

See discussions, stats, and author profiles for this publication at: <https://www.researchgate.net/publication/333601725>

Active Noise Control of Automobile Interior Noise – A Review on Researches and Applications

Conference Paper · May 2019

CITATIONS

0

READS

437

7 authors, including:



Liu Feng

Chinese Academy of Sciences

10 PUBLICATIONS 7 CITATIONS

[SEE PROFILE](#)



Ming Wu

Chinese Academy of Sciences

51 PUBLICATIONS 422 CITATIONS

[SEE PROFILE](#)



Rong Han

Chinese Academy of Sciences

6 PUBLICATIONS 5 CITATIONS

[SEE PROFILE](#)



Wang Yushuai

Beijing Institute of Technology

14 PUBLICATIONS 21 CITATIONS

[SEE PROFILE](#)

Some of the authors of this publication are also working on these related projects:



Active noise control in an automobile cabin [View project](#)



Teaching Reform and Website Construction of Testing Technology [View project](#)

汽车内部噪声主动控制研究与应用综述

刘峰¹, 吴鸣^{1,2}, 韩荣^{1,2}, 王玉帅³, 贾尚帅⁴, 韩铁礼⁴, 杨军^{1,2}

¹中国科学院声学研究所噪声与振动重点实验室, ²中国科学院大学, ³北京理工大学机械与车辆学院

⁴中车唐山机车车辆有限公司

[摘要]主动噪声控制技术因其优异的低频噪声控制能力, 从上世纪 80 年代开始陆续被用于汽车领域解决车内低频噪声问题, 至今经历了近 40 年的发展。目前, 已经有众多车型全系标配主动噪声控制系统。在这一发展历程中, 主动噪声控制系统经历了由模拟系统向数字系统的升级, 控制目标由声压级控制向声品质控制转变, 控制对象由发动机噪声向路噪和进排气噪声拓展, 产生了一系列研究成果和商用化系统。为了总结行业发展历史与现状, 探讨发展方向, 文章以车内噪声来源为分类依据, 综述了主动噪声控制技术在车内噪声控制中的应用并指出了未来发展趋势, 可供主动噪声控制算法研究人员和汽车行业工程技术人员参考。

关键词:发动机噪声, 路面-轮胎噪, 主动噪声控制, 声品质, 独立声区, 综述

Active Noise Control of Automobile Interior Noise - A Review on Researches and Applications

Liu Feng¹, Wu Ming^{1,2}, Han Rong^{1,2}, Wang Yushuai³, Jia Shangshuai⁴, Han Tieli⁴, Yang Jun^{1,2}

¹ Key Laboratory of Noise and Vibration Research, Institute of Acoustics, Chinese Academy of Sciences

² University of Chinese Academy of Sciences

³ School of Mechanical Engineering, Beijing Institute of Technology

⁴ CRCC Tangshan Co., Ltd

[Abstract] Active noise control (ANC) has been used to control automobile interior noise for almost 40 years since 1980s because of its effectiveness in controlling low frequency noise. Nowadays, there are many automobiles offer ANC system. In this process, ANC system was upgraded from analog system to digital system. The control target transformed from sound pressure level to sound quality. The target noise to control extended from engine noise to road-tire noise and exhaust noise. A series of research outputs and commercial systems have been produced. In order to summarize the history and current situation and forecast the future of active noise control in automobile, we review the researches and applications of ANC in automobile according to the source of automobile interior noise, which can be referenced by researchers in the institutes and engineers in automobile industry.

Key words: Engine noise, Road-tire noise, Active noise control, Sound quality, Individual sound zone, Review

1 引言

汽车 NVH (noise, vibration and harshness) 是提升汽车品质最核心的技术之一，车内噪声控制是 NVH 研究的重要组成部分。从是否消耗能量的角度，噪声控制技术可以分为被动噪声控制技术 (passive noise control, PNC) 和主动噪声控制技术^[1] (active noise control, ANC)。被动噪声控制技术依靠修改结构设计或使用减振器和吸振器等技术手段来降低噪声，这些技术通常对中高频（高于 500Hz）噪声非常有效，但对低频噪声效果有限^[2]。主动噪声控制基于声波相消干涉原理，通过引入与原始噪声等幅反相的可控次级声源来抵消或大幅减小原始噪声^[1; 3-5]。与被动噪声控制相比，主动噪声控制技术适合控制低频噪声，控制目标灵活，系统设计限制条件少，切换方便，不仅可以控制噪声幅度，而且还可以通过控制噪声频谱结构，改善声品质^[6-14]。

当前汽车行业主流的噪声控制技术仍然是被动控制技术，但是被动控制方案往往是汽车重量、噪声控制效果和成本折中的结果。随着汽车轻量化的推进和国家对汽车排放要求的不断提高，可变缸技术等新技术的应用，混合动力汽车、纯电动汽车等新能源汽车的出现，传统的被动噪声控制技术已不能满足汽车 NVH 发展的需求，主要表现在以下几个方面：

第一，被动噪声控制对低频噪声控制效果差，控制频带窄，且附加质量大。提高汽车燃油效率，降低二氧化碳排放是汽车设计的发展趋势，轻量化设计是实现这一目标的重要手段^[15; 16]。但轻量化设计常常会引起车内低频噪声，使用被动方法控制车内低频噪声会显著增加车重，反而降低燃油效率，增加尾气排放^[16]，与设计目标背道而驰。

第二，被动噪声控制效果对车辆调校要求较高，在某一频率下调校好的设计也许对其他频率的噪声并不适用^[16]。例如，对于混合动力汽车和可变缸汽车^[17]来讲，在某一动力源或者某个缸数下调校好的降噪方案，当动力源改变或气缸数变化时，原来调校好的降噪方案有可能失效。

第三，被动噪声控制技术往往需要经过多次迭代才能达到降噪目标，设计周期长，时间成本高。

第四，被动噪声控制一致性差，同一型号的汽车噪声水平相差较大^[18]。

第五，不同年龄段和不同种族的人对车内声音的感知不尽相同^[19]，如果使用被动方法调校同一款车型以满足不同市场的客户，成本将大幅提高，主动噪声控制方法则只需要调整控制器参数即可实现控制目标。

第六，对于纯电动汽车，车内声音较小，导致驾驶体验不佳。此外，纯电动汽车低速行驶时车外噪声较小，威胁行人安全。**GB 7258-2017《机动车运行安全技术条件》**中规定“纯电动汽车、插电式混合动力汽车在车辆起步且车速低于 20km/h 时，应能给车外人员发出适当的提示性声响”；推荐性国家标准《电动汽车低速行驶提示音技术要求》征求意见稿对匀速向前行驶，车速为 10km/h 和 20 km/h 及倒档行驶时的车外最低声压级限值作了具体规定。被动噪声控制技术对解决这个问题无能为力，但主动噪声控制技术在解决这个问题时有非常大的发挥空间，目前已经取得了一些研究成果^[20; 21]。

从上世纪 80 年代初开始，在科研人员和工业界近 40 年的共同努力下，车内噪声主动控制算法和商用化取得了长足的发展。文章以车内噪声来源为分类依据，综述了车内噪声主动控制研究与应用近 40 年来的发展，结合汽车行业需求指出在新能源汽车时代，汽车 NVH 工程师、汽车电子工程师和汽车音响工程师应紧密配合、优势互补，共同打造智能车载声学系统。广义来讲，车内噪声主动控制、车内独立声区控制、车内声音合成和车外警示音合成均可以归为汽车主动噪声控制范畴，但限于篇幅，本文仅对车内噪声主动控制的研究和应用进行综述。

