

文章编号 1004-924X(1999)06-0030-06

空间光学遥感器轨道外热流的计算与软件设计

王建设

(中国科学院长春光学精密机械研究所 长春 130022)

摘要 简述了采用离散平面假设,计算空间光学遥感器的太阳辐射、地球红外辐射及地球阳光反照角系数和轨道外热流的方法。结合空间工程的结构、轨道参数和工况要求,设计开发了其实用计算软件以及与PATRAN软件进行数据传递的接口软件。该方法和软件已在实际工程的热分析计算中得到应用,适用于空间飞行器轨道外热流的计算。

关键词 空间光学遥感器 角系数 轨道外热流 软件设计

中图分类号 TP752.2, TP391.72 **文献标识码** A

1 引言

轨道外热流的计算是空间飞行器热分析和热设计的重要部分。在轨道运行中的飞行器受到来自其它天体的辐射加热、高空大气的摩擦加热、微流星的碰撞加热和电磁的热效应等因素的加热量极小,故其接收的外部热流主要是:太阳的直接辐射热、地球的红外辐射热和地球对太阳辐射的反射热。飞行器的外表面各部分接受辐射热量的不均匀性和随时间的变化,将造成其表面温度分布的不均匀和波动。对于研制高质量的空间光学遥感器,计算和预测其表面温度分布,采用对应的热控措施,更加显得其意义重大。尤其是那些暴露于空间环境的光学系统,受外部热流的作用,将对其分辨力产生直接的影响。因而,合理计算太阳、地球辐射的角系数和轨道外热流是空间光学遥感器热设计的前提。

以飞行器的外表面为研究对象,对于空间相机,即光学窗口、外遮光罩、太阳帆板及其相关结构部分,将其结构和形状各异的表面划分成若干微小区域,把每一区域视为一平板,逐一加以分析计算。对于每一平板的外表面,建立相对于飞行器本体坐标系的外法线矢。运用球面三角关系、坐标变换、平板法线矢与太阳和地球间的几何关系,建立轨道参数下的数学模型,编制成轨道外热流的计算软件。该软件与PATRAN软件的热分析模块通过接口软件建立了便利的数据传递和转换,形成了工程实用软件系统。

2 基本假设与轨道参数

2.1 基本假设

- (1) 可以认为太阳光为平行光, 太阳辐射强度是均匀的, 即太阳常数为 S ;
- (2) 假设地球是一个均匀的热辐射平衡体, 且其表面的红外辐射强度相同。

2.2 飞行器本体坐标系

根据相机系统的结构特点及其在飞行器中的位置, 确定其待计算的表面结构, 一般是外露表面。在飞行器上建立球面坐标系, OZ 轴为飞行器的主轴, 并指向其飞行方向。与 OZ 轴垂直的平面为飞行器的赤道平面。球面坐标系的赤纬 θ 由赤道平面算起, 朝主轴方向为正。 OX 轴为飞行器与地球连线在赤道平面上的投影线, 并为球面坐标系赤经 ζ 的起算线, ζ 的正方向与 OZ 轴符合右旋法则。

2.3 轨道参数

飞行器表面结构的角系数和外热流与轨道的方位、形状、大小及其在轨道上的位置密切相关。轨道参数及与方位有关的参数主要有: 轨道倾角、近地点距离、远地点距离、运行周期、轨道偏心率、近地点幅角、升交点赤经、太阳黄经等等。

3 表面结构的离散及微元法矢量的确定

(1) 表面结构的离散

根据飞行器表面结构的形状、材料、作用等特点, 将欲计算 n 研究的对象划分为若干个具有同一性质的子区域。在每一子区域内, 将其表面离散为若干个平板单元。这些单元的形状可以是三角形、四边形。三角形单元由三个结点组成, 四边形单元由四个结点组成。单元上各个结点的排列顺序依照外法线的右手规则, 如图 1 所示。角系数和外热流的计算精度与离散的单元的总数目 N 有关。 N 越大, 则计算精度越高。但是 N 又受到有限元热计算模型的限制。

