文章编号：1006-1355(2014)05-0210-04+218

基于DOE的挖掘机排气消声器结构优化设计

吕金水，陈 剑，袁 正

（合肥工业大学 噪声振动研究所，合肥 230009）

摘 要：以某型挖掘机的排气消声器为例，通过现场测试及仿真分析，找出了消声量较小的频率段。运用DOE方法，对各消声单元主要尺寸进行参数化建模，安排优化拉丁方试验，分析各消声结构对其消声性能的贡献量。通过多目标优化计算得到最优化的消声器结构参数。优化后消声器的模拟计算结果表明，改进后的消声器在目标频率段的消声量明显提高。

关键词：声学；排气消声器；DOE；传递损失；优化设计

中图分类号：TB535+.2 **文献标识码：**A **DOI编码：**10.3969/j.issn.1006-1335.2014.05.045

Optimization Design of Muffler's Structure of a Digging Machine Based on DOE

LV Jin-shui, CHEN Jian, YUAN Zheng

(Institude of Noise and Vibration, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China)

Abstract : An exhaust muffler of a digging machine is studied to find the weak frequency band with test and CAE method. With the internal structure characteristics of the muffler as design factors, the main sizes of anechoic components are parameterized based on DOE. The Latin square optimization experiment is done to analyze the noise elimination contribution of each muffler component. And the optimized muffler structural parameters are obtained through multi - objective optimization. Simulation result of the optimized muffler indicates that the noise attenuation performance in the target frequency band is significantly improved.

Key words : acoustics ; exhaust muffler ; DOE ; transmission loss ; optimization design

消声器是发动机排气系统广泛应用的消声装置。液压挖掘机的控制和运转部件较多，相应的噪声来源也比较多，而排气噪声占了相当大的比例 [1]。匹配一个好的消声器，能够有效控制并降低排气噪声，一直是噪声控制工程中的一项重要工作。其中传递损失是评价消声器性能的一项重要指标。

目前，对于单一消声结构的传递损失都有了较深入的研究，但在实际应用中，常见消声器往往是由多个结构串联而成，各个结构所针对的频率一般是不同的，它们之间是否有相互增益或者衰减，通过单一结构的研究也无法得知。按照以往的经验或者少量的计算公式，已不能满足设计要求。

本文针对某一工程机械公司的某一型号挖掘机，对其消声器进行参数化建模。采用实验设计（DOE）方法，通过定义设计因素，进行CAE仿真计算，得到设计因素对响应的贡献量以及多因素交互效应对响应的影响，并通过优化参数选取建立近似模型，使消声器在目标频段的噪声得到了很大降低，找到匹配发动机的最佳消声器结构。

1 实验分析

1.1 排气噪声贡献量的确定

在挖掘机定置状态下使用LMS SCADAS采集仪，在驾驶员右耳、泵、阀、进气口、发动机舱内和排气尾管处布置测点进行测试，经频谱分析发现9档时排气尾管处与驾驶室内右耳噪声频谱如图1所示，从图中可以看出，在97 Hz和194 Hz处，右耳处有俩尖峰存在。

收稿日期：2013-12-25

作者简介：吕金水（1989- ），男，安徽歙县人，硕士研究生，主要研究方向：汽车进排气系统的声学仿真与结构优化。

通信作者：陈剑，男，博士生导师。

E-mail: chenjian@mail.hf.ah.cn

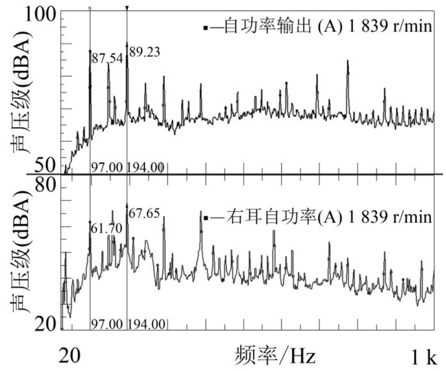

图1 9档时排气尾管(上)及驾驶室右耳处(下)噪声频谱

对驾驶室右耳和排气尾管处噪声进行偏相干分析得到偏相干系数曲线，如图2所示。发现在97 Hz处，这两点的偏相干系数为0.77，194 Hz处偏相干系数为0.95，说明9档时对驾驶室右耳声压贡献量最大的是排气噪声。

