

有源消声评述

(西安交通大学机械工程研究所)

吕广庆

本文在回顾有源消声技术发展历史的基础上,通过对已有消声次级系统的特性分析,指出了这一领域尚存的问题,明确了当前研究的重点和技术关键。指出了对一维管道问题,单级系统是较为简单的次级结构,成功应用的关键在于现代控制技术的使用,可望近期有简单应用产品;对于三维空间的有源消声,当前的首要问题应是在弄清消声物理机制的基础上寻找简单而可行的消声次级单元,它的实用化仍需借助现代控制技术。

一、引言

有源消声技术就是根据两个声波相消性干涉或声辐射抑制的原理,通过抵消声源(常称为次级声源)产生与被抵消声源(常称为初级声源)的声波大小相等、位相相反的声波辐射,二者作用结果,相互抵消,从而达到降低噪声的目的,通常称这一降噪方法为有源法(Active Method)。在噪声控制工程中,采用吸声材料或隔声构件等的声学处理方法,通常称为无源法(Passive Method),这一方法对于中高频噪声是较为有效的控制途径;而对于低频噪声,由于无源材料的声衰减性能随频率降低而变差,要取得与中、高频同样的降噪效果,就要增加材料的厚度或质量,从而使实际治理趋于“庞大”化,有时甚至难以实现。有源法在低频是较易实现的,理论上消声量可达到很高,而且体积小,便于设计和控制。随着现代工业化的发展,低频噪声愈来愈普遍,低频噪声对人也有不利的作用。这样,人们对有源法在噪声控制中的应用愈来愈重视。本文在回顾有源消声领域发展简况的基础上,分析已有的消声系统的消声特性,指出尚存的困难和待解决的问题,以期对此领域有一个总体性了解。

二、有源消声发展概况

有源消声(Active Sound Attenuation)这一概念最早由美国Paul Lueg提出,为此,他在1934年申请了专利,并于1936年发表了题为“Processing of Silencing Oscillations”的文章^[1]。他根据Yong氏干涉原理提出了利用声波的相消性干涉来达到降低噪声的目的,并提出了两种消声结构,如图1所示,图(a)为一维管道中单频简谐波的消声结构——Lueg单极子消声结构,图(b)为空间点噪声源辐射场的消声结构。图中话筒为拾取初级源声波信号 S_1 的探测传声器其输出信号经放大器 V 放大后馈给次级源 L, S

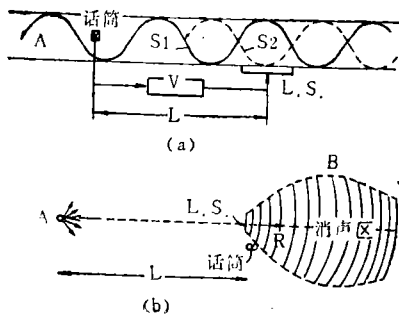


图1 Lueg单极系统(a)管道(b)空间

L, S ,产生与其所在处初级场声波大小相等、

相位相反的声波,从而在L.S.下游实现声抵消。对图(a), S_1 和 S_2 的反相是通过调节 $L = n\lambda/2 (n=1, 2, \dots)$ 来实现,所以消声只能对特定的单频(L一定下)有效;另外,还有存在声反馈引起的驻波形成使得Mic.拾取的信号是频率的函数,这也给实现宽频带消声带来困难。图(b)中也因为声反馈的存在使得消声性能受到限制。由于当时技术的限制,Lueg只是作了原理上的阐述,之后的20年间,没有这方面的进展报道。

直到1953年,电子技术的发展使有源消声的实现成为可能。美国RCA公司实验室H.F. Olson根据Lueg的设想,首次设计了名为“电子吸声器”的实验装置^[2],如图2(a)示,图2(b)为在距话筒附近几个距离处测得的消声谱曲线。对于这种结构,Olson提出了许多应用的设想,如在人头部局部空间建立无噪声区,置于声源附近抑制声辐射,等等。但实际应用的报道并不少,只是1955年RCA公司Elvind. Sinbauser等人将其用于耳机,试图研制军用抗噪声耳罩,但没有给出实用效果的报道。

