

# 薄膜声体波谐振器的电磁场建模与仿真

董树荣, 金 浩, 王德苗

(浙江大学 信息与电子工程学系, 浙江 杭州 310027)

**摘 要:** 为了模拟薄膜声体波谐振器(FBAR)的电磁场(EM)分布特性, 提出了一种新的 FBAR 建模方法. 该方法从基本的一维弹性压电方程和三维麦克斯韦尔方程出发, 结合电极与压电薄膜交界处机械应力与机械位移连续的边界条件, 推导出了 FBAR 等效复介电常数的严格解. 将电磁场和声场等效到一个复介电常数中, 用等效复介电常数的形式来包含电声效应. 并基于有限元方法对 FBAR 全波段进行了仿真. 结果表明, 该方法的仿真结果与实测数据基本一致, 具有很好的准确性. 与传统的电路模型比较, 由该方法得到的模型能够实现场的不连续仿真和 FBAR 的电磁场分布与压电效应的实时仿真.

**关键词:** 声体波; 射频谐振器; 电磁场建模; 介电常数

**中图分类号:** TN712; TM154

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1008-973X(2006)09-1477-05

## Electromagnetic analysis of thin film bulk acoustic resonator

DONG Shu rong, JIN Hao, WANG De miao

(Department of Information Science & Electronic Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

**Abstract:** For simulating the electromagnetic (EM) distribution of thin film bulk acoustic resonators (FBAR), a new FBAR modelling method was proposed. Through rigorously solving the one dimensional elasticity piezoelectric linear equations and the three dimensional Maxwell equations, the continuity boundary conditions of mechanical displacement and traction forces at the interfaces between piezoelectric thin film and electrodes were considered, and the effective permittivity of FBAR was deduced in analytic form. After EM and acoustic field were transformed into an effective permittivity, the piezoelectricity was embodied in the form of the effective permittivity, and the method was simulated in full wave FBAR based on finite element method. The results show that the simulation data of the method agree well with those of the measurement. Compared with traditional circuit model, the model designed by the method can implement the field discontinuity simulation and the co-simulation of electromagnetic distribution and piezoelectricity of FBAR.

**Key words:** FBAR; electromagnetic (EM) modelling; dielectric constant

无线终端的多功能化发展对频率器件提出了微型化、低功耗、低成本、高性能等要求, 传统射频频率器件的解决方案主要是微波介质陶瓷和声表面波(surface acoustic wave, SAW)技术. 前者虽有很好的性能但体积太大; 后者体积虽小, 但存在工作频率不高、插入损耗较大、功率容量较低、性能随温度变化漂移明显等缺点<sup>[1-3]</sup>. 薄膜声体波谐振器(thin

film bulk acoustic resonator, FBAR)是一种布置于硅或砷化镓半导体衬底之上, 由金属电极压电薄膜金属电极构成, 且基于声体波传输的谐振器. FBAR综合了微波介质陶瓷性能优越和SAW体积较小的优势, 同时又能克服两者的缺点, 其工作频率高、温度系数小、功率容量大、损耗低、体积小、可大批量生产、成本低、与Si和GaAs半导体工艺兼容,

被认为是最佳的射频 IC 解决方案<sup>[3]</sup>。

Mason 模型是最早用来分析 FBAR 电学性能的基本方法之一。Lakin 等人<sup>[4]</sup>给出了 Mason 模型详细的推导过程,用其可以很好地估算 FBAR 谐振器的电学阻抗特性,但它电路结构复杂,不适宜于用来设计滤波器。为了借助 EDA 软件设计 FBAR 滤波器, Larson 等人<sup>[5]</sup>提出了一种 MBVD 模型,它以简单的 LRC 电路等效 FBAR 在谐振频率附近的特性。以上两种模型都是一维的,为了更精确地建模,目前已有二维和三维的建模方法报道,如 Seo 等人<sup>[6]</sup>提出的时域有限差分法(finite difference time domain, FDTD), Southin 等人<sup>[7]</sup>提出的有限元法(finite element method, FEM)等。但正如 Aigner<sup>[8]</sup>所说,二维和三维声学模型的有限元等数值方法因需要计算大量的数据,精度与一维模型相比提高并不多且不实用。一般地说,在实际设计过程中,最常采用的还是一维 Mason 模型和 MBVD 模型。

