DOI:10. 19431/j. cnki. 1673-0062. 2018. 06. 012

# 主动消声技术在地铁噪声控制中的应用研究

申龙章[1],邱长军[1],吴晓艳[1,2],张泽斌[3]

(1.南华大学 机械工程学院,湖南 衡阳 421001;2.南华大学 规划基建处,湖南 衡阳 421001;
3.浙江省家具与五金研究所,浙江 杭州 310013)

**摘　要**:分析了铁轮运行过程中噪声构成及产生机理,并根据噪声频谱特性分析结果,运行在 60~120 km/h 的城市轨道交通中对车厢影响最大的噪声源为轮轨噪声,虽然噪声频带较宽,且频谱随车速、工况等变化较大,但可针对其噪声来源可在噪声控制过程中进行预测.基于 PAT(phase auto-track)算法设计了地铁噪声主动控制系统,可将地铁运行特殊环境简化为管道系统,并通过 MATLAB 平台进行了噪声的主动消除模拟仿真.仿真结果表明,经过一定调整周期后,系统能获得明显降噪效果.

**关键词**:地铁噪声;主动噪声控制;相位自动跟踪

**中图分类号**:U231$^{+}$.94;TB535$^{+}$.2　**文献标志码**:A　**文章编号**:1673-0062(2018)06-0074-05

# Study on the Technology Application of Active Noise Control in Subway Noise Control

**SHEN Longzhang[1], QIU Changjun[1], WU Xiaoyan[1,2], ZHANG Zebin[3]**

(1.School of Mechanical Engineering, University of South China, Hengyang, Hunan 421001, China;
2.Planning Infrastructure Department, University of South China, Hengyang, Hunan 421001, China;
3.Zhejiang Furniture and Hardware Research Institute, Hangzhou, Zhejiang 310013, China)

**Abstract**: In the paper, the mechanism composition and process of the wheel running noise in carriage were analyzed. According to the noise spectrum characteristics analysis, the most important composition of the urban rail transit noise in carriage is wheel-rail noise in the speed of 60 - 120 km/h generally. Although the noise wide frequency band, and the spectrum on the speed, operating mode change is bigger, its noise sources can be predicted in the process of noise control. Based on the PAT(phase auto-track) algorithm, the subway active noise control system was designed, which can simplify the special environment of the

**收稿日期**:2018-05-22

**基金项目**:衡阳市指导性科技计划项目(S2018G9031015303);南华大学船山学院教改重点课题项目(2018CZ003)

**作者简介**:申龙章(1988-),男,实验师,主要从事机械电子工程、激光及表面改性等方面的研究.E-mail:shenlongzhang@usc.edu.cn

subway system to the pipe system. The noise active elimination simulation system was designed based on the MATLAB platform. The simulation results show that the system could obtain the obvious effect of noise reduction after a certain period of adjustment.

**key words**: metro train noise; active noise control; phase auto-track

## 0　引　言

近年来,城市轨道交通高速发展,极大地减轻了传统地上交通的压力,为人们出行提供方便,同时在各个方面促进着社会的发展[1].但是,地铁带来的噪声问题,严重影响着乘客乘坐舒适性和地铁工作人员的正常工作与身心健康.调查表明,长期受到噪声困扰的人们容易产生头疼、失眠、烦躁、记忆力衰退,严重者造成听力损伤,精神抑郁等严重后果[2-3].地铁噪声成为了衡量地铁质量的重要指标之一,全国各地乘客、工作人员对地铁噪声问题的投诉日益频繁.因此,必须做好地铁噪声控制,提高乘客乘坐舒适性,改善地铁从业人员工作环境.

而国内外针对地铁噪声的来源和控制都进行了广泛研究,梁笑娟等[4]调查了广州地铁 1、2、3、4 号线的车站环境噪声和列车车厢内部噪声水平,探讨了车站环境噪声的日变化趋势和地铁噪声的来源,测试结果证实地铁列车高速运行是地铁车站环境噪声的主要噪声源.张晓排等[5]对地铁车辆在静止及运行情况下进行车内噪声测试,结果表明车辆在运行过程中对车内噪声影响较大的是轮轨噪声,且车辆的密封性对车内噪声的分布有较大的影响.徐靖[6]采用 Artemis 测试分析系统对隧道内运行的大连厂地铁车辆进行了噪声测试,结果表明车辆内噪声的最主要噪声源是轮轨噪声,且主频带一般都在 315~5 000 Hz 之间,低频率的声压级很小.

