

文章编号 1004-924X(2014)11-3050-11

用于探空仪的加热式湿度传感器及测量电路

罗毅^{1*}, 施云波², 杨昆¹, 商春雪¹, 渠立亮²

- (1. 云南师范大学 信息科学与技术学院 西部资源环境地理信息技术教育部工程研究中心, 云南 昆明 650092;
2. 哈尔滨理工大学 测控技术与通信工程学院 测控技术与仪器黑龙江省高校重点实验室, 黑龙江 哈尔滨 150080)

摘要:针对探空仪湿度传感器在高空低温、高湿恶劣环境下容易结露,湿度波动大、电路板分布电容对测量结果有影响等问题,研究了具有蛇形加热器的平板夹心电容式湿度传感器及其工艺制备方法,并设计了测量电路。采用微机电系统(MEMS)加工工艺设计了加热式湿度传感器,通过对传感器进行有限元分析,确定了传感器表面加热区域温度分布情况,得出了环境温度、加热功率与加热温度三者之间的函数关系。提出一种基于电容充放电及比较法的湿度测量电路,从而有效地抑制了温度漂移和零点漂移,减小了寄生电容对测量结果的影响。地面实验结果显示:湿度传感器灵敏度约为 $2.3\%RH \cdot pF^{-1}$,迟滞约为 $0.7\% F \cdot S$,重复性约为 1.9% ,测量总不确定度约为 4% ,时间常数约为 $0.5 s$ 。本文研究的湿度传感器及其测量电路具有很好的温度稳定性,能够在低温环境下正常工作。

关键词:探空仪;湿度传感器;微机电系统(MEMS);蛇形加热器;有限元

中图分类号:TP212.2;TH765.1 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20142211.3050

Humidity sensor for radiosonde and its measuring circuit

LUO Yi^{1*}, SHI Yun-bo², YANG Kun¹, SHANG Chun-xue¹, QU Li-liang²

- (1. *Geographic Information System Technology Research Center of Resource and Environment in Western China of the Ministry of Education, School of Information Science and Technology, Yunnan Normal University, Kunming 650092, China;*
- (2. *The Higher Educational Key Laboratory for Measuring & Control Technology and Instrumentations of Heilongjiang Province, School of Measurement-Control Technology & Communications Engineering, Harbin University of Science and Technology, Harbin 150080, China)*

* Corresponding author, E-mail: luoyi861030@163.com

Abstract: Humidity sensors are easy to condense and have humidity fluctuation, moreover, their board distributed capacitances affect measurement results under a high altitude environment. Therefore, this paper proposes a sandwich plate capacitive humidity sensor integrated with a snake like platinum resistance heater and its prepared method. Then, it studies the measuring circuit for the sensor. The humidity sensor with heater was designed using Micro-electric-mechanic System(MEMS)

收稿日期:2014-03-13;修订日期:2014-04-13.

基金项目:国家 863 高技术研究发展计划资助项目(No. 2006AA04Z319);黑龙江省自然科学基金资助项目(No. ZD201217977);哈尔滨市科技创新人才专项资金资助项目(No. 2010RFXXG009);黑龙江省研究生创新科研资金资助项目(No. YJSCX2011-049HLJ)

technology, the temperature distribution of sensor surface was analyzed and the function relationship between environment temperature, heating power and heating temperature were obtained by using finite element analysis. To suppress the temperature and zero drifts effectively and reduce the influence of parasitic capacitance on measurement, a humidity measurement circuit based on the capacitor charging and comparative law was designed. The ground experimental results on the sensor show that the humidity sensitivity is about $2.3\%RH \cdot pF^{-1}$, hysteresis is about $0.7\%F \cdot S$, and the repeatability is about 1.9% . Moreover, it gives the measurement uncertainty about 4% , time constance about $0.5 s$. In conclusion, the humidity sensor and measurement circuit have good temperature stability, and is suitable for working at a low temperature correctly.

Key words: high altitude radiosonde; humidity sensor; Micro-electrical-mechanical System(MEMS); snake like heater; finite element analysis

1 引言

高空气象探测水平是衡量一个国家大气探测科学水平的主要参考指标之一,而湿度探测是高空气象探测的重要环节^[1]。由于高空环境恶劣,湿度变化剧烈,环境温度最低可达 $-90^{\circ}C$,这就要求湿度传感器具有耐低温、响应快、抗干扰能力强等优点。电容式湿度传感器恰好具备上述特点,并且制造成本较低,因此,成为探空仪用湿度传感器研究的重要方向之一。但由于电容式湿度传感器自身的结构特点,致使其在高湿环境中表面容易结露,从而使得测量误差增大,甚至造成传感器失效。目前国内外相关学者将研究重点倾向于优化传感器结构、改进湿敏材料等方面^[2]。欧美等发达国家在该领域的研究一直处于世界领先的地位,如奥地利 E+E 公司研制的高分子电容式湿度传感器,该传感器从感湿材料方面解决了低温湿度测量问题,其响应时间约为 $1.5 s$,分辨率约为 1% ,不确定度约为 5% ,能够在 $-80^{\circ}C$ 正常工作;芬兰维萨拉公司研发的 RS92 型探空仪从传感器结构和工作模式上解决了低温湿度的测量问题,其采用两片具有加热功能的湿度传感器交替工作,响应时间小于 $0.5 s$,分辨率约为 $1\%RH$,不确定度约为 5% ,是目前公认的高空湿度探测的标准^[3-4]。

近年来,我国在湿度传感器研制方面也取得了一定的成果^[5-7],但仍未有效解决低温环境下的湿度测量问题。目前普遍使用的探空仪仍采用电阻式湿度传感器^[8]。由于传感器自身材料的特点,其存在响应时间长、测量误差大、不易保存等缺点,其响应时间约为 $1.5 s$,分辨率约为 $5\%RH$,

不确定度约为 10% 。在探测精度要求较高时仍需依赖国外传感器。

探空仪属于一次性使用仪器,施放后不回收,目前我国年平均使用量较大,约为 16 万支,预计 2015 年将突破 30 万支。因此,在满足其性能指标的同时,还需要降低其成本。同时,高空气象探测数据属于国家机密,长期依赖国外产品将对国家安全造成潜在的危害。另外,高空气象探测是一个持续的科研探索过程,长期采用国外产品不利于开展我国高空气象探测事业。

