

# 反射式光纤温度传感器的设计\*

张 平, 马吉祥

(西安建筑科技大学机电工程学院 西安, 710055)

**摘要** 针对强磁、狭小空间等特殊环境下的液体温度实时检测,利用液体折射率随温度变化规律,结合光在液体中的传播特性,设计了用于液体温度实时检测的反射式光纤温度传感器。在提出反射式光纤温度传感器测温原理的基础上,确定了传感器探头结构,根据光纤纤端光场近似高斯分布的特性建立传感器数学模型,分析了不同参数对传感器输出特性的影响,并搭建传感器实验平台进行静态标定。实验结果表明:在 30~120℃的测量范围内,该传感器可以实现对温度的检测,灵敏度为 0.71 mV/℃。

**关键词** 光纤; 温度传感器; 液体; 数学模型; 特性  
**中图分类号** TH811

## 引 言

液体温度是许多工业生产中重要的参量。但是在一些应用领域由于特殊的工作环境和要求,如高电压、大电流、强电磁干扰、高温、空间狭小及实时检测等<sup>[1-2]</sup>,对传感器的性能提出了较高的要求。热电偶、电阻等具有电特性的温度传感器容易受到电磁干扰的影响,而红外测温属于非接触测量<sup>[3]</sup>,仅可以检测到物体表面温度<sup>[4]</sup>。为此,这些特殊环境就需要可靠性高、绝缘性好、抗电磁干扰性强、响应快及体积小的温度传感器。

光纤传感器是以光为载体,光纤作为介质,用来感知及传播外界变化传感器<sup>[5]</sup>,具有体积小、化学稳定性好、抗电磁干扰及响应快等特点,可用于特殊环境下液体温度检测<sup>[6]</sup>。李艳萍等<sup>[7]</sup>设计了反射式光纤温度传感器,但仍以半导体材料作为温度敏感元件。敏感元件材料<sup>[8]</sup>是经过自身的热物理或化学性质变化来反映温度,所以存在热滞性<sup>[9]</sup>,不能满足实时性测量要求。为了解决此问题,笔者基于液体折射率实时随液体温度变化规律,提出一种反射式双圈同轴光纤测温传感器。该传感器可实现变压器内部绝缘油温、电站风机齿轮箱油温、风力发电机润滑油温<sup>[10]</sup>等强磁电环境下油温的实时监测。相比于传统的热敏电阻、红外测温,该传感器不仅抗磁干扰、响应快,还可将传感器探头伸入液体内部,实现液体内部温度测量。该反射式光

纤温度传感器采用双圈同轴结构可消除光源强度波动、反射表面性质以及光纤光强损耗等变化对传感器输出特性的影响<sup>[11]</sup>。

## 1 传感器测温原理及结构

### 1.1 测温原理

反射式光纤测温传感器是由光源、入射光纤、接收光纤、转换电路以及进液套组成。光源为波长 650 nm 的激光器发出的光,通过入射光纤传输到充满待测液的进液套中,经过反射面后由接收光纤接收送至光电转换器进行光电转换。接收光强的变化反映了被测温度的变化,其光强响应特性是这类传感器的设计依据和应用基础。光强响应特性是在纤端出射光场分布的基础上建立起来的,因此首先必须建立合适的光场分布假设。对于单接收光纤传感头结构,以发射光纤中心轴线为  $z$  轴,以过两光纤端面中心的连线为  $x$  轴建立坐标系,如图 1 所示。

光纤温度传感器利用液体折射率随温度变化的特性来实现,当温度升高时液体的折射率变小,变化近似成线性关系。通过对实验数据的拟合可以得到油液的折射率  $n_T$  随温度变化的经验关系<sup>[12]</sup>为

$$n_T = n_{20} - \alpha(T - 20) \quad (1)$$

其中:  $n_{20}$  为 20℃ 时液体的折射率;  $\alpha$  为该液体温度系数;  $T$  为液体实际温度。

光纤最大入射角  $\theta_{N_A}$  与光纤的数值孔径  $N_A$  和介

\* 国家自然科学基金资助项目(51405366);陕西省液压技术重点实验室基金资助项目(YYJS2022KF08)  
收稿日期:2019-12-25;修回日期:2020-03-25

