

强噪声环境下高速列车内语言清晰度评价与分析

鞠龙华, 葛剑敏

(同济大学 物理科学与工程学院, 上海 200092)

摘要: 为了对高速列车车内强噪声环境下的语言清晰度进行定量分析, 利用最新语言传输指数间接测量方法及其与汉语语言清晰度的关系, 得到不同运行速度和语音声级下车内不同位置的语言清晰度。结果表明, 受电弓下部车内位置语言清晰度状况最差; 该位置的语言清晰度随速度呈线性规律变化, 随语音声级呈二次非线性规律变化。采用多元非线性回归分析, 建立以语音声级和列车运行速度为自变量的车内语言清晰度的关系式。试验测试结果与计算结果的标准差为 1.75%, 拟合优度为 0.963, 表明该关系式可以较好地模拟三者之间的相关关系。与基于语言清晰度指数的评价方法相比较, 该评价方法所需的客观参量测量更简单, 更具应用价值。

关键词: 高速列车; 语言清晰度; 语言传输指数; 运行速度; 语音声级

中图分类号: U270.1⁺6

文献标志码: A

Evaluation and Analysis of Speech Intelligibility in High-speed Train Compartments Under Strong Noise Environment

JU Longhua, GE Jianmin

(School of Physical Science and Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: For the quantitative analysis of the speech articulation in high-speed train compartment under strong noise environment, the speech articulation was achieved in different positions of high-speed train compartments under different speeds and speech levels by using the relationship between Chinese speech articulation and the speech transmission index (STI) according to IEC 60268-16(2011). The results show that the interior location below the pantograph is the weakest position for speech articulation. In addition, at this position speech articulation changes with speed linearly rule and with speech level quadratic nonlinearly. Then, by using multivariate nonlinear regression analysis, the relational expression of interior speech

articulation, speed and speech level was established. The standard deviation between the test results and the curve was 1.75% and the coefficient of determination R^2 was 0.963, which indicates that the expression can well simulate the relationship among them. Compared with the evaluation method based on speech transmission index, the objective parameter of this evaluation method is simpler and this method has more application values.

Key words: high-speed train; speech intelligibility; speech transmission index; running speed; speech level

随着列车速度不断提升, 车内声品质问题越来越突出。车内嘈杂声环境不但降低乘客舒适度, 也会影响车内公共广播系统发布重要信息的准确传达, 例如旅行信息、注意事项通知、安全信息广播、紧急广播等。因此, 语言清晰度不仅是车内声品质的重要评价指标, 还是评价列车是否能带给乘客便利、保证乘客生命财产安全的基本要求。

通过文献调研发现, 关于列车车内语言清晰度的研究主要针对列车停靠站或低速运行时的车内低噪声环境开展。在这种噪声环境下, 研究人员更为关注的是语言私密性问题, 即避免说话声影响到其他乘客^[1-4]。同样, 针对车内广播系统语言清晰度问题, Ryota Shimokura 等^[5]从列车车厢内的声场特性出发, 利用相对声级、早期衰减时间、明晰度、语言传输指数和双耳互相关系数等评价了不考虑列车运行噪声情况下的车内语言清晰度状况。通过前期研究发现, 我国现行高速列车车内噪声级最大可达 80 dB(A)^[6], 而关于车内如此强噪声影响下的语言清晰度问题的研究鲜有报道。此外, STI (speech transmission index) 作为一个可以充分反映室内声场特性和信噪比对语言清晰度影响的客观评价参量^[7-8], 不失为一个用作高速列车内语言清晰度评价

收稿日期: 2016-07-26

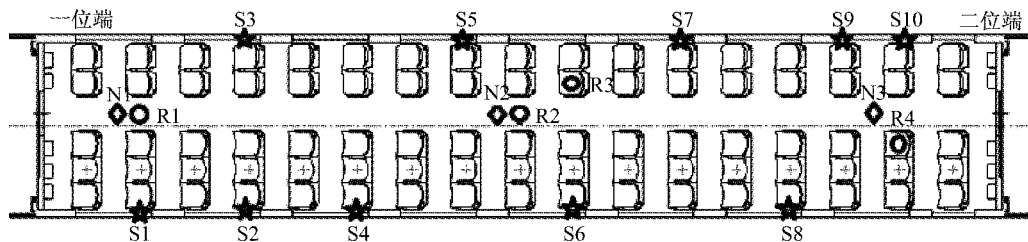
基金项目: 国家重点研发计划(2016YFB1200500)