针对以上问题,本文在原有的研究基础上^[9-12],提出了一种具有蛇形加热器的平板夹心电容式湿度传感器结构,并介绍了其工艺制备方法。通过有限元仿真分析,得到了湿度传感器加热过程中的热量分布,并得出环境温度、加热功率与加热温度的函数关系。最后,结合湿度传感器的特点,研究了一种基于电容充放电及比较法的湿度测量电路,消除了高空环境下湿度传感器与地间及引线间的寄生电容对测量结果的影响。

2 湿度传感器研制

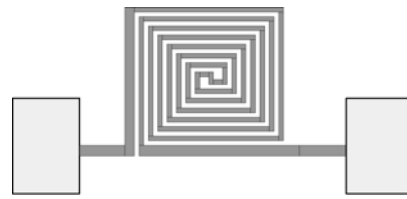
由于湿空气的饱和水蒸气含量与空气温度成正比。当空气温度较高时,空气中存在的水蒸气多;当空气温度较低时,空气中存在的水蒸气少,但即使含有很少的水蒸气也会产生结露。所以,即使湿空气自身未达到饱和状态,当湿度传感器表面温度低于湿空气的饱和温度时,物体表面的水蒸气也会凝结,产生结露。若能在不影响湿度传感器测量特性的情况下,将湿度传感器表面温度恒定在某一个温度范围内,使湿度传感器表面温度高于环境温度,那么就能避免湿度传感器表

面结露。基于上述考虑,本文研究了一种具有蛇形加热器的平板夹心电容式湿度传感器,通过在不同环境温度下控制加热器的加热功率,使湿度传感器的表面温度恒定在理想范围内,从而有效解决了湿度传感器高空环境下的结露问题。

聚酰亚胺在 $-200 \sim +260^{\circ}\text{C}$ 时具有优良的力学性能及介电性能、较好的尺寸稳定性、优秀的耐高温、耐低温、耐辐射、耐磨损性能,并且具有易于改性,加工形态多样性、合成多样性等特点。因此本文采用聚酰亚胺作为湿度传感器的感湿材料,通过对湿度传感器进行加热,使得聚酰亚胺感湿薄膜工作在恒定的温度条件下。

2.1 湿度传感器加热器结构分析及设计仿真

由于聚酰亚胺的感湿特性随温度变化而变化,所以要求湿度传感器在加热过程中的表面温度分布均匀,且加热面积需覆盖有效感湿区域,以便保证湿度传感器测量的稳定性和可靠性。本文采用铂金属制备蛇形加热器。为了得到最优的加热效果,设计了如图 1 所示的 4 种加热器结构,并将 4 种加热器加载到湿度传感器结构中,进行有限元仿真分析,包括湿度传感器热传递过程分析、衬底材料传热分析。



(d) 第四种加热器结构

(d) The fourth heater structure

图 1 4 种加热器结构

Fig. 1 Four kinds of heater structures

首先建立了湿度传感器的热传导模型,高空环境中湿度传感器热量主要以热传导、热对流及热辐射 3 种形式散失,分别表示为 Q_{Cond} 、 Q_{Conv} 、 Q_{Rad} ,其理论模型如图 2 所示。

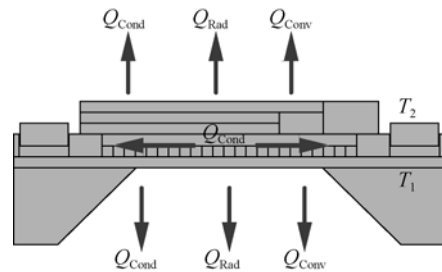


图 2 湿度传感器热传递理论模型

Fig. 2 Theory model of thermal transmission for humidity sensor

T_1, T_2 分别表示传感器内部温度及环境温度。从图 2 中可得出湿度传感器总热散失 Q 可由式(1)表示:

$$Q = Q_{\text{Cond}} + Q_{\text{Conv}} + Q_{\text{Rad}} \quad (1)$$

为了简化分析过程,将湿度传感器近似为一个规则的长方体,假设长方体面积为 S ,高度为 h ,如图 3 所示。



(a) 第一种加热器结构

(a) The first heater structure



(b) 第二种加热器结构

(b) The second heater structure



(c) 第三种加热器结构

(c) The third heater structure

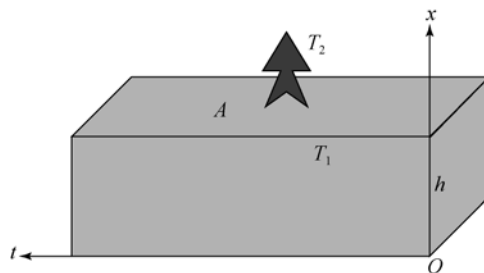


图 3 湿度传感器热传递简化模型

Fig. 3 Simplified model of thermal transmission for humidity sensor

那么湿度传感器热传导方程可由式(2)表示:

$$dQ_{\text{Cond}} = -\lambda S \frac{dt}{dx}, \quad (2)$$

其中: λ 为导热系数; dt/dx 为温度梯度向量,方向指向温度升高的方向。对上式中的 x 在 $0 \sim h$ 内做积分,可得:

$$Q_{\text{Cond}} \int_0^h dx = -\lambda S \int_{T_1}^{T_2} dx = \frac{\lambda S(T_1 - T_2)}{h}. \quad (3)$$

热对流实质是由于流体质点的宏观运动而引起的热量传递。热对流传热方程可表示为:

$$Q_{\text{Conv}} = \mu(T_1 - T_2), \quad (4)$$

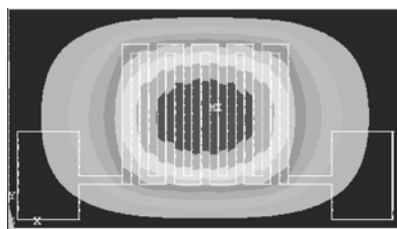
其中: μ 为空气对流系数,一般取 $10 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ 。

热辐射是指物体以电磁辐射的形式将热能向外散发的传热方式,这种传热方式不依赖于外界任何条件。根据斯特藩-玻耳兹曼定律(Stefan-Boltzmann Law)可知,热辐射传热方程可表示为:

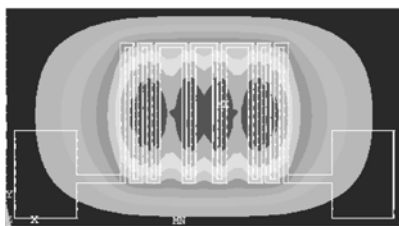
$$Q_{\text{Rad}} = 2S\sigma\epsilon(T_1^4 - T_2^4), \quad (5)$$

其中: S 为加热区面积; $\sigma = 5.67 \times 10^{-8} \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)$,为玻耳兹曼常数,为了简化分析过程,假设传感器为绝对黑体,那么 $\epsilon = 1$ 。

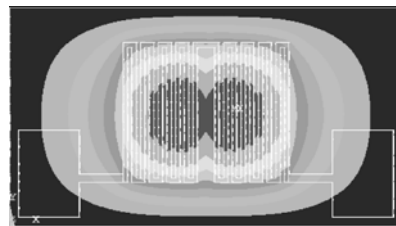
假设环境温度为 -70°C ,生热率为 $1.16 \times 10^{11} \text{ W}/\text{m}^3$,为了简化仿真过程,做出以下两个约定:忽略材料因温度、湿度改变引起的导热系数的变化;忽略传感器各层间的接触热阻。图 4(彩图见期刊电子版)为 4 种加热器加载相同边界条件、施加相同加热功率时的热仿真结果,红色部分是目标温度覆盖区域。



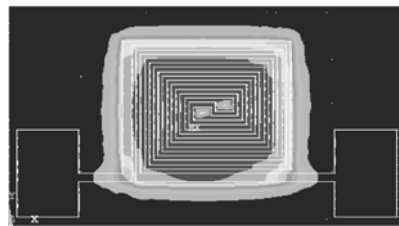
(a) 第一种加热器
(a) The first heater



(b) 第二种加热器
(b) The second heater



(c) 第三种加热器
(c) The third heater



(d) 第四种加热器
(d) The fourth heater

图 4 4 种加热器热仿真结果

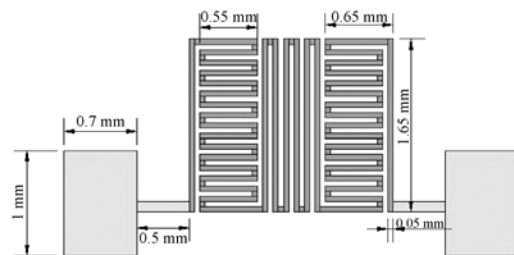
Fig. 4 Thermal simulation results for four kinds of heating electrodes

在以上 4 种结构基础上进行优化和改进,设计了如图 5(a)所示的加热器结构,图 5(b)为热仿真结果。

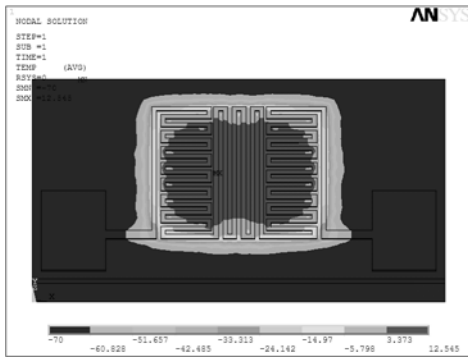
加热器总体积 $V \approx 2.9 \times 10^{-8} \text{ m}^3$ 。加热电极电阻可通过式(6)得到。其中: $\rho = 1 \times 10^{-3} \Omega \cdot \text{m}$,为铂电阻的电阻率; $L = 33.95 \times 10^{-3} \text{ mm}$,为加热电极的总长度; $S = 8.5 \times 10^{-7} \text{ m}^2$,为加热电极的横截面积。

$$R = \frac{\rho L}{S} = \frac{1 \times 10^{-3} \times 33.95 \times 10^{-3}}{8.5 \times 10^{-7}} \approx 40 \Omega. \quad (6)$$

从仿真结果可知,湿度传感器的最高温度约为 12.5°C ,湿度传感器有效感湿面的平均温度为 2°C 左右。温度分布均匀,目标温度覆盖了有效感湿面。



(a) 加热器结构
(a) Structure of heating electrode for humidity sensor

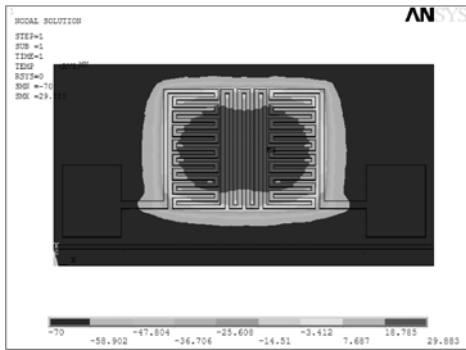


(b) 传感器表面热量分布

(b) Surface temperature distribution of sensor

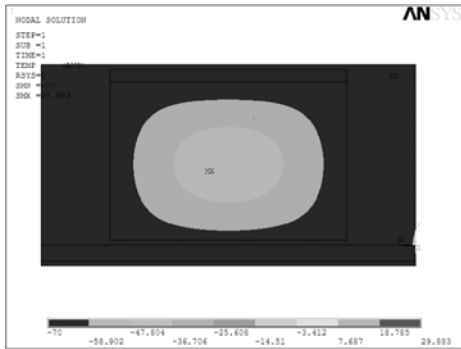
图 5 湿度传感器结构尺寸及热仿真结果

Fig. 5 Humidity sensor structure and thermal simulation results



(a) 衬底镂空后湿度传感器表面热量分布

(a) Surface temperature distribution of humidity sensor with hollow substrate



(b) 湿度传感器背面热量分布

(b) Temperature distribution for backside of sensor

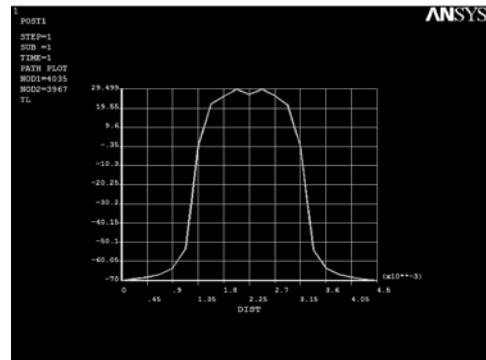
图 6 湿度传感器正面、背面热量分布

Fig. 6 Temperature distributions of humidity sensor

当采用腐蚀工艺进行硅衬底刻蚀时,生热率仍然为 $1.16 \times 10^{11} \text{ W/m}^3$,环境温度为 -70°C ,热仿真结果如图 6 所示。从仿真结果可以看出,湿度传感器中心的最高温度约为 $+30^\circ\text{C}$,湿度传感器有效感湿面的平均温度约为 $+20^\circ\text{C}$ 。进行硅衬

