



中国电子技术标准化研究院
China Electronics Standardization Institute

主动降噪技术现状与 发展趋势

中国电子技术标准化研究院

国家数字音视频及多媒体产品质量监督检验中心

2017 年 7 月

参与本研究报告编制的人员信息

报告编撰：

董桂官、阮向远、周阳翔、韩少晖、徐楠、曹新凤、程怡

联系方式：

Email: donggg@cesi.cn

TEL: 010-64102361-22 / 18612118407

www.cesi.cn

www.adtc.org.cn

目 次

1 主动降噪技术发展沿革.....	1
1.1 主动降噪技术概述.....	1
1.2 主动降噪耳机技术发展沿革.....	2
1.2.1 降噪耳机概述.....	2
1.2.2 主动降噪耳机的技术发展沿革.....	2
1.3 汽车车内噪声主动控制技术沿革.....	3
2 主动降噪耳机技术的分类、技术现状与产品链.....	5
2.1 主动降噪耳机的分类.....	5
2.1.1 前馈式主动降噪耳机.....	5
2.1.2 反馈式主动降噪耳机.....	5
2.1.3 复合式主动降噪耳机.....	6
2.2 耳机降噪性能极限.....	6
2.3 当前研究热点.....	8
2.3.1 降噪算法模型与优化.....	8
2.3.2 降噪结构与原理研究.....	8
2.3.3 产品化研究.....	9
2.4 产业链概要与典型产品示例.....	9
2.4.1 产业链概要.....	9
2.4.2 典型主动降噪耳机示例.....	10
3 汽车车内噪声主动控制技术的现状.....	13
3.1 汽车车内噪声主动控制系统的分类与特殊性.....	13
3.1.1 分类.....	13
3.1.2 特殊性.....	13
3.2 当前研究热点与主要研究机构.....	14
3.3 汽车噪声标准法规概述.....	14
3.4 典型车内噪声主动控制示例.....	14
4 主动降噪技术发展趋势展望.....	16
4.1 智能化.....	16
4.2 节能化.....	16
4.3 融合化、集成化.....	16
4.4 技术独立化.....	16
4.5 模块化、价格亲民化.....	17
4.6 总结.....	17
参考文献.....	18

主动降噪技术现状与发展趋势

1 主动降噪技术发展沿革

1.1 主动降噪技术概述

噪声是指发声体做无规则振动时发出的声音。声音由物体的振动产生，以波的形式在一定的介质（如固体、液体、气体）中进行传播。从生理学观点来看，凡是干扰人们休息、学习和工作以及对所要听的声音产生干扰的声音，即不需要的声音，统称为噪声。当噪声对人及周围环境造成不良影响时，就形成噪声污染。产业革命以来，各种机械设备的创造和使用，给人类带来了繁荣和进步，但同时也产生了越来越多而且越来越强的噪声。

一般而言，消除或者降低噪声通常采用三种降噪措施，即在声源处降噪、在传播过程中降噪和在人耳处降噪；但是这几种方式都是被动的，实际使用过程中往往呈现出低频降噪效果差等缺点。为了主动地消除噪声，人们发明了“有源消声”这一技术，也就是主动降噪技术。

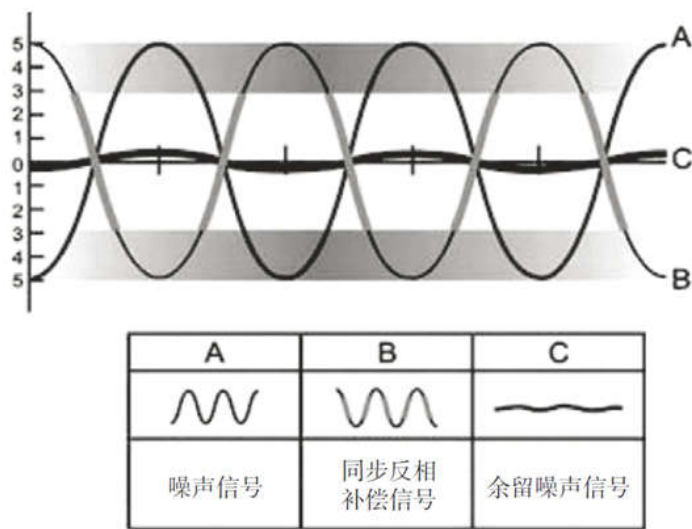


图1 主动降噪技术的原理示意图

图 1 所示为主动降噪技术的基本原理示意图。可以认为所有的声音都由一定的频谱和能量组成。从接收噪声源着手，通过电声处理，运算出反相的波，并通过内置音频处理电路进行放大和重放，相互反相的声音将会叠加，噪声的振幅将会大幅衰减，从而降低了噪声。

目前主动降噪技术已经在实际生产生活中得到应用；但是受制于成本、性能等各方面因素限制，其应用范畴还比较局限。常见的应用范围包括：主动降噪耳机、封闭空间有源噪声

控制等。以下从两例典型应用即主动降噪耳机和汽车车内噪声主动控制出发，探究主动降噪技术的技术沿革和当前的研究热点，并结合产业现状分析该技术未来的应用前景和发展趋势。

1.2 主动降噪耳机技术发展沿革

1.2.1 降噪耳机概述

降噪耳机是一种很常见的护听器，在人们的日常生活和生产中有着广泛的应用。降噪耳机由弓形头环连接两个半球形壳体组成，壳体上附带有吸声材料和密封垫圈，适用于存在噪声污染的环境，降噪量一般在 20 dB 以上，可以单独使用，也可以与耳塞结合使用，脱戴方便，但是长时间佩戴后会有闷热等不适感。

