

可展桁架天线在轨运行中温度场分析^{*}

张惠峰¹ 关富玲¹ 侯国勇²

¹(浙江大学土木系空间结构研究中心 杭州 310027)

²(浙江省城乡规划设计研究院)

摘要 利用热传导辐射理论, 并引入天线所处的轨道条件, 可计算可展桁架抛物面天线在轨运行时不同时刻的温度场。利用 Fortran 语言, 编制了基于上述理论的有限元程序, 可计算各种轨道条件下不同时刻天线的温度场。还可用于指导天线的热变形分析和热控制设计。

关键词 可展桁架天线; 温度场; 轨道

中图法分类号 V 44

Thermal Analysis of Deployable Truss Antenna in Orbit

ZHANG Hufeng¹ GUAN Fuling¹ HOU Guoyong²

¹(Space Structure Research Center, Department of Civil Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027)

²(Zhejiang Urban and Rural Planning Design Institute)

Abstract Using conduction-radiation theory, considering the orbit of the antenna, temperature fields of a deployable truss parabolic antenna in orbit can be calculated at different local time. Using Visual Fortran, a finite element program based on the theory above is built, and temperature fields of antennas in different orbits can be calculated at different local time. The result is useful to thermal displacement analysis and thermal control design.

Key words Deployable truss antenna, Temperature field, Orbit

1 引言

大型可展桁架式抛物面天线是空间可展机构研究中最为活跃和待深入研究的领域。由于这种结构的敏感性和热稳定性要求较高, 故对其在正常工作时的温度场有很高的要求。本文利用热传导辐射理论, 并引入天线轨道条件及姿态, 计算了可展桁架天线在轨运行过程中不同时刻的温度场, 编制了基于上述理论的有限元程序, 可用于大型可展桁架式抛物面天线在轨运行中温度场的计算。

2 几何模型

模型为一个 5 m 口径的抛物面可展天线结构, 如图 1 所示。结构支撑部分为桁架, 反射面为柔性网状。设上弦节点坐标为 (x_i, y_i, z_i) , 上弦节点的抛物面方程为

$$\frac{x_i^2 + y_i^2}{4f} = z_i. \quad (1)$$

* 国家 973 计划项目资助 (51329010302)

2007-08-28 收到原稿, 2008-08-17 收到修定稿

式中, f 为抛物面的焦距, 在本模型中 f 的取值为 2170 mm.

与反射面相连接的桁架部分为上弦部分, 远离反射面的桁架部分为下弦部分, 连接上弦节点和下弦节点的桁架部分称为腹杆. 此天线的上弦部分、下弦部分及腹杆部分布置如图 2 和图 3 所示.

在图 2 和图 3 中, 实线表示弦杆, 虚线表示腹杆. 腹杆的两端分别连接两个蜘蛛节点, 其长度始终保持不变. 弦杆的两端也分别连接两个蜘蛛节点, 中间安装了可折叠的节点.

