

Design of Integrated System for Sensing Moisture Content of Asphalt Mixture*

ZHANG Yong, LIU Ce*, GUO Chen, HE Zhili

(School of Information Engineering, Chang'an University, Xi'an 710064, China)

Abstract: To improve the accuracy of the sensor measuring pavement asphalt mixture moisture, and simplify its structure, A 1.5 GHz micro-ring resonator is presented in the paper. With different water content, the dielectric constant of unsaturated asphalt mixture changes within a range, which causes effective dielectric constant of micro-ring changed and micro-ring resonant frequency shifted. To invert the mixture dielectric through the resonant frequency, and build the linear-proportion between water content and effective dielectric constant, water content in asphalt mixture can be got. The research work includes algorithm analysis, micro-ring structure design and simulation, and sensor integration design. Mixture sample (water content in 0 ~ 30%) tests show that the measurement resolution $\leq 0.1\%$, the measurement error $\leq 1\%$, the system response time ≤ 100 ns. This new sensor is small volume, low power consumption, high precision, suitable for pavement detection.

Key words: asphalt mixture; moisture content detection; micro-ring sensor; dielectric constant; resonant frequency;
EEACC: 5240; 7230 **doi:** 10.3969/j.issn.1004-1699.2013.05.028

沥青混合料含水量集成检测系统设计与研究*

张勇, 刘策*, 郭晨, 贺之莉

(长安大学信息工程学院, 西安 710064)

摘要: 为提高路面沥青混合料含水量测量装置精度, 简化结构, 提出一种 1.5 GHz 微带环结构的含水量传感器检测系统。因含水量不同, 不饱和混合料介电常数变化, 导致微带环有效介电常数发生改变, 谐振频率偏移。通过谐振频率反演混合料介电常数, 建立含水量与有效介电常数的线性关系求得沥青混合料含水量。研究工作包括算法分析、微带环结构设计仿真、系统软硬件集成设计。混合料样本(含水量 0 ~ 30%)测试显示测量分辨率 $\leq 0.1\%$, 误差 $\leq 1\%$, 系统响应时间 ≤ 100 ns。这种新型传感器体积小、功耗低、精度高, 适合路面测量。

关键词: 沥青混合料; 含水量检测; 微带环传感器; 介电常数; 谐振频率;

中图分类号: TP212.2

文献标识码: A

文章编号: 1004-1699(2013)05-0751-06

路面沥青混合料含水量是公路工程施工的重要指标, 含水量控制在理想的范围内进行压实才能确保路面压实度。目前工程中常用的检测法是钻芯烘干称重法, 国际上作为对比标准方法^[1], 此方法误差大、路面损毁严重。

电磁无损检测是近年来含水量检测新方法, 具有非接触、无损耗等优点。包括电容法、传输线法、谐振腔法、时域反射法、探地雷达法等^[2]。电容法工作频段低对高盐分测量不精确。谐振腔法多数谐振腔体

结构复杂, 品质因数 Q 值^[3] 不高, 易产生频点漂移。时域反射法探针结构复杂并包含直流信号分量, 对高金属、高盐含量混合料因电导率影响无法准确测量。探地雷达法适合大面积测量且测量精度差。

将电磁探测与路面检测结合, 本文提出一种基于微带耦合环结构路面沥青混合料含水量检测传感器。原理基于混合料含水量与混合料介电常数对应关系, 因含水量不同, 不饱和混合料介电常数变化, 导致微带环周围有效介电常数发生改变, 谐振频率

项目来源: 国家自然科学基金项目(51277012, 61201233); 中国博士后科学基金项目(20110491639); 中央高校基本科研业务专项基金项目(CHD2011ZD004, CHD2011TD012)

收稿日期: 2013-01-25 **修改日期:** 2013-04-23

偏移。通过谐振频率反演混合料介电常数,建立含水量与介电常数的线性关系求得沥青混合料含水量。该传感器结构简单、精度高、功耗低,耐高盐铁含量,适合各种配型混合料的路面检测。

