

# 导弹天线罩静热联合试验及其热强度分析

王端志 高万镛

(北京强度环境研究所,北京,100076)

**摘要:** 本文介绍了导弹天线罩地面模拟试验的技术与方法,并采用有限元法求解某型号天线罩结构在热流与机械载荷的作用下,结构内部随时间变化的温度场及应力场。计算时主要是依据模拟试验中所施加的边界条件和载荷条件进行的。

**关键词:** 天线罩;热试验;热强度;有限元法

中图分类号:V416.4 文献标识码:A 文章编号:1006-3919(2001)03-0001-09

## 1 前言

随着型号的不断发展,导弹以高马赫数在大气层中飞行时,气动加热问题日趋严重,结构热问题越来越受到人们的重视,“热环境”已作为结构设计的外载荷条件列入了设计规范。结构热试验作为研究结构热问题的有效方法,目前已成为弹(箭)结构设计、强度及可靠性分析、产品性能检验和鉴定的重要手段之一。但是由于飞行器的飞行环境十分复杂,单纯地靠地面试验是不可能全真模拟这种环境条件,只能在简化的基本上近似模拟,加上试验本身的误差,不可避免地要借助多种手段。为配合热结构试验的研究,印证试验的合理性以及弥补试验的不足,从而促进结构热试验技术向更高的水平发展,对试验件进行理论分析与计算工作是至关重要的。同时,对试验中的问题进行准确地分析和计算也是开发计算机仿真技术的必要前提,仿真技术与结构热试验技术的密切结合,必将成为解决结构热问题很有前途的发展方向。

天线罩结构是导弹型号设计、研制阶段的重要部件,由于飞行时天线罩受气动加热较为严重,机动飞行时要承受复杂的气动载荷以及为了透过电磁波采用非金属材料而承载能力较差等原因,其强度、刚度是否合格直接影响到型号的设计定型。目前研制单位一般要进行热强度试验来考核其是否合格。

## 2 静热联合试验

结构热试验是以设计部根据弹道和气动加热理论计算的边界条件为依据,进行试验设

---

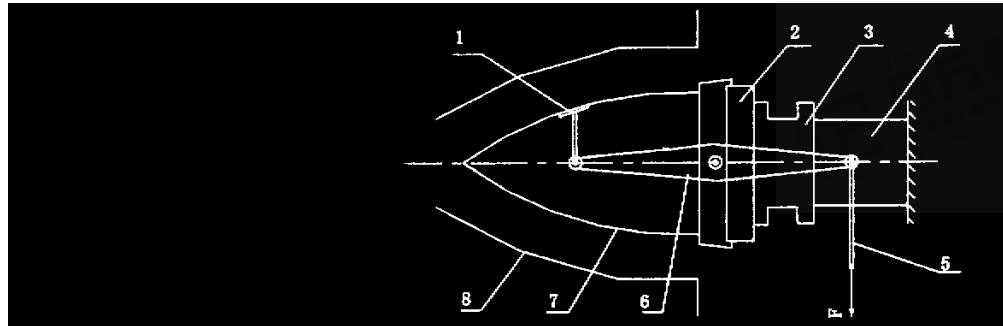
收稿日期:2000-12-04

作者简介:王端志,男,1972年6月生,汉族,江苏连云港人,硕士,工程师(100076)北京强度环境研究所;

高万镛,男,1942年3月生,汉族,北京人,研究员(100076)北京强度环境研究所。

万方数据

计。天线罩的静热联合试验包括高温热冲击试验、静力载荷试验、静热联合试验。试验安装示意图如图 1 所示。



根据设计部给定的数据和要求,采用温度控制进行加热。由于天线罩结构各个部位的气动加热状态不同,各部位表面所吸收的热流密度呈非均匀分布状态,要在大面积上实现一个非均匀分布的热场,最有效的方法是把整个加热器进行离散化控制,即将整个加热器划分为多个温区。理论上讲,温区划分得愈多,加热模拟的效果愈真实,在可能的条件下应当遵循“区小域多”的原则,但与此同时增加了设计和试验的复杂程度,在当前条件下难于实现。因此在天线罩静热联合试验中主要根据试验大纲的要求优化设计合理布局,将加热器划分六个控温区,并且两两对应一致。控温点分别位于天线罩上、中、下三段的典型点上,三点控温数据如表所示。由于外表面需要进行加热,所以机械载荷的施加采用内加载,加载头用橡胶缠绕起缓冲作用,以施加面力的方式防止集中力对试件产生破坏。

