

轨道车辆噪声主动控制技术研究综述

罗竹辉¹, 李 涛^{2, 3}, 贺才春¹, 张亚新¹, 周熙盛¹, 李 壮²

(1. 株洲时代新材料科技股份有限公司, 湖南 株洲 412007;
2. 中车株洲所电气技术与材料工程研究院, 湖南 株洲 412001;
3. 湖南工业大学, 湖南 株洲 412007)

摘 要: 轨道车辆特别是高速列车随着车辆运行速度的不断提高, 车内噪声会显著增大。相比于隔声吸声等噪声被动控制技术, 噪声主动控制技术具有轻量化、低频降噪效果好的优点。介绍了噪声主动控制技术和轨道车辆噪声源特点, 对噪声主动控制技术在轨道车辆噪声控制国内外研究现状进行了综述, 简要分析了噪声主动控制中次级声源和误差传感器布放策略和 FXLMS 控制算法。对噪声主动控制技术用于轨道车辆噪声控制的发展方向进行了初步讨论。

关键词: 噪声主动控制; 轨道车辆; 次级声源; 滤波-XLMS 算法

中图分类号: U270.1⁺6; TB533⁺.2

文献标识码: A

doi: 10.13890/j.issn.1000-128x.2018.05.004

Review of Active Noise Control Technology of Railway Vehicle

LUO Zhuhui¹, LI Tao^{2, 3}, HE Caichun¹, ZHANG Yaxin¹, ZHOU Xisheng¹, LI Zhuang²

(1. Zhuzhou Times New Material Technology Co., Ltd., Zhuzhou, Hunan 412007, China;

2. CRRC ZIC Research Institute of Electrical Technology and Material Engineering, Zhuzhou, Hunan 412001, China;

3. Hunan University of Technology, Zhuzhou, Hunan 412007, China)

Abstract: Interior noise of railway vehicle especially high-speed train increases with vehicle's speed increasing. Compared with passive noise control such as sound insulation and absorption, active noise control (ANC) has many advantages such as lightweight and effective for attenuating with low frequency noise. Active noise control technology and noise source characteristics of railway vehicle was introduced briefly. Present research status of ANC technology for decreasing railway vehicle noise at home and abroad was reviewed. A brief analysis about arrangement strategy of secondly sound resource and error sensors and FXLMS control algorithm was provided. Development trend about ANC technology for decreasing interior noise of railway vehicle was preliminary discussed.

Keywords: active noise control; railway vehicle; secondary sound resource; FXLMS control algorithm

0 引言

轨道交通具有高速化、便捷性和舒适性等优点, 使其成为了一种越来越受欢迎的交通方式。轨道车辆车内的噪声水平是舒适性非常重要的体现, 尤其是随着列车速度的不断提升, 车内噪声会不断升高, 降低车内噪声对提高乘坐舒适性具有非常重要的意义。传统的噪声控制方法如吸声、隔声、阻尼减振等技术手

段针对高频噪声非常有效, 而针对低频噪声效果有限, 采用这些技术手段同时会较大地增加整个车辆系统的重量, 与轻量化和节能减排的趋势相违背^[1-4]。噪声的主动控制具有低频噪声控制效果好、设备重量轻的特点, 可能成为轨道车辆噪声控制重要的方式之一。本文对噪声主动控制、轨道车辆噪声源特点进行介绍, 对噪声主动控制技术用于轨道车辆噪声控制国内外研究现状进行综述, 对噪声主动控制技术中次级声源和误差传感器布放、控制算法等关键技术进行分析。

收稿日期: 2017-12-27; 修回日期: 2018-07-10

1 噪声主动控制技术

1.1 定义与分类

噪声控制可以从噪声源、噪声传播途径和噪声接收者 3 个方面着手,最常见的噪声控制方法包括吸声、隔声、阻尼减振等,这些噪声控制方法属于被动式的控制方法,亦称为“无源”噪声控制(Passive Noise Control)。

无源噪声控制方法对中高频噪声有较好的效果,而对低频噪声的控制效果一般。噪声主动控制技术(Active Noise Control, ANC)亦称有源噪声控制技术^[5]正是为了解决中低频噪声控制应运而生的。1933 年,德国物理学家 Paul Leug 申请了一项专利:“Process of silencing sound oscillations”,他利用在同一声场中,两列同频率的声波叠加会产生相加性或相消性干涉,使声场中的声能增强或减弱的原理,利用相消性干涉来降低噪声。Paul Leug 这项专利的提出被认为是噪声主动控制历史上的起点。经过近一个世纪,噪声主动控制技术取得了长足的发展,在降噪耳机、汽车车内噪声控制等领域取得了非常成功的应用。

如图 1 所示,在噪声主动控制中,噪声源称为初级声源,噪声主动控制是指通过一定的方法,在要降噪的空间范围内实时产生用以消除初级声源的噪声(称为次级声源),如果次级声源与初级声源在降噪空间范围内噪声幅值相等、相位相反,两列噪声则可叠加相消,达到降低噪声的目的。