文章结构如下：第一部分介绍了车内噪声主动控制系统的基本原理。第二部分论述了车内噪声

的主要来源及特性。第三部分是文章的主体部分，分别介绍了发动机噪声和路面-轮胎噪声主动控制技术的发展。第四部分介绍了当前商用化车内噪声主动控制系统。第五部分展望了车内噪声主动控制技术的发展趋势。第六部分是文章的结论。

2 车内噪声主动控制系统工作原理

根据是否需要参考传感器，主动噪声控制系统可以分为前馈控制系统和反馈控制系统^[22]。前馈控制系统具有良好的稳定性，因此商用化车内噪声主动控制系统多为前馈系统，反馈系统很少见。典型的车内噪声前馈主动控制系统如图 1 所示，参考传感器持续为控制器提供参考信号，控制器根据参考信号和控制算法计算驱动信号，驱动信号经汽车音响系统输出与初级噪声产生相消干涉，从而达到降低车内噪声的目的，布置在车内的误差传感器持续监测车内噪声并传输至控制器，控制器根据误差信号、参考信号和控制算法自适应地计算驱动信号并不断循环。根据系统工作过程可知，车内噪声主动控制系统主要由四部分组成。

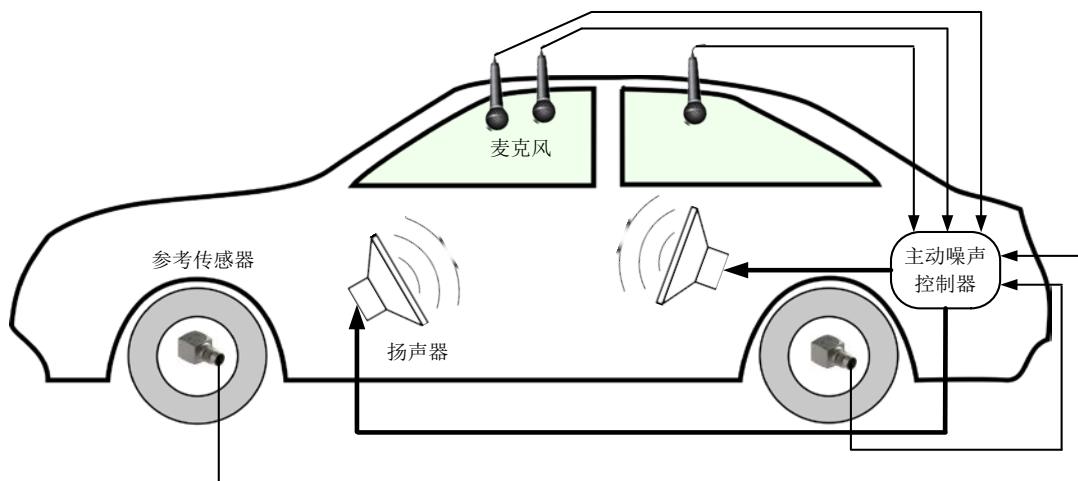


图 1 车内噪声前馈主动控制系统示意图

- (1) **参考传感器**，为主动噪声控制器提供参考信号，一般为声压传感器、振动加速度传感器或转速传感器。控制频率与发动机转速相关的车内噪声时，参考传感器一般为转速传感器，如 Bose 和 Harman 的发动机噪声控制系统。控制路面-轮胎噪声时，参考传感器一般为多个振动加速度传感器，布置在汽车悬架上^[18]。需要指出的是只有前馈控制系统需要参考传感器，反馈控制不需要^[3]。
- (2) **误差传感器**，用来监测车内噪声，为控制器提供反馈，一般为声压传感器。为了在降噪性能和成本之间取得平衡，现有的商用化汽车主动噪声控制系统使用 3 个或 4 个误差传感器比较常见。例如别克昂科威和凯迪拉克 XTS 均使用了 3 个声压传感器作为误差传感器，分别位于前排头顶拉手处（两个）和后排中央车顶处，而奥迪 S8 则使用了 4 个声传传感器作为误差传感器^[17]。
- (3) **主动噪声控制器**，接收来自参考传感器和误差传感器的信号，根据控制目标和自适应控制算法自动生成驱动信号，驱动信号驱动执行器（一般为车内扬声器）工作。主动噪声控制器是车内噪声主动控制系统的中心。
- (4) **执行器**，将控制器产生的驱动信号转换为声信号，与车内初级噪声（不想听到的噪声）发生相消干涉，从而达到控制车内噪声的目的，执行器一般为车内扬声器，个数主要取决于车内音响

系统，例如奥迪 S8 使用了 5 个扬声器^[17]（4 个车门扬声器及一个后置扬声器），控制信号进入扬声器前需要经过功率放大器进行放大。

车内噪声主动控制算法主要基于 FxLMS 算法^[23-25]及其变体，关于主动噪声控制算法的详细内容可参考 Kuo 教授、Elliott 教授和陈克安教授的专著^[1; 3; 26]，这三本专著全面系统地介绍了主动噪声控制算法及控制器设计。

3 车内噪声主要来源及特性

汽车噪声是发动机噪声、传动系统噪声、进排气噪声、路面-轮胎噪声、风噪声、制动噪声、附件噪声和 BSR（buzz, squeak, rattle）噪声共同作用的结果^[27]。从影响区域上可分为车外噪声和车内噪声两大类^[27]，除车内 BSR 噪声外，其它噪声均产生于车外，通过车身以某种方式传递到车内^[28]。以上所述声源中，车内噪声主要来源有四个：发动机噪声、进排气噪声、路面-轮胎噪声和风激励引起的噪声^[28]，下面分别介绍这四种声源及其频率特性。

3.1 发动机噪声（engine noise）

发动机噪声主要由机械噪声和燃烧噪声两部分组成。机械噪声（比如由活塞运动产生的噪声）主要为脉冲噪声，其频谱比较平坦。燃烧噪声来自作用在发动机结构上的气体压力，它引起振动，然后辐射噪声。燃烧噪声以谐波噪声为主，直接与发动机转速相关^[27; 29]。对于四冲程发动机，发动机点火频率与气缸个数的关系为：

$$f_0 = \frac{n}{60} \times \frac{N}{2} \quad (1)$$

式中， f_0 为发动机点火频率， n 为发动机转速，单位为 rpm， N 为气缸个数。发动机点火频率及其倍频和半频的幅值比例关系决定了发动机的声品质。例如豪华车要求声音和谐悦耳，要达到这样的效果，就要求车内声音中尽可能只含有发动机点火频率的整数阶次，尽可能降低半阶次的成分^[29]；运动型车要求驾驶起来声音动感，声音中不仅点火阶次应该占主导地位，并且也还要包含点火阶次的谐波成分及其半阶成分^[30]。因此，如果使用主动控制技术控制发动机声品质，就需要控制点火频率的阶次。对于四缸发动机，当其转速范围为 800~6000rpm，其点火频率范围为 26.7~200Hz，这个频率范围是主动噪声控制的理想应用范围^[31]。而且从噪声的频谱特征来看，发动机噪声频率成分简单，与发动机转速严格相关，可以使用发动机转速信号作为前馈控制的参考信号来设计控制系统。

