

太阳同步圆形轨道空间相机 太阳辐射外热流的计算

邓桂俊 武克用

(中国科学院长春光学精密机械研究所 长春 130022)

摘要 从热设计的角度出发, 针对太阳圆形同步轨道的特征, 分析了太阳同步轨道的热特点, 给出了计算运行于太阳同步圆形轨道的空间相机太阳辐射外热流的一般公式和方法, 为空间相机的热计算和热设计提供基本数据。

关键词 太阳同步圆形轨道 空间相机 太阳辐射外热流

1 引言

随着我国航天技术的发展, 形成了采用近地太阳同步轨道对地照像侦察卫星系列, 如“尖兵”和“风云”系列。我国也正在研制搭载于这些卫星的高分辨率的空间相机。运行于近地轨道的空间相机除受高真空和空间热沉影响外, 还要接受地球和太阳对它的辐射热^[1], 主要有三部分: 太阳辐射外热流、地球红外辐射外热流和地球反照外热流, 其中太阳辐射外热流是相机表面接受外热流的最主要部分, 对相机各部分的温度影响最大, 直接决定了相机的平衡温度水平。因而, 计算太阳辐射外热流是搞好热设计工作以保证相机正常工作的首要一步。

要正确计算相机所受到的太阳辐射外热流, 必须知道相机、地球和太阳之间的几何关系。本文针对太阳同步圆形轨道, 从其轨道参数计算开始, 以球面三角和坐标变换为手段, 把复杂的空间几何关系简化为可通用的一般公式, 依此可计算任意轨道位置处空间相机所受的太阳辐射外热流。

2 太阳同步圆形轨道参数计算

2.1 轨道热特性分析

所谓太阳同步轨道就是轨道的升交点赤经 Ω (如图1) 的变化率等于地球公转的平均角速

度(0.9856度/天),即轨道升交点的进动与太阳的东行同步($\Omega - \alpha$ 保持常数)。因此卫星经过地面某一特定位置的太阳光照条件相同,有利于相机侦察地面并判读得到的地面图像。

