

文章编号:1000-582X(2009)03-0283-05

摩托车声品质偏好性评价与分析

贺岩松^{1a,1b}, 赵勤^{1b}, 徐中明^{1a,1b}, 杨振东², 张袁元^{1b}

(1. 重庆大学 a. 机械传动国家重点实验室; b. 机械工程学院, 重庆 400030;
2. 重庆建设摩托车股份有限公司 技术中心, 重庆 400050)

摘要:以摩托车在不同发动机转速下驾驶员耳旁的声样本为评价对象,运用分组成对比较法进行偏好性主观评价实验,并在精确计算评价结果误判率的基础上,通过相关分析和多元回归分析,建立以心理声学参数描述偏好性主观评价结果的数学模型。研究结果表明,响度和粗糙度是影响摩托车噪声主观偏好性的主要参量,与线性数学模型相比,采用非线性数学模型可以更好地表达摩托车噪声主观偏好性与心理声学参数之间的关系。

关键词:声品质;主观评价;偏好性;成对比较

中图分类号:U483

文献标志码:A

Subjective preference evaluation and analysis of motorcycle sound quality

HE Yan-song^{1a,1b}, ZHAO Qin^{1b}, XU Zhong-ming^{1a,1b},
YANG Zhen-dong², ZHANG Yuan-yuan^{1b}

(1a. State Key Lab of Mechanical Transmissions; b. College of Mechanical Engineering, Chongqing University, Chongqing 400030, P. R. China;
2. Research and Development Center, Jianshe Industries Co., Ltd., Chongqing 400050, P. R. China)

Abstract: Noise samples of motorcycles at different engine speeds taken at the position of the ear of a motorcycle operator are selected as the evaluation stimuli to investigate sound preferences of motorcycle sound quality. Subjective testing is carried out via the paired comparison method. Precise calculation of the misjudging rate is adopted to ensure test result reliability. Formulae between subjective preference scores and psychoacoustic parameters are obtained through linear correlation and multi-dimensional regression analysis. The results indicate that loudness and roughness are two predominant metrics influencing preference evaluation for motorcycle noise, and the nonlinear equation better describes the dependence of subjective preference scores on psychoacoustic parameters than the linear one.

Key words: sound quality; subjective evaluation; preference; paired comparison

随着减振和降噪技术的进步,车辆的振动和噪声性能已经得到很大改善,而声音品质开始受到越来越多的关注。传统的 A 计权声压级不能充分反映人们对噪声的主观感觉,尤其是对低频的估计不

足^[1-4]。人对声音的感觉受其生理学和心理声学等不同因素影响,具有很强的主观性,会出现 A 声级测量合格但顾客却感觉噪声十分烦躁,难以忍受的现象。反映主观感受的声品质概念,成为评价声音

收稿日期:2008-10-12

基金项目:重庆市科委科技计划攻关资助项目(CSTC,2007AA6006-3);中国博士后科学基金资助项目(20070410772)

作者简介:贺岩松(1968-),男,重庆大学副教授,博士,主要从事噪声与振动研究,(E-mail) hys@cme.cqu.edu.cn。

适宜性的主要指标。好的声音品质不仅能够提高顾客对产品的满意度,同时还能树立一个独特的品牌形象^[5-6]。

声品质的主观评价通过选取合适的心理声学参数,运用适当的评价方法得到能反映人耳听觉特性和感知的结果,主要包括评价参量的设计、选取以及评价方法的建立和对评价结果的分析^[7-8]。把主观评价结果和声音的物理参数、心理声学参数结合起来,评价结果才更客观并被进一步加以利用。

笔者采用分组成对比较法进行主观评价实验,以“偏好性”作为声品质主观评价指标,通过主客观参量相关性分析和多元回归分析,获得影响偏好性的主要客观参量,建立以心理声学参数为基础的主客观声品质评价模型。

1 声品质主观评价实验

1.1 噪声样本采集及截取

为了在主观评价中,获得与实际情况一致的声事件感觉,评价噪声库采用 B&K 的双耳传声器(binaural microphone type 4101)记录实际条件下的双耳噪声信号。样本采集试验中选取了 5 种不同类型的摩托车,记录定置工况下发动机不同转速时驾驶员耳旁位置的稳态噪声样本,每种工况的记录时间为 30 s。现场试验采集样本经试验室内回放、客观分析,剔除样本中受干扰或运行工况不稳定的样本,得到的有效噪声样本为 25 个独立样本。

