

文章编号:1006-1355(2017)03-0112-05

## 偏相干分析在客车降噪中的应用

王茜影<sup>1</sup>, 谢小平<sup>1,2</sup>, 李 阳<sup>1</sup>, 杨 悦<sup>3</sup>, 王晨辉<sup>1</sup>

(1. 湖南大学 汽车车身先进设计制造国家重点实验室, 长沙 410082;  
2. 常州湖南大学 机械装备研究院, 江苏 常州 213000;  
3. 西安西沃客车有限公司, 西安 710089)

**摘 要:** 车内低频噪声一直是汽车NVH研究关注的重点问题, 常需要找到对噪声影响较大的振动结构进行改进, 但是振动对场点的贡献并不能代表对整个声场噪声的贡献量。针对多峰值多场点的车内声场问题, 引入“总相干系数”和“相干系数和”的概念对现有的偏相干分析方法进行改进。对某型客车的车内噪声进行小波包分解, 得到车内声场的声学特性, 确定研究的频率范围。通过对各板件振动与车内测点噪声信号进行偏相干分析, 确定对车内声场影响较大的结构, 并在实车上实施了改进措施。结果表明, 车内噪声测点声压级降低0.5 dB~2 dB, 为有效降低客车车内噪声提供了指导方向。

**关键词:** 声学; 总相干系数; 偏相干分析; 低频噪声; 小波包分解

中图分类号: TB535

文献标识码: A

DOI编码: 10.3969/j.issn.1006-1355.2017.03.022

## Application of Partial Coherence Analysis in Interior Noise Reduction of Passenger Cars

WANG Xi-ying<sup>1</sup>, XIE Xiao-ping<sup>1,2</sup>, LI Yang<sup>1</sup>,  
YANG Yue<sup>3</sup>, WANG Chen-hui<sup>1</sup>

(1. The State Key Laboratory of Advanced Design and Manufacturing for Vehicle Body,  
Hunan University, Changsha 410082, China;  
2. CZ-HNU Institute of Machinery Equipment, Changzhou 213000, Jiangsu China;  
3. Xian Silver Bus Co. Ltd., Xi'an 710089, China)

**Abstract :** Interior low-frequency noise has been the focus of automotive NVH research. It is necessary to detect and improve the vibrating structures that have great impact on the interior noise. However, contribution of vibration to the noise of field points is unlikely to completely represent the contribution to the whole interior acoustic field. For the interior acoustic field with multiple frequency peaks and multiple field points, the “total coherence coefficient” and “coherence coefficient sum” are introduced as two new parameters to improve the existing partial coherence analysis method. Then, the interior noise of a passenger car is analyzed by wavelet packet decomposition. The acoustic characteristics of the interior acoustic field and the concerned frequency range are obtained. Through the partial coherence analysis of the vibration of panels and interior noise signals at the measurement points, the structures which have greater impact on the interior noise are identified. And the improvement measures are carried out for the car. The results of the test show that the sound pressure level of the interior noise of the field points is reduced by 0.5 dB-2 dB. This work provides the guidance for reducing the interior noise of passenger cars.

**Key words :** acoustics; total coherence coefficient; partial coherence analysis; low-frequency noise; wavelet packet decomposition

收稿日期: 2017-01-09

基金项目: 国家自然科学基金重点项目资助(11232004);  
中国新能源汽车产品检测工况研究和开发项目-长沙资助项目

作者简介: 王茜影(1991—), 女, 河南省新乡市人, 硕士生, 主要研究方向为汽车噪声与振动控制。

E-mail: 980193761@qq.com

通信作者: 谢小平, 男, 博士, 工程师。

E-mail: xxp7828@163.com

车内噪声是影响汽车乘坐舒适性的主要因素之一, 客车作为人们出行重要的公共交通工具, 其噪声问题也得到越来越多的关注。车内低频噪声大多与车身结构振动相关, 由于白车身多由钣金件组成, 在激励源作用下这些板件产生振动就会向车内辐射噪声<sup>[1]</sup>。为减小这部分结构噪声, 需要找到对车内噪声贡献量较大的板件, 对其振动进行控制。

