

基于 STM32 和 FPGA 的 电动汽车主动声浪控制器设计

张 贤¹, 苏 新², 石 岩², 史晨路², 武俊杰²

(1. 石家庄铁道大学 机械工程学院, 河北 石家庄 050043;

2. 中汽研(天津)汽车工程研究院有限公司, 天津 300300)

摘要:为电动汽车设计了一种基于 STM32 和 FPGA 双 CPU 的车内主动声浪控制器。首先,建立了主动声浪控制系统体系架构,主要包括 CAN 信号输入、控制器、信号输出等;然后,详细阐述了控制器的硬件控制电路设计,其中包括 CAN 通信模块、STM32 与 FPGA 通信模块、DA 数模转换模块等,并对控制器各功能模块编写了软件控制程序;最后,将硬件模块搭建形成主动声浪系统原理样机并进行实车试验。试验结果表明,该系统可以准确模拟发动机动态声浪且声音阶次成分清晰,验证了该系统的有效性与可行性。

关键词:电动汽车;主动声浪;控制器;STM32;FPGA

中图分类号: U469.72⁺2 **文献标志码:** A **文章编号:** 2095-0373(2021)03-0087-07

目前,“低碳化、信息化、智能化”已成为汽车行业发展的潮流方向,汽车电动化已成为不可逆转的趋势。为满足人们对个性化、多元化的体验诉求,主动声浪技术受到了越来越多的关注,已成为电动汽车领域的研究热点之一^[1-2]。2012年,Jagla et al^[3]通过读取声音数据库中的声音片段进行发动机声音的合成,并进行了实验验证。2015年,奔驰汽车公司开发了一种名为“SLS eSound”的合成声音系统^[4],该系统根据电动机和变速箱来制定声音合成控制策略,并通过车内扬声器播放声音来给人带来极具运动感的驾驶体验。现代汽车公司的 Park et al^[5]开发了一套个性化引擎声音系统(personalized engine sound system, PESS),提供了可定制的驾驶体验,通过车辆音频系统来实现对驾驶室内发出发动机声音,增加了表达个性驾驶乐趣的机会。2016年,英国里卡多公司的 Maunder et al^[6]设计了现实增强声音(realistic augmented sound by ricardo, RAS-R)系统,利用发动机转速和负载施加额外增益来对驾驶员提供实时车辆动态驾驶反馈。2018年,韩国崇实大学的 Park et al^[7]提出了利用声音产生和合成原理来制造发动机声音的方法,通过试验证实了该方法可以使用较少的内存来重现发动机声音。Jung et al^[8]开发了发动机振动引起的发动机声音(engine sound by engine vibration, ESEV)技术,该技术依据信号控制处理器从发动机振动中获取车辆的速度和负载信息,产生所需的发动机声音,通过车内扬声器来实现声音播放效果。2020年,陈成等^[9]提出了一种声音离线分析在线合成的方法,证明了该方法可以较好地模拟发动机排气声音。国外对于车内主动声浪技术研究及控制器的研发已初具规模,研发的相关产品已经应用在部分量产车型上,但是相关的硬件选型以及硬件通信关系并不透明。我国对主动声浪技术的研究起步相对较晚,且主要在声浪技术方面展开研究。2020年底,中国国务院办公厅正式发布《新能源汽车产业发展规划(2021—2035年)》,规划中指出到2035年纯电动汽车将成为主流的销售车辆,公共区域用车也将全面电动化^[10]。综上,本文展开对主动声浪控制器的研制具有一定的工程应用意义。

收稿日期:2021-04-13 责任编辑:车轩玉 DOI:10.13319/j.cnki.sjztdxxb.20210074

基金项目:河北省自然科学基金(E2017210166);河北省高等学校科学技术研究项目(ZD2019128)

作者简介:张贤(1994—),男,硕士研究生,研究方向为车辆工程。E-mail:925609565@qq.com

张贤,苏新,石岩,等.基于 STM32 和 FPGA 的电动汽车主动声浪控制器设计[J].石家庄铁道大学学报(自然科学版),2021,34(3):87-93.

