

用测量振动来间接测量噪声的方法及应用

苏州太阳花感知技术有限公司

孙晓昶

摘要：本文给出一种用测量振动来间接测量噪声的方法，根据测量得到的振动数据，通过一定的算法合成噪声的统计结果。本文给出的是一种基于振动噪声的辐射特性的简化计算方法。

关键词：噪声；噪声检测；振动；VNT；测振法；噪声辐射系数；噪声振动关系；油泵检测；噪声振动间接测量；信号处理；测量

分类： TB52, TB533

1 引言

应用背景：对于产品噪声的测量，要求背景噪声比被测信号至少低 10dB，满足这个条件试验可以很简单地进行。在一些特定的应用场合（比如生产车间）做产品的噪声检测，由于背景噪声较大，会掩盖产品本身的噪声。如果测量目标噪声非常微弱，背景噪声比较强的情况下，测量泵或电机噪声时，环境的影响和目标噪声在一个量级或者比目标噪声还高，直接测量噪声比较困难。对于微弱噪声的测量，一般的思路是构建消声室。但建立消声室是需要雄厚的资金支持，并需要专业人员维护，成本是非常高的。生产线都配备消声设施，而产品在输送带上流动，密封、隔音并预留较大的隔音空间，是非常困难的。生产线上有很多产品需要检验是否噪声合格，传统的生产线消音箱能够合理工作的下限约在 60dB，对于 45dB 以下的噪声无能为力，生产线静音间的效果更差。但是新型汽车的电子水泵等零部件的上限噪声约在 35dB（BOSCH 实验室）^[3]。因此从根本上讲，生产线静音箱、静音间无法满足汽车集成商等噪声测量的试验室标准，并且成本也会较大。这时可以通过测量振动间接来测量噪声。采用测振法测试产品的噪声是在其他方法都无法简便、迅速、经济和准确地解决产品现场噪声检测的情况下很自然的选择。

研究现状：^{[4][5]}用测量振动的方法间接测量噪声，西德、美国等国家开展此项技术研究已有多多年了，德国 BBC 公司花费了十几亿马克研究振动法，并成功地将此项技术用于接触器的现场噪声检测上。美国经过多年的研究，已在海军 MIL 标准中规定用振动法测定微电机的噪声。国际 ISO 标准化组织已公布了测振法标准技术文件。

^[5]我国是在七十年代末期开始探讨测振法的。经过十多年的试验研究，明确了要得到振动法的实际应用，必须解决如下 6 个方面得到技术问题^[5]：

- (1) 必须获得各机电产品的实际辐射效率指数曲线。
- (2) 必须解决按声源尺寸变化的辐射效率指数曲线制成仪器的计权网络曲线。
- (3) 必须解决仪器的校准及分贝量的基准值。
- (4) 必须确定各机器表面振动的关键测点。
- (5) 必须解决空气动力噪声叠加及修正问题。
- (6) 对于生产线上的检测还必须解决简化测点很更多地细致工作要做。

最为关键的就是辐射效率指数曲线。对电机、电器、电冰箱进行大量试验研究，以求取这些产品的实际辐射效率指数，试验研究程序大致这样进行^[5]：

(1) 按不同尺寸结构选择系列的典型样机，如电机从 80 到 280 机座都有，冰箱几种容积结构都有。

(2) 在样机（电机、电冰箱、电器）的表面上确定有代表的振动区和相应的典型测点，如电机有 6~7 个点；电器有 4~5 个点；冰箱则是 29 个点，在每个测点上按 1/3 倍频程（有

33 个频段) 及 A 计权测定表面频带振动级及 A 计权振动级, 同时, 按国际和我国标准的消声室精密法标准测定各样机的 1/3 频带声功率级和 A 计权声功率级, 一般称此为消声室的声压级测定方法。

(3) 将表面振动测定结果与消声室内远场声压级方法测得的结果进行统计分析(按 1/3 倍频带及 A 计权) 以求取各种产品的实际辐射效率曲线。

计算方法简介: 廖文彬等在参考资料[2]中对于用测量振动来间接测量噪声的方法已经给予数学解释: 把泵理想化为一个脉动球, 由振动速度为参量表示的声强级为:

$$L_I = 20\lg \frac{V}{V_0} + 10\lg \frac{\rho c}{\rho_0 c_0} - 20\lg [Kr_0 \eta_m(Kr_0)] \quad (1)$$

