

DOI:10.19651/j.cnki.emt.2105956

基于 HTCC 的无线无源温度传感器的设计*

李 焕 董和磊 韩 磊 王 鑫

(中北大学 仪器科学与动态测试教育部重点实验室 太原 030051)

摘要: 针对传感器使用寿命短,抗电磁干扰能力低的问题,设计了一种电感电容分离式传感器,此结构既延长了读取线圈的寿命,又减少了电感器的寄生电容和读取线圈的电阻对敏感信号的干扰,同时也提高了传感器的灵敏度。在温度范围为 100 °C~1 300 °C 对传感器性能进行测试,结果表明传感器与线圈天线的耦合距离在 10 mm 内,传感器谐振频率随温度的上升规律性向左偏移,测量灵敏度最低为 2 kHz/°C,高达 7 kHz/°C。由测试结果可知,该传感器可应用于恶劣环境下的温度监测且测试结果可靠。

关键词: 无线无源;LC 传感器;高温共烧陶瓷;输入回波损耗;温度传感器;丝网印刷技术

中图分类号: TP212 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 460.4020

Design of wireless passive temperature sensor based on HTCC

Li Huan Dong Helei Han Lei Wang Xin

(Key Laboratory of Instrumentation Science & Dynamic Measurement, Ministry of Education,
North University of China, Taiyuan 030051, China)

Abstract: Aiming at the problem of short service life of the sensor and low anti-electromagnetic interference ability. In this paper, an inductance-capacitance separation sensor is designed. This structure not only prolongs the life of the reading coil, but also reduces the interference of the parasitic capacitance of the inductor and the resistance of the reading coil to the sensitive signal, and also improves the sensitivity of the sensor. The performance of the sensor was tested in the temperature range of 100 °C~1 300 °C, and the results showed that the coupling distance between the sensor and the coil antenna was within 10 mm, and the resonant frequency of the sensor shifted to the left regularly with the rise of temperature, and the measurement sensitivity was as low as 2 kHz/°C, up to 7 kHz/°C. It can be seen from the test results that the sensor can be applied to temperature monitoring in harsh environments and the test results are reliable.

Keywords: wireless passive; LC sensor; high temperature co-fire ceramic (HTCC); input return loss; temperature sensor; screen printing technology

0 引 言

温度传感器作为自动化与检测系统的前端,在航空、军事、工业方面有着十分重要的地位^[1-3]。在航空领域中,涡轮发动机中的叶片等关键运行部件通常在高温、高压、强腐蚀性等恶劣环境中运行,其内部温度的高精度提取十分重要,很多温度检测算法也由此诞生。是监测涡轮发动机健康状态、保证其正常工作的前提^[4-6]。

许多文章已经介绍了无线无源传感器的应用,例如 Martuza 等^[7]通过可扩展的大面积薄膜半导体制造工艺,制备了基于 ZnO 的 LC 型无源湿度传感器,能够远程监测

相对湿度,但是其信号耦合区域也处于测试环境,长期使用会降低传感器的湿度测试精确度;李来超等^[8]提出了一种以聚合物先驱体陶瓷 SiCN (PDC-SiCN)为介质材料的温度传感器,传感器的测试温度达到了 610 °C,但是传感器与测试天线均处于高温环境,长期使用会降低外部天线的寿命;同样 Ji 等^[9]通过高温共烧陶瓷工艺制备了 LC 温度传感器,此传感器能实现高温测试的功能,但是信号的传输限制了感应线圈天线的寿命以及制造成本。此外,由于紧凑的结构设计导致其电磁抗干扰能力在高温恶劣环境中表现较差^[10-12]。基于上述的调研,本文基于 LC 谐振电路原理,结合 LTCC 技术通过丝网印刷工艺研制一种

收稿日期:2021-03-14

* 基金项目:国家重点研发计划(2018YFB2003100)项目资助

LC 谐振式无线无源温度传感器,该传感器是由 LC 电路和陶瓷基板组成,电感分布在低温区,电容分布于高温区,避免了天线在高温环境下被破坏的问题。HTCC 基板比 LTCC 基板更耐温度,且在测试信号上表现优于蓝宝石基板,是一种应用广泛的耐热材料。电路印刷材料采用的金属铂具有良好的重复性和热敏性,保证了高温环境下的测试状况。