采用 STM32+FPGA(field-programmable gate array)的架构设计了一种电动汽车主动声浪控制器,建立基于电机转速和油门踏板开度为主要参数的声音样本读取控制策略,通过对相应的硬件模块搭建以及软件编程开发,制作出主动声浪控制系统工程样机,并在实车上进行试验验证,解决电动汽车车内声浪实现的问题。

1 主动声浪控制系统总体方案设计

主动声浪控制器读取车辆实时车速、电机转速、油门踏板开度等参数,然后根据这些参数进行相应的数据处理,产生对应的模拟声音信号,并传递给数模转换模块和功率放大器,来驱动车载扬声器系统播放发动机声音,达到主动声浪模拟的目的。主动声浪控制系统总体方案如图 1 所示,主动声浪系统结构由信号输入、主动声浪控制器和信号输出 3 部分组成。

电动汽车控制器局域网络(controller area network,CAN)作为系统的信号输入,可获取电动汽车的挡位、车速、电机转速和油门踏板开度等实时运行参数信息,信号经过 CAN_H和 CAN_L 2 条信号线传输给主动声浪控制器。

主动声浪控制器作为系统的核心控制部分,主要包括 STM32 最小系统和 FPGA 开发板。STM32 通过与 CAN 总线通信,将接收并过滤处理后的电机转速(revolutions per minute,RPM)和油门踏板开度(accelerator position sensor,APS)信号通过 USART(universal synchronous/asynchronous receiver/transmitter)串口通信传输到 FPGA。

FPGA 开发板板载一片 W25Q128 型 128 Mbit 大小的 Quad-SPI FLASH,其具有非易失特性,可作为声音样本数据库和控制程序的存储器。FPGA 根据 STM32 发送的 2 个参数信号实时对声音样本数据库中的声音样本进行读取并合成,同时合成的声音数据通过 I/O 拓展接口传输到双通道 DA 输出模块,将合成声音数据的数字信号转换成模拟信号输出。

功率放大器及扬声器作为系统信号输出,将模拟信号声音通过功率放大器进行功率放大,并由车载扬声器系统播放,发出实时状态下的模拟发动机的声音。

2 控制器硬件设计

主动声浪系统控制器硬件主要由 CAN 滤波器、STM32 最小系统、FPGA 开发板、双通道 DA 输出模块组成。其中,STM32 最小系统采用基于 Cortex-M3 内核的 STM32F103C8T6,FPGA 开发板采用 Xilinx 公司的 AX545。基于控制器的硬件构成对硬件通信电路进行设计,主要包括 CAN 总线解读模块、STM32 与 FPGA 通信模块、DA 数模转换模块。

2.1 CAN 总线通信模块

控制器局域网络是国际标准的串行通信协议,具有数据传输速度快和抗干扰能力强等特性,在汽车中广泛应用。STM32F103C8T6 芯片在其内部集成了一个标准的 bxCAN,支持 CAN 协议 2.0A 和 CAN 协议 2.0B,波特率最高可达 1 Mbps。它可以接收和发送 11 位标识符的标准帧,也可以接收和发送 29 位标识符的扩展帧,具有 2 个接收先入先出队列(first input first output,FIFO)缓存,每个 FIFO 有 3 层深度。CAN 滤波器采用 NXP(恩智浦)公司的 TJA1050 芯片,其符合通信速率为 125 kbps~1 Mbps 高速通信的 ISO11898 标准。CAN 总线通信原理如图 2 所示,根据 CAN_H与 CAN_L 2 条线来判断 CAN 总线电平状态,经过 TJA1050 内部转换将 CAN_H和

