

◇ 研究报告 ◇

一种新型的电脑键盘按键声信号采集方法*

张梦玉^{1,2} 王绪隆^{1,2} 张仲宁^{1,2} 李杰³ 杨京^{1,2†} 梁彬^{1,2} 程建春^{1,2}

(1 南京大学声学研究所 南京 210093)

(2 人工微结构科学与技术协同创新中心 南京 210093)

(3 苏州邦冠自动化有限公司 苏州 215000)

摘要: 传统的电脑键盘按键声信号采集方法是采用造价较高的低噪声马达以恒定的速度敲击键盘按键,通过传声器远距离采集键盘的按键声,该方法在自然环境下受环境噪声影响大,需在低噪声环境中进行,因此很难在工业上大规模使用。该文提出了一种新型的电脑键盘按键声信号采集方法,首先采用模拟信号驱动电磁铁模拟手指敲击键盘按键,然后通过缩小检测距离和设计隔声腔有效实现对环境噪声的隔离,最终使传声器有效采集键盘按键声信号。该方法有利于同类型设备在工业上的大规模使用,并可大幅度降低设备生产成本。

关键词: 按键异响检测;模拟手指敲击;微弱信号采集;隔声腔

中图分类号: O429

文献标识码: A

文章编号: 1000-310X(2020)03-0445-08

DOI: 10.11684/j.issn.1000-310X.2020.03.018

A new method to detect the sound of computer keyboard

ZHANG Mengyu^{1,2} WANG Xulong^{1,2} ZHANG Zhongning^{1,2} LI Jie³ YANG Jing^{1,2}
LIANG Bin^{1,2} CHENG Jianchun^{1,2}

(1 *Institute of Acoustics, Nanjing University, Nanjing 210093, China*)

(2 *Collaborative Innovation Center of Advanced Microstructures, Nanjing 210093, China*)

(3 *Suzhou Bangguan Automation Company, Suzhou 215000, China*)

Abstract: The traditional sound detection of computer keyboard uses a mute-motor to tap the cap of keyboard. Besides, the process of detection must be in the silent room. The cost of sound detection is very expensive so that it can't be used widely. In this letter, we propose an advanced method to detect the sound of keyboard. First, the electromagnet, which is driven by the analog signal, taps the cap of keyboard. By this way, the process of tapping caps can be perfectly simulated. Then we designed a cavity, which can insulate the background noise effectively. The microphone was placed in the cavity and near by the electromagnet and keyboard, which can improve the signal-noise ratio effectively. The proposed design could open up an alternative avenue for the sound detection of computer keyboard.

Keywords: Detecting abnormal sound; Simulated finger percussion; Weak signal collecting; Soundproof cavity

2019-04-29 收稿; 2019-11-28 定稿

*国家自然科学基金项目 (11374157)

作者简介: 张梦玉 (1994-), 女, 安徽阜阳人, 硕士研究生, 研究方向: 声信号检测。

†通信作者 E-mail: yangj@nju.edu.cn

0 引言

键盘作为一种方便快捷的手动外部输入部件,目前已广泛用于电脑和打字机等办公设备。自键盘的诞生之日起,人们就不断地在提升改进键盘的设计^[1]以获得更舒适的使用感。近年来,键盘的速度、键盘按键的手感以及键位冲突等键盘的有关需求在众多研究人员的努力下得到很大的提高^[2-3]。较为舒适的键盘按键声能够传递出键盘品质的可靠性、先进性,影响消费者的选择心理,如今随着人们生活水平的提高,键盘的按键噪声品质也越来越被人们关注。过去,键盘噪声品质的优劣大多依靠使用者亲身感受,由于每个人的使用习惯不同,所以不同的人感受也不同,很难有准确的行业标准。为了提高键盘质量水平,保证使用的舒适度,键盘按键声检测系统应运而生。目前键盘按键声检测方法主要是使用低噪声马达敲击键盘按键,传声器采集按键声信号后传给信号分析系统分析信号的分贝值,通过信号分贝值来判断键盘按键是否合格。如本文所检测的键盘按键,经过大量键盘按键的敲击声实验测试,键盘按键声在36~46 dB之间的按键为合格键,超出这个范围的按键视为不合格按键,需退回重装。由于实际键盘生产线环境复杂,且有较强的背景噪声,因此在强背景噪声下,设计一个好的信号采集系统是保证键盘按键检测准确、可靠的前提。在传统的键盘按键声信号采集过程中,敲击方式是采用低噪声马达以恒定的速度敲击键盘按键,这种敲击方式与实际使用键盘按键时人手手指敲击键盘按键的方式相距甚远,并且传统的键盘按键声信号采集过程是在低噪声环境中进行,这种信号采集的环境条件较为苛刻,并且生产成本低,不利于在工业上大规模使用。