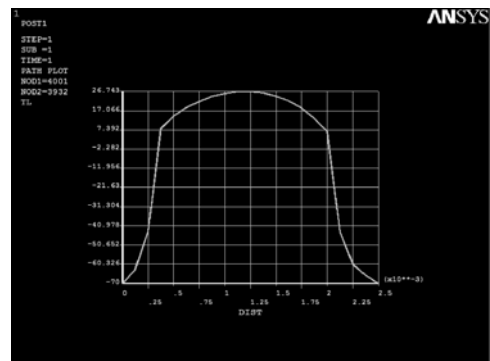
底刻蚀后,在相同的加热功率及环境温度下,湿度传感器温升更高了,从而提高了加热效率,降低了功耗。图 6(b)为传感器背面热仿真结果。从仿真结果可以看出,在硅衬底上方制备 SiO_2 不仅可以起到绝缘的效果,并且具有较好的隔热效果,湿度传感器背面最高温度约为 -47°C ,该结构有效降低了传感器的热量散失。

图 7(a)、7(b)为湿度传感器加热后表面温度横向、纵向分布曲线。从仿真结果可以得出,湿度传感器表面 $13.5\text{mm} \times 16.3\text{mm}$ 区域的平均温度约为 20°C ,该区域覆盖了湿度传感器的有效感湿面积。在高空低温环境下,温度变化为 $+35 \sim -90^\circ\text{C}$ 。通过测量环境温度,确定加热功率,可以使湿度传感器有效面积上的温度维持在 $+20^\circ\text{C}$ 左右,一方面,保证湿度传感器表面温度高于环境温度,避免湿度传感器结露;另一方面,静态实验结果表明,当湿度传感器表面温度维持在 $+20^\circ\text{C}$ 左右时,湿度传感器的测量特性最佳。



(a) 横向温度分布

(a) Transverse temperature distribution



(b) 纵向温度分布

(b) Vertical temperature distribution

图 7 湿度传感器表面温度分布曲线

Fig. 7 Surface temperature distributions of humidity sensor

进行热仿真分析时,环境温度选取为+10~-70℃,湿度传感器表面目标温度为+20℃,得到的加热功率与环境温度的关系如表 1。

表 1 加热功率与环境温度关系表

Tab.1 Relationship between ambient temperature and heat power

环境温度/℃	温升/℃	$Q/(W \cdot m^{-3})$	加热功率/W
+10	+10	0.235×10^{11}	6.781 5
0	+20	0.351×10^{11}	10.128 9
-10	+30	0.467×10^{11}	13.476 4
-20	+40	0.583×10^{11}	16.823 9
-30	+50	0.699×10^{11}	20.171 3
-40	+60	0.815×10^{11}	23.518 8
-50	+70	0.931×10^{11}	26.866 3
-60	+80	1.047×10^{11}	30.213 8
-70	+90	1.163×10^{11}	33.561 2

采用最小二乘法对以上数据进行曲线拟合,拟合方程如式(7)所示:

$$y = -0.0116x + 0.351 \quad (7)$$

2.2 湿度传感器工艺制备方法

采用 MEMS 工艺设计了湿度传感器,工艺步骤如下:(1)制备基底:传感器基底是厚度为 400 μm、晶向 100 的单晶硅,采用去离子水清洗传感器基底;(2)制备绝缘层:在氧化基底表面生成一层 500~800 nm 致密的 SiO₂ 作为第一层;(3)采用光刻工艺和磁控溅射的方法制备蛇形加热电极,靶材为 99.99% 的铂,靶材尺寸为 Φ60×2.5 mm;(4)采用射频溅射的方法制备 Al₂O₃ 保护层;(5)采用光刻工艺和磁控溅射方法制备下电极,靶材为 99.99% 的金,靶材尺寸为 Φ60×2.5 mm;(6)采用质量分数为 35%~40% 的氢氧化钾溶液对基底进行镂空,凹槽深度约为 350 μm;(7)采用匀胶工艺制备感湿层,制备的聚酰亚胺薄膜厚度约为 1 μm;(8)采用蒸发镀膜机制备多孔上电极。图 8 为湿度传感器结构及主要工艺步骤。

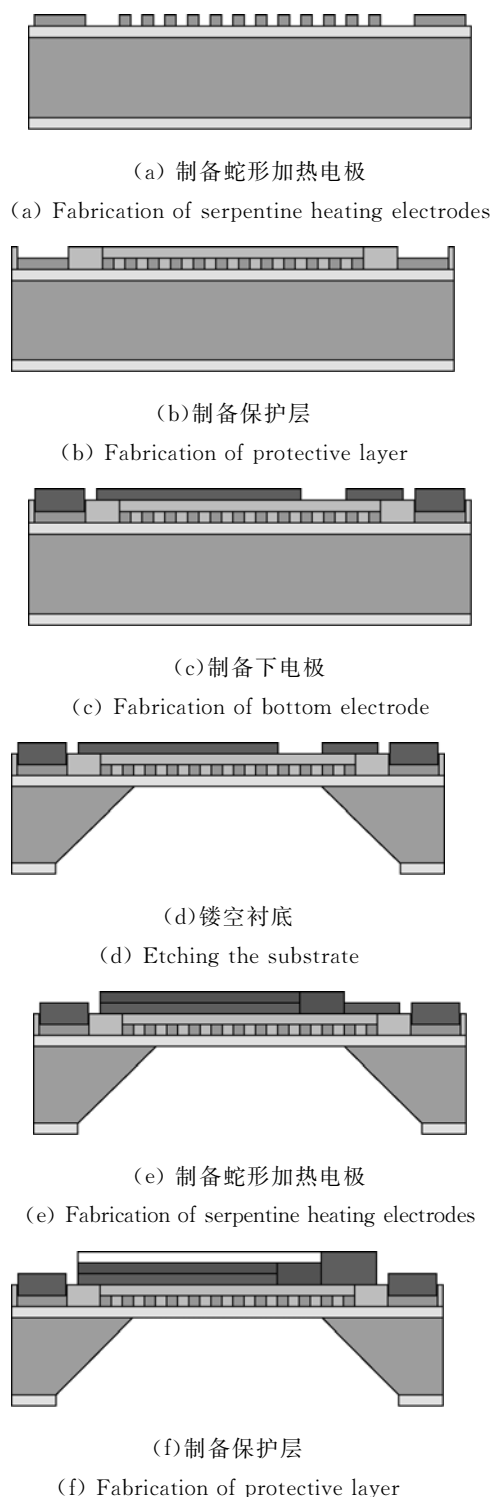
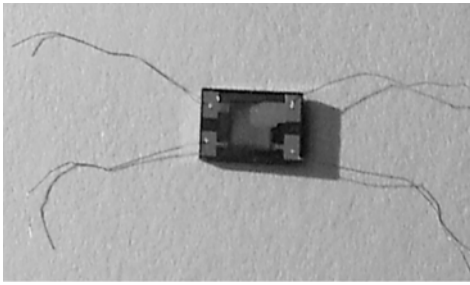