对于低频结构噪声,常采用板件声学贡献量分析的方法确定贡献量较大板件,通过控制局部振动降低噪声<sup>[2-5]</sup>。低频噪声与结构振动相关,也可通过振动和噪声信号的相干分析确定贡献量较大的结构,由于板件振动并不完全独立,需采用偏相干分析的方法。目前偏相干分析的方法可以计算出两个信号在单一频率处的相干系数<sup>[6-9]</sup>,对于多峰值多场点声场来说,简单的偏相干分析并不能衡量各振动对车内整体声学特性的贡献量,因此提出“总相干系数”与“相干系数和”的概念来评价振动对多峰值场点及整个声场的影响程度。

针对某型客车车内的噪声问题首先进行了小波包分解,得到车内声场的声学特性。由小波包系数节点能量得到声压信号特征向量<sup>[10-11]</sup>,通过计算各场点与声源信号之间特征向量的相关系数,确定车内噪声与结构振动相关。在此基础上,选取多个场点代表车内整体声场特征,通过计算各场点声压信号与各车身板件振动信号的偏相干系数确定了贡献量较大的板件。之后在这些板件上粘贴阻尼材料,通过实车噪声测试验证改进措施的降噪效果。

## 1 数据分析理论

### 1.1 小波包分解

对于噪声问题,一般会对声压信号进行频谱分析,提取噪声的声学特性,但是频谱分析只能体现噪声的频域特性,小波分解却可以同时反映信号的频域和时域特性,而小波包分解可同时分解低频和高频部分,通过分解得到噪声信号特征向量,比频谱分析得到更细致的信号特征。

对信号进行 $n$ 层小波包分解, $S_{xy}$ 表示第 $x$ 层第 $y$ 个节点的特征信号, $x=0,1,2\cdots n$ , $y=0,1,2\cdots 2^n-1$ ,其对应频带的特征能量为 $E_{x,y}$

$$E_{x,y} = \int |S_{xy}(t)|^2 dt \quad (1)$$

以信号各频带能量为元素可以构造一个特征向量 $T=[E_{n,0}, E_{n,1}, \cdots E_{n,2^n-1}]$ ,为方便分析,对特征向量进行归一化处理,令

$$E = \left[ \sum_{j=0}^{2^n-1} |E_{n,j}|^2 \right]^{-\frac{1}{2}} \quad (2)$$

则 $T=[E_{n,0}/E, E_{n,1}/E, \cdots E_{n,2^n-1}/E]$ 可以作为表征信号的特征向量,并可以用于计算特征向量之间的相关系数。

### 1.2 偏相干分析理论

相干分析常用来分析振动或噪声信号的频率特征以及峰值特征与一个或多个振动源或噪声源信号的相关程度,从而找到振动或噪声问题的根源。常

用的相干分析有常相干、重相干和偏相干分析,常相干函数常用于分析单输入单输出系统的相干性,重相干分析用于多输入单输出系统的相干性且各输入之间不相关,而偏相干分析能够提取出各输入之间相关的部分,因而常用于分析多输入多输出系统的输入与输出信号的相干性。

#### 1.2.1 基本相干理论

以两输入两输出系统为例,如图1, $X_1$ 、 $X_2$ 为输入, $Y_1$ 、 $Y_2$ 为输出, $X_{1\cdot 2}$ 、 $X_{2\cdot 1}$ 分别为剔除 $X_2$ 、 $X_1$ 影响后的输入, $X_{2\cdot 1}$ 、 $X_{1\cdot 2}$ 分别为其他输入对 $X_1$ 、 $X_2$ 的作用, $Y_{1\cdot 2}$ 、 $Y_{2\cdot 1}$ 分别为 $X_1$ 、 $X_2$ 剔除其他输入的影响对应的输出, $N$ 为输出 $Y$ 的测量干扰。

如果在图1中只考虑所求输入本身而忽略其他输入对其影响,则系统简化为单输入单输出等效系统如图2。

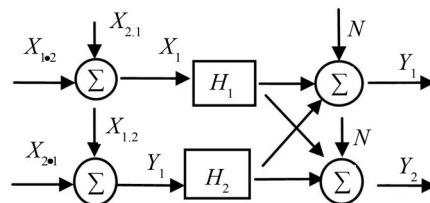


图1 两输入两输出系统

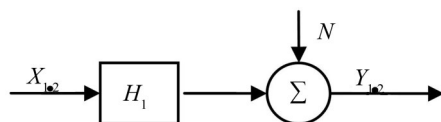


图2 仅保留与 $X_2$ 不相干信号后的等效系统

$$X_{1\cdot 2} = X_1 - \frac{G_{21}}{G_{22}} X_2 \quad (3)$$

$$Y_{1\cdot 2} = Y_1 - \frac{G_{2(y1)}}{G_{22}} X_2 \quad (4)$$

$$G_{11\cdot 2} = G_{11} - \frac{G_{21}G_{21}}{G_{22}} \quad (5)$$

$$G_{1(y1)(y1)\cdot 2} = G_{(y1)(y1)} - \frac{G_{2(y1)}G_{2(y1)}}{G_{22}} \quad (6)$$

