

基于声源定位技术的叉车降噪研究

徐少华

杭叉集团股份有限公司 浙江杭州 311305

摘要: 随着人们生活质量提高, 叉车整机声学舒适性也逐渐备受关注, 叉车作业时产生多种噪声对操作员的工作效率和健康带来极大的影响^[1-2]。合理的利用声源识别技术是有效找出振动与噪声源的关键。声源定位设备能将声源进行可视化, 能对复杂环境下噪声源进行识别, 并且能够直观的用图形的方式呈现出来。本文主要对声源定位成像的波束形成原理进行阐述, 最后利用声源定位设备并结合频谱分析开展叉车噪声源识别研究, 并提出通过局部吸音隔音的方法应用于样机改进方案。

关键词: 叉车; 声源定位; 波束形成; 频谱分析

Research on noise reduction of forklift truck based on sound source location technology

Shaohua Xu

Hangzhou fork Group Co., LTD., Hangzhou, Zhejiang, 311305

Abstract: With the improvement of people's quality of life, the acoustic comfort of forklift trucks has gradually attracted attention. The various noises generated during forklift operations have a significant impact on the operator's work efficiency and health^[1-2]. The rational use of sound source identification technology is crucial for identifying the sources of vibration and noise. Sound source localization devices can visualize the sound sources, identify noise sources in complex environments, and present them graphically in an intuitive manner. This paper mainly elaborates on the principle of beamforming in sound source localization imaging. Finally, by using a sound source localization device in conjunction with spectral analysis, research is conducted on the identification of forklift noise sources. Furthermore, an improvement plan is proposed by applying local sound absorption and isolation methods to the prototype.

Keywords: Forklift; Sound source location; Beamforming; Spectrum analysis

目前国内外专家对声源定位方法开展了很多深入的探索, 也都取得了相关的研究成果, 其中有非接触式、近场声全息、远场声阵列技术, 都能直观的将声源可视化, 根据不同的算法完成不同的相关测试。

在声源定位测试领域, 袁旻恣等^[3]采用传递率分析法, 对高速行驶的列车内部车厢进行了声源定位测试分析。郝鹏等^[4]研究了在不同行驶速度过程中, 对车辆运行、方位及速度下实时状态下的特殊性, 并提出声源在运动时不同的传递路径识别方法。齐全等^[5]利用OTPA测试方式对挖掘机的驾驶员耳边噪声进行噪声传递路径进行测试分析, 并通过改进减振系统从而改变振动共振点, 起到减振作用。

一、声源定位技术原理

现市面上声源定位技术主要均采用波束形成算法, 波束形成算法通过测量麦克风阵列的信号幅值和相位差可以云图方式标注明确的声源位置与声场分布^[6-7]。该项技术被广泛应用于整车行业产品测试、发动机等研发, 家用电器设计以及各种机械设备的生产中^[8-9]。随着技术进步, 声源定位技术更多采用声信号分析, 通过多个麦克风空间位置组成的传声阵列对空间声场进行滤波, 即波束形成法。

波束形成算法基本原理。经典波束形成算法的基本原理可由上图描述, 声源的观察平面上存在声源点, 麦克风阵列位于接收平面上。由于麦克风与声源点的位置存在差异, 所以在接受噪声源信号时, 各个麦克风信号间将存在延时 Δt 。同步各个麦克风声压信号反演至观察平面并进行叠加, 从而叠加点不为声源点, 则麦克风信号在该点叠加时, 相位是错乱无序, 叠加后信号幅值很小; 如果叠加点为声源点, 则麦克风信号在该点叠加时将为同相位, 叠加后信号幅值明显增加。叠加所有点后得到声源平面网格的声压级大小云图, 从而确定声源位置, 这就是波束形成算法的基本原理。

二、整车噪声试验

为了更好的获取叉车工作时的的工作噪声, 先要进行原车的噪声试验测试, 试验在半消声室内进行, 测量设备选用睿深科技有限公司生产的 Bionic M-112 Array 声阵列设备, 西门子公司生产的 LMS.SCADAS 振动噪声测试分析仪以及 BK 生产的 130E20 噪声测试麦克风。其频率响应范围、相对灵敏度、质量等参数符合相关测试要求。并从左侧、右侧、前侧、后侧多个方位进行声阵列噪声测试, 并利用对驾驶员耳边的噪声进行测试, 结合叉车的多种工况进行试验, 包括

