

# 玻璃钢定向器热弹耦合动态特性分析\*

张中利<sup>1</sup>, 周铭丽<sup>1</sup>, 党玉功<sup>1</sup>, 于存贵<sup>2</sup>

(1 河南科技大学车辆与动力工程学院, 河南洛阳 471003;

2 南京理工大学机械工程学院, 南京 210094)

**摘 要:**为掌握玻璃钢定向器在火箭弹和燃气流作用下的动态特性情况,采用瞬态有限元法对某玻璃钢定向器进行真实工况下热弹耦合性能的数值仿真与分析,获得了玻璃钢定向器热弹动态特性和火箭弹管内运动与作用情况。结果表明某玻璃钢定向器在开始阶段产生的响应应力和应变较大,定向器后端产生的响应应力和变形位移比前端大;燃气流热载荷对玻璃钢定向器的动态性能产生一定影响,其主要影响是在火箭弹出定向器以后,使定向器产生较大热变形。

**关键词:**玻璃钢定向器;热弹耦合;动态特性;有限元法

**中图分类号:**TJ393;TJ013 **文献标志码:**A

## Dynamic Characteristic Analysis of Thermal-elastic Coupling for Glass-steel Directional Tube

ZHANG Zhongli<sup>1</sup>, ZHOU Mingli<sup>1</sup>, DANG Yugong<sup>1</sup>, YU Cungui<sup>2</sup>

(1 School of Vehicle and Power Engineering, Henan University of Science and Technology, Henan Luoyang 471003, China;

2 School of Mechanical Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China)

**Abstract:** In order to master the dynamic characteristic of glass-steel directional tube under the action of rocket projectile and high temperature burning gas jet flow. The numerical simulation and analysis of thermal-elastic coupling performance under true work condition for a certain glass-steel directional tube with instantaneous state finite element method are done. So the dynamic characteristic of thermal-elastic coupling of glass-steel directional tube and the states of movement and interaction of rocket in directional tube are gained. The results indicate that the response stress and strain of glass-steel directional tube are bigger at the start stage of launch, and the response stress and deformation displacement of directional tube end is bigger than forepart, the thermal loads of burning gas jet flow bring some influences to the dynamic performances of glass-steel directional tube, but the main influence is after rocket sliding out directional tube, which cause directional tube producing more thermal deformation.

**Keywords:** glass-steel directional tube; thermal-elastic coupling; dynamic characteristic; finite element method

## 0 引言

火箭武器的玻璃钢定向器除受到火箭弹定心部的接触碰撞作用及发射架孔的约束作用外,还受到火箭弹发动机产生的燃气流的冲刷烧蚀,处于燃气流瞬间高温作用的温度场中,为结构载荷和热载荷的共同作用,其内部产生结构应力的同时还产生温度应力<sup>[1]</sup>,呈现出热弹耦合的复杂力学特性。因而,研究玻璃钢定向器在火箭弹和燃气流作用下的动态性能情况,可更好了解和掌握玻璃钢定向器的特性与使用状况,对结构和热性能设计有重要参考价值。

由于玻璃钢定向器的传热为非线性的热传导问

题,分析求解复杂困难,而有限元法便于处理各种非线性、材料局部物性变化和各種复杂边界问题<sup>[2]</sup>,因而文中用瞬态动力有限元法建立某火箭炮弹管作用的数值仿真模型,进行真实工况下玻璃钢定向器热弹耦合特性的数值计算与分析。

## 1 热弹耦合基本方程

热弹耦合问题包括考虑结构变形的热传导问题和考虑惯性效应的热弹性问题。

如果考虑到结构应变对热传导产生影响,则热力学第一定律表示为:

$$Qdt = dU - (\sigma_x d\epsilon_x + \sigma_y d\epsilon_y + \sigma_z d\epsilon_z) \quad (1)$$

\* 收稿日期:2009-03-13

作者简介:张中利(1969-),男,山东兖州人,副教授,博士,研究方向:火箭发射动力学、结构动力学。

式中:  $Q$  为单位时间内被吸收的热量,  $U$  为物体的内能,  $\sigma_x d\epsilon_x + \sigma_y d\epsilon_y + \sigma_z d\epsilon_z$  表示机械力对应变所做的功。

根据热力学和传热学关系, 可导出热传导基本方程式:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( k_x \frac{\partial \varphi}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( k_y \frac{\partial \varphi}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( k_z \frac{\partial \varphi}{\partial z} \right) + \rho Q - \beta \rho_0 \frac{\partial e}{\partial t} = \rho c \frac{\partial \varphi}{\partial t} \quad (2)$$

式中:  $\varphi_0$  为物体初温;  $e = \epsilon_x + \epsilon_y + \epsilon_z$  为总应变;  $\beta$  为热应力系数;  $c$  为材料比热;  $\rho$  为材料密度。

方程式左边存在反映热和结构耦合的耦合项, 该耦合项以应变速度的形式出现, 对高速变形情况影响比较显著。

根据热弹性理论, 考虑结构温度效应的热弹性运动方程如下:

$$\left. \begin{aligned} (\lambda + G) \frac{\partial e}{\partial x} + G \nabla^2 u - \beta \frac{\partial \varphi}{\partial x} + X &= \rho \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} \\ (\lambda + G) \frac{\partial e}{\partial y} + G \nabla^2 v - \beta \frac{\partial \varphi}{\partial y} + Y &= \rho \frac{\partial^2 v}{\partial t^2} \\ (\lambda + G) \frac{\partial e}{\partial z} + G \nabla^2 w - \beta \frac{\partial \varphi}{\partial z} + Z &= \rho \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

