

Analysis of the Phenomenon Caused by Nonlinear Structure of Piezoelectric Fatigue Testing Machine

Xiaochao Tian¹, Anjun Xu¹, Daizhi Zhang¹, Qinghua Li¹, Chunshan He¹, Changlong Zhao¹, Zhigang Yang²

¹Institute of Mechanical and Vehicle Engineering, Changchun University, Changchun Jilin

²Institute of Mechanical Science and Engineering, Jilin University, Changchun Jilin

Email: tianxczb@163.com

Received: May 30th, 2018; accepted: Jun. 18th, 2018; published: Jun. 25th, 2018

Abstract

There is a nonlinear structure in the vibration process of the piezoelectric fatigue testing machine. When the vibration is prolonged, the resonance frequency drift, the sharp noise and the jitter of the loading specimen will appear, which seriously affect the system loading accuracy, stability and reliability. At the same time, it will bring about natural frequency coupling, collision and vibration, and poor vibration control. This paper starts with the phenomena caused by the nonlinear structure of the piezoelectric fatigue testing machine, analyzes the causes, and gives some solutions to provide theoretical basis and technical reference for similar problems in the work of vibration system.

Keywords

Piezoelectric Fatigue Testing Machine, Vibration System, Structural Nonlinearity, Experiment

压电疲劳试验机结构非线性引发的现象分析

田晓超¹, 徐安俊¹, 张代治¹, 李庆华¹, 贺春山¹, 赵昌龙¹, 杨志刚²

¹长春大学机械与车辆工程学院, 吉林 长春

²吉林大学机械科学与工程学院, 吉林 长春

Email: tianxczb@163.com

收稿日期: 2018年5月30日; 录用日期: 2018年6月18日; 发布日期: 2018年6月25日

文章引用: 田晓超, 徐安俊, 张代治, 李庆华, 贺春山, 赵昌龙, 杨志刚. 压电疲劳试验机结构非线性引发的现象分析[J]. 机械工程与技术, 2018, 7(3): 195-199. DOI: 10.12677/met.2018.73024

摘要

压电疲劳试验机在振动过程中存在结构非线性,振动时随着时间的延长会出现共振频率漂移、噪声尖锐、加载试件抖动等问题,严重影响系统加载精度、稳定性以及可靠性。同时会带来系统各部件之间固有频率耦合、碰撞振动、振动试验控制差等问题。本文从压电疲劳试验机系统结构非线性引起的现象入手,分析产生的原因,并给出了一些解决办法,为振动系统工作出现的类似问题提供理论依据和技术参考。

关键词

压电疲劳试验机, 振动系统, 结构非线性, 实验

Copyright © 2018 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

压电疲劳试验机是微小金属构件或非金属构件弯曲、扭转、拉压等疲劳性能试验与检测的设备之一,在机械电子、航空航天、冶金等领域有着广泛的应用。但压电疲劳试验机在振动过程中存在着结构非线性因素。在振动机械系统中由于非线性因素会引起螺栓松动、碰撞振动、粘弹性材料的松弛、干摩擦、材料弹塑变形等现象[1]。国内外研究学者对振动系统结构非线性现象进行了大量的研究。美国 NASA 发射的“卡西尼”(Cassini)土星探测器在试验时就曾发现存在较大幅度的频率漂移[2][3]。我国运载和航天器研制单位也普遍遇到过这样的现象,引起的后果很严重。陈昌亚等[4][5]对卫星一阶频率随振动量级增大而下降的现象进行了理论和试验研究,明确了结构非线性是造成这一频率漂移现象的原因。振动环境下结构连接件松动除了会引发频率漂移,还会导致部件间的低速往复碰撞形成碰撞振动,这种往复循环的碰撞行为可能导致机械系统在局部区域发生结构的疲劳损伤,使系统发生非稳定的运动[6]。中国工程物理研究院的王东升等人[1]从结构非线性入手定性分析了航空与导弹系统引发固有频率漂移、谐波响应现象的原因,指出改进产品连接结构、适当增大含间隙部件之间的预紧力和阻尼是解决这些问题的有效方法;北京科技大学的闫晓强教授等人[7]通过 ANSYS 建模获得轧机传动系统的固有特性,进一步研究了传动系统在非线性刚度及阻尼影响下的系统特性;何大方等人[8]则在大容量轴流风机 300 Hz 以下频段发现大量的线性及非线性谐波,分析认为应该是受到某种不稳定、具有摩擦性质的非线性外力激励所致。Dhupia 等[9]以铣床为研究对象,建立了立柱-主轴箱系统的非线性动力学模型并采用非线性阻抗耦合法进行了分析,发现结合面的非线性特性使结构的固有频率和相应的共振峰值发生了明显的变化;文献[10]通过波特图及奈奎斯特图区分了阻尼非线性与刚度非线性等等。

