

# 基于冲击能量大小的冲击力位置识别方法<sup>\*</sup>

王兴君<sup>1</sup> 黄莺<sup>2</sup>

(1. 黔南民族师范学院 物理与电子科学系 都匀 558000; 2. 台州学院 机械工程学院 台州 318000)

**摘要:**冲击力识别的一个重要课题就是冲击力点位置的识别。准确地识别冲击载荷位置有助于确定结构的损伤范围,从而加速对其重点部位的健康监测。虽然截止到目前已经有一些冲击力识别的技术,但是这些方法有的需要大量的训练数据,有的需要大量的计算,还有的方法对边界条件非常敏感。本文通过建立冲击力和冲击响应之间的关系,获得压电信号与能量大小之间的关系。通过能量的信息获得冲击力的力点和冲击能量,从而轻松的实现了对力点的定位。该方法可以实现任意冲击力在任意位置的识别,最后的仿真结果很好的证明了该方法是一个简单、有效的计算方法。

**关键词:**薄板;冲击力定位;能量大小;压电传感器

**中图分类号:** TB302      **文献标识码:** A      **国家标准学科分类代码:** 130.20

## Identification of impact location based on impact energy

Wang Xingjun<sup>1</sup> Huang Ying<sup>2</sup>

(1. Department of Physics and Electronic Science, Qiannan Normal College for Nationalities, Duyun 558000, China;

2. Department of Mechanical Engineering, Taizhou University, Taizhou 318000, China)

**Abstract:** An important aspect of the impact identification is the impact location identification. Accurately identify the impact location will help to determine the possible location of the damage, and accelerate the detection of the critical parts of the structure. Although there are some existing recognition technologies, they either need a lot of training data, or require a lot of calculation and sensitive to boundary conditions. Establishing the relationship between impact force and impulse response, the present paper obtain the relation between the piezoelectric signal and energy flow (Poynting vector). Based on the important information of energy, impact location and their energy can be obtained. Finally, the simulation results confirm the effectiveness to the proposed method. This is a simple, computationally efficient method giving a solution to the bending wave propagation at any point of the structure whatever the location and waveform of the input force.

**Keywords:** plate; impact location; energy quantification; piezoelectric sensor

## 1 引言

飞机在飞行过程中,冰雹撞击、飞鸟撞击、雷击等会对其结构造成严重的威胁,加上飞机结构的复杂性不断增加,以及考虑到结构失效而引起的严重后果,因此对飞机等大型复杂设备的健康状况进行准确的评估是至关重要的<sup>[1-2]</sup>。在一项对1475架飞机的复合材料升降机的研究报告中指出:最常见的损伤类型是内部损伤。在很多情况下,这些损伤是很难用肉眼观察到的。从而对该种类型失效的常规性检查也受到限制。不但如此,这种很难用肉眼观察到的内部损伤对结构的整体性能带来了潜在的威胁,甚至会使结构的力学性能严重退化。因此很有必要对材料结构进行全方面的健康状态

的检测以确保其结构的安全性和可靠性。

作为结构健康监测的一个部分,冲击力识别的一个重要方面就是冲击力点位置识别。准确识别冲击位置有助于确定可能的损伤位置,从而加速对结构重点部位的检测。目前,从事冲击力识别的科研团队有美国斯坦福大学的Fu-Kou Chang教授,该团队采用多个传感器在横梁上对冲击力进行同步估计<sup>[3]</sup>。但是这种方法涉及到过多变量的优化问题,这可能会导致优化过程难以进行。另外,日本的东北大学航空工程系<sup>[4]</sup>利用有限元方法建立传递矩阵,从而描述传感器应力响应和冲击力信息之间的关系。国内从事冲击力识别的著名科研院所和团队有:南京航空航天大学智能材料与结构航空科技重点实验室。苏永振等人<sup>[5-6]</sup>以理论估计应变与实

收稿日期:2015-03

<sup>\*</sup> 基金项目:贵州省教育厅自然科学研究重点项目(黔教合KY[2012]066)

际测量应变之间的误差建立优化模型,利用优化的方法来求解逆问题。暨南大学理工学院,重大工程灾害与控制教育部重点实验室的研究团队,马宏伟等人<sup>[7-8]</sup>采用小波反卷积法来识别冲击力。不足的是,在选择小波的宽度和平移量时需要一定的经验。综上所述,截止到目前,虽然已经有一些冲击力识别的技术,而且在一定程度上取得了成功,例如有比较好的测量精度。但是这些方法有的需要大量的训练数据,有的需要大量的计算,还有的方法对边界条件非常敏感。