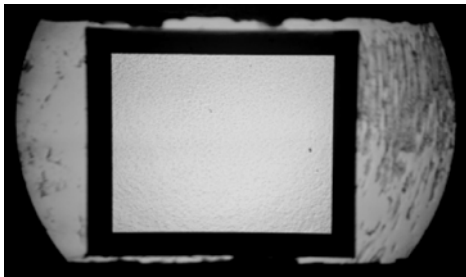
图 8 湿度传感器结构图

Fig.8 Structures of humidity sensor

图 9(a)为采用金丝球焊接工艺焊接湿度传感器引线,以便与电路板连接。图 9(b)为镂空后的湿度传感器基底。湿度传感器电容值约为 100~160 pF。



(a) 金丝球焊接工艺焊引线
(a) Welding wires for gold ball



(b) 基底镂空后实物图
(b) Physical map of hollow substrate

图 9 传感器实物图

Fig. 9 Physical maps of sensor

3 湿度传感器电容测量方法

当高空湿度发生变化时,湿度传感器的电容值随之发生变化,如果能够精确得到湿度传感器电容值的变化情况,就能够得到高空环境湿度的变化趋势。在大多数情况下,电容式湿度传感器可以被认为是一个纯电容,但在高温、低温、高湿条件下工作时,湿度传感器的电容损耗不能忽略,当在高频下工作时,电感效应也不能忽略。因此,考虑湿度传感器的损耗和电感效应时,湿度传感器不能认为是一个纯电容^[13-14],等效电路如图 10 所示。

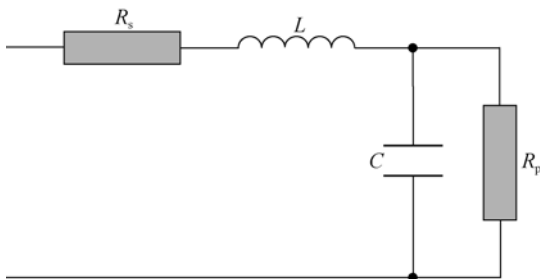


图 10 湿度传感器的等效电路图

Fig. 10 Equivalent circuit of humidity sensor

图中 R_s 为电路板引线以及极板间的电阻损耗,其值随着工作频率的增高逐步变大, R_s 通常很小,即使工作频率在兆赫兹以上时也很小,所以只有当工作频率极高时才需要考虑 R_s 对测量结果的影响; L 为湿度传感器自身的电感和外部引线的等效电感,自身的电感与其结构形式有关,外部引线等效电感则与引线长度有关,引线越短,电感越小; R_p 为并联损耗电阻,包括极板间的介质损耗和漏电损耗,当湿度传感器工作在低频时,其损耗较大,随着工作频率的增高逐渐变小。湿度传感器电容总损耗系数可由式(8)表示:

$$D = \frac{1}{R_p \omega C} + R_s \omega C, \quad (8)$$

其中: ω 为圆频率。从图 10 可知,湿度传感器电容的等效电路存在谐振频率,但湿度传感器处于谐振频率时将不能正常工作,故设计电路时需避开谐振频率。由式(8)可知,第一项随着谐振频率的升高而降低,第二项随着谐振频率的升高而增大,所以存在最优频率 f_b 使总损耗系数 D 最小,可以通过对式(8)求最小值得到 f_b ,如式(9)所示:

$$f_b = \frac{1}{2\pi C \sqrt{R_p R_s}}, \quad (9)$$

那么湿度传感器的有效电容 C_e 可由式(10)表示:

$$\frac{1}{j\omega C_e} = j\omega L + \frac{1}{j\omega C}, \quad (10)$$

湿度传感器电容的实际变化量可由式(11)表示:

$$\frac{\Delta C_e}{C_e} = \frac{\Delta C/C}{1 - \omega^2 LC}. \quad (11)$$

上式表明,湿度传感器自身的电感和外部引线的等效电感对湿度传感器电容值具有一定影响,而且湿度传感器与地间的寄生电容及与引线间的寄生电容在低温环境下随温度的变化而变化。

针对上述问题,结合高空气象探测业务对湿度测量的要求,本文研究了一种基于电容充放电及比较法的湿度测量电路,如图 11 所示。其中 C_m 为湿度传感器, C_s 为标准电容, R_p 为模拟开关导通电阻及引线电阻。由于湿度传感器与标准电容在同一测量回路,且湿度传感器与标准电容的另一端与地连接,湿度传感器及标准电容的接线寄生电容及与地之间的寄生电容可用 C_p 表示。

