

doi: 10.11823/j.issn.1674-5795.2024.05.07

# 基于声表面波谐振器的扭矩检测研究

黄明镜<sup>1</sup>, 陈智军<sup>2\*</sup>, 孙聪<sup>2</sup>, 钟明<sup>1</sup>, 宿丕强<sup>1</sup>

(1. 中国航发四川燃气涡轮研究院, 四川 绵阳 621010; 2. 南京航空航天大学自动化学院, 江苏 南京 211106)

**摘要:** 针对当前声表面波扭矩检测技术在理论分析、算法设计、实验测试方面的现状和存在的问题, 研究基于声表面波(Surface Acoustic Wave, SAW)谐振器的扭矩检测技术。根据扭矩在转轴和谐振器之间以应变形式传递的特点, 建立拉格朗日坐标系下的应变偏载理论模型。定义频率扭矩系数作为切型优化的指标, 基于频分多址原理设计制作4个声表面波谐振器。根据声表面波谐振器的回波特性, 总结谐振频率的测量方法及特点。分别搭建静态、动态扭矩无线检测系统, 静态检测系统采用扫频测强度方法, 通过“大步长粗扫”结合“小步长细扫”的扫频方案增强实时性, 并提高频率测量精度; 动态检测系统采用载波频率测量方法, 通过“频域三次样条插值”解决频谱分辨率不足、扭矩测量精度过低的问题。实验结果显示: 当无线检测距离大于20 cm、扭矩测量范围为-80~80 N·m时, 静态检测系统最大测量误差不超过1 N·m; 当无线检测距离大于20 cm、扭矩测量范围为0~80 N·m、转速不高于600 r/min时, 动态检测系统最大测量误差不超过3 N·m, 验证了基于声表面波谐振器的扭矩检测系统的有效性, 为高精度扭矩检测提供了新思路。

**关键词:** 声表面波谐振器; 扭矩检测; 频率扭矩系数; 谐振频率; 功率检波; 三次样条插值

**中图分类号:** TB93; TN65; TP212 **文献标志码:** A **文章编号:** 1674-5795 (2024) 05-0057-10

## Research on torque measurement based on surface acoustic wave resonators

HUANG Mingjing<sup>1</sup>, CHEN Zhijun<sup>2\*</sup>, SUN Cong<sup>2</sup>, ZHONG Ming<sup>1</sup>, SU Piqiang<sup>1</sup>

(1. AECC Sichuan Gas Turbine Establishment, Mianyang 621010, China;

2. College of Automation Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 211106, China)

**Abstract:** In view of the current status and existing problems of the surface acoustic wave (SAW) torque measurement technology in theoretical analysis, algorithm design and experimental test, the torque measurement technology based on the SAW resonator (SAWR) is studied. According to the feature that the torque on the shaft is transmitted to the SAWR by the strain, the theory model of the strain loading in the Lagrange coordinates is established. The torque coefficient of frequency is defined as an important indicator for cuts optimization, and four SAWRs are designed and produced according to the principle of frequency division multiple access (FDMA). On the basis of the echo characteristics of the SAWR, the measurement methods of the SAWR resonance frequency and their characteristics are summarized. The wireless measurement system for static and dynamic torque are built respectively. The static system utilizes the method of frequency sweep for the signal strength measurement, which combines big step for rough sweep with small step for fine sweep for the purpose of enhancing real-time performance and improving the frequency measurement accuracy. The dy-

收稿日期: 2024-10-01; 修回日期: 2024-10-11

基金项目: 财政稳定支持二期资助项目(GJCZ-0203-03)

引用格式: 黄明镜, 陈智军, 孙聪, 等. 基于声表面波谐振器的扭矩检测研究[J]. 计测技术, 2024, 44(5): 57-66.

**Citation:** HUANG M J, CHEN Z J, SUN C, et al. Research on torque measurement based on surface acoustic wave resonators[J]. Metrology & Measurement Technology, 2024, 44(5):57-66.



dynamic system employs the carrier frequency measurement method, and solves the problems of insufficient spectrum resolution and low torque measurement accuracy by the cubic spline interpolation in the frequency domain. The results show that the maximum measurement error of the static system does not exceed  $1 \text{ N}\cdot\text{m}$  when the wireless distance exceeds 20 cm and the torque range is from  $-80$  to  $80 \text{ N}\cdot\text{m}$ ; The maximum measurement error of the dynamic system does not exceed  $3 \text{ N}\cdot\text{m}$  when the wireless distance exceeds 20 cm, the torque range is between 0 and  $80 \text{ N}\cdot\text{m}$ , and the rotational speed does not surpass 600 r/min. The results validate the effectiveness of the torque measurement system based on the SAWRs, which provided a new approach for high-precision torque measurement.

**Key words:** surface acoustic wave resonator; torque measurement; torque coefficient of frequency; resonance frequency; power detection; cubic spline interpolation

## 0 引言

SAW传感器是一种新型传感器,具有体积小、功耗低、抗干扰能力强、结构工艺性好等特点,其最显著的优点是无线无源,即在阅读器和天线的配合下可实现无线传感,且传感器端完全不需要电源。SAW传感器可用于高速旋转等特殊状态和易燃易爆等极端环境下的检测<sup>[1-3]</sup>。

扭矩是使物体发生转动的力矩,是力对物体产生旋转效果的度量。扭矩检测在机械制造、汽车工业、航空航天等领域必不可少<sup>[4-6]</sup>。测量扭矩时,由于转轴处于旋转状态,无法直接使用导线进行测量,通常需要基于导电滑环、电磁耦合、无线遥测等方法实现测量并传输信号,但上述方法均存在不足<sup>[7-9]</sup>。接触力较小时,导电滑环的触头测量可靠性较低;接触力较大时,导电滑环的触头会磨损,且会增加转轴的摩擦力矩,影响测量精度。电磁耦合法利用环形变压器来传输电源和信号,最大转速受到限制,且变压器初级和次级的对准过程会引入噪声和误差。无线遥测法通过安装在转轴上的无线收发模块实现信号的传输,需要使用高能电池,其在极端环境下易燃易爆,且存在寿命短、功耗高等问题。采用声表面波技术进行扭矩测量可从原理上避免上述问题<sup>[10-11]</sup>。

