

# 不同材质智能表面总成设计对比分析

李征<sup>1,2</sup> 陈光<sup>1,2</sup> 陈昕<sup>1,2</sup>

(1. 中国第一汽车股份有限公司研发总院, 长春 130013; 2. 高端汽车集成与控制全国重点实验室, 长春 130013)

【欢迎引用】李征, 陈光, 陈昕. 不同材质智能表面总成设计对比分析[J]. 汽车文摘, 2024(7): 51-57.

【Cite this paper】LI Z, CHEN G, CHEN X. Comparative Analysis on Intelligent Surface Assembly Design with Different Materials[J]. Automotive Digest (Chinese), 2024(7): 51-57.

【摘要】目前广泛应用的智能表面产品绝大多数为塑料单一材质,且只集成了电容触控和振动反馈技术。为了满足用户对外观设计、数字化体验的需求,采用电容触摸、声音反馈、振动反馈、压力感应等多项技术,通过表面覆盖塑料、真木、金属、织物4种材质,探索多种振源手感、多种材质表面性能,旨在提升智能座舱设计的材质丰富性和用户体验。

关键词: 智能表面; 触控技术; 振动反馈; 压力感应

中图分类号: U463.66 文献标志码: A DOI: 10.19822/j.cnki.1671-6329.20220298

## Comparative Analysis on Intelligent Surface Assembly Design with Different Materials

Li Zheng<sup>1,2</sup>, Chen Guang<sup>1,2</sup>, Chen Xin<sup>1,2</sup>

(1. Global R&D Center, China FAW Corporation Limited, Changchun 130013; 2. National Key Laboratory of Advanced Vehicle Integration and Control, Changchun 130013)

【Abstract】At present, the vast majority of intelligent surface products are made of a single material: plastic, which typically integrated capacitive touch and vibration feedback technologies. In order to meet the needs of users for appearance design and digital experience, various technologies such as capacitive touch, sound feedback, vibration feedback, and pressure sensing are utilized. By covering the surface with 4 materials: plastic, wood, metal and fabric, this paper explores various tactile sensations from vibration sources and surface properties of materials. This exploration aims to enhance the material richness and user experience in intelligent cockpit design.

Key words: Intelligent surfaces, Touching technology, Vibration feedback, Pressure sensing

## 0 引言

在汽车智能化、网联化背景下,智能表面总成作为一款集功能性与智能化于一体的表面处理技术是汽车内饰的重要发展方向之一<sup>[1]</sup>。在智能座舱设计领域,减少多余的按钮和开关设计,可以使座舱设计更为简洁和智能。智能表面产品实现了从物理按键到虚拟按键的跨越,其采用隐藏式字符与图标的一体无缝外观,兼顾物理与数字体验,拥有更佳的防尘、防水性能和更简单的结构。

目前国内外研发机构已经对电容触控技术<sup>[1]</sup>、高分子材料<sup>[2]</sup>、织物材料<sup>[3]</sup>、振动反馈技术<sup>[4]</sup>、压力感应技术<sup>[5-13]</sup>等进行了较深入的研究,部分成果已量产应用。但上述研究均局限于单一技术,少数研究集成了2~4项相关技术应用,其在表面材质的丰富性和用户实际

操作体验上还存在一定问题。首先,表面覆盖材料绝大多数仍以塑料材质为主,通过表面渲染为仿木、仿石等定制花纹实现“材质多样”的效果,仅宝马iX车型使用了真木材质的智能表面产品。其次,虽然应用振动反馈来提供接近实体按键的操作手感,并辅以压力感应来提升操作准确性,但目前国内应用振动反馈和压力感应的产品不多,实车体验仍存在一定概率的误动作或操作失败。

为了探索上述问题的解决方案,本文结合电容触控、振动反馈、压力感应等技术,提供一种融合智能表面结构、硬件框架、软件框架的设计方案,通过覆盖真木、金属、织物等智能材料,在提升表面材料丰富性的同时,也分析上述材料在显示特性上的不同,并搭载一种根据用户需求个性化定义的压力阈值控制逻辑,旨在提升不同使用场景的准确性。

## 1 功能需求

### 1.1 智能表面演示样件

智能表面总成演示样件按照定义好的功能,提供声音反馈、振动反馈及工作指示灯光反馈,按键布局如图1所示。通过改变其表面包覆材料,主要用于对比塑料、真木、金属和织物4种材质的显示特性。

