

文章编号 1004-924X(2010)03-0646-07

基于高精度位移传感器的减振平台

宁大勇^{1,2},高云国¹,刘稀凤³

(1. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所,吉林 长春 130033;
2. 中国科学院 研究生院,北京 100039; 3. 大连教育学院,辽宁 大连 116021)

摘要:为了保证光学精密仪器工作基础的高稳定性,设计了一种新型的减振平台。该减振平台采用精度为 10 nm 的位移传感器作为测量装置,通过位移传感器测量隔振平台支撑弹簧的长度变化,计算出支撑力的变化;然后,调整电磁驱动器的电磁力,使光学精密仪器受力平衡,达到减振的目的。理论及仿真分析表明,采用这种减振方式有很好的减振效果。同时,由于每级减振装置之间是彼此独立的,这种减振方式更有利于多级减振。实验结果显示,基座振幅为 0.22 mm 时,减振台支撑面振幅为 1.6 μm ;基座振幅为 0.20 mm 时,减振台支撑面振幅为 1.4 μm ;基座振幅 0.18 mm 时,减振台支撑面振幅为 1.2 μm ;基座振幅为 0.15 mm 时,减振台支撑面振幅为 1.0 μm ,表明该平台有效地起到了减振作用。

关键词:位移传感器;减振平台;弹簧;电磁驱动器

中图分类号:TH161.6; TP212.12 **文献标识码:**A

Vibration isolation platform base on high accurate displacement sensors

NING Da-yong^{1,2}, GAO Yun-guo¹, LIU Xi-feng³

(1. *Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;*
2. *Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China;*
3. *Dalian Institute of Education, Dalian 116021, China*)

Abstract: A vibration isolation platform is designed for keeping the precise optical instrument to work accurately. By taking displacement sensors with an accuracy of 10 nm as measuring devices, the platform calculates the changed force of the supporting spring by measuring the length change of the spring with the displacement sensor, then it adjusts the force of electromagnet actuator according to the changed force of spring to balance the precise optical instrument to isolate the vibration of base. According to the analysis of theory and simulation, it can satisfy the request of vibration isolation. Furthermore, this method is propitious to the multilevel reduce vibration, for each vibration isolation platform is independent. Experimental results indicate that when the vibration amplitudes of foundation are 0.22, 0.20, 0.18 and 0.15 mm, the vibration amplitudes of isolation vibration platform is 1.6, 1.4, 1.2 and 1.0 μm , respectively, which shows proposed method can satisfy the requirement of isolation vibration.

Key words: displacement sensor; vibration isolation platform; spring; electromagnet actuator

收稿日期:2009-04-22;修订日期:2009-07-07.

基金项目:国家 863 高技术研究发展计划资助项目(No. 2006AA04Z367)

1 引言

振动控制是振动工程领域内的一个重要分支,是振动研究的出发点和归宿。抑制振动手段主要有5种,即消振、隔振、吸振、阻振及改变系统结构。消振和改变系统结构在很多情况下是不能办到的,在工程领域最常用的振动控制方法是隔振、吸振和阻振。目前常用的减振方法主要有:被动控制、绝对加速度反馈控制、绝对速度反馈控制及 Skyhook 控制等,这些方法虽然能够起到减振效果,但是减振效果不是很理想。本文主要研究了应用同步控制纳米级高精度电容式位移传感器来抑制振动的方法(要求振动频率 <30 Hz)。该减振方法为主动控制,但是又区别于以往的主动控制方法,可以起到很好的减振作用。由于各级减振系统之间是相互独立的,更有利于多级减振,只需要考虑振动平台的振幅,不需要考虑被隔振物体的振动情况。该方法减振效果与电子器件的发展直接相关,当然,在电子技术飞速发展的今天,采用与电子器件精度相关的方法是一种必然。

