

智能平板叶片的振动主动控制研究

北京航空航天大学 孙长任** 聂景旭 赵长占

【摘要】 介绍了利用形状记忆合金对悬臂平板叶片进行错频以实现振动主动控制的原理及试验研究。首先推导出回复力作用下的复合平板叶片的弯曲振动特性。然后对平板叶片进行了振动主动控制试验。根据理论分析和试验研究,提出了一些利用形状记忆合金进行振动主动控制的特点和规律。

主题词: 振动 控制 形状记忆合金

分类号: O327

1 引言

利用形状记忆合金(SMA)制作的智能复合材料结构,目前都是将预塑性应变处理的 SMA 丝与基体全部粘合在一起。但由于 SMA 的回复应变可以高达 8%,远远大于其它材料的弹性应变极限。因此丝受热产生回复力时将与基体之间产生极大的应力梯度,从而容易引起两者互相脱离。记忆合金与基体的连接是一个很难解决的问题。智能结构对振动的控制主要是利用 SMA 丝受热后引入的“残余应变能”,使其自振频率都小幅度地升高^[1,2]。

本文作者制作了多种结构的智能平板叶片,并对其进行了振动主动控制试验研究。提出的一种“筒式”结构,即把预先塑性拉伸变形的形状记忆合金丝埋入复合平板叶片中,丝与基体不粘结,只在两端用机械方式固定,很好地解决了连接问题。“筒式”智能平板主要是利用 SMA 丝的高回复应力特性,其一阶自振频率升高而二阶自振频率却下降。并且变化幅度都很大,表现出了与其它结构不同的显著的振动主动控制特性。

2 理论分析

智能平板叶片结构中 SMA 为 NiTi 丝,沿 E_{11} 方向对称于中性面均布,丝的体积含量 $V_f < 0.6\%$,因而丝的刚度对板的整体刚度影响极小。给 NiTi 丝加热到一定温度,除了叶片尖端,在其它部分的横截面上都将均匀作用一个沿弹性线切线方向的大小为 T 的压缩力。对于比较长的悬臂平板叶片可以作为悬臂梁来分析。

可以推导出智能平板叶片的特征方程和振型方程为:

$$(m^2 chml + k^2 \cos kl)^2 - (m^3 shml - k^3 \sin kl)(mshml + k \sin kl) = 0 \quad (1)$$

$$y = D \left[(chmx - \cos kx) - \frac{m^2 chml - k^2 \cos kl}{m^2 shml + m k \sin kl} (shmx - m/k \sin kx) \right] \quad (2)$$

$$\text{式中: } a = \frac{T}{\rho A}, \quad b = \frac{EI}{\rho A}, \quad m = \left[\frac{a^2 + 4b\omega^2 - a}{2b} \right]^{1/2}, \quad k = \left[\frac{a^2 + 4b\omega^2 + a}{2b} \right]^{1/2}$$

各式中, A 是梁的横截面积, ρ 是材料密度, EJ 是抗弯刚度, l 是平板长度。

根据 (1) 式计算的平板叶片的振频如图 1 ($\triangle$ 一阶, $\square$ 二阶) 所示。根据 (2) 式计算的平板振型如图 2 ($\circ V_f = 0$, $\triangle V_f = 0.1\%$, $\square V_f = 0.3\%$) 所示。从图中可以看出随回复

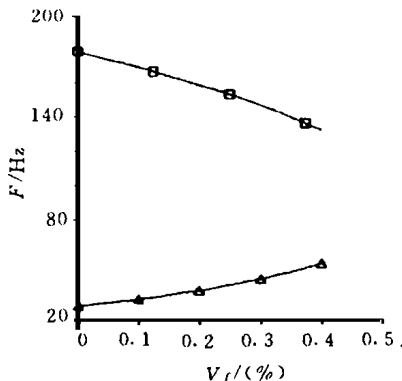


图 1 振频变化曲线

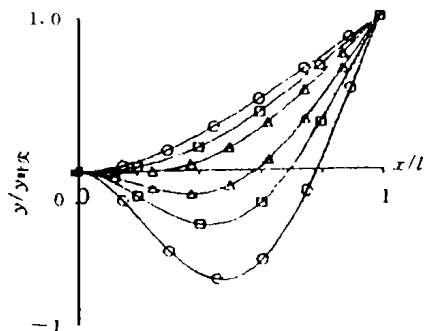


图 2 弯曲振动弹性线

力的增大, 即随加热丝的体积含量 V_f 的增大, 自振频率变化增大, 而且一阶振动频率增高, 二阶振动频率下降。在新的自振频率下发生共振时, 振动节线偏移, 振型改变。假设叶尖振幅仍大小不变, 叶身上其它各点的振幅则都相对减小了。

