

· 光电工程系统技术 ·

空间目标温度场理论计算

李颖杰^{1,2,3}, 吕相银^{1,2}

(1. 脉冲功率激光技术国家重点实验室, 安徽 合肥 230037; 2. 电子工程学院安徽省红外与低温等离子体重点实验室, 安徽 合肥 230037; 3. 空军第五飞行学院, 甘肃 武威 733003)

摘要: 获取空间目标表面温度场是进行红外辐射特征分析的重要前提, 为确定目标表面温度场分布, 首先建立了空间目标的导热微分方程; 然后利用节点网络法, 求解其表面温度场分布; 最后对一个空间目标模型的表面温度场分布进行了数值计算并加以分析。

关键词: 空间目标; 温度场; 红外辐射

中图分类号: TN241

文献标识码: A

文章编号: 1673-1255(2009)06-0004-03

Theoretical Calculation of Temperature Distribution of A Space Target

LI Ying-Jie^{1,2,3}, LV Xiang-Yin^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Pulsed Power Laser Technology, Hefei 230037, China;

2. Key Laboratory of Infrared and Low Temperature Plasma of Anhui Province Electronic Engineering

Institute, Hefei 230037, China; 3. The Fifth Flight College of Air Force, Wuwei 733003, China)

Abstract: Obtaining the target's surface temperature field is prerequisite to analysis of the IR characteristic. In order to determine the temperature field distribution, a differential equation of heat conduction for space target was established and the surface temperature distribution of space target was got by node network. Lastly the value calculation was made and analyzed for the surface temperature distribution of a space target model.

Key words: space target; temperature field; infrared radiation

空间目标可以近似看成灰体, 为了得到其红外辐射特性, 必须计算其表面温度分布, 表面温度的分布主要取决于周围环境及目标的热交换和热平衡。由于空间目标的结构复杂、所处的外部热环境振荡, 使得计算空间目标温度分布的难度较大, 为了从总体上把握其表面温度的分布, 必须对计算条件进行合理性简化, 假设目标为内部温度固定的空腔结构体, 由于目标处在大气层外, 除太阳和地球外, 其他星体和宇宙空间与目标的辐射换热可以忽略不计。因此, 目标表面温度的分布主要由下列因素决定^[1,2]: (1) 太阳直接投射到目标表面的辐射 (简称太阳直接辐射); (2) 地球及其大气系统直接投射到

目标表面的辐射 (简称地球辐射); (3) 太阳的辐射经地球反射后再投射目标表面 (简称地球反照辐射); (4) 目标表面向宇宙空间的辐射。

1 外界环境的热量交换

1.1 太阳直接辐射

为了计算地球大气层外的太阳辐照度, 必须知道太阳半径和表面温度。设定太阳是半径为 6.95×10^8 m 的规则球体, 并且是表面温度为 5 777 K 的黑体。由于太阳与地球的距离远大于地球半径, 可以认

收稿日期: 2009-09-29

基金项目: 重点实验室开放基金项目 (2007A008008K)

作者简介: 李颖杰 (1983-), 男, 内蒙古呼和浩特人, 硕士研究生, 研究方向为光电工程技术。

为空间的太阳光是辐射度均匀的平行光,则第 j 个表面单元吸收的太阳直接辐射 q_{sj} 为

$$q_{sj} = \epsilon_s E_s S_j X_{sj} \quad (1)$$

式中, ϵ_s 为目标表面对太阳辐射的吸收率; E_s 为太阳常数; S_j 为该单元表面积; X_{sj} 为该单元外表面对太阳直接照射的角系数.

1.2 地球反照辐射和地球辐射

空间目标不仅接收太阳直接辐射,而且还会接收到地球反射的太阳辐射,地球对太阳辐射的反射可认为是地表均匀的漫反射,由此在计算地球反射太阳辐射时可将地球当作二次光源来处理^[4],则第 j 个表面单元所吸收的地球反照辐射 q_{sej} 为

$$q_{sej} = \epsilon_{se} \rho E_s S_j X_{sej} \quad (2)$$

式中, ϵ_{se} 为目标表面对地球反射太阳辐射的吸收率; ρ 为地球反射率; X_{sej} 为该单元表面对太阳间接辐射的角系数.

