

悬臂梁式压电振动能量收集器的疲劳分析

张 淼,孟庆丰,王宏金

(西安交通大学 润滑理论与轴承研究所,陕西 西安 710049)

摘 要:建立了悬臂梁式压电振动能量收集器的有限元模型,通过模态分析求解了其第一阶固有频率,并通过实验验证了求解结果的准确性。对所建立的有限元模型进行静态分析后将静态分析的结果导入 ANSYS nCode DesignLife 中进行疲劳分析,结果表明,随着激励位移幅值的增大,压电层的应变与其成线性关系增大,而疲劳寿命迅速缩短,当激励位移增大 1 倍时,疲劳寿命缩短了 284 倍。因此在实际应用中,要综合考虑压电悬臂梁的输出电压及压电陶瓷层的疲劳寿命,才能实现最大的电能输出。

关键词:压电悬臂梁;有限元;模态分析;疲劳分析;疲劳寿命

中图分类号:TN384;U467.4+97 **文献标识码:**A

Fatigue Analysis for Cantilever Piezoelectric Vibration Energy Harvester

ZHANG Miao, MENG Qingfeng, WANG Hongjin

(Theory of Lubrication and Bearing Institute, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: The finite element model of cantilever piezoelectric vibration energy harvester is established. Its first order natural frequency is solved by modal analysis and an experiment verifies the accuracy of the result. The static analysis of the established finite element model is carried out, then the results is conducted into ANSYS nCode DesignLife for fatigue analysis. The results show that with the increase of excitation displacement amplitude, the strain of piezoelectric layer increases linearly but the fatigue life shortens rapidly. When the excitation displacement doubles, the fatigue life is reduced as much as 284 times. Therefore, the output voltage of piezoelectric cantilever beam and the fatigue life of piezoelectric layer should be considered comprehensively in order to achieve maximum power output.

Key words: piezoelectric cantilever beam; finite element; modal analysis; fatigue analysis; fatigue life

0 引言

悬臂梁式压电振动能量收集器因其结构简单,能量密度高,易实现等特点得到了国内外许多学者的研究^[1]。

在实际应用中,使压电悬臂梁的一阶固有频率与振动环境相匹配,由于压电悬臂梁的输出电压与激振力和激励位移成正比^[2-3],因此为了获得尽可能高的输出电压,一般使悬臂梁工作于尽可能大的激振力或激励位移下。然而,随着激振力或激励位移的增大,构成压电悬臂梁的压电材料和金属材料的应力、应变也会相应地增加,在这种长周期交变应力的工况下,其材料的疲劳寿命将成为影响压电悬臂梁最终输出电能的一个重要因素。目前,对压电悬臂梁的研究多集中在振动性能,对疲劳特性的研究还较少,且主要是对金属材料^[4-5]的研究。因此,本文运用新一代计算机辅助工程(CAE)疲劳分析软

件 nCode DesignLife,联合 ANSYS 的压电耦合模块对压电悬臂梁进行模态、静态及疲劳分析。

1 nCode DesignLife 疲劳分析基础

疲劳是指在交变应力长期作用下,结构在无明显塑性变形的情况下发生突然断裂破坏的现象。材料的疲劳特性一般用材料承受的最大应力、应变和相应的循环次数间的关系来表示,即通常所说的最大应力-疲劳寿命(S-N)曲线或应变-疲劳寿命(E-N)曲线。

Designlife 是 ncode 公司开发的新一代 CAE 疲劳分析软件,它继承了已得到广泛应用的上一代疲劳分析软件 FE-Fatigue 的功能特点^[6-7]。其疲劳分析的基本原理是根据有限元分析中所获得的应力、应变结果,结合材料的疲劳寿命性能曲线,应用疲劳理论计算出零部件的疲劳寿命分布。Designlife 的组成如图 1 所示。

收稿日期:2013-11-07

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51275380)

作者简介:张淼(1989-),男(蒙古族),内蒙赤峰人,硕士生,主要从事微发电及能量收集技术的研究。E-mail: zhangmiao0520@163.com。
孟庆丰(1959-),男,河北海兴人,教授,博士,主要从事机械信号分析、故障诊断与状态预,微发电及能量收集技术的研究。