本文提出了一种计算量小、简便、有效的冲击力定位方法。通过建立冲击力和冲击响应之间的关系,获得压电信号与能量大小之间的关系。通过能量的矢量换算,从而轻松地实现了对力点的定位。

## 2 理论建模

如何建立起能量大小与传感器的输出电压之间的联系,仍然是科研界探讨的问题<sup>[9]</sup>。在这里,使用冲击力能量大小的方法来解决。该方法的关键步骤就是要推导出结构中(这里的研究对象是一块薄板)能量的表示方法,从而建立该能量大小与电压之间的直接关系<sup>[10]</sup>,再利用响应信号反演确定出冲击力的位置<sup>[11-13]</sup>。

本节将给出能量大小和压电片输出电压之间的表达式。首先,薄板弯曲变形的速度可以用如下的公式来表示<sup>[14]</sup>:

$$\dot{u}_z = \frac{1}{2tm} \sqrt{\frac{2\pi m}{D(1-\xi^2)}} e^{-\frac{r}{2t}\xi\sqrt{\frac{m}{D}}} \sin\left(\frac{r^2}{4t} \sqrt{\frac{m}{D}}(1-\xi^2)\right) \quad (1)$$

从公式1可以得到:

$$\frac{\partial \dot{u}_z}{\partial x} = \frac{1}{2tm} \sqrt{\frac{2\pi m}{D(1-\xi^2)}} \left( e^{-\frac{r}{2t}\xi\sqrt{\frac{m}{D}}} \left( -\frac{2x}{4t}\xi \sqrt{\frac{m}{D}} \right) \cdot \sin\left(\frac{x^2+y^2}{4t} \sqrt{\frac{m}{D}}(1-\xi^2)\right) + e^{-\frac{r}{2t}\xi\sqrt{\frac{m}{D}}} \cdot \cos\left(\frac{x^2+y^2}{4t} \sqrt{\frac{m}{D}}(1-\xi^2)\right) \frac{2x}{4t} \sqrt{\frac{m}{D}}(1-\xi^2) \right) \quad (2)$$

由于 $\xi$ 的取值为0.05到0.1,与公式2的第二项相比,公式2的第一项可以忽略。因此公式2可以写成如下形式:

$$\frac{\partial \dot{u}_z}{\partial x} \approx \frac{1}{2tm} \sqrt{\frac{2\pi m}{D(1-\xi^2)}} \left( e^{-\frac{r}{2t}\xi\sqrt{\frac{m}{D}}} \cdot \cos\left(\frac{x^2+y^2}{4t} \sqrt{\frac{m}{D}}(1-\xi^2)\right) \frac{2x}{4t} \sqrt{\frac{m}{D}}(1-\xi^2) \right) \quad (3)$$

从公式3可以得到:

$$\frac{\partial^2 \dot{u}_z}{\partial x^2} \approx \frac{1}{2tm} \sqrt{\frac{2\pi m}{D(1-\xi^2)}} \left( e^{-\frac{r}{2t}\xi\sqrt{\frac{m}{D}}} \left( -\frac{2x}{4t}\xi \sqrt{\frac{m}{D}} \right) \cos\left(\frac{x^2+y^2}{4t} \sqrt{\frac{m}{D}}(1-\xi^2)\right) \frac{2x}{4t} \sqrt{\frac{m}{D}}(1-\xi^2) + e^{-\frac{r}{2t}\xi\sqrt{\frac{m}{D}}} \left( -\sin\left(\frac{x^2+y^2}{4t} \sqrt{\frac{m}{D}}(1-\xi^2)\right) \right) \right)$$

$$\frac{2x}{4t} \sqrt{\frac{m}{D}}(1-\xi^2))^2 e^{-\frac{r}{2t}\xi\sqrt{\frac{m}{D}}} \cos\left(\frac{x^2+y^2}{4t} \sqrt{\frac{m}{D}}(1-\xi^2)\right) \frac{2}{4t} \sqrt{\frac{m}{D}}(1-\xi^2) \quad (4)$$

