

DOI: 10.11830/ISSN.1000-5013.201903038



# 交流接触器振动噪声测量方法 及系统开发

陈首虹, 杨建红, 范伟, 高丽华, 杨凯, 张认成

(华侨大学 机电装备过程监测及系统优化福建省高校重点实验室, 福建 厦门 361021)

**摘要:** 为了实现强背景噪声环境下交流接触器的噪声测量, 开发基于振速法的噪声测量系统. 首先, 在消声室内, 通过激光测振仪和传声器分别采集大量相同型号的交流接触器的振动信号和声压信号, 计算并提取辐射指数. 然后, 测量一定数量相同型号的交流接触器运行时的表面振动, 通过振速法, 求得其噪声值. 最后, 将求得的噪声值与声级计的测量值进行对比. 结果表明: 当交流接触器的噪声为 30~50 dB 时, 两种方法的测量误差为  $\pm 1$  dB; 该测量系统能够通过振动强弱求得噪声值, 并准确判定合格与否, 不受背景噪声的影响.

**关键词:** 交流接触器; 振速法; 振动; 噪声; 辐射指数

中图分类号: TM 572.2

文献标志码: A

文章编号: 1000-5013(2019)04-0429-08

## Vibration and Noise Measurement Method of AC Contactor and System Development

CHEN Shouhong, YANG Jianhong, FAN Wei,  
GAO Lihua, YANG Kai, ZHANG Rencheng

(Key Laboratory of Process Monitoring and System Optimization for Mechanical and Electrical Equipment  
of Fujian Province, Huaqiao University, Xiamen 361021, China)

**Abstract:** In order to realize the noise measurement of AC contactor under strong background noise, a noise measurement system based on vibration velocity method was developed. First, the vibration signals and sound pressure signals of a large number of AC contactors with the same type were collected respectively by laser vibrometer and microphone in the anechoic chamber, and the radiation index was calculated and extracted. Then, the surface vibration of a certain number of AC contactors with the same type was measured, and the noise value was obtained by using the vibration velocity method. Finally, the obtained noise was compared with the measured value of sound level meter. The experimental results showed that when the noise of the AC contactor was between 30 and 50 dB, the measurement error of the two methods was within  $\pm 1$  dB. The system can obtain the noise value through vibration strength, and accurately determine whether the AC contactor was qualified or not, which not affected by background noise.

**Keywords:** AC contactor; vibration velocity method; vibration; noise; sound radiation index

交流接触器是一种常见的机械开关电器, 在低压配电系统中被广泛应用<sup>[1-5]</sup>. 交流接触器的电磁机构线圈由交流电源供给, 由于电磁铁的电压是随时间按正弦规律变化的周期函数, 所以其磁通和电磁吸

收稿日期: 2019-03-18

通信作者: 杨建红(1974-), 男, 副教授, 博士, 博士后, 主要从事先进传感与检测技术的研究. E-mail: yjhong@hqu.edu.cn.

基金项目: 福建省自然科学基金资助项目(2017J01108, 2018J05082); 福建省高校产学研合作项目(2016H6014); 福建省泉州市科技计划项目(2018C117R); 华侨大学科研基金资助项目(19BS103)

力的大小也按正弦规律周期变化. 交流接触器的振动噪声主要有电磁性噪声、机械噪声和 高频噪声<sup>[6-7]</sup>. 根据 JB/T 7435—2006《CJX 系列交流接触器》<sup>[8]</sup> 的规定,接触器在控制电源电压为额定电压的 85%~110% 时,在距离声源 0.5 m 处,其测量噪声应在 40 dB(A) 以下. 长期以来,由于生产车间背景噪声的影响,在生产线上,很难直接使用声级计测量交流接触器的噪声,工厂常用的办法是抽检部分产品在消声室中进行测量,或在生产线上凭借有经验的工人手摸振动、耳听声音进行判断,但这两种方法都无法同时保证检测质量和效率<sup>[9-11]</sup>. 振速法通过测量工件表面的振动,间接获得工件表面的辐射声能大小,因此,可有效消除背景噪声过大的影响,从而对交流接触器运行噪声进行高效、高质的检测<sup>[12-18]</sup>. 激光测振法将激光打在被测工件表面,直接获得位移或速度,通过测量结构振动,理解声学现象,是一种非接触式测量法,具有适用性强、效率高、精度高、不易受干扰等特点. 目前,激光测振技术已得到较大的发展,可以方便地在空间分辨率较高的结构上进行振动测量,已成功应用于汽车<sup>[19]</sup>、航空航天<sup>[20]</sup>、机械设计<sup>[21]</sup> 和建筑<sup>[22]</sup> 等领域. 基于此,本文采用激光测振法,对交流接触器生产线上的噪声进行检测<sup>[10]</sup>.