根据研究人员长期以来针对地铁运行过程中噪声的测试和分析,可得出地铁车辆运行中主要噪声源有:1)轮轨接触引起的噪声,滚动噪声、刺耳尖利的摩擦噪声和通过曲线时的蠕滑噪声;2)牵引电动机产生的电动机械噪声;3)非动力系统噪声;4)地铁高架桥梁结构振动辐射噪声.而对车内环境影响最大的一直以来都是轮轨噪声,因此这对利用对抗声相消原理的主动消声技术而言[7-8],噪声成分相对单一且可预测,可在一定程度上降低研究难度.

## 1　铁路噪声频谱特性分析

要完成地铁噪声的主动消声控制,首先须对地铁噪声来源及其频谱特性进行深入分析.铁路噪声源主要包括线路噪声、站场噪声和工厂噪声三大部分,而我们所要分析和研究的为线路噪声.线路噪声属于流动污染源、具有线长、面广、间歇性等特点,由于其污染程度随列车速度的提高而日益加重,因此本文主要讨论铁路线路噪声的特点及其控制措施.普通铁路线路噪声的声源主要包含机车鸣笛噪声和轮轨噪声,以轮轨噪声为主,而对于提速后的城市轨道交通,其线路噪声还包括铁路桥梁结构的噪声、空气动力噪声以及集电系统噪声[9].

轨道交通系统中,主要噪声源多种多样,包括了牵引噪声、轮轨噪声和气动噪声.根据列车运行速度的不同等级,各个噪声源所占比重也不一样,当列车运行速度低于 35 km/h 时,铁路噪声的主导成分是车辆牵引噪声;当列车运行速度在 35~250 km/h 之间时,铁路噪声的主导成分是轮轨噪声;运行速度高于 250 km/h 时,空气动力噪声成为主导噪声[10],车内噪声构成及产生机理见图 1,噪声与速度的关系见图 2.我国地铁速度一般为 60~120 km/h,因此,轮轨噪声是最主要的声源.

铁路噪声由多种噪声构成,如图 2(a)所示,在运行速度低于 200 km/h 时,其占主要比例仍为车轮噪声.我国做过不同车速列车驶过时的频谱测定,如图 2(b)所示.当列车速度是 38 km/h 时,噪声频谱图为单峰,其噪声以低频为主,线性声压级 20 Hz 附近高达 90 dB 以上,人耳对这种噪声并不敏感,但是人体能感到较强烈的振动;列车速度是 58 km/h 时,噪声频谱图为双峰,低频噪声退居次要地位,人耳敏感的中频噪声较为突出,国际标准化组织 ISO 规定的听力损失检查频率 500~2 000 Hz 范围内线性声压级均在 70 dB 以上;列车速度是 96 km/h 时,频谱图亦为双峰,中频噪声更强、频带更宽,同时低频噪声也不容忽视,更加增加了治理难度.

