

高速列车透射噪声与结构噪声的分离

纳跃跃¹, 谢 翀²

(1. 北京交通大学 交通数据分析与挖掘北京市重点实验室, 北京 100044;

2. 中国科学院 力学研究所, 北京 100190)

摘要: 高速列车噪声是影响车内旅客舒适度和铁路沿线居民生活质量的重要因素, 如何有效的降低噪声是高速列车设计者们所关心的问题之一. 研究表明, 高速列车的车内噪声由透射噪声与结构噪声组成, 如何有效的从车内噪声中分离出这两种噪声成分将为列车的减振降噪设计提供一定的指导作用. 本文以高速列车实车噪声数据为研究对象, 首先运用多种数字信号处理的方法对高速列车噪声数据进行了分析, 总结了高速列车噪声的主要特点; 然后通过对列车静止时和运行时的噪声透射情形分别进行建模和分析, 指出可以利用车体的频响特性作为反映车体隔声性能的声学参数, 并提出了一种计算频响特性的简便算法; 最后, 利用该算法从实车噪声数据中计算出了车体的频响特性, 并在此基础上实现了透射噪声与结构噪声的分离.

关键词: 高速列车; 噪声; 频响特性; 噪声分离

中图分类号: U270.16; TB391.9 **文献标志码:** A

High speed train transmission noise and structural noise separation

NA Yueyue¹, XIE Chong²

(1. Key Lab of Transportation Data Analysis and Mining of Beijing, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China; 2. Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

Abstract: High speed train noise level is an important factor with respect to passenger comfort and life quality of residents along the railway. How to attenuate the noise level is an important research direction that train designers care about. Studies show that train interior noise is consist of transmission noise and structural noise. Separating these two kinds of components from their overall observations will provide further guide to high speed train noise reduction design. The research is based on the real world high speed train noise data. First, data are analyzed by different digital signal processing methods and some basic properties of the train noise signal are concluded. Then, by modeling and analyzing the noise transmission circumstances when train is stationary and moving, train body frequency response is used to measure the noise insulation quality, and an algorithm is proposed to calculate the frequency response conveniently. At last, train body frequency response is calculated according to the real world train noise data via the proposed algorithm, and the result is used to separate transmission noise and structural noise from the recorded noise data.

Key words: high speed train; noise; frequency response; noise separation

高速铁路具有运载能力大、运行速度快、运输效率高和能源消耗低等优点,在极大的减少了人们的旅行时间之外,高速铁路的建设还带动了铁路沿线地区的发展。然而,高速铁路在给中国带来巨大的经济效益和社会效益的同时也给我们带来了新的挑战:随着速度的提高,列车噪声将显著增大,这使得高速列车噪声成为了影响车内旅客舒适度和铁路沿线居民生活质量的主要因素,如何有效的抑制噪声成为了高速列车设计者们关心的问题之一^[1-2]。目前的研究通常认为高速列车噪声主要是由轮轨噪声、气动噪声、集电系统噪声和车体振动等因素,在中空铝合金型材、隔热和隔声等材料构成的车体中耦合而形成的综合效果^[1]。由于高速列车噪声的组成成分和混合方式较为复杂,研究难度较大,所以目前国内外大多采用的是“测量加仿真”的研究方法,研究重点在于测量和估计噪声的大小及定位噪声源的位置^[1-2],而对于高速列车噪声的组成成分、耦合方式和传播路径等机理性问题还缺乏深入研究。

高速列车的车内噪声^[3-4]是影响旅客舒适度的重要因素之一。在工程上,根据噪声产生途径的不同,又可以将车内噪声再细分为两种:第1种是由气动噪声、受电弓与接触线摩擦噪声、轮轨噪声等车外噪声透射或渗透进车内而产生的噪声,在本文中将这些噪声统称为透射噪声;第2种是由于轮轨行走激振、车体振动、集电系统激扰和车内设备运转等通过物理部件的振动而产生并传递到车内的噪声,在本文中将这些噪声统称为结构噪声^[5]。在高速列车减振降噪设计中,针对透射噪声和结构噪声采用的是完全不同的应对措施:为了降低透射噪声,采用的是增强车体隔声和吸声性能,并减少噪声渗漏的方法;为降低结构噪声,所采用的是减少和抑制结构振动的方法。所以,研究车内噪声中透射噪声和结构噪声的成分,将这两种噪声从测量得到的总噪声中分离出来将对高速列车的减振降噪设计起到一定的指导作用。然而,在实际测试过程中,测量得到的车内噪声是透射噪声和结构噪声相互叠加后的综合结果,并不能直接得到这两类噪声在总噪声中所占的比例。

为了研究车体的隔声性能,并计算从车外透射进车内的噪声大小,目前所采用的主要是基于透声系数和隔声量的方法^[6]。隔声量的实验室测量方法有多种,如声压法、冲击响应法和声强法等^[7],其中声强法属于目前公认的比较好的方法^[7],但是声强探头往往价格比较昂贵,且传感器构造比较复杂。使用透声系数与隔声量来描述高速列车车体隔声特性

