

文章编号:1006-1355(2019)03-0235-06+249

声阵列测试技术在微型泵降噪中的应用研究

白国军¹, 李 军¹, 纪红刚¹, 袁国刚²

(1. 广东省珠海市质量计量监督检测所, 广东 珠海 519060;
2. 上海睿深电子科技有限公司, 上海 201108)

摘 要:声源定位作为机械降噪的关键之一,有效指导着产品噪声问题的解决。某微型压力水泵的噪声较大,为了有效降噪,综合声阵列测试技术和机械降噪技术,构建起一套完整的降噪优化流程方法。在声源定位过程中采用声阵列采集实验数据,利用声强法与波束形成技术获取得到微型压力水泵噪声源的主要声源位置位于套筒中部,结合流场与结构场的实验分析,进一步验证泵体噪声主要由套筒结构的振动发声所致。在准确识别声源的位置后提出相应的降低本体噪声的改进方法并进行验证,结果表明:增大壳体的阻抗特性和通过弱化电机与顶盖和底盖的轴向连接刚度的方式可以有效降低压力水泵的噪声。

关键词:声学;降噪;声源识别;波束成形;压力水泵

中图分类号:TB533

文献标志码:A

DOI编码:10.3969/j.issn.1006-1355.2019.03.045

Application of Acoustic Array Testing Technique in Miniature Pump Noise Reduction

BAI Guojun¹, LI Jun¹, JI Honggang¹, YUAN Guogang²

(1. Guangdong Zhuhai Supervision Testing Institute of Quality and Metrology,
Zhuhai 519060, Guangdong, China;
2. Shanghai Rhythm Electronic Technology Co., Ltd., Shanghai 201108, China)

Abstract : As one of the key points of mechanical noise reduction, sound source localization effectively guides the solution of product noise problems. The noise of a miniature pressure water pump is relatively large. In order to effectively reduce the noise, combining sound array testing technique with mechanical noise reduction technique, a complete noise reduction optimization process is constructed. In the sound source localization process, the acoustic array is used to collect experimental data. The main noise source of the miniature pressure pump is localized by the sound intensity method and beamforming technique, which is in the middle of the sleeve. According to the experimental analysis of the flow field and the structure field, it is further verified that the pump body noise is mainly caused by the vibration of the sleeve structure. After accurately identifying the position of the noise source, a corresponding improvement method for reducing the bulk noise is proposed and verified. The results show that increasing the impedance of the shell and weakening the axial connection stiffness between the motor and the top cover and the bottom cover can effectively reduce the noise of the pressure pump.

Keywords : acoustics; noise reduction; sound source identification; beamforming; pressure pump

微型电机及压力泵越来越被广泛使用在汽车、医疗器械、白色家电等领域中,这一领域的客户对舒适性提出越来越高的需求,因此噪声问题越发突出,

如何快速诊断噪声问题,并针对产品进行优化整改在工程实际中具有非常重要的意义。声源定位技术可以有效指导产品的声学优化设计,并实现噪声的主动控制。传统的声源识别方法如近场测量法、表面振速法等存在抗干扰能力差、识别精度差等问题,在强源干扰及多声源识别中极易出现误差^[1]。目前常用的声源识别技术主要为声全息法^[2]、声强法^[3]、波束形成法^[4],这些方法均采用声阵列的形式进行数据采集,通过不同的重构理论重构测量表面的声场并获取声源位置。

收稿日期:2018-10-15

基金项目:广东省科技厅资助项目(2018ZJ03)

作者简介:白国军(1986-),男,吉林省锦州市人,本科,工程师,主要从事新能源利用,振动噪声控制研究。

E-mail: 13844033663@163.com

通信作者:袁国刚(1980-),男,研究生,主要从事振动噪声控制研究。

E-mail: guogang.yuan@rhythm-tech.com

其中波束形成技术由于其测量速度快、计算效率高、定位结果准确,适于中远场测量等优点,近些年来在车辆、发动机、航空航天等领域被广泛应用^[5]。由于波束形成技术识别精度与声源的波长成反比,因此在低频下的识别效果会变差,微型电机及压力泵的噪声能量也会在低频段出现,但通常的定位实验中只取中高频能量进行分析^[6-7]。声全息法与声强法均可以弥补波束形成技术在低频下的缺陷,但是为了得到全息面的时域声压信号,声全息技术通常需要测量整个平面上等间距网格点上的信号,导致测量过程非常复杂。另一方面,声全息技术对于声源表面形状的适应性非常差^[8],微型电机/泵的外形特征通常较小,并且声源表面不规则,因此结合声强法对信源的低频成分进行定位。