声表面波器件可分为声表面波谐振器(Surface Acoustic Wave Resonator, SAWR)和声表面波延迟线(Surface Acoustic Wave Delay-line, SAWD)两种类型<sup>[12-13]</sup>,相较而言,SAWR小型化的上限更高,同等条件下检测灵敏度更高,因此针对SAWR的研究也更为广泛。目前在声表面波扭矩检测以及声表面波应变、压力检测等领域中,研究者们已经

开展了理论分析、算法设计、实验测试等工作<sup>[14-17]</sup>。理论分析方面,除石英外,基于压电薄膜、柔性单晶、层状结构的SAWR也建立了理论模型,但上述理论模型通常在欧拉坐标系下进行建模,而且只考虑了扭矩或应变、压力引起的压电基底弹性常数变化,忽略了其对压电常数、介电常数的影响,并且在切型优化时缺乏类似声表面波温度传感器的“频率温度系数”客观指标;在算法设计方面,学界已提出相关的频率估计算法,但算法在检测系统上的验证以及针对实际具体问题的改进方法较为欠缺;实验测试方面,通常使用矢量网络分析仪、示波器、信号源等仪器测试并验证传感器的性能,但面向实际应用的无线检测系统较少。对于静态扭矩测量,文献[18]报道的 $100 \text{ N}\cdot\text{m}$ 量程范围的最大误差为 $1.55 \text{ N}\cdot\text{m}$ ,文献[19]报道的 $1000 \text{ N}\cdot\text{m}$ 量程范围的最大误差为 $5.5 \text{ N}\cdot\text{m}$ 。

针对当前声表面波扭矩检测技术在理论分析、算法设计、实验测试方面的研究现状和存在的问题,本文开展基于声表面波谐振器的扭矩检测技术研究,分析扭矩导致的压电基底弹性常数、压电常数、介电常数的变化,建立拉格朗日坐标系下应变偏载的理论模型,定义体现压电材料自身扭矩敏感特性的频率扭矩系数作为切型优化的指标;设计4个采用频分多址方式的SAWR,并制作相应的传感器电路板;分析声表面波谐振器的回波特性,总结扫频测强度方法、载波频率测量方法、基带频率测量方法的优缺点,在此基础上,分别搭建静态、动态扭矩无线检测系统,并开展实验对检测效果进行验证。

### 1 理论分析

在转轴上施加扭矩时的应力应变分析如图1所示。根据材料力学相关知识可知，转轴表面的最大剪应力 $\tau_{max}$ 计算公式为

$$\tau_{max} = \frac{16}{\pi D^3} M \quad (1)$$

式中： $D$ 为转轴直径， $M$ 为扭矩。

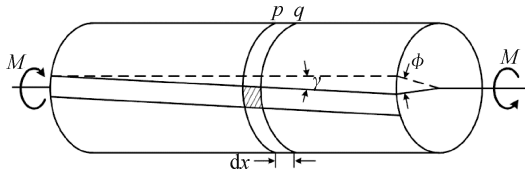


图1 转轴受扭矩时的应力应变分析

Fig.1 Stress-strain analysis of rotating shaft subjected to torque

剪应力通常难以直接测量。根据平面二向应力状态分析可知，转轴表面与其轴线呈 $\pm 45^\circ$ 时，剪应力为零，转轴分别受到一个拉应力和一个压应力作用，拉应力与压应力的绝对值与式(1)中的最大剪应力值相等。在转轴表面与轴线呈 $+45^\circ$ 、 $-45^\circ$ 的位置处，分别粘贴SAWR，如图2所示。

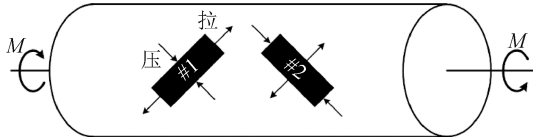


图2 声表面波传感器与转轴的相对位置

Fig.2 Relative position of SAW sensor and rotating shaft

$$\begin{bmatrix} s_{11} \\ s_{22} \\ s_{33} \\ 2\gamma_{23} \\ 2\gamma_{13} \\ 2\gamma_{12} \end{bmatrix} = \frac{1}{E} \begin{bmatrix} 1 & -\mu & -\mu & 0 & 0 & 0 \\ -\mu & 1 & -\mu & 0 & 0 & 0 \\ -\mu & -\mu & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 2(1+\mu) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 2(1+\mu) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 2(1+\mu) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sigma_{11} \\ \sigma_{22} \\ \sigma_{33} \\ \tau_{23} \\ \tau_{13} \\ \tau_{12} \end{bmatrix} \quad (4)$$

式中： $E$ 为转轴材料的弹性模量， $\mu$ 为泊松比， $s_{11}$ 、 $s_{22}$ 、 $s_{33}$ 分别为沿 $x_1$ 、 $x_2$ 、 $x_3$ 方向的正应变， $\gamma_{23}$ 、 $\gamma_{13}$ 、 $\gamma_{12}$ 为相应的剪应变。将式(2)代入式(4)，可得

$$\begin{aligned} s_{11} &= -\frac{16(1+\mu)}{\pi ED^3} M \\ s_{22} &= \frac{16(1+\mu)}{\pi ED^3} M \\ s_{33} &= \gamma_{23} = \gamma_{13} = \gamma_{12} = 0 \end{aligned} \quad (5)$$

在如图3所示的声表面波器件坐标系下，#1、#2传感器粘贴位置处的转轴表面应力计算公式分别如式(2)和式(3)所示，两式构成差动形式。

$$\begin{aligned} \sigma_{11} &= \frac{16}{\pi D^3} M \\ \sigma_{22} &= -\frac{16}{\pi D^3} M \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \sigma_{33} &= \tau_{23} = \tau_{13} = \tau_{12} = 0 \\ \sigma_{11} &= -\frac{16}{\pi D^3} M \\ \sigma_{22} &= \frac{16}{\pi D^3} M \end{aligned} \quad (3)$$

$$\sigma_{33} = \tau_{23} = \tau_{13} = \tau_{12} = 0$$

式中： $\sigma_{11}$ 、 $\sigma_{22}$ 、 $\sigma_{33}$ 分别为沿 $x_1$ 、 $x_2$ 、 $x_3$ 方向的正应力， $\tau_{23}$ 、 $\tau_{13}$ 、 $\tau_{12}$ 为相应的剪应力。

