

【基础理论与应用研究】

碳纤维薄壁杆件空间热辐射分析

刘锦贤¹, 陈务军¹, 房光强², 彭福军²

(1. 上海交通大学 空间结构研究中心, 上海 200030; 2. 上海宇航系统工程研究所, 上海 200030)

摘要: 碳纤维复合材料以其高强轻质等显著特点广泛应用于航天器的结构设计, 以空间可展天线框架结构中的碳纤维复合材料薄壁杆件为研究对象, 对其空间热辐射环境下的温度场和热变形进行数值模拟; 采用分层实体单元和层合板壳单元两种模型进行计算, 比较了两种尺度下的温度场和热变形结果, 验证了采用层合板整体正交异性热参数和等效壳单元进行计算的适用性, 进而可以为整体结构和复杂杆件的计算提供依据; 同时也表明: 薄壁构件的在轨温度场下的热变形水平满足空间可展天线的形面精度要求。

关键词: 热辐射; 碳纤维材料; 薄壁杆件; 空间可展天线

中图分类号: V214; O312

文献标识码: A

文章编号: 1006-0707(2012)11-0124-05

热荷载是太空环境中的主要荷载, 轨道上的航天器承受较大幅度的高低温变化, 在结构中存在较大温度梯度, 这将引起热应力和热变形, 从而可能引起结构产生变形甚至振动^[1]。航天器上的可展开天线结构是热变形敏感部件结构, 由于天线的形面对其任务频率和指向精度影响很大, 热变形引起的反射面形状变化会对天线的电性能产生很大影响^[2]。准确地预测空间可展天线在轨温度场、热应力、热变形对于整个结构的热设计和结构设计均具有重要意义。国内外已经有了大量的研究和分析^[3-4]。

空间可展天线主要构件适合采用高强质轻的碳纤维复合材料。复合材料具有显著的各向异性和非均匀性, 热分析十分复杂。对于整体结构的模拟, 实体单元规模过大, 而由热导方程和层合板理论建立起相应的有限元格式^[5]计算热辐射效率不高, 目前也没有通用软件平台。采用辐射视角的有限差分单层壳单元可以很好地进行这方面的计算。考虑轨道上的太阳辐射热、地球反射太阳热、地球红外辐射热等热流, 同时考虑地球阴影、机构本身阴影的遮挡, 对碳纤维复合材料薄壁杆件进行了强非线性瞬态温度场和热变形分析, 验证采用整体热参数和与之相应的层合板壳单元方法的适用性。这样可以极大的减少计算规模, 对工程应用有很大参考。

1 原理

1.1 热荷载分析

在轨天线结构主要承受热辐射荷载, 复合材料薄壁构件的外表面大部分受到辐射热流的作用。在此对太空环境和

热荷载做一些假设和简化。分述如下^[6-8]:

1) 轨道处于空间真空、空间低温和微重力的环境下, 天线与空间热源的热交换以辐射方式进行, 对流换热忽略不计, 同时天线自身的热交换也只有辐射和导热。认为天线的自身辐射全部进入宇宙空间, 被宇宙空间完全吸收, 也就是说宇宙空间对天线是绝对黑体。

2) 空间热源主要考虑太阳辐射热流 q_s 、地球辐射热流 q_e 和地球反射热流 q_a , 则吸收总热量为: $q = q_s + q_e + q_a$ 。用描述地球大气层上界的太阳辐射强度的太阳常数来表示上述辐射热流。如图 1 所示。天线在轨热平衡关系为:

$$q_s + q_e + q_a + q_1 = q_2 + q_3$$

其中: q_1 为天线自身所产生的热流率, q_2 为天线内能的变化率, q_3 为天线向空间辐射的能率; 在此不考虑 q_1 。

3) 在计算地球阴影时, 假设地球阴影为一圆柱体, 直径等于地球平均直径; 地球为全阴影, 半影忽略不计; 大气散射影响忽略不计。如图 2 所示。天线结构自身阴影的影响分析中, 结构不透光, 认为光线全部被反射或吸收。进入地球阴影的判断, 按 Kreith 所述。表 1 给出了地球同步轨道 (GEO) 和低轨道 (LEO) 的周期和高度, 穿过全阴影和半阴影的时间。

