

卫星的红外辐射特征研究

韩玉阁, 宣益民

(南京理工大学 动力工程学院, 江苏 南京 210094)

摘要: 卫星的红外辐射特征对于工作卫星与失效卫星的判别具有重要意义, 根据卫星与地球、太阳之间的位置关系, 计算了太阳直接辐射角系数, 利用随机模拟法计算了地球反照和地球红外辐射角系数, 建立了卫星温度控制方程, 并利用辐射传递系数的概念和蒙特卡洛方法进行辐射换热的计算, 对卫星温度场进行了求解, 讨论了卫星红外辐射特征的计算方法, 并对其特性进行了分析计算, 结果表明: 卫星的散热面是区别工作卫星和失效卫星的依据。

关键词: 红外辐射特征; 热模型; 卫星

中图分类号: TN21 **文献标识码:** A **文章编号:** 1007-2276(2005)01-0034-04

Infrared feature of the satellite

HAN Yu-ge, XUAN Yi-min

(School of Power Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China)

Abstract: The infrared feature of the satellite has important significance to the identifying of the satellite and the distinguishing of the working satellite and the non-working satellite. The view factor of the sun direct radiation is calculated according to the locations of the sun, the earth and the satellite. The view factor of the albedo and the earth infrared radiation are calculated with the random method. The temperature control equation is established, and the radiation heat transfer is calculated with the concept of the radiation transfer coefficient and the Monte-Carlo method. The method of calculating the infrared feature of the satellite is discussed, and the infrared feature of the satellite is calculated and analyzed. It can be concluded from the results that the satellite can be found and identified more easily in the sunlight region, and the heat exchange surface of the satellite can be as the characteristic position for distinguishing the working satellite and the non-working satellite.

Key words: Infrared feature; Thermal model; Satellite

0 引言

卫星沿轨道飞行时, 要周期性地经历日照区和地球阴影区, 被周期性地加热和冷却, 因此卫星的温度也随之周期性地变化, 这将影响卫星的红外辐射特

征。卫星正常运行时, 其内部的仪器设备将产生一定的热量, 而当卫星失效时, 内部设备将不再散热, 因此卫星温度变化将不同, 从而影响到卫星的红外辐射特征。对卫星的红外辐射特征进行研究, 可以为失效卫星的判别提供依据。

收稿日期: 2004-02-03; 修订日期: 2004-05-05

作者简介: 韩玉阁(1967-), 男, 山东聊城人, 主要从事目标与背景红外特性方面的研究。

1 辐射外热流的计算

1.1 太阳辐射外热流

从近地轨道至地球静止轨道的高度上,太阳光被认为是均匀的平行光束,其辐射强度为一个太阳常数 S 。卫星外表面任一微元面 dA 上,当 dA 不绕卫星主轴旋转时,其太阳辐射角系数为 $\phi_1^{[1]}$:

$$\phi_1 = \sin \theta \cos \psi_s + \cos \theta \sin \psi_s \cos \xi_R \quad (1)$$

式中 θ, ξ_R 分别为卫星微元面 dA 的赤纬、赤经, ξ_R 由太阳在卫星赤道面上的投影算起; ψ_s 为卫星主轴与太阳光的夹角,如图 1 所示。

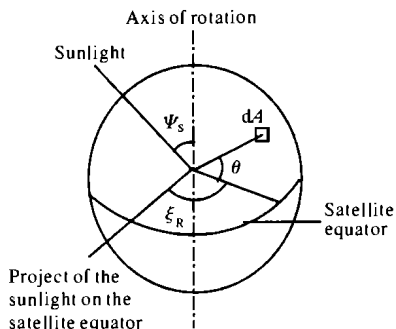


图 1 太阳辐射角系数

Fig.1 View factor of the sun direct radiation

1.2 地球红外辐射和地球反照

利用随机模拟法直接从地球反照和红外辐射的定义出发,根据几个球面的三角关系,计算空间任意位置关系的典型表面的地球反照和红外辐射的角系数^[2]。

随机模拟法的基本思路是:首先,在卫星可以看到的地球表面上任取一面积元,该面积元的位置与一定的概率分布函数有关,即与一定的随机数有关,其面积等于空间飞行器可以看到的地球球冠面积除以所取的总的面积元数。其次,利用球面的三角关系求出地球反照和红外辐射角系数定义式中的几个角度量,进而求出该面积元对空间飞行器表面上的任一微元面积的地球反照和红外辐射角系数,随机选取大量的面积元,分别进行上述计算并累加,相当于在空间飞行器可以看到的地球球冠面上进行了面积分,从而得到了地球反照和红外辐射角系数的数值结果。

2 卫星太阳能电池阵的热模型

卫星的温度控制方程采用三维导热微分方程:

$$\rho c_p \frac{\partial T}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x} \left(k_x \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k_y \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k_z \frac{\partial T}{\partial z} \right) \quad (2)$$