式中  $\lambda$  和  $G$  为拉梅系数。

联立求解热传导方程(2)和热弹性基本方程(3), 即可求解耦合热弹性问题, 其中热传导耦合项和热弹性惯性项考虑了对耦合动力问题的影响<sup>[3]</sup>。

## 2 动态特性数值分析

### 2.1 数值求解模型建立

建立某火箭炮玻璃钢定向器的实体模型, 单元类型采用三维热、结构耦合单元, 材料参数为玻璃钢热复合材料, 密度  $\rho = 2100 \text{ kg/m}^3$ , 弹性模量  $E_1 = 1.42 \times 10^4 \text{ MPa}$ ,  $E_2 = 1.18 \times 10^4 \text{ MPa}$ ,  $E_3 = 0.85 \times 10^4 \text{ MPa}$ , 剪切模量  $G_{12} = 0.72 \times 10^3 \text{ MPa}$ ,  $G_{23} = 1.05 \times 10^3 \text{ MPa}$ ,  $G_{13} = 1.26 \times 10^3 \text{ MPa}$ , 泊松比  $\mu_{12} = 0.26$ ,  $\mu_{23} = 0.32$ ,  $\mu_{13} = 0.35$ , 纵向拉伸强度为  $263 \text{ MPa}$ , 纵向压缩强度为  $285 \text{ MPa}$ , 横向拉伸强度为  $326 \text{ MPa}$ , 横向压缩强度为  $208 \text{ MPa}$ , 垂直剪切强度为  $116 \text{ MPa}$ , 导热系数  $K_{11} = 0.54 \text{ W/m} \cdot \text{K}$ ,  $K_{22} = 0.54 \text{ W/m} \cdot \text{K}$ ,  $K_{33} = 0.32 \text{ W/m} \cdot \text{K}$ , 热膨胀系数  $\alpha_1 = 1.1 \times 10^{-5} / ^\circ\text{C}$ ,  $\alpha_2 = 1.1 \times 10^{-5} / ^\circ\text{C}$ ,  $\alpha_3 = 1.4 \times 10^{-5} / ^\circ\text{C}$ , 比热容  $C = 1420 \text{ J/kg} \cdot \text{K}$ <sup>[4]</sup>。

火箭弹定心部与定向器内壁间隙为  $0.4 \text{ mm}$ , 定义火箭弹前、中、后定心部表面与定向器内壁表面以

及火箭弹定向钮表面与定向器螺旋槽两侧壁表面的接触碰撞约束, 并考虑接触界面相对运动时的库仑摩擦力, 来模拟计算定向器与火箭弹的接触碰撞作用。再对定向器外壁 3 个支撑圆台处的节点自由度进行约束, 以表征发射架对定向器的固定支撑作用。

火箭弹发动

机的推力如图 1 所示, 作为已知力施加在火箭弹尾端表面, 闭锁装置的闭锁力经计算最大值为  $500 \text{ N}$ ,

闭锁作用时间为  $7.5 \text{ ms}$ 。根据管内燃气流场计算结果, 定向器轴向温度分布如图 2 所示, 将轴向温度分布值施加在定向器内壁各节点上, 对定向器进行瞬态传

热分析, 通过 APDL 和 FORTRON 语言编程衔接, 将传热分析结果中的 rth 文件读入, 该文件包含了定向器管体从内到外热传导过程中节点温度变化的数据结果, 在火箭弹作用过程中, 程序给管体相应各节点动态施加热载荷<sup>[5]</sup>。

### 2.2 结果分析

经计算知, 火箭弹刚开始启动时速度较慢, 后逐渐加速, 运动速度越来越大, 后定心部出定向器前管口的时间为  $89 \text{ ms}$ , 速度值为  $41 \text{ m/s}$ ; 火箭弹前、中、后 3 个定心部依次作用并滑过定向器内壁, 各作用最大值如图 3 所示分别为  $1882 \text{ N}$ 、 $2339 \text{ N}$ 、 $3400 \text{ N}$ , 定向钮作用并滑过螺旋