本文以某家用电器中的微型压力水泵为研究对象,将阵列测试技术应用于其降噪优化过程中,采用声强法弥补波束形成技术在低频下识别效果差的问题,引入清晰化波束形成技术 DAMAS 算法提高常规波束形成技术的分辨率,最终结合机械降噪技术实现了噪声源位置的优化改善,并将整套过程进行了流程化,以便于该测试方法的推广应用。

1 降噪优化方法

噪声控制的关键之一就是声源定位,因此机械降噪的过程通常可以分为声源定位及降噪优化两部分。声源定位的精度直接影响到产品降噪成本的效果,误差大甚至错误的结果会造成产品优化降噪过程不能对症下药,浪费人力物力却无法取得满意的效果。因此将基于声阵列的高分辨率声源定位方法应用于产品降噪优化过程中,首先通过基于声阵列的声源识别方法快速地对噪声源进行定位,判定气动还是结构噪声,如果是气动噪声考虑使用流场优化,风扇等源噪声控制,如果是结构辐射造成的噪声,考虑结构模态贡献,主要传递路径等问题,然后考虑减低传递率和采用有效的隔吸声方法对噪声问题进行解决,其具体流程如图1所示。

1.1 常规波束形成算法

常规波束形成算法(Conventional Beamforming, CBF)是基于若干个麦克风组成的阵列的噪声源识别方法的一种,其基本原理是通过对各麦克风的输出进行加权、延迟、求和,使得每个测点对于某一聚焦方向来说,接收的信号相位相同,阵列在该方向上的输出为各测点输出的同相相加,得到加强;而在其他方向上,阵列输出不是各测点输出的同相相加,得到减弱,理想情况下输出为零。各测点之和的最大值所在的聚焦方向即为声源所在方向,简而言之就