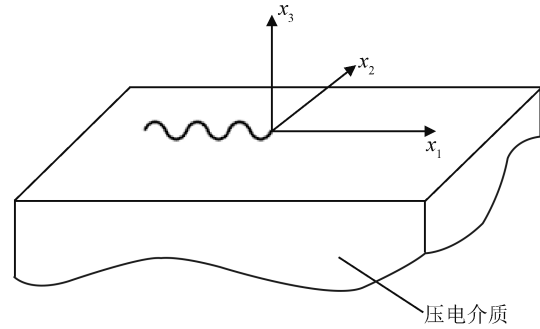


图3 声表面波器件坐标系

Fig.3 SAW device coordinate system

转轴在扭矩作用下产生应变，该应变传递到SAWR的压电基底，由此改变谐振频率 $f_r$ 。转轴的应变、应力关系为

与欧拉坐标系相比，拉格朗日坐标系下的质点即使产生应变，其变形仅导致拉格朗日坐标系自身的变化，质点的坐标值保持不变。因此，在扭矩引起的应变偏载下，本文采用拉格朗日随体坐标系，压电基底的耦合波方程为

$$\begin{cases} G_{LyM\alpha} u_{\alpha,ML} + R_{ML\gamma} \phi_{,ML} = \rho \ddot{u}_\gamma \\ R_{LM\alpha} u_{\alpha,ML} - N_{LM} \phi_{,ML} = 0 \end{cases} \quad (6)$$

式中： $G$ 为有效弹性常数， $R$ 为有效压电常数， $N$ 为有效介电常数， $u_\gamma$  ( $\gamma = 1, 2, 3$ )为三个方向的位移分量， $\bar{\cdot}$ 为求导两次运算符， $\phi$ 为电势， $\rho$ 为密度。式(6)采用爱因斯坦求和约定：对于微分项、乘积项的重复英文下标，表示在该下标的所有取值范围内求和，其取值范围均为  $\{1, 2, 3\}$ ；此外式(6)采用逗号惯例，即逗号前的量对逗号后面的下标求偏微分。

扭矩导致的应变偏载下的有效材料常数为

$$\begin{aligned} G_{LyM\alpha} &= c_{LyM\alpha}^0 + c_{LyM\alpha AB}^0 E_{AB} + c_{LKM\alpha}^0 E_{Ky} + \\ & c_{LyKM}^0 E_{K\alpha} + T_{LM} \delta_{\gamma\alpha} \\ R_{MLy} &= e_{MLy}^0 + e_{MLyBC}^0 E_{BC} + e_{MLK}^0 E_{Ky} \\ N_{LM} &= \varepsilon_{LM}^0 + b_{LMCD}^0 E_{CD} - 2\varepsilon_0 \bar{J} E_{LM} \end{aligned} \quad (7)$$

式中： $c_{LyM\alpha}^0$ 为二阶弹性常数， $e_{MLy}^0$ 为二阶压电常数， $\varepsilon_{LM}^0$ 为二阶介电常数， $c_{LyM\alpha AB}^0$ 为三阶弹性常数， $e_{MLyBC}^0$ 为三阶压电常数， $b_{LMCD}^0$ 为电致伸缩常数， $\bar{J}$ 为扭矩导致变形前的压电基底密度 $\rho_0$ 与变形后密度 $\rho$ 的比值， $\varepsilon_0$ 为真空中的介电常数， $\delta_{\gamma\alpha}$ 为克罗内克符号， $E$ 、 $T$ 分别为扭矩导致的压电基底上的应变和应力。

声表面波的场量表达式为

$$\begin{cases} u_i = A_i \exp[-jk(x_1 + \beta x_3 - vt)] \\ \phi = A_4 \exp[-jk(x_1 + \beta x_3 - vt)] \end{cases} \quad (8)$$

式中： $v$ 、 $k$ 分别为声表面波的传播速度和沿传播方向的波矢， $k = 2\pi/\lambda = \omega/v$ ， $\omega$ 、 $\lambda$ 分别为角频率和波长； $\beta$ 为声表面波沿压电基底深度 $-x_3$ 方向的衰减系数； $A_i$  ( $i = 1, 2, 3$ )、 $A_4$ 分别为位移、电势的振幅。

将式(7)、式(8)代入式(6)，可得扭矩导致应变偏载下压电基底的Christoffel方程组。在满足边界条件的前提下，可通过表面有效介电常数等数值求解方法<sup>[11]</sup>获得随扭矩 $M$ 变化的自由化 $v_f(M)$ 、金属化声表面波传播速度 $v_m(M)$ ，进一步得到反映声表面波激发效率的机电耦合系数 $k_s^2$ ，计算公式为

$$k_s^2 = 2 \frac{v_f(M) - v_m(M)}{v_f(M)} \quad (9)$$

转轴扭矩 $M$ 最终导致SAWR的谐振频率变化 $f_r(M)$ 的计算公式为

$$f_r(M) = \frac{v_f(M)}{\lambda(M)} = \frac{v_f(M)}{\lambda_0(1 + s_{11}(M))} \quad (10)$$

式中： $\lambda_0$ 为初始状态下即扭矩为 $0 \text{ N}\cdot\text{m}$ 时的SAW波长，其值等于叉指换能器(Inter-digital Trans-

ducer, IDT)的叉指周期； $\lambda(M)$ 为扭矩为 $M$ 时的SAW波长； $s_{11}(M)$ 为扭矩为 $M$ 时的正应变。

## 2 声表面波谐振器的设计与制作

SAWR的结构如图4所示。向SAWR加载脉冲激励信号，叉指换能器通过逆压电效应产生声表面波，IDT两侧的反射栅构成谐振腔充能，再通过正压电效应输出回波信号<sup>[11]</sup>。如前所述，SAWR的谐振频率 $f_r$ 随扭矩的变化而变化。