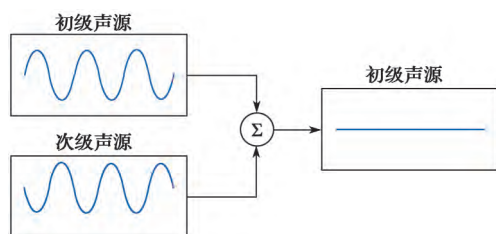


图 1 有源噪声控制原理

噪声主动控制包括噪声主动声控制和噪声主动力控制。噪声主动声控制中的次级源均为声源(一般为扬声器),这种噪声主动控制方式可叫做“以声消声”。噪声主动控制中的次级源也可作为作动器等力源,这种控制方式叫噪声主动力控制,也叫做“以力消声”。“以力消声”一般针对平板等机械结构振动辐射出噪声的控制。

以“以声消声”为例,经典的单通道噪声主动控制系统如图 2 所示。控制器接收参考传感器采集到的噪声源信号和误差传感器采集的噪声控制区域的误差信号,通过一定的控制算法,控制器输出信号驱动次级声源发出声音,目的是使初级声源发出的声音和次级声源发出的声音在误差传感器处叠加后噪声能量最小。根据控制器中控制方式的不同、次级声源类型的不同和误差传感器布置策略的不同,噪声主动控制可

以进行多种分类:如按控制方式可分为前馈、反馈控制;按次级声源分布特点可分为分布式和集中式;按误差传感器布置策略可分为远场布置和近场布置等。

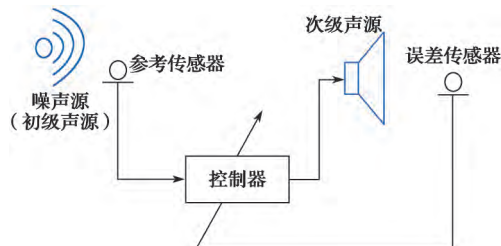


图 2 噪声主动控制系统示意图

1.2 影响噪声主动控制降噪效果的因素

图 2 中噪声主动控制系统包括噪声源、参考传感器、控制器、次级声源和误差传感器,每一个部分对噪声控制效果都有非常重要的影响。噪声主动控制主要的原理是产生一个反向的次级噪声来抵消噪声源的噪声,因此噪声源频率越低、单频成分越突出(离散线谱噪声),越容易产生相位相反的噪声,噪声控制效果也越好。另外,噪声源如果能简化为点源时降噪效果最好,它可以用尽可能少的次级声源获得最大的降噪量。

如果能采集到参考信号,则可以使用前馈控制系统,此时参考信号与误差传感器处初级声源信号的相关性越高,降噪效果越好。

控制器硬件和软件的性能对降噪效果有重要影响。对于控制器性能如滤波器长度、收敛系数、信号处理器字长等对控制效果有很重要的影响。良好的控制算法应具有较好的收敛性和鲁棒性。随着控制技术的发展,在噪声的主动控制中出现了模糊控制、神经网络控制等算法^[6-10],目前这些算法尚未在轨道车辆噪声控制中得到应用,需要人们继续进行深入的研究。

对于一个理想的噪声主动控制系统,如果次级声源的个数、次级声源的性能和次级声源摆放的位置已经确定,假定控制器足够理想,此时的降噪量为理想降噪量。次级声源的个数、性能和位置对降噪效果有很重要的影响,次级声源个数和位置的确定称为次级声源的布置,理想的次级声源布置为其产生的次级声场能与初级声场完全抵消。

实际执行控制的时候,需要确定一个控制目标函数。理想的控制目标函数为将声功率控制到最小,声功率是一定空间内单位时间内总的声能量,因为无法通过测量得到完全准确的声功率,一般测量该空间内有限点的声压,通过计算得到近似的声功率作为控制目标函数,基于此控制目标函数得到的降噪量显然比理想的降噪量要低。所以,通过误差传感器获得的信息计算得到的声功率应尽量逼近理想的声功率,原则上误差传感器越多,越能逼近理想的声功率,但误差传感器增多,会使成本增加、布置增加难度、对降噪空间产生影响等。为了减少误差传感器的个数,但不降低降噪效果,出现了虚拟麦克风技术^[11-13]。虚拟麦

