

# 汽车时变噪声的响度计算模型适用性分析

张觉慧<sup>1,2</sup>, 张立军<sup>1</sup>, 于 佳<sup>1</sup>

(1. 同济大学 汽车学院, 上海 201804; 2. 上汽集团 汽车研究中心, 上海 201804)

**摘要:** 建立 Zwicker 瞬时响度、Moore 瞬时响度、Moore 时变响度计算方法, 引入 ArtemiS 软件的 Zwicker 时变响度计算方法, 并采用 4 种模型针对汽车发动机怠速噪声、汽车关门声和电机驱动汽车加速噪声 3 种典型的稳态、冲击与阶次扫频的信号进行响度计算, 对比分析 4 种模型用于时变噪声响度计算的适用性. 研究表明: 噪声频率成分与幅值变化越剧烈, Zwicker 与 Moore 时变响度计算偏差越大, 瞬时响度模型的计算越精确; Moore 时变响度时频分析有助于噪声来源和发生机理的分析与识别.

**关键词:** 响度计算模型; 时变噪声; 适用性分析

**中图分类号:** U 270

**文献标识码:** A

## Applicability of Different Loudness Models to Time-varying Sound of Vehicle

ZHANG Juehui<sup>1,2</sup>, ZHANG Lijun<sup>1</sup>, YU Jia<sup>1</sup>

(1. College of Automotive Studies, Tongji University, Shanghai 201804, China; 2. Automobile Research Center of SAIC, Shanghai 201804, China)

**Abstract:** Three sound loudness calculation models, including Zwicker instantaneous loudness model, Moore instantaneous loudness model and Moore time-varying loudness model, and the cited Zwicker time-varying loudness model in ArtemiS, were applied to calculate the time-varying loudness of three typical noises such as steady engine idle noise, impulsive door closing noise and order-swept electric vehicle pass-by noise. Based on the loudness amplitude and time-frequency loudness results, the applicability of the four loudness models to time-varying sounds was analyzed and compared. It is found that both Zwicker and Moore time-varying loudness models are more reliable than Zwicker and Moore instantaneous loudness models if the sound amplitude and frequency vary tempestuously. And the time-frequency result of Moore instantaneous loudness model can be very helpful to noise source identification and mechanism analysis.

**Key words:** loudness calculation model; time-varying noise; applicability analysis

现代汽车 NVH(noise, vibration and harshness)工程已经从传统的噪声控制发展到声学品质设计的新高度, 响度成为重要的评价指标. 响度概念最早由 Barkhausen 提出<sup>[1]</sup>, 随后人们建立了多种响度计算模型, 主要包括: 计权声压级、Stevens 响度、Zwicker 响度与 Moore 响度<sup>[2-4]</sup>. 其中, Zwicker 方法由于建立较早, 计算精度较高, 应用最为广泛. 但是, 上述模型对于稳态噪声响度的计算精度较高, 计算非稳态噪声响度则存在较大误差. 因此, 基于人耳时域掩蔽效应, 人们提出时变响度计算方法<sup>[5-8]</sup>. 但是, 由于时变响度详细考虑时域掩蔽效应的复杂性与困难性, 导致该方法未被广泛认可. 针对不同的信号如何选择响度计算方法尚未形成清晰的指导原则, 因此急需分析不同响度模型对于不同噪声信号响度计算的适用性. 本文在综合前期文献的基础上, 建立了 Zwicker 瞬时响度(Zwicker instantaneous loudness, ZIL)、Moore 瞬时响度(Moore instantaneous loudness, MIL)、Moore 时变响度(Moore time-varying loudness, MTVL)计算方法, 并引入基于 Head 公司 ArtemiS 软件的 Zwicker 时变响度(Zwicker time-varying loudness, ZTVL)计算方法; 然后针对发动机怠速噪声、汽车关门声和电机驱动汽车加速噪声 3 种分别具备稳态、冲击与扫频典型特征的信号采用 4 种模型进行响度计算, 并分析不同响度计算方法的计算精度与适用性.

