

无源无线声表面波温度传感器及其在智能变电站中的应用

张朋¹, 范福玲¹, 王艳霞², 常静¹

(1. 中原工学院, 郑州 450007; 2. 河南经贸职业学院, 郑州 450053)

摘要: 为了克服智能变电站温度检测环境复杂、非接触、精度低、成本高的缺点, 研究并开发了一款无源无线声表面波智能温度传感器; 研究了该型温度传感器的检测机理, 并研究了无源无线声表面波智能传感器收发系统; 设计了传感器系统射频模块匹配电路, 并对输入输出信号进行了 Multism 仿真; 基于无源无线声表面波传感器构建了智能变电站温度检测系统; 现场试验发现系统温度精度提高了 10% 以上, 长期运行无故障, 表明该无源无线声表面波温度传感器在智能变电站测温中具有优异的表现, 具有较广的应用前景。

关键词: 声表面波温度传感器; 无源无线; 匹配电路; 智能变电站; Multism

Research on Passive Wireless SAW Temperature Sensor and Its Application in Intelligent Substation

Zhang Peng¹, Fan Fuling¹, Wang Yanxia², Chang Jing¹

(1. Zhongyuan University of Technology, Zhengzhou 450007, China;

2. Henan Economy and Trade Vocational College, Zhengzhou 450053, China)

Abstract: To overcome the high complexity, non-contact, low sensitivity and the high cost of the temperature monitoring environment in the intelligent substation, a smart passive wireless SAW (Surface Acoustic Wave) temperature sensor has been studied and fabricated. The wireless transceiver system architecture and the sensing mechanism of the SAW sensor have been studied. The matching circuit of the SAW sensor RF module is also designed. The Multism simulation of the input and output of the matching circuit is proposed too. An intelligent substation temperature detection system is built on the smart passive wireless SAW temperature sensors. The use of the passive wireless SAW temperature sensor in the temperature monitoring of intelligent substation has excellent performance.

Keywords: SAW temperature sensor; passive wireless; matching circuit; intelligent substation; Multism

0 引言

随着电网规模、容量增大, 对供电可靠性的要求越来越高。电气设备在高电压、大电流的状态下运行时, 其工作可靠性与发热密切相关。据统计, 电力系统事故有相当部分与过热问题^[1-2]有关。因此, 对电力设备进行温度监测并实现过热报警是避免重大事故和控制故障恶化的有力手段, 是电力系统亟待解决的课题。

无源无线声表面波 (surface acoustic wave, SAW) 温度传感器^[3-4]是一种新型的传感器, 与普通类型的声表面波温度传感器相比, 具有以下优点: 不需要任何电池供电, 可实现传感器敏感端的无源化, 且维护简单; 因为信号的发射/接收装置间没有电线连接, 可用于移动或旋转部件参数测量, 在肮脏、多灰、潮湿、强辐射、电磁场、强光、极端温度、有爆炸危险的测量场合, 具有独特的优势; 在人不易到达的地方, 如封闭

中空空间中的测量也是一种理想的测量方案; 迎合了高性能、多功能、成本低和小型化的发展趋势和研究热点, 有较大的发展应用前景。

无源无线声表面波温度传感器应用于智能变电站以及电力系统中国内还没有报道, 本文将报道无源无线声表面波温度传感器的工程化研究以及在智能变电站测温中的应用。

1 智能变电站测温特点

变电站状态监测是变电站建设的重要技术支撑, 温度则是需要监测的最重要数据之一^[1,5-7]。电气设备接点发热是变电站安全运行的较大隐患, 尤其是隔离开关、母线连接点分布在不同的地方, 而且都是高压部件, 在长期运行中, 断路器的触点和母线的连接处等部位接触电阻大而发热, 发热部位无法检测, 最终导致事故发生。

智能变电站电力设备由于其环境的特殊性, 对其中节点的温度在线监测有如下难点:

(1) 监测点数众多。初步统计一个 220 kV 变电站的各种电缆接头达数千个;

(2) 监测点的位置千差万别。有的在室内、有的在室外; 有的在控制柜内、有的裸露在高空;

