

减振与降噪

柴油机排气噪声有源消声系统的设计与实现

杨绪辉^{1,2}, 童宗鹏^{1,2}, 李小虎^{1,2}, 彭安^{1,2}, 胡宾^{1,2}

(1. 七一一研究所, 上海 201108; 2. 船舶与海洋工程动力系统国家工程实验室, 上海 201108)

摘要: 为解决柴油机排气低频噪声问题, 基于噪声有源消声技术理论, 选用与排气噪声相关的转速信号作为数字信号处理控制器的参考信号, 以自适应陷波滤波算法为基础, 采用次级通路离线自适应建模方式, 设计了单通道有源噪声前馈控制系统, 并在 Matlab 平台上进行仿真分析, 最终选取迭代步长 μ 为 0.003。在某柴油机排气管路上进行了排气噪声有源消声试验, 120 Hz 时降噪量达到了 13 dB(A); 系统收敛速度快且具有良好的稳定性。

关键词: 排气噪声; 有源消声; 自适应陷波滤波算法; 次级通路; 前馈控制

中图分类号: TK421⁺.6 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-4357(2021)02-0046-05

Design and Realization of Active Control System for Diesel Engine Exhaust Noise

Yang Xuhui^{1,2}, Tong Zongpeng^{1,2}, Li Xiaohu^{1,2}, Peng An^{1,2}, Hu Bin^{1,2}

(1. Shanghai Marine Diesel Engine Research Institute, Shanghai 201108;

2. National Engineering Laboratory for Marine and Ocean Engineering Power System, Shanghai 201108)

Abstract: In order to solve the problem of diesel engine exhaust low-frequency noise, the theoretical basis of active noise control (ANC) technology was introduced. The speed signal related to the exhaust noise was selected as the reference signal for the digital signal process (DSP) controller. Based on the adaptive notch filtering algorithm, the single-channel active noise feed-forward control system was designed by using the secondary path offline adaptive modeling method. Simulation analysis was carried out on the Matlab platform, and the iteration step of 0.003 was selected finally. An active noise control test for exhaust noise was carried out on the exhaust pipe of a diesel engine. The noise reduction reaches 13 dB (A) at 120 Hz, and the system has fast convergence speed and good stability.

Key words: exhaust noise; active noise control; adaptive notch filtering algorithm; secondary path; feed-forward control

0 引言

噪声会对人们的日常生活和工作造成严重影响。对于船舶而言, 复杂的柴油机系统在工作时会产生大量噪声。目前, 柴油机机体的各种隔振和降噪装置已相对完善, 由机体引发的振动和噪声有一定程度的降低; 如此, 由柴油机进排气管路引发的噪声问题愈发突出。一般通过加装阻性、抗性或阻抗复合式消声器对排气管路进行降噪处理, 这种技

术属于被动式无源噪声控制技术 (passive noise control)。虽然排气消声器技术比较成熟, 但在应对柴油机复杂多变的工况时, 还是较难平衡提高降噪效果与减少功率损失这对矛盾^[1]。特别是在消除低频噪声时, 只能采用增大消声器体积, 及加强内部结构设计的方法, 这使得排气背压和油耗增大, 排气质量恶化, 最终降噪效果不佳。而主动式有源消声技术, 又称为噪声主动控制 (active noise control, ANC), 可以弥补这些缺陷。

收稿日期: 2020-11-19; 修回日期: 2020-12-29

作者简介: 杨绪辉(1994—), 硕士研究生, 主要研究方向为船舶设备减振降噪技术, xh-young@ qq. com。

有源消声技术是噪声控制领域近年来发展的一种新技术, 其运用数字信号处理 (digital signal process, DSP) 技术产生一个与噪声源同频率、同幅值, 但相位相反的次级声波, 两列声波叠加后实现声波干涉相消, 从而达到降低噪声的目的。但在实际噪声控制过程中, 噪声源和声场的物理参数经常会随时间发生变化, 故要求控制器必须是自适应的^[2-4]。一个完整且有效的有源消声系统的核心就是自适应数字滤波器和相应的自适应算法。