## 1 稳态响度评价指标

稳态响度的评价指标包括计权声压级、Stevens 响度、Zwicker 响度、Moore 响度, 这些指标体现了响

收稿日期: 2009-06-02

基金项目: 国家“八六三”高技术研究发展计划资助项目(2006AA11A101)

作者简介: 张觉慧(1963—), 男, 高级工程师, 博士生, 主要研究方向为汽车集成与动力学分析与控制. E-mail: zhangjuehui@saicmotor.com

张立军(1972—), 男, 副研究员, 工学博士, 主要研究方向为汽车振动与噪声控制、汽车系统动力学分析与控制.

E-mail: lijun.zhang@fcv-sh.com

度模型发展的基本过程.其中,计权声压级属于单频带(single-band)响度模型,后三者属于多频带响度模型,能够模拟人耳听觉特性,对输入信号进行多尺度滤波<sup>[9]</sup>.计权声压级<sup>[1]</sup>和 Stevens 响度<sup>[9]</sup>的特点与计算方法有关文献已阐述,下面仅简要介绍 Zwicker 响度和 Moore 响度.

1.1 Zwicker 响度

Zwicker 响度是一种基于激励模式的多频带响度计算模型,能够模拟人耳的听觉产生机理.根据人耳产生听觉的机理,耳蜗基底膜可被类比为的一组带宽重叠的带通滤波器,称为特征频带.在外部激励的作用下,每个特征频带上会产生对应的激励强度,称为“激励模式”.根据 Stevens 定律,特征响度与耳蜗基底膜激励强度成比例关系,由特征响度进一步积分可以得到 Zwicker 响度<sup>[1]</sup>.Zwicker 响度的计算过程参见文献[1-3,10].Zwicker 响度计算以频带声压级作为输入,频率精度受到一定限制;在激励模式计算以及考虑频域掩蔽效应采用的查表法,使用不够方便.

1.2 Moore 响度

Moore 响度与 Zwicker 响度相同,是模拟人耳听觉产生机理且基于激励模式的多频带响度计算模

型,其计算流程与 Zwicker 响度计算过程一致<sup>[4,11]</sup>.

与 Zwicker 相比,Moore 响度计算方法具有以下特色:①以离散频率成分声压级作为模型计算输入;② Moore 响度模型特征频带采用 ERB (equivalent rectangular bandwidth)尺度,Zwicker 响度模型采用 Bark 尺度,两种尺度在 500 Hz 以下带宽差别较大,500 Hz 以上差别较小;③Moore 响度计算在确定外耳与中耳声波传递特性时分别确定了两者的传递特性,而 Zwicker 响度计算时采用的是二者综合传递特性;④Moore 响度模拟人耳频域掩蔽效应时采用了基于机理的数学模型,而 Zwicker 响度模型采用查表法. Moore 响度模型适用于各种稳态噪声信号,频率分辨率较高,一般认为其精度高于 Zwicker 模型.

1.3 基于纯音对稳态响度模型的验证

考虑到计权声压级和 Stevens 响度计算方法及其应用的局限性,仅对 Zwicker 与 Moore 稳态响度模型利用纯音进行正确性检验.2 种响度模型及标准 ANSI 3.4 计算结果的对比如表 1 所示.由表 1 可知:①除低频段(100 Hz 以下),两模型均较准确;② Moore 模型精度高于 Zwicker 模型.