2 隔振模型及原理

2.1 隔振模型

隔振模型如图1所示,隔振平台由弹簧、位移传感器、光磁驱动器构成,其中弹簧为高刚度线性弹簧,被隔振物体安放在被隔振台上。

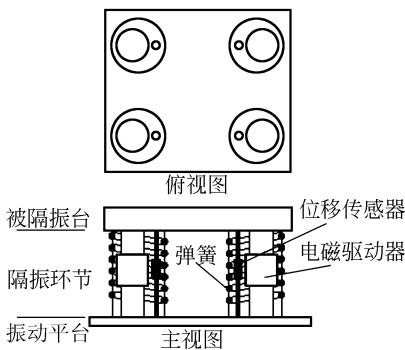


图1 隔振模型

Fig. 1 Model of vibration isolation

2.2 隔振原理

从运动角度分析,首先从四组减振装置中取

出一组来研究,如图(2)所示,定义被隔物体的质量为 m ,应用理论力学的基本知识建立物体的平衡方程及运动方程。

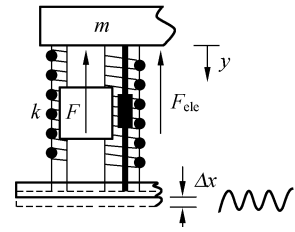


图2 隔振原理

Fig. 2 Principle of vibration isolation

(1)在不受外界干扰时,物体 m 的平衡方程为:

$$mg = ky_0, \quad (1)$$

y_0 为系统静态平衡时弹簧的变形量

(2)当有外部扰动影响时,物体 m 的动力学方程为:

$$mg + m\ddot{y} = ky_0 + F + F_{\text{elec}}, \quad (2)$$

其中 y 物体 m 的位移量, F 为弹簧支撑力的变化量, F_{elec} 为电磁作动器对 m 施加的电磁力。

为了起到最好的减振效果,尽量减小 \ddot{y} , 当 \ddot{y} 为 0 时,被隔振物体始终保持静止状态。从理论上讲,可以达到完全消振的目的,但是由于实际系统存在误差,同时控制系统有延时,所以不可能达到完全消振,因此只能尽量减小 \ddot{y} 。

把方程(1)带入方程(2)中可以得到:

$$m\ddot{y} = F + F_{\text{elec}}, \quad (3)$$

弹簧本身有阻尼,当弹簧长度发生变化时,其刚度也会发生变化。所以本文支撑用的弹簧选用优质无阻尼弹簧(其阻尼很小可以视为没有),当弹簧受到外力而引起长度发生微小变化时,弹簧的刚度可以看成为一个常数。这时可以调整电磁驱动器的电磁力,使 $\ddot{y} \approx 0$, 即可达到减振的目的。

3 仪器选择

3.1 位移计

位移计选用 ZCS1100 英国超精密电容位移

传感器, 纳米级分辨率; 线性 0.08%; 灵敏度可调。测量范围为 0.24 mm; 分辨率为 10 nm(最高为 0.1 nm); 带宽为 35 kHz。

3.2 数模转换芯片

数模转换芯片可以选用 16 位数模转换芯片 MAX5661, 该芯片价格较低, 属于工业级的数模转换芯片。

4 控制原理

4.1 原理分析

在分析过程中为了分析便捷, 假设基座所受干扰后产生振动的幅值为位移传感器的量程, 即 0.24 mm, 振动频率为 30 Hz, 位移传感器采样频率为 35 kHz, 分辨率为 10 nm, 处理器、数模转换器及模数转换器的速度非常快, 尽量选用高端产品。

当外部干扰振动频率为 30 Hz, 位移计的采样频率设为 35 kHz 时, 在一个振动周期内可以采集 1 200 个位移数据, 相当于把每个振动周期平均分为 1 200 小份, 每次采样的数据即为此时支撑弹簧相对于静止时的长度变化量, 把长度变化量乘以弹簧的刚度系数, 求出弹簧力的变化量, 此变化量即为所求的电磁力, 由电磁学知识计算出所需的电流值, 然后调整电磁驱动器线圈内的电流值。

4.2 减振及延迟分析

在实际应用过程中, 采集完一个数据后, 需要将此数据转换成数字量, 然后送到处理器处理, 再送到数模转换器, 转换成模拟电信号控制电磁线圈内的电流值。此过程需要消耗几个机器周期, 所以采集完数据到调整电磁线圈中的电流中间间隔了一段时间, 此时电磁力的大小与变化的弹簧力不相等, 因此采用此种控制方法不会达到消振的目的, 只能使振动衰减。但是由于每个振动周期内采集 1 200 个数据, 所以当把一个正弦分成 1200 份, 中间相隔一份或几份时 (δt), 两个点的数值 (δA) 相差不大。如图 3 所示。