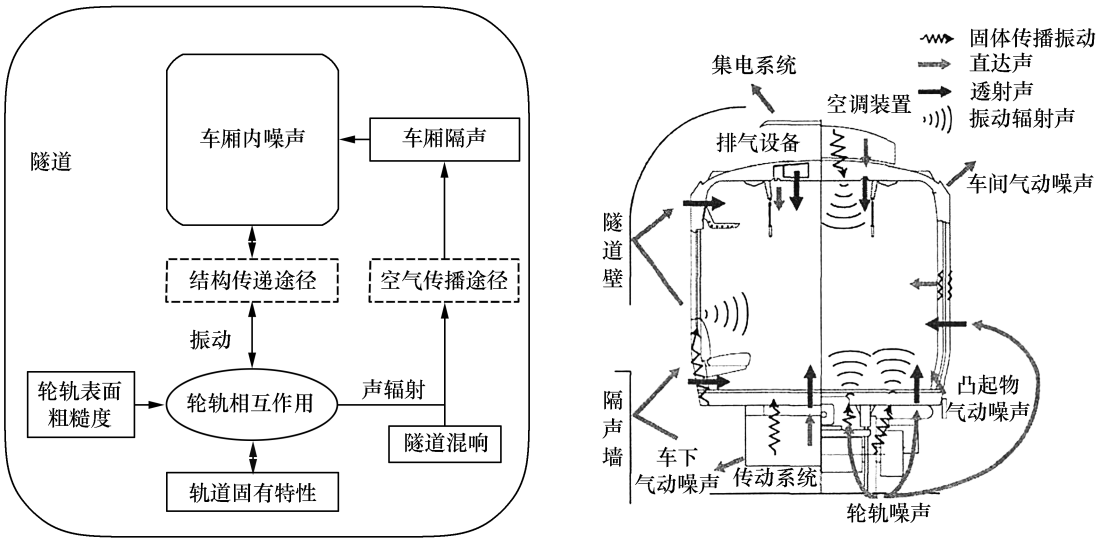
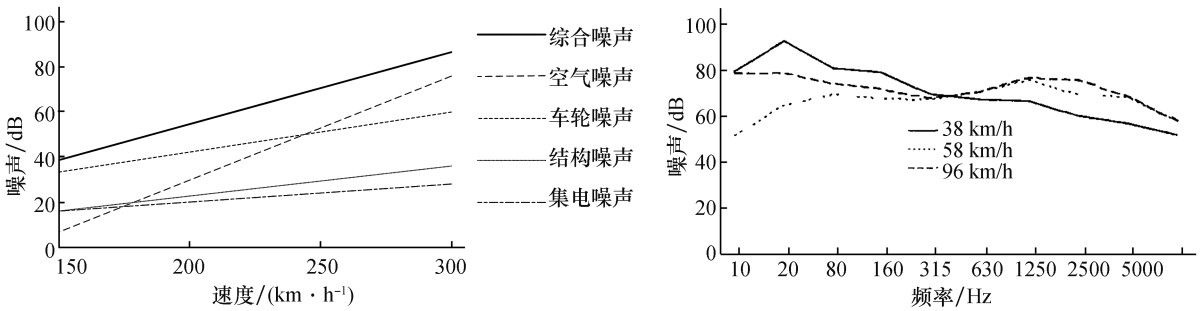



**图 1 车内噪声构成及产生机理**

**Fig.1 The composition of noise in carriage and its generating mechanism**




(a)噪声值与列车行驶速度的关系 (b)列车不同速度行驶时噪声频谱图

**图 2 铁路噪声与速度的关系**

**Fig.2 The relations with metro train noise and running speed**

在列车的行驶过程中,轮轨之间滚动接触产生的振动,并以噪声形式向外辐射.如图 3 所示,车轮滚动过程中产生的车轮噪声和钢轨噪声合成后形成轮轨噪声并向车厢内部辐射.当列车运行速度加快时,轮轨的粗糙度和机车车辆行走部各组件和线路上的各构件振动将引起高强度噪声.

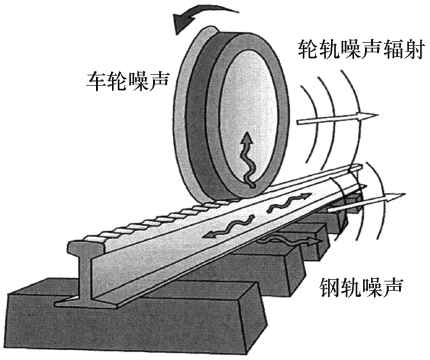



**图 3 轮轨噪声产生构成**

**Fig.3 The composition of wheel-rail noise**

## 2 基于 PAT 算法的地铁噪声主动控制研究

### 2.1 基于 PAT 算法的主动消声系统设计

所谓 PAT 算法就是相位自动跟踪(phase auto-track)技术,简单来讲就是控制两个简谐信号的相位差($\Delta\varphi$),如图 4 所示.