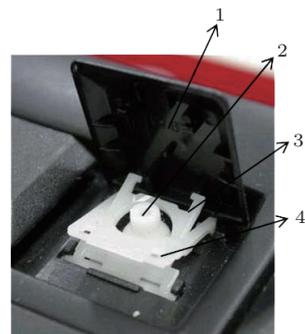
本文提出一种新型的键盘按键声信号采集方法,包括信号采集系统的优化和设计按键声信号采集空间,可以有效实现在强背景噪声下微弱信号采集。本文首先利用单片机的DAC口编程发出半正弦波模拟信号,经过功率放大器放大后驱动电磁铁模拟手指敲击键盘按键。这种敲击方式一方面利用价格较为便宜的单片机和电磁铁代替了原先造价较高的可编程低噪声马达,大幅度降低了生产成本;另一方面模拟了手指敲击键盘按键的过程,增加了键盘按键声信号采集的可靠性。为真正实现工业化信号采集,本文还提出了一种新型的敲击声信号采集空间设计,即采用钢板材料,设计出两个隔离腔,

分别从质量隔声和腔体的结构特性两方面隔离环境噪声。此设计提高了设备的隔声性能,使其可以在有背景环境噪声的条件下有效采集键盘按键敲击的声信号,有利于设备在工业上的大规模使用。

1 键盘按键敲击方式优化

1.1 键盘按键构造及敲击特点

图1为键盘按键结构图,其中1为键盘按键的键帽,2为橡胶弹簧,二者受到向下的力时会有向下的一个自由行程,压力消失后自动复原。3、4分别为两个塑料卡扣,一起组装在键盘的底座架子上形成一个半自由活动结构,可带动键帽上下运动。由键盘按键的组成结构可知,按键敲击声是外力作用于键盘按键时两个塑料卡扣之间的摩擦和橡胶弹簧的上下运动摩擦而产生。在键盘按键组装过程中,由于各零部件之间组装失配会造成在敲击键盘按键时键盘按键发出异响,因此可以通过键盘按键的异响检测来判断键盘按键是否合格。由手指敲击实验^[4]可知,人们在使用手指敲击键盘按键时使用的不是恒力,是变化的力,整个受力过程力逐渐增加,当键盘按键被按压到底时,手指的力反向逐渐减小。传统的键盘按键声信号采集方法是采用低噪声马达以恒定的速度敲击键盘按键,当低噪声马达撞击到键盘按键时,速度突然降为零,从动力学的角度分析,此时会发生非弹性碰撞,碰撞引起振动,由此产生撞击声,此时采集到的信号不仅仅是键盘按键的按键声,还混有低噪声马达撞击键盘按键时的撞击声。因此在键盘按键声的信号采集过程中,一个关键的问题就是寻找一种新型的敲击方式,一方面可以模拟手指敲击键盘按键,另一方面可以消除敲击过程中的撞击声,保证传声器采集到较干净的按键声。



1. 键盘按键的键帽; 2. 橡胶弹簧; 3/4. 塑料卡扣

图1 键盘按键结构

Fig. 1 The structure of keyboard key

1.2 键盘按键敲击方式优化

本文采用半正弦波模拟信号作为驱动电磁铁敲击键盘按键的信号。电磁铁在半正弦波信号的驱动下敲击键盘按键,电磁铁的敲击力度与半正弦波驱动信号的变化趋势一致,敲击力度随着半正弦波信号电压的增加而增加,减小而减小,如图2(a)所示。此种敲击方式,一方面模拟了人们实际使用键盘按键的敲击过程,使得键盘按键在被敲击过程中所发出的声音更接近人们实际使用键盘按键时的敲击声,增加了信号源的可靠性,并且这种敲击方式不会由于电磁铁速度的突然归零,产生撞击声;另一方面电磁铁的成本低,使用电磁铁代替低噪声马达大幅度降低了生产成本,有利于工业上的大规模使用。给电磁铁施加半正弦信号的目的之一是模拟人手敲击键盘按键的过程,并非以完全模仿人手敲击键盘的力度的时域变化情况,因为给电磁铁施加半正弦信号的另一目的是给电磁铁施加一个缓慢增

大的力,保证是电磁铁按下的过程,尽量减小电磁铁和按键键帽的撞击声。电磁铁在敲击键盘的过程的声信号主要包括两个部分,一是电磁铁以一定速度撞击到键盘之后和键盘帽之间的撞击声,二是电磁铁在按下键盘的过程中,键盘本身的弹性结构所产生的声音,前者并非我们需要的,后者才是我们需要分析和处理的。从图2(b)也可以看出其中的声信号包括两部分,即电磁铁按下键盘按键和按键回弹过程中按键的弹性卡扣结构所产生的声音。