的方法存在一定的局限性:¹传统隔声量测量方法的基本思想是在无声反射的环境中(如消声室中)对被测量材料发射已知的入射声,在材料的另一端测量穿过构件的透射声,通过对比隔声构件两边的测量值后得到隔声量。但对于高速列车来说,由于受到实验条件的限制,在进行实验室测量时往往只能对其中某块板材或某个构件进行测量,这与整车的效果可能会存在一定差异。^④由于旅客最终体验到的将是列车在线运行时的隔声效果,列车在线运行时的工况是实验室测量无法完全模拟的,所以在线测量的结果才能更加贴近实际。然而,如果在列车运行时进行测量,由于车内噪声除了包含透射噪声外还包含结构噪声,所以无法用现有方法进行简单对比后得出隔声量。^④隔声量所描述的物理意义与实际需求存在一定差异。隔声量重点考察的是构件的隔声性能,所以测量过程中为了提高精度应该尽量避免噪声渗漏的影响。然而,对于高速列车透射噪声的研究来说,重点考察从车外透射或渗透进车内的噪声大小,渗透噪声正是要研究的内容之一。

随着计算机和数字信号处理技术的发展,以及测试设备性能和精度的提高,使得用信号处理技术来计算并分析高速列车噪声成为可能^[8]。如果能用现代的数字信号处理方法从列车实际运行时的噪声数据中提取可以表征车体声学参数的特征将是十分有意义的。本文作者提出了一种方法用于计算车体的频响特性,并指出频响特性可以反映车体的隔声性能,并可以用来实现透射噪声和结构噪声的分离。

1 高速列车噪声的基本性质

在本文中所使用的高速列车噪声数据为通过声压传感器测量得到的声压数据,其单位为 Pa,信号采样率为 65 536 Hz,车速为 350 km/h。为了研究高速列车噪声的基本性质,我们选取了 5 组具有代表性的测点数据作为例子进行说明,对应的 5 个测点的位置分别为:测点 a:车体上表面受电弓下方测点;测点 b:车顶内表面附近测点;测点 c:车内距地板 1.2m 高处标准测点;测点 d:车内设备箱附近测点;测点 e:车外下表面测点。所有测点都部署在列车上,即在测量过程中测点与列车保持相对静止。在本节中,我们将通过一些信号处理的手段来对高速列车噪声进行分析,了解高速列车噪声的基本性质,并总结出一些规律。

1.1 时频分析

时频变换又称为短时傅里叶变换(Short Time Fourier Transform, STFT),该操作根据下式依次对

信号进行分段和加窗, 并进行傅里叶变换^[9]

$$S(f, \tau) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} s(n) \varphi(n - \tau) e^{-j2\pi f n / N} \quad (1)$$

式中: s 表示原始时域信号; φ 表示窗函数, 一般使用的为 Hanning 窗^[9]; N 为 FFT 的长度; τ 代表与时间有关的坐标. 通过时频变换进行分析不仅能看出信号的频谱, 还能看出频谱随时间的变化规律.

图 1 中给出了测点 a 和测点 b 的时频图, 其中测点 a 代表车体外表面的情况, 而测点 b 代表车内的情况. 图中黑色越深表示幅度越大, 白色表示值接近于 0.

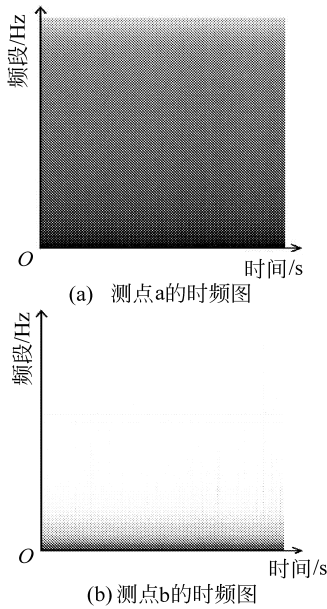


图 1 车内与车外噪声的时频图

Fig. 1 Spectrograms of train interior and exterior noise

从图 1 中可以看出以下规律: ① 噪声频谱随时间变化不明显, 说明在稳定工况下高速列车的噪声属于平稳信号. ④ 车外噪声以低频成分为主, 但中高频成分也很丰富, 这说明车外噪声接近于“白

噪声”的情形. ④ 车内噪声较车外有显著减少, 其成分以低频为主, 中高频成分衰减尤其明显, 即车内噪声接近于“粉红噪声^[10]”的情形. 另外, 通过对比图 1(a) 与图 1(b) 可以推测得知, 车外噪声的中高频成分很难穿透车体进入车内, 然而, 由车外进入车内的低频噪声在车内噪声中所占的比例还无法得出.

1.2 自相关性分析

结构噪声在高速列车噪声中占有相当一部分的比例. 由于机械振动, 设备运转会呈现出物理设备本身的固有频率, 所以, 结构噪声中也蕴含了对应物理设备固有频率的相关信息, 即结构噪声也应该呈现一定的周期性. 然而, 由于存在诸多干扰, 很难从结构噪声的波形或频谱中直接看出设备的固有频率.