1 反演模型

微带环固有谐振频率 f^u ,微带环加负载(贴近待测介质)后谐振频率为 f^l 。微带环加负载前后的谐振频率比值与有效介电常数关系如式(1)

$$\frac{f^u}{f^l} = \frac{\operatorname{Re}[\sqrt{\varepsilon_{\text{eff}}^l}]}{\sqrt{\varepsilon_{\text{eff}}^u}} \quad (1)$$

其中 f^l 、 f^u 分别为加负载后谐振频率和固有谐振频率, $\varepsilon_{\text{eff}}^l$ 、 $\varepsilon_{\text{eff}}^u$ 为加负载前后有效介电常数。对于有耗传输线,复介电常数可表示为

$$\varepsilon_{\text{eff}}^l = \varepsilon_{\text{eff}}^l - j\varepsilon_{\text{eff}}^n \quad (2)$$

式中 $\varepsilon_{\text{eff}}^l$ 、 $\varepsilon_{\text{eff}}^n$ 为复介电常数的实部和虚部。

传输线 C 、 G 、 ε_{eff} 可表示如式(3)^[4]

$$k_0 \sqrt{\varepsilon_{\text{eff}}} = \omega \sqrt{LC \left(1 - j \frac{G}{\omega C}\right)} \quad (3)$$

C 、 G 分别是传输线有效电容、电导。由式(3),有耗传输线固有和加负载时有效介电常数、电容与电导的关系如式(4)、式(5)

$$C^l = C^u \frac{\varepsilon_{\text{eff}}^l}{\varepsilon_{\text{eff}}^u} \quad (4)$$

$$\frac{G^l}{\omega^l C^u} = \frac{\varepsilon_{\text{eff}}^n}{\varepsilon_{\text{eff}}^u} \quad (5)$$

介质损耗品质因数 Q_d 为谐振时电容器 C 与电感线圈 G 上电压的比值,如式(6)^[5]:

$$Q_d = \omega \frac{W_e + W_m}{P} = \omega \frac{CV^2/2}{GV^2/2} = \omega \frac{C}{G} \quad (6)$$

其中 $W_e = W_m = CV^2/4$ 。 Q_d 有如式(7)

$$\frac{1}{Q_d} = \frac{1}{Q_m} - \frac{1}{Q_u} \quad (7)$$

在忽略辐射损耗情况下, Q_m 为加负载情况下通过谐振频率和3 dB带宽^[6]测得的品质因数, Q_u 传输线固有品质因数。根据式(7)得到介质损耗品质因数 Q_d 。根据式(4)~式(6)得式(8):

$$\varepsilon_{\text{eff}}^n = \frac{\varepsilon_{\text{eff}}^l}{Q_d} \quad (8)$$

由式(1),微带环加负载后有效介电常数的实部 $\varepsilon_{\text{eff}}^l$ 可以通过谐振频率 $\frac{f^u}{f^l}$ 和介质损耗品质因数 Q_d 得到,由式(8)推导出虚部 $\varepsilon_{\text{eff}}^n$ 。得到 $\varepsilon_{\text{eff}}^l$ 、 $\varepsilon_{\text{eff}}^n$,根据式(4)、式(5),微带环的电容 C 和电导 G 可以看作加负载后混合料介电常数 ε_2 和电导率 σ 的函数,对

式(4)、式(5)求逆函数并用泰勒级数方法展开如式(9)、式(10):

$$\begin{aligned} \varepsilon_2 \approx & a_0 + a_1 C + a_2 G + a_3 CG + a_4 C^2 + a_5 G^2 + a_6 CG^2 + \\ & a_7 C^2 G + a_8 C^3 + a_9 G^3 + a_{10} C^2 G^2 + a_{11} CG^3 + \\ & a_{12} C^3 G + a_{13} C^4 + a_{14} G^4 \end{aligned} \quad (9)$$

$$\begin{aligned} \sigma \approx & b_0 + b_1 C + b_2 G + b_3 CG + b_4 C^2 + b_5 G^2 + b_6 CG^2 + \\ & b_7 C^2 G + b_8 C^3 + b_9 G^3 + b_{10} C^2 G^2 + b_{11} CG^3 + \\ & b_{12} C^3 G + b_{13} C^4 + b_{14} G^4 \end{aligned} \quad (10)$$