3.2 进排气噪声（intake and exhaust Noise）

进排气声源主要有三类^[27]：①主要噪声源。当不稳定质量流通过控制阀时，引起歧管压力波动，压力波动传递到进气孔（排气尾管）后辐射噪声。②次要声源。由气流在进气和排气系统中流动产生的噪声，这种自激噪声一般称为流动噪声。③壳体噪声。以上两种噪声激励进气和排气尾管产生的结构辐射噪声。从频率成分上来看，上述第一类噪声以发动机点火频率低频谐波成分为主，第二类噪声既含有低频谐波成分也包含高频谐波成分。某四冲程汽油机排气噪声频谱如图 2 所示，从频谱图可以看出，噪声的频率成分以发动机点火频率（93.3Hz）及其倍频为主，且包含点火频率的半频。由以上分析可知，进排气噪声以低频谐波噪声为主，且与发动机转速严格相关，是主动噪声控制理想的应用对象。

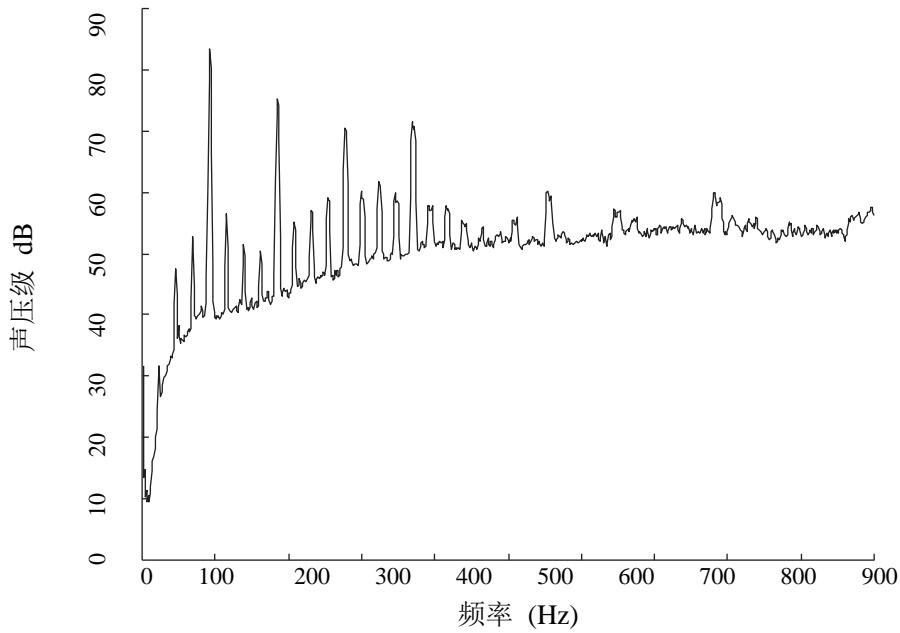


图 2 距 1.6L 四冲程汽油机排气管 0.5m 采集的噪声频谱图（满负荷，2800rpm）^[27]

3.3 路面-轮胎噪声 (road-tire noise)

路面-轮胎噪声是由轮胎和路面接触产生的噪声，由于轮胎设计不同，路面-轮胎噪声相差可达 10dB。路面-轮胎噪声主要由胎面空气泵和轮胎振动引起^[19]。空气泵主要有两类：由轮胎胎面引起空气泵和由路面不平度引起空气泵^[32]。对于平坦路面，空气噪声主要由轮胎胎面空气泵引起，由于轮胎转动，在接地时胎面花纹槽的容积缩小，槽内空气被挤出，而当胎面离地时，花纹槽的容积恢复，空气又被吸入槽内，这样挤出、吸入所产生的噪声叫作空气泵噪声^[33]。相反地，当车辆在粗糙路面上行驶时会出现由路面不平引起的空气泵噪声，在实际情况下这两种空气泵共同作用产生噪声。

路面不平和轮胎花纹的不规则引起轮胎振动，轮胎振动可以直接辐射噪声，也可能通过轮胎和悬架的传递在车内产生噪声，既包含随机成分也包含窄带成分。一般情况下，由冲击和滑动粘附引起的轮胎切向激励产生中高频噪声，由路面不平引起的轮胎径向激励产生低频噪声，这些低频噪声是主动噪声控制的潜在目标。由以上分析可以看出，由于路面-轮胎噪声的随机性及结构激励到车内声响应传递途径的复杂性，获得与车内噪声相干性好的参考信号不容易，这也是路面-轮胎噪声主动控制的难点之一。

3.4 风噪声 (wind noise)

行驶的汽车与空气产生相对运动，运动的空气作用在车身上，在车内产生的噪声称为风噪声，也称为空气动力噪声^[28]。汽车在低速行驶时，车内噪声主要来自发动机噪声和路面-轮胎噪声，风噪声成分较小。但当汽车高速（大于 100km/h）行驶时，风噪成为车内噪声的主要来源^[22; 32; 34]。根据风噪声的表现形式，风噪可以分为以下三类^[32; 34]：

(1) 由于汽车在空气中高速行驶所产生的气动噪声。当汽车高速行驶时，气流在汽车表面产生的湍流压力脉动激起车身壁板振动而向车内辐射噪声，这类噪声主要取决于汽车空气动力学系数，其频率范围为 31.5~63Hz，且以低频为主。

(2) 湍流空气流过缝隙产生的气动噪声。这类噪声主要取决于汽车的密封情况，如车门和车窗等的密封，其频率成分与 (1) 类似。

(3) 由于外部风况变化引起的空气动力学噪声。例如，高速公路上横风引起的噪声，此类噪声与上述两种截然不同。外部风噪声具有脉冲性，其频率一般大于 300Hz。

虽然汽车高速行驶时，风噪在车内噪声中占主导地位，而且风噪的频率大部分在主动噪声控制频率范围 (<500Hz) 内^[31]，但关于风噪主动控制的研究非常缺乏^[32]。

上述主要声源对车内噪声的贡献量是随着车速、外部环境（如风速、天气等）和路况变化的。但总体来讲，汽车在怠速和低速行驶时，主要噪声来自发动机和其它动力辅助系统（如进气系统和排气系统）。当车速达到 50km/h 时，路面-轮胎噪声增加并随车速的提高而增加。当车速超过 80km/h 时，路面-轮胎噪声可能会比发动机噪声大，甚至掩蔽发动机噪声，成为主要声源，特别是在粗糙路面上，路面噪声更加突出。当车速达到 100km/h 时，风噪就开始出现。当车速达到 120km/h 时，风噪成为汽车的主要声源。当车速进一步提高时，风噪有可能完全掩盖发动机噪声和路面-轮胎噪声^[28]，图 3 为车速与车内噪声源的关系示意图^[28]。有一点需要注意，这里所提到的车速均是定性说明，并不指精确值，实际情况会随车辆和行驶环境发生变化。