本文选取与排气噪声相关的转速信号作为参考信号, 基于自适应陷波滤波算法设计并制作单通道前馈结构有源消声系统。系统能够根据排气噪声随转速、负载的变化, 自动调整次级声源的频率、幅值和相位, 以保证有源消声系统实时保持在最佳工作状态。仿真分析自适应算法在不同步长情况下的收敛性和稳定性。并在某柴油机排气管路上进行有源消声试验。

1 柴油机排气噪声有源消声系统

1.1 排气噪声特性

柴油机由各种复杂的系统组成, 其噪声根据产生原理、状态的不同, 主要分为: 燃烧噪声、机械噪声和空气动力性噪声。由排气门周期性开闭产生的压力波动以及由此引发的气流扰动所形成的排气噪声属于空气动力性噪声。一般而言, 排气噪声指的是排气系统中消声器外壳的机械振动噪声, 以及排气管道和排气口处产生的扰动噪声。排气噪声的大小与柴油机的排量、排气管道直径以及排气口开启特性等有关, 但最主要的影响因素是柴油机的转速和负载。柴油机排气噪声是一种复杂噪声, 主要包括: 基频噪声、管道内气柱共振噪声、废气喷注和冲击噪声、气缸的亥姆霍兹共振噪声等, 其中以基频噪声及高次谐波噪声为主。

当柴油机排气口开启时, 燃烧废气会瞬间从气缸内高速流出, 排气管道内压力剧变, 从而形成压力波并激发噪声。由于柴油机各缸做功是按固定的发火顺序进行的, 所以排气噪声是一种周期性的基于排气频率的小振幅低频噪声。排气噪声的基频表示式为:

$$f = \frac{Zn}{60\tau} \quad (1)$$

式中: Z 为柴油机气缸数; n 为柴油机转速; τ 为冲程系数, 四冲程 $\tau=2$, 二冲程 $\tau=1$ 。

图 1a) 所示为某柴油机在 1 200 r/min 时排气管路内噪声的 1/3 倍频程图, 可以看出排气噪声在

20 ~ 20 000 Hz 的分布情况。其中低频段在排气噪声中占据主要成分, 这也验证了排气噪声主要是一种周期性的基于排气频率的小振幅低频噪声。图 1b) 所示为 20 ~ 1 600 Hz 范围内排气噪声的 FFT 频谱图。可以看出: 柴油机排气噪声为线谱噪声, 具有多个谐波次峰值, 而且基频以及低阶谐次的低频段对排气噪声总声压级的贡献量最大。

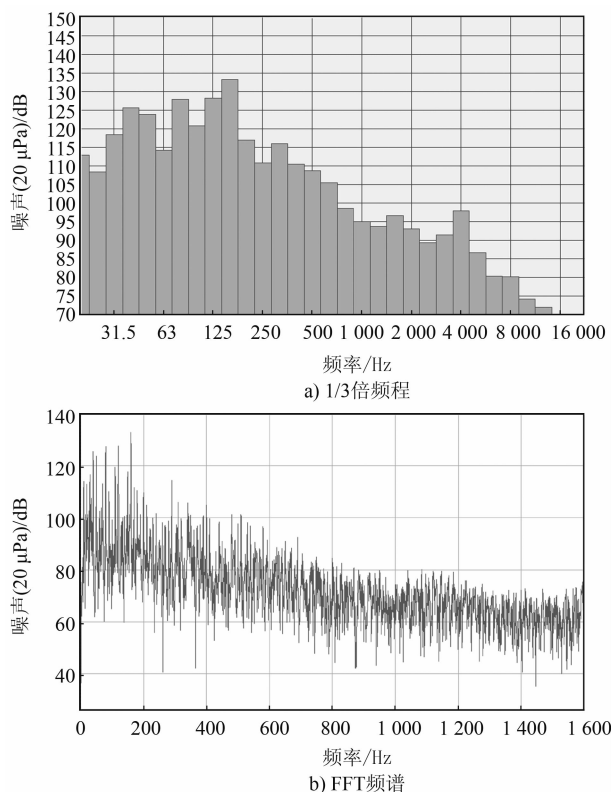


图 1 柴油机排气噪声频谱图

虽然通过 1/3 倍频程可以看出排气噪声在各个频率段的分布情况, 但却无法精确得到噪声的峰值特性, 因此不能进行精确控制。而 FFT 频谱虽然可以获得噪声的峰值特性, 但由于其谱线数过于密集, 较难精确得到排气噪声频谱的有效特性。因此在实际降噪应用中, 首先对采集到的噪声信号进行倍频程分析, 确定须要降噪的频段, 再对此频段进行 FFT 线谱分析, 从而可较精确地得到该频段内的主要贡献线谱。

