

主动降噪技术在改善车内噪声上的应用

邓峰¹ 任冬¹ 刘浩¹ 周启明²

1. 东风汽车公司技术中心

2. 中国 Bose 公司

【摘要】 本文阐述了自适应噪声主动控制理论 (Adaptive Active Noise Control, AANC), 并详细介绍了主动降噪系统的组成和应用原理。为验证主动降噪系统的效果, 在某家用三厢轿车上建立了自适应噪声主动控制系统, 并在半消声室对车内噪声问题进行声学标定和调试。标定完成后, 通过实车测试常用的定速和加速等工况证明采用主动降噪系统能有效降低车内噪声, 尤其是低频噪声。

【关键词】 车内噪声 主动降噪 AANC ANC

ANC is Applied on Improving the Vehicle Interior Noise

Deng Feng¹ Ren Dong¹ Liu Hao¹ Zhou Qiming²

1. Dongfeng Motor Corporation Technology Center

2. Bose Automotive China

Abstract: This paper explained the adaptive active noise control theory (Adaptive Active Noise Control, abbreviation is AANC). It also introduce the composition and the principles of the active noise reduction system. In order to verify the effect of active noise reduction system, established an adaptive active noise control system on a family sedan vehicle. And calibrated and tuned up the system parameters for the vehicle interior noise in a semi-anechoic chamber. After acoustic calibration, the vehicle NVH test result of constant speed and acceleration conditions showed that the active noise control system can effectively reduce the vehicle interior noise, especially low frequency noise.

Key words: Vehicle interior noise Active noise control AANC ANC

引言

随着国内汽车销量的增加, 人们对汽车的认知和汽车性能的要求也水涨船高。NVH 作为用户最直接感受到的重要汽车性能维度, 也将面临高要求。目前, 汽车主要还是以内燃机动力为主, 不可避免的会产生发动机轰鸣声, 而汽车 NVH 开发的主要工作之一就是解决轰鸣声问题。本文将要介绍的主动降噪技术, 是在不对原车做较大改动的情况下, 就能较好解决车内轰鸣声的途径。

主动降噪控制 (Active Noise Control, ANC) 概念是 1933 年由 Lueg 提出^[1]。原理很简单, 即让两个等幅值但是相位相反的声信号相互抵消。但该技术的应用发展却并不顺利。即使到了 20 世纪末, 主动降噪技术主要还是停留在学术和研究阶段。但近十年, 由于电子和控制技术成熟、各种硬件的成本大幅度下降, 主动降噪技术在汽车上的广泛应用才变为现实。特别是高速 CPU 出现之后, 人们将自适应滤波技术应用于噪声主动控制, 可使系统能够连续不断地跟踪噪声源及环境的变化, 自动选取控制器参数, 保证最佳降噪效果, 由此就构成了自适应噪声主动控制 (Adaptive Active Noise Control, AANC) 系统。国外整车厂商也陆续将主动降噪技术应用在量产车型上。日本日产汽车公司 1991 年就开始在蓝鸟车型上应用主动降噪技术, 可达到 5~6 dB 的降噪效果。英国莲花公司在 1987—1990 年通过自适应主动降噪

技术, 在 3 000~5 000 r/min 转速段, 降低发动机阶次噪声轰鸣声 10 dB 左右。2003 年, 西班牙巴伦西亚大学对汽车发动机噪声进行主动降噪研究, 可降低车内噪声 10 dB 左右, 且主观评价效果明显^[2]。

ANC 技术与传统的被动降噪技术相比, 有两个较突出的优势: 一是主动性, 可根据原始噪声的特性, 相应地设计和改变控制系统特性, 使噪声控制具有针对性和目的性, 可实现选择性降噪; 二是低频噪声控制效果好。低频噪声在车内噪声中占据主要地位, 而传统的被动降噪措施, 如隔声、吸声、隔振等, 对较低频段内的噪声控制效果均不太理想, 而有源消声技术对降低低频噪声有较好的降噪效果。此外, 噪声主动控制系统体积小、重量轻、附加成本相对较低, 并且对汽车的结构及工作特性几乎没有影响。