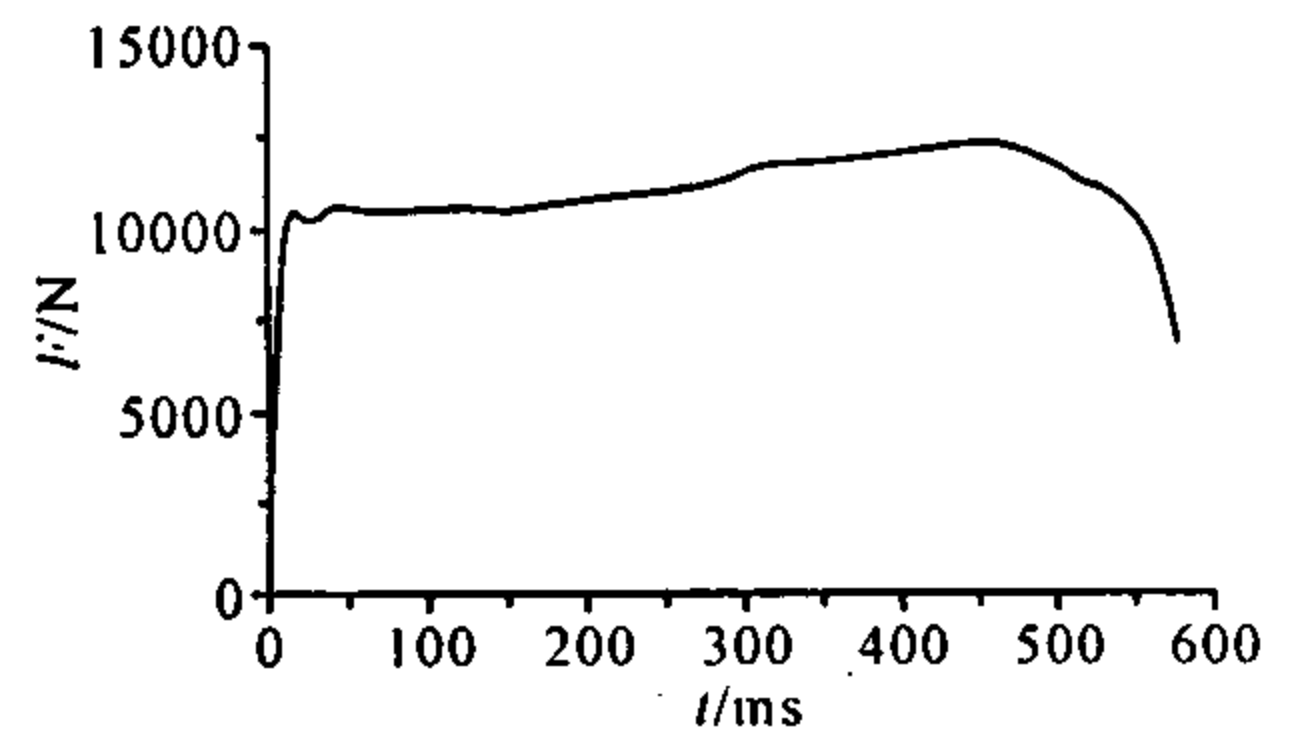


图1 火箭弹发动机推力曲线

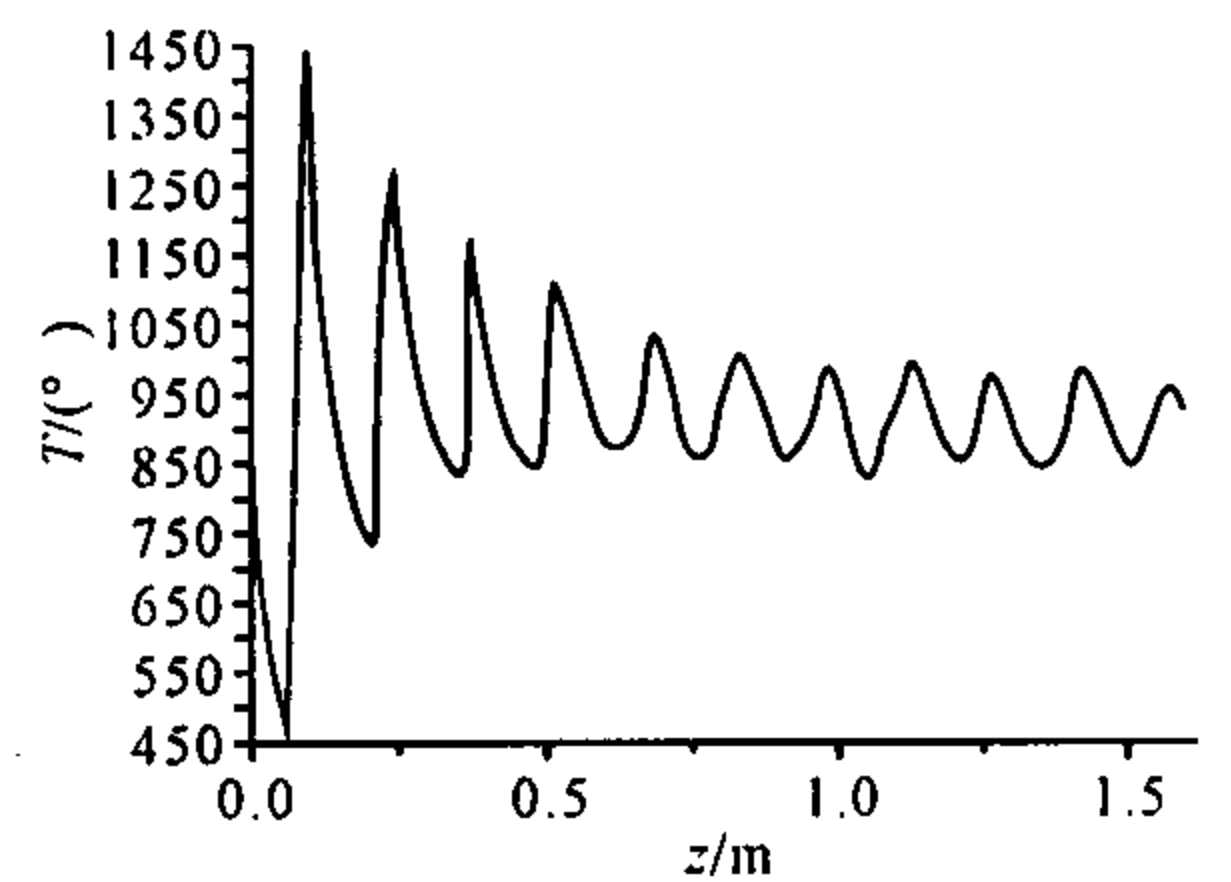


图2 沿定向器轴向的温度分布曲线

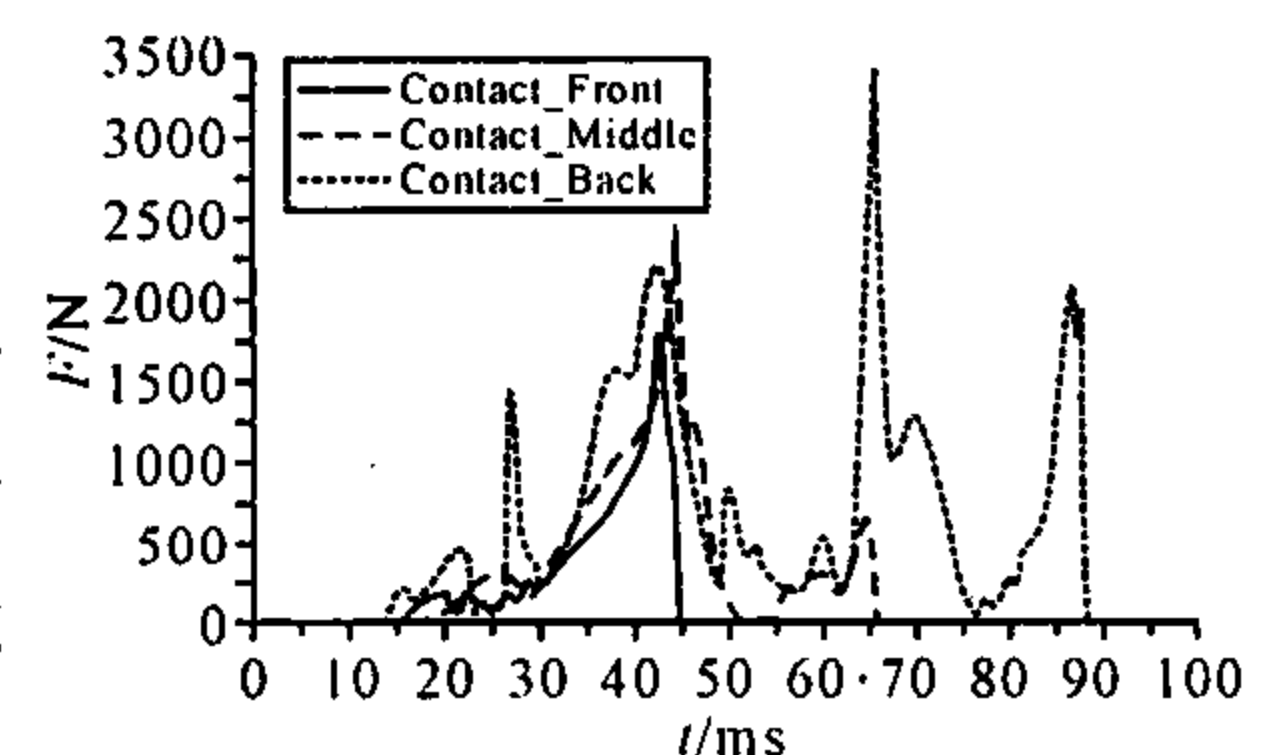