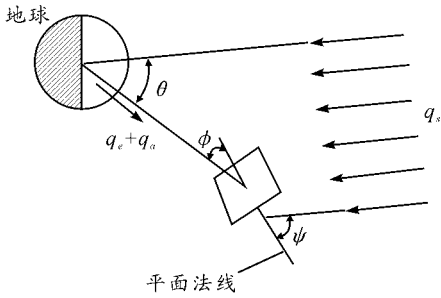
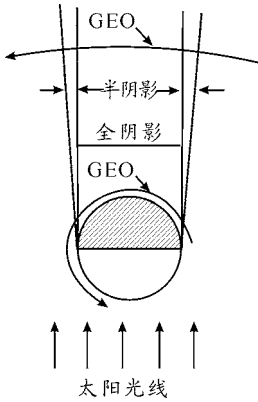
表 1 轨道参数^[8]

轨道类型	周期/s	轨道高度/km	全阴影时间/s	半阴影时间/s
LEO	5 511	280	2 200	8
GEO	86 400	35 800	4 170	130

收稿日期: 2012-07-09

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (11172180); 上海航天基金 (HTJ10-15); 上海市空间飞行器机构重点实验室开放课题 (11GFZJJ06-15)。

作者简介: 刘锦贤 (1986—), 男, 硕士研究生, 主要从事大跨空间结构研究。

图1 轨道热源及其位置关系^[8]图2 轨道和地球阴影的关系^[8]

1.2 温度场和位移场分析

1.2.1 计算方法和假设

1) 复合材料层合板,厚度与长宽之比很小,假设温度沿厚度方向(z 方向)线性分布,且梯度很小。辐射热荷载主要受到视角系数的影响,层合板平面法向(xy 平面)一致的区域,平面方向(xy)温度梯度并不大,在此以整体性能来模拟材料的不均匀性,用实测等效的正交异性层合板热传导系数可得到满意的温度场分布,并且能够反应出杆件热变形的形式和精度;

2) 碳纤维热膨胀系数在纤维主向一般很小,引起热变形属于小位移问题,在此不考虑热变形对视角系数的影响,即不属于热-结构耦合问题;在所求的温度范围内,热传导系数 λ ,热膨胀系数 α ,比热 c 等随温度变化不大,即不属于材料非线性问题;

3) 假定天线从升交点起一个周期的进行计算,设此时太阳位置为春分点(即太阳赤纬为 0°)。假设初始时刻整个结构温度均匀,为 0°C 。本文在春分点,输出温度场的时间步长为 $1\ 800\ \text{s}$ 。模拟计算时,杆件纵向沿轨道切线方向,截面宽度方向沿轨道法向。由轨道的周期性,后半周期和前半周期对应时间步位置的温度场和热变形分布对称。

1.2.2 微分方程及其有限元分列式

1) 导热微分方程:

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial \tau} = (\Delta T)^T \lambda \Delta T + Q \quad (1)$$

式(1)中, ρ 、 c 、 T 、 τ 、 λ 、 Q 分别代表材料密度、材料比热、温度、时间、热传导系数、内热源强度。

$$\lambda = \begin{pmatrix} \lambda_x & \lambda_{xy} & 0 \\ \lambda_{xy} & \lambda_y & 0 \\ 0 & 0 & \lambda_z \end{pmatrix}, \Delta T = \left(\frac{\partial T}{\partial x}, \frac{\partial T}{\partial y}, \frac{\partial T}{\partial z} \right)^T$$

初始条件: $T = \bar{T}_0(x, y, z)$; 边界条件: $-\lambda \left(\frac{\partial T}{\partial n} \right)_s = \bar{q}(t)$ 。

此处

$$\bar{q}(t) = [\varphi_1 + \eta\varphi_2 + 0.25(1 - \eta)\varphi_3] aS -$$

$$\sigma T^4 \varepsilon + \sum a\sigma T^4 \varepsilon\phi_{ij} \quad (2)$$

式(2)中, φ_1 、 φ_2 、 φ_3 、 ϕ_{ij} 分别代表太阳直接辐射、地球反照、地球红外辐射和元件之间辐射的视角系数,它们均会随结构位移的不同而发生变化。 a 、 η 、 ε 分别代表材料热学性能中的吸收率、反照率和材料黑度, S 为太阳常数、 σ 为波尔茨曼常数。第一项为外热流,第二项为物体微元向空间辐射的热流,第三项为物体微元间辐射换热^[8]。