1 理论

1.1 主动噪声控制原理

ANC 是在指定区域内人为地、有目的地产生一个次级声信号去控制初级声信号的方法。其基本原理是声波的杨氏干涉理论, 即频率相同、相位相反的两列声波相遇时, 在空间产生干涉和叠加现象。但是干涉的结果究竟使能量增加还是减少, 完全取决于两列声波的相位和幅值关系。

设入射声波 (初级声信号) 为

$$P_p = A \cos(\omega t - kx)$$

则有平均入射声能密度为

$$E_p = \frac{\overline{P_p^2}}{2\rho c^2} = \frac{A^2}{4\rho c^2}$$

现在人为地加上一个满足上述相干条件的声波（次级声信号），即

$$P_s = \beta A \cos(\omega t - kx + \alpha)$$

则叠加后总的声场平均能量密度为

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

于是空间中任一点在次级声波作用前后的声级差为

$$\Delta L_p = 10 \lg \frac{E_p}{E_{ps}} = -10 \lg (1 + 2\beta \cos \alpha + \beta^2)$$

显然，当 β 接近1（振幅相等）， α 接近 π （相位相反）时，对初级声而言，就可以在一定的空间区域得到很大的声衰减。

1.2 自适应主动噪声控制 FXLMS 算法

为使次级声源发出的声音能够有效地抵消车内初级声源的噪声，在有源消声系统中广泛采用自适应滤波技术。自适应滤波技术的关键在于其控制算法，目前在有源消声领域应用比较广泛的算法为 FilteredXLS (FXLMS) 算法。

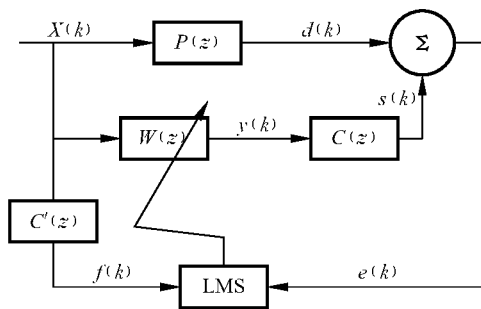


图1 FXLMS 自适应控制算法框图

图1中： $x(k)$ 是参考信号； $P(z)$ 为初级声通道（噪声信号从参考点到误差传声器）的传递函数； $d(k)$ 是 $x(k)$ 经 $P(z)$ 后传到误差传声器处的声信号； $y(k)$ 是控制器输出信号； $C(z)$ 为次级声通道（控制信号经 D/A、功放等到误差传感器的总传递函数； $s(k)$ 是 $y(k)$ 经过 $C(z)$ 后到达误差传声器处的声信号； $e(k)$ 是系统误差信号； $W(z)$ 为自适应 LMS 滤波器。

假设控制滤波器为 M 阶，在时刻 k 时应有控制器输出信号为

$$y(k) = \sum_{i=1}^M w_i x(k-i+1) = \mathbf{W}^T(k) \mathbf{X}(k)$$

参考点噪声信号向量为

$$\mathbf{X}(k) = [x(k), x(k-1), \dots, x(k-M+1)]^T$$

滤波器权系数向量为

$$\mathbf{W}(k) = [w_1, w_2, \dots, w_M]^T$$

经过滤波后的参考噪声信号向量为

$$\mathbf{F}(k) = [f(k), f(k-1), \dots, f(k-M+1)]^T = \mathbf{X}(k) \mathbf{C}'(z) = \mathbf{X}(k) \mathbf{C}(z)$$