2 强背景噪声下的微弱信号采集

由于实际键盘生产线环境复杂,且有较强的背景噪声,键盘按键的信号相对较为微弱,因此在强背景噪声下,设计一个好的信号采集系统保证键盘按键声信号采集的干净度是键盘按键检测准确、可靠的前提。

2.1 信号采集系统

在传统的键盘按键声信号采集过程中,传声器距离待检测信号源的距离为50 cm,但由于传统的键盘按键声检测过程在低噪声环境中进行,信号采集不受环境噪声影响,若此种较长距离的信号采集方法在自然环境下进行,信号采集精度将会受环境噪声影响较大^[5-9]。为提高信号在自然环境下的采集精度和信号采集效率,本文设计了多通道键盘按键声信号采集电路系统,该采集系统以单片机为核心,上位机通过串口与单片机通讯控制单片机程序运行。在上位机的控制下,单片机执行已写入的程序,其DAC口发出半正弦波信号,经过功率放大器放大后驱动电磁铁敲击键盘按键,传声器采集键盘按键的按键声,由于按键声信号较小,需要经过放大电路放大后再进行信号分析。电路系统示意图如图3所示。此电路系统由以单片机为主的数字部分、以功率放大器为主的功率部分、对外通讯部分和信号采集部分组成。为保证电路系统的可靠性,本文采用光隔离器^[10]将此电路系统的每一部分隔离为独立的一个子电路系统,以提高整个电路系统的抗干扰能力。本文分别采用HCNR200、PVI1050N和6N137这3种光隔离器实现了功率部分与数字部分的隔离和通讯部分与数字部分的隔离,保证了信号采集系统的稳定性。