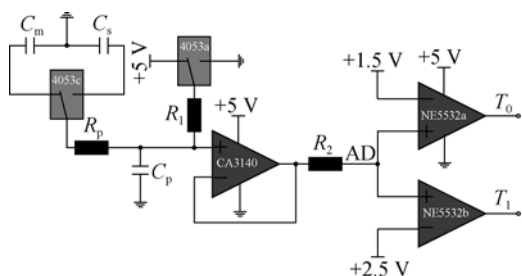


图 11 湿度测量电路

Fig. 11 Humidity measurement circuit

对标准电容及湿度传感器在相同情况下分别进行充放电,电容的充放电曲线如图 12 所示。

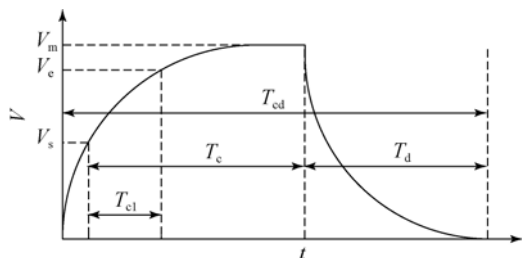


图 12 电容充放电曲线

Fig. 12 Capacitor discharging and charging curves

图中: T_c 为充电时间; T_d 为放电时间; V_m 为充电饱和电压。假设标准电容从电压为 V_s , 充电至 V_e 所需的时间为 T_{sc} , 湿度传感器从电压为 V_s , 充电至 V_e 所需的时间为 T_{mc} , 则标准电容的电容值为 C_s , 那么:

$$K_1 C_m = T_{mc} \times \frac{K_2 C_s}{T_{sc}} \quad (12)$$

K_1 为考虑模拟开关及引线电阻、寄生电容对湿度传感器电容值的影响, K_2 为考虑模拟开关及引线电阻、寄生电容对标准电容值的影响, 由于湿度传感器与标准电容在同一回路, $K_1 = K_2$, 那么被测电容 C_m 可由式(13)得到:

$$C_m = T_{mc} \times \frac{C_s}{T_{sc}} \quad (13)$$

该方法具有很好的温度稳定性, 能够有效抑制温度漂移和零点漂移, 从而减小了寄生电容对测量结果的影响。需要注意的是: 考虑到分布电容及漏电流的影响, 充电过程中电压不能选择 0 V 至满量程区间; 由于湿度传感器电容值为 100 ~ 160 pF, 电容值较小, 因此, 需合理调整充电时间常数, 充电时间不易过长也不易过短; 在保证较

高的测量精度的同时缩短测量时间; 充电电流不易过大, 避免击穿湿度传感器; 需选择具有高精度、较好的温度特性、高可靠性及稳定性的电容作为标准电容; 充电电路中的运算放大器需具有较高的输入阻抗, 较低的漏电流。

4 地面试验与结果讨论

4.1 常温特性测试

采用双压法湿度发生器进行了湿度测量静态实验。湿度传感器可在 0% RH ~ 100% RH 下工作, 根据测试点选取原则及样本空间大小选取原则, 选取了 10% RH, 30% RH, 50% RH, 70% RH, 90% RH 5 个测试点, 环境温度为 +30°C, 在每个湿度点稳定 20 min, 使相对湿度从 10% RH 上升至 90% RH, 并记录数据。实验结果如图 13 所示。

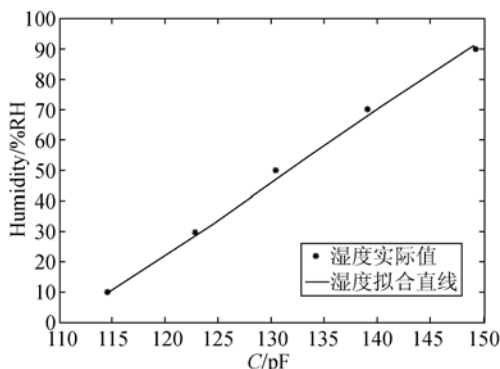


图 13 +30°C 环境下湿度测量性能测试

Fig. 13 Humidity measurement performance test under +30°C

拟合曲线表达式如式(14)所示:

$$y = 2.336x - 256.553 \quad (14)$$

从实验结果中可得出, 确定系数为 0.996 3 时, 湿度测量结果具有较好的线性度, 此时, 灵敏度为 2.336% RH · pF⁻¹; 标准差 $\sigma = 1.917$; 电容测量分辨力为 0.1 pF; 湿度测量分辨力约为 0.2% RH。为了得到湿度测量的迟滞及重复性, 对湿度上升及下降段进行连续测试, 实验结果如图 14 所示。

测试温度为 +30°C, 湿度在 10% RH ~ 90% RH 间变化, 选取了 10, 30, 50, 70, 90% RH 5 个测试点。根据实验结果可知, 湿度在上升过程与

下降过程曲线的最大差值 $\Delta H_M \approx 0.7\%RH$; 满量程输出 $Y_{FS} = 100\%RH$; 测量迟滞约为 $0.7\%F \cdot S$; 重复性约为 1.9% ; 迟滞不确定度 $U_H \approx 0.35\%$; 线性不确定度 $U_L = 3\%$; 重复性不确定度 $U_r \approx 1.9\%$; 那么总不确定度 $U \approx 4\%$ 。

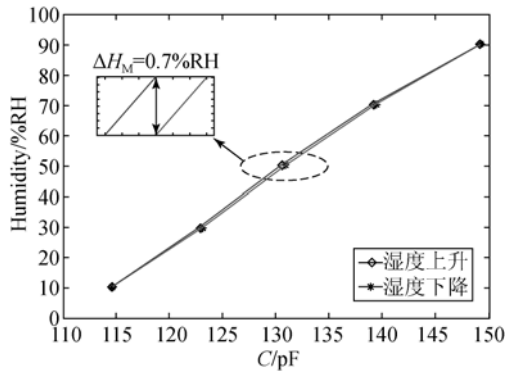
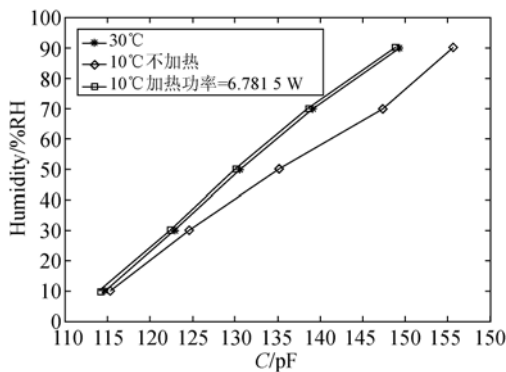


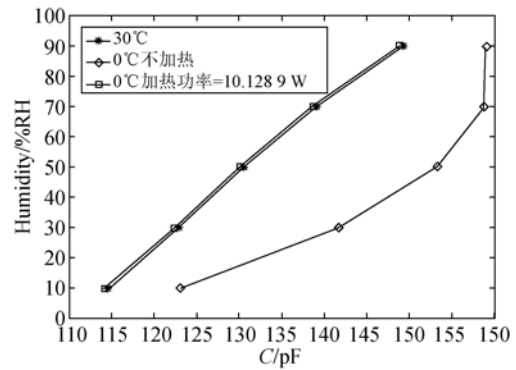
图 14 湿度上升与下降测量特性
Fig. 14 Performance test curves at humidity rising and dropping