1 振动噪声测量系统的硬件搭建

交流接触器振动噪声测量系统的设备型号及主要技术参数,如表 1 所示. 交流接触器振动噪声测量系统的总体结构,如图 1(a)所示.

表 1 设备型号及主要技术参数  
Tab. 1 Equipment model and main technical parameters

名称	型号	技术参数
激光测振仪	LV110D	速度: $-2.4 \sim 2.4 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ; 测量距离: $0.4 \sim 20.0 \text{ m}$ ; 频率: $2.0 \sim 4.0 \times 10^4 \text{ Hz}$
数据采集卡	NI USB-6363	32 个单端或 16 个差分输入
传声器	AWA 14400	灵敏度: $45.18 \text{ mV} \cdot \text{Pa}^{-1}$
声级计	AWA 5636	灵敏度: $30.00 \text{ mV} \cdot \text{Pa}^{-1}$ ; 测量范围: $30 \sim 130 \text{ dB(A)}$ , 频率: $20.0 \sim 12.5 \times 10^3 \text{ Hz}$

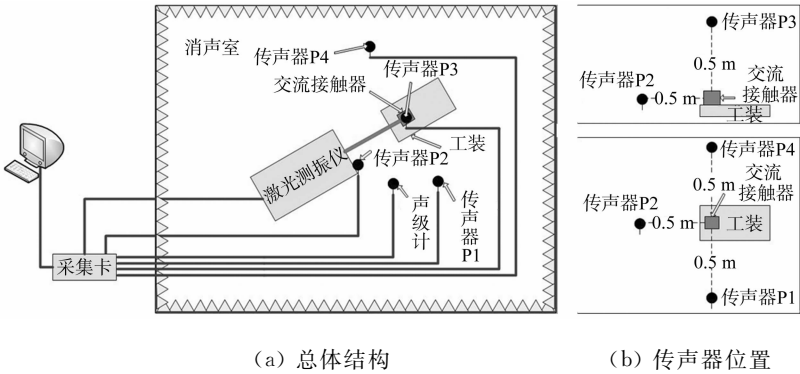


图 1 交流接触器振动噪声测量系统结构图

Fig. 1 Structure diagram of vibration and noise measurement system of AC contactor

实验在消声室内进行,待检测的交流接触器被固定于自制的工装上.通过控制工装气缸的气路开关开闭,可方便地实现交流接触器的夹紧与松开.工装上设计有电源触头,当夹紧时,触头能给交流接触器的线圈供电.线圈的电源由 1 个调压器供应,可实现 0~300 V 的调整.

激光测振仪通过工装上的孔,将激光打在交流接触器的铁芯表面,可测得交流接触器工作时的振动信号.参照 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》<sup>[23]</sup> 布置传声器,采用平行六面体测量表面.

经多次实验可知,由于交流接触器声源为稳态噪声,且辐射呈对称性,若将传声器减少为 4 个后,测得的表面声压与标准规定位置的测量结果的偏差不超过 0.6 dB.因此,采用 4 点法进行实验.传声器(P1~P4)的位置,如图 1(b)所示<sup>[23-24]</sup>.声级计置于距声源 0.5 m 处,测量交流接触器工作的噪声,以验证振速法测量结果的准确性.信号通过 NI USB-6363 型多通道数据采集卡完成模数(A/D)转换,转换后的数字信号经 USB 总线传输至计算机,用软件 LabVIEW 完成数据采集、采样波形实时显示、采集数据存储和数据的分析处理.

## 2 测量系统计算方法及软件开发

### 2.1 振速法测定声功率级

振速法通过测量表面振动确定其所辐射的声功率，可消除背景噪声对声压法和声强法的影响，实现交流接触运行噪声的现场测定。

声功率级  $L_w$  表示单位时间内辐射声波的平均能量，有

$$L_w = 10 \lg \frac{W}{W_0}. \tag{1}$$

式(1)中： $W$  为机器振动面辐射的声功率； $W_0$  为基准声功率，其值为  $10 \sim 12 \text{ W}$ 。

辐射因数  $\sigma$  表示声辐射效率的因数，有

$$\sigma = \frac{W}{\rho c S v^2}. \tag{2}$$

式(2)中： $\rho$  为空气密度； $c$  为空气声速； $\rho c$  为空气声阻抗； $S$  为振动表面面积； $v$  为通过激光测振仪测量交流接触器表面振动速度的有效值。