$$G_{1(y1)\cdot 2} = G_{1(y1)} - \frac{G_{2(y1)}G_{21}}{G_{22}} \quad (7)$$

式中 $G_{11\cdot 2}$ 、 $G_{1(y1)(y1)\cdot 2}$ 、 $G_{1(y1)\cdot 2}$ 为 $X_{1\cdot 2}$ 、 $Y_{1\cdot 2}$ 的自功率谱密度和互功率谱密度, $G_{11}$ 、 $G_{22}$ 、 $G_{21}$ 、 $G_{(y1)(y1)}$ 、 $G_{1(y1)}$ 、 $G_{2(y1)}$ 分别为 $X_1$ 、 $X_2$ 、 $Y_1$ 的自功率谱密度和互功率谱密度。

根据常相干函数定义,由以上公式可得 $X_{1\cdot 2}$ 、 $Y_{1\cdot 2}$ 的相干函数为

$$\gamma_{1(y1)\cdot 2}^2 = \frac{|G_{1(y1)\cdot 2}|^2}{G_{11\cdot 2}G_{1(y1)\cdot 2}} \quad (8)$$

式中 $\gamma_{1(y1)\cdot 2}^2$ 称为输入 $X_1$ 和输出 $Y_1$ 的偏相干函数,其

值表示  $X_i$  对  $Y_l$  的贡献量。对于多输入多输出系统来说,偏相干函数的计算与此类似。

### 1.2.2 总相干系数

现有的偏相干分析方法只是计算出在主要峰值频率处输入与输出的相干系数,但是对于车内噪声测试信号来说,一般会存在有多个较大的峰值频率,同时声场内也会有多个场点,同一输入在不用峰值频率处跟输出的相干系数不同,而且在同一峰值频率处,输入信号与不同的输出信号的相干系数也不相同,这就给噪声分析带来了困难。所以对于多场点多峰值系统来说,引入总相干系数与相干系数的概念。

相干系数和  $P_j$  定义为某输入  $X_i$  对输出  $Y_j$  在  $n$  个主要峰值频率处相干系数的加权系数和,衡量输入在宽频带范围内对场点的影响。

$$P_j = \sum_{k=1}^n \lambda_k P_{jk} \quad (9)$$

式中  $P_{jk}$  为输入  $X_i$  在输出  $Y_j$  第  $k$  个峰值频率下对输出  $Y_j$  的相干系数,  $\lambda_k$  为第  $k$  个峰值的加权系数,  $n$  为主要峰值频率个数。

客车车内空间较大,不同位置的声学特性有较大的不同,评价车内声学特征时,需要多个场点共同参与。为衡量某输入对整个车内声场的影响程度,引入新概念“总相干系数”,总相干系数  $P_{\text{total}}$  定义为某输入对  $l$  个输出即场点声压信号的相干系数和的线型叠加,以各场点的重要性作为加权系数,则总相干系数定义为

$$P_{\text{total}} = \sum_{j=1}^l \omega_j P_j \quad (10)$$

式中  $l$  为输出的个数,  $\omega_j$  为输出  $Y_j$  对应的加权系数,  $P_j$  为输入在全频段内对输出  $Y_j$  的相干系数和,由此  $P_{\text{total}}$  就可以用来表征输入对整个声场的影响。

## 2 客车车内噪声分析

### 2.1 客车噪声试验及分析

针对某型客车行驶过程中的噪声问题进行道路噪声测试。根据国标《声学—汽车车内噪声测量方法》,在驾驶员右耳、乘客区1,3,7排乘客右耳共布置4个传感器,在匀速4挡50 km/h行驶工况下采集信号,采样频率为50 kHz,对信号的初步频谱分析结果显示信号较集中的频率范围在2 000 Hz以下,为更明确地找到问题产生的原因,对原噪声信号进行降采样处理,信号降采样的采样率为4 k,用db4小波基函数进行四层小波包分解,0~2 000 Hz被分为16个频段,得到各个频段所占总能量的百分比。为消除偶然因素对分析结果的影响,每1秒数据为一组,共6秒数据,求得6组数据并取平均数,计算结果如图3所示。