通过初步的理论分析可以看出, 对称铺层的智能平板叶片用于振动主动控制是可行的。

3 试验研究

用汇编语言建立的自动振动测试系统如图 3 所示。计算机既是激振信号发生器, 又是控制系统的控制器, 同时也是数据记录仪和分析仪。根据叶根应变与叶尖振幅的关系, 通过采集的应变信号就可以计算出叶片的振幅并对其进行主动控制。智能平板叶片尺寸为 $230 \text{ mm} \times 40 \text{ mm} \times 6 \text{ mm}$ 。NiTi 丝的体积含量 $V_f = 0.3\%$ 。

当智能平板叶片远离共振状态时, 振幅很小。但当趋近共振时振幅急剧增大, 处于共振时振动最大。此时给 NiTi 丝通电加热, 测试计算的叶片振幅如图 4、图 5 所示。图下部的温度曲线的激振频率。试验中微机的采样频率为 400 Hz。

从图中可看出, NiTi 丝没有通电加热时, 一阶自振频率为 25 Hz, 振幅 6 mm。NiTi 丝通电后振幅衰减很快, 1.2 秒就完全抑制了叶片的共振。快速改变激振频率, 叶片又发生新的一阶共振, 振频为 32 Hz, 但振幅减为 2 mm, 减小了 67%。此时 NiTi 丝断电冷却, 振动又很快停止。NiTi 丝加热后一阶自振频率提高了 23%, 这与理论分析的变化规律一致。

NiTi 丝没有通电加热时, 二阶自振频率 173 Hz, 振幅 3 mm。NiTi 丝通电加热, 1.8 秒停止振动。迅速改变激振频率, 在 158 Hz 叶片又发生新的二阶共振, 振幅为 0.8 mm, 振幅减小了 73%, 振频下降幅度为 9%。此时断电冷却, 振动又很快被抑制。受热后, NiTi 丝刚

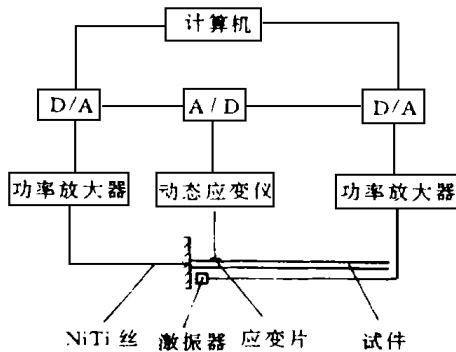


图 3 自动振动测试系统

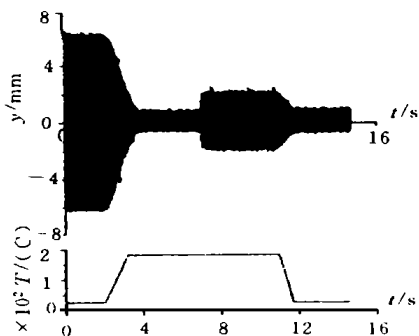


图 4 一阶振动控制

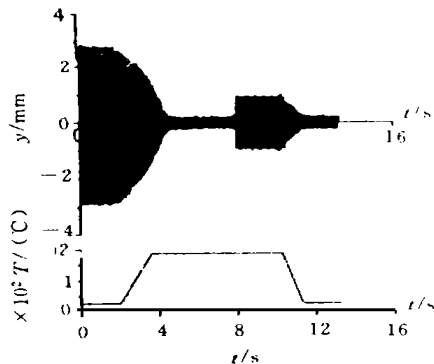


图 5 二阶振动控制

度增加,对板的影响只能使自振频率升高,但二阶共振频率变化规律与理论分析相一致,呈下降趋势。这表明回复力对振动抑制起决定作用,理论分析中忽略 NiTi 丝刚度的影响是合理的。

试验测量的 NiTi 丝通电加热后,叶片自振频率与理论计算值有小的误差。这主要是试验中丝的加热温度可能偏高了,实际产生的回复力高于理论计算中所取的 T ,从而影响了试验值与理论值的完全一致。

4 结 论

“筒式”智能平板叶片的自振频率和振动量的变化规律与理论分析的相一致。对振动的主动控制主要依赖其回复力的作用。结构的动刚度受回复力的影响随不同的振动模态而变,一阶动刚度增加,二阶动刚度降低,而且引起的自振频率偏移幅度都很大,可以完全避开外部的共振激励,对振动进行显著的主动控制。

参 考 文 献

- 1 Barker D. Active Dynamic Response Tuning of Adaptive Composite Utilizing Embedded Nitinol Actuators. Master Thesis, Virginia Polytechnic Institute and State University, Blacksburg, VA, 1989
- 2 Chaudhry R, Rogers C A. Response of Composite Beams to an Internal Actuator Force. AIAA, Paper No. 91-1108
- 3 Crawley E F, Lazaras K B. Induced Strain Actuation of Isotropic and Anisotropic Plates. Proceedings of 30th SMD Conference, 1989
- 4 Lazaras K B, Crawley E F. Static Aeroelastic Control Using Strain Actuated Adaptive Structures. Proceedings of First Joint U. S. / Japan Conference on Adaptive Structures, 1989
- 5 [日] 舟保久, 熙康. 形状记忆合金. 北京: 机械工业出版社, 1992

(责任编辑 王震华)