其中, V 脉动球表面的振动速度,

V_0 脉动球表面的振动速度基准值,

K 波数

r_0 球源尺寸

ρc 声阻抗

$\rho_0 c_0$ 声阻抗基准值

$\eta_m(Kr_0)$ 反映辐射效率的 Hankel 函数

对一个脉动球所辐射的声波的声强, 除与运动速度有关外, 还是声强、声源尺寸的函数, 也与脉动球的振动形式 m 有关, 这些关系都归纳到 Hankel 函数中, 这一项正反映了振动声的辐射效率问题。

理论计算的辐射球声功率:

$$L_w = L_I + 10\lg \frac{S}{S_0} = 20\lg \frac{V}{V_0} + 10\lg \frac{\rho c}{\rho_0 c_0} - 20\lg [Kr_0 \eta_m(Kr_0)] + 10\lg \frac{S}{S_0} \quad (2)$$

其中, S 是测试包络面的面积, $S_0 = 1m^2$.

声压法测试得到的声功率:

$$L_w = L_p + 10\lg \frac{S}{S_0} \quad (3)$$

其中, L_p 是测试得到的声压级。

因此,

$$L_p - L_v = 10\lg \frac{\rho c}{\rho_0 c_0} - 20\lg [Kr_0 \eta_m(Kr_0)] \quad (4)$$

其中, $L_v = 20\lg \frac{V}{V_0} = 20\lg \frac{\int Adt}{V_0}$, A 是振动的加速度值。

至此可以看出, L_p 、 L_v 可以看成由振动和噪声中的各种频率成分组成, $20\lg[Kr_0\eta_m(Kr_0)]$ 在泵的外形和尺寸及工况确定后, 试验是在同一传播媒质中进行的, 波数和频率有确定的线性关系。因此方程 (4) 可以在频域展开, 在足够窄的每个频率段上, 方程 (4) 都是成立的。

我们的算法中, 命名 $L\xi_i (i = 0, \dots, N-1)$ 为振动噪声辐射级系数级, ξ_i 为振动噪声辐射系数, 也称为辐射系数, 或振动噪声系数, 其单位是 $P_a / (m/s^2)$

$$L\xi_i = -L_p(f_i) - \frac{1}{2\pi f_i} L_A(f_i) = -10\lg \frac{\rho c}{\rho_0 c_0} \times \delta(0) + 20\lg \left[\frac{f_i}{C} r_0 \eta_m \left(\frac{f_i}{C} r_0 \right) \right] \quad (5)$$

