

压电陶瓷激振器定频激振能力的评价方法

李 晖,薛鹏程,孙 伟,闻邦椿
(东北大学 机械工程与自动化学院,辽宁 沈阳 110819)

摘 要 :提出了评价压电陶瓷激振信号的线性度指标,并基于自主研发的压电陶瓷激励反馈系统,对一款 PZT 陶瓷进行了实验研究.在分析其激振力的影响因素及影响规律的基础上,提出了压电陶瓷定频激振能力的评价方法.由实验数据建立了评价方程,得到了其定频激振的频率置信区间,使其可以更好地被应用到板壳类薄壁构件的高阶振动测试研究中.研究结果表明,压电陶瓷定频激振能力的总体特点是在低频状态下可实现高幅定频激励,而高频状态下仅能实现低幅定频激励.

关 键 词 :压电陶瓷激振器;定频激振;评价方法;激振能力;线性度

中图分类号:TB 53 文献标志码:A 文章编号:1005 - 3026(2016)10 - 1421 - 05

Evaluation Method of Single-Frequency Excitation Capability for Piezoelectric Ceramic Exciter

LI Hui ,XUE Peng-cheng ,SUN Wei ,WEN Bang-chun
(School of Mechanical Engineering & Automation , Northeastern University , Shenyang 110819 , China.
Corresponding author : LI Hui , E-mail : lh200300206@ 163. com)

Abstract : The linearity index was proposed for evaluating piezoelectric ceramic excitation signal , and experiment was carried out to study a PZT ceramics based on self-designed piezoceramic excitation feedback system. After analyzing the influence factors and law of excitation force , an evaluation method of single-frequency excitation capability was proposed. Evaluation equation was established based on the experimental data , and confidence interval in frequency domain of single-frequency excitation was obtained to make good use of piezoelectric ceramic exciter during the high order vibration test of thin-walled structures. The overall characteristics of the piezoelectric ceramic single-frequency excitation showed that high level excitation capability can be realized under the smaller single-frequency condition , while the low level excitation capability can only be realized under the larger single-frequency condition.

Key words : piezoelectric ceramic exciter ; single-frequency excitation ; evaluation method ; excitation capability ; linearity

压电陶瓷激振器是近年来发展起来的新型微位移激励设备,它具有体积小、质量轻、频响高、出力大等优点,在光学、电子、航天航空、机械、超声波等领域得到了广泛应用^[1-2].利用逆压电效应可以将其制成不同规格和形状的压电陶瓷激振器,作为测试板壳类薄壁构件的专用高频振动激励设备.例如,Gaspar 等^[3]利用压电陶瓷对卫星太阳帆板及其部件开展了模态实验.Rongong^[4]利用压电陶瓷对薄壁圆柱壳进行了激励,获得了该圆柱壳的固有频率和黏性阻尼参数.Ivancic^[5]利用压电陶瓷对硬涂层悬臂薄板进行扫频激励,来识别该复合结构的阻尼特性.张益松等^[6]也将压电陶瓷应用到平板结构的振动试验中,将陶瓷分为压电激振片和压电拾振片两类,其中压电激振片的信号来源于信号发生器,其输出电压直接从信号源上读出,而拾振片的信号幅值则通过

收稿日期:2015 - 10 - 10
基金项目:国家自然科学基金资助项目(51505070);中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(N150304011);国家重大科学仪器设备开发专项(2013YQ470765).
作者简介:李 晖(1982 -)男,内蒙古丰镇人,东北大学讲师,博士后研究人员;闻邦椿(1930 -)男,浙江温岭人,东北大学教授,博士生导师,中国科学院院士.