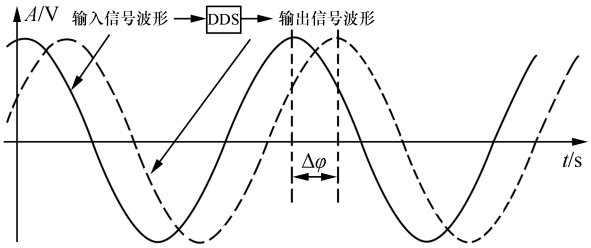



**图 4 PAT 调相波形**

**Fig.4 Waveform of PAT's phase modulation**

当采集一个信号后,通过控制系统直接数字频率合成,输出与该频率相关的信号,然而输入和输出信号间的相位差是可控的.从声场的线性叠加原理可知,频率相同、同向传播的两列声波会在空间中产生相加或者相消的干涉现象,干涉后的波峰波谷,完全取决于两列声波的相位和幅值的关系[11-12].

假设初级声信号可表示为:

$$P_P = A\cos(\omega t - kx) \tag{1}$$

式中 $A$ 表示振幅,$\omega$ 表示角频率,$k$ 表示波数,$x$ 代表坐标轴符号.则平均声能密度:

$$E_P = \frac{A^2}{4\rho c^2} \tag{2}$$

式中 $\rho$ 表示声传播介质密度,$c$ 为声速.满足上述相干条件的次级声波:

$$P_S = \beta A\cos(\omega t - kx + \alpha) \tag{3}$$

式中 $\beta$ 表示次级声波的振幅系数,$\alpha$ 表示两个干涉声波的相位差;总声场平均能量密度为:

$$E_{PS} = \frac{A^2}{4\rho c^2}(1 + 2\beta\cos\alpha + \beta^2) \tag{4}$$

空间任一点在次级声波作用前后的声级差为:

$$\Delta L_P = 10\lg\frac{E_P}{E_{PS}} = -10\lg(1 + 2\beta\cos\alpha + \beta^2) \tag{5}$$

通过式(5)可知:当 $\beta$ 接近 1(振幅相等),$\alpha$ 接近 $\pi$(相位相反)时,对初级声源而言,就可以在一定的空间区域得到很大的声衰减.根据 PAT 算法所设计的主动消声系统如图 5 所示,主动消声控制流程如图 6 所示.