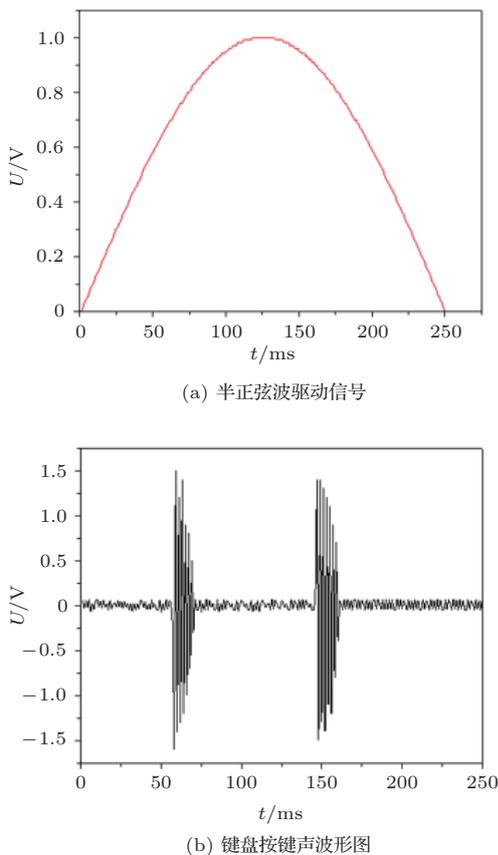


图2 驱动信号波形和采集信号波形

Fig. 2 The wave form of driving signal and acquisition signal

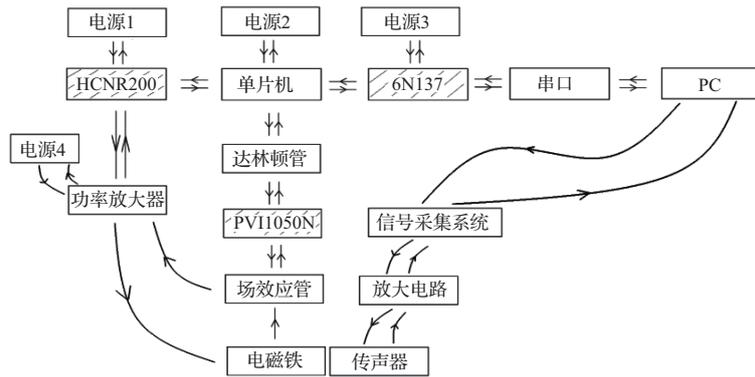


图3 电路系统示意图

Fig. 3 Schematic diagram of circuit system

如图4(a)所示, 17个传声器分布在40个电磁铁周围, 每个传声器后均接放大电路用于采集并放大所对应的敲击键盘按键的按键声信号, 每个传声器距离相应的电磁铁的距离为1.5 cm, 这种近距离的信号采集, 一方面有利于降低环境噪声的影响, 另一方面有利于构造一个狭窄的信号采集环境, 隔离低频噪声对信号采集的影响。传声器采用橡胶圈封装, 可以较好地隔离电磁铁敲击键盘按键的振动, 如图4(b)所示。传统的信号采集距离为50 cm, 本文采用的信号采集距离为1.5 cm, 本文理论分析并且实验验证了在这两种信号采集距离下, 环境噪声对信号采集的影响。在无环境噪声的条件下传声器1距离信号源的距离为1.5 cm, 所采集到的信号源的分贝值为 $L_{p1} = 70$ dB, 传声器2距离信号源的距离为50 cm, 所采集到的信号源的分贝值记为 L_{p2} 。图4(c)为实验示意图。

键盘按键声信号可视为点声源, 在常温下球面声波随距离衰减的表达式为 $L_p = L_w - 20 \lg r - k$,

式中, L_p 为声压级, L_w 为声强级, k 为修正系数, 对于自由空间 $k = 11$, 半自由空间 $k = 8$ 。

距离 r_1 和 r_2 之间的声压级差值为

$$L_{p1} - L_{p2} = 20 \lg(r_2/r_1). \quad (1)$$

本文 $L_{p1} = 70$ dB, $r_2/r_1 = 50/1.5 \approx 33$, 由公式(1)得 $L_{p2} = L_{p1} - 20 \lg 33 \approx 70 - 30 = 40$ dB。

若在环境噪声为46 dB的条件下, 由公式 $SPL = 20 \lg(p_e/p_{ref})$ 计算得传声器1处的声压分贝值 $L'_{p1} = 70.5$ dB, 传声器2处声压分贝值 $L'_{p2} = 52$ dB, 此时信号在传声器2处已被噪声完全湮没。

测试结果及分析结果如表1所示。结果说明相同的信号采集条件下, 缩小信号采集距离可以降低环境噪声对信号采集的影响。

表1 不同信号采集距离测试结果

Table 1 The test results of the different signal collection distance

测试类别	传声器1	传声器2
无背景环境噪声	70 dB	40 dB
46 dB 环境噪声	70.5 dB	52 dB
噪声增量	0.5 dB	信号湮没

由于键盘按键声信号较为微弱, 信号分析系统无法直接对此微弱信号进行信号分析^[11-12]。本文采用TLE2072芯片做前置放大电路来放大所采集到的键盘按键信号, 以便后续信号分析系统作信号分析^[13-17]。图5(a)为放大电路原理图, 其电阻 R_1 、 R_2 分别为100 k Ω 、1 k Ω , 输入端电容 c_1 为10 μ F, 用于滤波和隔离低频噪声。

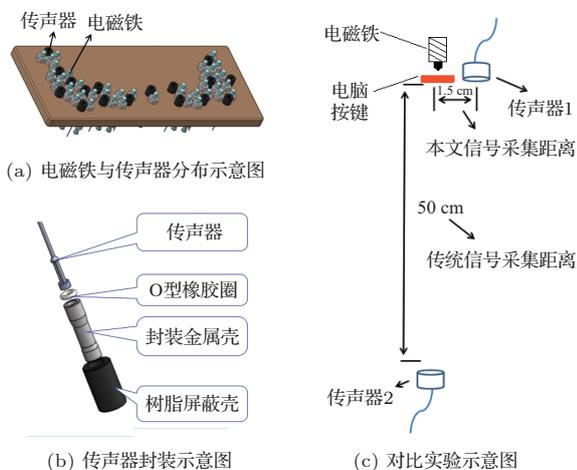


图4 信号采集图

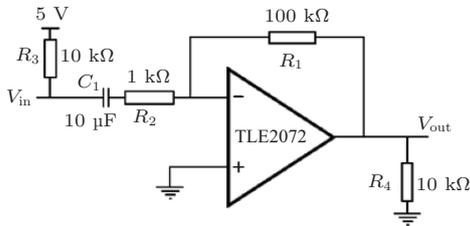
Fig. 4 The signal acquisition chart

此放大电路的放大倍数为

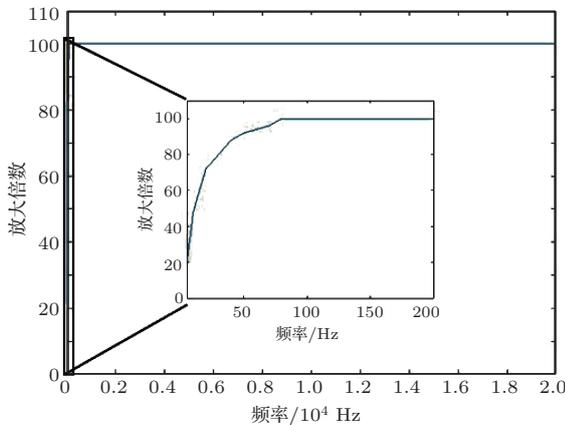
$$n = \frac{R_1}{\frac{1}{j2\pi f c_1} + R_2}, \quad (2)$$