从图中可得,信号能量主要集中在前四个频段0~500 Hz,更多集中在前两个频段250 Hz以下范围。低频噪声信号大多数情况下是由结构振动引起,主要是车内钣金件振动引起的。

为确定车内噪声的产生原因,对车内测点噪声信号和车外噪声源信号进行了相关分析。根据小波分解后的小波系数得到各节点能量,由归一化的能量值组成信号的特征向量,计算车内测点与车外声源特征向量的相关系数,计算结果如表1所示。

从表中可以知道,各测点与声源特征向量的相

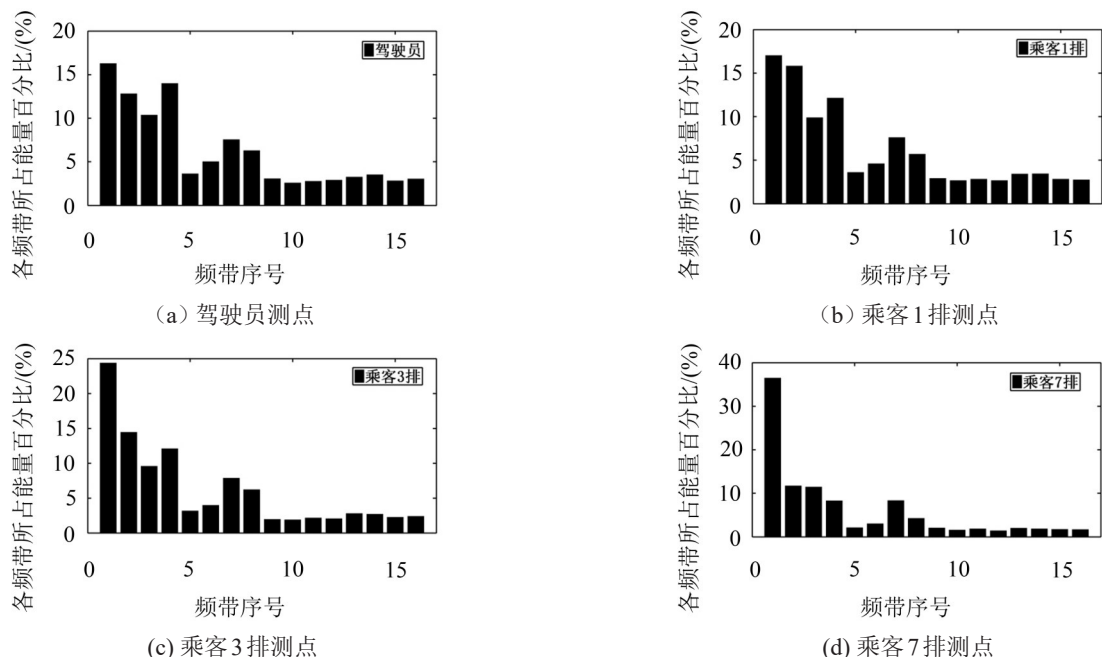


图3 各测点能量分布

表1 各声源与场点声压信号相干系数

声源	驾驶员	乘客前	乘客中	乘客后
进气口	0.01	-0.04	-0.05	-0.03
发动机	0.47	0.46	0.51	0.43
主减速器	0.01	-0.04	-0.05	-0.03
排气口	0.46	0.44	0.59	0.50

关系数大多数都小于0.5,说明车内噪声很大程度上是与结构振动相关的。对于车内结构噪声而言,一般是车身钣金件在激励源的作用下振动,进而向车内辐射的噪声。为降低车室内的噪声水平,就要找到对车内噪声影响最大的板件,通过减小振动来降低噪声。

## 2.2 振动与噪声偏相干分析

通过测点噪声与板件振动信号的相干分析可以找到与车内噪声相关性较大的板件。由于板件之间的振动并不是完全相互独立的,因此采用偏相干分析方法对板件振动与车内测点噪声进行分析。

振动与噪声同时采集数据,由于客车车身较长,振动测点分布在左侧围前后,右侧围前中后和顶棚前中后,车内噪声测点为驾驶员,乘客1、3、7排乘客右耳位置,图4、5分别为车外振动和车内噪声测点布置示意图。采样频率为5 kHz,采集数据后,对各个振动测点信号和噪声测点信号做偏相干分析。



