

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2209552

基于磁致伸缩扭转波温度传感器的设计与优化*

李保良^{1,2}, 李明明^{1,2}, 李海毅^{1,2}, 翁玲^{1,2}, 黄文美^{1,2}

(1. 河北工业大学省部共建电工装备可靠性与智能化国家重点实验室 天津 300130;
2. 河北工业大学河北省电磁场与电器可靠性重点实验室 天津 300130)

摘要:超声导波温度传感器是目前工业领域中新兴的测温仪表,其导波的选取对传感器的测温性能有着重要的影响。磁致伸缩扭转波具有易于产生与拾取、衰减小的特点,且其波速随温度呈线性关系,适合应用于超声导波温度传感器的设计。本文选用磁致伸缩材料 $\text{Fe}_{83}\text{Ga}_{17}$ 丝产生和传导磁致伸缩扭转波,通过固定距离内扭转波的飞行时间与温度的关系,计算扭转波的波速与温度的拟合关系,根据该拟合关系与实测扭转波波速实现温度测量,并提出了基于磁致伸缩扭转波温度传感器的输出电压模型。实验可得,在室温~500℃下,磁致伸缩温度传感器的输出电压幅值达到 215.7~465.2 mV,与本文提出的输出电压模型一致,能够满足一定温度范围内的测温要求。为提高温度传感器的测温上限,将 $\text{Fe}_{83}\text{Ga}_{17}$ 丝与热敏材料 $\text{Ni}_{20}\text{Cr}_{80}$ 丝耦合成新的波导丝,得到了结构优化后的温度传感器。在室温~1 200℃温度区间内,传感器能够输出幅值范围为 44.9~85.6 mV 的输出电压信号,温度与扭转波波速的拟合关系始终保持高度线性,有能力实现 1 200℃ 以下的可靠测温。

关键词: 温度传感器;磁致伸缩扭转波;输出电压;波速;热敏材料

中图分类号: TP212 TH711 文献标识码: A 国家标准学科分类代码: 470. 40

Design and optimization of temperature sensor based on magnetostrictive torsional wave

Li Baoliang^{1,2}, Li Mingming^{1,2}, Li Haiyi^{1,2}, Weng Ling^{1,2}, Huang Wenmei^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Reliability and Intelligence of Electrical Equipment, Hebei University of Technology, Tianjin 300130, China; 2. Key Laboratory of Electromagnetic Field and Electrical Apparatus Reliability of Hebei Province, Hebei University of Technology, Tianjin 300130, China)

Abstract: The ultrasonic guided wave temperature sensor is currently an emerging temperature measuring instrument in the industrial field, and the selection of its guided wave has important impact on the performance of the sensor. Magnetostrictive torsional wave is suitable for the application, as the basis for temperature measurement with its wave speed proportional to the temperature as well as the characteristics of low decay and easily pick-up. In this article, the magnetostrictive material $\text{Fe}_{83}\text{Ga}_{17}$ wire is selected to generate and conduct magnetostrictive torsional waves. The relationship between the flight time and temperature of the torsional wave at a fixed distance is calculated to achieve the fitting relationship between the wave velocity and temperature. According to the fitting relationship and the measured torsional wave velocity, the temperature measurement is realized, and an output voltage model based on a magnetostrictive torsional wave temperature sensor is proposed. In experiments, the output voltage of the magnetostrictive temperature sensor reaches 215.7~465.2 mV under the room temperature up to 500℃. The fitting relationship between the measured temperature and the wave velocity can be used as a basis for temperature measurement. To increase the upper temperature measurement limit of the temperature sensor, $\text{Fe}_{83}\text{Ga}_{17}$ wire is coupled with the heat sensitive material $\text{Ni}_{20}\text{Cr}_{80}$ wire into a new waveguide wire, and the temperature sensor after structural optimization is obtained. The unamplified output voltage of the optimized sensor reaches 44.9~85.6 mV

收稿日期: 2022-04-04 Received Date: 2022-04-04

* 基金项目: 国家自然科学基金(51777053, 51801053, 52077052)、中央引导地方科技发展资金项目(226Z1704G)、河北省自然科学基金(E2019202315, E2022202067)项目资助

under the temperature from room temperature up to 1 200°C. The wave speed of the torsion wave remains highly proportional to the temperature in the temperature region, which is capable for reliable temperature measurement under 1 200°C.

Keywords: temperature sensor; magnetostrictive torsional waves; output voltage; wave speed; thermos-sensitive material

0 引 言

超声导波测温传感器是一种新型测温传感器,具有测温范围广、精度高、响应时间短等优点,目前多用于航空、军工等领域的高温环境测温^[1-2],其测温依据是超声导波波速与温度的拟合关系。

根据超声导波温度传感器的常用结构和工作原理^[3-4],超声导波在波导杆上多个刻槽处发生反射,通过反射波之间的飞行时间 TOF(time of flight),计算出导波在已知距离内的传播速度,作为传感器的测温依据。