(3) 要求传感器与外界彻底隔离。布线会带来新的安全隐患, 传感器供电问题难以解决;

收稿日期: 2014-04-17; 修回日期: 2014-05-21。

基金项目: (河南省教育厅科学技术研究重点项目 (12B510037; 13B510296))。

作者简介: 张朋 (1979-), 男, 河南郑州人, 博士, 博士后, 主要从事电力系统, 微电网技术, 网络化测控技术, 多传感器数据融合技术方向的研究。

(4) 电磁干扰强。电压高达数万乃至几十万伏, 电流几十安培甚至上百安培, 设备周围分布着极强的电磁场干扰;

(5) 工作环境温度高。要求传感器能在 120 °C 高温下工作。

2 无源无线声表面波温度传感器检测机理^[3,7-9]

声表面波传感器输入与输出叉指换能器 (IDT) 间的延迟线是声表面波传播的路径, 也是声表面波传感器的敏感部分。当声表面波器件的延迟线暴露在某种环境下, 声波的传播受到环境因素 (温度、湿度、压力、质量、粘度、密度等) 的影响将导致声波频率的变化, 这些变化最终体现在输出信号频率或幅度上的差异, 这就是声表面波传感器的基本传感原理。

无源无线 SAW 温度传感器检测系统有无源无线温度传感器和咨询系统两部分组成。无源无线声表面波传感器由三部分组成: 声表面波传感器、阻抗匹配网络、天线。结构如图 1 所示。其中质询系统负责发射激励信号和接收射频信号, 无源无线 SAW 温度传感器负责检测温度信号。质询系统通过天线发射一定频率的高频激励信号, 无源无线 SAW 温度传感器通过天线接收到射频信号, 经阻抗匹配电路到达 SAW 温度传感器。当远端的咨询系统断开激励信号后, SAW 谐振器将以自身的谐振频率发射射频信号, 该射频信号随着温度会发生频率变化和衰减, 称作回波信号。经阻抗匹配网络匹配后, 通过天线发送到远端咨询系统, 远端咨询系统接收到回波信号并进行分析, 通过回波信号的频移大小可获得相应的温度变化。这就是无源无线声表面波温度传感器检测温度的理论基础。本文系统正是基于该理论进行设计的。



图 1 无源无线声表面波温度传感器检测系统

3 无源无线声表面波智能传感器收发系统^[8,9-11]

无源无线 SAW 传感系统由发射机 (发射回路) 和接收机 (接收回路) 两部分构成。在本文中, 这两部分的功能完全由一块集成芯片 CC1101 实现, 主控制器通过 SPI 接口能够使得 CC1101 在发射和接收两种工作模式之间进行快速的切换。信号的发射和接收处理单元全部集成在芯片内部, 且均可以通过软件设置, 这使得系统工作比较灵活, 结构简单, 工作稳定, 成本大大地降低。系统功能结构如图 2。

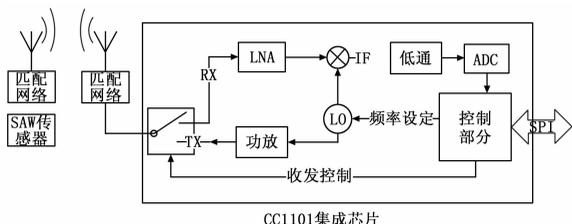


图 2 收发系统结构图

图 2 中矩形框中的结构全部集成在 CC1101 射频收发芯片中, 天线和匹配网络在接收和发送模式下共用。连接天线和射

频芯片之间和声表面波传感器与发射天线之间都要配以匹配网络, 使得天线阻抗与 SAW 传感器阻抗达到匹配, 以便提高信号的转换和传输效率, 这对于系统的工作至关重要, 将在下文论述。

4 传感器系统射频模块匹配电路设计及仿真

射频模块收发系统主要包括 CC1101 模块及其外围匹配电路两部分。主控制器通过 CC1101 射频收发模块产生间歇正弦脉冲信号激励 SAW 温度传感器谐振器, 接收谐振器的回波信号, 获取回波信号强度值, 求出谐振器的谐振频率, 测出温度传感器感测到的压力值, 完成对温度的无源无线测量。测量系统硬件设计中最关键的是 CC1101 射频收发模块的外围匹配网络的设计。

