

大型柔性空间结构热 - 动力学耦合系统的 非线性有限元分析

范立佳¹, 段 进², 向志海¹, 薛明德¹, 岑章志¹

(1. 清华大学工程力学系, 北京 100084; 2. 中国建筑科学研究院, 北京 100013)

摘 要: 针对在轨航天器柔性附件的热 - 动力学耦合系统, 发展了一种基于更新 Lagrange 格式的非线性有限元分析方法。构造了一种一维温度杆单元, 该单元通过增加节点自由度能够同时得到薄壁杆件横截面的平均温度和沿杆截面周向的温差, 这些温度直接产生相应的热轴力、热弯矩和热双力矩。利用 Rodrigues 公式得到薄壁梁在大转动情况下的坐标转换矩阵, 并推导了非线性动力学方程。进一步考虑结构变形和热流入射角的相互影响后, 就得到了高度非线性的热 - 动力学耦合有限元方程。首先用标准考题验证了该方法的正确性, 然后利用该方法对哈勃太空望远镜太阳翼的热诱发弯扭耦合振动问题进行了分析, 给出了可能导致其失效的模式。

关键词: 薄壁杆件; 热 - 动力学耦合; 非线性; 瞬态温度场; 有限元法

中图分类号: V414.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1328(2009)01-0299-06

DOI: 10.3873/j.issn.1000-1328.2009.00.054

0 引言

航天器在轨运行时, 在进出地球阴影区的瞬间, 其温度场会发生剧烈变化。骤变的温度可能使航天器中的大型柔性附件, 如太阳能帆板、通讯天线、摄像机桅杆等产生热诱发振动。热诱发振动已成为航天器失效的典型模式。在一系列热诱发振动事故中, 最有名的当数 1990 年哈勃太空望远镜失效事件^[1]。该事故引起了很多学者的关注, 比如 Thornton 和 Kim^[2]以及 Chung 和 Thornton^[3]分析了哈勃望远镜的太阳翼在昼夜交替时发生弯曲和扭转振动的原因。前人的研究中大多采用简单梁模型进行分析。即便使用有限元方法, 在计算薄壁杆件的温度场和结构变形时往往采用两种不同的单元, 无法使分析在同一套网格下进行, 操作起来既繁琐又不准确。另外当研究大型空间结构的辐射换热时, 温度场分析所需的巨大计算量也是一个需要解决的问题。针对这些问题, Xue 和 Ding^[4]发展了一种“傅立叶温度杆单元”, 该单元通过增加节点自由度将薄壁杆件的二维温度场问题转化为一维温度场问题, 从而使温度场分析和结构分析得以在同一有限元网格下进

行。程乐锦^[5]、李伟^[6]等人基于这种一维温度杆单元采用模态迭加法分析了大型柔性空间结构的热诱发振动现象, 同时给出了热诱发振动的稳定性准则^[6]。但是这些研究工作只局限于小变形假设和闭口薄壁杆件。实际大型复杂柔性空间结构可能出现大变形或者大幅度的振动; 而有些结构部件为实现伸缩运动可能采用开口薄壁结构。对这类问题进行分析时需要考虑几何非线性的影响和薄壁结构翘曲的影响。段进等^[7]在文献[4]的基础上将一维温度杆单元推广到开口薄壁杆件, 但热变形分析仅限于小变形。本文在文献[7]开口薄壁杆件温度单元的基础上, 考虑开口薄壁杆件的翘曲影响, 采用更新的 Lagrange 格式, 推导了非线性动力学有限元方程。进一步考虑结构变形和热流入射角的相互影响后, 得到了高度非线性热 - 动力学耦合有限元方程。

1 非线性热 - 动力学耦合分析的有限元方程

本节包括以下三部分内容:

- (1) 基于闭口“傅立叶温度单元”理论, 推导开口薄壁杆件温度单元格式;
- (2) 建立基于更新 Lagrange 格式的非线性动力

学有限元方程;

(3) 热-结构耦合方程的求解方法;

