

文章编号: 2095-4980(2018)04-0753-04

固有频率压电堆激励无损测量方法

颜刚毅

(南京电子技术研究所, 江苏 南京 210039)

摘要: 提出一种利用压电堆激励测量结构固有频率的方法, 该方法利用压电堆产生纳米级微小振动对结构进行扫频激励。与传统的采用振动台激励、锤击等固有频率测量方法相比, 所提出的方法激振幅度小, 对于阻尼小、品质因数高且达到共振频率时位移放大系数大的结构, 也不会产生破坏。设计了品质因数很高的悬臂梁结构进行实验, 为准确探测微小振动信号, 采用电涡流传感器测量位移, 并使用锁定放大器提高信噪比。仿真与实验数据表明, 该方法准确有效, 可实现对结构固有频率的无损测量。

关键词: 固有频率; 无损测量; 压电堆; 锁定放大; 电涡流传感器

中图分类号: TN914.42

文献标志码: A

doi: 10.11805/TKYDA201804.0753

Nondestructive measurement of natural frequency by excitation of a piezoelectric stack

YAN Gangyi

(Nanjing Research Institute of Electronics Technology, Nanjing Jiangsu 210039, China)

Abstract: A method of measuring natural frequency by excitation of a piezoelectric stack is proposed. In comparison with the traditional method that using a vibrating table or a hammer, the proposed method is nondestructive to the structure even when the structural damping is small and the displacement magnification factor is large, because the amplitude of the vibration is controlled to be exceptionally small. A cantilever of a high Q factor is designed to verify the method. An eddy current sensor and a lock-in amplifier are utilized to detect the displacement of the cantilever. The finite element analysis and the experimental result show that the proposed method can measure the natural frequency without destruction to the structure effectively.

Keywords: natural frequency; nondestructive measurement; piezoelectric stack; lock-in amplifier; eddy current sensor

结构的固有频率是一项极为重要的参数, 其测量在工程上具有重要意义。实验测得的固有频率不仅有助于修正有限元模型^[1], 进一步优化结构^[2], 也是检验结构是否达到设计预期的重要手段。结构的固有频率应远离环境中的振动频率, 以免结构产生共振, 进而导致结构破坏。

常见的测量结构固有频率的方法有锤击法和振动台试验法。锤击法是指利用重锤敲击试件, 相当于给结构一个 δ 激励, 通过测量结构的响应, 得到固有频率; 振动台试验法需要设计一个振动夹具, 将试件固定在夹具上, 再将夹具固定于振动台, 在试件上安装振动传感器, 利用振动台进行扫频测量。其缺点主要有: 振动台操作复杂, 场地占用大, 夹具设计投产周期长, 夹具本身的振动特性会影响测量结果, 而刚度足够的夹具往往比较笨重, 又可能影响振动台本身的特性, 即便采用振动传感器产生反馈信号进行闭环控制, 有时仍无法调整至理想的试验条件。此外, 振动台在试验前虽可以小幅试振, 但试件本身如果阻尼非常小, 达到共振点时仍有被振坏的风险。

本文提出一种利用压电堆激励测量结构固有频率的方法。利用压电堆产生的微小振动来激励结构振动, 激振幅度极小, 即使结构阻尼很小, 共振时位移放大倍数很高, 最大位移仍然可以控制在较小范围(本实验中为小于 $1\ \mu\text{m}$), 结构最大应变极小, 不会对结构产生应力损伤。

1 原理

1.1 压电堆结构及惯性冲击力计算

压电材料既能传感又能致动, 在结构中有相当多的应用^[3-4]。压电堆是利用压电材料的逆压电效应进行致动的机械电子元件。压电堆通电后可产生形变, 将电能转换成机械能。压电堆致动器广泛用于精密定位、精密测量领域^[5-11]。

压电堆内部由多层压电片堆叠而成, 这是因为单层压电片所能产生的位移太小, 比如厚度 0.4 mm 的压电片, 按最大允许的应变 1/1 000 来计算, 厚度方向最大产生 0.4 μm 的位移。如果把压电片做厚, 驱动电压又太高, 不方便使用。采用多层薄压电片堆叠的方式既能保证足够的输出位移, 又能避免驱动电压过高的问题。具体封装结构如图 1 所示, 相邻 2 层压电片极化方向相反, 每 2 层压电片周边涂有绝缘体, 两侧刷有导电涂层, 从两侧的导电涂层再引出导线。