文献[3]和[4]中设计的传感器将压电陶瓷产生的超声纵波 L(0,1)传递到测量杆上,放大 10 000 倍后收集到了幅值 1 V 左右的输出电压信号。文献[5]中传感器选用超声探头产生的扭转波 T(0,1),得到了与采用纵波 L(0,1)时相近的输出电压信号,改善了采用纵波 L(0,1)时存在的频散问题。文献[6]中的传感器用线圈在 Fe-Ga 棒中发生和检测超声扭转波,并在 Fe-Ga 棒上刻槽作为温度测量杆,简化了传感器的结构,减少了信号的衰减,此时收集到的信号放大 1 000 倍就能得到 3 V 左右的输出电压信号。

在上述文献的研究中,温度传感器选用的超声导波的抗干扰能力有限,同时具有频率高、速度快等特点,因此,在实际应用中要求温度传感器的分辨率至少达到 0.003 $\mu\text{s}/^\circ\text{C}$,增大了传感器输出电压信号的处理难度。本文将采用低频、低速、信号强大并且工作原理简单的磁致伸缩扭转波,应用于超声导波温度传感器的设计,提高温度传感器的性能。

1 磁致伸缩扭转波的工作机理

根据魏德曼效应^[7],在介质均匀的磁致伸缩波导丝两端施加激励电流,波导丝内部会发生电-磁耦合,产生环形激励磁场 H_e 。激励磁场 H_e 与外部施加的偏置磁场 H_0 叠加,能够产生一个螺旋磁场 H ;如图 1 所示,磁致伸缩材料内部的磁畴会受螺旋磁场产生的力重新排列,引起材料内部的扭转应变,形成扭转模态的应力波。应力波会引起磁畴的转动,使材料的磁感应强度 B 变化。根据式(1)所示的电磁感应定律,检测线圈能够感应产生一定幅值的输出电压信号 e_0 。

$$e_0 = -n \frac{d\phi}{dt} = -nBs \frac{dx}{dt} = -nBsv_0 \quad (1)$$

其中, n 为线圈的匝数, s 为线圈的截面积, ϕ 为线圈中的磁通量。

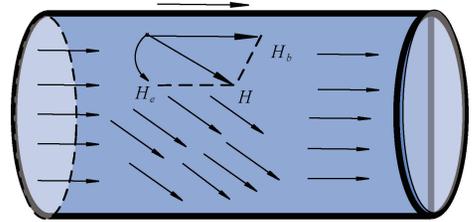


图 1 魏德曼效应

Fig. 1 Wiedemann effect

基于磁致伸缩扭转波的工作原理设计的传感器,其产生的输出电压信号如图 2 所示。由于输出电压的波形接近对称的三角形,因此通过设置触发阈值检测到的时间平均值,能够确定扭转波的飞行时间。根据位移的计算公式 $x = v \cdot t$,在扭转波波速不变的前提下,扭转波的飞行时间能够作为位移传感器的测量依据^[8]。

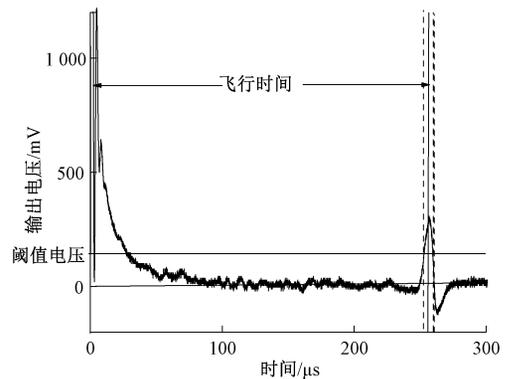


图 2 磁致伸缩扭转波感应产生的输出电压波形

Fig. 2 The output voltage waveform generated by magnetostrictive torsional wave induction

根据固体介质中波速的计算公式,扭转波的波速 v_0 的计算公式为:

$$v_0 = \sqrt{\frac{E}{2(1+\nu)\rho}} \quad (2)$$

由式(2)可得,扭转波的波速是由波导丝的杨氏弹性模量 E 、泊松比 ν 和密度 ρ 决定的。

由于磁致伸缩材料存在 ΔE 效应,使波导丝的杨氏模量 E 会随温度 T 的上升而下降^[9],因此扭转波的波速 v_0 会随温度 T 的上升而下降。

如图 3 所示,将基于磁致伸缩扭转波的传感器置于不同温度环境中,并将实验条件由波速不变改为距离不

变,就能够通过固定距离 d 内扭转波的飞行时间 t ,计算得到扭转波的波速 v_0 随温度 T 的变化关系,作为传感器的测温依据。

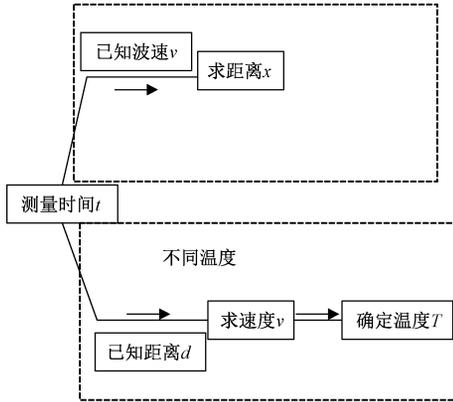


图3 不同传感器的测量原理

Fig. 3 The measurement principle of different sensors

2 基于磁致伸缩扭转波的测温实验设计

2.1 实验平台的搭建

根据超声导波测温原理和魏德曼效应,搭建了如图4所示的基于磁致伸缩扭转波的测温实验平台。

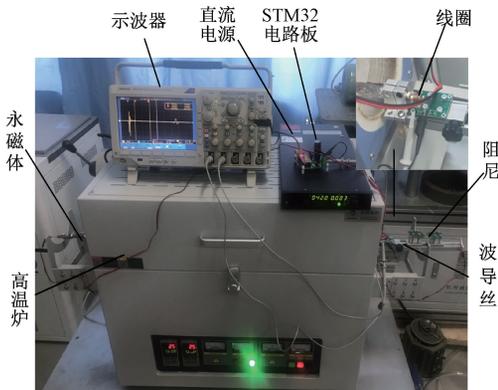


图4 基于磁致伸缩扭转波的测温实验平台示意图

Fig. 4 Diagram of the temperature measurement experimental platform based on magnetostrictive torsional wave

该平台主要由波导丝、永磁体、阻尼、检测线圈、示波器、脉冲发生电路以及高温炉等元件构成。波导丝前端穿过检测线圈,并在橡胶阻尼中固定。检测线圈与DPO3014型数字示波器相连接,用于显示波形信号。脉冲发生电路由直流电源、STM32电路板组成,其输出端与波导丝相连接,能够在波导丝两端施加激励脉冲电流,使波导丝表面产生激励磁场。永磁体固定在波导丝末端,目的是产生偏置磁场。将测量杆部分置于高温炉中,高

温炉能够提供室温 $\sim 1\ 200\text{ }^\circ\text{C}$ 的温度环境,在高温炉内部采用热电偶校准温度。为使永磁体处产生的扭转波在高温环境中的传播距离为固定长度 d ,检测线圈应该固定在高温炉边缘处。

2.2 温度传感器样机的设计

考虑到魏德曼效应产生的磁致伸缩扭转波要在高温下发生明显衰减,因此在温度传感器样机的设计过程中,应该选择合适的永磁体和波导丝来提高传感器的输出电压信号质量。

根据手册中不同种永磁体的力-磁耦合性能以及耐高温、抗氧化辐射性能,本文选择高温下磁性能最好的钕钴2:17型永磁体;磁致伸缩材料中 $\text{Fe}_{83}\text{Ga}_{17}$ 合金的磁致伸缩系数最大,适合作为本文设计的温度传感器中的波导丝。

根据电流的集肤效应,波导丝内部的电流密度 J 能够表示为:

$$J = \frac{I}{2\pi[Rl - l^2 + l^2 e^{-\frac{R}{l}}]} \quad (3)$$

其中, R 为波导丝的半径, l 为表层深度。表层深度 l 能够表示为:

$$l = \frac{1}{\sqrt{\pi f \mu_i \sigma_i}} \quad (4)$$

其中, f 为脉冲电流的频率, σ_i 是波导丝的电导率, μ_i 是波导丝的磁导率。

根据安培环路定理 $\int H_e dl = \int J(r) dS$, 波导丝表面(深度为 $l/2$) 的激励磁场为:

$$H_e = JI(R - 3l/4)/(2R - l) \quad (5)$$

根据文献[7],在 $\text{Fe}_{83}\text{Ga}_{17}$ 合金丝两端施加的激励脉冲电流频率为 $1\ 200\ \text{Hz}$ 、电流幅值为 $30\ \text{A}$ 时产生的扭转波信号最大,因此在 $\text{Fe}_{83}\text{Ga}_{17}$ 丝的电导率 σ_i 和磁导率 μ_i 已知的情况下, $\text{Fe}_{83}\text{Ga}_{17}$ 丝的半径 R 取 $0.4\ \text{mm}$ 时,波导丝表面的激励磁场 H_e 最大。本文将选用直径为 $0.8\ \text{mm}$ 的 $\text{Fe}_{83}\text{Ga}_{17}$ 丝。

3 非绝热条件下传感器的输出电压模型

3.1 磁致伸缩材料的热-力-磁耦合方程

磁致伸缩波导丝在非等温条件下的热-磁-力耦合示意图如图5所示^[10]。

对于磁致伸缩材料,内能 U 的变化量主要取决于两种物理量:一种是应变变量 ε 所受的弹性应变力 σ ;另一种是磁场强度方面的磁感应强度 B ,能够表示为:

$$dF = \sigma d\varepsilon - HdB - SdT \quad (6)$$

其中, F 为自由能, S 为交换系数, T 为温度。由式(6)可得,自由能 F 取决于应变变量、磁感应强度 B 和温

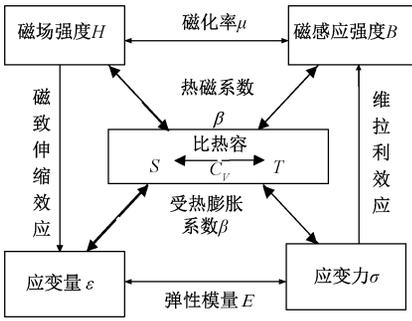


图 5 磁致伸缩材料中的热-磁-力耦合模型

Fig. 5 Thermo-magnetic-mechanical coupling model in magnetostrictive materials

度 T , 能够分别表示为:

$$\begin{cases} \sigma = \frac{\partial F}{\partial \varepsilon} \\ H = -\frac{\partial F}{\partial B} \\ S = -\frac{\partial F}{\partial T} \end{cases} \quad (7)$$