按照降噪方式，降噪耳机可以分为被动降噪耳机（无源降噪耳机）和主动降噪耳机（有源降噪耳机）。

（1）被动降噪耳机（无源降噪耳机）

传统的降噪耳机一般都是被动降噪耳机，又称无源降噪耳机；是利用隔声原理降低噪声的个人防护装置，具有佩戴方便、价格低廉等优点。被动降噪耳机在高频段有着良好的降噪性能，但是由于耳机体积和重量的限制，在 500 Hz 以下低频段的降噪性能较差。

（2）主动降噪耳机（有源降噪耳机）

包含有源降噪系统的耳机，一般称作主动降噪耳机，又称有源降噪耳机。有源降噪系统有良好的低频降噪性能，可以实现在较宽的频带上良好的降噪性能。

1.2.2 主动降噪耳机的技术发展沿革

1936 年德国物理学家 Lueg 首先提出有源噪声控制即主动降噪的概念，利用声波相消性干涉原理降噪，并申请了专利^[1]。1953 年 Olson 发表了关于有源噪声控制的文章。文中把有源噪声控制系统命名为电子吸声器，利用反馈控制方法实现了噪声控制，他成功制作出了实际的控制系统，并取得了一定的降噪效果^[2]。20 世纪 60 年代以来，随着电子技术的发展和声学理论研究的进步，有源噪声控制技术获得了极大的发展。70 年代英国剑桥大学的 Swinbanks、伦敦大学的 Leventhall、法国的 Mangiante 等分别对管道中的有源噪声控制进行了研究，并取得了重大的进展^[3]。

80 年代以来，随着大规模集成电路、数字电路、信号处理和微电子技术的发展，主动降噪技术也取得了长足的发展。英国 Essex 大学开发出采用微处理器在线控制的“Essex 有源降噪系统”，英国剑桥大学的 Ross 发表了关于宽带有源降噪控制系统的专门算法，美国

贝尔实验室的 Burgess 基于计算机仿真对用于管道降噪的自适应噪声控制系统进行了研究^[4]。1992 年世界上第一部有源噪声控制的专著在伦敦出版。

中国的有源噪声控制始于 20 世纪 70 年代末。南京大学声学所、北京劳动保护科学研究所和中国科学院声学研究所等先后开展了管道有源噪声控制的研究,西北工业大学声学研究所和清华大学汽车工程系也都先后开展了这方面的研究^[5]。1993 年国内出版了第一部有源噪声控制方面的专著。以上这些研究成果,为主动降噪耳机的工程实现奠定了坚实的基础。

1985 年,南京大学的田静和沙家正在其管道和三维空间有源噪声控制的研究基础上,率先发明了前馈结构的主动降噪耳机,并且在 80–800 Hz 的频率范围内取得了 8–12 dB 倍频程的降噪效果^[6]。1993 年前后,中科院声学所的田静等在数字电路自适应有源控制系统研究的基础上,完成了数字自适应主动降噪耳机的原理研究,取得了 1000 Hz 以下约 18 dB 的宽带降噪效果^[7]。1994 年下半年,中科院声学所与澳大利亚的西澳大学合作,充分研究了反馈结构的极点分布性质和补偿方法,完成了基于双四阶网络的反馈式模拟电路和国产电动耳机的主动降噪耳机,在低频 3–4 个倍频程的范围内可以取得 10–20 dB 的降噪效果^[8]。1995 年前后,清华大学汽车工程系朱彦武等将模拟电路的前馈和反馈结构结合起来,完成了复合结构的主动降噪耳机的原理实验^[9]。

1.3 汽车车内噪声主动控制技术沿革

车内噪声的主动控制技术最早始于上世纪 80 年代,英国的 Nelson 等人在封闭空间有源降噪理论研究和技術方面做了大量工作。1983 年,挪威的 T. Berge 在柴油车驾驶室内采用有源噪声控制^[10]。1984 年美国通用汽车公司的 J. Oswald 提出了第一个主动控制系统,用自适应有源降噪方法对柴油车的驾驶室进行研究^[11]。1988 年英国 Southampton 大学的 P. A. Nelson 和 S. J. Elliott 等人在 BAE748 双发动机 48 座螺旋桨推进器飞机的机舱内进行了一次主动降噪研究领域规模最大、环境最复杂、技术水平最高的实验^[12],实验结果充分证明了主动降噪技术应用于实际工程尤其是封闭空间内的低频噪声控制是完全可行的。英国 Lotus 汽车公司和日本尼桑公司等汽车公司在 1990 年前后开始在部分汽车上装备主动降噪系统^[13]。1999 年美国 VAL 实验室的 Jerome Couche 和 Chris Fuller 对福特汽车由发动机和路面引起的噪声进行了系统研究^[14]。2002 年西班牙巴伦西亚工业大学的 A. Gonzalez 和 M. Ferrer 等人不仅研究了前馈 ANC 系统对汽车发动机噪声的控制效果,还研究了人们在降噪前后的心理反应^[15]。

我国国内的相关研究开展较晚。南京大学声学所沙家正等人在 1979 年开始了管道有源

降噪技术的研究，中科院声学所马大猷等人在封闭空间声场形式、混响声场噪声主动控制方面进行了深入的理论研究和实验。清华大学汽车工程系用传递函数法建立了模拟汽车车厢内声学特征的主动噪声控制理论模型^[16]。东南大学对机车车辆室内复合噪声主动控制系统进行了研究设计^[17]。除此以外，吉林大学汽车工程学院、同济大学、上海交通大学等也在主动降噪技术及工程应用方面开展了大量工作。