相关性(Correlation)分析^[11-13]衡量的是两个信号的相关程度, 或相似程度, 两个信号间的相关性越高, 则它们就越相似. 相关性计算广泛用于雷达、声纳、通信、地质学等科学和工程领域中. 两个信号的相关性可以按下式进行计算为

$$r_{xy}(l) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} x(n)y(n-l) \quad (2)$$

式中 x 和 y 表示两个时域信号, 如果某一信号和其自身计算相关性则称为自相关性 (Autocorrelation)^[11], 表示的是信号和自身延迟的相似程度. 根据文献[11]中的分析, 测量信号的自相关序列具有与原始信号 x 较为接近的周期, 且减弱了噪声的干扰, 所以从中能揭示出原信号的周期信息.

图 2(a) 和图 2(b) 为车内典型位置处噪声的自相关序列及其频谱. 可以看出其中的自相关序列明显呈周期性变化, 对应的频谱图显示该位置处的噪声具有 18 Hz 左右的固有频率, 该频率与车体振动的固有频率比较接近, 说明此测点处的噪声与车体振动有很强的联系.

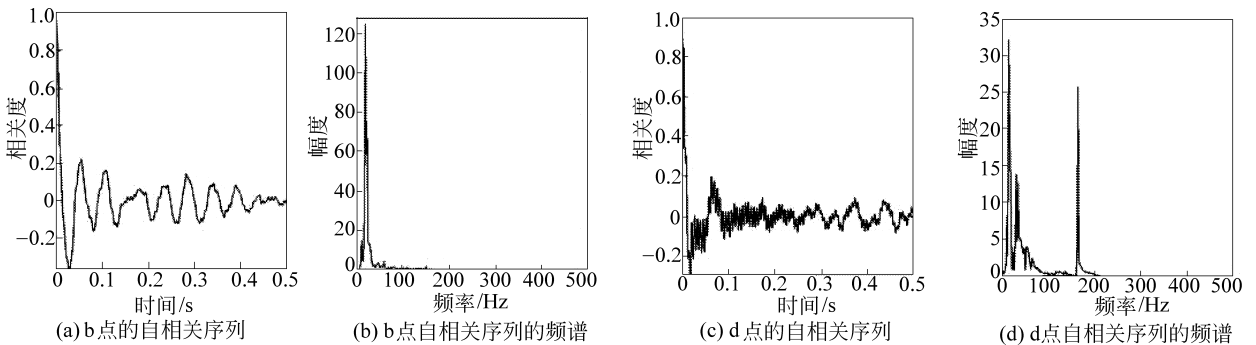


图 2 测点 b 和 d 的自相关序列及其频谱

Fig. 2 Sensor b and d s autocorrelation sequence and corresponding spectrum

对于设备箱附近的测点, 由于有其他设备运转的影响, 所以对应的噪声的固有频率也有所不同. 例

如图 2(c) 和图 2(d) 所示的测点中, 通过计算该位置处噪声的自相关性, 可以推测出有设备正在以 164

Hz 左右的固有频率运行.

图3(a)和图3(b)给出的是测点a处噪声的自相关性.可以看出,车体上表面的噪声并无明显的相关性,说明该位置处的噪声信号的随机性较强,不能观察到明显的周期现象.由于随机性正是气动噪声的典型特征,所以可以推断测点a处的噪声成分以

气动噪声为主,基本不包含结构噪声.作为对比,图3(c)和图3(d)中给出了车外下表面测点信号的自相关性.同样是车外噪声,位于车体下表面处的噪声由于受到车下设备的影响,所以从噪声的自相关性分析中仍然可以观测到一定的周期现象.

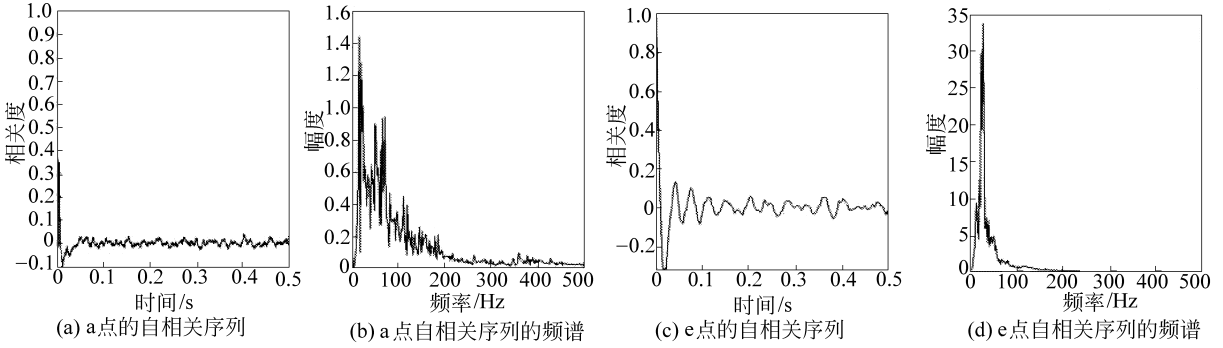


图3 测点a和e的自相关序列及其频谱

Fig.3 Sensor a and e's autocorrelation sequence and corresponding spectrum

综合上述分析,我们对高速列车噪声的基本性质做出以下总结:在稳定工况下,高速列车的噪声接近于平稳的高斯噪声,车外噪声在各个频段上的成分都比较丰富,接近于高斯白噪声的情形,而车内噪声则以低频成分为主,且呈现出一定的周期性.

