

# 基于声表面波的车辆驱动轴动态扭矩测量系统研究\*

张海涛<sup>1,2</sup> 唐敦兵<sup>1</sup> 许 芹<sup>2</sup>

(1. 南京航空航天大学机电学院, 南京 210016; 2. 安徽科技学院机械工程学院, 凤阳 233100)

**摘要:** 基于声表面波(SAW)技术,应用单端口 SAW 谐振器,设计了车辆驱动轴动态扭矩测量装置,实现车辆驱动轴扭矩无线无源实时测量。采用三点等间距对称方式布置信号收发天线,消除信号的绕射现象;以 PWM 信号控制 FET 时序通断,设计信号查询时序电路;通过差频测量方式,消除温度等因素的影响,提高了测量精度。模拟试验结果表明,测量装置所测得结果与理论模型一致,测量灵敏度约为  $1.15 \text{ kHz}/(\text{N}\cdot\text{m})$ ,为车辆驱动轴动态扭矩的测量提供了一种可行的方案。

**关键词:** 车辆驱动轴 SAW 单端口谐振器 扭矩 动态测量

**中图分类号:** U463.216<sup>+</sup>.2; U467.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2014)10-0029-05

## 引言

汽车传动轴是车辆传动系统中的关键部件,担负着变速箱与驱动桥之间的扭矩传递作用。汽车行驶过程中悬架变位,变速箱与驱动桥的相对位置发生变化,使传动轴与变速箱间存在相对位移,其承受力复杂多变。汽车在起步、减速和制动时,传动轴承受很大的扭矩,对整车性能影响极大。准确实时地随车测量传动轴的扭矩对于及时发现传动轴存在的故障和改进设计具有重要意义<sup>[1-2]</sup>。目前轴类扭矩测量方法主要有相移式、差动变压器式、应变式、感应变压器式、磁致伸缩式及激光测量等<sup>[3]</sup>,上述测量方法大多为静态测量,且需电缆对传感器供电及检测信号传输;现有无线传感器需电池供电且体积质量大,安装于车辆传动轴时由于高速转动而影响其平衡性;滑环、电磁类供电式传感器易引入干扰噪声对车辆传动轴这类旋转移动部件动态扭矩测量不适用。声表面波(SAW)传感器是近几年发展起来的一大研究热点,该类传感器精度和灵敏度高,线性度好且实现了传感器无线和无源化,非常适用于恶劣环境下旋转移动部件的扭矩测量<sup>[4]</sup>。本文在分析单端口 SAW 谐振器工作原理的基础上,采用两组 SAW 谐振器搭建差频测量方案,建立扭矩的数学模型,为避免信号盲区采用 3 点等间距传感器天线安装方式,并设计以场效应管为开关器件的信号查询

电路,通过实验验证该测量方法的可行性。

## 1 SAW 扭矩传感器设计

### 1.1 单端口 SAW 谐振器工作原理

SAW 器件按工作方式可以分为延迟线型 SAW 器件和谐振器型 SAW 器件;按照能源供给方式的不同可以分为有源 SAW 器件和无源 SAW 器件。无源 SAW 谐振型器件比延迟线型 SAW 器件具有更好的 Q 值<sup>[5-6]</sup>,因此通常使用单端口谐振器。如图 1 所示,单端口无源 SAW 谐振器通过 IDT 上的天线接收信号激励出的声表面波,声表面波经反射栅反射后返回 IDT 被转换成电磁波并通过天线发射出去。无源 SAW 谐振器的响应信号是一个以谐振频率为中心频率的震荡衰减的信号,如图 2a 所示。为了适应中心频率的变化以及提高响应信号的幅值,一般不采用单个脉冲激励,而是采用占空比可调的正弦脉冲信号激励<sup>[6]</sup>,如图 2b 所示。