将磁导率 μ 、应变系数 h 、热膨胀系数 a 、热磁系数 β 、应变变量 ε 以及比热容 C_v 的计算公式^[11-14]代入式(7), 并考虑非等温情况, 式(7)能够表示为:

$$\begin{cases} \sigma = E\varepsilon - \frac{B}{h} + a\Delta T \\ H = \frac{B}{\mu} + \frac{\varepsilon}{h} + \beta\Delta T \\ S = C_v \left(\frac{\Delta T}{T} \right) - a\varepsilon + \beta B \end{cases} \quad (8)$$

E 为波导丝的杨氏模量。在本文研究的磁致伸缩波导丝内部的应变过程中, 扭转波的产生是因为其内部的剪切模量受到了挤压。因此, 热弹性方程中弹性应变力 σ 的表达式 $\sigma = E\varepsilon$, 应该由剪切应变力 τ 的表达式 $\tau = G\gamma$ 代替, G 为剪切模量, γ 为剪切应变。

式(8)应该表示为:

$$\begin{cases} \tau = G\gamma - \frac{B}{h} + a\Delta T \\ H_e = \frac{B}{\mu} + \frac{\gamma}{h} + \beta\Delta T \end{cases} \quad (9)$$

在波导丝上没有外力的情况下, 剪切力 τ 为 0, 将 $\tau=0$ 代入式(6), 能够消除磁感应强度 B 对剪切应变 γ 的影响, 得到关于剪切应变 γ 的表达式:

$$\gamma = \frac{\mu h H_e - (ah^2 + \mu h B)\Delta T}{Gh^2 + \mu} \quad (10)$$

3.2 温度传感器的输出电压模型

在检测线圈开路的情况下, 由于激励脉冲电流为 0, 所以激励磁场 $H_e = 0$; 在室温下, ΔT 也能够认为等于 0。

因此, 式(9)能够演化为开路条件下检测线圈中的逆磁致伸缩关系:

$$B = -\mu' h' \gamma \quad (11)$$

其中, μ' 和 h' 分别表示线圈覆盖下的波导丝的磁导率与应变系数。

将式(10)和(11)代入式(1)中的输出电压模型, 得到的输出电压模型如式(12)所示。

$$e_0 = ns\mu' h' \sqrt{\frac{E}{2\rho(1+\nu)}} \frac{\mu_i h_i H_e - (ah_i^2 + \mu_i h_i \beta)\Delta T}{Gh_i^2 + \mu_i} \quad (12)$$

在该模型中, 磁致伸缩波导丝的受热膨胀系数 a 为 10^{-13} 级别的常数, 与模型中其他物理量相比, 其大小能够被忽略, 因此式(12)能够表示为:

$$e_0 = ns\mu' h' \mu_i h_i \sqrt{\frac{E}{2\rho(1+\nu)}} \frac{H_e - \beta\Delta T}{Gh_i^2 + \mu_i} \quad (13)$$

应用式(13)对非等温环境下传感器的输出电压进行数值计算, 计算中采用的计算参数如表 1 所示^[15]。

表 1 计算参数

Table 1 Calculation parameters

参数	数值	参数	数值
线圈匝数 n	800	泊松比 ν	0.2
单匝线圈面积 s/mm^2	23.8	刚度模量 G/GPa	72.625
波导丝半径 R/mm	0.3	经验常数 η	30
饱和磁致伸缩系数 $\lambda_s/\times 10^{-6}$	20.9	密度 $\rho/(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$	7.347
饱和磁化强度 $M_s/(\text{kA}\cdot\text{m}^{-1})$	1186	弹性模量 E/GPa	174.3
热磁系数 $\beta/(\text{Am}^{-1}/^\circ\text{C})$	-76	电导率 $\sigma_i/(\text{S}\cdot\text{m}^{-1})$	1.21×10^7
初始磁弹耦合系数 $h_i/(\text{m}\cdot\text{A}^{-1})$	0.70	初始线性区的磁化率 χ_m	20

4 磁致伸缩温度传感器的实验与输出特性分析

采用直径为 0.8 mm 的 $\text{Fe}_{83}\text{Ga}_{17}$ 丝和钕钴 2:17 型永磁体构成温度传感器, 在上文搭建的实验平台中进行实验, 在室温 $\sim 500^\circ\text{C}$ 环境下, 测量得到的输出电压波形如图 6 所示。

由图 6 可得, 本文设计的基于 $\text{Fe}_{83}\text{Ga}_{17}$ 丝的温度传感器, 能够在室温 $\sim 500^\circ\text{C}$ 环境下不经放大产生 215.7~465.2 mV 输出电压。输出电压幅值的测量值与计算值的对应关系如图 7 所示。由图 7 可得, 传感器的输出电压的测量值在 300°C 以下的环境中与计算值高度拟合, 验证了本文提出的输出电压模型; 但是在 300°C 以上的环境中, 输出电压的测量值与计算值有误差。