由以上分析可见,结构非线性问题广泛存在于一切机械动力系统中,其非线性因素主要来自于零件间的间隙、干摩擦、材料弹塑性,以及在振动载荷作用下的连接松动、粘弹性材料的松弛、预紧结构面内部应力的减弱或消失等,带有断续、随机、偶然作用的特征,严重损害系统工作的平稳性、可靠性与准确性,是必须加以解决的。

本文从压电疲劳试验机系统结构非线性引起的现象入手,分析产生的原因,主要在固体(压电振子)振动、接合面(螺钉、螺栓)较多、零部件材料多样化(压电体、金属弹性体)等结构下非线性分析,解决压

电疲劳试验机精确性、平稳性、可靠性等问题的技术与解决方法。

2. 压电疲劳试验机系统结构组成

本文列举一种弯曲疲劳试验系统，样机如图 1 所示。由外部支撑单元、载荷预制单元、激振单元和检测单元组成。外部支撑单元包括导柱、基座和橡胶底脚；载荷预制单元包括加载手轮、顶梁和移动加载座；激振单元包括圆环形压电振子、连接环、传振杆、上下板弹簧、砝码和加载头；检测单元包括载荷传感器、试件和移动定位夹块。从结构上可以看出，该系统每个部件都是由螺栓和螺钉等螺纹紧固件连接而成，系统还有多处连接面和结合面。

试验仪器有压电驱动电源、阻抗分析仪、激光侧微仪，放大器、采集卡等相关仪器。测试示意图如图 2 所示。每次测试系统调至共振状态下工作。

3. 压电疲劳试验机非线性现象

3.1. 固有频率漂移

固有频率随着压电疲劳试验机振动时间的增长会发生漂移。为了研究系统固有频率随时间变化关系，将系统调至共振频率，每隔 30 个小时测试一次系统的固有频率，测试结果如图 3 所示。