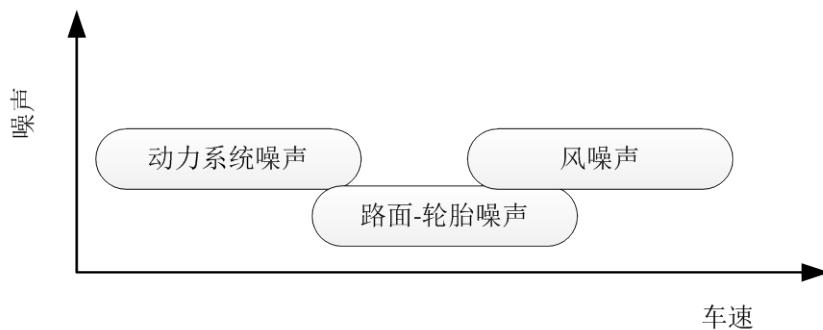


图 3 汽车车速与车内噪声源关系示意图^[28]

4 车内噪声主动控制

根据车内噪声来源，车内噪声主动控制系统可分为发动机噪声控制系统、路面-轮胎噪声控制系统、进排气噪声控制系统和风噪声控制系统。发动机噪声由于频率成分简单、参考信号易于获取，因此研究难度较少，是研究最早，也是目前大规模商用化的技术。路噪主动控制系统经历了二十多年的研究，取得了一系列成果，最近也有量产车型报道^[35]。进排气噪声主动控制系统从原理上来说，和发动机噪声类似，但由于系统工作环境恶劣，工程化难度较大。此外，进排气噪声对人的影响较小，受关注程度不高，因此商用化报道较少。风噪声来源广且频带宽，参考信号不易获取，主动控制难度较大，目前研究进展缓慢。本文暂不讨论进排气噪声和风噪声主动控制。

4.1 发动机噪声主动控制

1984年，Oswald率先将主动噪声控制技术应用于发动机噪声控制，并在整个驾驶室内都取得了降噪效果^[36]，但由于Oswald当时使用的是模拟电路，系统收敛速度较慢。随后Elliott等使用数字电路对Oswald的系统进行了改进并且在实车上做了验证试验，系统收敛速度明显加快^[4]。

1988年，英国南安普顿大学声音与振动研究所 (ISVR) 和莲花工程公司 (Lotus Engineering) 合作开发了前馈型车内噪声主动控制系统，用来控制发动机点火频率噪声及其谐波成分，该系统使用了4个扬声器作为次级声源、8个传声器作为误差传感器。当发动机转速为3000~4000rpm以上时，前排座位点火频率处的声压级降低了约10dB，总的A计权声压级降低了4~5dBA^[16]。但该系统的不足是主动噪声控制系统独立于汽车音响系统，导致成本较高。但在当时的条件下，能够做出这样的研究

成果，已经非常出色了，这也奠定了南安普顿大学ISVR在振动噪声主动控制领域的领导地位。

1992年，尼桑的Hasegawa等^[37]首次将ANC系统应用于量产蓝鸟车型，控制由发动机二阶噪声引起的车内轰鸣声，显著降低了驾驶室噪声。该系统是首次将主动噪声控制技术用于量产车型上，具有划时代的意义。但是该系统没有利用原车的音响系统，导致系统成本较高^[38]。

2001年，本田汽车将反馈控制策略用于汽车前排40Hz轰鸣声控制^[31]，同时，将前馈策略用于防止汽车后排噪声被放大。由于轰鸣声频带较窄，与40Hz波长相比，麦克风安装离扬声器很近，所以反馈控制在控制声腔共振轰鸣声时取得了较好的结果。实测结果表明，40Hz窄带噪声控制后约下降10dB。该系统是第一个将主动噪声控制系统与汽车音响系统集成在一起的商用系统。为了降低成本，系统主要从以下三方面入手：(1) 使用反馈控制策略，不需要参考传感器；(2) 使用模拟电路；(3) 将主动噪声控制系统与汽车音响系统集成，共用硬件。成本的降低使该系统有可能大规模商用。

2003年，西班牙瓦伦西亚理工大学的Gonzalez^[39]研究了主动噪声控制对发动机声品质的影响，分别使用了基于心理声学指标的评价方法和主观评价方法对主动控制前、控制后的噪声品质进行评价。基于心理声学指标的评价方法表明，主动控制在改善声音愉悦度方面取得了令人满意的结果；主观评价结果表明，绝大多数情况下主动控制可以改善声学舒适性。但是，在少部分情况下，虽然声压级降低了，仍有部分主观评价人员认为舒适度变差了。所以，改善汽车声品质不仅仅是使声压级更低，同时还要考虑人耳对声音的感知和驾乘人员对车内噪声的预期，需要考虑更加适合声品质控制的算法。

2004年，英国南安普顿大学ISVR的Rees在ANE(Adaptive noise equalizer)算法^[40]的基础上提出了三种主动噪声频谱塑形(Active Sound-Profiling)算法^[41, 42]并分析了其稳定性，该算法可以用于控制发动机各阶次对应噪声的幅值进而控制车内声品质，算法对次级通道估计误差有更好的鲁棒性。2005年，Kuo等^[6, 43]在主动噪声均衡^[44]的基础上首次提出主动声品质控制的概念，并于2008年将频域子带无延时算法^[7]应用于主动声品质控制中，为车内噪声品质主动控制奠定了理论基础。

传统ANC系统的控制目标是尽可能地降低误差传感器处的声压级。但是在汽车领域，并不是声压级越低越好，乘员希望得到的是好的声品质，有时为了改善声品质需要在车辆加速时增强某些频率处的噪声，以往是通过排气系统的设计来实现这个目标的。但是排气系统有时会提高巡航时的车内噪声和车外噪声。此外，该方法还有可能降低其它频段的噪声，进而影响加速时车内声压级与发动机转速的线性度。为了解决这个问题，本田的Kobayashi等^[45]于2008年提出了主动声音控制(Active sound control, ASC)的概念，ASC概念如图4所示。从功能上来讲，ASC包含了ANC的功能。ASC除了能降低噪声外，还可以根据需求对某些转速下的噪声进行增强，进而改善车内声品质。

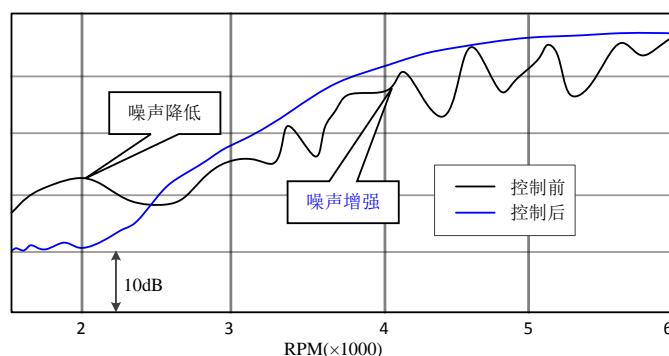


图4 ASC概念示意图^[45]