克风技术是利用已知的麦克风获得的信号, 通过传递函数计算虚拟麦克风点 (该点不放置传感器) 处的信号。

综上, 影响噪声主动控制降噪效果的因素及其提高降噪效果的参考原则如图3所示。

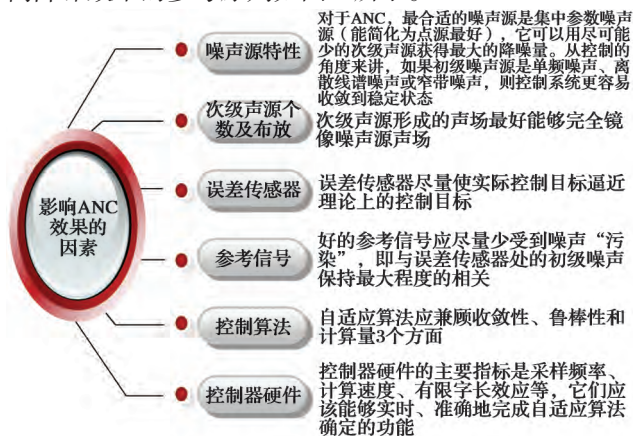


图3 影响噪声主动控制降噪效果的因素

2 轨道车辆噪声源

根据国内外铁路噪声理论研究和试验测试, 铁路噪声主要由牵引噪声、轮轨噪声和空气动力噪声等组成, 各种噪声源及其向车内的传播如图4^[14-17]所示。

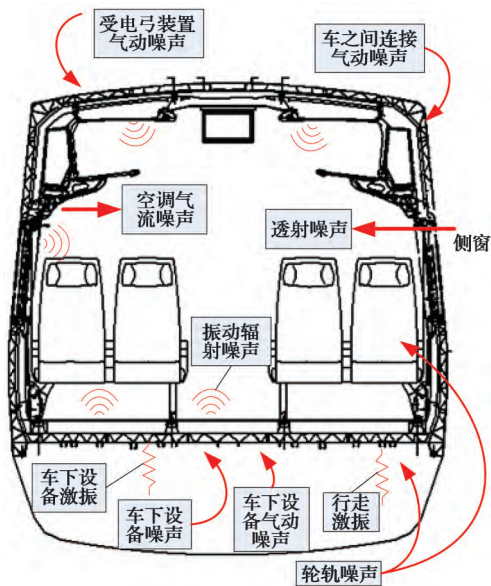


图4 列车噪声源及传播示意图

牵引噪声、轮轨噪声和空气动力噪声与车速关系很大, 按照噪声大小与车速对应的大致关系, 车辆噪声可以分为图5所示的3个区段: 区段I、区段II和区段III。3个不同区段分界点对应的列车运行速度称为声学转换速度 (图中 v_{t1} 和 v_{t2})。列车的声学转换速度与轨道和列车的状态、所使用的减振降噪措施有关。例如, 当轮轨噪声通过降噪手段 (如使用车轮降噪块^[18]) 降低后, 声学转换速度 v_{t1} 将会变得更高而 v_{t2} 将会变得更低, 也就是说, 此时牵引噪声和空气动力噪声占主导地位的车速范围变大, 轮轨噪声占主导地位的车速范围变小。

研究表明, 气动噪声大致以 $60 \text{ ln}v$ 速度增加, 轮轨噪声大致以 $30 \text{ ln}v$ 速度增加, 而实际测试时, 不管是车内噪声还是车外噪声, 测试结果都是各种噪声的综合结果, 噪声源分离难度大^[19]。通过大量的测试和分析研究得出, 一般对 250 km/h 以下速度级列车, 轮轨噪声为其主要噪声源, 气动噪声也较为突出; 对 $250\sim350 \text{ km/h}$ 速度级高速列车, 气动噪声和轮轨噪声都很突出; 而对于 350 km/h 以上速度级列车, 气动噪声为其主要噪声源。

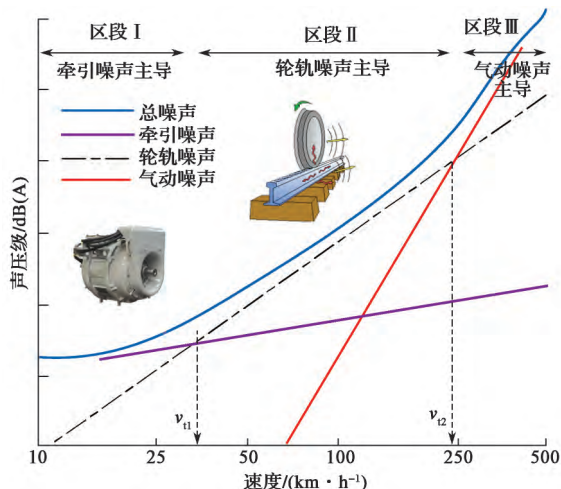


图5 列车噪声源速度分区

从图5可以看出, 随着车辆速度的不断增加, 车内噪声 (声压级) 也不断增加, 传统的噪声被动控制技术往往不足以满足噪声控制的需求, 这就需要噪声的主动控制。另外, 轨道车辆车内噪声一般表现为中低频特性, 如图6为某高速列车 300 km/h 运行时车内噪声频谱图^[20], 其中 $1\,000 \text{ Hz}$ 以下频率成分的噪声占总噪声的主要部分, 这实际上有利于噪声的主动控制。