目前的 FBAR 模型都假定电场为准静态。但是当 FBAR 的工作频率达到或者高于 10 GHz,或采用高介电常数的压电材料,如 PZT 等时,电磁场的分布特性将不容忽视。退一步说,即使单个的 FBAR 用等效电路模型可以很好地描述,但构成滤波器时,各个 FBAR 之间的寄生电磁耦合,以及滤波器与周围元件之间的耦合都非常重要,不可忽略。对于此问题,一般的解决方案为:先用等效电路模型仿真得到 FBAR 的压电性能,再将 FBAR 当作普通电容处理,置于三维电磁场仿真软件中进行电磁场分布特性仿真,最后再将两次仿真的结果综合起来。此方法的缺点是声场仿真和电磁场仿真需要分开进行,步骤复杂,且较为费时。

本文提出了一种声场和电磁场协仿真的方法:将 FBAR 的压电效应包含于随频率复杂变化的等效复介电常数之内,并在三维电磁场仿真软件中用此等效复介电常数代替工作区域中压电薄膜的夹持介电常数。

## 1 电磁场模型的建立

本文提出了一种适合于三维电磁场全波仿真的 FBAR 建模方法,通过求解完整的三维 Maxwell 方程和一维声学方程,引入等效复介电常数模型,该等效复介电常数包含了压电薄膜的压电效应以及电极、支撑层等声学负载的影响,以实现一次性电声的协同仿真。

因 FBAR 的横向尺寸远大于厚度,故可近似用

一维声学模型来分析。如图 1 所示,将 FBAR 以压电薄膜层为中心划分为 3 个区域,并建立厚度方向的坐标系。 $x=-h$  平面为压电薄膜与上电极的交界面; $x=h$  平面为压电薄膜与下电极的交界面。根据传输线理论,可以将任意多层无压电性能的普通声学材料层等效为一层延伸到无穷远处的普通声学材料层,只要其特征阻抗等于等效前的输入阻抗。据此用区域 1 表示压电薄膜之上的等效层,特征声阻抗为  $Z_1$ ;区域 2 表示压电薄膜之下的等效层,特征声阻抗为  $Z_2$ ;假设所有的场量都是稳态的、随时间正

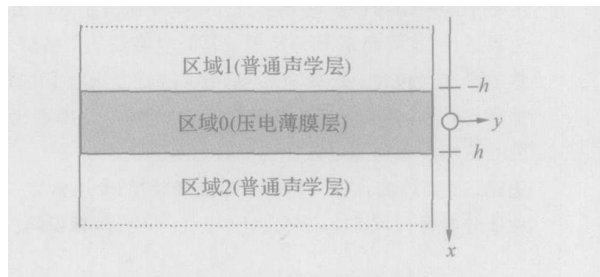


图 1 FBAR 多层声学等效图

Fig. 1 Equivalent multi layers schematic of FBAR

弦变化的,那么对于区域 0,一维弹性压电方程形式如下<sup>[4]</sup>:

$$\left. \begin{aligned} \frac{d\sigma_p}{dx} &= -\rho_p \omega^2 e_p, \\ \frac{dD}{dx} &= 0, \\ \sigma_p &= c_E \frac{de_p}{dx} - \eta E, \\ D &= \eta \frac{de_p}{dx} + \epsilon_s E. \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

式中: $\sigma_p$  为应力, $e_p$  为机械位移, $D$  为电位移, $E$  为电场强度,它们均是以厚度方向  $x$  为变量的复函数,下标  $p$  表示它们处于压电区域; $\rho_p$  为压电材料的密度, $c_E$  为短路弹性刚度常数, $\eta$  为压电应力常数, $\epsilon_s$  为夹持介电常数; $\omega$  为角频率。区域 1 和 2 的声学场方程如下:

$$\left. \begin{aligned} \frac{d\sigma}{dx} &= -\rho \omega^2 e, \\ \sigma &= c \frac{de}{dx}. \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