图3 前、中、后定心部碰撞作用力图

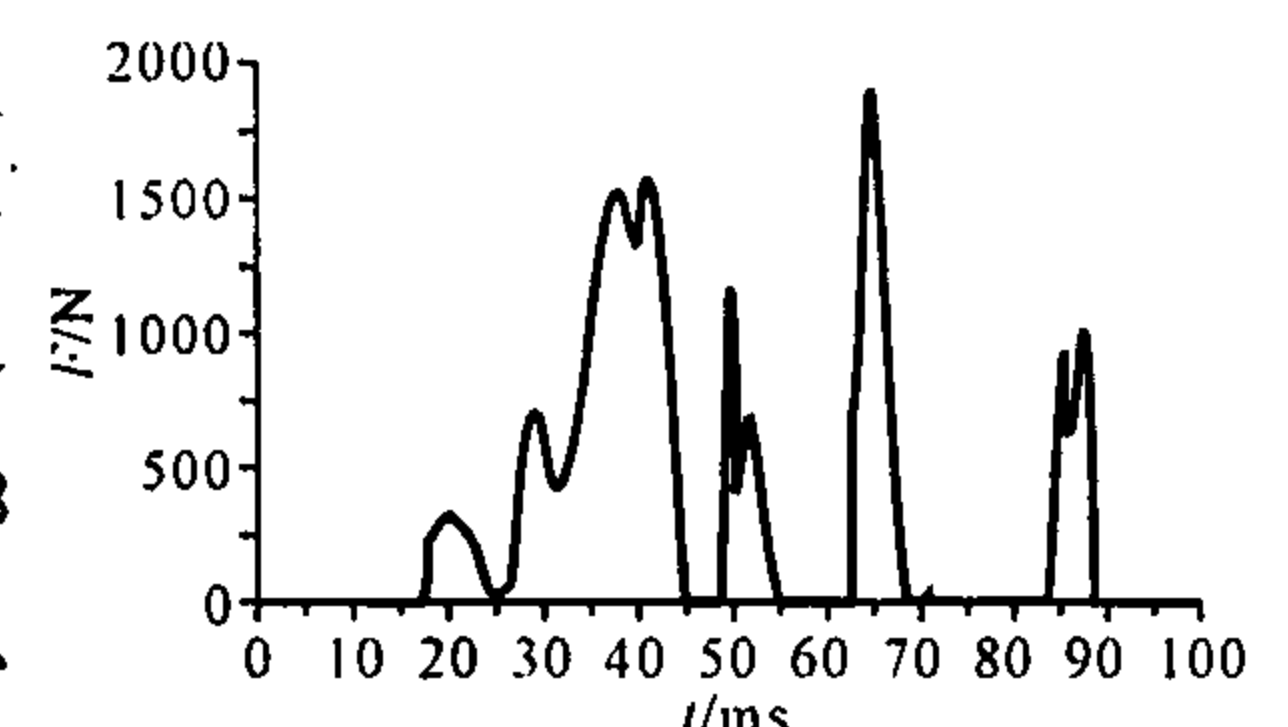


图4 定向钮碰撞作用力图

槽侧壁,对定向器产生接触碰撞作用,最大值如图 4 所示为 1906N;同时定向器内壁产生应力和变形,也反作用于火箭弹,影响火箭弹在管内的运动,二者是一个接触一分离一再接触的相互作用的复杂过程。