第一作者: 鞠龙华(1988—), 男, 博士生, 主要研究方向为噪声与振动控制。E-mail: longhua1988@yeah.net

通讯作者: 葛剑敏(1963—), 男, 教授, 博士生导师, 工学博士, 主要研究方向为噪声与振动控制。E-mail: jmge_ae@163.com

的可靠指标.但在实际测量过程中发现,由于测量标准对声信号处理、测试过程和数据处理要求严格,致使该方法对测试人员和仪器提出了较高的要求,也因此限制了其在实际工程应用中的推广.

为了解决以上两个问题,且考虑到车内噪声环境随列车运行速度变化的特点,本文在研究过程中引入两个便于测量的参量——语音声级和运行速度.首先,以我国某型高速动车组为研究对象,利用最新版 IEC 60268-16(2011)规范中所推荐的基于房间脉冲响应的 STI 间接测量方法^[9],对其线路运行时车内噪声和列车静止时的脉冲响应进行测量,得到不同运行速度和语音声级下的 STI,并基于 STI 与汉语语言清晰度的关系,获得不同语音声级和运行速度下的语言清晰度.进一步研究车内语言清晰度随列车语音声级和运行速度的变化规律,并建立基于语音声级和列车运行速度的车内语言清晰度评价关系式.



☆表示声源位置 S1~S10;○表示脉冲响应测点 R1~R4;◇表示噪声测点 N1~N3

图1 车厢内脉冲响应测量时的声源、接收点及线路运行时噪声测点分布

Fig.1 Configurations of sound sources and receiver positions during impulse response measurement and receiver positions during field test

1.2 脉冲响应测量

1.2.1 声源及接收点的布置

由于噪声测试中的2节车厢内部布置基本一致,所以本次脉冲响应测量选择在该型动车组列车的受电弓车厢进行.其内部尺寸为长17.6 m、宽2.9 m、高2.2 m,车厢内两侧分别布置2排座椅;声源(S1~S10)分别位于车厢内10个广播扬声器位置,4个接收点(R1~R4)分别位于车厢前、中、后位置,如图1所示.

1.2.2 测量设定

鉴于不同型号列车中所采用广播系统扬声器频响特性的差异影响车内声环境语言清晰度的评价,本次测量中使用 B&K 4292 型球面声源.声源高度距离列车地板 1.6 m.接收点使用 B&K4189 型传声器.本次研究模拟坐在座位上的乘客,所以设置接收点高度为距离列车地板 1.2 m.数据采集设备使用 B&K Pulse 3560-C 型数据采集系统.

1 试验测量

1.1 噪声测量

本次噪声测量对象为我国某型高速动车组的2节二等座车厢(包括受电弓和非受电弓车厢).线路条件为高速铁路,无缝、60 kg·m⁻¹钢轨,轨面状况良好,混凝土轨枕,平直、路堤线路.试验用设备包括 B&K Pulse 3560-C 型数据采集系统、数据记录处理系统、B&K4189 型传声器、前置放大器、测试数据延长线、校准器、稳压电源等.噪声测点布置如图1所示,在受电弓车厢中,布置了受电弓下部的车内 N1 测点及车厢中部的 N2 测点;在非受电弓车厢中,布置于车厢前、中、后3个位置对应的 N1~N3 测点,测点距地面高度 1.2 m.测试内容为当动车组列车分别以 200,250,300,350 km·h⁻¹ 恒定速度运行时进行噪声数据连续采集,采集时间为 15 s.

本次测量中利用历时 20 s 的 63 Hz~1.4 kHz 的正弦扫频信号来获得脉冲响应^[10].将声源分别布置在 10 个扬声器位置处,测量得到 10 组脉冲响应.然后,利用每组发声信号与接收信号之间时间差的不同,计算合成 10 个声源位置同时发声时 4 个接收点处的脉冲响应.