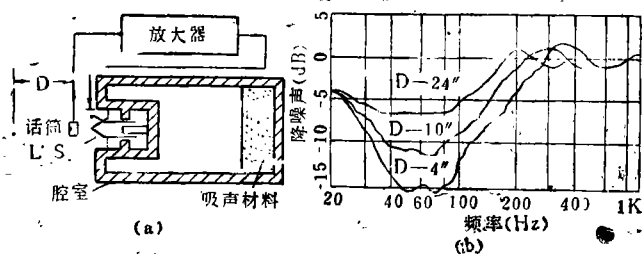


图2 Olson电子吸声器(a)及其性能(b)

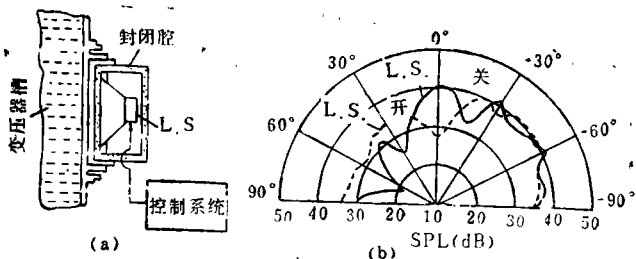


图3 Conover变压器降噪装置(a)及性能(b)

约在Olson同时,该公司W.B. Conover于1956年首先提出将有源消声用于变压器噪声控制。他对一座15000KVA的大型变压器进行了试验,如图3(a)示。激励次级源扬声器的信号直接取自供电系统。结果如图3(b)示,在L.S.辐射的轴向(0° 方向)上,消声量随距离变远而减小,但直到30m处仍有10dB的降噪量。但消声只在偏离轴向 $\pm 20^\circ$ 左右的空间方位角内有效果,其他方向便有增有减了。Conover在总结他的工作时指出,尽管有源法在原理上是可行的,但由于变压器声辐射的复杂性,使得实际的有源处理会有很大困难。

Olson和Conover的工作虽对有源消声领域起到一定的复兴作用,但由于他们都没能取得令人欣慰的成功,所以在Conover之后的10年中,人们基本上放弃了这方面的研究,而致力于无源法的研究。

60年代中期,随着先进的控制技术的发展,对有源消声技术的研究又得到了恢复,主要是法国物理研究中心M.J.M. Jessel等人的工作。他基于一维问题的惠更斯原理对

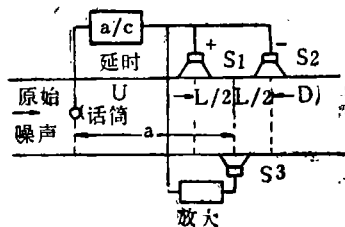


图4 Jessel三极子结构

管道问题进行了研究。为克服Lueg单级结构存在声反馈(次级源的上游辐射)带来的困难,他提出了具有单向辐射特性的三极子结构,如图4示,称为Jessel三极子结构(Jessel tripole),它由一个单极子和一个偶极子组成,调节系统相移的增益,理想时在上游呈相消性干涉而下游呈增强性迭加。这样,上游的话筒,只拾取初级入射噪声信号,消除了由声反馈形成的驻波的影响。然而对图4示的系统,即使各组件均具有理想的平直响应的情况下,整个次级源系统的频率响应亦为 $2\sin\frac{kl}{2}e^{-j\pi/2}$,这就是说,次级源系统

的辐射与频率有关,最佳消声只在一中心频率 $f_0 = C/2L$ 处最大,难以取得宽频带消声。

自70年代以来,有源消声研究有了稳步发展,突出表现在一维管道问题上。1973年英国剑桥大学M.A.Swinbanks从波导理论出发,讨论了实现单向拾取信号的探测传声

