

激光测振传感器宽频域性能评估关键技术

陈敏泽¹, 李中翔^{2,3}, 胡纯^{2,3}, 郑德智^{2,3}, 樊尚春⁴

(1 北京理工大学 机电学院, 北京 100081; 2 北京理工大学 前沿交叉研究院, 北京 100081; 3 北京理工大学 长三角研究院(嘉兴), 浙江 嘉兴 314000; 4 北京航空航天大学 仪器科学与光电工程学院, 北京 100191)

摘要: 针对激光测振传感器宽频域性能评估问题, 本工作采用内调制和外调制相结合的实验方案: 内调制对激光测振传感器内部信号解调器的动态频率特性测量; 外调制对激光测振传感器整体性能评估。内调制通过非线性调频函数优化局部信噪比、抑制局部噪声, 实现宽频域、高精度、快速扫频测量, 对测振仪信号解调部分 1~10kHz 频率范围进行频率特性测量, 实现了 2% 以内的相对误差, 可以满足工程应用需求; 外调制通过发明一种基于非线性扫频方式的动态频率特性校准方法, 设计压电梁在给定电场情况下的结构形变建立等效工作环境, 实现激光测振传感器外调制。仿真结果显示: 激励信号与仿真压电梁输出的任意频率信号的相对误差都小于 1%, 能够对激光测振传感器的动态性能进行宽频域标定。本工作旨在提出一种部分评估与整体评估结合, 宽频域、高重复性的激光测振传感器性能评估系统, 提升我国非接触测振能力。

关键词: 激光测振; 非线性调频; 光频调制; 性能评估

Key assessment techniques for features in wide frequency range of Laser vibration sensors

Chen Minze¹, Li Zhongxiang^{2,3}, Hu Chun^{2,3}, Zheng Dezhi^{2,3}, Fan Shangchun⁴

(1 School of Mechatronic Engineering of Beijing Institute of Technology Beijing 100081; 2 Advanced Research Institute of Multidisciplinary Sciences of Beijing Institute of Technology Beijing 100081; 3 Yangtze Delta Region Academy of Beijing Institute of Technology, Jiaxing Zhejiang 314000; 4 School of Instrumentation and Optoelectronic Engineering of Beihang University Beijing 100191)

Abstract: In this work, a combination of internal and external modulation is used to evaluate the performance of the laser vibration sensor in the wide frequency domain. Internal modulation is

used to measure the dynamic frequency characteristics of the internal signal demodulator of the laser vibration sensor. The external modulation is used to evaluate the overall performance of the laser vibration sensor. The internal modulation optimizes the local signal-to-noise ratio and suppresses local noise through a nonlinear FM function, which achieves wide frequency domain, high accuracy, and fast sweep measurement. By measuring the frequency characteristics in the range of 1 to 10 kHz in the demodulated part of the vibrometer signal, a relative error within 2% is achieved. Thus the method can meet the demand of engineering applications. The external modulation invents a dynamic frequency characteristic calibration method based on a nonlinear sweep. We design the structural deformation of the piezoelectric beam under a specific electric field to establish the equivalent operating environment of the laser vibration sensor. The simulation results show that the relative error between the excitation signal and the output of the simulated piezoelectric beam at any frequency is less than 1%. Therefore, it is able to calibrate the dynamic performance of laser vibrometry sensors in a wide frequency domain. Our work aims to propose a new laser vibration sensor evaluation system combined of partial evaluation and overall evaluation, with a wide frequency domain and high repeatability, which improves our non-contact vibration measurement capability.

1 传感器设计背景和应用价值

1.1 设计背景

激光测振技术属于非接触式测量，应用范围非常广泛，与传统的振动传感器、探针等接触式测量方法相比，不受被测物体的尺寸、温度、位置、振动频率等的限制，可以弥补接触式测量无法测量大幅度振动的缺陷，且具有测量方便、测量效率高、精度高、响应速度快、不破坏被测表面、可适应高温表面等优点，在航空航天领域、汽车振动和碰撞、磁盘、发动机和电机、叶片和外壳等复杂结构测试中发挥着不可替代的作用。激光测振传感器作为高精度的测量仪器，其动态响应性能至关重要，系统在工作频带范围内的频率响应特性将很大程度影响系统的动态性能。尤其在测试计量领域，对于传感器、测量仪器的动态特性标定结果将直接影响到测量的精度与工作频带范围。

