

# 汽车发动机启动声品质评价与分析

徐中明<sup>1,2</sup>, 夏小均<sup>2</sup>, 贺岩松<sup>2</sup>, 张志飞<sup>2</sup>

(1. 重庆大学 机械传动国家重点实验室, 重庆 400030; 2. 重庆大学 机械工程学院, 重庆 400030)

**摘要:** 以驾驶员耳处采集的乘用车发动机启动时声样本为对象, 分析了其时频域分布, 计算了声样本的基本物理参数、心理声学参数和烦恼度指标。运用成对比较法进行了声样本主观评价实验, 得出各声样本主观偏好性得分。通过主、客观参数的相关分析和回归分析表明: 烦恼度模型能正确预测声样本的主观偏好性, 双耳响度和粗糙度是影响主观偏好性评价的主要客观参量, 用对数变换后的拟合模型能更好的描述主观评价结果与客观参量之间的关系。

**关键词:** 发动机启动; 声品质; 主观评价; 成对比较

中图分类号: U461.4

文献标志码: A

DOI: 10.13465/j.cnki.jvs.2014.11.025

## Analysis and evaluation of car engine starting sound quality

XU Zhong-ming<sup>1,2</sup>, XIA Xiao-jun<sup>2</sup>, HE Yan-song<sup>2</sup>, ZHANG Zhi-fei<sup>2</sup>

(1. State Key Laboratory of Mechanical Transmission, Chongqing University, Chongqing 400030, China;

2. College of Mechanical Engineering, Chongqing University, Chongqing 400030, China)

**Abstract:** The acoustic samples of a passenger car collected at the position of the driver's ear during its engine starting were taken as an object to analyze their time-frequency distributions, and to calculate their physical parameters and psychoacoustic parameters. Their subjective evaluation tests were performed via the paired comparison method. The subjective preference scores of the samples were obtained. The results of the linear correlation analysis between subjective and objective parameters and multi-dimensional regression analysis showed that the psychoacoustic annoyance (PA) model can be used to predict the subjective preference of the acoustic samples correctly; and the loudness of two-ear and roughness strength are the dominant objective parameters influencing the subjective preference evaluation of the interior sound of the passenger car during its engine starting; the fitting model after logarithmic transformation can describe the relationship between subjective preference scores and objective parameters better.

**Key words:** automotive engine starting; sound quality; subjective and objective evaluation; paired comparison

随着人们对汽车噪声分析与控制领域研究深入, 声品质这一反映了人对特定环境下噪声的主观感觉的概念和相应的研究方法也被广泛的引入汽车工业。近年来, 学者以客观评价方法、主观评价方法或是主客观结合的评价方法对很多工况下的车内噪声进行了研究。赵彤航等<sup>[1]</sup>采用成对比较法对轿车在匀速行驶时的车内噪声品质进行了偏好性的评价。Lee等<sup>[2-3]</sup>对乘用车加速时的声品质进行客观评价得出车内轰隆声与噪声的响度、尖锐度和粗糙度直接相关。而对汽车关门声的研究更是深入和广泛<sup>[4-6]</sup>。对于汽车发动机启动时车内噪声却少有研究, 但其很大程度上决定了驾乘人员对汽车品质的第一印象, 也成为汽车商品性

因素之一, 影响着消费者的购买意图。只有 Ford 汽车公司在 90 年代对豪华车型的启动时车内噪声进行了主观评价与分析, 得出启动时间和响度是影响豪华车启动时车内噪声主观偏好性的主要因素<sup>[7]</sup>, 但该研究没有涉及中低档轿车, 更是缺少主、客观参数的分析。而汽车发动机启动时的车内噪声不仅会对车内的声品质产生影响, 也在一定程度上反映了汽车性能好坏。所以对汽车发动机启动时的车内噪声进行进一步的研究是必要的。

本文针对普通家用轿车, 采用主客观结合的分析方法, 完成了汽车发动机启动时车内噪声的客观参数的计算和分析, 并运用成对比较法进行主观评价实验。通过主客观参量的相关和回归分析, 获取影响主观偏好性的主要参量, 并以主要客观参量建立了汽车发动机启动时车内噪声的主客观评价模型。