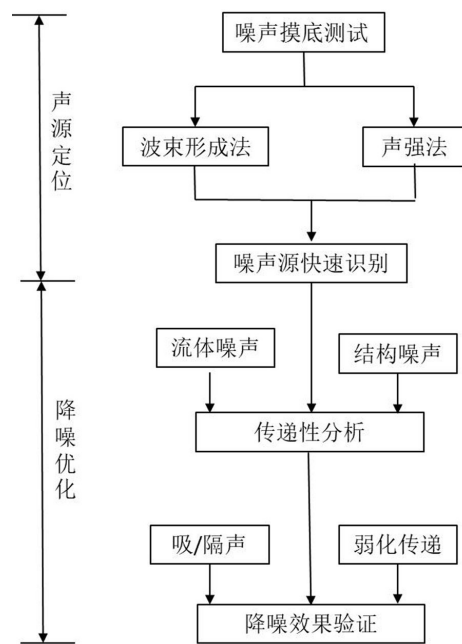


图1 降噪优化流程

是采用“延迟求和”算法对阵列各传声器接收的声压信号进行“相位对齐”和“求和运算”^[9-10]。如图2所示。

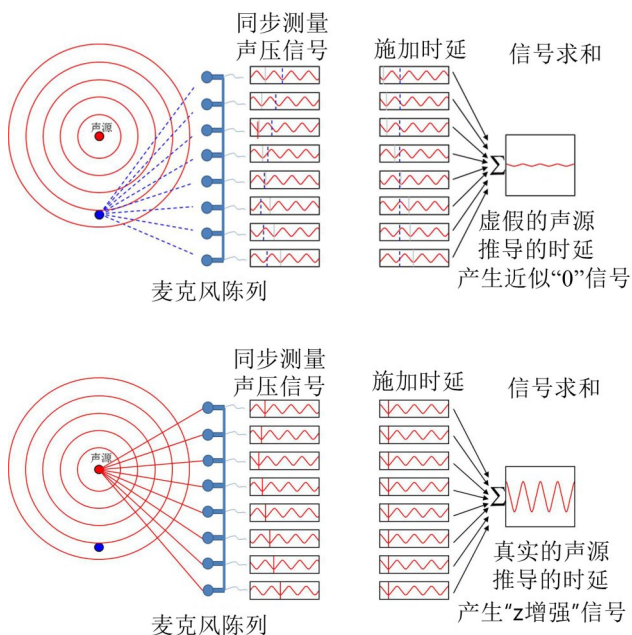


图2 波束形成原理示意图

假设有两个平面,声源平面和测量平面(阵列在这一平面上),测量面和声源面之间距离为 z ;传感器阵列由 N 个麦克风组成,则测量面上各个阵元位置为

$$r_m (m = 1, 2, \dots, N) \quad (1)$$

θ 为声源的入射方向,参考阵元 r_0 接收到的的信号为 $P_0(t)$, $\Delta_m(\theta)$ 为声源信号到达各个阵元相对于参考阵元的时间差;则各个阵元输出为

$$p_m(t) = p_0(t - \Delta_m(\theta)) \quad (2)$$

α 为任意的聚焦方向,将阵列输出在 α 方向进行

聚焦,则阵列在 α 方向上的输出为

$$p(\alpha, t) = \sum_{m=1}^N \alpha_m p_0[t - \Delta_m(\theta) - \Delta_m(\alpha)] \quad (3)$$

其中: α_m 是对各阵元接收信号的加权系数。在未加说明的情况下,取加权系数为1,即 $\alpha_m = 1$ 。 $\Delta_m(\alpha)$ 的取值分为近场和远场两种情况。

当聚焦方向 α 与入射方向 θ 一致时, $\Delta_m(\theta) = \Delta_m(\alpha)$,也就是说经过时间延迟校正后,各个阵元所接收的信号位于同一个瞬时波前,它们相加时相互加强,阵列输出取得极大值。

$$p(\alpha, t) = \sum_{m=1}^N \alpha_m p_0(t) = N p_0(t) \quad (4)$$

当聚焦方向 α 与入射方向 θ 不一致时, $\Delta_m(\theta) \neq \Delta_m(\alpha)$,各个阵元所接收的信号是不相干的,它们相加时会相互抵消,理想情况下,阵列输出为零。这样就实现了对信号的空间滤波。

$$p(\alpha, t) = 0 \quad (5)$$

对上式两端做傅里叶变换,将由时域转换至频域得

$$p(\alpha, t) = \sum_{m=1}^N \alpha_m p_m(\omega) \exp(j\omega\Delta_m(\alpha)) \quad (6)$$

依据上式就可求得重建区域上的声压等效分布。

1.2 反卷积波束形成算法

常规波束形成结果受到阵列的有限性和离散性影响,成像结果往往会存在主瓣宽度大、旁瓣数量多的问题,导致识别结果精度不高^[11]。为了有效提高常规波束形成的识别分辨率,Brooks等提出了反卷积DAMAS算法^[12]。国内外学者围绕DAMAS算法展开了丰富的研究,在汽车、航空航天等领域的应用结果均显示该算法可以有效衰减旁瓣并提高声源识别结果的精度^[13-14]。

常规波束形成算法的输出结果可以看做是阵列点传播函数与声源分布之间的卷积结果,DAMAS算法基于这种关系建立卷积格方程式,并通过高斯一赛德尔迭代方法就行反卷积计算,获取声源的真实空间分布位置。

1.3 声强法

声强传声器阵列基于传统的声强测试方法(p-p),通过快速傅里叶变换求解传声器之间的互谱 G_{ij} ,根据互谱的虚部可以得到测量点的声强值,其是矢量具备方向性,因此可以剔除由于包络面外输入能量的影响,并能够反映声级的大小、声能的流动方向、主声源的位置、声辐射面声强分布规律等特征。