表 1.1 传统激光测振评估方法及其不足

	对象	传统方法	不足
部分评估	信号解调器	线性调频信号法	<ul style="list-style-type: none"> ● 一定的信噪比损失 ● 幅度的调制受到限制 ● 扫频效率低 ● 无法校准干涉测量部分
整体评估	激光测振传感器	振动台激励法	<ul style="list-style-type: none"> ● 振动台量程范围不足 ● 速度范围小 ● 频率范围小
		脉冲激励法	<ul style="list-style-type: none"> ● 频率范围小 ● 重复性较差

如表 1.1 所示，开展这项研究的一项关键问题在于，常用于扫频测试的线性调频激励常常会进行加权处理，从而引入一定的信噪比损失，而且幅度的调制也受到激励信号产生源以及被测系统所能接受的最大信号幅度限制。且使用均匀的频率变化率进行扫频，对过多非常用频带进行等精度扫频测试必然会消耗更多时间。调频信号校准法可以覆盖激光测振仪的测量量程，但其只能校准激光测振仪信号处理部分的测量误差，而无法校准干涉测量部分，不能系统校准激光测振仪。同时该校准方法存在应用局限性，只适于校准分体式外差式激光测振仪。因此，激光测振仪的整体性能评测就显得极其重要。因此，亟需一种部分评估与整体评估结合，宽频域、高重复性的激光测振传感器性能评估系统。

1.2 应用价值

激光测振仪的主要生产厂家大部分均为外国企业，我国激光测振产业较国外先进技术仍有较大差距，本工作的激光测振传感器宽频域性能评估系统有助于推动我国激光测振产品的研制向着高可靠性、高安全性、标准化、系列化、规模化生产的方向发展，解决关键技术“卡脖子”难题，并逐步打破国外品牌的垄断，满足国防装备、军工武器、国家重大工程、计量标准、大型装备制造等各行各业的研究、生产和测试需求，成为势在必行的重大需求。

表 1.2 激光测振仪主要生产厂家及国家

厂家名称	国家
Polytec	德国
OMS Corporation	美国
OptoMet GmbH	德国
Julight	意大利
Sunny Optical Technology	中国香港
Holobright	新加坡
Graphtec Corporation	日本
ONO SOKKI	日本

2 创新点与优势

2.1 创新点

本文的创新点主要有以下两部分。

(1) 在内调制方面，本工作发明的一种新型的基于非线性扫频方式的动态频率特性测量方法。通过对调频函数的设计，可以使得在待测频段内激励能量非均匀分布，可以实现激励信号能量在宽频域内的非均匀分布，从而在某些重要频段内实现快速、高精度测量。具有模型设计灵活、调频速度可变、频谱能量分布可控等优势。可广泛用于传感器与仪器仪表的频率响应测量与标定。

(2) 在外调制方面，本工作发明了一种创新的用于激光测振传感器的双光束干涉校准装置。通过设计一种两侧具备“弓”形结构的压电梁，在给定电场情况下的结构形变建立等效工作环境。采用光频调制的方法，实现压电梁对测量光直接进行宽频率、高精度、快速调制，能够对激光测振传感器的动态性能进行标定，并提高校准效率和适用范围，研究了压电驱动机制理论，完成器件的微加工制作。该工作为激光测振传感器校准技术的进一步研究提供了方法。

2.2 优势

本工作的优势在于：首先，使用非线性扫频信号，可以在较短的时间内使激励频率成分

覆盖待校准频段，在保证精度的同时，测量效率大幅提高。另外，在外调制中克服了传统压电式 MEMS 驱动器结构复杂、工艺可靠性差和性能低等缺点，具有响应速度快、输出力大、驱动线性度好，工作频率宽的优势。

3 实施方案简介

3.1 设计原理

激光测振传感器测量过程可以等效为待测物理信号对标准信号的调制过程。内调制通过非线性调频函数优化局部信噪比、抑制局部噪声，实现宽频域、高精度、快速扫频测量；外调制通过发明一种基于非线性扫频方式的动态频率特性校准方法，设计压电梁在给定电场情况下的结构形变建立等效工作环境，实现激光测振传感器外调制。通过内调制与外调制实现对激光测振传感器整体性能的评估。最后，通过对 MEMS 压电梁原理样件的性能测试，证明了外调制可行性。