2 车体频响特性的测量

在本文中,我们将稳定工况下车外噪声透射进车内的过程近似看作一个线性时不变系统的作用过程,所以车体的隔声作用可以由对应的线性时不变系统的频响特性或冲击响应表示(冲击响应的傅里叶变换称为频响特性^[11]).针对高速列车噪声数据的特点,以及车体隔声问题的特点,本文中提出了一种方法用来从测量数据中计算车体的频响特性及冲击响应,最后利用所得结果来进行透射噪声和结构噪声的分离.

2.1 列车静止时的情形

为了计算车体的频响特性,首先我们将问题简

化,考虑列车静止时的情形,此时的实验环境如图4(a)所示.在实验过程中需要用到一个人工噪声源用于模拟车外噪声,以及两个分别部署在车内和车外相对位置的声压传感器,两传感器所采集到的信号必须同步.在测量过程中,模拟噪声源可以播放高斯白噪声,或者列车在线运行时车外对应测点采集到的噪声.在图4(a)的实验环境中,由于列车处于静止状态,不存在结构噪声的影响,所以测点w得到的信号相当于车体外表面的噪声,测点s得到的信号为车外噪声穿透和渗漏进车体的噪声,即透射噪声.图4(b)图为将图4(a)的情形抽象之后的框图结构,该系统的输入为测点w的信号,输出为测点s的信号,而系统的传递函数T就反映了车体对输入信号的作用,即车体的隔声效果.在测量过程中,测点w和测点s的信号已知,而系统的传递函数T未知,我们的目的就是要通过对比测点w和测点s的信号,从而估计出传递函数T.

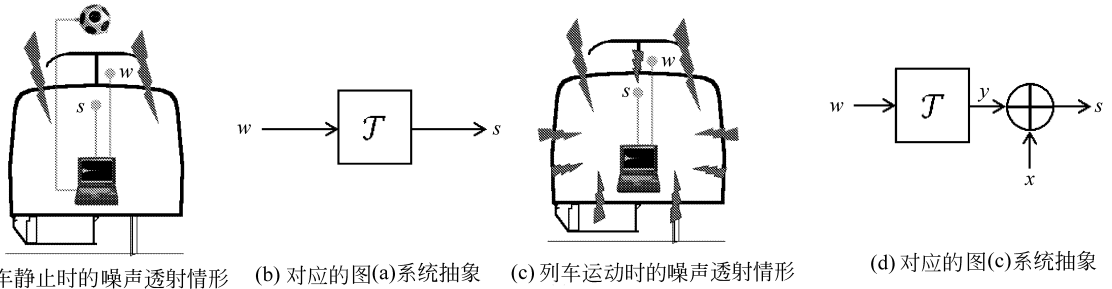


图4 列车静止时及运动时的噪声透射情形及系统抽象

Fig.4 Noise transmission and its abstraction when train is stationary and moving

由于处于稳定工况下, 所以图 4(b) 中的系统可以近似看作线性时不变系统^[11], 所以系统的传递函数 T 可以由该系统的冲击响应 h 或频响特性 H 表示, 系统的输出 s 可以由对应的输入 w 与冲击响应 h 卷积得到^[11], 即

$$s = w \times h \quad (3)$$

式中 \times 表示卷积操作。

试想如下情形: 假设只给模拟噪声源一个冲击信号, 则该冲击信号将经过延迟、透射和回响后到达测点 s , 但由于没有持续的能量供给, 信号将逐步衰减, 直至消失。换句话说, 当输入 w 为冲击信号时, 输出 s 为该系统的冲击响应, 而该冲击响应属于有限长冲击响应 (Finite duration Impulse Response, FIR)^[11]。

用于求线性时不变系统冲击响应或频响特性的方法有很多, 大致可以将它们分为时域法和频域法两种: 时域法直接在时域信号上操作并计算系统的冲击响应, 其典型算法例如经典的最小二乘法, 以及基于子空间的方法^[14]; 频域法首先利用傅里叶变换将信号变换到频域, 接着在频域信号上计算系统的频响特性, 其典型算法例如文献[15-16]。频域法求系统频响特性的问题通常也被称为 System Identification 问题。

对于求高速列车车体频响特性这个具体问题来说, 由于信号数据量大, 信噪比低, 而传统的计算方法计算量较大, 或有多种参数需要调整, 所以往往不能满足实际的需求。本文根据高速列车噪声信号的特点, 在文献[15]中算法的基础上进行改进, 提出了一种简单而有效的车体频响特性估计方法。

输入: 测点信号 w 和 s , FFT 的长度 N , N 应远大于冲击响应 h 的长度。

输出: 车体的频响特性 H 。

1) 将信号 w 和 s 按每段长度 N , 以及式(2) 分别做短时傅里叶变换, 得到每段的频域信号 $W(0), \dots, W(T-1)$ 和 $S(0), \dots, S(T-1)$, 其中 T 表示信号段的总数, $W(\tau)$ 和 $S(\tau)$ 都为长度为 N 的向量, τ 表示信号段的序号。