由于这是瞬态问题,当时间 $t$ 取零值, $r$ 与时间 $t$ 相比足够大,那么变形速度可以简化为如下形式:

$$\frac{\partial^2 \dot{u}_z}{\partial x^2} \approx \frac{1}{2tm} \sqrt{\frac{2\pi m}{D(1-\xi^2)}} \left( e^{-\frac{r}{2t}\xi\sqrt{\frac{m}{D}}} \cdot (-\sin\left(\frac{x^2+y^2}{4t} \sqrt{\frac{m}{D}}(1-\xi^2)\right)) \left( \frac{2x^2}{4t^2} \frac{m}{D}(1-\xi^2) \right) \right) \quad (5)$$

基于相同的假设,同样可以得到:

$$\frac{\partial^3 \dot{u}_z}{\partial x^3} \approx \frac{1}{2tm} \sqrt{\frac{2\pi m}{D(1-\xi^2)}} \left( e^{-\frac{r}{2t}\xi\sqrt{\frac{m}{D}}} \cdot (-\cos\left(\frac{x^2+y^2}{4t} \sqrt{\frac{m}{D}}(1-\xi^2)\right) \right)$$

$$\frac{2x}{4t} \sqrt{\frac{m}{D}}(1-\xi^2) \left( \frac{2x^2}{4t^2} \frac{m}{D}(1-\xi^2) \right) \quad (6)$$

从公式1、5和2、6可以得到:

$$\frac{\partial^2 \dot{u}_z}{\partial x^2} \approx -\xi \left( \frac{2x^2}{4t^2} \frac{m}{D}(1-\xi^2) \right) \quad (7)$$

$$\frac{\partial^3 \dot{u}_z}{\partial x^3} \approx -\frac{\partial \dot{u}_z}{\partial x} \left( \frac{2x^2}{4t^2} \frac{m}{D}(1-\xi^2) \right) \quad (8)$$

因此,坡印廷矢量可以表示为:

$$\mathbf{P}_x = \left( \frac{\partial^3 u_z}{\partial x^3} \frac{\partial^2 \dot{u}_z}{\partial x^2} - \frac{\partial^2 u_z}{\partial x^2} \frac{\partial^3 \dot{u}_z}{\partial x^3} \right) \cdot (-1) \cdot \left( \frac{2x^2}{4t^2} \frac{m}{D}(1-\xi^2) \right) \quad (9)$$

考虑有一个面积为 $S$ 的薄板abcd,在薄板的左右两侧各有一个压电传感器,分别平行的固定在薄板a-b端和c-d端。可以得到 $V_1, V_2$ 的形式如下:

$$V_1 = \alpha \int_{x_1-w}^{x_1+w} \frac{\partial^2 u_z}{\partial x^2} L_{\text{pie}} dx$$

$$V_2 = \alpha \int_{x_2-w}^{x_2+w} \frac{\partial^2 u_z}{\partial x^2} L_{\text{pie}} dx \quad (10)$$

式中: $\alpha = \frac{l_{\text{pie}} e_{31} h_{\text{pla}}}{2 \epsilon_{33}^s S_{\text{pie}} (1-\nu)}$ ,  $L_{\text{pie}}, l_{\text{pie}}, S_{\text{pie}}, e_{31}, h_{\text{pla}}, \epsilon_{33}^s$  被分别定义为传感器的长度,厚度,面积,电压系数,薄板的厚度和介电常数。如果传感器的宽度 $w$ 和两个传感器之间的距离 $l_{\text{ad}}$ 与弯曲波的波长相比足够的小的话,那么这两个压电传感器的电压就成为如下形式:

$$V_1 \approx \alpha \frac{\partial^2 u_z}{\partial x^2} S_{\text{pie}} \Big|_{x=x_1}$$

$$V_2 \approx \alpha \frac{\partial^2 u_z}{\partial x^2} S_{\text{pie}} \Big|_{x=x_2} \quad (11)$$

位移对于时间的变化率可以看作是电压的函数,表达为:

$$\int_{r_1}^{r_2} \frac{\partial^2 \dot{u}_z}{\partial r^2} dr = \frac{1}{\alpha S} (V_1 + V_2) \frac{l_{\text{ad}}}{2} \quad (12)$$