2 语言清晰度计算

2.1 语言清晰度计算说明

20 世纪 70 年代,Houtgast 等^[11]从室内声学中引入调制转移函数(modulation transfer function, MTF)概念,提出通过测量声音传输系统的调制转移函数得到 STI. STI 提出后,Houtgast 等^[12]研究了 11 个语种的语言清晰度与 STI 的相关性以及不同语言之间语言清晰度差异,结果表明 STI 与这 11 种语言的相关性很高.因此,STI 可以用于不同语种

语言清晰度评价. 20 世纪 90 年代开始, 鉴于汉语是与西方语言不同的声调语言, 国内学者着手开展 STI 与汉语语言清晰度在某种特定测试条件下的相关性研究^[13-18]. 通过多年研究发现, STI 可以较好地预测和评价不同条件下室内汉语语言清晰度, STI 值随语言清晰度增长呈单调递增趋势^[17-18].

本文中 STI 的计算流程如图 2 所示. 其中, MTF 根据 Schroeder 提出的方法^[19], 通过声传输系统的脉冲响应计算得到, 计算公式为

$$m(f_m) = \frac{\left| \int_0^\infty h(t)^2 e^{-j2\pi f_m t} dt \right|}{\int_0^\infty h(t)^2 dt} \cdot (1 + 10^{-R_{SN}/10})^{-1} \quad (1)$$

式中: $m(f_m)$ 为调制转移函数; $h(t)$ 为脉冲响应; f_m 为调制频率, Hz; R_{SN} 为信噪比, dB. 式中的信噪比为测点位置接收到的语言信号各倍频带语音声级与相应倍频带噪声信号声压级的差值.

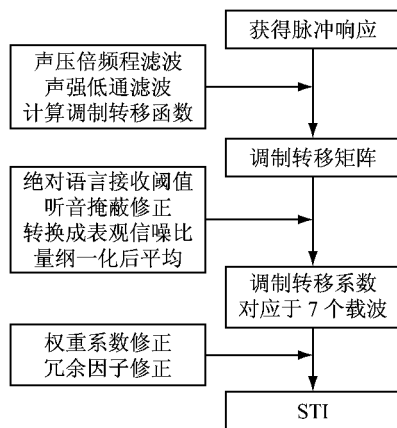


图 2 STI 间接测量法流程示意图

Fig.2 Flowchant of STI indirect measurement method

对于不同信噪比条件下 STI 与汉语语言清晰度之间关系, 文献^[18]进行了较为全面的研究. 为验证该研究结果在评价高速列车车内语言清晰度的适用性, 首先将 $350 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 速度工况下噪声测试结果与文献^[18]中所采用的具有男性标准语言谱特性的

噪声信号进行对比分析, 如图 3 所示. 由对比曲线可以看出, 车内环境噪声在不同频带内能量分布与男性标准语言谱的能量分布基本一致. 此外, 本文所研究的语音声级与车内噪声的信噪比也皆在 Zhu 等^[18]研究范围内, 所以利用文献^[18]中所提出的 STI 与汉语语言清晰度的关系, 得到了列车内的语言清晰度. Zhu 等^[18]的研究结果表明, STI 可以用于汉语语言清晰度评价, 并给出如下 STI 与汉语语言清晰度的相关关系:

$$I_A = 54.989 I_{ST}^3 - 238.1 I_{ST}^2 + 287.35 I_{ST} - 8.056 \quad (2)$$

式中: I_A 为语言清晰度; I_{ST} 为语言传输指数.

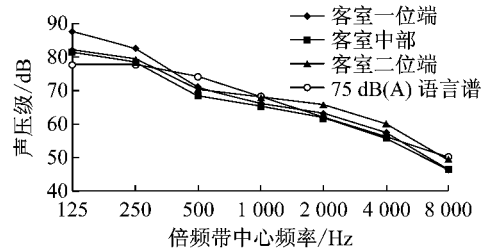


图 3 $350 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 运行速度条件下车内噪声与男性语言谱对比曲线

Fig.3 Comparison of train interior noise level under $350 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ and male speech level of 75 dB(A)

2.2 计算结果有效性验证

由于 2011 版本 IEC 60268-16 标准首次引入了语音声级的概念, 而现行 STI 测试软件仍按照 2003 版本标准计算, 计算不同语音声级下的 STI 值时需通过调整声源的大小获得, 因此在研究语言清晰度随语音声级变化规律时存在诸多不便. 所以本文按照 STI 间接测量法的计算流程, 参照 IEC 60268-16: 2011 规范, 利用 Matlab 对 STI 进行编程计算, 引入语音声级参数设定功能和新规范中的听觉掩蔽效应函数, 使不同语音声级下的 STI 值计算更快捷、更准确.