式中 ρc_p 为材料的热容量; k 为材料的导热系数。

卫星外表面接收太阳辐射、地球反照辐射和地球红外辐射^[1,3,4],边界条件为:

$$k_n \frac{\partial T}{\partial n} = \alpha_s S \phi_1 (1 - \eta) + \alpha_e E_r \phi_2 (1 - \eta) + \varepsilon_e E_e \phi_3 - \varepsilon_e \sigma T^4 \quad (3)$$

式中 α_s 为星体蒙皮外表面的太阳吸收率; S 为太阳常数; E_r 为地球表面反射太阳辐射的平均辐射密度; E_e 为地球表面的平均红外辐射密度; η 为太阳能电池的光电转换效率,当卫星的表面不是太阳能电池表面时, $\eta=0$; ε_e 为表面材料的发射率; ϕ_1, ϕ_2, ϕ_3 分别为太阳辐射角系数、地球反照角系数和地球红外辐射角系数。

卫星内部表面的辐射换热边界条件为:

$$k_n \frac{\partial T}{\partial n} = \sum_{j=1}^N B_j A_j \varepsilon_j \sigma T_j^4 - \varepsilon \sigma T^4 \quad (4)$$

式中 B_j 为表面 j 辐射的能量被吸收的份额。

3 辐射边界条件的处理

采用求解辐射传递系数的蒙特卡罗-区域法来计算表面间的辐射换热^[5]。由 N 面组成的封闭系统中,面 j 所吸收的所有各面 $i (i=1 \sim N)$ 辐射能的能量 Q_j 可表示为:

$$Q_j = \sum_{i=1}^N R_{ij} A_i \varepsilon_i \sigma T_i^4 \quad i \neq j \quad (5)$$

式中 R_{ij} 为辐射传递系数。

由于辐射换热项的存在,在对能量方程进行离散时,得到的是非线性方程组,而非线性方程组的求解非常困难,为避免出现该方程组,将辐射项看成单元体附加源项^[6],这样方程组就不会出现非线性项,从

而将非线性问题转换为线性问题。但在温度的迭代求解中,源项为温度的函数,在数值计算中将源项中的温度作为常数处理,温度取值为上一次迭代的结果,也可采用源项线性化方法进行处理^[6]。

4 卫星红外辐射特性的计算

卫星红外热特征是卫星在红外波段范围内的辐射通量。对于卫星上任一单元表面,该辐射通量包括本身辐射和反射辐射两部分。

4.1 本身辐射

在获得卫星温度分布后,卫星表面红外辐射通量可以直接从普朗克公式出发,通过对其在红外波段范围积分得到:

$$E_{\lambda_1-\lambda_2}^* = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \varepsilon(\lambda, T) \frac{C_1}{\lambda^5 [\exp(C_2/\lambda T) - 1]} d\lambda \quad (6)$$

式中 λ_1 、 λ_2 分别为给定红外波段的下、上限; T 为单元表面温度; $\varepsilon(\lambda, T)$ 为与波长 λ 和温度 T 有关的表面材料发射率; $C_1 = 3.742 \times 10^8 \text{ W}\mu\text{m}^4/\text{m}^2$, 为第一辐射常数; $C_2 = 1.439 \times 10^4 \mu\text{mK}$, 为第二辐射常数。

4.2 反射辐射

卫星表面对于投入辐射的反射部分包括对来自太阳和太空背景辐射的反射辐射。卫星表面反射辐射的计算表达式为:

$$E_{sf}^{infra} = \rho^{infra} (q_{sun}^{infra} + q_{sky}^{infra}) \quad (7)$$

式中 ρ^{infra} 为单元表面红外波段范围的反射率; q_{sun}^{infra} 为单元表面接收的红外波段范围内的太阳辐射能量; q_{sky}^{infra} 为单元表面接收的红外波段范围内的太空背景辐射能量。

4.3 辐射通量

卫星表面某一单元的辐射通量为本身辐射与反射辐射之和,即:

$$E_{\lambda_1-\lambda_2} = E_{\lambda_1-\lambda_2}^* + E_{sf}^{infra} \quad (8)$$

结合公式(6)、公式(7)及卫星温度分布,并根据公式(8),即可确定卫星表面的红外辐射特征及其分布。

5 计算结果

该卫星轨道为地球同步卫星轨道,太阳能电池板始终面向太阳,卫星本体的背面为散热面,其他表面包覆有保温材料,分为有内热源(工作卫星)和无内热源(失效卫星)两种情况进行计算。图 2、图 3 为计算结果示意图。两图中(a)对应日照区卫星的正面,(b)对应日照区卫星的背面,(c)对应地球阴影区卫星的正面,(d)对应地球阴影区卫星的背面。