4.2 温度交变特性测试

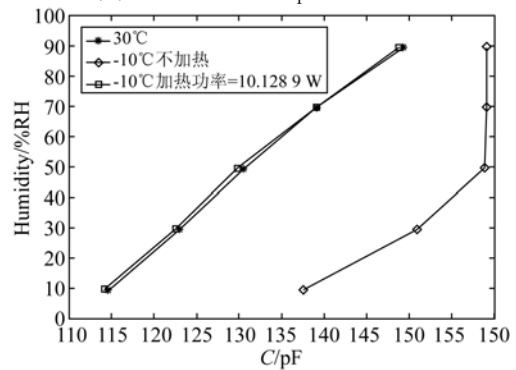
在不对湿度传感器进行加热控制的情况下, 分别于 $-10^\circ C, 0^\circ C, +10^\circ C, +20^\circ C, +30^\circ C$ 温度下进行静态实验。通过控制湿度传感器的加热功率, 使得传感器表面温度在不同环境温度条件下都维持在 $+20^\circ C \sim +30^\circ C$, 从而保证湿度传感器具有较好的测量特性, 避免湿度传感器表面结露。加热功率参照表 1 数据进行控制。实验结果如图 15 所示。从测试结果可知, 当湿度传感器在低温环境下工作时, 通过对湿度传感器加热, 使其表面温度高于环境温度, 其测量特性可以得到明显改善, 从而避免了传感器结露的现象。



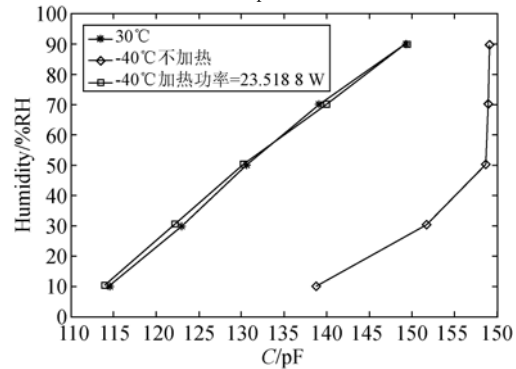
(a) 环境温度为 $+10^\circ C$
(a) At ambient temperature of $+10^\circ C$



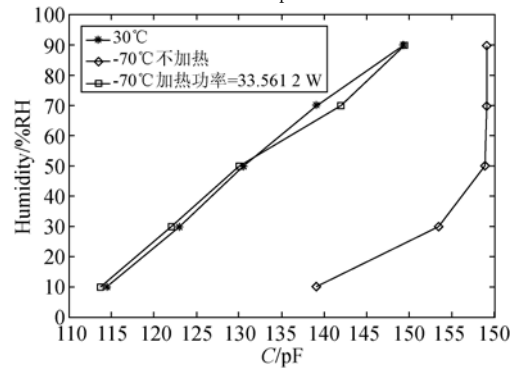
(b) 环境温度为 $0^\circ C$
(b) At ambient temperature of $0^\circ C$



(c) 环境温度为 $-10^\circ C$
(c) At ambient temperature of $-10^\circ C$



(d) 环境温度为 $-40^\circ C$
(d) At ambient temperature of $-40^\circ C$



(e) 环境温度 $-70^\circ C$
(e) At ambient temperature of $-70^\circ C$

图 15 不同温度条件下加热湿度传感器湿度测量特性
Fig. 15 Performance of humidity test under different temperatures

当湿度传感器分别在 $+10^{\circ}\text{C}$, 0°C , -10°C , -40°C , -70°C 温度环境下工作时,对湿度传感器进行加热后,其灵敏度、平均误差、迟滞、重复性如表 2 所示。

表 2 不同温度下加热湿度传感器测量特性

Tab. 2 Performance of humidity test under different temperatures

工作温度/ $^{\circ}\text{C}$	灵敏度 $\% \text{RH} \cdot \text{pF}^{-1}$	平均 误差/ $\% \text{RH}$	迟滞 $\% \text{F} \cdot \text{S}$	重复性 $\% \text{RH}$
+10	2.338	1.12	1.16	1.94
0	2.322	0.74	0.93	1.93
-10	2.327	0.79	1.40	1.89
-40	2.261	1.13	1.96	1.55
-70	2.182	1.40	1.98	2.60

4.3 时间常数测试

将自制的密封舱置于湿度发生器中,湿度传感器安装在密封舱内,通过电缆将湿度传感器的信号引出,通过控制密封舱内与密封盖连接的气缸的上下运动,可以打开或关闭密封舱。设定湿度发生器的温度为 $+30^{\circ}\text{C}$,打开密封舱盖,设定湿度发生器初始湿度 $H_0 = 30\%$,待湿度稳定后,关闭密封舱;设定湿度发生器的湿度 $H_1 = 70\%$,待湿度稳定后,打开密封舱,同时每 0.05 s 记录一次湿度值。假设某时刻 t_n 湿度传感器测得的湿度值 H_n 满足式(15),那么 t_n 便是湿度传感器的时间常数^[15-16]。

$$\frac{H_1 - H_n}{H_1 - H_0} = 63.2\% \quad (15)$$

参考文献:

- [1] TETELIN A, POUGET V, LACHAUD J L, et al.. Dynamic behavior of a chemical sensor for humidity level measurement in human breath [J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2004, 53(4): 1262-1267.
- [2] FEI T, ZHAO H R, JIANG K, et al.. Polymeric humidity sensors with nonlinear response: Properties and mechanism investigation [J]. *Journal of Applied Polymer Science*, 2013, 130(3): 2056-2061.
- [3] VOMEL H, SELKIRK H, MILOSHEVICH L, et

图 16 为湿度传感器的时间常数测试结果。从测试结果中可知,湿度传感器的时间常数约为 0.5 s ,与国外先进的 RS92 型探空仪湿度传感器时间常数相同,优于目前国内正在使用的 GTS1 型探空仪湿度传感器。