式中: $\sigma$ 、 $e$  分别为上、下电极的应力和机械位移, $\rho$  为电极材料的密度, $c$  为电极材料的弹性刚度常数。

为了求出一个等效复介电常数  $\epsilon_{\text{eff}}$ ,使得  $\epsilon_{\text{eff}}$  满足:

$$D = \epsilon_{\text{eff}} E. \quad (3)$$

首先,联立方程式 (1) ~ (3),求解微分方程式 (1) 的特征值,可以求出应力、机械位移和电位移的

通解如下:

$$\left. \begin{aligned} &e_p(x)=\beta_-e^{jk_px}+\beta_+e^{-jk_px}, \\ &E(x)=\frac{-j\eta k_p}{\epsilon_s}(\beta_-e^{jk_px}+\beta_+e^{-jk_px})-a, \\ &D=-\epsilon_s a, \\ &\sigma_p(x)=j\omega Z_p(\beta_-e^{jk_px}+\beta_+e^{-jk_px})+\eta a, \\ &e_1=\beta_1e^{jk_1(x+h)}, \\ &\sigma_1=j\omega Z_1u_1, \\ &e_2=\beta_2e^{-jk_2(x-h)}, \\ &\sigma_2=j\omega Z_2u_2. \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

式中:  $k_p = \omega/v_p$  为区域 0 中的声学波矢,  $v_p = \sqrt{c_D/\rho_p}$  为区域 0 中的声速,  $c_D = c_E + e^2/\epsilon_s$  为开路弹性刚度系数,  $Z_p = \sqrt{c_D/\rho_p}$  为区域 0 中的特征声学阻抗;  $\beta_-$ 、 $\beta_+$ 、 $a$  为待定系数;  $k = \omega/v$  为区域 1 和 2 中的波矢,  $v = \sqrt{c/\rho}$  为区域 1 和 2 中的声速,  $Z = \sqrt{\rho c}$  为区域 1 和 2 中的特征声学阻抗;  $\beta_{1,b}$  为待定系数. 应用如下的边界条件:

$$\left. \begin{aligned} &u_p(-h)=u_1(-h), \\ &T_p(-h)=T_1(-h), \\ &u_p(h)=u_b(h), \\ &T_p(h)=T_b(h). \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

结合式(4)、(5),可以得到等效复介电常数为

$$\epsilon_{\text{eff}}=\epsilon_s\cdot[1-K^2\cdot(\alpha_-e^{jk_px}-\alpha_+e^{-jk_px})]^{-1}.\quad (6)$$

式中:

$$\alpha_-=\frac{(z_1+1)e^{j\phi}+(z_2+1)e^{-j\phi}}{(z_1+1)(z_2+1)e^{2j\phi}-(z_1-1)(z_2-1)e^{-2j\phi}},$$

$$\alpha_+=\frac{(z_2+1)e^{j\phi}+(z_2+1)e^{-j\phi}}{(z_1+1)(z_2+1)e^{2j\phi}-(z_1-1)(z_2-1)e^{-2j\phi}}.$$

两式中的阻抗采用归一化, 上电极归一化阻抗  $z_1 = Z_1/Z_p$ , 下电极归一化阻抗  $z_2 = Z_2/Z_p$ . FBAR 中电磁场的相位为  $\phi = k_ph$ , 压电薄膜的机电耦合系数为  $K^2 = e^2/(\epsilon_s c_E + e^2)$ .

式(6)为本模型要得到的等效复介电常数, 包括了包含了压电薄膜的压电效应电学阻抗和声学负载, 以及电极和支撑层等声学负载的影响. 式(6)的等效复介电常数对于频率是色散的, 对于空间也是色散的, 而目前主流的三维电磁场仿真软件几乎都不能对空间色散的介质进行仿真, 为了能够使用现有仿真软件对本模型进行仿真. 本文对式(6)作近似处理. 在 FBAR 在厚度方向的尺寸与电磁波长相比是微乎其微的, 即其空间色散的变化并不是很大, 可以将其近似成均匀的、无空间色散的介质, 用平均电场代替实际电场.

$$E'_z=\frac{1}{2h}\int_{-h}^hE_zdz.$$

代入式(4), 并使用边界条件式(5), 可以获得简化的等效复介电常数为

$$\epsilon_{\text{eff}}=\frac{\epsilon_s}{1-k_t^2\frac{\tan\theta}{\theta}\frac{(z_1+z_2)\cos^2\theta+j\sin2\theta}{(z_1+z_2)\cos2\theta+j(z_1z_2+1)\sin2\theta}}.$$