DAC-2 型电子毫伏表进行判断. 黄爱萍等^[7]在压气机轮盘轮缘和辐板上布置了 12 片压电陶瓷并对其激励,采用激光全息干涉法获取轮盘在 0~15 kHz 频率范围内的 7 阶振动模态的静频和振型. Yang 等^[8]在堆叠型压电陶瓷的基础上,设计并提出了一种多层圆柱型轴向超声振动器,并对其振动特性进行了测试与分析. Paral 等^[9]研究了压电陶瓷圆片的振动特性,为其作为激振器使用奠定了基础. 但研究也发现压电陶瓷材料本身存在蠕变、迟滞等非线性特点^[10],其制备工艺还存在一定的问题(如存在不能承受拉力和扭力等缺点),目前压电陶瓷激励技术还有许多有待改进和提高的环节.

目前,压电陶瓷在薄壁构件的固有特性和阻尼特性测试中已经发挥出一定的作用. 随着人们对其激振原理和激振性能的日益关注,很多学者希望进一步将其用于上述构件的动力学响应测试研究中,为结构修改、响应预估等环节提供支持,这就对压电陶瓷的定频激振能力提出了更高的要求. 定频激励有诸多优点,例如能在特定频率上输入比较大的振动能量、激励力幅容易控制等^[11]. 因而,相对于随机激励及瞬态激励,采用定频激励可以获得更高信噪比的响应数据^[12],可有效检测出薄壁类构件自身所表现的动力学特点.

然而,压电陶瓷作为激振器有着很大的特殊性,不仅受到本身尺寸、材料参数的影响,而且与压电陶瓷驱动电源功率、驱动电压的加载形式和电压值、激励频率的使用范围等环节有很大关系^[13-14]. 有效地控制压电陶瓷实现定频激励,需要对压电陶瓷的定频激振能力进行系统分析. 本文首先提出了评价压电陶瓷激振信号的线性度指标,并基于自主研发的压电陶瓷激励反馈系统,对一款 PZT 陶瓷进行了试验研究. 进一步,在分析其激振力的影响因素及影响规律的基础上,提出了压电陶瓷定频激振能力的评价方法,并由实验数据建立了评价方程,得到了其定频激振的频率置信区间,使其可以更好地被应用到板壳类薄壁构件的高阶振动测试研究中.

1 压电陶瓷激励反馈系统

现有振动测试中应用的压电陶瓷激励系统通常是一个开环系统,即压电陶瓷驱动电源放大后的高电压激励信号只是用来驱动陶瓷进行振动激励,没有实现激励信号的实时采集. 主要问题在于绝大多数数据采集设备的安全采集电压一般都在

$\pm 1\text{ mV} \sim \pm 10\text{ V}$ 范围内,不能直接采集 $\pm 110 \sim \pm 220\text{ V}$ 的高电压信号. 为此,本文首先自主研发了一款反馈衰减器,解决了加载到压电陶瓷上的高电压激励信号的实时采集问题,并建立了压电陶瓷激励反馈系统,该系统的示意图如图 1 所示,其涉及的主要仪器的型号、功能如下.

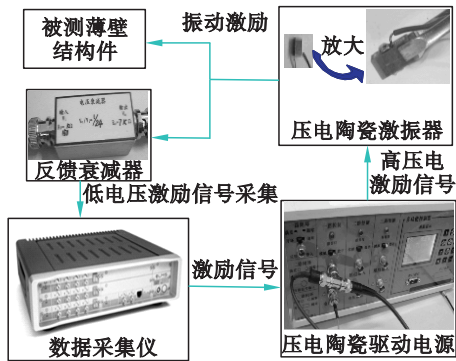


图 1 压电陶瓷激励反馈系统示意图
Fig. 1 Schematics of piezoelectric ceramic excitation feedback system

1) 压电陶瓷激振器:压电陶瓷选用德国 PI 公司的 P-885.10,外形尺寸为 5 mm×5 mm×9 mm,可承受 2.5 V 到 100 V 的偏置电压. 电容量 0.6 μf,最大出力 660 N,质量为 2 g.