声强法的输出有功声强的频率分布 $I(\omega)$ 表达

式为

$$I(\omega) = -\frac{1}{\omega \rho_0 d} \text{Im}(G_{ij}) \quad (7)$$

式中: Im 表示取互谱 G_{ij} 的虚部; ω 为圆频率; ρ_0 为空气密度; d 为传声器之间的距离。

2 微型压力泵噪声试验分析研究

以某微型压力水泵为例,其结构示意图如图3所示。其结构主要包括凸轮、活塞、轴承等,在工作过程中通过机械装置使水泵内部的活塞做往复运动,从而压缩、拉伸泵腔(固定容积)内的空气,在出水口处形成正压,在进水口处形成真空,在压差作用下形成较稳定的流量。该压力水泵样品的噪声比较高,迫切需要快速查找噪声问题的根源并提出明确的降噪措施。

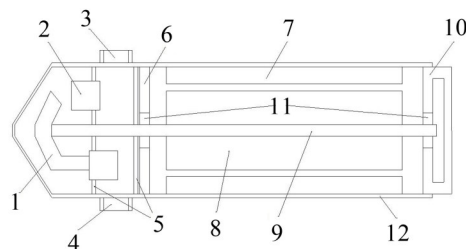


图3 微型压力泵结构示意图

- (1. 凸轮; 2. 活塞; 3. 进水口; 4. 出水口; 5. 隔水层;
6. 电机上端盖; 7. 定子; 8. 转子; 9. 轴;
10. 电机下端盖; 11. 轴承; 12. 外壳)

泵的噪声源主要由以下几个方面造成的,电机转动、轴承油隙、叶片摩擦、泵体流道光洁度、排气口结构、电磁噪声等,明确其主导声源是进行噪声优化的首要工作。

2.1 微型压力泵噪声基准测试分析

为了对微型泵进行降噪优化分析,首先对某型号的微型泵进行摸底测试。根据JB/T 8098-1999《泵的噪声测量与评价方法》,选择平行六面体测量表面方法,测量距离选择1m,共布置5个测点进行测试如图3所示。

各测点之间的大小关系如图4,测试数值显示:#3、#5>#1>#2、#4,可以发现两侧的噪声明显高于泵顶部和末端。顶部是泵体的压缩部件,底部是电机的连接端盖,发声面积小,声能辐射能力有限,侧面是圆柱形包含了部分塑料件和金属,因此可能的声辐射能力更强。

由图5可以发现主要的噪声贡献频率在500 Hz~800 Hz倍频段,1 250 Hz倍频段和3 150 Hz倍频段。其中以500 Hz~800 Hz最为明显,其次为3 150 Hz频段,水平两侧的噪声明显高出其他测点,



图3 声压级测量实际测点布置图

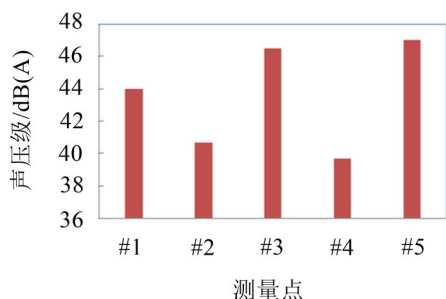


图4 各个噪声测点声压级比较

因此声源可能在泵的两侧(即3号点和5号点位置),有比较好的对称特征,但是具体位置需要进一步分析。

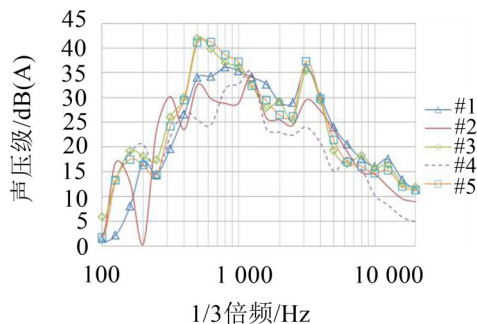


图5 各点测试声压级频率分量大小

微型泵顶部是一个泵头,下部套筒底部安装有驱动电机。套筒上安装有电机的定子,电机转子通过轴与顶盖、底盖连接,顶盖、底盖再与套筒连接,转子与套筒不直接接触。由于电机转子是转速较高频率已知,是中高频噪声,但直达声场会被金属套筒衰减很多,噪声来自于结构的二次发声的可能性更大。考虑到泵头为塑料件,噪声源可能是从泵头或者金属套筒发出。从噪声摸底测试结果可知,微型泵顶部的噪声值不大,因此泵头发声的可能性不大。