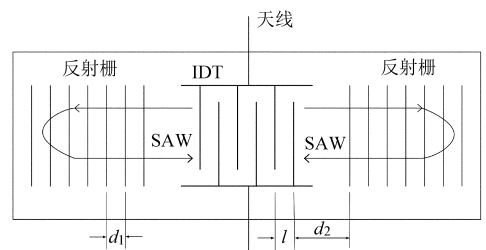


图 1 单端口谐振器

Fig.1 Single-port resonator

收稿日期: 2013-10-12 修回日期: 2013-11-29

\* 国家自然科学基金资助项目(51175262)、安徽省高校优秀青年人才基金资助项目(2012SQRL140)、安徽省高校自然科学基金资助项目(KJ2013B075)和安徽科技学院基金资助项目(ZRC2013338、ZRC2013376)

作者简介: 张海涛, 博士生, 安徽科技学院讲师, 主要从事机电智能控制与检测研究, E-mail: toby\_sh@163.com

通讯作者: 唐敦兵, 教授, 博士生导师, 主要从事机电控制与自动化研究, E-mail: d.tang@nuaa.edu.cn

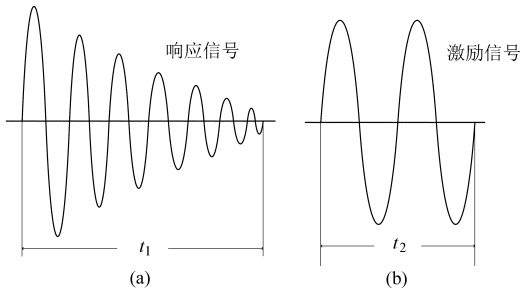


图2 激励与响应信号

Fig.2 Stimulus and response signals

当反射栅的间距为 SAW 波长  $\lambda$  二分之一的整数倍时,即

$$d_1 = n_1 \frac{\lambda}{2} \quad (n_1 = 1, 2, 3, \dots) \quad (1)$$

经反射栅各栅极反射的 SAW 同相位,幅值相互叠加增强,产生 Bragg 反射<sup>[7]</sup>。取  $n_1 = 1$ ,即  $d_1 = \frac{\lambda}{2}$ 。

因此,  $\lambda = 2d_1$ 。

当 IDT 与反射栅之间距离为

$$l = \left( n_2 - \frac{1}{2} \right) \frac{\lambda}{2} \quad (n_2 = 1, 2, 3, \dots) \quad (2)$$

Bragg 反射信号与 IDT 激发的 SAW 相位相同,相互叠加,反射栅与 IDT 之间产生驻波谐振<sup>[7]</sup>。因此,SAW 谐振器采用均匀 IDT 结构,并且使左右反射栅的栅格间距等于 IDT 叉指间距,即  $d_1 = d_2 = d$ ,设压电基体材料上 SAW 传播的速度为  $v$ ,波长为  $\lambda$ ,中心频率为  $f$ ,则有

$$\lambda = 2d_1 = 2d \quad (3)$$

$$f = v/\lambda = v/(2d) \quad (4)$$

同时考虑外界参数对 SAW 谐振频率的影响给出<sup>[5]</sup>

$$\Delta f = f_y - f_0 = \frac{1}{T_y} - \frac{1}{T} = \frac{S_y^y y}{T_0(1 + S_y^y y)} = \frac{S_y^y}{T_y} \quad (5)$$

式中  $\Delta f$ ——SAW 谐振器中心频率偏移量

$f_0$ ——初始谐振频率,即未受外界参数影响时的谐振频率

$f_y$ ——在参数  $y$  作用下的谐振频率

$S_y^y$ ——频率对参数  $y$  的灵敏度

## 1.2 SAW 扭矩传感器差频测量原理

由材料力学扭转特性可知,当车辆传动轴受扭矩作用时,轴表面有最大剪应力  $\tau_{\max}$ ,轴表面为纯剪应力状态,在与轴线呈  $45^\circ$  和  $135^\circ$  方向上有最大的正应力  $\sigma_1$  和  $\sigma_2$ ,其值为  $|\sigma_1| = |\sigma_2| = \tau_{\max}$ ,相应的变形为  $\varepsilon_{45^\circ}$  和  $\varepsilon_{135^\circ}$ ,且  $\varepsilon_{45^\circ} = -\varepsilon_{135^\circ} = \varepsilon$ 。因此,通过测量与中心线呈  $45^\circ$  和  $135^\circ$  方向上的应变而引起的谐振频率偏移量可以实现轴上扭矩测量<sup>[7-8]</sup>。为了提高测量的精度,一般不直接测量 SAW 谐振器的响