对于船舶而言, 由式 $c = \lambda f$ 可知: 低频噪声具有更长的波长; 由于衍射作用其穿透力较强, 传播路径更广。特别是对于隐蔽性要求较高的船舶而言, 低频噪声更须得到有效控制。同时, 低频噪声能量高, 接收到的人会感到明显的压迫感。目前应用在船舶管路的传统被动式消声器能够对人耳较为敏感的 1 000 ~ 2 000 Hz 中高频噪声进行有效控制, 但对低频噪声却很难进行有效控制。而运用声波干

涉相消的有源消声技术可以解决低频降噪问题。

柴油机排气噪声的主要贡献量为低频段, 对该低频段内噪声进行详细 FFT 分析。图 2 为低频段内排气噪声 FFT 频谱图, 图中虚线代表未加权声压级曲线。可以看出: 250 Hz 内线谱有多个峰值点须要控制, 特别是基频及其低阶谐波。图中实线代表与人耳感受最为接近的 A 计权声压级曲线。可以看出: 须要控制的线谱峰值点幅值仍较大, 依然是低频排气噪声的主要贡献部分。本文主要针对 31.5 ~ 250 Hz 低频段的排气噪声设计有源消声系统。

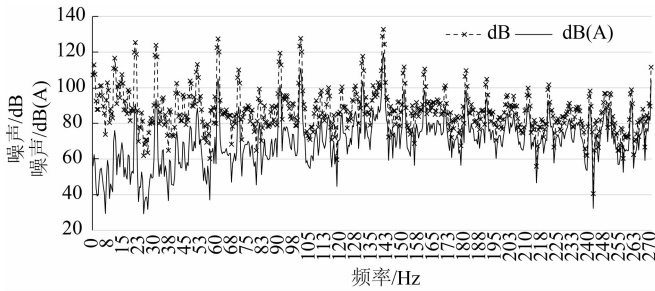


图2 排气低频噪声频谱图

1.2 系统模型

柴油机排气噪声前馈结构有源消声系统以参考传感器采集的转速信号和误差传感器采集的残差声信号作为输入信号, 通过自适应控制算法自动调整滤波器的各加权系数, 控制次级声源的输出参数, 保证管路内的残差声信号始终保持在最小值。其系统简化示意图如图 3a) 所示。本文不考虑次级声反馈 (次级声源向上游参考传感器的声波反馈), 则系统简化框图如图 3b) 所示。

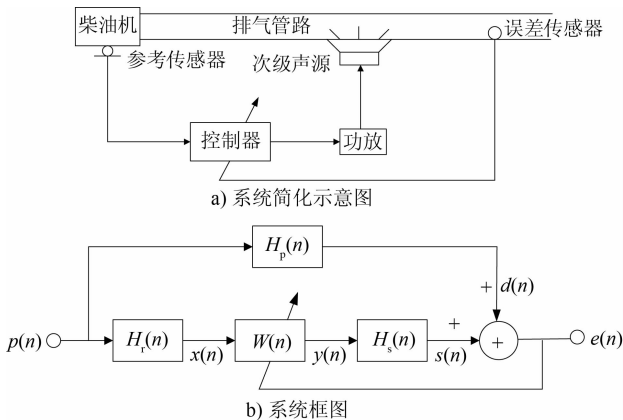


图3 柴油机排气有源消声系统

图 3b) 中, $H_p(n)$ 、 $H_r(n)$ 和 $H_s(n)$ 分别表示初级通路、参考通路和次级通路, 其对应的传递函数为 $h_p(n)$ 、 $h_r(n)$ 和 $h_s(n)$ 。 $p(n)$ 为拟抵消的柴油机排气噪声; $x(n)$ 为输入滤波器的参考信号; $y(n)$ 为滤波器输出的次级信号; $s(n)$ 为