通过对公式9和12的合并,可以得到坡印廷矢量 $\mathbf{P}_x$

的值,把该值与时间域结合,可以给出能量大小的表达式:

$$\int_0^t P_x dt = \int_0^t ((V_1 - V_2)(\dot{V}_1 + \dot{V}_2) - (V_2 + V_1)(\dot{V}_1 - \dot{V}_2)) \frac{(\frac{2x^2}{4t^2} \frac{m}{D} (1 - \xi^2))}{2S \cdot S_{pie} \cdot \alpha^2} dt \quad (13)$$

基于上面公式的推导,我们就可以知道能量大小的 Q 值与传感器输出电压之间的关系。通过计算流经压电陶瓷片的能量流的信息来获得冲击力的力点和冲击能量,从而实现对冲击力位置的识别。

### 3 仿真结果

为了证明上述理论模型,我们使用 MATLAB R2006a 进行仿真模拟。考虑如图 1 所示的薄板模型。具体参数如下:弹性模量  $E = 1.95 \times 10^{11} \text{ Pa}$ , 模板厚度为  $8 \times 10^{-4} \text{ m}$ , 泊松比  $\nu = 0.33$ , 电压系数  $e_{31} = -4.3 \text{ C} \cdot \text{m}^{-1}$ , 内圈的传感器的长  $L_1$  和宽  $W_1$  分别是:  $0.138 \text{ m}$  和  $0.003 \text{ m}$ , 外圈的传感器的长  $L_2$  和宽  $W_2$  分别是:  $0.14 \text{ m}$  和  $0.003 \text{ m}$ 。

图 1 中的能量的初始值为假设是在压电圈的中心(坐标为  $(0,0)$ )。当冲击力作用在封闭压电圈内部,所有的弯曲应力波将有封闭圈内向圈外流,现定义从封闭圈内向圈外的能量大小为正值,把能量值对时间积分的值定义为 Q,我们将得到一个正的 Q 值。当冲击力作用在封闭圈外,能量首先流入封闭圈,再流出封闭圈,能量值对时间的积分 Q 值将是零值。考虑到一个有损耗的系统, Q 值将为负值。如图 2 的仿真结果很好的说明了这一点。从图中可以看出,当外加脉冲作用在封闭圈外部时,能量值为零值。由于这是一个有能量损耗的系统,该能量值稳定在负值,并趋于一个常量。当外加脉冲作用在封闭圈内部时,能量值为正值,并趋于一个常量。该仿真结果和公式推导计算预计的结果是相符合的。

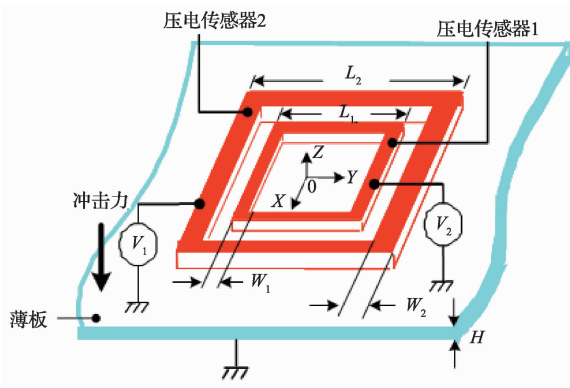


图 1 模拟图(两个压电片圈固定在薄板上用于采集电压信号)

从这个结果中,我们就可以通过观察能量值的大小来辨别外加脉冲是否在封闭圈这个范围内。从而快速缩小冲击力位置,实现有效的定位。

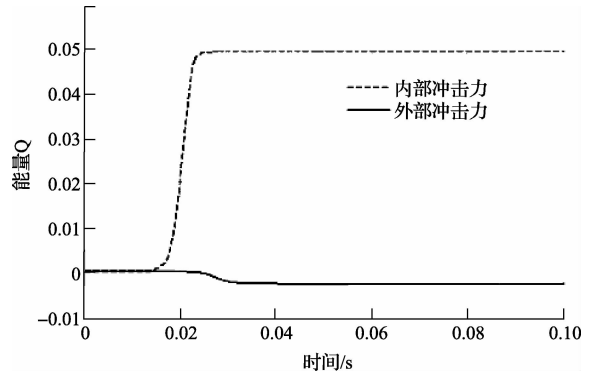


图 2 脉冲的能量响应的模拟结果

### 4 结论

本文介绍了一种新的处理机械波传播问题的分析模型。此模型是一个有效计算的方法,它可以确定无限薄板对于给定的外加激励下的冲击响应,同时它给出了能量大小和电压响应之间的分析公式。文章的最后给出了脉冲能量响应的数值模拟结果。该仿真结果表明该模型能够很好的对冲击力点的位置进行定位。