# 1 汽车发动机启动时声样本获取

## 1.1 声信号采集

试验参照《GB/T18697 - 2002》中对车内噪声测量的方法,选取测试环境为开阔场地,与建筑物等大型物体之间的距离大于 20 m。汽车测试时除了驾驶员、测试人员和测试设备外,无其它载荷。天窗、所有车窗全部关闭,辅助装置停止动作。

试验过程中采用 B&K 公司的双耳麦克风 (Binaural Microphone Type 4101) 和 B&K 公司 6 通道采集器,设置其采样频率为 48 000 Hz。双耳麦克风由驾驶员挂置在其双耳处,以获得驾驶员处的声信号。由同一名技术熟练的驾驶员对汽车发动机进行启动。为了便于数据的截取和分析,每次操作重复 3 次,每次采集时间为 20 s。

## 1.2 声样本预处理

经过时域采集的声样本,导入 B&K 的数据处理程序。通过回放,找出发声效果最佳、记录最完整的样本,作为后续分析的样本,一共得到 10 个声样本。考虑到需完整记录汽车启动过程和人耳听觉形成过程,截取单事件的声样本长度为 2.5 s。

在进行主观评价时,响度是占据主要影响作用的量并掩盖了对其它特征的感知和评价,所以对响度的处理有助于发现其他特征对评价主体感受的影响。本文采用中等响度的方式,将双耳响度均等调节到 10 ± 1 sone。

# 2 客观参数计算及分析

心理声学参数是描述不同声音信号所造成主观感受差别程度的客观物理量,采用心理声学参数分析,可以定量地反映听觉感受的差别,消除个体的影响。而对不同的特征的声信号,其计算方法不一,所以对声信号进行前期分析就十分必要了。

## 2.1 声信号分析

采集到的某一声样本在时域内显示如图 1 所示。可以看出,汽车发动机启动时车内噪声幅值随着记录时间波动较大。

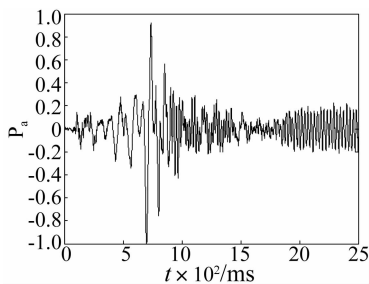


图 1 声样本时域图

Fig. 1 Time analysis of signal

利用短时傅立叶变换得声样本的能量时频分布如图 2 所示。可以看出,汽车发动机启动时的车内噪声都集中在低频段,能量分布较集中,随时间波动大,为非稳态类信号。

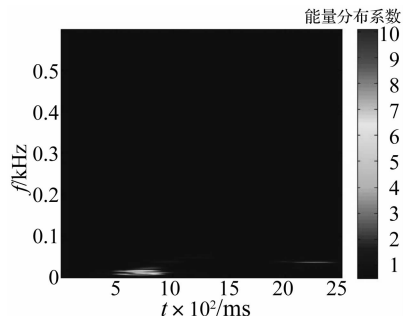


图 2 声样本时频分布

Fig. 2 The time-frequency distribution of signal

## 2.2 客观参量计算

根据前述分析的结果,选用非稳态状况下声信号参数计算方法对汽车发动机启动时车内噪声的客观参数进行计算<sup>[8]</sup>。本文对声样本的线性声压级、A 计权声压级、双耳响度、粗糙度、尖锐度、抖动度等参数进行分析计算。为了以客观参量对汽车发动机启动时车内噪声的主观偏好性进行初步分析和预测,引入烦恼度 (psychoacoustic annoyance PA)<sup>[9]</sup> 这一综合评价指标。其计算公式为