2 主动降噪耳机技术的分类、技术现状与产品链

2.1 主动降噪耳机的分类

主动降噪耳机按照控制电路分类可以分为模拟式和数字式，按照控制结构分类可以分为前馈式、反馈式和复合式。

2.1.1 前馈式主动降噪耳机

前馈式主动降噪耳机使用前馈式有源噪声控制系统，该系统又称开环式噪声控制系统，其典型结构如图 2 所示。这种系统一般需要被控制的初级声场的声音信息，通常称为参考信号。参考信号送到前馈式控制器，经过控制器处理后，产生一个相应的控制信号，驱动扬声器输出该声音信号产生次级声场，进而和实际通过物理途径中传来的原始声波信号相叠加，误差传声器检测初级声场和次级声场的叠加所形成的误差信号，送到控制器中，控制器根据特定的算法调整次级声源信号的强度。

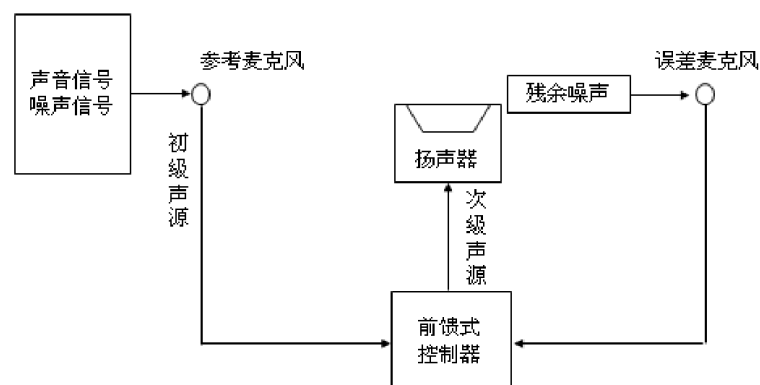


图2 前馈式主动降噪耳机典型结构

前馈式有源噪声控制的优点是传声器接收的是纯噪声，并不接收喇叭发出的声音，所以系统是一个开环，不会引起任何的闭环振荡和啸叫，因此可以独立地调试电路，使降噪的效果达到最佳。但噪声经过扬声器并在扬声器内多次反射，其大小和相位已发生变化，传声器采集到的噪声与扬声器内的噪声将有很大的不同，且外部噪声的方向性很强，难以使用同一电路满足来自不同方向的噪声的降噪要求，这些都在前馈式有源降噪耳机的设计中需要克服的问题。

2.1.2 反馈式主动降噪耳机

反馈式主动降噪耳机使用反馈式有源噪声控制系统，该系统又称闭环式噪声控制系统，它比前馈式系统少了一个参考传声器，其典型结构如图 3 所示。虽然系统构成上得以简化，

但是应用范围也大大缩小。

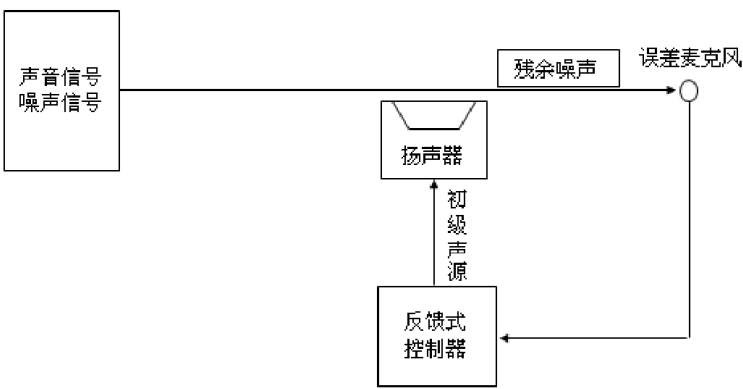


图3 反馈式主动降噪耳机典型结构

反馈结构的有源噪声控制系统不需要预先得到声音信息，而是通过控制器调整误差信号，从而降低噪声。由于是反馈系统，当放大器的增益加大到一定程度时，系统将变得很不稳定，产生高频啸叫或低频振荡，为了维持控制系统的稳定，一般会要求控制器和误差传声器的位置十分接近，这就限制了反馈式有源噪声控制系统的应用范围。

2.1.3 复合式主动降噪耳机

复合式主动降噪耳机结合了前馈式、反馈式的结构，其典型结构如图 4 所示。

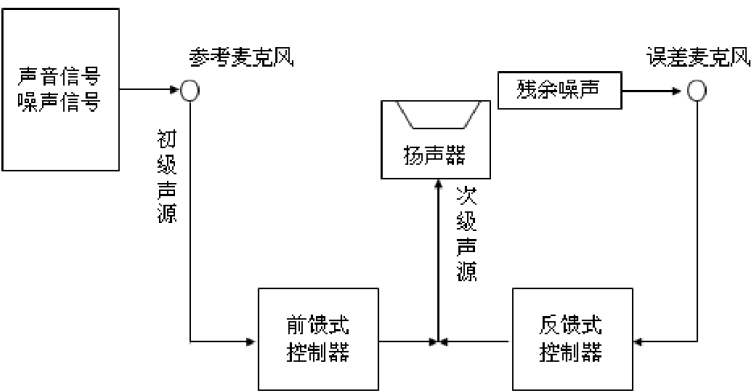


图4 复合式主动降噪耳机典型结构

次级声源发出的信号将由参考传声器和误差传声器共同决定。前馈式系统可以减弱参考传声器检测到的与初级噪声相关的噪声，反馈式系统则对窄带噪声十分有效，两者结合使用，可以增强有源噪声控制系统的灵活性，从而比使用单一结构获得更好的降噪效果，但缺点是系统实现复杂、成本也非常高。

2.2 耳机降噪性能极限

传入人耳的噪声主要有两个途径，分别是通过耳道中空气传播和通过人体组织传播。耳

机只能隔绝通过耳道内空气传播的声音，所以耳机存在一个降噪性能的极限，即骨导传声阈值。此前有大量的研究者对于骨导传声的阈值进行了研究。

1957 年，Zwislocki 首先研究了骨导传声的阈值^[18]。实验结果表明骨导传声的阈值在 400 Hz 以下由佩戴带共振腔的耳塞时的听音阈值决定，在 1500 Hz 以上由同时佩戴固体耳塞和耳机时的听音阈值决定，而在 400 Hz 至 1500 Hz 之间则由两种情况下相对较高的阈值决定。