1 传感器测试原理

本文传感器测温机理为当温度升高时,基底的介电常数变化改变了传感器又指电极的电容值,相应的影响了传感器的谐振频率。传感器测试原理如图 1 所示,阅读器与传感器的电感通过近场耦合传递信号。当网络分析仪给阅读器扫频信号时,扫频信号以电磁波的形式发散出去,传感器中的电感线圈作为与外界传递信号的中介,以电磁耦合的方式与阅读器发射的信息进行交互。当阅读器发射的信号与不同温度下传感器本身的谐振频率相等时,两者发生谐振,便可得到该温度环境下传感器的谐振频率值,传感器的谐振频率的计算公式如式(1)所示。

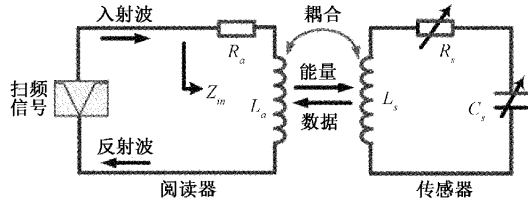


图 1 传感器测试原理

用输入回波损耗 S_{11} 的对数形式呈现反射波幅值与入射波幅值的比值关系来获取传感器信号的变化,反射系数 Γ 计算公式如式(2)所示。 S_{11} 与反射系数的关系如式(3)所示^[13]。

$$f_s = \frac{1}{2\pi \sqrt{L_s C_s}} \quad (1)$$

$$\Gamma = \frac{Z_{in} - Z_0}{Z_{in} + Z_0} \Big|_{Z_0=50 \Omega} \quad (2)$$

$$S_{11} = 20 \lg(|\Gamma|) \quad (3)$$

结合式(2)、(3)可知,输入阻抗(Z_{in})对传感器的信号变化影响很大。从电路的角度看,电磁波在传播时发生反射是因为传感器与信号接收测试系统的阻抗不匹配造成的。一般系统阻抗是 50Ω ,当输入阻抗接近 50Ω 时,与传感器耦合的信号就会越多, S_{11} 值也会相应的越小。LC 传感器输入阻抗如式(4)所示。

$$Z_{in} = R_a + j\omega L_a + \frac{(M\omega)^2}{R_s + j\omega L_s - \frac{1}{j\omega C_s}} \quad (4)$$

$$\omega = \frac{1}{\sqrt{L_s C_s}}$$

2 传感器的设计与仿真

2.1 传感器的设计

本文设计的传感器是利用导线将电感器与电容器连接起来的 LC 串联电路,电感线圈处于相对低温区,又指电容处于相对的高温区,又指电容的面积也不再受电感线圈的内径的限制,传感器的电感器部分的设计原则是增加电感,从而增加 S_{11} 信号的强度。如果电感器与电容器是集成的,那么天线也必须承受高温环境。而普通线圈天线在高温环境中容易发生氧化,贵金属的天线成本高昂,不适合普遍应用,并且在高温环境中线圈天线的阻抗会随温度的变化而变化,影响测量结果的准确性,且随着温度的升高,回波损耗衰减的很快。电感电容的分离方案能良好的应对高温环境下线圈天线无法正常运行的问题,传感器的结构如图 2 所示。因方形结构空间利用率高,电感值最大,所以选用正方形平面螺旋电感器。电感器的电感值计算如式(5)所示。 K_1 为 2.34 和 K_2 为 2.75 是方形电感器的形状系数, μ 为真空磁导率 $1.2566 \times 10^{-6} \text{ H/m}$; n 为电感器的匝数。 d_a 和 φ 分别代表线圈的平均直径和电感的空心程度^[14]。

$$L_s = \frac{K_1 \cdot \mu n^2 d_a}{1 + K_2 \cdot \varphi}$$

$$d_a = \frac{d_{out} + d_{in}}{2}$$

$$\varphi = \frac{d_{out} - d_{in}}{d_{out} + d_{in}} \quad (5)$$

又指电容是以两组电极以梳齿状交叉在一起,又指电极间电场可以近似为匀强电场,当又指电极对数为 x 时,电容值计算如式(6)所示^[15]。

$$C_s = (2x - 1) \frac{\epsilon_0 \epsilon_r (l_c h_1)}{s} \quad (6)$$

其中, x 为又指对数, ϵ_0 为真空介电常数, ϵ_r 为相对介电常数, l_c 为又指电极长度, h_1 又指电极厚度, s 为又指电极的线距。因此,通过温度改变相对介电常数,实现电容值的变化。