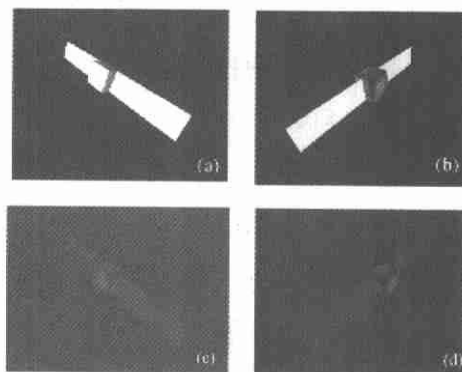


图 2 无内热源卫星的红外图像

Fig.2 Infrared images of the satellite without inner heat source

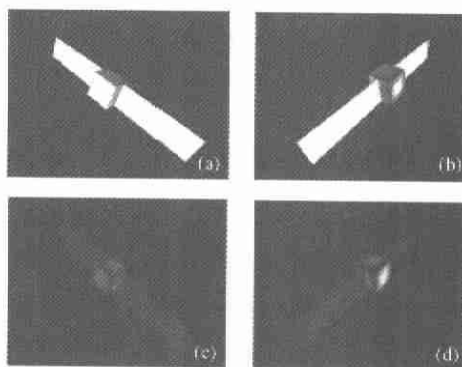


图 3 有内热源卫星的红外图像

Fig.3 Infrared images of the satellite with inner heat source

从图 2、图 3 的对比可以看出,无论是日照区还是地球阴影区,无论是正面还是背面,对于工作卫星和失效卫星两种情况,太阳能电池板的红外辐射特征几乎没有变化,这是因为太阳能电池板远离卫星本体,卫星内部仪器的散热不会对其产生影响。因此太阳能电池板的红外特征不能作为工作卫星和失效卫星判别的依据。但是无论是工作卫星还是失效卫星,无论是太阳能电池板的正面还是背面,太阳能电池板

在日照区都具有很强的辐射强度。

从图2和图3的对比还可以看出,在日照区,工作卫星和失效卫星本体正面的红外图像没有明显差别,这是因为卫星正面的本体上包覆有保温材料,内部热源对其外表面的温度几乎没有影响,因此其红外图像也几乎一致。而卫星本体的背面,工作卫星的红外辐射明显强于失效卫星,这是由于卫星背面为其散热面,在工作时,卫星内的热量通过此表面散发,因此表面温度较高,具有较强的红外辐射,而失效卫星内部设备停止工作,没有热量散发,因此温度较低,红外辐射较弱。当卫星处于地球阴影区时,工作卫星与失效卫星的差别与日照区相似。因此卫星是否失效可以从其散热面的红外辐射强度来判断。

另外无论是工作卫星还是失效卫星,其日照区的红外辐射强度都明显大于地球阴影区的红外辐射强度,尤其对于失效卫星,在地球阴影区时,其辐射强度与背景的差别很小,难于分辨。对于工作卫星,只有其散热面的辐射强度明显高于背景,其他部分与背景几乎没有差别。

6 结束语

通过以上分析,可以得到以下结论:

(1)无论是日照区还是地球阴影区,对于工作卫星和失效卫星两种情况,太阳能电池板的红外辐射特征几乎没有差别,因此其红外特征不能作为工作卫星和失效卫星判别的依据。

(2)无论是日照区还是地球阴影区,工作卫星散热面的红外辐射明显强于失效卫星,因此卫星是否失效可以从其散热面的红外辐射强度来判断。

(3)无论是工作卫星还是失效卫星,其日照区的红外辐射强度都明显大于地球阴影区的红外辐射强度。

参考文献:

- [1] 闵桂荣. 卫星热控制技术[M]. 北京:宇航出版社,1991.
- [2] 赵立新. 轨道空间外热流计算的一种新方法[J]. 光学精密工程, 1995,3(6):80-85.
- [3] Marcia B H, Edson B, Paulo C. Design of solar absorber plates: its application to CPL microgravity experiments[R]. AIAA-98-2453.
- [4] 冯刚,安翔,张铎. 空间站大面积太阳翼热分析[J]. 强度与环境, 2001,28(1):54-61.
- [5] 郝金波,阮立明,谈和平. 贴体坐标系下复杂形体介质内辐射传递研究[J]. 哈尔滨工业大学学报,2003,35(8):930-934.
- [6] 陶文铨. 数值传热学[M]. 西安:西安交通大学出版社,1988.

《红外与激光工程》中文摘要编写要求

本刊中文摘要按 GB6447-86《摘要编写规则》编写,编写摘要应注意:

1. 摘要应包含目的、方法、结果和结论四要素。目的是指主题范围;方法是指所用的原理、工艺、材料、手段、装备等;结果是指对实验研究的分析、评价、建议等。篇幅为200~300字。
2. 结构严谨,表达简明,语义确切。一般不分段落。
3. 摘要一律用第三人称,应采用“介绍了…”,“对…进行了研究”,不必使用“本文”“作者”等作为主语。
4. 摘要应具有独立性、自含性,不标注图、表、公式和参考文献的序号。
5. 要采用规范化的名词术语,第一次出现非公知的术语时应标注说明。
6. 缩略语、略称、代号除读者能清楚的以外,首次出现时必须加以说明。
7. 应采用国家颁布的法定计量单位。
8. 要注意正确使用简化字和标点符号。
9. 中摘要要前加“摘要”作为标识。