2.2 微型泵噪声源识别分析

为了进一步验证主要声源位置,对于基准测试所发现的主要声源段,采用声学阵列进行识别从而对声源位置进行进一步的确认。

试验装置采用德国CAE公司的112个测点的0.6 m的麦克风阵列进行远程波束成形识别,其外形如图6左图。其特点是可以采用近似均匀分布的螺旋阵列设计,兼顾了远场的波束成形方法和近场声全息方法,采用集成度极高的数字式麦克风大大降低了系统的复杂程度,在确保测量精度的同时,使工程应用更为简单,同时考虑到低频成分的识别,也采用了同样基于数字式麦克风的声强阵列,如图6右图所示。

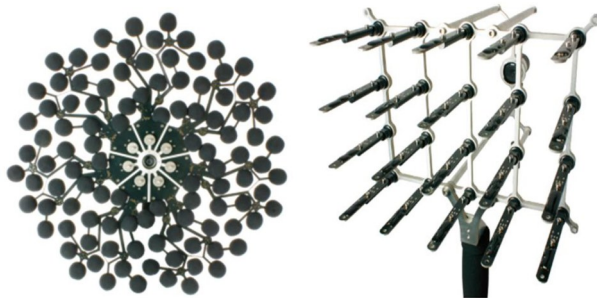


图6 112通道的螺旋形阵列和20通道棋盘形声强阵列

对于400 Hz~900 Hz的频带,由于其频带较低,使用的0.6 m远场阵列无法在这一频带下有明显的声源分离能力,阵列的低频识别能力取决于其阵列的直径大小,通常遵循如下准则,

$$R = 1.22 \frac{\lambda}{ZD}$$

其中: R 为空间分辨率,为识别频率的波长, Z 为测量面和阵列面的间距, D 为阵列的直径。因此0.6 m的阵列通常较在1 000 Hz以上有好的识别能力。因此对于中低频特征采用声强阵列进行扫描,其识别能力取决于两个麦克风之间的间距,通常的识别能力在40 Hz~4 000 Hz范围内。

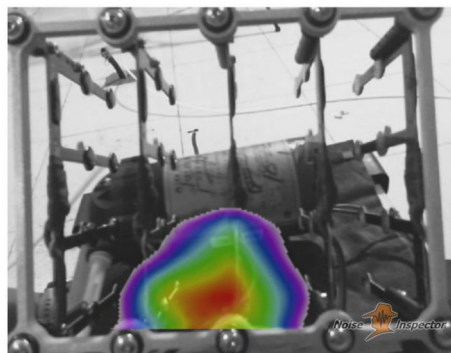


图7 400 Hz~900 Hz声源定位

通过近场的声强扫描,返现中低频声源位置在套筒的侧边接近底部,如图7所示。

对于中高频段3 000 Hz~3 400 Hz,采用反卷积优化(DAMAS)的波束成形和常规波束成形方法进行远场识别,结果如图8及图9所示,可以清晰地发现中低频和高频的声源位置都在金属套筒靠近泵头

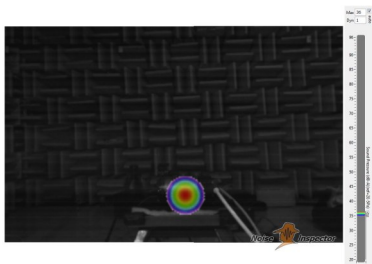


图8 3 000 Hz~3 400 Hz 声源定位(CBF)

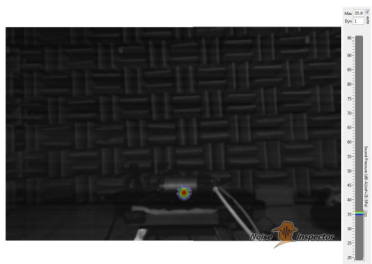


图9 3 000 Hz~3 400 Hz 声源定位(DAMAS)