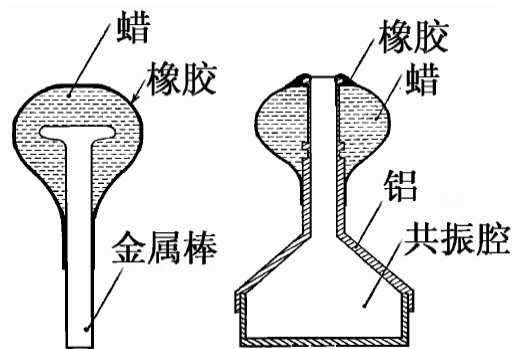


图5 Zwislocki 实验所用固体耳塞(左)和带共振腔的耳塞(右)

1959 年，Nixon 和 Gierke 测试了 5 款商业耳塞和耳机的组合降噪量^[19]。实验参照了当时护听器噪声衰减量的测试标准，并在此基础上，作者在受试者的头部部分或者全部缠绕了 2 至 3 英寸厚的棉芯情况下，测试耳塞和耳机的组合降噪量。实验结果表明在缠绕棉芯的情况下，在 2000 Hz 至 8000 Hz 的频率范围内骨导传声的听音阈值提高了 10 至 18 dB。这说明了头部覆盖与否以及覆盖部位的选择等情况对于骨导传声阈值的高频部分影响较大。

1980 年，Schroeter 和 Els 测试了一款带有源降噪系统的定制头罩与耳塞的组合降噪量^[20]。该定制头罩体积为 30000 cm³，足够大可以完全包裹住头部，内衬普通耳机衬垫。实验使用 REAT 的方法，有 10 个受试者。

2001 年，Ravicz 和 Melcher 使用了 REAT 和 MIRE 的方法研究了耳塞、耳机和头盔的单独降噪量和组合降噪量，其中头盔足够大可以套在耳机的外面，且头盔使用毛巾密封至颈部位置^[21]。得出结论耳塞和耳机的组合降噪量在低频部分比耳机和头盔的组合降噪量好，在高频部分比耳机和头盔的组合降噪量差，而耳塞、耳机和头盔的组合降噪量比任意两者的组合降噪量都好，但是在低频部分的组合降噪量还是不够好。

2003 年，Berger 和 Kieper 测试了耳塞、主动降噪耳机和飞行头盔的单独和组合降噪量^[22]。实验使用了 REAT 的方法，有 16 名受试者。作者总结了自己和前人的实验数据提出了一个可能达到的最好的降噪量。

虽然以上研究测得骨导传声的极限有一定的差异，但在 100 Hz 至 10 kHz 的范围内骨导传声的极限基本在 50 dB 至 70 dB 之间，如图 6 所示。

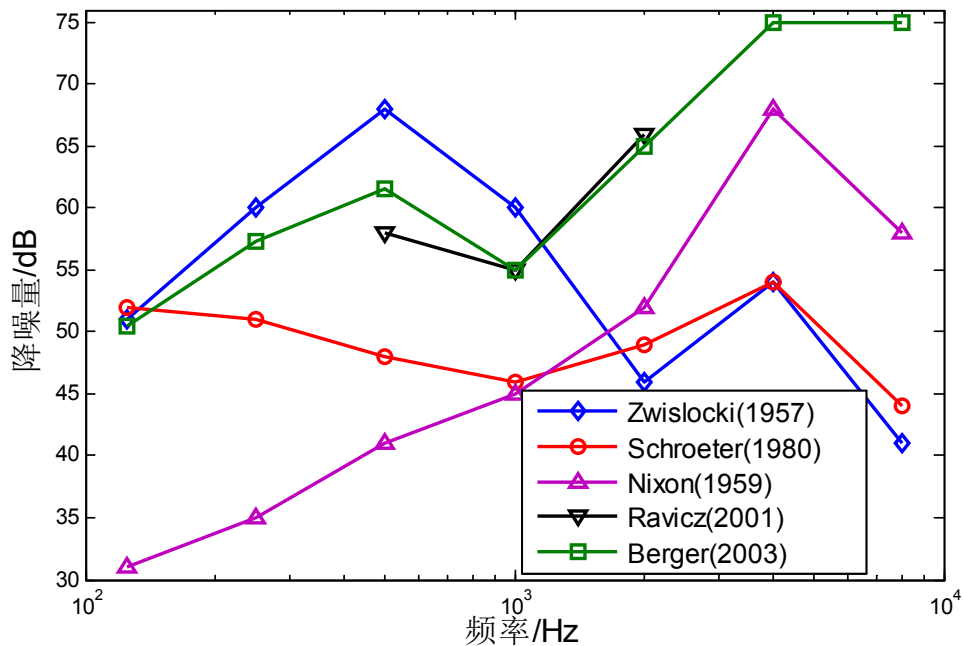


图6 多组实验获得的耳机降噪性能的极限

这些研究同时也表明，为提高耳机的降噪量，可使用组合降噪的方法。但无论采用何种方式，均无法突破耳机降噪性能极限。

2.3 当前研究热点

当前主动降噪耳机的技术研究热点主要集中于降噪算法优化与降噪结构以及降噪原理研究。目前国内的主要研究机构包括中科院声学所、南京大学声学所等科研院校和深圳冠旭电子有限公司、歌尔声学股份有限公司等。