天线罩结构近似于锥体(具体结构见图 1),主体是陶瓷段,底部通过胶层与殷钢环连接。用竖直的安装方式将天线罩固定在铸块上。采用碘钨石英灯辐射加热器进行加热,加热器由两个锥状半圆柱合并而成,共分上、中、下三排灯,分别对应六个温区。通常控制方式主要有热流控制、温度控制二种方式,其中以热流控和温度控较为常见<sup>[1]</sup>。热流控一般由设计部提供热壁热流数据,试验前要作损失项与位置系数的修正,中间环节较多,相对麻烦,但比较成熟。在此试验中,由于只给定边界温度曲线,所以采用温度控制方式,并保证加热与机械载荷在时域、空间域上合理叠加<sup>[2]</sup>。

### 3 相关理论与方程求解

一般的非线性瞬态热传导方程是:

$$\operatorname{div}(K \operatorname{grad} T) + \dot{q} = \rho C p \dot{T} \quad (1)$$

在直角坐标系中表示为:

$$\frac{\partial}{\partial x} (k_x \frac{\partial T}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y} (k_y \frac{\partial T}{\partial y}) + \frac{\partial}{\partial z} (k_z \frac{\partial T}{\partial z}) + \dot{q} = \rho C p \frac{\partial T}{\partial t} \quad (2)$$

边界条件:

$$\text{在 } S_1 \text{ 边界上} \quad t > 0 \quad T = T(x, y, z, t) \quad (3)$$

$$\text{在 } S_2 \text{ 边界上} \quad t > 0 \quad q = q_r + q_c + q_s \quad (4)$$

其中  $q_r$  为辐射换热热流,  $q_c$  为对流换热热流,  $q_s$  为给定热流。一般来说,  $q_r, q_c$  的表达式

分别为：

$$q_r = \epsilon\sigma(T^4 - T_\infty^4) \quad q_c = h(T - T_\infty)$$

式中  $T_\infty$  为周围环境温度,  $h$  为对流换热系数

初始条件为  $T(x, y, z, 0) = T_0, t = 0, (x, y, z) \in \Omega$

利用有限元素法对导热微分方程的边值问题进行求解,一般有两种解法,一种对其直接求解,选取试探函数利用加权余数法。另一种是利用微分方程的边值问题与泛函求极值问题的等价性原理,即变分有限元法<sup>[3]</sup>。

与方程(2)及边界条件(3)、(4)对应的泛函可写成:

$$I = \frac{1}{2} \iiint_v [k_x(\frac{\partial T}{\partial x})^2 + k_y(\frac{\partial T}{\partial y})^2 + k_z(\frac{\partial T}{\partial z})^2 + 2(\dot{q} + \rho C p \frac{\partial T}{\partial t})T]dv + \iint_s qTds + 0.5 \iint_s h(T^2 - T_\infty T)ds \quad (5)$$

将求解域离散成  $ne$  个单元,每个单元有  $r$  个节点,任意一个单元或子域记作  $D_e$ ,即  $D = \sum de$ ,则每个单元上的泛函为

$$I^e = \frac{1}{2} \iiint_{D_e} [k_x(\frac{\partial T^e}{\partial x})^2 + k_y(\frac{\partial T^e}{\partial y})^2 + k_z(\frac{\partial T^e}{\partial z})^2 + 2(\dot{q} + \rho C p \frac{\partial T^e}{\partial t})T^e]dv + \iint_{se} qT^eds + 0.5 \iint_{se} h(T^{e^2} - T_\infty T^e)ds \quad (6)$$

每个单元内,温度函数可表示为

$$T^e(x, y, z, t) = \sum_{i=1}^r N_i T_i = [N][\hat{T}]^e \quad (7)$$

又由于  $I = \sum_{e=1}^{ne} I^e$ ,  $\frac{\partial I}{\partial T^e} = \frac{\sum_{e=1}^{ne} \partial I^e}{\partial T^e} = \sum_{e=1}^{ne} \frac{\partial I^e}{\partial T^e} = 0$  可推导出有限元列式

$$[K][\hat{T}] + [N] \frac{\partial [\hat{T}]}{\partial t} = [P] \quad (8)$$

式中  $[K]$ ——整体温度刚度矩阵

$[N]$ ——整体变温矩阵

$[\hat{T}]$ ——节点温度矩阵

求解非定常温度场时,还要考虑时间坐标,一般采用向后差分法。对于任意时刻  $t$  有

$$[K][\hat{T}]_t + [N](\frac{\partial [\hat{T}]}{\partial t})_t = [P]_t$$

在求解瞬态温度场时,一般已知的是初始条件和边界条件,而把  $(\frac{\partial [\hat{T}]}{\partial t})_t$  项用差分法展开<sup>[4]</sup>,则

$$(\frac{\partial [\hat{T}]}{\partial t})_t = \frac{[T]_t - [T]_{t-\Delta t}}{\Delta t}$$