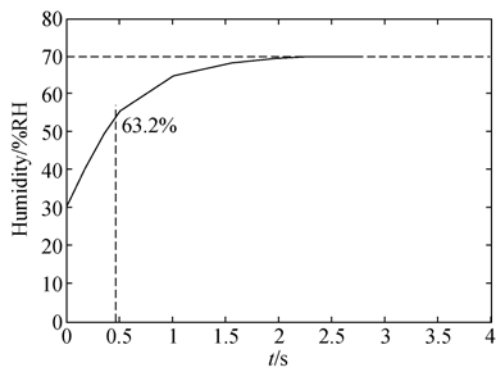


图 16 湿度传感器时间常数测试结果

Fig. 16 Time constant test results of humidity sensor

5 结 论

本文提出了一种具有蛇形加热器的平板夹心电容式湿度传感器结构及工艺制备方法,设计了测量电路,进行了地面特性实验。实验结果表明,设计的湿度传感器的灵敏度约为 $2.3\% \text{ RH} \cdot \text{pF}^{-1}$;迟滞约为 $0.7\% \text{ F} \cdot \text{S}$;重复性约为 1.9% ;测量总不确定度约为 4% ;时间常数约为 0.5 s 。通过对传感器进行加热,使得湿度传感器在低温环境下能够保证稳定测量,从而验证了该方法的科学性与有效性。本文的研究工作将为下一步工程化应用奠定技术基础。

al.. Radiation dry bias of the Vaisala RS92 humidity sensor [J]. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 2007, 24(6): 953-963.

- [4] AJIL K, STEFAN A B, VIJU O J. On the importance of vaisala RS92 radiosonde humidity corrections for a better agreement between measured and modeled satellite radiances [J]. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 2012, 29(2): 248-259.
- [5] ZHAO CH L, QIN M, HUANG Q A. A fully packaged CMOS interdigital capacitive humidity sensor with polysilicon heaters [J]. *IEEE Sensors*

- Journal*, 2011, 11(11), 2986-2993.
- [6] 宁德亮, 阎昌琪, 高璞珍. 新型电容式蒸汽湿度传感器及提高测量精度的方法[J]. *仪器仪表学报*, 2006, 27(6 增刊): 329-330.
NING D L, YAN CH Q, GAO P ZH. Novel capacitance sensor for measuring wetness of wet steam and methods for improving measure precision [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2006, 27(6supp.): 329-330. (in Chinese)
- [7] 赵振刚, 刘晓为, 王鑫, 等. 基于 555 多谐振荡器检测的碳纳米管湿敏传感器[J]. *光学 精密工程*, 2011, 19(1): 118-123.
ZHAO ZH G, LIU X W, WANG X, *et al.*. Carbon nanotube sensors based on 555 multivibrators [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2011, 19(1): 118-123. (in Chinese)
- [8] 李伟, 邢毅, 马舒庆. 国产 GTS1 探空仪与 VAISALA 公司 RS92 探空仪对比分析[J]. *气象*, 2009, 35(10): 97-102.
LI W, XING Y, MA SH Q. The analysis and comparison between GTS1 radiosonde made in China and RS92 radiosonde of vaisala company [J]. *Meteorological Monthly*, 2009, 35(10): 97-102. (in Chinese)
- [9] SHI Y B, LUO Y, ZHAO W J, *et al.*. A radiosonde using a humidity sensor array with a platinum resistance heater and multi-sensor data fusion [J]. *Sensors*, 2013, 13: 8977-8996.
- [10] 赵文杰, 施云波, 罗毅, 等. 一种 AlN 基热隔离 MEMS 阵列风速传感器设计[J]. *仪器仪表学报*, 2012, 27(6): 2819-2824.
ZHAO W J, SHI Y B, LUO Y, *et al.*. Design of the wind velocity sensor based on the AlN thermal isolation MEMS arrays [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2012, 27(6): 2819-2824. (in Chinese)
- [11] LUO Y, SHI Y B, SHANG CH X, *et al.*. Research of high altitude meteorological detection system based on GPRS/GPS [J]. *International Journal of Advancements in Computing Technology(IJACT)*, 2012, 22(4): 616-624.
- [12] 罗毅, 施云波, 渠立亮, 等. 谐波分析及交流比较的高空温度探测方法研究[J]. *仪器仪表学报*, 2014, 35(4): 721-729.
LUO Y, SHI Y B, QU L L, *et al.*. Research of atmosphere aloft temperature probing based on harmonic analysis and AC comparison methods [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2014, 35(4): 1-9. (in Chinese)
- [13] HIMANSHU J, KALPESH V, MATTHEWS T. Dual-phase charge-based capacitance measurement technique [J]. *48th Midwest Symposium on Circuits and Systems*, 2005, 2: 1000-1002.
- [14] MIYAKE Y, GOTOM. Benefit of Direct Charge Measurement (DCM) on interconnect capacitance measurement [J]. *IEEE International Conference on Microelectronic Test Structures*, 2009, ICMTS 2009, 2009: 211-215.
- [15] 刘向阳, 张平, 韩振海, 等. 压电传感器时间常数辨识方法研究[J]. *仪器仪表学报*, 2006, 28(4): 1167-1168.
LIU X Y, ZHANG P, HAN ZH H, *et al.*. Research on the identification algorithm for time constant of piezoelectric sensor [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2006, 28(4): 1167-1168. (in Chinese)
- [16] 吕菁华, 管玉国. 气敏元件测量电路的优化设计[J]. *哈尔滨工业大学学报*, 2002, 34(4): 531-534.
LV J H, GUAN Y G. Optimum design of measuring circuit for gas sensor [J]. *Journal of Harbin Institute of Technology*, 2002, 34(4): 531-534. (in Chinese)

作者简介:



罗毅(1986—),男,云南通海人,博士,讲师,2009年、2012年、2014年于哈尔滨理工大学分别获得学士、硕士、博士学位,主要研究方向为 MEMS 传感器及微系统、智能检测与控制、微弱信号拾取。E-mail: luoyi861030@163.com



施云波(1966—),男,吉林人,教授,博士生导师,1987年于天津大学获得学士学位,2002年于福州大学获得硕士学位,2008年于哈尔滨理工大学获得博士学位,现为哈尔滨理工大学测控技术与通信工程学院系主任,主要研究方向为 MEMS 传感器及微系统,测试和系统集成技术。E-mail: shiyunbo@hrbust.com