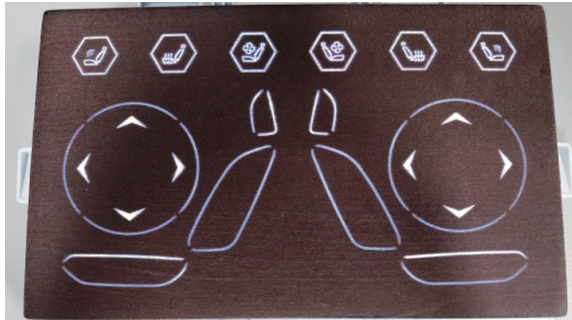


图1 智能表面演示样件按键布局

#### 1.1.1 功能定义

本文所示智能表面总成演示样件旨在实现汽车座椅通风调节、座椅加热调节、座椅按摩调节和座椅姿态调节。其中加热、通风功能共4个挡位(0~3挡);座椅按摩功能为2个挡位,通过指示灯的亮、灭来指示功能开或关;座椅调节区域键为3选1的选择键,可分别控制头枕上下、靠背角度及坐垫前后移动,当选择对应的功能时,上下左右按键通过背光亮、灭来提示用户操作。

#### 1.1.2 声音反馈

智能表面演示样件内置扬声器并在芯片内写入音源实现按键音发声,为用户提供声音反馈。每次识别到操作动作且触发成功后,驱动内置扬声器发出按键音。

#### 1.1.3 振动反馈

触觉反馈技术通过压力、振动或其他激励方法实现触觉感知<sup>[3]</sup>。与视觉、听觉、嗅觉和味觉相比,触觉是最复杂的感知方式。为了给用户直接提供触觉反馈,增加振动反馈是业内解决此类问题的常见方案。振动反馈提供类似操作机械按键手感,在用户操作成功后用于提醒用户此次操作成功。在任意按键触摸成功后给出振动反馈,且不同区域的振动手感应一致。

由于振动电动机有3个可选振动方向( $X$ 、 $Y$ 、 $Z$ ),因而需要确定好振动方向,以提供最佳的振动手感。在仿真模拟时,当振动触觉发生在指腹表面时,振动感知能力最强。1阶振动模态输出是该结构刚度及边

界约束条件下的最大位移平行手指面输出,故建议选择 $Z$ 轴方向振动输出的振子。

#### 1.1.4 灯光控制

选用三色发光二极管<sup>[14]</sup>,可实现253色显示,所有按键背光颜色为白色。加热、通风2种按键工作指示灯分低、中、高3种亮度进行区分;第一次操作按最高亮度显示,之后每触摸一次,灯光亮度减弱1挡,直至恢复到0挡,以此往复循环;座椅区域选择键在选中时更换颜色,取消选中后颜色恢复为默认颜色;方向调节键在被手指触摸操作时,可调节方向字符以高亮显示,从而提示用户操作成功,手指离开字符恢复默认亮度。

### 1.2 智能表面展台样件

通过与电脑上位机连接,实现4种振源与4种压力阈值搭配方案,提供多种压力及多种振源手感的实际体验。

#### 1.2.1 功能定义

智能表面展台实现振源选择、振源振幅、振源频率及压力阈值设置的功能,并在软件界面体现压力、振源、电容等采样信息。

#### 1.2.2 振源选择

振源可选择音圈电动机、转子电动机<sup>[15]</sup>、线性电动机<sup>[16]</sup>和压电陶瓷电动机,并通过操作来体验4种振源不同手感,供后续产品振源选择及振动手感定义参考。

#### 1.2.3 压力感应

压力传感器的工作原理是一种信号转换机制<sup>[5-6]</sup>,通过将外部压力转换为电信号实现压力检测。压力传感器分为3类:压电电阻式<sup>[7-8]</sup>、电容式<sup>[9-11]</sup>和压电式<sup>[12]</sup>。压电传感器产生的电荷与施加的力、压力或变形成正比<sup>[13]</sup>。本文通过压力-电压的标定,实现4种压力(2 N、4 N、6 N、8 N)可调方案,尽可能地覆盖汽车领域内操纵件常见的压力值范围,4种振源标定的压力曲线和电压曲线如表1、图2所示。

