

基于 ANSYS 的形状记忆合金复合材料板簧的模式分析

管 鸣,任勇生,孙祥正

(山东科技大学 机械电子工程学院,山东 青岛 266590)

摘 要:运用 ANSYS 软件对形状记忆合金(SMA)复合材料板簧进行模式分析。首先,建立 SMA 复合材料板簧的有限元模型;然后,针对升温和降温两个过程分别对 SMA 复合材料板簧进行模式分析。分析结果表明了温度、SMA 纤维含量对复合材料板簧的固有频率以及模式振型的影响,揭示了 SMA 复合材料板簧的固有频率随着温度的升高而逐渐变大等规律。

关键词:复合材料板簧;形状记忆合金;模式分析;固有频率

中图分类号:TH113.1

文献标志码:A

文章编号:1672-3767(2012)06-0106-07

Modal Analysis of Composite Leaf Spring with SMA Based on ANSYS

GUAN Ming,REN Yongsheng,SUN Xiangzheng

(College of Mechanical and Electronic Engineering,Shandong University of Science and Technology,Qingdao,Shandong 266590,China)

Abstract: The modal analysis of composite leaf spring with SMA was carried out by the ANSYS software. First, a FEM modal of the composite spring was established, and then the modal analysis of the composite spring correspond to heating and cooling was conducted, respectively. Numerical results show the influence of temperature on the natural frequency and the modal shape of the composite spring. The influence of volume content of SMA fiber on the natural frequency and the modal shape of the composite spring was also investigated. The natural frequency of composite leaf spring with SMA is larger with the rising of temperature and so on.

Key words: composite leaf spring; shape memory alloy; modal analysis; natural frequency

板簧是现代汽车的重要组成部分,其功能是保证车轮或轮轴与汽车承载系统之间的联系,缓和冲击,并保证汽车的平顺行驶^[1]。SMA(shape memory alloy,形状记忆合金)是一种智能材料,具有体积小,存储和传递能量的能力强,可产生较大驱动应力等优点^[2]。将 SMA 嵌入复合材料板簧中,板簧的缓冲吸振功能可以得到显著改善。

目前,关于复合材料板簧的结构静力学和动力学方面的研究已有一些成果,如:文献[3]在基于瑞利-里兹能量法计算挠度的基础上,导出 SMA 复合材料板簧的刚度计算公式,并对其进行了理论近似计算;文献[4]对不含 SMA 的普通复合材料板簧进行有限元分析,但所研究的板簧模型是等截面的,没有考虑实际板簧的变截面问题;文献[5]基于瑞利-里兹能量法求板簧的固有频率,给出了表达式,并应用 MATLAB 进行数值计算,得到板簧固有频率与温度、铺层角、SMA 含量的关系曲线,揭示了 SMA 纤维复合材料变截面板簧的固有频率可调节机理。目前,国内外尚未见运用 ANSYS 软件对 SMA 复合材料板簧进行振动模式分析的研究。

本研究运用 ANSYS 软件对嵌入 SMA 的复合材料变截面板簧进行模式分析,得到温度对复合材料板

收稿日期:2012-05-04

基金项目:山东省自然科学基金项目(ZR2011EEM031)

作者简介:管 鸣(1986—),男,山东潍坊人,硕士研究生,主要从事板簧振动方面的研究。E-mail:guanming1226@163.com
任勇生(1956—),男,山西太原人,教授,博士生导师,主要从事机械系统动力学方面的研究。

簧的固有频率和振型的影响,同时分析了 SMA 纤维含量对其产生的影响。

1 SMA 复合材料板簧的固有频率方程

根据复合材料层合板振动理论可得板簧系统的特征方程^[5]为

$$(\mathbf{M}^{-1}\mathbf{K}-\omega^2\mathbf{E})\mathbf{A}=0; \quad (1)$$

$$\omega=(\mathbf{M}^{-1}\mathbf{K})^{1/2}。 \quad (2)$$

其中: \mathbf{K} —广义刚度矩阵; \mathbf{M} —板簧质量矩阵; \mathbf{E} —单位矩阵; ω —板簧的固有频率; \mathbf{A} —待定系数矩阵。在嵌入 SMA 纤维的情况下,由于其受限回复特性,广义刚度矩阵 \mathbf{K} 会随着驱动温度的变化而变化,从而影响板簧的固有频率。