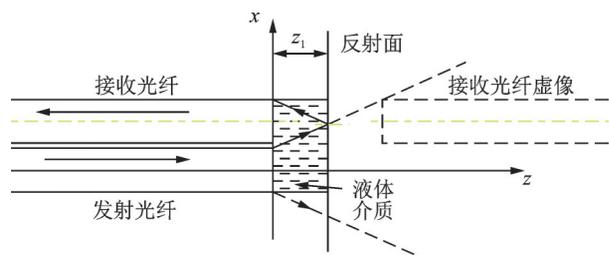


图 1 单接收光纤温度传感器光耦合原理图

Fig.1 Schematic of optical coupling of single receiving fiber temperature sensor

质折射率  $n_T$  有关

$$\sin\theta_{NA} = \frac{N_A}{n_T} \quad (2)$$

Yuan 等<sup>[13]</sup>认为纤端光场既不是纯粹的高斯光束,也不是纯粹均匀分布的几何光束,而是更接近于两者的混合。结合文献[14]及上述两种近似情况,且考虑激光光束在液体传播过程中存在油液吸收度等因素,给出光束在油液中传播的强度调制函数为

$$I(T) = \frac{AK_0I_0}{\pi R^2(T)} \exp[-x^2/R^2(T)] \quad (3)$$

其中: $A$ 为油液对光的吸收度; $K_0$ 为光波在发射光纤中的损耗; $I_0$ 为光源耦合到光纤中的光强; $R(T)$ 为光场分布等效半径; $x$ 为发射光纤和接收光纤的轴间距。

$$R(T) = a_0 + k \tan\theta_{NA} z^{\frac{3}{2}} \quad (4)$$

其中: $a_0$ 为纤芯半径; $z$ 为反射面与光纤端面的垂直距离; $k$ 为光场耦合系数表征光源的性质和耦合条件对光场分布的影响。

将式(1)、式(2)代入式(4),可得到温度和光强调制函数的关系为

$$I(T) = \frac{AK_0I_0}{\pi \left( a_0 + k \tan \left( \arcsin \left( \frac{N_A}{n_{20} - \alpha(T-20)} \right) \right) z^{\frac{3}{2}} \right)^2} \times \exp \left[ -x^2 / \left( a_0 + k \tan \left( \arcsin \left( \frac{N_A}{n_{20} - \alpha(T-20)} \right) \right) z^{\frac{3}{2}} \right)^2 \right] \quad (5)$$

通过式(5)可知,当参数  $x, a_0, z$  和  $N_A$  一定时,光纤输出特性仅与光纤端面与反射体之间的液体温度有关。接收光强的大小决定于反射体和光纤探头之间液体的温度,当温度改变时输出光强也发生相应的变化,可以通过对输出光强的检测得到温度的变化量。此过程不需要热敏元件,缩短了响应时间。

## 1.2 传感器结构

传感器结构如图 2 所示,由反射体、进液套、传感器主体及传输光纤组成。传感器主体、进液套、反射体之间通过螺纹连接,在反射体的反射面和传感器主体的端面间形成确定的距离。

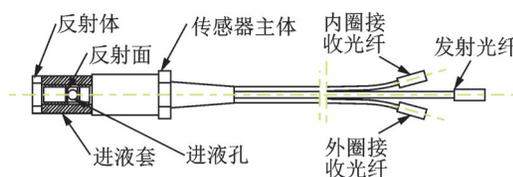


图 2 反射式光纤温度传感器结构示意图

Fig.2 Schematic of the structure of reflective optical fiber temperature sensor

进液套结构如图 3 所示,液体能够通过进液孔进入进液套中,并在反射体的反射面和传感器主体的端面间形成液体膜,液体厚度即为反射面与传感器主体端面的垂直距离。

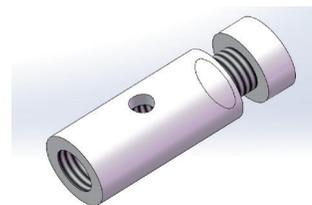


图 3 进液套

Fig.3 Liquid-accessible device

探头光纤排列方式如图 4 所示,结构为双圈同轴。传感器结构中心为单根发射光纤(TF),外围为接收光纤,包括内圈接收光纤和 外圈接收光纤两部分。内圈接收光纤(RF<sub>1</sub>)有 6 根,外圈接收光纤分为两组,第 1 组(RF<sub>2</sub>)、第 2 组(RF<sub>3</sub>)均为 6 根。这样的排列方式可以在相同的面积布置更多的光纤,且较多的接收光纤可以增大外圈的接收光功率。