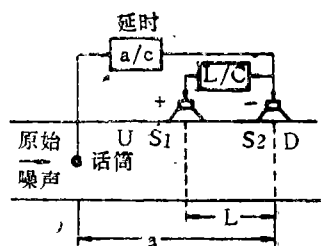


图5 Swinbanks双级系统

入射声波信号,系统不受声反馈的影响。同样的,系统在即使各组件为理想情况下亦具有与频率有关的 $2\sin(KL/2)e^{-j\pi/2}$ 频率响应,消声中心频率 $f_0 = C/2L$,亦难以得到宽频带消声。为了简化次级系统,即使单极子声源实现宽频带消声,Leventhall等人于1976年改进了Lueg单极系统,将反馈声作为传声器拾取信号的一部分进行模拟地补偿,这就是Chelsea单极结构^[6],如图6(b)示,实验表明它的性能与Chelsea偶极系统相近。

管道消声的应用要求寻找经济、简单而有效的消声结构。1982年Leventhall等人

器组合和次级声源单向辐射的组合^[4],指出对于只存在平面波传播的波导管中,两组间距为 $0.19(1-M)\lambda_m$ (λ_m 为消声中心频率波长, M 为气流马赫数 <1),装于管壁上的两次级源环,当调节二者相位差为 90° 时可得到单向辐射特性,这就是Swinbanks双极结构,如图5示。对于探测信号的传声器,当满足上述条件时,同样可获得单向灵敏度响应特性,也可减少声反馈影响。Swinbanks的论证在1976年由H.G.Leventhall等人给予了实验验证^[5]。然而这一双极系统在各组件理

想下系统频响亦为 $2\sin KLe^{j(\frac{\pi}{2} + KL)}$,与频率有关,这样,也不能提供宽带消声,最佳消声中心频率为 $f_0 = C/4L$ 。

另外,英国伦敦大学Chelsea学院H.G.Leventhall等人提出了用于管道消声的偶极子结构^[6],如图6(a)示,话筒,置于反接的次级源中间,在理想下,话筒,只拾取初级

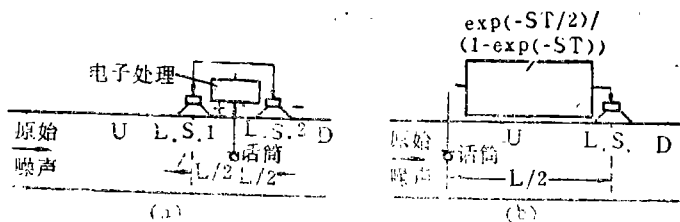


图6 Chelsea偶极子结构(a)和单极子结构(b)

基于对单极系统传输函数的数学推证^[7],指出只要Chelsea单极结构中话筒移至次级源L.S.上方,则延迟为零,当提高系统增益很高时便可实现下游方向的消声,如图7示,称这种结构为紧耦合消声结构(Tight-Coupled Monopole-TCM)。系统高增益时能对系统非理想频响具有等效的补偿作用,使得消声频宽可以很宽。将这种结构顺序地排列于管道中,形成多级消声,即构成紧耦合级联消声系统(Tight-Coupled Tandem),实验表明TCT系统的消声量近似

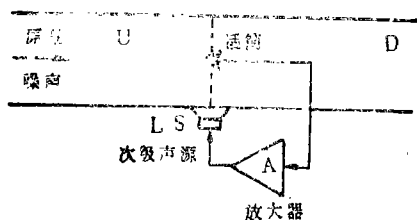


图7 TCM结构

等于各级TCM单独消声量的和^[8]。

近年来，人们对“单级”系统应用数字技术进行信号的实时分析和补偿，增强了系统的应用性，1983年法国V. Martin等人在细管道(16×8cm)用模拟数字方法配合对信号进行频响补偿^[9]，获得了80~2000Hz范围内约15~30dB的消声效果，显示了数字技术在展宽频带方面的有效性。为增强实用性，日本M. Takahashi等人设计了两个等距于次级源而分别置于上下游的传声器信号采样系统，如图8示，称DSM消声系统^[10]。两个传声器输出信号相减后经数字滤波补偿馈给次级源L.S.，这样在下游便得到较宽频带的消声，应用于管道轴流风扇噪声控制的实验结果表明，这一系统具有较好的实用性能。



图8 DSM系统

在一维问题的消声机理方面，M. Berengier和A. Rource根据波导理论从辐射阻抗的角度分析了有源消声的过程^[11]。指出消声是满足能量平衡的，从能量转换关系分，有源消声的过程可分为吸收能量式的（如单向辐射次级源系统）和反射能量式的（具有上游辐射的次级源系统）。南京大学声学所沙