表1 压力与电压标定关系

压力 /N	音圈电动机 /mV	转子电动机 /mV	线性电动机 /mV	压电陶瓷电动机/mV
0	120	130	1 100	1 700
2	400	500	1 400	1 800
4	2 000	1 700	2 000	2 000
6	3 300	2 700	2 600	2 100
8	4 095	3 900	3 200	2 250

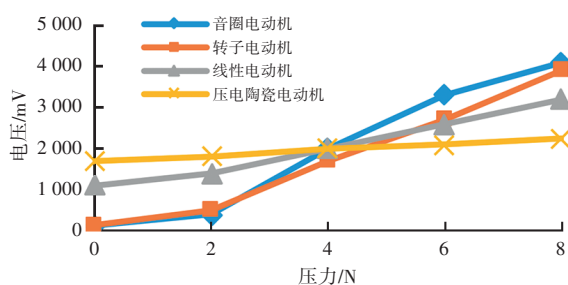


图2 压力与电压标定曲线

### 1.2.4 显示要求

智能表面展台样件表面人机界面(Human-Machine Interface, HMI)使用红旗设计方案,智能表面展台样件与电脑上位机的通用串行总线(Universal Serial Bus, USB)串口连接,实时设置压力阈值、选择振源、调节振源振幅与频率,并在电脑上位机实时显示电容采样值和压力采样值(见图3)。

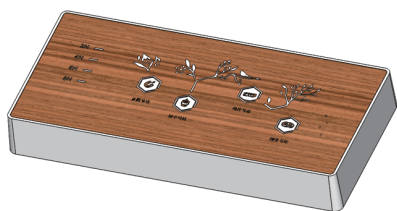


图3 智能表面展台样件

## 2 方案设计

### 2.1 系统设计框图

智能表面系统设计框图见图4。通过微控制单元(Micro Controller Unit, MCU)对触摸电容检测、振动电动机驱动、扬声器驱动、发光二极管(Light Emitting Diode, LED)灯光驱动等模组进行控制,实现控制器局域网络(Controller Area Network, CAN)总线信号收发、电机驱动座椅动作的功能。

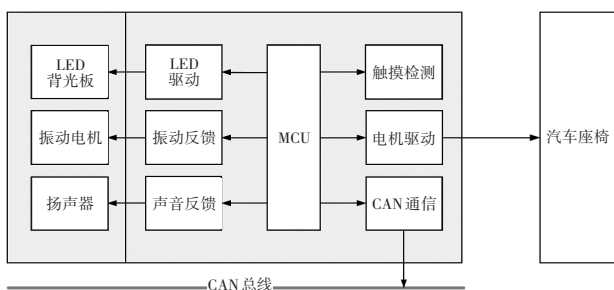


图4 系统设计框图

### 2.2 面板设计

#### 2.2.1 塑料材质

材料为聚碳酸酯(Polycarbonate, PC)+丙烯腈-丁二烯-苯乙烯共聚物(Acrylonitrile-Butadiene-Styrene, ABS),采用双层聚碳酸酯面板,上层为半透黑色PC

(0.6 mm),下层为整体透明壳体,在下层内侧采用喷黑漆镭雕图标方式,图标可显示不同亮度和不同颜色,每颗LED单独可控,对比效果见图5。



图5 塑料材质点亮前后对比

#### 2.2.2 真木材质

材料为PC+ABS+木纹纸,面板采用PC面板+木纹纸,上层为木纹纸(0.1 mm),下层为整体透明PC壳体,在下层内侧采用喷黑漆镭雕图标方式,图标可显示不同亮度和不同颜色,每颗LED单独可控,对比效果见图6。

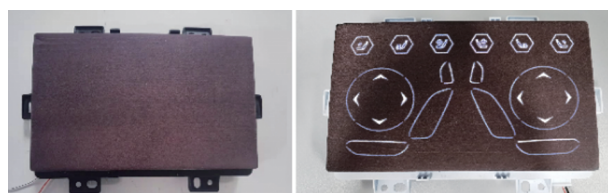


图6 真木材质点亮前后对比

#### 2.2.3 织物材质

材料为PC+ABS+透明硅胶+织物材料,上层为编织物(0.2 mm),中层为透明硅胶,下层为整体透明壳体,在下层外侧采用喷漆镭雕图标方式,图标可显示不同亮度和不同颜色,每颗LED单独可控,对比效果见图7。