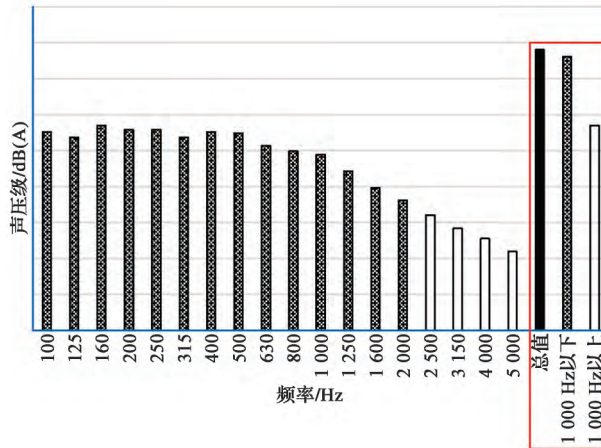


图6 某高速列车 300 km/h 运行时的车内噪声频谱

3 国内外研究进展

与汽车领域最早于20世纪90年代开展噪声主动控制并商业化应用相比^[21-22], 轨道车辆噪声的主动控制目前尚处于发展阶段, 无商业化的工程应用案例。

最早进行轨道车辆噪声主动控制的是法国国家自然科学基金委启动的关于CC6500电力机车的噪声主动

控制研究项目。相关研究人员使用了 8 个参考传感器、13 个靠近墙体的次级声源,对 ANC 系统是否对整个车厢空间具有降噪效果进行了测试。结果显示,在所有工况下,降噪效果均不明显,主要原因是外部噪声通过多条路径传递至车内,同时车厢内噪声发生了混响,噪声频率较高。另外,针对驾驶员双耳小范围区域噪声进行控制,在列车速度 85 km/h 进行了测试,研究了参考传感器个数和位置对降噪效果的影响。结果显示:①使用麦克风作为参考信号,仅对 500 Hz 以下噪声控制有效;②使用加速度作为参考信号,噪声控制有效频率可以提高到 600~700 Hz;③对于低频纯音,降噪效果可达 10 dB,对于实际噪声,舱内驾驶员双耳处声压降低了 3~4 dB,但是主观感受不明显。

2006 年,西班牙的 Diaz 等^[13, 23]针对卧铺车辆轨低频噪声进行了噪声主动控制研究。他们在线性声场叠加原理的前提下,使用 FXLMS 算法,利用虚拟麦克风技术,使用 MATLAB 进行了仿真,并建立了一个图 7 所示的卧铺车辆模拟样舱进行了试验研究。仿真和试验结果表明卧铺车辆中旅客头部 100~300 Hz 的噪声降低了 15~20 dB。

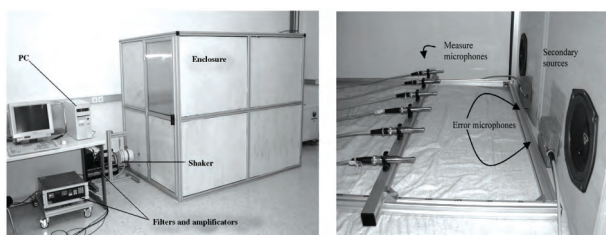


图 7 文献 [13, 23] 中卧铺车辆模拟样舱

2008 年,美国 Harris Miller Miller & Hanson 公司的 Timothy M. Johnson 等^[24-25]针对 EMD SD70MAC 柴油-电力混合动力车开展噪声控制优化研究,如图 8 所示,目的是使车内工作人员暴露噪声环境满足美国联邦公路局标准要求(8 h 暴露不大于 90 dB 要求)。除了采用浮筑地板等被动降噪措施外,还使用了噪声主动控制技术。将机车车身放置在实验室(车间),用超级低音音箱模拟柴油发动机噪声,参考麦克风放置在声源处,驾驶员头顶天花板处放置 2 个次级声源,在座

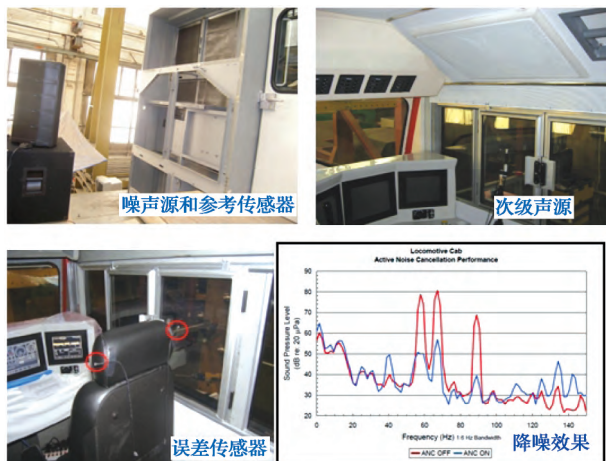


图 8 针对 EMD SD70MAC 机车的主动噪声控制

椅靠近驾驶员耳朵处放置 2 个误差传感器,使用 ANC 系统后,几个主要噪声频率(57 Hz、67 Hz、89 Hz)降低了 20~30 dB,降噪效果非常理想。值得注意的是,由于人耳听觉对这几个主要频率不是特别敏感,因此,短时间内人耳主观上感觉降噪效果并不明显,更重要的效果是针对驾驶员的听觉疲劳有极大的改善。

2012 年,韩国东亚大学的 Kwon Soon Lee 团队^[16, 26-28]针对 KTX 进行了主动噪声控制研究,建立了一个模拟高铁列车客室的封闭空间,如图 9 所示。研究过程中使用多通道 ANC,控制算法采用 FXLMS 算法,以避免电声音响和功放延迟对系统造成影响。研究结果显示 ANC 系统对 360 Hz 以下低频噪声具有很好的控制效果。