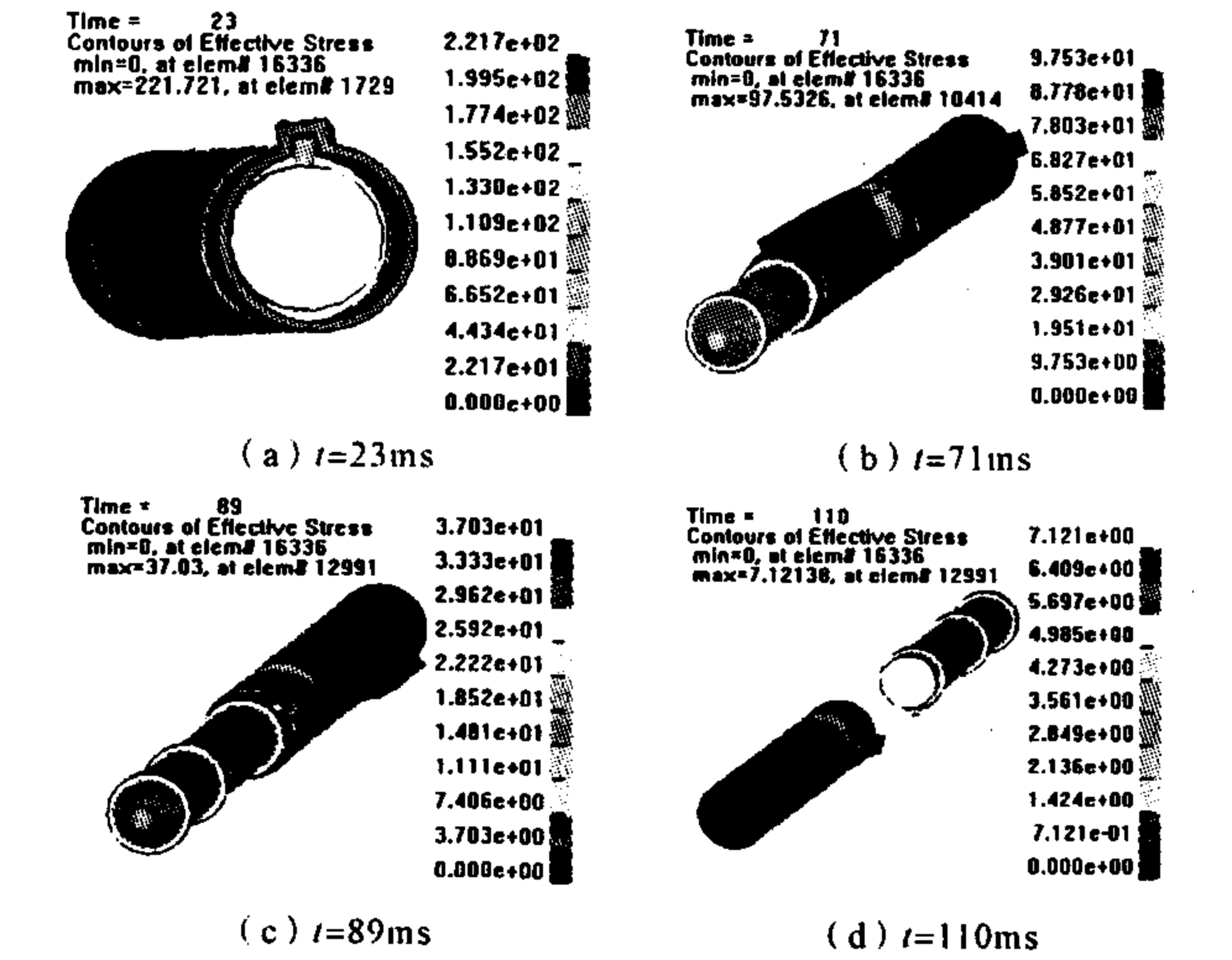


图 5 定向器应力显示的弹管作用过程图(MPa)