2) 压电陶瓷驱动电源:压电陶瓷驱动电源的主要功能是为压电陶瓷提供高稳定性、高分辨率的电压. 所采用的驱动电源 Rhvd3c110v 具备同时驱动三路压电陶瓷的功能,通过 BNC 接头与数据采集仪的激励信号源相连. 可以将模拟激励信号放大 24 倍,并通过设置偏置电压使得压电陶瓷工作在正电压范围内. 其电压输出分辨率为 5 mV,最大输出功率为 100 W,通信速率为 9 600 B/s, LCD 显示,可以实时监测输出电压.

3) 反馈衰减器:反馈衰减器主要用于将高电压信号衰减到数据采集仪可以接受的信号范围内(通常为 $\pm 1\text{ mV} \sim \pm 10\text{ V}$). 其一端用于和压电陶瓷的两个引脚相连接,另一端连接数据采集仪.

2 压电陶瓷定频激振能力影响因素及影响规律

本文将压电陶瓷激励时的主要影响因素归纳为以下两个方面:第一类是激励系统自身参数的影响,包括压电陶瓷尺寸、材料参数、电容量、制备工艺(单级性或双级性)及驱动电源的输出功率、反馈衰减器的衰减比率等;第二类是使用中设定参数的影响,包括激振频率、激励电压及偏置电压

等. 由于第一类影响因素主要涉及硬件参数, 在出厂时就已确定, 难以从实验数据中直接发现其科学规律. 因此本文仅从激振频率、激励电压、偏置电压等方面寻找其对压电陶瓷的激振性能的影响.

压电陶瓷的激励对象为钛合金薄板, 其长、宽、厚分别为 152, 110, 2 mm, 该薄板处于悬臂状态, 夹持长度为 40 mm. 测试时, 首先设定 S_i 为评价压电陶瓷激励信号线性度的指标, 其表达式如式 (1) 所示. 若各倍频的激励幅度 A_i 与基频激励幅度 A_0 相比都小于等于 1%, 则认为该信号在单一激振频率下具有良好的线性度, 即该激振设备具有良好的定频激振能力.

$$S_i = A_i/A_0 \leq 1\% \quad (i = 2, \dots, n).$$
 (1)

1) 偏置电压的影响 通过软件设定激励电压为 1 V, 在驱动电源的偏置电压为 25, 50 和 75 V 三种状态下考察压电陶瓷在 300, 3 000 Hz 两个频率点的激振力信号, 测试结果见表 1. 从中可以发现偏置电压幅值基本不会对压电陶瓷的定频激振能力产生影响.

表 1 不同偏置电压下的激振力幅值
Table 1 Exciting force amplitude under different bias

| 激振频率 Hz | 偏置电压 V | 激振力信号/V | | | S_2 | S_3 |
|------------|-----------|---------|-------|-------|-------|-------|
| | | A_0 | A_2 | A_3 | | |
| 300 | 25 | 0.98 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 300 | 50 | 0.98 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 300 | 75 | 0.98 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 3 000 | 25 | 0.9 | 0.031 | 0.03 | 0.03 | 0.03 |
| 3 000 | 50 | 0.89 | 0.03 | 0.029 | 0.03 | 0.03 |
| 3 000 | 75 | 0.9 | 0.03 | 0.03 | 0.03 | 0.03 |

2) 激振频率的影响 固定偏置电压为 75 V, 并设置激励电压为 1 V, 考察不同激振频率对压电陶瓷激振性能的影响, 测试结果见表 2. 图 2 和图 3 分别为 1 200 Hz 和 4 300 Hz 对应的激振力信号的时频谱图. 可知, 激振频率对压电陶瓷的定频激振能力有着重要的影响. 低频状态下压电陶瓷激振力的频率主要是单一频率(包含的倍频成分没有超过 S_i 的限定指标 1%). 高频条件下, 其逐步出现倍频成分, 且激振频率越高, 2 倍频、3 倍频的幅值越高.