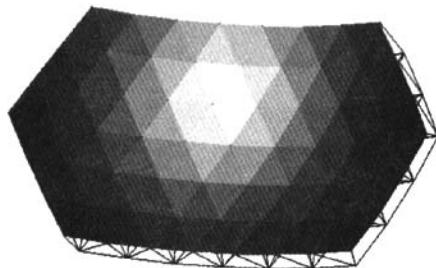


图 1 可展桁架抛物面天线

Fig.1 Deployable truss parabolic antenna

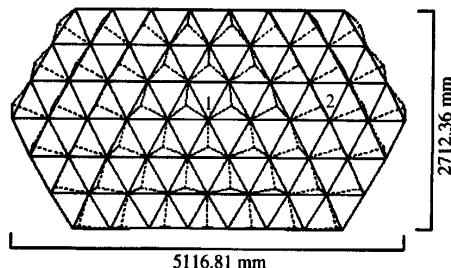


图 2 结构上弦部分及尺寸

Fig.2 Upper surface of the structure and dimensions

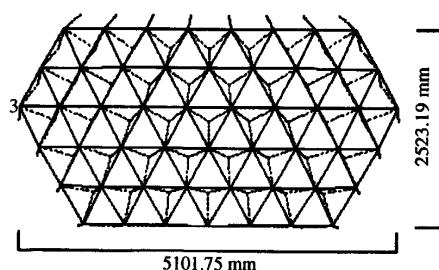


图 3 结构下弦部分及尺寸

Fig.3 Lower surface of the structure and dimensions

3 模型所处的轨道及运行过程中的姿态分析

对在轨运行中的天线进行热分析, 可计算各个时刻天线的温度场, 而各个时刻的温度场与外热流及轨道条件、天线的姿态均有很大的关系. 本模型天线所处轨道高度为 500 km, 半长轴 6870 km, 轨道偏心率约为 0.001, 轨道倾角为 98°, 轨道周期 96 min, 卫星发射日为春分, 降交点为 06:00 LT, 则升交点赤经为 90°. 卫星运行在太阳同步轨道上, 太阳同步轨道卫星的轨道平面绕地球极轴进动的角速度等于地球绕太阳公转的平均角速度, 如图 4 所示. 因春分时太阳光线直射春分点, 则初始时刻太阳光线与天线轨道的夹角为 98°.

天线姿态: 天线采用三轴稳定模式, $+z$ 轴指向地球, $+x$ 轴指向运行方向, $+y$ 轴垂直于运行轨道面, 如图 5 所示. 此时天线运行方向 x 轴垂直纸面向里, 天线以图 5 的稳定姿态在图 4 所示的轨道上沿着箭头所指方向运行. 热辐射参数: 太

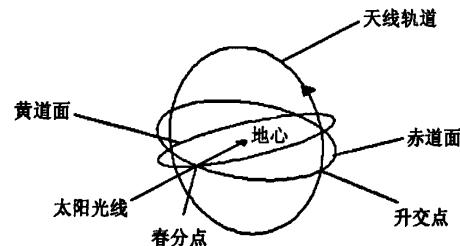


图 4 天线所处的轨道关系

Fig.4 Orbit of the antenna

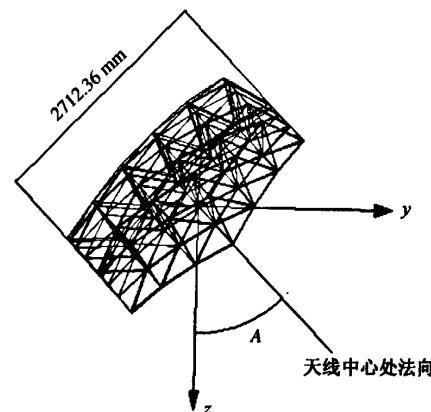


图 5 展开天线轨道姿态坐标轴

Fig.5 Three-axis attitude of deployed antenna

阳常数 S 为 1377.2 W/m^2 (春秋分), 1410.94 W/m^2 (冬至), 1323.06 W/m^2 (夏至). 天线中心处法向与 z 轴所成角度, 即图 5 中所示角度 A 为 40° . 地球反照率取 0.35.

太阳光线在地球的背光面会形成一个圆柱形的阴影区, 在阴影区内无太阳光照, 因此, 需计算天线是否会处于太阳光照的阴影区和天线何时处于阴影区. 如图 6 所示, 只需计算天线何时处于阴影圆柱体内部. 如图 7 所示, 天线处于 A 点, C 点为地心, 过地心取与太阳光线垂直的面 CD , 则以 CD 为底面所形成的圆柱体即为此刻太阳光照的阴影区. B 点为 A 点在 CD 面上的投影.

地球半径为 R , 轨道高度为 h , 若 $BC \leq R$, 则天线此刻处于太阳光照阴影区; 若 $BC \geq R$, 则此刻天线不处于太阳光照的阴影区. 因 $AC = R + h$, 当 $BC = R$ 时,

$$AB = \sqrt{(R + h)^2 - R^2}. \quad (2)$$

故若 $AB \geq \sqrt{(R + h)^2 - R^2}$, 则此刻天线处于太阳光照的阴影区; 若 $AB < \sqrt{(R + h)^2 - R^2}$, 则此刻天线不处于太阳光照的阴影区.