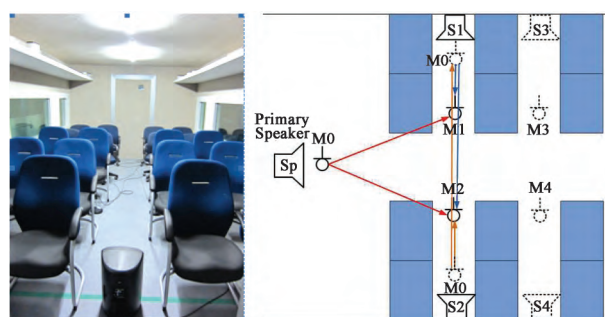


图 9 文献 [16, 26-28] 中 KTX 高速列车噪声主动控制

2013 年,瑞典皇家工学院联合庞巴迪组建了研究团队,针对高速列车进行了主动噪声控制研究,如图 10 所示^[29]。使用多通道前馈控制系统和虚拟麦克风技术,使用的软硬件均由以色列 Silentium 公司开发,使用 2 个参考麦克风、2 个误差传感器、2 个次级声源,算法采用 Leaky FXLMS。用人工头来得到静音区云图和噪声降低水平,测试了头部移动对系统稳定性的影响,结果表明降噪效果对头部移动非常敏感,特别是高频。该研究团队认为:决定 ANC 是否适合减少乘客头部局部噪声的关键在于静音区的大小。如果静音区太小,头部轻微的移动(从理想区域)就会离开静音区,采用 ANC 的目的在于保障控制区域噪声的降低,但不能保障控制区域以外的噪声是降低还是升高,这就意味着,头部移开控制区域,可能存在噪声反而升高的情况。静音区面积随着频率的升高而降低,10 dB 静音区面积一般为波长的 1/10,这就意味着 1 000 Hz 频率的静音区仅几厘米。另外,有一种观点认为,5 dB 噪声的降低已经非常明显了,这样对应的静音区面积会更大,有效频率会更高。由于典型的轨道车辆噪声在 1 000 Hz 以下,因此,静音区相对来说较大。



图 10 文献 [29] 中 ANC 实验平台及人工头降噪静音区

文献[30]介绍了澳大利亚矿区机车主动噪声控制技术, 针对 150 Hz 以下机车噪声, 使用了 2 个次级声源和 2 个误差传感器, 用 1 个加速度参考传感器测量发动机悬置的加速度, 不同挡位下降噪效果在 2~8 dB 之间。

国内针对轨道车辆开展噪声主动控制研究较晚, 目前西南交通大学、北京交通大学开展了初步的研究^[31-34], 如邹侃平在高速列车广义舒适度平台中进行了相关试验, 在一个车厢前端安装初级声源音箱和次级声源音箱, 初级声源音箱前端安装声传感器, 将其所采集信号作为初级声源输入信号, 座椅人耳高度处安装声传感器, 将其所采集信号作为目标场区误差输入信号, 500 Hz 纯音降噪为 10 dB。据了解, 中车唐山机车车辆有限公司联合中科院声学所等多家单位, 正在针对 400 km/h 以上的高速列车开展主动噪声控制研究, 目前取得了一定进展。

上述研究均为“以声消声”, 随着传感技术的不断发展, “以力消声”在轨道车辆噪声控制中得以尝试。2013 年, 日本的 K. Yamamoto 等^[35-36]在轨道车辆天花板等内饰板与车体结构之间安装隔声板, 在隔声板上安装压电陶瓷片, 如图 11 所示。当车外噪声透射进入隔声板时, 必然引起隔声板的振动, 通过控制压电陶瓷的振动来抑制甚至抵消板的振动, 从而降低透射噪声。试验结果表明, 在过道处安装这种隔声板, 300 Hz 以下的低频噪声降低了约 4 dB。

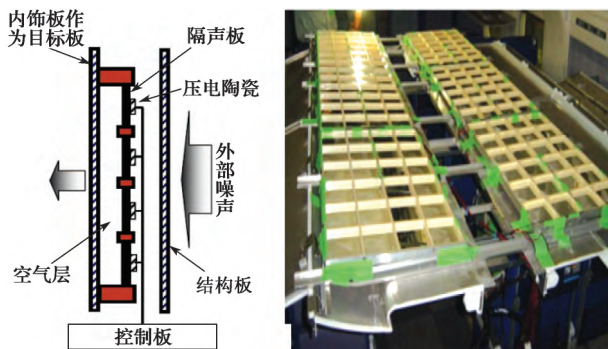


图 11 压电陶瓷隔声板用于列车噪声主动控制

4 相关关键技术

由前文可知, 一个实际的噪声主动控制系统能否取得好的控制效果, 由初级源的类型和特征、参考信号及其质量、次级源和误差传感器的位置以及自适应算法及其控制器硬件各个方面决定。初级源和参考信号及其质量决定了噪声主动控制技术是否适用, 一旦确定要使用噪声主动控制, 那么次级源和误差传感器的位置和个数以及自适应算法及其控制硬件是决定降噪效果的关键。

4.1 次级源和误差传感器布放策略

对于轨道车辆车内低频噪声控制而言, 此时可以用封闭空间声场噪声主动控制理论进行分析。轨道车辆内装壁面一般为刚性壁, 假定要控制的噪声为低频

噪声, 此时可以用简正波理论进行初步分析。根据简正波理论, 声场中任意观察点 r 处的声压可以用有限个声模态叠加表示, 有

$$p(r, \omega) = \sum_{n=1}^N f_n(r) a_n(\omega) \quad (1)$$

式中: $f_n(r)$ 、 $a_n(\omega)$ 分别表示第 n 阶声模态的模式函数和模态幅度; N 为选取的最大声模态数。

定义 N 阶模态函数列矢量为 $F(r)$ 、模态幅度列矢量为 $A(\omega)$, 则上式可以表示为

$$p(r, \omega) = F^T(r) A(\omega) \quad (2)$$

假设空间中有 M 个次级声源, 它们的复强度记为 $q_{sm} (m=1, 2, \dots, M)$ 。

当初级声源和次级声源共同作用于声场时, 它们的声模态函数是相同的, 只是模态幅度不同, 计模态幅度分别为 a_{pn} 、 $a_{sn} (n=1, 2, \dots, N)$, 则叠加后的声场模态幅度为