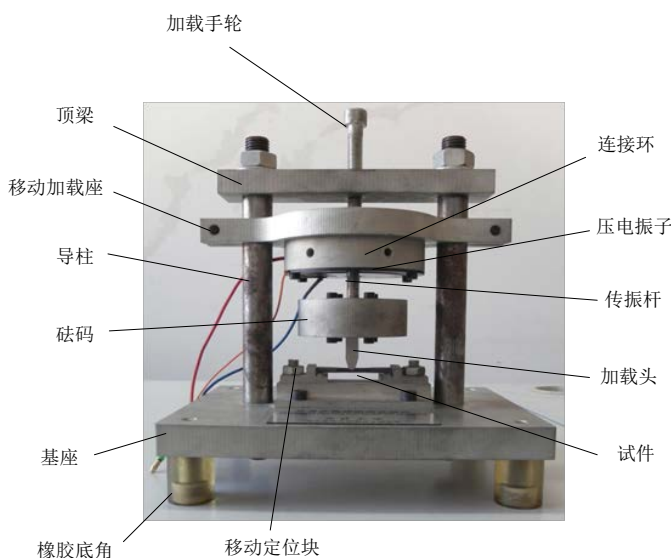


Figure 1. Piezoelectric bending fatigue test system

图 1. 压电弯曲疲劳试验系统

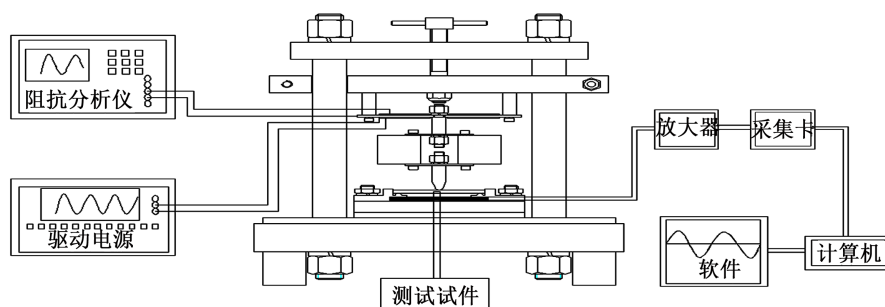


Figure 2. Schematic diagram of system test for fatigue testing machine

图 2. 疲劳试验机系统测试示意图

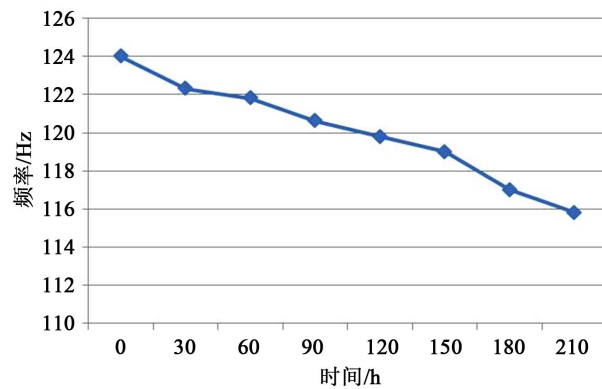


Figure 3. Relation of resonance frequency to time
图 3. 共振频率随时间变化关系

从图 3 中可以看出, 随着时间的增长共振频率下降, 这是由于随着时间的增长, 连接螺栓、各个部件之间预紧力的垫层松弛或回弹均会引起结构刚度和阻尼的变化, 进而引起固有频率的变化, 结构松弛引起的固有频率漂移是不可恢复的、是永久的。

3.2. 动态响应

当压电疲劳试验系统在共振状态下工作一定时间后, 系统会发出碰撞振动的声音。分别对系统响应进行了测试, 测试结果如图 4 所示。

从图 4 中可以看出正弦波有明显的畸变, 由于结构内部螺纹螺栓等紧固件进行的连接, 刚度存在着非线性, 产生了谐波响应。将压电疲劳试验机拆卸发现由于内部部件连接部位存在间隙, 间隙之间发生了碰撞振动。产生的谐波响应能量较高, 而且由于结构碰撞影响激励响应, 输入和输出已经不是稳定的频响函数。

3.3. 系统振幅变化

非线性结构因素还会对系统振幅控制产生影响。在压电疲劳试验机上取一测试点, 设某点距平衡位置的位移为 x , $k = \text{d}f/\text{d}x$ 表示为刚度, 这里面的 k 包括硬弹性和软弹性两种。当 k 随着 $|x|$ 的增大而增加时, 弹性力为硬特性的, 振动时振幅相对较小。当 k 随着 $|x|$ 的增大而减小时, 弹性力为软特性的, 振动时振幅相对较大。

非线性结构除了影响振幅外, 还会出现控制性差的问题。在压电疲劳试验机低频率振动情况下较为正常, 在高频率振动情况下控制很差, 这是由于在高速长时间振动情况下发生了碰撞振动。压电疲劳试验机在最初共振时正常, 高速振动试验时会发生碰撞振动, 控制性能较差。这主要是因为, 在低速振动情况下激励振幅不足以使结构具有克服惯性和阻尼的加速度, 没有产生碰撞振动, 当系统振幅超过某一临界值则会发生碰撞振动。