2) 根据卷积定理, 有 $S(\tau) = W(\tau) \times H$, 所以对于每个信号段 τ 来说, 计算 $H(\tau) = S(\tau) \oslash W(\tau)$, 其中 \times 表示信号点对点相乘操作, \oslash 表示信号点对点相除操作。

3) 计算 $H = E\{H(\tau)\}$ 并返回 H , 其中 $E\{\cdot\}$ 表示求期望操作。

该算法的基本思想在于: 有限长冲击响应的频响特性同样可以由有限长 FFT 求出, 在短时傅里叶

变换将时域卷积转换为频域点积的过程中, 频响特性对于每段频域信号都保持不变^[11], 所以在分别计算每段信号的频响特性之后可以通过求期望来得到最终的结果。

由于在实际计算过程中信号的长度有限, 所以算法第 3 步的求期望操作简化为求平均操作。另外, 由于算法的第 2 步中包含了除法, 为防止除数接近于 0 而使得计算结果不稳定的情况, 在实际计算过程中可以采取如下措施: 在算法第 2 步中对向量 $H(\tau)$ 的每个元素 $H(f, \tau)$ 分别进行计算, 当某个 $W(f, \tau)$ 接近于 0 时忽略该项即可, 最后在第 3 步中根据各项统计的结果分别求 $E\{H(f, \tau)\}$, 最后再输出 H 。

2.2 列车运行时的情形

在 2.1 节针对的只是列车静止时的情形, 而通过本节的推导可以证明, 该算法同样适用于从列车运行时的数据中计算车体频响特性。列车运行时的情况要比静止时更加复杂, 这是因为除了从车外透射进车内的噪声之外, 车内还包含了由振动产生的结构噪声。通过传感器测量得到的是所有因素的综合结果, 无法从中区分出透射噪声与结构噪声, 该情形如图 4(c) 所示。

图 4(d) 图为对列车运行时环境的系统抽象, 其中 y 表示透射噪声, x 表示结构噪声, \oplus 表示信号点对点相加操作, 透射噪声与结构噪声叠加后得到了测点 s 的信号。在实际线路测试中, 只有 w 、 s 已知, 而 T 、 x 、 y 均未知。值得注意的是, 由于车内结构噪声与车外噪声是由两个不同的物理过程产生的, 所以可以认为这两个物理过程是独立的, 即 w 与 x 统计独立(从图 3(a) 与图 2(a) 也可以看出, 两种信号的性质明显不同, 所以可认为两者独立)。

将图 4(d) 的框图结构转化为公式的形式就得到了下式为

$$s = w \times h + x \quad (4)$$

两边同时进行傅里叶变换得

$$S = F(w \times h + x) = W \oplus H + X \quad (5)$$

式中 $F(\cdot)$ 表示傅里叶变换操作。根据 2.1 节算法的第 2 步, $S(\tau) \oslash W(\tau)$ 并没有得到频响特性 $H(\tau)$, 而是得到了下式。将下式进行整理后可以看出, 真正的系统频响特性应该由下式计算得出

$$S(\tau) \oslash W(\tau) = H(\tau) + X(\tau) \oslash W(\tau) \quad (6)$$

$$H = E\left\{S(\tau) \times \frac{1}{W(\tau)}\right\} - E\left\{X(\tau) \times \frac{1}{W(\tau)}\right\} \quad (7)$$

式(7)中等号右边的第 1 个期望就为 2.1 节算法的

输出结果. 由于 w 与 x 统计独立, 其频域信号 W 与 X 同样独立, $1/W$ 与 X 也独立, 所以对于求期望操作来说可将式(7)转化为下式

$$H = E\{S(\tau) \times \frac{1}{W(\tau)}\} - E\{X(\tau)\} \times E\{\frac{1}{W(\tau)}\} \quad (8)$$

结合测试信号的实际性质, 由于 w 与 x 为噪声信号, 反映的是声压的波动值, 且噪声具有一定的高斯性, 所以有 $E(w) = E(x) = 0$. 可以证明, 当信号 x 的长度 L 趋于无限长时, $E\{X(\tau)\} = 0$, 所以式(8)被化简为下式

$$H = E\{S(\tau) \times \frac{1}{W(\tau)}\} \quad (9)$$

式(9)与 2.1 节算法的输出相同.

通过以上推导可以说明, 使用列车在线运行的数据进行计算时, 只要测试信号足够长, 按照该算法同样能够得到车体的频响特性 H , 再进行傅里叶逆变换后可得到车体的冲击响应 h . 当求出车体的频响特性和冲击响应之后, 根据图 4(d) 中的模型, 利用下式可以得到透射噪声 y 为