所以有 万方数据

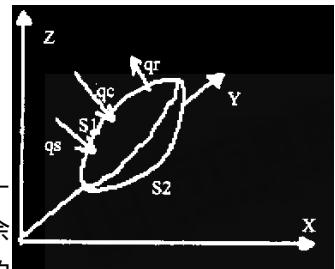


图 2

$$([K] + \frac{1}{\Delta t} [N])[\hat{T}]_t = \frac{1}{\Delta t} [N][[\hat{T}]_{t-\Delta t} + [P]_t] \quad (9)$$

式中,  $[\hat{T}]_{t-\Delta t}$  为已知的初始温度场, 由此求出  $t$  时刻的温度场  $[\hat{T}]_t$ , 然后再用  $t + \Delta t$  替代上式中的  $t$ , 就可求出  $t + \Delta t$  时刻的温度场。照此递推, 可以求出时间步长为  $\Delta t$  的各个时刻的温度场。

计算出温度场分布后, 可以计算罩体的应力场<sup>[5]</sup>。根据最小位能原理可推导出  $[K][\delta] = [P_T] + [P_T]$  其中

$$[P_T] = \int_v [T(x, y, z, t)] [B]^T [D] [\alpha] dv$$

$$[K] = \int_v [B]^T [D] [B] dv$$

$[B]$ —— 几何矩阵,  $[D]$ —— 弹性矩阵

又根据应力、应变和位移之间的关系

$$[\varepsilon] = [B][\delta], [\sigma] = [D]([\varepsilon] - [T][\alpha]) \quad (10)$$

即可求出应力  $[\sigma]$ 。

## 4 某型号天线罩联合试验的计算结果与试验分析

### 4.1 天线罩有限元模型

天线罩结构为陶瓷材料的旋转壳体, 根部由胶层与连接环粘结。在建立模型时均采用六面体单元, 在径向(厚度方向)共分四层。在划分有限元网络时, 考虑到模型结构长径比很大及局部复杂性, 同时为了使连接部位单元节点合并进行的连续协调, 因此根据模型特点对其分区处理, 并在局部复杂处增大单元划分密度。模型图见图 3。

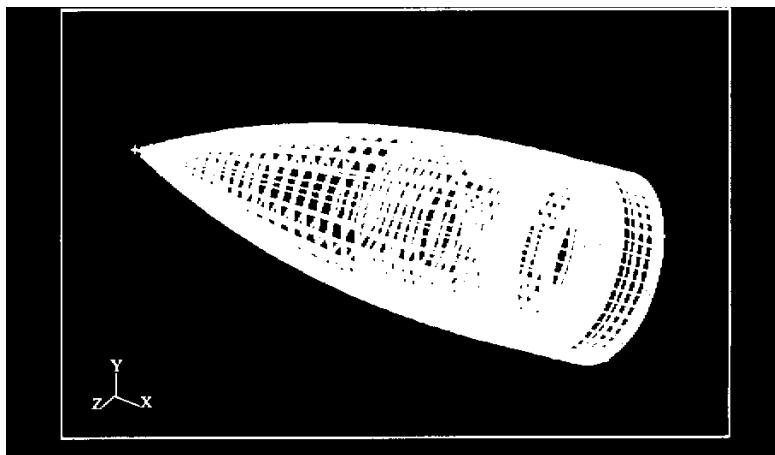


图 3 天线罩的有限元模型图

#### 4.2 静载作用下罩体应力场计算

在计算应力时,殷钢环底部一段为固定约束,在罩体内壁作用点周围的一小面上施加面力,力的大小是根据设计部所给的气动载荷数据换算而来。试验前首先对天线罩在此载荷作用下、常温条件时的应力场进行了计算,设计载荷下应力分布如图 4,计算的目的除了对罩体进行强度分析外,也为加载头的合理设计提供了理论依据,保证试验的顺利进行。