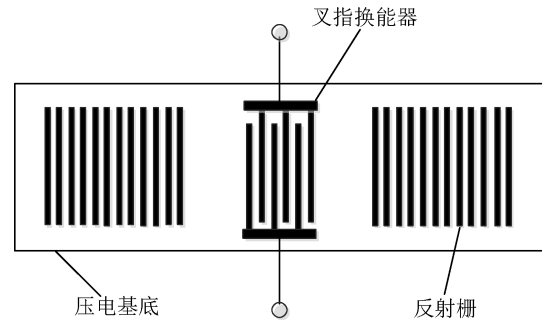


图4 SAWR的结构

Fig.4 Structure of surface acoustic wave resonator

由于压电材料的各向异性特征，设计SAWR的第一步是对其压电基底进行切型优化。如式(11)所示，定义频率扭矩系数(Torque Coefficient of Frequency, TCF)作为重要的优化指标。在转轴材料、直径确定的前提下，频率扭矩系数只与SAWR的压电基底材料、切型有关，其反映了材料本身对扭矩的敏感特性。

$$T_{TCF} = \frac{1}{f} \frac{df}{dM} = \frac{1}{v} \frac{dv}{dM} - \frac{1}{\lambda} \frac{d\lambda}{dM} = \frac{1}{v} \frac{dv}{dM} - \frac{s_{11}}{dM} \quad (11)$$

式中： $T_{TCF}$ 为频率扭矩系数。

根据前文可知，通过数值求解方法可计算出不同切型压电基底材料的 $T_{TCF}$ 。根据式(11)可知，在压电基底的切型确定之后，SAWR的扭矩灵敏度 $df/dM$ 与频率 $f$ 成正比，因此采用 $T_{TCF}$ 作为切型优化指标比扭矩灵敏度更客观。SAWR频率增大会导致其品质因数 $Q$ 减小，因此需要在灵敏度与品质因数之间进行折中。

以 $T_{TCF}$ 尽可能大、 $k_s^2 > 0.1\%$ 、确保声表面波的可靠激发为优化原则，选择欧拉角为 $(0^\circ, 126^\circ, 0^\circ)$ 的石英切型制作SAWR，通过数值求解方法仿真得到 $T_{TCF}$ 为 $9.93 \times 10^{-6}/(\text{N}\cdot\text{m})$ 。拟将SAWR的频



率设计在 433 MHz 频段，对应的扭矩灵敏度为 4.3 kHz/(N·m)。为了避免转轴弯矩对测量结果产生影响，同时保持转轴的动平衡状态，在转轴的周向相对位置对称布置两组差分结构(共计 4 个 SAWR)，如图 5(a)所示。实际制作时，在转轴沿轴向的中间位置铣出矩形平面，以方便 SAWR 的粘贴。2 个 SAWR 并联连接天线，如图 5(b)所示。

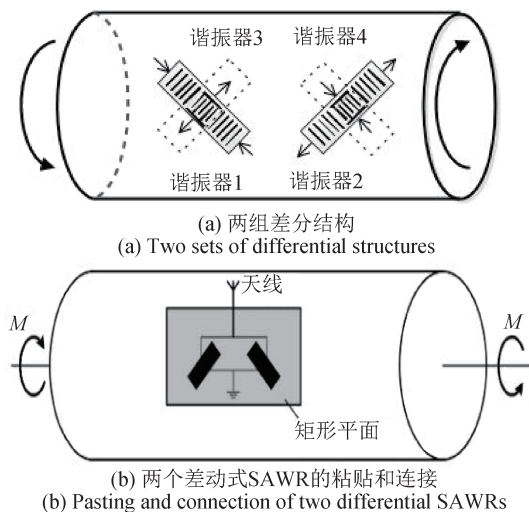


图5 SAWR在转轴上的布置方案

Fig.5 Layout scheme of SAWRs on the rotating shaft

采用频分多址的方式，区分 4 个 SAWR 的谐振频率。当灵敏度为 4.3 kHz/(N·m)、测量范围为 ±100 N·m 时，每个 SAWR 的谐振频率变化范围为  $f_0 \pm 430$  kHz。为了避免与主峰偏离 1 MHz 左右的寄生峰影响<sup>[20]</sup>，SAWR 之间的初始谐振频率需要间隔 1.43 MHz 以上，本文以 2 MHz 为间隔。以 431.5 MHz 的 SAWR 设计为例，(0°, 126°, 0°)切型石英的声表面波传播速度为 3 150.06 m/s，相应的波长、叉指周期为 7.30 μm。叉指对数越多，带宽越窄、Q 越大，但叉指对数受器件尺寸限制；反射栅条数越多，反射率越大，但反射栅条数同样受器件尺寸限制。4 个 SAWR 尺寸参数如表 1 所示。

采用 Ledit 软件绘制 SAWR 的掩膜版图。以 431.5 MHz 的 SAWR 为例，其版图如图 6 所示。另外 3 个 SAWR 的版图类似，它们的 IDT、反射栅的尺寸以及对数、条数等略有不同。在石英晶圆上镀膜，再通过掩膜版曝光、光刻，经过显影、清洗、剥离等工艺流程<sup>[21]</sup>之后，晶圆上的 SAWR 实物如图 7 所示。

表 1 4 个 SAWR 尺寸参数

Tab.1 Dimensional parameters of the 4 SAWRs

初始谐振频率/MHz	IDT周期/μm	IDT对数/对	反射栅条数/条
431.5	7.30		
433.5	7.27		
435.5	7.24	110	170
437.5	7.21		

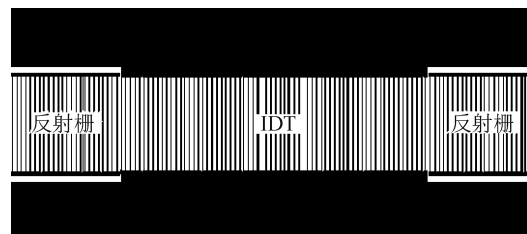


图6 SAWR的掩膜版图

Fig.6 Mask layout of SAWR

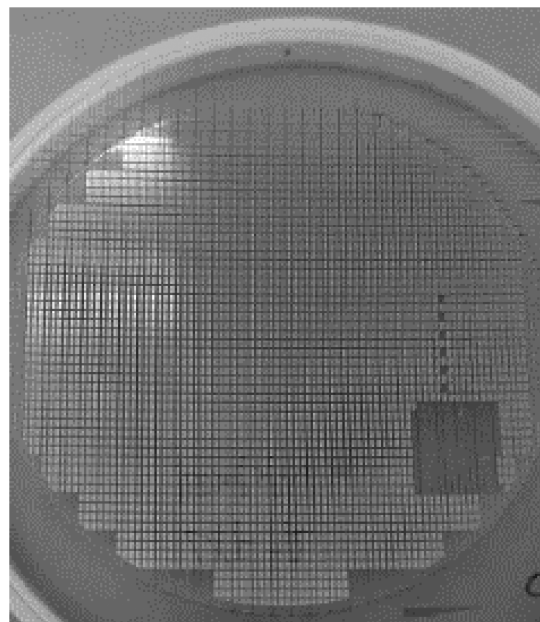


图7 石英晶圆上的SAWR实物

Fig.7 SAWRs on a quartz wafer

制作如图 8(a)所示的传感器线路板。线路板上有两个呈 ±45° 方向的矩形孔，用于将两个差分结构的 SAWR 直接粘贴到转轴上，线路板通过螺钉固定到转轴上。SAWR 的引线焊接到引线焊盘上，采用金属管壳封装 SAWR。粘贴 SAWR 的转轴实物如图 8(b)所示。