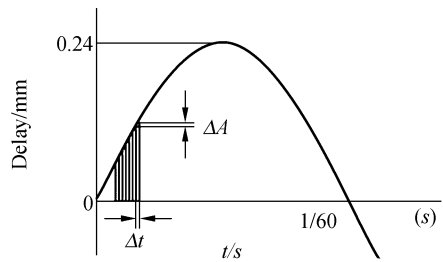


图 3 延迟分析

Fig. 3 Analysis of delay

4.2.1 一级减振分析

目前市场上频率在 16 位 10 MHz 以上的数模转换芯片有很多, 且价格也不高, 所以本文采用了处理频率为 16 位的 10 MHz 的数模转换器; 处理器采用主频 10 MHz 以上的数字信号处理器。采用这两种类型的芯片, 可以使数据在这两个芯片中的处理时间与传输时间之和 $< 1.7 \times 10^{-4}$ s, 从而可保证正在采集的数据与正在执行的数据只相差一个采样周期。

正弦曲线梯度最大的点位于平衡点(在图 3 中就是坐标原点), 所以在平衡点时被隔振物体的位移变化最快也就是速度最大。假设外界干扰振动的幅值为 0.24 mm 时, 理论上被隔振物体的振幅最大值为

$$A(\sin \omega t_1 - \sin \omega t_0) = A \sin \omega t_1 = 0.24 \sin(60\pi/35\ 000) = 1.3 \times 10^{-3} \text{ mm}$$

4.2.2 二级减振分析

在高精密场合可以采用 2 级减振处理, 2 级减振延迟时间及减振公式与一级减振延迟分析相同, 2 级减振处理的方法即相当于在隔振平台上方再加上同样减振平台, 经过二次减振后振幅为

$$1.3 \times 10^{-3} \sin(60\pi/35\ 000) = 7 \times 10^{-6} \text{ mm}$$

总之, 在实际应用中延迟时间为两次采样之间的间隔时间的整数倍, 尽量控制间隔时间为一倍的采样周期, 一倍的采样周期是延迟的最短时间。

4.3 减振过程分析

任意时刻外界干扰的振动方程为:

$$z = A \sin(\omega t), \quad (4)$$

A 为外界干扰的振幅; ω 为外界干扰的频率。

任意时刻被隔振物体的运动方程为:

$$K A \sin(\omega t) - K A \sin(\omega t - \omega/35\ 000) = m a, \quad (5)$$

$K A \sin(\omega t)$ 为弹簧长度变化时,其弹力变化的大小; $K A \sin(\omega t - \omega/35\ 000)$ 为电磁力的大小; m 为被隔振系统的质量; a 为被隔振系统的加速度; K 为弹簧刚度系数; A 为弹簧最大变化量与外界干扰的振幅相同。

上式中 $\omega = 60\pi$, A 为0.24 mm,将式(5)变形可以得到:

$$a = \frac{K A \sin(\omega t) - K A \sin(\omega t - \omega/35\ 000)}{m}, \quad (6)$$

对式(6)进行两次积分可以得到被隔振物体的振动方程

$$x = \frac{K A}{m \omega^2} [\sin(\omega t - \omega/35\ 000) - \sin(\omega t)]. \quad (7)$$

5 电磁作动器

电磁作动器选为非接触型差动电磁作动器,采用这种电磁作动器可以避免冲击损坏。为了减小自退磁效应对系统的影响,电磁铁设计成吸盘式的结构。

5.1 最大电磁力

通过之前的分析可知:电磁作用力与弹簧的动态弹力大小近似相等,方向相反,所以可以得到电磁驱动器所需负载的最大电磁力为:

$$F = K A = 25\ 000\ \text{N/m} \times 0.24 \times 10^{-3}\ \text{m} = 6\ \text{N}$$

5.2 电磁力方程

根据电磁学的知识可以得到差动电磁作动器的电磁力为:

$$F = k_0 \mu_0 N^2 A \left[\left(\frac{I_0 + i}{C_0 + y} \right)^2 - \left(\frac{I_0 - i}{C_0 - y} \right)^2 \right], \quad (8)$$