电感值会影响信号强度的大小,为了加强 S_{11} 信号的强度,且满足所设计的传感器的大小,经过计算与仿真,电感器的导线间距 S 和线宽 w 均与电感值成反比,传感器的基底的厚度 h 对电感值影响甚微,仿真结果如图 2 所示。

经过计算仿真优化,本文所设计的电感器匝数为 7,线宽为 0.3 mm ,电感器和电容器间距 40 mm 。传感器的结构如图 3 所示,具体几何尺寸如表 1 所示。

2.2 传感器的仿真

利用 HFSS 仿真软件,对表 1 的传感器几何结构的电场表面图仿真^[16]。仿真结果如图 4 所示,电场主要集中于又指表面,这表明该部分作为温度敏感单元,有较高的温度灵敏度,从而提高实验测试的精确度。

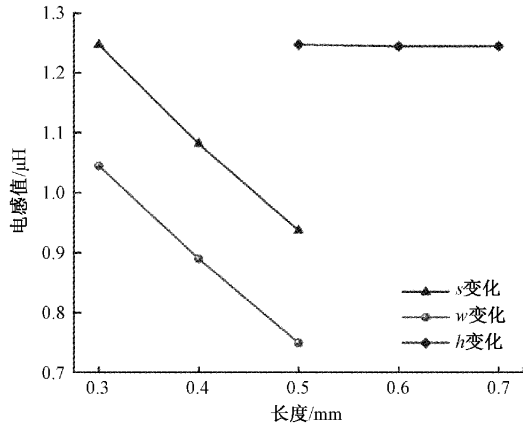


图 2 电感器物理尺寸的对电感值的影响

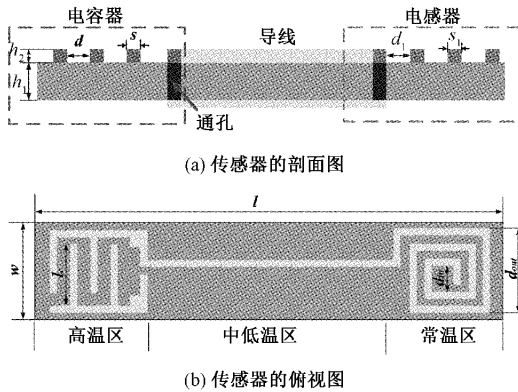


图 3 LC 无线无源温度传感器

表 1 传感器的几何尺寸

器件	参数	符号	值
电感器	外径	d_{out}	20 mm
	内径	d_{in}	12.2 mm
	线宽	s_1	0.3 mm
	线距	d_1	0.3 mm
电容器	厚度	h_2	10 μm
	线宽	s	0.1 mm
	线距	d	0.15 mm
	叉指对数	x	33
基底	叉指长度	l_c	15.5 mm
	长度	l	81 mm
	宽度	w	21 mm
	厚度	h_1	0.5 mm

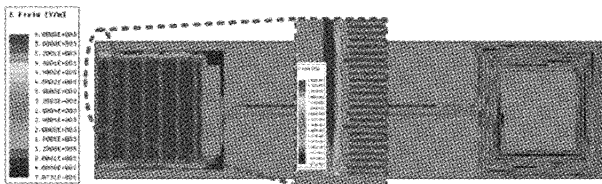


图 4 传感器表面电场仿真

传感器与线圈天线之间距离对于传感器的 S_{11} 幅值以及工作频率的影响的仿真图如图 5 所示,可以看出,随着天线线圈与传感器之间距离的增大,工作频率逐渐向左偏移,且 S_{11} 先减小,后增大。因此文中选择天线与传感器的最佳工作距离 10 mm,传感器的谐振频率为 114.8 MHz。