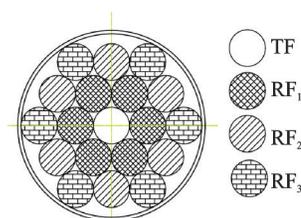


图 4 双圈同轴式光纤排列结构

Fig.4 Structure of double-circle coaxial optical fiber arrangement

## 2 反射式光纤温度传感器模型

如图1所示的单接收光纤温度传感器,假设反射面为光滑镜面,不考虑散射的影响,则接收光纤所接收到的光强等价于将之置于反射体镜像对称处直接接收到的光强乘以镜面的反射系数。根据光纤纤端光强分布假设,将式(3)在接收光纤端面积分得到光功率为

$$\phi(T) = A\rho \iint_S KI(T) \exp(-\sum_i \eta_i r_i) ds \quad (6)$$

其中: $\rho$ 为镜面反射率; $K$ 为接收光纤的光功率损耗系数(本征损耗); $\exp(-\sum \eta_i r_i)$ 表示由于接收光纤弯曲所附加的损耗; $S$ 为光纤有效接收面积。

将式(5)代入式(6)可得

$$\phi(T) = A\rho \iint_S \frac{K_0 K I_0}{\pi \left( a_0 + k \tan \left( \arcsin \left( \frac{N_A}{n_{20} - \alpha(T-20)} \right) \right) z^{\frac{3}{2}} \right)^2} \times \exp \left[ \frac{-x^2}{\left( a_0 + k \tan \left( \arcsin \left( \frac{N_A}{n_{20} - \alpha(T-20)} \right) \right) z^{\frac{3}{2}} \right)^2} \right] \exp(-\sum_i \eta_i r_i) ds \quad (7)$$

从式(7)可以看出,在距离确定的情况下,传感器输出除了受到液体温度变化的影响外,还受到入射光功率波动、光纤传输损耗、微弯损耗和油液吸收率 $A$ 的影响。

为解决此类问题,采用如图4所示的双圈同轴的结构。以发射光纤中心轴线为 $z$ 轴,以过发射光纤中心的径向连线为 $x$ 轴,在端面建立坐标系如图5所示。

由图4所示的光纤探头光纤束的排列方式和图5可知,若TF与RF<sub>1</sub>的轴间距分别为 $d$ ,则TF与RF<sub>2</sub>和RF<sub>3</sub>的轴间距分别为 $\sqrt{3}d$ 和 $2d$ 。在图5所建

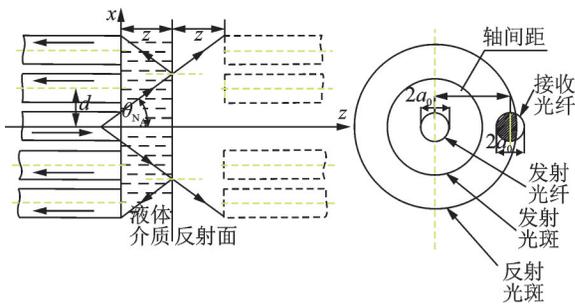


图5 双圈同轴式光纤传感器光耦合原理图

Fig.5 Optical coupling schematic of double-loop coaxial fiber optic sensor

立的坐标系中,将轴间距 $x=d$ 代入式(7),分别计算内圈接收光纤和外圈接收光纤所接收到的总光功率,则得

$$\phi_1(T) = 6A_1 \rho_1 \iint_{S_1} \frac{K_0 K_1 I_0}{\pi R^2(T)} \exp(-\sum_i \eta_i r_i) \times \exp\left(\frac{-d^2}{R^2(T)}\right) ds_1 \quad (8)$$

$$\phi_2(T) = 6A_2 \rho_2 \iint_{S_2} \frac{K_0 K_2 I_0}{\pi R^2(T)} \exp(-\sum_j \eta_j r_j) \times \exp\left(\frac{-(\sqrt{3}d)^2}{R^2(T)}\right) ds_2 \quad (9)$$

$$\phi_3(T) = 6A_3 \rho_3 \iint_{S_3} \frac{K_0 K_3 I_0}{\pi R^2(T)} \exp(-\sum_k \eta_k r_k) \times \exp\left(\frac{-(2d)^2}{R^2(T)}\right) ds_3 \quad (10)$$