由图 5 部分时间点的弹管作用图和图 6 的最大应力曲线知,对玻璃钢定向器,受火箭弹运动时的接触碰撞和热载荷共同作用,其内部的应力和应变呈现无规律性的变化,

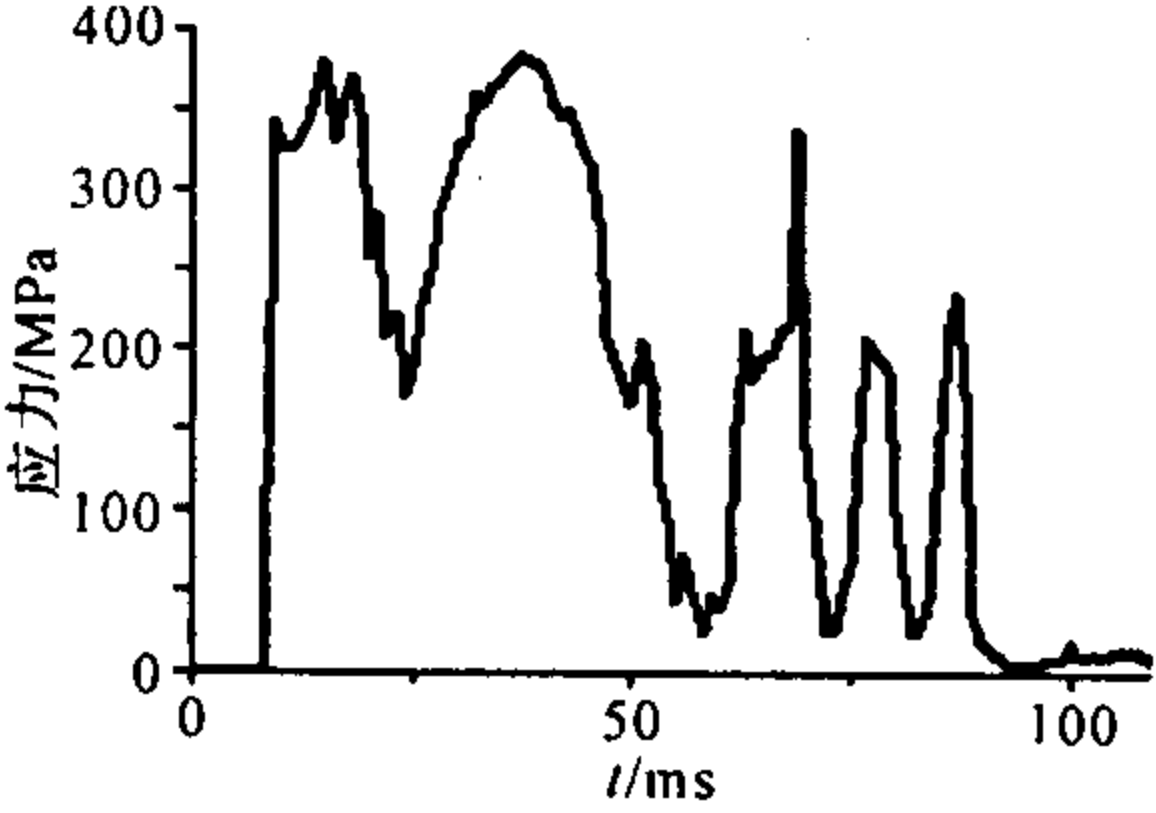


图 6 定向器各部位最大应力曲线

这是由于玻璃钢定向器的弹性常数、线膨胀系数、热物理参数及材料强度等方面的各向异性和不均匀性造成的。定向器应力和应变的较大值出现在定心部作用处,随着定心部向前移动,应力、应变的较大值呈环状跟着移动变化,产生的最大瞬时耦合应力为 384MPa,在火箭弹发射的开始阶段,位于定向器前端,前定心部作用处,产生的最大应变为 0.0076。火箭弹出定向器管口后,前管口产生的横向最大变形位移为 0.58mm,纵向最大变形位移为 0.67mm。整个作用过程中,玻璃钢定向器在开始阶段产生的响应应力和应变较大,定向器后端产生的响应应力和变形位移比前端大。

由图 7 的定向器部分时间点温度分布图和图 8 最大温度曲线知,高温燃气流以对流形式作用于定向器内壁,在火箭弹起动到出管口较短时间内,定向器从内到外发生热传导,管体温度值逐渐升高,随着火箭弹向前移动,温度较大值跟着向前移动变化,经热