2) 有限元分析列式:

各向异性热传导泛函:

$$I = \frac{1}{2} \int_n \left((\Delta T)^T \lambda \Delta T - 2 \left(\rho Q - \rho c \frac{\partial T}{\partial \tau} \right) T \right) dv - \int_s \bar{q} T ds \quad (3)$$

将物体离散为单元体,可得到物体在空间域离散化的瞬态传热问题的有限元格式,得到以时间 t 为独立变量的线性常微分方程组,再进一步对时间域进行离散。分述如下。

将单元的温度场 T^e 表示为节点温度的插值关系,其中 N 为形状函数, δ^e 为节点温度列阵,由变分极值有

$$C^e \delta^e + K^e \delta^e = P^e \quad (4)$$

其中,

$$C^e = \int_{v^e} \rho c N^T N dv \quad (5)$$

$$K^e = \int_{v^e} (\Delta N)^T \lambda \Delta N dv \quad (6)$$

$$P^e = \int_{v^e} \rho Q N^T dv + \int_s \bar{q} N^T ds \quad (7)$$

把时间划分为一系列时段,在时段 $\Delta t = t_{n+1} - t_n$ 内,各节点的温度用时间域形函数表示如下:

$$\delta(t) = N_n(t) \delta_n + N_{n+1} \delta_{n+1} \quad (8)$$

其中, $N_n(t) = 1 - \xi$, $N_{n+1} = \xi$, $\xi = t/\Delta t$ ($0 \leq \xi \leq 1$), δ_n 为在 $t = t_n$ 时的节点温度。

将 $\delta, \dot{\delta}$ 代入式(4),设 W_j 为权函数, $\{R\}$ 为余量,根据加权余量法原理,有 $\int_0^1 W_j \{R\} d\xi = 0$,其中, $s = \int_0^1 W_j \xi d\xi / \int_0^1 W_j d\xi$ 。得到求解热传导问题的基本方程如下^[9]:

$$\left(sK^e + \frac{1}{\Delta t} C^e \right) \delta_{n+1} + \left((1-s)K^e - \frac{1}{\Delta t} C^e \right) \delta_n - P = 0 \quad (9)$$

3) 热应力问题有限元分列式

设物体内存在温差的分布 ΔT ,引起的初应变为 ε_0 ,根据广义胡克定理,单元应力可表示: $\sigma = D(\varepsilon - \varepsilon_0)$ 。

由经典层合板理论^[10],考虑横向剪切应变 γ_{xz} 及 γ_{yz} ,得到层合板等参单元有限元格式:

$$K^e \delta^e = P^e + P_0^e \quad (10)$$

其中,

$$K^e = \int_{V^e} B^T DB dv = \sum_k \int_{-1}^1 \int_{-1}^1 \int_{-1}^1 B^T DB |J| \frac{h_k}{h} d\xi d\eta d\zeta_k$$

2 薄壁杆件温度场数值模拟

2.1 薄板和圆管模拟

薄板模型为 300 mm × 100 mm × 0.6 mm 尺寸的矩形薄

板,由 12 层纤维铺设,单层厚 0.05 mm,铺层方向: [+45/-45/0/-45/+45/0/0/+45/-45/0/-45/+45]。计算所用材料参数见表 2。本小节分别采用实体单元和等效正交异性单层壳单元模拟得到温度场结果。如图 3 和图 4 所示。对于平板,法线方向一致,相对于辐射热流的辐射角度一致,薄板温度场分布均匀,图中可以看出,采用分层实体单元和等效壳体单元所得温度平面分布接近,误差在 2% 左右。