其中: $\phi_1$ 为内圈接收光纤束接收的光功率; $\phi_2$ 为外圈接收光纤束第1组接收的光功率; $\phi_3$ 为外圈接收光纤束第2组接收的光功率。

此积分式较为复杂。由于单根多模光纤纤芯半径较小,可用接收光纤端面中心点处的光强来作为各个光纤面上的平均光强。以内圈为例,可得其接收光功率表达式为

$$\phi_1(T) = 6A_1 \rho_1 \frac{K_0 K_1 I_0 S_1}{\pi R^2(T)} \exp(-\sum_i \eta_i r_i) \times \exp\left(\frac{-d^2}{R^2(T)}\right) \quad (11)$$

采用内圈与外圈接收光功率比值,得到光纤传感器的输出特性调制函数。内外接收光纤为同规格光纤,光纤端面的纤芯面积、本征损耗和弯曲所带来的附加损耗等可认为相等,则得到光纤传感器输出特性调制函数为

$$M(T) = \frac{\phi_2 + \phi_3}{\phi_1} = \frac{\left[ 6A_2 \rho_2 S_2 \frac{K_0 K_2 I_0}{\pi R^2(T)} \exp(-\sum_j \eta_j r_j) \exp\left(\frac{-(\sqrt{3}d)^2}{R^2(T)}\right) + 6A_3 \rho_3 S_3 \frac{K_0 K_3 I_0}{\pi R^2(T)} \exp(-\sum_k \eta_k r_k) \exp\left(\frac{-(2d)^2}{R^2(T)}\right) \right]}{6A_1 \rho_1 \frac{K_0 K_1 I_0 S_1}{\pi R^2(T)} \exp(-\sum_i \eta_i r_i) \exp\left(\frac{-d^2}{R^2(T)}\right)} \quad (12)$$

在光纤探头与反射面之间距离确定的前提下,由于接收光纤采用同种油液环境、同一反射面和同一光纤,则 $M(T)$ 中的油液吸收率 $A$ 、接收面反射率 $\rho$ 、光纤接收面积 $S$ 本征损耗 $K$ 和弯曲附加损耗

$\exp(-\sum \eta_i r_i)$  可认为一致,则有如下近似关系

$$\begin{cases} A_1 = A_2 = A_3 \\ \rho_1 = \rho_2 = \rho_3 \\ S_1 = S_2 = S_3 \\ K_1 = K_2 = K_3 \\ \exp(-\sum_j \eta_j r_j) = \exp(-\sum_k \eta_k r_k) = \exp(-\sum_i \eta_i r_i) \end{cases} \quad (13)$$

最终双圈同轴光纤温度传感器调制函数为

$$M(T) = \frac{\phi_2 + \phi_3}{\phi_1} = \frac{\exp(\frac{-\sqrt{3}d^2}{R^2(T)}) + \exp(\frac{-2d^2}{R^2(T)})}{\exp(\frac{-d^2}{R^2(T)})} \quad (14)$$

用比值处理的方法可以消除光源功率波动  $I_0$ 、光纤传输损耗  $K$ 、微弯损耗  $(-\sum \eta_i r_i)$  和油液吸收率  $A$  等对传感器输出特性的影响,使得输出特性只与油液温度的变化有关。

### 3 输出特性仿真

根据数学模型,可分别绘制出反射距离、数值孔径、轴间距及纤芯半径不同时双圈同轴光纤温度传感器的特性曲线,以液体温度为横坐标,光功率比值  $M(T)$  为纵坐标,建立坐标系。为了更好地比较灵敏度变化,以  $d=300 \mu\text{m}$ ,  $a_0=100 \mu\text{m}$ ,  $N_A=0.22$ ,  $z=1.5 \text{ mm}$  时的特性曲线初始点为原点建立坐标系,将其余参数的特性曲线初始点平移至该坐标原点,如图6所示。图6(a)是当  $d=300 \mu\text{m}$ ,  $a_0=100 \mu\text{m}$ ,  $N_A=0.22$ , 改变反射面距离  $z$  时,所对应的输出特性调制曲线;图6(b)是当  $a_0=100 \mu\text{m}$ ,  $z=1.5 \text{ mm}$ , 改变光纤轴间距  $d$  时,所对应的输出特性调制曲线;图6(c)是当  $d=300 \mu\text{m}$ ,  $a_0=100 \mu\text{m}$ ,  $z=1.5 \text{ mm}$ , 改变光纤数值孔径  $N_A$  时,所对应的输出特性调制曲线;图6(d)是当  $z=1.5 \text{ mm}$ ,  $N_A=0.22$ , 改变接收光纤纤芯半径时,所对应的输出特性调制曲线。由图(6)中的接收光纤束光强随各参数的变化曲线可知,当其他条件不变时,温度在  $20\sim 100^\circ\text{C}$  时,反射面距离  $z=1.5 \text{ mm}$  时的特性曲线灵敏度是  $z=1.3 \text{ mm}$  时灵敏度的 2.47 倍;仅增大入射光纤和接收光纤的轴间距  $d$  时,轴间距  $d=300$  比  $d=400$  的灵敏度增加了 13.6%;仅增大光纤的数值孔径  $N_A$  时,数值孔径  $N_A=0.22$  时的特性曲线