1.1 开口薄壁杆件的温度单元

对开口薄壁杆单元,本文采用以下的假设来推导其温度有限元方程;(1) 忽略沿壁厚的温差,认为温度沿壁厚均匀分布;(2) 沿杆横截面周向的温差远小于其平均温度;(3) 考虑薄壁杆外表面对于空间的辐射换热,忽略其内表面相互之间和外表面相互之间的辐射换热;(4) 薄壁杆开口处为绝热边界;(5) 材料性质不随温度变化。

根据假设(1),其二维温度场 $T = T(s, x, t)$, 满足如下偏微分方程^[4]:

$$c\rho \frac{\partial T}{\partial t} - \frac{\partial}{\partial x} \left(k_x \frac{\partial T}{\partial x} \right) - \frac{\partial}{\partial s} \left(k_s \frac{\partial T}{\partial s} \right) + \frac{\epsilon\sigma}{t_s} (T^4 - T_\infty^4) - \frac{\alpha_s}{t_s} \bar{q}(s, x, t) = 0 \quad (1)$$

其中: t 表示时间 ($t \geq 0$); t_s 表示壁厚; c 是表示比热; ρ 是材料密度; k_x 和 k_s 分别为轴向和环向的热传导系数; ϵ 是杆外表面的辐射系数; α_s 是杆外表面的吸收系数; σ 是 Stefan-Boltzman 常数; T_∞ 是环境温度; $\bar{q}(s, x, t)$ 是入射热流的法向分量,与热流矢量和杆表面法线的夹角有关。

将温度场分解为平均温度和摄动温度,并沿杆轴向采用线性插值^[4]得到:

$$T(s, x, t) \approx \sum_{i=1}^2 [T_i^{(0)}(t) + \sum_{m=1}^M T_i^{(m)}(t) N^{(m)}(s)] N_i(x) \quad (2)$$

其中: i 为节点号; $T_i^{(0)}(t)$ 和 $T_i^{(m)}(t)$ ($m = 1, 2, \dots, M$) 分别为截面的平均温度和摄动温度; $N_i(x)$ 表示沿杆轴向的线性插值函数; $N^{(m)}(s)$ 表示沿杆截面周向的形函数,可采用三角函数^[7],对于开口薄壁杆件 $N^{(m)}(s) = \cos(m\pi s/S_h)$ ($m = 1, 2, \dots$)。将上式代入二维热传导方程并采用加权余量法,得到薄壁杆的瞬态温度场方程^[7]:

$$C^{t+\Delta t} \dot{T}^{(0)} + [K^{(0)} + R(t^{+\Delta t} T^{(0)})]^{t+\Delta t} T^{(0)} = Q^{(0)}(t^{+\Delta t} a, t^{+\Delta t} q) \quad (3)$$

$$C^{t+\Delta t} \dot{T}^{(m)} + \left[K^{(m)} + \frac{1}{4} R(t^{+\Delta t} T^{(0)}) \right]^{t+\Delta t} T^{(m)} = Q^{(m)}(t^{+\Delta t} a, t^{+\Delta t} q) \quad (4)$$

其中: $(\cdot) = d(\cdot)/dt$; 右上角标(0)表示与平均温度相

关, (m) 表示与多谐摄动温度相关; $t^{+\Delta t} T$ 为 $t + \Delta t$ 时刻的节点温度向量; C 为热容矩阵; K 为热传导矩阵; R 为辐射矩阵; Q 为吸收热载荷向量,因梁变形导致入射热流矢量 q 与梁表面的夹角变化, Q 与该时刻的外加热流载荷 $t^{+\Delta t} q$ 及节点位移 $t^{+\Delta t} a$ 相关。

1.2 几何非线性动力学有限元方程

本文采用考虑截面翘曲的 Euler-Bernoulli 梁单元。假设:(1) 满足刚周边条件;(2) 大位移小应变。采用更新的 Lagrange 格式,考虑热应力和截面翘曲的影响,以 t 时刻梁的构型为参考构型建立梁单元的平衡方程,然后转换到初始构型下并转到总体坐标系下求解。梁截面内任意点 P 的增量位移可用形心 O 处的轴向位移 ${}_t u$ 、剪力中心的横向位移 ${}_t v^*$ 和 ${}_t w^*$ 、截面扭转角 ${}_t \theta_x$ 来表示,具体如下:

$$\begin{aligned} {}_t u^p &= {}_t u - y \frac{\partial {}_t v^*}{\partial x} - z \frac{\partial {}_t w^*}{\partial x} - \omega \frac{\partial {}_t \theta_x}{\partial x} \\ {}_t v^p &= {}_t v^* - (z - C_z) {}_t \theta_x \\ {}_t w^p &= {}_t w^* + (y - C_y) {}_t \theta_x \end{aligned} \quad (5)$$