4.1 匹配电路设计

由于 CC1101 射频的输入输出均为差分式, 匹配电路基于巴伦平衡转换器来实现。巴伦平衡转换电路的设计能提供一个精确的 180 度相移, 同时电路对信号的损耗要降低到最小且要有相同的平衡阻抗。从而巴伦转换电路能实现差分射频信号与单端信号之间的转换。

除了解决差分信号与单端信号的转换问题, 匹配电路还需解决 CC1101 与天线的阻抗匹配问题。所以在巴伦平衡转换器的单端信号端需配置连接电路, 以实现整体的阻抗匹配。整个匹配网络如图 3 所示。

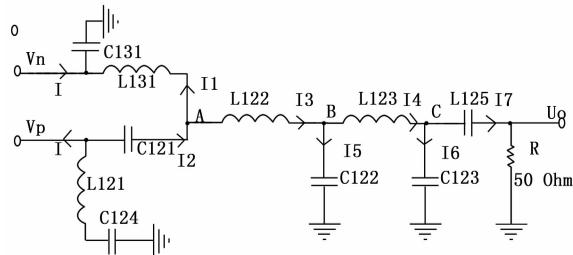


图 3 射频模块匹配网络

图 3 中, 电容 C131 和 C121、电感 L131 和 L121 共同组成了一个巴伦平衡转换器。电容 C124 是平衡转换器的直流模块电容, 电容 C131 和 C121 的值相等, 电感 L131 和 L121 的值相等。巴伦转换器不仅有差分信号与单端信号相互转化的功能, 还有进行阻抗转换的作用。

射频收发器需设计成频率可调, 则匹配网络各元件的参数值必须改变才能适应多种频段。由于 CC1101 的工作频率最低为 300 MHz, 最高为 928 MHz, 本文根据需要设计的匹配网络的工作频段为 300~410 MHz 频段。

4.2 匹配电路传递函数推导

根据图 3 中的标注, 用 ω 表示角频率, f 为射频信号的频率, ω 与 f 的关系为 $\omega = 2\pi f$ 。用节点法可以列出电路中参数之间的关系, 如公式 (1)。

运用 MATLAB 工具求出传递函数 $G(\omega) = \frac{U_o}{U_i}$, 又有 $\omega = 2\pi f$, 所以传递函数 $G(f) = \frac{U_o}{U_i}$ 可以表示出。由于电路中的电容和电感值未知, 全部用符号表示, 所以 $G(f)$ 的表达式过长, 不在文中给出。

$$\begin{cases}
 I_7 = U_O/R; \\
 U_C = I_7(R + 1/(j\omega C_{125})); \\
 I_4 = I_7 + U_C \times j\omega C_{123}; \\
 U_B = U_C + I_4 \times j\omega L_{123}; \\
 I_3 = I_4 + U_B \times j\omega C_{122}; \\
 U_A = U_B + I_3 \times j\omega L_{122}; \\
 (V_p - U_A) \times j\omega C_{121} = I_2; \\
 U_A - V_n = j\omega L_{131}; \\
 I_2 = I_1 + I_3; \\
 U_I = 2V_p = -2V_n
 \end{cases} \quad (1)$$

4.3 MATLAB 对中心频率的仿真

当匹配网络中各元件参数值确定后，匹配网络的传递函数 $G(f) = \frac{U_O}{U_I}$ 便只含一个变量，即射频信号的频率 f 。取 $G(f)$ 的模值 $|G(f)|$ 做运算，得到以分贝表示的增益 $A(f)$, $A(f) = 20\lg |G(f)|$ 。匹配网络中各元件参数值确定后，每一个频率 f 都对应一个增益 $A(f)$ 。当 $-3 \text{ dB} \leq A(f) \leq 0 \text{ dB}$ 时，说明输出信号传输是在通频带内，是有效的。增益 $A(f)$ 取值在 $-3 \text{ dB} \leq A(f) \leq 0 \text{ dB}$ 之间时对应的频率 f 组成此时匹配网络的通频带，增益 $A(f)$ 的最大值若在 $-3 \text{ dB} \leq A(f) \leq 0 \text{ dB}$ 内，则该最大值对应的频率 f 为匹配网络工作的中心频率。