振速级  $L_v$  为

$$L_v = 10 \lg \frac{v^2}{v_0^2}. \tag{3}$$

式(3)中： $v_0$  为基准速度， $v_0 = 5 \times 10^{-8} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。

因此，远场的声功率级可表示为

$$L_w = L_v + 10 \lg \frac{S}{S_0} + 10 \lg \sigma + 10 \lg \frac{\rho c}{(\rho c)_0}. \tag{4}$$

式(4)中： $S_0$  为参考面积， $S_0 = 1 \text{ m}^2$ ； $(\rho c)_0$  为空气在温度为  $20 \text{ }^\circ\text{C}$ ，气压为  $105 \text{ Pa}$  时的阻抗； $10 \lg \sigma$  为物体表面振动向远场辐射的声能量的辐射指数。

辐射指数与相关频率声波在空气中的波长、激励力、辐射面尺寸、相应频率振动模态、机器结构特性等因素有关。因此，各种类型机器的辐射指数曲线没有固定的形状，但相同类型、相同型号的交流接触器的辐射指数曲线却具有规律性<sup>[8,25]</sup>，可以通过测定一定数量相同型号的交流接触器获得其辐射指数的规律曲线。

噪声与振动之间具有相关性，由式(4)可知，辐射指数可描述噪声和振动之间的关系，只要获得辐射指数和表面振速级，即可求得声功率级。

研究表明，不论噪声强度大小如何，A 计权网络都能较好地反映人对噪声吵闹的主观感觉。根据 A 计权的响应特性，将 1 个噪声的 1/3 倍频程谱转换为 A 计权声功率级的公式<sup>[25]</sup>为

$$L_{w_A} = 10 \lg \sum_{n=1}^{i=0} 10^{0.1(L_{w_i} + \Delta L_{w_i})}. \tag{5}$$

式(5)中： $L_{w_A}$  为 A 计权声功率级； $L_{w_i}$  为第  $i$  个频带声功率级； $\Delta L_{w_i}$  为第  $i$  个 A 计权修正值。

### 2.2 计算流程

交流接触器运行噪声检测系统的流程主要分为辐射指数提取、噪声检测和噪声验证 3 个部分，如图 2 所示。

1) 辐射指数提取。选取一定数量相同型号的交流接触器作为实验样本，提取其辐射指数。通过激光测振仪和传声器，分别获得交流接触器的表面振动信号和声压信号。通过快速傅里叶变换(FFT)，求得振动速度和声压频域信号，再用 1/3 倍频程滤波器对信号进行滤波，分别获得中心频率为  $20 \sim 16\,000 \text{ Hz}$  的 30 个频带的频谱信号。通过傅里叶逆变换(IFTT)，得到振动信号和声压信号的实数序列，振动信号的实数序列经过均方根计算，得到各频带振速级，由声压信号的实数序列可得各频带声压级，即

$$L_P = 10 \lg \left( \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{i=0} 10^{0.1 L_{P_i}} \right). \tag{6}$$

式(6)中： $L_{P_i}$  为第  $i$  个测点的频带声压级； $n$  为总测点数。

然后，将声压级转换成声功率级，即

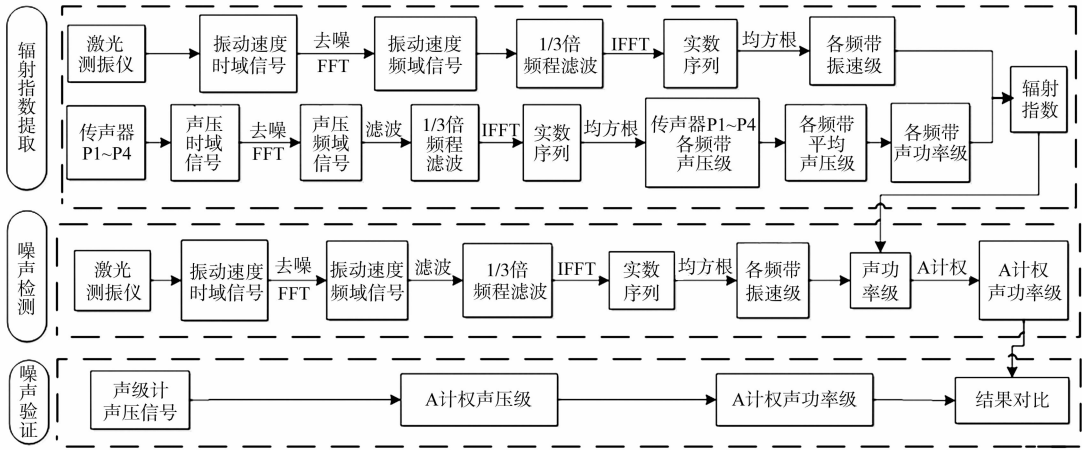


图 2 交流接触器振动噪声测量系统流程图

Fig. 2 Flow chart of vibration and noise measurement system of AC contactor

$$L_w = L_p + 10 \lg S. \tag{7}$$

最后,计算各频带的振速级和声功率级,获得交流接触器的辐射指数.