频率的分段, 一般采取 1/3 倍频程。我们发现对于油泵, 在谐波的峰值段附近划为计算输入段, 可以有效拟制背景噪声的干扰。

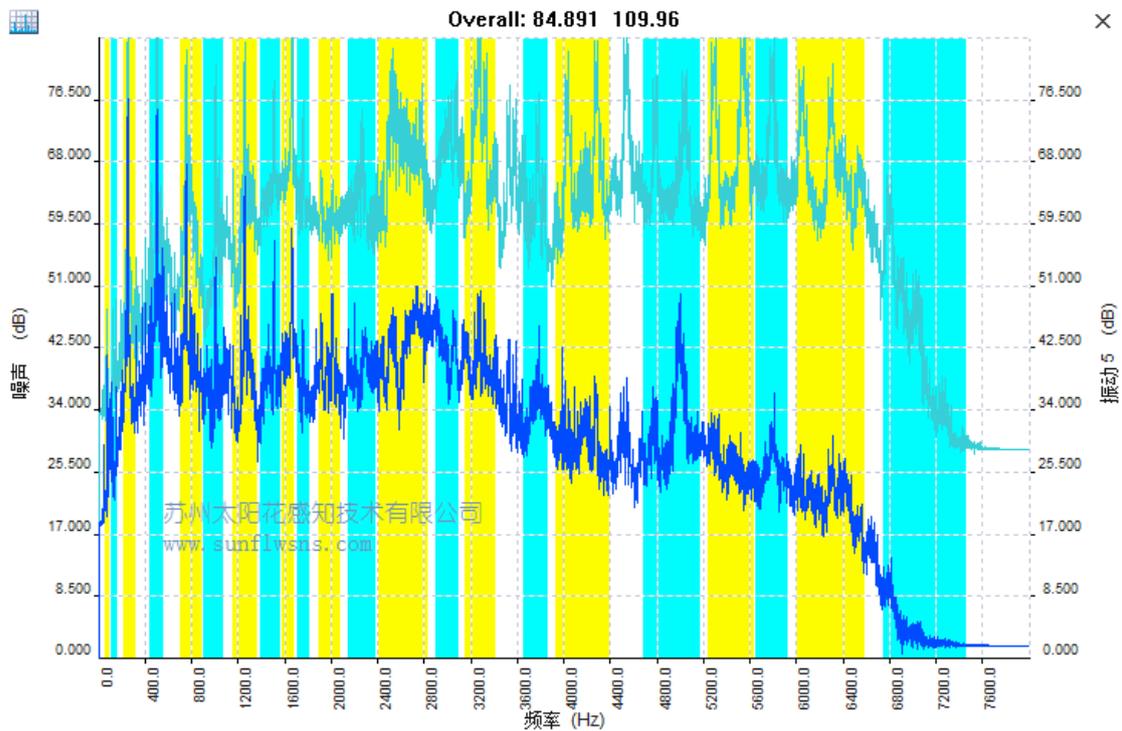


图 1 频域计算段落划分

(谐波的峰值段附近划为计算输入段, 可以有效拟制背景噪声的干扰)

2 计算方法的工程实现

我们的试验直接利用车间现场测试的数据, 振动只测试 1 个点, 另外布置一个加速度传

传感器在夹具上监视台架的振动。试验是在油泵的 1500RPM 稳速工况下的测试结果。变速工况下的试验有待进一步完成。具体的传感器位置：

(1) 噪声 1 个通道，传声器固定在距离泵体 500mm 处，用吊线布置于测试泵的正前方指向正对泵体。目的是为了记录泵体运行时的整体噪声。

(2) 微型加速度传感器 PCB353B16，用磁铁吸附在泵体的工作部位，泵体的进油腔末端，目的是测试泵体的振动。是利用振动信号来测量噪声，这个设置的好处是受到周围环境噪声的影响较小，是最为有利的测量位置。后面的分析数据一般选取这个位置振动数据。

(3) 加速度传感器 CTC117 用磁座吸附于夹具 (Fixture) 上，目的是测量台架的振动信号作为参考，用于和传声器信号和泵体噪声的试验比对。

信号采集：采集器硬件选用本公司生产的 TYH801 (最大采样率 128kHz，分析最大分析频率范围 2-50kHz，102dB 动态范围；测量声压级范围 25-136dB，精度 $\pm 3\%$ (20-20kHz)。振动测试范围不小于 $\pm 500\text{m/s}^2$ ，精度 $\pm 3\%$ (4-20kHz))。软件为本公司 TYH801 生产线噪声振动检测软件。