控制器输出经误差通道后，到达误差传感器的信号为：

$$s(k) = y(k) C(z) = [\mathbf{W}^T(k) \mathbf{X}(k)] C(z) =$$

$$\mathbf{W}^T(k) \mathbf{X}(k) \mathbf{C}(z) = \mathbf{W}^T(k) \mathbf{X}(k)$$

误差信号表示为：

$$e(k) = d(k) - s(k) = d(k) - \mathbf{W}^T(k) \mathbf{F}(k)$$

同理，对上式处理可以得到 FXLMS 算法的权系数向量公式：

$$\begin{aligned} \mathbf{W}(k+1) &= \mathbf{W}(k) + 2\mu e(k) \mathbf{F}(k) \\ &= \mathbf{W}(k) + 2\mu e(k) \mathbf{X}(k) \mathbf{C}'(z) \end{aligned}$$

式中， μ 为算法的收敛因子。

FXLMS 算法是采用通过次级声通道过滤后的参考噪声信号向量 $\mathbf{F}(k)$ 来修正权系数向量 $\mathbf{W}(k)$ ，这样只要正确估计出 $\mathbf{C}(z)$ ，就可以解决误差声通道的延时问题。

2 车内主动噪声控制系统

2.1 车内噪声特点

汽车的噪声源有很多，其中发动机是主要的噪声源之一。发动机转速阶次的激振力对车内噪声的影响非常大。如果旋转部分的质量完全平衡，转速 1 阶成分的激振力可以做到互相抵消。但是如果是 4 缸发动机，由于其结构特点，转速 2 阶的激振力将不能完全抵消。原因如下^[3]：

1) 燃烧压力引起的扭矩波动，4 缸发动机燃烧每 180° 的曲柄转角燃烧 1 次（每旋转 1 次燃烧 2 次），因此产生了转速 2 阶的扭矩波动。由于扭矩波动的波形不是整齐的正弦波，所以也包含基本倍数的高阶谐波。

2) 活塞惯性力，伴随活塞连杆结构运动，发动机会产生转速 1 阶和 2 阶的惯性力。6 缸直列发动机连杆排列可以不考虑平衡，但是 4 缸直列，V 形 6 缸等就会产生 2 阶成分不平衡。这将成为“高速轰鸣声”的主要激振源。

图 2 为实车测量的加速车内噪声的三维噪声云图，横坐标是频率分布，纵坐标是发动机转速、云图表示车内噪声声压级 A 计权值。可见加速车内噪声的阶次噪声明显，需要重点管控。

2.2 主动噪声控制系统

ANC 系统按照其控制器输入信号的不同可分为，前馈控制系统和反馈控制系统，不同的控制器有各自不同的特点。

图 3 为反馈控制系统。反馈控制系统包括误差传感器、控制装置和扬声器。误差传感器测量信号，输入到控制装置，再推动扬声器，产生一个与前行主声源的声波幅度相等而相位相反的次声源。主声源的声波与次声源的声波在误差传感器的位置抵消，从而达到消声的目的。

图 4 为前馈控制系统。这个系统中有误差传感器、控制装置、扬声器和参考传感器。参考信号与误差信号同时传递到控制装置，然后再推动扬声器产生次声源。前馈控制系统与反馈控制系统的根本不同是前馈系统采用了参考信号。这样系统遇到微小的干扰时，它可以自我调节。前馈控制系统是一个自适应系统，而反馈控制是一个非自适应系统。

2.3 车载 AANC 系统布置形式

本文中所用控制系统采用了自适应前馈控制，是以转速信号为参考，对不同频段的初始噪声进行不同程度的可控性抵消，或对某些特定频段噪声完全保留甚至予以补偿。如图 5 所示为本文中车内主动噪声控制系统示意图。