表 1 基于纯音的响度计算结果正确性验证(与 ANSI 3.4 计算结果比较)

Tab.1 Validation of loudness model based on pure tone (compared with ANSI 3.4 calculation results)

纯音		ANSI 3.4 标准响度/Sone	Moore 模型		Zwicker 模型	
频率/Hz	声压级/dB		响度/Sone	误差/%	响度/Sone	误差/%
100	50	0.34	0.13	61.7	0	100.0
1 000	20	0.14	0.14	0	0.13	7.1
1 000	40	1.00	1.00	0	1.00	0
1 000	80	16.00	16.00	0	16.50	3.1
3 000	40	1.80	1.82	1.1	1.64	9.0
3 000	80	27.50	27.50	0	25.50	7.3

2 瞬态响度计算模型建立

稳态响度模型假设声信号的频率成分不随时间改变,而实际的信号往往具有明显的时频特性,因此需要建立瞬态响度计算模型.研究发现,非稳态噪声的时变响度与噪声带宽、幅值及其冲击成分持续时间存在复杂的非线性关系<sup>[1]</sup>,因此难以形成基于机理的时变响度计算模型.目前,Head 公司的 ArtemiS<sup>[12]</sup>在 Zwicker 稳态响度算法基础上,基于大量主观评价试验数据,以不同时间常数的低通滤波器模拟时域掩蔽效应,建立了 Zwicker 时变响度计算方法;Glasberg 和 Moore 等人在 Moore 稳态响度算法基础上,基于自动增益控制方法,调整时间常数以模拟时域掩蔽效应,

得到短期响度和长期响度计算方法<sup>[8]</sup>.本文中 Zwicker 时变响度方法以商业软件计算结果为准;Zwicker 瞬时响度、Moore 瞬时响度、Moore 时变响度计算方法,各种模型的计算方法、计算流程以及注意事项参阅文献[8-9]等.

3 瞬态响度模型的适用性分析

稳态噪声、冲击噪声、扫频特性噪声为汽车噪声中较有代表性的 3 种噪声形式,其幅值变化、频率分布特性、冲击成分的持续时间各不相同.下面将以这 3 种噪声为例,对 Zwicker 瞬时响度、Moore 瞬时响度、Zwicker 时变响度、Moore 时变响度的适用性展开讨论,分析时各算法的帧长和帧移相等.

对比分析主要从瞬态响度幅值分析、特征响度时频分析、结合尖锐度的综合分析开展.其中幅值分析指标包括平均值、标准偏差、相对误差及响度变化率等.尖锐度表征了样本高频(1 000 Hz 以上)能量的比例,反映了特征响度的频域分布,本文采用基于 Zwicker 稳态响度模型的 Bismarck 模型<sup>[1]</sup>.

### 3.1 不同模型对稳态噪声响度计算的适用性分析

稳态噪声的特点是信号幅值大小以及频率成分不随时间变化而变化.为此选取某 4 缸 4 冲程 1.5 L 汽油机怠速时的噪声信号作为分析对象,数据采样频率为 12 000 Hz,声压时域信号如图 1a 所示.

分析 4 种响度模型响度、尖锐度幅值分析结果可知:①MIL, ZTVL, MTVL 平均值接近,且响度离散程度较小;ZIL 平均值偏低,相对误差较大,响度离散程度也较大(图 1b).②尖锐度在 1.3~1.5 Acum 间波动,波动范围较小,反映了稳态噪声特点.

分析 Zwicker, Moore 特征响度时频分布及声压级时频分布可知:①声压级的时频分布能量较分散(图 1d),而特征响度分布能量较集中(图 1e, 1f),这是因为 Zwicker 与 Moore 模型考虑了频域掩蔽效应,峰值大的特征响度将峰值小的特征响度“淹没”.②Moore 特征响度与 Zwicker 特征响度时频特性都能够反映响度的时间与频率分布特性,但 Moore 特征响度的频率分辨率更高(图 1e, 1f).

由此得到:①4 种响度模型对稳态噪声瞬态响度计算均适用,但 ZIL 响度计算值偏小,且离散程度较大.②Zwicker 与 Moore 特征响度分布,可以识别噪声响度主要能量的分布,但 Moore 特征响度时频分辨率更高.

### 3.2 不同模型对冲击噪声响度计算的适用性分析

冲击噪声的特点为宽带噪声,噪声频率成分及幅值变化快,往往包含多重间隔性的细微冲击过程(即微过程).选取的冲击噪声信号为汽车关门声,采样频率为 44 100 Hz,声压时域信号如图 2a.