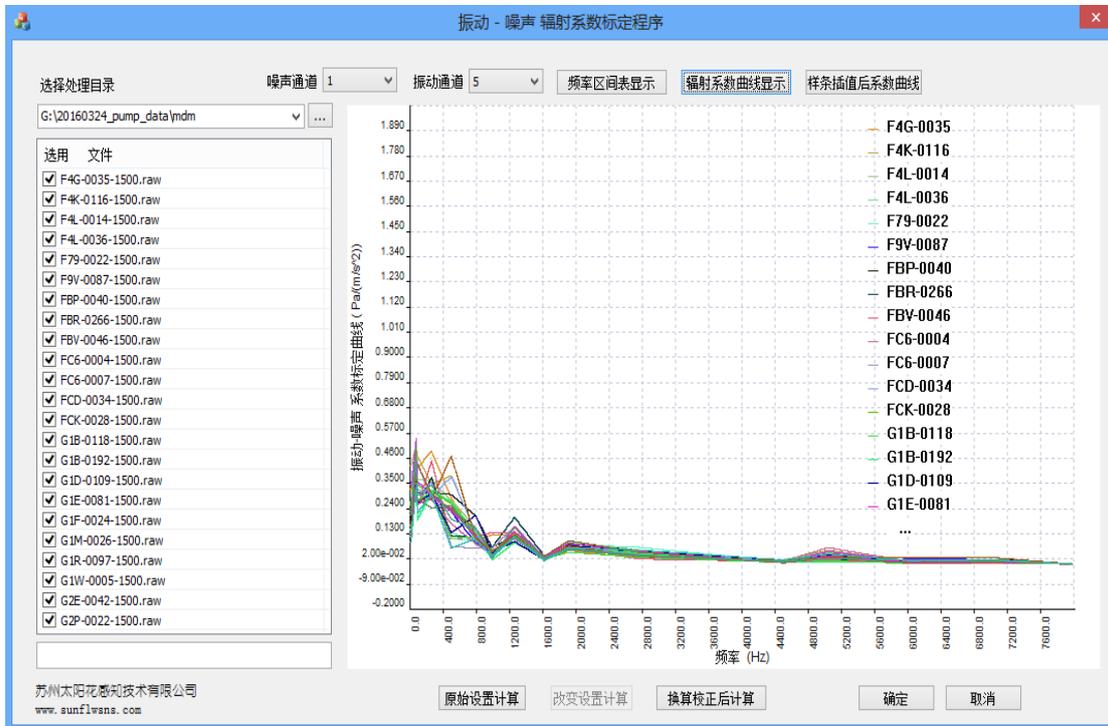


图 2 振动噪声系数计算程序

我们将本为的计算方法，另外写一个程序 (如上图)，可以手工选择频率区间、计算振动噪声系数，并生成可以被控制台的工作软件加载振动噪声数文件。生产线控制台从此只需要测试振动，就可以给出噪声的统计值和频谱。

辐射效率曲线的标定：同时测量振动和噪声信号，变换到频域，在频域用信号处理的方法找到振动噪声系数 (实际辐射效率曲线)，是一个系数组合，写入文件。这个过程我们有专门的软件，可以在消声室进行，只要标定一次即可。利用得到振动噪声系数，以后进行产品噪声检测，加载辐射效率曲线的标定文件，只要测量振动，就可以给出噪声统计值和噪声的频谱。

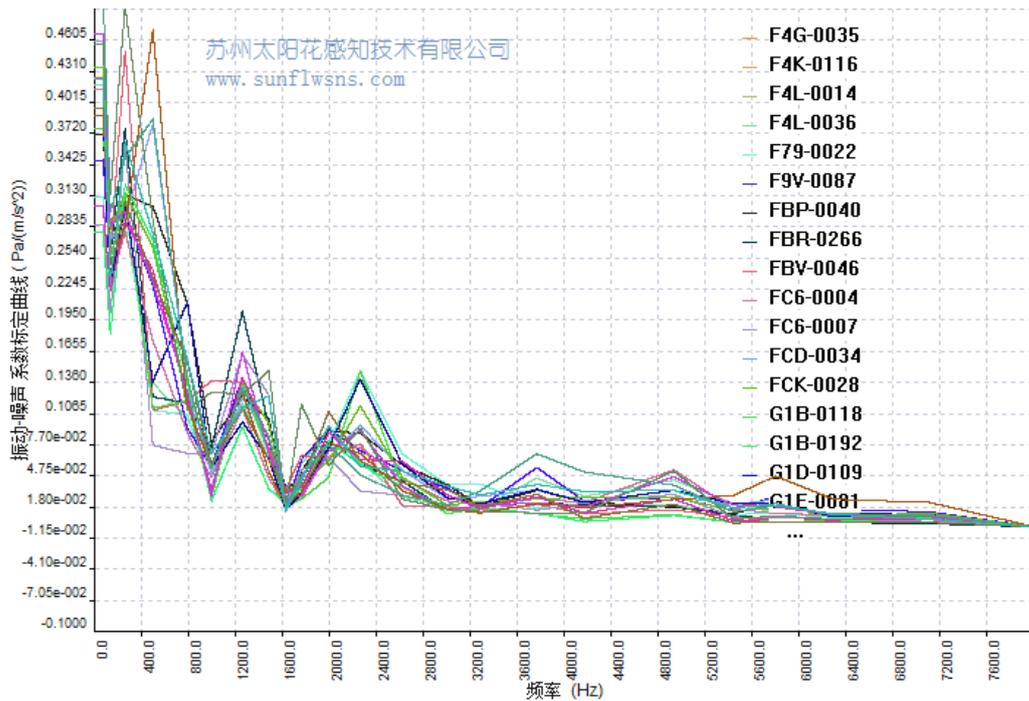


图 3 多个泵振动噪声系数标定结果

(连续多次测试的频率标定系数，可以看到一致性很好。只有 20Hz 以下部分，由于仪器精度限制，不准确，但是噪声综合经过 A 计权后，这部分衰减很大，因此并不影响测试结论)