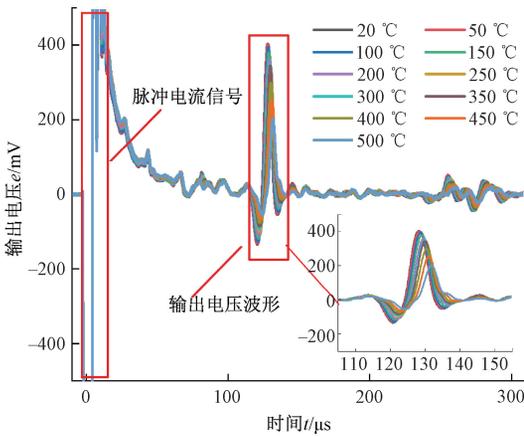


图6 磁致伸缩温度传感器的输出电压波形图

Fig. 6 Output voltage waveform of the magnetostrictive temperature sensor

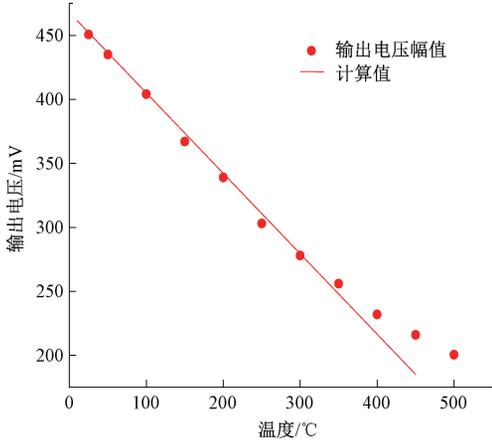


图7 不同温度下磁致伸缩温度传感器的输出电压幅值的实验值与计算值

Fig. 7 The experimental and calculated values of the output voltage amplitude of the magnetostrictive temperature sensor at different temperatures

经过多次实验,通过阈值法测量得到的不同温度环境下扭转波的飞行时间如表2所示。根据表2中的数据,得到扭转波飞行时间 t 随温度的变化关系如图8(a)所示;通过计算,得到扭转波速度 v 随温度的变化关系如图8(b)所示。由图8(b)所示的关系曲线可得,在室温~500°C的温度范围内,扭转波传播速度与温度的拟合关系为 $v = 2712.7 - 0.357T$,能够作为传感器的测量依据。

由于波导丝和永磁体的磁性能会随温度下降,因此,基于 $\text{Fe}_{83}\text{Ga}_{17}$ 丝的温度传感器只能工作在500°C以下。为使磁致伸缩扭转波信号强、衰减小等优势,在测温领域能够得到充分地发挥,需要通过结构的优化设计,设计出量程更大的温度传感器。

表2 不同温度下测得的飞行时间数据

Table 2 Time-of-flight data measured at different temperatures

温度/°C	实验1测得的飞行时间/ μs	实验2测得的飞行时间/ μs	实验3测得的飞行时间/ μs
20	129.5	129.5	129.4
50	129.8	129.8	129.7
100	130.7	130.9	130.7
150	131.6	131.6	131.5
200	132.5	132.4	132.5
250	133.4	133.3	133.4
300	134.3	134.3	134.3
350	135.2	135.2	135.6
400	136.1	136.0	136.1
450	137.0	137.2	137.4
500	137.9	137.7	137.9

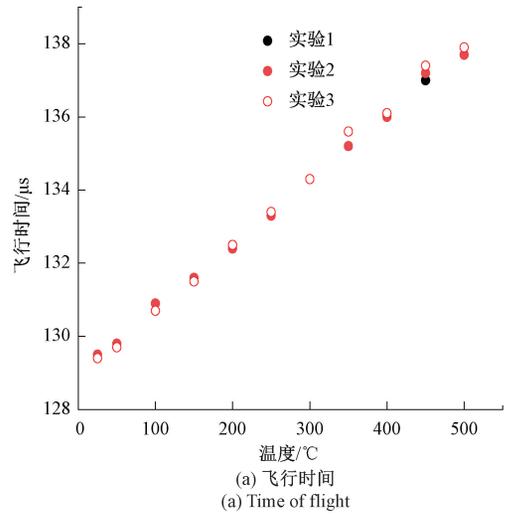
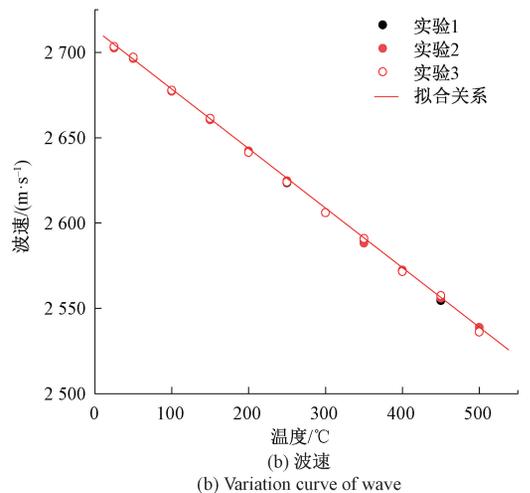
(a) 飞行时间
(a) Time of flight(b) 波速
(b) Variation curve of wave