由于在 30 s 的记录时段内车辆运行条件很难严格控制,可能出现运行不稳定的情况。在评价前通过试听和客观参量随时间变化情况的分析,同时考虑到人耳听觉中主观感知的形成过程,对记录的噪声信号进行截取。用于主观评价的样本信号的截取时间为 5 s^[9]。

1.2 主观评价实验设计

笔者采用分组成对比较的方法进行主观评价实验。分组成对比较法是针对传统成对比较法在大样本主观评价实验中的缺点,将大样本量的评价试验分成具有相互联系的多个样本组,再对各样本组独立进行成对比较评价试验。通过在各样本组之间预设的关联样本,将各组的评价结果重建获得整体样本的评价结果^[9-10]。

实验中选取 24 位在读硕士研究生为评价主体,他们均有一定声学知识基础,其中约 1/3 的评价者从事振动与噪声研究,平均年龄为 25 岁,均无听力障碍。

主观评价实验由于受到主体物理、心理、认知等多方面的影响,评价之前对评价量和评价方法的解释说明以及主体对样本的听音培训都是必不可少的。本次主观评价实验采用的分组成对比较法,评价方法相对比较简单,对主体听音培训的要求相对较低,一般认为只需在评价之前做些模拟试验即可^[9,11]。本次评价实验前,除对评价过程进行预演及调整外,还对评价人员进行了如下的培训:

1) 评价样本的说明。在进行听音评价之前对声音事件的情景及其特征进行说明,其目的是让评价者在评价过程中预先形成声音事件的感受,并想象被评价噪声的场景。

2) 评价量的解释。在主观评价之前,对所要进行评价的评价量(或词汇)的含义进行解释,其目的是让评价者更好地理解评价量(或词汇)所表达的声品质特征,以及减小评价者对评价内容理解的差异。

3) 评价过程的说明。在每次评价之前,对评价者作出判断的要求,对评价判断结果的方法以及技巧等方面进行说明,以保证评价者能如实反映评价中的判断结果。

实验的具体方法如下:

1) 将声样本根据工况随机地分成 A、B、C 3 组,分组时采取各种声样本的均匀分布,使每组中均包含不同工况的样本,确保 3 组的标度范围基本一致。参考国内相关研究,参考样本应选取具有中等声品质特征的声样本^[10]。

2) 在不影响评价实验有效性的基础上,为减小工作量,提高效率,采用半矩阵评价。设 i, j 分别代表 2 个声样本,为了验证评价结果的有效性,辅助 $i-i$ 比较(同一样本不同回放顺序比较)和 $ij-ji$ 不同回放顺序比较实验。当 i 偏好于 j 时,比较结果 $P(i, j)$ 赋值为 1; 感觉相当,赋值为 0; 若 i 比 j 差时则赋值为 -1。

3) 声样本在比较评价中被选择的次数,作为某评价人员(TP)对该样本声音的所给出的主观分值,由此得到 24 个评价人员对各声样本的偏好性主观分值。

1.3 数据的误差及误判分析

声品质参量的主观评价过程实际上是一种心理测验,在实验中,评价者可能出现以下的情况而导致错误的判断:在评价过程中的注意力不够集中;评价者的评判标准在不断修正变动;声样本之间比较接近,较难作出判断。

在主观评价实验中,通过人为设计的检验来进

行评价者评价结果的可靠性的检验。设计的检验包括以下 3 个方面:相同声事件比较($i-i$ 比较)错误、不同回放顺序的比较($ij-ji$ 比较)错误、三角循环误差。

1)相同声事件比较($i-i$ 比较)的错误是指评价者在听到一对实际上是相同声事件而作出了两者评价参量不相同的判断。每组设计的 $i-i$ 比较序列对共 9 对。

2)不同回放顺序比较($ij-ji$ 比较)错误是指在评价序列对中,设计嵌入了先回放声事件 i 然后再回放声事件 j (记为 ij 评价对),以及先回放声事件 j 然后再回放声事件 i (记为 ji 评价对),评价者在无关联的 2 次评价中得出的结果不一致的情况。每组设计的 $ij-ji$ 比较序列对共 11 对。