$$PA = N(1 + \sqrt{w_s^2 + w_{FR}^2})$$

$$w_s = 0.25(S - 1.75) \lg(N + 10) \quad S > 1.75$$

$$w_s = 0 \quad S \leq 1.75$$

$$w_{FR} = 2.18(0.4F + 0.6R)/N^{0.4} \quad (1)$$

式中,  $N$  表示响度、 $S$  表示尖锐度、 $R$  表示粗糙度、 $F$  表示抖动度。计算得到的烦恼度值越高,说明该声样本的偏好性越低。

计算出的参量,除双耳响度外,其它参数的结果采用左右耳测量值的算术平均值作为最终的双耳参数值。计算得到的各客观参量见表 1。

表 1 各声样本客观参量

Tab. 1 The objective parameters of samples

声样本	线性声压级/dB	A 计权声压级/dB(A)	双耳响度/sone	尖锐度/acum	粗糙度/asper	抖动度/vac	烦恼度 PA
1	76.4	54.9	13.3	1.315	2.175	3.11	39.550 5
2	76.3	54.7	13.2	1.375	2.605	2.715	40.357 1
3	83.8	55.9	12.1	1.185	2.015	2.425	33.302 4
4	78.4	49.6	10.8	1.38	2.21	2.415	31.631 7
5	76.95	49.9	8.37	1.305	2.465	1.89	25.802 9
6	76.4	50.55	8.63	1.225	2.205	1.895	25.162 4
7	77.6	59.05	14.4	1.355	2.63	2.655	42.915 3
8	73.3	56.9	13.2	1.355	2.515	2.91	40.603 1
9	73.8	46.85	7.55	1.61	2.185	2.095	23.306 5
10	74.75	47.95	8.25	1.59	2.305	2.35	26.213 0

计算得到的各声样本的烦恼度值对比如图3所示。对比表明1、2、7、8号声样本的烦恼度值最高。根据烦恼度模型的定义,这些声样本的主观偏好性应该最低,这将从后续主观评价实验的结果进行验证。

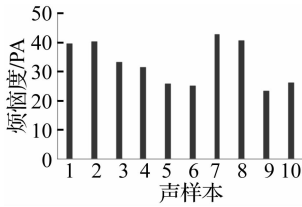


图3 各声样本烦恼度对比图  
Fig. 3 The comparison chart of psychoacoustic annoyance

### 2.3 客观参量间相关性分析

为了研究声样本客观参量间的相互关系,利用SPSS软件,对汽车发动机启动时车内噪声的以上客观参量进行Pearson相关分析。客观量相关分析结果如表2所示。

表2 客观参量相关分析表

Tab. 2 The correlation coefficient of objective parameters

	线性声压级	A计权声压级	双耳响度	尖锐度	粗糙度	抖动度	烦恼度
线性声压级	1						
A计权声压级	0.305	1					
双耳响度	0.247	0.934**	1				
尖锐度	-0.644*	-0.555	-0.416	1			
粗糙度	-0.419	0.398	0.384	0.112	1		
抖动度	-0.061	0.686*	0.848**	-0.061	0.229	1	
烦恼度	0.100	0.906**	0.986**	-0.310	0.498	0.876**	1

\*. 表示95%置信区间内显著相关

\*\* .表示99%置信区间内显著相关

从表2中可以看出,线性声压级与A计权声压级相关性不大,这是由于汽车发动机启动时车内噪声的成分主要集中在低频范围内导致。抖动度与A计权声压级、双耳响度及烦恼度都有着显著的相关性,再次说明了声信号的波动较大,是一个非稳态信号的特点。

### 2.4 主成分分析

由客观参数间的相关分析可以看出,许多变量之间直接的相关性比较强,证明他们存在信息上的重叠,因此需要进行降维处理,以得出各参量对样本信息的表现能力,本文则运用主成分分析法分析该类样本的主要影响参量。

主成分个数提取原则为主成分对应的特征值大于1的前m个主成分。则本次依据表3,提取前2个主成分进行分析。

表3 方差分解主成分提取分析表

Tab. 3 Total Variance Explained

主成分	最初特征值			提供特征值		
	总数	变异百分数/%	累积百分数/%	总数	变异百分数/%	累积百分数/%
1	4.004	57.204	57.204	4.004	57.204	57.204
2	1.867	26.672	83.876	1.867	26.672	83.876
3	.742	10.606	94.482			
4	.289	4.125	98.607			
5	.078	1.115	99.722			
6	.019	.278	100.000			
7	6.240E-06	8.914E-05	100.000			

表4 初始因子载荷矩阵

Tab. 4 Component Matrix

客观参量	主成分	
	1	2
线性声压级	0.235	-0.895
A计权声压级	0.959	-0.107
双耳响度	0.992	0.004
尖锐度	-0.467	0.737
粗糙度	0.430	0.643
抖动度	0.823	0.265
烦恼度	0.982	0.163