4. 结论

通过对压电疲劳试验机结构非线性引发的现象得出, 压电疲劳试验机在工作一段时间后会发生共振频率漂移, 动态响应产生了谐波响应, 并且在驱动电压和驱动频率不变的情况下振动振幅也会发生变化。主要是因为系统结构非线性引起的, 导致系统固有频率漂移、谐波响应、加载精度下降等现象。解决结构非线性最有效的方法就是不断改进产品设计, 着力解决连接件松动问题, 适当增加含间隙部件之间的预紧力和阻尼。

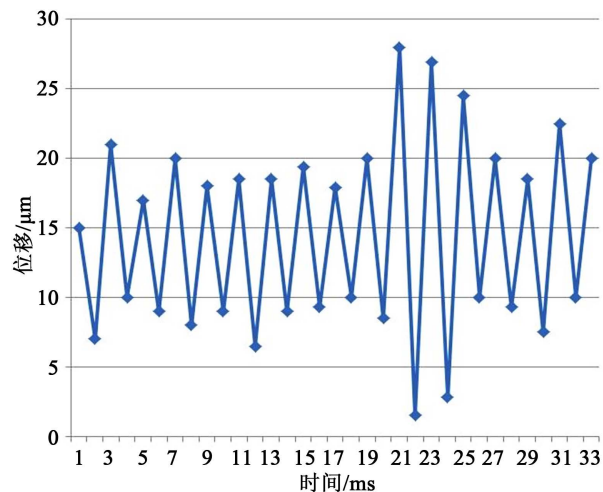


Figure 4. Dynamic response curve

图 4. 动态响应曲线

基金项目

国家自然科学基金项目(51705031), 吉林省教育厅科学研究项目(JJKH20170489KJ)。

参考文献

- [1] 王东升, 周桐, 张志旭. 浅析振动试验中结构非线性引发的现象[J]. 航天器环境工程, 2012(5): 314-317.
- [2] Canrey, K., et al. (1997) Nonlinear Dynamic Behavior in the Cassini Spacecraft Modal Survey. 15th International Modal Analysis Conference. Part I. CT, USA, 811-817.
- [3] Smith, K.S. and Peng, C.-Y. (1997) Modal test of the Cassini Spacecraft. 15th International Modal Analysis Conference. Part I. CT, USA, 804-810.
- [4] 陈昌亚, 等. 卫星振动试验中固有频率“漂移”现象初步研究[J]. 振动与冲击, 2003, 22(4): 23-25.
- [5] 陈昌亚, 等. 随机振动量级增加-JI 星结构频率下移的分析[J]. 上海航天, 2004(3): 44-47.
- [6] 金栋平, 胡海岩. 碰撞振动与控制[M]. 北京: 科学出版社, 2007.
- [7] 张义方, 闫晓强, 凌启辉. 变频谐波诱发轧机传动非线性耦合振动研究[J]. 华南理工大学学报: 自然科学版, 2014, 42(7): 62-67.
- [8] 何大方. 大容量轴流风机振动跳变故障诊断及处理[J]. 风机技术, 2013(1): 86-88.
- [9] Dhupia, J.S., Powalka, B., Ulsoy, A.G., et al. (2007) Effect of a Nonlinear Joint on the Dynamic Performance of a Machine Tool. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, **129**, 943-950. <https://doi.org/10.1115/1.2752830>
- [10] Vakakis, A.F. and Ewins, D.J. (1994) Effects of Weak Non-Linearities on Modal Analysis. *Mechanical Systems & Signal Processing*, **8**, 175-198. <https://doi.org/10.1006/mssp.1994.1015>

知网检索的两种方式：

1. 打开知网页面 <http://kns.cnki.net/kns/brief/result.aspx?dbPrefix=WWJD>
下拉列表框选择：[ISSN]，输入期刊 ISSN：2167-6631，即可查询
2. 打开知网首页 <http://cnki.net/>
左侧“国际文献总库”进入，输入文章标题，即可查询

投稿请点击：<http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱：met@hanspub.org