误差传感器接收到的次级声场声信号; $d(n)$ 为误差传感器接收到的柴油机排气噪声信号, 也称为期望信号; $e(n)$ 为柴油机排气噪声和次级声场声信号叠加后的残差声信号; $W(n)$ 为自适应控制器的频率响应。自适应算法根据 $x(n)$ 和 $e(n)$ 持续调整控制器的加权系数, 从而调整次级信号的幅值和相位, 直到满足期望信号 $d(n)$, 系统达到稳定状态。

1.3 自适应陷波滤波算法

柴油机排气的主噪声是由曲轴带动活塞往复运动引起。排气噪声的频谱为孤立的线状谱 (线谱噪声)^[5]。线谱噪声具有明显的周期性, 本文采用自适应陷波滤波算法合成柴油机排气噪声信号。该算法基于转速传感器在柴油机输出轴上测得的周期性转速信号, 获得排气噪声的基频率, 采用相同频率的正弦波作为输入参考信号。这种窄带前馈控制算法称为自适应陷波滤波算法, 如图 4 所示。

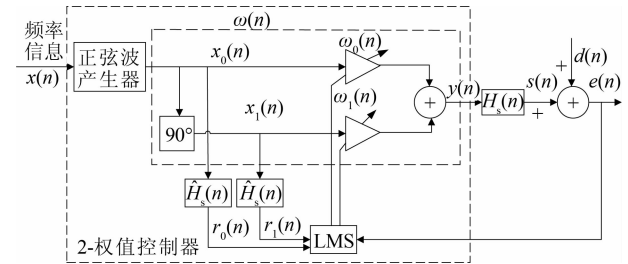


图4 单频自适应陷波滤波算法

在图 4 中, 单频陷波滤波算法的控制器为两个加权系数控制器, 加权系数分别为 ω_0 和 ω_1 , 基于 FXLMS 算法原理^[6]:

$$\omega_0(n+1) = \omega_0(n) - 2\mu e(n)r_0(n) \quad (2)$$

$$\omega_1(n+1) = \omega_1(n) - 2\mu e(n)r_1(n) \quad (3)$$

式中: μ 为收敛因子, 为控制自适应过程稳定性和收敛速度的一个参数。 $r_0(n)$ 和 $r_1(n)$ 为滤波-X 信号:

$$r_0(n) = x_0(n) * h_s(n) \quad (4)$$

$$r_1(n) = x_1(n) * h_s(n) \quad (5)$$

式中: $*$ 为卷积运算, 参考信号 $x_1(n)$ 来自 $x_0(n)$ 的 90° 移相:

$$x_0(n) = A \sin \omega t \quad (6)$$

$$x_1(n) = A \cos \omega t \quad (7)$$

则输出次级信号:

$$y(n) = x_0(n)\omega_0(n) + x_1(n)\omega_1(n) \quad (8)$$

通过上述算法自适应调整两个加权系数, 直到残差声信号 $e(n)$ 满足要求。

实际应用中, 柴油机的排气噪声不仅含有基频成分, 还含有大量谐波成分。因此须要将多个 2-权值陷波滤波器并联, 构成多频自适应陷波滤波

器；同时，通过子带自适应滤波器分割抽取、内插重构输入信号，降低算法的计算复杂度，提高算法的收敛速度。

从公式(4)和(5)可以看出：滤波器权系数迭代公式(2)和(3)并不是对参考信号 $x(n)$ 直接进行计算，而是对参考信号与次级通路传递函数的卷积进行计算。因此要实现自适应有源消声算法，次级通路传递函数的获取至关重要。通常采用滤波器自适应建模的方式来获取次级通路传递函数^[7]。次级通路自适应建模分为在线 (on-line) 和离线 (off-line) 两种模式。本文选择附加随机噪声的离线建模方式，如图 5 所示。