应频率,而是利用运算放大器将 2 个谐振器置于振荡电路的反馈回路中,其振荡频率正比于测量值,方便进行测量<sup>[9-10]</sup>,如图 3 所示。

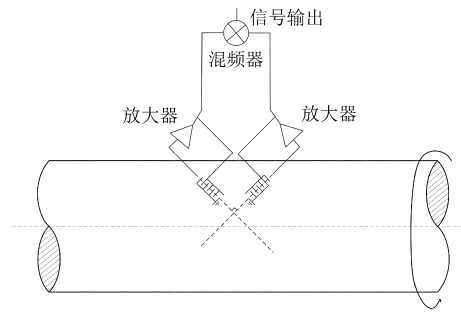


图3 轴上传感器布置

Fig.3 Sensors on shaft

由材料力学可知,轴上应变  $\varepsilon$  与扭矩  $T$  间关系为

$$\varepsilon = \frac{16 T}{\pi G D^3} \quad (6)$$

式中  $G$ ——材料的弹性模量

$D$ ——转轴直径

SAW 谐振器中心谐振频率很高,通常是几十兆赫兹到几吉赫兹<sup>[11-12]</sup>,对测量系统硬件要求较高。由于中心频率受外界各种参数的影响,直接通过测量中心频率来测量扭矩会产生很大的误差,且测量结果受温度影响很大<sup>[13-14]</sup>。

由式(5)可以得到,在影响因素  $y$  作用下 SAW 谐振器的谐振频率为

$$f_y = f_0 + \Delta f \quad (7)$$

当轴在扭矩作用下产生应变  $\varepsilon$  时,轴上 SAW 谐振器的 SAW 波速  $v$  和波长  $\lambda$  会随之变化<sup>[8]</sup>,即

$$\lambda(\varepsilon) = \lambda_0(1 + \varepsilon) \quad (8)$$

$$v(\varepsilon) = v_0(1 + K_v \varepsilon) \quad (9)$$

式中  $\lambda(\varepsilon)$ ——应变  $\varepsilon$  影响下的波长

$v(\varepsilon)$ ——应变  $\varepsilon$  影响下的波速

由式(4)、(8)和(9)知,当不考虑温度影响,只考虑应变对频率影响时,轴上  $45^\circ$  和  $135^\circ$  方向的 SAW 谐振器中心频率分别为

$$f(\varepsilon_{45^\circ}) = \frac{v(\varepsilon)}{\lambda(\varepsilon)} = f_0 + \frac{\varepsilon}{1 + \varepsilon} (K_v - 1) f_0 \quad (10)$$

$$f(\varepsilon_{135^\circ}) = \frac{v(\varepsilon)}{\lambda(\varepsilon)} = f_0 - \frac{\varepsilon}{1 - \varepsilon} (K_v - 1) f_0 \quad (11)$$

式中,由于温度对同一根轴上  $45^\circ$  和  $135^\circ$  方向上 SAW 谐振器的影响近似相同,设温度对中心频率的影响为  $\Delta f(T)$ 。因此据式(7),同时考虑温度和应变对中心频率的影响时, $45^\circ$  和  $135^\circ$  方向的 SAW 谐振器中心频率分别为

$$f(\varepsilon_{45^\circ}) = f_0 + \frac{\varepsilon}{1 + \varepsilon} (K_v - 1) f_0 + \Delta f(T) \quad (12)$$

$$f(\varepsilon_{135^\circ}) = f_0 - \frac{\varepsilon}{1 - \varepsilon}(K_v - 1)f_0 + \Delta f(T) \quad (13)$$