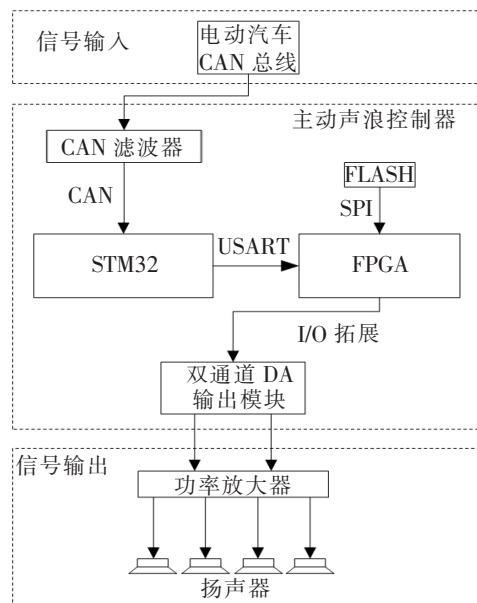


图 1 主动声浪系统总体方案

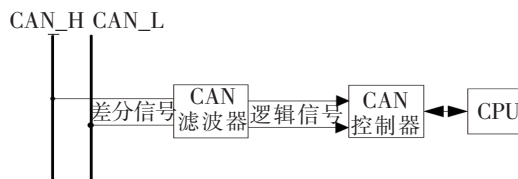


图 2 CAN 总线通信原理

CAN_{UL} 上的差分信号转换为逻辑电平传输到 bxCAN。

2.2 STM32 与 FPGA 通信模块

在主动声浪控制器设计中,利用 USART 实现 STM32 最小系统与 FPGA 开发板之间的通信和数据传输。USART 是一个全双工通用同步/异步串行收发模块,作为一种应用最广泛和高度灵活的通信总线,是硬件间最为常用的串行通信方式。USART 支持同步双向通信,只需 TXD、RXD 2 根信号线即可完成。需要注意的是,硬件设计为了使系统达到预期的控制效果,只需要将 STM32 的数据单向传输给 FPGA,因此只需要一根数据发送信号线 TXD 和一根共地线 GND,来实现 STM32 与 FPGA 开发板间的通信。

2.3 DA 数模转换模块

DA 输出模块作为控制器中的一部分,用来将数字信号转换成模拟信号,该模块选用 ANALOG DEVICES 公司的双通道 AN9767。该模块主要由 AD9767、低通滤波、第一级运放和第二级运放等 4 部分组成,其数模转换原理如图 3 所示。

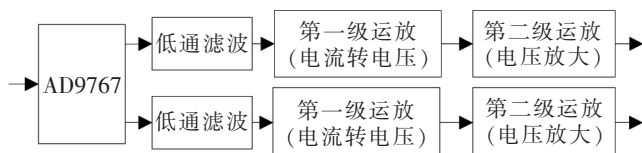


图 3 DA 数模转换原理

低通滤波电路可将 AD9767 输出的 2 通道信号首先进行滤波,以减少外界对其的干扰影响,滤波后的电流信号经过第一级运放和第二级运放,来达到电流信号转换成放大的电压信号,最终输出的模拟信号电压范围在 $-5 \sim +5$ V 之间。其中,第一级运放可将电流转换成 $-1 \sim +1$ V 电压,第二级运放可将 $-1 \sim +1$ V 的电压放大来达到幅值增大的目的,也可通过在调整板上旋转可调电阻来实现幅值变化这一过程。

3 系统软件设计

主动声浪系统软件设计分为 STM32 程序设计和 FPGA 程序设计 2 部分。使用 C 语言在 Keil uVision5 开发环境中完成 STM32 程序编写工作,使用硬件描述语言 Verilog HDL 在 ISE Design Suite 14.4 开发环境中完成 FPGA 程序编写工作。

3.1 STM32 程序设计

基于 STM32 的 CAN 和 USART 通信硬件连接在系统硬件电路设计部分进行了详细的介绍,这里对 STM32 的程序设计进行介绍,程序设计采用模块化思想完成。

(1)CAN 通信模块程序设计。CAN 通信模块的程序通过硬件电路完成与汽车 CAN 总线通信,CAN 通信是控制器能否正常运行的前提条件。CAN 通信模块程序流程图如图 4 所示。

通信模块程序中需要对 CAN 的工作方式进行配置,其中波特率的配置最为重要。CAN 通信波特率计算公式为

$$\text{Baud Rate} = \frac{f_{ck}}{(t_{sjw} + t_{bs1} + t_{bs2}) \text{prescaler}} \quad (1)$$

式中, f_{ck} 为 APB 总线时钟频率; t_{bs1} 、 t_{bs2} 分别为时间段 1 和时间段 2 的时间单元; t_{sjw} 为重新同步跳跃时间单元; prescaler 为波特率分频器系数。

在实际的 CAN 通信过程中,电动汽车 CAN 总线波特率为 500 kbps。由于 CAN 总线基于相同波特率进行通信,其通信接口挂载在 APB1 时钟总线上,其频率为 36 MHz,在式(1)中将 t_{bs1} 、 t_{bs2} 、 t_{sjw} 、prescaler 项目参数分别设置为 1、3、2、12,即可得到匹配的波特率。