其中: C_y 和 C_z 为局部坐标系中剪力中心的坐标值, ω 表示截面翘曲函数^[8]。

对轴向位移 ${}_t u$ 采用线性插值,对扭转角 ${}_t \theta_x$ 以及横向位移 ${}_t v^*$ 和 ${}_t w^*$ 均采用 Hermit 插值。这样式(5)可改写为:

$$[{}_t u^p \quad {}_t v^p \quad {}_t w^p]^T = {}_t \bar{H}_i a^{e*} \quad (6)$$

其中 ${}_t \bar{H}$ 为插值函数矩阵; ${}_t a^{e*}$ 为单元节点扭心处的广义位移。以 t 时刻构型为参考,考虑下一时刻梁单元的平衡条件,由虚功原理得:

$$\begin{aligned} & \int_0^l \int_{\lambda} [{}_t \sigma_{xx} \delta {}_t \epsilon_{xx} + {}_t \sigma_{xy} \delta {}_t \gamma_{xy} + {}_t \sigma_{xz} \delta {}_t \gamma_{xz}] d.x d.y d.z \\ &= {}_t \Delta \mathcal{Q} - \int_0^l \int_{\lambda} \rho {}_t \ddot{u}_k \delta {}_t u_k d.x d.y d.z \end{aligned} \quad (7)$$

其中 ${}_t \Delta \mathcal{Q}$ 为外力虚功。把(6)式代入(7),并考虑热应力,可得:

$$\begin{aligned} & \Omega^T {}_t M \Omega {}_t^{t+\Delta t} \ddot{a}^e + \Omega^T ({}_t K_L + {}_t K_G + {}_t K_T) \Omega {}_t a^e \\ &= \Omega^T ({}_t^{t+\Delta t} P_e + {}_t^{t+\Delta t} P_T - {}_t P) \end{aligned} \quad (8)$$

其中 Ω 表示为位移从扭心转到形心的转换矩阵; ${}_t M$ 表示质量矩阵; ${}_t^{t+\Delta t} \ddot{a}^e$ 表示 $t + \Delta t$ 时刻单元节点形心处的广义加速度; ${}_t K_L$ 、 ${}_t K_G$ 和 ${}_t K_T$ 分别表示线性刚度阵、几何非线性刚度阵(与单元应力相关)和温度应力刚度阵(与截面温度 ${}_t T$ 相关); ${}_t a^e$ 表示 $t + \Delta t$

时刻单元节点形心处的广义位移增量; tP 表示单元内力; ${}^{t-\Delta t}P_e$ 表示梁单元所受的外载; ${}^{t-\Delta t}P_T$ 表示节点等效温度载荷,它包含热轴力、热弯矩和热双力矩(如果不考虑截面翘曲,则只有热轴力和热弯矩),它通过入射热流在杆表面法向矢量的夹角方向余弦与节点位移矢量 ${}^t a$ 相关。方程(8)中, t 时刻的单元内力 tP 可由 $t-\Delta t$ 时刻的单元内力 ${}^{t-\Delta t}P$ 以及 $t-\Delta t$ 到 t 时刻的增量位移 ${}^{t-\Delta t}a^e$ 计算得到,具体步骤为:

(1) 按公式(9)计算 $t-\Delta t$ 构型下 t 时刻的单元节点力 ${}^{t-\Delta t}P$; (2) 利用 Yang 和 Chiou^[9] 提出的刚体试验准则,将 $t-\Delta t$ 构型下的单元内力直接转到 t 构型(见公式(10))。这样可以避免由位移计算单元内力所带来的麻烦。

$${}^{t-\Delta t}P = {}^{t-\Delta t}P + ({}^{t-\Delta t}K_L + {}^{t-\Delta t}K_G + {}^{t-\Delta t}K_T) {}^{t-\Delta t}a^e \quad (9)$$

$${}^tP = {}^{t-\Delta t}P \quad (10)$$

本文用 Rodrigues 公式来描述梁单元的大转动。相应的位移转换矩阵 ${}^t_0\bar{R}$ 将方程(8)转换到 0 时刻的单元构型下:

$${}^t_0\bar{R}^T \Omega^T {}^t M \Omega {}^t_0\bar{R} {}^{t-\Delta t}a^e + {}^t_0\bar{R}^T \Omega^T ({}^tK_L + {}^tK_G + {}^tK_T) \Omega {}^t_0\bar{R} a^e = {}^t_0\bar{R}^T \Omega^T ({}^{t-\Delta t}P_e + {}^{t-\Delta t}P_T - {}^tP) \quad (11)$$

把方程(11)转换到整个坐标系下并集成,就可得非线性动力学有限元方程为:

$$M {}^{t+\Delta t}a + D {}^{t+\Delta t}a + {}^tK({}^tT, {}^t a) \Delta a = {}^{t+\Delta t}R({}^{t+\Delta t}T) - {}^tF({}^t a) \quad (12)$$

其中 D 表示阻尼矩阵; Δa 为 t 时刻到 $t+\Delta t$ 时刻总体坐标系下的节点广义位移增量; tK 表示结构总体刚度矩阵(为非线性的,与 t 时刻的节点温度 tT 和节点广义位移 ${}^t a$ 相关); ${}^{t+\Delta t}R$ 为载荷列阵(与 $t+\Delta t$ 时刻的节点温度 ${}^{t+\Delta t}T$ 相关); tF 为节点内力。

1.3 热-结构耦合方程的求解方法

方程(3)和(4)在时间域内采用 Wilson- θ 法求解,其中高度非线性方程(3)在每一时间步内用 Newton-Raphson 迭代进行求解。采用 Newmark 方法在时间域内逐步积分动力学方程(12)式,为了防止解的漂移,采用 Newton-Raphson 迭代法求解按时间域离散后的方程。这是抛物型与双曲型方程组的耦合问题,把 ${}^t a$ 先代入(3)和(4)式右端求得 $t+\Delta t$ 时刻的结点温度,再代入(12)式求得结点位移;将此位移作为 ${}^{t+\Delta t} a$ 代入(3)和(4)式,重复上述步骤直至前后

两次计算所得温度之差小于给定误差允许值。

2 数值算例

本节通数值算例来验证该方法的可靠性与实用性。首先,通过一个几何非线性动力学例子来验证本文对于几何非线性动力学问题的可靠性;然后,采用 Thornton 和 Kim^[2] 所给的哈勃太空望远镜太阳翼的理论解对本文数值解进行热-结构耦合的线性振动验证;最后对哈勃太阳翼的左右展开梁采用开口薄壁圆杆来模拟实际观测到的太阳翼失效现象。

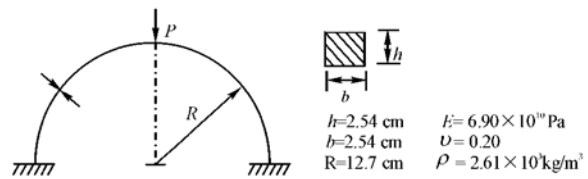


图 1 半圆弧受时变载荷

Fig.1 Semicircular circular arch subjected to dynamic loads

2.1 两端固支半圆弧受时变集中力作用

两端固支半圆弧梁,顶部受随时间变化的集中载荷 P 作用,其几何尺寸和材料参数见图 1,集中载荷 P 随时间变化规律见式(13)。考虑几何非线性的影响,计算半圆弧动力响应。图 2 给出本文与 Kuo^[10] 结果的比较,二者吻合很好。

$$P(t) = \begin{cases} 8896.444 \left[1 - \cos\left(\frac{\pi t}{0.0003}\right) \right] & 0 \leq t \leq 0.0003s \\ 17792.888 & t > 0.0003s \end{cases} \quad (13)$$