为了验证本文 Matlab 编程算法的有效性, 同样利用 12 版本商业软件 ODEON 计算了对应条件下的 STI 值, 对比结果如表 1~3 所示.

表 1 $300 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 运行速度、80 dB(A) 语音声级状况下不同测点 STI 计算验证

Tab.1 STI value of 80 dB(A) speech level of different measuring points at $350 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$

计算方法	STI 计算值						
	R1		R2		R3		R4
	非受电弓车厢	受电弓车厢	非受电弓车厢	受电弓车厢	非受电弓车厢	受电弓车厢	非受电弓车厢
ODEON 计算	0.66	0.49	0.72	0.65	0.69	0.61	0.70
Matlab 编程计算	0.65	0.48	0.73	0.64	0.71	0.61	0.68
差值	0.01	0.01	-0.01	0.01	-0.02	0.00	0.02

表 2 350 km·h⁻¹运行速度下测点 R1 不同语音声级状况 STI 计算验证

Tab.2 STI value of measuring point R1 of different speech levels at 350 km·h⁻¹

计算方法	STI 计算值					
	75 dB(A)		80 dB(A)		85 dB(A)	
	非受电弓车厢	受电弓车厢	非受电弓车厢	受电弓车厢	非受电弓车厢	受电弓车厢
ODEON 计算	0.50	0.33	0.61	0.47	0.68	0.58
Matlab 编程计算	0.49	0.32	0.60	0.45	0.68	0.57
差值	0.01	0.01	0.01	0.02	0.00	0.01

表 3 75 dB(A)语音声级状况下测点 R2 不同运行速度 STI 计算验证

Tab.3 STI value of measuring point R2 of 75 dB(A) speech level under different speed conditions

计算方法	STI 计算值							
	200 km·h ⁻¹		250 km·h ⁻¹		300 km·h ⁻¹		350 km·h ⁻¹	
	非受电弓车厢	受电弓车厢	非受电弓车厢	受电弓车厢	非受电弓车厢	受电弓车厢	非受电弓车厢	受电弓车厢
ODEON 计算	0.71	0.65	0.66	0.63	0.65	0.55	0.59	0.52
Matlab 编程计算	0.68	0.62	0.64	0.61	0.63	0.52	0.56	0.50
差值	0.03	0.03	0.02	0.02	0.02	0.03	0.03	0.03

为保证不同运行速度、位置和语音声级条件下语言清晰度分析结果的可信性,本节采用固定其中 2 个条件以另外 1 个条件为变量的方法,对 2 种算法中造成计算结果产生差异的 3 个因素(包括脉冲响应信号处理方法、语音声级参数设定功能和听觉掩蔽效应)进行分析.其中,表 1 和表 2 在特定环境噪声条件下不同语音声级和位置的 STI 值的最大差值为 0.02,表明调制值转移函数计算中脉冲响应信号处理方法的正确性和语音声级参数设定功能的有效性,为准确计算 STI 值打下了坚实基础.而表 3 中在特定位置和语音声级下随环境噪声变化的 STI 值的差异较大,主要是由于编程算法中考虑了环境噪声不同频带之间的听觉掩蔽效应造成的.这体现出新标准可以更充分地考虑车内强噪声环境对语言清晰度影响的优势.通过以上分析表明本文 STI 编程计算结果的有效性.

3 计算结果分析

由 Matlab 编程计算得到不同运行速度条件下,车内不同位置处接收到不同声级的语音信号时所获得的 STI 值及语言清晰度(AI),计算结果如表 4~7 所示.研究发现男性语言的清晰度状况比女性的差^[9],因此本文采用男性标准语言谱进行计算.