家正等人的工作对此作了实验验证^[12]。

70年代以来，三维空间有源消声的研究也有了一些进展。实验研究工作主要有两类：一类是基于Jessel根据Huygens原理进行的可行性论证，对声场的有源吸收进行的研究，这类研究途径均属于JMC法（Jessel, Mangiante, Canevet）。如法国的G. A. Mangiante对空间一点源辐射进行的全方位有源控制的试验研究^[13]；Jessel对变压器降噪的模拟试验^[14]；南京大学声学所沙家正等人的三极子消声结构的实验室实现^[15]。另一类属于直接合成次级源激励信号，次级源声场与初级场抵消以建立无噪声空间，如Glem. E. Warns的无噪声小室试验^[16]；Joel Piraux有源声屏障的设计与试验^[17]等。三维空间有源消声的应用研究主要集中在变压器降噪问题上，这一方面是因为变压器噪声十分普遍，而且占主要成份的低频噪声无源法处理较为困难；另一方面是因为这种噪声主要是离散的、以供电频率为基频的 $2n$ （ n 为整数）次谐波频份声级较高，这对于激励信号的获得可变得简化，从而达到经济而有效的目的。自从Conover之后，许多人，如K. Kido、Hesselman、Ross、Jessel和Angvine等。对这一问题作了大量工作，获得了不同程度的消声效果。另外的应用研究还有C. F. Ross对两道门厅间采用有源消声处理；G. B. B. Chaplin的用于周期性噪声与振动控制的Essex有源抑制系统；M. D. Crocker对内燃机排气的有源降噪设计以及M. Nadim对汽车驾驶舱的定域有源消噪声试验等等。

总体上看，这一研究领域的研究大致经历了“Lueg设想—Olson及Conover试验—Jessel及Swindanks的理论工作—实用化研究”的进程，如图9示，为各年代有关文献报道的数目，表明了这一领域正越来越引起人们的极大兴趣，而主要的努力将在探索实用化的有效途径上。

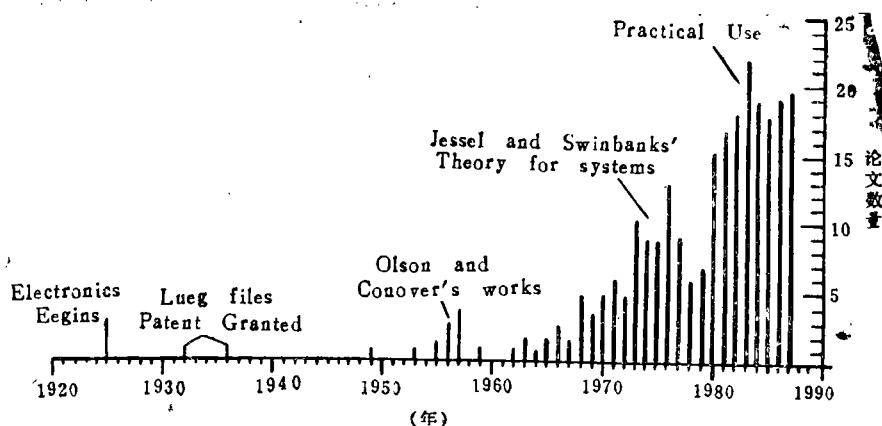


图9 研究论文报道随时间(年的分布)

三、尚存的问题

如前所述,一维问题的有源消声,研究主要集中在消声系统的次级源结构上,大致经历了“单级结构——多级结构——改进的单级结构”的发展进程,总的来看,已趋于实用化阶段。“单级”系统从次级源结构讲是简单的,为提高其消声的实用性,要借助于现代的数字技术,解决如下问题:

1) 补偿系统的非理想频率响应,以展宽消声频带和增大消声量;

2) 实时地进行信号的分析处理实现非稳态噪声的有源控制;