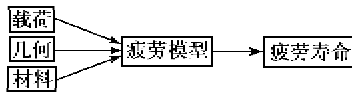


图1 nCode Designlife的组成

在应用中,将有限元分析得到的应力、应变结果导入,通过加载载荷曲线,设置结构材料属性,选择相应的疲劳分析模型,通过求解即可得到结构的疲劳寿命。

2 ANSYS 模态分析及实验验证

本文所研究的悬臂梁式压电振动能量收集器的结构和尺寸如图2所示。其中,所有组成部分的宽均为20 mm。压电悬臂梁主要由3部分构成,中间为金属层,材料为黄铜,起支撑和导电的作用。压电陶瓷层黏贴于金属层上、下表面,材料选用PZT-5H,两个压电陶瓷片均沿厚度方向极化,且通过金属层的导电性实现双压电片的并联,悬臂梁末端附加有起频率调节作用的质量块,材料采用45#钢。

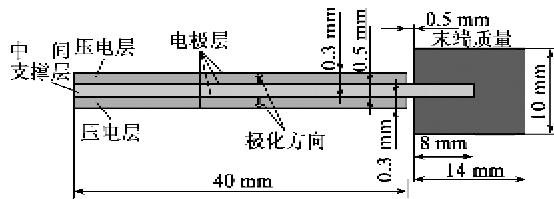


图2 压电悬臂梁结构与几何尺寸

在ANSYS中可作压电分析的单元很多,考虑本文压电悬臂梁的结构形状,选用8个节点的SOLID5作为压电分析单元,其他的中间金属层和质量块均采用无压电效应的8节点SOLID45单元。ANSYS中压电材料各参数矩阵中参数的定义顺序与材料手册中的定义不同,可参考文献[8]进行设置。由于本文的压电悬臂梁的结构较规则,因此采用扫掠式的网格划分法。划分完网格后对压电悬臂梁施加边界约束。给压电悬臂梁的固定端施加零位移约束从而限制其6个方向的自由度,此为机械约束。再对压电层进行电压自由度耦合,这是对压电陶瓷进行压电分析的关键,此为电学约束。

为获取压电悬臂梁的固有频率,确定在下面的分析中激励位移的频率,对图2得到的压电悬臂梁仿真模型进行模态分析,得到其一阶固有频率(f_1)为71.28 Hz。图3为压电悬臂梁的一阶振型图。

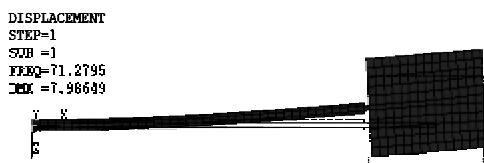


图3 压电悬臂梁一阶振型图

为了验证 ANSYS 进行压电分析结果的准确性,通过搭建实验台来测量压电悬臂梁的振动衰减信号,进而求取其固有频率及结构的阻尼比。实验台的组成如图4所示。

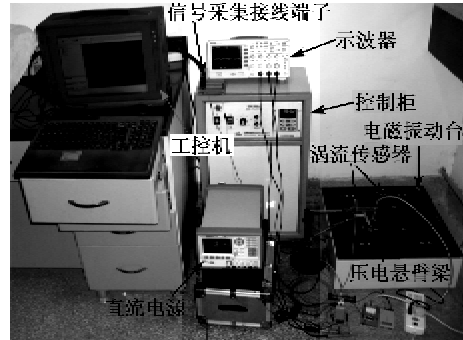


图4 压电悬臂梁振动衰减信号获取实验台

将压电悬臂梁固定在‘Z’型支架上,并给其自由端一个微小的瞬时位移激励,然后让其自由振动。利用电涡流传感器可测得其振动衰减曲线,每隔2个周期记录1次衰减曲线的时间坐标和位移坐标值,共测到7个坐标点如图5所示。利用

$$f_1 = \frac{6 \times 3}{\sum_{i=1}^5 (X_{i+1} - X_i)} \quad (1)$$

$$\zeta = \frac{1}{6 \times 3} \frac{\sum_{i=1}^6 \ln\left(\frac{Y_i}{Y_{i+1}}\right)}{2\pi} \quad (2)$$