2009 年, 比利时鲁汶大学的 de Oliveira^[8; 46-48]等针对发动机声品质主动控制做了大量的理论和实验研究, 提出了 NEX-LMS 算法, 该算法首先依据 Sun 等^[49]提出的算法对传统 FXLMS 算法做了改进, 加快了收敛速度, 其次, 在参考信号中引入了归一化滤波器来补偿次级通道动态特性的影响, 使得归一化后的滤波参考信号的功率在整个感兴趣的频带相等, 从而减小滤波参考信号的动态范围, 加快算法的收敛速度。除了收敛速度方面的改进外, NEX-LMS 算法可以预先设计多个阶次-转速曲线, 使控制后误差信号的阶次-转速曲线分别达到设计目标。但是该算法仅适用于稳态窄带噪声或缓慢变化的窄带噪声, 并且没有考虑各谐波的相位差。Mosquera-Sánchez 等^[50-52]在 de Oliveira 研究的基础上, 提出改善声品质的多谐波幅值和相对相位控制算法, 该算法不但可以实现独立控制多个窄带噪声的幅值, 而且可以控制谐波间的相对相位, 最终达到控制噪声响度和粗糙度地目标。在前期研究的基础上, Mosquera-Sánchez 等^[9]于 2018 年提出了基于声品质指标(响度、粗糙度、尖锐度、音调)优化的主动噪声控制算法并将其应用于混合动力汽车传动系统声品质控制。这是主动噪声控制在声品质控制方面的有益尝试, 与已有的主动声品质控制研究不同的是 Mosquera-Sánchez 等直接将声品质指标作为系统的优化目标, 控制结果是可预期的, 而以往的研究还是以声压级作为控制目标, 待实施控制后再计算声品质指标的改善, 控制结果不可预期。

4.2 路噪主动控制

与发动机噪声相比, 路噪频带宽, 传递路径复杂, 参考信号不易获取, 研究难度大。1994 年, 英国南安普顿大学 ISVR 联合莲花工程公司 (Lotus Engineering) 成功将前馈主动控制技术应用于路噪控制^[18], 系统使用车辆悬架和车体振动加速度作为前馈控制的参考信号。为了获得理想的降噪量, 研究发现, 需要 6 个加速度传感器为控制器提供参考信号, 这是因为轮胎各方向振动不相关, 参考信号需要包含各主要噪声贡献源。测试结果表明: 当车速为 60km/h 时, 在驾驶员头部 100~200Hz 频带内的降噪量达到约 7dB, 主动降噪前后频谱如图 5 所示。这一研究也指出了影响路噪主动控制效果的主要因素: (1) 参考信号与路噪的相干性, 相干性越好, 降噪量越大, 反之亦然; (2) 参考信号相对初级噪声的超前量, 参考信号要有足够的超前量以保证控制器能实时生成控制信号。

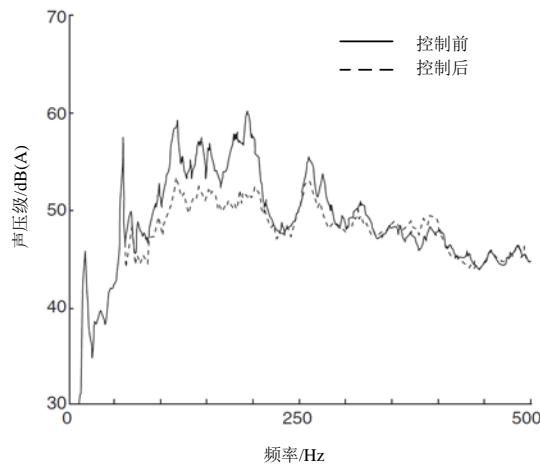


图 5 主动噪声控制前后频谱图

为了选择合适的参考传感器, Heatwole 等^[53]提出了车内结构噪声前馈主动控制参考传感器选择方法。南安普顿大学的路噪主动控制系统以扬声器作为控制器。1998 年, Dehandschutter 等^[54]提出使用振动作动器来控制车身振动进而控制结构辐射噪声, 90km/h 路试结果表明: 在 75~105Hz 频带范围内, 误差传感器位置降噪量为 6.9dB, 乘员人耳处的降噪量为 6.1dB。

以上所述均为前馈控制系统, 前馈控制系统稳定性好, 但需要布置多个参考传感器, 成本较高。

此外，当参考信号与车内噪声相干性较差时，控制效果将大打折扣。Cheer 等^[55]将反馈控制引入车内路噪控制，系统使用车载音响系统作为次级源，低成本麦克风作为误差传感器，大大降低了系统实现成本。

路噪频带宽，传递路径复杂，因此路噪主动控制系统需要布置多个参考传感器，多个次级源和多个误差传感器，导致时域 FXLMS 算法需要执行的卷积运算量大，对系统的实时性提了挑战。为了解决这个问题，Duan 等提出了时频域 FXLMS 算法^[56]，算法将时域卷积运算转换为频域相乘，在频域更新控制器，在时域计算控制信号，降低了计算复杂度，并且控制效果与时域算法相当。

当参考信号与车内噪声相干性较差时，前馈控制效果较差。为了解决这个问题，Duan 等将前馈和反馈算法结合^[57]，提出车内路噪主动控制混合算法，系统利用了前馈控制和反馈控制的优点，提高了降噪量，改善了纯反馈系统稳定性不足的缺点。

2013 年，南安普顿大学的 Cheer 系统地研究了车内声环境主动控制^[32; 58]，该研究将声场重建技术引入汽车声环境控制，在前排和后排分别产生独立的听音区。在路噪主动控制方面，该研究考虑了系统的大规模应用，在算法设计时考虑了成本因素，使用前馈策略控制发动机噪声，使用反馈策略控制路面-轮胎噪声^[59; 60]，大幅减少参考传感器的使用，降低了成本。

2018 年，韩国平昌冬奥会使用了现代的 Nexo 电动车，该车由燃料电池驱动，因此非常安静，车内仅有路噪传入乘员耳内。为了克服路噪问题，现代开发了量产的路噪主动控制系统^[35; 61]，系统在四个头靠附近形成了静音区。系统使用了四个数字加速度计作为参考信号，八个麦克风作为误差信号，为了安装方便，使误差信号远离人头，系统还使用了虚拟传声器技术。实车测试结果表明，系统在 500Hz 以下对四个座位的平均降噪量达到了 4.6dB，降噪前后四个位置的频谱如图 6 所示。由图 6 可知，系统在 500Hz 以下均有降噪量，主要降噪频段为 100~400Hz，各位置降噪水平有差异。主动噪声控制系统的成功使用不但提升了汽车的舒适性，而且避免了被动控制方法造成的车重增加，提高了可行驶里程^[35]。

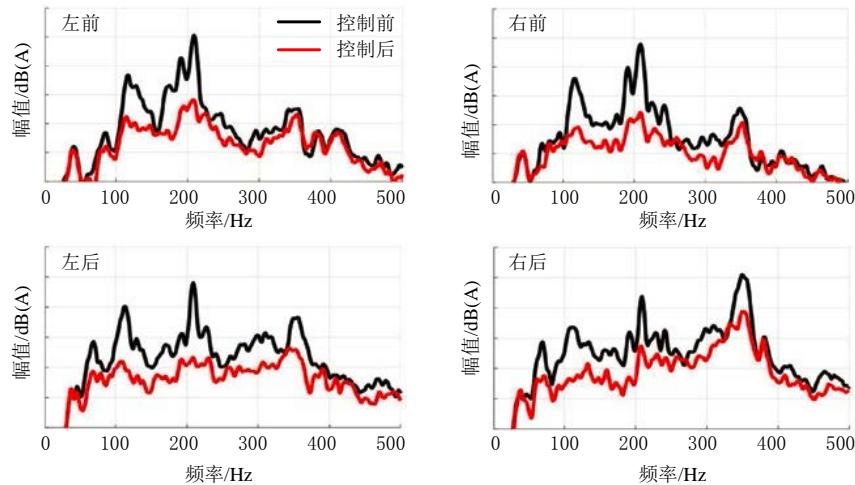


图 6 路噪主动控制前后频谱图^[61]