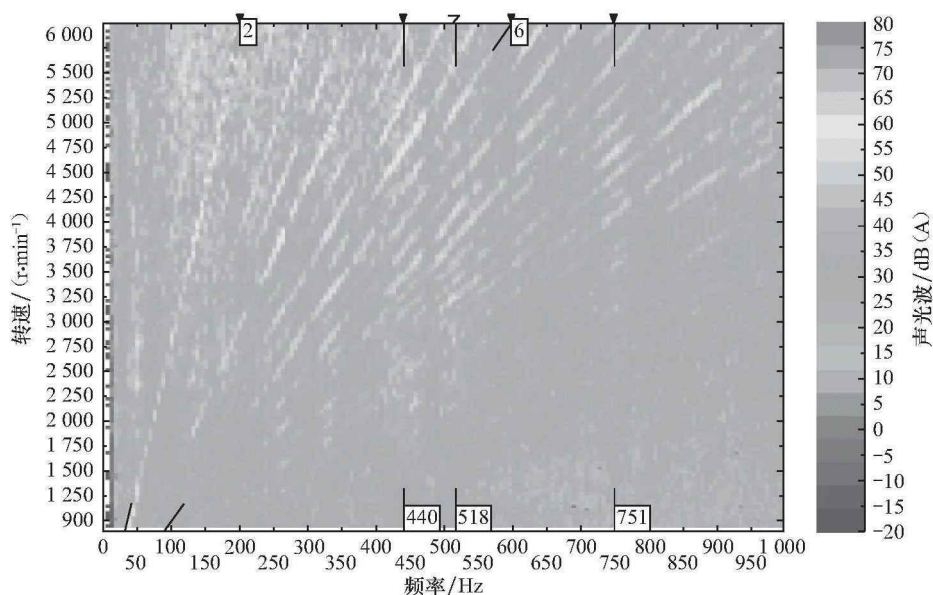


图2 车内噪声 A 计权声压级云图

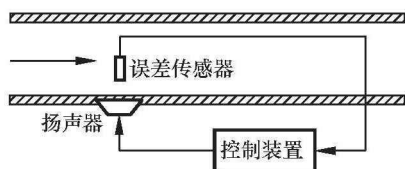


图3 反馈控制系统

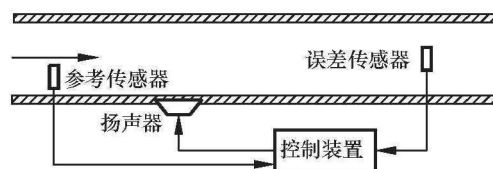


图4 前馈控制系统

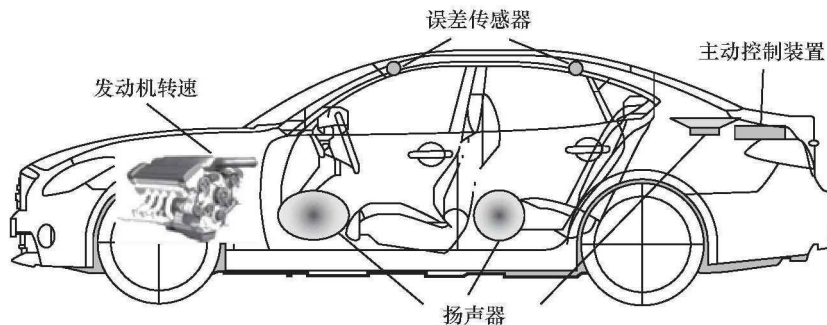


图5 车载 ANC 系统示意图

系统包括主动控制装置、音响系统和误差传声器。主动控制装置包括电子控制元件 (ECU) 和传声器等。产生次级声源的扬声器使用汽车本身的音响。误差传声器安装在乘客附近。发动机的转速信号与传声器的信号一起输入到控制装置内。控制装置发出一个与车内声场幅值相等但是相位相反的声波来抵消车内噪声。

2.3.1 误差传感器

误差传感器实际就是麦克风, 布置在车内需要重点降噪的区域附近, 如图5所示, 主要关注车前排头部空间附近。麦克风的主要作用是监控车内的降噪效果。通过麦克风实时监控到的关注点附近的噪声情况, 实时反馈到 ANC 系统, 控制系统经过一系列运算, 对消音声源进行实时调整。

2.3.2 扬声器

扬声器可利用车载音响系统的扬声器, 对整车不需要额

外增加成本。但扬声器作为输出抵消噪声信号的次级声源, 扬声器的数量及品质对降噪的效果有较大的影响。所以对扬声器基本要求如下^[4]:

- 1) 自适应主动降噪控制 (AANC) 主要解决的是车内低频噪声, 所以扬声器的频率响应特性的下限要尽量低。
- 2) 低频范围内幅频特性曲线要平直, 在此频段内扬声器必须无明显的互调失真或瞬态失真。
- 3) 扬声器体积应尽量小, 使其安装布置不影响封闭空间的声场特性。

2.3.3 功率放大器

对声音信号进行放大, 要求在低频段有较好的频率特性, 动态范围大, 失真度小, AANC 的功率放大器可采用原车音响系统的功放, 这样将不增加原车的整车成本。也可例外改装, 与 AANC 控制系统集成。

2.3.4 AANC 控制系统

AANC 控制系统是除麦克风之外整车必须增加的成本,也是整车 AANC 改装工作的主要成本。AANC 控制系统通过自适应噪声主动控制算法运算,最终实现输出合适的次级声源信号。

2.3.5 转速传感器

发动机转速对车内噪声的影响巨大,所以作为前馈控制系统,转速信号是提高降噪效果的重要因素。本文通过提取原车 ECU 输出给组合仪表的脉冲信号,为 AANC 系统提供发动机转速信息。因为汽油机点火频率与转速的对应关系,所以通过提取控制各汽缸点火的分频电压信号可以测量出发动机的转速。对于原车的 4 缸发动机则每两个脉冲信号表示发动机旋转一周。

2.4 影响 ANC 效果的因素

对一个实际的 ANC 系统,是否能取得好的控制效果,关键因素如下:

1) 初级声源的类型和特征。对于 ANC,最合适的噪声源是集中参数噪声源,它可以用尽量少的初级声源获得最大降噪量。从控制的角度看,如果初级噪声是单频噪声、离散线谱噪声或窄带噪声,则控制系统更容易收敛到稳定状态,而宽带噪声的控制则要难得多。

2) 次级声源和误差传感器的位置和个数。为了获得全局空间上完全复制初级声场,也就是使次级声场成为初级声场的“镜像”,而误差传感器应尽量使实际的控制目标逼近理论上的控制目标。

3) 参考信号及其质量。获得参考信号,就可以构造前馈控制器。好的参考信号应该尽量少的受到噪声“污染”,与误差传感器处的初级噪声保持最大程度的相关。

4) 自适应算法及其控制器硬件。宽带噪声的抵消效果、

系统稳定性、控制器的复杂程度均与自适应算法的类型有关。好的自适应算法应该兼顾收敛性、计算量等方面。控制器硬件的主要指标是采样频率、计算速度、有限字长效应等,它们应该能够实时、准确地完成自适应算法确定的功能。

3 AANC 的改善效果

当在整车上完成车载 ANC 系统的搭建之后,剩下的工作就是对系统参数进行标定,并验证改善效果。标定过程一般由专业人员完成,有点类似音响系统的调试,理论容易理解,标定结果的好坏,所需时间的长短将取决于标定师的经验和对软硬件的操作能力。标定的原则:通过主客观测量,找出问题点,针对噪声峰值点进行重点控制,尤其是主观评价不好的地方。

验证改善效果,我们重点分析了加速、定速两种常用工况。从图 6 可见,当车辆处于加速工况时,随着发动机转速的不同,开启 ANC 系统对乘员舱 2 阶轰鸣声的影响也不尽相同,前排在 3 000 ~ 5 000 r/min 优化大约 10 dB,后排在 1 500 ~ 3 000 r/min 优化大约 10 dB;ANC 系统基本消除了车内噪声的峰值点。

表 1 列出 ANC 系统主要峰值点的降噪量,可见前排在 3 900 r/min、后排在 2 250 r/min 时的降噪效果最大。而原曲线在该转速段都存在峰值。标定后的曲线,在常用的加速工况转速下,不存在明显峰值,且都在 85 dB 之下,从整车开发的经验判断应该不会存在用户抱怨的情况。从后来组织的主观评价结果也验证了这一判断。

