

文章编号: 0451-0712(2004)12-0138-04

中图分类号: U416.222.06

文献标识码: B

# 模糊控制理论及音谱分析技术在刚性路面脱空识别中的应用

彭永恒<sup>1,2</sup>, 王志丹<sup>3</sup>, 昂雪野<sup>1</sup>, 张肖宁<sup>4</sup>

(1. 大连民族学院土建系 大连市 116600; 2. 哈尔滨工业大学交通学院 哈尔滨市 150001;

3. 大连民族学院设备处 大连市 116600; 4. 华南理工大学交通学院 广州市 510641)

**摘要:** 介绍一种利用模糊控制理论及音谱分析技术对刚性路面进行脱空识别的方法。通过声振法采集及分析声音信号,可以准确地判定刚性路面地基接触情况。

**关键词:** 模糊控制; 音频; 刚性路面; 脱空识别

刚性路面脱空的检测有很多种方法,目前判断地基是否脱空多采用经验方法<sup>[1]</sup>,准确性很难保证。还有采用落锤式弯沉仪(FWD)弯沉测量数据反演路面结构层模量,判定地基接触状况<sup>[2]</sup>,但该方法需要昂贵的检测设备,不便于工程应用。本文通过敲击装置产生音频信号,通过声音传感器(麦克风)将音频信号传入声卡,利用声卡同时具有 A/D 转换功能将数据存入计算机,利用 MATLAB 软件中丰富的数据分析和处理功能进行频谱及声谱分析,从中提取特征向量,用模糊控制理论及音谱分析技术在噪声信号中判定地基的接触状况<sup>[3]</sup>。该法操作方便,装置简单,经济实用,取得了令人满意的识别结果。

## 1 系统的工作原理

### 1.1 信号检测及识别系统

建立了一套音频信号检测及脱空判定测试系统。来自敲击装置的模拟音频信号从麦克风输入,经声卡的 A/D 转换后由数字信号处理(DSP)芯片压缩处理以数字文件存入计算机。采用 MATLAB 语言工具箱的信号分析和处理功能进行声谱分析,采用模糊控制理论技术为基础制定隶属函数算法并结合 FFT 声谱分析结果最终实现对刚性路面的脱空判定。测试系统原理图如图 1 所示。在对刚性路面脱空识别的整个过程中, MATLAB 软件的信号分析和处理功能起着很重要的作用,它可以将录取的声音文

件变换为离散的数据文件,然后利用其强大的矩阵运算能力处理数据文件,如数字滤波、傅立叶变换、时域和频域分析、幅域分析以及声谱分析等。



图 1 刚性路面脱空测试系统

利用 MATLAB 软件的数字信号分析和处理工具箱进行刚性路面脱空声信号分析和处理。MATLAB 作为一种高性能的科技语言,在数值计算、算法研究、数据分析及工程设计等方面已广泛应用,到目前为止它已成为国际上最先进的科技应用软件之一<sup>[4]</sup>。

### 1.2 声信号的回放

MATLAB 软件系统可以读写多种文件格式,最佳的输入方式依赖于用户的数据格式。测试系统将采集的地基脱空声信号采用波形文件格式加以保存。利用 MATLAB 中 wavread 函数将波形文件读入工作区,并在 MATLAB 工作空间中创建一个与文件相同的变量<sup>[4]</sup>。此变量值即地基脱空声信号。这样,数字化后的声信号又转变为模拟形式,通过作图函数 plot 就可以将地基脱空声信号的波形图显示在屏幕上。

### 1.3 声信号滤波

受环境噪声和信号噪声比等方面的限制,在对

声信号采集过程中,不可避免地会产生噪声,因此,需要对声信号进行滤波处理。数字滤波器设计是 MATLAB 信号处理工具箱一个重要的组成部分,可以根据频谱的特点和处理信号的目的,设计出各种各样符合要求的数字滤波器。本文利用 MATLAB 软件,设计一个有限长低通数字滤波器(FIR 数字滤波器),由于 FIR 数字滤波器的单位冲激响应是有限长的,因此,其系统函数永远稳定,且具有线性相位<sup>[4]</sup>。

FIR 数字滤波器单位冲激响应  $h(n)$  的系统函数为:

$$H(z) = \sum_{n=0}^{N-1} h(n)z^{-n} \quad (1)$$

$H(z)$  对应的频率响应为:

$$H(e^{j\omega}) = \sum_{n=0}^{N-1} h(n)e^{-j\omega n}, 0 \leq n \leq N-1 \quad (2)$$