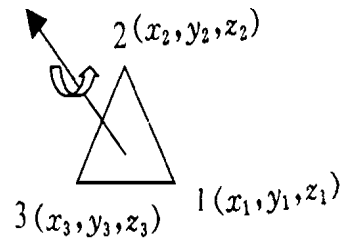


Fig. 1 The normal vector of discrete surfaces

(2) 微元法矢量的确定

取某一微元的面积元素为 dA , 设微元 dA 的方向余弦为 l, m, n , 坐标轴 x, y, z 的单位向量为 i, j, k 则微元表面的外法线矢量为 n , 则有

$$n = li + mj + nk \quad (1)$$

由外法线矢量 n , 可计算微元 dA 的球面坐标 (ζ, θ)。

4 轨道外热流的计算^[1]

4.1 太阳辐射角系数的计算

如图 2 所示, 飞行器外表面任一微元面积 dA 上接收的太阳辐射热流为

$$dQ_1 = S \cos \beta_s dA \quad (2)$$

微元 dA 单位面积接收的太阳辐射热量 q_1 为

$$q_1 = \frac{dQ_1}{dA} = S \cos \beta_s \quad (3)$$

式中: β_s —— 太阳光线与面元法矢的夹角。

定义投射到飞行器外表面微元 dA 上的太阳直接辐射被它吸收的份额, 即为微元 dA 的太阳直接辐射角系数, 记作 Φ , 则

$$\Phi = \frac{q_1}{S} = \cos \beta_s \quad (4)$$

根据轨道参数, 计算飞行器轨道面与太阳光的夹角 i_{\odot} ; 计算太阳光与飞行器—地球连线的夹角 Φ ; 由微元 dA 法线矢球面坐标 (ζ , θ) 和飞行器主轴与飞行器—地球连线的夹角 Ψ , 求得微元 dA 法线矢与飞行器—地球连线的夹角 β , 以及参数 ξ_c^* 等等。经过这些由坐标变换、球面三角公式关于飞行器微元 dA 、地球、太阳之间的空间几何和有关矢量关系的一系列的计算, 最终计算出微元 dA 法线矢与太阳光的夹角 β_s , 则

$$\cos \beta_s = \sin \beta_s \sin \Phi \cos \xi_c^* - \cos \beta \cos \Phi \quad (5)$$

当 $\cos \beta_s < 0$ 时, 太阳光照不到微元 dA 的外法面, 故

$$\Phi = 0 \quad (6)$$

4.2 太阳辐射外热流的计算

任一微元的太阳辐射外热流 q_1 为

$$q_1 = \alpha \cdot S \cdot \Phi \cdot dA \quad (7)$$

式中: α —— 面元表面的太阳吸收率。

4.3 地球红外辐射角系数的计算

地球红外辐射角系数 \mathcal{Q} 的计算如下:

$$\text{当 } 0 \leq \beta \leq \arccos k, \quad \mathcal{Q} = k^2 \cos \beta \quad (8)$$

当 $\arccos k < \beta < (\pi - \arccos k)$,

$$\mathcal{Q} = k^2 \cos \beta + \frac{1}{2} \left\{ \frac{\pi}{2} - (1 - k^2)^{\frac{1}{2}} (k^2 - \cos^2 \beta)^{\frac{1}{2}} - \arcsin \left[\frac{(1 - k^2)^{\frac{1}{2}}}{\sin \beta} \right] - k^2 \cos \beta \arccos \left[\frac{(1 - k^2)^{\frac{1}{2}}}{k \tan \beta} \right] \right\} \quad (9)$$

$$\text{当 } (\pi - \arccos k) \leq \beta \leq \pi, \quad \mathcal{Q} = 0 \quad (10)$$

$$\text{式中: } k = \frac{R_E}{(R_E + h)}$$

4.4 地球红外辐射外热流的计算

任一微元的地球红外辐射外热流 q_2 为

$$q_2 = \epsilon \cdot E_e \cdot \mathcal{Q} \cdot dA \quad (11)$$

式中: E_e —— 地球表面的平均红外辐射密度;