(2)数据处理模块程序设计。数据处理模块接收并处理来自 CAN 总线数据,bxCAN 提供可配置的标识符过滤器组,通过软件编程设计,对接收到的数据帧进行标识符匹配过滤的配置,在引脚收到的报文

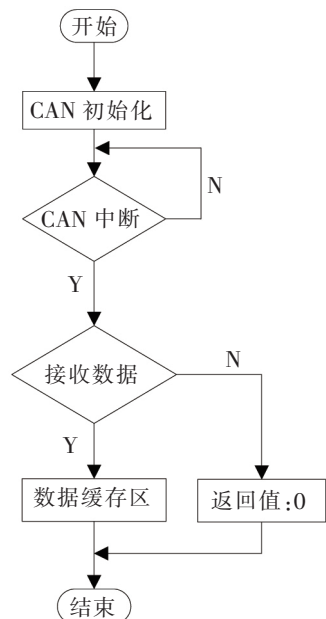


图 4 CAN 通信模块程序流程图

中过滤掉不需要的报文,而与过滤器匹配的报文会被放入 FIFO 缓存。对于电动汽车而言,电机转速和车速的比值始终为一个常量,因此在设计中将车速和油门踏板开度 2 个参数标识符配置,匹配的数据帧作为 RPM 和 APS 变量向 FPGA 的发送数据信号。数据处理模块程序流程图如图 5 所示。

(3)USART 通信模块程序设计。USART 通信模块程序流程如图 6 所示,USART 通信模块程序将数据处理后的参数通过 USART 传输给 FPGA,来完成数据发送。与 CAN 通信同理,硬件之间的 USART 通信也是根据相同波特率进行通信,STM32 串口波特率通过 USART_BRR 进行配置,USART_BRR 的前 4 位用于表示小数,后 12 位用于表示整数,波特率寄存器支持分数设置,以提高精确度。波特率计算公式为

$$TX/RX \text{ Baud} = \frac{f_{ck}}{16 \text{USARTDIV}} \quad (2)$$

式中, f_{ck} 为外设的时钟频率;USARTDIV 是一个无符号的定点数,表示对时钟频率进行分频。

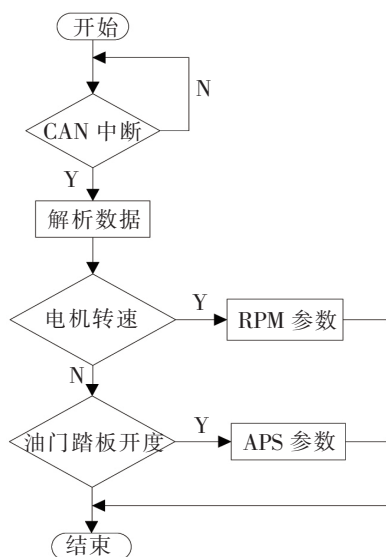


图 5 数据处理模块程序流程图

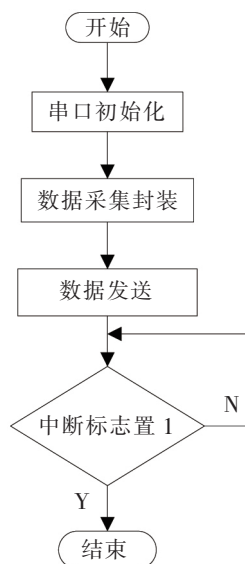


图 6 USART 通信模块程序流程图

设计的 USART 挂载在 APB2 时钟总线上,其频率为 72 MHz,波特率设置为 115 200 bps,由式(2)计算得到 USARTDIV 的值为 39.0625,赋值给 USART_BRR 寄存器。

3.2 FPGA 程序设计

FPGA 采用自顶向下的设计方法,利用软件编程,通过综合、逻辑映射、布局布线,将逻辑网表配置到具体的 FPGA 芯片上。FPGA 程序设计主要包括 FPGA 与 STM32 通信程序和声音样本合成算法程序。FPGA 与 STM32 通信模块程序流程如图 7 所示。FPGA 接收来自 STM32 的通信数据,对声音样本库中的声音样本进行读取,声音样本合成算法程序根据读取的声音样本实时合成处理。