2 SMA 复合材料板簧的有限元建模

本研究采用有限元软件 ANSYS10.0 进行建模分析。

实际应用中的板簧是变截面的,复合材料制成的板簧应为整体式板簧,板簧外形结构如图 1 所示^[6]。其中,板簧任一点的厚度

$$h(x)=\begin{cases} 12, & 0 < x < 100 \\ \frac{4x}{185} + \frac{364}{37}, & 100 \leq x \leq 470。 \\ 20, & 470 < x < 510 \end{cases} \quad (3)$$

复合材料在板簧中的铺设情况如图 2 所示。整个板簧一共 20 层,每层的厚度为 1 mm,上面 12 层隔层铺设 SMA 纤维复合材料,其余各层为石墨/环氧材料,基体材料的铺层角 θ 为 45° 。

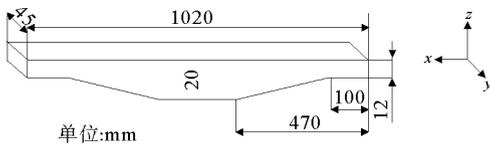


图 1 形状记忆合金复合材料板簧的结构模型图
Fig. 1 The structural model of spring with SMA composite materials

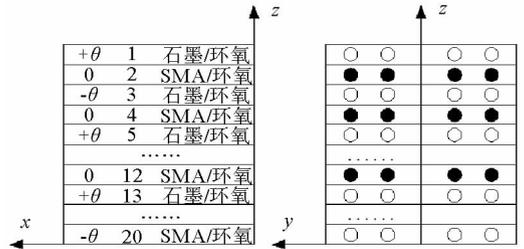


图 2 板簧铺层方式示意图
Fig. 2 The orientation style of layer

1) 单元类型的选择和材料属性的设置

本研究选用 Solid46 单元类型进行分析。Solid46 是三维实体单元 Solid45 的一种叠层形式,可以用来建立叠层壳或实体的有限元模型,每个单元允许有多达 250 层等厚材料层或 125 层不等厚材料层^[7]。

分别对嵌入 SMA 的材料层和未嵌入 SMA 的材料层的材料属性进行设置。各材料层的材料属性、铺层角以及厚度如图 3 所示。针对不同温度,通过 MATLAB 编程计算得到嵌入 SMA 的材料层的材料参数,并将这些参数输入到 ANSYS 中的材料属性定义表中。

2) 创建变截面复合材料板簧的模型

由于板簧是变截面的,在建立模型时采用分段建模

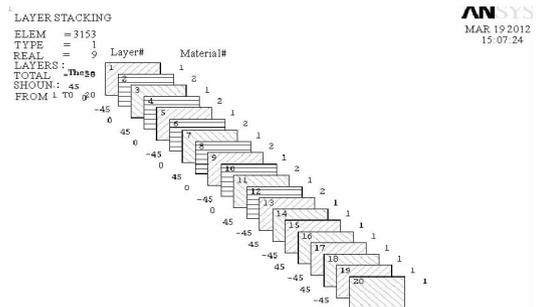


图 3 铺层角设置图
Fig. 3 The orientation angle of layer

的方法。根据板簧在 x 轴方向上的对称性,现取板簧的一半进行建模。变截面复合材料板簧的有限元模型如图 4 所示。



图 4 板簧的有限元模型图

Fig. 4 The finite element model of spring

3) 施加约束及荷载

按照图 5 所示板簧的受力情况进行加载并施加位移约束。其中: P 取 1270 N, 为 1/4 车体的重力^[6]; N_r 表示 SMA 产生的受限回复力。SMA 在升温过程中 20, 60 °C 以及降温过程中 45, 35 °C 时的形状回复力通过编制相应 MATLAB 程序计算可得, 其结果如表 1 所示。