式(6)的等效复介电常数仅对频率是色散的, 故可将其置入现行的三维电磁场仿真软件进行仿真, 仿真计算的原理是: 将有关材料数据带入式(6), 可以获得 FBAR 作为一个整体的等效介电常数, 该等效复介电常数包含了压电薄膜的压电效应电学阻抗和声学负载, 以及电极和支撑层等声学负载的影响, 也就是说等效介电常数包含了电场和声场的所有行为, 这样就可以把 FBAR 完全放在电磁场中作为一种特殊的介电体考虑, 利用现有的三维电磁场仿真软件, 如 Ansoft HFSS, 对 FBAR 进行三维全波仿真, 而 FBAR 的压电特性完全体现在  $\epsilon_{\text{eff}}$  中, 只要通过一次仿真计算就可以获得 FBAR 性能参数, 这种新模型即电磁场模型. 它避免了电路模型声场仿真和电磁场仿真需要分开进行、步骤复杂且较为费时的缺点.

2 模型验证与分析

为了验证电磁场模型的正确性, 借用 Su 等人实测数据<sup>[9]</sup>来进行模型的验证, 文献[9]中的 FBAR

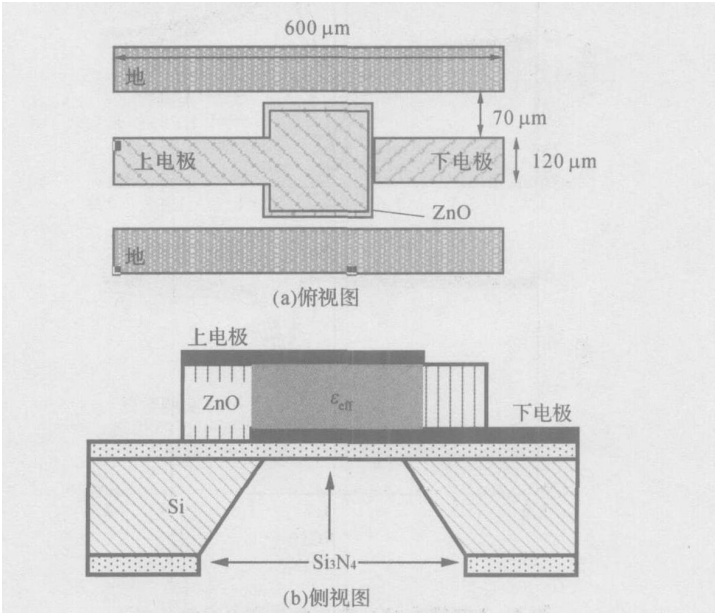


图 2 仿真所用 FBAR 结构的俯视及侧视图

Fig.2 Top and side views of modeled ZnO FBAR

以 ZnO 作压电薄膜, Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> 作支撑层、Au 作电极、共面波导 (coplanar waveguide, CPW) 馈电、采用 Si 反面刻蚀工艺的 FBAR 做, 其结构及尺寸标注如图 2(a)、(b) 所示, CPW 按图尺寸设计使得 FBAR 在谐振频率附近约为 50 Ω 馈电. 电极厚度为 100 nm, 电极电导率取  $2.5 \times 10^7$  S/m, Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> 厚 200 nm, ZnO 厚 1.2 μm, 硅片厚度 345 μm, ZnO 面积为 200 μm×200 μm, ZnO 介电常数取 11.9, ZnO 电导率 0.033 S/m, ZnO 机电耦合系数为 0.078, 材料的其他声学属性列于表 1. 在 HFSS 中输入此三维结构, 使用 Ansoft HFSS 对其进行三维电磁场仿真.

表 1 仿真相关的材料声学属性

Tab. 1 Relation material acoustic properties

材料	$\rho /$ ( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ )	$\nu /$ ( $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ )	$\alpha /$ ( $\text{dB} \cdot \text{m}^{-1}$ )	$\epsilon$
Au	20 630	3 200	17 760	1.0
ZnO	5 600	6 340	2 500	8.8
Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub>	3 270	11 000	—	7.0

将本文电磁场模型、实际测量的结果以及基于传统 Mason 电路模型的仿真结果进行比较, 见图 3. 图 3(a) 为获得的  $S$  参数中结果  $S_{11}$ , 图 3(b) 为获得的  $S$  参数中结果  $S_{21}$ . 图 3 中 HFSS 仿真结果采用本文电磁场模型获得, 电路仿真是采用传统 Mason 电路模型的结果, 实测数据来自文献 [9] 的测量结果.