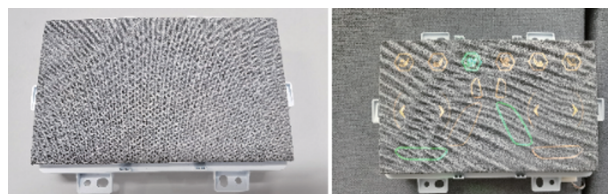


图7 织物材质点亮前后对比

#### 2.2.4 金属材质

材料为PC+ABS+硅胶+金属,面板采用PC+金属面板,上层为金属面板+金属键帽+透明硅胶(0.5 mm),下层为整体透明壳体,金属键帽上镂刻图标,图标可显示不同亮度和不同颜色,每颗LED单独可控,对比效果见图8。

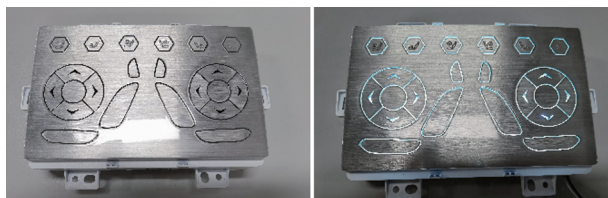


图8 金属材质点亮前后对比

### 2.2.5 总结

通过对塑料、真木、金属和织物4种材料显示效果进行对比分析,结果显示:塑料、真木、金属和织

物4种材质在外观表现、显示亮度2个维度上,塑料材质最佳,金属与真木材质次之,织物效果较差,见表2。

表2 材质性能对比

性能	塑料	真木	金属	织物
外观表现	厚度≤0.05 mm,字符可隐藏或外显,字符显示清晰无光晕,可覆膜成仿木等材质,可在半径≥1 mm的圆角进行包覆	0.2 mm<厚度≤0.5 mm,字符可隐藏或外显,字符有≤1 mm的光晕,可在半径≥3 mm的圆角进行包覆	厚度0.5 mm,字符必须镂空字符或微孔,不可隐藏,无光晕,无法在小圆角处进行包覆	厚度>0.5 mm,必须增加基布才能保证耐拉伸性,织物内纤维物质对字符的清晰度和完整度有较大影响,光晕>2 mm,可在半径≥1 mm的圆角进行包覆
显示亮度/cd·m <sup>-2</sup>	>200	>100	>200	<50

### 2.3 结构设计

面板以透明塑料作为基材,外面包覆塑料膜片、织物,木皮或金属材质。感应电极和压力检测电路粘接在面板背面,通过柔性线路板(Flexible Printed Circuit, FPC)连接到主控电路板,按键位置做镂空处理,并增加导光柱及散光板,实现灯光性能要求。面板与壳体采用柔性硅胶垫连接,柔性硅胶垫采用硬度为40~45HA的透明硅胶,在受到压力后可轻微变形,减少刚性连接吸能。主控电路板实现灯光控制、触控信号检测、压力检测、振动电机控制及通信等功能。智能表面结构剖视图见图9。

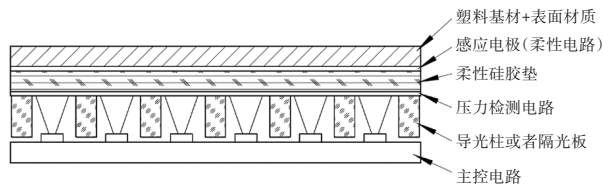
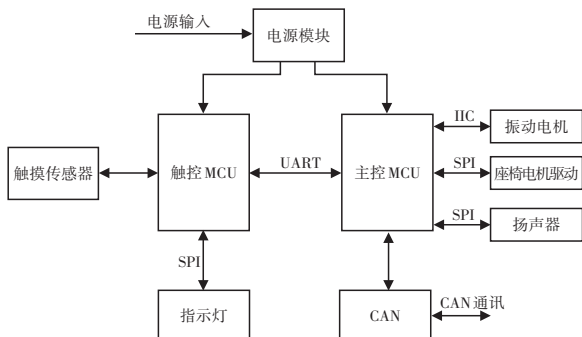


图9 智能表面结构剖视图

### 2.4 硬件电路设计

在硬件电路设计方案方面,电容检测芯片负责完成电容信号的采集监控以及253色指示灯的驱动;MCU负责完成振动电机驱动、座椅电机继电器驱动、扬声器驱动及CAN通信的功能。硬件原理框图见图10。