$$y = w \times h \quad (10)$$

利用下两式可以得到结构噪声 x

$$x = s - w \times h = s - y \quad (11)$$

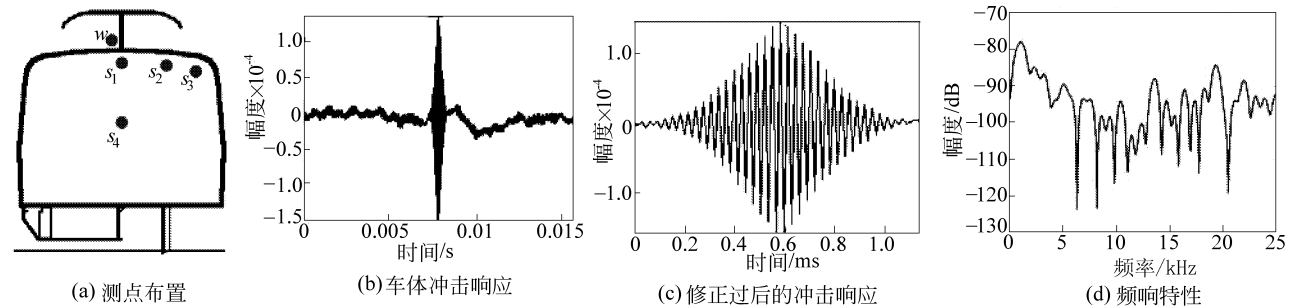


图5 列车噪声分离实验

Fig. 5 Train noise separation experiment

在计算过程中, 首先利用 2.1 节的算法计算得到车体的频响特性, 再利用傅里叶逆变换得到对应的冲击响应, 结果如图 5(b) 所示. 可以看出, 所得的冲击响应在中间部分由较大振荡. 根据 2.2 节中的分析, 在计算过程中只有当测点信号的长度 L 趋于无限长时计算得到的才是准确结果, 然而, 由于实际条件的限制, 只能采集到有限长度的测试信号, 所以根据这些信号计算出的冲击响应只能是近似值. 在我们的实验中可以观察得知, 无论选择哪一对测点信号进行计算, 无论 FFT 的长度如何选择(从 512 到 65 536), 图 5(b) 的中心处主要部分的形状是不变的, 而周围的次要部分却随着数据和参数的不同

$$x = F^{-1}(S - W \times H) \quad (12)$$

3 实验

为了估计出车体的频响特性, 以及实现透射噪声与结构噪声的分离, 我们利用实车数据进行了实验, 其中测点布置环境如图 5(a) 所示.

我们分别以图 5(a) 中的车外测点 w 到 4 个车内测点 $s_1 \sim s_4$ 的噪声数据为基础, 利用 2.1 节的算法计算了车体的频响特性和冲击响应, 并进行了透射噪声和结构噪声的分离. 在所有实验中, 我们观察到的现象和得出的结论都非常相近, 下面以测点 w 和 s_1 的数据为例来对计算过程进行说明.

作为参考, 我们根据测量得到的原始数据画出了反映噪声大小的 1/3 倍频程图^[17], 如图 6(a) 和图 6(b) 所示. 在图 6 中, 1/3 倍频程图的纵坐标为 A 计权等效声压级^[2, 17]经过归一化处理之后的相对值, 反映的是噪声的相对大小(根据南车青岛四方机车车辆股份有限公司的要求, 本文中不涉及列车噪声的实际大小). 对比车内和车外测点的 1/3 倍频程图可以得知, 车外噪声在各个频段都很明显, 而车内噪声相对于车外噪声有较大幅度的减少, 且在高频部分减少显著, 这与图 1 所反映的结果是一致的.

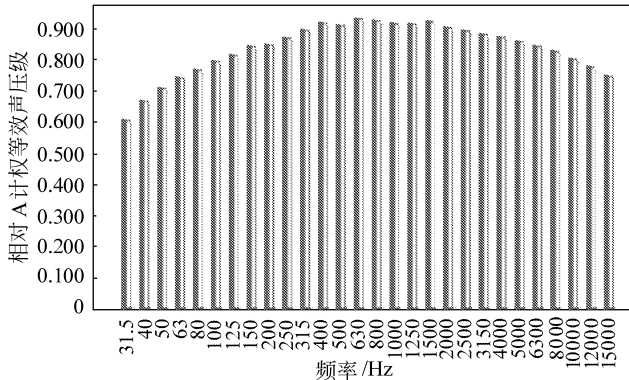
而改变, 且随着数据量的增大而逐渐趋向于 0. 通过以上对实验现象的观察可以推测得知, 图 5(b) 的中间部分为真正的车体冲击响应, 而周围的次要部分为各种干扰和数据量不足造成的结果. 根据卷积定理及图 4(d) 中的模型, 透射噪声 y 也可由车外噪声 w 与图 5(b) 中的冲击响应卷积后求得, 由于在卷积操作中图 5(b) 的冲击响应的周边次要部分收效甚微, 所以可忽略其次要部分, 截取其中心处的主要部分作为车体的冲击响应. 另外, 根据文献[18]中的研究结果, 当测试数据的长度 L 有限时, 所计算得到的冲击响应往往会受到某个偏置值的影响, 所以需要进一步对结果进行中心化处理, 即从中减去冲击

响应的均值, 所得的最终结果如图 5(c) 所示.