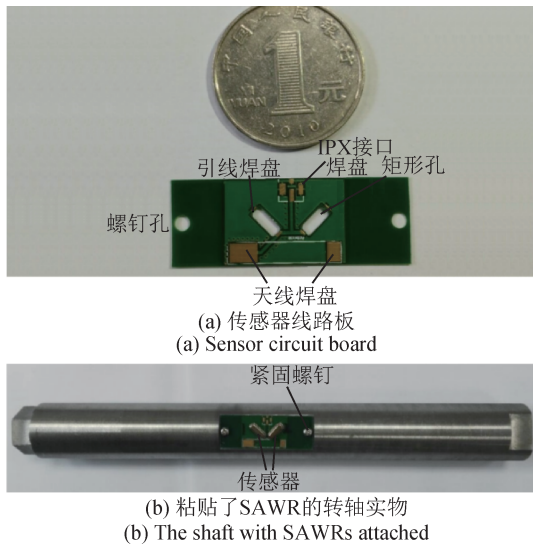


图8 传感器线路板和粘贴了SAWR的转轴实物图

Fig.8 Physical image of sensor circuit board and the shaft with SAWRs attached

### 3 声表面波谐振器的回波特性与频率测量方法

已知SAWR的谐振频率 $f_r$ 会随扭矩的变化而变化，因此可以通过测量 $f_r$ 率获得扭矩信息。

对SAW加载的脉冲激励信号 $x(t)$ 表达式为

$$x(t) = A_0 \cos(2\pi f_e t), \quad (0 \leq t \leq T) \quad (12)$$

式中： $f_e$ 为激励信号的频率， $A_0$ 为振幅， $T$ 为脉冲宽度， $t$ 为时间。

当 $f_e = f_r$ ，即SAWR处于谐振状态时，回波 $y(t)$ 是频率为 $f_e$ 并按指数形式衰减的信号，如图9(a)所示，其表达式为

$$y(t) = A_0 e^{-\frac{t}{\tau}} \cos(2\pi f_e t + \varphi) \quad (13)$$

式中： $A_0 e^{-\frac{t}{\tau}}$ 为回波包络， $\tau$ 为衰减时间常数， $\varphi$ 为回波与脉冲激励信号的相位差。

当 $f_e \neq f_r$ ，即SAWR失谐时，回波是高频载波经差频基带信号调制后的信号，如图9(b)所示，其表达式为

$$y(t) = A_0 e^{-\frac{t}{\tau}} \cos[2\pi(f_e - f_r)t] \cos(2\pi f_e t + \varphi) \quad (14)$$

综合上述分析可知，无论 $f_e$ 与 $f_r$ 是否相等，回波信号的载波频率均为随扭矩变化的SAWR谐振频率 $f_r$ 。 $f_e$ 越接近 $f_r$ ，SAWR回波信号的能量越大；当 $f_e$ 与 $f_r$ 不相等时，基带调制信号的频率为 $f_e$ 与 $f_r$ 之差。

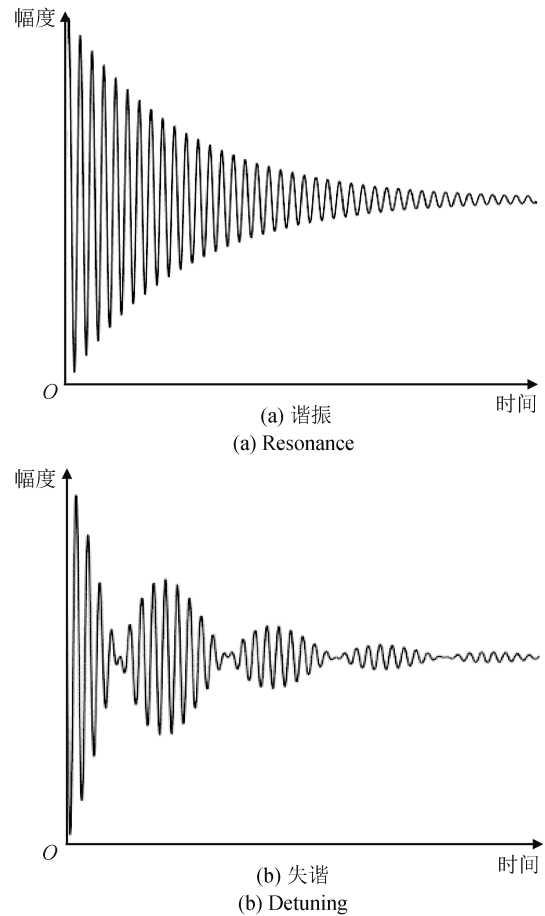


图9 SAWR谐振、失谐时的回波信号

Fig.9 Echo signal when SAWR is resonant or detuned

测量 $f_r$ 的方法包括：

#### 1) 扫频测强度方法

在一定频率范围内，按一定的步进频率轮询发射激励信号。测得不同频率的激励信号对应的回波信号强度，回波强度最大时的激励信号频率 $f_e$ 即为SAWR谐振频率 $f_r$ 。由于需要轮询发射激励信号，该方法测量速度较慢，不适用于待测对象动态变化尤其是快速变化的场景。

#### 2) 载波频率测量方法

通过测量回波信号的载波频率获得 $f_e$ 。由于载波频率较高，实际应用时对回波信号进行混频，下变频到低频进行测量。

#### 3) 基带频率测量方法

通过测量回波信号的基带调制频率获得 $f_e$ 与 $f_r$ 之差，并进一步获得 $f_r$ 。通常情况下无法预知 $f_e$ 与 $f_r$ 的大小关系，而且 $f_e$ 接近 $f_r$ 时，基带频率极小，难以准确测量，所以实际应用场景有限。