可计算出压电悬臂梁的 $f_1 = 70.039$ Hz,结构的阻尼比(ζ)为0.0147。

式中: X_{i+1}, X_i 为图5中相邻标记点的 x 坐标值; Y_i, Y_{i+1} 为图5中相邻标记点的 y 坐标值。

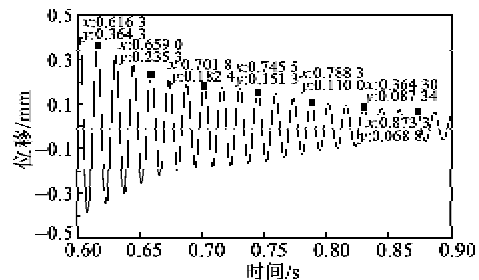


图5 压电悬臂梁的振动衰减曲线

与ANSYS模态分析求解的结果71.28 Hz相比,误差仅为1.8%,验证了ANSYS进行压电分析结果的准确性。

3 压电悬臂梁的疲劳分析

对上文(指求取压电悬臂梁固有频率时建立的仿真模型)得到的压电悬臂梁仿真模型进行静态分

析,在其自由端面施加位移激励,采用路径操作的后处理方式,得到上、下压电层沿轴向(x 方向)的应变。以 2 mm 激励位移为例,得到的结果如图 6 所示。通过改变激励位移的幅值可得到压电层最大应变与激励位移幅值间的变化关系,如图 7 所示。

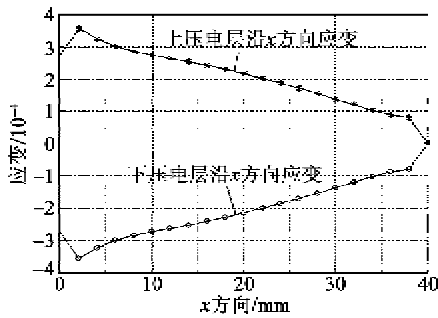


图 6 上、下压电层沿 x 方向应变

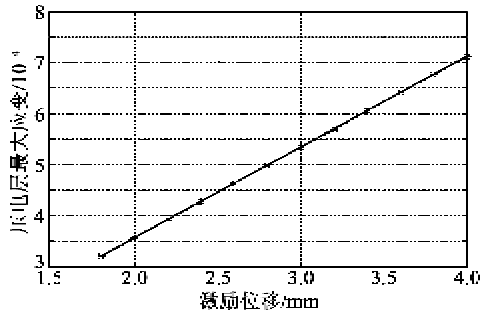


图 7 不同激励位移下压电层最大应变

将 ANSYS 静态分析的结果导入 Designlife 中,选用基于时间载荷的应变-寿命模块(nCode EN TimeSeries)对压电悬臂梁进行疲劳分析,疲劳计算的组成如图 8 所示。分析过程中,假设压电悬臂梁自由端面受到频率等于其一阶固有频率的正弦位移激励。因为 DesignLife 中没有压电陶瓷材料的 $E-N$ 曲线,因此,我们通过利用压电陶瓷的弹性模量(60 GPa)和其强度极限(UTS,77 MPa)生成 $E-N$ 曲线的方式来对压电陶瓷材料属性进行设置。

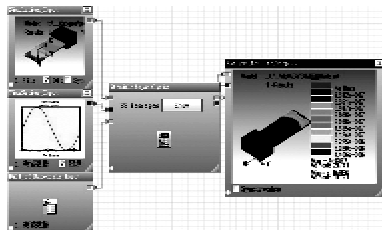


图 8 nCode DesignLife 中疲劳计算的组成

图 8 展示了在 2 mm 的激励位移下,压电悬臂梁疲劳分析的结果,从结果中可得出压电悬臂梁的疲劳寿命分布情况及结构的最短疲劳寿命出现的部位。通过加载不同幅值的激励位移,得到压电悬臂