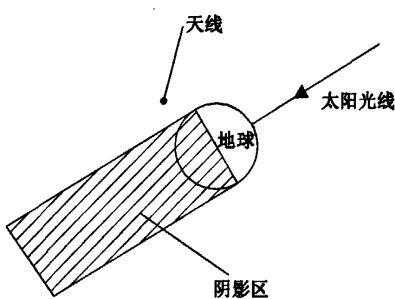


图 6 太阳光线阴影区示意图

Fig.6 Shadow area of the sun's rays

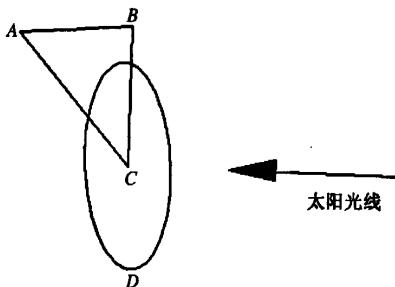


图 7 天线阴影区

Fig.7 Geometric relation for calculation of shadow area

4 模型的材料参数

构架为不锈钢杆件, 厚度为 0.5 mm, 杆件外径为 9 mm, 内径为 8 mm. 其导热系数取 $20 \text{ W}/(\text{m}\cdot^\circ\text{C})$, 密度为 7800 kg/m^3 , 热膨胀系数为 2.5×10^{-6} , 弹性模量为 $2.0 \times 10^5 \text{ MPa}$, 泊松比为 0.3, 比热容为 $500 \text{ J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$, 杆件表面涂层的发射率 $\epsilon = 0.3$, 吸收率 $A_s = 0.6$. 每个蜘蛛节点质量为 0.052 kg, 热容为 52 J/K .

反射面材料为各向同性材料, 反射面厚度为 0.05 mm, 网格尺寸为 $1.03 \text{ mm} \times 0.79 \text{ mm}$, 天线的反射面为镀金钼丝网, 发射率、吸收率分别为 $\epsilon = 0.62$ 和 $A_s = 0.24$. 导热系数为 $123 \text{ W}/(\text{m}\cdot^\circ\text{C})$, 密度为 570.47 kg/m^3 , 热膨胀系数为 4.9×10^{-5} , 弹性模量为 $3.3 \times 10^5 \text{ MPa}$, 泊松比为 0.3, 比热容为 $251 \text{ J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$.

5 热传导与热辐射公式

对于空间任意点, 温度可以表示为空间坐标与时间坐标的函数, 即 $T(x, y, z, t)$. 瞬态及有热源问题的导热微分方程为

$$\lambda_x \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \lambda_y \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \lambda_z \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + Q = \rho c \frac{\partial T}{\partial t}. \quad (3)$$

式中, T 为温度; $\lambda_x, \lambda_y, \lambda_z$ 分别为 x, y, z 方向的导热系数; Q 为单位体积内热源生成的热量; ρ 为材料密度; c 为材料比热容; t 为时间.

天线由支撑构架和反射面组成. 其中支撑构架由杆件组成, 杆件的导热和辐射属于一维导热辐射问题; 反射面由网面组成, 网面的导热和辐射属于二维导热辐射问题.

5.1 杆件的导热-辐射问题

杆件的导热-辐射采用二节点杆单元. 设已知等截面圆杆的截面积为 A , 截面外周长为 P , 外径为 d , 组成杆的材料导热率为 λ , 杆件表面的发射率为 ϵ , 杆长为 l . 因杆件一般为空心杆, 杆壁较薄, 故忽略沿直径方向的热传导. 初始条件杆两端温度分别为 T_1 和 T_2 , 则表征此问题的微分方程为:

$$\lambda A \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} - Pl\sigma\epsilon T^4 + Pl\sigma \sum_{n=1}^N \epsilon_n B_n T_n^4 + Qd = A\rho c \frac{\partial T}{\partial t}. \quad (4)$$

式中, T 为温度, σ 为 Stefan-Boltzmann 常数, $\sigma = 5.67 \times 10^{-8} \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)$, ϵ_n 为第 n 个杆件表面的发射率, B_n 为杆件对第 n 个杆件热辐射的吸收

因子, T_n 为第 n 个杆件的温度, Q 为外部环境对杆件单位面积的辐射能, ρ 为材料的密度; c 为材料比热容, t 为时间. 式(4)的边界条件为

$$T|_{x=0} = T_1, \quad T|_{x=l} = T_2. \quad (5)$$

把整根杆件分成若干个子单元, 对任意子单元 e 有泛函:

$$I^e = \int_{x_i}^{x_j} \left[\frac{1}{2} \lambda A \left(\frac{\partial T^e}{\partial x} \right)^2 + \frac{1}{5} P \sigma \varepsilon (T^e)^5 - P \sigma \sum_{n=1}^N \varepsilon_n B_n T_n^4 T^e - Q d T^e + A \rho c \frac{\partial T^e}{\partial t} T^e \right] dx. \quad (6)$$

式中, 各字母含义同式(4), T^e 为单元的温度.