太阳同步轨道倾角*i*总是大于90°;对于圆形轨道,轨道倾角*i*与轨道高度*h*的关系如图2所示。

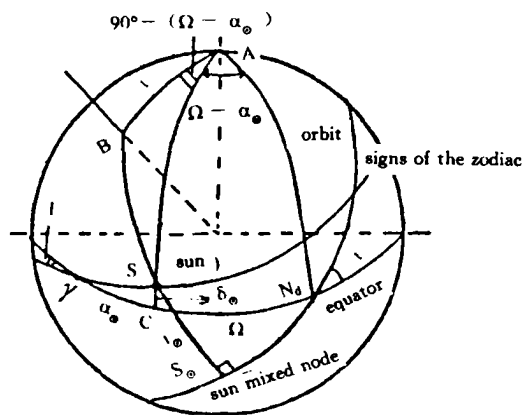


Fig. 1 Coordinate of celestial body

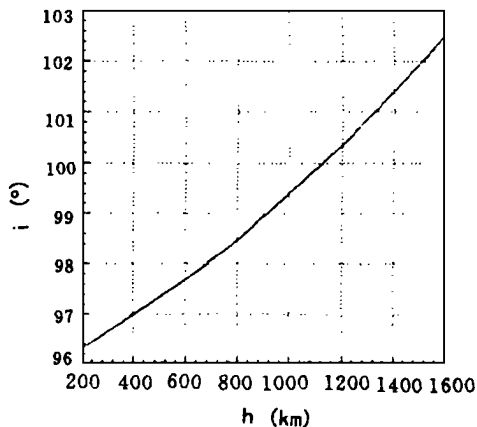


Fig. 2 Sun-synchronous orbit inclination versus orbit altitude

应该强调的是^[2-3],太阳同步轨道意味着太阳与轨道平面有相对固定的几何关系。通过随后的太阳光与轨道平面夹角(*i*)计算,可以得出太阳光与轨道平面夹角(*i*)在一年中有季节性的变化,一天中几乎不变。但这并不意味着在轨运行的航天器所受的太阳辐射热流不变,相反航天器各面太阳辐射热流变化很大。如果把三轴稳定的航天器分为6个面,即朝阳面、背阳面、对天面、对地面、朝前面(飞行方向)和朝后面,各面将有不同的热特点。朝阳面在轨运行一天中(地球阴影区除外)将受到基本衡定的太阳外热流,与之相对的背阳面始终受不到太阳光照,对天面、朝前面(飞行方向)和朝后面随航天器在轨道中位置不同所接受的太阳外热流也随之变化,对地面仅在日落和日出时才能接受到太阳辐照。从上面分析可知,航天器的朝阳面和背面有较为稳定的外热流,温度波动不大,宜作为空间相机的搭载面,以减小实施相机热控措施的负担和代价。

2.2 轨道参数计算^[4-5]

要计算在太阳同步圆形轨道上运行的相机所受的太阳辐射外热流,必须确定相机、地球和太阳之间的几何关系,为此需要以下轨道参数:

- 1) 轨道半径 $R: R = R_e + h$ h 为轨道高度;
- 2) 轨道倾角 i : 轨道平面与赤道平面的交角(如图1);
- 3) 升交点赤 Ω 升交点 N_d 离春分点 γ 的经度;
- 4) 升交点(降交点)时刻: 航天器飞经升交点的时刻。对于太阳同步轨道,知道升交点(降交点)时刻就可知道($\Omega - \alpha$)的值;

5) 轨道周期:

$$\tau_0 = \frac{2\pi R^3}{\sqrt{K}} \quad (1)$$

式中 K 为地球万有引力常数 ($398600\text{km}^3/\text{s}^2$);

6) 轨道与太阳、地球相对位置有关的参数

(1) 太阳黄经:

$$\Psi = \Psi_0 + N \tau_0 \bar{\Psi} \quad (2)$$

式中 Ψ_0 ——发射日期的太阳黄经初始值, 可由“天文年历”“太阳”一栏中查出;

N ——航天器运行的第 N 圈;

τ_0 ——航天器的运行周期, 以天计;

$\bar{\Psi}$ ——太阳黄经的平均变化率, $\bar{\Psi} = 0.9856$ 度/天;

(2) 太阳光轨道面的夹角 i (见图1)

在球面三角形 ABS 中, 由球面三角知识得:

$$\cos(90 - i) = \cos i \cdot \cos(90 - \delta) + \sin i \cdot \sin(90 - \delta) \cdot \sin i \cdot \sin[90 - (\Omega - \alpha)] \quad (3)$$

在球面三角形 ASC 中

$$\sin \delta = \sin I \cdot \sin \Psi \quad (4)$$

将(4)式代入(3)式得:

$$\sin i = \cos i \cdot \sin I \cdot \sin \Psi + \sin i \cdot \sin(\Omega - \alpha) \cdot \sqrt{1 - \sin^2 I \cdot \sin^2 \Psi} \quad (5)$$

式中 I 为黄赤交角。

对于太阳同步轨道, $\Omega - \alpha$ 为常数, 大小由升交点(降交点)时刻决定, 因此, 从(5)式可看出, 当轨道倾角和升交点(降交点)时刻确定后, 太阳光与轨道面的夹角 i 的大小仅是 Ψ 的函数。依据(5)式可计算出一年中任何一天或航天器运行任何一圈太阳光轨道面的夹角 i 。

(3) 进出地影角 V_1, V_2

进出地影角为轨道进出地影时刻与会日点的地心角距(见图4)。

作如下假设: 1) 地球是一圆球体, 平均半径为 6370km ;

2) 地影是个圆柱, 它的半径与地球半径相等, 并无半影区;