3) 激励幅度的影响 固定偏置电压为 75 V, 激励幅度设为 0.5 V 到 3 V, 分别在 300 Hz 和 2 700 Hz 进行激励, 观测激振力幅值的变化, 测试结果详见表 3. 从中可知, 压电陶瓷的定频激振能力与其激励幅度有着密切的关系. 基本规律是随

着激励幅度的增大, 压电陶瓷激励信号中倍频成分越发明显.

表 2 不同激振频率下的激振力幅值
Table 2 Exciting force amplitude under different exciting frequency

| 激振频率 Hz | 激振力信号/V | | | S_2 | S_3 |
|------------|---------|-------|-------|-------|-------|
| | A_0 | A_2 | A_3 | | |
| 300 | 0.98 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 600 | 0.98 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 900 | 0.97 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 1 200 | 0.96 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 1 500 | 0.95 | 0 | 0.003 | 0 | 0 |
| 1 800 | 0.94 | 0 | 0.005 | 0 | 0.01 |
| 2 100 | 0.93 | 0 | 0.006 | 0 | 0.01 |
| 2 400 | 0.91 | 0 | 0.007 | 0 | 0.01 |
| 2 700 | 0.90 | 0 | 0.008 | 0 | 0.01 |
| 2 800 | 0.87 | 0.01 | 0.006 | 0.01 | 0.01 |
| 4 300 | 0.86 | 0.15 | 0.06 | 0.17 | 0.07 |
| 5 800 | 0.76 | 0.17 | 0.07 | 0.22 | 0.09 |
| 6 500 | 0.71 | 0.18 | 0.08 | 0.25 | 0.11 |

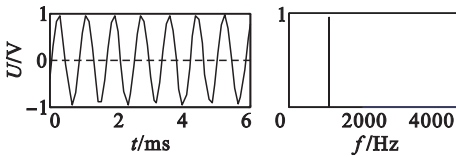


图 2 1 200 Hz 激振力信号的时频谱图
Fig. 2 Time-frequency spectro-graph under 1 200 Hz exciting force signal

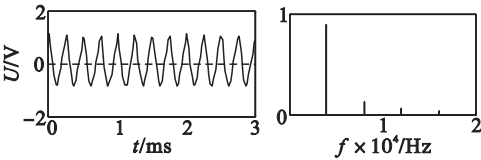


图 3 4 300 Hz 激振力信号的时频谱图
Fig. 3 Time-frequency spectro-graph under 4 300 Hz exciting force signal

从上述影响因素分析可以发现: 压电陶瓷的定频激振能力不是单由激振频率或者激励幅度所决定的, 而是由两者共同决定的. 为了说明这个问题, 开展了更加详细的实验. 将激励幅度分别设为 1.5, 2.0, 2.5, 3.0 V, 用不同的频率进行激励, 观测激振力信号的幅值变化, 测试结果也一并列入表 4 中. 通过分析可知, 压电陶瓷定频激振能力的总体特点是在低频状态下可实现高幅定频激励, 而高频状态下仅能实现低幅定频激励.

表 3 不同激励幅度下的激振力幅值
Table 3 Exciting force amplitude under different excitation amplitude

| 激振频率 | 激励幅度 | 激振力信号/V | | | S_2 | S_3 |
|-------|------|---------|-------|-------|-------|-------|
| | | A_0 | A_2 | A_3 | | |
| Hz | V | | | | | |
| 300 | 0.5 | 0.49 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| | 1.0 | 0.98 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| | 1.5 | 1.48 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| | 2.0 | 1.97 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| | 2.5 | 2.46 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| | 3.0 | 2.95 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 2 700 | 0.5 | 0.45 | 0 | 0.006 | 0 | 0.01 |
| | 1.0 | 0.90 | 0 | 0.008 | 0 | 0.01 |
| | 1.5 | 1.27 | 0.23 | 0.09 | 0.18 | 0.07 |
| | 2.0 | 1.31 | 0.41 | 0.13 | 0.31 | 0.10 |
| | 2.5 | 1.20 | 0.46 | 0.19 | 0.38 | 0.16 |
| | 3.0 | 1.30 | 0.49 | 0.2 | 0.41 | 0.19 |