综合对比分析 4 种响度模型响度、尖锐度幅值分析结果可知:①ZIL 和 MIL 响度上升变化率明显高于 ZTVL 和 MTVL.这是因为时变响度模型考虑了时域掩蔽效应,人耳响度感知的建立时间约为 100 ms<sup>[1]</sup>;②ZIL 和 MIL 响度下降变化率与 ZTVL 和 MTVL 接近.这一方面是因为该冲击噪声的衰减较慢,如图 2a 中 100 ms 时刻后声压幅值变化,另一方面是时变响度模型考虑了时域掩蔽效应,即人耳对响度感觉的衰减最多持续 200 ms<sup>[1]</sup>.③ZIL 和 MIL 结果近似,ZTVL 和 MTVL 结果存在幅值偏差,如图

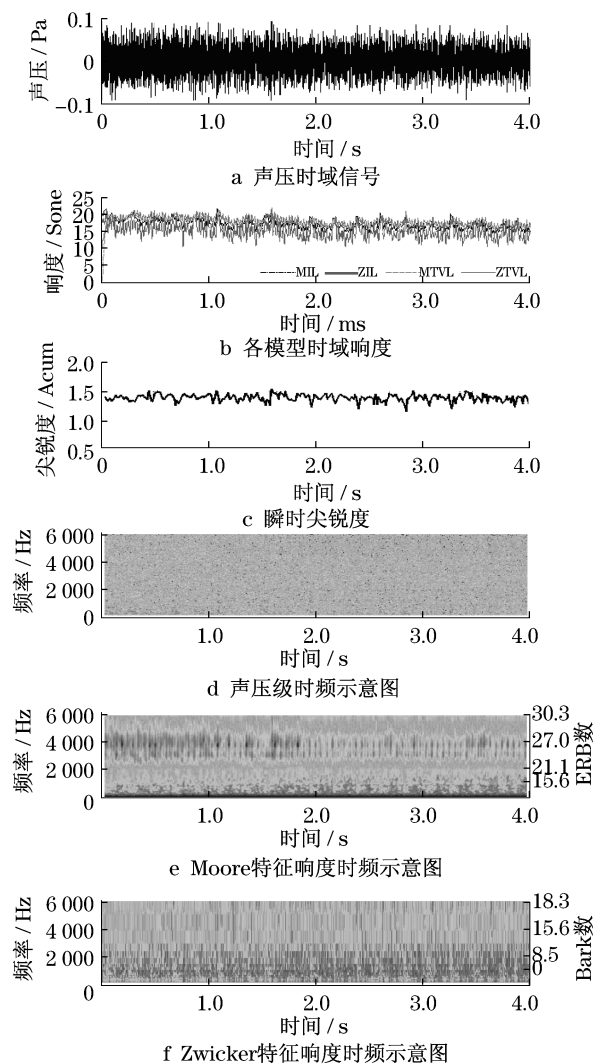


图1 发动机稳定怠速噪声响度分析

Fig.1 Loudness analysis of engine stationary idle noise

2b; ZIL, MIL 与 ZTVL, MTVL 的变化规律不一致,说明考虑时域掩蔽效应对冲击噪声的响度计算是必要的.④瞬时响度模型和时变响度模型存在多个极值点,反映了汽车关门短暂过程丰富的冲击现象,同时说明,瞬态响度模型有助于分析冲击噪声的微过程.⑤尖锐度的峰值出现在 75 ms 附近,而非瞬时响度的峰值和时变响度峰值时刻,如图 2c,这与特征响度的时频分布规律吻合,如图 2e, 2f.这充分显示了特征响度在分析冲击噪声的优越性.

综合对比分析 Zwicker, Moore 特征响度时频分布及声压级时频分布可知:①声压级时频分布能量较分散,如图 2d, Zwicker, Moore 特征响度能量分布较集中,如图 2e, 2f.②Zwicker, Moore 特征响度时频分布规律基本一致,且时频分辨率近似.