从图 7 可以看出,对于车内噪声的 OA 值:前排在 3 000 ~ 4 500 r/min 优化大约 3 dB (A),后排在 1 500 ~ 3 000 r/min 优化大约 5 dB (A)。

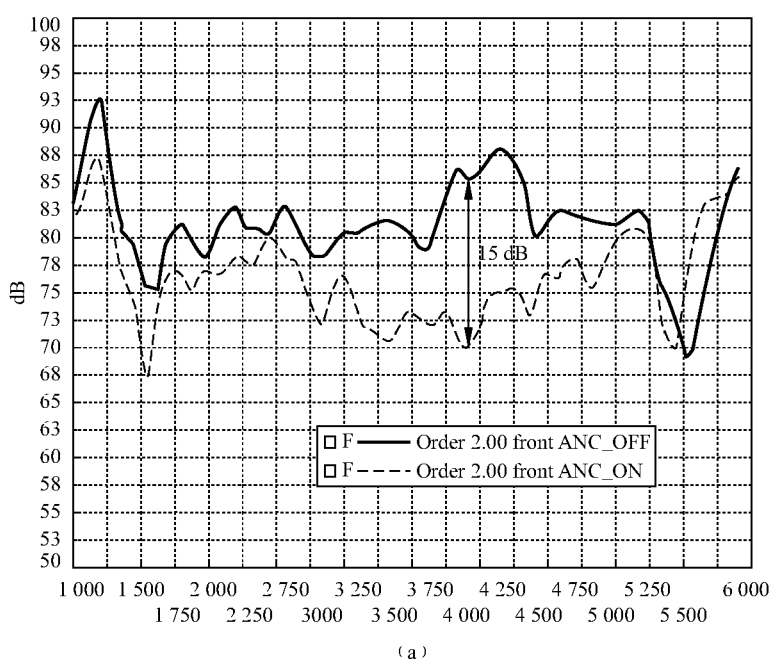


图 6 加速工况车内发动机 2 阶噪声对比曲线

(a) 前排

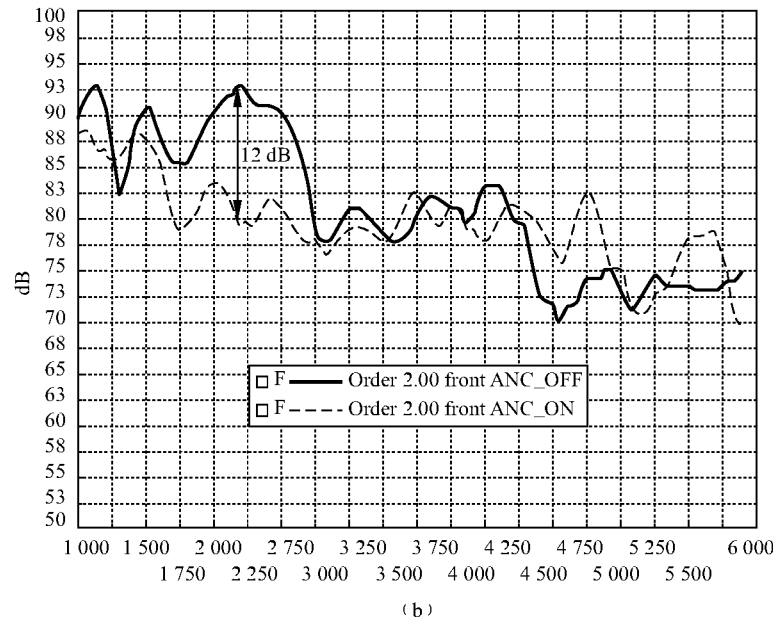


图6 加速工况车内发动机2阶噪声对比曲线(续)
(b) 后排

表1 ANC系统的全油门加速降噪效果

前排		后排	
发动机转速 $/(r \cdot \min^{-1})$	降噪量/dB	发动机转速 $/(r \cdot \min^{-1})$	降噪量/dB
1 200	5.4	1 750	5.8
1 550	7.5	2 250	12.8
3 300	11.8	4 000	5.2
3 900	15.5	—	—
4 800	7.2	—	—