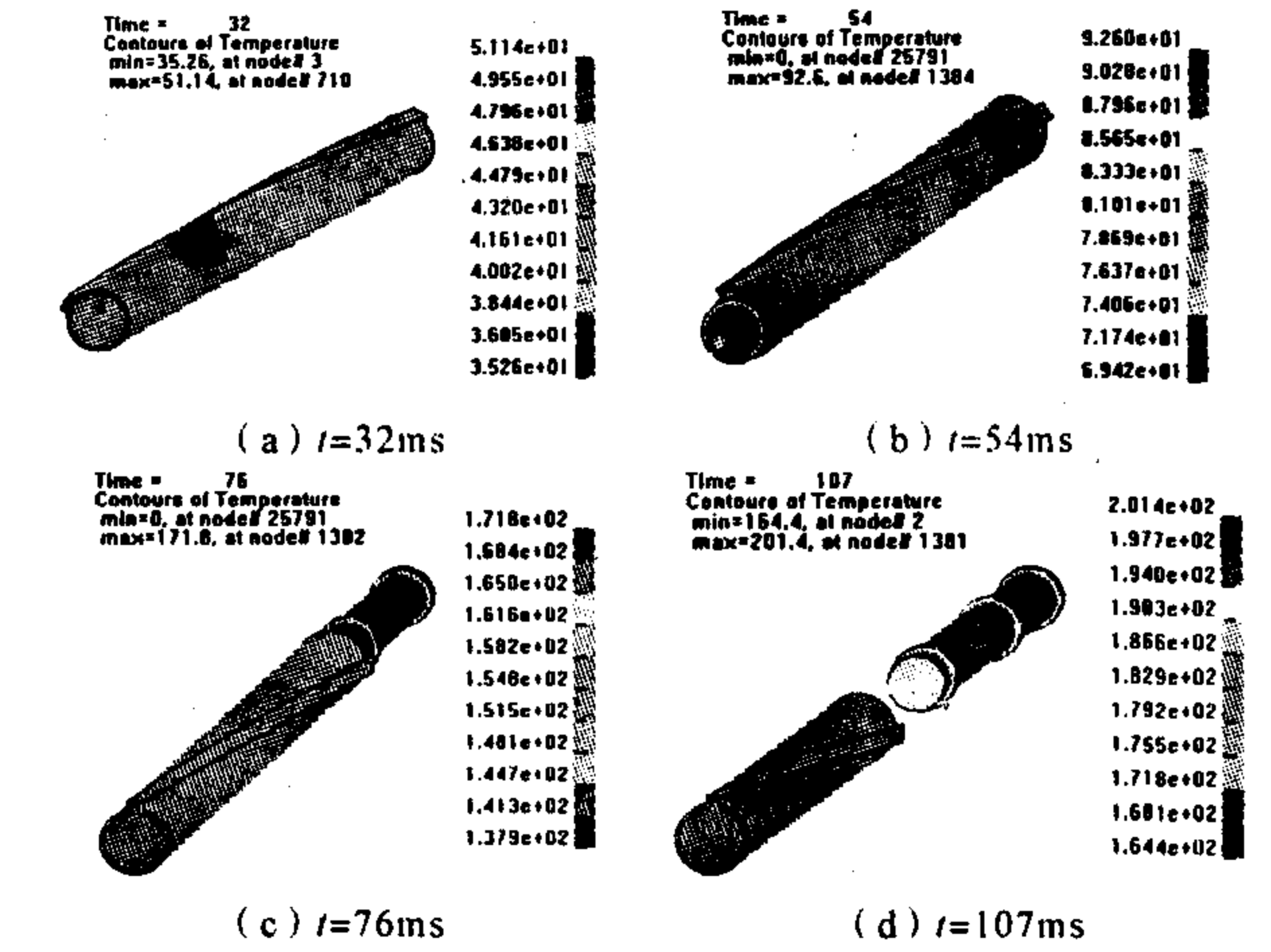


图 7 定向器部分时间点的温度分布图(℃)

传导产生的瞬时较大温度为 211℃,在火箭弹出定向器管口后,位于定向器前端。

表 1 将定向器热结构耦合动态结果和不考虑热载荷作用的结构动态结果相比较,可知燃气流热载荷对玻璃钢定向器的动态性能产生一定影响,使定向器产生的瞬时应力、应变和变形增大,但热载荷对定向器的影响主要体现在火箭弹出定向器以后,使定向器产生较大热变形,在火箭弹内弹道发射阶段对定向器使用性能影响不大。

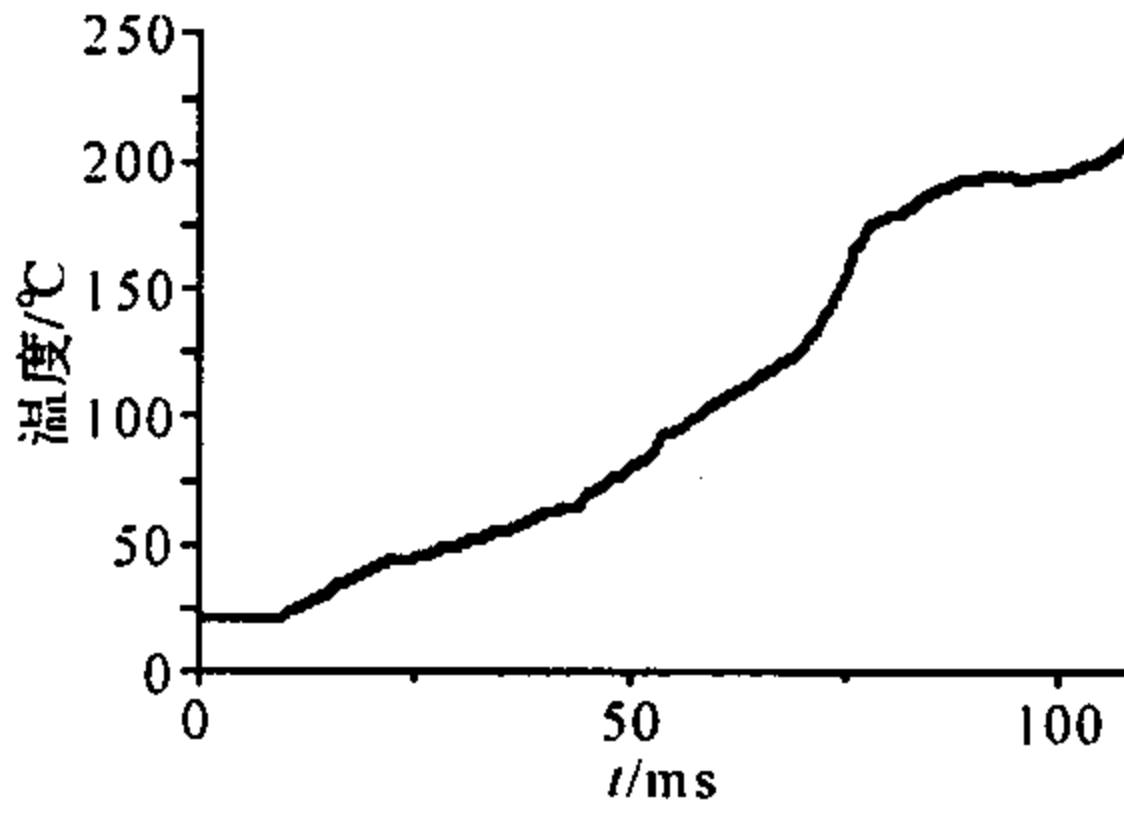


图 8 定向器各部位最大温度曲线

表 1 定向器热结构耦合动态响应结果与结构动态响应结果比较

	应力最大 值/MPa	应变最大 值/MPa	前管口横 向位移最 大值/mm	前管口纵 向位移最 大值/mm
热结构 耦合响应	384	0.0076	0.58	0.67
结构响应	316	0.00582	0.42	0.54