2.3.1 降噪算法模型与优化

主动降噪技术的核心在于噪声控制系统及算法性能。目前主要的研究热点集中于自适应噪声控制与算法优化。

在有源噪声控制系统中，信号处理的主要任务是解决噪声中信号的提取问题。随着数字降噪技术的发展，有源降噪算法的优化和研究工作依然有很多优化和进步的空间。

2.3.2 降噪结构与原理研究

不同的降噪结构能够更加逼近主动降噪耳机的降噪极限。目前主要的研究热点集中于双层降噪耳机、骨传导技术的结构与原理研究。

双层结构耳机虽然在低频部分降噪性能与传统的单层结构耳机基本相同，但在高频部

分的降噪性能有极大的提升。骨传导技术作为目前耳机领域的热点，其主动降噪已经成为各大耳机厂商和科研院校的研究重点。

2.3.3 产品化研究

生产厂商研究重点更加倾向于主动降噪技术的产品化研究，包括成本控制、芯片通用化等研究方向。

2.4 产业链概要与典型产品示例

2.4.1 产业链概要

1989 年美国 Bose 公司第一个生产出了有源降噪的产品，专为飞行员设计的主动降噪耳机。经过多年发展，国外主动降噪耳机的研制和生产比较成熟，生产厂家也比较多，包括 Bose、Sennheiser、Telex 及 NCT，日本的索尼、爱华等。

目前国内生产厂商主要是深圳冠旭电子有限公司、歌尔声学股份有限公司等。

（1）主要技术方案商与科研机构

目前国际上主要的技术方案主要被大型音响公司掌握，它们是业内领先的技术方案商，也同时是产品布局和市场占有率较高的生产厂商。

目前国内的科研机构以中科院声学所和南京大学声学所为主力在该领域开展研究工作，其研究方向不局限于耳机类产品。此外，深圳冠旭电子有限公司等生产厂商也拥有自己独立的研发团队，是目前国内具有代表性的拥有自主知识产权的技术方案商和生产厂商。

（2）主要生产厂商

以上所列举技术方案商和科研机构中，国内的科研机构尚无自主品牌的商业化耳机产品，更多的是开展与歌尔等国内公司的技术合作，作为其技术方案商参与主动降噪耳机的产品化、商业化运作。

其余所列举公司，都拥有自主品牌的主动降噪耳机产品。值得一提的是，歌尔声学股份有限公司作为全球领先的微型扬声器生产厂商，是苹果、三星等大型终端厂商的重要供应商。

表 1 主动降噪耳机国内外主要技术方案商、科研机构和生产厂商

公司/单位名称	主要研究内容
Bose公司	Bose公司很早即开展主动降噪耳机的研究和开发，其代表性产品如Quiet Comfort系列在业内具有较高认可度，也是目前应用较多的技术方案商和生产厂商。
Sennheiser公司	该公司作为耳机领域的传统巨头，在主动降噪耳机领域也有成熟产品布局；同时作为传声器领域的巨头，其产品覆盖更为全面，布局更为均衡。
铁三角公司	与前两者类似，有独立知识产权的主动降噪耳机系列产品。
Sony公司	作为消费电子巨头，Sony也有MDR-NC100D等型号的主动降噪耳机产品。
中国科学院声学所	主要研究内容包括有源噪声控制、降噪耳机原理研究等，其主动降噪研究不局限于耳机类产品。值得一提的是，中科院在国内率先实现了反馈式结构控制和数字电路自适应主动降噪耳机的开发。
南京大学声学所	主要研究内容包括有源噪声控制研究等，其主动降噪研究不局限于耳机类产品，在有源噪声控制领域有丰富研究和开发经验。值得一提的是，南京大学声学所率先发明了前馈式结构。
深圳冠旭电子有限公司	该公司拥有主动降噪耳机产品的技术研发团队；结合该公司主要成果可以看出其研发方向偏向于多环境适用的主动降噪耳机产品。
歌尔声学股份有限公司	该公司拥有主动降噪耳机产品的技术研发团队，并依托中科院声学所等科研院校；结合该公司主要成果，可以看出其研发方向偏向于器件研究与开发。
华为技术有限公司	该公司拥有主动降噪耳机产品的技术研发团队；结合该公司主要成果可以看出其研发方向偏向于终端产品，适配主动降噪耳机产品。

2.4.2 典型主动降噪耳机示例

主动降噪耳机产品繁多，价格相对于普通耳机昂贵很多，以下仅列举三例典型的主动降噪耳机作为示例。

（1）铁三角公司ATH-ANC系列

ATH-ANC系列内置ANC反向降噪电路，能有效降低背景噪音，适合在长途飞行或喧闹的办公室中配戴使用。



图7 ATH-ANC 系列 ATH-ANC7B 耳机

(2) 深圳冠旭电子有限公司 233621 系列耳机

233621 系列产品独有“耳环境 INC”技术,消除低频背景噪声效果明显。值得一提的是,该系列产品由国内主动降噪耳机领先品牌深圳冠旭电子有限公司研发,并与南方航空公司开展合作为南航头等舱提供高端智能降噪耳机产品。



图8 233621 系列 H501 耳机

(3) Bose 公司 QuietComfort 系列

Bose 公司投入主动降噪耳机研发已经有 30 余年历史, QuietComfort 系列即为其代表性

产品。该系列产品使用 Bose 专利的 Acoustic Noise Cancelling 有源消噪技术。



图9 QuietComfort 系列 QuietComfort 15 耳机

(4) 华为公司 AM180

华为公司于 2014 年推出其首款主动降噪耳机产品 AM180，该耳机配备专属降噪电路，包括定制高灵敏度 MEMS 硅麦和专业级降噪芯片，360° 全方位准确拾取环境噪音。相比于同类型产品，其结构和尺寸简单便捷，价格也更加亲民。