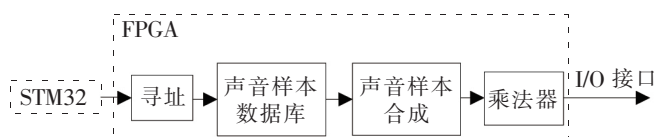


图 7 FPGA 与 STM32 通信模块程序流程图

3.2.1 FPGA 与 STM32 通信模块程序

FPGA 程序基于 USART 串口与 STM32 通信,USART 通信的功能是接收 STM32 发送的 RPM 和 APS 参数数据。为保证通信协议相同,USART 通信的两端设定相同的波特率即 115 200 bps。利用 RPM 参数对声音样本数据库进行寻址,读出相应的声音样本,APS 参数来对该样本声音的幅值进行修正。

3.2.2 声音样本合成模块程序

声音样本合成模块程序基于声音样本的在线时域同步叠加合成,而声音样本的制作则是通过对采集原始发动机声音信号离线分解来完成。

发动机声音具有周期性非正弦特性,因此发动机声音的分解利用此特性进行展开分析^[11]。对于四冲程发动机加速声音而言,主阶次频率

$$f_e = \frac{n_e}{2 \times 60} \times N_c \quad (3)$$

式中, n_e 为发动机每分钟转速; N_c 为发动机气缸数量。

在转速不变时,连续时间信号 t 的发动机声音模型表达式为

$$x(t) = \sum_{i=1}^k A_i(t) \sin[2\pi f_i t + \varphi_i(t)] + \omega_i(n) \quad (4)$$

式中, $A_i(t)$ 和 $\varphi_i(t)$ 分别为 i 阶次谐波幅值和初相位; $\omega_i(n)$ 为 i 阶次附带的随机信号成分。通常情况下, $k = N_c/2$ 对应的阶次谐波能量最大,即主阶次对应的谐波。

四冲程发动机曲轴每转 1 圈,对应的主谐波波形有 m 个过零点,每个气缸完成一次点火为一个周期,共计有 $2m$ 个过零点。因此,声音样本截取的长度为发动机 2 个周期数据的倍数加上固定声音叠加区数据之和,并对每个声音样本依次赋予对应声音频率值和电机转速值,通过此操作可实现每个声音样本具有相同的初始相位以及相同的重合叠加区。将上述分解步骤得到的各个声音样本按主阶次频率由低到高依次排列,制作而成声音样本数据库,存储在主动声浪控制器的 FLASH 中,以此为基础进行发动机声音的合成。

声音样本合成程序将读取声音样本库中的样本声音实在线合成,来达到发动机声音合成的效果,声音样本合成过程如图 8 所示。

由图 8 可知,声音样本 1 和声音样本 2 分别为声音样本库中的 2 个随机声音样本, Δ 为每个声音样本的固定叠加区域。将此固定叠加区域设置为 512 个数据点,目的是实现加权平滑过渡,保证声音合成过程中的连续稳定。

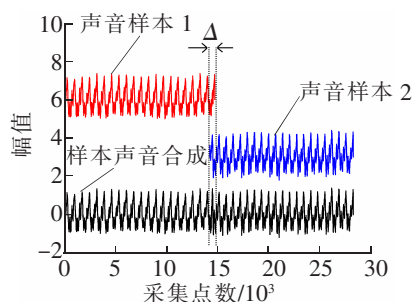


图8 声音样本合成示意图

4 实车试验

为了验证主动声浪控制器的声音合成效果,在国产某型 SUV 电动汽车上进行实车试验。原始声音数据采集工作在中国汽车技术研究中心整车半消声实验室中进行,某型四缸四冲程发动机转速从 1 000 r/min 到 5 000 r/min 缓加速,加速过程时间为 110 s,采集到的发动机声压波形、发动机转速与加速时间曲线如图 9 所示。对采集的声音信号离线分解,将其制作成声音样本数据库,并存储在主动声浪控制器的 FLASH 中。