135°和 45°方向上的信号混频后得到频率差值为

$$\Delta f = f(\varepsilon_{135^\circ}) - f(\varepsilon_{45^\circ}) = \frac{-2\varepsilon}{1 - \varepsilon^2}(K_v - 1)f_0 \quad (14)$$

由于轴上应变一般为一个很小的值, 一般为  $10^{-3}$ , 因此式(14)可简化为

$$\Delta f \approx -2\varepsilon(K_v - 1)f_0 \quad (15)$$

由式(6)和式(15)可以得到轴上扭矩数学模型为

$$T = \frac{\pi G d^3 \Delta f}{32(1 - K_v)f_0} \quad (16)$$

由式(15)可以看出, 当 SAW 谐振器基体材料、叉指间距和反射栅栅距确定时, 初始谐振频率  $f_0$  即是确定的, 因此测量信号频率差值  $\Delta f$  只与轴上应变  $\varepsilon$  有关, 而与  $\Delta f(T)$  无关, 从而消除了温度对测量结果的影响, 而且由于  $\varepsilon$  一般数量级比较低, 从而将最终测量信号的频率由  $f_0$  的频率级别降到了  $\Delta f$  的频率级别。以  $\varepsilon$  为  $10^{-3}$ ,  $f_0$  为 MHz 数量级为例, 最终测量信号  $\Delta f$  的频率为 kHz, 降低了  $10^3$  倍, 从而降低了对后续信号处理硬件电路的要求, 并且采用差频测量方式使测量精度提高了 1 倍。

## 2 测量系统

测量系统主要包括 SAW 传感器模块和查询系统。SAW 扭矩传感器通过查询信号激励, 查询系统接收单元接收传感器的回波信号, 输出频率信号进行后续处理及频率测量工作。文中 SAW 传感器模块中两谐振器共用一组天线, 采用查询耦合器形式, 这样既简化了无限查询系统, 降低了硬件电路要求, 又不会在查询频带中占用过多带宽。

在电路设计中, 采用谐振频率为 433 ~ 435 MHz 的 SAW 器件, 利用正反馈原理, 采用电容反馈式结构设计 SAW 振荡器, 将车辆驱动轴扭矩信号转换为正弦波频率信号后, 经混频器混频并滤波, 得到的信号经波形变换后, 由频率检测电路完成信号的采集处理。测量系统如图 4 所示。

传感器响应信号相比查询信号其输出功率非常小, 为此传感器采用先并后串 L 型阻抗匹配网络电路, 传感器谐振电路呈容性, 通过调节图 5 中的  $L$ 、 $C$  值, 使电路工作在谐振频段, 进而传感器获得较大的吸收功率。

安装在车辆驱动轴上的 SAW 谐振器及其天线随驱动轴旋转时, 仅靠天线接收激励信号及响应信号。驱动轴转动时天线间距相对是变化的, 进而影

响信号信噪比, 由于构成传感器的两 SAW 谐振器安装于轴的同一截面位置, 由天线间距变化而引起频率响应信号的偏移量近似相等, 采用差频测量方式消除了天线间距变化引起的影响, 当谐振器旋转到背对外置天线时会产生绕射, 转动使信号的多普勒频移产生震荡, 系统可靠性降低, 由 3 颗同步卫星可以覆盖地球得到启示, 将扭矩测量系统的鞭状天线设计如图 6 所示。