的位置,并且发现 DAMAS 算法结果在聚焦精度上有了明显提高。结果表明,声源位于微型泵中部。通过这样快速的声学成像方法给降噪问题的解决提供了方向。

3 结构优化设计与降噪效果

为了进一步验证是套筒结构振动发声,下面分别从流场和结构方面去验证噪声源。

3.1 流动噪声分析及优化

流动噪声一般与直接的压水机构泵头有重要关系,为此,更换流场优化后的泵头来确认它们对流动噪声的影响,这里对于流场优化的细节就不做赘述。结果如表1所示。

表1 流场改进效果

序号	改进状态	声压级/dB
1	基准状态	44.9
2	流场改进1	44.1
3	流场改进2	45.5

流动优化后的降噪效果一般,变化量仅为0.8 dB左右。因此,可以认为现有条件下流动噪声对整体噪声的影响比较小,优化空间有限,或者可以认为流动噪声对总体噪声的贡献非常低。

3.2 结构振动噪声分析及优化

微型泵由3个部件构成:电机、泵头和套筒组成,相比电机和泵头,金属套筒和底座这种薄壁结构振动更容易引起噪声。前面的声压级测试和声源识别基本确定是薄壁结构套筒和安装底座发声,套筒振动是由泵头撞击和电机旋转振动传递而来,这里

再次对此验证。采用加速度传感器采集泵体的振动信号,测点布置如图10所示。

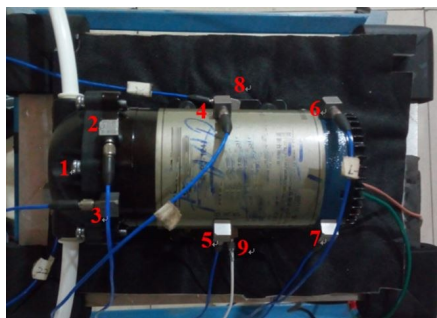


图10 振动测点布置图

在明确了噪声产生的位置后,通过减小结构振动即可抑制表面辐射噪声,通常有两种方式:降低振动传递、增大结构阻抗或阻尼,微型泵振动是400 Hz~900 Hz为主,而阻尼或吸声材料在此频率隔声或吸声效果较低,因此,考虑其他降噪途径。增大结构的阻抗特性具体措施有:加厚壳体/安装底座、加强筋或改变材料。

表2 各测点振动加速度量级

序号	位置	振动加速度 $\times 10^{-3}/$ (g rms)	振动速度/ (mm \cdot s $^{-1}$ rms)
1	泵顶头	219	0.420
2	泵顶盖-1	287	0.476
3	泵顶盖-2	302	0.466
4	套筒中部-1	229	0.462
5	套筒中部-2	244	0.476
6	泵底盖-1	495	0.936
7	泵底盖-2	451	0.856
8	安装底座-1	264	0.495
9	安装底座-2	239	0.426

减小对外壳的振动激励就要对壳体的振动传递路径进行分析,由表2可知,振动大小关系是:泵底盖>泵顶盖>套筒中部,振动传递过程中是逐渐衰减的。因此,振动传递能量是主传递路径是:电机→轴→底盖→套筒,次传递路径是:电机→轴→顶盖→套筒。对各点的频率成分进行分析,发现微型泵泵头及顶部,频率曲线较为平坦。其他点400 Hz~900 Hz、3 100 Hz频率成分较为明显,与噪声峰值频率吻合,近一步说明了振动主要是通过底部传递到外壳结构上,图11所示为泵体不同位置处振速的1/3倍频图,可以发现安装底座的位置上400 Hz~900 Hz的振速能量相对较大,而在高频即噪声明显的3 100 Hz处,套筒中部的振动明显较高,这和前一节声源识别出来的效果完全吻合。

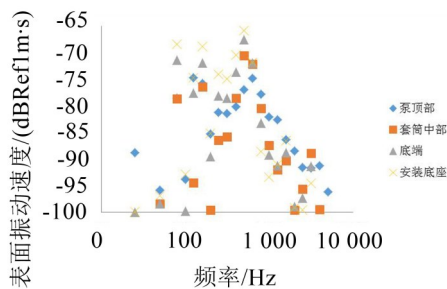


图 11 振速的1/3倍频图

3.3 改进验证

确认明显的声源之后,降噪方法分为2个方面:

1) 降低传递率

1 顶盖、底盖与套筒的连接是通过螺栓,尝试在顶盖与套筒的连接处加软密封垫圈,测试改变状态后的声压级改变不大,主要是因为之间通过螺栓连接,中间的垫圈处于压紧状态,另外螺栓本身也会传递振动,这种改进的效果不明显;