图8 磁致伸缩温度传感器变化曲线

Fig. 8 Change curve of a magnetostrictive temperature sensor

5 磁致伸缩温度传感器结构的优化设计与输出特性分析

5.1 磁致伸缩温度传感器的结构优化设计

为了提高传感器的测温上限,本文将继续对温度传感器的结构进行优化设计,使磁致伸缩扭转波在室温环境下产生,在高温环境下的测量杆中传导,并通过实验测试其性能。优化设计后的温度传感器结构与工作原理如图 9 所示。

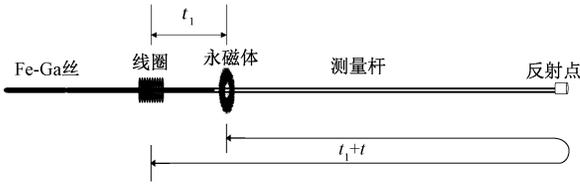


图 9 优化设计后温度传感器的结构示意图

Fig. 9 Structure of temperature sensor with the optimized design

将磁致伸缩波导丝与永磁体置于高温炉外并设置石棉隔热板封住炉口,使磁致伸缩扭转波的产生过程不受温度影响。将热敏材料制作的测量杆与磁致伸缩波导丝耦合,采用单晶银在耦合处滴焊为水滴形状能够起到聚能器作用^[16],使扭转波在耦合处传递时衰减减少。在测量杆后端形成反射点,能够使扭转波在传递时产生扭转波。永磁体位置产生的扭转波将从 $\text{Fe}_{83}\text{Ga}_{17}$ 丝末端向两端传播,向前端传播的扭转波到达检测线圈的时间为 t_1 ; 向后端传播的扭转波透过耦合点在测量杆中传播,在反射点处向前端传播,传递到检测线圈处所需时间为 $t+t_1$ 。检测线圈检测到的两个输出电压波形分别为扭转波原始信号和反射信号,两个波形之间的时间差 t 即为扭转波在距离为 $2d$ 的测量杆中的飞行时间。选用工作温度低但矫顽力更大、成本更低的烧结钕铁硼永磁体代替钕钴 2:17 型永磁体;在 $\text{Fe}_{83}\text{Ga}_{17}$ 丝两端施加与上文参数相同的激励脉冲电流,将高温炉从室温加热至 $1\,200^\circ\text{C}$ 进行实验,得到不同温度环境下的传感器输出电压波形。根据扭转波的飞行时间 t ,计算得到波速 v 与温度 T 之间的拟合关系,作为传感器的测温依据。

$\text{Ni}_{20}\text{Cr}_{80}$ 合金具有热膨胀系数小、导热性能好、熔点高等优点,具有作为温度传感器中测量杆的理想条件。设 $\text{Ni}_{20}\text{Cr}_{80}$ 丝的声阻抗为 Z_2 ,与声阻抗为 Z_1 的 $\text{Fe}_{83}\text{Ga}_{17}$ 丝耦合时,其透射系数 T_1 为^[3]:

$$T_1 = \frac{2Z_2}{Z_1 + Z_2} = \frac{2\rho_2 c_2 A_2}{\rho_1 c_1 A_1 + \rho_2 c_2 A_2} \quad (14)$$

其中, c_1 、 c_2 为扭转波的声速, A_1 、 A_2 为波导丝的截面积。在本文设计的优化设计后的温度传感器的结构当中,扭转波在传递时,需要经过两次透射再传递到线圈位置,其总透射系数 T_n 为:

$$T_n = T_1 \cdot T_2 = \frac{4Z_1 Z_2}{(Z_1 + Z_2)^2} = \frac{4(\rho_2 c_2 A_2)(\rho_1 c_1 A_1)}{(\rho_1 c_1 A_1 + \rho_2 c_2 A_2)^2} = \left(\frac{1}{2} + \frac{\rho_2 c_2 A_2}{4\rho_1 c_1 A_1} + \frac{\rho_1 c_1 A_1}{4\rho_2 c_2 A_2} \right)^{-1} \quad (15)$$

由式(15)可得,当截面积 $A_1 = A_2$ 时,即 $\text{Ni}_{20}\text{Cr}_{80}$ 丝与 $\text{Fe}_{83}\text{Ga}_{17}$ 丝直径相等时,透射系数 T_n 最大,扭转波传递前后的声压之比最大。所以本文的传感器结构设计中选用直径为 0.8 mm 的 $\text{Ni}_{20}\text{Cr}_{80}$ 丝作为测量杆与 $\text{Fe}_{83}\text{Ga}_{17}$ 丝耦合。

5.2 优化设计后温度传感器的输出特性分析

图 10 为优化设计后的温度传感器在不同温度下的输出电压波形图,由图 10 可得,优化设计后的温度传感器,在室温 $\sim 1\,200^\circ\text{C}$ 的温度区间内,能够不经放大输出幅值范围为 $44.9 \sim 85.6\text{ mV}$ 的输出电压信号输出电压,实现高达 $1\,200^\circ\text{C}$ 的环境下的测温。