式(2)中, f 为声信号频率, 当 $f > 100$ 时, $|R_2| \gg |1/(j2\pi f c_1)|$, 式(2)可以简化为 $n \approx R_1/R_2 = 100$ 。

本文对此放大电路系统做了频率响应测试, 频率响应测试结果如图 5(b) 所示, 在 $0 \sim 100$ Hz 范围内, 放大电路的放大倍数上升; 100 Hz ~ 20 kHz 范围内, 放大电路的放大倍数稳定为 100 倍。图 6 为键盘按键声信号频谱图, 在 $0 \sim 100$ Hz 范围内, 键盘按键声所占比例较小, 所以尽管在此范围内放大电路的频率响应为非线性, 对最终的测试结果并无较大影响。



(a) 放大电路原理图



(b) 放大电路频率响应曲线

图 5 放大电路原理图及其频率响应曲线

Fig. 5 The schematic diagram of amplified circuit and its frequency response curve

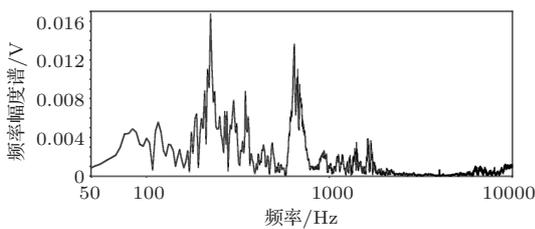


图 6 按键声信号频谱图

Fig. 6 Key sound signal spectrum

2.2 信号采集过程

图 7 为信号采集流程图。上位机通过串口给单片机发送指令打开 40 路电磁铁中的某一路并同时开启单片机的 DAC 口发出半正弦波信号, 上位机 1 s 发送一次指令, 因此单片机的 DAC 口每隔 1 s 发出一次半正弦波信号, 由于单片机 DAC 口发出的信号不具有驱动能力, 单片机发出的半正弦波信号需要经过功率放大器放大后才能作为驱动信号驱动电磁铁敲击键盘按键。若功率放大器的增益较小, 键盘按键就不能被电磁铁敲击按下, 就不会有按键声产生; 若功率放大器增益较大, 则在敲击过程中会产生较大的撞击声, 不利于后续的信号分析, 因此需要选择一个较为合适的功率放大器增益来驱动电磁铁敲击键盘按键。经实验验证, 当调节功率放大器增益旋钮使电磁铁敲击的力的峰值是 0.8 N 时, 电磁铁可以将键盘按键按下, 并且不会产生撞击声。传声器采集键盘按键的按键声, 由于键盘按键的按键声信号较小, 本文采用放大电路将采集到的键盘按键声信号放大后传送到信号分析系统。一个键盘按键的按键声信号采集完成后, 单片机执行程序关闭 DAC 和 I/O 口。本文中一个键盘上共需检测 40 个按键, 因此检测一块键盘, 此检测流程需循环 40 次, 所需时间为 40 s。一块键盘检测完成后更换待检测键盘后再次循环此流程。

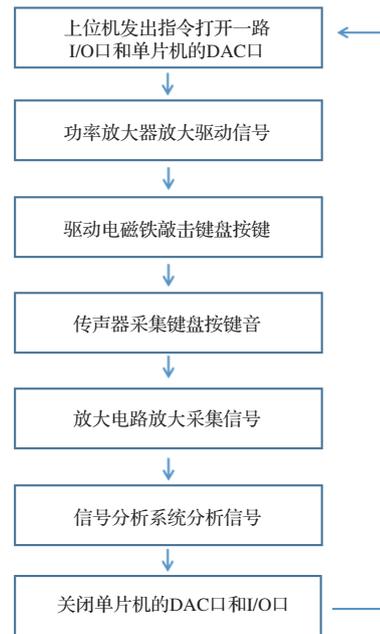


图 7 信号采集流程图

Fig. 7 Flow chart of signal acquisition

3 按键声信号采集空间设计

传统的键盘异响检测过程在低噪声环境中进行,这个采集环境极大地限制设备的工业使用率。为扩大工业使用率且保持键盘按键声信号采集纯净度,本文设计了隔声的信号采集空间。

3.1 抗干扰信号采集装置

为克服环境噪声对键盘按键声信号采集的影响,本文设计了两个隔声腔叠加使用来隔离环境噪声。如图8(a)所示,整个设备封装在一个较大的箱体中,箱体的尺寸为1.5 m×1.3 m×1 m。箱体材料采用厚度为1 cm的钢板,其隔声效果如图8(b)所示,横坐标为频率,纵坐标为散射压力场与入射压力场的比值,即 $\frac{p_s}{p_i}$,其中 p_s 为散射压力场, p_i 为入射压力场,下同。