表 2 碳纤维材料性能参数

密度/(g · cm ⁻³) 比热容/(KJ/(kg · K ⁻¹)) 泊松比	辐射系数		方 向	弹性模量 (实测值) (MPa)	热膨胀系数 (实测值) (/°C)	热导系数 (单层板) (W/(m · K))	热导系数 (层合板) (W/(m · K))
	实测值	%					
1.35	辐射率	89	纵	80 800	1e-7	6.85	3.22
0.84	吸收率	89	横	6 179	40e-6	0.95	2.01
0.34	反射率	11	切	2 930	-	-	-

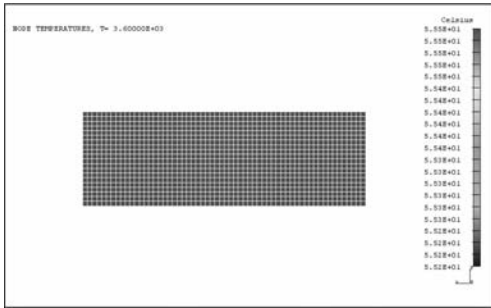


图 3 实体单元计算温度场结果

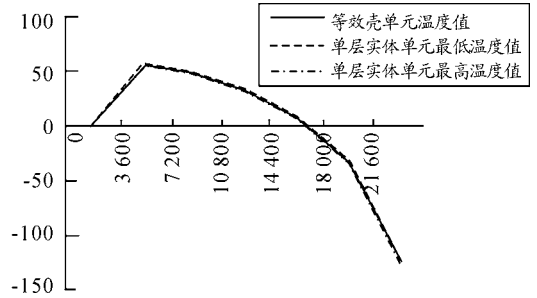


图 5 薄板温度不同时间步对比结果

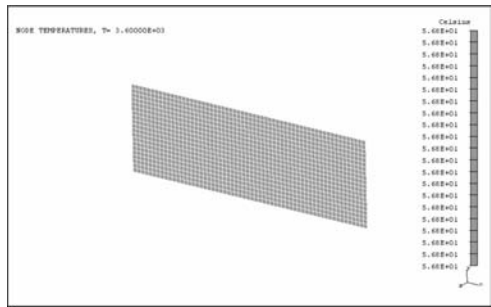


图 4 等效壳单元计算温度场结果

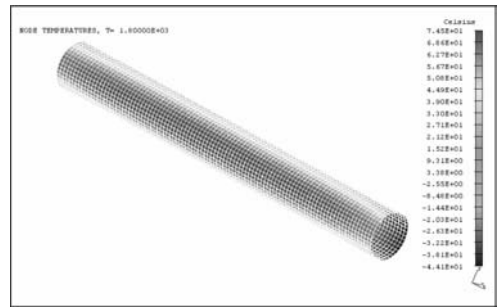


图 6 实体单元计算温度场结果

计算四分之一地球同步轨道,薄板温度分布两种模拟方法结果接近,并且温度限值在合适的范围之内,如图 5 所示。

圆管模型为 1 m 长,外径为 60 mm,厚度为 1 mm。由 4 层纤维铺设,单层厚 0.1 mm,铺层方向: [-45/0/0/-45]。圆管薄壁杆件可以模拟出对辐射热流的封闭遮挡效果。同样采用分层实体单元和壳单元进行模拟。如图 7 - 图 10 所示。