### 参考文献

- [1] GUYOMAR D, LALLART M, PETIT L, et al. Impact localization and energy quantification based on the power flow: A low-power requirement approach[J]. Journal of Sound and Vibration, 2011, 330(13): 3270-3283.
- [2] 朱峰, 罗建, 董海涛, 等. 基于声传感器阵的舰船被动定向研究[J]. 国外电子测量技术, 2013(12): 56-58.
- [3] CHOI K, CHANG F K. Identification of foreign object impact in structures using distributed sensors [J]. Journal of Intelligent Material Systems and Structures, 1994(5): 864-869.
- [4] HU N, MATSUMOTO S, NISHI R, et al. Identification of impact forces on composite structures using an inverse approach[J]. Structural Engineering and Mechanics, 2007, 27(4): 409-424.
- [5] 苏永振, 袁慎芳, 周恒保. 基于三角测量和最优化技术的复合材料冲击定位两步法[J]. 宇航学报, 2009, 30(3): 1201-1206.
- [6] 杨维新, 唐伶俐, 汪超亮, 等. 基于遗传小波神经网络的光电稳定平台系统辨识[J]. 仪器仪表学报, 2013, 34(3): 517-523.
- [7] 程良彦, 宋振华, 王志华, 等. 基于小波反卷积的冲击力识别[J]. 暨南大学学报(自然科学版), 2008, 29(5): 443-446.
- [8] 李嘉全, 程志峰. 用于主动减振的振动信号实时高精

- 度检测[J]. 电子测量与仪器学报, 2013, 27(12): 1134-1140.
- [9] GUYOMAR D, LALLART M, MONNIER T, et al. Passive impact location estimation using piezoelectric sensors[J]. Structural Health Monitoring, 2009, 8(5): 357-367.
- [10] WANG X J, GUYOMAR D, YUSE K, et al. Impact force detection using an energy flow estimator with piezoelectric sensors [J]. Frontiers of Mechanical Engineering in China, 2010, 5(2):197-203.
- [11] GUYOMAR D, WANG X J, PETIT L, et al. Modeling of transient bending wave in an infinite plate and its coupling to arbitrary shaped piezoelements [J]. Sensors & Actuators: A. Physical, 2011, 171(2): 93-101.
- [12] GUYOMAR D, LALLART M, WANG X J, et al. Energy extraction-based force location estimation [C]//Proceedings of the 6th International Workshop on Structural Health Monitoring. Stanford (Stanford USA): Destech, 2007: 1711-1718.
- [13] 王兴君,黄莺. 使用压电传感器对复合薄板冲击力位置的确定[J]. 电子测量技术, 2013, 36(10): 78-81.
- [14] 王兴君,黄莺. 基于能量流方法的冲击力历史的识别[J]. 测试技术学报, 2013, 04(27): 277-281.

### 作者简介

**王兴君**, 1977年12月出生, 工学博士, 讲师, 主要从事结构健康监测, 力点定位识别等方面的研究。

E-mail: xingjun.wang@gmail.com

**黄莺**, 1978年9月出生, 工学博士, 讲师, 主要从事信息采集、电子测量等教学科研工作。

E-mail: ying.huang2013@gmail.com

(上接第5页)

- [6] 任洛卿,白泽洋,于昌海,等. 风光储联合发电系统有功控制策略研究及工程应用[J]. 电力系统自动化, 2014,38(7):105-110.
- [7] 赵仁德,王永军,张加胜. 直驱式永磁同步风力发电系统最大功率追踪控制[J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(27):106-111.
- [8] CHEN Y K, WU Y C, SONG C C, et al. Design and implementation of energy management system with fuzzy control for DC microgrid systems [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2013, 28(4): 1563-1570.
- [9] 谢维. 直驱型永磁风电机组并网控制系统的研究[J]. 电源技术, 2014,38(10):1907-1910.

### 作者简介

**梁洲**, 硕士, 主要研究方向为风电机组并网技术。陈意军, 博士, 教授, 主要研究方向为高效 LED 照明驱动技术。

E-mail: 734601849@qq.com