实际中遇到的离散时域信号总是有限长的,因此,不可避免地要遇到数据截短问题,即出现吉布斯效应。选择合适的窗函数,可有效地抑制吉布斯效应。通常,可选用窗函数有: Hanning 窗、Hamming 窗、Blackman 窗等。本文选择 Hanning 窗,其函数为:

$$\bar{\omega}(n) = \begin{cases} \frac{1}{2} \left| 1 - \cos \frac{2\pi n}{N-1} \right|, & 0 \leq n \leq N-1 \\ 0, & \text{其他 } n \end{cases} \quad (3)$$

### 1.4 声信号的功率谱分析

对声信号分析和处理的目的是要提取或利用信号的特征,信号既可以用时域描述,表示成时间的函数,还可以用频域描述,表示成频率的函数。在许多情况下,信号的频谱表示比时域表示更简单,更容易解释和表征,因此便于进行特征分析。

### 1.5 用于刚性路面脱空识别的状态参数

假定  $Y(t)$  为声音信号,  $Q_i$  为穿越纵座标  $(Y(t))$  某值  $i$  的频率,  $P(f)$  为  $Y(t)$  的功率频谱函数,则有:

$$Q_i = \frac{\sigma_y}{2\pi\sigma_x} e^{-i^2/2\sigma_x^2} \quad (4)$$

式中:  $\sigma_x^2 = \int_0^x P(f)df$

$$\sigma_y^2 = \int_0^x (2\pi f)^2 P(f)df$$

则  $i$  值处的概率密度为:

$$P_i = \frac{\sqrt{2\pi}}{\sigma_y} Q_i \quad (5)$$

假定  $Y_j$  为在某一检测点测量  $N$  次所得到的声音信号 ( $j=1, 2, \dots, N$ ), 并且把  $\max\{Y_j(t)\}$  与  $\min\{Y_j(t)\}$  之间的区域分为  $M$  份, 则第  $i$  ( $i=1, 2, \dots, M$ ) 部分

$$Y_i = \frac{\min(Y_j(t)) + i \times (\max(Y_j(t)) - \min(Y_j(t)))}{M}$$

根据公式(1)和(2),可以得到  $Q_{ij}$  和  $P_{ij}$ , 其平均值分别为:

$$Q_{mi} = \sum_{j=1}^N Q_{ij} / N$$

$$P_{mi} = \sum_{j=1}^N P_{ij} / N$$

定义  $I_{qj}$  和  $I_{pj}$ , 分别为:

$$I_{qj} = \sum_{i=1}^M |\lg(Q_{ij}/Q_{mi})| / M \quad (6)$$

$$I_{pj} = \sum_{i=1}^M |\lg(P_{ij}/P_{mi})| / M \quad (7)$$

若  $Y_{fj}(t)$  为所测到的缺陷信号, 则由公式(4)~(7)可以得到相应的  $I_{qfj}$  和  $I_{pfj}$ , 显然它们要大于正常状态时的  $I_{qj}$  和  $I_{pj}$ <sup>[3]</sup>。

$I_{qfj}$  和  $I_{pfj}$  为随机变量, 我们可以求出它们的概率密度函数。但由于脱空状态的概率密度是未知的, 因此用  $I_{qfj}$  和  $I_{pfj}$  的概率密度函数来直接计算脱空概率是困难的。但若能求出  $I_{qfj}$  和  $I_{pfj}$  的隶属函数, 则根据模糊控制理论, 可以把它们作为状态参数来识别刚性路面地基的脱空<sup>[5]</sup>。

## 2 模糊控制理论的应用

### 2.1 隶属函数的计算方法

若  $I_{qfj}$  和  $I_{pfj}$  的概率密度函数属于正态分布, 则它们可由下面的公式转化为期望分布函数<sup>[5]</sup>。

$$\mu(x_j) = \sum_{i=1}^N \min(\lambda_i, \lambda_s) \quad (i=1, 2, \dots, N) \quad (8)$$

$$\text{其中, } \lambda_i = \int_{x_{i-1}}^{x_i} \frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{(X-X_m)^2}{2\sigma^2}\right] dx$$

$$\lambda_s = \int_{x_{s-1}}^{x_s} \frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{(X-X_m)^2}{2\sigma^2}\right] dx$$

$X$  为  $I_{qfj}$  和  $I_{pfj}$ ,  $X_m$  为平均值,  $\sigma$  为标准偏差。  $X_0 = -\infty, X_1 = -3\sigma, X_2 = -3 + 6\sigma/(N-2), \dots, X_{N-1} = 3\sigma, X_N = +\infty$ 。最终隶属函数可根据经验及实际情况做适当调整而得到。下面将给出一个求隶属函数的实例。