3)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。

三角循环误差准确计数公式为^[12-13]

$$C = \frac{1}{C_t^3} \sum_{1 \leq i, j, k \leq t} \delta_{ijk}, \quad (1)$$

式中: $C_t^3 = \frac{t!}{(t-3)!} / 3!$, t 为评价样本数量;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, $\delta_{ijk} = \min(|\max(\min(p(i, j) + p(j, k), 1), -1) - p(i, k)|, 1)$ 。

在采用不同数据有效性判据分析比较后,最终确定采用计权误判率(计权一致性系数)的方法进行数据的筛选。计权误判率 C_w ^[12-13] 根据式(2)计算

$$C_w = \frac{\sum C_i \cdot E_i}{\sum E_i}, \quad (2)$$

式中: E_i 为第 i 种误判可能产生的次数; C_i 为第 i 种误判实际产生的误判率。

计权一致性系数为^[12-13]

$$\zeta = 1 - C_w. \quad (3)$$

表 1 为计权一致性系数的计算结果,分别剔除在 A 组中表现较差的 TP18 (74.7%), TP21 (76.8%); B 组中的 TP8 (82.1%), TP17 (82.1%); C 组中的 TP7 (82.1%), TP8 (82.1%)。保留的评价人员的计权一致性系数均在 80% 以上。剔除以后计算剩余评价人员对某声音样本的平均值便为其最终偏好性分值。

表 1 偏好性计权一致性系数

评价者	A	B	C
TP1	1.000	0.958	1.000
TP2	0.958	0.979	0.958
TP3	0.884	0.979	0.979
TP4	0.916	0.937	0.989
TP5	0.895	0.947	0.937
TP6	0.947	0.979	0.968
TP7	0.884	0.863	
TP8	0.926		
TP9	0.926	0.926	0.874
TP10	0.937	0.958	0.937
TP11	0.937	0.926	0.821
TP12	0.863	0.926	0.947
TP13	0.958	0.979	1.000
TP14	0.905	0.916	0.853
TP15	0.853	0.895	0.853
TP16	0.811	0.968	0.979
TP17	0.895		0.926
TP18		0.937	0.968
TP19	0.947	0.968	1.000
TP20	0.884	0.884	0.979
TP21		0.958	0.979
TP22	0.874	0.968	0.895
TP23	0.905	0.905	0.874

根据 A、B、C 3 组中公共参考样本的分值对 A、B、C 3 组结果进行统一标准化综合。由于各组标度范围基本一致,可以认为 3 组偏好性分值变化范围的差异是由于样本特性的差异引起的,采用对参考样本的偏好性分值按比例调节到相同的分值,再将 2 组结果组合到一起,得到 25 个声样本的偏好性值,如表 2 所示。

表 2 声样本偏好性最终得分

组别	得分	组别	得分
A1	7.77	A9	4.86
A2	6.28	B1	5.57
A3	2.72	B2	2.00
A4	8.55	B3	5.10
A5	4.92	B4	4.10
A6	7.90	B5	5.67
A7	2.59	B6	2.76
A8	3.17	B7	3.10

续表 2

组别	得分	组别	得分
B8	2.67	C5	2.14
B9	4.86	C6	5.48
C1	2.72	C7	3.12
C2	5.21	C8	3.92
C3	4.86	C9	4.01
C4	2.14		

续表 3

组别	dBA	响度	尖锐度	粗糙度	波动度
B4	84.20	40.48	92.27	79.67	27.41
B5	68.08	15.12	54.13	60.58	85.99
B6	88.97	52.32	66.40	87.55	22.90
B7	84.46	38.40	72.53	66.80	65.16
B8	99.95	100.00	71.47	58.09	26.33
B9	77.57	28.64	72.53	62.03	29.10
C1	90.19	56.64	90.67	86.10	29.15
C2	68.29	15.68	65.33	67.22	59.61
C3	77.57	28.64	72.53	62.03	29.10
C4	91.09	59.04	100.00	95.02	23.55
C5	91.15	59.44	76.00	81.54	20.17
C6	66.54	14.08	51.23	72.41	100.00
C7	84.36	38.08	70.93	66.60	56.65
C8	72.16	21.76	54.32	55.39	69.02
C9	84.46	41.68	60.27	58.30	28.58