注:通用异步收发器(Universal Asynchronous Receiver/Transmitter, UART) 集成电路总线(Integrated Circuit, IIC) 串行外围设备接口(Serial Peripheral Interface, SPI)

图10 硬件原理框图

### 2.5 软件设计

软件设计采用PSOC Creator和KEIL作为开发平台,开发内容包括电容检测驱动、防误触算法、振动电机驱动、声音反馈驱动、灯光控制驱动和CAN通信驱动等。软件设计框架见表3。

表3 软件设计框架

应用层	初始化、电机控制、LED控制、故障检测、CAN通信、音频播放
数据层	数据采集、数据滤波、数据缓存
引导层	CAN Bootloader
驱动层	CAN驱动、电容驱动、电机驱动、LED驱动、音频驱动

触控板软件部分分为驱动层、应用层和设备层。驱动层包括变化数据捕获(Charge Data Capture, CDC)、LED、电动机、音频解码等驱动;应用层包括电容应用模块、LED模块、电动机模块、音频模块等应用模块,分别与相应驱动一一对应;设备层包括外围受控设备。驱动层负责采集电容数据和控制外围硬件;数据分析模块负责对来自驱动层的电容数据进行分析,有效的分析结果传输给电容应用模块进行后续处理,无效的结果直接丢弃;电容应用模块则依据来自分析模块的结果,通过LED、电动机等模块,对外围设备进行控制。座椅加热、通风、按摩软件控制流程见图11,座椅控制功能软件控制流程见图12,触控软件控制流程见图13,压力感应软件控制流程见图14,振动反馈软件控制流程见图15。

### 2.6 DEMO 振源选型

根据建模数据以及产品质量(600 g)的条件,分析对比音圈电动机、转子电动机、线性电动机、压电陶瓷电动机的优缺点可得出以下结论:(1)音圈电动机响应最慢(约100 ms),输出加速度为1~2 g;(2)转子电动机提供波形粗糙且响应慢(>50 ms),输出加速度约1 g;(3)线性电动机响应相对较快(约30 ms),输出加速度