3.2 设计方法

3.2.1 内调制

针对激光测振传感器中信号解调器频率特性的动态测试，如图 3.1 所示提出一种基于非线性扫频方式的动态频率特性测量方法，设计非线性调频函数，可以灵活的调整调频信号能量的频域分布，从而可以对其中某些重要频段进行突出。在扫频测量应用中，可以利用非线性调频信号的这个特点，在重要特征频段或系统常用频段内加强激励信号的能量分配，从而在这些频段内更充分地激励系统，抑制测量过程中各种噪声对频率响应测量结果的影响，提高特定频段内的测量精度。这种频段能量的可控分配，是通过改变调频函数的瞬时斜率来实现的，在重要频段采用较低的调频速度，而在其他频段提高调频速度，在保证重要频段内的测量精度的同时，进一步提高整个测试过程的效率。

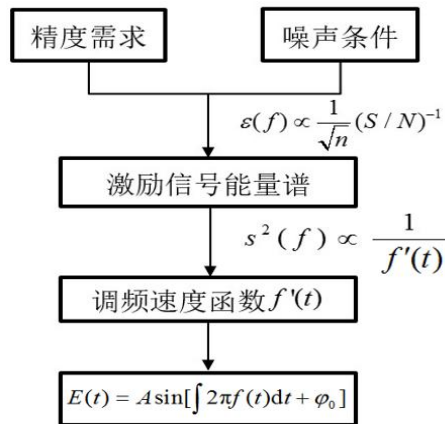


图 3.1 非线性调频激励信号设计流程

使用 Matlab 中的 Simulink 工具进行频率扫描测量仿真。

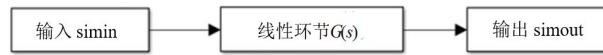


图 3.2 扫频的 Simulink 仿真框图

3.2.2 外调制

针对激光测振传感器整体的频率特性的性能评测方法,提出一种用于激光测振传感器的双光束干涉测量装置,采用光频调制的方法,利用压电梁在给定电场情况下的结构形变从而建立激光测振传感器的等效工作环境,实现对激光测振传感器整体进行测量,同时符合计量测量溯源的要求,采用光隔离器排除被校激光测振传感器自身测量光路对测量结果的影响。利用压电效应实现快速响应测量,实现微位移校准,并且校准的频率范围更宽,提高了校准范围。

设计的用于激光测振传感器的双光束干涉测量系统,包含激励源、光路系统、待测激光测振传感器、驱动电源、信号发生装置以及数据采集系统,如图 3.3 所示。由标准激光源发出的线偏振光,经过光隔离器 I_1 ,到达第一偏振分束器 PB_1 ,垂直于水平面振动的光分量被反射到第一转折棱镜 DP_1 ,形成参考光束,而平行于水平面振动的光分量透过第一偏振分束器 PB_1 ,经过透镜 L_1 后被聚焦,穿过 $\lambda/4$ 波片,入射到压电梁 B 表面,形成探测光束。探测光被压电效应机构表面反射后,再次穿过 $\lambda/4$ 波片,其偏振方向被旋转 90° ,此时激光为垂直于水平方向的振动,所以在第一偏振分束器 PB_1 处被反射,经过三次转折棱镜即第二、第三、第四转折棱镜 DP_2 、 DP_3 、 DP_4 和 $\lambda/2$ 波片后到达第二偏振分束器 PB_2 。参考光经过两次转折棱镜即第一(DP_1)、第五(DP_5)转折棱镜和 $\lambda/2$ 波片后到达第二偏振分束器 PB_2 ,两束光汇合,产生干涉,干涉光经过光隔离器 I_2 后,进入待测激光测振传感器。