薄板和圆管沿厚度方向存在温度梯度,大致呈线性分布。由于厚度很薄,在计算变形时按中面处温度处理,可得到较好的效果。如图 8 - 9 所示。

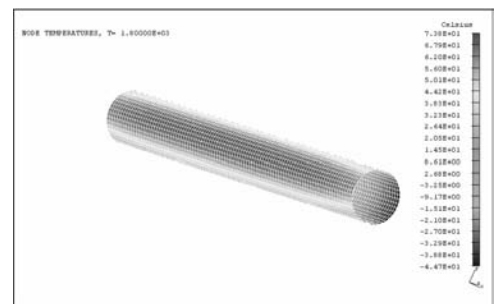


图 7 壳单元计算温度场结果

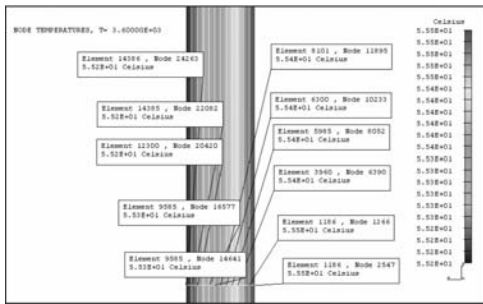


图8 薄板厚度方向温度梯度示意图

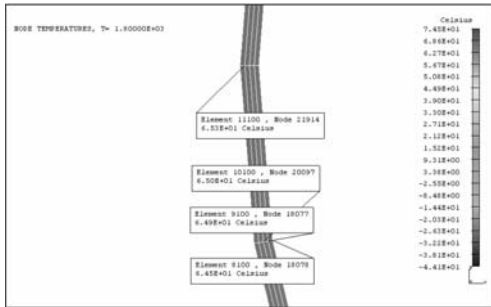


图9 圆管沿厚度方向温度梯度示意图

2.2 豆荚杆模拟

豆荚杆模型长为 19 m, 由 12 层纤维铺设, 单层厚 0.05 mm, 铺层方向: [+45/ -45/0/ -45/ +45/0/0/ +45/ -45/0/ -45/ +45]。采用等效正交异性壳单元模拟得到温度场结果。可看出杆件整体沿纵向对辐射热流视角一致, 在中间部分温度值分布均匀, 在端部温度梯度大, 特别是在杆件正背面相对于太阳变换时, 如图 10 所示。在中间部分温度值分布均匀, 在靠近端部温度值开始渐变, 在此处可以加密单元来准确模拟, 如图 11 所示。

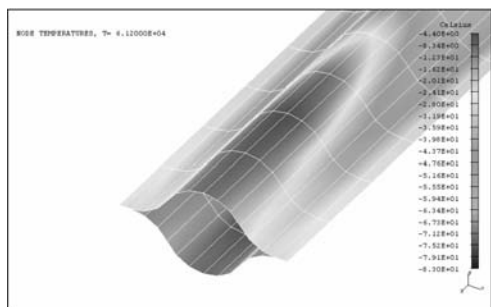


图10 杆件端部某瞬时计算温度场结果

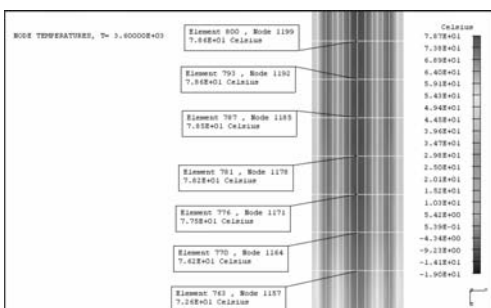


图11 杆件中间到端部温度梯度示意图

3 薄壁杆件热变形数值模拟

圆管的几何模型如前所述。在本小节中, 圆管一端固定, 分别施加分层实体单元节点温度场按一般固体有限元理论和施加等效壳单元节点温度场按复合材料层合板经典有限元理论进行热变形数值模拟。选取 $T = 3\ 600\ \text{S}$ 时刻, 即数值模拟的第二步时刻瞬时温度场下的位移场最大值结果列于表 4。此时刻的位移场分布如图 12 和 13 所示。可以看出, 位移限值 and 场分布两者符合比较理想, 位移在数值上都很小, 满足前面的理论假设同时满足天线形面精度的要求。其他时刻同样满足要求。

表 4 $T = 3\ 600\ \text{s}$ 时刻圆管位移最大值

单元类型	U1 位移/mm	U2 位移/mm	U3 位移/mm	总位移/mm
分层实体单元	0.498 5	0.881 7	0.049 9	0.959 5
等效壳单元	0.460 1	0.857 6	0.049 0	0.935 3

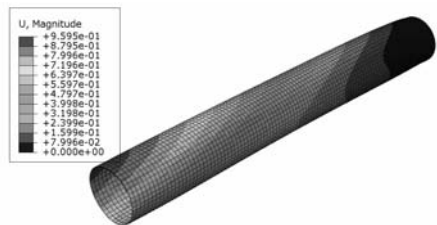


图12 实体单元热变形结果

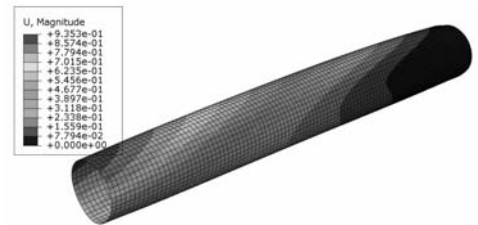


图13 等效壳单元热变形结果

豆荚杆的几何模型如前所述。按照上述圆管的计算方法进行模拟。此时刻的位移场分布如图 14 所示。



图14 等效壳单元热变形结果

地球同步轨道一半周期端部最大位移如图 15 所示。可以看出,位移限值和场分布两者符合比较理想,位移在数值上都很小,满足前面的理论假设同时满足天线形面精度的要求。其他时刻同样满足要求。