$$a_n = a_{pn} + a_{sn} = a_{pn} + \sum_{m=1}^M B_{nm} q_{sm} \quad (3)$$

式中: B_{nm} 为第 m 个次级声源至观察点 r 的 n 阶声传输阻抗。

叠加后声场声压可以用矢量形式表示为

$$p(r, \omega) = F^T(r) (A_p + B q_s) \quad (4)$$

式中: B 为 $N \times M$ 阶声传输阻抗矩阵。

次级声源的个数如果选定为声模态的个数, 此时矩阵 B 就为一个方阵, 令 $q = -B^{-1} A_p$, 就可以得到声场中声压处处为零。实际上, 次级声源的个数远小于声模态的个数, 即 $M \ll N$ 。次级声源的个数一般根据车内噪声源几个主要贡献模态数来确定, 即次级声源的个数与主要贡献模态个数相等, 如果几个主要贡献模态的最大幅值处于同一空间位置, 用 1 个次级声源即可抵消这几个主要声学模态。

确定了次级声源的个数后, 还需要确定每一个次级声源的强度, 控制时需要确定一个控制目标函数。噪声主动控制理想的目标函数是包含声势能和声动能的总声能量。

$$E_p = \frac{1}{4\rho c^2} \int_V |p(r, \omega)|^2 dV + \frac{\rho}{4} |v(r, \omega)|^2 \quad (5)$$

实际上, 由于声动能包含速度不易测量, 而声场声压易于测量, 因此, 一般选取整个空间中总的时间平均声势能作为控制目标函数, 即

$$E_p = \frac{1}{4\rho c^2} \int_V |p(r, \omega)|^2 dV \quad (6)$$

将式(4)代入(6)式, 利用模态函数矢量的正交性, 有

$$E_p = \frac{V}{4\rho c^2} (Q_s^H B^H Q_s + Q_s^H B^H A_p + A_p^H B Q_s + A_p^H A_p)$$

可以看出, 声势能 E_p 是次级声源复强度的二次型函数。由于 $B^H B$ 为对称正定矩阵, 可以找到唯一的一

组次级声源复强度矢量 Q_{s0} 作为最优次级声源强度, 使 E_p 最小记为 E_{p0} 。用无约束最优化方法, 即可求得

$$Q_{s0} = -(B^H B)^{-1} B^H A_p \quad (7)$$

$$E_{p0} = \frac{V}{4\rho c^2} \left[A_p A_p - A_p B (B^H B)^{-1} B^H A_p \right] \quad (8)$$

由此, 可以得到封闭空间中的最佳降噪量。

其中 $E_{pp} = \frac{V}{4\rho c^2} A_p^H A_p$ 为初级声源单独作用时, 空间中的时间平均声势能。

根据上述推导, 可以利用理论分析和计算机仿真, 研究封闭空间噪声主动控制规律^[37-38]。文献[38]在 Virtual.lab 软件中建立了特种车辆封闭空间声学模型, 进行次级声源布放规律的研究。

次级声源的布放应根据具体情况进行设计和优化, 但可以遵循以下 3 个原则: ①次级声源位置不能放置在需要降噪的声模态的节线或节线附近, 这就需要通过测试或声学有限元分析的方法进行声模态分析; ②次级声源应尽量放置在需要抵消的声模态的最大幅值处; ③可以使用几个次级声源联合起来去抵消声模态。误差传感器布放规律与次级声源的布放原则类似。次级声源和误差传感器的布置可以通过优化算法进行优化。

4.2 滤波-XLMS 算法

控制系统是噪声主动控制中非常关键的部分。20 世纪 80 年代以前, 噪声主动控制系统中的控制电路均采用模拟电路。由于被控噪声源的复杂性和模拟电路的局限性, 随着信号处理技术的进步, 出现了自适应噪声主动控制技术, 其中最成熟的是文献[39]提出的滤波-XLMS 算法。

如果忽略次级反馈环节, 就可以得到滤波-XLMS 控制系统的离散域框图, 如图 12 所示。

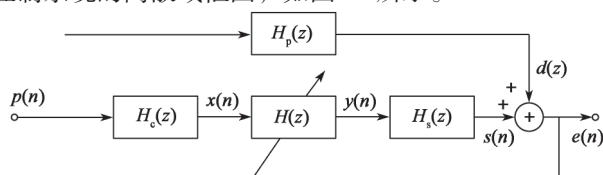


图 12 滤波-XLMS 算法框图

图 12 中 $H_p(z)$ 、 $H_c(z)$ 、 $H_s(z)$ 分别表示初级通道、参考通道和次级通道的传递函数。它们的脉冲响应分别为 $h_p(n)$ 、 $h_c(n)$ 、 $h_s(n)$ 。噪声源 (初级声场) 在参考传感器处的时域信号 $x(n)$ 和在误差传感器处的信号 $d(n)$ 分别为

