

星载可展开天线热振动数值分析

刘劲 朱敏波 曹罡
(西安电子科技大学机电工程学院, 西安 710071)

摘要 根据非耦合动力学理论及有限元方法, 研究分析了星载可展开天线的热振动。利用半正弦波温度冲击模拟热动力荷载, 对天线典型节点的热振动位移和应力以及形面精度进行了数值分析。研究表明, 急剧变化的温度荷载将导致该天线结构发生热振动, 热振动响应明显大于静力学响应。

关键词 形面精度误差 温度冲击 热振动 可展开天线 卫星

DOI: 10.3780/j.issn.1000-758X.2011.02.009

1 引言

星载可展开天线结构在绕地球飞行时所接收的空间热流不断变化, 加之轨道阴影以及结构部件遮挡影响, 结构中会产生变化且分布不均匀的温度场。同时由于星载可展开天线结构尺寸大、质量轻、柔性大、固有频率低、分布密集, 因此结构在变化的温度场下可能发生较明显的热结构响应。特别是进出阳光区与阴影区时, 由于热荷载瞬变, 导致结构温度场迅速变化, 引起结构轻微甚至明显振动, 这种振动称为热振动^[1-4]。热振动往往会造成不良后果, 到目前为止, 已有多起由大型空间结构热振动造成的空间飞行器工作受影响乃至不能正常工作的例子, 其中最为著名的是哈勃空间望远镜太阳电池阵热振动现象^[5]。

大型空间结构热振动现象的研究中存在两种观点: 一种认为, 结构吸收的外热流与结构变形无关, 温度场和应变场是相互独立的, 即所谓“非耦合”的观点; 另一种观点认为, 结构变形会影响结构对外热流的吸收, 温度场和应变场之间交替作用, 即所谓“耦合”的观点。文献[6]对此进行了总结。

本文利用有限元方法, 以铰接肋天线为例对星载可展开天线进行了热振动研究。根据铰接肋天线特点建立其有限元模型, 在半正弦波温度冲击荷载下, 采用非耦合动力学方法求解了该天线的热振动; 同时采用静力学方法求解了该天线在此热荷载下的静态热变形, 并对两种求解方法进行了对比, 对天线热振动特性和形面精度变化进行了分析^[7]。

2 热振动问题描述方程

2.1 非耦合动力学理论

对于空间结构热振动分析, 可采用热传导方程和热弹性动力学方程^[7]描述。

收稿日期: 2010-09-13。收修改稿日期: 2010-11-15

(1) 热传导方程

不考虑内热源的情况下，热传导方程为

$$\frac{\partial T}{\partial t} - \alpha \nabla^2 T = 0 \quad (1)$$

式中 $\alpha = \frac{k}{c_p}$ 为热扩散率， k 为导热系数， c_p 为比定压热容， ρ 为密度； ∇^2 为拉普拉斯算子； T 为温度。

(2) 热弹性动力学方程

以位移表示的热弹性动力学方程为

$$\left. \begin{aligned} (\lambda + G) \frac{\partial e}{\partial x} + G \nabla^2 u - \beta \frac{\partial T}{\partial x} + X &= \rho \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} \\ (\lambda + G) \frac{\partial e}{\partial y} + G \nabla^2 v - \beta \frac{\partial T}{\partial y} + Y &= \rho \frac{\partial^2 v}{\partial t^2} \\ (\lambda + G) \frac{\partial e}{\partial z} + G \nabla^2 w - \beta \frac{\partial T}{\partial z} + Z &= \rho \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

式中 G 为切变模量； $\lambda = \frac{2\mu G}{1-2\mu}$ ，其中 μ 为泊松比； $e = \varepsilon_x + \varepsilon_y + \varepsilon_z$ ，为体积应变； u, v, w 为位移在三个坐标轴上的分量； $\beta = \frac{\alpha_T E}{1-2\mu} = \alpha_T (3\lambda + 2G)$ 为热应力系数， α_T 为线膨胀系数， E 为弹性模量； X, Y, Z 是体积力在三个坐标轴上的分量。

