

改进单元法在红外模拟热像中的应用

朱文勇 高景[√] 栗鹏义 黎学文 严 瑗

(上海交通大学应用物理系, 上海, 200030)

7N215

A **摘要** 在单元法基础上, 分析了封闭薄壳结构的物体在海天环境中的传热学过程及各种因素的影响, 对物体进行了三维划分, 根据面元主要热物性参数进行了分类, 并引入了两类新的温度修正公式. 根据改进后的单元法进行了数值计算, 得到了物体三维温度场分布及其红外模拟热像.

关键词 红外模拟热像, 单元法, 温度场分布, 辐射.

引言

程 颖

建立物体的红外热成像理论模型, 是目前各国有关研究机构的研究热点之一. 物体红外理论模型的建立、模拟热像的形成将为红外系统的研制、仿真设计以及人员培训等提供极为经济有效的手段^[1~3]. 国外在这一领域作了大量研究工作, 并已逐步进入实用阶段, 建立了大量比较成熟的红外成像模型, 其中较简洁、有效的有单元法 SEM^[4] (Single Element Method) 和 SPACE (Sun Precipitation Atmosphere Clouds Earth) 模型^[5] 等. SEM 主要用于水面物体, SPACE 模型则用于地面物体的计算.

单元法可以认为是一种集总参数法, 主要是先把物体沿目视方向投影到一平面上, 再把各部分按类划分成许多小面元, 每个面元用一个温度值表示, 然后选取基元, 计算基元温度; 再把其它各类与基元类的温差作为微扰修正分别计算, 最后得到总的平均温度. 但由于单元法所考虑的因素过于简单, 而且一般只得到物体的平均温度, 所以在模拟热像应用上有很大的局限性. 本文在单元法的基础上, 针对具有封闭薄壳结构的物体 (厚度方向温差可忽略不计), 较为全面考虑了在海天环境中物体的传热学过程; 对物体进行了三维划分, 引入了两类新的温度修正, 并给出了相应的修正公式, 完成了基元温度和其它各类面元温度修正的快速计算, 得到了物体的三维温度场分布和红外模拟热像.

1 温度场的计算

为了得到红外模拟热像, 最重要的就是要得到物体的三维温度场分布. 一般情况下水面物体如舰船等常被简化作封闭的薄壳结构. 我们可假设壳体内部为恒温, 计算中分别考虑辐射、对流、传导等各种物理过程. 一般而言, 壳体表面的温度差 ΔT 主要是由热容量、比辐射率以及内部温度、环境等热物性参数的差异所造成的. 因此可以按照上述参数对物体表面进行分类. 而且, 一般情况下, ΔT 与 T 相比是一小量 (约相差两个数量级), 故可将 ΔT 作为修正项来考虑. 单元法就是首先选取某类面元作为基元, 计算其温度; 面元之间的传导和辐射较小而被忽略, 因此可以分别独立地计算其它各类面元与基元的温度差, 最终得到全部面元的温度. 经退耦、分类处理, 计算量将大大降低; 但由于是按类计算, 所以对较为复杂的物体

不可能达到很高的温度分辨率,一般仅适用于薄壳结构的、相邻各部分温差较小的物体. 1.1 基元的温度

从便于计算的角度出发,我们在划分后的面元中选择具有最低的热容或最小内部温度的面元作为基元,然后计算其它面元相对基元的温度修正. 面元温度计算中,忽略面元之间的热传导和辐射,可得到面元能流方程:

$$WdT/d\tau = Q_{\text{sun}} + Q_{\text{sky}} + Q_{\text{in}} - h_a(T - T_a) - h_r(T - T_r) - h_i(T - T_i) - Q_{\text{e}} - Q_{\text{io}}, \quad (1)$$

式(1)中 T 是所求面元的温度, W 是该面元的热容, T_a 是外界空气温度(假设雨水温度与空气温度相同), T_r 是与面元内壁接触的空气温度, h_a 、 h_r 和 h_i 分别是面元与空气、雨水、内部空气的换热系数, Q_{sun} 为太阳对面元的辐射,在文献[4]的基础上,我们同时又考虑了天空、海面对该面元的辐射 Q_{sky} 、 Q_{sea} , 物体内部对面元内壁辐射 Q_{in} , 以及该面元对内、外的辐射 Q_{e} 、 Q_{io} .