搭建主动声浪控制器并将汽车 CAN 总线和扬声器系统通过线束与控制器相连接,形成电动汽车车内主动声浪系统,麦克风与主动声浪控制器的安装位置如图 10 所示。

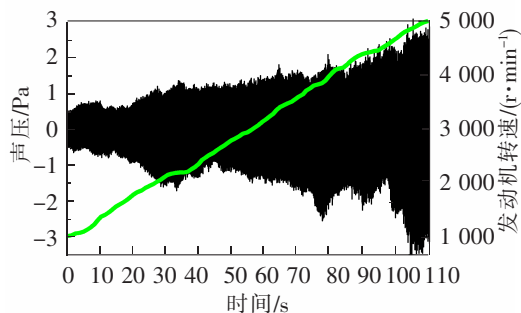


图9 采集的发动机声压波形、发动机转速与加速时间曲线



图10 麦克风与主动声浪控制器实车安装

为达到车内声音的动态合成效果,制定了 20%、40%、60%、80% 4 种油门踏板开度随车速变化的控

制方案,通过实车试验分别得到了不同油门踏板开度下车内合成发动机声音的频谱瀑布图,见图 11。

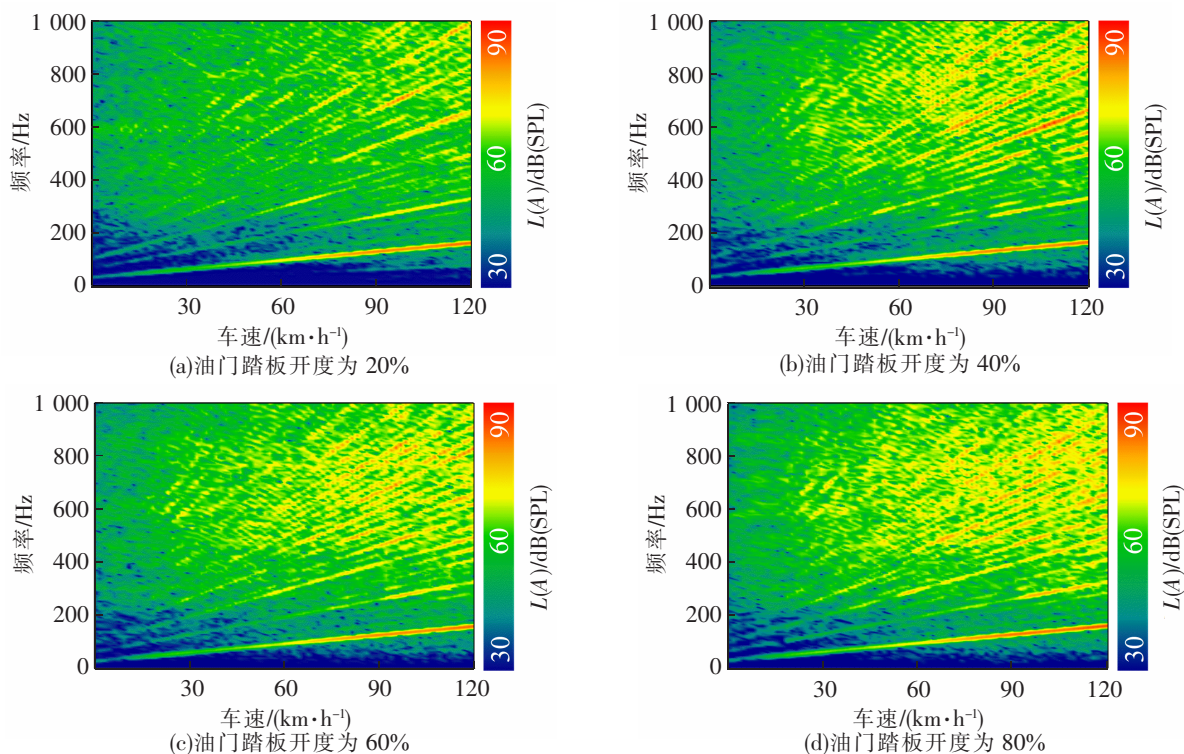


图 11 不同油门踏板开度下车内声音频谱瀑布图

从图 11 可以看出,在 20%、40%、60%、80% 4 种不同油门踏板开度下,随着车速在 0~120 km/h 的范围内逐渐增加,车内模拟声音的声压级也逐渐增强,且模拟声音清晰还原了原始发动机声音丰富的阶次成分,并存在明显的主阶次成分;在车速不变的情况下,对比油门踏板开度分别在 20%、40%、60%、80% 处时可知,车内各个阶次声压级随着踏板开度的增加而增强,满足汽车行驶时根据车速和油门踏板开度下发出动态声音特性的要求。实车试验结果表明,所设计的主动声浪控制器能够较好地模拟电动汽车在行驶状态下高度匹配的传统发动机声浪。