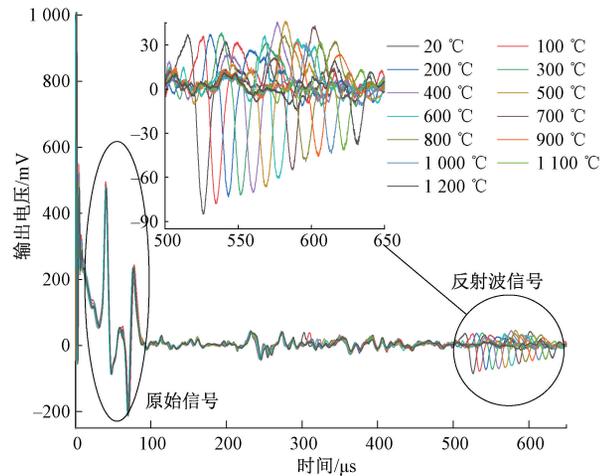


图 10 优化设计后的温度传感器在不同温度下的输出电压波形图

Fig. 10 Output voltage waveform diagram of the temperature sensor after optimizing at different temperatures

经过多次实验,测量得到的不同温度环境下扭转波的飞行时间如表 3 所示。根据表 3 中扭转波的飞行时间数据,计算得到如图 11 所示的扭转波波速与温度的拟合关系,并与文献[3]中纵波波速与温度的拟合关系相对比。由图 11 可知,扭转波波速与温度的线性关系能够表示为 $v = 3\,249.7 - 0.609T$,与纵波相比,更接近线性,有利于提高测温准确性。

表3 不同温度下测得的飞行时间数据

Table 3 Time-of-flight data measured at different temperatures

温度/°C	实验1测得的 飞行时间/μs	实验2测得的 飞行时间/μs	实验3测得的 飞行时间/μs
20	432.6	431.6	432.6
100	437.2	437.2	435.2
200	442.8	442.0	442.8
300	448.4	448.4	447.4
400	454.0	454.0	454.9
500	459.6	457.6	459.6
600	465.2	465.2	463.2
700	470.8	470.2	471.8
800	476.6	476.6	476.6
900	482.2	484.2	83.2
1 000	487.8	487.6	487.8
1 100	493.6	493.2	492.6
1 200	499.2	498.2	498.9

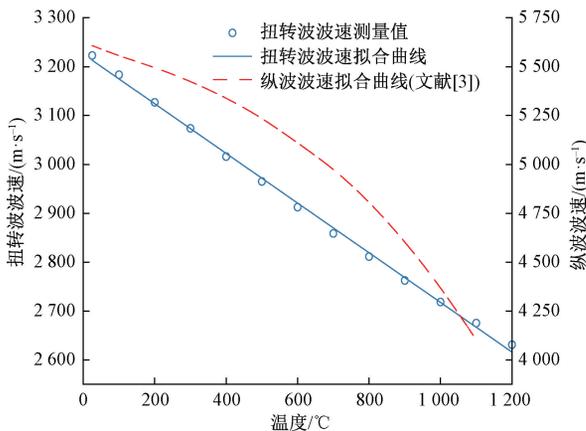


图11 不同模式下波速与温度的拟合关系对比

Fig. 11 The fitting relationship between the wave velocity and temperature in different modes

根据传感器线性度的计算公式:

$$\delta = \frac{\Delta Y_{\max}}{Y} \times 100\% \quad (16)$$

计算可得,优化设计后的温度传感器,线性度为98.7%,全量程最大误差约为4°C,仅占0.3%。

根据灵敏度 S_i 计算公式:

$$S_i = \lim_{x_i \rightarrow 0} \left(\frac{y_i}{x_i} \right) \quad (17)$$

计算可得,传感器的灵敏度为0.48 m/s/°C。

根据重复性 ε_R 的计算公式:

$$\varepsilon_R = \frac{cS_{\max}}{Y_{FS}} \quad (18)$$

计算可得,传感器的重复性达到99.2%。

与现有的超声导波温度传感器相比,优化设计后的温度传感器测量精度更高,更有利于在测温领域的应用。

6 结 论

根据磁致伸缩扭转波原始信号强、工作原理简单等特点,设计了 $\text{Fe}_{83}\text{Ga}_{17}$ 丝的磁致伸缩温度传感器,并根据波导丝的热-磁-力耦合方程建立起了温度传感器的输出电压模型。在 $\text{Fe}_{83}\text{Ga}_{17}$ 丝两端施加频率为1 200 Hz、脉冲宽度为5 μs、电流幅值为30 A的激励脉冲电流,在室温~500°C温度区间内,磁致伸缩温度传感器能够输出幅值为215.7~465.2 mV输出电压信号,验证了输出电压模型;温度与扭转波波速的拟合关系为 $v = 2\,712.7 - 0.357 T$,能够作为测温依据,但是传感器的测温上限受限于波导丝和永磁体的工作温度。

将 $\text{Fe}_{83}\text{Ga}_{17}$ 丝与热敏材料 $\text{Ni}_{20}\text{Cr}_{80}$ 丝耦合成新的波导丝,制作了优化设计后的温度传感器样机,传感器的量程将仅由处于待测温度环境的Ni-Cr合金决定。实验结果表明,该传感器在室温~1 200°C温度区间内,能够不经放大输出幅值为44.9 mV~85.6 mV的输出电压信号,温度与扭转波波速的拟合关系为 $v = 3\,249.7 - 0.609 T$ 。优化设计后的温度传感器线性度达到98.7%,重复性达到99.2%,全量程最大误差约为4°C,仅占0.3%,灵敏度为0.48 m/s/°C,稳定性与精确度得到了很大的提高。研究为超声导波测温传感器的设计与推广应用提供了理论依据与指导。