表 4 不同激励幅度和激振频率下的激振力幅值
Table 4 Exciting force amplitude under different excitation amplitude and frequency

| 激振频率 | 激励幅度 | 激振力信号/V | | | S_2 | S_3 |
|-------|------|---------|-------|-------|-------|-------|
| | | A_0 | A_2 | A_3 | | |
| Hz | V | | | | | |
| 300 | 1.5 | 1.47 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 600 | 1.5 | 1.47 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 900 | 1.5 | 1.46 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 1 200 | 1.5 | 1.44 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 1 500 | 1.5 | 1.43 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 1 800 | 1.5 | 1.42 | 0.04 | 0.04 | 0.03 | 0.03 |
| 2 000 | 1.5 | 1.39 | 0.09 | 0.07 | 0.06 | 0.05 |
| 2 100 | 1.5 | 1.38 | 0.11 | 0.08 | 0.08 | 0.06 |
| 2 400 | 1.5 | 1.32 | 0.17 | 0.09 | 0.13 | 0.07 |
| 300 | 2.0 | 1.97 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 600 | 2.0 | 1.96 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 900 | 2.0 | 1.94 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 1 200 | 2.0 | 1.92 | 0.05 | 0.04 | 0.03 | 0.02 |
| 1 300 | 2.0 | 1.88 | 0.12 | 0.09 | 0.06 | 0.05 |
| 1 500 | 2.0 | 1.79 | 0.20 | 0.11 | 0.11 | 0.06 |
| 300 | 2.5 | 2.46 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 600 | 2.5 | 2.44 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 900 | 2.5 | 2.41 | 0.09 | 0.07 | 0.04 | 0.03 |
| 1 000 | 2.5 | 2.34 | 0.20 | 0.12 | 0.09 | 0.05 |
| 1 100 | 2.5 | 2.24 | 0.28 | 0.14 | 0.13 | 0.06 |
| 1 200 | 2.5 | 2.13 | 0.34 | 0.14 | 0.16 | 0.07 |
| 300 | 3.0 | 2.95 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 600 | 3.0 | 2.93 | 0.23 | 0.02 | 0.08 | 0.01 |
| 900 | 3.0 | 2.64 | 0.39 | 0.17 | 0.15 | 0.06 |

3 压电陶瓷定频激振能力评价方法

从以上测试数据可知,评价压电陶瓷激振器定频激振能力的指标应该同时包含激振频率和激励幅度两个参数的影响. 根据上述规律,本文提出了压电陶瓷定频激振能力评价方法,该方法建立在实验测试数据的基础上,认为可以通过在不同激振频率和激励幅度下获得的实验数据来建立评价方程,进而建立压电陶瓷定频激振的频率置信区间,并以此来实现压电陶瓷定频激振能力的客观评判.

3.1 压电陶瓷定频激振能力评价方程

由于 2 倍频对激励信号线性度的影响高于 3 倍频,因此,取 $S_2 \approx 1$ 时对应的参数来建立压电陶瓷定频激振能力评价方程,表 5 提取了该压电陶瓷在不同激励幅度下所能达到的最大激振频率.

表 5 压电陶瓷在不同激励幅度下对应的最大激振频率
Table 5 Maximum exciting frequency of piezoelectric ceramic under different excitation amplitude

| 激励幅度/V | 最大激振频率/Hz | 激励幅度/V | 最大激振频率/Hz |
|--------|-----------|--------|-----------|
| 0.5 | 4 000 | 2.0 | 1 300 |
| 1.0 | 2 800 | 2.5 | 1 000 |
| 1.5 | 2 300 | 3.0 | 600 |

设 I 为压电陶瓷定频激振能力的评价指标,由于该指标与激励幅度及最大激振频率有关,基于表 5 的测试数据,可以将评价方程可描述为

$$I=f \times A^b. \tag{2}$$

式中 f 为最大激振频率; A 为激励幅度; b 为拟合系数,可由实验数据估值得出.