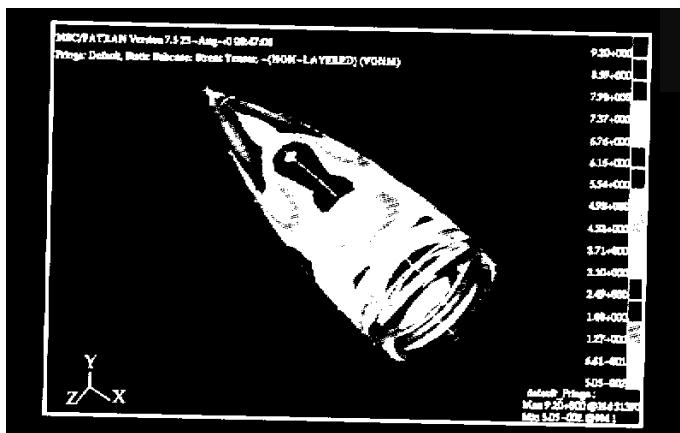


图 4 静力条件下陶瓷段的应力分布图

#### 4.3 热冲击试验条件下罩体的温度场与应力场

试验时将试件分为六个温区,且两两对应。即已知第一类边界条件(3)  $T_1, T_2, T_3$ 。计算时,考虑到罩体内表面与空气接触,由于罩内空气导热系数和势容较小,所以计算中忽略天线罩内空气所吸收的热量,按绝热边界条件处理,这样简化对计算结果的影响很小,较符合实际情况。

图 5~图 11 分别给出了天线罩结构在 40 秒、1410 秒时温度场、应力场分布图以及罩体在 300 秒前各层及内外表面各个温区随时间变化的温度曲线。图 12 为静热联合作用下的应力分布。

其中图 10、图 11 中黑线( $B, D$ )为外表面施加温度随时间变化曲线,红线( $C, E$ )为试验时传感器测量值,绿线( $H, I$ )为计算值。最大误差小于 8%,表明有限元法求解结构温度场是十分有效和方便的计算方法。

#### 4.4 静热联合作用下天线罩结构的温度场与应力场

静热联合实际上考虑到将热流与机械载荷在时域和空间域上合理叠加。此时罩体由于受到气动力作用而有微小变形,对温度场分布影响不大,但由于受到二者联合作用,对应力场则会产生较大影响。图 12 为 1410 秒时静热联合作用下应力分布图。

由计算可以看出当结构既承受热载又承受机械载荷时,最大应力值明显增大(静载时  $\sigma_{max} = 9.2 \text{ MPa}$ , 联合作用下  $\sigma_{max} = 13.2 \text{ MPa}$ )。