怠速工况、高速工况、起升工况。

考虑到叉车的发动机工况下发动机的转速并不是很高，频率为中低频为主，所以在测试前将通道的频率设置为 5120Hz，测试应在一个作业循环内进行，每一种工况下至少测量 3 次，且每两次测量值相差不应超过 1dB (A)，才能进行下一步测量。为了获取准确的相关数据，先将发动机进行预热。噪声测试结果如下表 1 所示。其中噪声的加权值为 85.06dB (A)，主要因为起升和高速工况的噪声贡献较大，为了降低整车的噪声值，必须对起升工况和高速工况下的噪声进行分析研究，并有针对性地进行优化改进。

表 1 原车噪声结果

单位: dB (A)

测试条件	测试点位	怠速	起升	运行	加权值
原车状态	耳边	72.19	88.91	88.52	85.06

三、噪声频谱分析及声源定位

从经验分析内燃叉车噪声源主要由发动机点火噪声、变速箱传动噪声、进排气噪声、风扇散热噪声、液压流体噪声等^[12-13]。通过对驾驶员耳边噪声进行频谱分析及整车噪声源定位分析，可以对该车的噪声源有一个系统的了解。如下图 3 所示，这是车辆在高速工况下驾驶员耳边噪声的频谱分析结果，从频谱图上可以看到较高的贡献频率集中在 76.3Hz、266.0Hz、532.7Hz，其中 76.3Hz 为该车发动机的点火频率，266.0Hz 为冷却风扇的工作频率，532.7Hz 为冷却风扇噪声的二阶频率，所以初步确定该车在高速工况下的峰值噪声主要来源于冷却风扇。

而为了进一步确定上述频谱分析结果，对声源定位测试进行分析，如图 3 所示，这是 240Hz~300Hz 频段的噪声源位置，主要集中在叉车后部的风扇位置，该声源定位分析与频谱分析结果正好一致。运用相同的方法，对起升工况的噪声也开展了分析研究，最终得出另一个贡献较高的频率为 382Hz，该噪声主要集中在车辆前面的前后底板附近，是液压系统中齿轮泵工作和多路阀管路噪声。



图 a 右侧 240Hz-300Hz 测试结果

图 b 发动机上方 240Hz-300Hz 测试结果



图 c 后侧 240Hz-300Hz 测试结果

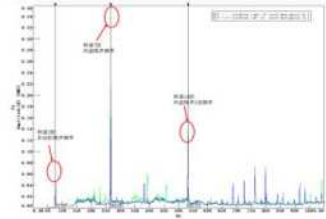


图 d 高速工况耳边噪声频谱图

图 2 噪声测试图

通过一系列的噪声和声源定位测试分析，最终确定了该车的噪声源主要由以下三方面引起：发动机点火噪声、风扇散热噪声、液压流体噪声，所以下一步需从这三个方面提出相应的改进方案。

四、声源控制分析研究

为了解决上述中声源的主要问题，分别对不同的频率进行分析，可从下列几个方案进行优化改进：

(1) 发动机点火噪声。发动机每做功一次，都会发生两次点火，在发动机工作时，点火声会一直存在，而且会随着转速的提升噪声会更大。由于叉车发动机不是自主研发，暂时无法对发动机内部进行修正，故只能对叉车车架部位进行相应的整改，目前只能用一些好的吸音材料通过相应的挡板安装在需要隔离的位置进行安装，能有效起到阻断噪声源的传播。

(2) 液压流体噪声。在叉车进行转向及起升下降作业时会一直伴随着，其中液压齿轮泵是液压流体噪声的主要部件，液压齿轮泵会随着转速、油压、流量的变化而变化，通常在起升工况下它的噪声能达到峰值。液压齿轮泵工作是通过内部齿轮的高速啮合，通常齿轮泵产生的噪声都比较尖锐。该车型液压齿轮泵齿数：10 齿，速比 1：1，通过理论分析， $2300 \times 1 \times 10 / 60 = 382 \text{Hz}$ ，与之前分析的 382Hz 噪声频率相吻合。针对液压系统的噪声可以采取如下控制的措施：一是更换一个啮合齿轮相对的低噪音泵，对液压齿轮泵的内部齿轮进行精修，从而减少齿轮泵的齿轮啮合噪声；二是可以消除一些由管路设计不合理、接头设计不合理，从而导致油管压力波动，对液压系统造成的液压流体异响，可在适当的地方去增加共振管路来降低液压流体异响，也可通过增加蓄能器、吸