灵敏度是  $N_A=0.5$  时灵敏度的 1.70 倍;仅增大光纤的纤芯半径时,接收光纤纤径  $a_0=100$  比  $a_0=200$  的灵敏度增加了 43.7%。

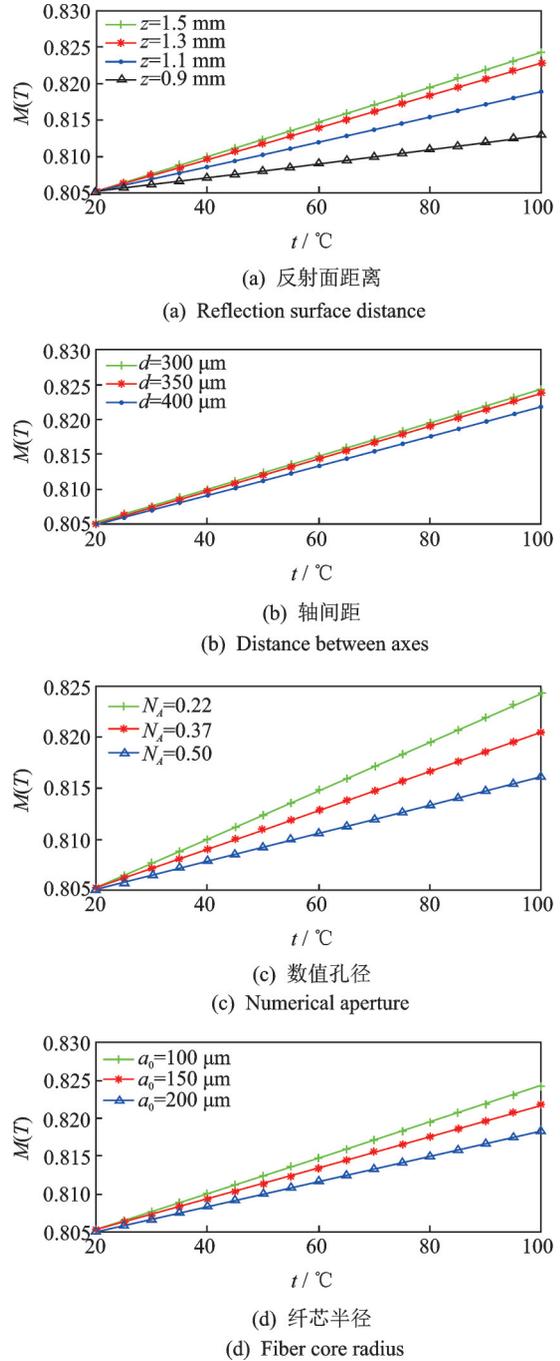


图6 不同参数所对应的输出特性曲线

Fig.6 The output characteristic curve corresponding to different parameters

设计的光纤探头的光纤布置见图4,纤芯半径  $a_0$  为  $100 \mu\text{m}$ , 轴间距  $d$  为  $300 \mu\text{m}$ , 数值孔径  $N_A$  为 0.22, 反射面距离为  $1.5 \text{ mm}$ 。根据式(14)得到输出特性仿真曲线如图7所示。