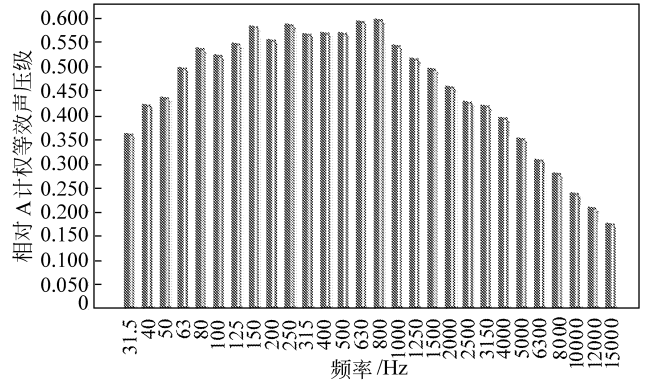
图 5(c) 的结果也比较符合实际的情况: 由于车体的回响时间很短, 所以冲击响应的长度也很短; 由于车体的隔声效果较好, 所以其冲击响应的幅值很小, 其最大值约为 1.5×10^{-4} ; 当给车外一个冲击激励时, 该冲击的效果需要一段时间才能到达车内测点, 所以冲击响应的前半部分幅值逐渐增加, 而由于没有外界能量补充, 该冲击的能量逐渐衰减, 直至消失, 所以其冲击响应的后半部分逐渐衰减为零. 显然, 该冲击响应属于有限长冲击响应.

将图 5(c) 中修正过的冲击响应进行傅里叶变换, 重新得到车体的频响特性, 如图 5(d) 所示. 从该图中可以看出, 在测量位置处, 车体对不同频率的噪声都有超过约 80 dB 的衰减作用. 利用图 5(c) 和图 (d) 中的结果, 根据式(10)~式(12)就可以进行透射噪声和结构噪声的分离, 分离结果的 1/3 倍频程图

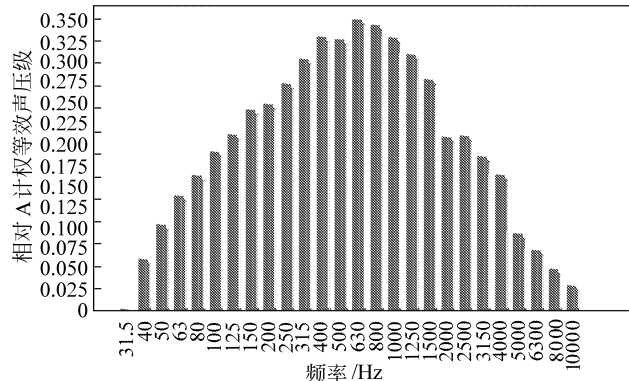
分别如图 6(c) 和图 6(d) 所示. 对比图 6(b) 与图 6(d) 可以发现, 两个图几乎没有变化, 这说明在测点 s_1 处的车内噪声主要以结构噪声为主. 进一步对比图 6(c) 后可知, 在测点 w 和 s_1 之间的车体隔声性能相当优良, 只有少量车外噪声进入了车内, 而进入车内的这部分透射噪声和车内测点处的结构噪声比起来则达到了可以忽略的程度. 所以, 要想降低该位置处的噪声水平, 只是加强车体的隔声性能已起不了太大的作用, 着重应该考虑的是抑制结构振动方面的改进. 当然, 该结论不能对整车一概而言, 由于车体各个位置的结构不同, 其频响特性也不同, 所以对应的隔声性能也不同. 在实际应用中, 可以按照本文介绍的方法对列车上所关心的位置分别测量频响特性并计算透射噪声和结构噪声, 并以此作为依据为列车的减振降噪设计提供参考.



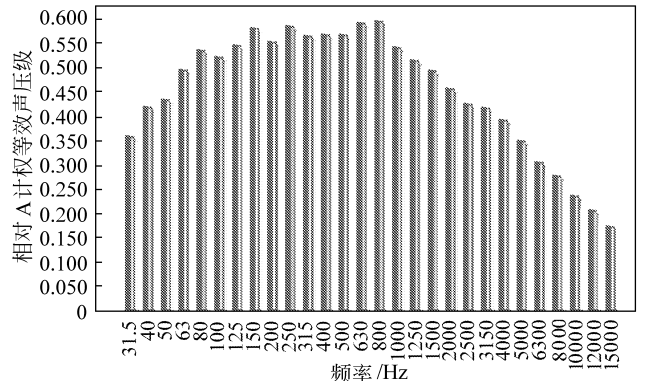
(a) 测点 w 处噪声的 1/3 倍频程图



(b) 测点 s_1 处噪声的 1/3 倍频程图



(c) 分离得到的透射噪声的 1/3 倍频程图



(d) 分离得到的结构噪声的 1/3 倍频程图

图 6 列车噪声的 1/3 倍频程图

Fig. 6 1/3 octave charts of train noise

4 结语

用高速列车噪声是影响车内乘客旅行舒适度和铁路沿线居民生活质量的首要因素之一. 研究表明, 高速列车的车内噪声由透射噪声和结构噪声组成, 从车内噪声中分离出透射噪声与结构噪声将对列车车体隔声性能的评价, 以及减振降噪设计起到一定

的指导作用. 本文首先利用多种数字信号处理方法对高速列车噪声数据进行了分析, 并对其性质进行了总结; 另外, 本文还对列车静止时和行驶时的噪声透射情形进行了建模, 并根据该模型提出了一种计算车体频响特性的简便方法, 指出车体的频响特性可以作为反映车体隔声性能的特征来使用, 并可以利用频响特性来实现对透射噪声和结构噪声的分