### 2.2 实例

图 2 和图 3 所示为利用声振法所测得的刚性路面的声音信号及相应的功率谱波形。图 4 为相应的隶属函数。

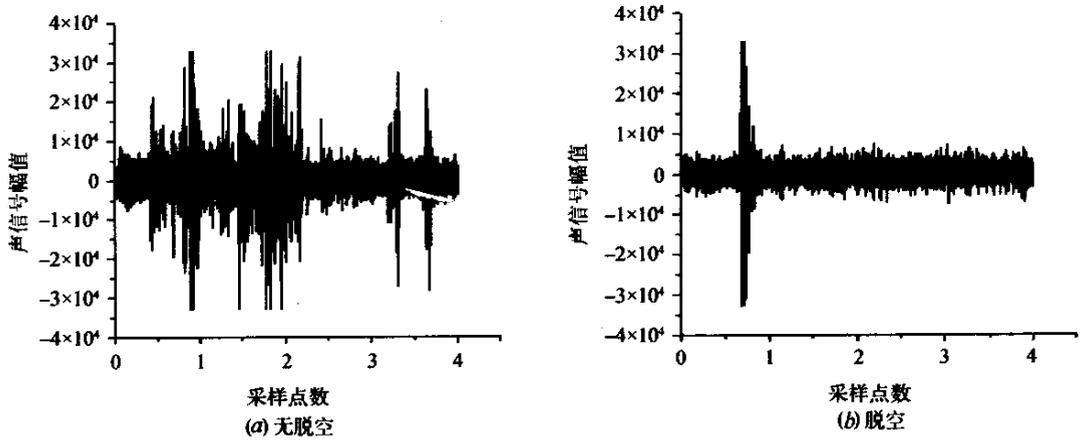


图 2 刚性路面声音信号波形图(示意)

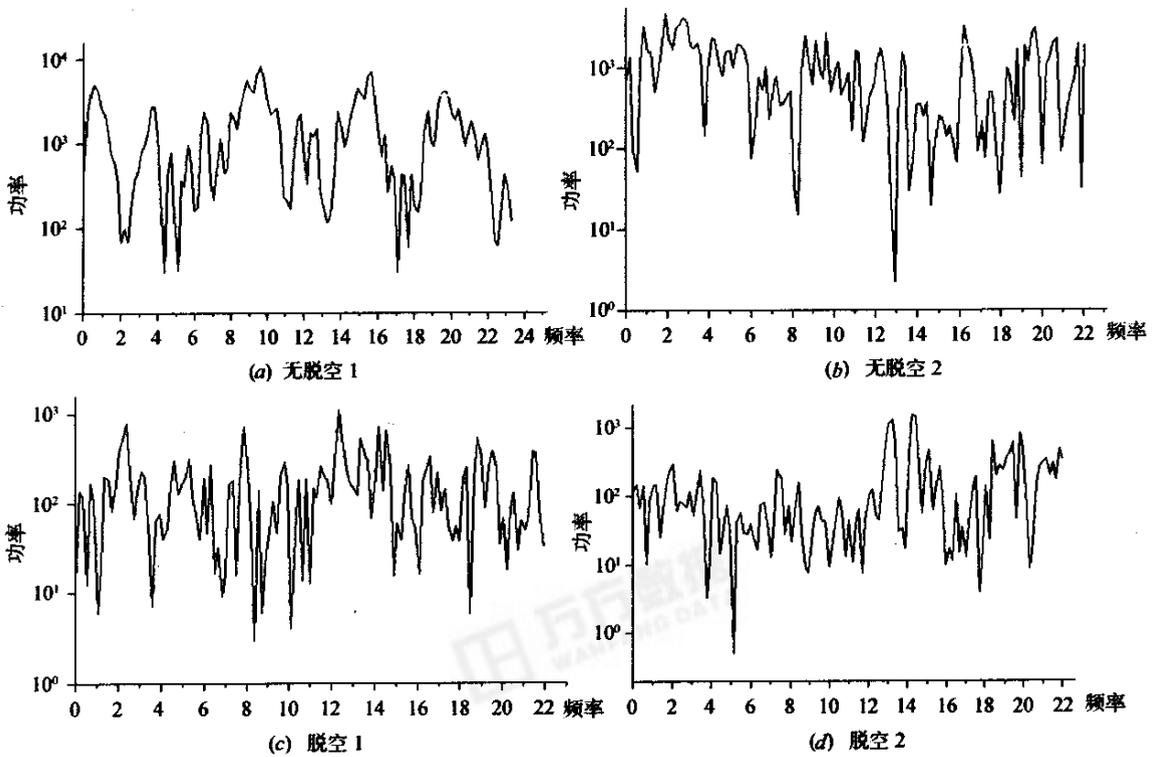
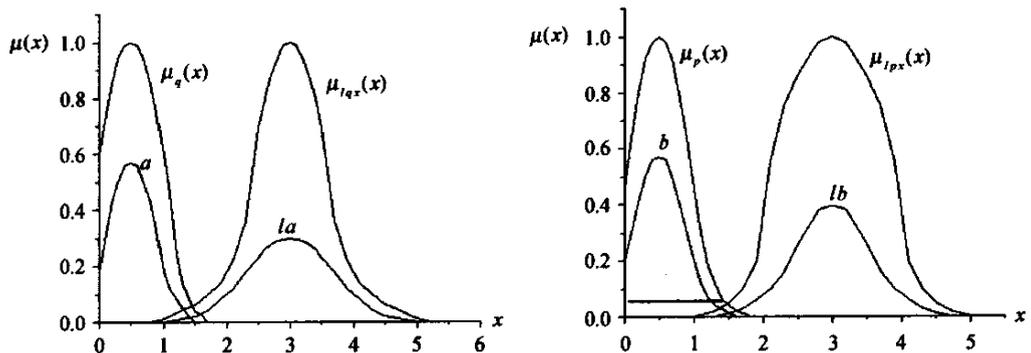