图10 华为公司 AM180 主动降噪耳机

3 汽车车内噪声主动控制技术的现状

3.1 汽车车内噪声主动控制系统的分类与特殊性

3.1.1 分类

汽车噪声水平是衡量汽车制造质量的重要标志之一。汽车噪声一般分为车外噪声和车内噪声；后者指车厢内的噪声，给驾驶员和乘客的感受最为直接，影响乘坐舒适性。图 11 所示为几种典型汽车噪声和分析模型的示意图。

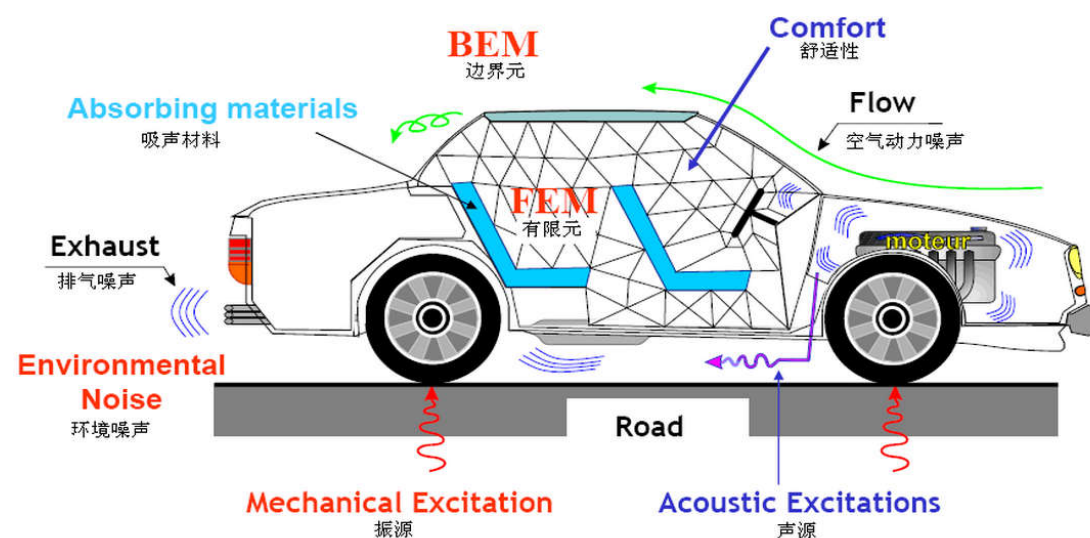


图11 汽车噪声与分析模型示意图

与主动降噪耳机类似，按照控制结构分类，汽车车内噪声的主动控制系统可以分为前馈式、反馈式和复合式。其结构、原理与主动降噪耳机类似，在此不再赘述。

3.1.2 特殊性

(1) 应用场景更为复杂

与主动降噪耳机相比，一方面汽车是一个结构更为精密、模型更为复杂的声学环境，其噪声控制需要将被动降噪和主动降噪结合；另一方面，汽车车外的声音不能简单作为噪声进行抵消，一些协助汽车驾驶者操控汽车的声音如鸣笛声、警报声等，必须保留乃至加强。

(2) 涉及层面更多

汽车的主要噪声源来自于汽车发动机等部件，该核心部件的噪声控制将具有极其重要的指标意义；而发动机等部件的噪声控制与其设计水平、生产工艺息息相关；再者，汽车的结构从整车到零部件均会影响汽车的噪声产生和传播，这就需要从设计、工艺、制造等各个环节都引入噪声控制，从源头控制噪声。

可见，汽车车内噪声控制是一个综合性的问题，涉及的学科和层面也比较多。以下主要从车内噪声的主动控制角度着手，研究主动降噪技术在汽车产业的应用现状和前景。

3.2 当前研究热点与主要研究机构

当前汽车车内噪声的主动控制技术，其研究热点也主要集中于降噪算法优化与降噪结构以及降噪原理研究；相比于主动降噪耳机，其研究主要集中于工程技术层面。

目前主要研究工作的开展还是集中于国外汽车厂商和 Bose、哈曼等汽车音响方案商。国内的主要研究机构包括清华大学汽车工程系、中科院声学所、南京大学声学所、吉林大学汽车工程学院、同济大学、上海交通大学等科研院校，国内汽车企业开展的研究工作相对较少。图 12 所示为中科院开发的“汽车客舱有源主动降噪系统”的方案示意图，该给出了两种典型降噪产品概念图作为示例。

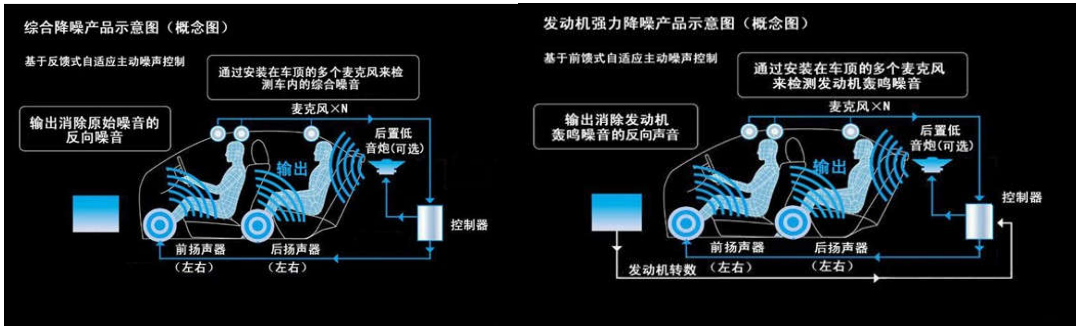


图12 中科院提供的某汽车噪声主动控制技术的方案示意图

3.3 汽车噪声标准法规概述

主要发达国家从上世纪 60 年代即开始制定车辆噪声法规和测量方法，如联合国欧洲经济委员会、欧洲经济共同体、日本、美国等主要国家和地区，从 70 年代起每 3 至 5 年即修订一次相关的法规或标准。