ϵ —— 面元表面的发射率。

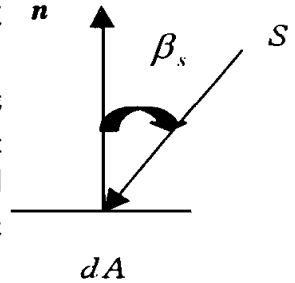


Fig. 2 The external thermal flux from the radiation of the sun

4.5 地球阳光反照角系数的计算

地球阳光反照角系数 \mathcal{Q} 的近似算法为

$$\mathcal{Q} = \mathcal{Q} \cos \Phi \quad (12)$$

4.6 地球阳光反照外热流的计算

任一面元的地球阳光反照外热流 q_3 为

$$q_3 = \alpha \cdot E_r \cdot \mathcal{Q} \cdot dA \quad (13)$$

式中: E_r —— 地球表面对太阳辐射的平均反射密度。

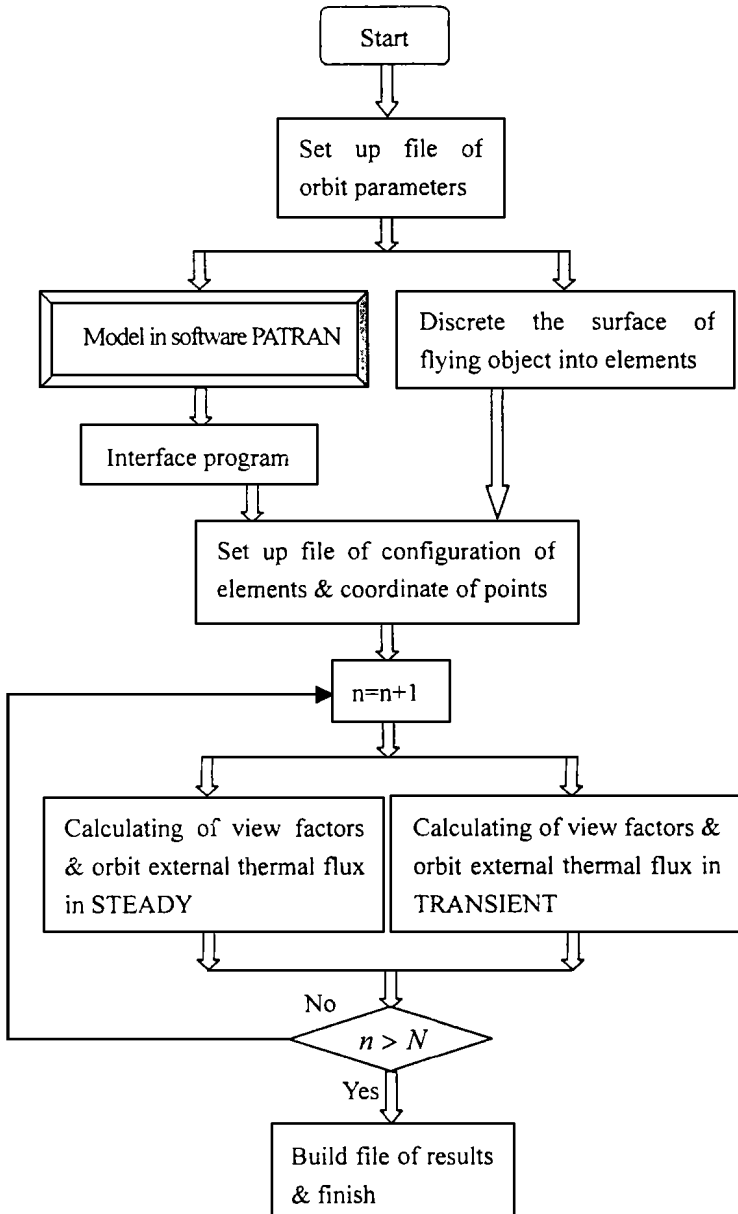


Fig.3 Program scheme of view factors & orbit external thermal flux

5 软件设计

该软件由角系数与外热流的计算程序、数据接口程序和空间几何关系判定程序等模块组成,并且可与软件 PATRAN 的计算模型进行数据传递。

5.1 角系数与外热流的计算程序

角系数与外热流计算程序的框图见图 3。

5.2 数据接口程序

计算角系数与外热流旨在为热分析提供必需的数据。热分析有限元计算模型的外表面单元的面形状和尺寸应与外热流计算模型的面元的几何形状和尺寸保持一一对应的关系。考虑到软件 PATRAN 具有强大的前后处理功能,是进行热分析的一种有力工具,为了便于在软件 PATRAN 的有限元模型与角系数和外热流程序之间传递数据、提高

速度,故编制了数据接口程序。将由软件 PATRAN 生成的有限元模型外表面上对应单元的面作为角系数和外热流的面元。按照图 1 所示的规则,提取面元的结构、几何结点的坐标和材料等数据。然后,由数据接口程序生成角系数和外热流程序所需的数据。