通过以上分析,得到:①瞬时响度模型未考虑时域掩蔽效应,不适用于对冲击噪声的响度评价;②相

比声压级的时频分布,特征响度的时频分布能清晰反映噪声来源,适用于冲击噪声声源识别;③瞬时响度模型有助于分析冲击噪声产生的微过程。

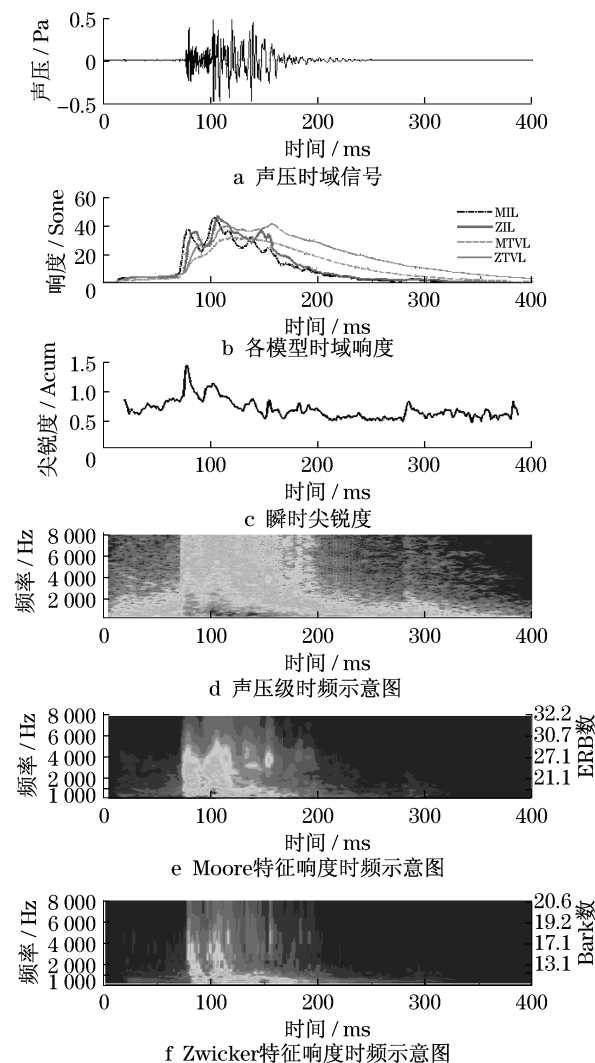


图2 汽车关门声响度分析

Fig.2 Loudness analysis of door closing noise

### 3.3 阶次扫频噪声响度模型适用性分析

阶次扫频噪声的特点为信号频率随时间连续变化,而且往往存在多个阶次的信号.选取的扫频噪声信号为电机驱动汽车加速时车内噪声,采样频率为22 050 Hz.如图3c所示.1 000 Hz以下各阶次信号随时间呈近似线性扫频特性,为了清晰显示阶次扫频信号,在计算前对声压信号进行1 000 Hz低通滤波,声压时域信号如图3a所示.综合对比分析4种响度模型响度幅值分析结果可知:①在噪声频率成分、幅值变化较快时间段,瞬时响度与时变响度偏差较大.如图3b,3c,1.5~3.0 s,4.5~6.0 s频率成分和瞬时响度幅值变化较快时间段,ZIL, MIL与

ZTVL响度幅值偏差增大,ZTVL与MTVL间偏差也增大.②在频率成分、幅值变化较慢时间段,瞬时响度计算偏差较小.在扫频特征明显的7.0~14.0 s,信号频率成分、瞬时响度幅值变化较慢,4种响度模型结果近似,ZIL偏差稍大.