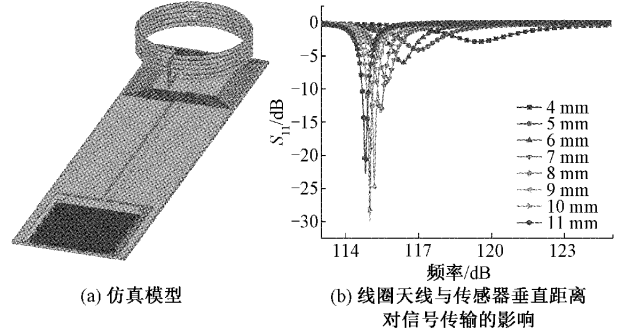


图 5 传感器仿真结果

3 传感器的制备工艺及测试

3.1 传感器的制备工艺

选用 21 mm×81 mm 的氮化铝陶瓷基底,采用丝网印刷技术将铂浆料通过定制网板印刷在烧结好的氧化铝陶瓷基底上,选用氮化铝陶瓷基底和铂浆料(ESL5541-A)主要是由于其耐高温特性,可以稳定工作在恶劣环境中,便于后期的高温环境下温度的实时测量和获取。将印刷好的结构在马弗炉中进行烘干,然后根据图 6 所示的烧结曲线,对印刷好结构的传感器进行烧结,烧结的主要目的是使铂浆料中的有机材料更好的与陶瓷基底结合,最终形成稳定工作的传感器。采用丝网印刷技术与陶瓷制造相结合比其他方法成本更低,操作工序简捷,高温稳定性高,网版的具体参数如表 2 所示。

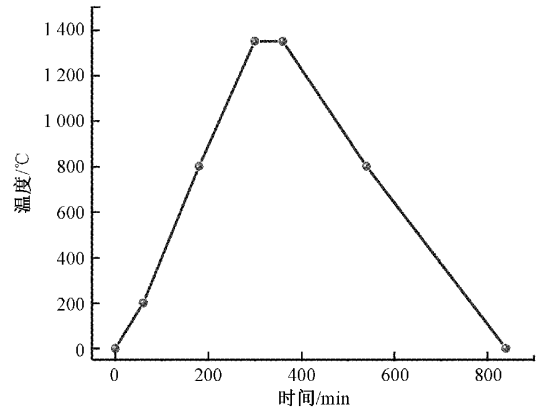


图 6 LC 传感器烧结曲线

表 2 网版的具体参数

网版参数	网布目数	纱厚/ μm	张网角度/ $(^\circ)$	张力/N	薄膜厚度/ μm
数值	400	54	22.5	30	10

3.2 传感器的测试与分析

为了验证传感器的工作性能,对其进行系统的的结果测试,主要包括温度变化对频率偏移量的影响,以及验证仿真结果与实际测试中天线圈与被测传感器的距离对实验结果的影响是否一致。搭建的测试平台如图 7 所示,天线和传感器的电感部分处于常温区,使天线端避免受到超高温环境的影响。测试天线与网络分析仪连接,扫频信号经网络分析仪传递到天线端,扫频信号以电磁波的形式散发出去,通过电磁耦合的方式,与传感器进行信息交换。

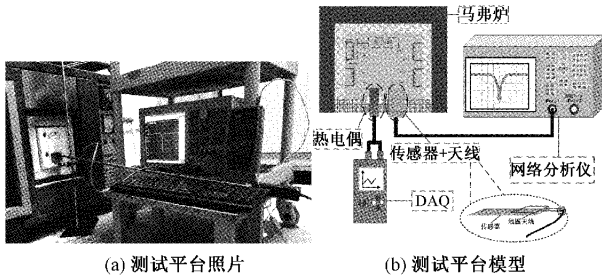


图 7 温度传感器测试平台

高温测试设备选用马弗炉,由于马弗炉是烧结陶瓷设备,高温以上温度段的精度较高,但是低温区的温度的较低,所以选用商用的热电偶连接数据采集记录仪(DaQ-PRO 5300)实时监测温度变化。从常温每间隔 100 °C 记录谐振频率和谐振频率所对应的 S_{11} 幅值,测试温度至 1 300 °C,测试数据如图 8 所示。 S_{11} 参数的幅值逐渐减小是因为天线与传感器的耦合强度随着温度的升高而减小,温度升至 1 300 °C 时, S_{11} 幅值依然为 6 dB,并不是温度传感器的极限温度,传感器可长时间工作在 1 300 °C。