4) 求解

对板簧进行有预应力的模态分析, 本研究求解器选 Subspace, 指定 3 阶步荷载选项。

5) 研究模态分析结果, 针对复合材料变截面板簧的固有频率和振型进行分析。

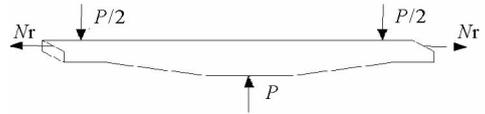


图 5 板簧受力分析模型图

Fig. 5 The model of stress analysis of spring

表 1 SMA 受限回复力表

Tab. 1 The restoring force of shape memory alloy

温度/°C	20	60	45	35
回复力/N	16 528	33 805	42 710	32 321

3 ANSYS 有限元结果分析与讨论

SMA 复合材料板簧的 SMA 材料类型选用镍钛合金, 其材料常数如表 2 所示; SMA 复合材料板簧的复合材料类型选用石墨/环氧树脂, 其材料常数如表 3 所示。

表 2 镍钛合金材料参数表

Tab. 2 The parameters table of Nitinol

参数	数值	参数	数值
E_A /MPa	67×10^3	M_s /°C	18.4
E_M /MPa	26.3×10^3	A_s /°C	34.5
σ_s^r /MPa	100	A_f /°C	49
σ_f^r /MPa	170	C_M /(MPa/°C)	8
ϵ_L	0.067	C_A /(MPa/°C)	13.8
θ /(MPa/°C)	0.55	ρ_s /(kg/m ³)	6450
M_f /°C	9		

表 3 石墨/环氧树脂材料参数表

Tab. 3 The parameters table of Graphite/Epoxy

石墨(基体材料 1)		环氧树脂(基体材料 2)	
E_x /GPa	142	E_x /GPa	25×10^{-3}
E_y /GPa	9.8	E_y /GPa	1×10^{-3}
E_z /GPa	9.8	E_z /GPa	1×10^{-3}
G_{xy} /GPa	6.0	G_{xy} /GPa	0.5×10^{-3}
G_{xz} /GPa	6.0	G_{xz} /GPa	0.5×10^{-3}
G_{yz} /GPa	4.83	PR_{xy}	0.25
PR_{xy}	0.42	PR_{xz}	0.25
PR_{xz}	0.42	ρ_{c2} /(kg/m ³)	1856
PR_{yz}	0.5	x /°C ⁻¹	0.2×10^{-6}
ρ_{c1} /(kg/m ³)	1672	y /°C ⁻¹	16×10^{-6}
∂x /°C ⁻¹	-0.07×10^{-6}		
∂y /°C ⁻¹	30×10^{-6}		

3.1 升温过程中 SMA 复合材料板簧的振型及固有频率

温度为 20 °C, 复合材料采用基体材料 1 时, SMA 复合材料板簧前 3 阶模态振型如图 6—图 8 所示。温度为 60 °C, 复合材料采用基体材料 1 时, SMA 复合材料板簧前 3 阶模态振型如图 9—图 11 所示。