由表 4 和表 5 可以看出:随着高速列车车速的提升,STI 值明显下降,语言清晰度逐渐变差,车内不同位置语言清晰度差异变大.由表 4 可知,在受电弓车厢中,当列车以 350 km·h⁻¹速度运行时,在受电弓下方车内位置,80 dB(A)的语音声级仅能获得 78%的语言清晰度.由图 5 计算结果可知,此运行速

表 4 80 dB(A)语音声级状况下受电弓车厢 STI 值和 AI 值

Tab.4 STI and speech articulation at a speech level of 80 dB(A) in the pantograph compartment

测点	200 km·h ⁻¹		250 km·h ⁻¹		300 km·h ⁻¹		350 km·h ⁻¹	
	STI	AI/%	STI	AI/%	STI	AI/%	STI	AI/%
R1	0.60	90.5	0.56	87.8	0.48	81.1	0.45	78.0
R2	0.70	95.3	0.69	94.9	0.64	92.7	0.61	91.1
R3	0.70	95.3	0.69	94.9	0.61	91.1	0.59	89.9

表 5 85 dB(A)语音声级状况下受电弓车厢 STI 值和 AI 值

Tab.5 STI and speech articulation at a speech level of 85 dB(A) in the pantograph compartment

测点	200 km·h ⁻¹		250 km·h ⁻¹		300 km·h ⁻¹		350 km·h ⁻¹	
	STI	AI/%	STI	AI/%	STI	AI/%	STI	AI/%
R1	0.67	94.1	0.64	92.7	0.59	89.9	0.57	88.6
R2	0.75	96.7	0.75	96.7	0.71	95.6	0.70	95.3
R3	0.77	97.1	0.77	97.1	0.71	95.6	0.69	94.9

表 6 75 dB(A)语音声级状况下非受电弓车厢 STI 值和 AI 值

Tab.6 STI and speech articulation at a speech level of 75 dB(A) in the non-pantograph compartment

测点	200 km·h ⁻¹		250 km·h ⁻¹		300 km·h ⁻¹		350 km·h ⁻¹	
	STI	AI/%	STI	AI/%	STI	AI/%	STI	AI/%
R1	0.67	94.1	0.60	90.5	0.55	87.1	0.49	82.0
R2	0.68	94.5	0.64	92.7	0.63	92.2	0.56	87.8
R3	0.66	93.7	0.60	90.5	0.60	90.5	0.52	84.7
R4	0.63	92.2	0.57	88.6	0.55	87.1	0.48	81.1

表 7 80 dB(A)语音声级状况下非受电弓车厢 STI 值和 AI 值

Tab.7 STI and speech articulation at a speech level of 80 dB(A) in the non-pantograph compartment

测点	200 km·h ⁻¹		250 km·h ⁻¹		300 km·h ⁻¹		350 km·h ⁻¹	
	STI	AI/%	STI	AI/%	STI	AI/%	STI	AI/%
R1	0.73	96.2	0.68	94.5	0.65	93.2	0.60	90.5
R2	0.76	96.9	0.72	95.9	0.73	96.2	0.67	94.1
R3	0.77	97.1	0.72	95.9	0.71	95.6	0.64	92.7
R4	0.75	96.7	0.70	95.3	0.68	94.5	0.62	91.7

度下语音声压级需提高至 87 dB(A), 车内声环境才能达到 90% 的优质语言清晰度. 通过表 6 和表 7 可知, 在非受电弓车厢中, 车厢两端位置的语言清晰度相对较差. 当语音声压级达到 80 dB(A) 时, 在 350 km · h⁻¹ 以下速度运行的列车内声环境均能达到 90% 的优质语言清晰度要求. 对比分析车内不同位置的语言清晰度状况可知, 受电弓下方位置语言清晰度问题最为严重.

为更直观地观测车内语言清晰度与列车运行速度以及语音声级的相关性, 以受电弓下方位置的语言清晰度为研究对象, 绘制了不同语音声级状况下车内语言清晰度随列车运行速度的散点关系图 and 不同速度条件下车内语言清晰度与语音声级的散点关系图, 如图 4 和图 5 所示. 图中给出了线性回归方程、多项式拟合曲线及其判定系数 R².