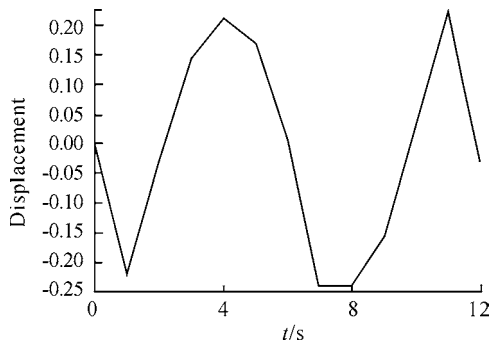


图 15 等效壳单元端部节点横向位移结果

4 结束语

本文对薄板,圆管和豆荚截面杆件的分析适用于一般闭口薄壁杆件的热分析。以上分析得出以下结论:等效壳单元的节点温度和实体单元厚度方向的平均温度误差很小,可以很好地模拟薄壁的表面温度;薄壁杆件厚度方向的温度梯度小,可以不考虑,在热变形分析中可以按均匀温度值计算;杆件的温度场和位移场随轨道周期性变化,且温度和控制位移的限值满足热控制的要求;采用等效壳单元和对称铺设复合材料整体正交异性热参数的模拟方法在计算手段和数值精度上满足热辐射问题的分析和设计要求。

(责任编辑 周江川)

参考文献:

- [1] CHEN XQ, MOHAN RV, TAMMA KK. Instantaneous response of elastic thin-walled structures to rapid heating[J]. International Journal for Numerical Methods in Engineering, 1994, 37 (14): 2389 - 2408.
- [2] 肖薇薇,陈务军,付功义. 空间充气可展抛物面天线反射面设计与精度分析[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2010, 31 (2): 257 - 261.
- [3] VELDMAN, SL, VERMEEREN, CAJR. Designing Inflatable Structures[M]. IASS 2002, Warsaw, Poland, 24 - 28 June, 2002: 890 - 894.
- [4] 陈志华,关富宁. 星载抛物面天线反射器瞬态热分析[J]. 固体力学学报, 2008, 29(3): 272 - 276.
- [5] 杨自春,黄玉盈. 复合材料新的热层合理理论及其有限元方法研究[J]. 海军工程学院学报, 1995 (3): 29 - 34.
- [6] 闵桂荣,郭舜. 航天器热控制[M]. 2版. 北京:科学出版社, 1998.
- [7] 闵桂荣. 卫星热控制技术[M]. 北京:宇航出版社, 1991.
- [8] 张淑杰. 空间可展桁架结构的设计与热分析[D]. 杭州:浙江大学, 2001.
- [9] 朱伯芳. 有限单元法原理与应用[M]. 3版. 北京:中国水利水电出版社, 2009.
- [10] 沈观林. 复合材料力学[M]. 北京:清华大学出版社, 1996.

(责任编辑 周江川)

(上接第 116 页)

参考文献:

- [1] 张占山,汪仁煌,谢莉萍,译. 开关电源手册[M]. 2版. 北京:人民邮电出版社, 2006.
- [2] 张占山,蔡宣三. 开关电源原理与设计[M]. 北京:电子工业出版社, 2001.
- [3] Kckermann W. On Semiconductor. Switch Mode Power Supplies Reference Manual and Design Guide [J]. 1999.
- [4] 叶慧页. 开关稳压电源[M]. 北京:国防工业出版社, 1995.
- [5] 史平君. 实用电源技术手册(电源元器件分册)[K]. 沈阳:辽宁科学技术出版社, 1999.

(责任编辑 周江川)