图 8 所示为杆件内部某位置处单元的划分及编号, 设单元内温度为线性分布

即

$$\begin{cases} T^e = a_1^e + a_2^e x, \\ T_i = a_1^e + a_2^e x_i, \\ T_j = a_1^e + a_2^e x_j. \end{cases} \quad (7)$$

与每个节点有关的单元只有 2 个, 在整个杆长中, 泛函对接点 n 取极值得到

$$\frac{\partial I}{\partial T_n} = \frac{\partial I^I}{\partial T_n} + \frac{\partial I^J}{\partial T_n} = 0. \quad (8)$$

节点 n 在单元 I 中为 j , 在单元 J 中为 i , 故上式可变为

$$\frac{\partial I}{\partial T_n} = \frac{\partial I^I}{\partial T_j} + \frac{\partial I^J}{\partial T_i} = 0. \quad (9)$$

对每个节点按照上述方法变分, 对整个域即可得到瞬态温度场迭代方程:

$$\{[K_{1a}] + [K_{2a}] + [K_{3a}]\}[T^n] = [Q_{1a}] + [Q_{2a}] + [K_{3a}][T^{n-1}]. \quad (10)$$

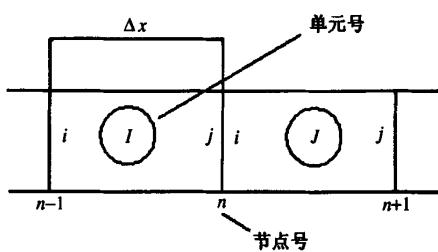


图 8 杆件导热-辐射问题的单元划分

Fig.8 Element partition for a conduction-radiation bar

其中, $[K_{1a}]$ 为热传导刚度矩阵, $[K_{2a}]$ 为热辐射刚度矩阵, $[K_{3a}]$ 为热容刚度矩阵, $[Q_{1a}]$ 为外部热源阵列, $[Q_{2a}]$ 为内部单元间辐射阵列, $[T^{n-1}]$ 和 $[T^n]$ 分别为第 $n-1$ 迭代步和第 n 步的温度.

5.2 反射面的导热-辐射问题

反射面的导热辐射采用三节点三角形单元, 如图 9 所示.

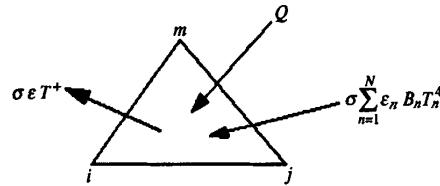


图 9 三节点三角形单元的导热辐射问题

Fig.9 Conduction-radiation problem of triangle element with three nodes

厚度为 h 的瞬态辐射导热问题的微分方程为

$$h \left(\lambda_x \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \lambda_y \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) - 2\sigma \varepsilon T^4 + \sigma \sum_{n=1}^N \varepsilon_n B_n T_n^4 + Q = h \rho c \frac{\partial T}{\partial t}. \quad (11)$$

式中, h 为面的厚度; λ_x, λ_y 分别为 x 方向和 y 方向的导热系数; T 为温度; σ 为 Stefan-Boltzmann 常数, $\sigma = 5.67 \times 10^{-8} \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)$; ε_n 为第 n 个单元表面的发射率; B_n 为此微元对其他第 n 个单元热辐射的吸收因子; T_n 为第 n 个单元的温度; Q 为外部环境对微元单位面积的辐射能; ρ 为材料的密度; c 为材料比热容; t 为时间.

边界条件为

$$-\lambda \frac{\partial T}{\partial k} \Big|_{\tau} = 2\sigma \varepsilon_{\tau} T^4 - \sigma \sum_{n=1}^N \varepsilon_n B_n T_n^4 - Q_{\tau}. \quad (12)$$

式中, k 为边界处的法线方向单位向量, 其余物理意义同式(11), 下标 τ 表示边界. 与式(11)和式(12)相应的满足欧拉方程的泛函为

$$I[T(x, y)] = h \iint_D \frac{1}{2} \left[\lambda_x \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \lambda_y \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right] dx dy +$$

$$\iint_R \sigma \left(\frac{2}{5} T^4 - \sum_{n=1}^N \varepsilon_n B_n T_n^4 \right) T dx dy - \iint_S Q T dx dy +$$

$$h \oint_{\tau} \sigma \left(\varepsilon_{\tau} \frac{1}{5} T^4 - \sum_{n=1}^N \varepsilon_n B_{n\tau} T_n^4 \right) T ds -$$

$$h \oint_{\tau} Q_{\tau} T ds + h \iint_D \rho c \frac{\partial T}{\partial t} T dx dy.$$