激光测振传感器将返回激光的频率转化为电压信号,将电压信号送入数据采集系统,并将获取的数据采集系统的电压信号控制系统设定的标准模拟电压信号进行比较处理。

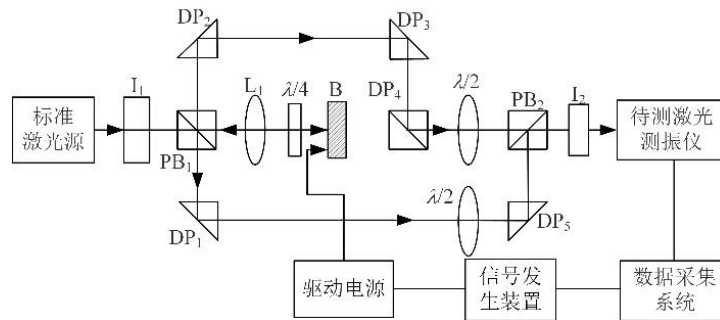


图 3.3 双光束干涉测量装置设计原理图

针对低频范围的测量,可设计不同压电梁的结构来满足测量功能。如图 3.4 所示,在传

统压电梁两端增加宽度可变化的弯曲结构，可以有效地降低机构的固有频率，同时增加压电梁中心部分的中心区域的宽度，以实现局部的刚度增强来保证运动的平稳性。将压电材料放置于位于中心部分两侧的“弓”形结构，使其更好地带动压电梁的振动。

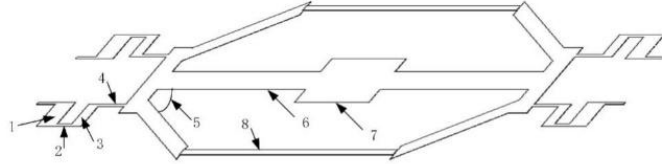


图 3.4 两侧具备“弓”形结构的压电梁

施加交变电压，设驱动电源为交变正弦信号，在仿真软件中进行瞬态分析得到观测结构检测点的位移-时间曲线，如下图所示。

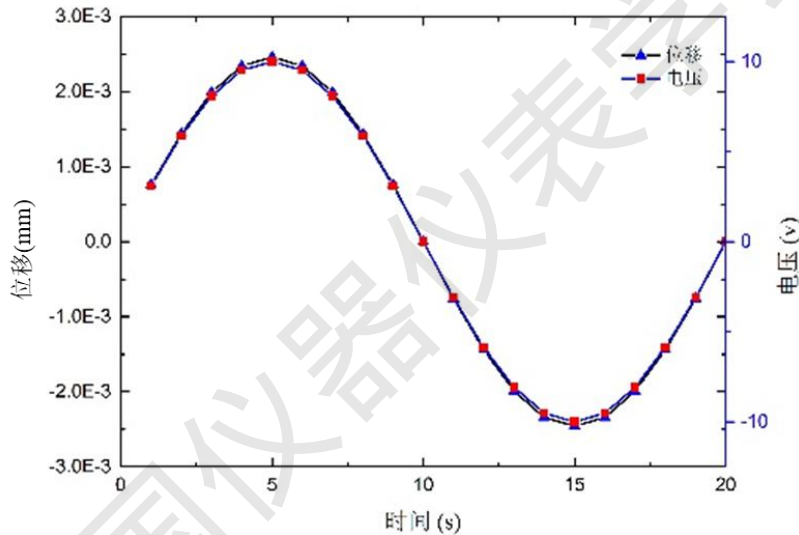


图 3.5 对压电梁施加交流电压 ($f = 20\text{Hz}$)

仿真结果显示，压电梁的输出响应快，与激励信号的延迟小，这与压电材料的特性相关；其次，无论是直流偏置还是交变电压，压电材料都能很好的表现出一致性，持续的直流激励可以是压电梁产生固定的形变，并且随着激励的变化呈线性关系，交流激励，体现在激励频率与输出频率有很好的一致性，通过设计梁的结构来改变其固有频率，无论是直流偏置还是交流激励，激励信号与仿真压电梁输出的位移信号的相对误差都远小于 1%，因此通过搭建的双光束干涉测量装置克服了测量中频率的限制，更好的对激光测振传感器的动态性能指标进行标定，能够提高测量效率，并提高测量适用范围。

3.3 实验验证过程

3.3.1 内调制

对激光测振传感器的信号解调部分进行幅频特性的测量系统，基本组成包括：激励电信号源、信号发生器、激光测振传感器信号解调器和数据采集卡。实验系统的整体框图如图 3.6 所示。其中扫频信号源采用自主设计开发的任意信号发生模块。