CC1101 的厂家已给定中心频率为 315 MHz 下的匹配网络中各电容电感的值。以这组值为蓝本，分析每个电容电感的改变对中心频率及频带宽度的影响，并结合 MATLAB 计算传递函数，最终确定了一组电容电感值，来构建匹配网络。因为电路中电容 C122 和电感 L123 两者对匹配电路的工作中心频率影响最大，所以匹配网络中将电容 C122 和电感 L123 均设计成取值可调的元件，通过改变这两个元件的值进行中心频率的调节。

图 4 给出了匹配网络在可调元件取四组不同值下的仿真结果。

图 4 中，(a) 图为设定 $C122=11 \text{ pF}$ 和 $L123=33 \text{ nH}$ 时仿真结果，由图可知曲线的最高点的增益在 $0 \sim 3 \text{ dB}$ 之间，最高点处对应的是此时匹配网络的中心频率，中心频率为 315 MHz。同理可分析其余 3 个图。(b) 图为设定 $C122=10 \text{ pF}$ 和 $L123=30 \text{ nH}$ 时仿真结果，中心频率为 342 MHz。(c) 图为设定 $C122=9 \text{ pF}$ 和 $L123=25 \text{ nH}$ 时仿真结果，中心频率为 390 MHz。(d) 图为设定 $C122=8 \text{ pF}$ 和 $L123=24 \text{ nH}$ 时仿真结果，中心频率为 405 MHz。匹配网络的中心频率在 $300 \sim 410 \text{ MHz}$ 内变化，根据图中已给出 4 种中心频率值下的 C122 和 L123 的值，其他中心频率的设定可以进行微调即可。

5 基于 Multism 对匹配电路输入输出信号仿真

前文用 MATLAB 调节匹配网络的中心频率，得到匹配网络中可调元件 C122 和 L123 的值后，整个匹配网络中所有元件值就都得到确定。虽然用 MATLAB 得到了中心频率的增益值，却无法直观地看到匹配网络输入与输出的关系。另外，根据匹配网络输入输出信号的比较图，也可以对 MATLAB 中设定的 C122 和 L123 值的准确性进行验证。

图 5 是匹配网络的仿真图。图中给出了 3 个信息：首先，可调电容 C122 与可调电感 L123 设定值分别为 11 pF 和 33 nH ；其次，左上角的函数发生器设置窗口将函数发生器设

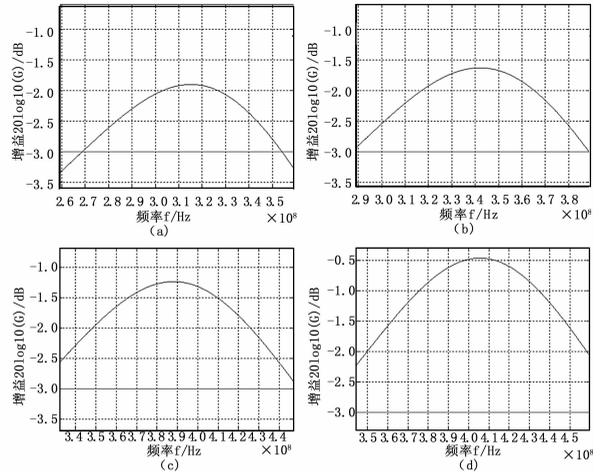


图 4 300~410 MHz 频段匹配网络仿真结果

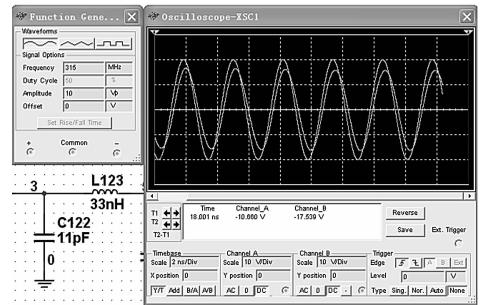


图 5 函数发生器的设置与示波器的显示

置成频率为 315 MHz 且幅值为 10 V 的正弦波；最后，右边的示波器显示窗口中显示了输入输出波形的仿真结果，幅值略大的正弦波是输入信号，另一正弦波为输出信号。由示波器显示的波形可以看到，输出信号为正弦波，输入和输出信号的频率是一样的、相位有一定的差异，输出信号因为有一定的衰减而幅值比输入信号的幅值略小。