## 4 测试系统搭建

### 4.1 有线测试

有线测试实物图如图 10 所示。通过台虎钳固定并夹紧转轴的底部，使用扭矩扳手在转轴的顶部施加扭矩，采用 IPX 转 SMA 接口连接线接入矢量网络分析仪，测量施加扭矩时 SAWR 谐振频率的变化情况。采用两组 4 个 SAWR 的差分结构，通过测量每组的差频变化，增加了扭矩灵敏度，体现了差分测量的优势。

有线测试时的扭矩变化为  $-80 \sim 80 \text{ N}\cdot\text{m}$ ，以步长  $20 \text{ N}\cdot\text{m}$  为例，4 个 SAWR 的谐振频率随扭矩变化的实测结果以及拟合曲线如图 11 所示。根据图 11 可知，4 个 SAWR 具有良好的线性度，扭矩灵敏度分别为  $-2.8$ 、 $3.9$ 、 $-3.6$ 、 $3.5 \text{ kHz}/(\text{N}\cdot\text{m})$ ，绝对值均小于数值仿真得到的灵敏度结果  $4.3 \text{ kHz}/(\text{N}\cdot\text{m})$ ，

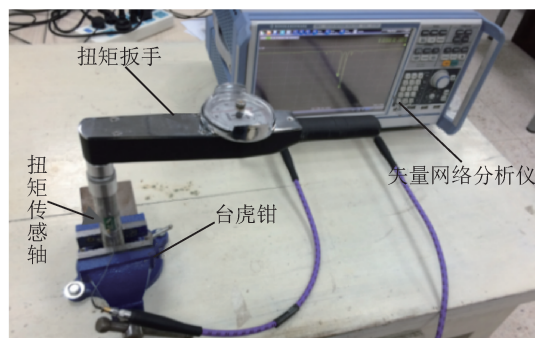


图 10 有线测试实物图  
Fig.10 Diagram of wired test

且 4 个 SAWR 之间也存在一定差距。理论仿真的灵敏度更高，是因为没有考虑应变从转轴传递到压电基底过程中胶水的存在和粘贴方式不同带来的影响；此外，SAWR 实际粘贴位置不准确也会引入误差，例如：SAWR 的中心未与矩形平面的中心线重合、亦或者 SAWR 的粘贴方向并没有严格与轴向呈  $\pm 45^\circ$  等。

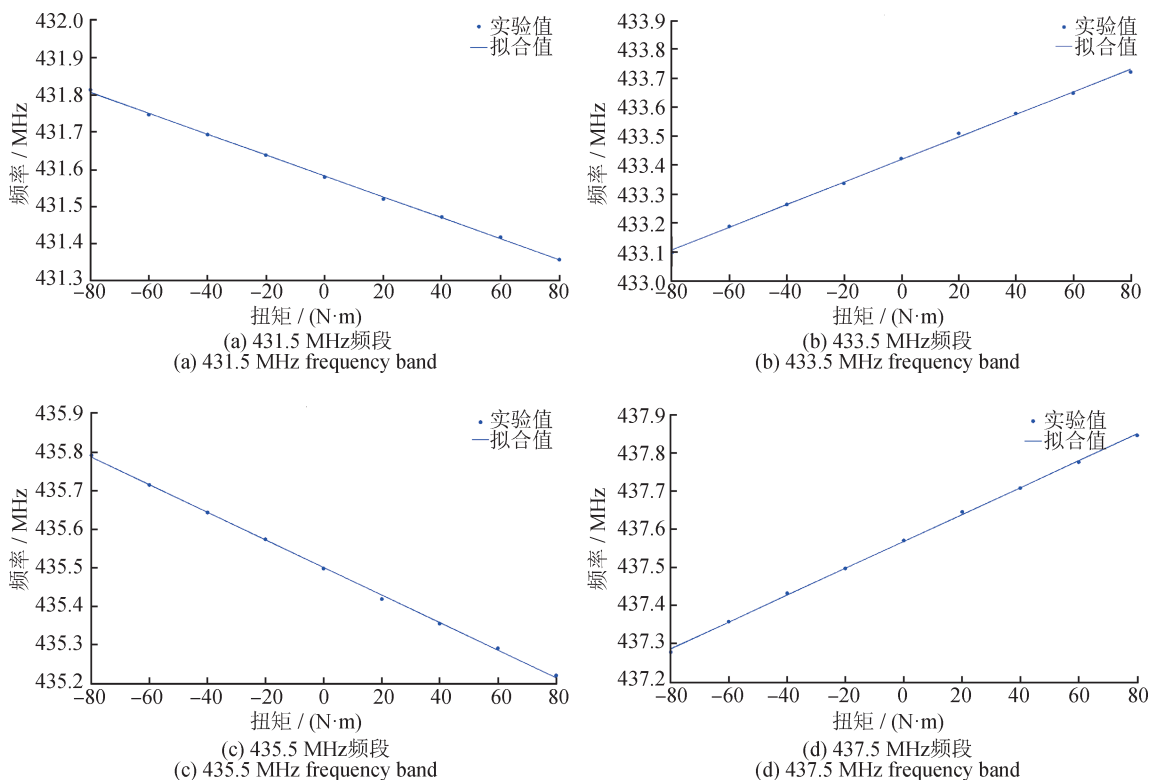


图 11 4 个 SAWR 的谐振频率随扭矩变化的实测结果及拟合曲线

Fig11 Measurement results and fitted curve of the resonant frequencies of four SAWRs as a function of torque

### 4.2 静态扭矩无线检测系统

搭建基于 SAWR 的静态扭矩无线检测系统。静态系统实物图如图 12 所示，仍使用扭矩扳手施

加扭矩，采用小型棒状天线作为传感器天线，阅读器天线使用分段环状天线<sup>[22]</sup>。阅读器对 SAWR 的回波信号进行功率检波，如图 13 所示。回波信