综合对比分析 Zwicker, Moore 特征响度时频分布及声压级时频分布可知:①特征响度分布较声压级时频分布,其能量分布较集中.图3c显示噪声主要源自电机的1,2,6阶次噪声<sup>[13]</sup>;而 Moore 特征响度显示噪声主要源自电机的6阶次噪声.②Zwicker 特征响度频率分辨率较低,不足以显示该扫频噪声的阶次关系.由于该扫频噪声频率成分均在600 Hz以下,而 Zwicker 模型的Bark尺度相对 Moore 模型的ERB尺度在500 Hz以下特征频带较宽,导致特征响度频率分辨率不足,如图3e.

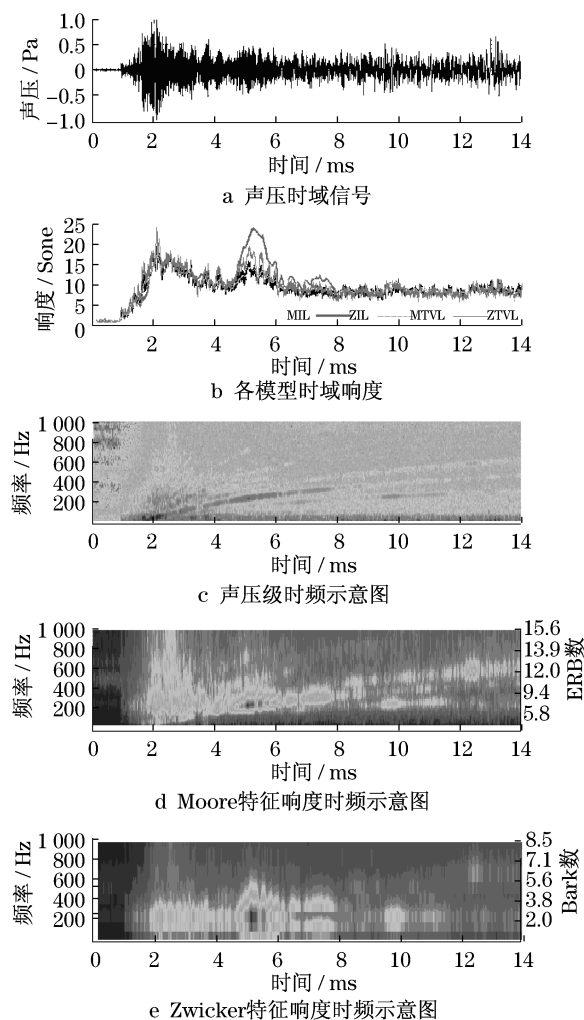


图3 电驱动汽车加速噪声响度分析

Fig.3 Loudness analysis of acceleration noise of electric vehicle

通过以上分析,得到瞬态响度模型对扫频噪声的适用性结论:①当扫频噪声频率成分、幅值变化较快时,瞬时响度与时变响度偏差较大,瞬时响度模型不适用;相反,若噪声频率成分、幅值变化较慢,4 种响度模型均适用. ②Moore 特征响度能清晰反映噪声来源,而 Zwicker 特征响度由于 500 Hz 以下频率

分辨率较低而不利于噪声源识别.

3.4 瞬态响度模型适用性分析总结

通过瞬态响度幅值分析、特征响度时频分析及结合尖锐度的综合分析方法,比较 4 种模型对 3 种典型噪声的计算结果,得到不同响度模型对具有不同特征噪声的适用性分析结论,见表 2.