2) 噪声检测. 另选一定数量相同型号的交流接触器作为验证样本,通过激光振速法,实现交流接触器运行噪声的非接触测量. 通过噪声检测流程,获得振速级,再与获得的辐射指数求得声功率级,并计算得到 A 计权声功率级.

3) 噪声验证. 在消声室内,用声级计直接测量交流接触器工作时的 A 计权声压级,变换获得 A 计权声功率级,对比振速法和声级计的 A 计权声功率级,验证测量结果的准确性.

2.3 测量系统软件开发

测量系统的软件开发主要包括辐射指数提取、振动噪声检测和振动噪声验证 3 个模块.

辐射指数提取模块采集、存储激光测振仪和各传声器的时域信号,并通过采集卡传输至计算机,其数据通信方式基于 NI DAQ 驱动软件设计. 最后,通过软件 MATLAB,计算、提取数据的辐射指数.

振动噪声检测模块采集振动的时域信号,对振动信号进行分析并显示结果,如图 3 所示. 分析模块的子模块采用 MATLAB-LABVIEW 混合编程实现,如图 4 所示. 测量系统人机界面,如图 5 所示.

振动噪声验证模块通过声级计采集交流接触器的运行噪声,并与振速法测得的噪声进行对比,验证其准确性.

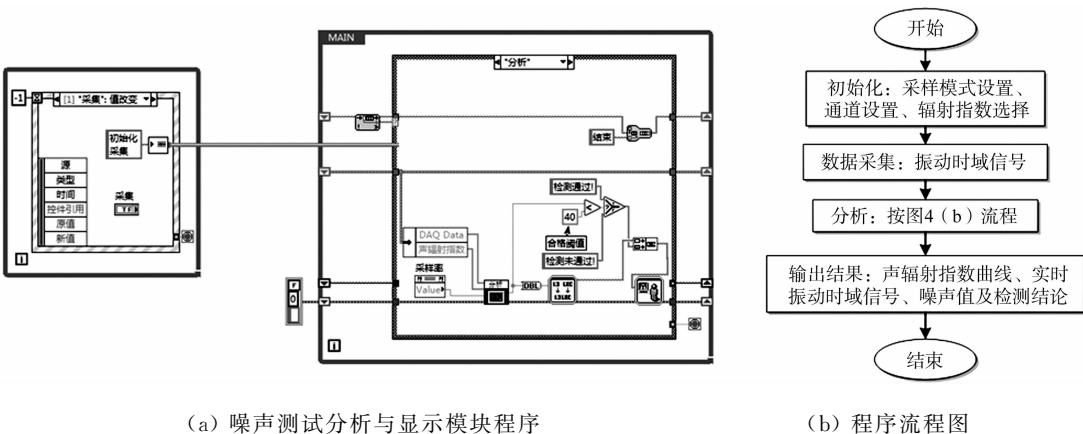


图 3 噪声测试分析与显示模块程序及流程图

Fig. 3 Program and flow chart of noise test analysis and display module

振动噪声测量系统,如图 6 所示. 激光测振仪、测试工装和声级计的位置参照图 1(a)布置,传声器的位置参照图 1(b)布置.

测量时,在工装上安装交流接触器,通气、夹紧、上电,将激光测振仪聚焦到待测表面,关闭消声室,测量噪声.

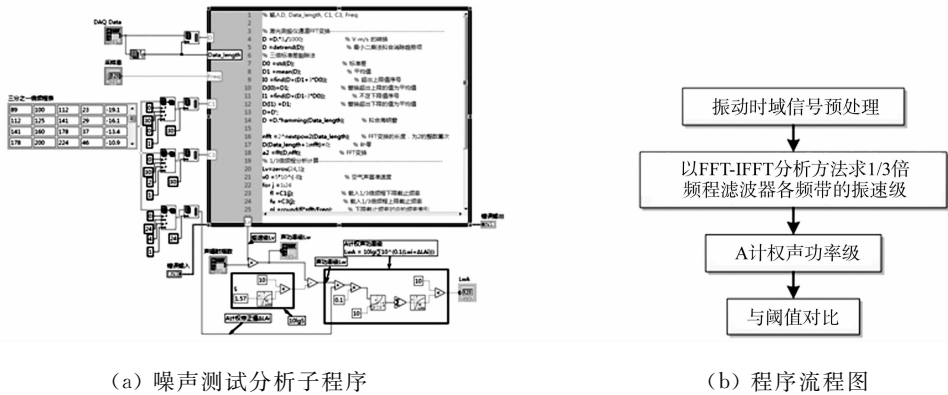


图 4 噪声测试分析子程序及流程图  
Fig. 4 Program and flow chart of noise test analysis subroutine