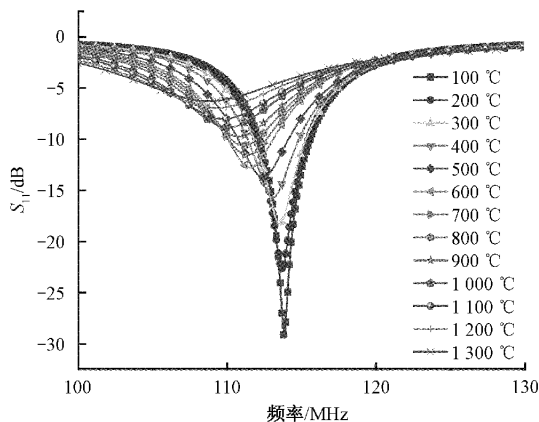


图 8 不同温度下传感器的频率与 S_{11} 的表现

通过实际测试,可以得到不同温度下测试频率的偏移结果,如图 9 所示。从图 9 中可以观察到随着温度从室温升高至 1 300 °C,测试频率逐渐下降,由 114.8 MHz 降低至 107 MHz,谐振频率变化了 7.8 MHz。曲线大致分为 4 段,这是因为氮化铝的介电常数与温度变化的非线性变化,谐振频率与温度的响应关系也是非线性的,可以看出,随着温度的升高,传感器响应的灵敏度逐渐增加。对不同温度范

围内温度频率响应点进行分段拟合,在第 1 阶段(100 °C ~ 300 °C),传感器测试灵敏度为 2 kHz/°C;在第 2 阶段(300 °C ~ 600 °C)内,其值增加到 7 kHz/°C;在第 3 阶段(600 °C ~ 900 °C)内,传感器的灵敏度为 4 kHz/°C;而在第 4 阶段(900 °C ~ 1 300 °C)内,灵敏度为 5 kHz/°C。

为了验证传感器的测温稳定性,在相同的环境下,对传感器进行了 3 次测试,测试结果如图 10 所示。从图 10 可得出,传感器的性能良好,3 次测试结果趋于一致,表明 LC 温度传感器对于超高温测量结果较为可靠。本实验采用较为精简的工艺流程,实现了传感器在高温环境下的温度检测,其具有精度高,成本低的优势。

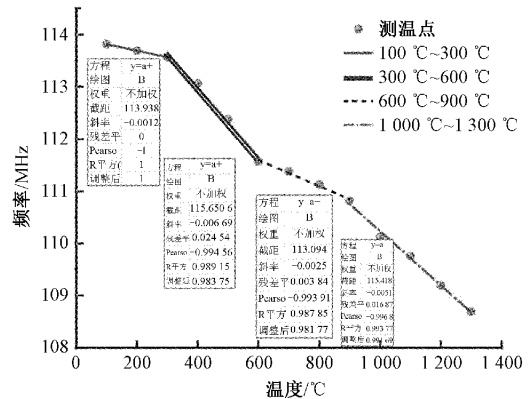


图 9 不同温度下谐振频率与温度的关系

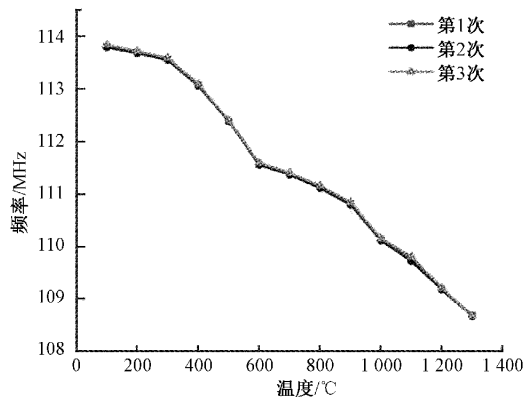


图 10 多次测试结果下传感器温度不同时频率表现

4 结 论

从简化传感器结构和提高信号利用率的角度出发,设计了一种基于 HTCC 和丝网印刷技术的电容电感分离式 LC 无线无源温度传感器,将传感器与天线所处的环境分离,实现了高温测量的技术要求。与此同时对传感器进行了仿真分析和实验测试,验证了谐振频率是温度的函数。经过高温测试,实验结果证实了理论分析的正确性,特别是在超高温下,传感器的温度响应良好,且温度灵敏度最低为 2 kHz/°C,最高为 7 kHz/°C。经过多次实验也证实了该传感器具有良好的热稳定性。面对复杂的测试环境,可以对