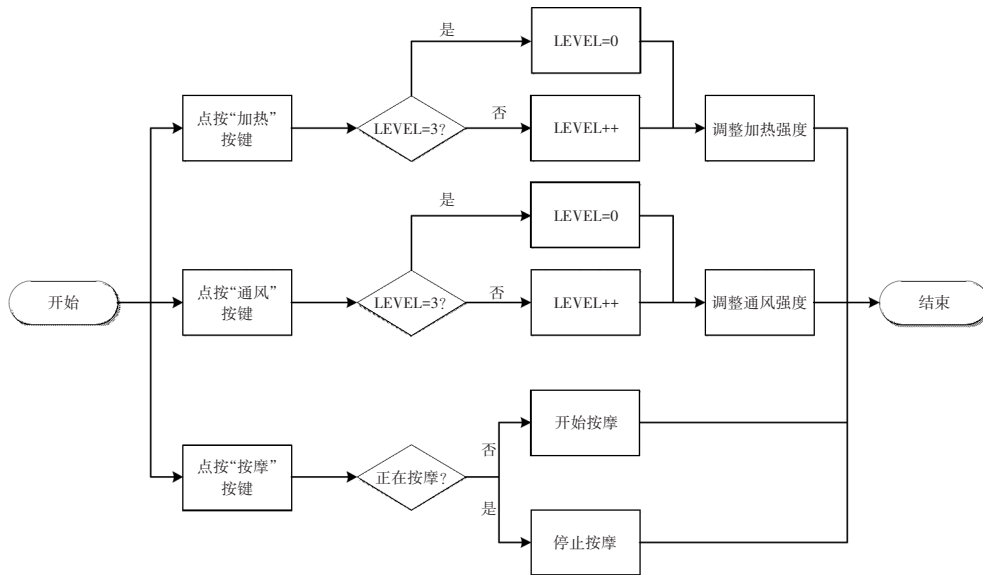


图 11 加热、通风、按摩控制流程

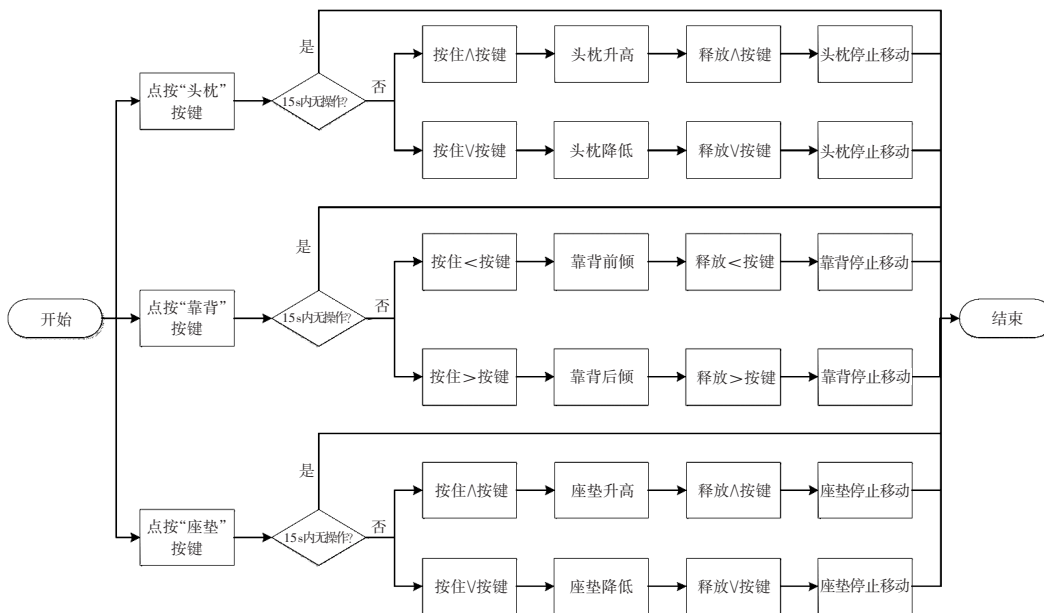


图 12 座椅姿态调节流程

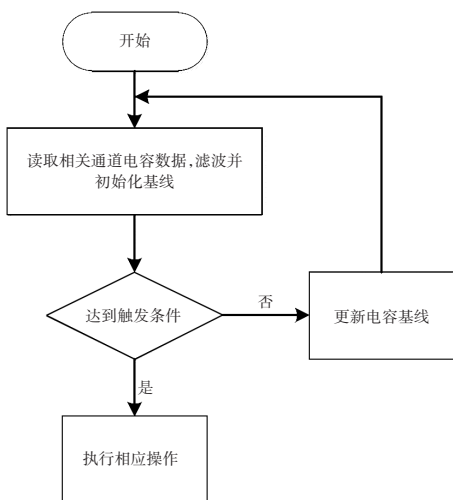
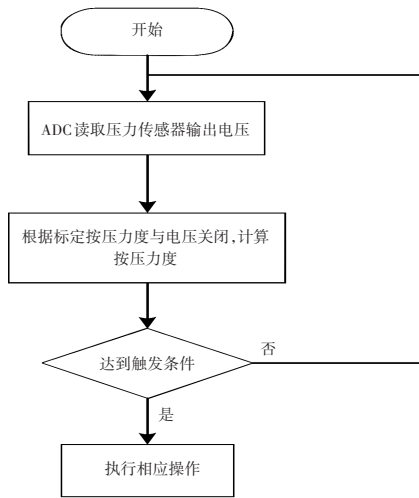


图 13 触控软件控制流程

一般约为  $2g$ ; (4) 压电陶瓷电动机一般输出加速度为  $3 \sim 5g$ , 同时响应快速 ( $0.5ms$ )。从振动加速度、噪声、响应时间、驱动电压和经济性方面综合考虑, 对于满足汽车产品基本需求, 线性电动机和转子电动机是综合性更佳的选择, 音圈电动机和压电陶瓷电动机次之, 具体对比见表 4。

通过对比, 压电陶瓷电动机在加速度和响应速度上较其余电动机有明显优势, 这意味着可以输出更高分辨率的包络波形同时输出强度更大, 尽管驱动压电陶瓷电动机成本较高且需要约  $120V$  高压驱动, 但是现在的集成泵升电压的驱动芯片可以为电路设计提供便利。综合上述因素, 为了达到最佳体验效果决定选择压电陶瓷电动机做为振源。



注:模拟数字转换器(Analog to Digital Converter, ADC)