其中: F 为电磁铁对衔铁的作用力; N 为单个电磁铁匝数; I_0 为基础电流; i 为控制电流; C_0 为电磁铁与衔铁之间的间隙; y 为衔铁与车架的相对位移; k_0 为电磁铁结构有关的常数。

将 F 在 $i = i_0$, $y = y_0$ 处做Taylor展开:

$$F = F_0 + \left. \frac{\partial F}{\partial i} \right|_{i=i_0, y=y_0} (i - i_0) + \left. \frac{\partial F}{\partial y} \right|_{i=i_0, y=y_0} (y - y_0), \quad (9)$$

其中:

$$F_0 = k_0 \mu_0 N^2 A \left[\left(\frac{I_0 + i_0}{C_0 + y_0} \right)^2 - \left(\frac{I_0 - i_0}{C_0 - y_0} \right)^2 \right]$$

$$\frac{\partial F}{\partial i} = 2 k_0 \mu_0 N^2 A \left[\frac{(I_0 + i_0)}{(C_0 + y_0)^2} + \frac{(I_0 - i_0)}{(C_0 - y_0)^2} \right]$$

$$\frac{\partial F}{\partial y} = -2 k_0 \mu_0 N^2 A \left[\frac{(I_0 + i_0)^2}{(C_0 + y_0)^3} + \frac{(I_0 - i_0)^2}{(C_0 - y_0)^3} \right]$$

在实际工作中,大型车在光电跟踪设备跟踪系统的震动振幅 $< 10\ \mu\text{m}$,远小于衔铁和电磁铁之间的距离 C_0 ,所以可以认为 $y_0 = 0$,将 $y_0 = 0$ 代入式(9)得到如下公式:

$$F = 4 k_0 \mu_0 N^2 A \left[\frac{I_0}{C_0^2} i - \frac{I_0^2 + i_0^2}{C_0^3} y \right], \quad (10)$$

在式(10)中 $\frac{I_0}{C_0^2} i \gg \frac{I_0^2 + i_0^2}{C_0^3} y$,所以

$$F \approx 4 k_0 \mu_0 N^2 A \frac{I_0}{C_0^2} i, \quad (11)$$

从式(11)可以看出电磁驱动器的输出力与控制电流线性相关。

k_0 为与电磁铁结构有关的常数,选 $k_0 = 0.25$; μ_0 为真空磁导率($\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}\ \text{N/A}^2$); A 为电磁铁铁心的截面面积,选择 $A = 710\ \text{mm}^2$; N 为线圈匝数,选 $N = 1\ 000$; I_0 为基础电流,取 $I_0 = 0.5\ \text{A}$; i 为控制电流; C_0 为电磁铁与衔铁之间的间隙,取 $C_0 = 1.5\ \text{mm}$ 。

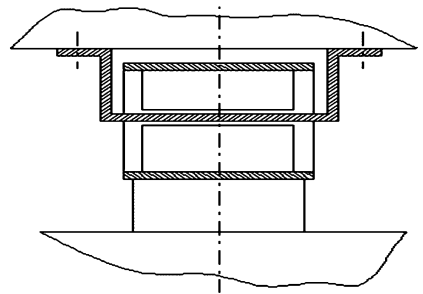


图4 电磁作动器结构图

Fig. 4 Structure of differential electromagnetic actuator

6 硬件电路

6.1 原理图

工作原理如图5所示,首先通过位移传感器测量平台变型情况,然后把测得的模拟信号转换

成数字信号,把数字信号送到 DSP 进行计算,计算结果转换成电流送给驱动器,控制电磁力,完成减振工作。

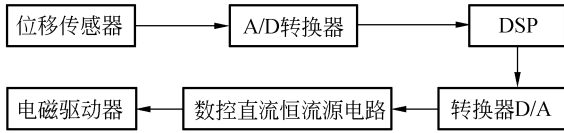


图 5 工作原理图
Fig. 5 Principle of working

6.2 电路图

DSP 与 A/D、D/A 的电路比较好连接,下面介绍一下数控直流电流源电路的设计。电路图如图 6 所示。D/A out 为数模转换器输出电压值 (0~5 V),同时也是功率放大器的输入端,12 位数模转换器的精度可以达到 0.001 V,所以控制电流的精度可以达到 10^{-5} A,控制电流的峰值为 0.04 A,完全能够满足系统的要求, R_0 为采样电阻,其阻值为 100 Ω , RL 为电磁线圈电阻,其阻值约为 15 Ω 。 W_3 为保护电阻,有限流的作用。当采用这种电路时,负载电流的大小与负载阻值无关,电路电流大小只与采样电阻和数模转换器输出电压有关。