式中, D 为整个求解域, S 和 R 分别为与外部辐射热交换和与周围辐射交换有关的部分. 其余字母意义同式 (11) 和 (12). 利用泛函对一点取极值有

$$\frac{\partial I}{\partial T_n} = 0. \quad (13)$$

对每个节点按照上述方法变分, 对整个域即可得到瞬态温度场迭代方程:

$$\{[K_{1b}] + [K_{2b}] + [K_{3b}] + [K_{4b}]\} [T^m] =$$

$$[Q_{1b}] + [Q_{2b}] + [Q_{3b}] + [Q_{4b}] + [K_{3b}] [T^{m-1}]. \quad (14)$$

其中, $[K_{1b}]$ 为热传导刚度矩阵, $[K_{2b}]$ 为热辐射刚度矩阵, $[K_{3b}]$ 为热容刚度矩阵, $[K_{4b}]$ 为边界附加热辐射刚度矩阵, $[Q_{1b}]$ 为外部热源阵列, $[Q_{2b}]$ 为内部单元间辐射阵列, $[Q_{3b}]$ 为边界附加外部热源阵列, $[Q_{4b}]$ 为边界附加内部单元间辐射阵列, $[T^{m-1}]$ 和 $[T^m]$ 分别为第 $m-1$ 迭代步和第 m 步的温度.

将式 (10) 和式 (14) 联立组集, 对整个结构可得如下总体迭代方程:

$$[K] [T^m] = [Q] + [K_3] [T^{m-1}]. \quad (15)$$

式中, $[K]$ 为总体刚度矩阵, 包括热传导、辐射、热容等; $[Q]$ 为总体外热源阵列, 包括外部热源和内部单元辐射, $[K_3]$ 为总体热容刚度矩阵.

同时, 由于结构中存在很多节点, 节点的面积、体积较小, 忽略节点的热辐射和节点内部的热传导, 但节点对热的消耗需要考虑, 因此在总体迭代方程中, 加入了节点热容部分的影响, 在总体刚度矩阵 $[K]$ 和 $[K_3]$ 中加入了节点热容矩阵.

6 温度场计算

天线在如图 4 所示的轨道中运行, 每天运行 15 圈. 不同时刻天线的温度场不同, 设一天内太阳辐射的外热流不变, 则天线运行过程中, 当天线运行至某圈时, 从此圈开始以后每一圈中当天线运行至

某一位置时, 天线的温度场也为某一固定的数值, 则认为从此圈开始天线进入相对稳定的状态. 即

$$T_i^r = T_i^{r+1} = T_i^{r+2} = \dots, \quad (16)$$

式中, $r, r+1, r+2$ 表示天线运行的圈数; i 表示各圈中天线所处的位置, 在一圈中, 天线可处于任意位置, 故 i 可任意取值; T 表示各圈中, 当天线位于 i 位置时, 天线的温度场. 当对于任意位置 i , 式 (16) 均成立时, 认为从第 r 圈开始, 天线进入相对稳定的状态; 当 $r > 15$ 时, 表示此天内天线不会处于相对稳定的状态.

利用式 (2)~(16) 的公式编制瞬态温度场计算有限元程序, 计算此模型在轨道中运行时不同时刻模型的温度场.

春分、夏至、秋分、冬至时, 天线运行 2 圈后均进入相对稳定状态, 进入相对稳定状态后一圈中, 温度随时间变化的曲线如图 10~12 所示. 1 和 2 节点均为上弦节点, 3 节点为下弦节点. 图中横坐标表示时间步, 第 1 个时间步为 16 s, 将一个周期分为 360 个时间步.