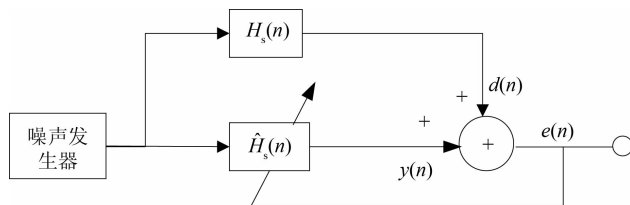


图 5 次级通路建模框图

离线建模时，柴油机处于停机状态，为了充分辨识次级通路的各个频率成分，噪声发生器发出白噪声信号；白噪声信号驱动次级声源扬声器发声，同时作为自适应建模滤波器参考输入信号；建模滤波器输出 $y(n)$ 与实际期望信号 $d(n)$ 叠加形成误差信号 $e(n)$ 。自适应算法根据白噪声参考信号和误差信号调整建模滤波器的权系数，直到 $e(n)$ 满足要求，系统达到稳定状态。此时，建模滤波器的传递函数是实际次级通路传递函数 $h_s(n)$ 的估计值 $\hat{h}_s(n)$ ，记录 $\hat{h}_s(n)$ 的系数，次级通路建模完成。

2 仿真分析

算法的收敛性和稳定性往往是矛盾的，迭代步长 μ 是控制算法收敛性和稳定性的一个参数。因此，在实际应用时， μ 的选择要在收敛性和稳定性之间作出权衡。本文在 Matlab 平台上进行仿真，分析比较了 μ 为 0.001、0.003 和 0.005 情况下，自适应陷波滤波算法的学习曲线。算法的学习曲线是指算法的均方误差 MSE (Mean Squared Error) 与迭代次数的关系曲线^[8]。仿真结果如图 6 所示。

从图 6 可以看出：随着迭代步长增大，算法收敛速度加快，但迭代步长并不是越大越好。当步长 μ 为 0.005 时，收敛速度是最快的，但相应的，其系统稳态误差也是最大的。因此，本文算法选用折中的迭代步长 μ 为 0.003。

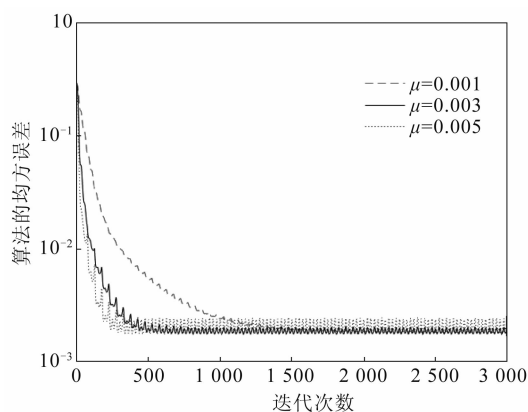


图 6 自适应陷波滤波算法学习曲线

3 试验验证

在某柴油机排气管路上，对低频 31.5 ~ 250 Hz 内排气噪声进行有源消声试验，现场试验装置如图 7 所示。排气噪声误差传感器选用 B&K 公司的驻极体传声器。数据采集仪为该公司的 LANXI 型 PULSE 板卡。试验结果如图 8 所示。

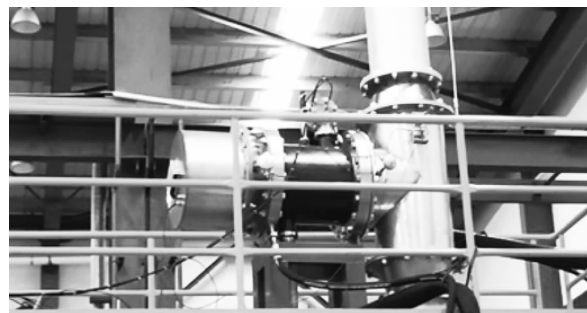


图 7 柴油机排气有源消声系统试验现场

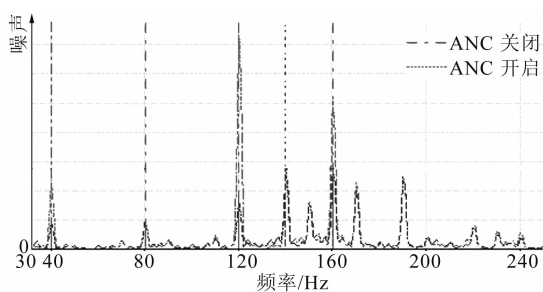


图 8 柴油机排气有源消声试验效果图

由图 8 可知：柴油机排气噪声在 40、80、120 和 160 Hz 时都有明显的线谱峰值，当有源消声系统开启后，上述线谱峰值都有了显著降低，说明系统达到了良好的降噪效果。其中，在 120 Hz 时，降噪量达到了 13 dB (A)。同时，当柴油机转速和负载发生变化时，有源消声系统能够及时做出响应，收敛速度快且具有良好的稳定性。