我国最初于 1979 年颁布了《机动车辆允许噪声》(GB 1495-79)和对应的《机动车辆噪声测量方法》(GB 1496-79)标准，但此后较长时间未作修订；相比于国外，其限值变化较慢，执行也较为宽松。2002 年颁布了《汽车加速行驶车外噪声限值及测量方法》(GB 1495-2002)标准，并分阶段强制实施。对于车内噪声，在强制性法规《机动车运行安全技术要求》(GB 7258-2012)标准给出了限值；尤其对于营运客车，交通部发布的《营运客车类型划分及等级评定标准》(JT/T 325-2013)及此后相关标准中，明确了车内噪声与客车的等级评定之间的关系。

3.4 典型车内噪声主动控制示例

汽车中使用噪声主动控制技术的相对较少，主要集中在中高档轿车中，以下仅列举两例典型的使用车内噪声主动控制的汽车作为示例。

(1) 凯迪拉克XTS

凯迪拉克 XTS 轿车由方案商 Bose 公司提供技术支持，利用车内 3 个麦克风进行信号采集，经过信号处理和放大后经由车内 5 个扬声器进行车内主动降噪。

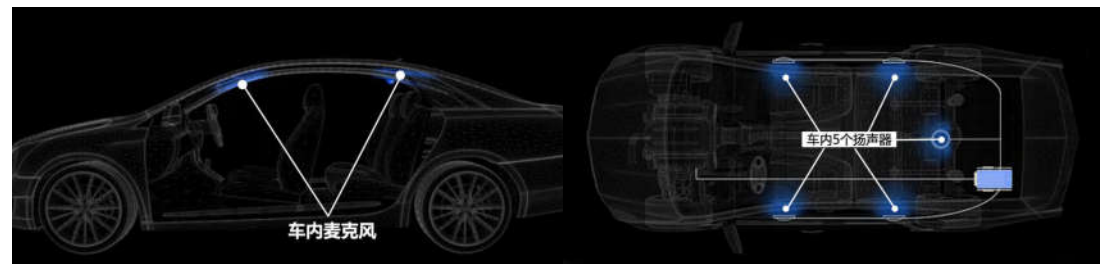


图13 凯迪拉克 XTS 主动降噪示意图

(2) 广汽本田歌诗图

歌诗图采用了多项先进的降噪技术。在车身体质上，采用了更多的隔音材料，比如隔音玻璃等，增加了车体的密封性和减噪性能；在车身设计方面，根据空气动力学对车体做出了大量改进，有效降低了风噪；同时，采用了 ASC 主动降噪系统，通过车载音响发出反相声波，与发动机噪音相互抵消。

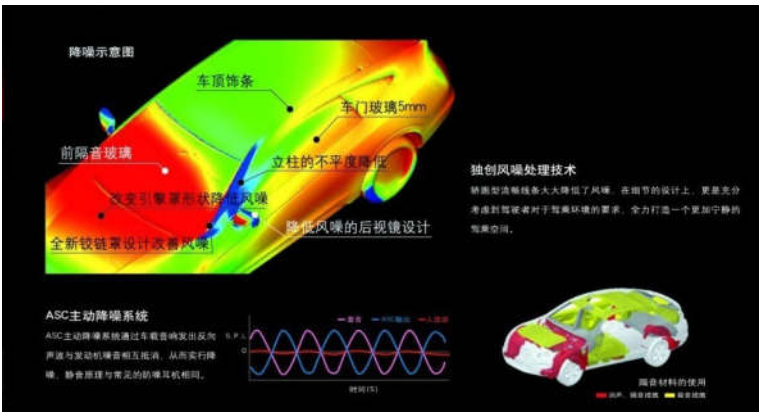


图14 广汽本田歌诗图噪声控制示意图

4 主动降噪技术发展趋势展望

作为主动降噪技术的两种典型应用，主动降噪耳机和汽车车内噪声主动控制有着类似的发展沿革，主动降噪技术的发展趋势体现出以下特点。

4.1 智能化

产品更智能，体验更佳。

通过优化降噪模型和算法，利用自适应、数字化算法，使主动降噪技术产品能够更加匹配各类型应用场景，拓宽产品的适用范围。

4.2 节能化

产品更省电，续航更久。

节能减排是所有技术和产业的未来发展趋势，主动降噪技术因为引入了噪声控制系统，不可避免的增加了能源消耗。未来的主动降噪技术，需要通过优化电路和降噪系统，不断降低系统功耗。

尤其对于主动降噪耳机而言，目前还多依赖于独立电源供电。随着电源充电技术的发展，未来的主动降噪耳机将实现低功耗，乃至无线充电、远程充电，产品耗能将进一步降低，续航更久，使用更便捷。

4.3 融合化、集成化

与外设产品进一步集成、融合，使用更方便。

主动降噪耳机作为耳机中的高端产品类型，随着智能终端已经逐步进入井喷式发展时代，将会进一步和各类型外设融合化、集成化。其供电系统、运算芯片等部件将和外设集成融合、综合匹配，主动降噪耳机将会迎来新的发展机遇。

汽车噪声主动控制系统将会和汽车的设计、工艺、制造等各个环节相互融合，共同构成整车的噪声抑制体系，其融合化、集成化要求更高。

4.4 技术独立化

不同生产厂商和科研机构将不断拥有独立专利的主动降噪技术，主动降噪产品的技术保护和专利壁垒将会越来越多。对于消费者而言，不同技术方案的主动降噪产品将提供越来越多的选择。

同时也需要看到，目前主动降噪技术尤其是汽车产业领域的核心技术主要还是由国外厂商和科研机构掌握，国内的相关研究相对落后，商业化运作则落后更为显著，在当前乃至未

来的发展中将会面临越来越多的专利壁垒。因此国内相关科研机构、技术厂商还需要加大在主动降噪技术领域的投入，加快商业化、产品化运作，推动国内主动降噪技术的发展与应用。