3) 地球中心是太阳同步圆形轨道的中心。

这些假设对轨道高度在 200km 至 400km 航天器的热设计是足够精确的^[4]。

图3为地球阴影圆柱体与太阳同步轨道平面相贯的情形, 相贯线为一椭圆, 称为地影椭圆(见图4)。

在如图3、4所示的坐标系中地影椭圆方程为:

$$x^2 + y^2 \cdot \sin^2 i = R_{\text{地}}^2 \quad (6)$$

太阳同步圆形轨道方程为:

$$x^2 + y^2 = R^2 \quad (7)$$

联解式(6)、(7)可求出进出地影角 V_1, V_2 。

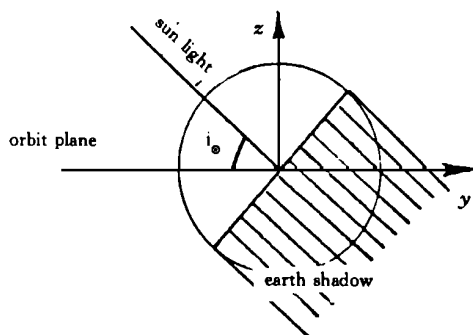


Fig 3 Shadow of earth

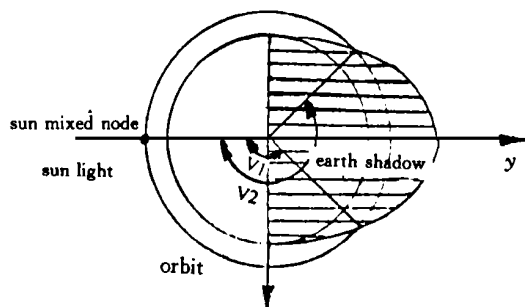


Fig 4 Eclipse shadow of earth

知道了以上轨道参数,明确了相机、太阳和地球的相对几何关系,可以进行太阳辐射外热流计算。

3 太阳辐射外热流的计算

1 太阳辐射外热流和太阳辐射角系数的定义

从近地轨道到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 ($1353\text{W}/\text{m}^2$)。

空间相机外表面任一微元面积 dA 上(见图5)所受的太阳辐射外热流为:

$$dq = \alpha \cdot S \cdot \cos\beta \cdot dA$$

式中 α 为太阳吸收率,其与物体的表面性质有关。

令

$$F = \frac{dq}{S \cdot dA \cdot \alpha}$$

则

$$F = \cos\beta \quad (9)$$

我们称 F 为太阳辐射角系数。太阳辐射角系统与物体的性质无关,仅取决于太阳与于物体表面的几何位置关系,即逆太阳光方向的单位矢量与为微元面的单位外法向矢量夹角的余弦。

2 太阳辐射角系数的计算

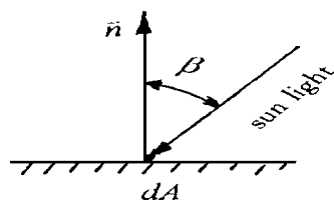


Fig 5 Thermal flow of sun radiation

为进一步明确相机、地球、太阳之间的几何位置关系,把图1的天球坐标系变换为图6的直角坐标系。 X 指向会日点, Z 垂直于太阳同步圆形轨道面, Y 按右手定则。 xyz 为相机本体坐标系, x 背离地心, y 指向飞行方向, z 平行于 Z 轴, θ 为相机到会日点的地心角距。

XYZ 坐标系与 xyz 的变换矩阵为:

$$I = \begin{Bmatrix} \cos\theta & -\sin\theta & 0 \\ \sin\theta & \cos\theta & 1 \\ 0 & 0 & 1 \end{Bmatrix}$$

逆太阳光方向的单位矢量为:

$$S = \cos i \cdot i + \sin i \cdot k \quad (10)$$

在相机本体坐标系中,根据相机的结构形状,将相机的外表面化分为 n 个近似平面的微元,确定各个面元在相机本体坐标系中的外法向矢量的方向余弦 $n_i = (\cos\alpha_i, \cos\beta_i, \cos\gamma_i)$, 和面积 $dA_i (i = 1, 2, \dots, n)$ 。则各面元的太阳辐射角系数为:

$$\begin{aligned} F_i &= I \cdot n_i \cdot S \\ &= \begin{pmatrix} \cos\theta & -\sin\theta & 0 \\ \sin\theta & \cos\theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \cos\alpha_i \\ \cos\beta_i \\ \cos\gamma_i \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \cos i \\ 0 \\ \sin i \end{pmatrix} \\ &= \cos\alpha_i \cdot \cos\theta \cdot \cos i - \cos\beta_i \cdot \sin\theta \cdot \cos i + \cos\gamma_i \cdot \sin\theta \end{aligned} \quad (11)$$