4 结 论

本文设计了基于自适应陷波滤波算法的柴油机排气低频噪声有源消声系统,通过仿真分析了迭代步长对算法性能的影响,并选用 $\mu = 0.003$ 作为本试验算法步长。试验结果表明:柴油机排气噪声在 120 Hz 时取得 13 dB (A) 的降噪效果;整个消声系统收敛速度快,稳态误差小。基于本文研究内容,拟针对以下问题开展进一步的研究。

(1) 针对柴油机排气的高温、高流速和多烟尘等特点,研究有源消声系统的稳定性和可靠性。

(2) 针对人耳较敏感的中高频段排气噪声,研究基于传统消声器的主被动复合式柴油机排气有源消声系统。

(3) 针对柴油机排气噪声多线谱的特性,研究使系统能够达到宽带多线谱降噪效果的技术。

(上接第 37 页)

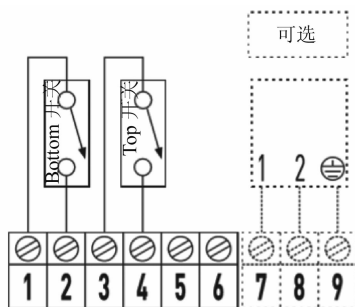


图 10 限位开关接线图

设有两个滤芯的滤油器的工作原理如图 11 所示。工作模式可分为三种:可单独使左或者右滤芯工作,也可使两个滤芯同时工作。滤芯的可切换性大大提高了发动机的可靠性。

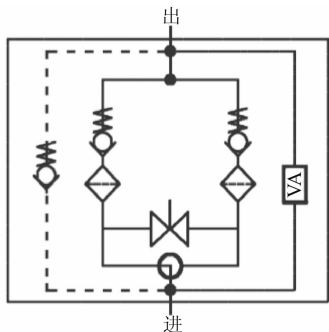


图 11 过滤器工作原理图

参考文献

- [1] 江宁, 秦四成, 汤黎明. 发动机排气噪声主动控制研究 [J]. 机械设计与制造, 2013 (11): 10-12, 16.
- [2] 伊善贞, 费仁元, 周大森, 等. 发动机排气噪声自适应有源消声系统的设计与试验研究 [J]. 内燃机工程, 2005, 26 (1): 59-62.
- [3] 张有鹏, 陈春明, 李国海. 基于 TMS320VC5509 DSP 的有源噪声控制系统设计与实现 [J]. 现代电子技术, 2011, 34 (17): 104-106.
- [4] 王进军. 管道噪声有源控制的工程实现及应用研究 [D]. 西安: 西北工业大学, 2004.
- [5] 魏明珠. 管道噪声有源控制系统的研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2008.
- [6] 陈克安. 有源噪声主动控制 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2003.
- [7] 周亚丽, 张奇志. 有源噪声与振动控制——原理、算法及实现 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2014.
- [8] 贝赫鲁兹·法尔航·保罗耶尼. 自适应滤波器原理及 Matlab 仿真应用 [M]. 韩芳明, 译. 北京: 机械工业出版社, 2018.

4 总 结

高低碱值气缸润滑油自动切换系统已实机应用,使用状态良好,成为 WinGD 双燃料机型的标准配置。

船舶长期在海上航行,维修条件不比陆地。发动机作为船舶的心脏,任何结构、系统的引入都须反复推敲。不仅系统功能须满足正常工作需求,且要求高可靠性。而手动/自动模式、限位开关及过滤器双滤芯等设计,使系统的可靠性及耐用性得到提高。

2020 年后排放法规进一步严格,全球燃油的硫质量分数大大降低,但只要有燃油切换的需求,高低碱值的气缸润滑油切换系统便有用武之地。

参考文献

- [1] Winterthur Gas & Diesel Ltd. Marine installation manual [R]. 2019.
- [2] ASTM D2896. Standard test method for base number of petroleum products by potentiometric perchloric acid titration [R]. 2015.
- [3] Winterthur Gas & Diesel Ltd. Lubricants [R]. 2019.