

[电缆]

# 声表面波原理在高压电缆测温中的应用

文/国网浙江省电力公司宁波供电公司 程国开 汪从敏 叶 薏

电力电缆的温度测量是电力系统日常运行维护的一项重要工作。电缆的运行温度监测可以及时发现电缆过热问题，有效地避免事故的发生。目前电力电缆的温度测量有多种方式，其中利用声表面波原理设计的温度传感器进行电缆温度测量是一门新兴的技术，其外形精巧，测量精度高，且可进行无线无源测量，工程投资低，非常适合电力系统线路温度测量。本文主要对声表面波原理进行了介绍，并对其在高压输电线路温度测量中的应用进行了分析。

电力电缆是电力系统能源输送的枢纽通道，其可靠运行是国家电力能源正常供应的重要保障。一直以来电缆因过热而烧毁在电力系统故障中占据相当大的比重，给电力企业和电力用户造成了严重的损失。因此电力电缆运行温度的有效监控就成为电力系统日常运行维护中一项非常重要的工作。电力电缆常用的温度测量方式有多种，基于声表面波技术的新型温度测量技术发展前景广阔，其优点在于可以无线远程监控、无需供电电源、抗干扰能力强、测量精度高、成本低、安装使用方便，十分适合智能电网的发展，其优越的性能为电力电缆温度监测提供了巨大的便利。

## 声表面波技术测温原理

如图1所示，声表面测温系统主要包括传感器芯片和数据读写器两部分构成。其中传感器测温芯片是整个系统的核心。在工作过程中，测温芯片产生声表面波，并沿敏感基片传播，由于温度的变化，导致声阻抗不连续，从而造成声波反射，驻波便在IDT和反射栅的腔体内形成，受温度影响压电材料上声表面波的频率会发生变化，通过对频率的测量并通过计算则得出被测对象的

温度。温度信号可以通过天线传输到读写器，一方面可以连接显示面板在本地显示，此外也可以通过通信手段最终传输到远程监控中心。

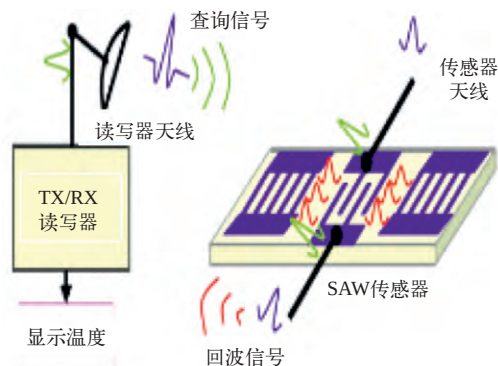


图1 声表面波技术测温系统示意图

如图1所示，声表面测温系统主要包括传感器芯片和数据读写器两部分构成。其中传感器测温芯片是整个系统的核心。在工作过程中，测温芯片产生声表面波，并沿敏感基片传播，由于温度的变化，导致声阻抗不连续，从而造成声波反射，驻波便在IDT和反射栅的腔体内形成，受温度影响压电材料上声表面波的频率会发生变化，通过对频率的测量并通过计算则得出被测对象的

温度。温度信号可以通过天线传输到读写器，一方面可以连接显示面板在本地显示，此外也可以通过通信手段最终传输到远程监控中心。

## 声表面波原理传感器设计

### 1. 敏感基片材料的选取

石英、铌酸锂和陶瓷是常用的压电材料，良好的温度特性是声表面波温度传感器敏感基片必须具备的条件，声表面波器件的温度和频率关系如下所示

$$f(T) = f(T_0)[1 + b_0(T - T_0) + b_1(T - T_0)^2 + \dots] \quad (1)$$

可以看出当所选用压电材料一阶温度系数较高，而二阶温度系数较低时，温度和频率区趋于线性，使数据处理难度和系统成本降低。石英的温度系数如表1所示，其温度特性良好，本文选用石英作为基片材料。

表1 石英晶体声表面波相关参数

| 切向  | 声速/(m/s) | 一阶系数 $b_0$                    | 二阶系数 $b_1$                      |
|-----|----------|-------------------------------|---------------------------------|
| JCL | 3 271    | $18 \times 10^{-6} \text{ k}$ | $-1.5 \times 10^{-9} \text{ k}$ |
| LST | 3 347    | $28 \times 10^{-6} \text{ k}$ | $-2 \times 10^{-9} \text{ k}$   |

