1311**: 80～93
4 Zhu W Y, Gao J, Shu P Y, *et al*. *J. Infrared Millim. Waves*（朱文勇，高景，粟鹏义等，**红外与毫米波学报**），1996, **15**(3): 179～182
5 McGrath C P, Jensen D R, Ostrowski P P. AD-A282672, 1994
6 Vaitekunas D A, Alexan K, Lawrence O E. *SPIE*, 1996, **2744**: 411～424
7 Siegel R, Howell J R. *Thermal Radiation Heat Transfer*. Hemisphere and McGraw-Hill, 1981（R. 西格尔，J R. 蒙厄尔，**热辐射传热**，曹玉璋等译，北京：科学出版社，1990, p. 261, 140）
8 Sullivar S P, Reynods W R. *SPIE*, 1988, 890
9 Kneizys F X, Shettle E P, Abreu L W, *et al*. *User's Guide to LOWTRAN7*, AFGL-TR-88-0177, 1988
10 Cox C, Munk W. *Measurement of the roughness of the sea surface from photographs of the sun's glitter*, J. O. S. A., 1954, **44**: 838～850
11 Ma W X, Zhang Z P. *Computational Physics*. Hefei: China Sci. & Tech. Univ. Press（马文金，张子平，**计算物理学**，合肥：中国科学技术出版社），1992, 25
12 Patahkar S V. *Numerical Heat Transfer and fluid flow*. McGraw-Hill Book Company, Hemisphere Publishing Co., 1980（S. V. 帕坦卡著，郭宽良译，**传热和流体流动的数值计算方法**，合肥：安徽科学技术出版社），1984, 118～140