电磁线圈需要有冷却装置,因为长时间工作电磁线圈会发热,导致线圈烧坏。

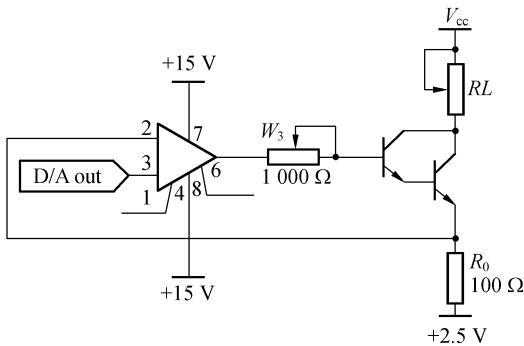


图 6 直流电流源电路
Fig. 6 Electric circuit of direct current power

7 仿真分析结果

仿真软件采用 MSC. ADAMS 与 Matlab 联

合仿真,在 ADAMS 中建立仿真模型,同时在 Matlab 中建立仿真所需的变量。

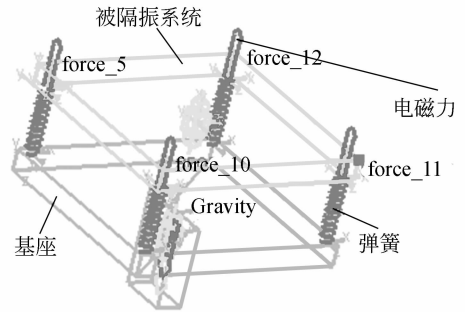


图 7 仿真模型
Fig. 7 Model of simulation

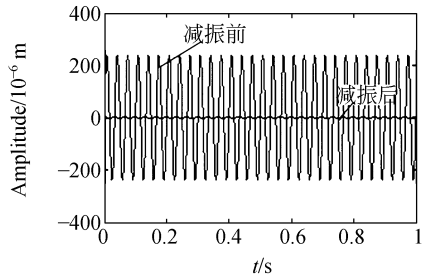


图 8 一级减振效果
Fig. 8 Result of once vibration isolation

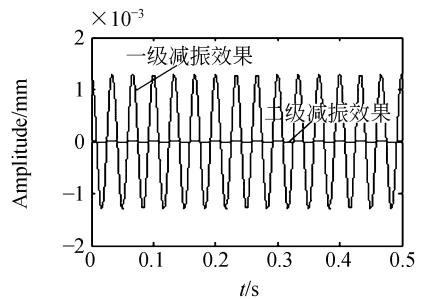


图 9 二级减振效果
Fig. 9 Result of twice vibration isolation

8 实验及分析

实验将平台设计为一级减振系统,弹簧刚度为 25 000 N/m,载重质量为 500 kg,振动测量仪

测量精度为 $0.1 \mu\text{m}$ 。数据测量点为与四个支撑 弹簧对应的平台上方。

表 1 实验数据

Tab.1 Experiment data

	基座振动 /mm	测量点 1 / μm	测量点 2 / μm	测量点 3 / μm	测量点 4 / μm	理论值 / μm
实验 1	0.22	1.6	1.6	1.5	1.6	1.3
实验 2	0.20	1.5	1.4	1.5	1.4	1.2
实验 3	0.18	1.3	1.2	1.1	1.3	1.0
实验 4	0.15	1.0	1.0	0.9	1.0	0.8