2 评价结果分析

主观评价的目的除了比较判断现有产品噪声的某些主观指标的优劣外,更重要的是为指导噪声的改善设计服务。寻求主观评价的结果与客观计算参量之间的相关性,可以获得主观评价指标对计算参量的依赖关系,得到为改善噪声的某些主观评价指标而对噪声的计算参量(客观物理量)进行改进的方向,进而对产品的结构和声学设计作相应的调整,以达到最终改善主观评级指标,改善人们的噪声暴露环境的目的^[14]。

2.1 主客观相关性分析

为了研究摩托车噪声声品质主观评价结果与心理声学参数之间的关系,应用 SPSS13.0 应用统计软件对主观偏好性与心理声学参数计算结果(见表 3)作主客观线性相关性分析,其结果如图 1 所示。

从图 1 中可以看出,样本的主观得分与 A 计权声压级和响度的相关性最明显,相关系数在 0.8 以上,主观得分与粗糙度的相关性也较高,而与波动度的相关性最差;同时,从图 1 中还可以看出各参数之间存在较强的相关性。

表 3 声样本心理声学参数计算结果

组别	dBA	响度	尖锐度	粗糙度	波动度
A1	71.58	19.36	62.13	59.96	46.17
A2	78.15	29.12	65.60	51.45	32.72
A3	92.74	69.44	94.13	89.00	26.19
A4	73.44	21.92	66.67	59.75	55.62
A5	76.30	26.00	64.80	56.85	32.77
A6	75.08	24.64	55.15	58.30	31.22
A7	84.31	37.92	70.67	66.80	64.03
A8	88.71	57.76	63.73	79.46	23.55
A9	77.57	28.64	72.53	62.03	29.10
B1	77.68	29.76	70.13	48.34	34.04
B2	93.53	71.12	96.80	100.00	30.84
B3	69.30	16.48	70.40	56.85	82.79

	偏好性	dBA	响度	尖锐度	粗糙度	波动度
偏好性	1.000					
dBA	-0.854	1.000				
响度	-0.845	0.971	1.000			
尖锐度	-0.605	0.717	0.733	1.000		
粗糙度	-0.775	0.718	0.805	0.708	1.000	
波动度	0.430	-0.759	-0.727	-0.562	-0.409	1.000

图 1 主观偏好性与客观参量之间的相关性矩阵 (Pearson 相关系数)

2.2 主客观回归分析

相关分析只能说明对主观评价结果有较大影响的客观参量,而其影响值则要通过多元回归分析来判断。本文中的因变量为主观偏好性得分,自变量为各心理声学参数,采用逐步回归(stepwise)法^[15]得到回归方程的回归系数。

表 4 列出了常用多元回归结果,其中 Y_{pef} 为主观偏好性得分,得分越高,则声品质越好, X_L 、 X_{dBA} 、 X_R 和 X_F 分别是响度、A 计权声压级、粗糙度和波动度。回归方程校正复相关系数(R^2)是衡量方程拟合程度优劣的常用指标。表 4 中第 1 个方程是多元线性回归方程,从结果可看出,多元线性回归的校正复相关系数($R^2 = 0.763$)并不理想,即本实验中的声品质主观得分与各参数之间不能建立合理的多元线性方程。经多个方程比较,选用校正复相关系数最高($R^2 = 0.843$)的方程: $Y_{\text{pef}} = 26.507 - 6.295 \lg X_L - 4.282 \lg X_R - 3.166 \lg X_F$ 。从方程系数可看出响度的影响最大。

对所建立回归方程进行校验^[15],结果表明:t检验成立;回归标准残差的正态 P-P 图显示残差符合正态分布的假设;回归方程关于残差独立;共线性诊断也满足要求,容忍度数值远大于 0.1。说明所建的回归方程是有统计学意义的。