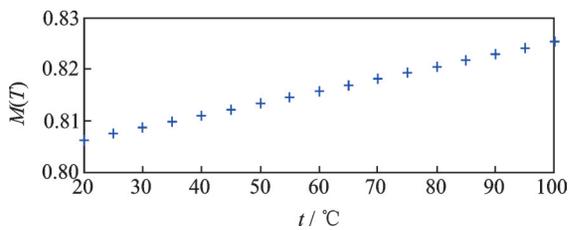


图7 输出特性调制曲线

Fig.7 Output characteristic modulation curve

## 4 测量实验与结果

### 4.1 调理电路

当光源发出的光强信号到达接收光纤的接收端时,需要将光信号转化为可测量的电信号。信号检测系统模块构成如图8所示。图中各模块的主要功能如下:光电转换模块,调理电路中的光电转换芯片为OPT101,其外接直流补偿电路实现对稳定背景光干扰的滤除;陷波电路模块滤除周围环境中带入的工频干扰;滤波放大模块实现低频滤波,滤除混叠干扰信号;除法电路模块采用AD711JD和AD633JN芯片组合实现比值处理,其输出的电压信号为负值电压;信号采集模块实现信号的输出采集。

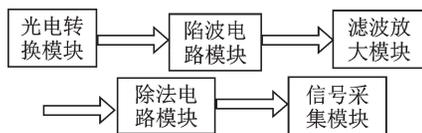


图8 信号检测系统模块框图

Fig.8 Signal detection system block diagram

### 4.2 实验台的搭建

所搭建的实验台如图9所示,主要包括:650 nm激光光源、光纤传感器、信号调理盒、V-1010微电脑加热平台、液压油、数据采集模块及上位机。



图9 反射式光纤传感器测温实验台

Fig.9 Reflective fiber-optic sensor temperature test bench

### 4.3 实验测试

采用上述设计的电路并结合光源、光纤和数据

采集模块等对反射式光纤温度传感器进行标定实验。打开V-1010微电脑加热平台,选用32号抗磨液压油,根据实验环境和油液特性,设置温度控制器初始温度为30℃,每调整4℃,加热5 min后,记录对应的除法电路模块输出的电压值。重复以上操作,直至120℃,得到结果如图10所示。通过分析可知,实验结果与仿真结果基本一致,传感器调理模块输出的电压值随温度增加而增加。对所测量数值进行线性拟合,在温度为30~120℃范围内,传感器的灵敏度为0.71 mV/℃。

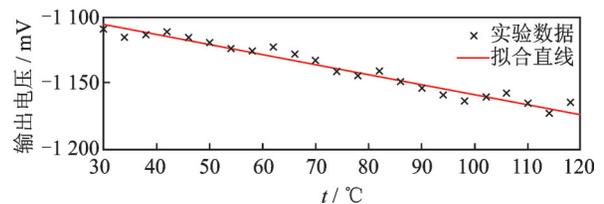


图10 系统输出量与温度关系曲线图

Fig. 10 Relationship between system output and temperature

## 5 结论

1) 光纤温度传感器根据液体折射率随温度变化的特性,利用折射率与光纤最大入射角的正弦值成反比,得出 $M(T)$ 与进液套中油液温度的关系,通过检测 $M(T)$ 的变化实现对温度的检测。

2) 利用液体折射率随温度变化的特性,结合高斯光束分布和均匀几何光束分布理论对反射式光纤温度传感器的纤端光场分布进行了分析,得出其输出特性函数表达式,建立数学模型。

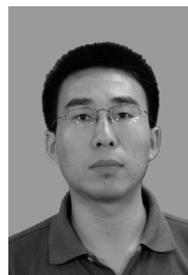
3) 通过仿真分析,当其他条件不变时,仅增大光纤的反射面距离 $z$ 时,光纤传感器灵敏度增大;仅增大光纤的轴间距 $d$ 时,光纤传感器灵敏度减小;仅增大光纤的数值孔径 $N_A$ 时,光纤传感器灵敏度减小;仅增大接收光纤的纤芯半径 $a_0$ 时,光纤传感器灵敏度减小。

4) 搭建了实验台并进行了传感器静态标定实验。实验结果表明:在30~120℃的测量范围内,该传感器可以实现对温度的实时检测,灵敏度为0.71mV/℃。

## 参 考 文 献

- [1] 何妍,陈江波,许晶,等. 光纤光栅温度传感器在变压器油温测量中的应用研究[J]. 变压器, 2017, 54(3): 60-63.  
HE Yan, CHEN Jiangbo, XU Jing, et al. Application