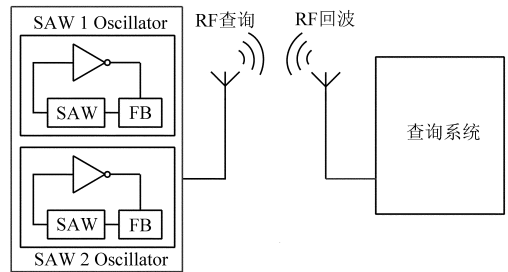


图 4 测量系统框图

Fig. 4 Block diagram of measuring system

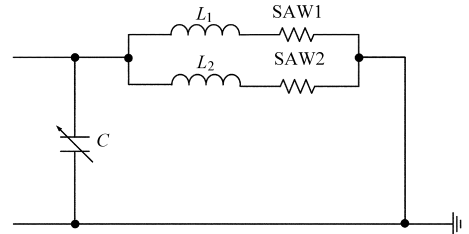


图 5 传感器阻抗匹配网络

Fig. 5 Sensor impedance matching network

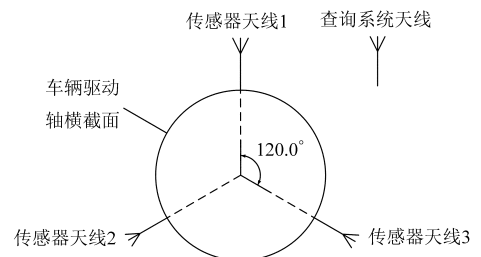


图 6 测量系统天线布置

Fig. 6 Measurement system antenna layout

图 6 中, 3 个传感器天线绕轴截面等间距分布, 两 SAW 谐振器输出端共同并联于 3 根天线, 其信号覆盖区可完全覆盖轴上区域, 从而可以有效减小信号查询盲区并提高了信号的接收功率。目前查询时序控制电路都是通过时钟信号控制高速电子开关来实现的<sup>[3,5,15]</sup>, 而时钟信号的周期和占空比的控制需要另外增加软硬件控制, 因而实现起来比较复杂。为此本文采用场效应管 (FET) 作为开关器件, 利用基频信号分频后控制 FET 的导通与断开, 实现天线与发射电路和接收电路间的通断。利用 PWM 实现发射与接收控制的电路原理图如图 7 所示。

图 7 中天线同时作为激励信号发射天线和响应信号接收天线。PWM 控制信号分成两路, 一路直接

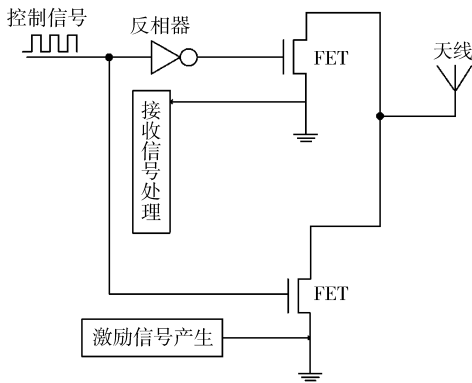


图7 查询时序控制电路

Fig.7 Sequence control circuit of inquiry system

控制天线作为发射天线将激励信号发射出去；另一路通过反相器取反后控制天线作为接收天线接收响应信号。由于这两路信号是同一 PWM 波经过反相器后得到的，因此保证了 2 个 FET 在同一时刻有且仅有一个是导通的，即在同一时刻天线只能作为发射天线或者接收天线。PWM 波的周期决定了接收天线和发射天线的切换周期，而 PWM 波占空比决定了发射激励信号和接收响应信号持续的时间，这样便可实现发射周期和接收周期的有序控制。其工作时序图如图 8 所示。图中， $t_1$  表示发射天线接通、激励信号维持的时间； $t_2$  表示接收天线接通、响应信号采集的时间。