以上方程(1)和(2)构成了热振动非耦合动力学基本方程，加上初始条件和边界条件就形成了热振动问题的数学抽象。该理论忽略热传导方程中的耦合项，考虑惯性项，即先根据方程(1)加上热初始条件和边界条件计算结构瞬态温度场，然后根据方程(2)计算结构的瞬态响应。

2.2 系统求解方程

由以上可知热振动问题的实质是非耦合动力学问题，其理论基础为公式(1)和(2)，结合实际情况，可引入阻尼项，推导得到温度场在内的动力学方程，即系统的求解方程^[7](又称运动方程)：

$$\ddot{\mathbf{M}}(t) + \dot{\mathbf{C}}(t) + \mathbf{K}(t) = \mathbf{F}(t) + \mathbf{Q}(t) \quad (3)$$

式中 $\ddot{\mathbf{a}}(t)$ 和 $\dot{\mathbf{a}}(t)$ 分别是系统的节点加速度向量和节点速度向量； \mathbf{M} 、 \mathbf{C} 、 \mathbf{K} 、 $\mathbf{F}(t)$ 、 $\mathbf{Q}(t)$ 分别是系统的质量矩阵、阻尼矩阵、刚度矩阵、节点载荷向量和温度荷载向量，它们分别由各自的单元矩阵和向量集成：

$$\mathbf{M} = \sum_e \mathbf{M}^e, \quad \mathbf{K} = \sum_e \mathbf{K}^e, \quad \mathbf{C} = \sum_e \mathbf{C}^e, \quad \mathbf{F} = \sum_e \mathbf{F}^e, \quad \mathbf{Q} = \sum_e \mathbf{Q}^e$$

式中 $\mathbf{M}^e = \int_{V_e} \rho N^T N dV$ 、 $\mathbf{K}^e = \int_{V_e} \mathbf{B}^T \mathbf{D} \mathbf{B} dV$ 、 $\mathbf{C}^e = \int_{V_e} \mu N^T N dV$ 分别为单元质量矩阵、单元刚度矩阵、单元阻尼矩阵， N 为形函数矩阵， \mathbf{B} 是几何矩阵， \mathbf{D} 是弹性矩阵； $\mathbf{F}^e = \int_{V_e} \rho N^T f dV + \int_{S_{\delta^e}} \mathbf{N}^T T dS$ 、 $\mathbf{Q}^e = \int_{V_e} \mathbf{B}^T \mathbf{D} \boldsymbol{\varepsilon}_0 dV$ 分别为单元载荷向量和单元温度载荷向量， $\boldsymbol{\varepsilon}_0 = \mathbf{A}[(T(t) - T_0)]$ 为温度应变向量， $\mathbf{A} = [\alpha_{xx} \quad \alpha_{yy} \quad \alpha_{zz} \quad \alpha_{xy} \quad \alpha_{yz} \quad \alpha_{zx}]^T$ 为热膨胀系数向量。

以上表明，结构内部变化的温度场可以形成温度载荷 $\mathbf{Q}(t)$ ，结构在 $\mathbf{Q}(t)$ 以及 $\mathbf{F}(t)$ 的作用下会发生动力学响应，在没有初始扰动和其他外力 $\mathbf{F}(t)$ 的情况下，变化的温度场是结构发生动力学响应的原因。同时，结构是否会发生较为明显的动力学响应还与结构本身的力学特性有关。

3 星载可展开天线热振动分析

3.1 计算模型及工况

根据非耦合动力学理论,采用有限元法,以图1所示的铰接肋天线为例对星载可展开天线进行热振动计算。天线口径15m,由支撑杆、肋、拉索、网面构成。支撑杆和肋材料为铝合金,拉索材料为碳纤维,网面材料为钼丝。根据其力学特性,支撑杆与肋采用梁单元,拉索采用杆单元,网面采用膜壳单元建模。

该天线一阶固有频率为1.384Hz,周期 $\tau=0.723$ s,取一温度冲击模拟热动力荷载对天线进行热振动计算,温度冲击如图2所示,结构初始温度为0℃;0~ τ 为半正弦波温度冲击,幅值50℃; τ ~4 τ 卸载,温度为0℃。结构阻尼为瑞利(Rayleigh)阻尼,质量阻尼系数为 $\alpha=0.621$,刚度阻尼系数 $\beta=0.004$ 。同时,按照一般静态热变形计算方法计算结构静态变形与应力,与热振动计算结果进行对比。