图 6 一阶模态振型图
Fig. 6 The first modal shape

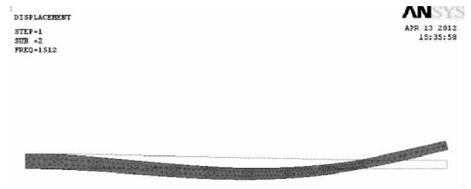


图 7 二阶模态振型图
Fig. 7 The second modal shape



图 8 三阶模态振型图
Fig. 8 The third modal shape

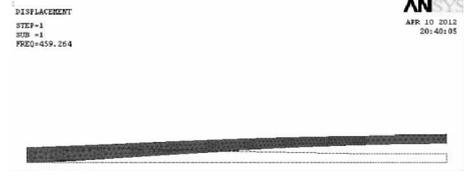


图 9 一阶模态振型图
Fig. 9 The first modal shape



图 10 二阶模态振型图
Fig. 10 The second modal shape

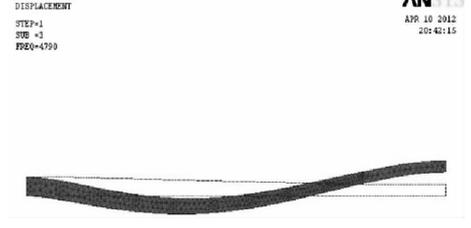


图 11 三阶模态振型图
Fig. 11 The third modal shape

当温度分别为 20,30,40,50,60,70,80,90 ℃时,对 SMA 复合材料板簧分别进行模态分析,采用基体材料 1 时得到的固有频率如表 4 所示,采用基体材料 2 时得到的固有频率如表 5 所示。

通过表 4 和表 5 可以看出:随着温度的升高,SMA 复合材料板簧的固有频率逐渐增大;同一温度下,SMA 复合材料板簧的固有频率随着阶数逐渐增大。

$T=60\text{ }^{\circ}\text{C}$,SMA 纤维的体积含量分别为 10%,20%,30%,40%,50%时,对 SMA 复合材料板簧分别进行模态分析,采用基体材料 1 得到的固有频率如表 6 所示,采用基体材料 2 得到的固有频率如表 7 所示。

表 4 升温过程中板簧的固有频率表

Tab. 4 The natural frequency of spring in heating

温度/℃	一阶频率/Hz	二阶频率/Hz	三阶频率/Hz
20	344.30	1516.00	4607.00
30	349.75	1522.27	4615.22
40	355.50	1532.54	4623.43
50	389.12	1592.25	4671.63
60	459.26	1729.00	4790.00
70	516.00	1849.22	4902.12
80	534.60	1889.52	4942.20
90	538.00	1897.00	4949.00

表 5 升温过程中板簧的固有频率表

Tab. 5 The natural frequency of spring in heating

温度/℃	一阶频率/Hz	二阶频率/Hz	三阶频率/Hz
20	269.25	845.72	1850.67
30	282.52	875.08	1891.90
40	295.78	904.43	1933.13
50	309.04	933.79	1974.37
60	373.32	1079.63	2191.46
70	427.85	1205.89	2387.58
80	438.63	1231.05	2427.31
90	449.40	1256.20	2467.05

表 6 升温过程中不同 SMA 纤维体积含量
下板簧的固有频率表

Tab. 6 The natural frequency of spring of different
SMA fiber volume content in heating

体积含量/%	一阶频率/Hz	二阶频率/Hz	三阶频率/Hz
10	459.26	1729.00	4790.00
20	430.04	1709.88	4560.26
30	398.00	1705.45	4353.03
40	351.59	1695.02	4167.79
50	275.92	1675.86	4001.40

表 7 升温过程中不同 SMA 纤维体积
含量下板簧的固有频率表

Tab. 7 The natural frequency of spring of different
SMA fiber volume content in heating

体积含量/%	一阶频率/Hz	二阶频率/Hz	三阶频率/Hz
10	191.35	559.65	1138.12
20	260.57	759.27	1542.73
30	308.13	895.22	1818.11
40	344.33	997.92	2026.05
50	373.32	1079.63	2191.46

由表 6 可以看出:随着 SMA 纤维体积含量的增加,SMA 复合材料板簧的固有频率逐渐降低。这是因为 SMA 的弹性模量小于基体材料 1 的弹性模量,SMA 纤维的体积含量越大,使得混合后的智能材料的整体弹性模量减小,导致 SMA 复合材料板簧的固有频率减小。