传统的路噪控制系统，为了节约成本和方便集成，均以车内扬声器做为次级声源。但是，当扬声器和误差传感器远离乘员头部时，控制效果有限，有效频率范围一般为 300Hz 以内。为了拓宽路噪主动控制系统可控的频率范围，增加系统降噪量，Jung 等^[62]提出了车内路噪局域控制方法，该方法采用主动头靠的方式控制人头附近的噪声。为了安装方便，使误差传感器远离人耳，系统使用了虚拟传声器技术。此外，当初级噪声频率较高，例如 1kHz 时，降噪区域的直径约为 3.4cm，系统不

具有可用性，为了克服这个难题，系统引入了人头位置跟踪技术^[62-64]，目前，该技术还在研究阶段。

5 商用化车内噪声主动控制系统

目前，进行车内噪声主动控制研究的单位主要有三类，第一类是大学，主要以控制算法研究和原型开发为主。第二类是主机厂，如本田，尼桑，现代和福特等公司都在主动噪声控制方面进行了大量的研究。第三类是专业提供音响系统与声学服务的公司，如 Harman, Bose, BBM, Silentium 和 Panasonics。

伴随着数字信号处理算法和芯片的发展，在研究人员的共同努力下，车内噪声主动控制技术与系统商用化取得了实质性的成果，发动机噪声主动控制系统已经有成熟的产品，如 Bose、Harman 和 Panasonics 等公司均能提供此类产品，并且已在多个车型上量产。仅 2018 年北京车展上展出的就有别克昂科威、新君越，凯迪拉克 XTS、CT6，本田思铂睿、CR-V、UR-V、第十代雅阁，英菲尼迪 Q70L，福特蒙迪欧，林肯 MKC、MKZ，讴歌 CDX 等车型。路噪控制目前主要集中在研究和试验阶段^[18; 60; 65; 66]。2018 年现代宣布在其燃料电池电动车 Nexo 使用了路噪主动控制系统，并取得了比较理想的降噪效果^[35]。Bose 在 2019 年 1 月的 CES 展上发布了其路噪控制系统，并计划于 2021 年应用于量产车型。

国内中国科学院声学研究所、南京大学和西北工业大学在主动噪声控制算法研究上做了大量工作，清华大学^[13; 67]、吉林大学^[10; 68-72]和东南大学^[11; 12; 73]等单位在车内噪声主动控制方面做了大量的研究工作，陆续也有主机厂、零部件供应商和科技公司开始在这方面投入研究。但目前为止，国内还没有能投入市场的量产化产品。

6 车内噪声主动控制技术发展趋势

6.1 主动声品质控制

传统车内噪声主动控制系统以降低车内声压级为目标。但有研究表明，在某些情况下，虽然声压级降低了，但主观评价认为舒适度变差了^[39]。所以改善汽车声品质不仅仅是使声压级更低，同时还要考虑人耳对声音的感知和驾乘人员对车内声音的预期。在汽车领域，评价汽车声品质的标准是人的听觉感受，但是人的听觉感受无法被量化，这样就无法实现主动控制。因此，引入心理声学指标来描述噪声，建立起主观感受与客观心理声学指标的关系模型，进而通过控制客观心理声学指标实现声品质的主动控制。这样就可以使车内声品质在豪华型、运动型和舒适型间自由切换。关于主观感受与客观心理声学指标关系的研究已经较多^[74-76]，但关于客观心理声学指标控制主动控制的研究还非常少，Mosquera-Sánchez 等在这方面进行了有益的研究，取得了一些成果^[9; 50-52]，但这些成果距商用化还有一定的距离，需要进一步深入研究。

6.2 独立声区技术

随着自动驾驶技术的兴起，乘用车正逐渐由代步工具向生活空间和办公空间转变，因此汽车上不同座位的乘员对声音有不同的需求：有人需要打电话，有人需要听音乐，还有人需要看电影，并且声音互不影响。独立声区（Individual Sound Zones）技术^[77]为此类问题提供了解决方案，汽车独立声区技术是指使用车内音响在每个乘员位置产生可以由乘员自由控制的声音，并且各个位置互不影响。

2015 年 CES 展上，Harman 发布了其独立声区控制系统，系统使用安装在乘员头靠上的宽频扬

声器和头顶的定向扬声器或线阵列，结合串扰消除信号处理算法在各个座位上形成独立声区，每个声区的音量可以单独控制，系统示意图如图 7 所示。2018 年 4 月，现代汽车发布了其独立声区控制系统，并预计在未来 1-2 年内达到可量产的水平。该系统可在每个座位上产不同的声音^[78]。

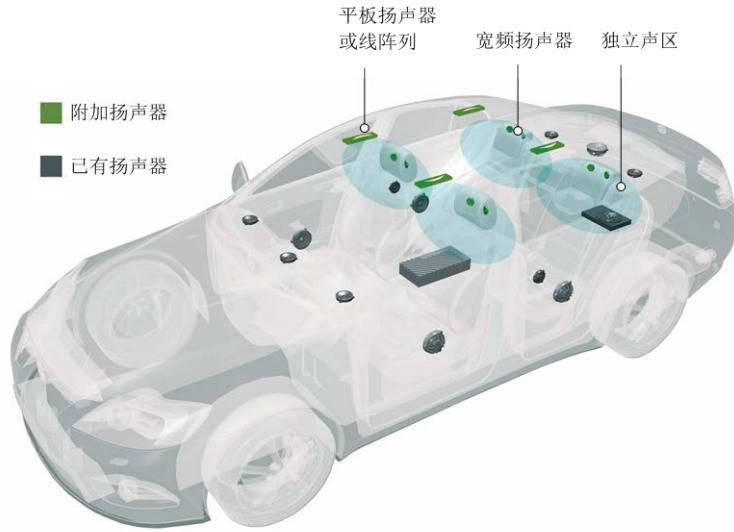


图 7 Harma 独立声区控制系统示意图

目前，关于汽车独立声区控制研究还比较少^[58]，有很多问题需要解决，例如改善低频重建效果，提高明暗区声能量对比，降低明区对暗区的影响，在车内环境下重建高频声音，以系统鲁棒性等都是需要研究的问题。

6.3 主动噪声控制系统与车载语音系统高度集成

广义的汽车主动噪声控制系统包括发动机噪声主动控制、路噪声主动控制、独立声区控制、车外警示音合成和车内主动发声。随着汽车向电动化和智能化发展，未来的汽车中，尤其是中高端汽车很有可能同时使用这些技术，这就需要将所有功能集成在一个系统中。此外，作为最自然的交互方式，语音技术越来越多地被应用于车内人机交互。为了改善车载环境下的用户体验，众多语音信号处理技术，如语音增强、回声消除、去混响、声源定位和语音识别技术被采用，这些技术也需要硬件系统支持，这里称其为智能语音系统。智能语音系统与主动噪声控制系统一起构成了车载声学系统，共用一套硬件，如图 7 所示。