对于空间目标而言,可以假设地球是一个均匀的热辐射平衡体,即地球大气系统吸收的太阳辐射等于它向空间辐射的能量^[5],地球辐射出射度为 390.1 W/m^2 ,其光谱分布近似于 254.3 K 的黑体,则第 j 个表面单元所吸收的地球辐射 q_{ej} 为

$$q_{ej} = \epsilon_e E_e S_j X_{ej} \quad (3)$$

式中, ϵ_e 为目标表面对地球辐射的吸收率; X_{ej} 为该单元表面对地球辐射的角系数.

1.3 目标向宇宙空间的辐射

表面温度高于绝对零度的空间目标必然会向宇宙空间辐射能量.该单元表面向宇宙空间的辐射能 q_{faj} 为

$$q_{faj} = \epsilon \sigma T_j^4(t) S_j \quad (4)$$

式中, ϵ 为目标表面的发射率; σ 为斯蒂芬-玻尔兹曼常数; $T_j(t)$ 为该部分在时间 t 的温度.

2 空间目标表面温度计算

空间目标的物理模型经合理化处理后,采用节点网络法来计算其表面温度分布及变化规律.将求解区域用与坐标轴平行的一系列网格线的交点所组成的点的集合来代替,在每个节点上,将控制方程中每一个导数用相应的差分表达式来代替,从而在每个节点上形成一个代数方程,每个方程中包括了本

节点及其附近一些节点上的未知值,递推求解这些方程组,便可以算出目标表面各节点的温度值及其随时间的变化规律,从而得到空间目标温度及其变化规律^[3].

2.1 热平衡方程

利用热平衡方程可以求出在一定边界条件作用下目标内的温度随空间和时间的分布状态,由此可以得出目标表面的温度分布状态和随时间的变化.热平衡方程以能量守恒定律和傅里叶定律为基本依据,它在柱坐标系的一般形式为

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \lambda \frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \lambda \frac{\partial T}{\partial r} \frac{1}{r} + \lambda \frac{\partial^2 T}{\partial \varphi^2} \frac{1}{r^2} + \lambda \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + \Phi_V \quad (5)$$

式中, ρ 为密度; c 为比热容; t 为时间; λ 为导热系数; Φ_V 为微元单位体积的发热功率.

2.2 边界条件的确立

边界条件指导热物体在其边界面上与外部环境之间在热交换方面的联系或相互作用.对于非稳态导热,它常常是使过程得以发生和发展的外界驱动力.由前面目标表面与外界环境的热量交换的分析,可以得到边界条件为

$$k \frac{\partial T}{\partial n} \Big|_{\text{边界面}} = Q_{xi} - Q_{fa} - Q_{fan} \quad (6)$$

式中, n 为边界面某处的外法线方向.式(6)左边表示由目标表面向内部导热而损失的热量,右边表示由辐射造成的目标表面得到的热量.

2.3 数值计算

用数值方法求解导热问题,首先要将求解区域离散化.对于导热微分方程,利用向前差分格式得出内节点方程为

$$\rho c \frac{T_{i,j,f}^{k+1} - T_{i,j,f}^k}{\Delta t} = \lambda \frac{T_{i+1,j,f}^{k+1} + T_{i-1,j,f}^{k+1} - 2T_{i,j,f}^{k+1}}{\Delta r^2} + \lambda \frac{T_{i,j-1,f}^{k+1} + T_{i,j+1,f}^{k+1} - 2T_{i,j,f}^{k+1}}{\Delta \varphi^2} \frac{1}{r^2} + \lambda \frac{T_{i,j,f+1}^{k+1} + T_{i,j,f-1}^{k+1} - 2T_{i,j,f}^{k+1}}{\Delta z^2} + \frac{T_{i-1,j,f}^{k+1} - T_{i+1,j,f}^{k+1}}{2\Delta r} \frac{1}{r} \quad (7)$$

对于边界节点,需要利用能量平衡方法推出节

点方程为

$$\rho c \frac{T_{i,j,f}^{k+1} - T_{i,j,f}^k}{\Delta t} = \lambda (T_{i+1,j,f}^{k+1} - T_{i,j,f}^{k+1}) \left(\frac{2}{\Delta r^2} - \frac{1}{r \Delta r} \right) + \lambda \frac{T_{i,j-1,f}^{k+1} + T_{i,j+1,f}^{k+1} - 2T_{i,j,f}^{k+1}}{\Delta \varphi^2} \frac{1}{r^2} + \lambda \cdot \frac{T_{i,j,f+1}^{k+1} + T_{i,j,f-1}^{k+1} - 2T_{i,j,f}^{k+1}}{\Delta z^2} + Q_{xi} - \epsilon_h \sigma (T_{1,j,f}^{k+1})^4 \frac{2}{\Delta r} \quad (8)$$