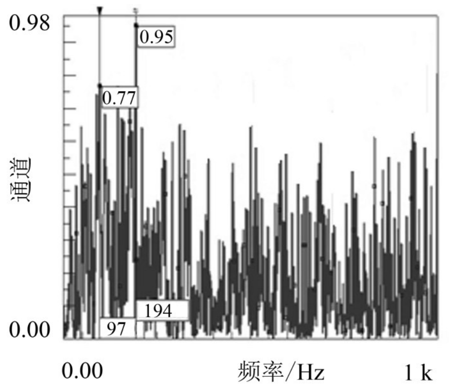

图2 排气噪声与驾驶员右耳处偏相干曲线

经过以上分析可以知道，为改善驾驶室内噪声，需同时提高97 Hz以及194 Hz附近频率段的消声量，将这两个频率下的消声量记为TL_{97}、TL_{194}。

1.2 排气消声器性能分析

1.2.1 传递损失计算

对排气消声器在半消声室中进行台架试验，测试设备为LMS SCADAS采集仪及配套Test Lab测试软件，传声器为B&K 4944 A型，采样频率为16 kHz，分辨率设置为1 Hz。信号发生器发出白噪声，经过功率放大器，并由扬声器发出声波经过管道传入消声器，出口处分别用以敞口及其他消声器作为末端，通过四点法进行消声器静态试验，得到其传递损失曲线，如图4所示。

对原消声器进行剖解，观察其内部结构，如图3所示，用LMS Virtual. Lab软件通过声学有限元方法对消声器进行声学计算。由于消声器尺寸不大，在此用平均温度650 K为计算温度，算的空气密度为0.543 kg/m^3，声速为470 m/s。进口用(0，0)阶声模态

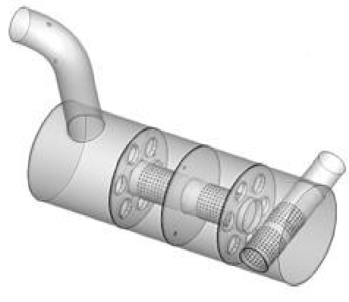

图3 原消声器内部结构

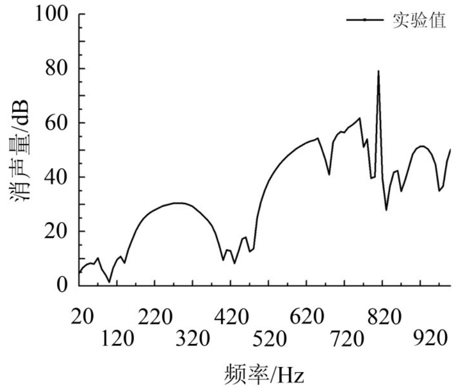

图4 静态试验测量的消声器传递损失曲线

波模拟平面波声源，选择功率为1 W即为入射声功率，出口定义为无反射边界层AML [2]。采用入口入射声功率级减去出口透射声功率级的公式，计算得到20 Hz～1 000 Hz传递损失曲线，如图9中虚线所示。

通过仿真和试验都验证了原消声器在发动机97 Hz、194 Hz附近频段处，消声量较低，需要进行优化。

1.2.2 流场压降计算

安装消声器除了消声量的要求外还希望排气阻力对发动机的动力性能影响尽量小，所以对消声器流场全压进行计算，以50 m/s的速度入口，压力出口为边界条件。计算结果如图5所示，全压的大小为16.6 kPa。

2 基于DOE的消声器优化设计

消声器的设计是一个比较复杂的问题，早期消声器消声性能的计算较少，且理论计算与实际试验结果相差较大，因此在实际设计中鲜有用到，而是用试错法通过反复的设计、试制、实验来研制消声器 [3, 4]。