图4 车外振动测点



图5 车内噪声测点

以驾驶员位置为例,噪声信号频谱图如图6所示,因为信号集中在低频段,所以确定分析频率为500 Hz以下。首先对噪声信号进行频谱分析,找到幅值较大的峰值频率,之后根据公式(8)计算在这些峰值频率下各振动信号与噪声信号的偏相干系数,由公式(9)计算各板件振动对驾驶员声压的相干系数和。

从表3可知,对车内声场影响较大的振动板件

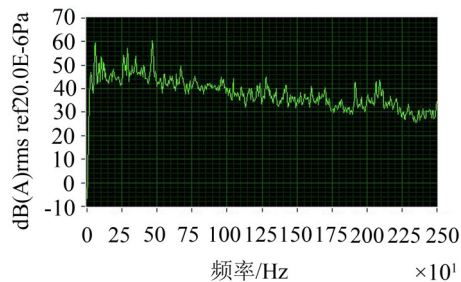


图6 驾驶员测点声压频谱图

有右侧围前,右侧围后、顶棚中和顶棚后,如果能采

从频谱图中可以看出较大的声压峰值主要集中在500 Hz以下,取幅值超过50 dB的峰值频率作为主要研究频段,驾驶员位置主要有58 Hz、85 Hz、103 Hz、118 Hz、260 Hz、290 Hz、350 Hz、465 Hz等8个频率点,取各峰值频率加权系数为1,根据公式9计算出各个振动测点对驾驶员位置的相干系数和。同样的方法,可得到各振动与其他噪声测点的相干系数和,如下表2所示。

表2 各输入对输出的相干系数和

$P_j$	驾驶员	乘客1排	乘客3排	乘客7排
右侧围前	1.86	1.06	1.24	1.05
右侧围中	0.82	0.91	0.94	0.79
右侧围后	0.74	1.71	0.70	1.19
左侧围前	0.90	1.04	0.49	0.52
左侧围后	0.65	0.41	0.34	0.38
顶棚前	0.48	0.73	0.37	0.42
顶棚中	1.87	1.47	1.66	1.04
顶棚后	1.07	1.72	1.15	0.85

根据表2得到各振动测点对各声压测点的相干系数和之后,由公式10可算出各振动对车内声场的总相干系数。

表3 各输入对输出的总相干系数

振动测点	$P_{total}$
右侧围前	6.18
右侧围中	4.88
右侧围后	5.45
左侧围前	3.62
左侧围后	2.31
顶棚前	2.30
顶棚中	7.53
顶棚后	5.94

采取措施降低这些板件的振动,车内测点的声压会得到有效的抑制。

## 3 试验验证

通过以上的分析,确定了对车内声场影响较大



的板件。由于车身多为钣金件,目前用得较多的方法有改进局部结构和粘贴阻尼材料,但是结构改进在白车身模型已经确定的情况下较难操作,而阻尼材料的使用在改善局部的振动情况下又不会影响车身整体的动静态特性,使得改进方便可行。因此在实车上实施降噪措施,在右侧围前、后,顶棚中和顶棚后等部位粘贴阻尼材料,图7显示了顶棚、侧围阻尼材料的布置情况。

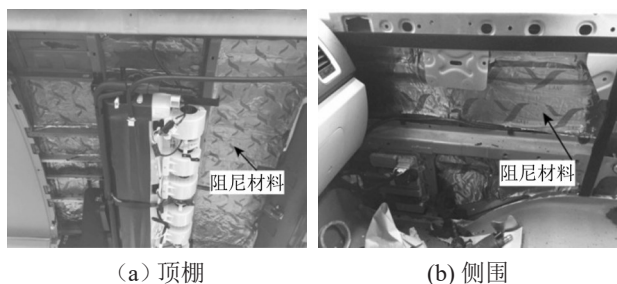


图7 顶棚和侧围阻尼材料布置

为验证改进效果进行了道路噪声测试,结果显示改进后驾驶员测点声压级由72.1 dB降到70.6 dB,乘客1排测点声压级由71.2 dB降到70.2 dB,乘客3排测点声压级由67.2 dB降到66.7 dB,乘客7排测点声压级由70.1 dB降到68.1 dB,车内测点声压级均下降0.5 dB~2 dB,降噪效果明显。