这样通过测量微带环的谐振频率、 Q 值等谐振参数,反演沥青混合料介电常数和电导率。不同传统介电常数反演算法忽略虚部电导率对含水量有影响,此算法通过谐振参数反演介电常数和电导率,将虚部电导率对含水量影响计算在内从而减小误差。

2 微带环

微带环设计分别从介电常数、穿透深度和盐含量几方面考虑。干燥混合料介电常数3~5、水为80,饱和混合料近似30,各配型非饱和混合料相对介电常数为3~30^[7]。微带环工作频率为1.5 GHz,波长约20 cm,由于具有有效穿透深度,微带环可以测量混合料表面及内部的含水量,穿透深度取决于介质中水分子多少及分布状况^[8],另外,有效穿透深度也受信号源功率控制,功率越大穿透深度越深。此频段,电导率对复介电常数虚部的影响可忽略,高盐铁含量混合料中溶于水的盐铁离子对电导率影响可忽略^[9]。因此,微带环可以准确测量高盐铁含量混合料含水量。综上,影响介电常数的主要因素是混合料含水量,穿透深度取决于水分子多少及分布。测量对混合料盐铁等矿物质浓度没有具体要求。

2.1 微带环结构设计

微带环采用环路的微带传输线结构,如图1,微带传输线采用RF4环氧树脂三层PCB结构,一层为微带铜环,二层覆铜接地,三层为信号集成电路。微带环采用双端口,一端发送正弦激励信号,另一端接收。正弦波沿微带环半周长传至另一端,正弦波长等于微带环周长,产生驻波发生谐振。

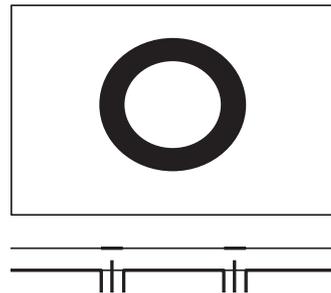


图1 微带环正侧面结构

微带环谐振条件为 $\pi \cdot d = \lambda$ 即:

$$l = \pi \cdot d = \frac{v}{f} = c/f \sqrt{\epsilon_{\text{eff}}} \quad (11)$$

λ 为波长, v 为相速, d 为圆环的直径, a 为矩形微带环的边长。因微带环在空气中工作波长 $\lambda_0 = 20 \text{ cm}$, 根据式(11)微带环周长设计为 $l = 11.3 \text{ cm}$, 可得有效介电常数。微带环有效介电常数计算式(12)^[10]

当 $w/h \geq 1$

$$\epsilon_{\text{eff}} = \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{2} \left(1 + 12 \frac{h}{w} \right)^{-1/2} \quad (12)$$

w/h 是微带线宽度与 PCB 板厚度之比。PCB 介电常数 $\epsilon_r = 4.5$, $h = 1.6 \text{ mm}$, 特性阻抗 $Z_c = 50 \Omega$, 根据式(12)得 $w/h = 1.875$, 线宽 $w = 3 \text{ mm}$ 。

2.2 微带环仿真

仿真采用基于微波有限元方法的 Asoft HFSS (High Frequency Structure Simulator) 电磁三维软件。

微带线、底衬覆铜设置理想电边界。仿真采用同轴线馈电, 同轴线端口设为波端口, 加阻抗线激励源。一层微带线上面创建混合料介质, 设为辐射边界, 介电常数设置 3 ~ 30 (模拟不饱和沥青混合料), 辐射方向为上半空间。在 1.5 GHz 自适应频率 delta-S 达到 0.01, 1.48 GHz ~ 1.53 GHz 快速扫描。模型尺寸如图 2, 微带线宽度 $w = 3 \text{ mm}$, 内环半径 $r_1 = 1 \text{ cm}$, 外环半径 $r_2 = 1.3 \text{ cm}$, 衬底厚度 $h = 1.6 \text{ mm}$, 衬底半径 $R = 1.8 \text{ cm}$ 。