太阳辐射周期平均角系数:

$$\begin{aligned} \bar{F}_i &= \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} F_i \cdot d\theta \\ &= \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} (\cos\alpha_i \cdot \cos\theta \cdot \cos i - \cos\beta_i \cdot \sin\theta \cdot \cos i + \cos\gamma_i \cdot \sin\theta) \cdot d\theta \end{aligned} \quad (12)$$

考虑以下情况,从(11)和(12)式可算出相机在轨道任意位置 θ 处各面元的太阳辐射角系数以及各面元的太阳辐射周期平均角系数:

- (1) 地影内 ($V_1 < \theta < V_2$), $F_i = 0 (i = 1, 2, \dots, n)$;
- (2) $F_i < 0$ 表明太阳光照不到微元的正面,取 $F_i = 0$;
- (3) 由于航天器遮挡,太阳光照不到相机表面的面元 $F_i = 0$ 。

3 太阳辐射外热流的计算

由(8)、(11)、(12)式可得任一面元的太阳辐射外热流 dq_i 和太阳辐射周期平均外热流 \bar{dq}_i

$$dq_i = \alpha_i \cdot S \cdot F_i \cdot dA_i \quad (13)$$

$$\bar{dq}_i = \alpha_i \cdot S \cdot \bar{F}_i \cdot dA_i \quad (14)$$

4 小 结

本文借助球面三角和坐标变换把太阳同步圆形轨道中相机、地球和太阳之间的几何位置

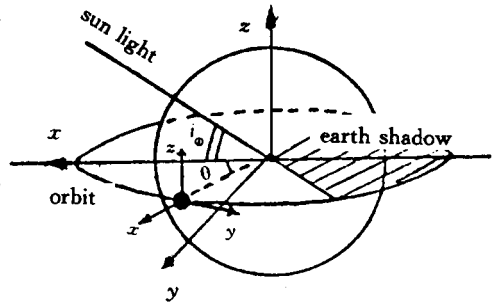


Fig 6 Position of orbit

关系, 推导成一般公式。利用本文中的公式, 可计算出一年中任意一天太阳光与太阳同步圆形轨道面的夹角和每运行一圈的进出地影角; 在合理划分相机表面面元的基础上, 把本文中的公式程序化, 可计算空间相机表面各部分在轨道任意位置处所接收的太阳辐射外热流, 以及太阳辐射周期平均外热流, 为空间相机的热分析计算和热工程设计提供可靠的数据。

参 考 文 献

- 1 闵桂荣等. 卫星热控制技术. 北京: 宇航出版社, 1991
- 2 Killough Brian D. Thermal and orbital analysis of earth monitoring sun-synchronous space experiments. NASA Technical memorandum 101630
- 3 过九熔. 通信卫星的热控制技术. 中国空间科学技术, 1990, (2): 45~ 51
- 4 杨贤荣等. 辐射换热角系数手册. 北京: 国防工业出版社, 1969
- 5 范剑峰. 太阳光对卫星投射角的计算. 中国空间科学技术, 1978, (5): 101~ 104

Calculation on Space External Thermal Flow of Sun for Space Camera in Sun Synchronous Round Orbit

DENG GuiJun, WU Ke-Yong

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

Abstract

This paper describes the thermal characteristics of sun synchronous orbit based on analysed feature of sun synchronous round orbit from the view of thermal design. The general formula and method for computing external thermal flow of sun which act on space camera in sun synchronous round orbit are also given for offering basic data to thermal calculation and design of space camera.

Key words: Sun synchronous round orbit, Space camera, External thermal flow of sun

邓桂俊 男, 1969年生, 1995年取得长春光机学院工学硕士学位, 现长春光机所在职博士。主要从事光学仪器及热控方面的工作。