按照图 5 中的方法，将可调电容 C122 与可调电感 L123 设置成上一节中已经调好的值，并将输入信号的频率设定为对应的中心频率，得到图 6 的仿真结果。

图 6 中 (a) 图设置 $C122=11 \text{ pF}$ 和 $L123=33 \text{ nH}$ 、输入信号频率即中心频率为 315 MHz 时的输入输出波形仿真结果。(b) 图设置 $C122=10 \text{ pF}$ 和 $L123=30 \text{ nH}$ 、中心频率为 342 MHz。(c) 图设置 $C122=9 \text{ pF}$ 和 $L123=25 \text{ nH}$ 、中心频率为 390 MHz。(d) 图设置 $C122=8 \text{ pF}$ 和 $L123=24 \text{ nH}$ 、中心频率为 405 MHz。

由图 6 可以发现，在这些参数和频率设定的情况下，输入信号和输出信号的波形吻合的比较好。所以这些设定的参数和对应的中心频率是符合要求的，经仿真输入信号与输出信号的关系，验证了参数和中心频率的准确性。

但上述确定的值只是仿真的结果（理论值），在实际应用中，在匹配网络选定后，制作电路板时，电容 C122 和电感 L123 选用可变的元件。然后采用网络分析仪分析匹配网络的中心频率和带宽，根据实际需要调节电容 C122 和 L123 来使其达到最佳的匹配。

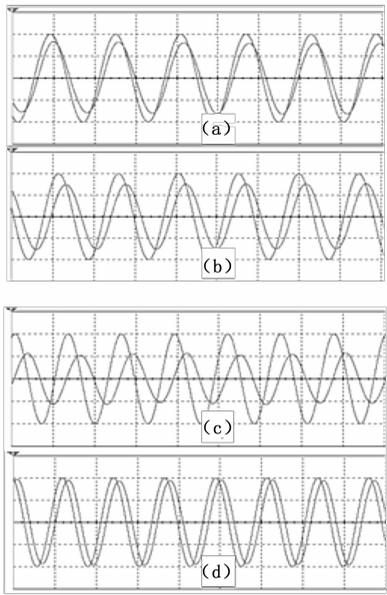


图 6 匹配网络输入输出仿真波形

6 基于无源无线声表面波温度传感器变电站温度检测系统

智能变电站温度在线监测系统采用智能变电站统一的三层构架。声表面波温度传感器安装在开关柜内母排上、电缆接头上, 将信息通过无线的方式传送给采集单元; 采集单元进行一对多的采集和解码, 然后将温度信息通过以太网或者 RS485 传送给温度在线监测智能电子设备 (Intelligent Electronic Device, IED); 温度在线监测 IED 通过光纤以太网的方式将信息传输给在线监测站内后台或一体化信息平台, 信息传输基于 IEC 61850 标准; 在线监测站内后台或一体化信息平台对全站监测到的温度信息进行统一管理。变电站温度在线监测系统结构如图 7 所示。

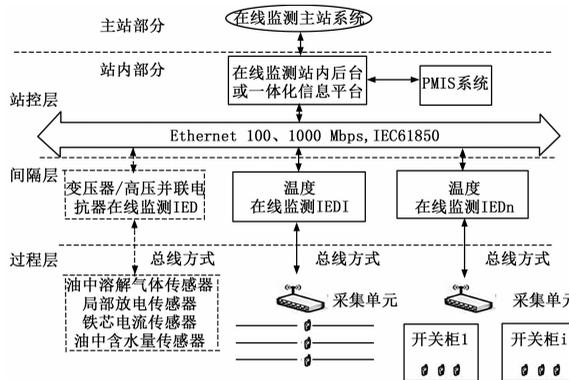


图 7 变电站在线温度监测系统构成图

表 1 为变电站高压测温用无源无线声表面波温度传感器温度输出原始频率值, 可发现测量频率值有较高的频率值, 且, 每 7 度对应的频率变化量最大可达 30 Hz 以上, 与其他类型传感器相比有更高的精度和分辨率。且, 测量时无需对传感器供电, 即可实现对温度的量测; 测得温度值 (频率值) 经标定后直接通过传感器自带天线传送到采集单元, 简化了安装、接线复杂度。