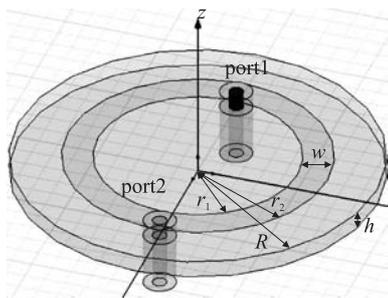


图2 HFSS 微带环仿真

2.3 环孔缝隙优化

微带环两端各开环孔缝隙^[11], 在微带线上形成内环。内环与下面同轴线或信号源连接馈电。内环与同轴线或信号源连通生成环状电流, 等效为磁流源激励^[12]。内环激励与微带环之间通过环孔缝隙形成磁偶极子^[13], 通过磁矩与微带环相耦合产生谐振, 如图 3 所示。

发送激励端环孔缝隙应置于微带环磁场最强处并调整环面垂直于磁力线。接收端环孔缝隙应置于微带环电场值较大处, 确保接收信号最强。上述激励模式下微带环电场分布模拟如图 4 所示, 两环孔

缝隙水平对称分布最理想。

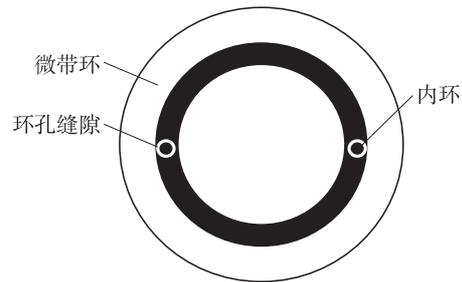


图3 环孔缝隙结构

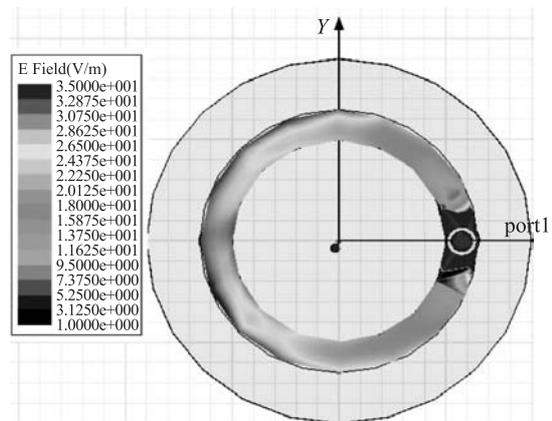


图4 微带环电场分布模拟

2.4 参数仿真

在 1.48 GHz ~ 1.53 GHz 频率范围, 微带环回波损耗如图 5 所示。中心频率 1.5 GHz, 反射损耗 S_{11} 和入射损耗 S_{21} ^[14] 分别为 -28.07 dB 和 -0.12 dB, 如图 5, 仿真结果表明微带环在此频段有效。微带线、同轴线阻抗匹配均为特性阻抗 50 Ω 。

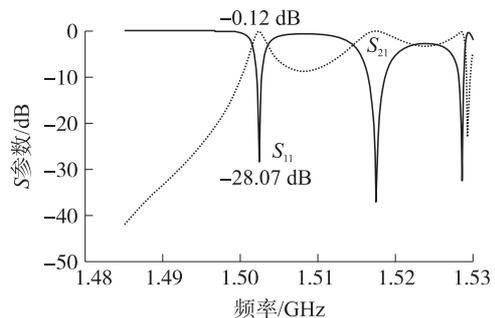


图5 微带环 S 参数曲线

2.5 谐振频率-介电常数关系仿真

在 1.48 GHz ~ 1.53 GHz 扫频范围, 通过改变微带环上面创建混合料介质的介电常数设置范围 3 ~ 30 (模拟不饱和沥青混合料), 仿真入射损耗 S_{21} 频偏与混合料介电常数的关系。从图 6 看出, 根据饱和度和不同混合料介电常数范围 3 ~ 30, 对应 S_{21} 频率在 1.48 GHz ~ 1.53 GHz 之间变化。微带环谐振频偏与混合料介电常数大致成线性关系。