由表 7 可以看出:随着 SMA 纤维体积含量的增加,SMA 复合材料板簧的固有频率逐渐升高。这是因为 SMA 的弹性模量大于基体材料 2 的弹性模量,SMA 纤维的体积含量越大基体材料 2 的含量就越小,使得混合后的智能材料的整体弹性模量增大,最终导致 SMA 复合材料板簧的固有频率增大。

3.2 降温过程中 SMA 复合材料板簧的振型及固有频率

温度为 45 °C,复合材料采用基体材料 1 时,SMA 复合材料板簧前 3 阶模态振型如图 12—图 14 所示。温度为 35 °C,复合材料采用基体材料 1 时,SMA 复合材料板簧前 3 阶模态振型如图 15—图 17 所示。

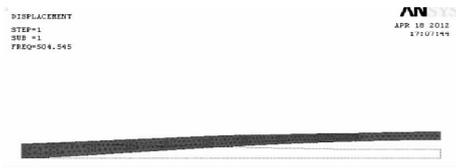


图 12 一阶模态振型图 ($T=45\text{ }^{\circ}\text{C}$)
Fig. 12 The first modal shape



图 13 二阶模态振型图 ($T=45\text{ }^{\circ}\text{C}$)
Fig. 13 The second modal shape



图 14 三阶模态振型图 ($T=45\text{ }^{\circ}\text{C}$)
Fig. 14 The third modal shape



图 15 一阶模态振型图 ($T=35\text{ }^{\circ}\text{C}$)
Fig. 15 The first modal shape



图 16 二阶模态振型图 ($T=35\text{ }^{\circ}\text{C}$)
Fig. 16 The second modal shape



图 17 三阶模态振型图 ($T=35\text{ }^{\circ}\text{C}$)
Fig. 17 The third modal shape

当温度分别为 90,80,70,60,50,40,30,20 ℃时,对 SMA 复合材料板簧分别进行模态分析,采用基体材料 1 得到的固有频率如表 8 所示,采用基体材料 2 得到的固有频率如表 9 所示。

表 8 降温过程中板簧的固有频率表

Tab. 8 The natural frequency of spring in cooling

温度/℃	一阶频率/Hz	二阶频率/Hz	三阶频率/Hz
90	538.00	1897.23	4949.12
80	533.23	1887.36	4939.24
70	528.48	1877.54	4929.48
60	523.71	1867.43	4919.71
50	518.95	1857.23	4909.95
40	478.23	1769.62	4828.91
30	419.63	1650.25	4721.44
20	344.00	1511.23	4607.74

表 9 降温过程中板簧的固有频率表

Tab. 9 The natural frequency of spring in cooling

温度/℃	一阶频率/Hz	二阶频率/Hz	三阶频率/Hz
90	449.40	1256.20	2467.05
80	437.95	1229.63	2425.55
70	426.50	1203.07	2384.05
60	415.05	1176.50	2342.55
50	403.60	1149.94	2301.04
40	392.16	1123.37	2259.55
30	336.77	996.45	2066.76
20	269.25	845.72	1850.67

由表 8 和表 9 可以看出:随着温度的降低,SMA 复合材料板簧的固有频率逐渐降低;同一温度下,SMA 复合材料板簧的固有频率随着阶数增加而逐渐增大。

当温度 $T=60$ ℃,SMA 纤维的体积含量分别为 10%,20%,30%,40%,50%时,对 SMA 复合材料板簧分别进行模态分析,采用基体材料 1 得到的固有频率如表 10 所示,采用基体材料 2 得到的固有频率如表 11 所示。

表 10 降温过程不同 SMA 体积含量下板簧的固有频率表

Tab. 10 The natural frequency of spring of different SMA volume content in cooling

体积含量/%	一阶频率/Hz	二阶频率/Hz	三阶频率/Hz
10	523.71	1867.43	4919.71
20	490.88	1832.66	4714.95
30	454.44	1810.90	4531.25
40	402.01	1776.94	4367.4
50	316.16	1724.83	4217.61

表 11 降温过程不同 SMA 体积含量下板簧的固有频率表

Tab. 11 The natural frequency of spring of different SMA volume content in cooling