离;最后,通过在实际数据上进行实验,得到了高速列车受电弓下方车体的频响特性,并分离出了透射噪声与结构噪声。

参考文献(References):

- [1] 张曙光. 350 km·h⁻¹高速列车噪声机理、声源识别及控制[J]. 中国铁道科学, 2009, 30(1): 86- 90.
ZHANG Shuguang. Noise mechanism, Sound source localization and noise control of 350 km·h⁻¹ High-speed train [J]. China Railway Science, 2009, 30(1): 86- 90. (in Chinese)
- [2] Melletta C, Letourneaux F, Poisson F, et al. High speed train noise emission: Latest investigation of the aerodynamic/rolling noise contribution[J]. Journal of Sound and Vibration, 2006, 293(3): 535-546.
- [3] 范蓉平, 孙旭, 孟光, 等. 高速列车车内噪声特性研究[J]. 振动工程学报, 2004, z2: 1097- 1100.
FAN Rongping, SUN Xu, MENG Guang, et al. Study on noise characteristics within the High speed train[J]. Journal of Vibration Engineering, 2004, z2: 1097- 1100. (in Chinese)
- [4] 张伟, 陈光雄, 肖新标, 等. 高速列车车内噪声声品质客观评价分析[J]. 铁道学报, 2011, 33(2): 13- 19.
ZHANG Wei, CHEN Guangxiong, XIAO Xinbiao, et al. Objective evaluation of sound quality of noises inside high speed train [J]. Journal of the China Railway Society, 2011, 33(2): 13- 19. (in Chinese)
- [5] 苗新芳. 高速列车车内噪声分析与控制方法[J]. 化学工程与装备, 2010(4): 202- 203.
MIAO Xinfang. High speed train interior noise analysis and control [J]. Chemical Engineering & Equipment, 2010 (4): 202- 203. (in Chinese)
- [6] 盛美萍. 振动与噪声控制技术 [EB/OL]. [2012-10-26]. <http://jpkc.nwpu.edu.cn/jp2005/32/ElectronicBook/7/7-1-1.htm>. 2012.
SHENG Meiping. Technology of vibration and noise control [EB/OL]. [2012-10-26]. <http://jpkc.nwpu.edu.cn/jp2005/32/ElectronicBook/7/7-1-1.htm>, 2012. (in Chinese)
- [7] Cai Yangsheng, Zhao Yuezhe, Wu Shuoxian. The summary of techniques on the airborne sound insulation measurement[C]//International Conference on Electric Technology and Civil Engineering (ICETCE), 2011: 1785- 1788.
- [8] Na Yueyue, Jian Yu, Bianfang Chai. Independent vector analysis using subband and subspace nonlinearity [J]. EURASIP Journal on Advances in Signal Processing, 2013, 1 (2013): 74.
- [9] Shoji Makino, Hiroshi Sawada, Ryo Mukai, et al. Blind source separation of convolutive mixtures of speech in frequency domain [J]. IEICE Transactions on Fundamentals of Electronics, Communications and Computer Sciences, 2005, E88- A(7): 1640- 1655.
- [10] Pink noise [EB/OL]. Wikipedia, [2012-10-26]. http://en.wikipedia.org/wiki/Pink_noise.
- [11] John G Proakis, Dimitris G Manolakis. Digital signal processing principles, Algorithms, and applications [M]. 4th ed. Publishing House of Electronics Industry, 2010: 116 - 129.
- [12] AapoHyvarinen, JuhaKarhunen, ErkkiOja. 独立成分分析 [M]. 周宗潭, 董国华, 徐昕, 译. 北京: 电子工业出版社, 2007.
AapoHyvarinen, JuhaKarhunen, ErkkiOja. Independent component analysis [M]. ZHOU Zongtan, DONG Guohua, XU Xin. Trans. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2007. (in Chinese)
- [13] AapoHyvarinen, ErkkiOja. Independent component analysis: Algorithms and applications [J]. Neural Networks, 2000, 13(4/5): 411- 430.
- [14] Soosan Beheshti, Munther A Dahleh. Noisy data and impulse response estimation [J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2010, 58(2): 510- 521.
- [15] Lawrence R Rabiner, Jont B Allen. Short-time fourier analysis techniques for FIR system identification and power spectrum estimation [J]. IEEE Transactions on Acoustics, Speech, and Signal Processing, 1979, ASSP-27(2): 182- 192.
- [16] Schoukens J, Vandersteen G, Barbe K, et al. Nonparametric preprocessing in system identification a powerful tool. [J] European Journal of Control, 2009, 15(3): 260- 274.
- [17] 周新祥. 噪声控制技术及其新进展 [M]. 北京: 冶金工业出版社, 2007.
ZHOU Xinxiang. Noise control techniques review [M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2007. (in Chinese)
- [18] Widanalage Dhammika Widanage, John L Douce, Keith R Godfrey. Effects of overlapping and windowing on frequency response function estimates of systems with random inputs [J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2009, 58(1): 214- 220.