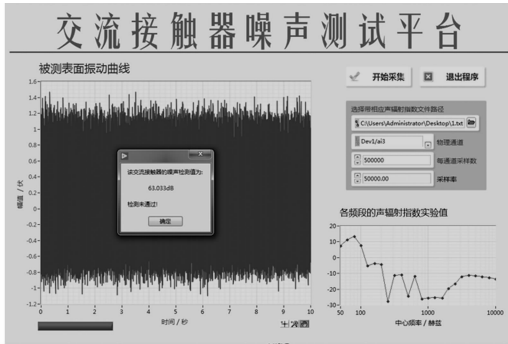


图 5 测量系统人机界面

Fig. 5 Man-machine interface of measurement system

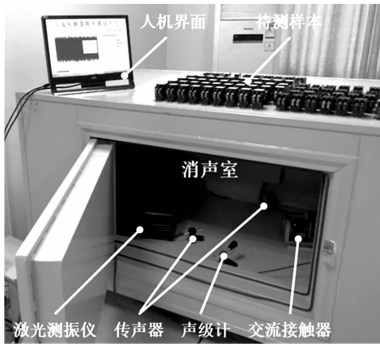


图 6 振动噪声测量系统

Fig. 6 Vibration and noise measurement system

### 3 实验结果及分析

#### 3.1 辐射指数提取

选取 100 个相同型号的交流接触器作为实验样本, 其中, 合格样本 35 个, 不合格样本 65 个. JB/T 7435—2006《CJX 系列交流接触器》<sup>[8]</sup> 中规定, 接触器噪声合格的阈值为 40 dB, 为了确定交流接触器运行时表面振动与噪声的相关性, 选取声级计测量值分别为 51 dB(不合格)和 25 dB(合格)的两个样本, 用激光测振仪测量其运行时的表面振动.

相同型号样本的时域图和频域图, 如图 7 所示. 图 7 中:  $U$  为电压幅值;  $f$  为频率. 由图 7 可知: 交流接触器的原始信号是典型的振动信号, 其振动具有一定的周期性; 合格与不合格样本的交流接触器振动信号都具有一定的规律性, 无杂乱的脉冲信号.

对交流接触器的内部结构及运行原理进行分析可知, 交流接触器运行噪声主要是由电磁激振力引起的交流接触器内部衔铁和铁芯硅钢片的周期性振动的电磁性噪声. 市电的频率为 50 Hz, 在每个周期电压下, 衔铁和铁芯吸合释放各 2 次, 当衔铁和铁芯周期性地吸合、释放, 引起交流接触器周期性地振动. 电磁性噪声的频率与磁场的变化频率相对应, 交流接触器在工频的激励下, 每个工频, 交流接触器衔铁与铁芯吸合释放 100 次, 而由这 100 次振动引起的谐振使交流接触器在 100 Hz 的整数倍处出现较大的幅值, 而在其他频率点处, 无明显幅值(图 7(b), (d)). 由此可知: 通过激光测振仪测得的交流接触器运行时表面振动的时域图和频域图与交流接触器内部结构及运行原理相符, 具有很好的相关性.

各实验样本的辐射指数及辐射指数平均值曲线, 如图 8 所示. 图 8 中:  $f_0$  为 1/3 倍频程中心频率. 由图 8(a)可知: 虽然 100 个实验样本的辐射指数曲线存在一定偏差, 但辐射指数曲线在各频段的趋势基本一致. 由图 8(b)可知: 3 条曲线基本一致, 说明各频率段的辐射指数与样本噪声及样本个体无关, 体现了物体结构辐射指数的固有属性.

将交流接触器所有样本辐射指数的平均值存入系统, 即为该型号交流接触器的辐射指数曲线.