在实际的电动汽车驾驶过程中,车速与油门踏板开度是实时变化的,通过车速对声音样本数据库中的声音样本进行实时读取,油门踏板开度对读取的声音样本幅值进行调整,结合时域同步叠加方法对声音样本进行合成,来模拟符合汽车实时运动状态的发动机声音。

5 结论

本文设计了一种基于 STM32 最小系统和 FPGA 开发板为核心的电动汽车车内主动声浪控制系统,具体包括系统的体系架构、硬件设计和软件开发;研发制作了主动声浪控制器原理样机,并进行了实车试验,得到以下结论:

- (1) 根据 CAN 通信实现对汽车车速和油门踏板开度等控制信号的实时读取,利用 STM32 作为控制核心,FPGA 的高速数据处理能力来对声音样本进行合成,通过车载扬声器系统对合成声音播放。
- (2) 研制的主动声浪控制系统原理样机完成的声音模拟,具有良好的发动机声音的线性阶次能量分布特性,且满足车内声浪动态模拟的控制需求。
- (3) 本文为电动汽车车内主动声音的模拟控制提供了一种解决思路和方法,还可以应用到驾驶模拟器、虚拟现实平台等相关领域的开发中。

参 考 文 献

- [1]《中国公路学报》编辑部. 中国汽车工程学术研究综述·2017[J]. 中国公路学报, 2017, 30(6): 1-197.
- [2]Fortino A, Eckstein L, Viehöfer J, et al. Acoustic vehicle alerting systems (AVAS)-regulations, realization and sound design challenges[J]. SAE International Journal of Passenger Cars-Mechanical Systems, 2016, 9(3): 995-1003.
- [3]Jagla J, Maillard J, Martin N, et al. Sample-based engine noise synthesis using an enhanced pitch-synchronous overlap-and-add method[J]. Journal of the Acoustical Society of America, 2012, 132(5): 3098-3108.
- [4]Engler O, Hofmann M, Mikus R, et al. Mercedes-benz SLS AMG coupé electric drive NVH development and sound design of an electric sports car[C]. Berlin: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2015.
- [5]Park D C, Jo E S, Hong S, et al. Development of personalized engine sound system using active sound design technology [J]. Applied Optics, 2015, 8(3): 4571-4578.
- [6]Maunder M, Grant P, Mawdsley D. System for realistic augmentation of sporty engine sound quality [C]//8th International Styrian Noise, Vibration & Harshness Congress; the European Automotive Noise Conference. [S. l. : s. n.], 2016.
- [7]Park H W, Bae M J. Virtual engine sound synthesis of eco-friendly vehicle [J]. Journal of Engineering & Applied Sciences, 2018, 13(2): 513-517.
- [8]Jung I, Lee D, Kim W, et al. Engine sound quality development using engine vibration[C]//10th International Styrian Noise, Vibration & Harshness Congress; the European Automotive Noise Conference. [S. l. : s. n.], 2018.
- [9]陈成, 朱廉洁, 陆楠. 运动感排气声合成技术在纯电动汽车上的应用[J]. 汽车技术, 2020(6): 13-16.
- [10]佚名. 国务院办公厅印发《新能源汽车产业发展规划(2021—2035 年)》[J]. 汽车零部件, 2020(12): 33.
- [11]Amman S A, Das M. An efficient technique for modeling and synthesis of automotive engine sounds[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2002, 48(1): 225-234.

Design of Active Sound Controller for Electric Vehicle Based on STM32 and FPGA

Zhang Xian¹, Su Xin², Shi Yan², Shi Chenlu², Wu Junjie²

(1. School of Mechanical Engineering, Shijiazhuang Tiedao University, Shijiazhuang 050043, China;

2. China Auto Research (Tianjin) Automotive Engineering Research Institute Co. Ltd., Tianjin 300300, China)

Abstract: An active sound controller based on STM32 and FPGA dual CPU was designed for electric vehicles. First, the active sound control system architecture was established, which mainly included CAN signal input, controller, and signal output; Then, the hardware control circuit design of the controller was introduced in detail, including CAN communication module, STM32 and FPGA communication module, DA signal conversion module, and software control programs were written for each functional module of the controller; Finally, the hardware modules was formed to build a prototype active sound systems and vehicle testing. The test results show that the system can accurately simulate the dynamic sound of the engine and the sound order components are clear, which verifies the effectiveness and feasibility of the system.

Key words: electric car; active sound; controller; STM32; FPGA