长度为 l 的压电堆通以驱动电压 U , 产生伸缩量 Δl :

$$\Delta l = nd_{33}U \quad (1)$$

式中: n 为压电堆中压电片层数; d_{33} 为压电材料的压电常数。

自身的伸长缩短带来质心的上下变动, 带给附着的结构件以惯性力作用, 本次试验中将其作为一个极小的振动器。试验所用的压电堆本身固有频率远高于被测试件的结构固有频率, 其动态特性几乎不受待测试件影响。此外, 严格来说, 压电堆底部由于受约束, 整体并不是均匀的伸长缩短, 而是有一部分过渡区域, 如图 2(c)中的仿真模型所示, 但此区域较小, 为简化计算可不予考虑。这样, 压电堆振动对所附着的结构的惯性力可用简化的模型来计算, 如图 2(a)、图 2(b)所示。假设压电堆质量为 m , 高度为 l , 不加电压时, 初始状态质心位置为 H_0 , 显然 $H_0=l/2$ 。当压电堆通以频率为 f_0 的正弦电压 $U=U_0\sin(2\pi f_0 t)$ 时, 压电堆的质心位置变为:

$$H_1 = l(1 + \varepsilon) / 2 \quad (2)$$

式中 $\varepsilon = \Delta l / l$ 为压电堆的应变。压电堆因应变而产生的质心上下运动带给结构的惯性力为:

$$F = -m\ddot{H}_1 = 2m\pi^2 f_0^2 nd_{33}U_0 \sin(2\pi f_0 t) \quad (3)$$

此力作用于结构上, 当达到结构固有频率时, 结构响应会产生峰值。

1.2 锁定放大原理

为检测微弱信号, 尽可能减小噪声干扰, 通常采用锁定放大技术, 锁定放大技术的基本原理为相关检测^[12-15]。待测量信号通常为周期性, 而环境噪声一般是随机的, 噪声中与有用信号频率完全相同的电信号的功率趋于 0。这样, 如果引入一个与待测信号频率相同的参考信号, 通过自相关与互相关运算就可以从噪声中分离出有用信号。

设待测信号为:

$$X(t) = A\sin(\omega_0 t) + n(t) \quad (4)$$

式中: A 为待测信号幅值; ω_0 为信号的角频率; $n(t)$ 为噪声信号。

设参考信号为:

$$Y(t) = B\sin(\omega_0 t + \varphi) \quad (5)$$

式中: B 为参考信号幅值; ω_0 为参考信号的角频率, 与待测信号相同; φ 为相位差。

将两信号相乘并积分(低通滤波), 并假设低通滤波器时间常数足够, 则输出信号 $U_0(t)$:

$$U_0(t) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} X(t)Y(t)dt = \frac{1}{2} AB \cos \varphi \quad (6)$$

最终, $U_0(t)$ 为一个直流分量。若另有一通道给参考信号额外 90° 相移, 则可以得到 $U_0(t) = (1/2) AB \sin \varphi$, 2 路信号再作运算, 即可得到待测信号幅值 A 。

由上面的分析可见, 噪声的影响被去除了, 只提取了有用信号。

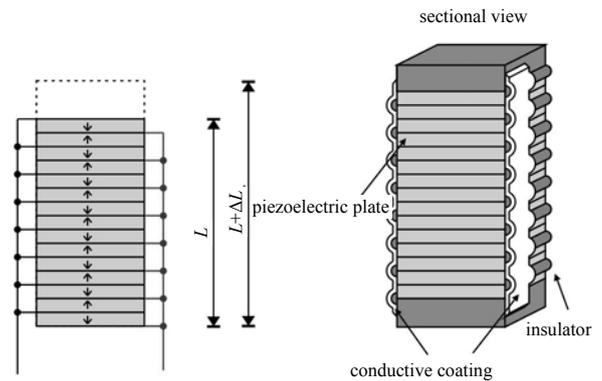


Fig.1 Structure of a piezoelectric stack
图 1 压电堆结构示意图

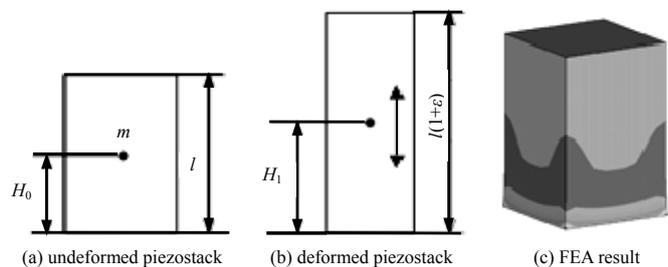


Fig.2 Simplified theoretical model to calculate the inertial force
图 2 惯性力计算模型

2 实验与仿真

2.1 实验装置

使用一根悬臂梁作为测试件(见图 3),材料为冷轧碳素结构钢,尺寸为 49 mm×4.4 mm×0.39 mm。实验装置原理如图 4 所示,悬臂梁端部固定并置于气垫减振台上,以减少环境振动噪声。悬臂梁端部贴有一压电堆,压电堆尺寸为 1.22 mm×1.30 mm×3.40 mm,本身共振频率约 390 kHz,为尽量减小导线的影响,使用直径 70 μm 的导线,并粘贴于结构件上以免晃动。使用的压电堆极小,以尽量减小对结构本身模式的影响。