由表4可以看出,第一主成分主要反映了A计权声压级、双耳响度、抖动度和烦恼度这4个指标。第二主成分则主要反映了声压级、尖锐度和粗糙度3个指标。而由各指标反映的主成分的表达式为

$$A_i = \frac{C_i}{\sqrt{\lambda_i}}, F_i = A_i \times Z_x$$

$$F = \frac{\sum_{i=1}^n \lambda_i F_i}{\sum_{i=1}^n \lambda_i}$$

其中,  $A_i$  为各主成分的特征向量;  $C_i$  为各指标在对应主成分上的载荷矩阵;  $\lambda_i$  为各主成分对应的特征值;  $F_i$  为各主成分表达式;  $Z_x$  为指标标准化矩阵;  $F$  为主成分综合模型;  $i = 1, 2$ 。代入计算数据得到主成分综合模型为

$$F = -0.128Z_{dB} + 0.302Z_{dBA} + 0.339Z_L + 0.012Z_S + 0.296Z_R + 0.342Z_F + 0.373Z_A$$

其中,  $Z_{dB}$ 、 $Z_{dBA}$ 、 $Z_L$ 、 $Z_S$ 、 $Z_R$ 、 $Z_F$ 、 $Z_A$  分别对应线性声压级、A计权声压级、双耳响度、尖锐度、粗糙度、抖动度和烦恼度7个指标。

从主成分分析结果可以得出,线性声压级和尖锐度两个参量对主成分的贡献量最低。而其它的5个指标与主成分的对应系数差距较小,是声样本的主要影响参量。

### 3 起动声主观评价及分析

#### 3.1 主观评价实验设计

(1) 评价方法选择。本文选用成对比较法作为本次的主观评价方法。成对比较法 (Paired comparison methods) 又称 A/B 比较法, 它是将声音样本成对播放, 评价者据此做出相关评判。分组成对比较法的评判是相对的, 而不是绝对的, 评价者可以不用顾忌的做出评价, 因此很适合无经验者使用<sup>[10-11]</sup>。

(2) 评价主体选择。Hempel 和 Chouard 对选取 54 名主体的测试结果和选取 20 名主体的评价结果进行了分析, 两者得到的均值和标准偏差几乎一致, 对于大多数心理声学评价测试, 20 名主体就已经足够了<sup>[16]</sup>, 而对研究对象的了解更能准确地把握实验任务。本次实验选定了 21 位在读研究生作为评价主体, 平均年龄为 25 岁, 均无听力障碍。他们均有一定的噪声和振动方面的基础知识, 其中 1/2 的人员更是从事声学方面的研究。所有人员都进过听前培训, 了解本次实验的任务和目的。

(3) 评分方法的确定。对于非稳态声信号, 应该记录完整的单个事件通过重复播放, 来研究声信号间的细微差别<sup>[12]</sup>。因此本次对每声样本进行重复播放一次。为了减少听审时间, 提高实验效率, 只对 10 个声样本组成的半角矩阵进行评价。对于每次对比  $P(i, j)$ , 若评价主体感觉其中声样本  $i$  比声样本  $j$  好, 就对  $P(i, j)$  赋值 1; 若感觉  $j$  比  $i$  好听, 就记作 -1; 感觉二者相等就赋值 0。最后以评价人员对某一声样本给出的偏好性选择的次数, 作为该声样本的主观评价得分。

#### 3.2 实验数据有效性分析

在主观评价实验中, 由于听审环境的变化、评价者的心理波动及声样本的相似性干扰等原因, 都会对主观评价的结果造成影响而导致错误。所以, 在完成主观评价实验后, 以统计方法对评价的结果进行有效性的检验就十分必要。而对评价结果的检验主要是针对以下三个方面的错误进行:

(1) 相同声事件比较 ( $i-i$  比较) 错误。即同一评价者对两个相同的声样本进行评价, 却得出了不相同的结果。

(2) 不同回放顺序的比较 ( $ij-j_i$  比较) 错误。即听审人对以不同顺序播放两个不同声样本进行评价时, 却得出不一致的结果。

(3) 三角循环错误。对于 A、B、C 3 个声事件, 在用成对比较法进行评价时, 如果评价者得出的结果是 A 比 B 好, B 比 C 好, A 仍旧比 C 好, 则 A、B、C 之间是连贯的; 反之, 如果 A 比 B 好, B 比 C 好, 而 C 又比 A 好, 则 A、B、C 之间是不连贯的, 这在成对比较法中称