多次试验验证结果还证明，振动法的测试精度是可以保证的，而且还相当高。利用测到的振动噪声系数，我们举一个例子，把计算出来的噪声频谱和测量的到噪声频谱进行比对，给用户一个直观的印象：

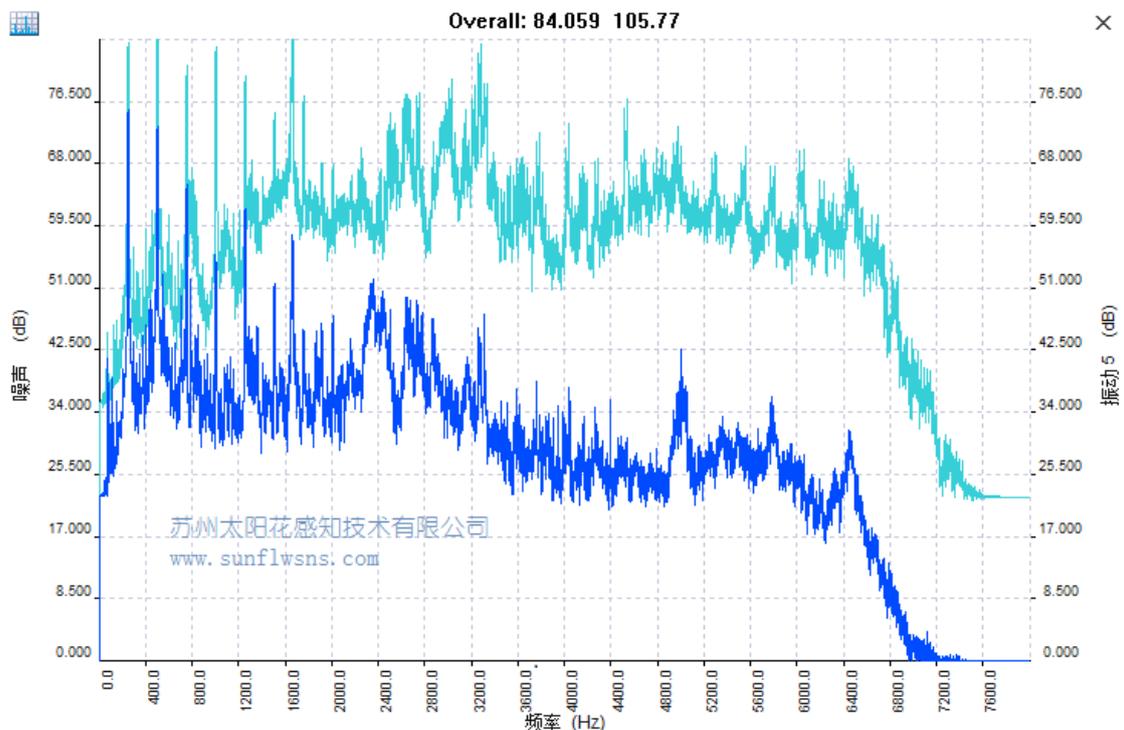


图 4 振动和噪声实测信号的频谱

(可以看出，振动和噪声的频谱相差是比较大的，仅仅在频率低端有一定的相似，频率中段和相差较大，总的统计值相差很大)