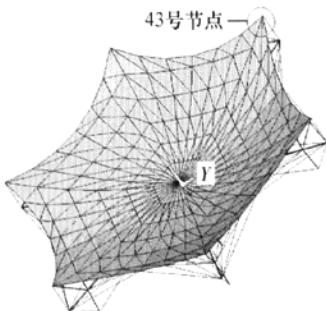


图1 铰接肋天线计算模型
Fig. 1 Model of deployable antenna

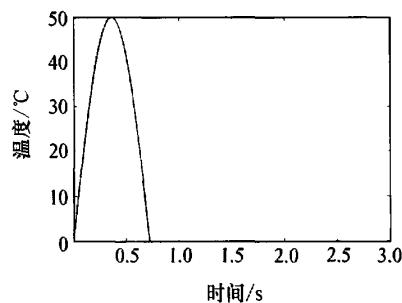


图2 温度冲击示意图
Fig. 2 Thermal shock

3.2 热振动分析

(1) 热振动位移与应力特性

取模型网面上一角点为观察点,节点号为43。该模型43号节点x,y,z方向热振动动态位移分别如图3~5中实线所示,静态位移如图中虚线所示。由图可知,热振动动态位移峰值明显大于静态峰值,为便于比较,表1给出了动态位移峰值与静态位移峰值的比较。在温度冲击阶段,位移振动较大,随后振幅逐渐减小,位移特性趋向于静态解。43号节点等效应力如图6所示,静态最大等效应力为14237Pa,动态最大等效应力为20162.2Pa,动态最大等效应力与静态最大等效应力的比值为1.416,动态应力明显大于静态应力,应力特性逐渐趋向于静态解。

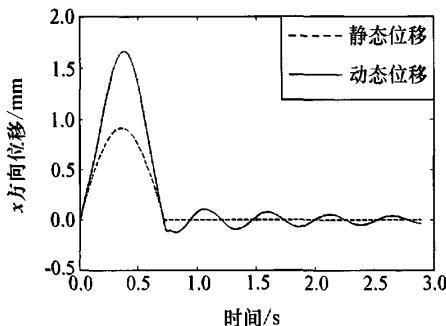


图3 43号节点x方向位移图
Fig. 3 x-axis displacement of node 43

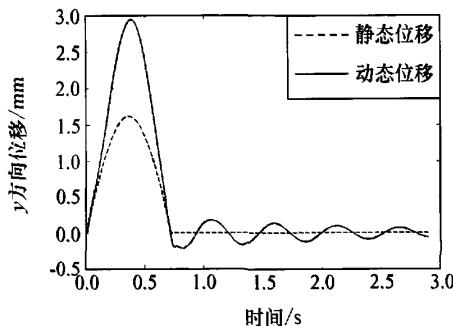


图4 43号节点y方向位移图
Fig. 4 y-axis displacement of node 43

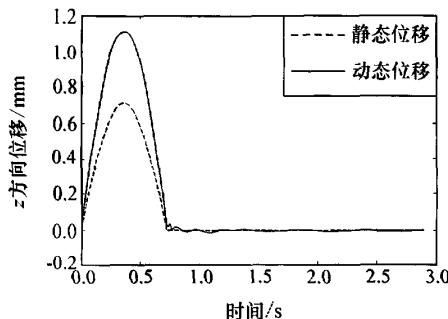


图 5 43号节点 z 方向位移图
Fig. 5 z -axial displacement of node 43

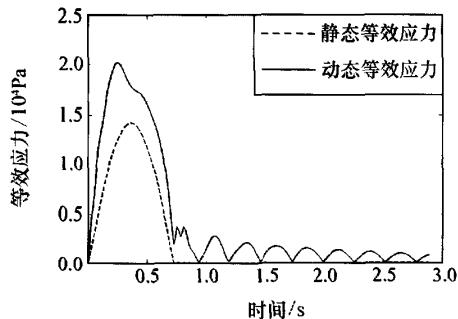


图 6 43号节点等效应力图
Fig. 6 Equivalent stress of node 43

表 1 动静峰值位移比较
Tab. 1 Comparison of the dynamic and static displacement of the peak