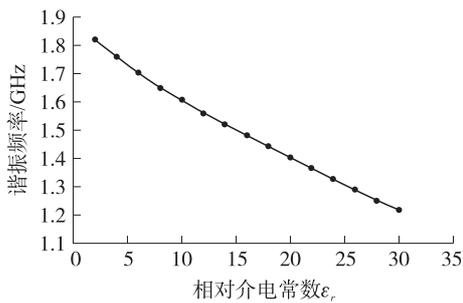


图6 HFSS 模拟谐振频率和介电常数关系

3 系统设计

系统硬件由微带环、信号集成系统、控制器三部分组成。

3.1 信号集成系统设计

采用微带环结构。微带环采用三层 PCB 板,一层为微带铜环,二层覆铜接地,为简化装置结构,减小体积,降低功耗,将微带环背面(第三层)集成为信号系统电路,包括信号收发器、采集器。

信号收发器由频率合成器 ADF4360^[15]、检波器 AD8318 组成。ADF4360 结合外部环路滤波器和外部基准频率使用,可实现锁相环 PLL 频率合成器。ADF4360 集成电压控制振荡器 VCO,其基波输出频率范围为 2200MHz,用分频电路可产生较低的输出频率。AD8318 是一款解调对数放大器,能够将检测射频信号输入精确地转换为相应的 dB 标度电压输出,如图 7。

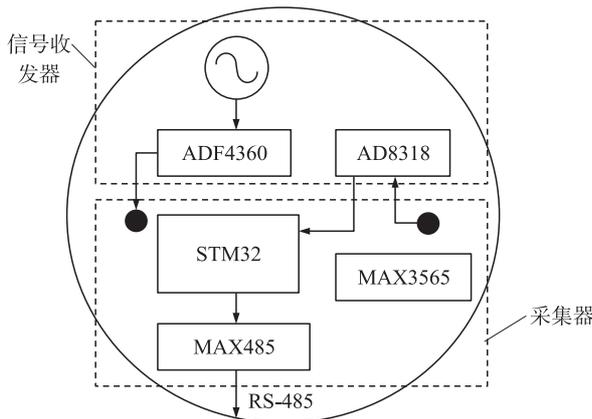


图7 信号集成系统结构

采集器采用最小单片机 STM32 系统,采用单片机+晶振+复位电路结构。单片机 STM32 系统具有 ISP 程序下载功能。通过 SPI 功能与频率合成器 ADF4360 连接,用于初始化信号收发器频率、时钟、相位等。单片机 STM32 接收测量数据并进行模数转换 ADC,将数据存入片内 FLASH,片内存储能保留数据 10 000 组以上。MAX485 模块具有转 RS-

485 功能,连接控制器。电压转换模块 AMS1117-5 可实现 12 V 转 3.3 V 功能,将大容量锂电池供电转为单片机系统供电。

STM32 单片机、频率合成器 ADF4360 构成信号集成系统。频率合成器 ADF4360 集成 VCO 组成锁相环 PLL 产生特定频率的电磁波输出信号。输出信号连接微带环,通过一环孔缝隙耦合微带环产生谐振,用作检测信号。检测信号通过微带环从另一环孔缝隙输出,接入检波器 AD8318,将检测射频信号输入转换为等效直流输出。输出的直流模拟电压经过 ADC 模数转换将数据存储在 STM32 片内 FLASH,通过 MAX485 转 RS-485 串口上传。

3.2 控制器设计

控制器硬件采用 ARM7 内核单片机 LPC2114。系统板上设计有 JTAG 接口、ISP 编程、复位键、LCD 显示、RS485 串口等功能。存储部分采用 256K 字节的片内 FLASH,16 K 的 SRAM,片内能保留含水量数据 30000 组以上。通信部分开发 UART、I2C、SPI、RS485 等功能,以实现 ADC 转换、GPIO 显示输出、串口通信等功能。整个系统简单可靠。