图 8 未来车载声学系统功能示意图

传统的汽车设计中，NVH工作师、电子工程师和音响工程师往往是独立工作的，互不影响。但新型的车载声学系统是集NVH、语音和音响于一体的系统，需要NVH、汽车电子和汽车音响等工程师多方通力合作，才有可能达到最佳的系统性能。

7 结论

目前，车内噪声控制仍以被动控制技术为主，但是被动技术对低频噪声控制效果有限。此外，被动技术对汽车电动化和智能化出现的声学问题也无能为力。主动噪声控制技术因其优异的低频噪声控制能力和方便灵活的开发方法越来越多地被应用于中高端车型。文章介绍了车内噪声主动控制系统的组成和各部分主要功能，系统总结了车内噪声的主要来源、频率范围及其频谱特性。以车内噪声来源作为分类依据，综述了发动机噪声、路面-轮胎噪声主动控制的历史、研究现状及商业化应用。最后指出主动声品质控制和独立声区控制是车内噪声主动控制的发展趋势。随着汽车电动化和智能化的逐步推进，NVH、汽车电子和汽车音响工程工程师的工作交集将越来越多，三方应通力合作、优势互补，共同打造智能车载声学系统。

参考文献

- 1 陈克安. 有源噪声控制[M]. 第2版. 北京: 国防工业出版社, 2014.
- 2 Li M, Duan J, Lim T C. Active Noise Cancellation Systems for Vehicle Interior Sound Quality Refinement[J]. Recent Patents on Mechanical Engineering, 2010, 3: 163-173.
- 3 Kuo M S, Morgan D R. Active noise control systems: algorithms and DSP implementations[M]. New York: Wiley, 1996: xv, 389 p.
- 4 Nelson P A, Elliott S J. Active control of sound[M]. London: Academic Press, 1992: xii, 436 p.
- 5 Hansen C H. Active control of noise and vibration[M]. 2nd. Boca Raton, FL: CRC Press, 2013.
- 6 Kuo S M, Gupta A, Mallu S. Development of adaptive algorithm for active sound quality control[J]. Journal of Sound and Vibration, 2007, 299(1-2): 12-21.
- 7 Kuo S M, Yenduri R K, Gupta A. Frequency-domain delayless active sound quality control algorithm[J]. Journal of Sound and Vibration, 2008, 318(4-5): 715-724.
- 8 De Oliveira L P R. Active Sound Quality Control Design Tools and Automobile Application[D]. Katholieke Universiteit Leuven, 2009: 217.
- 9 Mosquera-Sánchez J A, Sarrazin M, Janssens K, et al. Multiple target sound quality balance for hybrid electric powertrain noise[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2018, 99: 478-503.
- 10 刘宗巍, 王登峰, 姜吉光, et al. 用主动噪声控制法改善车内声品质[J]. 吉林大学学报(工学版), 2008, (02): 258-262.
- 11 姜顺明, 陈南. 以响度为度量的车内噪声有源控制[J]. 汽车工程, 2008, (06): 479-482+505.
- 12 姜顺明, 陈南. 采用响度控制改进算法的封闭车厢主动消声[J]. 振动与冲击, 2013, (05): 167-170.
- 13 Wang Y, Liao X, Zheng S. A parallel active order sound equalization method to improve vehicles sound quality during acceleration[C]. 24th International Congress on Sound and Vibration 2017, ICSV 2017, 2017.
- 14 Liu F, Mills J K, Dong M, et al. Active broadband sound quality control algorithm with accurate predefined sound pressure level[J]. Applied Acoustics, 2017, 119: 78-87.
- 15 Bein T, Elliott S, Ferralli L, et al. Integrated Solutions for Noise & Vibration Control in Vehicles[J]. Procedia - Social and Behavioral Sciences, 2012, 48: 919-931.
- 16 Wang X. Vehicle noise and vibration refinement[M]. Boca Raton: Woodhead Publishing, 2010: xiii, 434 p.
- 17 Schirmacher R, Kunkel R, Burghardt M. Active noise control for the 4.0 TFSI with cylinder on demand technology in Audi's S-series[J]. SAE Technical Paper, 2012.
- 18 Sutton T J, Elliott S J, McDonald A M, et al. Active control of road noise inside vehicles[J]. Noise Control Engineering Journal, 1994, 42(4):

- 137-147.
- 19 Fahy F, Walker J. Advanced applications in acoustics, noise and vibration[M]. London ; New York: Spon Press, 2004: xiii, 640 p.
- 20 Konet H, Sato M, Schiller T, et al. Development of Approaching Vehicle Sound for Pedestrians (VSP) for Quiet Electric Vehicles[J]. SAE International Journal of Engines, 2011, 4(1): 1217-1224.
- 21 Fortino A, Eckstein L, Viehöfer J, et al. Acoustic Vehicle Alerting Systems (AVAS) - Regulations, Realization and Sound Design Challenges[J]. SAE International Journal of Passenger Cars - Mechanical Systems, 2016, 9(3): 995-1003.
- 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 Morgan D R. An analysis of multiple correlation cancellation loops with a filter in the auxiliary path[J]. Acoustics, Speech and Signal Processing, IEEE Transactions on, 1980, 28(4): 454-467.
- 24 Widrow B, Shur D, Shaffer S. On Adaptive Inverse Control[C]. 15th Asilomar Conference on Circuits, Systems, and Computers, 1981: 185-189.
- 25 Burgess J C. Active adaptive sound control in a duct: A computer simulation[J]. The Journal of the Acoustical Society of America, 1981, 70(3): 715-726.
- 26 Elliot S J. Signal processing for active control[M]. San Diego, Calif. ; London: Academic Press, 2001: xviii, 511 p.
- 27 Harrison M. Vehicle refinement : controlling noise and vibration in road vehicles[M]. Oxford ; Burlington, MA: Elsevier Butterworth-Heinemann, 2004: xi, 345 p.
- 28 庞剑. 汽车车身噪声与振动控制[M]. 机械工业出版社, 2015.
- 29 庞剑, 谌刚, 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.
- 30 Hiscutt P, Ishikawa S. Development of Exhaust Sound Quality on Aston Martin V8 Vantage[J], 2008.
- 31 Sano H, Inoue T, Takahashi A, et al. Active control system for low-frequency road noise combined with an audio system[J]. Speech and Audio Processing, IEEE Transactions on, 2001, 9(7): 755-763.
- 32 Cheer J. Active Control of the Acoustic Environment in an Automobile Cabin[D]. University of Southampton, 2012: 389.
- 33 葛剑敏. 汽车声学[M]. 同济大学出版社, 2013.
- 34 Cerrato G. Automotive Sound Quality - Powertrain, Road and Wind Noise[J]. Sound and Vibration, 2009, 43(4): 16-24.
- 35 Oh C, Ih K-D, Lee J. Development of Mass Producible ANC System for Broad-Band Road Noise[C]. SAE Technical Paper, 2018.
- 36 Oswald L J. Reduction of diesel engine noise inside passenger compartments using active, adaptive noise control[C]. Inter-noise & Noise-con Congress & Conference, 1984.
- 37 Satoshi H, Toshiyuki T, Akio K, et al. The development of an active noise control system for automobiles[J]. SAE Technical Paper, 1992.
- 38 Elliott S J. A review of active noise and vibration control in road vehicles[M]. ISVR, 2008.
- 39 Gonzalez A, Ferrer M, De Diego M, et al. Sound quality of low-frequency and car engine noises after active noise control[J]. Journal of Sound and Vibration, 2003, 265(3): 663-679.
- 40 Kuo S M, Ji M J. Principle and application of adaptive noise equalizer[J]. Circuits and Systems II: Analog and Digital Signal Processing, IEEE Transactions on, 1994, 41(7): 471-474.
- 41 Rees, Lewis E. Active sound-profiling for automobiles[D]. University of Southampton, 2004.
- 42 Rees L E, Elliott S J. Adaptive algorithms for active sound-profiling[J]. Audio, Speech, and Language Processing, IEEE Transactions on, 2006, 14(2): 711-719.
- 43 Kuo S M, Mallu S. Adaptive active sound quality control algorithm[C]. Intelligent Signal Processing and Communication Systems, 2005. ISPACS 2005. Proceedings of 2005 International Symposium on, 2005: 737-740.
- 44 Kuo S M, Ji M J, Jiang X H. Development and Experiment of Narrowband Active Noise Equalizer[J]. Noise Control Engineering Journal, 1993, 41(1): 281-288.
- 45 Kobayashi Y, Inoue T, Sano H, et al. Active sound control in automobiles[C]. INTER-NOISE and NOISE-CON Congress and Conference Proceedings, 2008.