位移方向	z 方向	y 方向	z 方向
动态位移峰值/mm	1.663	2.939	1.113
静态位移峰值/mm	0.915	1.621	0.709
动态/静态	1.817	1.813	1.570

(2) 热振动天线形面精度特性

温度冲击下的热振动将导致天线形面精度误差(RMS)，由图7可知热振动动态RMS峰值为1.277mm，静态RMS峰值为0.805mm，热振动动态RMS峰值为静态RMS峰值的1.586倍。在整个时间历程中，RMS振动主要发生在温度冲击阶段，随着时间的推移迅速衰减到静态解。

4 结束语

1) 总结了非耦合动力学理论及有限元方法求解热振动问题的计算方程式。应用该方法可使用有限元软件ANSYS进行热振动分析，算例表明，对于星载可展开天线进出地球阴影，温度急剧变化，该分析方法是必要的。

2) 在时间历程中，热振动主要集中于温度冲击阶段，热振动响应明显大于静力学响应。由于热振动导致天线结构发生变形，从而导致天线形面精度误差，形面精度误差由急剧振动趋于静态特性，但温度冲击阶段热振动导致的形面精度误差较大，应引起重视。

参 考 文 献

- [1] CHEN X Q, MOHAN R V, TAMMA K K. Instantaneous response of elastic thin-walled structures to rapid heating [J]. International Journal for Numerical Methods in Engineering, 1994, 37 (14): 2389-2408.
- [2] JOHNSTON D JOHN, THORNTON A EARL. Thermally induced dynamics of satellite solar panels [J]. Journal of Spacecraft and Rocket, 2000, 37 (5) : 604-613.
- [3] AL HUNITI NASER S, AL NIMR M A, MEQDAD M M. Thermally induced vibration in a thin plate under

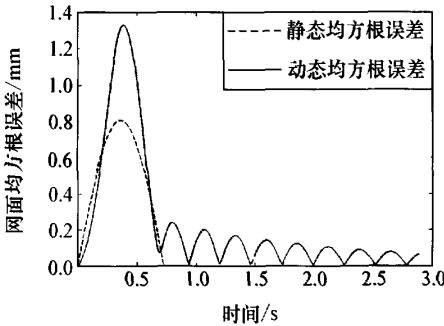


图 7 网面均方根误差对比
Fig. 7 Time history of RMS for antenna

- the wave heat conduction model [J]. Journal of Thermal Stresses, 2003 (26): 943-962.
- [4] EL MAGHRABY NASSER M, YOSERF HAMDY M. State space approach to generalized thermoelastic problem with thermomechanical shock [J]. Applied Mathematics and Computation, 2004 (156): 577-586.
- [5] FOSTER L CARLTON, TINKER L MICHAEL. Solar-array-induced disturbance of the hubble space telescope pointing system [J]. Journal of Spacecraft and Rocket, 1995, 32 (4) : 634-644.
- [6] 安翔. 大型空间结构热扰动机理研究[D]. 西安: 西北工业大学, 2001.
AN XIANG. Study on thermally induced disturbance of large space structures [D]. Xi'an; Northwestern Polytechnical University, 2001.
- [7] 杨玉龙. 空间展开桁架结构设计理论与热控制研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2007.
YANG YULONG. Structure design theory and thermal control study for space deployable truss structure [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2007.

作者简介

刘 劲 1985 年生, 2011 年获西安电子科技大学机械设计及理论专业硕士学位, 主要研究方向为星载电子设备结构冲击振动与热结构耦合。

Numerical Analysis of Thermal Induced Vibration for Deployable Antenna

Liu Jin Zhu Minbo Cao Gang

(School of Electronical and Machanical Engineering, Xidian University, Xi'an 710071)

Abstract Thermal induced vibration of a deployable antenna was analyzed by the non-coupling dynamics and finite element method. Thermal dynamic forces was simulated by a half sine wave thermal shock. Typical model node displacement and stress, as well as root mean square of antenna induced by thermal dynamic forces were discussed. The results show that thermal induced vibration of antenna occurs when thermal dynamic forces greatly change. Meanwhile, the dynamic response of thermal induced vibration is significantly greater than that of the static response.

Key words Root mean square Thermal shock Thermally induced vibration Deployable antenna Satellite

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>