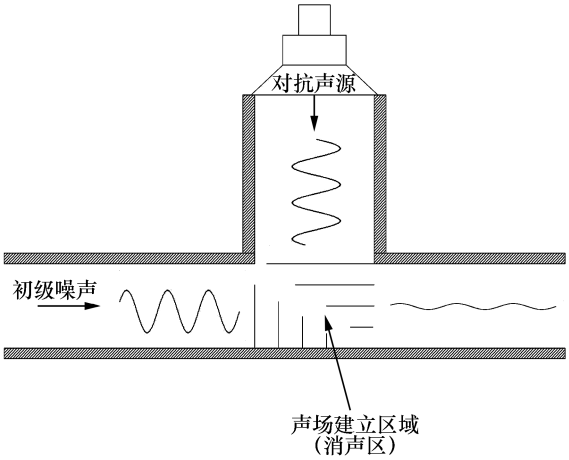



**图 5　主动消声系统**

**Fig.5　The schematic diagram of ANC**

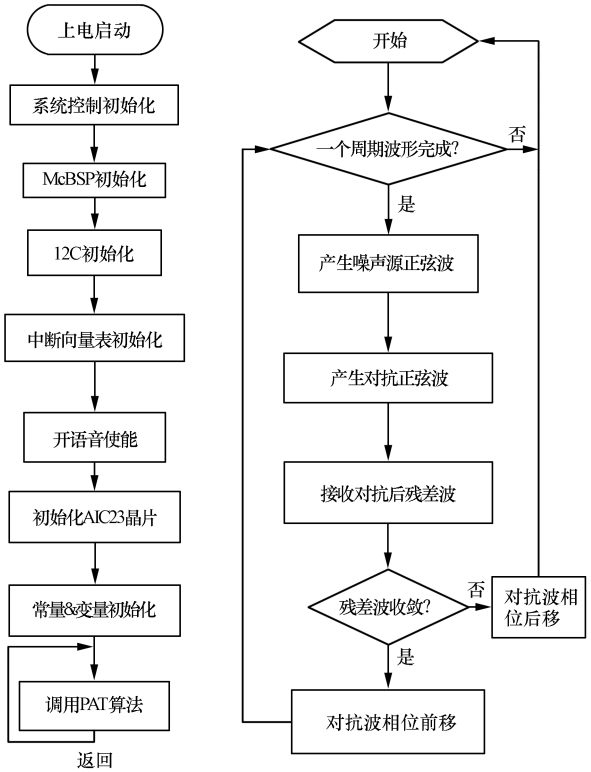



**图 6　基于 PAT 算法的主动消声主程序流程图**

**Fig.6　ANC control program flow chart based on PAT**

为了简化系统组成,这里采用同一个控制器产生初级噪声和次级对抗声波,省去了上游初级噪声采集部分,这样,系统简化为如图所示的反馈控制系统.噪声源 $x(n)$ 为一个单频正弦信号,$y(n)$ 是系统发出的对抗声源,两波形干涉后,差生残余误差 $e(n)$,反馈给主控制器,通过 PAT 算法,不断调整 $y(n)$ 的相位.通过使 $e(n)$ 不断的减小,来使 $\Delta\varphi$ 不断逼近 180°.从而达到声音干涉相消的效果.

## 2.2　自适应消声系统的构建与分析

由于条件关系,这里暂时先通过 MATLAB 进行仿真实验.如图 7 所示,通过 MATLAB 构建的自适应消声系统的系统模型,及消声结构框图[13].

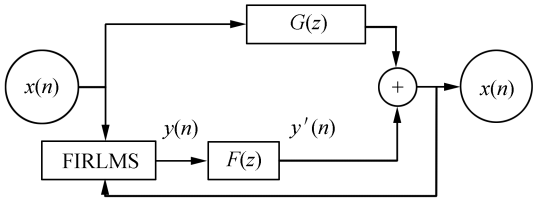



**图 7　自适应消声系统的系统模型及结构框图**

**Fig.7　The system model and structured flowchart of ANC**

其中:$x(n)$ 是在气流上游的传声器(1.reference microphone)测得的参考输入信号,ANC 产生一个与

参考输入信号 $x(n)$ 等值反相的输出信号 $y(n)$,$y(n)$ 驱动扬声器(2.canceling loudspeaker)产生抗噪声信号以减弱管道中的噪声.称噪声源为主声源,扬声器为次级声源.噪声有源控制的基本原理是,参考输入信号 $x(n)$ 和扬声器输出信号 $y(n)$ 之间存在时间延迟,ANC 可以在合适的时间发出抗噪声信号[14].理想情况下,两个信号叠加的结果是噪声被降为零.其中输入传声器和扬声器之间的距离 $L$ 决定了延迟的时间,在实际应用时必须仔细考虑自适应所需的运算时间、延迟时间和距离 $L$ 的关系.下游的误差传声器(3.error microphone)可以实时检测消声效果,以反馈给控制系统,控制系统通过调整参数,来实现 ANC 系统的自适应控制,该信号也叫误差信号或残差信号.

通过相位的不断调整,最终是噪声源与对抗声源在干涉区相位差在 180°左右,并产生消声效果,如图 8 所示.在进行模拟仿真过程中,进行主动消声干涉前,声级计输出的电压值跳动幅度非常大,反映的是初始噪声的强度.当对抗声源介入调整时,其噪声没有降低,反而有一定幅度增加,如图 7 所示.这个是消声系统原理所决定的,目前只能尽可能的缩短其调整时间,并降低噪声增幅.