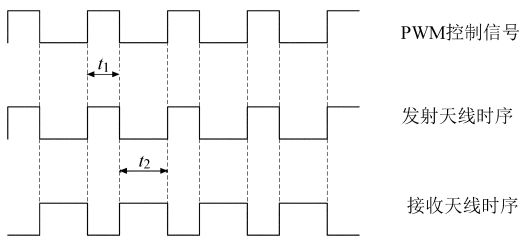


图8 控制电路工作时序图

Fig.8 Sequence diagram of control circuit

### 3 实验结果与分析

实验系统由射频信号发生器、示波器及 SAW 谐振器件等构成，实验时被测件旋转轴采用的材料为 40Cr 合金钢，轴的直径  $D = 40$  mm，材料的弹性模量  $E = 2.11 \times 10^5$  MPa，泊松比  $\nu = 0.277$ ，扭转模量  $G = 8.26155 \times 10^4$  MPa，基体材料为石英，其中材料常数  $K_p = -0.4$ ，实验时，被测轴采用酒精局部清洗后，利用粘合剂在轴中心线处预先覆盖一层基体，待凝固后再将传感器粘贴于轴上，以达到刚性测量，被测轴用以模拟车辆驱动轴与扭转试验机相连，扭转试验机加载不同负载下等转速单向旋转，在扭矩试验机给定负载下，射频信号发生器产生正弦脉冲串频率约为 434 ~ 435 MHz，测得不同负载下的部分采样点频率如表 1 所示。

表 1 不同加载下对应的部分采样点频率

负载 /(N·m)	采样点 kHz				
	1	2	3	4	5
30	33.56	33.11	32.51	34.14	32.76
60	73.18	69.85	69.30	72.62	71.63
90	103.75	104.04	102.61	99.45	101.10
120	144.08	144.35	143.18	147.62	145.00

图 9 所示为被测轴在扭转实验机等速不同加载扭矩的状态下，经多次采样测得谐振器返回信号频率差值，采样频率差值取均值后与所加载的扭矩构成 2 组对应曲线，从曲线趋势来看，采样点频率差值与所加载的扭矩近似呈比例关系，与理论公式一致，即由于被测轴受扭状态下产生的应变与两组谐振器中心频率的偏移差值之和呈正比，测量灵敏度约为 1.15 kHz/(N·m)。从表 1 中，可以看出在同一加载状态下，多次采样频率差波动较小，说明采用差频测量方式可以减小温度等外界因素对测量值的影响。

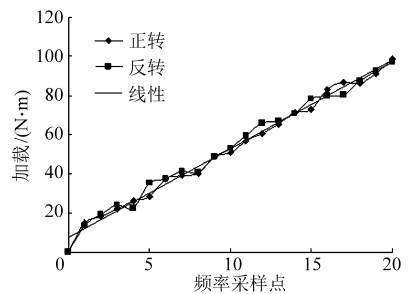


图9 扭矩频率采样点关系曲线

Fig.9 Curve of torque vs frequency

### 4 结论

(1) 采用两组 SAW 谐振器差频测量方式构建车辆驱动轴的无源无线扭矩测量方式，大大弱化了传感器温度漂移造成的影响，同时经差频后，返回信号频率值降低 3 个数量级，避免了对谐振频率的直接测量，降低了后续信号采集处理电路的硬件要求，并且测量精度提高约 1 倍，信噪比也得以提高。

(2) 考虑车辆驱动轴转速变化时容易出现检测盲区对测量结果造成影响，传感器天线采用绕轴同一截面等间距 3 点对称布置，使信号覆盖区得以提高，降低了对信号查询系统功率的要求。

(3) 采用差频测量方式返回信号频率数量级低，设计了以场效应管为开关器件，利用 PWM 信号控制 FET 的导通与断开，实现了信号查询时序电路的有序工作，简化了以往采用时钟信号控制高频电子开关的硬件电路。