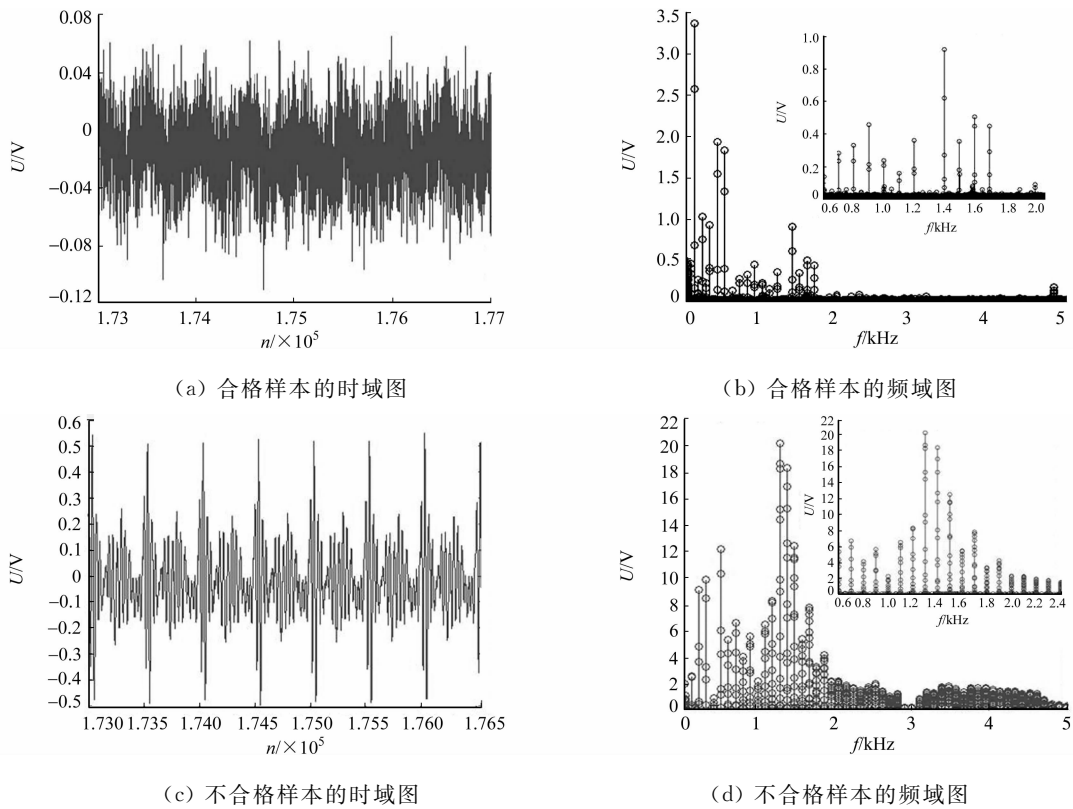


图 7 相同型号样本的时域图和频域图

Fig. 7 Time domain and frequency domain diagrams of same model samples

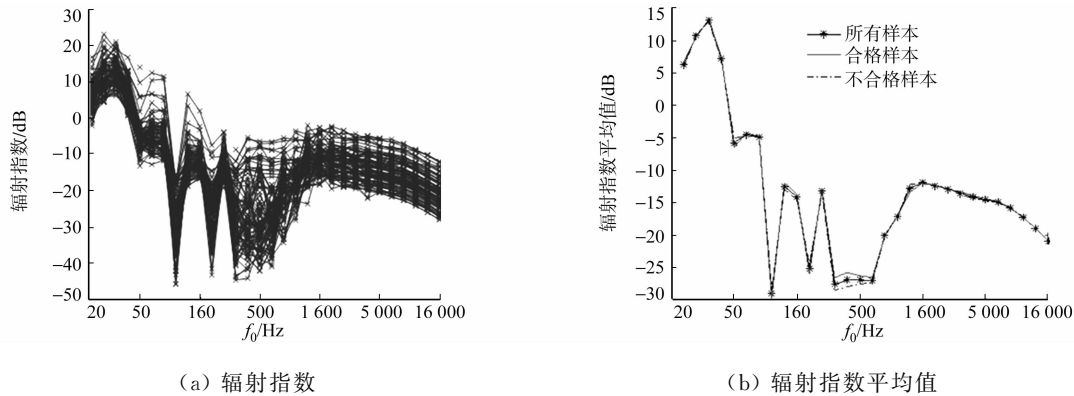


图 8 实验样本的辐射指数及辐射指数平均值

Fig. 8 Radiation index and radiation index mean value of experimental samples

3.2 振动噪声测量及验证

振动噪声测量系统加载提取的辐射指数后,得到 A 计权声功率级,并与标准规定的接触器噪声合格的阈值 40 dB 进行对比. 振动噪声测量系统人机界面可显示振动时域信号、选择的辐射指数曲线及测量结果. 为了验证测量系统的可靠性,另选 80 个相同型号的交流接触器作为验证样本,其中,合格样本 32 个,不合格样本 48 个. 分别采用振速法和声级计进行测量,并将得到的 A 计权声功率级的结果进行对比.