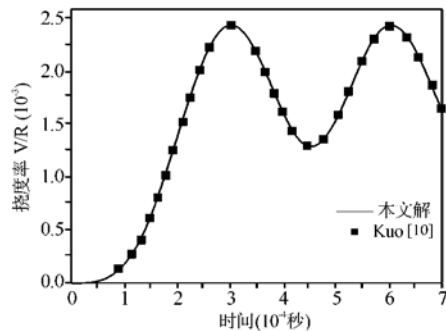


图 2 半圆弧模型的挠度变化历程

Fig.2 Time history of tip displacement

2.2 考虑小变形哈勃望远镜热诱发振动分析

哈勃望远镜的太阳翼模型见文献[2],为了与文献[2]中结果进行比较,采用与文献[2]中同样的假设:(1)小变形小转动;(2)采用闭口薄壁圆杆近似

太阳翼的开口截面梁。入射热流方向与太阳翼垂线的夹角记为 γ ，结构阻尼取 Rayleigh 阻尼 $\alpha = \beta = \zeta$ 。其材料参数见表 1。计算与文献中相同的工况，图 3 和图 4 分别对应稳定振动与不稳定振动的情况，结果显示本文数值解与 Thornton^[2] 的理论解能够很好地符合。

表 1 HST 梁的材料参数

Table 1 Material properties of the HST beam

| | | | |
|----------------------------|-----------------------------------|--------------|--------------------------------|
| $k_{\xi} = k_s$ (W/m·K) | α_s | ϵ | ρ (kg/m ³) |
| 16.61 | 0.5 | 0.13 | 7010 |
| c (W/kg·K) | α (10 ⁻⁵ /K) | E (GPa) | G (GPa) |
| 502 | 1.69 | 193 | 75 |

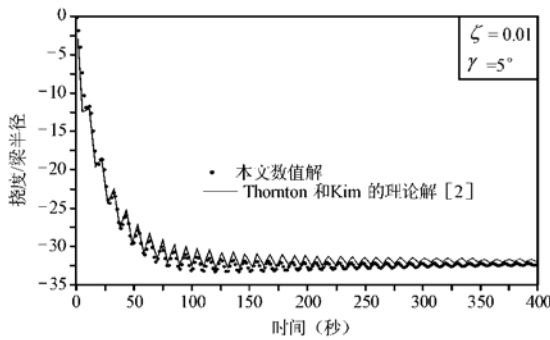


图 3 稳定的热诱发振动

Fig. 3 Stable thermally-induced vibration

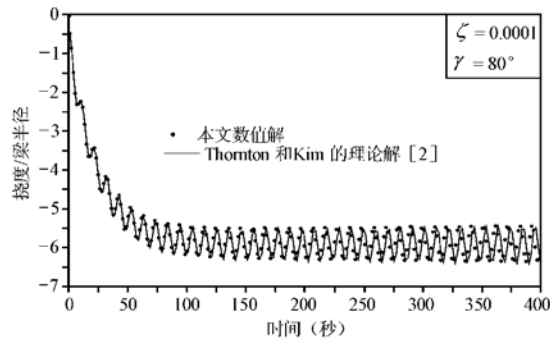


图 4 不稳定的热诱发振动

Fig. 4 Unstable thermally-induced vibration

2.3 几何非线性情况下哈勃望远镜热诱发振动分析

1990 年太空中拍摄到的哈勃太空望远镜在出入地球阴影时太阳翼发生了热诱发扭转振动。其后宇航员修复该太阳翼时，又发现有一块太阳帆板已经因严重的扭转屈曲而损毁。但是按照文献[2]所提出的支承梁为闭口薄壁圆管的模型，文献[2]及 Li