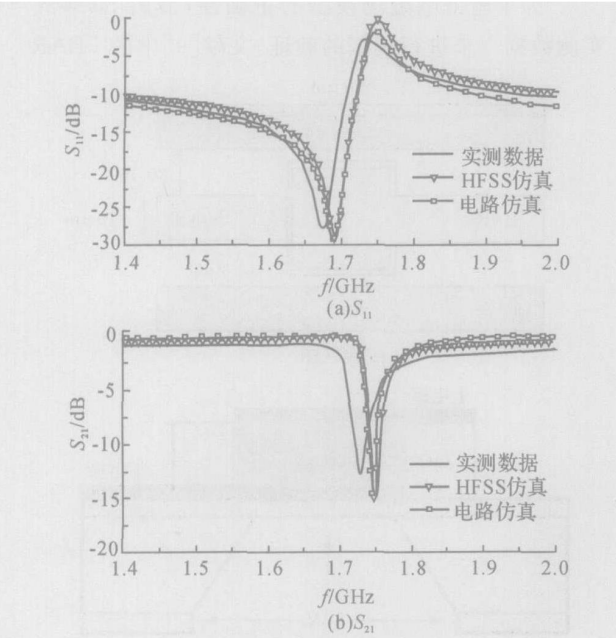


图 3 2 种模型的计算值与实测 S 参数比较

Fig. 3 Comparison of S parameters measured with those calculated in two models

从图 3 可见, 使用本文电磁场模型进行 HFSS 仿真的结果与实际测量所得的  $S$  参数曲线十分接近, 说明本文电磁场模型对 FBAR 行为的模拟较准确.

此外从图 3 可以看出, 在远离谐振频率处, 本文电磁场模型仿真结果比 Mason 电路模型更逼近于实际测量曲线. 这是因为在远离谐振频率处, 即  $f=1.67 \sim 1.75$  GHz, 电极不连续性所增加的额外电抗、边缘效应以及等电磁场特性体现得较为明显, 本文电磁场模型可以很好地仿真到这些电磁分布的不均匀性所带来的影响. 这点是传统 Mason 电路模型做不到的.

本文采用 HFSS 还有个优点就是可以直观地看出 FBAR 结构中的表面电流分布, 在 FBAR 串联谐振、 $f=1.69$  GHz 时的电流分布如图 4(a) 所示, 可以直观地看到, 在串联谐振时, 电流可以无障碍得通过 FBAR, 相当于短路; 在 FBAR 并联谐振、 $f=1.75$  GHz 时的电流分布如图 4(b) 所示, 可以看到, 在并联谐振时, 因 FBAR 的阻抗无穷大, 几乎没有电流可以馈入 CPW.

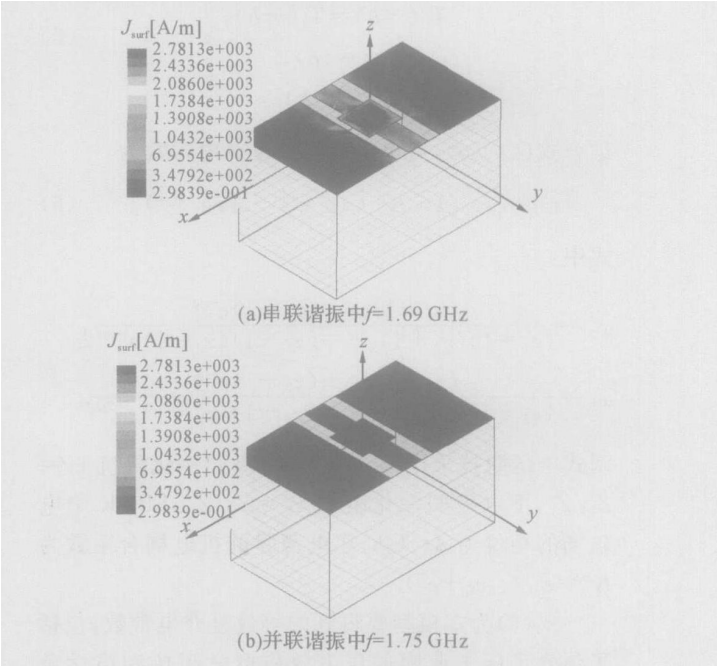


图 4 FBAR 中的电流分布特性

Fig. 4 Distribution characteristics of currents in FBAR

该模型的结果完全可以作为一个介电常数可变的介质代替 FBAR, 这样给实际电路系统设计带来了很大方便, 尤其避免了传统 Mason 电路模型声场仿真和本文电磁场仿真需要两步分别进行的缺点. 另外电磁场模型还可以使用 HFSS 模拟到滤波器与周围元件之间的电磁寄生、耦合情况, 这点也是 Mason 电路模型无法具备的.