### 2. 单端谐振型声表面波原理传感器。

声表面波原理传感器分为延迟线形和谐振型两种。延迟线形声表面波原理传感器便于大规模传感器阵列的构建，但其检测距离很短，同时基于简单实用的考虑，本文选择单端谐振器结构如图2所示。需要指出的是无论何种谐振器，电容比和质量因子才是衡量其谐振特性的重要指标。在进行谐振器的结构设计时，必须综合考虑电容比、质量因子和响应特性三方面因素。

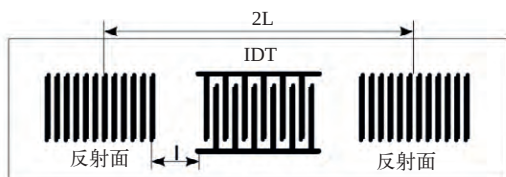


图2 单端谐振型声表面波原理传感器结构

### 3. 声表面波原理传感器的改良

在电力系统实际运行过程中，由于接触电阻的存在，高压电缆的接头处的温度往往要高于电缆的其他部位。而由于接头处的特殊结构，当应用常用的声表面传感器时，其安装和固定的难度较大。为了解决这个问题，可以通过改变传感器和天线的外形结构，把谐振器芯片和环形传感器外壳紧贴，并把天线设计成环形围绕在传感器外壳进行信号传输。从而在解决传感器的安装问题

的同时，也使传感器的信号传输精度增大了。图3为环形声表面波原理温度传感器的实物图。

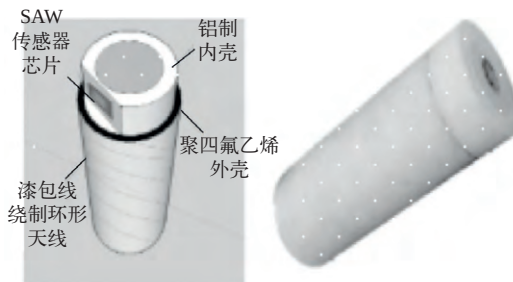


图3 环形声表面波原理温度传感器

对于安装在电缆内部的声表面波温度传感器，则要考虑屏蔽层和钢铠对信号传输的影响。实际应用中发现，一方面电缆接头部分往往会将屏蔽层和钢铠去掉，这时声表面波的信号屏蔽问题则不存在；另一方面，电磁波频率达到1 MHz以上后，屏蔽网的屏蔽效果会大大减少，而声表面波原理温度传感器的工作频率在400 MHz以上，此时的屏蔽效果已经很小。因此，传感器的信号是可以正常传输的。

### 4. 环形天线的设计

环形天线的结构模型如图4所示。

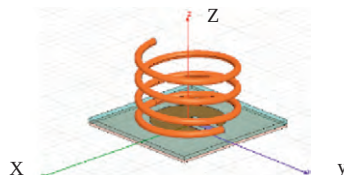


图4 环形天线的结构模型

从理论分析和实践经验来看，环形天线的性能相对其他类型的天线要优越，首先环形结构使天线的尺寸大大减小，其次其辐射电阻较高，另外设计合理的环形天线可以得到正增益。当天线的输入阻抗和负载阻抗的共轭复数相等时，接收天线和声表面波温度传感器芯片最为匹配。为提升能源效益，避免高频微波信号反射，使其全部传至负载点，发射天线的阻抗通常为实数，当天线阻抗为复数时，则应去除天线的电抗部分，并使接收和发射天线的阻值相等。单端口声表面波原理谐振器等效电路图如图5所示。

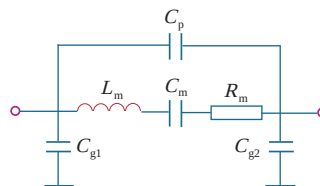


图5 单端口声表面波谐振器等效电路图

图中,  $L_m$ 和 $C_m$ 的谐振频率和声表面波的传感器的串联谐振频率相等,  $R_m$ 为损耗电阻, 三者皆为动态变量。 $C_g$ 为传感器两端的静态电容。通过等效电路变换, 其输入阻抗可以等效为一个并联的电阻和电容。为保证天线输入阻抗和辐射阻抗匹配, 天线阻抗应为 $Z=R+X_j$ , 通过计算可以得出芯片两端应并联的电感原件参数。辐射阻抗可通过如下公式计算。