4.5 模块化、价格亲民化

主动降噪系统是主动降噪耳机、汽车噪声主动控制系统的核心部件，其复杂的电路、系统设计和森严的专利壁垒，使得其价格一直居高不下。随着主动降噪技术应用范围越来越广和技术的发展，主动降噪系统将独立化、模块化，各价位线的产品将会不断推出，消费者将会以更少的花费享受到主动降噪技术带来的全新体验。主动降噪系统的模块化将会大大降低产品成本，同时主动降噪领域的产业分工也将会进一步细化。

4.6 总结

主动降噪技术作为重要的噪声消除手段，具有很多被动降噪无法媲美的优势，也决定了这项技术在噪声控制领域的光明前景。随着经济技术的发展，人民生活水平的提高，噪声污染将得到更多的重视，主动降噪技术将会获得更多应用。

同时也需要看到，一方面对于汽车、火车乃至更为复杂的噪声背景，主动降噪技术仍然有很多待研究的课题和待提升的空间；另一方面高昂的成本仍然制约着这项技术的推广和应用，如何在更低的成本下实现更加契合使用场景的降噪效果将伴随着这项技术的发展全程。

总之，随着技术的发展和市场的成熟，主动降噪技术的适用范围将越来越宽泛，性能将越来越优异，使用将越来越智能便捷，能耗将越来越低；也将会有更多的消费者能够以亲民的价格享受新技术带来的便利。同时伴随着智能终端的发展，主动降噪技术可能会迎来新的机遇和契机。

可以畅想在不久的将来，在人们生产、生活的各个环节中，主动降噪技术将会给人们营造出更多无污染的纯净空间：在汽车、火车、飞机等出行工具中，在建筑、制造业的现场与办公室中，在温馨宁静的卧室、医院病房中，在戴上耳机享受曼妙音乐的旅程中，主动降噪技术将会带给使用者全新的体验。

参考文献

- [1] Lueg P. "Process of silencing sound oscillations"[P]. US, NO.2043416, 1936.
- [2] Olson H. F. "Electronic sound absorber"[J]. Journal of the Acoustical Society of America, 25(6): 1131-1132, 1953.
- [3] Mangiante G. A. "Active sound absorption"[J]. The Journal of the Acoustical Society of America, 61(6): 1516-1523, 1977.
- [4] Burgess J. C. "Active adaptive sound control in a duct: A computer simulation"[J]. The Journal of the Acoustical Society of America, 70(3): 715-726, 1981.
- [5] 董淑斌, 陈克安. 有源耳罩的发展现状与前景[J]. 电声技术, 2004 (8): 54-56.
- [6] 田静, 沙家正, 李宁荣. 有源护耳器的原理与设计[J]. 声学学报, 1991, 16(2): 122-127.
- [7] Tian Jing, Li Ming-Feng, Pan Jie, Shao Guang-Zhen. "Active anti-noise headphones". International Symposium on Consumer Electronics. Nov. 1-4, 1996, Beijing.
- [8] 田静, 潘杰. 有源抗噪声头戴耳机[J]. 电声技术, 1997 (4): 30-32.
- [9] 朱彦武, 连小珉, 刘起元, 等. 有源消声耳罩的研究[J]. 声学学报 (中文版), 1996, 21(2): 123-127.
- [10] T.Berge. "Active noise cancellation of low frequency sound inside vehicle cabs"[J], Proceeding of Internoise, 83:457-460, 1983.
- [11] L.J.Oswald. "Reduction of diesel engine noise inside a passenger compartments using active, adaptive noise control"[J], Proceeding of Internoise, 84:483-488, 1984.
- [12] P.A.Nelson, A.R.D.Curtis, S.J.Elliott, A.J.Bullmore. "The active minimization of harmonic enclosed sound fields, Part 1: Theory"[J], Journal of Sound and Vibration, No.1:1-13, 1987.
- [13] 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年, 31(6): 55-58.

[14] JC Couche. "Active control of automobile cabin noise with conventional and advanced speakers ". master thesis, Blacksburg, Virginia, February 1999.

[15] A Gonzatez, M Ferrer et al. "Sound quality of low-frequency and car engine noises after active noise control"[J]. Journal of Sound and Vibration, 265(3):663-679, 2003.

[16] 王国领, 许国贤, 连小眠, 蒋孝煌. 车内有源噪声控制的研究[J]. 清华大学学报(自然科学版), 1996年, 36(4):23-26.

[17] 胡啸, 胡爱群, 涂有超. 机动车辆室内复合主动噪声控制系统的设计[J]. 噪声与振动控制, 2001年2月, 第1期:8-12.

[18] Zwislocki J. "In search of bone-conduction threshold in a free sound field"[J]. The Journal of the Acoustical Society of America, 29(7): 795-804, 1957.

[19] Nixon C. W, von Gierke H. E. "Experiments on the bone-conduction threshold in a free sound field"[J]. The Journal of the Acoustical Society of America, 31(8), 1121-1125, 1959.

[20] Schroeter J, Els H. "The Acoustic Properties of the Human Head" (in German), Wirtschaftsverlag NW, Bremerhaven, Fed. Rep. of Germany, ISBN 3-88314-112-4, 1980.

[21] Ravicz M. E, Melcher J. R. "Isolating the auditory system from acoustic noise during functional magnetic resonance imaging: examination of noise conduction through the ear canal, head, and body"[J]. The Journal of the Acoustical Society of America, 109(1): 216-231, 2001.

[22] Berger E. H, Kieper R. W, Gauger D. "Hearing protection: Surpassing the limits to attenuation imposed by the bone-conduction pathways"[J]. The Journal of the Acoustical Society of America, 114(4): 1955-1967, 2003.