$$x(n) = p(n)h_c(n) \quad (9)$$

$$d(n) = p(n)*h_p(n) \quad (10)$$

式中: $p(n)$ 为初级信号源; $*$ 为卷积运算。

用长度为 L 的横向结构 FIR 滤波器作为控制器, 控制器的输出信号 $y(n)$ 为权系数矢量 $W(n)$ 和参考信号矢量 $X^T(n)$ 之积, 有

$$y(n) = X^T(n)W(n) \quad (11)$$

控制器输出信号 $y(n)$ 经过次级通道后得到信号 $s(n)$, 有

$$s(n) = y(n)*h_s(n) \quad (12)$$

将式 (11) 代入式 (12), 假设在 L 时刻内参考信号保持平稳, 则有

$$s(n) = r^T(n)W(n) \quad (13)$$

式中: $r^T(n) = [r(n), r(n-1), \dots, r(n-L+1)]^T$, 它的第 n 个分量 $r(n) = x(n)*h_s(n)$ 称为滤波-X 信号。

其中, 误差信号可以表示为

$$e(n) = d(n) + s(n) = d(n) + r^T(n)W(n) \quad (14)$$

定义系统的目标函数为误差信号均方值, 用最速下降法即可求出滤波器权系数矢量递推公式

$$W(n+1) = W(n) - 2\mu e(n)r(n) \quad (15)$$

式中: μ 为收敛系数。

5 结语

本文介绍了噪声主动控制技术和轨道车辆噪声源特点, 对轨道车辆噪声主动控制国内外研究现状进行了综述, 简要分析了噪声主动控制技术中次级声源和误差传感器布放策略和滤波-XLMS 算法。

从目前轨道车辆噪声主动控制国内外研究现状来看, 研究工作基本处于实验室研究阶段, 主要原因有:

①轨道车辆有多个噪声源, 车内噪声来自多条路径, 噪声特性随着运行工况的变化而变化, 噪声特性复杂, 特别是对于高速列车而言, 空气动力噪声为主要噪声源, 虽然频率较低, 但是带宽较宽, 噪声主动控制难度较大。②车内乘客众多, 要得到全空间降噪量较大的声场需要增加较多的麦克风和扬声器, 技术难度较大, 成本也会增加。同时工程应用还需要考虑到麦克风和扬声器等布置对车内其他设备设施、车内空间和美观的影响。③控制系统本身的质量, 包括控制算法的稳定性、系统的延迟等, 使得噪声控制效果受到一定影响。

笔者认为轨道车辆噪声主动控制未来的发展趋势可以分为以下几个方面: ①利用人工智能和大数据分析, 准确地 (离线/在线) 识别车内噪声特性, 进而有针对性地开展噪声主动控制系统的设计。②车内麦克风和扬声器的布置可以与车内娱乐、通信系统进行结合, 并与整车内饰同步设计, 在满足噪声控制功能性要求的同时, 满足低成本和美观要求。③针对轨道车辆车内空间特性和噪声源特性, 开发先进控制算法, 提高控制算法的稳定性; 采用先进的传感器和控制执行机构, 如使用头部追踪技术, 以提升降噪效果。

参考文献:

- [1] Simmons-boardman publishing corporation. Got a noise problem? cancel it [J]. Railway Age, 2004(3): 205.
- [2] 靳光磊, 刘永明. 高速列车车厢内噪声主动控制技术综述 [J].