两种方法的测量误差,如图 9 所示. 图 9 中: $\Delta$  为误差绝对值. 由图 9 可知:噪声为 30~50 dB 的样本,在运行过程中,振动微弱且平稳,这部分样本的测量误差基

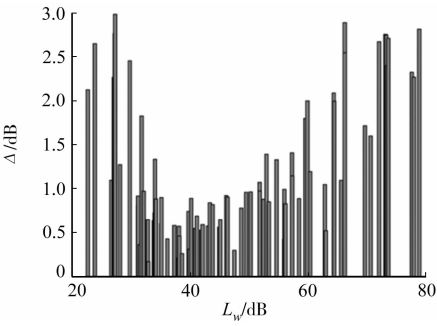


图 9 噪声测量误差分布图  
Fig. 9 Error distribution diagram  
of noise measurement

本为 $\pm 1$  dB;噪声为40 dB以下的样本,无经验人员用手触摸样本几乎感觉不出其振动;噪声低于30 dB的样本,测量误差大多超过 $\pm 2$  dB.这是由于声级计测量范围为30~130 dB,对低噪声样本测量误差偏大.噪声超过50 dB的样本,测量误差部分也超过 $\pm 2$  dB,这部分样本在运行过程中,振动较为明显,噪声越大,振动越明显,尤其是当噪声超过65 dB时,部分测量误差接近 $\pm 3$  dB,用手触摸样本有明显振感,这是由于噪声过大的样本导致其振动的因素较多,噪声与振动呈多样性,而文中主要测量样本的电磁性噪声.

由此可知,振速法可以较为准确地测量噪声为30~50 dB的样本,而噪声低于30 dB及超过50 dB的样本误差均不影响测量系统判定的准确性.通过该测量系统,声级计测量为合格的样品,通过振速法测量也为合格的比例为97%;声级计测量为不合格的样品,通过振速法测量也为不合格的比例为98%.因此,激光测振仪通过振速法测得的结果能够较为准确地反映交流接触器运行噪声的大小.

该系统满足工程应用,具有很好的推广性.在工程应用中,由于激光有效距离范围较大,故激光测振仪安装位置较灵活,但需避免和其他设备引起共振的情况,测量方向必须根据振源振动方式选择,且每个样本的测点需保持一致,以减少测量误差.

## 4 结论

针对交流接触器运行噪声测量现状,开发了振动噪声测量系统,该系统包括辐射指数提取、噪声测量和噪声验证3个模块.通过激光测振仪和传声器提取相同型号的交流接触器运行时的辐射指数及表面振动信号,采用振速法实现交流接触器运行噪声的现场测量,并得到以下3个结论.

1) 同一型号的交流接触器各频率段的辐射指数曲线趋势基本一致,与样本噪声及样本个体无关,体现了物体结构声辐射效率的固有属性.

2) 通过激光测振仪测量交流接触器运行时的振动,求得其运行噪声.与声级计测量值相比,噪声为30~50 dB的样本的测量误差为 $\pm 1$  dB,可准确反映噪声与振动的关系.

3) 采用激光测振法测量交流接触器运行时的噪声,能够很好地解决现场测量强背景噪声带来的影响,实现快速、准确地测量.

实验结果表明,该测量系统能够较为准确地通过测量振动强弱求得噪声的大小,为实现强背景噪声环境下交流接触器的现场测量提供理论依据和方法.

## 参考文献:

- [1] 郭良,梁步猛,章上聪,等.考虑电磁续流的智能交流接触器耦合动力学仿真与试验研究[J].电器与能效管理技术,2018(12):19-24. DOI:10.16628/j.cnki.2095-8188.2018.12.004.
- [2] DIMITROV B,CRUDEN A,MARINOV A. Modelling, analysis and verification of a resonant LLC converter as a power supply for the electromagnetic driving mechanism of an electromagnetic contactor[C]//19th International Symposium on Electrical Apparatus and Technologies, Bourgas:IEEE Press,2016:1-4. DOI:10.1109/SIELA.2016.7542988.
- [3] LIU Yingyi,CHEN Degui,JI Liang,*et al.* Dynamic characteristic and contact bounce analysis for an AC contactor with PWM controlled coil[C]//Proceedings of the 53rd IEEE Holm Conference on Electrical Contacts, Pittsburgh: IEEE Press,2007:1-4. DOI:10.1109/HOLM.2007.4318232.
- [4] 陈连生.交流接触器的噪声溯源及处理[J].建筑工人,2010,31(9):41. DOI:10.3969/j.issn.1002-3232.2010.09.022.
- [5] HUNG C Y,CHI C T. A new hardware-based actuator for driving an AC/DC electromagnetic contactor[J]. WSEAS Transactions on Systems and Control,2010,5(11):872-771.
- [6] 仲百全,王守彪,周玉海,等.对交流接触器运行中存在问题的分析及解决[J].河北建筑工程学院学报,2010,28(2):98-99. DOI:10.3969/j.issn.1008-4185.2010.02.032.
- [7] 陈玉平,陈尧君.交流接触器无声节能控制研究与应用[J].煤炭技术,2011,30(1):58-60.
- [8] 中国机械工业联合会.CJX系列交流接触器:JB/T 7435—2006[S].北京:机械工业出版社,2007.
- [9] 杨建红,张认成,吴晓梅.交流接触器运行噪声的在线测量实验[J].华侨大学学报(自然科学版),2012,33(2):134-