如图8(b)所示,由于外部箱体的材料特性,当噪声频率大于5000 Hz时,外界噪声基本可以隔离。其中的一些波峰为隔声板的四分之一波长共振频率点^[18]。但结果显示低频声会有较小的一部分进

入箱体内部。由于环境噪声中这个频段(5000 Hz以下)的声波占比较大,会对信号采集过程造成较大影响,因此仅利用外部箱体的材料特性进行隔声的缺点不容忽视。为减小低频噪声对信号采集过程的影响,本文采用与设备箱体同样的材料设计出一个尺寸较为狭窄的密闭小腔体^[19-20],作为信号采集空间。如图9(a)所示,小腔体由腔体上半部分和腔体下半部分组成,电磁铁和传声器镶嵌在腔体上半部分上,下半部分用于盛放待检测键盘。当待检测键盘就位后,小腔体在设备的驱动下,合在一起,形成一个密闭的信号采集空间,腔体上半部分下面的一圈橡胶圈有利于上下两部分腔体密封。此密闭空间等效为一个长方体如图9(b)所示。本文利用comsol软件仿真了该结构的3个不同截面的隔声效果,结果如图10所示。

由图10可以看出6000 Hz以下的声波基本不能进入腔体,隔离效果较好。由于其结构特性,腔体在高频时共振效果明显。本文在设计时,将小腔体置于大箱体内部,综合利用两个结构的优点,达到隔离环境噪声效果。