表 2 瞬态响度模型适用性分析  
Tab.2 Applicability of instantaneous loudness models

响度模型		稳态噪声	冲击噪声	扫频噪声
瞬 时 响 度	ZIL	适用,但计算值偏小,离散度较大	(1)ZIL,MIL 结果近似,但相比时变响度误差较大,不适宜作响度评价方法 (2)瞬时响度对声压变化灵敏度高,可用于冲击噪声微过程分析	(1)当扫频噪声频率成分、幅值变化较快时,ZIL,MIL 均不适用 (2)当扫频噪声频率成分、幅值变化较慢时,ZIL,MIL 均适用,ZIL 偏差稍大
	MIL	平均响度值居中,响度值离散程度较小,适用		
	ZIL 特征响度	特征响度能量分布集中,但频率分辨率低	特征响度能量分布集中,两者时频分辨率近似	特征响度能量分布清晰,但 500 Hz 以下分辨率较低
	MIL 特征响度	特征响度能量分布集中,频率分辨率较高		特征响度能量分布清晰
时 变 响 度	ZTVL	平均响度值最大,响度值离散程度较小,适用	ZTVL,MTVL 两者变化规律一致,但存在偏差,两者正确性有待验证	ZTVL,MTVL 在噪声频率成分、幅值变化较快处,存在偏差,两者正确性有待验证
	MTVL	平均响度值居中,响度值离散程度较小,适用		

4 结论

(1) 计权声压级,对时变响度计算的误差来自计算机理,不能准确评价时变响度;Stevens 响度对信号频率成分有限制,不适宜准确评价时变响度.

(2) 噪声频率成分、幅值随时间变化越慢,4 种模型瞬态响度结果越接近,但 Zwicker 瞬时响度离散程度最大,如稳态噪声和缓变扫频噪声;噪声频率成分、幅值变化越快,Zwicker,Moore 时变响度偏差越大,如冲击噪声.

(3) 瞬时响度模型对响度变化灵敏度较高,有助于分析冲击噪声发生机理与微过程的噪声源识别与机理分析.

(4) 特征响度时频分布清晰反映噪声来源,较声压级时频分布能量分布集中;Zwicker 特征响度频率分辨率在 500Hz 以下较低.

参考文献:

[ 1 ] Zwicker E, Fastl H. Psychoacoustics: facts and models [M]. Berlin: Heidelberg, New York: Springer, 2007.  
[ 2 ] International Organization for Standardization. ISO 532 Acoustics-method for calculating loudness level[S]. Geneva: [s. n. ], 1975.  
[ 3 ] Deutsches Institut Für Normung E. V. DIN 45631 Procedure for calculating loudness level and loudness [S]. Berlin: [s. n. ], 1991.

[ 4 ] American National Standards Institute. ANSI S3. 4 – 2005 Procedure for the computation of loudness of steady sounds[S]. Washington: American National Standards Institute, 2005.  
[ 5 ] Zwicker E. Procedure for calculating loudness of temporally variable sounds [J]. Journal of Acoustic Society of America, 1977, 62(3): 675.  
[ 6 ] Richard J Fridrich. Investigating calculated loudness ISO 532 for evaluating impulsive sounds[R]. [S. l. ]; SAE, 1991.  
[ 7 ] Blommer M, Otto N. Calculating the loudness of impulsive sounds of impulsive sounds[R]. [S. l. ]; SAE, 1995.  
[ 8 ] Glasberg R, Moore C J. A model of loudness applicable to time-varying sounds[J]. Journal of Audio Engineering Society, 2002, 50(5): 331.  
[ 9 ] Skovenborg E, Nielsen S H. Evaluation of different loudness models with music and speech material [C] // Proceedings of the AES 117th Convention. San Francisco: Audio Engineering Society, 2004: 376 – 409.  
[10] Zwicker E, Fast H, Widmann U. Program for calculating loudness according to DIN 45631 (ISO 532B) [J]. Journal of Acoustic Society of Japan, 1991, 12(1): 39.  
[11] Moore C J, Glasberg R, Thomas Baer. A model for the prediction of thresholds, loudness, and partial loudness [J]. Journal of Audio Engineering Society, 1997, 45(4): 224.  
[12] Head Acoustics. Loudness and sharpness calculation with artemis[R]. Herzogenerath: Head Acoustics, 2006.  
[13] 于增亮, 张立军, 孙北. 轮毂电机驱动电动微型车车内噪声道路试验分析[J]. 上海汽车, 2009(8): 12.  
YU Zengliang, ZHANG Lijun, SUN Bei. Road test analysis of interior noise of wheel-hub motor driven micro electric vehicle [J]. Shanghai Auto, 2009(8): 12.