注:测量数值为 3 次测量的平均值。

理论分析与实际平台的误差主要是由于实际系统中弹簧存在阻尼并且不是严格线性的,同时干扰源振幅也不是很精确。

9 结 论

为了确保光学精密设备稳定工作,本文提出了一种新的隔振方法,介绍了隔振方法的机械结构及工作原理,然后对影响精度的因素进行了分

析,设计了隔振系统中的核心设备,电磁驱动器,并设计了简单的电路系统。最后,进行了仿真分析及实验,结果显示基座振幅为 0.22 mm 时,减振台支撑面振幅为 $1.6 \mu\text{m}$;基座振幅为 0.20 mm 时,减振台支撑面振幅为 $1.4 \mu\text{m}$;基座振幅为 0.18 mm 时,减振台支撑面振幅为 $1.2 \mu\text{m}$;基座振幅为 0.15 mm 时,减振台支撑面振幅为 $1.0 \mu\text{m}$,结果表明提出的隔振方法能够起到有效的减振作用。

参考文献:

[1] 刘彦,谭久彬,王雷. 差动电磁作动器的超大型光学仪器隔振基础的主动控制机理 [J]. 光学精密工程,2007,15(10):1602-1608.

LIU Y, TAN J B, WANG L. Control mechanism based on differential electromagnet actuator for a room-sized optical instrument vibration isolation foundation [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2007, 15 (10):1602-1608. (in Chinese)

[2] 高策,乔彦峰. 光电经纬仪测量误差的实时修正 [J]. 光学精密工程,2007,15(6):846-851.

GAO C, QIAO Y F. Real-time error-correction method for photoelectric theodolite [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2007, 15(6):846-851. (in Chinese)

[3] 季宏丽,裘进浩,赵永春,等. 基于 TMS320F2812 的悬臂梁振动半主动控制 [J]. 光学精密工程,2009, 17(1):126-131.

JI H L, QIU J J, ZHAO Y C, *et al.*. Semi-active control for structural vibration of cantilever beam based on TMS320F2812 [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2009, 17(1):126-131. (in Chinese)

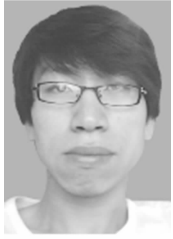
[4] 董斌,丁亚林,田海英,等. 新型航空光学遥感器减振结构设计 [J]. 光学精密工程,2008,16(12): 2454-2459.

DONG B, DING Y L, TIAN H Y, *et al.*. Design of vibration absorbing structure for aerial remote sensor [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2008, 16(12): 2454-2459. (in Chinese)

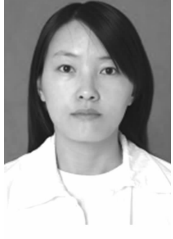
[5] 梅德庆,陈子辰. 微制造平台的精密隔振系统研究 [J]. 光学精密工程,2001,9(6):506-510.

MEI D Q, CHEN Z C. Research on precision isolation system of micro manufacturing platform [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2001, 9(6): 506-510. (in Chinese)

作者简介:



宁大勇(1981—),男,黑龙江青冈人,博士研究生,主要从事车载大型光电跟踪设备稳定性的研究。E-mail: ningdayongning@163.com



刘稀凤(1985—),女,黑龙江七台河人,教研员,主要从事特教及数学方法的研究。E-mail: lxfeng2001183@sina.com

通讯作者:



高云国(1955—),男,山东乳山人,研究员,博士生导师,1991年于中科院长春光学精密机械与物理研究所获硕士学位,主要从事光电仪器设备、精度定位方法与机构、机械传动方法的研究。E-mail: gaoyunguo@163.com

● 下期预告

运用统计小波的光纤光栅结构健康监测技术

王 为,林玉池,赵美蓉,沈小燕,黄银国,宋 乐

(天津大学 精密测试技术及仪器国家重点实验室,天津 300072)

针对振动型结构健康监测方法的特点,搭建了基于非平衡 M-Z 干涉仪和相位载波解调技术的光纤光栅损伤识别系统;运用小波包分解振动信号,建立了基于小波包节点能量相对变化率之和的结构损伤识别指标;介绍了统计过程控制原理,推导了使用均值-极差控制图分析损伤识别指标,进行结构连续损伤识别的过程。实验测试了铝制简支梁结构处于健康状态和 3 种损伤状态下的各 40 次振动信号,信号时域图显示各状态振动信号持续时间均约为 0.05 ms,幅值基本相同;依据结构健康状态下的统计过程控制限(12.85,41.35),进行了均值-极差控制图损伤识别分析,结果表明搭建的损伤识别系统能连续地对结构进行健康监测。