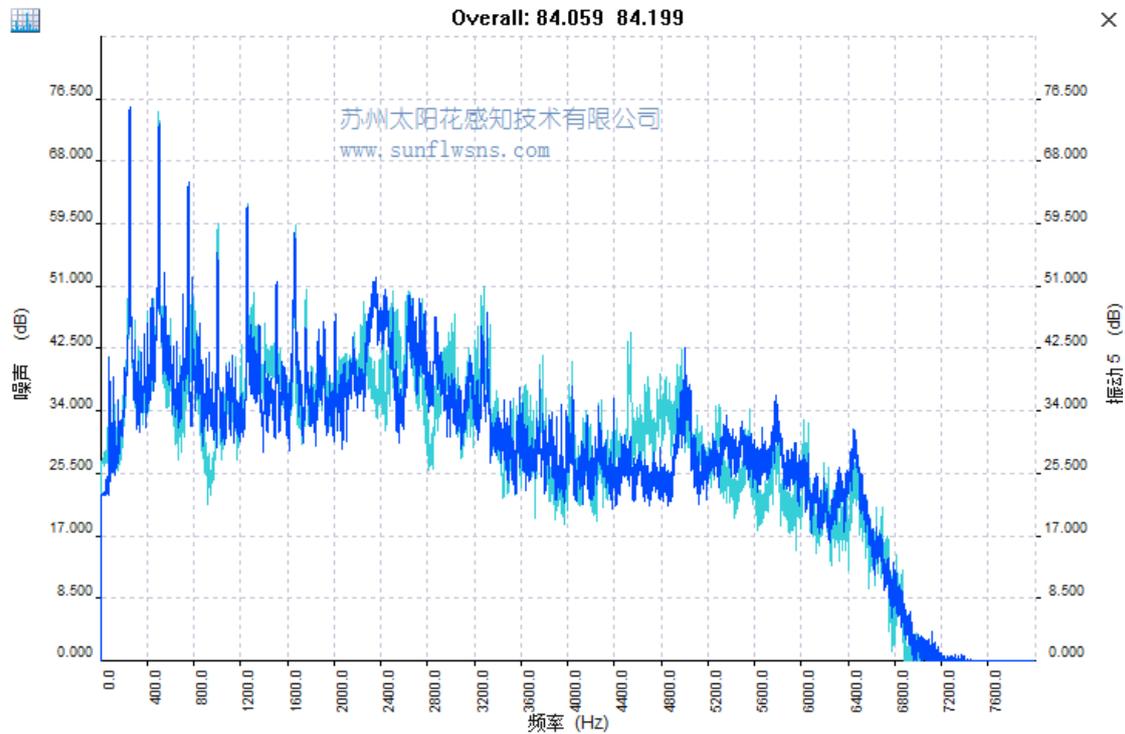


图 5 计算的振动频谱与噪声实测频谱的比较

(可以看出，计算的到振动频谱和噪声实测的频谱一致性很高，总的统计值也相差很小)

3 结论和应用

^[5]声音是机械振动的结果，当物体出现声频范围内的机械振动时，就会使周围介质也发生相应振动，从而以声波的形式向外辐射声音。声波的辐射实质上就是机械振动波能量传递的过程。很多人都认为振动测量可以直接代替噪声的测量。

但是经过试验，发现振动和噪声确实有很大的不同，其频谱大不相同。振动测量必须经过辐射系数修正才可以代替噪声测量。

修正后测试精度，参考资料[1]的认为具有较高的精度，已经应用于生产测试；参考资料[2]的试验方法精度是 $\pm 2\text{dB}$ ，同时认为声和振之间存在非常强的相关关系，并且和受温度影响不大；参考资料[4]的试验方法精度为 $\pm 1\text{dB}$ ，极差情况为 $\pm 2\text{dB}$ 。

本文的方法，物理意义明确，计算简单快捷。目前试验结果，这种方法的对于等效声压级的误差绝大多数在 $\pm 2\text{dB}$ 以内，极差情况为 $\pm 4\text{dB}$ 。受温度影响和变速工况下的试验有待于下一步进行。