为三角循环错误。国内同济大学的毛东兴等人, 通过计算分析提出了较为精确的三角循环误差统计模型, 其计算公式如下

$$C = \frac{1}{C_{t-1}^3} \sum_{i \leq j, k \leq t} \delta_{ijk}$$

式中  $C_t^3 = \frac{t!}{(t-3)!3!}$ ,  $t$  为评价样本个数,  $\delta_{ijk}$  只能取 0 或者 1。当  $p(i, j) + p(j, k) = 0$ , 且  $p(i, j)$  或  $p(j, k)$  不为 0 时,  $\delta_{ijk} = 0$ ; 在其他情况下,  $\delta_{ijk} = \min(|\max(\min(p(i, j) + p(j, k), 1), -1) - p(i, k)|, 1)$ 。

完成数据的错误统计后, 以计权一致性系数来判断各评价结果的有效性。其计算公式为

$$\zeta = 1 - \frac{\sum C_i E_i}{\sum E_i}$$

式中  $E_i$  为第  $i$  中误判的可能产生的次数,  $C_i$  为第  $i$  类误判的误判率。则各评价者的一致性系数如表 5 所示。

表 5 评价者的计权一致性系数

Tab. 5 The weighted coefficient of consistency of evaluators

评价者序号	计权一致性 $\zeta$	评价者序号	计权一致性 $\zeta$
TP1	0.837	TP12	0.915
TP2	0.809	TP13	0.922
TP3	0.880	TP14	0.901
TP4	0.865	TP15	0.901
TP5	0.957	TP16	0.901
TP6	1	TP17	0.801
TP7	0.915	TP18	0.574
TP8	0.738	TP19	0.695
TP9	0.908	TP20	0.936
TP10	0.894	TP21	0.915
TP11	0.809		

根据国外的研究表明, 评价结果的计权一致性系数在 0.7 ~ 0.8 以上, 结果的可靠性才比较高, 而在所有的评价结果中约有 10% ~ 20% 的评价者的数据是不可信的<sup>[13]</sup>。因此, 为了分析的结果能更加准确反映真实情况, 依据本次实验的结果的一致性检验结果, 剔除 TP8、TP18、TP19 号的评价数据。

#### 3.3 主观评价结果分析

以经过有效性检验的数据为依据, 将所有评价者对某一声样本的偏好性选择的次数的平均值作为该声样本的得分。具体评价结果如表 6 所示

而各样车在发动机启动时车内噪声的主观偏好得分的柱状图如下所示。

表6 声样本主观评价得分

Tab. 6 The subjective preference scores of samples

样本	1	2	3	4	5
主观得分	2.77	1.72	5.11	4.5	5
样本	6	7	8	9	10
主观得分	4.77	1.77	2.55	7.77	4.72

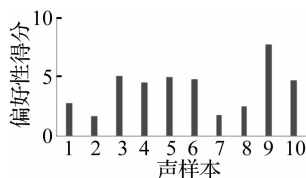


图4 声样本主观偏好性得分对比图

Fig. 4 The comparison chart of preference scores

主观评价实验的结果表明,1、2、7、8号声样本的主观得分是最低的,与烦恼度模型的预测分析结果一致。

## 4 评价结果分析

主观评价除了得出人们对参评声样本的喜好程度外,更是为了为声品质的改进提供指引和方向。而通过揭示主观评价结果与客观参量之间的一些内在联系,可以得出对主观评价起主要影响作用的客观量。通过对这些关键参数的偏好性的提升,最终促进产品的声音更加符合人们的主观喜好。

### 4.1 主客观相关性分析

在客观分析的基础上,运用 SPSS 软件对主要影响参量和主观评价结果进行 Pearson 相关分析结果如表 7。

表7 主观得分与客观参量相关分析

Tab. 7 The correlation analysis of preference scores and objective parameters

	A 计权声压级	双耳响度	粗糙度	抖动度	烦恼度
主观评价	-0.790**	-0.850**	-0.656*	-0.719*	-0.891**

\*. 表示 95% 置信区间内显著相关

\*\* . 表示 99% 置信区间内显著相关

由相关分析结果可以看出,主观评价结果与 A 计权声压级、双耳响度、粗糙度和尖锐度都存在较强相关,说明评价主体对汽车启动声的感受是受多因素影响的。

综合指标烦恼度与主观偏好性得分在 99% 置信区间 0.891 的显著负相关,说明了烦恼度越高而主观偏好性得分越低。通过烦恼度指标可以较好的反映声样本的主观偏好程度,能很好的对声样本的主观偏好性