在联立方程组迭代计算时,还面临着外边界条件含辐射项温度四次方的问题.为此,利用泰勒公式作线性化处理可得

$$(T_{1,j,f}^{k+1})^4 = 4(T_{1,j,f}^k)^3 T_{1,j,f}^{k+1} - 3(T_{1,j,f}^k)^4 \quad (9)$$

对于内表面节点方程,普通情况下与外表面相同,但其辐射项由于密闭空间的相互反射要变得复杂得多,具体计算方法见参考文献.为简化计算,通常情况下可以认为每个内表面接收到的辐射能量等于其由于热辐射而损失的能量.故其内边界节点方程相对于外边界节点方程而言,可以忽略辐射项.

3 计算分析

以图1所示的一个空间目标模型为研究对象.分别把目标划分成若干个热力学特性基本相同的单元,以主体单元为例,考虑其各单元表面的相互辐射,利用节点网络法求解整个空间目标的温度分布和红外辐射特性.设定目标的材料导热系数 $\lambda = 1 \times 10^{-5} \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$,目标的材料密度 $\rho = 500 \text{ kg}/\text{m}^3$,目标的比热容 $c = 200 \text{ J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$,目标表面对太阳辐射的吸收率 $\epsilon_s = 0.95$,目标表面的发射率 $\epsilon = 0.15$,目标表面对地球辐射的吸收率 $\epsilon_e = 0.15$,目标表面

对地球反射太阳辐射的吸收率 $\epsilon_{sc} = 0.95$,太阳光来自圆2(T2)右侧,地球相对位置在圆4(T4)左侧.

太阳直接辐射是空间目标接收的最主要的外部热源,对空间目标的表面温度影响很大,如图2所示,圆2(T2)、圆3(T3)和圆5(T5)的圆周方向右侧可以接收到太阳直接辐射,表面温度变化明显;T3、T4和T5的圆周方向左侧可以接收到地球反照辐射和地球辐射,表面温度也有所变化;圆1(T1)圆周方向左右两侧、T2圆周方向左侧和T4圆周方向右侧的表面温度无法接收到太阳直接辐射、地球反照辐射和地球辐射,表面温度变化很小.

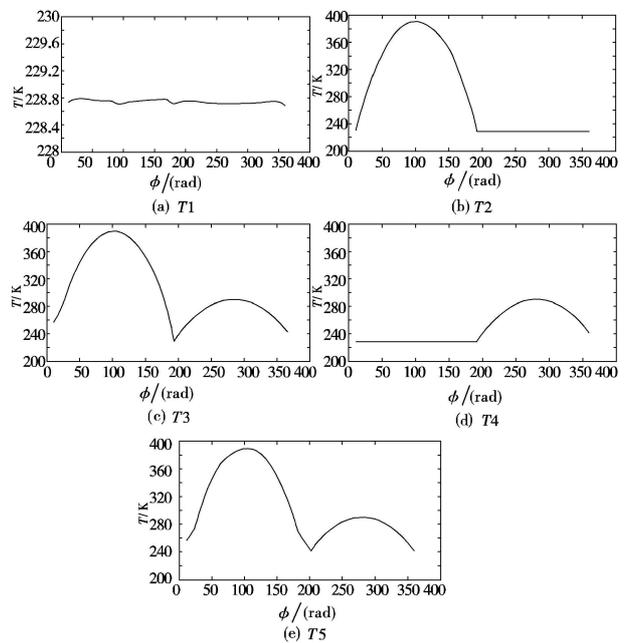


图2 空间目标表面温度场分布

4 结束语

建立了空间目标的导热微分方程,利用节点网络法,求解其表面温度场分布,对一个空间目标模型的表面温度场分布进行了数值计算.该方法可以简单计算出空间目标在任意时刻和任意太阳入射角时的温度场分布,基本可以满足对于精度要求不高的工程计算.

参考文献

- [1] 杨华,凌永顺,马东辉,等.空间飞行器对背景辐射的反射特性[J].红外与激光工程,2002,31(4):326-328.