图 14 压力感应软件控制流程

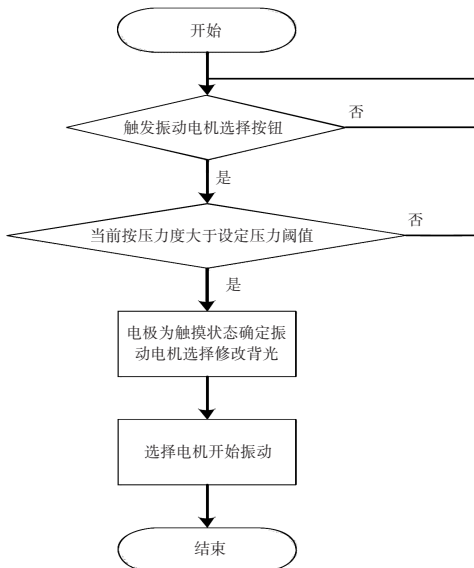


图 15 振动反馈软件控制流程

表 4 电动机性能对比

	音圈电动机	转子电动机	线性电动机	压电陶瓷电动机
振动加速度/g	1~2	1~2	1~2	3~5
噪声	大	较大	中等	安静
响应时间/ms	100.0	50.0	30.0	0.5
驱动电压/V	8.1	12.0	1.8~3.0	120.0
经济性	好	好	中等	较差

### 2.7 按键声音反馈设计

按键声音反馈是指手指触发按键操作时,通过内置扬声器提供声音反馈,提醒操作者此次操作成功。MCU把内存中存放的音频数据传输给音频解码芯片进行解码,解码后的数据经过功率放大器进行放大,最终通过扬声器播放。

### 3 结束语

通过综合应用电容触控技术、振动反馈技术,使用塑料、真木、金属、织物4种材料,提供一种多功能、多材质、防误触的综合性产品技术解决方案。

在振动反馈设计方面,通过多种电动机的参数性能的设置应用,直观展示了不同电动机的反馈手感,为后续产品在成本与性能的均衡选型上提供依据。

在压力阈值设计方面,通过4种压力感应阈值的切换,来应对更丰富的用户场景。如转向盘开关频繁使用且位于人手容易触碰区域内,须防止误操作,则定义2 N或4 N的操作压力;而发动机起动开关需要有明确操作目的性,且对车辆安全使用有潜在影响,则定义8 N的操作压力;对于常规使用情况,可以让用户在2 N、4 N、6 N间自定义操作压力。

在材料应用方面,通过集成塑料、真木、金属和织物4种材料,探索在实车环境下的4种材料的使用表现。在成熟度、灯光亮度、材质效果3个维度上进行对比分析,塑料综合表现最优,无明显优缺点;金属材质在字符不可隐藏和电磁兼容(Electro Magnetic Compatibility, EMC)性能方面存在劣势;真木材料存在字符边界发散及耐久性问题;织物材料存在无法体现精细符号、不耐脏、不耐磨、亮度低等问题。

目前,蔚来、小鹏、智己、哪吒、荣威、奥迪、宝马、奔驰等国内外各整车企业均应用了智能表面技术。当前塑料材质智能表面技术应用日益广泛,未来真木、金属、织物等材质智能表面技术成为发展趋势,为智能表面产品提供更丰富的内饰选择。由于本文未进行试验验证相关工作,故除塑料材质外,真木、金属和织物材质的真实耐久水平仍需进行试验验证。

#### 参考文献

- [1] 赵胜. 汽车智能内饰传感器系统[J]. 汽车电器, 2020(8): 3.
- [2] 方超, 赵欢, 梁成, 等. 智能高分子材料在汽车上的应用展望[J]. 汽车文摘, 2020(10): 16-25.
- [3] OGAWA D, YEM V, HACHISU T, et al. Multiple Texture Button by Adding Haptic Vibration and Displacement Sensing to the Physical Button[C]// SA '15: SIGGRAPH Asia 2015 Haptic Media And Contents, 2015: 1-2.
- [4] OGUNLEYE O O, SAKAI H, ISHII Y, et al. Investigation of the Sensing Mechanism of Dual-Gate Low-Voltage Organic Transistor Based Pressure Sensor[J]. Organic Electronics, 2019, 75(12): 105431.