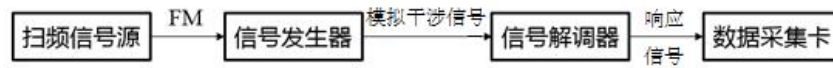


图 3.6 扫频实验系统框图

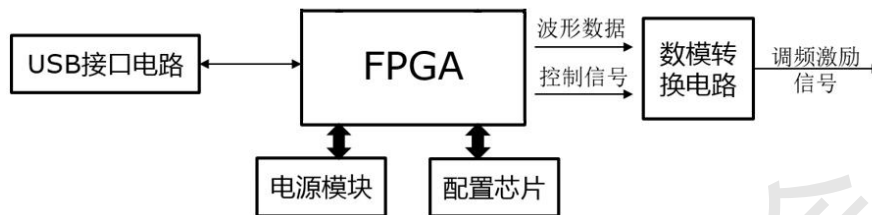


图 3.7 任意信号发生模块框图

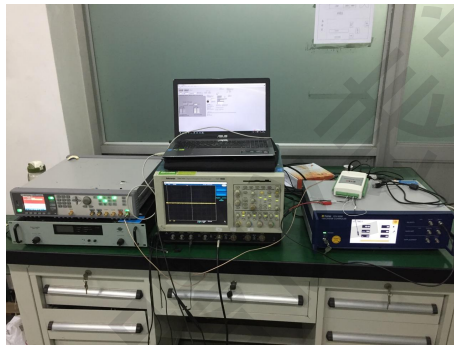


图 3.8 扫频实验平台实物图

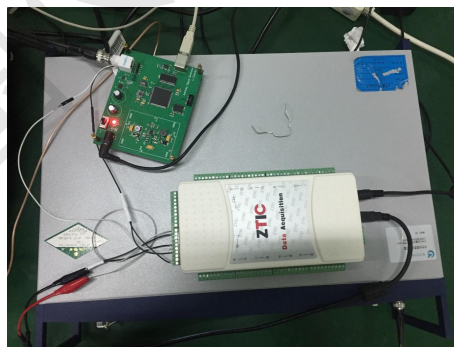


图 3.9 任意信号发生模块和数据采集卡

为了验证非线性调频激励相对于线性调频激励对于局部噪声的抑制能力，在激励信号中分别加入约-18dB 的高斯白噪声和-30dB 的频率范围为 9.5kHz~10.5kHz 的窄带噪声。

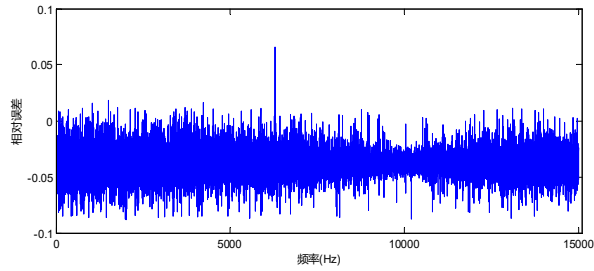


图 3.10 三次调频激励测量在 Gaussian 白噪声下的相对误差

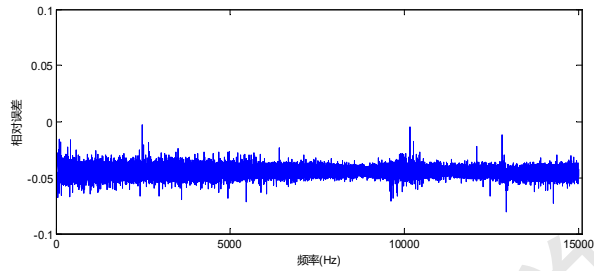


图 3.11 三次调频激励在窄带噪声下的测量误差

附加白噪声条件下，采用三次调频激励在基本不影响扫频效率的同时，分别将局部的测量随机误差由线性调频激励的 $\pm 4\%$ 降至 $\pm 1\%$ ；在附加窄带噪声条件下，采用三次调频激励，提高局部频段测量信噪比，抵消掉了由窄带噪声带来的局部测量误差增大。

3.3.2 MEMS 压电梁原理样件

通过设计压电梁的频率和振幅来进行光调制，意味着压电梁起到标准件的作用。因此压电梁需要具备批量制备、性能定制的能力，从而通过改变不同的结构尺寸来调整压电梁的工作频率宽度。