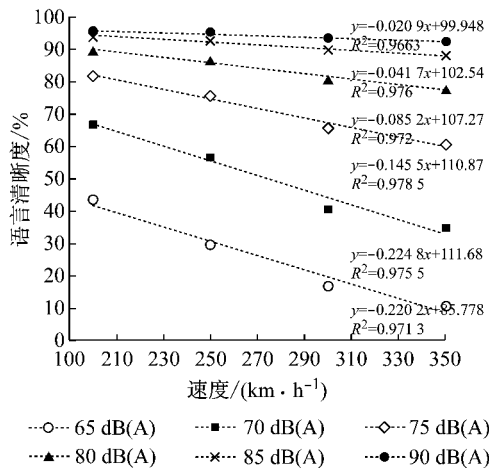


图 4 语言清晰度计算结果与列车运行速度的散点关系图
Fig.4 Speech intelligibility versus train running speed

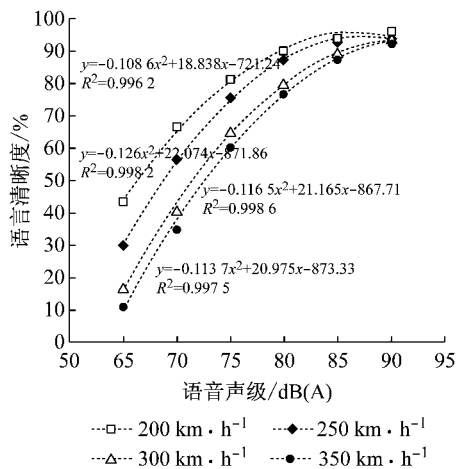


图 5 语音声级与语言清晰度计算结果的散点关系图
Fig.5 Speech intelligibility versus speech level

由图 4 和图 5 的相关性结果可知, 语言清晰度与运行速度呈线性相关关系, 与语音声级呈二次非线性相关关系. 因此构建了如下多元非线性回归模型:

$$I_A = (aS_L^2 + bS_L + c)v + dS_L^2 + eS_L + f \quad (3)$$

式中: I_A 为语言清晰度; a 、 b 、 c 、 d 、 e 、 f 为常系数; S_L 为语音声级, dB(A); v 为速度, km · h⁻¹.

依据最小二乘法进行多元非线性回归分析, 利用 Matlab 软件中 lsqcurvefit 函数对上述未知系数进行求解. 所得计算模型的判定系数 R² 为 0.963, 由该模型所得语言清晰度与由试验数据所得语言清晰度的标准差为 1.75%. 由此说明了车内语言清晰度与列车运行速度和语音声级的高度相关性. 本文所建立的车内语言清晰度多元非线性方程如下:

$$I_A = (-0.000181S_L^2 + 0.0385S_L - 2.008)v - 0.0739S_L^2 - 11.401S_L + 329.527 \quad (4)$$

与公式(2)中基于 STI 的评价方法相比, 该方法所需的客观参量测量更简单, 更具有实际应用价值. 在实际应用中, 利用声级计测得车内广播系统的语音声级, 由公式(4)即可预测不同运行速度条件下的车内语言清晰度状况. 另外, 通过设定目标语言清晰度, 可计算得到不同运行速度下相应位置所需达到的语音声级. 由此看出, 该评价方法对高速列车广播系统的验收及设计具有指导意义.

4 结语

高速列车车内语言清晰度是一个非常值得关注的问题, 本文基于最新的 STI 测量方法和 STI 与汉语语言清晰度的相关关系, 对高速列车不同运行速度下的车内语言清晰度状况进行了定量分析, 可以得出以下结论:

- (1) 随着列车运行速度的提升, 车内不同位置的语言清晰度差异变大.
- (2) 受电弓下方位置是车内语言清晰度最为薄弱位置, 当列车以 350 km · h⁻¹ 速度运行时, 语音声级需达到 87 dB(A), 该位置才能达到 90% 的优质语言清晰度.
- (3) 在受电弓下方车内位置, 语言清晰度随列车运行速度呈线性规律变化, 随语音声级呈二次非线性规律变化.
- (4) 建立了以运行速度和语音声级为自变量的车内语言清晰度关系式, 且拟合结果与试验测量结

果相一致.该评价方法较基于 STI 的评价方法所需的客观参量测量更简单,更具有工程应用价值.