等^[6]都无法得到太阳翼的扭转变形模态，只能得到弯曲模态，无法正确解释真实的太阳翼损毁现象。另一方面，文献[2]中哈勃太阳翼的左右支承梁实际上并不是闭口薄壁杆件，而是开口薄壁杆件。文献[3]指出用左右对称的开口薄壁圆杆模拟哈勃望远镜太阳翼支撑梁，该太阳帆板的扭转自振频率远低于弯曲自振频率，扭转屈曲临界载荷远低于弯曲模态的屈曲临界载荷。但是由于其温度场分析采用闭口薄壁圆管模型，文献[2, 3]都无法解释热为什么会诱发扭转振动与屈曲。本文采用图 5 所示开口薄壁圆杆模拟哈勃太空望远镜太阳翼的支承梁，用作者所发展的开口薄壁杆单元对于温度场与结构位移场进行前后一致的耦合有限元分析。分析中考虑了几何非线性影响，得到了热诱发弯扭耦合振动与动力屈曲模态。

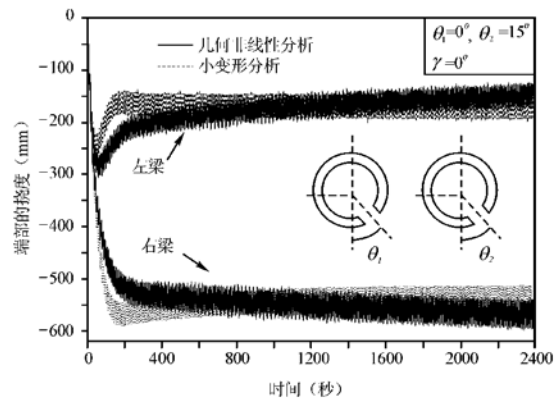


图 5 太阳翼端部的挠度响应曲线

Fig. 5 The tip deflection response of the solar array

与文献[2]相同，太阳翼受 29.5N 的预张力，左右梁受 14.75N 的预压力。由于实际工作状态下很难保证左右支撑梁的开口方向完全一致，本文给出了两种工况下(见表 2)的无阻尼热诱发振动响应。

表 2 工况

Table 2 Cases

| | 左梁偏角 | 右梁偏角 | 热流入射角 |
|------|------------------------|-----------------------|--------------------|
| 工况 1 | $\theta_1 = 0^\circ$ | $\theta_2 = 15^\circ$ | $\gamma = 0^\circ$ |
| 工况 2 | $\theta_1 = -10^\circ$ | $\theta_2 = 10^\circ$ | $\gamma = 0^\circ$ |

工况 1: 太阳翼的挠度响应曲线如图 5 所示。由于左右梁采用不同的开口方向，使得结构不对称，从而使左右梁的挠度不再对称。从表 3 可以看出结构整体发生了扭转变形和扭转振动，即产生了弯扭耦合振动。当不考虑几何非线性时虽然有较大的扭转变

形,但扭转振动振幅不大(见表 3)。文献[11]给出了线性振动的前六阶频率及其模态。对图 5 挠度曲线分三段做 FFT 变换,可得各时间段内弯曲振动和扭转振动的等效频率和振幅(见表 3)。其中弯曲振动振幅随时间逐渐增大,可见该振动是不稳定的。

表 3 太阳翼的振动频率和幅值

| | 一阶弯曲振动 | | 一阶扭转振动 | |
|---------------------|--------|--------|--------|--------|
| | 频率(Hz) | 振幅(mm) | 频率(Hz) | 振幅(mm) |
| 线性分析 | 0.0964 | 13.430 | 0.0403 | 0.015 |
| 非线性分析 0~800s | 0.0964 | 13.430 | 0.0488 | 2.442 |
| 非线性分析 800~1600s | 0.0989 | 15.800 | 0.0464 | 2.276 |
| 非线性分析 1600~2400s | 0.0989 | 16.487 | 0.0464 | 1.253 |

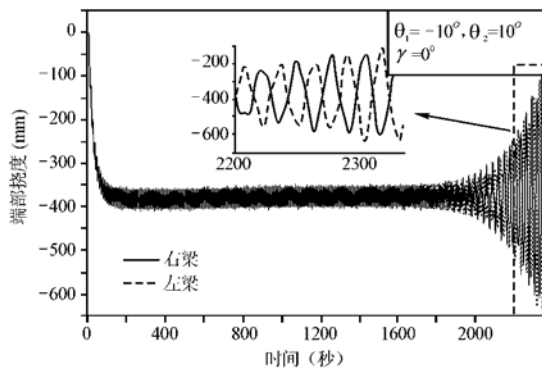


图 6(a) 太阳翼端部的挠度响应曲线(大变形)
Fig. 6(a) The tip deflection response of the solar array (Large deformation)