从图8可见50 km/h定速工况后排AANC关、开两种状态

下声压级相差约5.5 dB(A)。100 km/h定速工况前排AANC关、开两种状态下声压级相差约3 dB(A)。之所以前排低速效果明显,后排在高速明显,跟原车前排在高转速存在峰值,后排在低转速存在峰值有关,因为AANC标定时间有限,所以主要解决了原车的峰值点,对车内噪声而言,引起用户抱怨的也是这些峰值点。

4 总结

降噪有两种途径:主动降噪和被动降噪。目前国内在车内主动降噪方面鲜有实际应用的先例,本文对ANC理论进行了分析,并将ANC系统在实车上进行了应用。

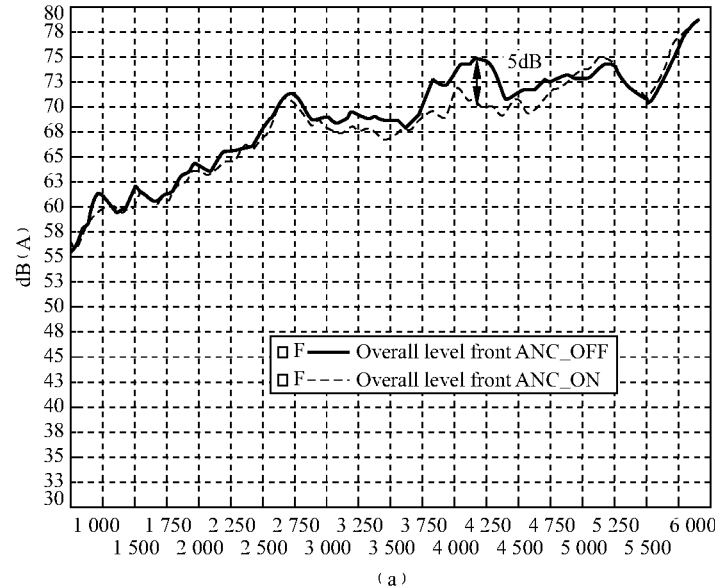


图7 加速工况加速车内噪声声压级对比曲线
(a) 前排

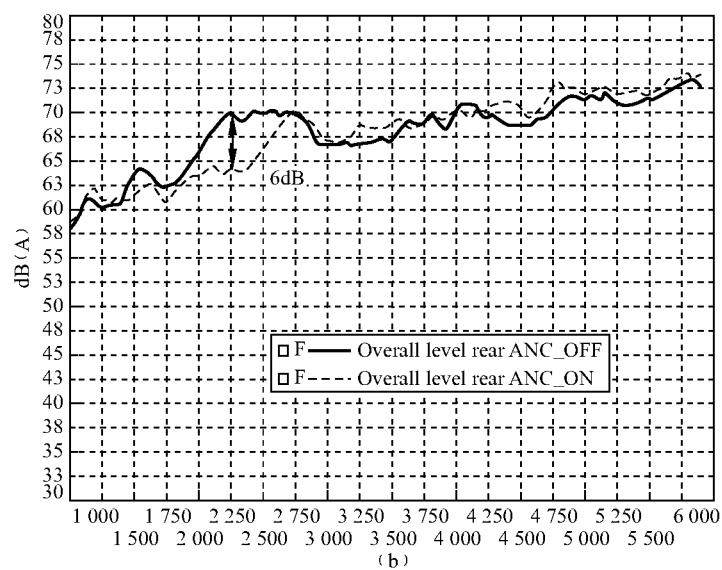
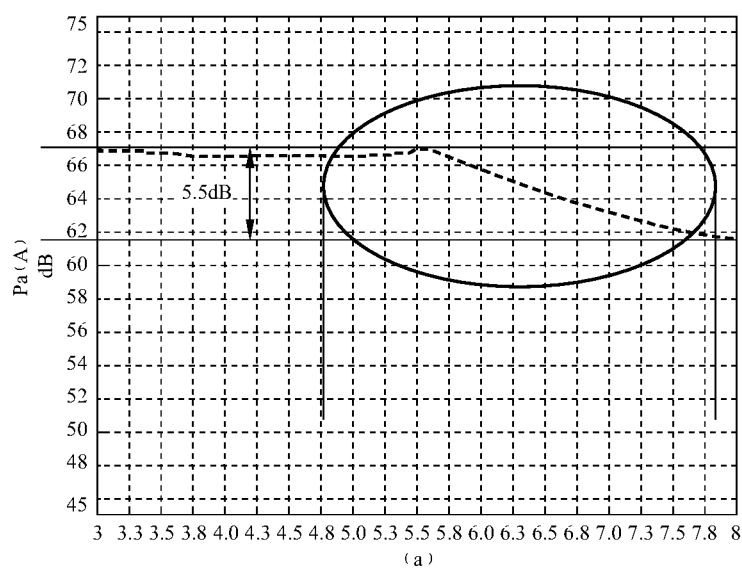
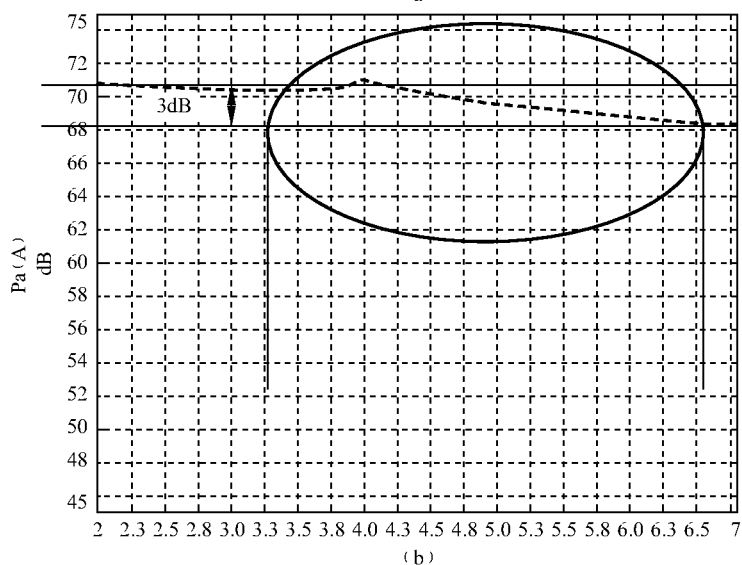


图7 加速工况加速车内噪声声压级对比曲线 (续)

(b) 后排



(a)



(b)

图8 定速工况车内噪声声压级在关、开AANC的对比曲线

(a) 50 km/h, 后排; (b) 100 km/h, 前排

通过大量的实车 NVH 试验分析表明, 基于 ANC 方法对车内噪声进行控制和改善是可行的, 且效果显著。实施 ANC 之后, 基本消除了原车车内的低频噪声的峰值, 解决车内轰鸣声的问题。具体降噪数值: 车内轰鸣声能达到 15 dB 左右

的降噪效果, 车内噪声声压级也能达到 5 dB 左右的降噪效果。

综上所述, AANC 系统在整车 NVH 开发, 尤其是车内轰鸣声的控制方面具有一定的应用前景。

参 考 文 献

- [1] 庞剑, 湛刚, 何华. 汽车噪声与振动——理论与应用 [M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2006.
- [2] 韩善灵, 朱平, 林忠钦. 主动噪声控制技术及其在车内噪声控制中的应用 [J]. 机械, 2004, 31 (6): 55 - 58.
- [3] Fumiyasu Komno, Masahide Onishi, Kazuhisa Kotegawa. Active Noise Control System for Engine Booming Noise [J]. Panasonic Technical Journal, 2009, 54 (4).
- [4] 刘宗巍. 基于发动机转速的车内噪声自适应主动控制系统研究 [D]. 长春: 吉林大学, 2004.