现代DOE是一门以应用数学、统计学、计算机辅助建模为基础的基于模型优化的前沿学科，它能通过科学安排试验方案，正确分析试验结果，尽快获

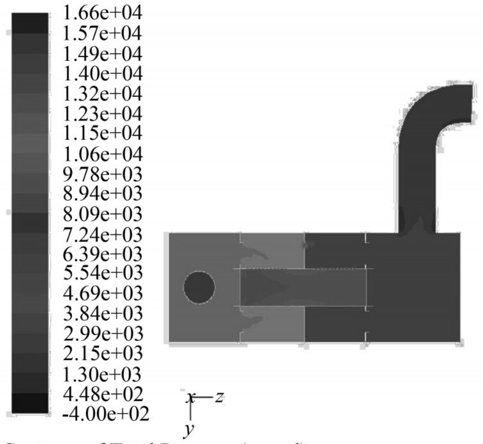

图5 消声器流场全压云图

得优化方案[5, 6]。

文中将DOE方法引入到消声器优化设计过程中，下面将从输入输出变量的选取、实验设计方法的选择、实验设计结果分析以及消声量优化设计四个方面进行阐述。

优化设计过程中使用的是LMS Virtual Lab软件，其具有界面友好，能满足多项工程分析需求的特点。几何建模、网格划分、试验设计等都能够在该软件中进行，避免了多个软件间相互切换，以及数据导出、输入导致的效率降低。

由于参数较多，传统的优化设计方法会导致优化时间不可控。本文通过试验设计方法建立近似模型，通过对近似模型的优化找出最优解。

2.1 输入输出变量的选取

进行试验设计前需要对待优化消声器进行参数化建模，首先需要保证建模时消声器各结构参数之间没有进行相互参照，即每个结构参数都能够进行独立变化。

由于整车布置的空间限制，对原消声器优化时其整体外形尺寸无法改变，这就导致消声容积无法改变，而只能够从其内部结构入手。且考虑到尽量降低结构调整造成的成本问题，现考虑在原结构基础上进行优化。

如图4所示，对消声器内部结构，选取如表1所示的结构变量作为优化因素，并确定参数高低水平。高低水平确定的主要依据是，在低水平时能保证每个腔的出口截面积大于其入口截面积，以保证气流畅通。

通过之前的CAE分析结果，能够在LMS Virtual. Lab软件的Optimization模块定义Sensor，即虚拟传声器，设置感兴趣的值作为输出相应。

表1 输入设计变量及其水平

序号	设计变量	低水平	高水平
1	阵列行数	12	19
2	一二腔是否连接	否	是
3	二三腔是否连接	否	是
4	三四腔是否连接	否	是
5	一二腔穿孔半径	19	35
6	二三腔穿孔半径	5	25
7	三四腔穿孔半径	19	35
8	插入管与一腔是否连接	否	是
9	插入管与四腔是否连接	否	是
10	插入管与二腔是否连接	否	是
11	插入管与三腔是否连接	否	是
12	二腔内阵列数	7	12
13	三腔内阵列数	7	12

在本例中，主要噪声频率出现在97 Hz和194 Hz附近，由于峰值的频率与转速有关，故不能以单个频率为目标，则以薄弱频率段90 Hz～100 Hz及190 Hz～200 Hz为计算频段，计算该频段内的传递损失作为输出响应，分别记为TL_{97}及TL_{194}。

2.2 实验设计方法的选择

试验设计安排表一般选择具有正交性，以保证拟合回归时矩阵有唯一解。试验设计的常用方法有：完全因子设计，部分因子设计，田口法，拉丁方，优化拉丁方等方法。

在本例中，选择了13个设计变量，若按照全因子法进行试验设计，则需要8 192次计算。耗费时间过长，所以在此采用优化拉丁超立方设计进行200次试验，保证其能够满足分析需要。

2.3 实验设计结果分析

将设计好的实验安排表导入Virtual. Lab中进行计算，计算结果输出汇总成表，在数学分析软件Isight中通过对试验结果进行帕累托效应排序，得到消声器各消声结构对输出响应TL_{97}、TL_{194}的贡献量，如图6、7所示。

从帕累托效应可得出插入管与一腔连接的交互效应对TL_{97}、TL_{194}贡献量是最高的，且该交互效应对TL_{97}、TL_{194}都是正相关的，这说明我们同时提高这两个频率的消声量是能够实现的。但是我们也发现该