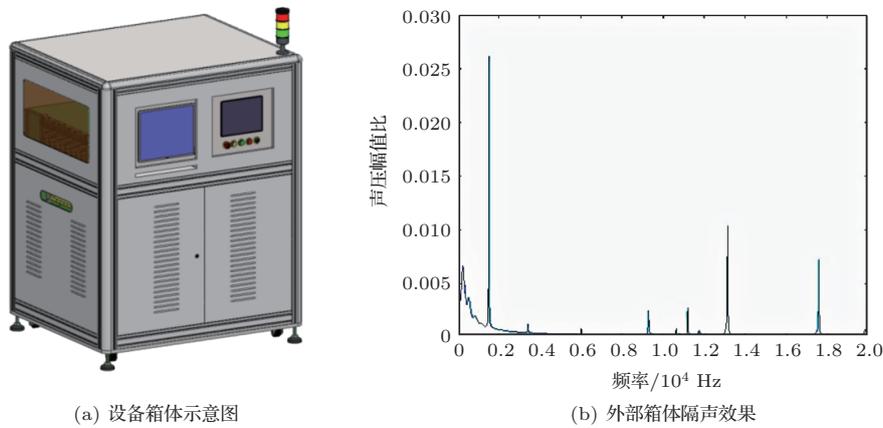


图8 设备箱体及其隔声效果图
Fig. 8 The equipment box and the sound insulation effect map

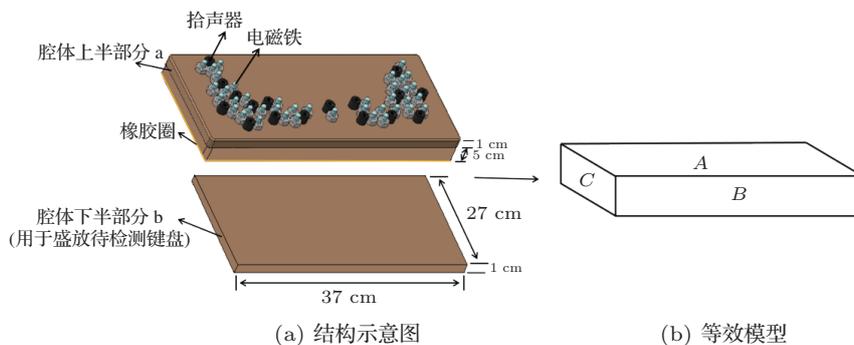


图9 小腔体结构示意图及其模型示意图

Fig. 9 The diagram of small cavity body and its model chart

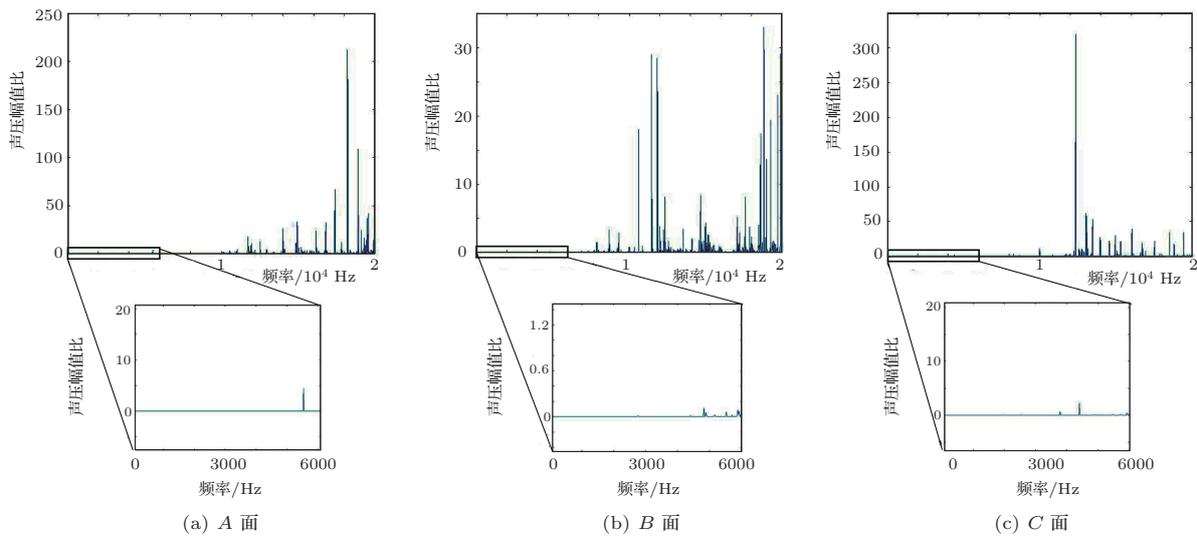


图10 小腔体不同面隔声效果图

Fig. 10 The effect of sound insulation of the small cavity body's different surfaces

3.2 实验结果与讨论

图11为本文所设计系统在两种环境下信号采集结果对比图,图11(a)为在开放的自然环境下的信号采集波形图,图中两个较为明显的波峰是采集到的键盘按键的按键声,受环境噪声影响。因为

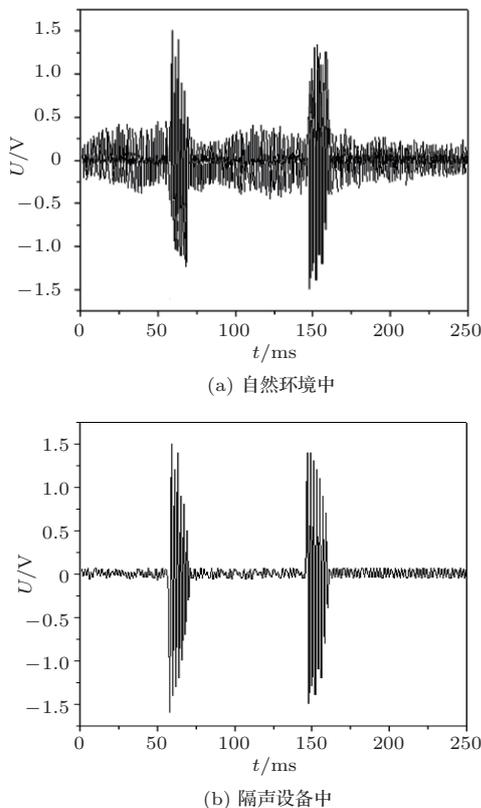


图11 信号采集波形对比图

Fig. 11 The signal acquisition waveform contrast diagram

实际键盘生产检测是在工厂的生产车间进行,键盘检测所处的环境是包含车间生产中的各种噪声,包括电机、风扇、空调噪声,以及车间生产的机器运行时产生的各种噪声,传声器远距离采集电磁铁敲击键盘的声信号会带来较低的信噪比,因此本文提出降低传声器和敲击信号源之间的距离,可以大大采集的信号的信噪比,有利于后期的信号分析处理。由图可见,信号采集过程,受环境噪声影响较大,所采集到的信号中除了键盘按键的按键声,还有环境噪声,由于环境噪声的随机性,信号采集中的环境噪声会对信号分析所得的分贝值造成很大影响,最终会影响键盘按键是否合格的判断。图11(b)为在隔声设备中的信号采集结果波形图,图中除了敲击键盘按键的按键声外,并无其他噪声,说明本文所设计的隔声腔可以有效隔离环境噪声,且易于实现,有利于同类设备在工业上的大规模使用。