参考文献:

- [1] KHAN M. Evaluation of acoustical comfort in passenger trains [J]. *Acta Acustica United with Acustica*, 2002, 88(2): 270.
- [2] KUWANO S, NAMBA S, OKAMOTO T. Psychological evaluation of sound environment in a compartment of a high-speed train [J]. *Journal of Sound and Vibration*, 2004, 277(3): 491.
- [3] MAFFEI L, MASULLO M, ALEXEEVA N, *et al.* The speech intelligibility aboard metros in different running conditions [J]. *Acta Acustica United with Acustica*, 2012, 98(4): 577.
- [4] JEON J, JANG H, HONG J. Evaluation of speech privacy in passenger cars of high-speed trains based on room acoustic parameters [J]. *Acta Acustica United with Acustica*, 2014, 100(4): 649.
- [5] RYOTA S, YOSHIHARU S. Evaluation of speech intelligibility of sound fields in passenger train compartments [J]. *Acoustical Science and Technology*, 2009, 30(5): 379.
- [6] 范蓉平,孟光,孙旭,等.基于心理声学响度分析的高速列车车内噪声评价[J].*振动与冲击*, 2005, 24(5): 46.
FAN Rongping, MENG Guang, SUN Xu, *et al.* Interior noise evaluation for high speed traveling train based on psychoacoustical loudness analysis [J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2005, 24(5): 46.
- [7] HOUTGAST T, STEENEKEN H. The modulation transfer function in room acoustics as a predictor of speech intelligibility [J]. *Journal of the Acoustical Society of America*, 1973, 54(2): 66.
- [8] HOUTGAST T, STEENEKEN H. A review of the MTF concept in room acoustics and its use for estimating speech intelligibility in auditoria [J]. *Journal of the Acoustical Society of America*, 1985, 77: 1069.
- [9] IEC. Sound system equipment-part 16: objective rating of speech intelligibility by speech transmission index; IEC 6026-16 [S]. Geneva: International Electrotechnical Commission, 2011.
- [10] BERKHOUT A, VRIES D, BOONE M. A new method acquire impulse response in concert halls [J]. *Journal of the Acoustical Society of America*, 1980, 68(1): 179.
- [11] STEENEKEN H, HOUTGAST T. A physical method for measuring speech-transmission quality [J]. *Journal of the Acoustical Society of America*, 1980, 67(1): 318.
- [12] HOUTGAST T, STEENEKEN H. A multi-language evaluation of the RASTI-method for estimating speech intelligibility in auditoria [J]. *Acta Acustica United with Acustica*, 1981, 83(4): 185.
- [13] 沈嵘.汉语普通话调制函数的实验研究[J].*应用声学*, 1989(5): 11.
SHEN Hao. Experimental study of modulation transfer functions for mandarin [J]. *Apply Acoustics*, 1989(5): 11.
- [14] KANG J. Comparison of speech intelligibility between English and Chinese [J]. *Journal of the Acoustical Society of America*, 1998, 103(2): 1213.
- [15] PENG J. Relationship between Chinese speech intelligibility and speech transmission index using diotic listening [J]. *Speech Communication*, 2007, 49(12): 933.
- [16] PENG J. Relationship between Chinese speech intelligibility and speech transmission index in rooms using dichotic listening [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2008, 53(18): 2748.
- [17] PENG J, BEI C, SUN H. Relationship between Chinese speech intelligibility and speech transmission index in rooms based on auralization [J]. *Speech Communication*, 2011, 53(7): 986.
- [18] ZHU P, MO F, KANG J. Relationship between Chinese speech intelligibility and speech transmission index under reproduced general room conditions [J]. *Acta Acustica United with Acustica*, 2014, 100(5): 880.
- [19] SCHROEDER M. Modulation transfer functions: definition and measurement [J]. *Acta Acustica United with Acustica*, 1981, 49(3): 179.