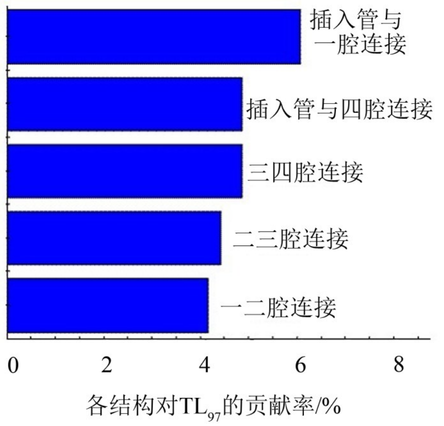

图6　消声器结构对TL_{97}的贡献率

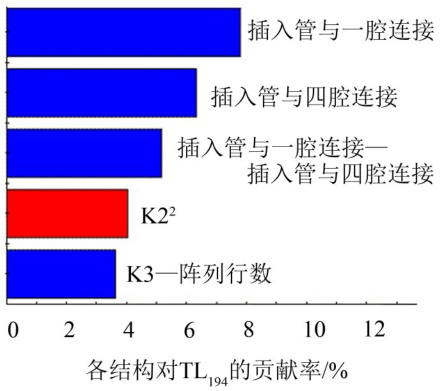

图7　消声器结构对TL_{194}的贡献率

交互效应的贡献率都低于10 %，说明在此消声器中没有针对TL_{97}、TL_{194}消声效果特别有效的结构。

2.4　消声量优化设计

在Isight中可使用试验设计的结果表格进行数学模型拟合，然后基于数学模型进行优化。在此，我们选用RBF神经网络模型进行拟合，其误差分析如图8所示，误差较小，能够满足需求。

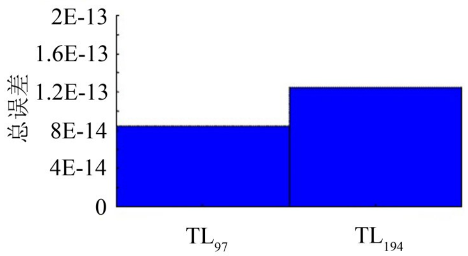

图8　拟合神经网络模型与试验设计数据误差分析

优化的目标为TL_{97}、TL_{194}的最大化，选用序列二次规划法进行优化，设置步长、权重等。由于是基于双目标进行优化，结果不会是唯一值，得到帕累托解集，需要人工选择适合的设计参数。在人工干预下，优化后得到的结果如表2所示。

表2　设计变量优化结果

设计变量	优化结果
一二腔穿孔半径/mm	34
二三腔穿孔半径/mm	10
三四腔穿孔半径/mm	20
插入管与二腔连接	否
插入管与三腔连接	否
插入管与四腔连接	是
插入管与一腔连接	是
二腔内阵列数	10
二三腔连接	是
三腔内阵列数	8
三四腔连接	是
一二腔连接	是
阵列行数	12
预测TL_{97}(dB)	18
预测TL_{194}(dB)	43

按照优化结果，重新建立几何模型进行验证。优化前后传递损失对比见图9，通过数据对比，TL_{97}提高了12 dB。TL_{194}提高了20 dB，优化效果较好。

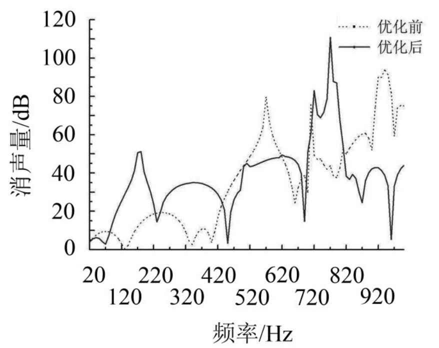

图9　优化前后传递损失曲线对比

优化后排气消声器全压云图如图10所示，流场全压值为10.7 kpa，相比优化前降低了近6 kPa。

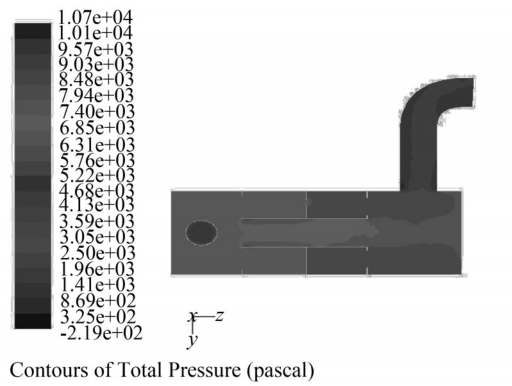

图10　优化后消声器流场全压云图

(下转第218页)