## 参 考 文 献

- 1 杨家军,周晓军,魏燕定,等. 履带车辆试验台建模与控制方法[J]. 农业机械学报,2013, 44(6):8-13.  
Yang Jiajun, Zhou Xiaojun, Wei Yanding, et al. Test bed modeling and control method for track vehicle[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(6): 8-13. (in Chinese)
- 2 刘海鸥,陈慧岩,郑慕侨. 履带车辆随车扭矩测试系统的研究[J]. 农业机械学报,2003, 34(3):29-30.  
Liu Haiou, Chen Huiyan, Zheng Muqiao. Research on on-board torque measurement system for a tracked vehicle[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2003, 34(3): 29-30. (in Chinese)
- 3 商维绿,缪德源,钱顺张. 现代扭矩测量技术[M]. 上海:上海交通大学出版社,1999:10-18.
- 4 韩韬,施文康. 声表面波无线传感系统设计[J]. 压电与声光,2001, 23(5):327-329.  
Han Tao, Shi Wenkang. Design of surface acoustic wave based wireless measurement system[J]. Piezoelectrics & Acoustooptics, 2001, 23(5):327-329. (in Chinese)
- 5 Pohl A. A review of wireless SAW sensors[J]. IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, 2000, 47(2): 317-332.
- 6 Kourosh Kalantar-Zadeh, David A Powell. Comparison of layered based SAW sensors[J]. Sensors and Actuators, 2003,91(3): 306-307.
- 7 Beckley J, Kalinin V, Lee M, et al. Non-contact torque sensors based on SAW resonators [C] // 2002 IEEE International Frequency Control Symposium and PDA Exhibition, 2002:202-213.
- 8 Reindl L, Scholl G, Ostertag T, et al. SAW devices as wireless passive sensors[C] // Proceedings of IEEE Ultrasonic Symp,1996: 363-367.
- 9 Marija F Hribšek, Dejan V Tošić. Surface acoustic wave sensors in mechanical engineering [J]. Faculty of Mechanical Engineering. 2010, 38(1): 12-13.
- 10 Bill Drafts. Acoustic wave technology sensor[J]. IEEE Transactions on Microwave and Techniques, 2011, 49(4):795-802.
- 11 冯冠平. 谐振传感理论及器件[M]. 北京:清华大学出版社, 2008: 335-348.
- 12 刘文辉,李平,文玉梅. 一种无源无线 SAW 压力传感器结构设计[J]. 传感技术学报, 2007,20(4):771-773.  
Liu Wenhui, Li Ping, Wen Yumei. A structure design for passive wireless SAW pressure sensor[J]. Chinese Journal of Sensors and Actuators, 2007, 20(4): 771-773. (in Chinese)
- 13 Atashbar M Z, Bazuin B J, Krishnamurthy S. Design and simulation of SAW sensors for wireless sensing[C] // Proceedings of IEEE Sensors, 2003, 1: 584-589.
- 14 李平. 无源无线声表面波传感器及仪器系统研究[D]. 重庆:重庆大学, 2003.  
Li Ping. Study on passive wireless SAW sensor and instrument system[D]. Chongqing: Chongqing University, 2003. (in Chinese)
- 15 Kalinin V, Bown G, Beckley J, et al. Pulsed interrogation of the SAW torque sensor for electrical power assisted steering[C] // 2004 IEEE, Ultrasonics Symposium, 2004, 3: 1577-1580.

## Measurement System of Vehicle Drive Shaft Dynamic Torque Based on SAW

Zhang Haitao<sup>1,2</sup> Tang Dunbing<sup>1</sup> Xu Qin<sup>2</sup>

(1. College of Mechanical and Electrical Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China

2. College of Mechanical Engineering, Anhui Science and Technology University, Fengyang 233100, China)

**Abstract:** This paper presents a real-time measurement method of vehicle transmission shaft dynamic torque, which was based on two single-port SAW resonators. Using three-point equidistantly and symmetrically arranged signal transceiver antenna, the diffraction of signal was eliminated. The control circuit of signal transmitting and receiving sequence was achieved with PWM signal, therefore, the hardware circuit was simplified. Modeling of SAW torque sensor measurement with frequency difference was introduced into this measurement system, and the influence of temperature or other factors was reduced and the measuring accuracy was improved. Theoretical and experimental results were compared and the results showed good agreement and supported the validity of the SAW torque sensor model. Obtained measurement sensitivity was 1.15 kHz/(N·m), and a feasible solution for vehicle transmission shaft dynamic torque measuring was provided.

**Key words:** Vehicle drive shaft SAW single-port resonator Torque Dynamic measurement