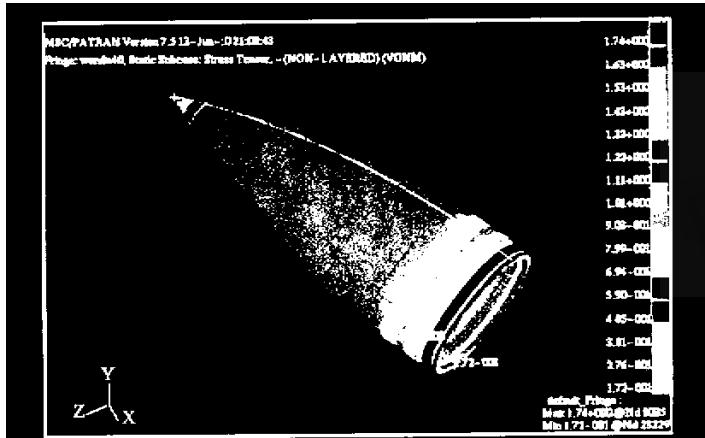


图 5 40 秒时温度引起的热应力云图

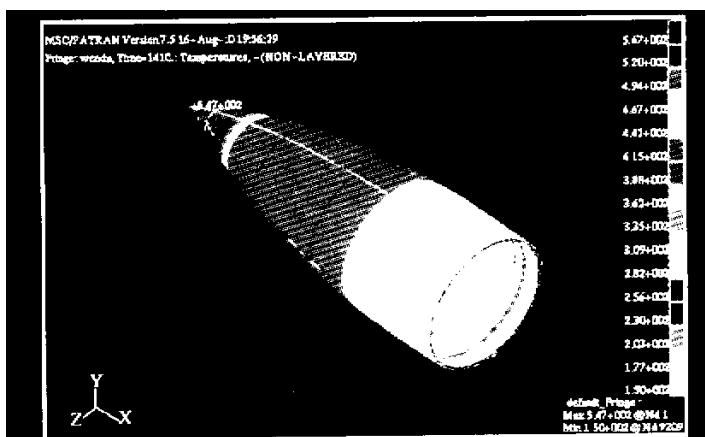


图 6 1410 秒时温度分布云图

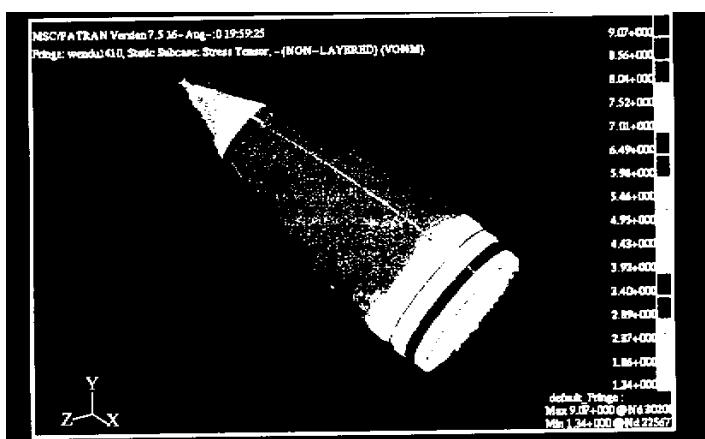


图 7 1410 秒时温度引起的热应力云图

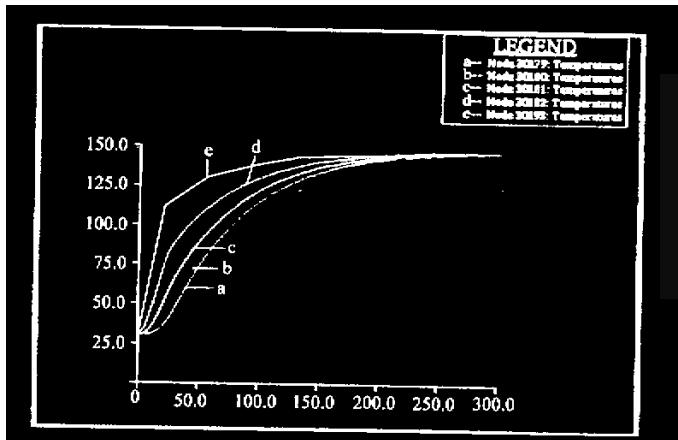


图 8 300 秒前第一温度区各层节点温度随时间变化曲线

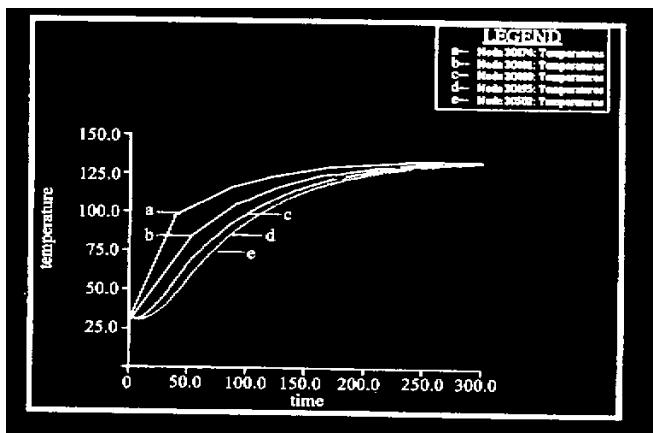


图 9 300 秒前第二温度区各层节点温度随时间变化曲线

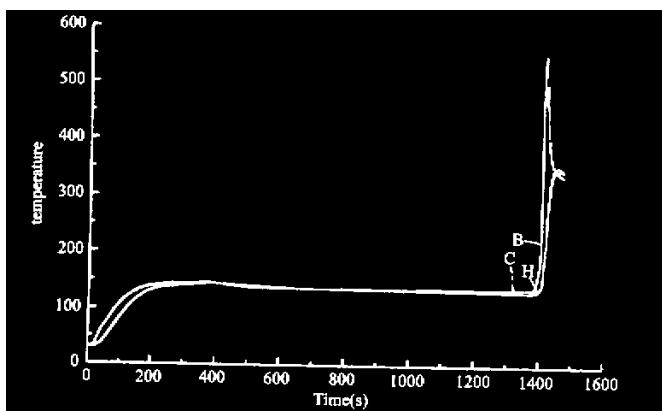


图 10 第一温度区计算值与试验测量值对比曲线  
万方数据

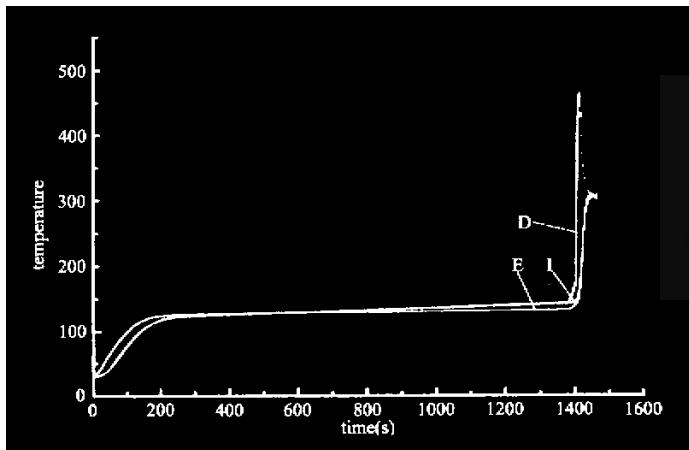


图 11 第二温度区计算值与试验测量值对比曲线

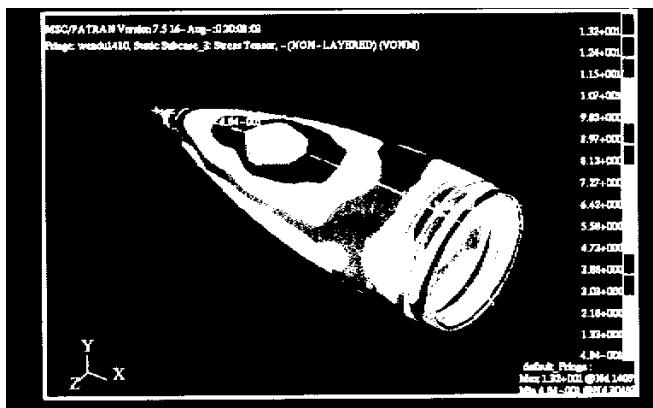


图 12 1410 秒时静热联合作用下应力分布云图

## 5 结论

本文对天线罩结构承受高温载荷的温度场、热应力场及静热联合作用的应力场分别进行了分析计算,取得了良好的计算结果。温度场的计算值与试验测量值吻合的很好。由于本试验是检定性试验,未做应变测量,无法将计算应力与实测结果进行比较。并且目前非金属高温应变测量难度大、精度差,是急需解决的技术问题。作者认为,由于有限元法计算的合理性及准确性,只要天线罩结构的材料力学参数准确,计算结果还是有很大的可信度,对试验的实施能够起到很好的预示作用。

## 参考文献:

- [1] 张钰,张伯泉.结构热试验技术[M].北京:宇航出版社,1993

- [2] GF-A0015558G, 王守礼. 中国国防科学技术报告, 低空超音速导弹天线罩静热联合强度研究[R]. 北京机电工程研究所, 1990-10
- [3] 孙菊芳主编. 有限单元法及其应用[M]. 北京: 航空航天大学出版社, 1990
- [4] 孔详谦. 有限单元法在传热学中的应用[M]. 北京: 科学出版社, 1986
- [5] 王瑁成, 邵敏. 有限单元法基本原理和数值方法[M]. 北京: 清华大学出版社, 1997

## 符 号 表

$T$ —— 温度(K)	$k$ —— 导热系数(W/(m · K))
$\rho$ —— 密度(kg/m <sup>3</sup> )	$\alpha$ —— 膨胀系数(1/K)
$C_p$ —— 比热(J/(kg · K))	$h$ —— 换热系数(W/(m <sup>2</sup> · K))
$\epsilon$ —— 黑度系数(应变)	$\sigma$ —— 斯蒂芬常数(应力)

# Antenna Cover Structure Thermal Test and Analysis Under Combined Thermal and Mechanical Loads

WANG Duan-zhi GAO Wan-yong

(Beijing Institute of Structure and Environment Engineering, Beijing, 100076)

**Abstract:** Thermal problem of structure has critical effect on the performance of missile and is being studied heavily. As the flight environment of the aircraft is very complicate, it is essential to calculate and analyze the thermal test.

In this paper, using structure thermal test method, the antenna cover was studied and the temperature and strain of the critical points were measured. Using the finite element method, the temperature and strain field, which changed with time in the structure, was calculated while the antenna cover was suffering high temperature thermal shock, heat flow and mechanical loading.

**Key words:** Antenna cover; Structure thermal test; Thermal strength; Finite element method(FEM)

## 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](http://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](http://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](http://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>