对面元作漫射灰体近似,利用斯蒂芬-波尔兹曼定律,并用差分代替微分,由式(1)可得:

$$T = [(W/\Delta\tau)T_0 + Q + H] / [(W/\Delta\tau) + K], \quad (2)$$

式(2)中, T_0 为面元的初始温度, $\Delta\tau$ 为时间间隔,

$$\begin{aligned} Q &= Q_{\text{sun}} + Q_{\text{sky}} + Q_{\text{sea}}, \\ H &= (h_a + h_r)T_a + h_i T_r + \epsilon_i \sigma T_r^4 + 3(\epsilon_i + \epsilon_o) \sigma T_0^4, \\ K &= h_a + h_r + h_i + 4(\epsilon_i + \epsilon_o) \sigma T_0^3. \end{aligned} \quad (3)$$

式(3)中 Q 为环境辐射, Q_{sun} 可分为直射能流 Q'_{sun} 和间接漫射能流 Q''_{sun} 两部分^[4], 直射能流部分还需考虑投影和遮挡关系; Q_{sky} 和 Q_{sea} 在计算中需考虑天空和海面对面元的角系数; ϵ_i 和 ϵ_o 分别是面元内、外壁的比辐射率, σ 为斯蒂芬-波尔兹曼常数.

基元温度 T_0 只需将所选基元的参数代入式(2)中即可求得.

1.2 温度修正

文献[4]在计算面元的温度时,引入了因热容和内部温差等产生的修正因子,为此修正如下:

设各个面元的热容分别为 $W_1, W_2, \dots, W_j, \dots$ (其中 W_1 为基元热容), 由文献[4]可得第 j 块与基元的温差为:

$$\Delta T_{wj} = T_j - T_0 = \frac{(V_j - V_1)(Q + H - KT_0)}{1.0 + K(V_1 + V_j) + V_1 V_j - K^2}, \quad (4)$$

其中, $V_j = \Delta\tau / W_j$.

设每个面的内部温度分别为 $T_{a1}, T_{a2}, \dots, T_{aj}, \dots$ (T_{a1} 为基元的内部温度), 由文献[3]得第 j 块的温度与基元的温差为:

$$\Delta T_{ij} = T_j - T_0 = gg(T_{aj} - T_{a1}) + cc(T_{aj}^4 - T_{a1}^4), \quad (5)$$

式(5)中,

$$\begin{aligned} gg &= h_i / [W_1 + h_a + h_r + h_i + 4(\epsilon_i + \epsilon_o) \sigma T_0^3], \\ cc &= \epsilon_i \sigma / [(W_1 / \Delta\tau) + h_a + h_r + 4(\epsilon_i + \epsilon_o) \sigma T_0^3]. \end{aligned}$$

2 新修正项的引入

在模拟热像的计算中,面元比辐射率的影响显然是极为重要的. 为此,我们在文献[4]的

基础上,根据面元的比辐射率的差异,引入了由此产生的第三类修正项.另外,考虑到天气晴朗时,太阳辐照对面元温度所产生的影响,又引入了第四类修正项.

2.1 比辐射率影响的修正

设各个面元的比辐射率为 $\epsilon_1, \epsilon_2, \dots, \epsilon_j, \dots$ (其中 ϵ_1 为基元的比辐射率),由式(2)可得第 j 块的温度为

$$T_j = (M + 3\sigma T_0^4 \epsilon_j) / (P + 4\sigma T_0^4 \epsilon_j); \quad (6)$$

式(6)中, $M = T_0(W_1/\Delta\tau) + Q + H$, $P = (W_1/\Delta\tau) + K$.

则第 j 块与基元的温差为

$$\Delta T_{\epsilon_j} = T_j - T_0 = \frac{(\epsilon_j - \epsilon_1)(3\sigma T_0^4 P - MQ)}{P^2 + PQ(\epsilon_1 + \epsilon_j)\epsilon_1\epsilon_j Q^2}. \quad (7)$$

2.2 太阳辐照影响的修正

虽然对同一类面元来说,太阳的能流是相同的,但由于面元之间存在着遮挡、阴影关系,面元所接收的太阳直射能流 Q'_{sun} 与实际被辐照到的面积成正比.由此引入太阳面积因子 A_i , 定义为面元实际被辐照到的面积与面元整个面积之比;显然该量主要是由太阳的方位角、物体的朝向和结构等所决定.

设各个面元的太阳面积因子分别为 $A_{i1}, A_{i2}, \dots, A_{ij}, \dots$ (其中 A_{i1} 为基元太阳面积因子),由式(1)可得第 j 块面元的温度为

$$T_j = kk + mm \cdot A_{ij}; \quad (8)$$

其中,

$$kk = [W_j/\Delta\tau + Q'_{sun} + Q_{sky} + Q_{sun} + H] / (W_j/\Delta\tau) + K,$$

$$mm = Q'_{sun} / [W_j/\Delta\tau + K].$$

显然,基元的温度 $T_0 = T_1 = kk + mm \cdot A_{i1}$, 于是第 j 块面元与基元的温差为

$$\Delta T_{ij} = T_j - T_0 = mm \cdot (A_{ij} - A_{i1}). \quad (9)$$

2.3 修正后的面元温度

综合上述各项修正可得面元的温度为:

$$T_j = T_0 + \Delta T_{w_j} + \Delta T_{n_j} + \Delta T_{\epsilon_j} + \Delta T_{ij}. \quad (10)$$