- 46 De Oliveira L P R, Janssens K, Gajdatsy P, et al. Active sound quality control of engine induced cavity noise[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2009, 23(2): 476-488.
- 47 De Oliveira L P R, Stallaert B, Janssens K, et al. NEX-LMS: A novel adaptive control scheme for harmonic sound quality control[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2010, 24(6): 1727-1738.
- 48 De Oliveira L P R. Review and future perspectives on Active Sound Quality Control[J]. Proceedings of Isma2010 - International Conference on Noise and Vibration Engineering Including Usd2010, 2010: 177-191.
- 49 Sun X, Meng G. LMS algorithm for active noise control with improved gradient estimate[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2006, 20(4): 920-938.
- 50 Mosquera-Sánchez J A, De Oliveira L P R. A multi-harmonic amplitude and relative-phase controller for active sound quality control[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2014, 45(2): 542-562.
- 51 Mosquera-Sánchez J A, Desmet W, De Oliveira L P R. A multichannel amplitude and relative-phase controller for active sound quality control[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2017, 88: 145-165.
- 52 Mosquera-Sánchez J A, Desmet W, De Oliveira L P R. Multichannel feedforward control schemes with coupling compensation for active sound profiling[J]. Journal of Sound and Vibration, 2017, 396: 1-29.
- 53 Heatwole C M, Bernhard R J. Reference transducer selection for active control of structure-borne road noise in automobile interiors[J]. Noise Control Engineering Journal, 1996, 44(1): 35-43.
- 54 Dehandschutter W, Sas P. Active Control of Structure-Borne Road Noise Using Vibration Actuators[J]. Journal of Vibration and Acoustics, 1998, 120(2): 517-523.
- 55 Cheer J, Elliott S J. The design and performance of feedback controllers for the attenuation of road noise in vehicles[J]. International Journal of Acoustics and Vibrations, 2014, 19(3): 155-164.
- 56 Duan J, Li M, Lim T C, et al. A Computationally Efficient Multichannel Active Road Noise Control System[J]. Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control, 2014, 137(1): 011003.
- 57 Duan J, Li M, Lim T C, et al. Combined Feedforward–Feedback Active Control of Road Noise Inside a Vehicle Cabin[J]. Journal of Vibration and Acoustics, 2014, 136(4): 041020-041020.
- 58 Cheer J, Elliott S J, Simon Galvez M F. Design and implementation of a car cabin personal audio system[J]. Journal of the Audio Engineering Society, 2013, 61(6): 412-424.
- 59 Cheer J, Elliott S J. The Design and Performance of Feedback Controllers for the Attenuation of Road Noise in Vehicles[J]. International Journal of Acoustics and Vibration, 2014, 19(3): 155-164.
- 60 Cheer J, Elliott S J. Multichannel control systems for the attenuation of interior road noise in vehicles[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2015, 60-61: 753-769.
- 61 Oh C S, Ih K D, Lee J, et al. Development of a Mass-producible ANC System for Road Noise[J]. Atz Worldwide, 2018, 120(7-8): 58-63.
- 62 Jung W, Elliott S J, Cheer J. Local active control of road noise inside a vehicle[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2019, 121: 144-157.
- 63 Elliott S J, Jung W, Cheer J. Head tracking extends local active control of broadband sound to higher frequencies[J]. Scientific Reports, 2018, 8(1): 5403.
- 64 Jung W, Elliott S J, Cheer J. Combining the remote microphone technique with head-tracking for local active sound control[J]. The Journal of the Acoustical Society of America, 2017, 142(1): 298-307.
- 65 Oh S-H, Kim H-S, Park Y. Active control of road booming noise in automotive interiors[J]. The Journal of the Acoustical Society of America, 2002, 111(1): 180-188.
- 66 Zafeiropoulos N, Ballatore M, Moorhouse A, et al. Active Control of Structure-Borne Road Noise Based on the Separation of Front and Rear Structural Road Noise Related Dynamics[J], 2015.
- 67 Li K, Yang D, Zheng S, et al. Active noise control for vehicle exhaust noise reduction[J]. Tsinghua Science and Technology, 2003, 8(5): 577-581.

- 68 谭刚平. 车内语言清晰度分析评价及其主动控制技术研究[D]. 吉林大学, 2013.
- 69 姜吉光. 车内噪声品质分析与选择性消声控制方法研究[D]. 吉林大学, 2012.
- 70 苏丽俐. 车内声品质主客观评价与控制方法研究[D]. 吉林大学, 2012.
- 71 刘宗巍. 车内噪声声品质建模分析与自适应主动控制研究[D]. 吉林大学, 2007.
- 72 常振臣, 王登峰, 周淑辉, et al. 车内噪声控制技术研究现状及展望[J]. 吉林工业大学学报(工学版), 2002, (04): 86-90.
- 73 姜顺明, 何仁. 前反馈混合的封闭车厢响度控制有源消声[J]. 汽车工程, 2015, (04): 451-455.
- 74 黄海波, 黄晓蓉, 苏瑞强, et al. 基于 EEMD 与 GA-小波神经网络的传动系声品质预测[J]. 振动与冲击, 2017, (09): 130-137.
- 75 左言言, 张海峰, 庄婷. 车内声品质主客观评价模型对比分析[J]. 江苏大学学报(自然科学版), 2017, (04): 403-409.
- 76 方源, 章桐, 陈霏霏, et al. 电动车噪声品质心理声学主客观评价模型[J]. 西安交通大学学报, 2015, (08): 97-101.
- 77 <http://www.individualsoundzones.com/>[EB/OL].
- 78 <https://www.hyundai.news/eu/technology/hyundai-motor-company-showcases-next-generation-separated-sound-zone-technology/>[EB/OL].