## 4 结语

(1) 对各声压信号小波包分解得到各频段的能量特征,确定了噪声研究的范围,以各频带能量为元素构造声压信号特征向量,通过计算向量间相关系数确定了车内噪声的特性即结构噪声占主导,为之后的分析提供了依据。

(2) 针对多输入多输出系统,提出“总相干系

数”与“相干系数和”的概念来衡量板件振动对车内声场特性的影响,确定了对车内声场影响较大的结构,并在实车上进行了验证,改进后车内噪声得到明显改善。

### 参考文献:

- [1] 庞剑, 湛刚, 何华. 汽车噪声与振动: 理论与应用[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2006: 310-320.
- [2] 惠巍, 刘更, 吴立言. 车内噪声预测与面板声学贡献度分析[J]. **噪声与振动控制**, 2006, 26(5): 62-66.
- [3] 韩旭, 余海东, 郭永进, 等. 基于壁板声学贡献分析的轿车乘员室声场降噪研究[J]. **上海交通大学学报**, 2008, 42(8): 1254-1258.
- [4] 白松, 徐新喜, 刘孝辉, 等. 车辆壁板声学贡献分析与降噪试验研究[J]. **振动与冲击**, 2013, 32(24): 204-208.
- [5] 张一麟, 廖毅, 莫品西, 等. 基于车身模态和板块贡献分析的阻尼优化降噪方法研究[J]. **振动与冲击**, 2015, 34(4): 153-157.
- [6] 赵海澜, 汪鸿振. 偏相干分析识别噪声源的计算[J]. **噪声与振动控制**, 2005, 25(5): 31-33.
- [7] 吴旭东, 左曙光, 芦勇, 等. 偏相干分析在燃料电池轿车噪声源识别中的应用[J]. **噪声与振动控制**, 2008, 28(3): 81-84.
- [8] FAN R, SU Z, MENG G, et al. Application of sound intensity and partial coherence to identify interior noise sources on the high speed train[J]. **Mechanical Systems & Signal Processing**, 2014, 46(2): 481-493.
- [9] 王建锋, 张维峰, 李平. 基于偏相干分析的大型客车振动源识别试验研究[J]. **汽车技术**, 2014(2): 36-39.
- [10] 王梦璇. 基于小波包分解的舰船辐射噪声特征提取方法研究[J]. **电子设计工程**, 2014, 22(4): 81-83.
- [11] 杨正理. 采用小波能量的光纤周界报警信号辨识[J]. **压电与声光**, 2014, 36(6): 883-887.

(上接第87页)

- [5] 续秀忠, 华宏星, 陈兆能. 基于环境激励的模态参数辨识方法综述[J]. **振动与冲击**, 2002, 21(3): 1-5.
- [6] PERRY M J, KOH C G, CHOO Y S. Modified genetic algorithm strategy for structural identification[J]. **Computers & Structures**, 2006, 84(8-9): 529-540.
- [7] KOH C G, HONG B, LIAW C Y. Substructural system identification by genetic algorithms[C]. 3rd US Japan Workshop on Nonlinear System Identification and Structural Health Monitoring, Los Angeles (CA), 2000.
- [8] TANG H, XUE S. Differential evolution strategy for structural system identification[J]. **Computer and Structures**, 2008, 86(21-22): 2004-2012.
- [9] COELHO L. S. KROHLING, R. A. Nonlinear system identification based on B-spline neural network and modified particle swarm optimization[C]. Vancouver,

Canada, Proc. IEEE World Conference on Computational Intelligence (WCCI), 2006.

- [10] 榎本裕里, 杨晓楠. 粒子群优化算法在结构参数识别中的应用[J]. **结构工程师**, 2010, 26(3): 78-81.
- [11] 张伟. 基于粒子群优化算法的结构参数及损伤识别[D]. 上海: 同济大学, 2008.
- [12] SUN J, FENG B, XU W B. Particle Swarm Optimization with Particle Having Quantum Behavior[C]. 2004 IEEE Congress on Evolutionary Computation, Portland, OR, US: IEEE Press, 2004: 325-331.
- [13] 孙俊. 量子行为粒子群优化算法研究[D]. 无锡: 江南大学, 2009.
- [14] 常军, 巩文龙. 量子粒子群结合小波变换识别结构模态参数[J]. **振动与冲击**, 2014, 33(23): 42-46.