$$R=31\,200\left(n\frac{A}{\lambda^2}\right)^2 \quad (2)$$

式中,  $n$ 是环形天线的匝数,  $A$ 为环形天线每匝的截面积,  $\lambda$ 为工作波长。

在实际应用中, 由于电缆尺寸多种多样, 天线的半径和匝数随着电缆尺寸的变化而改变。假设天线吸纳和电缆表面的平均距离为5 mm, 则有

$$r=\frac{d}{2}l+5 \quad (3)$$

其中,  $r$ 为天线实际半径,  $d$ 为导体直径,  $l$ 为绝缘厚度。可见天线半径随电缆尺寸的减小而减小, 天线缠绕匝数也随之增多, 但天线缠绕匝数是有限的, 同时信号在传输中也会衰减。

#### 5. 声表面波原理温度传感器测量精度的验证

为了验证该传感器的温度测量精度, 我们通过利用声表面波原理温度传感器和DS1SB20数字式温度传感器在温控项内同时进行温度测量。首先将恒温箱中温度设为20℃, 温度稳定后, 校准两个温度传感器为20℃。将温控箱升温, 待温度稳定后读出两个温度传感器的温度检测值。并将数据记录到表中。

表2 温度传感器精度测量试验

| 温控箱<br>温度<br>/℃ | 声表面波传感器 |      | DS1SB20数字式<br>温度传感器 |      |
|-----------------|---------|------|---------------------|------|
|                 | 测试温度/℃  | 误差/℃ | 测试温度/℃              | 误差/℃ |
| 45              | 45.0    | 0.0  | 45.2                | 0.2  |
| 50              | 49.7    | 0.3  | 50.1                | 0.1  |
| 55              | 53.5    | 1.5  | 54.9                | 0.1  |
| 60              | 59.8    | 0.2  | 59.8                | 0.2  |
| 65              | 63.6    | 1.4  | 65.3                | 0.3  |
| 70              | 71.4    | 1.4  | 70.1                | 0.1  |
| 75              | 74.6    | 0.4  | 74.1                | 0.2  |

从试验结果可以看出, 声表面波原理的温度测量结果误差在2℃以内, 在误差允许范围以内, 符合温度测量要求。

## 声表面波原理传感器在高压输电线路温度测量中的应用

在电缆相应温度检测点安装温度传感器监测温度变化, 并通过无线通信将数据传输的数据读写器, 一个数据读写器可以和多个温度传感器进行通信, 读写器带有液晶显示器, 可以在本地显示监测点温度, 同时读写器将采集到的温度信息通过无线通信发送到远程监控中心, 从而实现电缆温度的测量和远程监控。测温系统不仅可以实现单一变电站的温度测量, 还可以将整个区域的多个变电站的温度测量集成为一个系统, 形成统一的温度监测网络, 其结构示意图如图6所示。

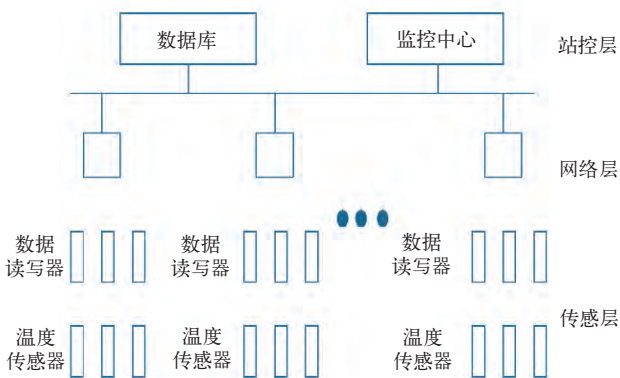


图6 声表面波原理传感器测温系统结构示意图

## 结束语

本文对声表面波原理温度传感器从原理到电力系统温度测量进行了分析和介绍, 并通过试验对其测量精度进行了验证。作为一项新技术, 其无可比拟的优越性为电力系统线路测量提供了巨大的便利, 其在电力系统智能化建设中将会发挥更大的作用。但如今其技术方面有很多方面需要改进, 比如传感器探头增益的提高; 增加通信距离使, 温度测量芯片和接收天线间通信质量的进一步提高; 实现温度测量的连续测量, 等等。但可以预见, 随着技术的不断发展, 声表面波原理传感器在电力系统中的应用必然越来越广泛。EA

(收稿日期: 2015.07.31)

(编辑: 白文亭)