进行预测。即在不进行主观评价实验时,运用烦恼度模型也能对该类声样本的主观偏好性进行简单预测。

### 4.2 主客观回归分析

回归分析是在相关关系的基础上对具有相关关系的两个或者多个变量之间进行一般关系预测的一种方法。通过回归分析,更能表现出各相关变量对主观评价的影响程度。

烦恼度是几类心理声学参数的综合,而回归分析是揭示主观评价与客观参量的数学关系,若选取其进行回归分析,则回归结果是烦恼度与主观评价的关系,包含了尖锐度这一非主要影响因素。所以,本次分析以主观评价得分为因变量,A 计权声压级、双耳响度、粗糙度、抖动度为自变量,采用逐步回归方法的进行。

表8 排除变量表

Tab. 8 Table of eliminating variable

	模型	Beta In	t	Sig.
1	A 计权声压级	-.058b	-.106	.919
	粗糙度	-.487b	-4.499	.003
	抖动度	.009b	.025	.981
2	A 计权声压级	.147c	.496	.638
	抖动度	-.104c	-.508	.629

a. 独立变量: 偏好性得分

b. 模型 1 中的预测变量: (常数), 双耳响度

c. 模型 2 中的预测变量: (常数), 双耳响度, 粗糙度

每一个自变量能否进入到回归方程都由 F 检验值决定,当 F 比小于 0.05 时,该变量就进入方程式。由排除变量表可知,只有双耳响度和粗糙度的 F 检验值小于 0.05,即双耳响度和粗糙度是描述主观偏好性的主要客观参量。

表 9 所示,分别为对原变量和经过对数变换后的变量进行回归分析结果。

表9 主观得分与客观参量回归分析结果

Tab. 9 T Multiple regression between subjective scores and objective parameters

变量	回归方程	R <sup>2</sup>
原变量	$Y_{\text{pref}} = -0.51X_L - 3.461X_R + 17.735$	0.850
经对数变换后的变量	$\lg Y_{\text{pref}} = -1.403\lg(X_L) - 2.725\lg(X_R) + 8.492$	0.927

表 9 中  $Y_{\text{pref}}$  为主观偏好性得分,  $X_L$ 、 $X_R$  分别对应响度和粗糙度。表中  $R^2$  是回归方程校正复相关系数,它是衡量方程拟合程度优劣的常用指标,  $R^2$  值越高,方程的拟合程度就越高<sup>[14]</sup>。由表 6 可知,直接将客观参数与主观评价得分进行拟合时,回归方程的校正复相关系数  $R^2 = 0.850$ ,而经过对数变换后的客观参数与主观评价结果的

拟合方程就有着较高的拟合度( $R^2 = 0.927$ )。所以,选取拟合度高的方程  $LgY_{pef} = -1.403Lg(X_L) - 2.725Lg(X_R) + 8.492$  作为主客观回归方程。

对所建立回归方程进行校验表明:方差检验中显著性概率为 0 小于 0.05,方程变量线性相关显著;常数、双耳响度和粗糙度的  $t$  检验的概率  $p$  值分别为 0.000、0.000、0.003,都小于 0.05,即方程回归系数  $t$  检验成立;回归方程的 Durbin - Watson 检验值为 1.714,残差间相互独立;残差符合正态分布;方差膨胀因子(VIF)为 1.125,远小 10,满足共线性诊断。则说明所建立的回归方程是有统计学意义的。

## 5 结 论

本文以发动机启动时的车内噪声为基础,对车内的声品质参数进行了计算及分析,引入了烦恼度模型对主观偏好性进行预测。完成主观评价实验,建立了主客观回归模型。得到的主要结论如下:

(1) 汽车发动机启动时的车内噪声为低频、非稳态信号,线性声压级和尖锐度对该类声样本的描述能力最差,A 计权声压级、双耳响度、粗糙度、抖动度和烦恼度为该声样本的主要影响因素。