图 3 刚性路面声音信号的功率谱波形(示意)



万方数据

图 4 隶属函数(示意)

$\mu_q(x)$ 和曲线  $a$  分别为刚性路面在无脱空状态下的期望分布函数和概率密度函数;  $\mu_{lqx}(x)$ 和  $la$  分别为刚性路面在脱空时的期望分布函数和概率密度函数。同理,  $\mu_p(x)$ 和曲线  $b$  分别为刚性路面在无脱空状态下的期望分布函数和概率密度函数;  $\mu_{lp_x}(x)$ 和  $lb$  分别为刚性路面脱空状态下的期望分布函数和概率密度函数。事实上,  $\mu_{p_x}(x)$ 和  $\mu_{q_x}(x)$ 就可作为刚性路面脱空状态下的隶属函数。

隶属函数在正常状态下的集合为:

$$W = \{\mu_q(x), \mu_p(x)\}$$

隶属函数在未知状态下的集合为:

$$W_x = \{\mu_{q_x}(x), \mu_{p_x}(x)\}$$

$W$ 和  $W_x$ 之间的相似度定义为<sup>[6,7]</sup>:

$$S_x = \min[\mu_q(x) \wedge \mu_{q_x}(x), \mu_p(x) \wedge \mu_{p_x}(x)] \quad (9)$$

若  $S_x$  小于 0.7, 则可判定刚性路面存在脱空状态。例如在图 4 中, 正常状态与脱空状态的相似度为:

$$S_x = \min[0.05, 0.08] \text{ 远远小于 } 0.7$$

同理, 应用上述方法也可以识别出刚性路面的其他缺陷, 如刚性路面内部存在空洞、裂缝等缺陷, 综上所述, 根据模糊控制理论并应用 FFT 进行音谱分析, 便可实现刚性路面的脱空等的缺陷识别。

### 3 结语

通过检测声音信号可以实现刚性路面脱空识别, 关键是要求出所谓的隶属函数。

经过现场测试及应用证明, 利用模糊控制理论及音谱分析技术进行刚性路面脱空识别是一种非常有效的方法, 它为实现刚性路面现场无损检测及维护提供了一条有效的途径。

### 参考文献:

- [1] 李家伟, 陈积懋. 无损检测手册[M]. 北京: 机械工业出版社, 2002.
- [2] 王陶. 基于遗传算法的刚性路面脱空判定[J]. 中国公路学报, 2003, (3).
- [3] 章卫国, 杨向忠. 模糊控制理论与应用[M]. 西安: 西北工业大学出版社, 1999.
- [4] 薛年喜. MATLAB在数字信号处理中的应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 2003.
- [5] 水本雅晴, 著. 刘凤璞, 译. 模糊数学及其应用[M]. 北京: 科学出版社, 1999.
- [6] Tokutaro Suzuki. Maintenance and Total Production Maintenance in Japan [J]. Journal of The Japan Society for Precision Engineering, 1991.
- [7] Tatu Miyazawa Intelligence Technology of Ro-bot Science of Machine of Japan, 1992.

## Application of Fuzzy Control Theory and Acoustic Charts Analysis Technology to Detachment Identification of Rigid Pavement

PENG Yong-heng<sup>1,2</sup>, WANG Zhi-dan<sup>3</sup>, ANG Xue-ye<sup>1</sup>, ZHANG Xiao-ning<sup>4</sup>

(1. Department of Civil Engineering & Architecture, Dalian Nationalities University, Dalian 116600, China; 2. Communication College Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China; 3. Equipment Department Dalian Nationalities University, Dalian 116600, China; 4. Communication College Huanan University of Technology, Guangzhou 510641, China)

**Abstract:** A method is introduced that applies fuzzy control theory and acoustic charts analysis technology to detachment identification of rigid pavements. Through detecting and analyzing the acoustic signal with the method of acoustics and vibration, groundwork contact status under rigid pavements is exactly identified.

**Key words:** fuzzy control; audio-frequency; rigid pavement; detachment identification