表 4 主观得分与客观参量的常见多元回归结果

回归方程	R^2	校正后的 R^2	F 值	P 值
$Y_{\text{pef}} = 8.143 - 0.084X_L - 0.022X_F$	0.787	0.763	33.192	0
$Y_{\text{pef}} = 12.489 - 0.00122X_{\text{dBA}}^2 + 0.00022X_F^2$	0.832	0.803	28.163	0
$Y_{\text{pef}} = 5.718 + 0.02\exp X_L - 0.01\exp X_{\text{dBA}}$	0.796	0.761	22.176	0
$Y_{\text{pef}} = 19.807 - 1.468\ln X_L - 2.528X_F$	0.774	0.749	30.860	0
$Y_{\text{pef}} = -32.539 + 3.592\exp(10/X_L) + 23.588\exp(10/X_R) + 2.999\exp(10/X_F)$	0.853	0.827	32.892	0
$Y_{\text{pef}} = 26.507 - 6.295\lg X_L - 4.282\lg X_R - 3.166\lg X_F$	0.867	0.843	36.926	0

3 结 语

利用分组成对比较法,对试验中采集的声样本进行了主观评价,并对主观评价结果与心理声学参数进行了相关性和多元回归分析。找出了影响该类摩托车声品质的主要心理声学参数,建立了合理的主客观数学模型。结果表明,在 4 个心理声学参数中,主观评价得分与响度的相关性最强,粗糙度次之。从回归分析中可以看出,本实验的主观评价结果与心理声学参数之间并不是简单的多元线性关系,而是非线性关系。

参考文献:

- [1] NILSSON M E. A-weighted sound pressure level as an indicator of short-term loudness or annoyance of road-traffic sound[J]. Journal of Sound and Vibration, 2007, 302(1/2): 197-207.
- [2] PARMANEN J. A-weighted sound pressure level as a loudness/annoyance indicator for environmental sounds—could it be improved[J]. Applied Acoustics, 2007, 68(1): 58-70.
- [3] SUSINI P, MCADAMS S, WINSBERG S, et al. Characterizing the sound quality of air-conditioning noise[J]. Applied Acoustics, 2004, 65(8): 763-790.
- [4] 杨诚, 吴行让, 卢喜, 等. 压缩机的声品质分析[J]. 重庆大学学报:自然科学版, 2007, 30(8): 17-20.
YANG CHENG, WU XING-RANG, LU XI, et al. Analyse of compressor sound quality[J]. Journal of Chongqing University: Natural Science Edition, 2007, 30(8): 17-20.
- [5] SVEND G M. What is sound quality[J]. Bruel & Kjaer Magazine, 2007(1): 19-23.
- [6] JIAO F L, TIAN J, LIU K, et al. Listener clustering and subject assessment of car interior noise quality[J]. Technical Acoustic, 2006, 25(6): 568-572.
- [7] 钟科平, 陈剑, 汪念平. 车内噪声声品质偏好性评价与分析实验研究[J]. 汽车工程, 2008, 30(1): 40-43.
ZHONG CHENG-PING, CHEN JIAN, WANG NIAN-PING. An experimental evaluation and analysis on sound quality preference for in-car noise[J]. Automotive Engineering, 2008, 30(1): 40-43.
- [8] GONZALEZ A, FERRER M, DE DIERO M, et al. Sound quality of low-frequency and car engine noises after active noise control [J]. Journal of Sound and Vibration, 2003, 265(3): 663-679.
- [9] 毛东兴. 车内声品质主观评价和分析方法研究[D]. 上海: 同济大学, 2003.
- [10] 毛东兴, 高亚丽, 俞悟周, 等. 声品质主观评价的分组成对比较法研究[J]. 声学学报, 2005, 30(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, 30(6): 515-520.
- [11] PARIZET E, GUYADER E, NOSULENKO V. Analysis of car door closing sound quality[J]. Applied Acoustics, 2008, 69(1): 12-22.
- [12] 毛东兴, 俞悟周, 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.
- [13] PARIZET E. Paired comparison listening tests and circular error rates[J]. Acta Acustica United with Acustica, 2002, 88(4): 594-598.
- [14] MAO D X, WANG Y, JIANG Z X. Parametric model for low-frequency index of subjective car interior sound quality[J]. Technical Acoustic, 2006, 25(6): 533-539.
- [15] 张文彤. SPSS11 统计分析教程[M]. 北京: 北京希望电子出版社, 2002.

(编辑 张 苹)