号由高频载波变换为相应的功率包络，无需进行混频处理，直接采用微控制器自带的2.4 MHz采样频率的模数转换器即可得到回波强度。



图12 静态扭矩无线检测系统实物图

Fig.12 Diagram of static torque wireless measurement system

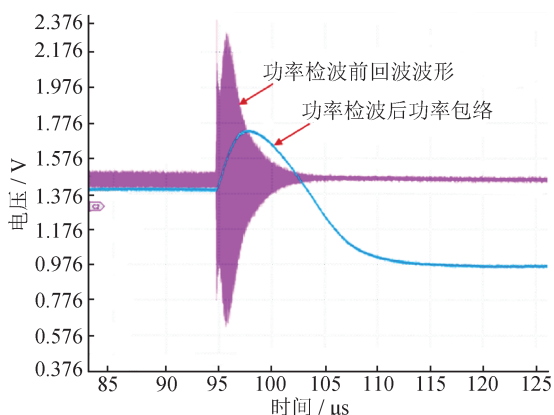


图13 功率检波前、后的回波信号

Fig.13 Echo signals before and after power detection

在对回波信号功率检波的基础上，采用扫频强度方法测量随扭矩变化的SAWR的谐振频率。扫频时步进频率越小，测量精度越高，但存在耗时太长的问題，故采用“大步长粗扫”结合“小步长细扫”的方法：先在扭矩测量范围对应的SAWR频率变化范围内粗扫，步长为10 kHz，得到大致的谐振频率 $f_{c1}$ ；再以该频率为中心，设置扫频范围为 $f_{c1} - 20 \text{ kHz} \sim f_{c1} + 20 \text{ kHz}$ 进行细扫，步长为0.5 kHz，最终得到准确的谐振频率。测量结果表明：在无线检测距离大于20 cm，扭矩测量范围为 $-80 \sim 80 \text{ N}\cdot\text{m}$ ，最大测量误差不超过 $1 \text{ N}\cdot\text{m}$ 。

### 4.3 动态扭矩无线检测系统

基于SAWR的动态扭矩无线检测系统的传感装置实物图、阅读器及上位机实物图如图14所示。使用发电机发电及拖动试验台控制转速和扭矩，以误差在 $\pm 0.5 \text{ N}\cdot\text{m}$ 以内的HBM型标准扭矩仪测得

的扭矩值作为施加扭矩，将转轴通过联轴器接入试验台，传感器天线采用小型螺旋天线，阅读器天线使用平板天线。



(a) 扭矩传感装置实物图

(a) Diagram of torque sensing device



(b) 阅读器及上位机实物图

(b) Diagram of reader and host computer

图14 动态扭矩无线检测系统实物图

Fig.14 Diagram of dynamic torque wireless measurement system

采用载波频率测量方法，先将回波信号下变频到20 MHz，再使用采样频率 $f_s = 125 \text{ MHz}$ 的模数转换器采集回波信号，采样点数 $N = 2048$ ，相应的采样时间约为 $16 \mu\text{s}$ ，与SAWR的回波衰减时间基本对应。对回波信号进行傅里叶变换，频谱分辨率 $\Delta f = f_s / N \approx 61 \text{ kHz}$ 。根据前述的扭矩灵敏度 $4.3 \text{ kHz}/(\text{N}\cdot\text{m})$ ，61 kHz对应 $14 \text{ N}\cdot\text{m}$ 左右，扭矩测量精度过低，需要对测量方法进行改进。

本文采用频域插值的方法来提高频谱分辨率，原理如图15所示。设频谱中幅值最大的为第 $k_0$ 条谱线，则信号实际频率为

$$f = \frac{f_s}{N} (k_0 + a) \quad (15)$$

式中： $f_s$ 为采样频率； $N$ 为采样点数； $a$ 为归一化频率偏差， $|a| < 1/2$ 。

采用三次样条插值方法，在回波信号频谱的2个极大值附近分别进行插值，以提高SAWR谐振频率的测量精度。实际插值时，采用极大谱线及



其左右各两条谱线进行三次样条插值,通过构建三弯矩方程,结合自然边界条件,从而唯一确定每段拟合的三阶多项式,拟合区间内纵坐标最大值的横坐标小数部分即为归一化频率偏差 $a$ 的值。

最终的实验结果表明:在无线检测距离大于20 cm、扭矩为0~80 N·m、转速不高于600 r/min时,扭矩最大测量误差不超过3 N·m。

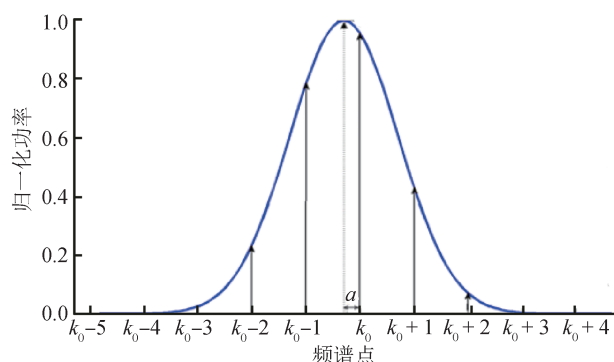


图15 频域插值原理

Fig.15 Frequency domain interpolation principle

## 5 结论

基于拉格朗日坐标系下应变偏载的理论模型,仿真分析了谐振频率随转轴扭矩变化而变化的过程。基于频分多址原理设计制作了包括两组差分结构的4个声表面波谐振器,设计了便于谐振器粘贴和应变传递的传感器线路板。研究了声表面波谐振器的回波特性,分析了扫频测强度方法、载波频率测量方法、基带频率测量方法的特点。通过矢量网络分析仪对声表面波谐振器进行了有线测试,其灵敏度与理论仿真值相比偏低,且不同谐振器之间的灵敏度存在一定差距,这是因为在应变从转轴传递到压电基底的过程中,胶水的存在和粘贴方式的不同影响了灵敏度,且谐振器的粘贴位置也存在误差。虽然上述因素对实测灵敏度有一定影响,但利用实际搭建的静态、动态扭矩无线检测平台进行实验,仍获得了较好的测量结果,验证了基于声表面波谐振器的扭矩检测系统的有效性。未来可通过传感器粘贴方式改进、频率估计算法优化等方式,进一步提升声表面波谐振器的扭矩测量精度,并且在理论模型中考虑粘胶对转轴和声表面波谐振器之间应变传递过程的影响,提升理论模型准确性。