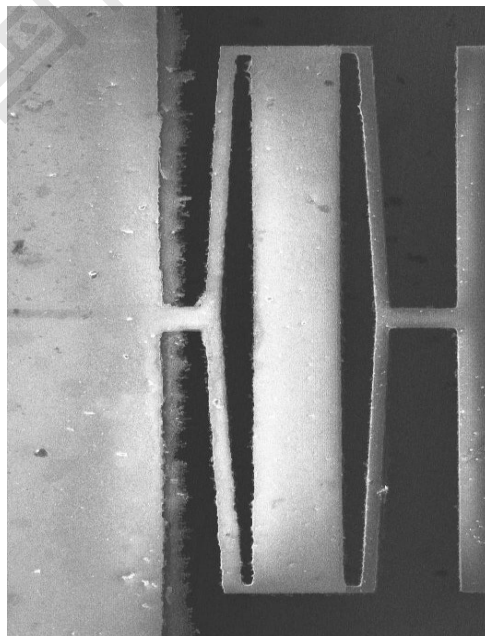


图 3.12 MEMS 压电梁样件

结合工艺条件，制作如图 3.12 所示 MEMS 压电梁样件进行可行性验证，图 3.13-3.15 的 XRD 和 SEM 表征结果显示，薄膜厚度均匀，晶界明显，晶粒尺寸在纵向分布均匀，具有良好的薄膜质量和电学性能。

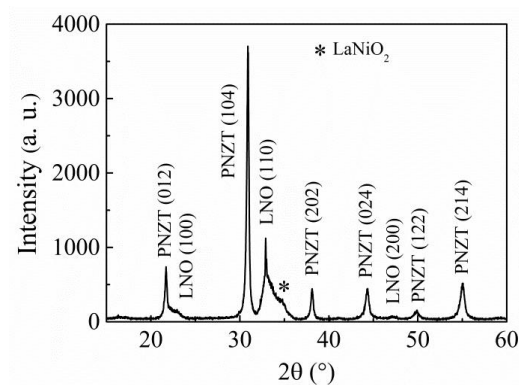


图 3.13 PNZT/LNO 薄膜 XRD 图谱

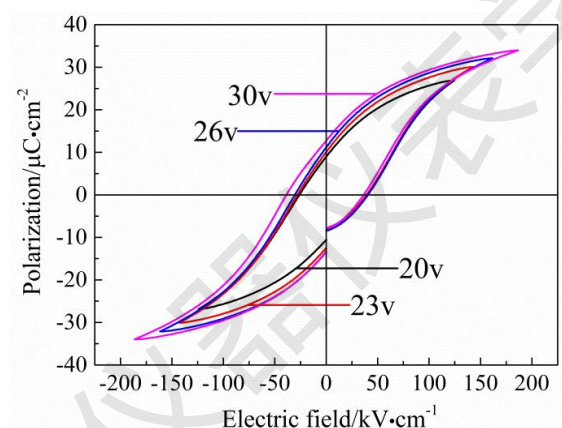


图 3.14 PNZT/LNO 薄膜电滞回线

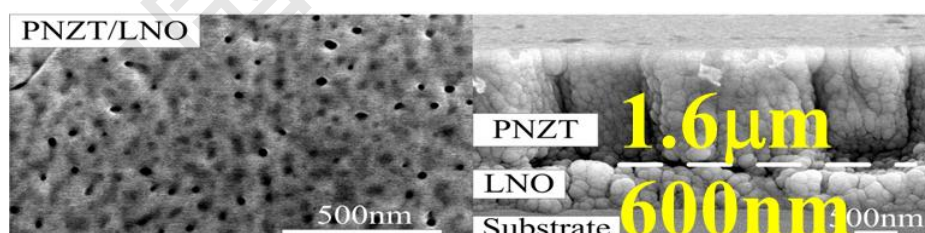


图 3.15 SEM 照片：表面和断面形貌

通过对压电梁施加不同大小、相同频率的交流电压，取压电梁的几何中点，可以看出位移呈线性关系，在交流信号强度 40V、频率为 4kHz 时，峰-峰位移 2 μm。原理样件的性能测试证明了采用压电梁作为光调制的可行性。

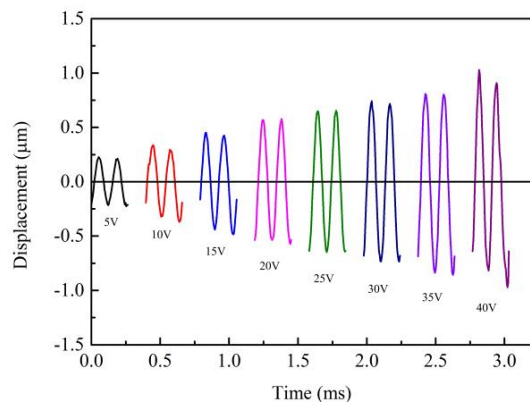


图 3.16 压电梁运动测试分析

中国仪器仪表学会