参考文献

- [1] LAURIE M, MAGALLON D, REMPE J, et al. Ultrasonic high-temperature sensors: Past experiments and prospects for future use[J]. International Journal of Thermophysics, 2010, 31(8-9): 1417-1427.
- [2] LI ZH, ZHOU X ZH, DONG CH L, et al. Ultrasonic thermometry algorithm based on inverse quadratic function[J]. IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, 2020, 68: 1876-1884.
- [3] WEI Y L, GAO W, GAO Y B, et al. A measurement system of high-temperature oxidation environment with ultrasonic $\text{Ir}_{0.6}\text{Rth}_{0.4}$ alloy thermometry[J]. Ultrasonics, 2018, 89: 102-109.
- [4] ZHAO G CH, YI T X, SONG L P, et al. Research

- status and development prospect of optical fiber high-temperature sensors[J]. *Advanced Materials Research*, 2014, 2912: 1388-1393.
- [5] SURESH P, PRABHU R, KRISHNAN B, et al. Torsional mode ultrasonic helical waveguide sensor for re-configurable temperature measurement[J]. *Journal of Technology & Science*, 2016, 49: 580-583.
- [6] 魏艳龙, 王高, 郭倩, 等. 基于磁致伸缩式超声导波测温技术基础研究[J]. *火力与指挥控制*, 2016, 41(7): 171-174.
WEI Y L, WANG G, GUO Q, et al. Basic study on temperature detection based on magnetostrictive ultrasonic guide wave[J]. *Fire Control & Command Control*, 2016, 41(7): 171-174.
- [7] 李媛媛, 王博文, 黄文美, 等. 考虑应力波衰减特性的磁致伸缩位移传感器的输出特性与实验[J]. *仪器仪表学报*, 2018, 39(7): 34-41.
LI Y Y, WANG B W, HUANG W M, et al. Output characteristics and experiments of magnetostrictive displacement sensor considering stress wave attenuation[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2018, 39(7): 34-41.
- [8] CARMAN G P, MITROVIC M. Nonlinear constitutive relations for magnetostrictive materials with applications to 1-D problems[J]. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 1995, 6:673-683.
- [9] LI M M, LI J H, BAO X Q, et al. Magnetostrictive $Fe_{82}Ga_{13.5}Al_{4.5}$ wires with large Wiedemann twist over wide temperature range[J]. *Materials & Design*, Volume 135, 2017:197-203.
- [10] DAPINO M J, SMITH R C, FLATAU A B. Structural magnetic strain model for magnetostrictive transducers[J]. *IEEE Transactions on Magnetics*, 2000, 36: 545-556.
- [11] LEE E W. Magnetostriction and magnetomechanical effects[J]. *Reports on Progress in Physics*, 1955, 18(1):184.
- [12] ZHOU X, YU C, TANG C, et al. Wiedemann effect in $Fe_{83}Ga_{17}$ alloys for magnetostrictive sensors[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2014, 14(1): 249-257.
- [13] MOHAMMAD R K, YOUSEF H, FARROKH S, et al. A novel magnetostrictive torsional resonant transducer[J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, Volume 195, 2013: 71-78.
- [14] 王莉, 王博文, 翁玲, 等. 高灵敏度光纤磁场传感器的设计与模型研究[J]. *仪器仪表学报*, 2012, 33(6): 1281-1286.
WANG L, WANG B W, WENG L, et al. Design and model research of high sensitivity optical fiber magnetic field sensor[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2012, 33(6): 1281-1286.
- [15] WANG Q, LI M, NIU X, et al. Model and design of high-temperature ultrasonic sensors for detecting position and temperature based on iron-based magnetostrictive wires[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2021, 21(23): 26868-26877.
- [16] 任海平. 超声导波测温关键技术研究[D]. 太原: 中北大学, 2017.
REN H P. Research on key technology of ultrasonic guided wave temperature measurement abstract[D]. Taiyuan: North University of China, 2017.

作者简介



李保良, 2019 年于山东农业大学获得学士学位, 现为河北工业大学硕士研究生, 研究方向为磁致伸缩位移传感器及其应用。

E-mail: 18853853781@163.com

Li Baoliang received his B. Sc. degree from Shandong Agricultural University in 2019. He is currently a master student at Hebei University of Technology. His research interests include magnetostrictive displacement sensor and its application.



李明明(通信作者), 2009 年于山东大学获得学士学位, 2012 年于北京科技大学获得硕士学位, 2018 年于北京科技大学获得博士学位, 现为河北工业大学副教授, 博士生导师, 主要研究方向为新型磁性材料与器件。

E-mail: Limm@hebut.edu.cn

Li Mingming (Corresponding author) received his B. Sc. degree from Shandong University in 2009, received his M. Sc. degree and Ph. D. degree both from University of Science and Technology Beijing in 2012 and 2018, respectively. He is currently an associate professor at Hebei University of Technology. His main research interest is intelligent materials and devices.