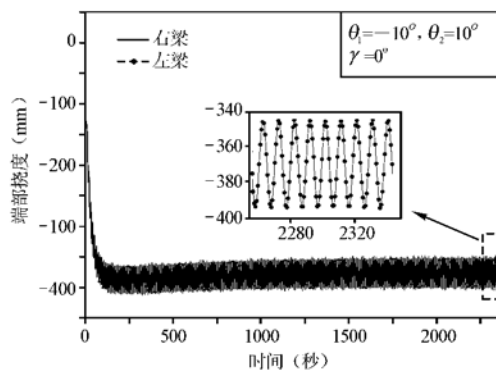


图 6(b) 太阳翼端部的挠度响应曲线(小变形)
Fig. 6(b) The tip deflection response of the solar array (Small deformation)

工况 2:左右梁开口方向相反,但结构左右对称,突加太阳热流垂直入射。太阳翼端部的挠度响应如

图 6(a)和图 6(b)所示。如果不考虑几何非线性,从图 6(b)中可知,左右梁的挠度完全一样,变形也是对称的,只有弯曲振动。如果考虑几何非线性的影响,从图 6(a)中可知,在一临界点(约 1900 秒)以前结构变形对称,没有扭转振动发生,但达到这一临界点后,结构会发生扭转振动,即产生弯扭耦合振动,并且弯曲振动和扭转振动的振幅发散的速度非常快,结构就会马上进入屈曲状态。从图 7 中可以看出左右梁的轴压力在临界点之前已经超过了线性扭转临界载荷,只不过此时变形没有扭转变形,因此并没有发生扭转屈曲。但是随着外载荷的增加,左右梁的轴压力逐渐增加,当达到临界点时,结构稍有一小的挠动就会产生扭转振动,但此时左右梁的轴压力已经超过其临界载荷,所以太阳翼就会马上进入扭转屈曲状态。这也可能是导致其失效的一种模式。

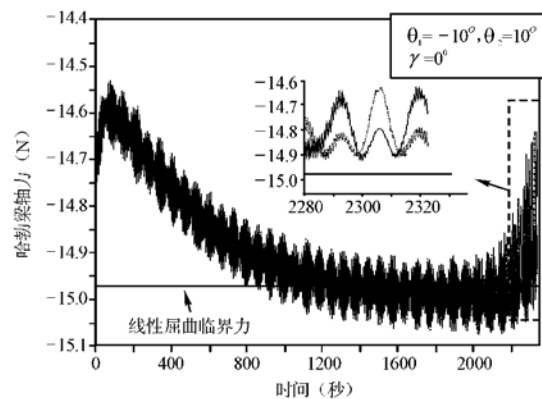


图 7 左右梁的轴力响应
Fig. 7 The axial force response of the solar array beams

3 结论

本文发展了一种能够对大型柔性空间结构的热-动力学耦合问题进行分析的有限元方法。该方法使用了一种能与结构分析互相协调的一维薄壁杆温度单元。在上述薄壁温度杆单元的基础上,从虚功原理出发,考虑梁单元大转动和截面翘曲的影响,发展了一种几何非线性有限元列式及耦合算法。通过与文献的比较验证了本文方法的可靠性。最后利用本方法对 1990 年哈勃太空望远镜的太阳翼扭转失效事件进行了分析,通过与实际观测到的现象的比较,给出了可能导致其扭转失效的原因。

参考文献:

- [1] Thornton E A. Thermal Structures for Aerospace Applications, AIAA Education Series. Washington, DC: AIAA, 1996.
- [2] Thornton E A, Kim Y A. Thermal induced bending vibrations of a flexible rolled-up solar array[J]. Journal of Spacecraft and Rockets, 1993, 30(4): 438 - 448.
- [3] Chung P W, Thornton E A. Torsional buckling and vibrations of a flexible rolled-up solar array[A]. AIAA Paper 95 - 1355 - cp, 1995: 1654 - 1664.
- [4] Xue M D, Ding Y. Two kinds of tube elements for transient thermal-structural analysis of large space structures[J]. International Journal for Numerical Methods in Engineering, 2004, 59(10): 1335 - 1353.
- [5] 程乐锦. 大型空间结构的热诱发振动有限元分析[博士学位论文][D]. 北京:清华大学工程力学系, 2003. [CHENG Le-jin. Finite element analysis for thermally induced vibrations of large space structures[D]. Department of Engineering Mechanics, Beijing, China, 2003.]
- [6] LI Wei, XIANG Zhi-hai, CHEN Le-jin, XUE Ming-de. Thermal flutter analysis of large-scale space structures based on finite element method[J]. Int. J. Numer. Meth. Engng, 2007, 69:887 - 907.
- [7] 段进, 薛明德, 向志海, 李伟. 辐射换热下瞬态热 - 结构分析的一种空间薄壁杆单元[J]. 计算力学学报, 2007, 24(3):345 - 351. [DUN Jin, XUE Ming-de, XIANG Zhi-hai, LI Wei. A kind of thin-walled beam element for transient thermal-structural analysis considering radiation heat transfer[J]. Chinese Journal of Computational Mechanics, 2007, 24(3):345 - 351.]
- [8] Vlasov V Z. Thin walled elastic beams, Israel Program for Scientific Translation, Jerusalem, 1961.
- [9] Yang Y B, Chiou H T. Rigid body motion test for nonlinear analysis with beam elements[J]. Journal of Engineering Mechanics, 1987, 113(9): 1404 - 1419.
- [10] Kuo Mo Hsiao and Rong Tser Yang. A co-rotational formulation for nonlinear dynamic analysis of curved euler beam. Computers & Structures, 1995, 54(6): 1091 - 1097.
- [11] 黄彦文, 薛明德, 程乐锦, 张逸凡. 含开口薄壁杆的大型空间结构热诱发弯扭振动[J]. 清华大学学报, 2005, 45(2): 262 - 266. [HUANG Yan-wen, XUE Ming-de, CHENG Le-jin, ZHANG Yi-fan. Thermally induced vibrations of large space structures including thin-walled open beam sections[J]. Journal of Tsinghua University, 2005, 45(2):262 - 266.]

作者简介: 范立佳(1982 -), 男, 博士研究生, 研究方向为大型空间结构的有限元分析及基于稳健性的优化设计等。

通信地址: 清华大学航天航空学院(100084)

E-mail: fanlj05@mails.tsinghua.edu.cn

The Thermal-Dynamic Coupling Analysis of Large Flexible Space Structures by Finite Element Method considering Geometric Nonlinearity

FAN Li-jia¹, DUAN Jin², XIANG Zhi-hai¹, XUE Ming-de¹, CEN Zhang-zhi¹

(1. Department of Engineering Mechanics, Tsinghua University, Beijing 100084, China;

2. China Academy of Building Research, Beijing 100013, China)

Abstract: In this paper, a geometric nonlinear Finite Element (FE) method was developed to analyze the thermal-dynamic coupling systems of large flexible space structures based on the updated Lagrange formula. A kind of 1-D temperature element of thin-walled beam was presented by adding additional degrees of freedom at each temperature node. The average temperature and temperature gradient of the cross section could be given at the same time, consequently, the thermal axial force, the thermal moments and bi-moments could be calculated. On the basis of the above temperature element, an updated Lagrange FE scheme had been formulated for the nonlinear thermal-dynamic problem, where the sectional warping and the large rotation were taken into account. The interaction between the structural deformation and the absorbed heat flux can be formulated and the thermal-structural coupling effect is thus considered. Numerical examples demonstrate the validity of the presented method. Using this method, the thermally-induced bending-torsion vibration of the solar array on Hubble Space Telescope was obtained. The results are consistent with actual observations.

Key words: Thin-walled beam; Thermal-dynamic coupling; Nonlinearity; Transient temperature field; FEM