若要计算整个物体的平均温度,只须对各面元的温度以面积加权平均即可,

$$T_{ave} = \frac{T_1 A_1 + T_2 A_2 + \dots + T_j A_j + \dots}{A_1 + A_2 + \dots + A_j + \dots}. \quad (11)$$

针对红外模拟热像,还必须同时考虑环境红外辐射在物体表面反射分量的影响,并利用基尔霍夫定律^[6],可得面元的表观温度为

$$T_{\mu} = [\epsilon_j T_j^4 + (1 - \epsilon_j) Q / \epsilon_j]^{1/4}. \quad (12)$$

如此,可以得到物体所有面元的表观温度,即三维温度场分布.再考虑到探测、成像系统的响应等,利用计算机三维成像技术,就可以得到物体的三维模拟红外热像.

3 计算及讨论

利用改进的单元法计算三维温度场分布具有快速、简便的特点,并能满足一定的精度要求,如一般的计算时间在 486 微机中仅为秒的量级.图 1 就是采用这种方法,并利用文献[4]和[7]的参数计算的一艘静止简化舰船的模拟热像;由图 1 可见太阳辐射对温度场分布具有

较大的影响。

在具体的数值计算中,值得注意的是各种参数的确定,我们在计算舰船时,整个船体分为约300块面元,船用钢板比重 $\rho = 7.8 \times 10^3 \text{kg/m}^3$,比热容 $W = 0.45 \text{kJ/kgK}$, $\epsilon_s = 0.85$, $\epsilon_o = 0.9$; 环境气温为 20°C , 换热系数由文献[4]可得 $h_a = 3.5625 \cdot |v|^{0.6}$, (v 为相对风速), 静止时取为 $6 \text{W/m}^2\text{K}$, h_r 一般取为 $4 \text{W/m}^2\text{K}$, 文献[4]还给出了不同雨量时所对应的 h_r 值; 图1计算中, 太阳直射能流 $Q'_{\text{sun}} = 858 \text{w/m}^2$, 间接能流 $Q''_{\text{sun}} = 118 \text{w/m}^2$.

详细的计算结果及相应参量的确定等拟另文讨论。

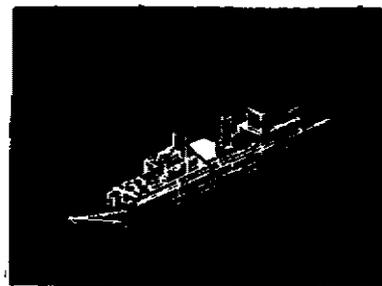


图1 简化舰船红外模拟热像
Fig.1 The simulated infrared thermogram of a simplified ship

参考文献

- 1 Schott J R, Raqueno R. *SPIE* 1991;1504;533
- 2 Sheffer A D, Cathcart J M, Montgomery J I. *SPIE*, 1992;1687;538
- 3 Graziano J M, Gerhart G R. *Use of the TACOM Thermal Imaging Model*, AD-A154060, Warren, Michigan, U. S. Army Tank-Automotive Command Research And Development Center, 1985;7
- 4 Wilson D M. *A Method of Computing Ship Contrast Temperature Including Results Based on Weather Ship Environment Data*, AD-A078794, NSWC/WOL, 1979;1~58
- 5 Agostion J AD. *SPIE*, 1987;781;2~9
- 6 Robert Siegel and John R. Howell, *Thermal Radiation Heat Transfer*, Hemisphere and McGraw-Hill, 1981, p. 43. 曹玉璋等译, 热辐射传热, 北京, 科学出版社, 1990,
- 7 Hughes H G. *Infrared Ship Signature Evaluation*, AD-A209354, San Diego, Naval Ocean Systems Center, 1989;1~13

THE APPLICATION OF IMPROVED SINGLE ELEMENT METHOD TO SIMULATED INFRARED THERMOGRAM

Zhu Wenyong Gao Jing Su Pengyi Li Xuwen Yan Yuan

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

Abstract Based on the SEM (Single Element Method), the heat transfer process of object with enclosure shell structure in the ocean was investigated. The 3-D object was divided into different elements which were classified according to their thermal characteristics. Two temperature correction formulas which were very important to the simulated infrared thermogram were developed for the first time. The 3-D temperature distribution of the object was obtained through simple numerical calculation, and the simulated infrared thermogram was also given.

Key words simulated infrared thermogram, single element method, temperature field distribution, radiation.