由表 5 可知, $A=1.0\text{ V}$ 时无论 b 取何值, I 均为固定值,因此,可以确定该压电陶瓷定频激振能力的评价指标 $I=2\,800$.

以下采用最小二乘法,基于上述实验数据获得系数的确切值. 具体流程如下.

1) 将激振频率和激励幅度写成向量形式:对于本次试验,激振频率的列向量形式为

$$f=[\,4\,000\,2\,800\,2\,300\,1\,300\,1\,000\,600\,]^T. \tag{3}$$

对应的激振力幅度的向量形式为

$$A=[\,0.5\,1.0\,1.5\,2.5\,3.0\,]^T. \tag{4}$$

2) 估算 b 的取值范围:在保持定频激励的前提下,由实验中激振频率和激励电压的直接乘积可以发现,相应的 I 值变得越来越小,为了保持 I 值不变, b 值应大于 1. 假如 $b=2$,则对应于 1.5 V 至 3.0 V 的激励幅度, I 值均远大于 $2\,800$. 可见 b

的取值范围为 $1 < b < 2$ 。

3) 最小二乘法估算 b 值 定义

$$\Delta I = \sqrt{\sum_{i=1}^6 (I(i) - \hat{I})^2} \quad b = 1.000\ 0\ 1.000\ 1\ \dots \quad (5)$$

其中 ΔI 为均方根偏差；

$$\hat{I}(i) = f(i) \times A(i)^b. \quad (6)$$

绘制横轴为 b ,纵轴为 ΔI 的曲线 ,只要使均方根偏差最小 ,则为选定的 b 值.图 4 即为所绘制用于求取 b 值的曲线 ,最终确定 b 值为 1.072 1.

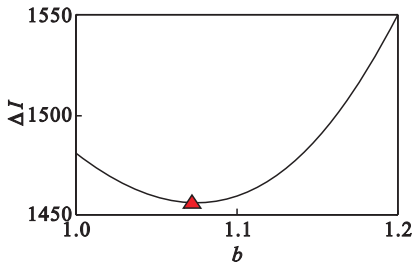


图 4 采用最小二乘法获得的拟合系数曲线
Fig. 4 Curve of fitting coefficient obtained by the least square method

3.2 评价方程的应用

按照式 (2) ,可对压电陶瓷定频激励进行有效控制.例如要实现 1 500 Hz 线性激励 ,则可推算出最大可给 2.06 V 的激励幅度.反之 ,假如给出一定的激励幅度 ,也可推算出最高可实现多大激振频率内的定频激励.还可以根据上述实验结果 ,将不同激励幅度下所包含的定频激振频率范围用不同的色彩绘制到图 5 上 ,称之为定频激振的频率置信区间 ,配合评价方程更科学地使用压电陶瓷激振器 ,从而实现其定频激振能力的客观评判.

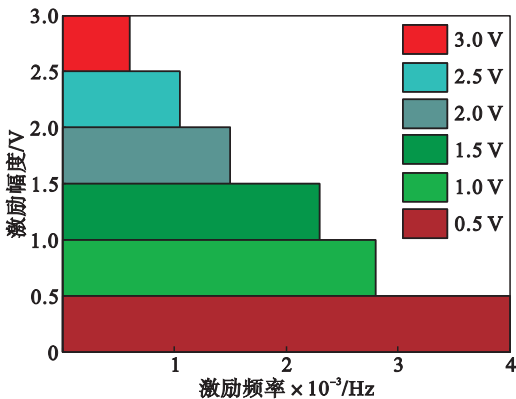


图 5 压电陶瓷定频激振的频率置信区间
Fig. 5 Frequency-confidence interval of piezoelectric ceramic under single-frequency excitation

4 结 论

本文对陶瓷激振器的定频激振能力进行了实验研究 ,提出了压电陶瓷定频激振能力的评价方

法 ,并由实验数据建立了评价方程 ,得到了其定频激振的频率置信区间 ,使其可以更好地被应用到板壳类薄壁构件的高阶振动测试研究中.