能器来削弱元件的脉冲压力, 同时也要尽可能避免一些直角弯接头。

(3) 散热系统噪声降噪研究。由于发动机在长时间的运行过程中, 需要对发动机内部的水和油进行散热, 来确保发动机的长时间稳定运行。当然越大的风扇叶片相对来说散热效果越好, 但要考虑到整车的布局以及对发动机动能的消耗来进行综合评估, 不能为了降低噪声而去牺牲前者。在该叉车上, 散热风扇叶片数为 7 片, 速比为 1, 故散热风扇的噪声按照理论分析为 $2300 \times 1 \times 7 / 60 = 266 \text{Hz}$, 与之前分析的 266Hz 噪声频率相吻合, 而 532Hz 为该频段的二阶频率, 占据该车的第一、第二噪声峰值。针对散热系统可以采用以下方法合理控制控制噪声: 风扇是散热系统的关键点, 为了减少风扇的噪声, 需对风扇进行优化改进, 开发低噪音风扇; 二是在轮胎室边上加装封板, 内部帖吸音隔音材料, 阻止噪声从后轮胎室往外泄露。这样虽然会占用空间、增加成本, 但是可以很好地改善噪声问题。

五、小结

为了准确的找到该内燃叉车的主要噪声源, 先后在半消声室内开展了一系列驾驶员耳边噪声和声源定位测试。通过对各工况测试数据进行频谱和声源定位分析, 确定了该内燃叉车的主要噪声频段和噪声源位置。并针对各个噪声源的噪声特性, 进行了降噪方案的设计, 为整车的降噪提供了技术支持。

通过该车的降噪研究, 掌握了整车噪声源的测试和分析方法, 为后期其他同类叉车的降噪研究提供了指导。

参考文献:

- [1]ZAJCZKOWSKI J. Vibrations of a crank-shaft in a sewing machine induced by a zigzag mechanism[J]. International Journal of Clothing Science and Technology, 1999, 11(1): 53-59.
- [2]张敬涛, 周以齐. 拖拉机驾驶室内异常噪声分析与控制[J]. 噪声与振动控制, 2017, 37(2): 75-79.
- [3]袁旻恣, SHEN ANNE, 鲁帆, 等. 高速列车运行工况下噪声传递路径及声源贡献量分析[J]. 振动与冲击, 2013, 32 (21): 189-196.
- [4]郝鹏, 郑四发, 连小珉. 运动噪声源的时域传递路径模型及贡献率分析[J]. 机械工程学报, 2012, 48(8): 104-109.
- [5]齐全, 周以齐, 崔文玲. 基于 OSPA 方法的挖掘机驾驶室结构噪声源识别[J]. 噪声与振动控制, 2017, 37(2): 75-79.
- [6]Raghuraman Mudumbai;D. Richard Brown III;Upamanyu Madhow;H. Vincent Poor, et al. Distributed transmit beamforming: challenges and recent progress.[J]. IEEE Communications Magazine, 2009, 47 (2) : 102-110.
- [7]王建英, 王英, 尹忠科. 阵列信号特征空间分解及其在波束形成中的应用[J]. 电讯技术, 2004, 44 (4) : 15-18.
- [8]FAURE B, CHIELLO O, PALLAS M A, et al. Characterisation of the acoustic field radiated by a rail with a microphone array: The SWEAM method[J]. Journal of Sound & Vibration, 2015, 346 (1) : 165-190.
- [9]贾智骏, 蒋伟康. 基于传声器阵列的电泵噪声源识别研究[J]. 噪声与振动控制, 2004, 24 (6) : 49-51.
- [10]薛玮飞. 机械噪声源辨识与特征提取的研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2007.
- [11]辛阳, 董大伟, 闫兵, 等. 汽车用发电机 NVH 性能测试声学实验室设计及鉴定[J]. 声与振动控制, 2012, 32 (3) : 147-151.