含量/%	一阶频率/Hz	二阶频率/Hz	三阶频率/Hz
10	223.41	635.12	1254.79
20	304.22	860.04	1701.33
30	359.75	1015.64	2005.31
40	402.01	1132.07	2234.89
50	415.05	1176.50	2342.55

由表 10 和表 11 可以看出:随着 SMA 纤维体积含量的升高,采用基体材料 1 时,SMA 复合材料板簧的固有频率逐渐降低;采用基体材料 2 时,SMA 复合材料板簧的固有频率逐渐升高。

4 结论

采用 ANSYS 软件对 SMA 复合材料板簧进行模态分析,得出以下结论:

1)SMA 复合材料板簧的固有频率随着温度的升高逐渐变大。降温过程中板簧的固有频率高于升温过程中板簧的固有频率,这是由于降温过程中 SMA 的回复力大于升温过程中 SMA 的回复力。因而,温度对 SMA 复合材料板簧的固有频率和模态振型有较大影响。

2)当基体材料的弹性模量大于 SMA 的弹性模量时,SMA 复合材料板簧的固有频率随着 SMA 纤维体积分含量的增多而降低;当基体材料的弹性模量小于 SMA 的弹性模量时,SMA 复合材料板簧的固有频率随着 SMA 纤维体积分含量的增多而升高。

参考文献:

[1] 郑银环,张仲甫. 利用 ANSYS 进行变截面板簧的优化分析[J]. 现代机械,2005(2):30-31.
ZHENG Yinhuang,ZHANG Zhongfu. Optimum analysis for taper-leaf spring using ANSYS[J]. Modern Machinery,2005 (2):30-31.

[2] 付小华. 嵌入形状记忆合金丝复合材料梁热屈曲分析[D]. 兰州:兰州理工大学,2000:10-25.

[3] 徐晓明,任勇生,杜向红. SMA 纤维复合材料变截面板簧的刚度特性研究[J]. 山东科技大学学报:自然科学版,2011,30(1):96-102.
XU Xiaoming,REN Yongsheng,DU Xianghong. Study on the stiffness property of section-changed plate spring with SMA fiber composite materials[J]. Journal of Shandong University of Science and Technology:Natural Science,2011,30(1):96-102.

[4] 杨俊杰. 树脂基复合材料板簧结构阻尼性能研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工程大学,2009:35-47.

[5] 徐晓明. 形状记忆合金复合材料变截面板簧的研究与设计[D]. 青岛:山东科技大学,2010:19-28.

[6] 薛元德,徐咏梅. 复合材料板簧的有限元应力分析及其设计[J]. 同济大学学报,1998,26(4):393-395.
XUE Yuande,XU Yongmei. Stress analysis and design study on composite leaf spring[J]. Journal of Tongji University, 1998,26(4):393-395.

[7] 刘伟,高维成,于广滨. ANSYS 12.0 宝典[M]. 北京:电子工业出版社,2010:75-110.

—————
“机器人与智能技术”研究专栏征稿

征稿范围:

- | | |
|--------------------|-------------|
| ◇ 机器人理论与控制技术 | ◇ 智能系统建模与控制 |
| ◇ 人工智能与智能控制技术 | ◇ 机器人结构设计 |
| ◇ 移动机器人及自主导航技术 | ◇ 多机器人系统 |
| ◇ 机器人传感技术、智能传感器 | ◇ 特种机器人 |
| ◇ 机器视觉、图像处理与模式识别技术 | ◇ 机器学习 |

欢迎相关领域专家、学者和工程技术人员踊跃投稿,来稿请注明“机器人与智能技术”专栏。稿件经专家评审通过后优先发表,并实行优稿优酬。

投稿平台:http://xuebao.sdust.edu.cn/index_z.asp

电子邮箱:xbgjcl@126.com; zklwh@sdust.edu.cn

联系电话:0532-86057826

山东科技大学学报(自然科学版)编辑部