(下转第22页)

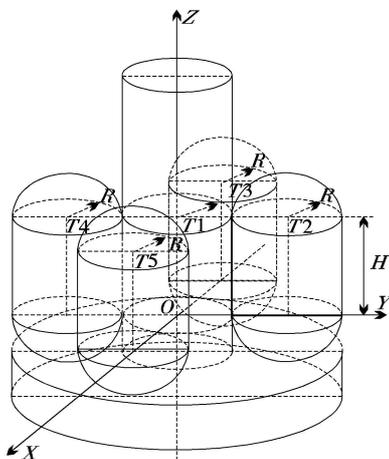


图1 空间目标几何模型

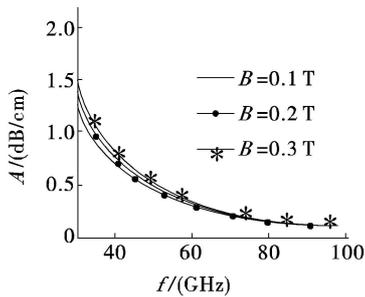


图5 不同磁场强度时衰减随入射波频率的变化关系

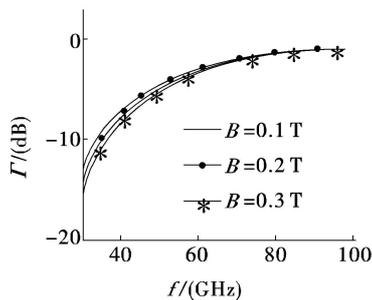


图6 不同磁场强度时反射率随入射波频率的变化关系

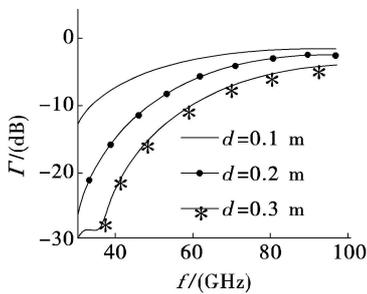


图7 不同等离子体厚度时衰减随入射波频率的变化关系

(4) 等离子体密度为 $N_e = 1.0 \times 10^{12}/\text{cm}^2$, 电子碰撞频率为 $\nu_{eff} = 50 \text{ GHz}$, 外加磁场为 $B = 0.1 \text{ T}$, 等离子体厚度分别为 $d = 0.1, 0.2, 0.3 \text{ m}$. 由于厚度对衰减(dB/cm)没有影响(如果不是计算每厘米的

衰减,厚度就会有影响),这里仅给出反射率的变化示意图(如图7所示).

图7显示等离子体厚度越小,反射率越小.而且随着入射波频率的增大,反射率呈逐渐增大的趋势.

3 结束语

金属板上覆盖等离子体后,入射电磁波从空气入射到等离子体,最后经过金属板的反射又从等离子体出射到空气层中.从仿真计算结果来看,电磁波的衰减以及等离子体表面反射率的大小与等离子体的离子密度、碰撞频率、外加磁场强度、等离子体厚度以及入射波频率的变化都有关系.而且在入射波频率过高的情况下,等离子体的反射趋于全反射.这将意味着等离子体对电磁波的传播没有任何效应,对金属板起不到任何减缩雷达散射截面的作用.因此下一步研究高频段电磁波在等离子体中的传播有非常重要的意义.

参考文献

- [1] 吴琼. 等离子体覆盖目标的电磁散射特性研究[D]. 西安:西安电子科技大学,2006.
- [2] 郭斌. 高频电磁波在大气等离子体层中的传播和吸收的研究[D]. 大连:大连理工大学,2005.
- [3] 曾福华,刘正东. 等离子体吸收隐身技术的吸收功率数值模拟[J]. 南昌:南昌大学学报(理科版),2008,32(2):183-185.
- [4] 鄂扬. 等离子体对电磁波吸收效应的研究[D]. 成都:电子科技大学,2003.
- [5] Klement Dieter, Preissner Jürgen, Volker Stein. Special Problems in Applying the Physical Optics Method for Backscatter Computations of Complicated Objects [J]. IEEE Transaction on Antennas and Propagation,1988,36(2):228-237.

(上接第6页)

- [2] 姚连兴,仇维礼,王福恒. 目标和环境的光学特性[M]. 北京:宇航出版社,1995.
- [3] 宣益民,韩玉阁. 地面目标与背景的红外特征[M]. 北京:国防工业出版社,2004.

- [4] 舒锐,周彦平,陶乾宇,等. 空间目标红外辐射特性的研究[J]. 光学技术,2006,32(2):196-199.
- [5] R 西格尔, J R 豪厄尔. 热辐射传热[M]. 曹玉璋. 北京:科学出版社,1990.
- [6] 刘景生. 红外物理[M]. 北京:兵器工业出版社,1995.