5.3 空间几何关系判定程序

为了考察太阳光线与面元的外法线矢之间的几何关系以及相关的空间几何关系,对于指定的面元,由空间几何关系判定程序可获取这些数据,用于对各项外热流数据的处理。

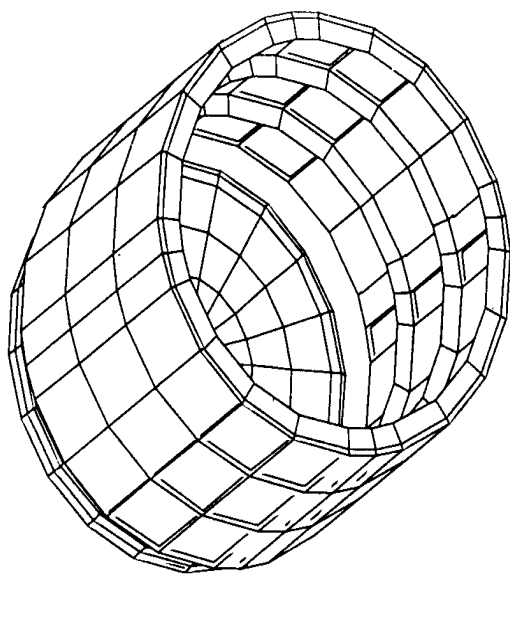


Fig. 4 Model of the discrete configuration of a space optical system

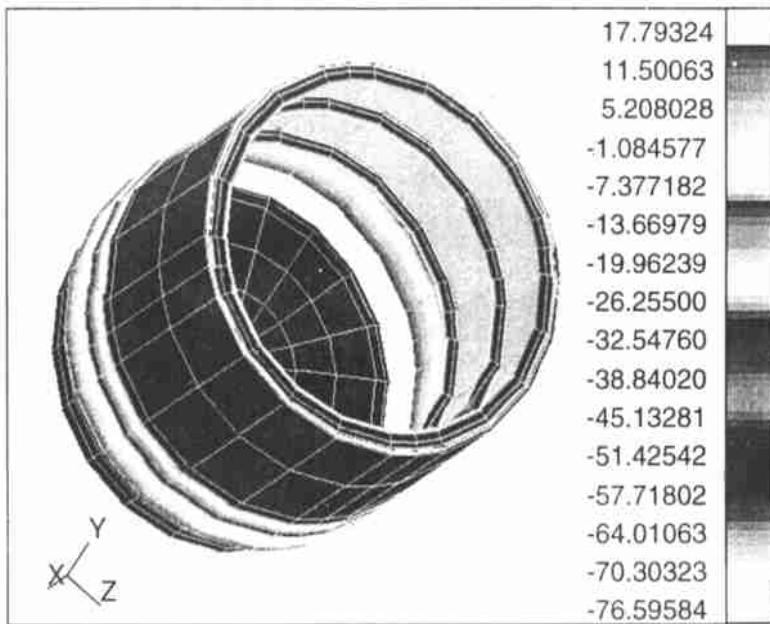


Fig. 5 Temperature distribution of a space optical system subjected to external thermal flux

6 应用实例

图 4 所示为一空间外露光学系统表面结构的离散面元模型图。应用上述方法和软件, 通过分析计算, 得到了其在不同条件和工况下的角系数和外热流的数据。该数据已应用于实际工程的热分析和热设计。图 5 所示为该光学系统在轨道运行中对应一定工况条件受外热流作用下的温度分布结果。

参 考 文 献

- 1 闵桂荣主编. 卫星热控制技术. 北京: 宇航出版社, 1991

Calculation and Software Design of the Orbit External Thermal Flux of a Space Optical Remote Sense

WANG Jian-She

(*Changchun Institute of Optics and Fine Mechanics,
Chinese Academy of Sciences, Changchun 130022*)

Abstract

An approach to the calculation the view factors and orbit external thermal fluxes of the sun radiation, the earth radiation and its reflection on a space optical remote sense are described on the assumption of discrete plane, and the corresponding computer program and interface program with software PATRAN are developed. The software has found application in the thermal engineering analysis of a space optical window system. Moreover, basically, it is also suitable for other space projects.

Key Words: Space optical remote sense, View factor, Orbit external thermal flux, Software design

王建设 男, 博士, 中国科学院长春光学精密机械研究所副研究员。主要从事数值模拟与计算机仿真技术, 精密机械, 动压润滑, CAD/CAE, 空间工程热分析热设计等研究工作。已发表论文 30 余篇。