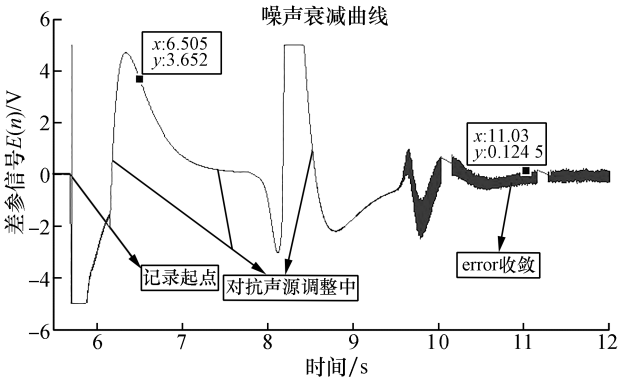



**图 8 干涉过程噪声衰减曲线**

**Fig.8 The attenuation curve of the intervention process**

## 3 结 论

1)分析了铁轮运行过程中噪声构成及产生机理,并根据噪声频谱特性分析结果,运行在 60~120 km/h的城市轨道交通中对车厢影响最大的噪声源为轮轨噪声,虽然噪声频带较宽,且频谱随车速、工况等变化较大,但可针对其噪声来源可在噪声控制过程中进行预测.

2)针对目前地铁噪声特点可将地铁运行特殊环境简化为管道系统,并提出了一种新的减噪方式-基于 PAT 算法的主动消声技术.通过 MATLAB 平台进行了噪声的主动消除模拟仿真,仿真结果表明,经过一定调整周期后,系统能获得明显降噪效果.

**参考文献:**

[1] 龙慧,陈振富,胡萍.软土场地中地铁地下车站对邻近高层建筑地震加速度响应的影响[J].南华大学学报(自然科学版),2017,31(2):90-96.

[2] LIU N N,WANG Y S,SHI L.Annoyance evaluation of subway interior noise based onpsychoacoustical indices[J].Noise & vibration worldwide,2013,44(9):18-24.

[3] HU K,WANG Y S,GUO H,et al.Simulation and optimization for interior sound field of a rail vehicle[J].Noise & vibration in industry,2015,29(3):83-92.

[4] 梁笑娟,宋刚,吴启航,等.广州市地铁噪声水平调查和分析[J].环境科学与术,2008,31(12):113-115;163.

[5] 张晓排,刘岩,钟志方.地铁车内噪声特性[J].噪声与振动控制,2010,30(2):69-71.

[6] 徐靖.隧道中地铁车辆内部噪声分析[J].大连交通大学学报,2013,34(6):39-42;52.

[7] SONG P,ZHAO H.Filtered-x generalized mixed norm (FXGMN) algorithm for active noisecontrol[J].Mechanical systems & signal processing,2018,107:93-104.

[8] HO C,SHYU K,CHANG C,et al.Integrated active noise control for open-fit hearing aids with customized filter [J].Applied acoustics,2018,137:1-8.

[9] KOO D,KIM J,YOO W,et al.An experimental study of the effect of low-noise wheels in reducing noise and vibration[J].Transportation research:part D,2002,7(6):429.

[10] MATSUMOTO K,SUDA Y,FUJII T,et al.The optimum design of an onboard friction control system between wheel and rail in a railway system for improved curvingnegotiation[J].Vehicle system dynamics,2006,44:531-540.

[11] ZHAO T,LIANG J,ZOU L,et al.A new FXLMS algorithm with offline and online secondary-path modeling scheme for active noise control of power transformers[J].IEEE transactions on industrial electronics,2017,64(8):6432-6442.

[12] SABZEVARI S A H,MOAVENIAN M.Application of reinforcement learning for active noisecontrol[J].Turkish journal of electrical engineering & computer sciences,2017,25(4):2606-2613.

[13] LAM B,ELLIOTT S,CHEER J,et al.Physical limits on the performance of active noise control through openwindows[J].Applied acoustics,2018,137:9-17.

[14] GUO X,LI Y,JIANG J,et al.Sparse modeling of nonlinear secondary path for nonlinear active noise control[J].IEEE transactions on instrumentation & measurement.2018,67(3):482-496.

(责任编辑:扶文静)