比较上述 3 个节点的时间温度曲线可见, 冬至时刻 3 个节点在一圈内的温度始终最高, 因为冬至时太阳辐射的外热流最大, 且此时天线在地球的阴影区; 春分、秋分时刻的温度较接近; 而夏至时

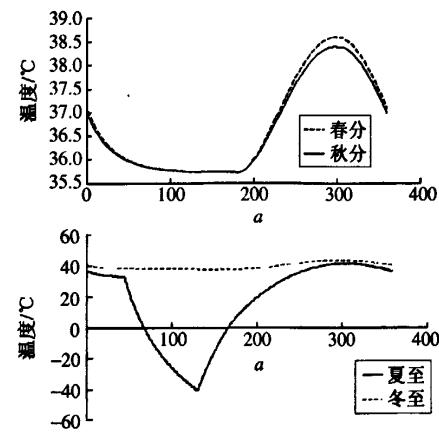


图 10 不同时刻相对稳定状态下 1 节点温度随时间的变化曲线 (时间步长 $a = 16$)

Fig.10 Temperature-time curves of joint 1 at different times which is in relative steady state

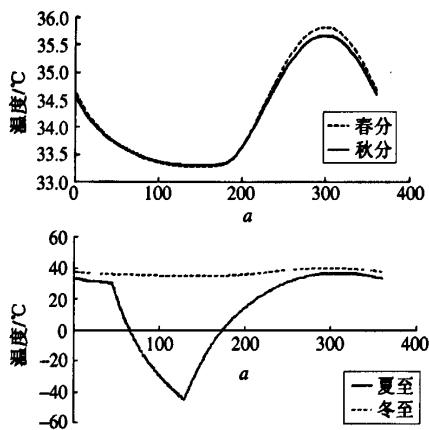


图 11 不同时刻相对稳定状态下 2 节点温度随时间的变化曲线 (时间步长 $a = 16$)

Fig.11 Temperature-time curves of joint 2 at different times which is in relative steady state

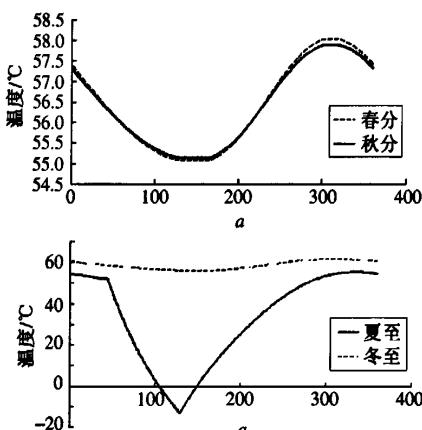


图 12 不同时刻相对稳定状态下 3 节点温度随时间的变化曲线 (时间步长 $a = 16$)

Fig.12 Temperature-time curves of joint 3 at different times which is in relative steady state

刻 3 个节点的温度均为最低, 且夏至时刻 3 个节点的温度跨度最大, 温度出现了负值, 这是因为夏至时刻太阳辐射的外热流最低而且夏至时天线运行过程中会经过地球的阴影区, 经过计算, 每圈中约

有 23.73 min 天线处于阴影区, 因夏至时温度跨度较大, 且出现负温区, 故此轨道条件下, 夏至时刻的温度场对天线更加不利.

7 结论

利用热传导-辐射理论, 同时引入可展桁架天线的轨道条件及天线在轨运行时的姿态, 可计算不同时刻天线在轨运行时温度场随时间的变化. 根据上述理论编制了可展桁架天线在轨运行时瞬态温度场的计算程序, 可以准确计算各种轨道条件, 各种姿态下的可展桁架天线运行过程中温度场的变化, 可用来分析天线的不利温度场, 从而指导天线热变形的分析及热控制设计.

参考文献

- [1] Min Guiqiong, Guo Sun. Thermal Control of Spacecraft (2nd ed.). Beijing: Science Press, 1998. in Chinese (闵桂荣, 郭舜. 航天器热控制 (第二版). 北京: 科学出版社, 1998)
- [2] Wang Yongqian. A method to calculate the angle of incidence between sunray and the orbit in sun-synchronous orbit. *Spacec. Eng.*, 1995, 4(4):65~73. in Chinese (王永谦. 太阳同步轨道的太阳相对于轨道面入射角的计算方法. 航天器工程, 1995, 4(4):65~73)
- [3] Chen Jin, Tang Guojian. Orbit design of sun-synchronousous satellite. *Aeros. Shanghai*, 2004, (3):34~38. in Chinese (陈洁, 汤国建. 太阳同步卫星的轨道设计. 上海航天, 2004, (3):34~38)
- [4] Yang Yulong, Guan Fuling, Zhang Shujie. Thermal-structural analysis of deployable truss antenna. *Chin. J. Space Sci.*, 2005, 25(3):235~240. in Chinese (杨玉龙, 关富玲, 张淑杰. 可展桁架天线温度场和热变形分析. 空间科学学报, 2005, 25(3):235~240)
- [5] Zhang Jiaxun, Wen Yaopu, Li Jindong. The preliminary thermal analysis and thermal control design for polar orbit lunar satellites with solar panel in single degree of freedom. *Chin. J. Space Sci.*, 2004, 24(1):51~56. in Chinese (张加迅, 文耀普, 李劲东. 单自由度太阳帆板极月轨道月球卫星的初步热分析与热设计. 空间科学学报, 2004, 24(1):51~56)