控制器软件采用 ADS1.2 作为开发平台,集成 ARM 汇编器、Thumb C/C++ 编译器、AXD 调试器等多种编译工具,采用汇编器、VC 等多种语言构架。软件打破传统单片机循环语句式的调度策略,采用 $\mu\text{C}/\text{OS II}$ 操作系统内核移植,将系统分为操作系统移植、内存管理、队列管理、协议栈主循环、设备驱动等多功能模块并行系统。系统采用多任务管理,提高并行效率。

4 含水量测量结果分析

取一定量混合料,放入烧杯中,制成含水量 30% 饱和混合料样本,精确测得饱和混合料总质量。恒温加热,定时称重,记录样本质量,根据式 (13)^[16],依次计算含水量。同时,采用传感器测量因谐振频率偏移而产生直流电压输出值。

$$\eta = \frac{m_w}{m_d} \times 100\% = \frac{m_m - m_d}{m_d} \times 100\% \quad (13)$$

m_w 为样本水的质量, m_d 样本干燥混合料质量, m_m 单位样本总质量。

当含水量依次为 30%、28%... 时,记录微带环系统的输出电压值,测量结果用黑点标记,如图 8,微带环系统输出电压值与混合料样品含水量为线性关系。

根据图 8,曲线大致为二项式,推倒二项式拟合方程,用实线表示。可以看出,黑点代表实验记录值

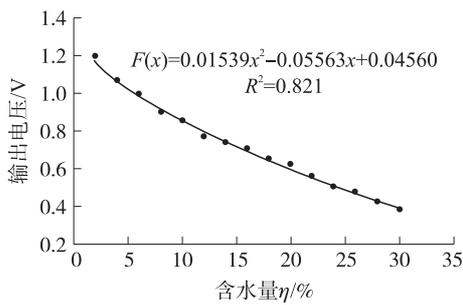


图 8 拟合实验数据结果(1.5 mV/MHz)

与曲线拟合值相吻合。拟合二项式表示为(14):

$$V_{f_0} = 0.01539 \times \eta^2 - 0.05563 \times \eta + 0.04560 \quad (14)$$

η 为混合料含水量, $R^2 = 0.821$ 回归系数。

图 9 左边为正面微带环,右边为背面信号集成电路。该微带环测量含水量的瞬时分辨率达到 0.1%,测量时间小于 100 ns,中心频率 1.5 GHz,对混合料配型和盐分不敏感。在实验中,该微带环谐振频率仅受含水量影响(不受混合料类型影响),密度影响可忽略不计。

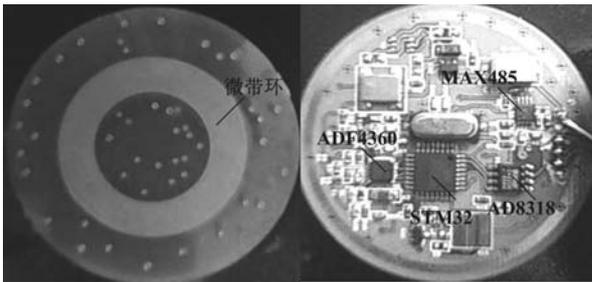


图 9 微带环传感器系统实现

该系统低功耗,使用普通的 12 V 锂离子电池可持续数月。考虑温度变化导致混合料介电常数轻微漂移,因此,该微带环需要温度补偿^[17]。用该系统与传统称重法测量含水量数据对比如表 1。

表 1 两种方法测量混合料样品含水量结果

含水量/%	称重法/%	微带环/%	误差/%	时间/ns
5	4.980	4.891	-0.2	22
8	7.966	7.913	-0.12	27
10	10.141	10.102	+0.21	30
12	11.951	11.977	-0.22	34
15	14.971	15.015	+0.22	53
18	18.241	18.011	+0.27	62
20	19.918	20.118	+0.58	72
22	22.225	22.251	+0.67	86
25	24.759	24.766	-0.81	90
30	29.770	29.742	-0.86	97

从表 1 可以看出,对于配置成标准 0 ~ 30% 含

水量混合料样本,微带环测量含水量比传统钻芯烘干称重法更准确,误差小于 1%,但随着含水量增大,微带环测量误差增大。

5 结论

本文提出一种新型微波传感器系统的设计。该传感器基于谐振原理,利用混合料含水量变化导致有效介电常数变化,从而产生谐振频率偏移,建立含水量跟谐振频率的函数关系,进而求得含水量。