## 参考文献

- [1] ASLAM M Z, ZHANG H, SREEJITH V S, et al. Advances in the surface acoustic wave sensors for industrial applications: potentials, challenges, and future directions: a review [J]. *Measurement*, 2023, 222. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2023.113657>.
- [2] PIERRE J, FIRAS A M, REMI B, et al. Wireless strain and temperature monitoring in reinforced concrete using surface acoustic wave sensors [J]. *IEEE Sensors Letters*, 2023, 7(11). DOI: 10.1109/LESENS.2023.3315219.
- [3] 韩韬, 吉小军, 李平, 等. 声表面波无线无源传感器 [J]. *上海交通大学学报*, 2018, 52(10): 1314-1323. HAN T, JI X J, LI P, et al. The SAW wireless passive sensor [J]. *Journal of Shanghai Jiaotong University*, 2018, 52(10): 1314-1323. (in Chinese)
- [4] OLARIU V, KALKUR T S, OLARIU S. Wireless torque sensing system for rotating machinery [C]// *Proceedings of the 11th International Workshop on Structural Health Monitoring 2017*. Stanford, 2017: 811-817. DOI: 10.12783/shm2017/13939.
- [5] HYTTINEN J, WENTZEL H, OSTERLOF R, et al. Development and analysis of an on-road torque measurement device for trucks [J]. *Experimental Mechanics*, 2024, 64(4): 455-466.
- [6] 陈智军, 孙聪, 童锐, 等. 声表面波扭矩传感及其在航空发动机领域的潜在应用 [J]. *航空科学技术*, 2017, 28(5): 74-78. CHEN Z J, SUN C, TONG R, et al. SAW torque sensing and its potential applications in aero engines [J]. *Aviation Science and Technology*, 2017, 28(5): 74-78. (in Chinese)
- [7] 樊尚春, 吕俊芳, 张庆荣, 等. 航空测试系统 [M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2005. FAN S C, LV J F, ZHANG Q R, et al. *Air test system* [M]. Beijing: Beihang University Press, 2005. (in Chinese)
- [8] 张文明. 燃油泵滑动轴承试验台测控系统的研制 [D]. 合肥: 合肥工业大学, 2013. ZHANG W M. *Development of measurement and control system of sliding bearing test bench of fuel pump* [D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2013. (in Chinese)
- [9] 蔡远思, 刘华平, 杨迎春. 某型航空发动机高低压电动驱动装置的研制与应用 [J]. *航空维修与工程*, 2016(8): 57-59. CAI Y S, LIU H P, YANG Y C. *Development and application of the high and low voltage electric drive device of a certain type of aero-engine* [J]. *Aviation Maintenance and*

- Engineering, 2016(8): 57-59. (in Chinese)
- [10] TANG Z Z, WU W Y, YANG P, et al. A review of surface acoustic wave sensors: mechanisms, stability and future prospects[J]. Sensor Review, 2024, 44(3): 249-266.
- [11] 孙聪. 声表面波扭矩传感系统的设计与实现[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2017.  
SUN C. Design and implementation of the acoustic surface wave torque sensing system [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2017. (in Chinese)
- [12] SVESHNIKOV B V, SHITVOV A P. Multi-transducer SAW device architecture for passive wireless sensor tags [J]. IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, 2018, 65(11): 2176-2183.
- [13] CUNHA D, PEREIRA M. High-temperature harsh-environment SAW sensor technology [C]// Proceedings of the IEEE International Ultrasonics Symposium 2023. Montreal, 2023: 1-10. DOI: 10.1109/IUS51837.2023.10306640.
- [14] 张泽钦. 高灵敏度 ZnO 薄膜声表面波扭矩传感器理论研究[D]. 天津: 天津理工大学, 2024.  
ZHANG Z Q. Theoretical study of highly sensitive ZnO thin film acoustic wave torque sensor [D]. Tianjin: Tianjin University of Technology, 2024. (in Chinese)
- [15] 孟旭. 用于汽车 EPS 的 SAW 型扭矩传感器多层状结构及参数优化研究[D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2022.  
MENG X. Study on multilayered structure and parameter optimization of SAW torque sensor for automotive EPS [D]. Harbin: Northeast Forestry University, 2022. (in Chinese)
- [16] 韩伟. 无线无源声表面波扭矩传感器的回波信号解调方法研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2021.  
HAN W. Study on the demodulation method of echo signal of wireless passive acoustic surface wave torque sensor [D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2021. (in Chinese)
- [17] 许红升. 柔性单晶声表面波器件及其温度应变传感应用研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2021.  
XU H S. Research on flexible single crystal acoustic surface wave devices and their temperature-strain sensing [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2021. (in Chinese)
- [18] 范彦平. 声板波扭矩传感器关键技术研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2016.  
FAN Y P. Research on key technology of sound wave torque sensor [D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2016. (in Chinese)
- [19] 齐红丽, 李涛, 江舒, 等. 基于声表面波技术的无线无源扭矩测量系统研究与实现[J]. 船舶工程, 2014, 36(增刊1): 99-103.  
QI H L, LI T, JIANG S, et al. Research and realization of wireless passive torque measurement system based on acoustic surface wave technology [J]. Ship Engineering, 2014, 36 (supplement 1): 99-103. (in Chinese)
- [20] 童锐. 声表面波扭矩检测研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2016.  
TONG R. Study on the torque detection of the acoustic surface wave [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2016. (in Chinese)
- [21] 卢旭, 陈智军, 黄鑫, 等. 声表面波标签的设计、制作和测试[J]. 压电与声光, 2013, 35(1): 4-9.  
LU X, CHEN Z J, HUANG X, et al. Design, fabrication, and testing of acoustic surface wave labels [J]. Piezoelectric and Acoustic-Optic, 2013, 35 (1): 4-9. (in Chinese)
- [22] 熊志强, 陈智军, 孙聪, 等. 声表面波扭矩检测系统的分段环状天线设计[J]. 压电与声光, 2020, 42(6): 747-751.  
XIONG Z Q, CHEN Z J, SUN C, et al. Design of segmented loop antenna for surface acoustic wave torque measurement system [J]. Piezoelectrics & Acoustoptics, 2020, 42(6): 747-751. (in Chinese)

(本文编辑: 刘圣晨, 米若鑫)



第一作者: 黄明镜(1965—), 男, 研究员, 专项总师, 主要研究方向为航空发动机试验测试技术。



通信作者: 陈智军(1976—), 男, 副教授, 博士, 主要研究方向为传感器技术。