3 结 语

本文提出了一种描述 FBAR 声电行为的电磁场模型及其仿真方法. 用等效复介电常数的形式来包含电声效应, 使得 FBAR 可以方便地与三维电磁场全波仿真软件结合起来, 实现电声效应的同步仿真以及电磁寄生和耦合情况仿真. 实测数据表明了本模型具有良好的准确性.

参考文献(References):

[ 1] LAKIN K M. A review of thin film resonator technology [ J] . **IEEE Microwave Magazine** 2003, 4( 4): 61 - 67.

[ 2] 叶学松, 徐成华, 樊海涛, 等. 一种新型的声表面波液相检测系统的研究[ J] . 浙江大学学报: 工学版, 2004, 38( 8): 1051 - 1055.

YE Xue song, XU Cheng hua, FAN Hai tao, et al. Study of a novel surface acoustic wave liquid detection system [ J] . **Journal of Zhejiang University: Engineering Science**, 2004, 38( 8): 1051 - 1055.

[ 3] RUBY R C, BRADLEY P, OSHMYANSKY Y, et al. Thin film bulk wave acoustic resonators ( FBAR) for wireless applications [ C] // **Ultrasonics Symposium**. Atlanta, Georgia: IEEE, 2001: 813 - 821.

[ 4] LAKIN K M, KLINE G R, MCCARRON K T. High Q microwave acoustic resonators and filters [ J] . **IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques** 1993, 41( 12): 2139 - 2146.

[ 5] LARSON J D, BRADLEY P D, WARTENBERG S et al. Modified butterworth van dyke circuit for FBAR resonators and automated measurement system [ C] // **Ultrasonics Symposium**. Caribe Hilton; IEEE, 2000: 863 - 868.

[ 6] WONE K, SAEHOON J, HYEONGDONG K. The modeling of thin film bulk acoustic wave resonators using the FDTD method [ J] . **IEEE Device Letters** 2002, 23( 6): 327 - 329.

[ 7] SOUTHIN J E A, WHATMORE R W. Finite element modelling of nanostructured piezoelectric resonators ( NAPIERs) [ J] . **IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control** 2004, 51( 6): 654 - 662.

[ 8] AIGNER R. High performance RF filters suitable for above IC integration: film bulk acoustic resonators ( FBAR) on silicon [ C] // **Custom Integrated Circuits Conference**. Orlando, FL: IEEE, 2003: 141 - 146.

[ 9] SU Q X, KIRBY P, KOMURO E, et al. Thin film bulk acoustic resonators and filters using ZnO and lead zirconium titanate thin films [ J] . **IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques** 2001, 49( 4): 769 - 777.

下期论文摘要预览

桥梁健康监测中损伤特征提取的小波包方法

郭 健<sup>1</sup>, 陈 勇<sup>1</sup>, 孙炳楠<sup>1,2</sup>

( 1. 浙江大学 土木工程学系, 浙江 杭州 310027; 2. 浙江大学 宁波理工学院, 浙江 宁波 315100)

摘 要: 针对桥梁健康监测中结构损伤识别的特点, 从模式识别的角度提出和分析了的损伤特征提取问题. 阐述了基于小波包分析的两种节点能量特征提取的方法. 为了研究小波包系数节点能量和小波包信号成分节点能量对损伤信息进行特征提取的差异, 通过对随机荷载激励下的连续梁进行数值模拟, 得到了结构未损和损伤状态下的加速度时程信号. 应用小波包变换, 对不同结构状态下的加速度信号分别提取了两种小波包节点能量特征, 并对比了它们作为结构损伤特征指标的敏感性. 认为两种特征指标的敏感性相差很小, 而小波包系数节点能量特征指标的计算效率更高, 更适合桥梁健康监测中损伤特征提取的要求.

关键词: 桥梁健康监测; 损伤特征提取; 小波包