表 1 温度测量试验数据

温度/ (°C)	频率/(kHz)			平均值/(kHz)
	(1)	(2)	(3)	
0	575 152.5	575 153.0	575 152.5	575 152.6
7	575 128.0	575 127.5	575 128.5	575 127.6
14	575 108.0	575 108.5	575 108.0	575 108.3
21	575 070.5	575 071.0	575 070.5	575 070.3
28	575 048.5	575 048.0	575 048.5	575 048.5
35	575 017.0	575 016.5	575 017.5	575 016.6
42	574 999.0	574 997.5	574 998.5	574 998.1
49	574 976.0	574 977.0	574 976.5	574 976.1
56	574 943.0	574 944.5	574 943.5	574 943.7
63	574 920.5	574 919.0	574 920.0	574 919.5
70	574 893.5	574 894.0	574 893.5	574 893.3

7 结论

基于声表面波技术设计并实现了一款新型无源无线声表面波温度传感器。并成功应用此传感器构建了一个智能变电站温度系统。可彻底解决电缆接头、开关柜、隔离开关等电力设备测温的安装不便、强电磁干扰、工作环境温度高和信号传输等难题。具有较广泛的推广价值。

参考文献:

[1] 李瑞生, 李燕斌, 周逢权. 智能变电站功能架构及设计原则 [J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38 (21): 24-27.

[2] 郭自刚, 陈俊, 陈佳胜, 等. 大型水电机组保护若干问题探讨 [J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39 (3): 148-151.

[3] 张朋, 陈明, 何鹏举. 声表面波 CO 气体传感器温度误差补偿方法研究 [J]. 压电与声光, 2010, 2: 3-6.

[4] 张朋, 李瑞生, 王晓雷. 微电网通信系统研究与设计 [J]. 计算机测量与控制, 2013, (8): 2209-2212.

[5] Abu Z. Sadek, Christina O. Baker, David A. Powell, Wojtek Wlodarski, Richard B. Kaner, Kourosh Kalantar-zadeh. Polyaniline Nanofiber Based Surface Acoustic Wave Gas Sensors—Effect of Nanofiber Diameter on H₂ Response [J]. IEEE Sensors Journal, Vol. 7, no. 2, February 2007.

[6] Fu Q Y, Wang J L, Luo W, et al. Progress of Matching Network for Passive Remote Hybrid Sensor Based on SAW Resonator [A]. Proc. IEEE Ultrasonic Symposium [C]. 2008. 1512~1515. (Digital Object Identifier (DOI): 10. 1109/ULTSYM. 2008. 0368.)

[7] 张朋, 陈明, 何鹏举. 基于 Web 服务的网格化智能 Agent 传感器 [J]. 计算机测量与控制, 2010, (2): 425-427.

[8] 张朋, 常静, 范福玲. 基于无源无线声表面波 RFID 技术的变电站巡检系统研究 [J]. 计算机测量与控制, 2013, (9): 2557-2559.

[9] 张谦, 王好娜, 付志红, 等. 滤波器—神经网络的谐波检测方法 [J]. 电力系统与控制, 2011, 39 (12): 42-47.

[10] Fu Q Y, Wang J L, Zhou D X, et al. Passive wireless SAW sensor system model including the effects of antenna distances [J]. Sensors and Actuators A. 2009, 150 (1): pp151-155.

[11] 臧西杰, 禹建丽, 周瑞芳. 基于 BP 神经网络的高校 3 种专利授权量预测研究 [J]. 中原工学院学报, 2009, 20 (6): 35-37.