- [5] RUTH S, FEIG V R, TRAN H, et al. Microengineering Pressure Sensor Active Layers for Improved Performance[J]. *Advanced Functional Materials*, 2020, 30(39): 2003491.
- [6] LIU W J, LIU N S, YUE Y, et al. Piezoresistive Pressure Sensor Based on Synergistical Innerconnect Polyvinyl Alcohol Nanowires/Wrinkled Graphene Film[J]. *Small*, 2018, 14(15): 1704149.
- [7] ZHAO T T, LI T K, CHEN L L, et al. Highly Sensitive Flexible Piezoresistive Pressure Sensor Developed Using Biomimetically Textured Porous Materials[J]. *ACS applied materials & interfaces*, 2019, 11(32): 29466–29473.
- [8] GUO Z X, MO L X, DING Y, et al. Printed and Flexible Capacitive Pressure Sensor with Carbon Nanotubes based Composite Dielectric Layer[J]. *Micromachines* 2019, 10(11): 10110715.
- [9] LUO Z, DUAN J, XU H, et al. Flexible Capacitive Pressure Sensor Based on an Embedded Rib Fabric with a Bionic Sloping Petal Structure[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2021, 21(18): 20119 – 20128.
- [10] PENG S H, WU S Y, YU Y Y, et al. Multimodal Capacitive and Piezoresistive Sensor for Simultaneous Measurement of Multiple Forces[J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2020, 12(19): 22179–22190.
- [11] YANG Y, PAN H, XIE G, et al. Flexible Piezoelectric Pressure Sensor Based on Polydopamine-Modified BaTiO<sub>3</sub>/PVDF Composite Film for Human Motion Monitoring[J]. *Sensors and Actuators A Physical*, 2019, 301:111789.
- [12] MAITA F, MAIOLO L, MINOTTI A, et al. Ultraflexible Tactile Piezoelectric Sensor Based on Low-Temperature Polycrystalline Silicon Thin-Film Transistor Technology[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2015, 15(7): 3819–3826.
- [13] 周航. 手机振动电动机的结构分析和优化设计[J]. *机械设计与制造*, 2020(3): 1–4.
- [14] NAM J, YEON T, JANG G. Development of a Linear Vibration Motor with Fast Response Time for Mobile Phones[J]. *Microsystem Technologies*, 2014, 20(8–9): 1505–1510.

(责任编辑 明慧)

## 《汽车工艺与材料》投稿须知

《汽车工艺与材料》于1986年创刊,是由中国第一汽车集团有限公司主办的国内外公开发行的汽车材料与制造技术类月刊,目前已入选《中文核心期刊要目总览》(第二版)、RCCSE中国准核心学术期刊(B+)、中国核心期刊(遴选)数据库、中国学术期刊综合评价数据库、欧洲学术出版中心数据库(EuroPub)、哥白尼精选期刊数据库(ICI Journals Master List)、EBSCO International数据库。

《汽车工艺与材料》以“为中国报道汽车制造,为汽车引领工艺材料”为办刊宗旨,致力于报道以汽车轻量化技术和智能制造技术为核心的先进制造技术与材料应用技术,重点关注电动汽车蓄电池、电机、电控关键材料技术,燃料电池材料技术,高强度钢、铝镁合金、非金属材料及其成形技术,连接技术,智能装备与绿色制造等,以期通过高质量学术内容的出版和传播助推行业创新技术的交流与发展。

《汽车工艺与材料》杂志关注领先的整车及零部件企业和材料、装备等供应商,及时报道汽车行业最新的产品设计、制造、材料、加工技术、生产装备、检测技术等方面的成功案例。

主要栏目:

AT&M视界、生产现场、材料应用、生产装备、检测技术、数字化园地、行业动态等。

投稿要求:

- (1) 来稿须具有独创性并与实践相结合,文章字数最好控制在5000~8000字之内。
- (2) 来稿不能在国内、外公开杂志上发表过,请勿一稿多投。
- (3) 来稿的试验方法、试验数据、试验结论必须准确、可靠。
- (4) 来稿须包括以下项目:题名、作者姓名、作者单位、摘要(200字左右)、参考文献等。来稿采用word文档的格式。
- (5) 来稿文章格式应符合一般科技论文格式,或参考近期刊所刊登文章格式。
- (6) 文章必须附有公开发表的、体现本领域最新研究成果的参考文献,且在文中应标注文献引用处。
- (7) 本刊使用网站投稿,投稿邮箱:<http://qcgycyl.cbpt.cnki.net>,咨询电话:0431-82026054。

竭诚欢迎汽车行业及相关各界的专家学者积极向本刊投稿。