用振动估计出的频谱和统计量，可以直接代替噪声的频谱和统计量，应用于生产线上产品的噪声检测（图 6）。

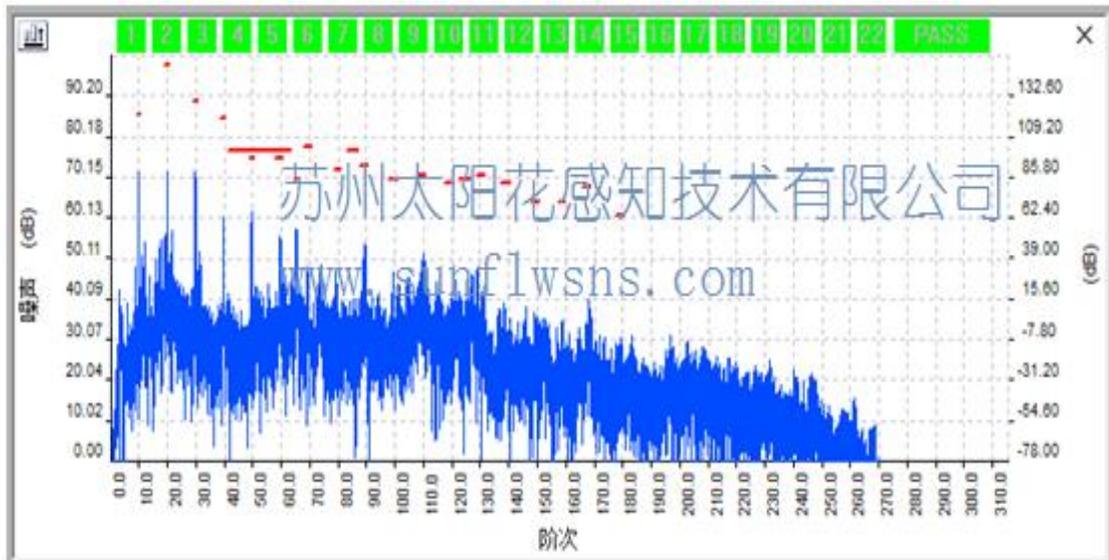


图 6 利用振动估计的噪声频谱应用于测试台的频域模板法检测

(实时计算振动信号的频谱，代替噪声信号频谱，整个频率范围分段，分段设置阈值，共 22 个识别段，每段 1 个阈值，对应 1 个指示灯。任何 1 个频率段的噪声或振动值超出阈值，对应的指示灯由绿变红，说明产品有噪声和振动问题，拒绝通过；指示灯绿色，表示产品检测通过。)

参考资料

- 1 VTN 振动噪声检测仪在电机噪声检测中的应用，马久旭，王传军，《中小型电机》2001，28(2) p53-55
- 2 振动法在压缩机噪声测量和研究中的应用，廖文彬，乔五之，杨伟成，《北京轻工业学院学报》1997，15(2) p19-22
- 3 BOSCH 汽车新型电子泵噪声测试标准
- 4 用测振法检验冰箱噪声的研究，顾金富，《噪声与振动控制》1984，8(4), p45-48
- 5 机械设备噪声测量的新方法-振动测试法
- 6 TYH801 机油泵噪声振动在线检测系统简介，孙晓昶，苏州太阳花感知技术公司
- 7 声压法测量汽车转向泵的声功率，孙晓昶，苏州太阳花感知技术公司
- 8 国家标准 GB10068-2008《轴中心高为 56mm 及以上电机的机械振动的测量、评定及限值》
- 9 国家标准 GB10068.1-88 旋转电机的振动测量方法
- 10 JB/T8680-98 的附录 A 机器设备噪声测试的新方法--振动法测噪声
- 11 Model 353B16 High frequency, quartz shear ICP® accel.

- 12 《GB/T8098—1999 泵的噪声测量与评价方法》
- 13 《GB/T1496-79 机动车噪声测量方法》
- 14 ISO3744:2010 Acoustics - Determination of sound power levels and sound energy levels of noise sources using sound pressure - Engineering methods for an essentially free field over a reflecting plane
- 15 ISO3745:2003 Acoustics - Determination of sound power levels of noise sources using sound pressure - Precision methods for anechoic and hemi-anechoic room
- 16 ISO3747:2011 Acoustics - Determination of sound power levels and sound energy levels of noise sources using sound pressure - Engineering/survey methods for use in situ in a reverberant environment
- 17 GB/T 6881.1-2002 声学 声压法测定噪声源声功率级混响室精密法
- 18 GB/T 6881.3-2002 声学 声压法测定噪声源声功率级混响场中小型可移动声源工程法第2部分：专用混响测试室法
- 19 GB/T 3767:1996 声学 声压法测定噪声源声功率级 反射面上方近似自由场的工程法
- 20 GB/T3768:1996 声学反射面上方采用包络测量表面的简易法
- 21 《乘用车普通动力转向油泵试验规范 Q/SQR.04.272—2006》 奇瑞汽车有限公司企业标准

附录

应用户的要求，这里给出试验所用振动传感器的资料：

PCB 353B16 微型宽带加速度传感器： ICP供电；灵敏度：10 mV/g 频率范围：0.7 ~ 20,000 Hz (+/- 10%)，重量 1.5克 使用温度 -54 to +121 ° C 安装：5-40 螺栓，电接头：5-44插孔（顶上）。

这个振动传感器的特点一是带宽大，覆盖整个声音的频域，所以可以用来处理后得到声音信号。特点二是非常轻，只有1.5克，放在电机或泵体上不会影响其本身的振动。



图 7 微型宽频带振动传感器