如何学习天线设计

天线设计理论晦涩高深，让许多工程师望而却步，然而实际工程或实际工作中在设计天线时却很少用到这些高深晦涩的理论。实际上，我们只需要懂得最基本的天线和射频基础知识，借助于 HFSS、CST 软件或者测试仪器就可以设计出工作性能良好的各类天线。

易迪拓培训(www.edatop.com)专注于微波射频和天线设计人才的培养，推出了一系列天线设计培训视频课程。我们的视频培训课程，化繁为简，直观易学，可以帮助您快速学习掌握天线设计的真谛，让天线设计不再难…



HFSS 天线设计培训课程套装

套装包含 6 门视频课程和 1 本图书，课程从基础讲起，内容由浅入深，理论介绍和实际操作讲解相结合，全面系统的讲解了 HFSS 天线设计的全过程。是国内最全面、最专业的 HFSS 天线设计课程，可以帮助你快速学习掌握如何使用 HFSS 软件进行天线设计，让天线设计不再难…

课程网址: <http://www.edatop.com/peixun/hfss/122.html>

CST 天线设计视频培训课程套装

套装包含 5 门视频培训课程，由经验丰富的专家授课，旨在帮助您从零开始，全面系统地学习掌握 CST 微波工作室的功能应用和使用 CST 微波工作室进行天线设计实际过程和具体操作。视频课程，边操作边讲解，直观易学；购买套装同时赠送 3 个月在线答疑，帮您解答学习中遇到的问题，让您学习无忧。

详情浏览: <http://www.edatop.com/peixun/cst/127.html>



13.56MHz NFC/RFID 线圈天线设计培训课程套装

套装包含 4 门视频培训课程，培训将 13.56MHz 线圈天线设计原理和仿真设计实践相结合，全面系统地讲解了 13.56MHz 线圈天线的工作原理、设计方法、设计考量以及使用 HFSS 和 CST 仿真分析线圈天线的具体操作，同时还介绍了 13.56MHz 线圈天线匹配电路的设计和调试。通过该套课程的学习，可以帮助您快速学习掌握 13.56MHz 线圈天线及其匹配电路的原理、设计和调试…

详情浏览: <http://www.edatop.com/peixun/antenna/116.html>



关于易迪拓培训:

易迪拓培训(www.edatop.com)由数名来自于研发第一线的资深工程师发起成立,一直致力于专注于微波、射频、天线设计研发人才的培养;后于 2006 年整合合并微波 EDA 网(www.mweda.com),现已发展成为国内最大的微波射频和天线设计人才培养基地,成功推出多套微波射频以及天线设计经典培训课程和 **ADS**、**HFSS** 等专业软件使用培训课程,广受客户好评;并先后与人民邮电出版社、电子工业出版社合作出版了多本专业图书,帮助数万名工程师提升了专业技术能力。客户遍布中兴通讯、研通高频、埃威航电、国人通信等多家国内知名公司,以及台湾工业技术研究院、永业科技、全一电子等多家台湾地区企业。

我们的课程优势:

- ※ 成立于 2004 年, 10 多年丰富的行业经验
- ※ 一直专注于微波射频和天线设计工程师的培养, 更了解该行业对人才的要求
- ※ 视频课程、既能达到了现场培训的效果, 又能免除您舟车劳顿的辛苦, 学习工作两不误
- ※ 经验丰富的一线资深工程师主讲, 结合实际工程案例, 直观、实用、易学

联系我们:

- ※ 易迪拓培训官网: <http://www.edatop.com>
- ※ 微波 EDA 网: <http://www.mweda.com>
- ※ 官方淘宝店: <http://shop36920890.taobao.com>