(2) 在不进行成本较高的主观评价实验时,引入烦恼度模型也能较好的对该类声样本的主观偏好性进行简单预测。

(3) 双耳响度和粗糙度是描述汽车发动机启动声主观偏好性的主要客观参量。主观评价与双耳响度、粗糙度之间更多表现为非线性关系。

### 参 考 文 献

- [ 1 ] 赵彤航,卢炳武,姜文君,等. 轿车车内噪声品质偏好性评价方法的研究[J]. 西安交通大学学报,2012,46(5):127-131.  
ZHAO Tong-hang, LU Bing-wu, JIANG Wen-jun, et al. Evaluation for car interior noise quality preference [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2012, 46(5):127-131.
- [ 2 ] Lee S K. Objective evaluation of interior sound quality in passenger cars during acceleration[J]. Journal of Sound and Vibration, 2008, 310(1-2):149-168.
- [ 3 ] Shin S H, Ih J G, Hashimoto T, et al. Sound quality evaluation of the booming sensation for passenger cars [J]. Applied Acoustics, 2009, 70(2):309-320.
- [ 4 ] 王长山,张立军. 汽车关门声品质评价方法的研究[J]. 汽车工程, 2011, 33(10):902-906.  
WANG Chang-shan, ZHANG Li-jun. A study on the method of evaluating the sound quality of vehicle door closing noise [J]. Automotive Engineering, 2011, 33(10):902-906.
- [ 5 ] 杨川,于德介. 基于伪 WIGNER - VILLE 分布的汽车关门

声品质评价参数研究[J]. 机械工程学报, 2011, 47(24):91-96.

YANG Chuan, YU De-jie. Research on the sound metric of door slamming sound based on pseudo WIGNER-VILLE distribution [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2011, 47(24):91-96.

- [ 6 ] Parizet E, Guyader E, Nosulenko V. Analysis of car door closing sound quality [J]. Applied Acoustics, 2008, 69(1):12-22.
- [ 7 ] Otto N C, Wakefield G H. A subjective evaluation and analysis of automotive starter sounds [J]. Noise Control Engineering Journal, 1993, 41(3):377-382.
- [ 8 ] 牟海龙. 国产轿车非稳态状况下声音品质的研究[M]. 长春:吉林大学, 2009年5月.
- [ 9 ] Fastl H, Blauert J. Psycho-acoustics and sound quality// communication acoustics [M]. Berlin, Springer Berlin Heidelberg, 2005:139-162.
- [ 10 ] 毛东兴,高亚丽,俞吾周,等. 声品质主观评价的分组成对比较法研究[J]. 声学学报, 2005(6):515-520.  
MAO Dong-xing, GAO Ya-li, YU Wu-zhou, et al. Grouped pair-wise comparison for subjective sound quality evaluation [J]. Acta Acustica, 2005(6):515-520.
- [ 11 ] 汪念平,陈剑,钟秤平. 汽车声品质分析方法与评价流程 [J]. 汽车工程, 2007, 29(9):800-803.  
WANG Nian-ping, CHEN Jian, ZHONG Cheng-ping. The analysis methods and evaluation procedure of vehicle sound quality [J]. Automotive Engineering, 2007, 29(9):800-803.
- [ 12 ] 陈剑,杨雯,李伟毅. 汽车声品质主观评价试验方法探究 [J]. 汽车工程, 2009, 31(4):389-392.  
CHEN Jian, YANG Wen, LI Wei-yi. An investigation into the test methods for subjective evaluation of vehicle sound quality [J]. Automotive Engineering, 2009, 31(4):389-392.
- [ 13 ] 毛东兴,俞吾周,王佐民. 声品质成对比较主观评价的数据检验及判据[J]. 声学学报, 2005, 30(5):468-472.  
MAO Dong-xing, YU Wu-zhou, WANG Zuo-min. Statistical validation and criterion for paired comparison data in sound quality evaluation [J]. Acta Acustica, 2005, 30(5):468-472.
- [ 14 ] 贺岩松,赵勤,徐中明,等. 摩托车声品质偏好性评价与分析[J]. 重庆大学学报. 2009, 32(3):283-287.  
HE Yan-song, ZHAO Qin, XU Zhong-ming, et al. Subjective preference evaluation and analysis of motorcycle sound quality [J]. Journal of Chongqing University, 2009, 32(3):283-287.
- [ 15 ] Susini P, McAdams S, Winsberg S. A multidimensional technique for sound quality assessment [J]. Acta Acustica united with Acustica, 1999, 85:650-656.
- [ 16 ] Chouard N, Hempel T. A semantic differential design especially developed for the evaluation of interior car sounds [M]. ASA-EAA-DAGA Joint Meeting, Berlin, Germany, 1999.