实验中采用电涡流传感器(SMT9700-15N,KAMAN,USA)用于测量悬臂梁的实际振动位移。本次实验频率在 5 kHz 以下,使用商用化的锁定放大器(Model 7265,AMETEK Co.,USA)。用信号发生器提供激励信号进行扫频,压电堆将电信号转换为机械振动,当达到待测结构件的模态共振频率时,待测结构件的振幅达到峰值。

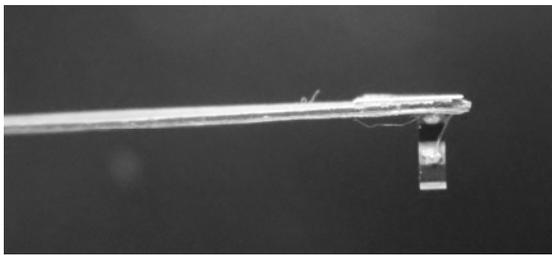


Fig.3 A cantilever to be tested
图 3 悬臂梁测试件

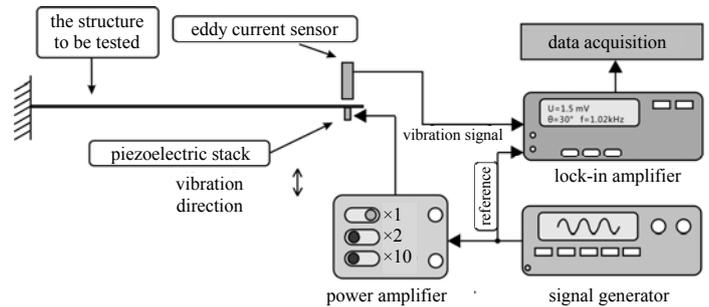


Fig.4 Experimental setup
图 4 实验装置原理图

2.2 实验与仿真结果

实验结果如图 5 所示,待测结构件在若干频率点(101.8 Hz,672.4 Hz,1 912 Hz,2 037.6 Hz, 3 774 Hz)产生了较大的振幅。作为对比,用 ANSYS 仿真结构件的模态,根据实验结果微调钢的参数,密度设置为 7 840 kg/m³,杨氏模量为 141 GPa,泊松比为 0.33,结果如图 6 所示,其中模态 3 为悬臂梁的横向振动模态,故不可能激励出。材料参数经过微调后,仿真出的固有频率与实验基本一致。

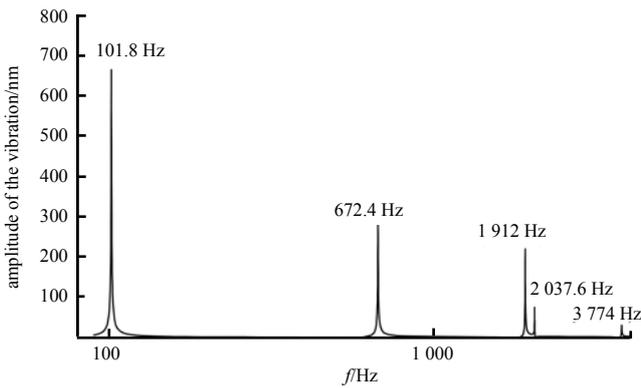


Fig.5 Amplitude–frequency response
图 5 幅频响应

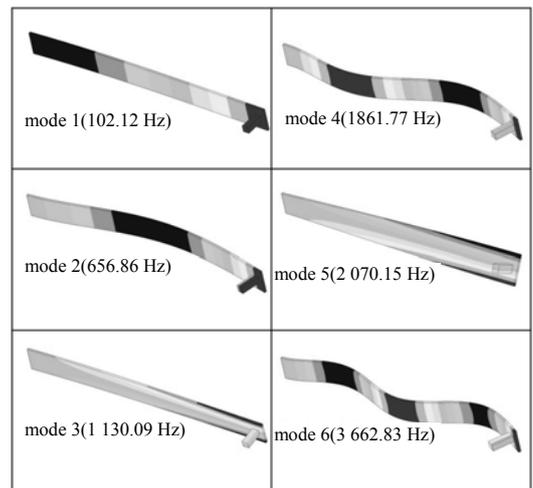


Fig.6 Modes of the structure (FEA result)
图 6 结构模态有限元仿真

实验时所粘接的小压电堆有一定的质量,会降低整个结构的固有频率。再次仿真,将压电堆去除,这时悬臂梁固有频率分别为 112.1 Hz,702.4 Hz,1 249 Hz,1 967 Hz,2 342 Hz,3 858 Hz,与之前的结果有一定的偏差。实际应用中,压电堆的影响会比此次实验中的更小,因为悬臂梁这种形式比较容易受到附加质量的影响。事实上,常规振动试验时,结构上加载的振动传感器同样会拉低结构的固有频率,只不过,当附加的质量远小于结构本身时,影响可以忽略不计。此外,当结构件较轻、较小时,亦可考虑将压电堆置于结构本身的固定点,将压电堆作为振动台使用,这样就可以避免附加质量的影响。