- of optical fiber grating temperature sensor to transformer oil temperature measurement [J]. Transformer, 2017, 54(3):60-63. (in Chinese)
- [2] 廖国珍,张军,蔡祥,等.基于石墨烯的全光纤温度传感器的研究[J].光学学报,2013,33(7):26-32.  
LIAO Guozhen, ZHANG Jun, CAI Xiang, et al. All-fiber temperature sensor based on graphene[J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(7):26-32. (in Chinese)
- [3] SIELAFF A, GOWIK M, VÖLZEL C, et al. Temperature measurement using infrared thermometry within semi-transparent media [J]. Experimental Heat Transfer, 2019, 32(6):545-565.
- [4] WEI S L, QIN W B, HAN L W, et al. The research on compensation algorithm of infrared temperature measurement based on intelligent sensors[J]. Cluster Computing, 2019, 22(3):6091-6100.
- [5] 宋世德,张作才,王晓娜.光纤布拉格光栅钢筋腐蚀传感器[J].振动、测试与诊断,2018,38(6):1255-1259.  
SONG Shide, ZHANG Zuocai, WANG Xiaona. Optical fiber grating sensors for monitoring corrosion of reinforcing steel[J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2018, 38(6):1255-1259. (in Chinese)
- [6] WANG H, MENG H, XIONG R, et al. Simultaneous measurement of refractive index and temperature based on asymmetric structures modal interference[J]. Optics Communications, 2016, 364:191-194.
- [7] 李艳萍,郭秀梅,刘海涛,等.反射式光纤温度传感器的研究[J].计算机测量与控制,2010,18(9):2201-2202,2206.  
LI Yanping, GUO Xiumei, LIU Haitao, et al. Study on reflection type optical fiber temperature sensor[J]. Computer Measurement & Control, 2010, 18(9):2201-2202, 2206. (in Chinese)
- [8] 胡鹏程,时玮泽,梅健挺.高精度铂电阻测温系统[J].光学精密工程,2014,22(4):988-995.  
HU Pengcheng, SHI Weize, MEI Jianting, et al. High-precision Pt-resistance temperature measurement system [J]. Optics and Precision Engineering, 2014, 22(4):988-995. (in Chinese)
- [9] 朱蕾.-80~300℃铂电阻温度计在0℃的热迟滞性研究[J].计量技术,2018(5):26-28.  
ZHU Lei. Study of -80~300℃ platinum resistance thermometer in thermal hysteresis of 0℃[J]. Measurement Technique, 2018(5):26-28. (in Chinese)
- [10] QIU Y, FENG Y, SUN J, et al. Applying thermophysics for wind turbine drivetrain fault diagnosis using SCADA data [J]. IET Renewable Power Generation, 2016, 10(5):661-668.
- [11] 张平,张小栋,董晓妮.双圈同轴光纤传感器在润滑油介质中的输出特性[J].中国光学,2015,8(3):439-446.  
ZHANG Ping, ZHANG Xiaodong, DONG Xiaoni. Output characteristics of sensor with two-circle coaxial optical fiber in lubricating oil medium [J]. Chinese Optics, 2015, 8(3):439-446. (in Chinese)
- [12] 张宏,万葆红.测量液体折射率随温度的变化[J].大学物理实验,1998(1):1-3.  
ZHANG Hong, WAN Baohong. Measuring the change of the index of refraction of liquid varying with temperatures [J]. Physical Experiment of College, 1998(1):1-3. (in Chinese)
- [13] YUAN L, JIAN P, TAO Y, et al. Analysis of the co-compensation mechanism of a fiber-optic displacement sensor [J]. Sensors & Actuators A Physical, 1993, 36(3):177-182.
- [14] 徐涛,吕海宝,杨华勇,等.一种强度补偿反射式光纤位移传感器的研究[J].国防科技大学学报,2000(6):109-112.  
XU Tao, LYU Haibao, YANG Huayong, et al. Research of a reflective fiber-optic displacement sensor with intensity compensation [J]. Journal of National University of Defense Technology, 2000(6):109-112. (in Chinese)



**第一作者简介:**张平,男,1980年5月生,博士、副教授。主要研究方向为流体传动与控制、光纤检测技术。曾发表《自调整复合级联形态滤波算法及应用》(《振动、测试与诊断》2015年第35卷第3期)等论文。

E-mail: zp\_80@163.com