另外 ,本文还提出了评价压电陶瓷激振信号的线性度指标 ,分析了其定频激振能力的影响因素及规律.研究发现其总体特点是在低频状态下可实现高幅定频激励 ,而高频状态下仅能实现低幅定频激励.

参考文献：

[1] Niezrecki C , Brei D , Balakrishnan S , et al. Piezoelectric actuation :state of the art[J]. *The Shock and Vibration Digest* 2001 ,33(4) :269 – 280.

[2] King T G , Preston M E , Murphy B J M , et al. Piezoelectric ceramic actuators :a review of machinery applications[J]. *Precision Engineering* ,1990 ,12(3) :131 – 136.

[3] Gaspar J , Mann T , Behun V , et al. Development of modal test techniques for validation of a solar sail design[J]. *American Institute of Aeronautics and Astronautics* 2004 ,1665 #5 – 52.

[4] Rongong J A , Tomlinson G R. Suppression of ring vibration modes of high nodal diameter using constrained layer damping method[J]. *Smart Materials and Structures* ,1996 ,5(5) :672 – 684.

[5] Ivancic F , Palazotto A. Experimental considerations for determining the damping coefficients of hard coatings[J]. *Journal of Aerospace Engineering* 2005 ,18(1) :8 – 17.

[6] 张益松 ,刘敏娜 ,伊立言.压电陶瓷片在振动试验中的应用[J]. *实验力学* ,1987 ,2(2) :90 – 94.

(Zhang Yi-song , Liu Min-shan , Yi Li-yan. The application of piezoelectric ceramics flakes in vibration test[J]. *Journal of Experimental Mechanics* ,1987 ,2(2) :90 – 94.)

[7] 黄爱萍.轮盘振动特性试验及共振转速特性分析[J]. *测控技术* 2007 ,26(4) :14 – 15.

(Huang Ai-ping. Test of vibration character and analysis of resonance speed character for disk[J]. *Measurement & Control Technology* 2007 ,26(4) :14 – 15.)

[8] Yang C , Shan X , Xie T. A new piezoelectric ceramic longitudinal-torsional composite ultrasonic vibrator for wire drawing[J]. *Ceramics International* ,2015 ,41(sup) :625 – 630.

[9] Paral L , Pechousek J. A digital measurement system based on laser displacement sensor for piezoelectric ceramic discs vibration characterization[J]. *Optik-International Journal for Light and Electron Optics* 2016 ,127(1) :84 – 89.

[10] Park J , Moon W. Hysteresis compensation of piezoelectric actuators :the modified Rayleigh model[J]. *Ultrasonics* ,2010 ,50(3) :335 – 339.

[11] Grantham C , Sutanto D , Mismail B. Steady-state and transient analysis of self-excited induction generators[J]. *Electric Power Applications* ,1989 ,136(2) :61 – 68.

[12] De Silva C W. *Vibration monitoring , testing , and instrumentation*[M]. Vancouver :CRC Press 2010.

[13] Newcomb C V , Flinn I. Improving the linearity of piezoelectric ceramic actuators[J]. *Electronics Letters* ,1982 ,18(11) :442 – 444.

[14] Ben-Mrad R , Hu H. A model for voltage-to-displacement dynamics in piezoceramic actuators subject to dynamic-voltage excitations[J]. *IEEE/ ASME Transactions on Mechatronics* 2002 ,7(4) :479 – 489.