3) 采取切实可行的措施,以消除诸如气流、温度、压力、湿度等一些因素的影响。

当然,对一些特定条件下的特殊要求,应作相应的技术设计和处理,这些在现代控制技术中的应用中都是可实现的。

三维空间的有源消声,相对来说研究得较少,这是因为空间情形的声学条件、信号处理均较一维复杂。三维问题的研究一般有两种途径,一是减少声源空间辐射的有源抑制(Active Suppression),另一种是在已有噪声场中建立局部无噪声空间,即实现局部声场的有源声吸收(Active Adsorption)前者在Olson的设想中曾指出将电子吸声器

置于源辐射部分附近,降低空间辐射阻抗以抑制源辐射,后来这种途径集中表现在Conover及其后许多人的变压器降噪的研究上;后者主要表现在一些人基于Jessel根据Huygens对空间情形的论证提出实现场吸收的三极子结构而进行的工作,而这些工作仍是力图通过多个吸声结构来实现源辐射的抑制。从总的情况来看,三维有源消声的研究仍处于初步的实验室阶段,几乎没有什么成功的应用。究其原因,有如下问题有待解决:

1) 空间有源消声的机理还有待研究,如消声过程中的能量转化,影响和决定消声性能的作用因素等。

2) 空间消声的基本单元及其消声的空间特性。实用中还要寻找简单、可行而有效的消声结构。

3) 克服复杂的声学环境(如室内混响、非稳声场等)及物理条件(如温度、气流、压力等)所带来的困难。

问题3)的解决需要借助现代控制技术才便于实现。

随着数字技术和微处理应用的普遍,使得有源消声的应用更具有成功的现实意义,可望在近期获得性能符合要求的管道应用产品。

参考文献

- [1] Glem E. Warnaka, NOISE-Control Engineering, May-June 1982 100-110, "Active Attenuation of Noise—The State of the art"
- [2] Harry F. Olson and Everett G. May, JASA, Vol. 25(6) Nov. 1953 1130-1136 "Electronic Sound Absorber"
- [3] M. J. M. Jessel and G. A. Mangiante, J. S. Vib. 1972 23(3) 383-390 "Active Sound Absorbers in An Air Duct"
- [4] M. A. Swinbanks, J. S. Vib. 1973 27(3) 411-436 "The Active Control of Sound Propagation in Long Ducts,"
- [5] J. H. B. Poole and H. G. Leventhall, J. S. Vib. 1976 49(2) 257-266 "An Experimental Study of Swinbanks' Method of Acttenuation of sound in Ducts"
- [6] H. G. Leventhall and Kh. Eghtesadi, INTER-NOISE 79, 175-180 "Active Attenuation of Noise: Dipole and Monopole System"
- [7] Kh. Eghtesadi, W. K. W. Hong and H. G. Leventhall, NOISE CONTROL ENGINEERING JOURNAL, 20(1), 16-20 1983, "The Tight Coupled Monopole Active Attenuator in a Duct"
- [8] W. K. Hong and H. G. Leventhall, INTER-NOISE 83 439-442 "The Tight Coupled Monopole (TCM) and Tandem (TCT) Attenuations in a Duct"
- [9] V. Martin and A. Roure, INT-ER-NOISE 83 431-434 "Control of Sources for Active Sound Propagation in a Duct"
- [10] M. Berengier and A. Roure, J. S. Vib. 68(3), 1980 437-449, "Broadband Active Sound Absorption in a Duct Carrying Uniformly Fluid"
- [11] 孙广荣, 吴启学, 《声学学报》 Vol. 8(2) 1983 93-99 "有源消声机理的研究"
- [12] G. A. Mangiante, JASA Vol. 61(6) June 1977 1516-1523, "Active Sound Absorption"
- [13] M. J. M. Jessel, INTER-NOISE 80, 689-694, "Active Acoustic Attenuation of a Complex Noise"
- [14] Sha Jiazheng and Tian Jing, 12 ICA C5-6 "Active Noise Attenuations in Three-dimensional Space"
- [15] Glenn E. Warnaka, INTERNOISE 83 415-418 "Active Control of Noise in Interior Spaces"
- [16] J. Piraux, INTER-NOISE 83 427-430 "An Experiment of Active Noise Attenuation in Three-dimensional Space"
- [17] INTER-NOISE 87