4 结论与展望

本文采用模拟信号驱动电磁铁模拟手指敲击键盘按键的方法降低了设备生产成本,有效解决了使用低噪声马达敲击键盘按键时引入的附加撞击声的问题;另外本文通过设计密闭隔声腔的方式,实现了在人耳可听频率范围内的全频段隔声,为键盘按键的按键声信号采集提供了优质的信号采集环境,有利于后续的信号分析,同时实现了同类设备在工业上大规模使用的可能性。在此较为良好的信号采集条件下,未来可以提取有效按键声做进一步的

时频分析,为提高键盘按键的噪声品质和异声检测水平奠定基础,以达到为广大消费者提供更为优良的键盘产品的目的。

参 考 文 献

- [1] 佚名. “键步”如飞:小述键盘进化史[J]. 数码世界, 2007(11): 27.
- [2] 朱坤. 可穿戴计算文本输入的测试及分析[D]. 重庆: 重庆大学, 2006.
- [3] 李华鹏. 键盘手感与电性能测试系统[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2016.
- [4] 金纯, 贾珍梅. 穿戴式输入系统的手指敲击识别算法[J]. 科学技术与工程, 2015, 15(1): 84-88.
Jin Chun, Jia Zhenmei. Finger tapping recognition algorithm for wearable input system[J]. Science Technology and Engineering, 2015, 15(1): 84-88.
- [5] 吴绍维, 向阳, 夏雪宝, 等. 无单元空间离散域的声波叠加方法[J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2013, 41(11): 22-25.
Wu Shaowei, Xiang Yang, Xia Xuebao, et al. Acoustic superposition method in element free spatial discrete domains[J]. Journal of Huazhong University of Science & Technology (Natural Science Edition), 2013, 41(11): 22-25.
- [6] 蒋伟, 王冬海. 基于声波叠加法的基阵声场计算和波束合成[J]. 计算机仿真, 2007, 24(8): 286-289, 315.
Jiang Wei, Wang Donghai. Array radiation sound field calculation and beam-synthesis based on wave superposition method[J]. Computer Simulation, 2007, 24(8): 286-289, 315.
- [7] Li W, Chen J, Yu F, et al. Near-field acoustic holography for semi-free acoustic field based on wave superposition approach[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2006, 19(3): 455-459.
- [8] Li W, Chen J, Yu F, et al. Reconstruction and prediction of coherent acoustic field with the combined wave superposition approach[J]. Chinese Journal of Acoustics, 2006, 25(2): 124-138.
- [9] 秦二强. 微弱信号检测及测向方法研究[J]. 黑龙江科学, 2019, 10(4): 32-33.
Qin Erqiang. Research on weak signal detection and direction finding method[J]. Heilongjiang Science, 2019, 10(4): 32-33.
- [10] 王德强. 光电隔离抗干扰技术及应用[J]. 科技风, 2008(23): 48.
- [11] 吕小京. 通信传输的若干问题和技术要点分析[J]. 中国新通信, 2016, 18(4): 57.
- [12] 吴卓, 于洋. 通信传输中信号变弱的原因及措施探讨[J]. 黑龙江科技信息, 2015(30): 177.
- [13] 邢亚第. 基于CTIA的微弱信号放大电路研究[J]. 微处理机, 2018, 39(2): 54-56, 60.
Xing Yadi. Research on weak signal amplification circuit based on CTIA[J]. Microcomputer Processing, 2018, 29(2): 54-56, 60.
- [14] 闫岩. 微弱直流电压信号的采集与测量系统[D]. 南京: 南京信息工程大学, 2017.
- [15] 蔡翠翠, 王本有, 常志强. 噪声背景下微弱信号检测系统的设计[J]. 皖西学院学报, 2017, 33(2): 54-57.
Cai Cuicui, Wang Benyou, Chang Zhiqiang. Design of weak signal detection system under noise background[J]. Journal of West Anhui University, 2017, 33(2): 54-57.
- [16] 赵冕. 苹果内部品质无损检测极弱信号放大与信号传输系统设计[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2017.
- [17] Liu W, Ma Z, Sun H. Summary of weak signal detection and processing methods[C]//Proceedings of 2nd International Conference on Mechanical, Electronic, Control and Automation Engineering (MECAE 2018), 2018: 206-209.
- [18] 杜功焕, 朱哲民, 龚秀芬. 声学基础[M]. 第3版. 南京: 南京大学出版社, 2012.
- [19] Wang P, Wu G, Luo Y, et al. Effect of repetitive square voltage frequency on partial discharge features[J]. Science China(Technological Sciences), 2013, 56(6): 1313-1321.
- [20] The 16th international conference on noise control engineering[J]. Chinese Journal of Acoustics, 1987(3): 187-293.