梁的疲劳寿命随激励位移的变化情况,如图 9 所示。

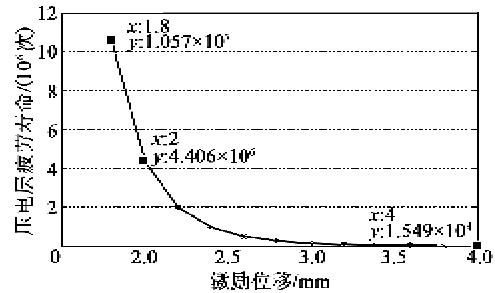


图 9 不同激励位移下压电层疲劳寿命

4 结论

1) ANSYS 的压电耦合模块为压电问题的分析提供了一个简单、高效的方法。通过实验验证与仿真结果的对比可看出,用 ANSYS 进行压电分析的结果较准确。

2) 本文所分析的悬臂梁式压电振动能量收集器由于是对称式的结构,因此在同一振动时刻,上、下压电层沿着 x 方向的应力、应变的大小相等,方向相反。即上压电层受拉,下压电层受压,或上压电层受压,下压电层受拉。更重要的是上、下压电层 x 方向的应力、应变与梁长基本成线性关系,这对压电悬臂梁产生稳定均匀的电能非常关键。证明了该对称结构压电悬臂梁用于能量收集的优越性。

3) 随着激励位移幅值的增大,压电层的最大应变与其成线性关系增大,当激励位移增大 1 倍时(2~4 mm),压电层最大应变也相应地增大了 1 倍。

4) 从疲劳寿命分布结果中可看出,由于在振动过程中压电悬臂梁根部附近受到的应力、应变最大,因此疲劳破坏出现在悬臂梁根部附近。结构的疲劳破坏发生在压电陶瓷层,这一方面是因为黄铜的强度极限(206 MPa)大于压电陶瓷的强度极限(77 MPa),另一方面是因为对弯曲振动的悬臂梁结构来说,横截面上任一点上受到的正应力与该点到中性轴的距离成正比,因而压电陶瓷受到的应力大于黄铜受到的应力。

5) 对于疲劳分析,一般认为如果经历 10^7 次应力循环,试件尚不破坏,则可认为试件经受无限次应力循环也不会破坏。从图 9 中可看出,当激励位移不大于 1.8 mm 时,压电悬臂梁的疲劳寿命大于 10^7 次,可认为其不发生疲劳破坏。当激励位移大于 1.8 mm 时,随着激励位移幅值的增大,疲劳寿命逐渐缩短,且缩短速度很快,当激励位移增大 1 倍时

(2~4 mm),疲劳寿命缩短了 284 倍,由此可见,当激励位移增加到一定值时,对压电陶瓷层的疲劳寿命影响很大,在实际应用中,不能任由激励位移任意增大而获得高的电压输出,要综合考虑其电压输出及压电陶瓷层的疲劳寿命,选择最佳的激励位移,才能使压电悬臂梁实现最大的电能输出。

参考文献:

- [1] WANG Hongjin, MENG Qingfeng. Analytical modeling and experimental verification of vibration-based piezoelectric bimorph beam with a tip-mass for power harvesting[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2013, 36(1):193-209.
- [2] 何学文,黄国平.基于 Ansys 的 0-3 型压电振子的有限元分析[J].压电与声光,2011,33(6):968-971.
HE Xuewen, HUANG Guoping. Ansys-based finite element analysis of 0-3 model piezoelectric vibrator[J]. Piezoelectrics & Acoustooptics, 2011, 33(6):968-971.
- [3] 缪建,朱若谷.基于 ANSYS 的压电微悬臂双梁的有限元分析[J].压电与声光,2011,33(4):557-560.
MIAO Jian, ZHU Ruogu. The finite element analysis of twin piezoelectric micro cantilever based on ANSYS [J]. Piezoelectrics & Acoustooptics, 2011, 33(4):557-560.
- [4] 刘焱,接勤,谢海峰,等.共振型气体泵用压电振子的疲劳寿命[J].光学精密工程,2013,21(4):941-947.
LIU Yan, JIE Meng, XIE Haifeng, et al. Fatigue life of piezoelectric actuator used in resonance-type air pump [J]. Optics and Precision Engineering, 2013, 21(4):941-947.
- [5] 何秀华,毕雨时,王健,等.基于 ANSYS/Fatigue 的泵用压电振子疲劳分析[J].排灌机械工程学报,2011,29(1):35-38.
HE Xiuhua, BI Yushi, WANG Jian, et al. Fatigue analysis of piezoelectric vibrator for pump based on ANSYS/Fatigue [J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2011, 29(1):35-38.
- [6] 张恺,王德石,张程焯.引信压电电源机电转换装置振动特性分析[J].四川兵工学报,2013(11):17-19.
ZHANG Kai, WANG Deshi, ZHANG Chengye. Vibration performance of electro-mechanical transformation device of fuze piezoelectric power supply[J]. Journal of Sichuan Ordnance, 2013(11):17-19.
- [7] nCode Company. Design life worked examples [M]. Shanghai: nCode Company Press, 2010.
- [8] 梁磊,王少萍,曹锋.基于 ANSYS 的压电陶瓷 PLZT 特性仿真分析[J].北京航空航天大学学报,2008,34(7):853-856.
LIANG Lei, WANG Shaoping, CAO Feng. Analysis of piezoelectric ceramics PLZT based on ANSYS [J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2008, 34(7):853-856.
- (上接第 756 页)
- [3] CHEN Y Y, PAN H W. A piezoelectric vibration energy harvester for tire pressure monitoring systems [J]. Proceedings of Symposium on Ultrasonic Electronics, 2011, 32: 321-322.
- [4] GL YNNE-JONES P, TUDOR M J, BEEBY S P, et al. An electromagnetic, vibration-powered generator for intelligent sensor systems[J]. Sensors and Actuators A, 2004, 110: 344-349.
- [5] MITCHESON P D, MIAO P, STARK B H, et al. MEMS electrostatic micro-power generator for low frequency operation [J]. Sensors and Actuators A, 2004, 115:523-529.
- [6] SODANO H A, INMAN D J, PARK G. A review of power harvesting from vibration using piezoelectric materials[J]. Shock and Vibration Digest, 2004, 36(3):197-205.
- [7] ROUNDY S. Energy harvesting for tire pressure monitoring systems; design considerations[C]//Sendai, Japan; Proceedings of the International Workshops on Micro and Nanotechnology for Power Generation and Energy Conversion Applications, PowerMEMS, 2008: 1-6.
- [8] 阚君武,唐可洪,王淑云,等.压电悬臂梁发电装置建模与仿真分析[J].光学精密工程. 2008, 16(1):71-75.
KAN Junwu, TANG Kehong, WANG Shuyun, et al. Modeling and simulation of piezoelectric cantilever generators[J]. Opt. Precision Eng, 2008, 16(1):71-75.
- [9] 袁江波,单小彪,谢涛,等.悬臂梁单晶压电发电机的实验[J].光学精密工程,2009,17(5):1072-1077.
YUAN Jiangbo, SHAN Xiaobiao, XIE Tao, et al. Experiment of monocrystal piezoelectric generator with cantilever beam structure [J]. Opt. Precision Eng, 2009, 17(5): 1072-1077.
- [10] AYERS J P, GREVE D W, OPPEN HEIM I J. Energy scavenging for sensor applications using structural strains [J]. SPIE, 2003, 5057: 364-375.
- [11] HA J L, FUNG R F, CHANG S H. Quantitative determination of material viscoelasticity using a piezoelectric cantilever bimorph beam[J]. Journal of Sound and Vibration, 2005, 289:529-550.
- [12] 闫世伟.胎压报警器用压电供电系统设计与实验研[D].长春:吉林大学,2010.
- [13] CAMPBELL G A, MU THARASAN R. Sensing of liquid level at micron resolution using self-excited millimeter sized PZT-cantilever[J]. Sensors and Actuators A, 2005, 122:326-334.