- 郑州轻工业学院学报(自然科学版), 2011, 26(4): 59–62.
- [3] 罗竹辉, 周熙盛, 贺才春, 等. 氢能源轨道车内装地板隔声性能优化设计[J]. 机车电传动, 2017(3): 77–80.
- [4] LETH S. Silent electric train transportation-present and future technologies [C]. Hamburg, Germany: Institute of noise control engineering, 2016.
- [5] 马大猷. 噪声与振动控制工程手册[M]. 北京: 机械工业出版社, 2002.
- [6] COJCINNILA J M, SOUSA J M, BOTTO M Ayala, et al. Model-based active noise control using neural networks [C]. Porto, Portugal: IEEE, 2015: 72–77.
- [7] ZHANG Xinghua, REN Xuemei. A novel active noise control using neural networks without the secondary path identification [C]. Jinan, China: IEEE, 2010: 5037–5041.
- [8] ZHANG Qizhi, GAN Woon Seng, ZHOU Ya Li. Adaptive recurrent fuzzy neural networks for active noise control [J]. Journal of Sound & Vibration, 2006, 296(4/5): 935–948.
- [9] DONG Jun Ahn, BAEK Kwang Hyun, NAN Hyun Do. Stabilized adaptive fuzzy LMS algorithms for active noise control [J]. Transactions of the Korean Institute of Electrical Engineers, 2011, 60(1): 150–155.
- [10] RAKHSHAN Mohsen, KHORSHIDI Shapour, SAFARINEJADIAN Behrouz. Active noise control in presence of disturbance using adaptive neuro fuzzy inference system [J]. Journal of Computational Intelligence & Electronic Systems, 2014, 3(2): 99–105.
- [11] GARCIBONITO J, ELLIOTT S J, BOUCHER C C. Generation of zones of quiet using a virtual microphone arrangement [J]. Journal of the Acoustical Society of America, 1997, 101(6): 3498–3516.
- [12] JANG Hyeon Seok, KIM Young Min, CHUNG Jin Do, et al. KTX's interior noise reduction performance comparison for each section using multichannel active noise control [J]. Applied Mechanics & Materials, 2012, 61(1): 1265–1270.
- [13] DIAZ J, VINOLAS J, EGANA J M. Method of adjusting active noise control system parameters for application in railway sleeping cars [J]. Noise Control Engineering Journal, 2006, 54(4): 263–270.
- [14] 张曙光. 350 km/h 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.
- [15] TALOTTE C, GAUTIER P E, THOMPSON D J, et al. Identification, modelling and reduction potential of railway noise sources: a critical survey [J]. Journal of Sound and Vibration, 2003, 267(3): 447–468.
- [16] HAMAMOTO Y, SHIRAISHI H, IWANNAMI K. Seeking for the optimum solutions for offering greater comfort by improving passenger cabins and bogies [R/OL]. [2017–12–11]. <http://www.railway-research.org/IMG/pdf/386-2.pdf>.
- [17] 吴作伟, 丁莉芬. 动车组车体结构与车内设备[M]. 北京: 北京交通大学出版社, 2012.
- [18] 郭涛. 车轮动力吸振器对城轨列车噪声抑制效果试验研究[J]. 机车电传动, 2014(5): 73–77.
- [19] 纳跃跃. 频域盲源分离算法研究及其在高速列车噪声成分分离中的应用[D]. 北京: 北京交通大学, 2014.
- [20] LRTH Siv. Silent trains for the future—an industrial approach for low noise design [R/OL]. [2017–12–11]. http://www.isma-isaac-be.mech.kuleuven.be/past/conf/isma2010/proceedings/papers/isma2010_0685.pdf.
- [21] STOTHERS I, ELLIOTT S, NELSON P, et al., The active control of engine noise inside cars [C] //Proc Inter-Noise and Noise-Control Congr. Avignon, France: Institute of noise control engineering, 1988.
- [22] SAMARASINGHE P N, ZHANG W, ABHAYAPALA T D. Recent advances in active noise control inside automobile cabins: toward quieter cars [J]. IEEE Signal Processing Magazine, 2016, 33(6): 61–73.
- [23] DIAZ J, EGAÑA J M, VIÑALAS J. A local active noise control system based on a virtual-microphone technique for railway sleeping vehicle applications [J]. Mechanical Systems & Signal Processing, 2006, 20(8): 2259–2276.
- [24] JOHNSON Timothy, HANSON Carl, ROSS Jason, et al. Development of passive and active noise control for next generation locomotive cabs [C]. Ottawa, Canada: Inter-noise and noise-congress and conference, 2009.
- [25] ROSS Jason. Passive and active noise control for next generation locomotive cabs [C]. Vancouver, British Columbia: APTA Rail Conference, 2010.
- [26] HAN S I, YEO D Y, KIM S H, et al. Improvement noise attenuation performance of the active noise control system using RCMAC [J]. Journal of the Korean Society for Power System Engineering, 2010, 14(5): 56–65.
- [27] JANG Hyeon Seok, KIM Sae Han, LEE Tae Oh, et al. Multi-channel ANC system modeling for reducing KTX interior noise [J]. Transactions of the Korean Institute of Electrical Engineers, 2012, 61(7): 148–150.
- [28] KIM Young Min, LEE Kwon Soon. A Study on the modeling for reducing high-speed train KTX's interior noise using active noise control technique [J]. Transactions of the Korean Institute of Electrical Engineers, 2012, 61(11): 2936–2940.
- [29] KASTBY Claes Rutges. Active control for adaptive sound zones in passenger train compartments[D]. Stockholm: Royal Institute of Technology, 2013.
- [30] PAN Jie, PAUROBALLY Roshun, QIU Xiaojun. Active noise control in workplaces [J]. Acoustics Australia, 2016, 44(1): 45–50.
- [31] 乐恺, 安军社, 钟延炯. 机车驾驶室中自适应有源降噪系统的研究[J]. 应用声学, 2003, 22(3): 33–38.
- [32] 邢优胜. 机车司机室局部自适应有源消声系统仿真研究初探[D]. 北京: 北京交通大学, 2005.
- [33] 邹侃平. 基于DSP的高速列车车内噪声主动控制技术研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2016.
- [34] 杨琼. 列车司机室自适应有源噪声控制系统研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2010.
- [35] YAMAMOTO K, YAMAMOTO D, MAMADA S, et al. Development of a system using piezoelectric materials to reduce the interior noise of a railway vehicle [J]. Noise and Vibration Mitigation for Rail Transportation Systems, 2012, 118: 471–478.
- [36] 山本克也, 彭惠民. 使用压电材料降低车内噪声[J]. 国外机车车辆工艺, 2011(2): 36–39.
- [37] 邓丹丹. 基于声模态的客车车内噪声有源控制仿真研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2015.
- [38] 杨益民. 特种车辆有源噪声控制系统的设计与仿真[D]. 杭州: 浙江大学, 2014.
- [39] BURGESS J C. Active adaptive sound control in a duct: a computer simulation [J]. Journal of the Acoustical Society of America, 1981(70): 715–726.

作者简介: 罗竹辉(1987–), 男, 博士, 高级工程师, 主要从事振动噪声控制和机电一体化研究工作。