137. DOI:10.11830/issn.1000-5013.2012.02.0134.
- [10] 陈首虹,黄身桂.激光测振法在交流接触器运行噪声测量中的实验研究[J].鄂州大学学报,2016,23(6):98-100. DOI:10.16732/j.cnki.jeu.2016.06.032.
- [11] 吴晓梅,张认成,杨建红.交流接触器振动噪声性能的在线检测[J].低压电器,2011(18):21-23. DOI:10.3969/j.issn.1001-5531.2011.18.005.
- [12] 宋健.振速法在电力变压器噪声测量中的应用研究[D].合肥:合肥工业大学,2013.
- [13] 阮学云,李志远,宋健.振速法在换流变压器声功率测量中的应用研究[J].高压电器,2015,51(4):24-28. DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2015.04.005.
- [14] COMESANA D F,FAN Yang,TIJS E. Influence of background noise on non-contact vibration measurements using particle velocity sensors[C]// Internoise 2014. Melbourne:[s. n.],2014:1-6. DOI:10.13140/2.1.1496.0322.
- [15] WU Xiaomei,ZHANG Rencheng,YANG Jianhong. The on-line detection for AC contactor's vibration noise[J]. Advanced Materials Research,2012,479/480/481:1174-1179.
- [16] 陈品.基于振速法的主减速器噪声在线检测系统研究[J].硅谷,2011(24):100-122. DOI:10.3969/j.issn.1671-7597.2011.24.101.
- [17] 黄莉,杨建红,黄宜坚.基于关联维数的交流接触器故障噪声起因分析[J].郑州轻工业学院学报(自然科学版),2013,28(2):36-39. DOI:10.3969/j.issn.2095-476X.2013.02.009.
- [18] 刘继承,徐庆华,查建新.用加速度传感器测量振动位移的方法[J].现代雷达,2007,29(5):69-71. DOI:10.3969/j.issn.1004-7859.2007.05.020.
- [19] MARTARELLI M,REVEL G M. Laser doppler vibrometry and near-field acoustic holography: Different approaches for surface velocity distribution measurements[J]. Mechanical Systems and Signal Processing,2006,20(6):1312-1321. DOI:10.1016/j.ymssp.2005.11.011.
- [20] REVEL G M,MARTARELLI M,CHIARIOTTI P. A new laser vibrometry-based 2D selective intensity method for source identification in reverberant fields: Part II. Application to an aircraft cabin[J]. Measurement Science and Technology,2010,21(7):1-10. DOI:10.1088/0957-0233/21/7/075108.
- [21] ZHENG Jing,PAN Jie,HUANG Hai. An experimental study of winding vibration of a single-phase power transformer using a laser doppler vibrometer[J]. Applied Acoustics,2015,87:30-37. DOI:10.1016/j.apacoust.2014.06.012.
- [22] ROOZEN N B,LABELLE L,RYCHTÁRIKOVÁ M,*et al.* Determining radiated sound power of building structures by means of laser doppler vibrometry[J]. Journal of Sound and Vibration,2015,346(1):81-99. DOI:10.1016/j.jsv.2015.02.029.
- [23] 机械工业部标化所.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:GB/T 3767-1996[S].北京:中国标准出版社,1997.
- [24] 周先辉,冯长虹,胡滨,等.汽车水泵总成半消声室噪声测试与声学评价[J].汽车技术,2013(12):50-53. DOI:10.3969/j.issn.1000-3703.2013.12.013.
- [25] 吴胜举,张明铎.声学测量原理与方法[M].北京:科学出版社,2014.

(责任编辑:钱筠 英文审校:崔长彩)