3 结论

本文提出利用压电堆激励测量结构固有频率的方法,其最大优点在于激振幅度极小,这样激振频率即使达到结构固有频率,结构的共振位移仍然维持在较小幅度,该方法可以有效避免结构因共振遭到破坏。引入锁定放大技术测量结构固有频率,可有效减小环境噪声的影响,使得测得信号更为准确。采用电涡流传感器非接触测量结构件的振动,减小了传感器本身的附加质量对结构固有频率的影响。本文提出的方法为结构固有频率的无损测量提供了新的思路。

参考文献:

- [1] 郭勤涛,张令弥,费庆国. 结构动力学有限元模型修正的发展——模型确认[J]. 力学进展, 2006,36(1):36-42. (GUO Qintao,ZHANG Lingmi,FEI Qingguo. From FE model updating to model validation:advances in modeling of dynamic structures[J]. Advances in Mechanics, 2006,36(1):36-42.)
- [2] 李芳,凌道盛. 工程结构优化设计发展综述[J]. 工程设计学报, 2002,9(5):229-235. (LI Fang,LING Daosheng. Survey of the development in engineering structural optimization design[J]. Journal of Engineering Design, 2002,9(5):229-235.)
- [3] 李传兵,廖昌荣,张玉璘,等. 压电智能结构的研究进展[J]. 压电与声光, 2002,24(1):42-46. (LI Chuanbing,LIAO Changrong,ZHANG Yulin,et al. Advances of research on piezo-intelligent structures[J]. Piezoelectrics & Acoustooptics, 2002,24(1):42-46.)
- [4] MEITZLER A H,BERLINCOURT D,WELSH F S,et al. 176-1987-IEEE Standard on Piezoelectricity[S]. 1988.
- [5] MAIN J A,GARCIA E. Piezoelectric stack actuators and control system design:strategies and pitfalls[J]. Journal of Guidance Control Dynamics, 2012,20(3):479-485.
- [6] YAN G,LIU Y,FENG Z H. A dual-stage piezoelectric stack for high speed and long range actuation[J]. IEEE/ASME Trans. on Mechatronics, 2015,20(5):2637-2641.
- [7] AKDOGAN E K,ALLAHVERDI M,SAFARI A. Piezoelectric composites for sensor and actuator applications[J]. IEEE Trans. on Ultrasonics Ferroelectrics & Frequency Control, 2005,52(5):746-775.
- [8] YONG Y K,MOHEIMANI S O,KENTON B J,et al. Invited review article:high-speed flexure-guided nan positioning:mechanical design and control issues[J]. The Review of Scientific Instruments, 2012, 83(12):121101.
- [9] RAMADAN K S,SAMEOTO D,EVOY S. A review of piezoelectric polymers as functional materials for electromechanical transducers[J]. Smart Materials & Structures, 2014,23(3):033001-033026.
- [10] TRESSLER J F,ALKOY S,DOGAN A,et al. Functional composites for sensors, actuators and transducers[J]. Composites Part A:Applied Science & Manufacturing, 1999,30(4):477-482.
- [11] GIBSON R F. A review of recent research on mechanics of multifunctional composite materials and structures[J]. Composite Structures, 2010,92(12):2793-2810.
- [12] 高普占. 微弱信号检测[M]. 北京:清华大学出版社, 2004. (GAO Puzhan. Detection of weak signals[M]. Beijing:Tsinghua University Press, 2004.)
- [13] 孙志斌,陈佳圭. 锁相放大器的新进展[J]. 物理, 2006,35(10):879-884. (SUN Zhibin,CHEN Jiagui. Advance of lock-in amplifier[J]. Physics, 2006,35(10):879-884.)
- [14] 万鸣,廖志雄,魏萍. 一种自偏置锁相环结构的分析[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2013,11(1):110-112. (WAN Ming,LIAO Zhixiong,WEI Ping. Analysis of a self-offset Phase Lock Loop[J]. Journal of Terahertz Science & Electronic Information Technology, 2013,11(1):110-112.)
- [15] GERVASONI G,CARMINATI M,FERRARI G. Switched ratiometric lock-in amplifier enabling sub-ppm measurements in a wide frequency range[J]. Review of Scientific Instruments, 2017,88(10):104704. doi:10.1063/1.4996423.

作者简介:



颜刚毅(1987-),男,南京市人,博士,工程师,主要研究方向为雷达天线阵面结构.email:yangangyi@126.com.