3 结论

1)火箭弹和定向器间是一个接触一分离一再接触的相互作用的复杂过程。

2)某玻璃钢定向器耦合应力和应变的较大值出现在定心部作用处,产生的最大瞬时耦合应力为 384MPa,最大应变为 0.0076。整个作用过程中,玻璃

(下转第 222 页)

表 1 神经网络故障诊断模型输入数据表

信号	1 号板故障	2 号板故障	3 号板故障	4 号板故障	5 号板故障	6 号板故障
1	0.046	0.0387	0.913	0.0202	0.0562	-0.1794
2	0.4567	0.3484	0.9718	0.187	0.763	-0.0209
3	0.6202	0.4549	0.929	0.2522	0.929	0.1401
4	0.6521	0.5087	0.86	0.2912	0.86	0.0168
5	0.9627	0.9441	0.9817	0.5209	0.9817	-0.1297
6	0.74	0.6128	0.8928	0.54	0.8928	-0.1578
7	0.6287	0.4605	0.9126	0.6678	0.9126	0.1675
8	0.1704	0.046	0.8014	0.6646	0.7222	-0.0036
9	0.1576	0.1285	0.9387	0.9099	0.2115	-0.0545
10	-0.0701	0.0074	-0.8259	-0.7467	-0.4011	-0.1693
11	-0.6435	-0.49	-0.9786	-0.7914	-0.9786	0.1793
12	-0.6035	-0.4422	-0.8587	-0.5635	-0.8587	0.1386
13	-0.7756	-0.703	-0.8931	-0.4899	-0.8931	-0.0217
14	-0.6301	-0.5395	-0.8241	-0.3129	-0.8241	0.1346
15	-0.5635	-0.3983	-0.8495	-0.2303	-0.8495	-0.1372
16	-0.4346	-0.288	-0.8904	-0.1632	-0.8904	0.0176

表 2 神经网络故障诊断模型输出数据表

1	2	3	4	5	6
0.9577	0.0002	0.0006	0.0000	0.0015	0.0000
0.2534	1.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
0.0008	0.0002	0.9974	0.0029	0.0010	0.0017
0.0000	0.0003	0.0000	0.9883	0.0000	0.0017
0.0018	0.0000	0.0011	0.0048	0.9973	0.0000
0.0000	0.0001	0.0000	0.0000	0.0000	0.9989

试验结果分析可得,将该型随动适配器的 6 组实际征兆/故障信号归一化处理后输入到故障诊断模型后,模型成功的诊断出了 6 种对应的故障。将故障诊断模型输出的数据(表 2 所示)和理论输出的目标向量  $T$ (式(11))相比较,可以发现这 6 种故障的诊断误差是非常小的。

### 3 结 论

采用神经网络技术进行某随动适配器故障诊断

(上接第 215 页)

钢定向器在开始阶段产生的响应应力和应变较大,后端产生的响应应力和变形位移比前端大。

3)在火箭弹起动到出管口较短时间内,定向器经热传导产生的瞬时最大温度为 211℃,燃气流热载荷对玻璃钢定向器的动态性能产生一定影响,对使用性能影响不大,其影响主要体现在火箭弹出定向器以后,使定向器产生较大热变形。

参考文献:

[1] 王润富,陈国荣. 温度场和温度应力[M]. 北京:科学出版

社,2005.

的突出优点是不需要系统的准确数学模型,可以直接应用历史故障/征兆数据来解决复杂的非线性问题。试验仿真后可以判定,经过充分训练后,该模型完全可以满足该型号随动适配器的故障诊断要求,结果表明采用神经网络技术构建的故障诊断模型是有效的。

参考文献:

[1] 刘君华. 基于 LabWindows/CVI 的虚拟仪器设计[M]. 北京:电子工业出版社,2003.

[2] 张德丰. MATLAB 神经网络应用设计[M]. 北京:机械工业出版社,2009.

[3] 高隽. 神经网络原理及仿真实例[M]. 北京:机械工业出版社,2007.

[4] 沈谦,张良展. BP 网络改进及在电路故障诊断中的应用[J]. 微电子学与计算机,1996(1):67-71.

[5] 张海燕,胡光锐,张东红,等. 多层前向神经网络的一种改进 BP 算法[J]. 通信技术,2003(11):6-7.

[2] Sze K Y, He L W, Cheung Y K. Predictor-corrector procedures for analysis of laminated plates using standard Mindlin finite element models[J]. Composite Structures, 2000,50(2):171-182.

[3] 于文芳,兰娇霞. 热弹耦合温度场中短圆柱壳的动力响应分析[J]. 太原理工大学学报,2003,34(2):119-121.

[4] 翁祖祺,陈博. 中国玻璃钢工业大全[M]. 北京:国防工业出版社,2004.

[5] 李裕春,时党勇. ANSYS10.0/LS-DYAN 基础理论与工程实践[M]. 北京:中国水利出版社,2006.