1 通过降低电机轴和顶盖的连接刚度,在导向轴和顶盖连接位置增加弹性橡胶,可以发现噪声得到明显的降低,降低约 1.5 dB。

2) 增大结构阻抗

通过增大套筒和安装底座的厚度,来降低其在 400 Hz~900 Hz 的声辐射能力,试验发现通过增厚约 10 % 的厚度,噪声降低了约 1.5 dB,通过锤击法发现,其在壳壁上的传递函数的确有 2 dB 左右的降低,如图 12 所示。

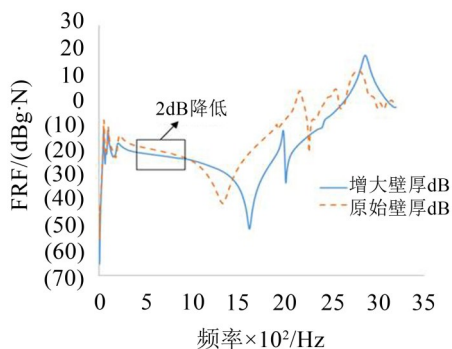


图 12 外壳传函频响函数曲线对比

经测原始状态、弹性连接增大壁厚的平均总声压级分别为 44.73 dB、43.24 dB、41.71 dB,由此可见,这两种减振方式能有效减小微型泵噪声,如图 13 所示。

3.4 降噪效果总结

(1) 微型泵声源是 400 Hz~900 Hz 为主是由泵头往复运动激励套筒产生,3 150 Hz 左右也有部分频率成分存在主要是电机噪声。微型泵的头尾 2 端

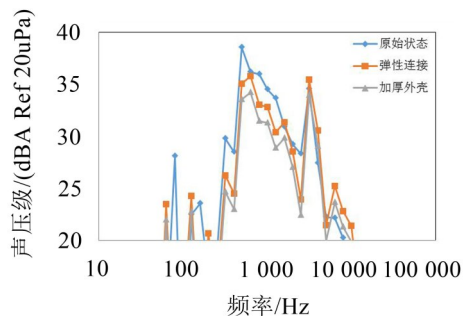


图 13 不同套筒厚度声压级对比

噪声最小,上下两个侧面噪声其次,水平两个侧面噪声最大,微型泵主要声源位于水平 2 个侧面的中部;

(2) 流动噪声对微型泵噪声总体量级贡献不大,主要噪声是由电机振动传递到套筒所引起的,振动传递能量是主传递路径是:电机→轴→底盖→套筒,次传递路径是:电机→轴→顶盖→套筒。由于套筒水平侧面方向上有定子的装配间隙,因此噪声源位于此处;

(3) 增大壳体的阻抗特性和通过弱化电机与顶盖和底盖的轴向连接刚度的方式来减小微型泵噪声的方法是有效的。对于 400 Hz~900 Hz 段噪声,后续可考虑的减振降噪优化方式有:加厚套筒或加强筋或改变套筒材料、电机轴两端用软垫片、顶盖或底盖用塑料;对于 3 150 Hz 频率噪声可以在微型泵侧面粘贴吸声材料。

4 结 语

将基于声阵列的测试方法应用于微型泵的降噪优化过程中,并对其声源识别、测试诊断和降噪方法过程进行了详细梳理,结果反映该流程可以有效快速地实现微型泵的降噪优化,并且该流程对于大多数的机械噪声问题有一定的通用性指导意义,可以遵循这样的方法流程来开展具体的试验方法进行减振降噪的工作。针对本次研究所使用的声学阵列的试验方法发现,在声源定位过程中,声强法可以弥补波束形成技术在低频段分辨率差的问题,结合波束形成技术可以实现机械噪声的全频段声源定位,高分辨率反卷积波束形成算法(DAMAS)可以非常明显的提高声源识别的精度,在微型机械声源定位中优势明显。使用基于声阵列的声源识别技术对于定位声源位置具有直观和快速的优点,从而指导技术人员更加高效地对进行降噪方案的确定,但是必须意识到声源识别结果仅仅是表面的声场分布对于声源的传递路径和真实源头还需要结合更多的试验数据进行分析。

(下转第 249 页)