工艺进行探索,如曲面烧结和印刷工艺研究,以便传感器适应较为复杂的测试系统;设计轻巧的方便安装的传感器的封装结构,便于传感器的重复测试实验以及传感器的产品化。

参考文献

- [1] WANG Z G, HE M. Temperature control based on fuzzy logic two-degree-of-freedom smith internal model [J]. Instrumentation, 2020, 7(2): 1-8.
- [2] 王凯. 蓝宝石超声导波原理的温度分布传感器[J]. 国外电子测量技术, 2019, 38(4): 88-92.
- [3] KUMAR V, CHOUDHARY B C, TIWARI U K. FBG temperature sensor for avionics display system [J]. Advances in Aerospace Science and Applications, 2013, 3(1): 1-11.
- [4] 王浩, 王立文, 王涛, 等. 航空发动机损伤叶片再制造修复方法与实现 [J]. 航空学报, 2016, 37(3): 1036-1048.
- [5] 杨晓军, 王瑛琦, 刘智刚. 航空发动机涡轮叶片损伤分析[J]. 机械工程与自动化, 2017(3): 203-205.
- [6] GUANG X N, LIU X H. Finite-time stability of heating furnace temperature control system [J]. Instrumentation, 2020, 7(2): 51-59.
- [7] MARTUZA M A, LEE C H, SAZONOV A, et al. Wireless LC-type passive humidity sensor using large-area RF magnetron sputtered ZnO films [J]. IEEE Transactions on Electron Devices, 2018, 65(8): 3447-3453.
- [8] 李来超, 余煜玺, 黄奇凡, 等. PDC-SiCN 陶瓷基无线无源温度传感器的制备[J]. 功能材料, 2017, 48(7): 7169-7172.
- [9] JI Y, TAN Q, WANG H, et al. A novel surface LC wireless passive temperature sensor applied in ultra-high temperature measurement [J]. IEEE Sensors Journal, 2018, 19(1): 105-112.
- [10] LI C, TAN Q, XUE C, et al. A high-performance LC wireless passive pressure sensor fabricated using low-temperature co-fired ceramic (LTCC) technology [J]. Sensors, 2014, 14(12): 23337-23347.
- [11] TAN Q, LYU W, JI Y, et al. A LC wireless passive temperature-pressure-humidity (TPH) sensor integrated on LTCC ceramic for harsh monitoring [J]. Sensors and Actuators, 2018, 270: 433-442.
- [12] LI W, LIANG T, LIU W, et al. Wireless passive pressure sensor based on sapphire direct bonding for harsh environments [J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2018, 280: 406-412.
- [13] 吉耀辉. 恶劣环境下 HTCC 基无源 LC 传感器设计及其测试方法研究[D]. 太原: 中北大学, 2019.
- [14] ZHANG L, TAN Q, WANG Y, et al. Wirelessly powered multi-functional wearable humidity sensor based on RGO-WS₂ heterojunctions [J]. Sensors and Actuators B: Chemical, 2021, 329: 129077.
- [15] 李炳宇. 无线无源温湿度传感器的制备与特性研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2020.
- [16] 孙成芹, 胡永建, 李显义, 等. 井下无线感应传输装置 HFSS 仿真设计 [J]. 电子测量与仪器学报, 2020, 34(4): 96-101.

作者简介

李焕, 硕士研究生, 主要研究方向为微波器件。

E-mail: 15525061816@163.com

董和磊, 博士, 副教授, 硕士生导师, 主要研究方向为新型功能薄膜材料与器件和无线无源微波器件。

E-mail: 13227039950@163.com

韩磊, 硕士研究生, 主要研究方向为太赫兹超材料功能器件。

E-mail: hanlei_666@163.com

王鑫, 硕士研究生, 主要研究方向为无线电能传输。

E-mail: 527963339@qq.com