传感器工作频率为 1.5 GHz,采用微带环耦合结构,研究工作进行系统硬件设计与仿真。仿真结果显示,该设计谐振频率取值范围合理,线性变化明显。样本实测结果采用二项式拟合,建立频率模拟输出电压与含水量之间函数关系。实测结果与仿真结果一致性较好,证明了谐振理论的正确性,该传感器系统结构设计的可行性。与传统取样烘干称重法对比测试,证明该传感器系统具有测量精度高、响应时间短、功耗小、持久性强等优势,适合各种路面配型沥青混合料含水量检测。

参考文献:

- [1] 黄飞龙,黄宏智,李昕娣,等.基于频域反射的土壤水分探测传感器设计[J].传感技术学报,2011,24(9):1367-1370.
- [2] 李志华,潘瑞林.路基稳定性无损检测方法技术研究[J].铁道工程学报,2007,24(2):28-31.
- [3] 俞摇锋,李昕欣,于海涛.平面内谐振式微悬臂梁生化传感器的设计与制造[J].传感技术学报,2012,25(7):869-875.
- [4] Chen R. Micro-strip Transmission Line for Soil Moisture Measurement[C]//Sensors for Harsh Environments, Proceedings of SPIE, Philadelphia, 2004, 559:84-86.
- [5] Sugisaka J I, Yamamoto N, Okano M, et al. Enhancement of the Q value of a Micro-ring Resonator by Introducing Curved Photonic Crystal Waveguides [J]. Optical Physics, 2012, 29 (7): 1599-1605.
- [6] Topp J C, Davis J L, Annan A P. Electromagnetic Determination of Soil Water Content: Measurement in Coaxial Transmission Lines [J]. Water Resources Research, 2008, 16(3):574-582.
- [7] 姜宇,丁雪梅,杨国辉.基于微波谐振腔的湿度传感器[J].仪表技术与传感器,2006,13(5):3-5.
- [8] 李恒成,敬守钊.24GHz贴片天线阵的仿真与设计[J].微波学报,2010,18(10):212-214.
- [9] 于云丰,叶甜春,马成炎,等.低相位噪声 Σ - Δ 小数频率合成器[J].中国科学院研究生院学报,2010,27(6):782-787.
- [10] 蒋玉英,张元,葛宏义.微波检测粮仓储粮水分技术的研究[J].计算机工程与应用,2010,46(29):239-241.
- [11] 钱江波,韩中合,田松峰,等.流动湿蒸汽湿度测量微波谐振腔结构分析[J].华北电力大学学报,2005,32(3):52-57.
- [12] 窦建华,徐兰天,杨学志.测量匹配网络 S 参数的转换模型[J].电子测量与仪器学报,2011,25(2):191-197.

- [13] 张淑娥,熊华. 谐振腔测量蒸汽湿度不确定性分析改进[J]. 华北电力大学学报,2007,34(4):22-26.
- [14] 王超,牟建超. 正交偶极子天线比相测向算法[J]. 仪器仪表学报,2011,32(5):976-979.
- [15] KUPFER. Microwave Moisture Measurement Systems and Their Applications[J]. Update-Sensors,2010,7(12):343-346.
- [16] Zhang Huyuan,Zhang Qiuxia,Li Min. Reliability Research of Soil Moisture Content Measurement by Microwave Oven Drying Method for Earthen Monuments[J]. Rock and Soil Mechanics,2012,33,(Suppl 2):65-70.
- [17] 陈瑶,薛月菊,陈联诚,等. pH 传感器温度补偿模型研究[J]. 传感技术学报,2012,25(8):1034-1038.



张 勇(1980-),男,西安长安大学博士研究生,研究方向为电磁无损探测、微波传感器技术,helloaword@126.com;



刘 策(1959-),男,博士,长安大学教授,博士生导师,研究方向为电磁无损探测、测井技术。